

**Weiterführende
Untersuchungen
zur deterministischen
Bewertung
naturbedingter
Einwirkungen von außen
auf Kernkraftwerke**

**Weiterführende
Untersuchungen
zur deterministischen
Bewertung
naturbedingter
Einwirkungen von außen
auf Kernkraftwerke**

Verónica Campo-Arnaiz
Manuela Jopen
Christian Strack

September 2018

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) im Rahmen des FE-Vorhabens 3613R01368 erstellt worden.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

Deskriptoren:

biologische Einwirkungen, Einwirkungen von außen, naturbedingte Einwirkungen, Eishochwasser, Hochwasser, Starkregen, Umgebungstemperaturen

Kurzfassung

Die hier dargestellten Untersuchungen führen die im Vorhaben 3609R01350 begonnenen Untersuchungen der naturbedingten Einwirkungen von außen auf Kernkraftwerke fort. Dabei werden im vorliegenden Bericht die möglichen Auswirkungen extremer Niederschläge, die sicherheitstechnische Relevanz von Eishochwassern, die Auswirkungen hoher und tiefer Temperaturen, die Auswirkungen biologischer Einflüsse sowie die sicherheitstechnische Bedeutung von Kombinationen von Einwirkungen von außen betrachtet.

Die Untersuchungen zu **lokalen Niederschlägen** auf dem Anlagengelände führen zu der Empfehlung, dass bestehende Gefährdungsanalysen zu größeren Wiederkehrperioden hin erweitert werden sollten. Bisherige Gefährdungsanalysen berücksichtigen nur kleine Wiederkehrperioden bis zu 100 Jahren. Ein mögliches Verfahren zur Ableitung seltenerer Starkregenereignisse mit größeren Wiederkehrperioden wurde in diesem Vorhaben entwickelt. Ferner wurden die möglichen Auswirkungen solcher Starkregenereignisse untersucht und Empfehlungen zum Schutz gegen solche Ereignisse abgeleitet.

Hinsichtlich des abdeckenden **Hochwasserabflusses** wurde eine vereinfachte Methode zur Abschätzung entwickelt und auf vorhandene Daten von Niederschlägen und Pegelabflüssen angewendet. Die Ergebnisse führen zu einem wesentlich höheren abdeckenden Abfluss am betrachteten Pegel als bisherige Untersuchungen mittels Extremwertstatistik. Allerdings führt eine Diskussion der großen Unsicherheiten und bestehenden intrinsischen Probleme mit dieser Methode dazu, dass eine Anwendung des Modells nicht empfohlen werden kann.

Hinsichtlich der **sicherheitstechnischen Bedeutung von Eishochwasser** ergeben sich keine neuen Erkenntnisse bezüglich ihrer Vorhersagbarkeit und der standortbezogenen Gefährdungsermittlung. Dies erscheint nach wie vor nur mit geringer Verlässlichkeit möglich. Die weiteren Untersuchungen zeigen, dass die Anlagen den Schutz gegen Eishochwasser vor allem durch administrative Maßnahmen verbessern können. Zudem besteht nach Einschätzung der RSK eine deutliche Robustheit gegen die Einwirkung „Hochwasser“ auf Grund der großen Freiborde und gegen den Eintrag von Eis in den Vorfluter als möglichen sekundären Effekt eines Eishochwassers.

Hinsichtlich **hoher und tiefer Umgebungstemperaturen** kommt der vorliegende Bericht zu dem Ergebnis, dass Verfahren der Extremwertstatistik auf Hitze- bzw. Kältewellen angewandt werden können. In der Literatur wird eine Vielzahl von Methoden zur Extrapolation auf Extremwerte verwendet. Eine Methode mit klar überlegenen Eigenschaften oder mit tiefergehender theoretischer Begründung existiert jedoch derzeit nicht. Die Untersuchungen zeigen, dass es in Bezug auf hohe und tiefe Temperaturen nicht ausreicht, nur auf einmalige Tagesmaximalwerte abzuheben, sondern dass auch die Dauer von Hitzewellen eine Rolle spielt. Daher ist im Sinne einer Standortgefährdungsanalyse eine Schar von Ereignissen zu ermitteln. Neue Hinweise auf eine zusätzliche Gefährdung der Anlagen ergaben sich nicht. Auch die RSK kommt zu dem Ergebnis, dass Phänomene ausgelöst durch hohe und tiefe Temperaturen entweder abgedeckt sind oder zumindest eine deutliche Robustheit plausibel ist.

Hinsichtlich der **Auswirkungen biologischer Einflüsse** ergeben sich keine neuen Erkenntnisse bezüglich ihrer Vorhersagbarkeit und der standortbezogenen Gefährdungsermittlung. Dies erscheint nach wie vor nicht verlässlich möglich. Die Anlagen können den Schutz gegen biologische Einwirkungen vor allem durch administrative Maßnahmen verbessern. Technische Maßnahmen dazu sind in den Anlagen nach Kenntnis der GRS weitgehend umgesetzt.

Hinsichtlich der **Kombinationen von naturbedingten Einwirkungen** ergeben sich keine neuen Erkenntnisse in Bezug auf die Gefährdungsermittlung. Es existiert bisher kein deterministischer Ansatz zur systematischen Gefährdungsermittlung durch Kombinationen von Einwirkungen. Bislang wurden diese nur vereinzelt betrachtet und nicht in systematischer Weise erfasst und bewertet. Die Auswertung der Betriebserfahrung zeigt, dass Kombinationen von Einwirkungen zu schwerwiegenden Störungen in den Anlagen führen können oder zumindest das Potenzial dazu haben. Dies kann auch bei Stärken von Einzeleinwirkungen passieren, die unterhalb der Auslegungswerte liegen. Ergebnis dieses Vorhabens ist, dass eine umfassende und systematische deterministische und generische Erfassung und Bewertung nicht möglich erscheint, da schon die zu erfassenden gleichzeitig oder mit Zeitverzug wirkenden Einwirkungen von außen nicht ausreichend genau bestimmbar sind. Eine systematische Erfassung von Einwirkungskombinationen und deren Auswirkungen kann aus Sicht der GRS nur standortspezifisch im Rahmen von probabilistischen Gefährdungsanalysen und probabilistischen Sicherheitsanalysen erfolgen. Grundsätzlich jedoch kann der Schutz der Anlagen durch eine robuste Auslegung der Anlagen gegen die entsprechenden Einzeleinwirkungen erreicht werden.

Abstract

The investigations on natural hazards described in this report extend the previous investigations of the project 3609R01350 to natural hazards previously not considered. This report considers the possible impacts of extreme precipitation, the safety-relevance of ice floods, the impacts of high and low temperatures, the impacts of biological phenomena as well as the safety-relevance of combinations of natural hazards.

Concerning the impacts of **local precipitation**, it is recommended that the existing analyses are extended to longer recurrence periods. Existing analyses are only concerned with recurrence periods up to 100 years. A method to derive local precipitation events with higher return periods was developed in this project. Furthermore, possible impacts of such events were investigated and recommendations to protect against such events were derived.

Concerning the simplified estimation of a bounding **river-runoff** caused by heavy precipitation in the watershed of the river, a method of estimation was developed and applied to precipitation data and gauge measurements. This results in significant higher runoff at the gauge under consideration compared to estimations by extreme value analysis. However, it is not recommended to apply this method. This is based on a discussion of the large uncertainties and the intrinsic problems of the developed method.

Concerning the **safety-relevance of ice floods**, there are no new insights with respect to the ability to predict as to where ice floods can occur and how a realistic hazard assessment can be performed. The reliability of the existing methods remains low. Further investigations show that the plants can enhance the protection mainly by administrative measures. Technical measures are already widely applied. In addition, an assessment by the RSK shows a significant robustness against the impacts of floods and also against the intrusion of ice into the intake structure as secondary effect of an ice flood.

Concerning the **impacts of high and low temperatures**, this report concludes that the methods of extreme value statistics can be applied to heat- and cold-waves. The literature study shows that a multitude of methods are applied to extrapolate to extreme values. However, a method with clearly superior characteristics or with underlying theoretical justification currently does not exist. Furthermore, the investigations in this report concerning the time spans of heatwaves show that it is not sufficient to derive only daily

maximum values. Instead a multitude of characteristic heat- and cold-waves with different time spans must be derived. New insights concerning additional hazards for the plant were not gained. The result of an additional RSK investigation is that phenomena resulting from heat- and cold-waves are either covered or a significant robustness of the plants is at least plausible.

Concerning the **impacts of biological phenomena**, there are no new insights with respect to the ability to predict them and the site-specific hazard assessment. A reliable quantitative assessment still seems not possible. Further investigations show that the plants can enhance the protection mainly by administrative measures. Technical measures to protect the plants against the impacts of biological phenomena are to the knowledge of the GRS already applied.

Concerning **the impacts of combinations of natural hazards**, there are no new insights with respect to the hazard assessment. Currently, no systematic deterministic approach for hazard assessment of combinations of natural hazards exists. Up to now combinations were only sporadically considered but not derived and assessed in a systematic way. The investigation on the operational experience shows that combinations of natural hazards can lead to severe impacts on the plant safety or have at least the potential to do so. This can occur even with the contributing single events are below the design values. This report concludes that a comprehensive, systematic and generic deterministic compilation and assessment of combinations of natural hazards is currently not feasible. GRS concludes that a systematic compilation of hazard combinations must be site-specific and probabilistic rather than generic and deterministic. One generic result is that the protection of the plant against combinations can be achieved if the robustness of the design against single events is enhanced.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| | Kurzfassung..... | I |
| | Abstract..... | III |
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Lokale Starkregen..... | 5 |
| 2.1 | Darstellung der Einwirkung „Lokale Starkregen“ | 5 |
| 2.1.1 | Grundlagen..... | 5 |
| 2.1.2 | Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch lokale Starkregen | 5 |
| 2.1.3 | Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland | 6 |
| 2.2 | Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu lokalen Starkregen | 6 |
| 2.2.1 | Betriebserfahrung im Inland..... | 6 |
| 2.2.2 | Betriebserfahrung im Ausland..... | 7 |
| 2.3 | Maßnahmen in Deutschland | 8 |
| 2.4 | Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung | 9 |
| 2.5 | Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse..... | 10 |
| 2.6 | Ergebnisse und Bewertung..... | 17 |
| 3 | Hochwasser | 21 |
| 3.1 | Beschreibung des Vorhabens | 21 |
| 3.1.1 | Vorarbeiten und Zielsetzung | 21 |
| 3.1.2 | Vorgehensweise zur Bestimmung der PMF | 22 |
| 3.1.3 | Datengrundlage und Urheberrechte..... | 26 |
| 3.1.4 | Abschätzung eines Hochwasserabflusses mittels Faustformel | 26 |
| 3.2 | Einzugsgebiet..... | 27 |
| 3.2.1 | Beschreibung des Einzugsgebiets | 27 |
| 3.2.2 | Einteilung des Einzugsgebiets in Teileinzugsgebiete | 29 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3 | Ermittlung der Gesamtniederschläge eines Gebiets | 32 |
| 3.3.1 | Daten..... | 32 |
| 3.3.2 | Korrelationen zwischen Wetterstationen..... | 32 |
| 3.3.3 | Flächengewichteter Niederschlag..... | 33 |
| 3.3.4 | Ermittlung eines abdeckenden Niederschlagsereignisses..... | 35 |
| 3.4 | Abflussmodell | 38 |
| 3.4.1 | Generelles Vorgehen..... | 38 |
| 3.4.2 | Reduzierte Abflüsse..... | 39 |
| 3.4.3 | Angesetzte Laufzeiten der Hochwasserwelle | 39 |
| 3.4.4 | Hochwasserereignisse und zugehörige Niederschläge..... | 40 |
| 3.4.5 | Kumulierte Niederschläge und Abflüsse | 40 |
| 3.4.6 | Modellbildung | 41 |
| 3.4.7 | Anzahl der Parameter | 41 |
| 3.5 | Ergebnisse..... | 42 |
| 3.5.1 | Fits an die Hochwasserereignisse | 42 |
| 3.5.2 | Extrapolation der Fitparameter zu hohen Niederschlägen..... | 44 |
| 3.5.3 | Abdeckendes Hochwasserereignis | 47 |
| 3.6 | Diskussion zu den Ergebnissen und Schwächen des Modells | 53 |
| 4 | Eishochwasser | 55 |
| 4.1 | Darstellung der Einwirkung „Eishochwasser“ | 55 |
| 4.1.1 | Grundlagen..... | 55 |
| 4.1.2 | Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland..... | 59 |
| 4.1.3 | Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland | 60 |
| 4.2 | Nationale und internationale Betriebserfahrung | 62 |
| 4.2.1 | National | 62 |
| 4.2.2 | International..... | 62 |
| 4.3 | Vorhersage von Eisständen..... | 62 |
| 4.4 | Maßnahmen gegen Eisstau und dessen Auswirkungen..... | 64 |
| 4.5 | Einschätzung der Durchführbarkeit und Wirksamkeit dieser Maßnahmen | 65 |
| 4.6 | Ergebnisse und Bewertung..... | 66 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5 | Hohe und niedrige Temperaturen..... | 71 |
| 5.1 | Darstellung der Einwirkung „Hohe und niedrige Temperaturen“ | 71 |
| 5.1.1 | Grundlagen..... | 71 |
| 5.1.2 | Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch hohe und tiefe Temperaturen | 73 |
| 5.1.3 | Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland | 74 |
| 5.2 | Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu hohen und tiefen Temperaturen..... | 75 |
| 5.2.1 | Nationale Betriebserfahrung | 75 |
| 5.2.2 | Internationale Betriebserfahrung | 80 |
| 5.2.3 | Vergleich der nationalen und internationalen Betriebserfahrung | 84 |
| 5.3 | Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung | 85 |
| 5.4 | Diskussion zur Ermittlung der Standortgefährdung | 85 |
| 5.4.1 | Ermittlung von Maximal- und Minimaltemperatur | 87 |
| 5.4.2 | Ermittlung der anzusetzenden Dauer von Hitze- und Kältewellen | 91 |
| 5.4.3 | Ermittlung der Kälte- bzw. Wärmesummen für verschiedene Zeiträume .. | 94 |
| 5.4.4 | Ermittlung eines Ereignisspektrums mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode | 94 |
| 5.5 | Einfluss langfristig niedriger Umgebungstemperaturen | 95 |
| 5.6 | Einfluss langfristig hoher Umgebungstemperaturen..... | 96 |
| 5.7 | Ergebnisse und Bewertung..... | 98 |
| 6 | Biologische Einwirkungen | 103 |
| 6.1 | Darstellung der Einwirkung durch biologische Einwirkungen und verwandte Phänomene | 103 |
| 6.1.1 | Grundlagen..... | 103 |
| 6.1.2 | Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch biologische Einwirkungen | 103 |
| 6.2 | Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu biologischen Einwirkungen | 104 |
| 6.2.1 | Nationale Betriebserfahrung | 104 |
| 6.2.2 | Internationale Betriebserfahrung | 110 |
| 6.2.3 | Vergleich der nationalen und internationalen Betriebserfahrung | 116 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3 | Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung | 117 |
| 6.4 | Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse..... | 119 |
| 6.5 | Ergebnisse und Bewertung..... | 119 |
| 7 | Kombinationen naturbedingter Einwirkungen..... | 121 |
| 7.1 | Darstellung der Kombination von naturbedingten Einwirkungen | 121 |
| 7.1.1 | Grundlagen..... | 121 |
| 7.1.2 | Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch Kombinationen naturbedingter Einwirkungen | 121 |
| 7.2 | Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu Kombinationen naturbedingter Einwirkungen..... | 122 |
| 7.2.1 | Nationale Betriebserfahrung | 122 |
| 7.2.2 | Internationale Betriebserfahrung..... | 127 |
| 7.3 | Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung | 136 |
| 7.4 | Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse..... | 137 |
| 7.5 | Ergebnisse und Bewertung..... | 140 |
| 8 | Zusammenfassung | 145 |
| | Literaturverzeichnis..... | 153 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | 161 |
| | Tabellenverzeichnis..... | 163 |
| | Abkürzungsverzeichnis..... | 165 |
| A | Methoden..... | 167 |
| A.1 | Theil-Sen-Schätzer | 167 |
| A.2 | Flächengewichteter Niederschlag | 173 |

1 Einleitung

Seit der Errichtung der deutschen Kernkraftwerke hat sich der Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich Einwirkungen von außen (EVA) weiterentwickelt. Dies bezieht sich sowohl auf die Methoden zur Ermittlung der Standortgefährdung als auch auf die Anforderungen an die Auslegung der Anlagen. Nach den Reaktorunfällen in Fukushima ist die Thematik national und international weiter in den Vordergrund gerückt. So fordert WENRA /WEN 14/ Nachweise im Auslegungsbereich für die Beherrschung von Wetterbedingungen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von höchstens $10^{-4}/a$. Sofern es nicht möglich ist, diese Überschreitenswahrscheinlichkeit mit ausreichender Zuverlässigkeit zu ermitteln, soll eine Einwirkung festgelegt und begründet werden, mit der ein vergleichbares Sicherheitsniveau erreicht wird¹. Den internationalen Entwicklungen folgend greift die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) in ihrer Stellungnahme „Einschätzung der Abdeckung extremer Wetterbedingungen durch die bestehende Auslegung“ vom 06.11.2013 /RSK 13/ diese Anforderung auf. Sofern sich Einwirkungen in diesem Häufigkeitsbereich nicht mit hinreichender Aussagezuverlässigkeit ermitteln lassen, sollte aus Sicht der RSK mit ingenieurmäßigen Bewertungen deterministisch eine sichere Ereignisbeherrschung sowie eine hohe Robustheit ausgewiesen werden.

Daher stellt sich die Frage, ob nach Stand von Wissenschaft und Technik verfügbare Methoden zur Durchführung von Standortgefährdungsanalysen mit einer solchen Überschreitenswahrscheinlichkeit von mindestens $10^{-4}/a$ oder zur Ermittlung eines abdeckenden Ereignisses vorliegen und ob sich bei deren Anwendung neue sicherheitstechnisch relevante Erkenntnisse für die Auslegung der Kernkraftwerke in Deutschland ergeben, die eine neue Standortgefährdungsermittlung erforderlich machen. Im Vorhaben 3609R01350 /GRS 13/ wurden die naturbedingten Einwirkungen von außen

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

¹ „The exceedance frequencies of design basis events shall be low enough to ensure a high degree of protection with respect to external hazards. An exceedance frequency not higher than 10^{-4} per annum, shall be used for the design basis events. Where it is not possible to calculate these probabilities with an acceptable degree of certainty, an event shall be chosen and justified to reach an equivalent level of safety.“ /WEN 14/

betrachtet. Dabei blieb insbesondere in Bezug auf Eishochwasser offen, inwiefern diese verlässlich ermittelt werden können und welche Relevanz sie für Kernkraftwerkstandorte haben.

Über diese offene Frage aus dem Vorhaben 3609R01350 hinaus wurden noch andere naturbedingte Einwirkungen ausgewählt, um einen aktuellen Gesamtüberblick über relevante Einwirkungen von außen zu gewinnen. In diesem Vorhaben wurden daher, zur Vervollständigung des Überblicks und Klärung der offenen Frage bezüglich Eishochwasser, die folgenden naturbedingten Einwirkungen von außen betrachtet:

- lokale Starkregenereignisse,
- Eishochwasser,
- hohe und tiefe Umgebungstemperaturen und
- biologische Einwirkungen.

Lokale Starkregenereignisse sind nach deutschem kerntechnischen Regelwerk standortspezifisch zu betrachten, ein Verfahren zur Ermittlung der Standortgefährdung ist bislang jedoch nicht vorgegeben. Im Unterschied dazu wird z. B. in der französischen Regel zum Schutz von Kernkraftwerken gegen Überflutung /ASN 13/ explizit beschrieben, wie die Bemessungswerte hinsichtlich lokaler Niederschläge zu bestimmen sind. Die Betriebserfahrung mit dem Starkniederschlagsereignis vom 04.09.2011 am Kernkraftwerkstandort Brunsbüttel /GRS 12/ einerseits und die allgemeinen Erfahrungen mit Wetterlagen, die zu langanhaltenden Niederschlägen führen, zeigen, dass extreme Niederschlagsereignisse aus Sicht der kerntechnischen Sicherheit relevant sein können. Vertiefte Untersuchungen den WENRA-Anforderungen zur Gefährdungsermittlung entsprechend, wurden nach Kenntnis der GRS bislang nicht durchgeführt.

Ebenso wie lokale Starkregenereignisse sind **Eishochwasser, hohe und tiefe Umgebungstemperaturen sowie biologische Einwirkungen** nach deutschem kerntechnischen Regelwerk standortspezifisch zu betrachten. Auch hinsichtlich dieser Einwirkungen sind bislang keine Verfahren zur Ermittlung der Standortgefährdung vorgegeben. Vertiefte Untersuchungen den WENRA-Anforderungen zur Gefährdungsermittlung entsprechend wurden nach Kenntnis der GRS bislang nicht durchgeführt.

Die hier vorgestellten Betrachtungen beziehen sich auf eine Erhebung und generische Bewertung der nach Stand von Wissenschaft und Technik verfügbaren Methoden zur

Ermittlung der Standortgefährdung im Hinblick auf EVA, sowie auf eine Bewertung der Relevanz der Einwirkungen.

Neben den oben genannten Einwirkungen werden im Vorhaben die Einwirkung

- Hochwasser und
- Kombinationen naturbedingter Einwirkungen von außen

untersucht.

In Ergänzung zum Vorhaben 3609R01350 wird im Hinblick auf die Untersuchung von **Hochwasser** ein deterministisches Verfahren zur Bestimmung eines abdeckenden Bemessungshochwassers erprobt. Das Verfahren wird in Anlehnung an /NRC 11/ und den dort beschriebenen Ansatz zur deterministischen Bestimmung des maximalen Hochwassers (Probable Maximum Flood, PMF), der sich wesentlich auf die Ermittlung des maximal möglichen Niederschlags (Probable Maximum Precipitation, PMP) im Einzugsgebiet des zu betrachtenden Flusses stützt, entwickelt. Eine deterministische Abschätzung der anzunehmenden Obergrenze für Hochwasserabflüsse analog zum Verfahren „Probable Maximum Flood“ basierend auf der Ermittlung extremer Niederschläge liegt bisher nach Kenntnis der GRS für deutsche Kernkraftwerkstandorte nicht vor.

Ausgehend von Annahmen zu den maximal möglichen Niederschlagsmengen wird daher anhand eines Referenzstandortes der maximal zu erwartende Hochwasserabfluss und damit der maximal zu erwartende Bemessungswasserstand abgeschätzt. Das Ergebnis dieser Abschätzung wird mit den Bemessungswasserständen, die auf Grundlage der KTA 2207 /KTA 04/ und daran angelehnter Verfahren /JEN 11/ ermittelt wurden, verglichen. Ziel ist es, zu überprüfen, ob deterministische Verfahren, wie sie z. B. in den USA angewandt werden, zu signifikant höheren Bemessungswerten führen, als der statistische Ansatz nach KTA 2207.

Darüber hinaus werden **Kombinationen von naturbedingten Einwirkungen von außen** aufgegriffen. Dazu werden Kombinationen von Einwirkungen durch die Auswertung nationaler und internationaler Betriebserfahrung und auf Grund von generischen Ingenieurstechnischen Einschätzungen, welche Kombinationen gemeinsam auftreten können, untersucht. Dabei werden für relevante Kombinationen die unterschiedlichen Zusammenhänge (kausal verknüpft, zufälliges gemeinsames Auftreten, schließen sich gegen-

seitig aus) zwischen den verschiedenen Einwirkungen ausgewiesen. Um die sicherheitstechnische Relevanz von Einwirkungskombinationen bewerten zu können, wird geprüft, ob Einwirkungskombinationen zu anderen Auswirkungen führen können, die bei individuellem Auftreten der Einwirkungen nicht zu erwarten wären.

Die im vorliegenden Bericht betrachteten naturbedingten Einwirkungen werden in den folgenden Kapiteln jeweils separat behandelt. Mit Ausnahme der Ermittlung eines abdeckenden Hochwasserereignisses (Kapitel 3) werden für jede betrachtete Einwirkung neben einigen grundlegenden Informationen zunächst die allgemeine Gefährdungssituation hinsichtlich der jeweiligen Einwirkung sowie in Deutschland aufgetretene Extremereignisse dargestellt. Danach folgen einige Beispiele aus der nationalen und internationalen Betriebserfahrung von Kernkraftwerken mit derartigen Einwirkungen, welche die möglichen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf Kernkraftwerke veranschaulichen. Dies geschieht um einen Eindruck von der Bedeutung der Einwirkungen für deutsche Standorte zu vermitteln. Für die Einwirkung „Hochwasser“ erfolgte dies bereits im Vorhaben 3609R01350 /GRS 13/.

Die Behandlung der Methodik zur Ermittlung der Standortgefährdung gliedert sich in zwei Hauptteile: die Beschreibung der bisherigen Vorgehensweise (meist in Anlehnung an die einschlägigen Regelwerksanforderungen) und die Darstellung zur Gefährdungsermittlung nach Stand von Wissenschaft und Technik. Auf dieser Grundlage wird anschließend bewertet, ob sich hieraus neue sicherheitstechnisch relevante Erkenntnisse ergeben. Sofern die Notwendigkeit zusätzlicher Untersuchungen hinsichtlich bestimmter methodischer Aspekte der Gefährdungsermittlung gesehen wird, wird auf diesen weitergehenden Forschungsbedarf hingewiesen.

2 Lokale Starkregen

2.1 Darstellung der Einwirkung „Lokale Starkregen“

2.1.1 Grundlagen

Lokale Starkregen wirken auf verschiedenen Zeitskalen und auf verschiedene Weise. Grundsätzlich nimmt bei Starkregenereignissen die Intensität (mittlerer Niederschlag pro Zeit- und Flächeneinheit) mit größerer Zeitspanne ab. Kurze und sehr intensive Regenereignisse wirken anders als Regenereignisse mit mittlerer Zeitdauer und (durchschnittlicher) Intensität.

Kurze Regenereignisse hoher Intensität führen zu hohen Belastungen der Entwässerungssysteme und ggf. zu deren Überlaufen oder Versagen. Integral gesehen führt dies jedoch nur zu geringen Wassermengen. Regenereignisse mit etwas längeren Zeitdauern (> 10 Minuten) führen nicht zu einer dauerhaften Überforderung der Entwässerungssysteme. Kommt jedoch ein Versagen von Entwässerungssystemen hinzu, z. B. ein Versagen einer Rohrleitungsverbindung bei innenliegenden Fallrohren der Dachentwässerung oder eine Verstopfung von Geländeabläufen, so kann es binnen kurzer Zeit zum Eintrag großer Wassermengen in Gebäude oder zu (lokal) hohen Wasserständen auf dem Gelände kommen. Letztere können durch tiefliegende Öffnungen wie z. B. Türen oder über den Zutritt von Wasser in Kabel- und Rohrkanäle und Leckagen an Durchführungen ebenfalls zum Eindringen von Wasser in Gebäude führen. Deutlich länger andauernde Regenfälle hingegen führen vor allem zu Veränderungen im Bodenbereich durch Auswaschungen und steigendem Grundwasserspiegel.

Kurzzeitige Starkniederschläge können zudem erhebliche Dachlasten verursachen, so dass ggf. die Auslegungswerte überschritten oder die Reserven der Auslegung reduziert werden.

2.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch lokale Starkregen

In Deutschland können, wie überall in gemäßigten Breiten, relativ starke Niederschlagsereignisse auftreten. Diese können sowohl als Teil lokaler Gegebenheiten, wie einer durchziehenden Gewitterfront, als auch während großräumiger Regenereignisse in Folge von Großwetterlagen auftreten.

Auf Grund der Erwärmung der Erdatmosphäre ist in Zukunft damit zu rechnen, dass der Wassergehalt der Atmosphäre größer wird und damit das Potenzial für Starkregenereignisse zunimmt. Globale und lokale Klimasimulationen legen derartiges nahe, sind aber in ihren Ergebnissen zu weit gestreut, um belastbare Aussagen zu erlauben. Auch aus empirischer Sicht gibt es derzeit noch keine Anzeichen für statistisch signifikant zunehmende Starkregenereignisse in Deutschland, auch wenn es auf Grundlage von flächendeckenden Niederschlagsbeobachtungen entsprechende Hinweise gibt /BEC 14/.

2.1.3 Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland

Extremereignisse treten auch in Deutschland auf. Nach Becker /BEC 14/ traten beispielsweise Extremniederschläge in Münster im Jahr 2014 mit 164 mm in 1 h und 245 mm in 2 h auf. In Miltzow in Mecklenburg-Vorpommern wurden im Jahr 1968 200 mm in 1 h gemessen und in Heilbronn im Jahr 1994 239 mm in 2 h. Ebenfalls erwähnenswert sind die 312 mm Niederschlag in 24 h im Jahr 2002 in Zinnwald /DWD 02/.

2.2 Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu lokalen Starkregen

2.2.1 Betriebserfahrung im Inland

In deutschen Kernkraftwerken trat bisher nur ein Meldepflichtiges Ereignis im Zusammenhang mit lokalem Starkregen auf. Dabei wurden die Auslegungswerte der Regenwasserentwässerungssysteme sowohl für die Auslegung der Regenentwässerung bestimmende 5 Minuten währende Ereignis mit 5 Jahren Wiederkehrperiode, als auch für die Dimensionierung der Notentwässerung bestimmende 10 Minuten währende Ereignis mit 100 Jahren Wiederkehrperiode überschritten /GRS 12/.

In der Folge kam es zu Leckagen an innenliegenden Fallrohren der Dachentwässerung und somit zu Regenwassereintrag in sicherheitstechnisch wichtige Gebäude. Ein Rückstau im Gullysystem führte zudem zu einer Beeinträchtigung von Treppen und Verkehrswegen. Des Weiteren kam es zum Eintrag von Regenwasser durch Außentore der Gleisdurchfahrten, unterstützt durch die Unterdruckhaltung in den Gebäuden.

2.2.2 Betriebserfahrung im Ausland

In der IRS-Datenbank (International Reporting System for Operation Experience) der IAEA lassen sich zusätzlich zu dem oben beschriebenen deutschen Ereignis vier weitere Meldungen finden, bei denen lokale Starkregen am Anlagengelände eine Rolle spielten. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

An einem Siedewasserreaktor kam es zum Eindringen von Wasser in das Reaktorgebäude und in Folge dessen zu einer Reaktorschnellabschaltung und einem Durchdringungsabschluss. Das Reaktorgebäude steht in einer Felsgrube. Zwischen Fels und Reaktorgebäude befindet sich ein Spalt. Die Felsgrube wird über Bohrlöcher in einen darunter liegenden Tunnel entwässert. Dieser Tunnel wird mittels Pumpen entleert und das anfallende Wasser entweder in das Meer zurückgespeist oder der Wasseraufbereitung zugeführt. Bei dem Ereignis drang, auf Grund von höherem Meerwasserstand und starken Regenfällen, durch das umliegende Gestein vermehrt Wasser in diese Felsgrube ein. Da die Abdeckgitter der Bohrlöcher verstopft waren, stieg das Wasser in der Grube stark an und erreichte eine Überströmklappe, die bei interner Überflutung das Reaktorgebäude nach außen entwässern soll. Diese Überströmklappe versagte und das Reaktorgebäude wurde daraufhin von außen geflutet.

Bei einem RBMK-Reaktor kam es in Folge schwerer Regenfälle zu Wassereintritt in das Maschinenhaus und in der Folge zur Turbinenabschaltung und zur Reaktorabschaltung. Der Grund für das eindringende Wasser war eine partielle Verstopfung der Dachentwässerung ebenso wie Leckagen an den Verbindungen der innenliegenden Entwässerungsleitungen.

Bei einem Siedewasserreaktor kam es während Wartungsarbeiten an einem 6,9-kV-System zu einem Brand in Folge eines Kurzschlusses. Die Wartungsarbeiten wurden während eines Sturms mit schweren Regenfällen durchgeführt. Als auslösende Ursache des Kurzschlusses wurde hohe Feuchtigkeit auf Grund von eindringendem Wasser ermittelt.

Bei einem Siedewasserreaktor drang Grundwasser in unterirdisch gelegene Räume, die der Aufbewahrung von gebrauchten Filterharzen dienen, ein. Dabei gelangte Aktivität in dieses Wasser. Als Ursache wurde ein hoher Grundwasserspiegel in Folge von schweren Regenfällen in den Tagen zuvor identifiziert. Nach Absinken des Grundwasserspiegels kam es zu einer Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung.

2.3 Maßnahmen in Deutschland

Nach dem oben beschriebenen meldepflichtigen Ereignis in Deutschland wurde hinsichtlich der Problematik von lokalen Starkniederschlägen durch die GRS eine Weiterleitungsnachricht verfasst /GRS 12/, die Empfehlungen zum besseren Schutz gegen Extremniederschläge enthielt. Diese Empfehlungen umfassen:

- Sicherheitstechnische Klassifizierung von Regenentwässerungssystemen und dementsprechende Handhabung beispielsweise bei Änderungsmaßnahmen oder Prüfungen.
- Gewährleistung, dass bei Starkregen oder Wasseranstau keine Leckagen infolge von Reaktions- und Druckkräften an den Rohrleitungen auftreten können. Sicherstellung, dass insbesondere Muffenverbindungen und Rohrbefestigungen in einem ordnungsgemäßen Zustand sind. Regelmäßige Prüfung von Regenwasserentwässerungssystemen auf ordnungsgemäßen Zustand, insbesondere auf Dichtheit und Halterung hin.
- Führung der Notentwässerungen (Notabläufe oder Notüberläufe) derart, dass das ab- bzw. überlaufendes Regenwasser sicherheitstechnisch wichtige Anlagenteile nicht gefährden kann und eine Verschleppung radioaktiver Stoffe ausgeschlossen ist. Dies muss auch gewährleistet sein, wenn die Kapazität der Notentwässerung bei Starkregenereignissen überschritten wird.
- Prüfung, ob Starkregenereignisse zum Eintrag von Wasser in sicherheitsrelevante Gebäude und Kanäle führen und sicherheitstechnisch wichtige Einrichtungen sowie aktivitätsführende Komponenten gefährden können. Falls erforderlich, müssen die Schutzmaßnahmen entsprechend ertüchtigt werden. Prüfung, ob ggf. herangezogene temporäre Hochwasserschutzmaßnahmen nach KTA zur Beherrschung von Starkregenereignissen rechtzeitig installiert werden können. Schutzmaßnahmen gegen Starkregenereignisse sollten so ausgelegt sein, dass sie auch bei Einwirkungen von Starkregenereignissen, die die Bemessungswerte nach DIN überschreiten, wirksam sind.

Im Nachgang wurden durch Betreiber und Sachverständige die Schutzmaßnahmen überprüft und Verbesserungen vorgenommen. Die Schutzmaßnahmen bzw. deren Verbesserung umfassen unter anderem:

- möglichst keine innenliegenden Fallrohre der Dachentwässerung,

- Verstärkung von innenliegenden Fallrohren und insbesondere deren Verbindungsstücken,
- Installation von zusätzlichen Dachentwässerungsmöglichkeiten nach außen,
- Überprüfungen der zulässigen Dachlasten,
- Überprüfungen von tiefliegenden Eingängen auf Vorhandensein von Schwellen und/oder von diesen Öffnungen aus abfallendes Gelände,
- Überprüfungen von Dichtungen und
- Überprüfungen des Schutzes von Kabel- und Rohrkanälen gegen eindringendes Wasser.

Die Überprüfungen und die Verbesserungen werden von Sachverständigen begleitet und begutachtet. Einige der Maßnahmen befinden sich im behördlichen Aufsichtsverfahren.

2.4 Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung

Lokale Starkregenereignisse sind nach deutschem kerntechnischen Regelwerk standortspezifisch zu betrachten, ein Verfahren zur Ermittlung der Standortgefährdung ist bislang jedoch nicht vorgegeben. Bemessungsereignisse mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von $10^{-4}/a$ entsprechend der Anforderung des WENRA Reference Level, Issue T /WEN 14/ wurden bisher in Deutschland nach Kenntnis der GRS nicht abgeleitet. Die Entwässerung der Gebäude und des Anlagengeländes ist gemäß DIN 1986 – 100 ausgelegt. Die DIN 1986 – 100 bezieht sich auf 5 – 15-minütige Niederschläge mit unterschiedlichen Wiederkehrperioden zwischen 5 und 100 Jahren und verweist bezüglich der anzusetzenden Werte auf KOSTRA-DWD².

² KOSTRA-DWD - Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs Auswertungen, ein vom Deutschen Wetterdienst (DWD) herausgegebener Starkregen katalog.

2.5 Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse

Wilson und Toumi /WIL 05/ argumentieren auf Basis theoretischer Ergebnisse, dass Extremniederschläge R Weibull-verteilt mit festem Formparameter c sind. Die Verteilungsfunktion extremer Niederschläge ergibt sich nach Wilson und Toumi zu

$$P(R < r) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{r}{R_0} \right)^{2/3} \right], \quad (2.1)$$

wobei R die Niederschlagsrate darstellt und R_0 der Skalierungsparameter (eine reelle Zahl) ist. Wilson und Toumi leiten den Formparameter c dabei aus theoretischen Überlegungen zu $2/3$ ab. Die Zeitspanne, in der Wilson und Toumi ihre theoretischen Ergebnisse als gültig ansehen, beträgt etwa einen Tag. Sind die Zeitspannen wesentlich kleiner oder größer als einen Tag, kommen zusätzliche Effekte zum Tragen, so dass dieses Ergebnis tendenziell nicht mehr zutrifft.

Wilson und Toumi validieren ihre theoretischen Überlegungen zum Formparameter durch den Abgleich mit Beobachtungsdaten des Global Daily Climatology Network. Hierzu wird der Formparameter aus den Beobachtungsdatensätzen ermittelt. Für das Sommerhalbjahr wird ein mittlerer Formparameter von 0,66 bei einer Standardabweichung von 0,16 und für das Winterhalbjahr ein Formparameter von 0,67 bei einer Standardabweichung von 0,18 ermittelt. Der jährliche mittlere Formparameter ist 0,66 bei einer Standardabweichung von 0,12. Variationen für einzelne Stationen können gemäß Wilson und Toumi durch einen instationären Skalenparameter R_0 bzw. durch das Auftreten mehrfacher Ereignisse, die zur Tagessumme beitragen, erklärt werden.

Van den Brink und Können /BRI 09/ argumentieren auf dieser Grundlage, dass die Jahresmaxima von $u = R^{2/3}$ damit exponentialverteilt sein müssen, mit rascher Konvergenz gegen eine Gumbelverteilung. Auf dieser Grundlage weisen van den Brink und Können durch empirische Untersuchungen an Zeitreihen nach, dass zumindest für Europa die theoretischen Ergebnisse von Wilson und Toumi zutreffen und die Gumbelverteilung gute Ergebnisse bis zu Wiederkehrperioden von etwa 50.000 Jahren liefert.

Im Folgenden wird der Vorgehensweise von van den Brink und Können gefolgt und für einen Referenzstandort (Adelsdorf) in einem ersten Schritt ein Tagesniederschlag mit

einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $10^{-4}/a$, entsprechend einer Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren abgeleitet. In einem zweiten Schritt wird ein Verfahren entwickelt, um daraus Extremniederschläge kürzerer Zeitspannen (5-Minutenwert) auf Basis empirischer Verteilungen abzuleiten.

Ausgehend von van den Brink und Können /BRI 09/ wird zuerst aus der in aufsteigender Reihenfolge sortierten Zufallsvariable der Jahresmaxima R der Tagesniederschläge der Zeitreihe 1961 bis 2015 der Messstation Adelsdorf eine Zufallsvariable u ermittelt zu

$$u = R^{2/3} \left[\frac{l}{m^2} \right]^{2/3} \quad (2.2)$$

Diese Zufallsvariable u ist ebenfalls in aufsteigender Reihenfolge geordnet und gemäß der Argumentation von van den Brink und Können Gumbel-verteilt.

Aus der Zufallsvariable u wird die normierten Zufallsvariable G

$$G = \frac{u - \bar{u}}{s_u} \quad (2.3)$$

abgeleitet, wobei \bar{u} den arithmetischen Mittelwert der Variable u bezeichnet und s_u die Standardabweichung der Zufallsvariable u bezeichnet.

Da nach van den Brink und Können u Gumbel-verteilt ist, ist auch die normierte Zufallsvariable G Gumbel-verteilt. Damit kann die Zufallsvariable G durch eine Gumbelverteilung

$$F(G) = \exp\left(-e^{-\frac{1}{\beta}(G-\mu)}\right) \quad (2.4)$$

beschrieben werden, wobei $\beta > 0$ der Skalierungsparameter und μ der Lageparameter der Gumbelverteilung ist. An die Zufallsvariable G wird mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode eine Gumbelverteilung gefittet und die Parameter $\lambda_0 = \frac{1}{\beta_0}$ und μ_0 ermittelt. Zur Schätzung der Unsicherheiten der Fitparameter wird der Likelihood-Quotienten-Test herangezogen.

Die Ergebnisse sind in **Abb. 2.1** dargestellt. Der Likelihood-Quotienten-Test erreicht sein Minimum bei (μ_0, λ_0) , markiert durch das weiße Kreuz und wächst von dort aus kontinuierlich in alle Richtungen. Die Schätzung für das 70%-Vertrauensintervall (entsprechend dem Bereich zwischen 15%- und 85%-Fraktile) der Parameter λ und μ ist mit einer weißen Linie umrandet dargestellt.

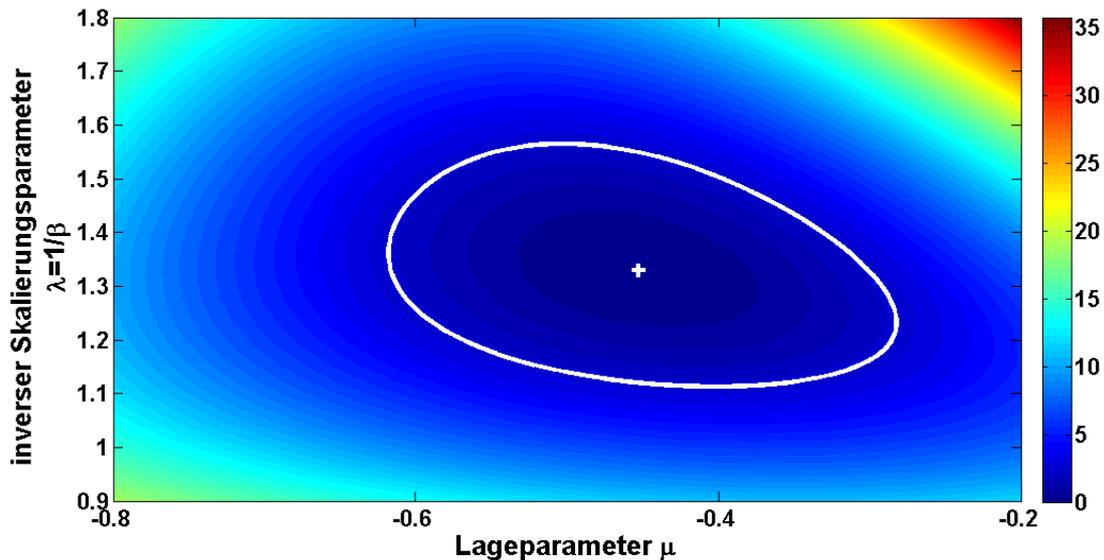


Abb. 2.1 Dargestellt ist das logarithmierte Ergebnis des Likelihood-Quotienten-Tests. Die Farben stellen den logarithmierten Wert des Tests an einer bestimmten Stelle im Parameterraum dar

Mit den so ermittelten Ergebnissen für die Parameter λ und μ wird dann in **Abb. 2.2** die normierte Zufallsvariable G in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode dargestellt, sowie als blaue Linie der bestmögliche Fit (50%-Fraktile) an diese empirischen Werte und als grüne Linien die 15%- bzw. 85%- Fraktile. Für eine Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren werden für die 15%-, 50%- bzw. 85%-Fraktile die entsprechenden Tagesniederschläge zu 100,36 l/m², 118,9 l/m² bzw. 143,25 l/m² ermittelt. Die Ermittlung erfolgt folgendermaßen:

- der 85%-Fraktilewert der normierten Zufallsvariable G wird für 10.000 Jahre Wiederkehrperiode ermittelt: $G_1 = 7,993$
- Der Wert G_1 wird mit der Standardabweichung $s_u = 2,1207 \left[\frac{l}{m^2} \right]^{2/3}$ multipliziert und der Mittelwert $\bar{u} = 10,4271 \left[\frac{l}{m^2} \right]^{2/3}$ addiert:

$$u_1 = G_1 * s_u + \bar{u} = 27,3777 \left[\frac{l}{m^2} \right]^{2/3}$$

- Der Wert u_1 wird mit $3/2$ potenziert um den Niederschlagswert $R_{85\%,10000} = u_1^{3/2} = 143,25 \frac{l}{m^2}$ zu erhalten.

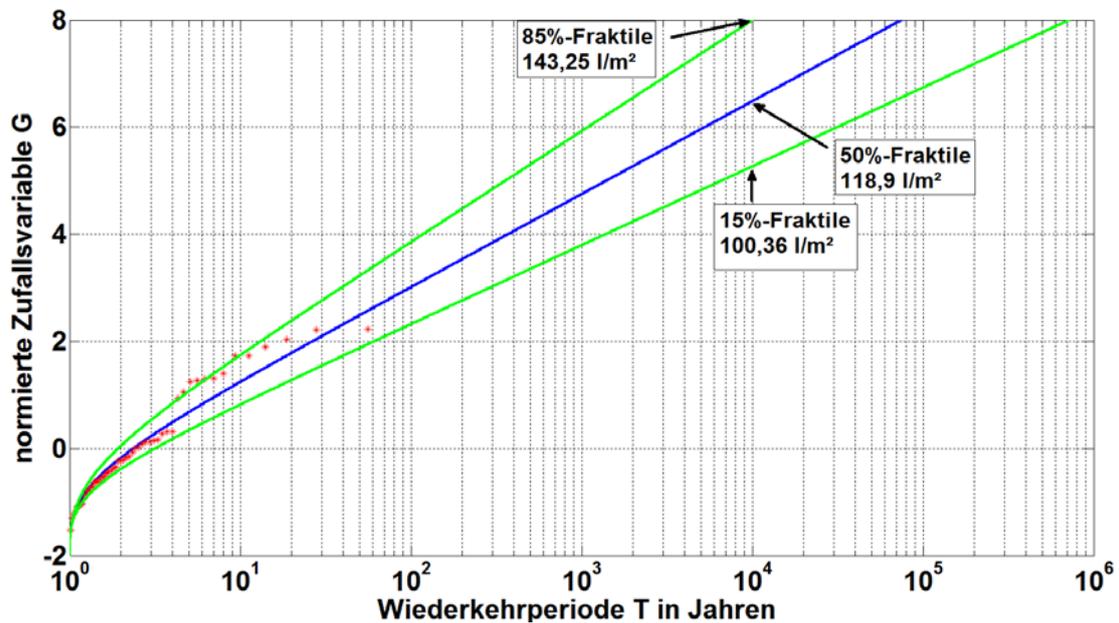


Abb. 2.2 Rote Symbole stellen die normierte Zufallsvariable G in Abhängigkeit von den empirischen Wiederkehrperioden dar. Die blaue Kurve ist der Fit der Gumbelverteilung. Die grünen Kurven stellen die 15%- bzw. 85%-Fraktile dar

Zur Ableitung von 5-Minutenwerten wird im zweiten Schritt eine empirische Beziehung zwischen beobachteten Tagesniederschlagswerten und den dazugehörigen maximalen 5-Minutenwerten für die Messstation Adelsdorf aufgestellt. Dazu wird für jeden beobachteten Tagesniederschlagswert größer oder gleich 5 l/m^2 im Zeitraum 01.09.2003 bis 31.12.2015³ der maximale 5-Minutenwert ermittelt und daraus das jeweilige Verhältnis ausgerechnet. Die ermittelten Verhältnisse wurden in 0,05-er Schritten zusammengefasst und gezählt, so dass jedem Intervall der Breite 0,05 eine Anzahl an Ereignissen zugeordnet wurde. Diese Anzahlen wurden durch die Gesamtanzahl geteilt und damit die Wahrscheinlichkeit ausgerechnet, dass ein Ereignis in einem bestimmten Intervall liegt.

³ Nur in diesem Zeitraum lagen 5-Minutenwerte vor. Der absolut höchste Tagesniederschlag der Zeitreihe Adelsdorf ist in diesem Zeitraum nicht enthalten.

Abb. 2.3 stellt die kumulativen Wahrscheinlichkeiten dar. Das Verhältnis 0,05 (Werte im ersten Intervall) wird z. B. in etwa 45 % der Fälle nicht überschritten und das Verhältnis 0,25 (Werte in den ersten fünf Intervallen) wird in etwa 90 % der Fälle nicht überschritten. Damit ist für diese empirische Verteilung in 90 % der Fälle der maximale 5-Minutenwert des Niederschlags nicht größer als 25 % des Tagesniederschlags. Wie bei jeder empirisch abgeleiteten Beziehung ist es grundsätzlich nicht auszuschließen, dass längere Beobachtungszeiträume abweichende Ergebnisse ergeben. Da allerdings kaum längere Zeitreihen für solch kurze Zeitspannen zur Verfügung stehen, ist dies hier als Arbeitsannahme verwendet worden.

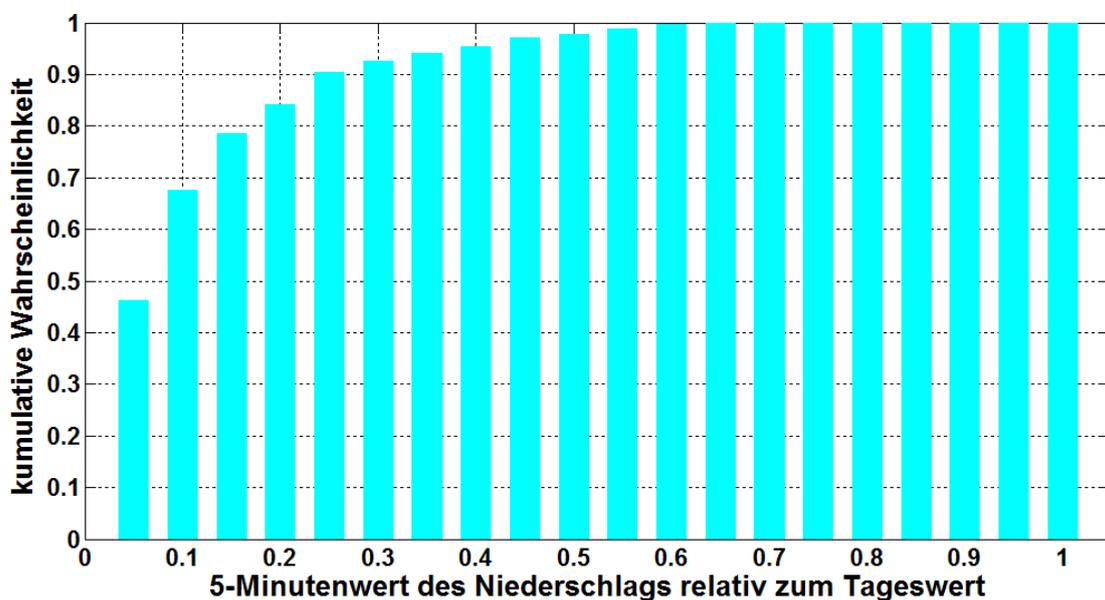


Abb. 2.3 Dargestellt ist die kumulative Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Verhältnis 5-Minutenwert zu Tageswert. So wird z. B. in 90 % der Fälle der maximale 5-Minutenwert das 0,25-fache des Tageswertes nicht überschreiten

Zur Absicherung dieses Ergebnisses wurden vier Unterkategorien gebildet. Dabei wurden Tagesniederschläge größer gleich 5 l/m² aber kleiner 10 l/m² der ersten Kategorie, Tagesniederschläge von größer gleich 10 l/m² aber kleiner 15 l/m² der zweiten Kategorie, Tagesniederschläge von größer gleich 15 l/m² aber kleiner 20 l/m² der dritten und Tagesniederschläge größer oder gleich 20 l/m² der vierten Kategorie zugeordnet. Die weitere Analyse erfolgte analog wie oben dargestellt für jede einzelne Kategorie.

Abb. 2.4 stellt die Ergebnisse für diese vier Unterkategorien dar. Dabei entspricht blau den Ergebnissen für Kategorie 1, rot den Ergebnissen für Kategorie 2, grün den Ergebnissen für Kategorie 3 und schwarz den Ergebnissen für Kategorie 4. Tendenziell führen

höhere Tagesniederschläge dazu, dass das Verhältnis zwischen maximalem 5-Minutenwert und Tageswert kleiner wird. Mit anderen Worten: Die kumulative Wahrscheinlichkeit wird größer bei gleichem Verhältnis der 5-Minuten- zu Tagesniederschlagswerten. Insofern ist, auf Grundlage dieser Auswertung, die Wahrscheinlichkeit von 90 %, mit der das Verhältnis von 0,25 nicht überschritten wird, als konservativ für große Niederschläge anzusehen.

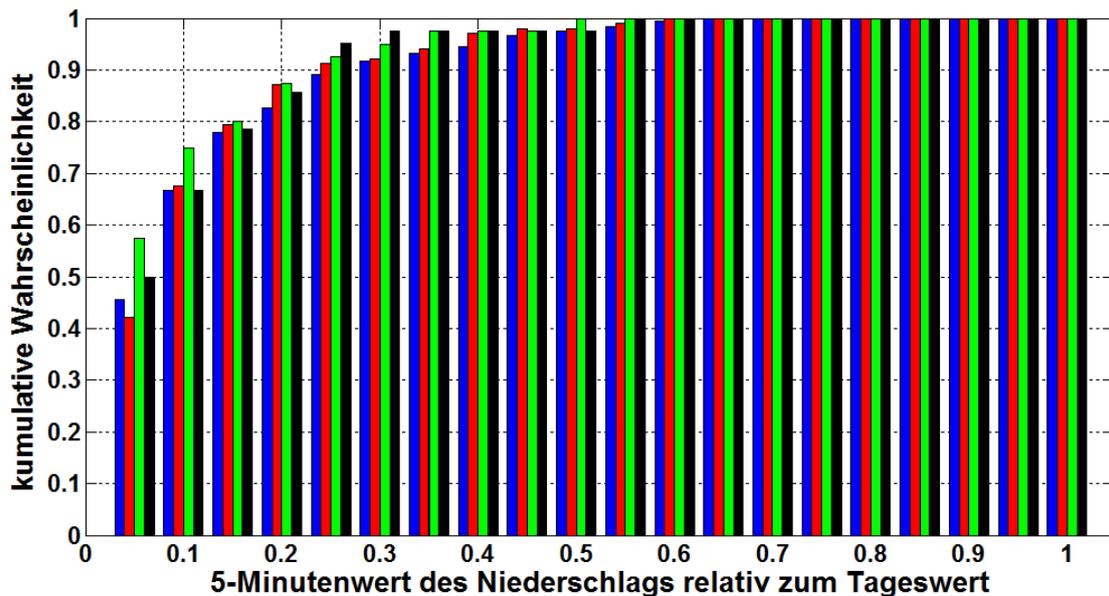


Abb. 2.4 Darstellung für die vier im Text beschriebenen Unterkategorien. Unterkategorie 1 ist blau, Unterkategorie 2 ist rot, Unterkategorie 3 ist grün und Unterkategorie 4 ist schwarz dargestellt

Mit den gewonnenen Ergebnissen aus Schritt 1 und 2 lässt sich also beispielsweise ein 5-Minuten-Niederschlagsereignis ableiten, das mit 90 % Wahrscheinlichkeit das 0,25-fache des 85%-Fraktilwerts bei einer Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren nicht überschreitet:

$$35,8 \frac{l}{(5 \text{ min}) m^2} = 35,8 \frac{l}{(300 \text{ s}) m^2} = 35,8 \frac{l}{(300 \text{ s}) m^2} \frac{10.000 m^2}{ha} \approx 1200 \frac{l}{s ha}.$$

Diese Vorgehensweise ist prinzipiell auch auf andere zu betrachtende Zeitspannen übertragbar. Die Übertragung von Wetterstationen mit langen Zeitreihen in der Nähe eines Standortes auf den Standort selbst erfordert ein sorgfältiges Vorgehen, sollte jedoch nicht zu extrem abweichenden Ergebnissen führen.

Anzumerken ist noch, dass die Verwendung einer Gumbelverteilung zur Ermittlung von Extremwerten des Tagesniederschlags in der Wissenschaft stark diskutiert wird. Einige

Forscher favorisieren hinsichtlich der Extremwertverteilung z. B. eine dreiparametrische Fréchetverteilung⁴ (/KOU 03/, /KOU 04a/ und /KOU 04b/) und argumentieren damit, dass diese Verteilung die gemessenen Extremwerte besser beschreibt. Dies ist grundsätzlich richtig, da auf Grund des dritten freien Parameters in der Regel ein besserer Fit an eine gemessene Zeitreihe erreicht werden kann. Dies macht die Fitfunktion jedoch sensitiver für Ausreißer in diesen Zeitreihen, so dass das zufällige Auftreten von einem (oder zwei, drei, vier) Extremereignissen mit eigentlich geringer Eintrittswahrscheinlichkeit in einem Datensatz zu tendenziell höheren Ergebnissen und größeren Unsicherheiten führt.

Van den Brink und Können /BRI 09/ argumentieren hingegen, dass, wenn man die „richtige“ Verteilungsfunktion an die Daten fittet, die Ausreißer um diese Verteilungsfunktion selbst Gumbel-verteilt sind. Sie validieren damit empirisch die Vermutung an Hand von knapp 90.000 Jahresmaxima an über 2000 Wetterstation in Europa und Nordafrika, dass sich die Tagesniederschläge verhalten wie von Wilson und Toumi /WIL 05/ angenommen. In diesem Sinne ist also anzunehmen, dass die Weibullverteilung nach Gleichung 2.1 die „passende“ Verteilungsfunktion für Tagesniederschläge ist. Zudem argumentieren sie damit, dass falls eine Fréchetverteilung als Extremwertverteilung der Maxima der Weibullverteilung genutzt wird, nach Furrer und Katz /FUR 08/ eine Beziehung zwischen dem Formparameter der Fréchetverteilung und dem Formparameter der Weibullverteilung sowie der Anzahl der unabhängigen Ereignisse im zu betrachtenden Zeitraum besteht. Sie argumentieren, dass dieser theoretisch abgeleitete Wert gut übereinstimmt mit den Fits an die knapp 90.000 jährlichen Maxima. Mit diesem konstanten Wert des Formparameters in der Fréchetverteilung unterscheiden sich Gumbel-Verteilung und Fréchetverteilung laut /BRI 09/ nicht mehr nennenswert voneinander.

Angesichts der Erkenntnisse von van den Brink und Können /BRI 09/ ist die GRS der Ansicht, dass die Ermittlung von Extremwerten des Tagesniederschlags für eine Wetterstation mit Hilfe der Gumbelverteilung, wie oben dargestellt, erfolgen kann und die Verwendung der Fréchetverteilung keine Genauigkeitsvorteile bietet.

⁴ Die Fréchetverteilung ist eine generalisierte Extremwertverteilung.

2.6 Ergebnisse und Bewertung

Die, aus der nationalen und internationalen Betriebserfahrung bekannt gewordenen Ereignisse deuten darauf hin, dass lokale Starkregenereignisse zu Beeinträchtigungen der Sicherheitsfunktionen in Kernkraftwerken führen können. Die bisherige Auslegung in Deutschland beruht auf konventionellem Regelwerk und berücksichtigt Ereignisse mit Wiederkehrperioden von bis zu 100 Jahren. Issue T der WENRA Reference Level /WEN 14/ fordert für naturbedingte Einwirkungen von außen die Berücksichtigung eines Ereignisses mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von höchstens $10^{-4}/a$. Sofern es nicht möglich ist, diese Überschreitenswahrscheinlichkeit mit ausreichender Zuverlässigkeit zu ermitteln, soll eine Einwirkung festgelegt und begründet werden, mit der ein vergleichbares Sicherheitsniveau erreicht wird. Eine Möglichkeit wie solche Ereignisse bezüglich extremer Niederschläge abgeleitet werden können, wurde in Abschnitt 2.5 entwickelt. Das Fraktile des Tagesniederschlags (im obigen Beispiel das 85%-Fraktile) und die Unterschreitenswahrscheinlichkeit bei der Umrechnung von Tageswerten auf 5-Minutenwerte (im obigen Beispiel 90 %) bei einer Gefährdungsanalyse ist im Einzelfall festzulegen. Im obigen Beispiel wurden die genannten Fraktilewerte angesetzt, um im Rahmen der hier durchgeführten Analyse auftretende Unsicherheiten abzudecken.

Der Niederschlag mit einer Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren wäre in Anlehnung an die WENRA Reference Levels /WEN 14/ standortspezifisch zu bestimmen und seine Auswirkungen auf den Standort wären zu untersuchen. Mit obigem 5-Minuten-Niederschlagswert von etwa 36 l/m^2 ergibt sich beispielsweise unter den Annahmen

- kein Wasser fließt vom Kraftwerksgelände ab,
- sämtliche Dachentwässerungen entwässern auf das Kraftwerksgelände,
- das freie Kraftwerksgelände beträgt etwa die Hälfte der Gesamtfläche,

nach 5 Minuten ein (mittlerer) Wasserstand von 7,2 cm auf dem freien Kraftwerksgelände⁵. Bei größeren Zeitdauern als 5 Minuten ist die mittlere Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit geringer und ein natürlicher (oberflächlicher) Abfluss ist zunehmend zu unterstellen, so dass die mittleren Wasserstände auf dem Gelände nicht wesentlich höher

⁵ Ein Niederschlag von $1 \text{ l/m}^2 = 0,001 \text{ m}^3/\text{m}^2$ entspricht einer Bedeckungshöhe von 1 mm, sofern kein Abfluss und kein Versickern unterstellt wird. 36 l/m^2 entsprechen damit 3,6 cm Bedeckung. Da gemäß Annahmen nur die Hälfte der Kraftwerksfläche frei ist, ist dieser Wert zu verdoppeln.

werden sollten. In Mulden auf dem Anlagengelände wird dieser Wasserstand natürlich überschritten.

Ein solcher Wasserstand auf dem Gelände kann über Öffnungen, wie z. B. (tiefliegende) Türen, oder über Eintrag in Kabel- oder Rohrkanäle und durch Undichtigkeiten an Durchführungen zu Wassereintrag in Gebäude führen. Ein weiterer möglicher Eintragsweg sind innenliegende Dachentwässerungssysteme, sofern es zu einem Versagen dieser Systeme kommt. Dies kann innerhalb kurzer Zeit zu großen Wassereinträgen in Gebäude führen. Das letztgenannte Phänomen war Gegenstand einer Weiterleitungsnachricht der GRS /GRS 12/.

Ein Wassereintrag in sicherheitstechnisch wichtige Gebäude ist analog zu einer internen Überflutung sicherheitstechnisch wichtiger Gebäude zu behandeln und hat das Potenzial zu redundanzübergreifenden Ausfällen zu führen. Allerdings greifen hier keine Maßnahmen zur Begrenzung der Überflutungsmengen, wie sie ggf. für eine interne Überflutung getroffen wurden. Ein weiterer Aspekt ist, dass Wasser, das über tiefliegende Öffnungen in Gebäude mit radiologischem Inventar eindringt, möglicherweise zu einer Verschleppung dieses Inventars führt. Dies umgeht die Gebäudeabdichtung und macht sie damit unwirksam.

Der Schutz gegen interne Überflutungen aus lokalen Starkregenereignissen muss aus Sicht der GRS daher abzielen auf

- Verhinderung von Wassereintrag in Gebäude mit sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen,
- Begrenzung des Wassereintrags in sicherheitstechnisch wichtige Gebäude, sofern ein Eindringen nicht verhindert werden kann (z. B. weil eine Leckage auftritt).

Zu diesen Punkten hat die GRS in der Weiterleitungsnachricht zum Ereignis /GRS 12/ aus deutscher Betriebserfahrung Empfehlungen ausgesprochen, die geeignet sind, den Wassereintrag in sicherheitstechnisch wichtige Gebäude zu verhindern bzw. zu verringern. Die in Abschnitt 2.3 geschilderten Empfehlungen und daraufhin erfolgten Maßnahmen sind grundsätzlich geeignet, um den Schutz gegen lokale Extremniederschläge zu verbessern. Eine Ableitung der anfallenden Wassermengen vom Kraftwerksgelände, insbesondere aber von sicherheitstechnisch wichtigen Gebäuden, sollte aus Sicht der GRS dabei oberste Priorität haben.

Auch in der RSK wurde die Problematik lokaler Starkregen diskutiert /RSK 17/. Der RSK wurden die Vorkehrungen der Anlagen gegen lokale Starkregenereignisse vorgestellt und das Schutzkonzept diskutiert. Weitergehender Handlungsbedarf lässt sich auch hier aus Sicht der GRS nicht ableiten.

3 Hochwasser

3.1 Beschreibung des Vorhabens

3.1.1 Vorarbeiten und Zielsetzung

Die naturbedingte Einwirkung „Hochwasser“ wurde bereits im Vorhaben 3609R01350 betrachtet. Dabei wurde der Vergleich verschiedener Methoden zur Ermittlung des Bemessungshochwassers mit dem Bericht GRS-A-3693 behandelt /GRS 13/. Im Zuge der Bearbeitung des Themas kam die Fragestellung auf, wie international Bemessungshochwasser abgeleitet werden und inwiefern man diese Methoden auch auf deutsche Standorte anwenden könnte. Daraufhin wurde exemplarisch das Vorgehen zur Ermittlung von Bemessungshochwasser in den USA („Probable Maximum Flood“ (PMF)) ausgewählt, um diese Methodik auf einen deutschen Standort zu übertragen.

Ziel dieses Vorhabens war die beispielhafte vereinfachte Abschätzung eines maximal möglichen Hochwassers (Probable Maximum Flood, PMF) auf Grundlage des abgeschätzten maximal möglichen Niederschlages (Probable Maximum Precipitation).

Die Methodik der „Probable Maximum Flood“ sieht vor, für das Einzugsgebiet eines Flusses, auf Basis der „Probable Maximum Precipitation“, mittels komplexer hydrologischer Modelle (Geländemodelle und Eigenschaften des Geländes) den Abfluss zu bestimmen und diesen konservativ zu überlagern. Im Vorhaben wird die Erstellung dieser komplexen hydrologischen Modelle ersetzt durch die Korrelation von Pegelständen mit den dazugehörigen Niederschlagsdaten des jeweiligen (Teil-)Einzugsgebiets. Dazu sollen anhand der Messreihen zu den Niederschlagsmengen und Abflussmengen/Pegelständen im für den Referenzstandort relevanten Einzugsgebiet Korrelationen zwischen den Parametern Niederschlagsmenge und Abflussmenge/Pegelstand sowie der zeitlichen Verzögerungen, mit der die Abflussmengen/Pegelstände den Niederschlägen folgen, ermittelt werden. Dies soll schrittweise erfolgen, beginnend mit den Einzugsgebieten kleiner Nebenflüsse bis hin zum gesamten Einzugsgebiet des betrachteten Flusses.

Der ermittelte Wert soll dann mit dem Bemessungshochwasserabfluss, der sich mit einer Ermittlung nach dem in Anhang A der KTA 2207 beschriebenen Verfahren ergibt, verglichen werden. Als Referenzstandort wurde der Pegel Schweinfurt am Main gewählt, da

für diesen Standort sowohl ausreichend Pegel­daten, als auch eine Ermittlung des Hochwasserabflusses nach dem in Anhang A der KTA 2207 beschriebenen Verfahren vorliegen. Dies erlaubt es, zu überprüfen, ob deterministische Verfahren, wie sie z. B. in den USA angewandt werden, zu deutlich höheren Bemessungswerten (am Referenzstandort) führen als der statistische Ansatz nach KTA 2207.

Die Methodik der PMF stellt ein deterministisches und konservatives Szenario dar. Eine PMF ist nicht mit einer bestimmten Wiederkehrperiode verknüpft, sondern soll die nach derzeitigem Kenntnisstand maximal zu erwartende und damit abdeckende Flut beschreiben.

3.1.2 Vorgehensweise zur Bestimmung der PMF

Die weitere Vorgehensweise wird hier zunächst nur grob umrissen, um als roter Faden zu dienen. Details werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Einen vereinfachten Überblick gibt das Ablaufdiagramm in **Abb. 3.1**.

Ausgehend vom Einzugsgebiet des Mains oberhalb des Pegels Schweinfurts werden zunächst in diesem Einzugsgebiet weitere Pegel ausgewählt. Die Auswahl der Pegel richtet sich nach den Kriterien

- Verfügbarkeit und Länge der Zeitreihe des Pegel­datensatzes,
- vollständige Erfassung aller Zuflüsse,
- nicht stark voneinander abweichende Größen der jeweiligen Einzugsgebiete und
- Anzahl der Wetterstationen im Einzugsgebiet.

Für jeden so ausgewählten Pegel werden „Teileinzugsgebiete“⁶ (TEG) definiert (Abschnitt **3.2.2**). Die Unterteilung in TEG umfasst für Pegel, die keine oberhalb gelegenen Pegel haben, das Einzugsgebiet des Pegels. Für Pegel, die einen oberhalb gelegenen Pegel haben, wird der Teil des Einzugsgebiets des Pegels, der noch nicht durch TEGs oberhalb gelegener Pegel erfasst wird, in weitere TEGs zerlegt und diese neuen TEGs

⁶ Diese sogenannten Teileinzugsgebiete können sich überlappen. Sie dienen der Zuordnung von Wetterstationen zu den jeweiligen Pegeln. Die Gebiete werden so gewählt, dass sie das gesamte Einzugsgebiet überdecken.

dem Pegel zugeordnet. Allen so definierten TEGs werden in einem weiteren Schritt die im TEG liegenden Wetterstationen (WS) zugeordnet.

Für jeden der betrachteten Pegel werden die Hochwasserereignisse ermittelt (Abschnitt **3.4.4**). Dazu werden bei Pegeln, die keine oberhalb liegende Pegel haben, die Abweichungen der Abflussmengen (HQ) von der mittleren Wasserführung am Pegel erfasst. Für Pegel, die oberhalb gelegene Pegel haben, wird dazu der Zufluss aus den oberhalb gelegenen Pegeln berücksichtigt (Abschnitte **3.4.2** und **3.4.3**). Dies geschieht indem reduzierte Pegeldatensätze erstellt werden. Bei diesem reduzierten Pegeldatensatz wird für den betrachteten Pegel für jeden Tag des Hochwasserereignisses die Differenz zwischen gemessenen Pegelabflüssen und den Zuflüssen aus den oberhalb gelegenen Pegeln gebildet. Dabei wird für jeden Zulaufpegel die Laufzeit der Hochwasserwelle vom Zulaufpegel zum betrachteten Pegel berücksichtigt. Die Verwendung von reduzierten Pegeldatensätzen (HQ_{red}) dient zur Zuordnung von Hochwasserereignissen zu den Niederschlägen (N) (s. u.) in den dem Pegel zugeordneten TEGs.

Zu den Hochwasserereignissen am Pegel werden die zugehörigen Niederschlagsdaten (N_{WS}) (Abschnitte **3.3** und **3.4.4**) der Wetterstationen der dem Pegel zugeordneten TEGs erfasst und daraus der Gebietsniederschlag (GNT) dieser Teileinzugsgebiete abgeleitet. Sofern einem Pegel mehr als ein TEG zugeordnet ist, werden diese kombiniert. Die so erhaltenen wirksamen Niederschläge (N) dienen als Grundlage der weiteren Auswertung.

Für jedes betrachtete Hochwasserereignis geht das Modell (Abschnitt **3.4.6**) als vereinfachte Modellannahme davon aus, dass die tägliche Änderung der (reduzierten) Abflussmenge am Pegel (ΔHQ_{red}) proportional ist zum gefallenem Tagesniederschlag (N) in den dem Pegel zugeordneten TEGs. Zudem hängt im Modell die Änderung der (reduzierten) Abflussmenge von der Niederschlagshistorie und den bereits erfolgten Abflüssen aus dem Einzugsgebiet ab. Dies ist so zu verstehen, dass die Änderung der reduzierten Abflussmenge auch abhängig ist von den kumulierten Niederschlägen (N_{kum}) und den kumulierten Abflüssen (Q_{kum}) (Abschnitt **3.4.5**), die sich aus den Messwerten der Vortage ergeben. Dies ist begründet durch die folgenden Annahmen:

- Niederschläge an den Vortagen fließen zum Teil verzögert ab und tragen so zum aktuellen Abfluss bei. Das Modell nimmt vereinfacht an, dass dieser Anteil durch die Kumulation der Niederschläge beschrieben werden kann.

- Bereits erfolgte Abflüsse an den Vortagen hingegen führen zu einem negativen Beitrag in den Änderungen der Pegelmesswerte.

Zudem ist ein gewisser Tagesniederschlag notwendig, um die mittlere Abflussmenge aufrecht zu halten. Dieser „Mindestniederschlag“ wird im Modell mit einer Konstanten erfasst.

Daraus ergibt sich für jeden betrachteten Pegel ein Modell mit vier Parametern (Abschnitt **3.4.7**). Diese Parameter werden für jedes Hochwasserereignis am Pegel ermittelt (Abschnitt **3.5.1**) und daraus Parameter für ein abdeckendes Hochwasserereignis am Pegel abgeleitet (Abschnitt **3.5.2**).

Zur Ermittlung eines abdeckenden Hochwassers benötigt man außer den Parametern für das abdeckende Hochwasser noch abdeckende Niederschläge für jedes TEG (Abschnitt **3.3.4**). Aus den ermittelten abdeckenden Niederschlägen (N_{extr}) für jedes TEG und den Parametern für ein abdeckendes Hochwasser für jeden Pegel lassen sich für jeden Pegel die (reduzierten) abdeckenden Hochwasserabflüsse ($HQ_{\text{extr},(\text{red})}$) ermitteln. Diese (reduzierten) abdeckenden Hochwasserabflüsse für die Pegel werden unter Berücksichtigung der Laufzeiten der Hochwasserwellen zwischen zwei Pegeln überlagert und so schließlich das abdeckende Hochwasser am Pegel Schweinfurt ermittelt (Abschnitt **3.5.3**).

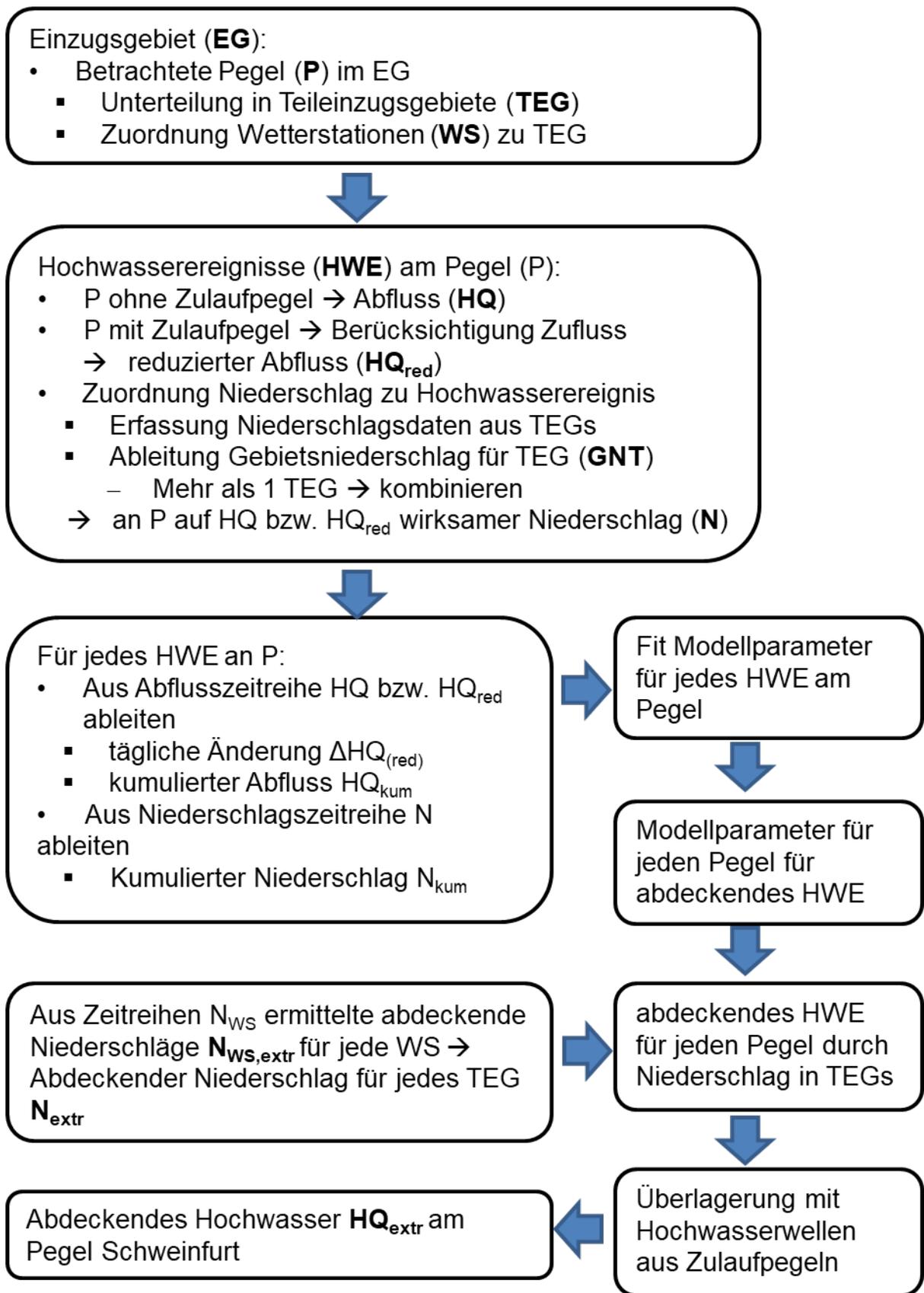


Abb. 3.1 Vereinfachtes Ablaufdiagramm der Hochwasserermittlung am Pegel Schweinfurt aus extremen Niederschlägen

3.1.3 Datengrundlage und Urheberrechte

Dem Vorhaben zu Grunde liegen Niederschlagsdaten von 428 Wetterstationen des Deutschen Wetter Dienstes (DWD), die über einen freien Zugang zu WESTE XL (WEt-terdaten und –STatistiken Express) des DWD einzeln angefordert wurden /WES 16/. Diese Daten sind urheberrechtlich geschützt, dürfen jedoch ohne Einschränkung genutzt und mit Quellenangaben weiterverwendet werden.

Ferner liegen dem Vorhaben Abflussdaten von 102 Pegeln im Einzugsgebiet der Regnitz und des Mains zu Grunde. Diese Daten unterliegen der Creative Commons BY 4.0 Lizenz. Die Datenquelle ist /GKD 16/.

3.1.4 Abschätzung eines Hochwasserabflusses mittels Faustformel

Man kann mittels einer einfachen Abschätzung (Faustformel) zu einem Höchstabfluss kommen, wenn man annimmt, dass alle Speichermöglichkeiten des Einzugsgebiets erschöpft sind und somit der fallende Niederschlag im Einzugsgebiet „direkt“ abfließt⁷. Unter der weiteren Annahme, dass dieser Zustand lange genug anhält, um auch die unterschiedlichen Fließzeiten der Nebenflüsse zu berücksichtigen, lässt sich dann eine Faustformel ableiten:

$$HWQ = EF * TN * \frac{1000 \frac{m^3}{km^2}}{1 \frac{l}{m^2}} * \frac{1 d}{86400 s} \quad (3.1)$$

wobei HWQ der zu erwartende Hochwasserabfluss in m³/s, EF die Fläche des Einzugsgebiets in km² und TN der Tagesniederschlag in l/(m²d) ist. Die konstanten Faktoren ergeben sich aus der Umrechnung von l/m² in m³/km² und aus der Umrechnung von Tag in Sekunden. Dies stellt eine vom weiteren Vorgehen unabhängige Schätzung eines Höchstabflusses dar.

Für den Pegel Schweinfurt mit einem Einzugsgebiet von 12.715 km² bedeutet das unter der Annahme, dass flächendeckend und konstant über mehrere Tage (1 Woche und

⁷ Die Verdunstung aus dem Einzugsgebiet wird ignoriert.

mehr) der Tagesniederschlag $100 \text{ l}/(\text{m}^2\text{d})$ beträgt, einen maximal zu erwartenden Abfluss von $14.716 \text{ m}^3/\text{s}$. Entsprechend höhere oder niedrigere Werte werden abgeschätzt, wenn man höhere oder niedrigere Tagesniederschläge ansetzt, die über mehrere Tage anhalten.

Diese Abschätzung ist aus mehreren Gründen unrealistisch (auch im Sinne eines „Worst Case“-Szenario), d. h. konservativ. Zum einen ist die Annahme komplett erschöpfter Speichermöglichkeiten sehr unwahrscheinlich⁸, da auch bei Sättigung des Bodens aus den oberen Schichten stets ein Abfluss in tiefere Bodenschichten stattfindet. Zum anderen sind erstens reale Niederschlagsereignisse nicht so gleichförmig und zweitens extreme Niederschläge dieser Größenordnung in der betrachteten Region nicht über mehrere Tage (oder eine Woche und mehr) zu erwarten.

3.2 Einzugsgebiet

3.2.1 Beschreibung des Einzugsgebiets

Der Main oberhalb von Schweinfurt ist geprägt durch den Zusammenfluss des Mains mit der Regnitz bei Bamberg. Diese beiden Flusssysteme werden nachfolgend näher beschrieben.

Am Zusammenfluss der fränkischen und der schwäbischen Rezat entsteht die Rednitz. Die fränkische Rezat entspringt auf der Frankenhöhe, die schwäbische Rezat entspringt am Fuß der südlichen fränkischen Alb. Die Rednitz fließt in nördlicher Richtung und bildet bei Fürth mit der (orographisch) von rechts einmündenden Pegnitz die Regnitz. Die Pegnitz entspringt in der Stadt Pegnitz in der fränkischen Schweiz (nördliche fränkische Alb). Die Regnitz fließt weiterhin in nördlicher Richtung. Von rechts mündet u. a. die Wiesent, von links die Aisch und die Rauhe Ebrach. Die Wiesent entspringt in der fränkischen Schweiz, die Aisch und die Rauhe Ebrach im Steigerwald. Über weite Strecken verläuft die Rednitz „parallel“ zum Main-Donau-Kanal, während die Regnitz auf ihrer gesamten Länge parallel zum Main-Donau-Kanal bzw. im selben Bett verläuft.

⁸ Eine weitgehende Erschöpfung der Speichermöglichkeiten kann aber beispielsweise bei stark gefrorenem Boden nach einer strengen Frostperiode auftreten.

Der Main entsteht aus dem Zusammenfluss von rotem und weißem Main bei Kulmbach. Der rote Main entspringt auf der nördlichen fränkischen Alb unweit der Pegnitz, der weiße Main im Fichtelgebirge. Der Main fließt zuerst in nordwestlicher Richtung, um dann nach und nach in fast südliche Richtung abzubiegen. Vor Lichtenfels fließt die Rodach von rechts in den Main. Die Rodach entspringt im Frankenwald. Ebenfalls von rechts münden bei Baunach die Itz, die im Thüringer Schiefergebirge entspringt, und die Baunach, die in den Haßbergen entspringt.

Nach dem Zusammenfluss der Regnitz mit dem Main fließt dieser in ungefähr nordöstlicher Richtung bis Schweinfurt, wo er scharf nach Süden abbiegt, bei Haßfurth mündet von rechts die Nassach, die in den Haßbergen entspringt.

3.2.2 Einteilung des Einzugsgebiets in Teileinzugsgebiete

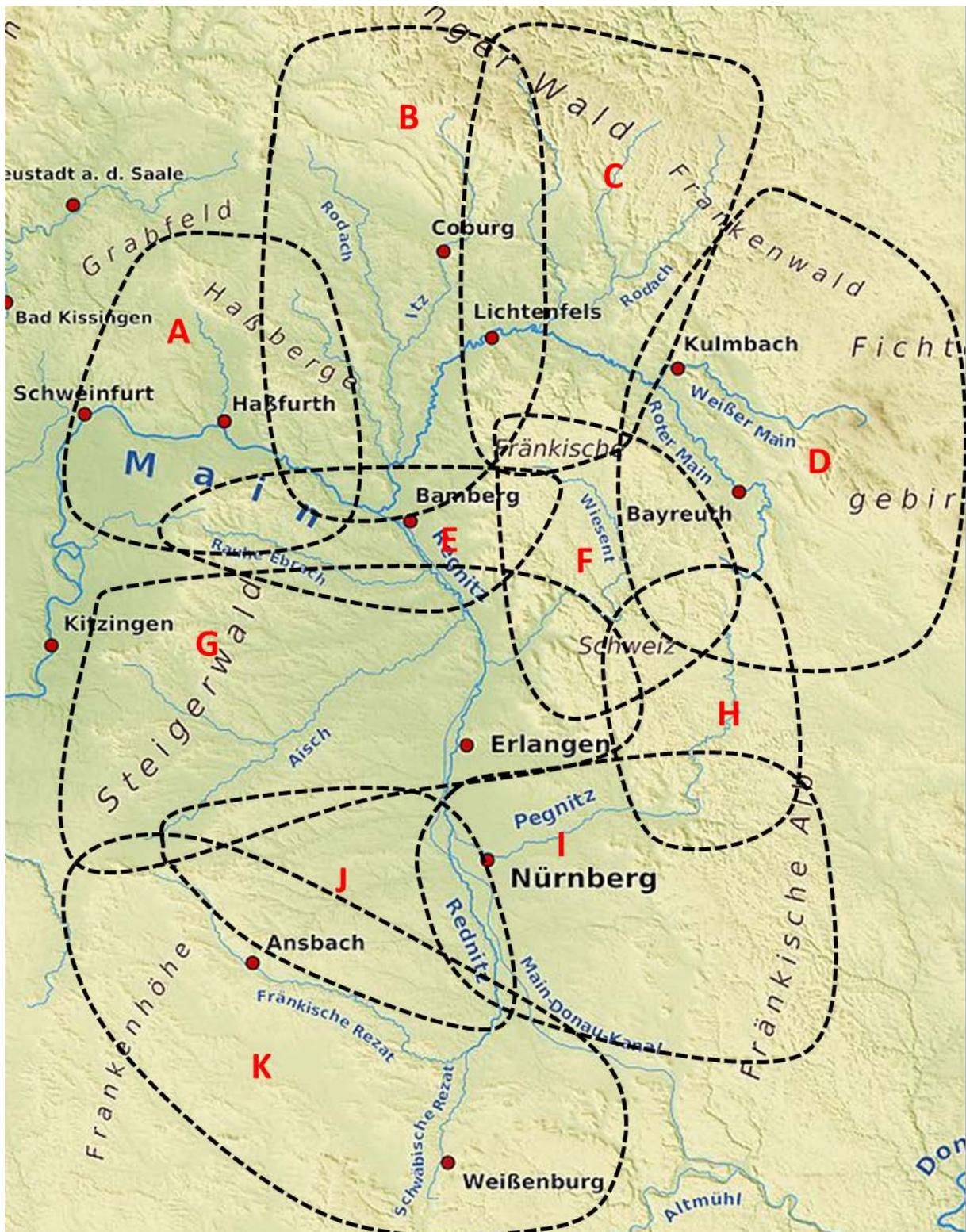


Abb. 3.2 Schematische Darstellung der überlappenden Unterteilung des Einzugsgebiets des Mains oberhalb von Schweinfurt in kleinere, den betrachteten Pegeln zugeordnete Gebiete (TEGs)

Die Unterteilung des Einzugsgebiets des Mains, wie in **Abb. 3.2** schematisch dargestellt, richtet sich nach

- der Lage der ausgewählten Pegel, die nicht unbedingt in der Nähe von Mündungen liegen müssen,
- den größeren Neben- bzw. Quellflüssen,
- der angestrebten Überdeckung der Teileinzugsgebiete durch Wetterstationen und
- der Tatsache, dass bei kleinen Einzugsgebieten die Pegel sehr „empfindlich“ reagieren und dieser Effekt durch größere Einzugsgebiete eher gemittelt wird.

Die Unterteilung des Einzugsgebietes in kleinere Gebiete (TEGs) ist in der nachfolgenden **Tab. 3.1** aufgeführt. Die TEG werden den Pegeln zugeordnet. Sofern die Pegel auch Zufluss aus oberhalb gelegenen Pegeln erhalten, werden auch diese Zulaufpegel aufgeführt.

Die Überlappung in der schematischen Darstellung in **Abb. 3.2** ist beabsichtigt, um eine sichere Überdeckung des jeweiligen Gebiets durch Wetterstationen zu erhalten. Dabei werden einzelne Wetterstationen für mehr als ein Gebiet zur Ermittlung des Gesamtniederschlags in diesem Gebiet herangezogen. Da der Gesamtniederschlag jedoch in diesem Vorhaben nicht als absolute Zahl, sondern nur als Maß (Schätzwert) für die gefallenen Niederschläge im jeweiligen Gebiet, herangezogen wird, ergeben sich daraus keine Probleme.

Die Pegel Schweinfurt und Hüttendorf haben jeweils zwei zugeordnete Niederschlagsgebiete. Die Gebiete A und E sind dem Pegel Schweinfurt zugeordnet, da ursprünglich das Gebiet E dem Pegel Trunstadt zugeordnet war, dieser aber in die weitere Betrachtung nicht einfluss. Die Gebiete I und J sind dem Pegel Hüttendorf zugeordnet, da ein großes Gebiet, das sich über beide Bereiche erstreckte, impraktikabel erschien.

Tab. 3.1 Einteilung des Einzugsgebiets des Mains in kleinere Gebiete (TEG) und Zuordnung zu den Pegeln

| Gebiet | Beschreibung | Pegel | Zulaufpegel |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
| A | Umfasst rechts- und linksseitige Zuflüsse des Mains unterhalb Trunstadt | Schweinfurt Neuer Hafen (Main) | Pettstadt (Regnitz) Kemmern (Main) |
| B | Umfasst insbesondere rechtsseitige Zuflüsse des Mains wie Itz, Rodach und Baunach | Kemmern (Main) | Schwüribitz (Main) |
| C | Umfasst insbesondere rechtsseitige Zuflüsse des Mains wie Rodach und Steinach | Schwüribitz (Main) | Mainleus (Main) |
| D | Umfasst das Einzugsgebiet des Roten und des Weißen Mains | Mainleus (Main) | keine |
| E | Umfasst rechts- und linksseitige Nebenflüsse der Regnitz bis zur Einmündung in den Main und den Main bis Trunstadt | Schweinfurt Neuer Hafen (Main) | Pettstadt (Regnitz) Kemmern (Main) |
| F | Umfasst den Oberlauf der Wiesent | Muggendorf | keine |
| G | Umfasst die Nebenflüsse der Regnitz, insbesondere die Aisch (linksseitig) und die untere Wiesent (rechtsseitig) | Pettstadt (Regnitz) | Muggendorf (Wiesent) Hüttendorf (Regnitz) |
| H | Umfasst den Oberlauf der Pegnitz | Hohenstadt (Pegnitz) | keine |
| I | Umfasst den Unterlauf der Pegnitz und die rechten Nebenflüsse der Rednitz | Hüttendorf (Regnitz) | Hohenstadt (Pegnitz) |
| J | Umfasst die linken Nebenflüsse der Rednitz | Hüttendorf (Regnitz) | Roth Kläranlage (Rednitz) |
| K | Umfasst insbesondere die fränkische und schwäbische Rezat und die obere Rednitz | Roth Kläranlage (Rednitz) | keine |

3.3 Ermittlung der Gesamtniederschläge eines Gebiets

3.3.1 Daten

Die Daten der 428 Wetterstationen des DWD im und um das Einzugsgebiet des Mains wurden analysiert. Zeitreihen mit weniger als 40 Jahren Daten und weniger als 97 % Abdeckung des Zeitraums wurden aussortiert. Ebenso wurden Zeitreihen von Wetterstationen, die weniger als zwei Kilometer auseinander liegen, zusammengefasst zu jeweils einer Zeitreihe. Dies geschieht mittels der Korrelation zwischen zwei nahe beieinander liegender Wetterstationen und dient zur Ergänzung der jeweils längeren Zeitreihe. Dies erfolgt auch um nahe beieinander liegende Wetterstationen nicht separat bei der Triangulierung des Gebiets berücksichtigen zu müssen.

Insgesamt betraf das nach der Zusammenführung vier Wetterstationen im betrachteten Gebiet. Diese Zusammenfassung erfolgte, um die Ermittlung des flächengewichteten Niederschlags zu vereinfachen. Die Ermittlung der Korrelationen zwischen den Zeitreihen erfolgt mittels eines modifizierten Theil-Sen-Schätzers, wie er in Anhang **A.1.2** beschrieben wird.

Im betrachteten Gebiet verbleiben so noch 161 Wetterstationen, die in die weitere Betrachtung einfließen. 157 davon sind Wetterstationen, deren Datenreihen nicht durch naheliegende Wetterstationen ergänzt wurden.

3.3.2 Korrelationen zwischen Wetterstationen

Für jedes der in Abschnitt **3.2.2** beschriebenen Gebiete wird eine Korrelationsmatrix der in diesem Gebiet befindlichen Wetterstationen berechnet, indem für jede Kombination von Wetterstationen dieses Gebiets die lineare Korrelation mittels des modifizierten Theil-Sen-Schätzers berechnet wird. Dazu wird von der Annahme ausgegangen, dass bei flächendeckenden Niederschlägen und bei räumlich nicht allzu weit voneinander entfernten Niederschlagsmessungen ein linearer Zusammenhang besteht und dieser lineare Zusammenhang eine Ursprungsgerade liefert. Es gibt dabei keine Garantie, dass diese Korrelationsberechnung konvergiert in dem Sinne, dass der Achsenabschnitt nicht wesentlich von Null verschieden ist. Nicht konvergierende Berechnungen werden in den Korrelationsmatrizen nicht berücksichtigt, es verbleiben jedoch ausreichend paarweise Korrelationen, um die Berechnung des flächengewichteten Niederschlags gemäß Abschnitt **3.3.3** zu unterstützen.

Dem Gebiet A sind 16, dem Gebiet B 27, dem Gebiet C 38, dem Gebiet D 30, dem Gebiet E 17, dem Gebiet F 19, dem Gebiet G 28, dem Gebiet H 29, dem Gebiet I 22, dem Gebiet J 20 und dem Gebiet K 30 Wetterstationen zugeordnet.

3.3.3 Flächengewichteter Niederschlag

Die Ermittlung des flächengewichteten Niederschlags für ein TEG erfolgt wie in Anhang A.2 dargestellt. Dazu wird das betrachtete Gebiet mittels einer Triangulation aller darin befindlicher Wetterstationen aufgeteilt. Für jedes Dreieck der Triangulation wird der arithmetische Mittelwert über die Niederschläge der drei beteiligten Wetterstationen berechnet und dieser Mittelwert mit der Fläche des Dreiecks gewichtet. Die Summe aller dieser gewichteten Mittelwerte wird dann noch durch die Gesamtfläche aller Dreiecke geteilt, um den flächengewichteten Mittelwert zu erhalten. Dieser flächengewichtete Niederschlag ist der GNT für das betrachtete TEG. Für Pegel mit nur einem zugeordneten TEG ist der am Pegel wirksame Niederschlag N_{wirk} gleich dem GNT. Für Pegel mit mehr als einem zugeordneten TEG ergibt sich der am Pegel wirksame Niederschlag aus der flächengewichteten Summe der GNTs der zugeordneten TEGs (s. u.).

Zur Ermittlung des flächengewichteten Niederschlags werden sämtliche Niederschläge eines Gebiets an einem Tag herangezogen. Bestehen Lücken in den Datenreihen der einzelnen Wetterstationen, werden diese Lücken mittels der Korrelation zwischen dieser Wetterstation und den anderen Wetterstationen im betrachteten Gebiet geschlossen. Dazu werden Niederschläge von Stationen, die in der Korrelationsmatrix eine Korrelation mit der lückenhaften Wetterstation aufweisen, jeweils in einen Ersatz-niederschlag für diese Station umgerechnet und anschließend der Mittelwert über sämtliche, so ermittelte Ersatzniederschläge gebildet.

Liegen also z. B. für ein Gebiet und einen bestimmten Tag an einer (oder mehreren) Wetterstation(en) keine Niederschlagsdaten vor, dann werden diese, für jede Wetterstation mit fehlenden Daten, wie folgt berechnet

$$N_{\text{fehl}} = \sum_{i=1}^{n'} \frac{N_i k_i}{n'}, \quad (3.2)$$

wobei n' die Anzahl der Wetterstationen darstellt, die eine Korrelation mit der fehlenden Wetterstation aufweisen und selbst Niederschlagsdaten für diesen Tag haben. N_i ist der

Niederschlag an der i-ten Wetterstation, die in der Korrelationsmatrix mit der fehlenden Wetterstation eine Korrelation aufweist und k_i ist diese Korrelation mit der fehlenden Wetterstation.

Pegel mit mehr als einem zugeordneten TEG

Die Gebiete A und E sind beide dem Pegel Schweinfurt zugeordnet. Da das Gebiet E aber ursprünglich dem Pegel Trunstadt zugeordnet war, wird der GNT des Gebiets E nicht als sofort wirksam am Pegel Schweinfurt angesehen. Die mittlere Laufzeit einer Hochwasserwelle von Trunstadt nach Schweinfurt beträgt zwölf Stunden, daher wird der flächengewichtete Niederschlag des Gebietes E als mit zwölf Stunden Verzögerung am Pegel Schweinfurt wirkend angesehen. Daraus wird ein – rechnerisch – direkt wirksamer flächengewichteter Niederschlag gebildet.

$$N_{E,wirk}(k) = \frac{GNT_E(k-1) - GNT_E(k)}{2} \quad (3.3)$$

Dazu wird für jeden betrachteten Tag k der Mittelwert des flächengewichteten Niederschlags des Gebiets E aus diesem Tag $GNT_E(k)$ und dem Vortag $GNT_E(k-1)$ gebildet und dieser Mittelwert wieder dem betrachteten Tag k zugeordnet. Der so rechnerisch zeitlich verschobene Niederschlag wird als gleichzeitig mit dem Niederschlag im TEG A am Pegel Schweinfurt wirkend aufgefasst. Für das TEG A ist der GNT gleich dem wirksamen Niederschlag N_A .

Da die Gebiete A und E unterschiedliche Flächen haben, werden die Niederschläge N_A und $N_{E,wirk}$ entsprechend ihrer Flächen gewichtet addiert:

$$N_{Schweinfurt} = \frac{F_A N_A + F_E N_{E,wirk}}{F_A + F_E} \quad (3.4)$$

Dabei ist N der wirksame Niederschlag im betrachteten Gebiet und F die jeweilige Fläche des Gebiets. $N_{Schweinfurt}$ ist dann der Niederschlag, der am Pegel Schweinfurt direkt wirksam wird.

Die Gebiete I und J sind dem Pegel Hüttendorf zugeordnet und werden beide als direkt wirksam am Pegel Hüttendorf angesehen. Aus den flächengewichteten Niederschlägen

der Gebiete I und J wird analog zum Pegel Schweinfurt ein flächengewichteter Niederschlag gemäß Gleichung **3.4** errechnet.

3.3.4 Ermittlung eines abdeckenden Niederschlagsereignisses

Die Grundidee des „Probable Maximum Flood“-Verfahrens ist es, einen für ein Gebiet abdeckenden Niederschlag anzusetzen und daraus das zu erwartende abdeckende Hochwasserereignis zu ermitteln. Abschnitt **2.5** legt nahe, dass es – zumindest hinsichtlich der Eintagesniederschlagsmengen – kein solches abdeckendes Ereignis gibt, da die verwendete Gumbelverteilung⁹ keine Obergrenze besitzt. Um dennoch zu einem abdeckenden Ereignis¹⁰ zu kommen, wird im Folgenden konservativ angenommen, dass der jeweilige Mittelwert des Eintagesniederschlags mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode an jeder Wetterstation im Einzugsgebiet an mehreren aufeinander folgenden Tagen auftritt. Dies führt zu einem Ereignis, das deutlich seltener als einmal in 10.000 Jahren auftritt, da für Niederschläge mit mehreren Tagen Dauer der Durchschnittsniederschlag deutlich kleiner ist als der tägliche Maximalwert. Ebenso ist es unwahrscheinlich, dass alle Wetterstationen eines Gebiets simultan solche abdeckenden Niederschläge erhalten.

Konkret wird in diesem Vorhaben ein Niederschlagsereignis von neun Tagen Dauer zugrunde gelegt. Am ersten Tag fallen in jedem betrachteten Gebiet an jeder Wetterstation 12,5 % des jeweiligen 10.000-jährigen Eintagesereignisses, am zweiten 25 %, am dritten 50 %, vom vierten bis sechsten Tag dann 100 %, am siebten wieder 50 %, am achten wieder 25 % und am neunten Tag wieder 12,5 %. Dies ist begründet darin, dass

- die Zeitdauer des angesetzten Niederschlags ein Mehrfaches der Laufzeit einer Hochwasserwelle im Einzugsgebiet abdecken soll und
- ein solches Niederschlagsprofil nach Einschätzung der GRS als abdeckend angesehen werden kann.

Dazu wird für jede der – unergänzten – 157 Wetterstationen der Mittelwert des Tagesniederschlags mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode analog zu Abschnitt **2.5** ermittelt. Mittels der Korrelationen zwischen den Wetterstationen werden dann vergleichbare

⁹ Nach /BRI 09/ ist die Gumbelverteilung zumindest bis zu Wiederkehrperioden von etwa 50.000 Jahren anwendbar.

¹⁰ Abdeckend im Sinne von „seltener als einmal in 10.000 Jahren.“

Werte auch für die vier Wetterstationen berechnet, deren Zeitreihen aus zwei Wetterstationsdaten zusammengefasst wurden. Aus allen 161 Wetterstationen werden schließlich die wirksamen abdeckenden Niederschläge (N_{extr}) für die einzelnen TEGs berechnet. Für die Pegel Schweinfurt und Hüttendorf werden aus den jeweils zwei zugeordneten Gebieten die wirksamen abdeckenden Niederschläge berechnet.

Tab. 3.2 Angesetzte abdeckende Niederschlagsereignisse für die betrachteten Pegel in Liter pro Quadratmeter und Tag

| Tag | Pegel | | | | | | | | | | |
|-----|-------------|---------|-------------|----------|------------|-----------|-------------|--------------|--------|---|--|
| | Schweinfurt | Kemmern | Schwuerbitz | Mainleus | Muggendorf | Pettstadt | Hohensstadt | Huetten-dorf | Roth | | |
| 1. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 2. | 12,56 | 15,52 | 16,68 | 17,44 | 17,19 | 18,38 | 17,56 | 18,02 | 16,77 | | |
| 3. | 29,75 | 31,04 | 33,36 | 34,89 | 34,38 | 36,76 | 35,13 | 36,05 | 33,54 | | |
| 4. | 59,51 | 62,08 | 66,72 | 69,77 | 68,75 | 73,51 | 70,25 | 72,09 | 67,08 | | |
| 5. | 119,02 | 124,17 | 133,43 | 139,55 | 137,50 | 147,03 | 140,50 | 144,19 | 134,17 | | |
| 6. | 137,52 | 124,17 | 133,43 | 139,55 | 137,50 | 147,03 | 140,50 | 144,19 | 134,17 | | |
| 7. | 137,52 | 124,17 | 133,43 | 139,55 | 137,50 | 147,03 | 140,50 | 144,19 | 134,17 | | |
| 8. | 87,27 | 62,08 | 66,72 | 69,77 | 68,75 | 73,51 | 70,25 | 72,09 | 67,08 | | |
| 9. | 43,63 | 31,04 | 33,36 | 34,89 | 34,38 | 36,76 | 35,13 | 36,05 | 33,54 | | |
| 10. | 21,82 | 15,52 | 16,68 | 17,44 | 17,19 | 18,38 | 17,56 | 18,02 | 16,77 | | |
| 11. | 4,63 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 12. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 13. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |

Tab. 3.2 gibt die für die einzelnen Pegel angesetzten Niederschlagsereignisse an. Die Werte ergeben sich aus dem neuntägigen Niederschlagsprofil und den für jede Wetterstation ermittelten Tagesniederschlag mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode. Insgesamt umfassen diese 13 Tage. Der erste Tag ohne Niederschlag und die Tage zum Ende ohne Niederschlag wurden aus rechentechnischen Gründen angesetzt. Für den Pegel Schweinfurt ergibt sich aus der zeitversetzten Ansetzung der Niederschläge in den Gebieten A und E ein rechnerisch zehntägiges Niederschlagsereignis.

3.4 Abflussmodell

3.4.1 Generelles Vorgehen

Jedem betrachteten Pegel werden Gebiete mit Niederschlägen zugeordnet. Von Interesse für dieses Vorhaben sind die Reaktionen der Abflussmengen am jeweiligen Pegel auf die zugeordneten Niederschläge. Für Pegel, die keine Zulaufpegel haben, hängt dann die Änderung des Abflusses direkt mit den Niederschlägen im zugeordneten Gebiet zusammen.

Bei Pegeln, die Zulaufpegel haben, hängt diese Änderung allerdings nicht nur davon ab, sondern auch von der Änderung der Zulaufmenge aus oberhalb liegenden Pegeln. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wird bei diesen Pegeln der Zulauf aus oberhalb liegenden Pegeln berücksichtigt, indem der Einfluss der Zulaufmengen herausgerechnet wird. Dieser reduzierte Abfluss wird dann im Folgenden als abhängig vom Niederschlag in den dem Pegel zugeordneten Gebieten betrachtet. Bei der Berechnung des reduzierten Abflusses werden die Laufzeiten zwischen den betrachteten Pegeln berücksichtigt.

Nach Ermittlung der (reduzierten) Abflüsse an den Pegeln werden für diese Abflüsse Hochwasserereignisse ermittelt und diesen Hochwasserereignissen jeweils Tagesniederschläge, kumulierte Niederschläge und kumulierte Abflüsse zugeordnet.

Danach werden die Änderungen der (reduzierten) Abflüsse als lineare Funktion der Tagesniederschläge, der kumulierten Niederschläge und kumulierten Abflüsse aufgefasst und reale Hochwasserereignisse an den betrachteten Pegeln mit diesem einfachen Modell beschrieben.

3.4.2 Reduzierte Abflüsse

Zur Herausrechnung des Einflusses der Zulaufmengen werden in diesem Vorhaben reduzierte Abflüsse für Pegel, die unterhalb von bereits betrachteten Pegeln liegen, ermittelt. Dazu werden für jeden Tag des vorliegenden Pegeldatensatzes die Zuflussmengen aus oberhalb liegenden Pegeln unter Berücksichtigung der Laufzeiten (vgl. **Tab. 3.3**) zwischen diesen Pegeln betrachtet. Diese Zuflussmengen werden entsprechend der Laufzeiten zwischen den Pegeln als gewichteter Mittelwert aus dem Abfluss des Zulaufpegels am Vortag und am betrachteten Tag ermittelt. Der Zufluss aus einem Zulaufpegel ergibt sich also für den k-ten Tag zu:

$$HQ_{Zulauf} = \frac{(t_1 HQ(k-1) + (24 - t_1) HQ(k))}{24} \quad (3.5)$$

Dabei ist $HQ(k)$ der Abfluss am Zulaufpegel am Tag k und t_1 die Laufzeit zwischen den betrachteten Pegeln. Bei mehreren Zulaufpegeln ergibt sich die gesamte Zuflussmenge als Summe aus den so berechneten Zulaufmengen.

$$HQ_{Zulauf,ges} = \sum_{i=1}^n HQ_{Zulauf,i} \quad (3.6)$$

Dabei ist $HQ_{Zulauf,ges}$ der gesamten Zufluss aus allen Zulaufpegeln, n die Anzahl der Zulaufpegel und $HQ_{Zulauf,i}$ der i -te Zulaufpegel. Der reduzierte Pegelabfluss ergibt sich dann für jeden Tag k zu:

$$HQ_{Pegel,red}(k) = HQ_{Pegel}(k) - HQ_{Zulauf,ges}(k) \quad (3.7)$$

3.4.3 Angesetzte Laufzeiten der Hochwasserwelle

Für die Laufzeiten der Hochwasserwellen zwischen den einzelnen Pegeln wurden, sofern vorhanden, die Angaben in /GKD 16/ genutzt. Fehlende Werte wurden abgeschätzt. Die angesetzten Werte werden in **Tab. 3.3** angegeben.

Tab. 3.3 Angesetzte Laufzeiten der Hochwasserwelle zwischen zwei Pegeln

| Pegel | Laufzeit | Pegel | Laufzeit |
|------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| Mainleus → Schwuerbitz | 4,5 h | Roth Kl. → Huettendorf | 21 h |
| Schwuerbitz →Kemmern | 15 h | Hohenstadt → Huettendorf | 18 h |
| Kemmern →Schweinfurt | 17 h | Huettendorf → Pettstadt | 14 h |
| Pettstadt →Schweinfurt | 15,5 h | Muggendorf →Pettstadt | 15 h |

3.4.4 Hochwasserereignisse und zugehörige Niederschläge

Ein Hochwasserereignis im Sinne dieses Berichts tritt auf, wenn der (reduzierte) Abfluss am betrachteten Pegel gemäß Gleichung 3.7 zumindest an einem Tag das Dreifache des (reduzierten) mittleren Abflusses an diesem Pegel erreicht oder überschreitet und andauert, bis dieser dreifache (reduzierte) mittlere Abfluss wieder sicher unterschritten wird. Der reduzierte mittlere Abfluss ist zu verstehen als die Differenz zwischen mittlerem Abfluss am betrachteten Pegel minus mittlerem Abfluss der Zulaufpegel.

Wurde ein Hochwasserereignis für einen Pegel ermittelt, dann werden für die Tage des Hochwasserereignisses die dazugehörigen Niederschlagswerte der Wetterstationen der dem Pegel zugeordneten TEGs ermittelt. Aus diesen wird, wie in den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.3 erläutert, die zu dem Hochwasserereignis gehörigen flächengewichteten Niederschlagsdaten ermittelt. Ggf. wird bis zu vier Tage vor das Hochwasserereignis geblickt, um Niederschläge in diesem Zeitraum auch noch zu erfassen. Liegt (bzw. endet) in diesem Zeitraum (bis zu vier Tage) vor dem betrachteten Hochwasserereignis ein weiteres Hochwasserereignis, so werden die Ereignisse zu einem Hochwasserereignis zusammengefasst.

3.4.5 Kumulierte Niederschläge und Abflüsse

Aus den dem Hochwasserereignis zugeordneten Daten des am Pegel wirksamen Niederschlags wird der kumulierte Niederschlag berechnet. Dabei wird dem ersten Tag des Zeitraums der kumulierte Niederschlag Null zugeordnet. Für alle anderen Tage des betrachteten Zeitraums wird jeweils die Summe aller Niederschläge der Vortage als kumulierter Niederschlag aufgefasst. Es gilt also für den k-ten Tag:

$$N_{kum}(k) = \sum_{i=1}^{k-1} N(i) \quad (3.8)$$

Dabei ist N_{kum} der kumulierte Niederschlag und $N(i)$ der jeweilige am Pegel wirksame Niederschlag (vgl. Abschnitte **3.3.2** und **3.3.3**) am i -ten Tag des Hochwasserereignisses.

Das Vorgehen zur Ermittlung der kumulierten (reduzierten) Abflüsse $HQ_{kum,(red)}$ ist dazu völlig analog. Anstelle der Niederschläge der Vortage werden hier jedoch die (reduzierten) Abflüsse der Vortage aufsummiert.

$$HQ_{kum,(red)}(k) = \sum_{i=1}^{k-1} HQ_{(red)}(i) \quad (3.9)$$

3.4.6 Modellbildung

Ziel ist es, die täglichen Änderungen des (reduzierten) Pegelabflusses als lineare Funktion von vier Ausgangsgrößen (wirksamer Tagesniederschlag, kumulierter Niederschlag, kumulierter Abfluss und konstanter Term) zu beschreiben. Es gilt also für die Änderung des Hochwasserabflusses ($\Delta HQ_{(red)}$) am Tag k :

$$\Delta HQ_{(red)}(k) = aN(k) + b + cN_{kum}(k) + dHQ_{kum,(red)}(k) \quad (3.10)$$

Dabei bezeichnet N die wirksamen Tagesniederschläge gemäß Abschnitt **3.3.3**, N_{kum} die kumulierten Niederschläge und Q_{kum} die kumulierten Abflüsse gemäß Abschnitt **3.4.5**. Für jedes Hochwasserereignis werden dann die vier Parameter a , b , c und d bestimmt.

3.4.7 Anzahl der Parameter

Es wird ein Modell mit vier Parametern gewählt (siehe auch Abschnitt **3.1.2**, sechster Absatz), da ein Modell mit nur drei Parametern, die zum Tagesniederschlag, kumulierten Niederschlag und kumulierten Abfluss korrespondieren, wie sich in einem ersten Versuch gezeigt hat, in der Regel zu wesentlich schlechteren Ergebnissen der Fits an die Hochwasserereignisse führt.

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Fits an die Hochwasserereignisse

Tab. 3.4 Anzahl der ermittelten Hochwasserereignisse und der davon berücksichtigten Ereignisse

| Pegel | Daten (Tage) | Anzahl Hochwasserereignisse | Davon berücksichtigt |
|-----------------|--------------|-----------------------------|----------------------|
| Schweinfurt | 39081 | 238 | 202 |
| Kemmern | 29492 | 282 | 254 |
| Schwüritz | 27299 | 150 | 133 |
| Mainleus | 11959 | 132 | 123 |
| Pettstadt | 33510 | 253 | 189 |
| Muggendorf | 17743 | 66 | 62 |
| Hüttendorf | 22552 | 123 | 116 |
| Hohenstadt | 37160 | 124 | 97 |
| Roth Kläranlage | 17804 | 74 | 72 |

Für die einzelnen Pegel wurden unterschiedlich viele Hochwasserereignisse automatisch ermittelt und die jeweils dazugehörigen Fitparameter mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

Die Anzahl der ermittelten Hochwasserereignisse und die Anzahl der davon berücksichtigten Ereignisse sind in **Tab. 3.4** aufgeführt.

Die ermittelten Hochwasserereignisse und die dazu errechneten Fits wurden in einem ersten Schritt einer visuellen Inspektion unterzogen. Diese visuelle Inspektion dient in erster Linie dazu, um offensichtliche Unstimmigkeiten zu klären, wie zum Beispiel größere Lücken in den Pegeldatenreihen oder Niederschlagsdatenreihen. Konnten diese Unstimmigkeiten nicht behoben werden, dann wurde das entsprechende Hochwasserereignis aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

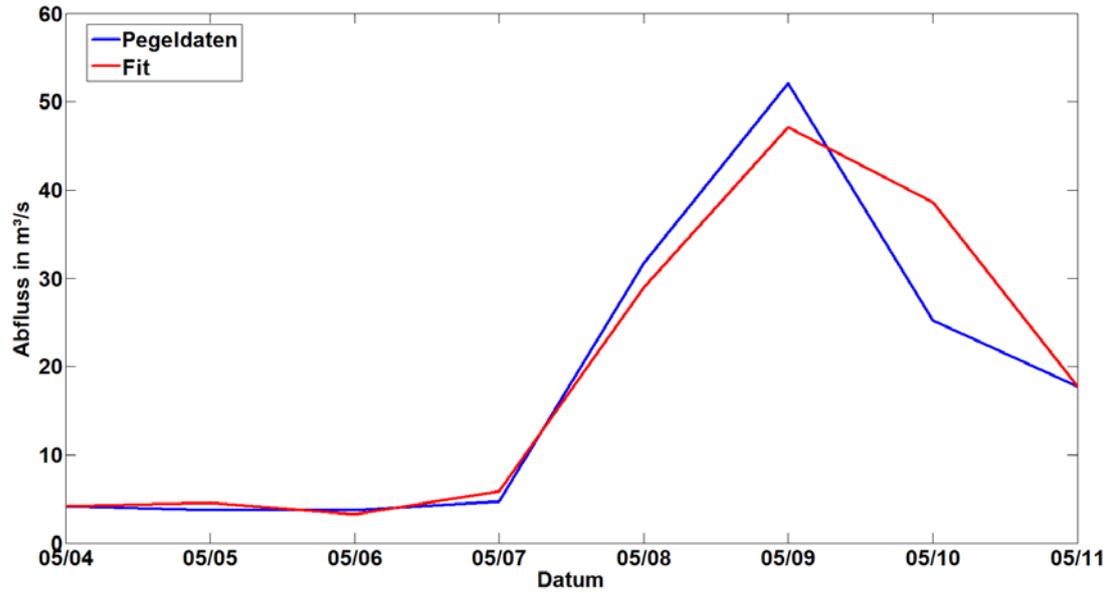


Abb. 3.3 1. Beispielbild für Hochwasser am Pegel Roth und Vergleich mit dem Fit

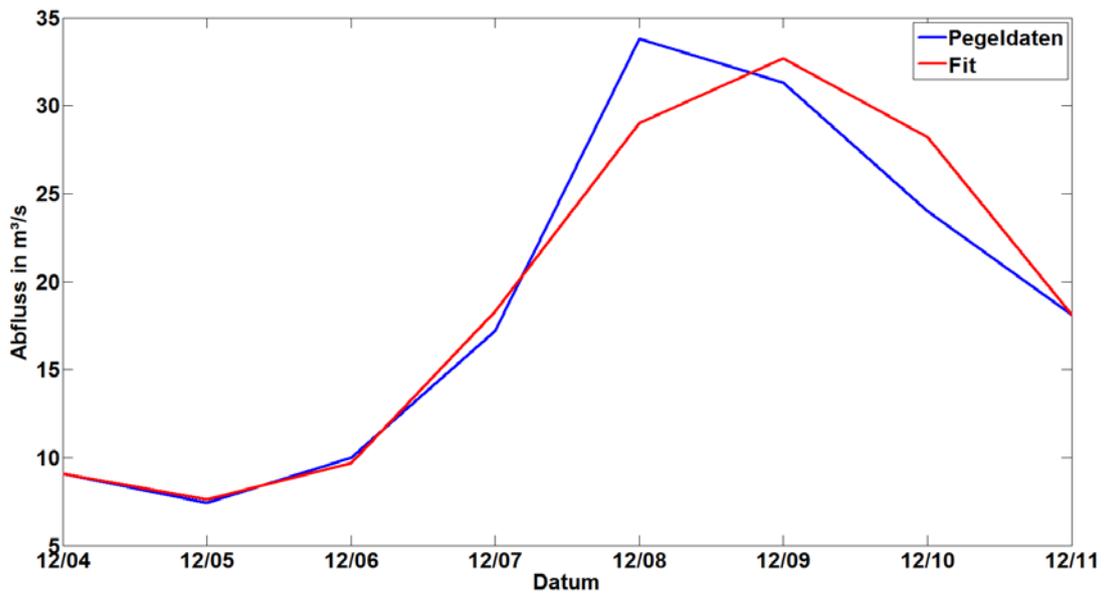


Abb. 3.4 2. Beispielbild für Hochwasser am Pegel Roth und Vergleich mit dem Fit

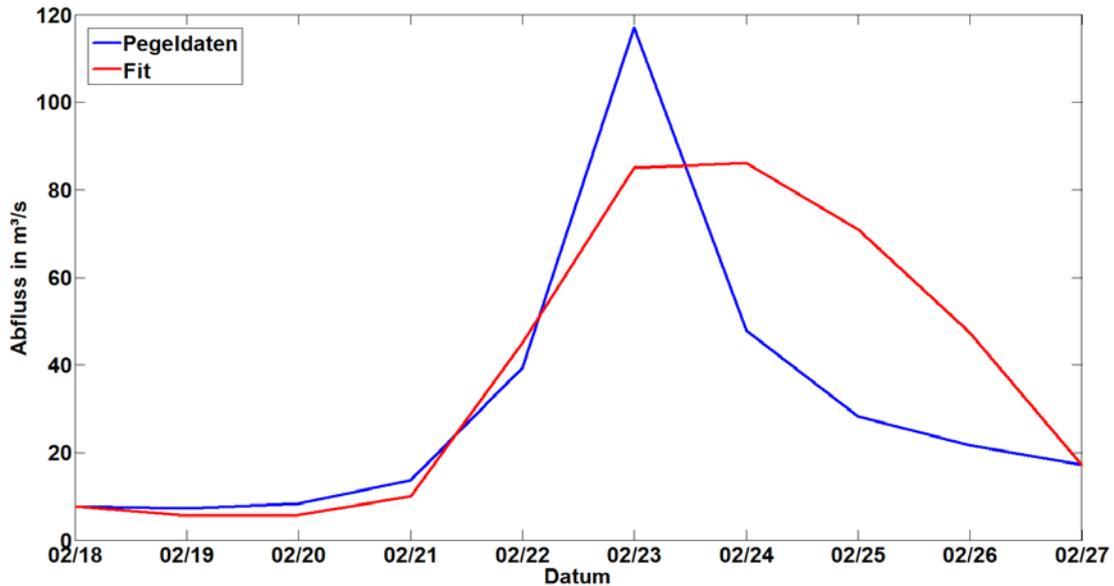


Abb. 3.5 3. Beispielbild für Hochwasser am Pegel Roth und Vergleich mit dem Fit

Hochwasserereignisse, die weniger als sieben Tage dauerten, wurden dabei nicht berücksichtigt. Ebenso wurden Hochwasserereignisse, die länger als 21 Tage dauerten nicht weiter berücksichtigt.

In einem letzten Schritt wurden Hochwasserereignisse, deren Parameter um mehrere Größenordnungen von den Parametern der übrigen Hochwasserereignisse abwichen (Ausreißer), manuell entfernt.

Abb. 3.3 bis **Abb. 3.5** zeigen Vergleichsbilder von drei am Pegel Roth gemessenen Hochwassern und daraus resultierenden Modellfits auf Grundlage der gemessenen Werte für Niederschläge und Abflüsse. Generelle Merkmale der Modellfits an die real beobachteten Hochwasserereignisse lassen sich daraus ablesen. Oft (aber nicht immer) wird der Maximalwert für das gerechnete Hochwasser erst einen Tag nach dem real gemessenen Hochwasser (**Abb. 3.4**) erreicht, auch die abfallende Flanke sieht meist deutlich anders aus. Bei schnell ansteigenden und wieder abfallenden Pegeln (**Abb. 3.5**) wird häufig der Maximalabfluss unterschätzt.

3.5.2 Extrapolation der Fitparameter zu hohen Niederschlägen

Zur Extrapolation werden die Parameter aller in die Auswertung einfließenden Hochwasserereignisse gegen charakteristische Größen des kombinierten Niederschlags- und Hochwasserereignisses aufgetragen. Als charakteristische Größen für das zu Grunde

liegende Niederschlagsereignis wurden der maximal aufgetretene Tagesniederschlag, der durchschnittliche Tagesniederschlag, der kumulative Niederschlag und der maximale durchschnittliche kumulative Niederschlag (der größte Quotient aus kumulativem Niederschlag eines Tages und der Anzahl der bis dato vergangenen Tage) und Kombinationen aus diesen Einflussgrößen, wie z. B. der Quotient aus maximalem Tagesniederschlag und durchschnittlichem Niederschlag betrachtet. Allerdings „kennt“ das Einzugsgebiet a priori nicht den zu erwartenden kumulativen Niederschlag. Insofern erscheinen charakteristische Größen, die darauf beruhen auch nicht sonderlich gut geeignet.

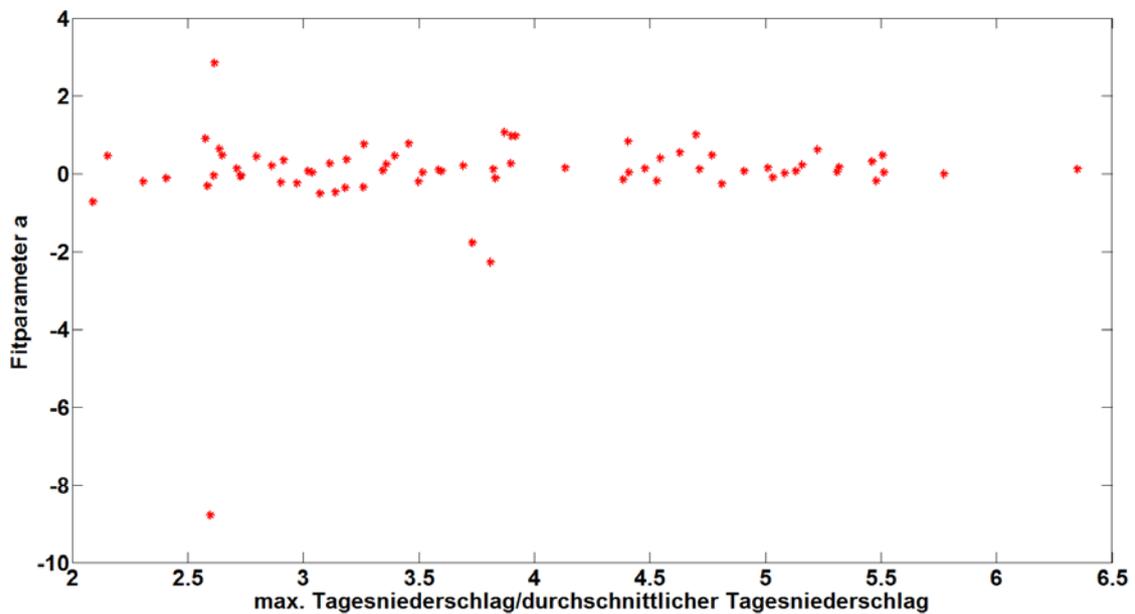


Abb. 3.6 Beispielbild für die Auftragung der Fitparameter, hier des Parameters a, gegen charakteristische Größen des Niederschlagsereignisses

Exemplarisch ist für den Pegel Roth in **Abb. 3.6** die Auftragung des Parameters a (Proportionalitätsfaktor bezüglich des Tagesniederschlages) gegen das Verhältnis aus maximalem Tagesniederschlag und durchschnittlichem Tagesniederschlag dargestellt.

Diese Auftragung wird deswegen gewählt, weil sie die auftretenden Probleme gut zusammenfasst. Einerseits erwartet man vom Parameter a, dass er positiv ist, da auftretende Tagesniederschläge normalerweise keine fallenden Pegelstände auslösen. Bei kleinen Tagesniederschlägen kann es dennoch zu diesen negativen Koeffizienten kommen, wenn der gefallene Niederschlag nicht den erfolgten Abfluss ausgleicht. Da allerdings Hochwasserereignisse mit zunächst steigenden Pegelständen betrachtet werden,

erscheint ein negativer Parameter a widersinnig. Andererseits sind die Fits an die Hochwasserdatensätze nach den oben beschriebenen Kriterien ausreichend und die Mehrheit der Fits liefert auch positive Parameter a. Analoge Beobachtungen werden beim Verhalten der Parameter b, c und d gemacht.

Zudem sind, wie in **Abb. 3.6**, auch in den anderen Auftragungen der Parameter gegen die charakteristischen Größen keine Tendenzen klar identifizierbar. Die Streuung dominiert klar bei kleinen Werten und bei großen Werten gibt es in der Regel nur wenige Ereignisse, so dass es unklar bleibt, ob ein Trend besteht, der geeignet extrapoliert werden könnte.

Tab. 3.5 Werte der ermittelten Parameter für jeden Pegel. Die Werte sind auf 4 Dezimalstellen gerundet

| Pegel | Parameter a | Parameter b | Parameter c | Parameter d |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Schweinfurt | 1,2240 | 1,9168 | 3,3736 | -0,5151 |
| Kemmern | 0,2364 | 0,2386 | 1,6026 | -0,2118 |
| Schwüritz | 0,2575 | 0,9435 | 1,4571 | -0,1857 |
| Mainleus | 0,2588 | 1,5368 | 1,3860 | -0,2788 |
| Muggendorf | 0,2861 | 0,2000 | 0,8159 | -0,4026 |
| Pettstadt | 0,4591 | 0,3945 | 1,3632 | -0,2122 |
| Hohenstadt | 0,0353 | 0,7689 | 0,3802 | -0,2394 |
| Hüttendorf | 0,6921 | 0,3861 | 2,7511 | -0,3302 |
| Roth Klär-anlage | 0,0198 | 1,7884 | 1,0301 | -0,3075 |

Um dennoch zu einem extrapolierten Hochwasserabfluss zu kommen, werden für die ermittelten Parameter für jeden Pegel die jeweiligen Mittelwerte der Parameter angesetzt, da keine Tendenz erkennbar ist. Mit diesen Werten wird dann im nachfolgenden Abschnitt das abdeckende Hochwasserereignis auf Grundlage des beschriebenen abdeckenden Niederschlagsereignisses ermittelt.

Für die einzelnen Pegel ergeben sich die in **Tab. 3.5** angegebenen gerundeten Werte. Zur Ermittlung des abdeckenden Hochwasserereignisses werden die Parameter mit der internen Präzision des Programmes genutzt.

3.5.3 Abdeckendes Hochwasserereignis

Entsprechend dem in Abschnitt 3.3.4 dargestellten Vorgehen werden für jeden betrachteten Pegel die jeweiligen abdeckenden Niederschlagsereignisse angesetzt und so die (reduzierten) Abflussänderungen und damit der Abfluss bestimmt. Dabei wird als (reduzierter) Abfluss am Tag Eins der mittlere (reduzierte) Abfluss des Pegels angesetzt. Der kumulierte Abfluss wird am ersten Tag als Null angesetzt. Die Änderung des (reduzierten) Abflusses am Tag Zwei ergibt sich dann aus den Niederschlags- und Abflussdaten des Tages Eins in Verbindung mit den angesetzten Parametern. Und der (reduzierte) Abfluss ergibt sich als Summe aus dem reduzierten Abfluss des Vortages und der (reduzierten) Abflussänderung. Dieses Verfahren wird iterativ auf die folgenden Tage angewendet. Dabei kann es nach Ende des Niederschlagsereignisses, bedingt durch das verwendete Modell, auch zu rechnerisch negativen (reduzierten) Abflüssen am Pegel kommen. Diese Werte werden durch den mittleren (reduzierten) Abfluss des Pegels ersetzt.

Verfügt der betrachtete Pegel noch über Zulaufpegel, dann werden deren Abflüsse unter Berücksichtigung der Laufzeiten (vgl. Gleichung 3.5) zwischen den Pegeln zum reduzierten Abfluss des Pegels hinzugerechnet und so der gesamte Abfluss am Pegel bestimmt.

Exemplarisch ist das Vorgehen für den Pegel Roth Kläranlage in **Tab. 3.6** dargestellt. Da der Pegel Roth Kläranlage keine Zulaufpegel hat, ist der reduzierte Abfluss gleich dem Abfluss am Pegel. In den gelb hinterlegten Feldern wurden die Werte korrigiert, da sich ansonsten ein negativer Abfluss ergeben hätte. Die Spalten für Tagesniederschlag, konstanten Term, kumulierten Niederschlag und kumulierten Abfluss sind zweigeteilt. In der ersten Unterspalte stehen immer die jeweiligen „Rohwerte“ und in der zweiten Unterspalte die Werte, die sich aus der Multiplikation mit dem jeweiligen Parameter ergeben. Die Änderung des (reduzierten) Abflusses ΔHQ_{red} an einem bestimmten Tag ergibt sich dann aus der Summe der zweiten Unterspalten am Vortag. Für den Pegel Roth ergibt sich so am zehnten Tag des betrachteten Zeitraums ein Abfluss von etwa 1206 m³/s.

Die zeitlichen Hochwasserabläufe an allen betrachteten Pegel sind in den **Tab. 3.7** bis **Tab. 3.9** aufgeführt.

In **Abb. 3.7** ist der Hochwasserablauf am Pegel Schweinfurt dargestellt. Der Pegel Schweinfurt ist die Summe aus den wirksamen Pegelwerten des Pegels Kemmern und des Pegels Pettstadt sowie dem reduzierten Abfluss aus den Gebieten A und E. Als höchster Abfluss wird am Pegel Schweinfurt am elften Tag, des betrachteten Zeitraums, ein Abfluss von etwa 13.500 m³/s erreicht.

Tab. 3.6 Beispiel für die Ermittlung des abdeckenden Hochwasserereignisses am Pegel Roth Kläranlage (Werte gerundet)

| Tag | Tagesnieder-schlag | | Konstanter Term | | Kumulierter Niederschlag | | Kumulierter Abfluss | | ΔHQ_{red} [m³/s] | HQ_{red} [m³/s] | Zulauf [m³/s] | Abfluss HQ [m³/s] |
|-----|--------------------|--------|-----------------|--------|--------------------------|--------|---------------------|----------|--------------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | Roh | a=0,02 | Roh | b=1,79 | Roh | c=1,03 | Roh | d=-0,31 | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1,79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,80 | 0 | 8,80 | |
| 2 | 16,77 | 0,33 | 1 | 1,79 | 0 | 0 | 8,80 | -2,71 | 1,79 | 0 | 10,59 | |
| 3 | 33,54 | 0,67 | 1 | 1,79 | 16,77 | 17,28 | 19,39 | -5,962 | -0,58 | 0 | 10,00 | |
| 4 | 67,08 | 1,33 | 1 | 1,79 | 50,31 | 51,83 | 29,39 | -9,04 | 13,76 | 0 | 23,77 | |
| 5 | 134,17 | 2,66 | 1 | 1,79 | 117,40 | 120,93 | 53,16 | -16,35 | 45,91 | 0 | 69,68 | |
| 6 | 134,17 | 2,66 | 1 | 1,79 | 251,57 | 259,14 | 122,84 | -37,78 | 109,03 | 0 | 178,71 | |
| 7 | 134,17 | 2,66 | 1 | 1,79 | 385,74 | 397,34 | 301,56 | -92,73 | 225,81 | 0 | 404,52 | |
| 8 | 67,087 | 1,33 | 1 | 1,79 | 519,91 | 535,55 | 706,08 | -217,17 | 309,06 | 0 | 713,58 | |
| 9 | 33,54 | 0,67 | 1 | 1,79 | 586,99 | 604,65 | 1419,66 | -436,56 | 321,54 | 0 | 1035,12 | |
| 10 | 16,77 | 0,33 | 1 | 1,79 | 620,53 | 639,20 | 2454,79 | -754,87 | 170,54 | 0 | 1205,67 | |
| 11 | 0 | 0 | 1 | 1,79 | 637,30 | 656,48 | 3660,46 | -1125,63 | -113,55 | 0 | 1092,12 | |
| 12 | 0 | 0 | 1 | 1,79 | 637,30 | 656,48 | 4752,57 | -1461,46 | -467,36 | 0 | 624,75 | |
| 13 | 0 | 0 | 1 | 1,79 | 637,30 | 656,48 | 5377,32 | -1653,58 | -615,95 | 8,80 | 8,80 | |

Tab. 3.7 Hochwasserablauf an den Mainpegeln bis Kemmern

| HQ _{red} [m³/s] | Kemmern | | Schwübitz | | | Mainleus |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Schwübitz wirksam (Zulauf) [m³/s] | Abfluss HQ [m³/s] | HQ _{red} [m³/s] | Mainleus wirksam (Zulauf) [m³/s] | Abfluss HQ [m³/s] | Abfluss HQ [m³/s] |
| 14,10 | 30,20 | 44,30 | 15,70 | 14,50 | 30,20 | 14,50 |
| 14,34 | 31,02 | 45,36 | 16,64 | 15,75 | 32,39 | 16,04 |
| 15,26 | 33,98 | 49,24 | 18,97 | 17,67 | 36,64 | 18,05 |
| 41,69 | 55,21 | 96,89 | 46,80 | 39,36 | 86,16 | 44,27 |
| 121,97 | 142,51 | 264,48 | 128,31 | 108,12 | 236,43 | 122,85 |
| 307,59 | 367,31 | 674,90 | 315,53 | 269,92 | 585,44 | 303,86 |
| 666,37 | 8356,00 | 1502,37 | 673,35 | 580,24 | 1253,59 | 644,02 |
| 1159,00 | 1599,40 | 2758,39 | 1167,02 | 1008,72 | 2175,74 | 1092,88 |
| 1694,79 | 2547,50 | 4242,29 | 1712,94 | 1454,16 | 3167,10 | 1537,53 |
| 2077,24 | 3424,42 | 5501,66 | 2130,82 | 1722,46 | 3853,28 | 1765,14 |
| 2146,78 | 3875,44 | 6022,22 | 2275,00 | 1637,38 | 3912,38 | 1607,89 |
| 1797,52 | 3622,67 | 5420,19 | 2043,61 | 1096,22 | 3139,83 | 978,14 |
| 993,53 | 2556,78 | 3550,31 | 1389,86 | 195,18 | 1585,04 | 14,50 |

Tab. 3.8 Hochwasserablauf an den Pegeln des Flusssystems Pegnitz-Rednitz-Regnitz

| Pettstadt | | | | Muggendorf | Hüttendorf | | | | Hohenstadt | Roth Klärani. |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------|------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|------------|---------------|
| HQ _{red} | Hütten-dorf wirksam (Zulauf) | Muggen-dorf wirksam (Zulauf) | Abfluss HQ | Abfluss HQ | HQ _{red} | Roth wirksam (Zulauf) | Hohenstadt wirksam (Zulauf) | Abfluss HQ | Abfluss HQ | Abfluss HQ |
| 10,20 | 34,80 | 7,20 | 52,20 | 7,20 | 20,40 | 8,80 | 5,60 | 34,80 | 5,60 | 8,80 |
| 10,59 | 35,13 | 7,27 | 53,00 | 7,40 | 20,79 | 9,02 | 5,79 | 35,60 | 6,37 | 10,59 |
| 17,26 | 39,02 | 8,23 | 64,51 | 9,62 | 26,91 | 10,52 | 6,38 | 43,81 | 6,42 | 10,00 |
| 55,17 | 70,48 | 16,44 | 142,09 | 27,80 | 88,23 | 11,72 | 7,87 | 107,83 | 12,24 | 23,77 |
| 156,40 | 192,59 | 47,37 | 396,36 | 80,00 | 264,78 | 29,51 | 16,96 | 311,25 | 31,12 | 69,68 |
| 379,89 | 509,13 | 123,78 | 1012,79 | 196,75 | 660,44 | 83,31 | 42,41 | 786,15 | 76,26 | 178,71 |
| 770,62 | 1154,97 | 270,53 | 2196,12 | 393,50 | 1365,33 | 206,94 | 99,04 | 1671,31 | 167,37 | 404,52 |
| 1281,17 | 2179,48 | 479,65 | 3940,30 | 623,22 | 2248,83 | 443,16 | 198,94 | 2890,92 | 293,63 | 713,58 |
| 1794,89 | 3398,86 | 684,65 | 5878,40 | 787,03 | 3028,28 | 753,78 | 327,92 | 4109,97 | 430,76 | 1035,12 |
| 2120,17 | 4376,17 | 771,70 | 7267,99 | 746,16 | 3238,57 | 1056,44 | 453,83 | 4748,84 | 523,04 | 1205,67 |
| 2106,17 | 4541,25 | 620,67 | 7268,09 | 411,53 | 2535,64 | 1191,47 | 523,51 | 4250,62 | 524,92 | 1092,12 |
| 1658,99 | 3450,26 | 259,91 | 5369,15 | 7,20 | 800,46 | 1033,70 | 495,59 | 2329,75 | 407,62 | 624,75 |
| 764,93 | 1740,28 | 7,20 | 2512,41 | 7,20 | 20,40 | 547,76 | 346,87 | 915,03 | 164,63 | 8,80 |

Tab. 3.9 Hochwasserablauf am Pegel Schweinfurt

| Schweinfurt | | | |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|
| HQ _{red} | Kemmern wirksam (Zulauf) | Pettstadt wirksam (Zulauf) | Gesamtabfluss HQ |
| 9,10 | 44,30 | 52,20 | 105,60 |
| 11,02 | 44,61 | 52,48 | 108,11 |
| 23,62 | 46,49 | 57,08 | 127,20 |
| 93,98 | 63,14 | 91,99 | 249,11 |
| 288,97 | 145,77 | 232,15 | 666,89 |
| 709,14 | 384,18 | 614,68 | 1708,00 |
| 1404,60 | 916,25 | 1431,89 | 3752,74 |
| 2198,68 | 1868,71 | 2813,85 | 6881,24 |
| 2671,55 | 3191,20 | 4626,71 | 10489,46 |
| 2252,69 | 4609,61 | 6370,55 | 13232,84 |
| 577,96 | 5653,49 | 7268,02 | 13499,47 |
| 9,10 | 5846,63 | 6595,55 | 12451,28 |
| 9,10 | 4874,81 | 4357,39 | 9241,30 |

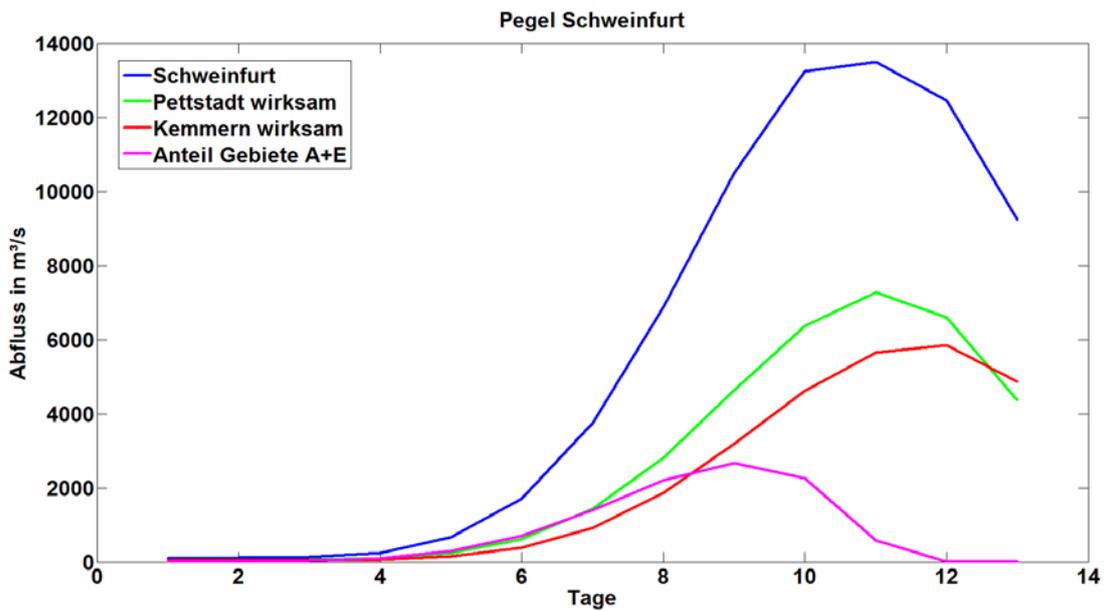


Abb. 3.7 Hochwasserablauf am Pegel Schweinfurt

3.6 Diskussion zu den Ergebnissen und Schwächen des Modells

Vergleicht man das Ergebnis der Hochwassersimulation von 13.500 m³/s Abfluss am Pegel Schweinfurt mit der Abschätzung per Faustformel von 14.716 m³/s in Abschnitt 3.1.4, so sind diese von der gleichen Größenordnung. Allerdings liegt der, bei der Abschätzung mittels Faustformel angesetzte, homogene Tagesniederschlag von 100 l/m²d je nach Teilgebiet um 24 % bis 47 % niedriger. Im Gegenzug werden dabei jedoch keinerlei Speicherkapazität des Bodens und sonstige Einflussfaktoren mehr berücksichtigt. Insbesondere wird angenommen, dass dieser Tagesniederschlag für beliebig lange Zeiten aufrechterhalten bleibt.

Ziel war es eine abdeckende Methodik zu erproben. Daher wurde ein Niederschlagsereignis angesetzt, das sehr viel unwahrscheinlicher als ein 10.000-jähriges Niederschlagsereignis ist. Das Resultat ist mit der Abschätzung mittels Faustformel vereinbar und ist deutlich konservativer als der Wert, der sich für das Hochwasser am Pegel Schweinfurt mit der in der KTA 2207 /KTA 04/ beschriebenen Methodik ergibt. So ergibt sich für das 10.000-jährige Hochwasserereignis nach KTA 2207 ein Abfluss von 3.169 bis 3.650 m³/s am Pegel Schweinfurt /JEN 11/. Ein Vergleich mit historischen Hochwasserereignissen im Maingebiet führt insbesondere zur sogenannten Magdalenenflut von 1342, bei der am Pegel Würzburg aus überlieferten Wasserstandsangaben ein Abfluss zwischen 3.050 und 3.600 m³/s ermittelt wird /WUE 13/. Das in diesem Bericht ermittelte Hochwasserereignis ist auch im Hinblick auf diese Werte als abdeckend zu betrachten und stellt eine sehr konservative Schätzung dar.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Simulation und den oben genannten Werten (KTA 2207 und Magdalenenflut) sind neben dem bewusst konservativen Ansatz (als PMF) insbesondere auch darauf zurückzuführen, dass die Ermittlung der Parameter für das Rechenmodell (deterministisches Verfahren) mit großen Unsicherheiten verbunden ist und sich einige Parameter – zumindest für einige Hochwasserereignisse – auch entgegen der physikalisch plausiblen Erwartungen verhalten. Insbesondere ist die Abwesenheit von Trends auffällig. Die Ermittlung der relevanten Parameter durch Mittelwertbildung verbleibt als einzige Möglichkeit, weist aber große Unsicherheiten (große Standardabweichung) auf und unterstellt implizit, dass es keinen Trend in den Parametern gibt.

Das Modell versucht mit einem sehr einfachen Ansatz mit vier Parametern zum Teil komplexe Hochwasserereignisse zu beschreiben. Die Parameter werden dabei als unabhängig voneinander angenommen und es wird implizit angenommen, dass während eines Hochwasserereignisses immer die gleichen Anteile von Tagesniederschlägen direkt in den Fluss abfließen. In der Realität ist jedoch anzunehmen, dass kleine Tagesniederschläge nahezu komplett verzögert abfließen und große Tagesniederschläge zu großen Teilen direkt abfließen werden. Problematisch ist vor allem, dass man globale Parameter für ein Hochwasserereignis benutzt und nicht Parameter, die mit der Vorgeschichte variieren, also nicht konstant sind. So steckt man implizit Informationen in die Hochwasserermittlung, die eigentlich noch unbekannt sind.

Analog zur Betrachtung des Parameters für den Tagesniederschlag trifft dies auch auf die Betrachtung des kumulierten Niederschlages zu. Ebenso berücksichtigt dieser eine Parameter nicht, dass bei bereits vorliegenden hohen kumulierten Niederschlägen mehr Tagesniederschläge direkt in den Fluss abfließen werden.

Des Weiteren kommt es bedingt durch das monotone Wachstum des kumulierten Abflusses nach Ende der Niederschläge zu einem immer steiler werdenden Abfall des Abflusses, der schließlich rechnerisch zu negativen Abflusswerten führen würde. Wichtig ist hier also das „rechtzeitige“ Abschneiden.

Auch auf Grund der teilweise nur kurzen Pegelratenreihen kommt es zu Problemen, da für diese Pegel nur einige Hochwasserereignisse betrachtet werden können. Diese kurze Zeitreihe „paust“ sich dann auch auf den unmittelbar unterhalb liegenden Pegel durch, da eine Bestimmung des reduzierten Abflusses für diesen nur mit den Daten des oberhalb liegenden Pegels durchgeführt werden kann.

Auch der Ansatz des abdeckenden Niederschlagsereignisses, wie er hier durchgeführt wurde, ist zu hinterfragen. Um zu einem realistischen und doch abdeckenden Ergebnis zu kommen müssten sehr viel detailliertere Auswertungen der Niederschlagsstatistiken erfolgen.

Durch die großen Unsicherheiten besitzt das entwickelte Modell nur geringe Aussagekraft. Aus Sicht der GRS ist eine Verwendung des hier entwickelten Modells für Hochwasseranalysen mit seinem vereinfachten Ansatz nicht zielführend. Zur Ermittlung eines abdeckenden Hochwasserereignisses ist daher aus Sicht der GRS der Einsatz komplexer hydrologischer Abflussmodelle des Einzugsgebietes erforderlich.

4 Eishochwasser

4.1 Darstellung der Einwirkung „Eishochwasser“

4.1.1 Grundlagen

Gemäß /NLW 02/ ist ein Eishochwasser ein Hochwasser, bei dem sich Eisschollen versetzen und verkanten und dadurch eine Barriere im Fluss aufbauen. Hierdurch behindern sie den Hochwasserabfluss, mit der Folge, dass durch den Auf- und Rückstau des Hochwassers Deiche überflutet und durch das Eis beschädigt werden können.

Gemäß /DIN 94/ ist ein Eishochwasser ein Hochwasser, das durch das Zusammentreffen von hohen Durchflüssen und Durchflussbehinderungen durch Eis (z. B. Eisversetzungen) entstanden ist.

In **Abb. 4.1** ist der Entstehungsprozess von Eishochwasser skizziert. Dabei ist im Hinblick auf diesen Bericht die Eisstaubildung von besonderem Interesse. Hierauf wird im Folgenden besonders eingegangen.

Die Entstehungswahrscheinlichkeit eines Eisstands¹¹ – und eines darauffolgenden Eishochwassers – ist unter anderem von den meteorologischen Bedingungen abhängig. In /JOE 07/ werden allgemein die folgenden meteorologischen Voraussetzungen für einen Eisstand genannt:

- ausreichende Kälteperiode zur Ausbildung von Eis,
- Temperaturzunahme nach einer Kälteperiode,
- Erhöhung des Abflusses durch Schneeschmelze oder Niederschlag,
- starker Wind als Hindernis für das Weiterdriften von sich bewegenden Eismassen infolge des Gegendrucks.

Eis bildet sich im Gewässer, wenn die Umgebungstemperaturen unter 0 °C absinken und die Gewässertemperatur ebenfalls (an der Oberfläche) 0 °C erreicht. Dann beginnt

¹¹ Die Begriffe Eisstau, Eisstand und Eisversetzung werden weiter unten genauer erläutert.

der exotherme Kristallisationsprozess. Daraus ergibt sich, dass die niedrigen Umgebungstemperaturen langfristig anstehen müssen, um die latente Wärme der Eisbildung und vorher die hohe spezifische Wärme des Wassers abführen zu können.

In stehenden Gewässerbereichen bildet sich Randeis an der Gewässeroberfläche, in stark strömenden Gewässerbereichen mit guter Durchmischung bilden sich zusätzlich Grund- und Schwebeis. Das gebildete Eis schwimmt auf und vereinigt sich nach und nach zu Eisschollen (Treibeis).

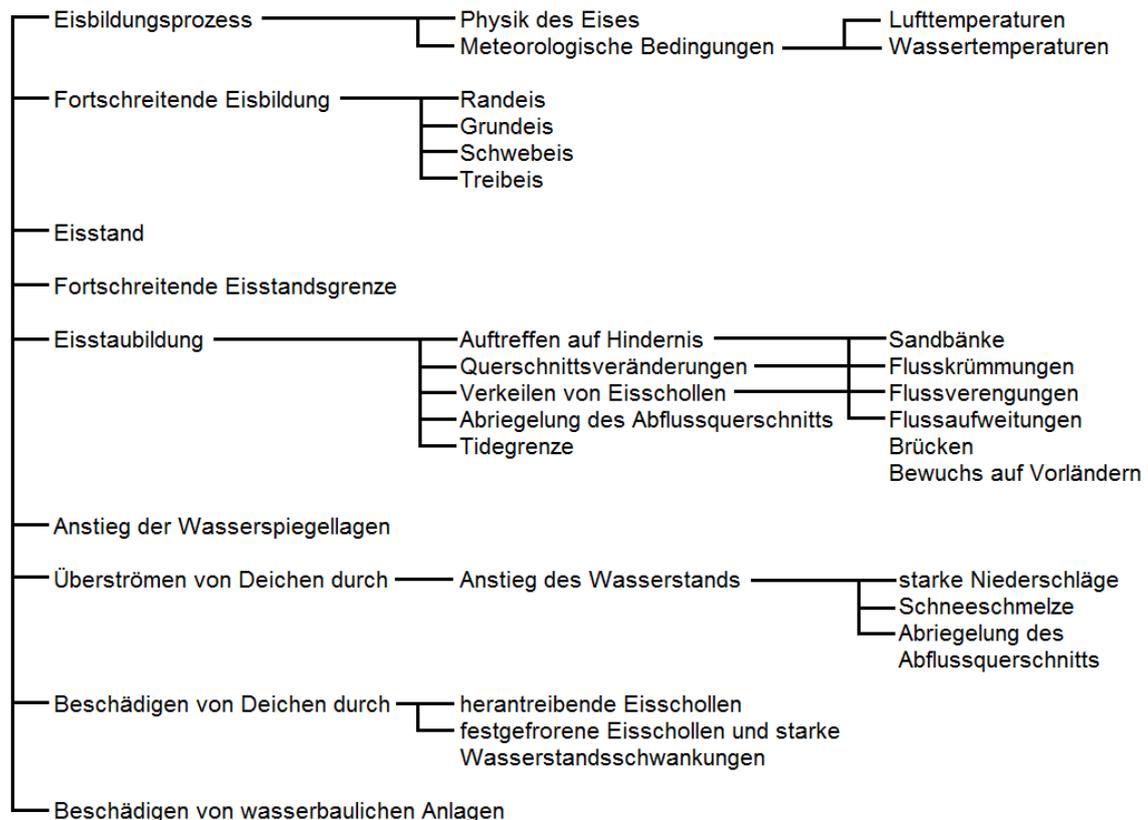


Abb. 4.1 Entstehungsprozess von Eishochwasser /CAR 08/

In **Abb. 4.2** wird schematisch erläutert, wie sich aus Treibeis ein Eisstau, Eisstand oder eine Eisversetzung entwickeln kann /CAR 08/. Ein Eisstau bildet sich unter anderem in einem Fluss, wenn der Transport von Eiskristallen bzw. Eisschollen infolge

- einer lokal ausgebildeten geschlossenen Eisdecke,
- einer oder mehrerer enger, scharfer Krümmungen,
- eines verminderten Sohl- und Wasserspiegelgefälles,

- einer Querschnittseinengung oder
- einer zusätzlichen Eiszuführung im Bereich der Einmündung eines Nebenflusses

eingeschränkt und/oder die Transportkapazität überschritten ist. Die einzelnen Schollen berühren sich und frieren zusammen /SCH 11/.

Verdichtet sich dieser Eisstau von Ufer zu Ufer, und die ankommenden Eisschollen können durch ihre Schub- und Eigenkraft diesen Eisstau nicht mehr auflösen oder anschieben, entsteht ein Eisstand. Mit diesem Ausdruck kennzeichnet man den Zustand,

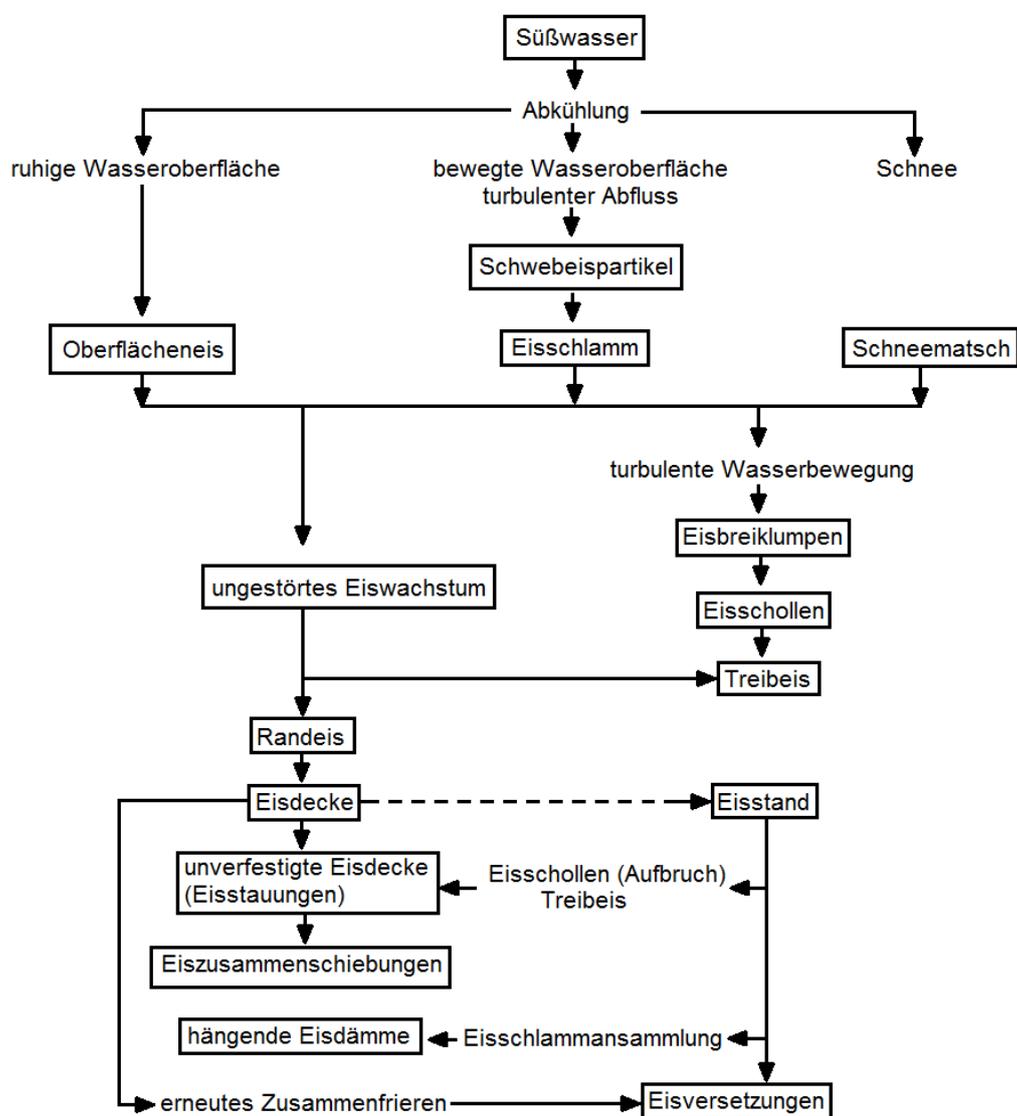


Abb. 4.2 Entwicklung eines Eisstaus, Eisstands oder einer Eisversetzung aus Treibeis /CAR 08/

wenn das Treibeis in fließendem Gewässer von Ufer zu Ufer zum Stehen gekommen und zusammengefroren ist /DIN 94/.

Eine Eisversetzung ist gegeben, wenn sich die weiter ankommenden Eisschollen sowohl auf, als auch unter den bereits bestehenden Eisstand schieben und so den Abflussquerschnitt stark einengen. Die vorerst lose zusammenliegenden Eisschollen werden durch den Strömungsdruck zusammengeschoben, sie frieren bei entsprechenden Temperaturen zusammen /CAR 08/. Gegebenenfalls setzt Eisdickenwachstum ein. Bei diesen Eisversetzungen können sich die über- und untereinander geschobenen Eisschollen zu einer Stärke von bis zu 2,50 m auftürmen. Die Folge davon sind ansteigende Wasserstände oberhalb der Eisversetzung /SCH 11/.

Eisstau bildet sich nach /STR 57/ an Stellen im Flusslauf, an denen sich Eis leicht festsetzen kann. Diese sind u.a.

- Untiefen wie bewachsene und unbewachsene Sandbänke oder nicht ausgebaute Flussabschnitte,
- Geschiebebänke,
- Brücken und Wehre,
- Verbuschungen auf Deichvorländern,
- Flussspaltungen mit Inseln,
- starke Einengung des Flussquerschnitts,
- Bühnen oder Kribben,
- Grenze von Ebbe und Flut an der Elbe,
- scharfe Flusskrümmungen.

Als wesentliche Gefahrenpunkte bzw. Beeinträchtigungen, die von einem Eisstand ausgehen, können festgehalten werden /JOE 07/:

- Erhöhung des Wasserstandes hinter einer Eisversetzung und dadurch Gefahr einer Überschwemmung (Eishochwasser),
- Auslösung von flutwellenähnlichen Phänomenen durch plötzliches Loslösen einer Eisversetzung,

- Beschädigung oder Zerstörung von Bauwerken und des Ufers durch die große Krafteinwirkung bei Eisgang (Deichbruch).

Die zu Eisversetzungen zusammengeschobenen Eisschollen können Teile des Flusses oder den Fluss in seiner gesamten Breite versperren. Dadurch stauen sich das weiter stromabwärts fließende Wasser und die Eisschollen an dieser Barriere. Es entsteht dabei ein extremer Wasserspiegelanstieg in einer solchen Schnelligkeit, dass Deiche ohne Vorwarnungen überspült oder zerstört werden können. Aus diesem Eisstand können sich auch große Felder von Eisschollen lösen und stromabwärts treiben und dabei sowohl Deiche, Buhnen als auch Brücken gefährden /ASH 86/.

Ursache für die Gefährdung von Bauwerken durch Eis auf dem Wasser können zum einen treibende Eismassen oder Eisschollen auf dem Fluss, im Tidestrom oder an der offenen Seeküste und zum anderen die mehr oder weniger geschlossene, stehende Eisdecke sein /STR 57/.

4.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland

Die Elbe unterliegt im Ober- und Mittellauf dem Einfluss des osteuropäischen Kontinentalklimas. So werden an der Elbe durchschnittlich 20 Eistage pro Jahr registriert, im Gegensatz zu anderen Strömen Deutschlands mit im Mittel weniger als 10 Eistagen pro Jahr /GAR 82/. Charakteristisch für den größten Teil der Elbe ist es, dass die Eisbildung mit Treibeis einsetzt und bei anhaltendem Frost von der unteren Elbe her flussaufwärts wächst. Daher sind in Magdeburg mehr Tage mit Eisstand bzw. Treibeis zu verzeichnen als in Dresden /SCH 11/.

Die Eiserscheinungen an der Elbe sind bis auf kleine Abweichungen denen der Oder ähnlich. Insgesamt gibt es an der Elbe geringfügig weniger Tage mit Eiserscheinungen, das Eis bildet sich später und ist früher wieder verschwunden. Das dürfte daran liegen, dass die Oder weiter ostwärts liegt und dort das Klima noch kontinentaler geprägt ist als an der Elbe /SCH 11/.

Das Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg /WSA 09/ veröffentlichte eine Liste mit den Eiswintern auf der Elbe seit Fertigstellung der Staustufe Geesthacht 1960 im Bereich des WSA Lauenburg. Daraus geht hervor, dass es vom Winter 1962/63 bis zum Winter 2008/09 in insgesamt 13 Wintern Treibeis bzw. Eisstand gab. Bei 6 Wintern wurde der Durchfluss vermerkt. Bis zu einem Durchfluss von 1.340 m³/s gab es Eisstand, ab einem

Durchfluss von 1.700 m³/s gab es nur noch Treibeis. Die geringe Zahl von Wintern dürfte nicht unbedingt repräsentativ sein. Sie kann jedoch als Indiz dafür gewertet werden, dass es zwischen einem Durchfluss von 1.340 m³/s und 1.700 m³/s einen „Grenzdurchfluss“ gibt, bei dem es zu keinem Eisstand mehr kommt. Dieser „Grenzdurchfluss“ ist sehr wahrscheinlich abhängig von den konkreten Gegebenheiten des betrachteten Flusses wie z. B. das lokale Klima, die Strömungsgeschwindigkeit, der Flussverlauf (gerade oder mit vielen Schleifen) und andere mehr. Allerdings kann ein solcher „Grenzdurchfluss“ auch so gedeutet werden, dass bei kleinen und mittleren Flüssen tendenziell eher Eisstand auftritt.

4.1.3 Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland

An der **Elbe** kam es zwischen 1400 und 1850 zu 33 Eisstandereignissen, Ihr Anteil an Hochwasserereignissen beträgt 16,3 %. Innerhalb von 450 Jahren sind 202 Hochwasser an der Elbe aufgetreten /SCH 00/. Anhand der Ereignisse kann festgestellt werden, dass Eishochwasser an der Elbe in der Regel im Winter, meistens im Januar oder Februar, stattfinden. Des Weiteren fanden die Hochwasser in der Regel zwischen Dresden und Magdeburg statt, lediglich einmal wird über ein Eishochwasser bei Hamburg berichtet. Auch in den Jahren nach 1850 traten noch Eishochwasser auf.

Es konnten keine Ereignisse mit Eisstand oder Eisversetzungen auf der **Ems** gefunden werden.

Am **Main** kam es zwischen 1413 und 1850 zu 8 Eisstandereignissen. Ihr Anteil an Hochwasserereignissen beträgt 11,4 %. Innerhalb von 437 Jahren sind 70 Hochwasser am Main aufgetreten /SCH 00/.

Der Main neigte wegen seiner geringen Wassertiefe in früherer Zeit stark zur Vereisung. Wegen der geringen Tiefe unterkühlte das Wasser rasch. Es kam bei anhaltendem Frost, beginnend in strömungsschwachen Flussbereichen, zu umfangreichen Treibeis- und Grundeisbildungen. Der Eisstand wanderte bei weiter anhaltender Treibeiszufuhr stromaufwärts. Die Vereisung führte meist auch zu einem Eisstau. Durch geringes Anschwellen wurden in der Regel der Aufbruch und der Abgang des Eises ausgelöst. Wenn durch einen plötzlichen Frosteinbruch der Eisgang unterbrochen wurde, kam es manchmal zu Eisversetzungen mit beträchtlichem Aufstau /WSD 10/.

Die Eisstauungen in Würzburg häuften sich nach der Errichtung der Staustufe in Er-labrunn im November 1934. Das Eis trieb aus der oberhalb der Staustufe freiliegenden Mainstrecke ab und kam im gestauten Wasser unterhalb von Würzburg zum Stehen. Die Eisschollen schoben sich dabei über- und untereinander und füllten häufig die gesamte Flussbreite aus. In den besonders strengen Wintern 1939/1940, 1940/1941 und 1946/1947 wurden auch die Wasserstände am Pegel Würzburg durch den Eisstau stark beeinflusst. Als die Staustufen oberhalb von Würzburg fertiggestellt waren und damit die Treibeiszufuhr unterbunden war, besserten sich die Verhältnisse. Die Mainstrecke Würzburg-Ochsenfurt mit drei Staustufen wurde 1954 eröffnet /WSD 10/.

Am Main bilden sich heute während Frostperioden in den einzelnen Stauhaltungen oberhalb der Wehre sofort geschlossene Eisdecken. Diese Eisdecken können schnell über die gesamte Stauhaltungslänge anwachsen. Durch die Eisdecke werden die angestauten Wassermassen in den einzelnen Haltungen vor allzu großer Unterkühlung geschützt und wirken als Wärmespeicher, sodass sich kein nennenswertes Treib- und Grundeis mehr bildet. Im gestauten Main entsteht deshalb bei gleicher Frostlage wesentlich weniger Eis als früher im ungestauten Zustand. Diese Wirkung wird noch durch die Aufheizung des Mainwassers infolge der zunehmenden Abwasser- und Warmwassereinleitungen unterstützt /WSD 10/

An der **Donau** kam es zwischen 1400 und 1850 zu 16 Eisstandereignissen. Ihr Anteil an Hochwasserereignissen beträgt 29,1 %. Innerhalb von 450 Jahren sind 55 Hochwasser an der Donau aufgetreten /SCH 00/.

An der **Isar** kam es zwischen 1589 und 1850 zu 13 Eisstandereignissen. Ihr Anteil an Hochwasserereignissen beträgt 35,1 %. Innerhalb von 261 Jahren sind 37 Hochwasser an der Isar aufgetreten /SCH 00/.

Am **Neckar** kam es zwischen 1413 und 1850 zu 9 Eisstandereignissen. Ihr Anteil an Hochwasserereignissen beträgt 17,6 %. Innerhalb von 437 Jahren sind 51 Hochwasser am Neckar aufgetreten /SCH 00/.

Am **Rhein** kam es zwischen 1301 und 1850 zu 12 Eisstandereignissen. Ihr Anteil an Hochwasserereignissen beträgt 8,9 %. Innerhalb von 549 Jahren sind 135 Hochwasser am Rhein aufgetreten /SCH 00/.

4.2 Nationale und internationale Betriebserfahrung

4.2.1 National

In der nationalen Betriebserfahrung lässt sich indirekt ein Eishochwasserereignis ableiten. In /KKK 11/ wird von einer Verbesserung des Hochwasserschutzes aufgrund eines Hochwasserereignisses infolge Eisversatz berichtet. Hierbei bleibt aber unklar, ob die Anlage direkt betroffen war. Weitere Informationen zu diesem Ereignis sind nicht verfügbar.

4.2.2 International

International konnten einige Ereignisse mit Eisbildung im angrenzenden Gewässer identifiziert werden (siehe Abschnitt 5.2 im Kapitel „Hohe und tiefe Umgebungstemperaturen“), jedoch war keines dieser Ereignisse ein Eishochwasser.

4.3 Vorhersage von Eisständen

Das Problem bei Eishochwasser ist, dass weder Zeitpunkt noch Örtlichkeit, an denen es durch Eisversetzungen zu Überschwemmungen und Gefährdungen kommen kann, exakt zu bestimmen sind /SCH 11/. Wann und wo sie auftreten, lässt sich nur mit großen Unsicherheiten vorhersagen. Außerdem sind die Gefahren in der Regel un stetig, können sich auflösen und an anderer Stelle erneut auftreten. Hier helfen jahrelange Erfahrungswerte, kontinuierliche Beobachtungen und detailliertes Wissen über die Verhältnisse im und am Gewässer /LTV 09/.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei Eisversetzungen um ein komplexes Wechselspiel zwischen hydrometeorologischen Einflüssen auf der einen und der Eismechnik auf der anderen Seite handelt, sind Modelle zu deren Vorhersage im Vergleich mit Modellen zur Vorhersage von Hochwassern, deren Ursache auf Niederschlag oder Schneeschmelze zurückzuführen sind, wesentlich komplizierter. Es existiert dennoch eine, wenn auch überschaubare Anzahl von verschiedenen Modellen zur Vorhersage von Eisversetzungen. Bei der Vorhersage können empirische (Threshold Modelle), statistische (Regressionsmodelle, logistische Regression, Diskriminanzfunktionsanalyse) und künstlich intelligente Modelle unterschieden werden /JOE 07/.

Empirische Modelle basieren auf Beobachtungen physikalischer Phänomene. Die Festlegung von Grenzwerten und die bei deren Überschreiten auftretenden Eisversetzungen

stehen im Zentrum dieser Methode, wobei oftmals auch wahrscheinlichkeitstheoretische und statistische Analysen Eingang finden /JOE 07/.

Statistischen Modellen wird der Vorteil der teilweisen Ausmerzungen von Unzulänglichkeiten der empirischen Modelle zugesprochen, was etwa die Schwierigkeit der Umlegung auf andere Orte betrifft oder die Willkür der Auswahl der Variablen. Jedoch hält sich die Anzahl der entwickelten statistischen Modelle in Grenzen /JOE 07/.

Modelle wie genetische Algorithmen, neuronale Netzwerke, Entscheidungsbäume oder Fuzzy Logic können nichtlineare Systeme abbilden. Vor allem die Methode der künstlichen neuronalen Netzwerke zeigt großes Potenzial in der Modellierung von Eisversetzungen, bei denen es sich ebenfalls um nichtlineare Erscheinungen handelt /JOE 07/.

Bisher hat sich keines dieser Modelle als überlegen herauskristallisiert. Zur Modellierung der Eisversetzung existiert bisher keine einheitliche Lösung. Eine solche wird auch in näherer Zukunft nicht verfügbar sein, da die Zusammenhänge, die zum Auftreten von Eisversetzungen führen, zu komplex sind. Vor allem der Einfluss unterschiedlicher Abflüsse auf das Verhalten der Eisbewegungen stellt die Forschung vor eine große Herausforderung /JOE 07/.

Folgende Untersuchungen an den relevanten Flüssen könnten im Hinblick auf Abwehrmaßnahmen gegen Eisversetzungen neue Erkenntnisse bringen /JOE 07/:

- Eis-Monitoring am Fluss:
 - Messung der Eisstärke,
 - Dokumentation und Untersuchung des Eisaufbruchprozesses,
 - Erhebung der Stellen, an denen das Eis früher aufbricht,
 - Erhebung der Stellen, an denen sich die Eisdecke länger hält,
 - Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Eisstärke und notwendiger Abflussänderung, um einen Aufbruch herbeizuführen bzw. der thermischen Schwächung des Eises im Vorfeld,
- Erhebung der Problemstellen:
 - genaue Erfassung und Analyse der Problemstellen sowie Beschreibung von möglichen Varianten zur Entschärfung,

- Erhebung der Sollrauhigkeit,
- Analyse der Wetterlagen, v. a. Föhnwetterlagen,
- Analyse von Wintern ohne Eisversetzungen:
 - Gibt es ähnliche Randbedingungen, in denen es zu keinen Eisversetzungen gekommen ist,
- Ufervegetation,
- Analyse der Bereiche, wo die Ufervegetation eine reibungslose Abfuhr des Eises verhindert.

4.4 Maßnahmen gegen Eisstau und dessen Auswirkungen

Als vorbeugende Maßnahme gilt es, bei Eintritt eines Eiswinters möglichst einen Eisstand zu verhindern oder seine Bildung zu verzögern. Bei Einsetzen von Tauwetter sind Eisstände nach Möglichkeit aufzulösen, bevor das Schmelzwasser zu einem größeren Wasserpegelanstieg führt und unkontrollierte Eisabgänge eintreten. Dies ist besonders auf solchen Teilstrecken relevant, auf denen es zu schweren Versetzungen kommen kann, wenn das abgehende Eis auf feststehende Eisdecken oder andere Hindernisse trifft. Nach Möglichkeit sollte mit Eisbrechern versucht werden, zu verhindern, dass sich das Treibeis in Verengungen durch Randeis, starke Krümmungen, auf Sandbänken, an Betriebsanlagen (z. B. Staustufen) und im Tidebereich festsetzt und dadurch Eisstände auslöst /HAG 90/.

Nach /LTV 09/ können folgende Maßnahmen gegen Eisstau ergriffen werden

- ständige Beobachtung des Wasserstands und der Eisverhältnisse,
- Einleitung von Kühlwasser in den Fluss,
- Einsatz von Luftsprudelanlagen,
- Sicherung von gefährdeten Deichabschnitten mit Baumstämmen und großen Reisigbündeln,
- Eisaufbruch mit Eisaufbruchwerkzeug (Eisstampfer, Fallmeißel, Eisaxt, Eishaken, Wurfanker, Eiszangen, Eissäge, Motorkettensägen, Presslufthammer, Bagger),
- Eissprengung.

Gemäß /LTV 09/ sind Eissprengungen umstritten. Sie dürfen von fachkundigem Personal nur dann durchgeführt werden, wenn die Allgemeinheit unmittelbar gefährdet ist und alle anderen Möglichkeiten der Gefährdungsabwehr ausgeschöpft sind. Ein künstlicher Aufbruch darf nur dann erfolgen, wenn die Fließstrecke flussabwärts eisfrei ist und eine ausreichend breite Abflussrinne vorhanden ist. Der Aufbruch darf grundsätzlich nur vom Unterlauf her durchgeführt werden.

4.5 Einschätzung der Durchführbarkeit und Wirksamkeit dieser Maßnahmen

Insgesamt kann festgestellt werden, dass viele der im letzten Abschnitt genannten Maßnahmen bereits erfolgreich bei Eisstand eingesetzt wurden. Allerdings können viele dieser Maßnahmen nicht von der Anlage durchgeführt werden. Daher wird im Folgenden speziell auf die Wirksamkeit der Kühlwassereinleitung eingegangen, da dies einen guten Schutz für die am Fluss befindlichen Anlagenteile eines Kernkraftwerkes darstellt und von der Anlage selbst durchgeführt werden kann.

Hinsichtlich der Wirksamkeit der Einleitung von Kühlwasser in den Fluss wird in /BOC 73/ am Beispiel des Kernkraftwerks Krümmel berechnet, welche Flusstrecke auf Höhe des Kernkraftwerkes theoretisch eisfrei gehalten werden kann.

Bei einer elektrischen Leistung von 1200 MW erzeugt das Kernkraftwerk eine Abwärme von 2600 MW und damit 2600 MJ/s werden in den Fluss geleitet. Damit lassen sich bei einer erforderlichen Schmelzwärme von 335 MJ/t insgesamt 7,75 t Eis pro Sekunde schmelzen. Durch die kleinen Strömungsgeschwindigkeiten kann sich das Warmwasser stromab verteilen. Leichtes bis mittleres Treibeis wird auf dem Weg zur Staustufe Geesthacht (Fließzeiten von 3 – 5 Stunden) geschmolzen. Ob große Treibeisteller von ca. 3 – 6 m Durchmesser und bis zu 0,4 m Dicke geschmolzen werden können, ist fraglich, weil in der recht ruhigen Strömung das an der Unterseite der Teller durch den Schmelzvorgang abgekühlte Wasser nur allmählich durch frisches warmes Wasser ausgetauscht wird.

Treiben wesentlich mehr als 7,75 t/s Eis am Kraftwerk vorbei, kann es zum Eisstand kommen. Diese Eisdecke würde durch die eingeleitete Abwärme von unten her auftauen. Die Flussoberfläche bis an die Staustufe beträgt 1,4 Mio m², die Masse der Eisdecke etwa

200.000 t. Bei einer Abschmelzleistung von 7,75 t/s wären etwa 7 Stunden erforderlich, um die Decke bis zum Wehr wieder aufzuschmelzen.

Bei einem in diesem Gebiet gängigen Kaltlufteinbruch mit Lufttemperaturen um -12 °C und Windgeschwindigkeiten um 5 m/s werden der Wasserfläche etwa 400 W/m^2 Wärme entzogen. Die 2600 MW des Kraftwerks reichen aus, um den Wärmeentzug aus $6,5\text{ Mio m}^2$ Flussoberfläche nachzuliefern. Das genügt, um eine Flusstrecke von etwa 20 – 25 km Länge unterhalb des Kernkraftwerks eisfrei zu halten.

Nach /BOC 73/ hat die Abwärme noch einen weiteren Effekt: Beim Einsatz von Eisbrechern oberhalb der Staustufe und des Wehres Geesthacht treiben gelöste Eis tafeln von 5 – 20 m Durchmesser und ca. 0,3 m Dicke am Kraftwerk vorbei. Die Wehranlage wird durch diese Eisfelder stark beansprucht. Durch die Abwärme können diese Eisfelder von der Unterseite her abschmelzen. Die nunmehr dünneren Eis tafeln führen demzufolge bei einem Aufprall zu einer geringeren Gefährdung des Wehres.

4.6 Ergebnisse und Bewertung

Eishochwasser werden mit den üblichen statistischen Verfahren zur Ermittlung des Bemessungshochwassers nicht ausreichend erfasst. Das deutsche kerntechnische Regelwerk gibt auch kein systematisches Verfahren zur Berücksichtigung von Eishochwasser an, fordert jedoch die Berücksichtigung von Eisversatz bei Hochwasserschutzmaßnahmen. Vertiefte Untersuchungen zu den Auswirkungen von Eishochwasser auf kerntechnische Anlagen liegen bisher nicht vor.

Anhand der Auswertung von historischen Eishochwassern kann festgestellt werden, dass auf fast allen Flüssen, an denen die derzeit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke liegen, in der Vergangenheit Eishochwasser aufgetreten sind. Ausnahmen bilden die Weser und die Ems, zu denen keine Aufzeichnungen über Eishochwasser gefunden werden konnten. Eisbildungen und Eisstau traten auch in jüngerer Zeit auf, auch wenn tendenziell das Problem auf Grund der Tendenz zu mildereren Wintern, den erhöhten zivilisatorischen Wärmeeintrag in die Flüsse und durch Flussbegradigungen und Stauhaltung kleiner zu werden scheint.

Die Auswertung der Betriebserfahrung zeigt, dass es in Deutschland (und international) bisher zu keinem sicherheitstechnisch relevanten Ereignis aufgrund von Eishochwasser

gekommen ist. Es wurden Ereignisse mit Sulzeisbildung im Einlaufbauwerk von Anlagen und daraus resultierenden Beeinträchtigungen gefunden, diese stellen jedoch keine Eishochwasser dar. Ein solches Ereignis kann durch Einleitung von warmem Kühlwasser in das Einlaufbecken des Entnahmebauwerks bewältigt werden.

Nach den in Abschnitt 4.3 dargestellten Ergebnissen ist die Entstehung von Eishochwassern komplex und hat sehr viele Einflussfaktoren, so dass derzeit keine Verfahren existieren, die die Orte der Entstehung von Eisstau oder gar die Höhe entsprechender Eishochwasser verlässlich vorhersagen können. Daher ist eine standortbezogene Ermittlung von Hochwasserereignissen bedingt durch Eisstau mit einer Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren derzeit aus Sicht der GRS nicht durchführbar. Oft jedoch lassen sich Überflutungshöhen zumindest abschätzen, indem die Topografie der Umgebung der Anlage mit einbezogen wird. Liegen die Deichkronen umliegender Deiche unterhalb des Anlagengeländes, so wird der Eisstau hier zumindest zeitweise umgangen und das Anlagengelände nicht erreicht. Dies ist jedoch anlagenspezifisch im Einzelfall zu untersuchen, ebenso wie mögliche Orte für die Entstehung von Eisstau in der Umgebung der Anlage.

Potenziell hat ein Eishochwasser die gleiche sicherheitstechnische Bedeutung wie ein normales Flusshochwasser. Zwischen beiden Arten von Hochwassern ergibt sich in der sicherheitstechnischen Betrachtung kein Unterschied, sofern die sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteile nicht überflutet werden bzw. Wasser nicht in sicherheitstechnisch wichtige Gebäude eindringt. Im Unterschied zu einem normalen Flusshochwasser können Eishochwasser unter Umständen sehr schnell einsetzen und die Vorwarnzeit kann im Unterschied zu normalen Flusshochwassern sehr kurz sein. Dadurch kann unter Umständen der Einsatz von vorgeplanten temporären Hochwasserschutzmaßnahmen, wie z. B. Dammbalken, nicht mehr rechtzeitig erfolgen. Sind solche temporären Maßnahmen Teil des Schutzes gegen das Bemessungshochwasser, so wäre auch bei Wasserständen unterhalb des Bemessungswasserstandes mit der Überflutung sicherheitstechnisch wichtiger Anlagenteile zu rechnen.

Da die Gefährdung durch Eishochwasser (Höhe der sich ergebenden Überflutung) nicht immer bestimmt werden kann, erscheint es sinnvoll die Abwehrmaßnahmen der Anlagen einer näheren Betrachtung zu unterziehen. Die Einleitung von Kühlwasser während des Leistungsbetriebs in den Fluss kann die Bildung von Eisstau für weite Strecken unterhalb der Anlage verzögern oder sogar ganz ausschließen. Die Bildung von Eisstau oberhalb der Anlage und anschließende Flutwellen werden dadurch nicht verhindert. Der Betreiber

der Anlage kann diesem Phänomen bzw. seinen Auswirkungen nur durch administrative Maßnahmen begegnen.

Administrative Maßnahmen können zum Beispiel sein:

- Durchführung der Maßnahmen des temporären Hochwasserschutzes bei drohendem oder bereits eingesetztem Eisstau. Dies setzt ein umfassendes Monitoring der Anlagenumgebung voraus.
- Durchführung von Maßnahmen, die für Hochwassersituation vorgeplant sind, wie z. B. ein Abfahren der Anlage.
- Kontakte zu den zuständigen Behörden, um frühzeitig Maßnahmen gegen Eisstau zu initiieren und über die Entwicklung informiert zu sein.

Die Beratungen der RSK beschäftigten sich nach dem Tohoku-Erdbeben, dem nachfolgenden Tsunami und den daraus resultierenden Folgen im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi intensiv u. a. mit der Auslegung gegen Hochwasser und den vorhandenen Reserven in der Hochwasserauslegung über den Wasserstand des Bemessungshochwassers hinaus. In der Stellungnahme der RSK vom 06.09.2017 /RSK 17/ werden die Aussagen des VGB in Bezug auf Anlagen mit Druckwasserreaktoren wie folgt zusammengefasst:

- Für alle Anlagen liegt eine Ermittlung des Bemessungshochwassers (Häufigkeit ca. $10^{-4}/a$) aus den letzten zehn Jahren vor.
- Für die noch in Betrieb befindlichen DWR-Anlagen kann aus den vorhandenen Daten das Δ im Pegel zwischen dem Bemessungshochwasser und dem 100- bzw. 1.000-jährlichen Hochwasser bestimmt werden oder es kann begründet werden, warum der Bemessungshochwasser-Pegel auch bei noch geringerer Eintrittshäufigkeit nicht wesentlich zunehmen kann.
- Dieses Δ ist bei allen Anlagen nicht größer als der Unterschied zwischen dem Bemessungshochwasser-Pegel und der für die vitalen Funktionen relevanten Schutzhöhe, d. h. damit wäre auch ein Hochwasser mit einer Extrapolation auf eine Eintrittshäufigkeit von $10^{-5}/a$ abgedeckt.

Die RSK sieht damit bei standortspezifischer Bestätigung der Betreiberangaben die Kriterien für Robustheitslevel 1 für DWR-Anlagen als erfüllt an. Im Hinblick auf SWR-Anlagen sieht die RSK ebenfalls das Robustheitslevel 1 als erfüllt an, sofern die Betreiberangaben bestätigt werden. Die Anlagen weisen damit über den Bemessungswasserstand hinaus

deutliche Reserven im Schutz gegen Hochwasser auf. Nach dem Bruch eines Eisstaus oberhalb der Anlage kann als sekundärer Effekt Eis in den Vorfluter eingetragen werden. Die RSK sieht auch in Bezug auf den Eintrag von Eis in den Vorfluter eine deutliche Robustheit als plausibel an /RSK 17/.

Aus Sicht der GRS lässt sich über die oben beschriebenen administrativen Maßnahmen hinaus und unter Berücksichtigung der Feststellungen der RSK, kein weiterer Handlungsbedarf ableiten.

5 Hohe und niedrige Temperaturen

Einwirkungen hoher und niedriger Umgebungstemperaturen gehören zu den naturbedingten Einwirkungen von außen. Als direkte Folgeeinwirkungen langfristig anstehender extremer Lufttemperaturen können extreme Wasser- und Bodentemperaturen auftreten. Die nachfolgenden Betrachtungen gehen demgemäß zuerst von hohen und niedrigen Lufttemperaturen aus.

5.1 Darstellung der Einwirkung „Hohe und niedrige Temperaturen“

5.1.1 Grundlagen

Gekennzeichnet ist die Einwirkung extremer Lufttemperaturen dadurch, dass Extremwerte (z. B. die Tagesmaximal- oder -minimaltemperatur) zumeist eingebettet sind in längerfristige Ereignisse (Hitze- bzw. Kältewellen). Die Schwankungsbreite im Jahresverlauf kann deutlich mehr als 60 K betragen und auch innerhalb eines Tages (oder einer Woche) sehr groß sein. In der Regel können (extreme) Kältewellen zwischen November und März und (extreme) Hitzewellen zwischen Mai und September auftreten.

Zur (lokalen) Einstufung von Intensitäten von Hitze- oder Kältewellen gibt es keine einheitliche Metrik, da diese auch von der Fragestellung abhängt. Man kann einerseits auf die erreichten Maximal- bzw. Minimalwerte abheben, um beispielsweise kurzfristige Belastungen zu beschreiben. Andererseits treten viele Phänomene erst durch das langfristige Anstehen von hohen oder tiefen Werten auf und führen zu anderen Belastungen. Das langfristige Anstehen hoher oder tiefer Werte kann z. B. über Wärme- bzw. Kältesummen¹² beschrieben werden.

Für die Zwecke dieses Berichts werden Kältesummen definiert als die Summe aller negativen Tagesmitteltemperaturen im betrachteten Zeitraum. Wärmesummen werden definiert als die Summe aller Tagesmitteltemperaturen über 0 °C im jeweils betrachteten Zeitraum. Für die Zwecke dieses Berichts wird ein Ereignis zur Hitzewelle, wenn es Tage mit

¹² Während Kältesummen in der Regel einheitlich definiert sind als die Summe aller negativen Tagesdurchschnittstemperaturen im betrachteten Zeitraum (also etwa dem Winterhalbjahr), werden Wärmesummen je nach zu beschreibendem Sachverhalt sehr unterschiedlich definiert. In der Landwirtschaft wird gerne auf Tage mit Temperaturen von 5 °C oder mehr abgehoben während in der Klimatechnik beispielsweise Tage mit 15 °C oder mehr relevant sind.

mindestens 23 °C Tagesmitteltemperatur enthält. Eine genauere Definition findet sich in Abschnitt **5.4.2**. Die Wahl von 23 °C unterliegt einer gewissen Willkür, da jedoch nur Perioden extremer Hitze Berücksichtigung finden sollen, erscheint diese Wahl gerechtfertigt.

Sowohl hohe als auch tiefe Lufttemperaturen wirken direkt und indirekt (über Folgeereignisse) auf Kernkraftwerke ein. Direkte Einwirkungen umfassen u. a. Einwirkungen auf Bauwerke sowie auf Systeme und Komponenten, die sich außerhalb von Gebäuden befinden. Dort können sie zu einer Vielzahl von Phänomenen führen, so z. B. Versprödung von Werkstoffen (tiefe Temperaturen), Wärmeabschaltungen von Transformatoren (hohe Temperaturen), etc. Eine umfassendere Darstellung erfolgt in Abschnitt **5.2**.

Indirekte Effekte stellen sich bei der langfristigen Einwirkung hoher und tiefer Umgebungstemperaturen ein. So können langfristige Kältewellen beispielsweise dafür sorgen, dass

- mehr Eis gebildet wird (zum Beispiel im Einlaufbauwerk, aber auch an anderen neuralgischen Stellen),
 - die Entstehung von Eishochwassern (siehe Kapitel 4) wird ermöglicht.
- langfristig die Einhaltung der geplanten Innentemperaturen in Gebäuden nicht mehr möglich ist und damit zum Beispiel vermehrt Kondenswasser anfällt,
- bei starkem Schneefall, bzw. starken Verwehungen die Zugänglichkeit der Anlage behindert wird.

Langfristige Hitzewellen dagegen können u.a. dazu führen, dass

- die Wärmeabfuhr über die Wärmesenke reduziert ist,
 - dadurch betroffen sind vor allem die Kühlung der Notstromdiesel und
 - die Kaltwasserzentrale,
- Flusspegel (stark) sinken, Schüttungen in Brunnen (stark) zurückgehen,
- langfristig die Einhaltung der geplanten Innentemperaturen in Gebäuden nicht mehr möglich ist und damit Komponenten ausfallen oder aus Schutzgründen abgeschaltet werden müssen.
 - Dies betrifft insbesondere Schaltanlagen.

5.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch hohe und tiefe Temperaturen

Deutschland liegt in der gemäßigten Klimazone mit vorherrschenden Westwinden. Dadurch wird die Atmosphäre über Deutschland meist gut durchmischt und lange andauernde hohe und tiefe Temperaturen treten eher selten auf. Da Deutschland allerdings auch im Übergangsbereich zwischen maritimem und kontinentalem Klima liegt, kann es auch zu ausgeprägten Vorstößen kontinentaler Klimaphänomene kommen.

Langanhaltende hohe und tiefe Temperaturen sind meist die Folge von (blockierenden) Omegalagen¹³, die im Bereich des Hochs für sehr stabile Wetterlagen sorgen. Ausgeprägte Kältewellen ergeben sich, wenn im Winter (trockene) Kaltluft aus östlichen Richtungen (Nordost bis Südost) zuströmt und während klarer Nächte vermehrte Wärmeabstrahlung auftritt. Ausgeprägte Hitzewellen treten auf, wenn Warmluft aus östlicher bis südwestlicher Richtung zuströmt und durch die langen Tage und kurzen Nächte im Sommerhalbjahr sowie durch ausgeprägten Sonnenschein im Bereich des Hochs die Luft stark erwärmt wird. Bei Zuströmen feuchter Luft, vor allem aus südwestlicher Richtung, kommt es auch verstärkt zu sehr warmen Nächten, da der Wasserdampf in der Atmosphäre die Wärmeabstrahlung während der Nächte vermindert.

Lang andauernde Kälteperioden können auch durch große Vulkanausbrüche hervorgerufen werden. Hierbei werden insbesondere die Winter durch den zusätzlich abkühlenden Effekt (vermehrte Aerosolgehalt der Atmosphäre) der Vulkanausbrüche verschärft.

Sowohl Hitze- als auch Kältewellen sind räumlich weit ausgedehnt, so dass nicht nur die Anlage selbst betroffen ist, sondern auch die weitere Umgebung. Dies führt dazu, dass Maßnahmen gegen die Auswirkungen einer solchen Hitze- bzw. Kältewelle, wie zum Beispiel der Einsatz zusätzlicher Heiz- oder Kühlgeräte, unter Umständen (wegen großer Nachfrage) nicht kurzfristig realisiert werden können. Andererseits sind extreme Abweichungen von den zulässigen Innentemperaturen auch mit einigen Tagen Vorlaufzeit absehbar.

¹³ Omegalagen sind charakterisiert durch ein großes Hochdruckgebiet, das von 2 Höhentiefs flankiert wird.

5.1.3 Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland

Viele Extremereignisse hinsichtlich besonders kalter, langer Winter sind lediglich anekdotisch in Wetterchroniken aus der Zeit vor der flächendeckenden Temperaturmessung erfasst. Diese sind daher nur eingeschränkt vergleichbar. Aus diesen anekdotisch erfassten Extremereignissen stechen in Deutschland besonders die Winter 763/64, 1607/08 und 1739/40 heraus /FUB 06/. Im (wohl) schwersten Winter 1739/40 wurde in Deutschland über Frost vom 24.10. bis 13.06. berichtet. Zudem werden die Winter 1783/84 und 1816 als sehr schwere Winter angesehen, die durch große Vulkanausbrüche ausgelöst bzw. verstärkt wurden.

Auch seit dem Beginn der (systematischen) Wetteraufzeichnungen kam es mehrfach zu sehr kalten und langen Wintern in Deutschland. Diese fielen lokal unterschiedlich schwer aus, so dass sich je nach Ort unterschiedliche Rangfolgen der Schwere ergeben. So ist beispielsweise der Winter 1962/63 hinsichtlich der Kältesumme der schwerste Winter seit Beginn der Aufzeichnungen um 1870, während dieser Winter in Berlin im zwanzigsten Jahrhundert nur an vierter Stelle steht /WZF 08/. Allgemein sind im zwanzigsten Jahrhundert in Deutschland die Winter 1928/29, 1939/40, 1941/42 und 1962/63 als besonders schwer hinsichtlich ihrer Kältesumme anzusehen /WZF 08/. Im 21. Jahrhundert ist insbesondere die Kältewelle 2012 im Januar und Februar zu nennen.

Ebenso wie bei langen und kalten Wintern sind bezüglich langer und heißer Sommer in Wetterchroniken anekdotische Überlieferungen erhalten. Hier stechen in Mitteleuropa wohl besonders die Jahre 1473, 1540 und 1599 heraus /FUB 06/. Der Sommer 1540 wurde als Megadürre in Westeuropa beschrieben /WET 14/, wobei die Dürre schon im Januar begann und elf Monate dauerte. Viele große Flüsse konnten problemlos zu Fuß durchquert werden, Brunnen und kleinere Flüsse trockneten aus. /WET 14/ kommt zu dem Schluss, dass der Sommer 1540 in der Geschichte beispiellos dasteht und selbst das Jahr 2003 bei Weitem übertrifft. Die statistische Häufigkeit der Hitzewelle von 2003 wird mit einer Wiederkehrperiode von 500 Jahren abgeschätzt /LUT 04/. Weitere bemerkenswerte Hitzewellen traten beispielsweise 1834, 1983, 2015 und 2018 auf.

5.2 Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu hohen und tiefen Temperaturen

Bezüglich der nationalen Betriebserfahrung wurden die in der Datenbank VERA (Vertiefte Auswertung meldepflichtiger Ereignisse) erfassten meldepflichtigen Ereignisse ausgewertet. Hinsichtlich der internationalen Betriebserfahrung wurden die in der IRS-Datenbank (International Reporting System for Operating Experience) erfassten Meldungen ausgewertet.

5.2.1 Nationale Betriebserfahrung

In Deutschland traten zehn meldepflichtige Ereignisse in Verbindung mit tiefen Umgebungstemperaturen auf, die der VERA-Datenbank entnommen wurden. Diese sind nachfolgend nach Art der Auswirkung auf Systeme und Komponenten geordnet und beschrieben. Die Ereignisse sind tabellarisch zusammengefasst in **Tab. 5.1**. Diese Zusammenstellung dient zur Identifizierung von möglichen Einwirkungspfaden tiefer Lufttemperaturen. Die Auswirkung „gering“ bedeutet, dass die Anlage ihren planmäßigen Betriebszustand nicht verlassen hat und ggf. nur auf eine weitere betriebliche Redundante umgeschaltet wurde.

Tab. 5.1 Aufgetretene nationale Ereignisse mit tiefen Umgebungstemperaturen

| Kurzbeschreibung | Ursachen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------|
| Verzögertes Hochlaufen von Notstromdieseln bei Funktionsprüfung, ausgelöst durch tiefe Kühlwassertemperaturen am Ladeluftkühler | Tiefe Wassertemperaturen | Notstromdiesel | Gering |
| Kurzschluss in der 400kV-Freiluftschaltanlage auf Grund Vereisung und später ablaufendem Tauwasser. Bei Umschaltung auf Reservenetz wurde Eigenbedarfschaltanlage vorübergehend spannungslos | Tiefe Temperaturen, Vereisungen | Freiluftschaltanlage | Start Notstromdiesel |
| Zweipoliger Kurzschluss in einem Sammelschienentrenner, verursacht durch nicht vollständig schließende Kontakte auf Grund von Eisbildung | Tiefe Temperaturen, Vereisung | Eigenbedarfsversorgung | TUSA, RESA |
| Frostschaden an Sprühwasserlöschanlage | Tiefe Temperaturen, Vereisung | Sprühwasserlöschanlage | Gering |

| Kurzbeschreibung | Ursachen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Ausfall zweier Grobrechenanlagen in Folge von Überlast durch dicke Eisschichten | Tiefe Temperaturen, Vereisung | Grobrechenanlage | Gering |
| Schutzabschaltung 3v6 Hauptkühlwasserpumpen auf Grund von Eiskristallbildung an den Grobrechen und dadurch verminderter Kühlwasserentnahme | Tiefe Temperaturen, Vereisung | Grobrechenanlage, Hauptkühlwassersystem | Leistungsabsenkung |
| Spannungseinbrüche im 380 kV-Netz auf Grund von Kurzschlüssen durch abtauende Vereisungen führten erst zur Abschaltungen mehrerer Kühlwasserpumpen und in der Folge zu TUSA. Weitere Kurzschlüsse führten 80 min später zur Eigenbedarfsumschaltung auf Fremdnetz und RESA. | Tiefe Temperaturen, Vereisungen | Freiluftschaltanlage, Eigenbedarfsversorgung | TUSA, RESA, Start eines Notstromdiesels |
| Ausfall eines Hauptkühlmittelpumpenmotors in Folge eines Kurzschlusses auf Grund von Kondensatbildung durch extrem niedrige Kühlwassertemperaturen | Tiefe Temperaturen, Kondensatbildung | Hauptkühlmittelpumpe | Leistungsabsenkung |
| Eingefrorene Entwässerungsleitung führt zu Leckage in Speisewassersystem | Tiefe Temperaturen, Vereisung | Speisewassersystem | Abfahren der Anlage |
| Mehrfach fehlerhaftes Öffnen eines Frischdampf-Sicherheitsventils für wenige Sekunden in Folge einer Vereisung einer Steuerleitung | Tiefe Temperaturen, Vereisung | Frischdampfsystem | Gering |

Ereignisse mit hohen Umgebungstemperaturen traten in der nationalen Betriebserfahrung nicht auf. Die Gründe dafür sind möglicherweise, dass sowohl hohe als auch tiefe Temperaturen am ehesten durch Folgeeffekte auf die Anlage wirken. Im Falle tiefer Temperaturen waren dies in der nationalen Betriebserfahrung meiste Vereisungen oder Kondensatbildung. Bei hohen Umgebungstemperaturen traten vergleichbare Folgeeffekte, wie z. B. der Ausfall der Gebäudeklimatisierung nicht auf, da die dafür erforderlichen Temperaturen offensichtlich bisher nicht erreicht wurden.

Auswertung und Bewertung nach Ereignisursachen

Es gab drei Ereignisse bei denen es auf Grund von *Vereisung in wasserführenden Systemen* zu Fehlfunktionen bzw. Schäden an diesen Systemen kam. Im ersten Ereignis betraf

die Vereisung eine Steuerleitung eines Frischdampf-Sicherheitsventils, was zum wiederholten, kurzzeitigen fehlerhaften Öffnen dieser Armatur führte. Das zweite Ereignis betraf die Vereisung einer Entwässerungsleitung, was zu einer Leckage am Speisewassersystem während des Leistungsbetriebs führte. Im dritten Ereignis kam es zu frostbedingten Schäden an zwei Absperrhähnen eines Feuerlöschsystems.

Weitere drei Ereignisse betrafen *Eisbildung an den Freiluftschaltanlagen*. Im ersten Ereignis führte abtauendes Eis im Umspannwerk zu Kurzschlüssen auf den 380-kV-Sammelschienen. In der Folge kam es zur Abschaltung von mehreren Hauptkühlwasserpumpen und Ansprechen des Kondensatorschutzes und TUSA. Im weiteren Verlauf kam es durch weitere Spannungseinbrüche zu einer Anregung der Eigenbedarfsumschaltung auf Fremdnetz und RESA. Beim zweiten Ereignis führte Eisbildung am Sammelschienentrenner dazu, dass Schaltkontakte nicht richtig schlossen. Während planmäßiger Schaltvorgänge wurde dadurch ein zweipoliger Kurzschluss ausgelöst. In der Folge wurden die Maschinenumspanner vom Netz getrennt und ein Lastabwurf auf Eigenbedarf durchgeführt. Infolge Überdrehzahl der Turbine kam es zu TUSA und Langzeitumschaltung der Eigenbedarfsversorgung sowie RESA. Beim dritten Ereignis kam es auf Grund starker Vereisung und später ablaufendem Tauwasser zu einem Kurzschluss in der 400-kV-Kraftwerksschaltanlage. Dies löste eine Langzeitumschaltung auf das Reservenetz aus. Dabei wurden die Eigenbedarfsschaltanlagen vorübergehend spannungslos und die Notstromdieselaggregate starteten und wurden nach 5 Minuten im Leerlauf ordnungsgemäß automatisch abgeschaltet.

Bei zwei Ereignissen führten (extrem) *niedrige Kühlwassertemperaturen* zu Ausfällen bzw. Abweichungen von betrieblichen Vorgaben. Im ersten Ereignis kam es durch untypisch tiefe Kühlwassertemperatur im Luft/Wasser-Kühler des Hauptkühlmittelpumpenmotors in Verbindung mit der Zumischung von Luft mit höherer absoluter Feuchte zu Kondensatbildung und nachfolgend zu einem Erdschluss und Ausfall der Hauptkühlmittelpumpe. Beim zweiten Ereignis führten niedrige Umgebungstemperaturen zu einer Kühlwassertemperatur am Ladeluftkühler von etwa 3 °C, die in Verbindung mit einer niedrigen (aber bestimmungsgemäßen) Temperatur im Motorkühlwasserkreislauf zu einem verzögerten Hochlaufen eines Notstromdiesels während einer WKP führte. Im Anforderungsfall wäre der Diesel zwar angelaufen, aber erst nach mehr als 15 Sekunden verfügbar gewesen.

Bei zwei Ereignissen kam es auf Grund von *Eisbildung im Einlaufbauwerk* zu Beeinträchtigungen der Kühlwasserentnahme. Beim ersten Ereignis führte Eiskristallbildung an den

Grobabweisern zur Beeinträchtigung der Kühlwasserentnahme, was schlussendlich zu einer Leistungsreduktion und Schutzabschaltung von 3 der 6 Hauptkühlwasserpumpen führte. Beim zweiten Ereignis kam es auf Grund von starker Eisbildung zur Außerbetriebnahme aller Grobrechenanlagen.

Da tiefe Temperaturen gleichzeitig in der gesamten Anlage wirken, besteht das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle bzw. Fehlfunktionen in wasserführenden Systemen durch Vereisungen. Ebenso können auch andere Systeme wie die Fremdnetzanbindung, Eigenbedarfsversorgung und auch Kühlsysteme redundanzübergreifend durch (äußere) Vereisung betroffen sein und zu Ausfällen führen. Durch Kondensatbildung in Gebäuden auf Grund (lokal) tiefer Temperaturen oder Tauwasserbildung bei zurückgehender Vereisung können zudem auch elektrische Kurzschlüsse auftreten. Dies geschieht möglicherweise auch redundanzübergreifend. Zudem können tiefe Temperaturen auch zu verändertem Betriebsverhalten in Systemen führen, wie das Beispiel des nur verzögert hochlaufenden Notstromdiesels auf Grund niedriger Kühlwassertemperaturen zeigt. Auch dieses Verhalten ist potenziell redundanzübergreifend.

Auswertung und Bewertung nach betroffenen Systemen

Die *Grobrechenanlage* war bei zwei Ereignissen betroffen. Die *Grobrechenanlage* nimmt rein betriebliche Aufgaben wahr. Bei drei Ereignissen waren die *Freiluftschaltanlage* und/oder die *Eigenbedarfsversorgung* betroffen. Auch diese Systeme haben allein betriebliche Aufgaben. Ein Ausfall dieser Systeme kann potenziell zu einem Notstromfall führen. Bei einem weiteren Ereignis war die *Sprühwasserlöschanlage* betroffen. Dieses System hat keine sicherheitstechnischen Aufgaben. Ebenfalls bei einem Ereignis war das *Hauptkühlwassersystem* betroffen. Dieses System hat rein betriebliche Aufgaben.

Ein weiteres Ereignis betraf eine *Hauptkühlmittelpumpe* und führte zum Ausfall dieser Pumpe. Auch der Ausfall mehrerer Hauptkühlmittelpumpen ist noch ein Ereignis der Sicherheitsebene 2 /BMU 15/ und damit eine Transiente, die die Anlage beherrschen können muss.

Ebenfalls bei einem Ereignis war das Speisewassersystem betroffen. Der betroffene Teil des Speisewassersystems hat rein betriebliche Aufgaben. Ein Ausfall des Speisewassersystems führt zu einer betrieblichen Transiente und ggf. zum Eingreifen des Notspeisewassersystems, um die Füllstände der Dampferzeuger zu halten. Im vorliegenden Fall fiel

das Speisewassersystem nicht aus, sondern die Anlage wurde normal abgefahren auf Grund der Leckage am Speisewassersystem.

Bei einem Ereignis war ein *Notstromdiesel* betroffen. Der Ausfall eines Notstromdiesels im Notstromfall ist durch die Auslegung abgedeckt. Hohe und tiefe Umgebungstemperaturen haben jedoch potenziell redundanzübergreifende Auswirkungen, so dass auch ein redundanzübergreifender Ausfall nicht ausgeschlossen werden kann. Dies könnte zu schweren Störungen bis hin zu Unfällen mit Kernschäden in den Anlagen führen, wenn die Stromversorgung nicht wiederhergestellt werden kann. Im vorliegenden Fall wäre der Diesel nur verzögert angelaufen, sodass die Anlage nicht stromlos gewesen wäre.

Bei einem Ereignis war ein *Frischdampf-Sicherheitsventil* betroffen. Beim Ereignis öffnete es mehrmals fehlerhaft für wenige Sekunden. Das Frischdampfsicherheitsventil hat sicherheitstechnische Aufgaben und ein fehlerhaftes Ansprechen dieses Ventils kann – vor allem dann, wenn es fehlerhaft in Offenstellung bleibt – zu gravierenden Transienten in der Anlage führen. Ein dauerhaftes Verbleiben in Offenstellung wäre ein Ereignis der Sicherheitsebene 3 der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/.

Auswertung und Bewertung nach tatsächlichen Auswirkungen

Bei vier Ereignissen kam es zu nur geringen Auswirkungen auf die Anlage. Dies bedeutet, dass die Anlage ihren planmäßigen Betriebszustand nicht verlassen hat und ggf. nur auf eine weitere betriebliche Redundante umgeschaltet wurde.

Bei zwei Ereignissen kam es zu einer – zumindest vorübergehenden – Leistungsabsenkung der Anlage. Eine sicherheitstechnische Relevanz ist nicht gegeben.

Bei einem Ereignis kam es zum Abfahren der Anlage. Hier waren die Auswirkungen zumindest so groß, dass die Anlage ihren Betriebszustand verließ. Auch hier ist eine unmittelbare sicherheitstechnische Relevanz nicht gegeben.

Bei zwei weiteren Ereignissen kam es jeweils zu einer Turbinenschnellabschaltung (TUSA) und nachfolgend jeweils zu einer Reaktorschnellabschaltung (RESA). Da die Umschaltungen auf Fremdnetz erfolgten, haben auch diese Ereignisse keine unmittelbare sicherheitstechnische Relevanz. Bei einem der Ereignisse lief zudem noch ein Notstromdiesel kurz an, da die Eigenbedarfsumschaltung auf Fremdnetz Probleme bereitete.

Bei zwei der Ereignisse liefen Notstromdiesel an. Da jedoch die Umschaltung der Eigenbedarfsversorgung auf Fremdnetz jeweils erfolgreich war, wurden diese nicht benötigt. Auch hier ist die sicherheitstechnische Relevanz nicht unmittelbar gegeben.

5.2.2 Internationale Betriebserfahrung

In der IRS Datenbank lassen sich 29 Meldungen identifizieren, die mit den Auswirkungen hoher und niedriger Umgebungstemperaturen verbunden sind. Davon betreffen einige Meldungen mehrere Ereignisse.

Auswertung und Bewertung nach Ereignisursachen

Im Zusammenhang mit niedrigen Umgebungstemperaturen betreffen 13 Ereignisse die Bildung von *Eis im Kühlwassereinlauf* oder den Eintrag von Eis in den Kühlwassereinlauf. In der Folge kam es zur Verminderung des Kühlwasserdurchsatzes oder zum Ausfall von Kühlwassersystemen. Die Blockade von Kühlwassersystemen durch Eisbildung kann potenziell auch zu redundanzübergreifenden Ausfällen in sicherheitstechnisch wichtigen Systemen führen.

Zehn Ereignisse betrafen das *Einfrieren von Kleinleitungen* (Impuls- oder Messleitungen) mit nachfolgend unterschiedlichen Auswirkungen, u.a. Abschaltungen wegen falscher Messwerte, Fehlauslösungen von Armaturen, etc. Fehlerhafte Messwerte und Fehlauslösungen von Armaturen sind normalerweise nur betriebliche Störungen. Erhebliche sicherheitstechnische Bedeutung erlangen sie dann,

- wenn es redundanzübergreifend zu falschen Messwerten kommt und damit der wahre Zustand der Anlage unter Umständen nicht erkannt wird oder
- wenn mehrere Armaturen gleichzeitig oder kurz hintereinander fehlauslösen, was je nach betroffenen Systemen zu schweren Betriebsstörungen bis zu schweren Störfällen führen kann.

Darüber hinaus kam es in zehn Fällen zum *Einfrieren von Armaturen, Feuerhydranten oder Leitungen mittleren Durchmessers*

- Das Einfrieren von Armaturen führt nur im Anforderungsfall dieser Armaturen zu direkten Auswirkungen auf die Anlage. Friert nur eine Armatur ein, so ist dies durch das Einzelfehlerkonzept abgedeckt. Tiefe Temperaturen haben jedoch das Potenzial zur

redundanzübergreifenden Nichtverfügbarkeit der Armaturen zu führen. Je nach betroffenen Systemen kann dies die Abläufe betrieblicher Störungen oder Störfälle ungünstig beeinflussen.

- Das Einfrieren von Feuerhydranten – vor allem wenn mehr als nur einer betroffen ist – kann Brandbekämpfung erheblich erschweren.
- Das Einfrieren von Leitungen mittleren Durchmessers kann zu betrieblichen Störungen führen.

In drei Fällen kam es zur *Bildung von Kondenswasser*. In zwei dieser Fälle kam es zur *Bildung von Kondenswasser* in Räumen mit elektrischen bzw. elektronischen Bauteilen und nachfolgend zu Ausfällen in diesen Systemen. In einem weiteren Fall kam es zur *Bildung von Kondenswasser* in einer Stickstoffleitung und zum Einfrieren derselben.

- Die Bildung von Kondenswasser in Räumen hat das Potential zu redundanzübergreifenden Ausfällen von elektrischen und/oder elektronischen Systemen. Die meisten dieser Fehler treten jedoch an bereits vorgeschädigten Komponenten (Isolierungsschäden) auf. Je nach betroffenen Systemen kann dies zu schweren betrieblichen Störungen, Störfällen bis hin zu Unfällen führen.
- Die Bildung von Kondenswasser in Stickstoffsystemen kann zum Ausfall dieser Systeme führen. Je nach betroffenem System kann es potenziell zu Fehlanregung von Armaturen führen oder aber auch zum Ausfall von mit Stickstoff vorgespannten Systemen. Da auch dies potenziell redundanzübergreifend auftreten kann, kann es in der Folge zu erheblichen betrieblichen Störungen in der Anlage führen.

In zwei Fällen kam es zu Schäden an der Freiluftschaltanlage durch Eisbildung bzw. Schneelast.

- In einem Fall kam es zu Schäden in den Freiluftschaltanlagen durch hohe Schneelast oder gefrierenden Regen. Dies kann zu einem Notstromfall führen.
- In einem weiteren Fall kam es zu einem Schaden an Isolierungen durch Eisbildung an ungünstigen Stellen. Auch dies kann zu einem Notstromfall führen.

Bezüglich hoher Umgebungstemperaturen betrifft eine Meldung 142 verschiedene Ereignisse, die zu *Schäden an elektrischen Umrichtern*¹⁴ führten, davon waren 50 % bedingt durch *hohe Umgebungstemperaturen und/oder Feuchtigkeit*, wobei unklar bleibt, ob mit Umgebungstemperatur die Raumtemperaturen oder die Außenlufttemperaturen gemeint sind. Der Ausfall einzelner Umrichter auf Grund von Schädigungen führt allenfalls zu betrieblichen Störungen. Hohe Umgebungstemperaturen und/oder Feuchtigkeit treten jedoch potenziell redundanzübergreifend auf, sodass entsprechende Schädigungen auch in mehreren Redundanten auftreten können. Ob dies zu einem Ausfall führt oder nicht, ist ohne weitere Kenntnis der Schädigungsmechanismen nicht abschließend bewertbar.

In weiteren Meldungen führten hohe Umgebungstemperaturen zu *Fehlern an der Isolierung* von elektrischen Sammelschienen und nachfolgenden Kurzschlüssen¹⁵ oder zu Fehlern an den Erregermaschinen von Notstromdieseln. Diese Fehler an Isolierungen sind potenziell redundanzübergreifend. Abhängig von den betroffenen Isolierungen (Material, Alter, Prüfung, etc.) sind auch die Ausfallwahrscheinlichkeiten zu sehen. Ob dies zu einem Ausfall führt oder nicht, ist ohne weitere Kenntnis der Schädigungsmechanismen nicht abschließend bewertbar. In einem weiteren Ereignis kam es zu Isolierungsfehlern an Transformatoren auf Grund dauerhaft erhöhter Umgebungstemperaturen. In der Folge kam es zu Kurzschlüssen und Bränden an diesen Transformatoren. Auch hier ist eine abschließende Bewertung nicht möglich.

Ein weiteres Ereignis beschreibt Effekte durch Wärmeexpansion von eingeschlossenem Wasser. In diesem Fall wurde die Leitung im Frühjahr abgesperrt und durch Wärmeexpansion des Wassers im Sommer stieg der Druck im System über den Auslegungsdruck, so dass die Armaturen sich auf Grund des hohen Differenzdrucks nicht mehr verfahren ließen. Eine abschließende Bewertung ist auch hier nicht möglich. Nach Kenntnis der GRS gibt es zumindest in deutschen Anlagen keine sicherheitstechnischen wichtigen Systeme, die in einer solchen Weise absperrbar wären ohne über ein Sicherheitsventil zu verfügen.

¹⁴ Wechsel- und/oder Gleichrichter

¹⁵ Die Kurzschlüsse traten nicht notwendigerweise während der Phase hoher Temperaturen auf.

Auswertung und Bewertung nach betroffenen Systemen

Leider sind in vielen der IRS-Meldungen (vor allem der Sammelmeldungen) die betroffenen Systeme nicht oder nicht eindeutig benannt. Eine Auswertung nach betroffenen Systemen kann damit nur eingeschränkt durchgeführt werden.

Systeme der Kühlwasserversorgung waren durch Eisbildung im oder Eiseintrag in die Einlaufbauwerke betroffen. Der redundanzübergreifende Ausfall sicherheitstechnisch wichtiger Kühlwassersysteme kann zu schweren Störungen bis Unfällen in den betroffenen Anlagen führen. Das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle ist durch Eis im Einlaufbauwerk gegeben.

Durch Eisbildung kam es zu Fehlern in der *Freiluftschaltanlage* und zum (partiellen) Ausfall. Die Freiluftschaltanlagen haben rein betriebliche Aufgaben.

Bei (in Gebäuden befindlichen) *Systemen der elektrischen Energieversorgung und Elektronik*

- kam es durch tiefe Temperaturen zur Kondenswasserbildung und nachfolgend zu Fehlfunktionen (Kurzschlüsse). Je nach betroffenen Systemen und abhängig davon, ob es zu redundanzübergreifenden Ausfällen kommt, kann dies potenziell zu schweren betrieblichen Störungen, Störfällen oder Unfällen führen.
- kam es durch hohe Temperaturen (z. T. in Verbindung mit Feuchtigkeit) zu Schäden an Isolierungen oder nicht näher beschriebener Schäden an Umrichtern. Je nach betroffenen Systemen und abhängig davon, ob es zu redundanzübergreifenden Ausfällen kommt, kann dies ebenso potenziell zu schweren betrieblichen Störungen, Störfällen oder Unfällen führen.

Systeme mit Impuls- und Messleitungen sind besonders anfällig für Vereisungen in diesen Kleinleitungen. Dafür müssen diese allerdings den entsprechenden Temperaturen ausgesetzt sein. Das Einfrieren von Impuls- und Messleitungen kann zu falschen Messwerten, Fehlauslösungen von Armaturen oder zum Ausfall der angesteuerten Armaturen führen. Je nach betroffenem System und abhängig davon, ob dies redundanzübergreifend geschieht, kann dies potenziell zu schweren betrieblichen Störungen bis hin zu schweren Störfällen führen.

Auswertung und Bewertung nach tatsächlichen Auswirkungen

Insbesondere bei Sammelmeldungen werden die tatsächlichen Auswirkungen auf Anlagen nicht näher beschrieben. Insofern ist eine Auswertung nach tatsächlichen Auswirkungen schwierig.

Bei den beschriebenen Fällen von Eis im Einlaufbauwerk kam es zum Teil zu Leistungsabsenkungen und manuellen Abschaltungen der Anlagen. Dies spricht dafür, dass mehr als eine Redundante tatsächlich betroffen war.

Bei den beschriebenen Fällen von Vereisungen von Kleinleitungen (Mess- und Impulsleitungen) und dem beschriebenen Fällen von Einfrieren von mittleren Leitungen, Feuerhydranten und Armaturen kam es nur zu einzelnen, nicht redundanzübergreifenden Ausfällen. Dies spricht dafür, dass auch bei redundanzübergreifendem Potenzial der Einwirkung bei solchen Ereignissen noch zusätzliche Einflüsse vorhanden sein müssen. Die betroffenen Komponenten hatten zudem meist keine sicherheitstechnische Bedeutung.

Bei den beschriebenen Fällen von Vereisungen in den Freiluftschaltanlagen kam es zu Abschaltungen der Anlagen. Diese haben zum Teil einen Notstromfall zur Folge sind aber ansonsten nicht von größerer sicherheitstechnischer Bedeutung.

Bei den beschriebenen Fällen von Schädigungen an elektrischen und elektronischen Komponenten durch hohe Temperaturen kam es vereinzelt zu Abschaltungen der Anlagen. Da in den weitaus meisten Fällen aber nur die Schädigung beschrieben wurde, können daraus keine verlässlichen Rückschlüsse gezogen werden.

5.2.3 Vergleich der nationalen und internationalen Betriebserfahrung

Während in der internationalen Betriebserfahrung auch Schädigungen an Systemen auf Grund hoher Umgebungstemperaturen auftraten, liegen solche Fälle aus der nationalen Betriebserfahrung nicht vor. Die Gründe warum dies so ist sind unklar. Mögliche Gründe können sein

- andere klimatische Bedingungen, insbesondere nicht regelmäßig und über längere Zeiträume (Monate) anhaltende Hitzewellen oder
- bessere Prüfung und Wartung.

Dies kann nicht abschließend bewertet werden.

In Bezug auf tiefe Umgebungstemperaturen ähneln sich die nationale und internationale Betriebserfahrung sehr. Besonders betroffen waren die Freiluftschaltanlagen und die Einlaufbauwerke durch Eisbildung. Ebenso kam es national und international zum Einfrieren von kleinen und selten auch von mittleren Leitungen.

Die beschriebenen Fälle des Ausfalls einer Hauptkühlmittelpumpe bzw. das verzögerte Anlaufen eines Notstromdiesels aus der nationalen Betriebserfahrung haben kein internationales Pendant.

5.3 Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung

Hohe und tiefe Umgebungstemperaturen sind nach deutschem kerntechnischen Regelwerk standortspezifisch zu betrachten, ein Verfahren zur Ermittlung der Standortgefährdung ist bislang jedoch nicht vorgegeben. Bemessungsereignisse mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von $10^{-4}/a$ entsprechend der Anforderung des WENRA Reference Level, Issue T /WEN 14/ wurden bisher in Deutschland nach Kenntnis der GRS nicht abgeleitet.

Nach den durch die Teilnahme an internationalen Gremien gewonnenen Informationen wird im Hinblick auf extreme Temperaturen die Standortgefährdung nicht als statistisch ermittelter Extremwert angesetzt, sondern auf der Basis historisch beobachteter maximaler und minimaler Temperaturen. In Deutschland und international gibt es nach Kenntnis der GRS derzeit kein etabliertes Verfahren zur Ermittlung der Standortgefährdung im Hinblick auf hohe und tiefe Temperaturen in probabilistischer Weise.

5.4 Diskussion zur Ermittlung der Standortgefährdung

Die WENRA fordert Nachweise im Auslegungsbereich für die Beherrschung von Wetterbedingungen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von höchstens $10^{-4}/a$. Sofern es nicht möglich ist, diese Überschreitenswahrscheinlichkeit mit ausreichender Zuverlässigkeit zu ermitteln, soll eine Einwirkung festgelegt und begründet werden, mit der ein vergleichbares Sicherheitsniveau erreicht wird /WEN 14/.

Bei der Diskussion über die Ermittlung der Standortgefährdung müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Dies sind hinsichtlich hoher und niedriger Temperaturen aus Sicht der GRS insbesondere die folgenden Punkte:

- Auswirkungen kurzfristiger extremer Temperaturereignisse,
- Auswirkungen langfristiger Temperaturereignisse,
- die Zeitspannen, die Anlagen ohne Hilfe von außen beherrschen können,
- die Auswirkungen des Klimawandels.

Kurzfristig anstehende extreme Temperaturereignisse haben vor allem Auswirkungen auf im Freien befindliche Anlagenteile. Zur Ermittlung solcher Extremtemperaturen mit Wiederkehrperioden von 10.000 Jahren ist prinzipiell eine geeignete Extremwertstatistik verwendbar, bei der beispielsweise die entsprechenden Jahresmaxima bzw. -minima¹⁶ aufgetragen und extrapoliert werden. Die verfügbaren Zeitreihen sind von vergleichbarer Länge wie die verfügbaren Pegelraten oder Niederschlagsaufzeichnungen. Die Auswirkungen solcher – nur kurzfristig anstehender – Temperaturen auf eine Anlage können im Weiteren detailliert analysiert werden.

Langfristig anstehende Temperaturextreme wirken nicht nur auf die im Freien befindlichen Anlagenteile, sondern möglicherweise auch auf innenliegende Komponenten. Im Zuge der Betrachtung von hohen und niedrigen Temperaturen ist es wichtig, auch langfristig anstehende Temperaturen und deren mögliche Folgewirkungen in die Analyse mit einzubeziehen. Hierbei stellt sich die Frage inwieweit und ab wann die Anlage Hilfe von außen kreditieren darf. Dabei ist zu beachten, dass Hitze- und Kältewellen gut vorhersagbar sind und die weitere Entwicklung einer Situation zumeist gut abschätzbar ist. Die Anlagensituation wird sich zudem nur langsam entwickeln. Bei Ereignissen, die wesentlich über einer Woche andauern, kann eine Hilfe von außen für die Anlage angenommen werden.

Gemäß der Auswertung in /GRS 08/ sind hinsichtlich hoher und tiefer Temperaturen die folgenden Auswirkungen des globalen Klimawandels zu erwarten:

¹⁶ Prinzipiell ist auch ein Peak-over-threshold-Verfahren geeignet, hier muss aber insbesondere darauf geachtet werden, dass die ermittelten Werte statistisch unabhängig voneinander sind.

- In den Sommermonaten ist grundsätzlich mit höheren Temperaturen zu rechnen und insbesondere werden vermehrt Trockenperioden mit durchgehend sehr hohen Temperaturen erwartet.
- Frostperioden im Winter werden abnehmen.

An diesen Einschätzungen hat sich auch mit Erscheinen des fünften Sachstandsberichts des IPCC /IPC 13/ nicht grundsätzlich etwas geändert. Die Zuverlässigkeit regionaler Klimamodelle (insbesondere solcher, die Vorhersagen für die nächsten Dekaden generieren) wird dort kontrovers diskutiert und ist derzeit als nicht allzu hoch einzuschätzen. Es erscheint daher zielführend, bei einer Analyse die beobachteten Trends in den zur lokalen Analyse verwendeten Daten zu berücksichtigen und sich nicht (ausschließlich) auf Klimaprojektionen zu stützen. Dies gilt für Deutschland umso mehr, da der zu betrachtende relevante Zeitraum für den Betrieb von Kernkraftwerken sich nur noch im Bereich eines Jahrzehnts bewegt. Geht man von der mittleren Projektion des IPCC aus, so wird sich die Erde als Ganzes etwa um 3 K pro Jahrhundert erwärmen. Über die regionale Erwärmung ist damit allerdings keine Aussage getroffen. Da sich regionale Klimamodelle zum Teil gegenseitig widersprechen, sind zuverlässige Aussagen über Trends derzeit nur aus Beobachtungen zu ziehen. Zur Absicherung gegen die Auswirkungen des Klimawandels kann bei den Betrachtungen noch ein Aufschlag auf die so ermittelten Temperaturen vorgenommen werden.

Im Folgenden wird anhand der Tagesmaximaltemperatur und von Hitzewellen eine mögliche Vorgehensweise zur Ermittlung der Standortgefährdung beschrieben. Hierbei steht die Vorgehensweise im Vordergrund und nicht die (absolute) Verlässlichkeit der Werte. Diese Vorgehensweisen lassen sich auch analog auf Tagesminimaltemperaturen und Kälteperioden übertragen.

5.4.1 Ermittlung von Maximal- und Minimaltemperatur

Liegen entsprechend lange Zeitreihen vor, so kann mit einem geeigneten Verfahren auf ein Ereignis mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode geschlossen werden. In der Literatur werden u. a. folgende Verfahren zur Ermittlung von Extremwerten der Temperatur unterschiedlicher Wiederkehrperioden verwendet:

- die Gumbelverteilung /KYS 02/,
- die generalisierte Extremwertverteilung /KYS 02/, /GUD 14/, /HAS 12/,
- die generalisierte Extremwertverteilung mit variierenden Parametern /HAS 12/,

- autoregressive Modelle (AR(1)) /KYS 02/,
- nicht-parametrische, räumliche Modelle /FUE 13/.

Alle diese Methoden sind grundsätzlich geeignet, um Ereignisse mit entsprechenden Wiederkehrperioden zu ermitteln, führen jedoch zu Unsicherheiten bei der Modellwahl (epistemische Unsicherheit). Ebenso zur epistemischen Unsicherheit trägt bei, wenn die Daten nicht stationär sind, sondern einem Trend unterliegen. Dies gilt auch dann, wenn entsprechend des Trends korrigiert wird, da die Wahl des Trendmodells ebenfalls eine epistemische Unsicherheit darstellt. Abgesehen von Verschiebungen des Mittelwerts, kann ein Trend bei den Extremwerten auch dann auftreten, wenn sich bei der zu Grunde liegende Verteilungsfunktion der Temperaturen die Varianz, die Schiefe und/oder die Wölbung (Kurtosis) verändern /MCK 16/. Nach /KYS 02/ kann auch die Wahl, wie die Parameter ermittelt werden (Least Square, Maximum Likelihood, etc.), eine epistemische Unsicherheit darstellen. Weitere epistemische Unsicherheiten bei Temperaturmessungen sind beispielsweise:

- Änderungen der Messmethode (z. B. Thermometerwechsel),
- Änderungen der Umgebung der Messstelle (z. B. Änderungen des Bewuchses, Änderung der Bebauung),
- Verschiebung der Messstelle.

Aleatorische Unsicherheiten können zumindest durch Ermittlung der Unsicherheiten der Parameter abgeschätzt werden, allerdings kommt es dabei auf Grund der verwendeten Methode zur Ermittlung dieser Unsicherheiten zu weiteren epistemischen Unsicherheiten.

Ein Teil dieser Unsicherheiten ist unvermeidbar und nur schwer quantifizierbar. Eine sorgfältige Analyse der Datensätze und Prüfung auf Konsistenz auch im Vergleich mit anderen Datensätzen aus der Umgebung erscheint zwingend erforderlich. Der Vergleich verschiedener Modelle erscheint ebenso empfehlenswert. Modelle mit wenigen Parametern sind Modellen mit vielen Parametern vorzuziehen, sofern letztere nicht statistisch signifikant bessere Ergebnisse liefern.

Im Rahmen dieses Vorhabens kann keine vollständige Analyse durchgeführt werden. Exemplarisch wird jedoch eine einfache Analyse zur Ermittlung von Extremtemperaturen mit einer Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren durchgeführt. Diese Analyse wird für die Maximaltemperatur durchgeführt. Die Ermittlung einer Minimaltemperatur kann analog erfolgen.

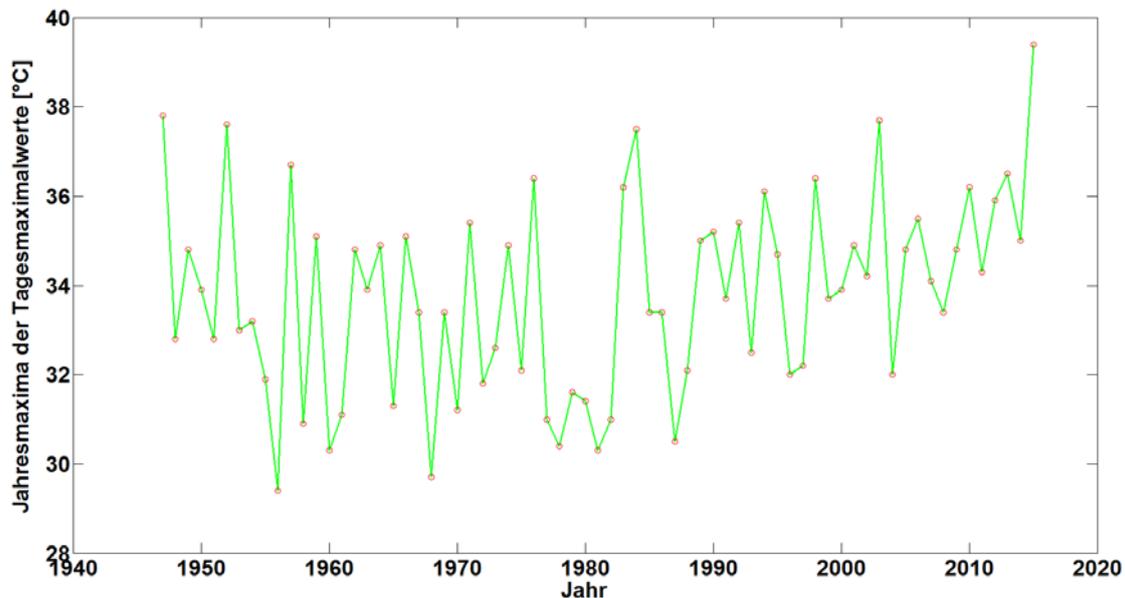


Abb. 5.1 Jahresmaxima der Tagesmaximalwerte für die Jahre 1947 bis 2015 der Station Würzburg

In einem ersten Schritt werden für die Station Würzburg im Zeitraum von 1947 bis 2015 die Jahresmaxima der Tagesmaximalwerte ermittelt. **Abb. 5.1** stellt die so erhaltene Zeitreihe dar. Ein klarer Trend ist nicht zu erkennen, auch wenn man vermuten kann, dass im Zeitraum 1947 bis etwa 1965 ein fallender Trend vorlag und danach ein steigender Trend. Die Wahl des Jahres 1965 wäre allerdings auch willkürlich. Eine Korrektur des Trends erfolgt aus diesem Grund nicht.

Die Jahresmaxima der Zeitreihe 1947 bis 2015 werden aufsteigender Reihenfolge geordnet und der Variable u zugeordnet. Daraus wird die normierte Zufallsvariable G

$$G = \frac{u - \bar{u}}{s_u} \tag{5.1}$$

abgeleitet, wobei \bar{u} den arithmetischen Mittelwert der Variable u bezeichnet und s_u die Standardabweichung dieser Zeitreihe.

Unter der Annahme, dass die Zufallsvariable G Gumbel-verteilt ist, kann diese durch eine Gumbelverteilung

$$F(G) = \exp\left(-e^{-\frac{1}{\beta}(G-\mu)}\right) \quad (5.2)$$

beschrieben werden, wobei $\beta > 0$ der Skalierungsparameter und μ der Lageparameter der Gumbelverteilung ist. An die Zufallsvariable G wird mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode eine Gumbelverteilung gefittet und die Parameter $\lambda_0 = \frac{1}{\beta_0}$ und μ_0 werden ermittelt.

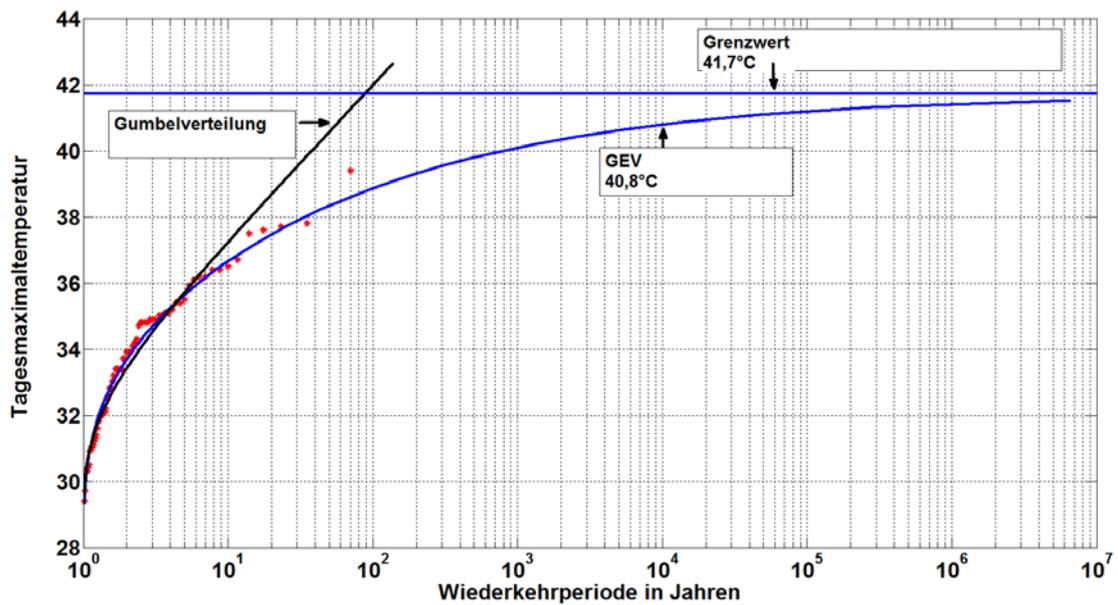


Abb. 5.2 Extrapolation der Jahresmaxima der Tageshöchsttemperaturen mittels Gumbelverteilung und generalisierter Extremwertverteilung (GEV)

Abb. 5.2 zeigt das so erhaltene Ergebnis als schwarze Linie. Die Gumbelverteilung stellt augenscheinlich keinen guten Fit an die rot dargestellten Messwerte dar. Zudem kommt die Extrapolation mittels der Gumbelverteilung für ein Ereignis mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode zu dem - unrealistisch hohen - Ergebnis von 51,5 °C. Da diese einfachste Extremwertverteilung – zumindest in Würzburg – nicht realistisch erscheint, wurde als Verallgemeinerung der Gumbelverteilung eine generalisierte Extremwertverteilung (GEV)

$$F(G) = e^{-\left(1+\xi\left(\frac{G-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-1/\xi}} \quad (5.3)$$

verwendet. Als Grenzwert $\xi \rightarrow 0$ enthält die GEV die Gumbelverteilung. Mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode wird die GEV an die Zufallsvariable G gefittet. Das Ergebnis ist in **Abb. 5.2** als durchgezogene blaue Linie dargestellt und liefert einen deutlich besseren Fit an die Datenpunkte. Als Ereignis mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode ergibt sich so eine Temperatur von 40,8 °C. Die GEV mit negativem Parameter ξ nähert sich asymptotisch einem Grenzwert an, so dass hier der Grenzwert für die Maximaltemperatur zu 41,7 °C angegeben werden kann.

5.4.2 Ermittlung der anzusetzenden Dauer von Hitze- und Kältewellen

Liegen entsprechend lange Zeitreihen vor, so kann mit einem geeigneten Verfahren auf die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Dauern der Hitze- bzw. Kältewellen geschlossen werden. In der Literatur werden unter anderem folgende Verfahren zur Ermittlung von Zeitdauern von Temperaturextremen unterschiedlicher Wiederkehrperioden verwendet /KYS 02/:

- die Gumbelverteilung,
- die generalisierte Extremwertverteilung und
- autoregressive Modelle (AR(1), AR(2)).

/KYS 02/ kommt bei der Verwendung von Gumbelverteilung bzw. GEV zu teils widersprüchlichen Ergebnissen, führt diese allerdings auf vergleichsweise kurze Beobachtungsdauern und die Existenz eines „Ausreißers“ in den Daten zurück. Nach /KYS 02/ passen AR(1)-Modelle besser zu Beobachtungsdaten, während AR(2)-Modelle besser zu den Daten aus Klimamodellen passen.

Es werden drei verschiedene Hitzewellentypen (A-C) definiert. Eine Hitzewelle vom Typ A besteht aus aufeinander folgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur von 23 °C oder mehr¹⁷. Eine Hitzewelle vom Typ B besteht aus aufeinander folgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur von 23 °C oder mehr, die aber von einzelnen, nicht aufeinander folgenden Tagen unterbrochen sein kann, aber nicht muss. Eine Hitzewelle vom Typ

¹⁷ Die Wahl dieses Schwellenwertes ist darin begründet, dass man einerseits Tage erfassen will, bei denen die Abkühlung über Nacht nicht zu groß ist und andererseits genug Tage in der Statistik haben will. Die Wahl unterliegt also auch einer gewissen Willkür.

C ist analog zu B definiert, nur dass die Unterbrechungen bis zu zwei aufeinander folgende Tage umfassen dürfen¹⁸.

Tab. 5.2 Beispiel für die Bestimmung der Hitzewellen

| Tage | Tagesmitteltemperatur | Typ A | Typ B | Typ C |
|------|-----------------------|------------|------------|------------|
| 1 | 23 | Hitzewelle | Hitzewelle | Hitzewelle |
| 2 | 22 | nein | | |
| 3 | 24 | Hitzewelle | | |
| 4 | 25 | | | |
| 5 | 20 | nein | nein | |
| 6 | 21 | nein | | |
| 7 | 26 | Hitzewelle | Hitzewelle | |

Ein Beispiel wie diese Hitzewellen bestimmt werden, ist in **Tab. 5.2** dargestellt. Die Tabelle zeigt den hypothetischen Temperaturverlauf über sieben Tage. Die Tage davor und danach liegen durchgehend unterhalb der Schwellentemperatur von 23 °C. Durch die niedrigen Temperaturen an den Tagen 2, 5 und 6 werden drei einzelne Hitzewellen des Typs A gezählt. Durch die niedrigen Temperaturen an den Tagen 5 und 6 werden zwei Hitzewellen des Typs B gezählt. Da jedoch keine Unterbrechung von mehr als zwei Tagen im dargestellten Zeitraum existiert ist nur eine Hitzewelle vom Typ C zu zählen.

Diese Art der Zählung von Hitzewellen wurde für die Station Würzburg durchgeführt. Dabei ergaben sich die in **Tab. 5.3** aufgeführten Werte der absoluten Häufigkeiten.

¹⁸ Diese Definitionen (Typ B und C) sind darin begründet, dass sowohl die Umgebung der Anlage als auch die Anlagengebäude selbst sich innerhalb von 1-2 Tagen nicht vollständig abkühlen.

Tab. 5.3 Absolute Häufigkeiten von Hitzewellen der Typen A, B und C

| Dauer [in Tagen] | Typ A | Typ B | Typ C |
|-------------------|------------|------------|------------|
| 1 | 138 | 123 | 113 |
| 2 | 63 | 50 | 40 |
| 3 | 32 | 29 | 22 |
| 4 | 17 | 15 | 11 |
| 5 | 6 | 9 | 10 |
| 6 | 7 | 5 | 9 |
| 7 | 4 | 4 | 9 |
| 8 | 4 | 5 | 4 |
| 9 | 2 | 7 | 5 |
| 10 | 3 | 4 | 3 |
| 11 | 0 | 0 | 3 |
| 12 | 0 | 0 | 2 |
| 13 | 0 | 0 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 1 |
| 15 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 1 | 1 |
| 17 | 0 | 0 | 1 |
| Gesamtzahl | 278 | 254 | 236 |

An die kumulativen relativen Häufigkeiten wird für die Hitzewellen vom Typ A – C jeweils eine GEV mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gefittet. Für Hitzewellen vom Typ A ergibt sich damit eine Dauer von etwa 43 Tagen für das Ereignis mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode, für Hitzewellen vom Typ B ergibt sich eine Dauer von etwa 34 Tagen und für Hitzewellen vom Typ C von etwa 33 Tagen.

Bezüglich der Werte für die 10.000 Jahre Wiederkehrperiode ist auch noch Folgendes zu beachten:

- Es werden sehr wenige Beobachtungswerte verwendet, daher weist die Extrapolation große Unsicherheiten auf.
- Verlässlicher erscheinen die Werte für Hitzewellen des Typs B und C, da dort mehr Beobachtungswerte der kumulativen relativen Häufigkeiten vorliegen.
- Die Dauer eines solchen Ereignisses sagt noch nichts über die Intensität der Hitzewelle aus.

5.4.3 Ermittlung der Kälte- bzw. Wärmesummen für verschiedene Zeiträume

Die im Abschnitt **5.4.1** aufgeführten Unsicherheiten betreffen auch die Ermittlung von Extremwerten von Wärme- und Kältesummen. Grundsätzlich spricht auch hier bei Vorliegen ausreichend langer Zeitreihen nichts gegen eine Extrapolation mittels Extremwertverteilungen. Eine Literaturrecherche hierzu führte allerdings zu keinem Ergebnis. Eine vollständige Analyse kann im Rahmen dieses Vorhabens nicht erfolgen, es wird jedoch eine vereinfachte Analyse für unterschiedliche Zeiträume durchgeführt.

Auf Grundlage der Ergebnisse in Abschnitt **5.4.2** werden Jahresextremwerte der gleitenden Mittelwerte für unterschiedliche Längen der Mittelungsdauer ermittelt und diese mittels GEV gefittet. Die Vorgehensweise ist dabei völlig analog zu Abschnitt **5.4.1**. Die gleitenden Mittelwerte sind die durchschnittlichen Wärmesummen für den betrachteten Zeitraum.

Da, abhängig vom Typ A – C der Hitzewellenbetrachtung, die Zeiträume für eine 10.000-jährliche Hitzewelle zwischen 33 und 43 Tage betragen, wird dies für neun gleichmäßig verteilte Dauern von 5 bis 45 Tage durchgeführt. Die Ergebnisse dazu werden in Abschnitt **5.4.4** dargestellt.

5.4.4 Ermittlung eines Ereignisspektrums mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode

Zur Ermittlung eines Ereignisspektrums mit jeweils 10.000 Jahren Wiederkehrperiode werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Hitzewellen einer bestimmten Dauer und der dazu korrespondierenden durchschnittlichen Wärmesumme kombiniert, um eine entsprechende Gesamteintrittswahrscheinlichkeit zu erhalten. Dabei ist zu beachten, dass die durchschnittliche Wärmesumme und die Dauer der Hitzewelle statistisch nicht zwingend unabhängig voneinander sind, das Maß der Korrelation jedoch nicht bekannt ist.

Da die Wärmesummen und die Dauer einer Hitzewelle nicht notwendigerweise statistisch unabhängig sind, wird im Folgenden angenommen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Hitzewelle einer bestimmten Dauer $1/a$ ist¹⁹ und dies kombiniert mit dem Ereignis mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode hinsichtlich der durchschnittlichen Wärmesumme für diese Dauer. Dieses Vorgehen ist konservativ, da es zu einer Überschätzung der tatsächlichen 10.000-jährlichen Ereignisse, vor allem für Ereignisse mit längeren Dauern, führt.

Tab. 5.4 Wärmesummen und durchschnittliche Wärmesumme (T_m) mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode für unterschiedliche Dauern zwischen 5 und 45 Tagen.

| Dauer [Tage] | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
|--------------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| T_m [°C] | 32,7 | 30,9 | 30,1 | 28,7 | 29,4 | 28,6 | 27,1 | 26,4 | 26,8 |
| Summe [°C] | 163,5 | 309 | 451,5 | 574 | 735 | 858 | 948,5 | 1056 | 1206 |

Die Ergebnisse sind in **Tab. 5.4** dargestellt. Klar erkennbar ist, dass mit zunehmender Dauer die durchschnittliche Wärmesumme sinkt. Insgesamt führen jedoch alle Ereignisse zu einer Erwärmung der Anlagenumgebung und der Anlage selbst.

5.5 Einfluss langfristig niedriger Umgebungstemperaturen

Langfristig anstehende niedrige Umgebungstemperaturen führen zu einer Auskühlung der Anlage und der Anlagenumgebung. Die nationale und internationale Betriebserfahrung legt nahe, dass vor allem die Freiluftschaltanlagen, der Kühlwassereinlauf und Kleinleitungen sowie Komponenten mit stagnierendem Wasser von Vereisung betroffen sind. Zusätzlich kam es durch niedrige Kühlwassertemperaturen (z.T. in Verbindung mit Kondensatanfall) zu Abweichungen im Betriebsverhalten bzw. Ausfällen. Durch vermehrten Kondensatanfall wurden insbesondere elektrische und elektronische Komponenten geschädigt. Grundsätzlich denkbar sind darüber hinaus Vereisungen in Lüftungskanälen, ebenso wie Einschränkungen der Zugänglichkeit der Anlage, sofern noch Schneefall/Schneeverwehungen hinzukommen.

¹⁹ Wenn also z. B. die Eintrittswahrscheinlichkeit einer 15 Tage dauernden Hitzewellen $1/20a$ ist, so wird dennoch konservativ davon ausgegangen, dass eine solche Hitzewelle von 15 Tagen jedes Jahr vorkommt. Bei statistischer Unabhängigkeit der Zeitspanne von der Wärmesumme wäre sonst hypothetisch die Wärmesumme mit 500 Jahren Wiederkehrperiode zu wählen.

Als Gegenmaßnahme kommt in den Anlagen unter anderem die Rückförderung von Kühlwasser vor das Einlaufbauwerk²⁰ zum Einsatz, was Vereisungen im Einlaufbauwerk verringert oder verhindert und die Kühlwassertemperaturen anhebt. Vereisungen in den Freiluftschaltanlagen können nur durch verstärkte Begehungen erkannt und durch entsprechend eingeleitete Maßnahmen gemindert werden. Die Einhaltung der Raumluftzustände kann durch (ggf. zusätzliche) Heizungen und vermehrten Umluftbetrieb erreicht werden. Im Leistungsbetrieb erscheint die Gefährdung insbesondere hinsichtlich Vereisung im Einlaufbauwerk und verstärktem Kondensatanfall insgesamt geringer als im Nichtleistungsbetrieb, da die Anlagen hier viel Abwärme produzieren.

5.6 Einfluss langfristig hoher Umgebungstemperaturen

Langfristig anstehende hohe Umgebungstemperaturen inklusive langanhaltender intensiver Sonneneinstrahlung führen zu einer Erwärmung der Anlage und der Anlagenumgebung. Solange die Anlage im Leistungsbetrieb ist, stellen sich keine besonderen Anforderungen, schwieriger wird es, wenn die Anlage abgefahren werden muss. Sicherheitstechnisch wichtige Systeme und Komponenten müssen dennoch in Betrieb bleiben und erfordern eine Wärmeabgabe an die Umgebung. Ebenso muss die Nachwärmeabfuhr gewährleistet werden.

Durch die hohen Umgebungstemperaturen steigt insbesondere die Temperatur der Wärmesenke²¹. Sollten Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeabgabe an die Wärmesenke nicht mehr erfolgreich sein, so steigt insbesondere die Temperatur in den Zwischenkühlkreisen. Dadurch wird der Wärmeübergang zwischen Nachkühlkreislauf und Zwischenkühlkreislauf schlechter, so dass es in der Folge auf Grund der Nachwärme zu steigenden Temperaturen im Reaktor- bzw. Beckenkühlkreislauf kommen wird. Dadurch wird auch wieder mehr Wärme abgeführt, so dass die Nachwärmeabfuhr, wenn auch auf höherem Temperaturniveau, gewährleistet bliebe.

²⁰ Maßnahmen mit vergleichbaren Effekten werden auch im Kühlturbetrieb angewendet.

²¹ Dies ist unabhängig davon ob Flusswasserkühlung oder Kühlturbetrieb vorliegt.

Langfristig ist bei extremer Hitze ein Notstromfall zu unterstellen²². In dieser Situation ist die Kühlung der Notstromdiesel und der Kaltwasserzentrale²³ von besonderer Bedeutung. Im Folgenden werden anhand des Beispiels einer Referenzanlage die Auswirkungen hoher Temperaturen auf die Zwischenkühlkreisläufe der Notstromdiesel und der Kaltwasserzentrale beleuchtet.

Die Notstromdieselanlage D1 der Referenzanlage ist auf eine Vorlauftemperatur des Zwischenkühlkreislafes von 34 °C und eine Rücklauftemperatur von ca. 59 °C bei einem Minstdurchsatz von 41 kg/s ausgelegt. Damit lassen sich rechnerisch 4,29 MW thermischer Verlustleistung abführen. Der Dieselmotor hat eine Verlustwärme von ca. 4,257 MW, so dass die Wärme unter diesen Bedingungen vollständig abgeführt werden kann. Der Motorkühlkreislauf des Notstromdiesels hat dabei eine Vorlauftemperatur von 65 °C – 70 °C und eine Rücklauftemperatur von 85 °C. Steigt die Vorlauftemperatur im Zwischenkühlkreislauf, so verschlechtert sich die Wärmeabgabe und die Temperaturen im Motorkühlkreislauf steigen an, bis die Wärme wieder vollständig nach außen abgegeben werden kann. Bei 90 °C Rücklauftemperatur erfolgt eine Warnmeldung und bei 95 °C Rücklauftemperatur erfolgt eine Abschaltung des Notstromdiesels durch den Aggregatechutz, allerdings nicht im Notstromfall. Da der Zusammenhang zwischen der Vorlauftemperatur des Zwischenkühlkreises und der Rücklauftemperatur des Motorkühlkreises linear ist, kann die Notstromdieselanlage also bei Vorlauftemperaturen von etwa 44 °C im Zwischenkühlkreislauf noch betrieben werden, ohne dass unmittelbar Schäden zu befürchten sind. Beachtet man, dass gemäß KTA 3702 die Kühlwassersysteme derart ausgelegt sein müssen, dass der Wärmetauscher unter den ungünstigsten Werten für Temperatur, Druck und Durchsatz im Zwischenkühlkreislauf eine Reserve von 10 % der rechnerisch erforderlichen Wärmetauscherleistung haben muss /KTA 14b/, so ergeben sich auch darüber hinaus noch Reserven.

Die Notstromdiesel D2 sind gebunkert verbaut und werden über die Deionatbecken des Notspeisewassersystems gekühlt und sind damit weitgehend unabhängig von steigenden Temperaturen der Hauptwärmesenke.

²² Der Notstromfall wird unterstellt, weil ggf. mehrere Kraftwerke ihre Leistung reduzieren müssen oder abgeschaltet werden, was zu einem großflächigen Stromausfall führen könnte.

²³ Die Kaltwasserzentrale stellt das Kaltwasser zur Kühlung der Anlagengebäude bereit.

Die Kaltwasserzentrale stellt Kaltwasser für die Raumkühlung zur Verfügung. Dazu wird mittels Kältemaschinen Kaltwasser erzeugt und im Kaltwassersammelbecken bzw. den redundanzzugeordneten Einzelbecken gespeichert. Steigt die Temperatur des Kaltwassers in den Becken über 8 °C werden die Kältemaschinen in Betrieb genommen. Die Kondensatoren der Kältemaschinen werden durch den Zwischenkühlkreislauf gekühlt. Der Druck im Kondensator darf 11,4 bar nicht überschreiten. Das verwendete Kältemittel R134a wird bei einer Temperatur im Kondensator von 44 °C bei 11,3 bar verflüssigt und kann somit Kühlleistung erbringen, so dass selbst bei diesen hohen Temperaturen im Zwischenkühlkreislauf noch eine Kühlung realisierbar ist. In Schaltanlagenräumen und Elektronikräumen muss gemäß KTA 3601 auch während und nach Störfällen eine Maximaltemperatur von 35 °C eingehalten werden /KTA 05/. Die Abschaltung betrieblicher Verbraucher reduziert den Wärmeeintrag, so dass schlussendlich nur die Verlustwärme der sicherheitstechnisch wichtigen Verbraucher und der Wärmeeintrag von außen zu kühlen sind. Die vorhandenen Reserven in deutschen Kernkraftwerken erscheinen, angesichts der Möglichkeit selbst bei sehr hohen Kühlwassertemperaturen noch Kühlleistung zu erbringen, ausreichend.

Die hier unterstellten hohen Vorlauftemperaturen im Zwischenkühlkreislauf sind nur zu erreichen, wenn das Nebenkühlwasser ebenfalls sehr hohe Temperaturen aufweist. Bei diesen hohen Temperaturen im Nebenkühlwasser erscheint es fraglich, ob überhaupt noch Nebenkühlwasser vorhanden ist oder ob nicht das angrenzende Gewässer oder der Brunnen schon ausgetrocknet sind oder zumindest extremes Niedrigwasser führen.

5.7 Ergebnisse und Bewertung

Wie oben ausgeführt, muss bei der Einwirkung hoher und tiefer Temperaturen nicht nur der (einmalig) anstehende Extremwert betrachtet werden, sondern ggf. auch die langfristige Einwirkung von hohen und tiefen Temperaturen und die damit verknüpften Folgewirkungen. Daraus ergibt sich, dass in Bezug auf hohe und tiefe Temperaturen nicht von einem maßgeblichen Ereignis ausgegangen werden kann, sondern vielmehr eine Schar maßgeblicher Ereignisse hinsichtlich Temperaturen und Zeitdauern ermittelt werden sollte. Ein mögliches Verfahren zur Ableitung solcher Ereignisse auf der Basis einer generalisierten Extremwertverteilung wurde im Abschnitt 5.4 vorgestellt.

Je länger hohe bzw. tiefe Temperaturen anstehen, umso stärker fallen Folgewirkungen ins Gewicht. Bei Hitzewellen sind dies insbesondere fallende Wasserstände und wärmeres Kühlwasser sowie ggf. Abweichungen von den geplanten Raumtemperaturen. Bei Kälteperioden sind diese Folgewirkungen insbesondere Abweichungen von den geplanten Raumtemperaturen, vermehrte Eisbildung an neuralgischen Stellen sowie in Verbindung mit Schneefall ggf. Behinderungen der Zugänglichkeit der Anlage. Grundsätzlich sind der Verlust der Netzanbindung und der Ausfall der Eigenbedarfsversorgung nicht auszuschließen, so dass ein (langanhaltender) Notstromfall denkbar ist.

Bezüglich Hitzewellen ist auf Grund der in den Abschnitten **5.6** und **5.4** dargestellten Ergebnisse fraglich, ob die Temperatur der Umgebung der am stärksten limitierende Faktor ist. Für eine der wärmsten Gegenden Deutschlands wurde in Abschnitt **5.4.1** eine Tagesmaximaltemperatur von etwa 42 °C abgeleitet (Grenzwert der GEV), für längerfristige Hitzewellen wurden mittlere Tagestemperaturen deutlich unter 40 °C abgeleitet (Abschnitte **5.4.2**, **5.4.3** und **5.4.4**). Abschnitt **5.6** leitet ab, dass selbst bei Kühlwassertemperaturen von 42 °C die Notstromdiesel und die Gebäudeklimatisierung noch ein Mindestmaß an Funktionstüchtigkeit haben. Diese Kühlwassertemperaturen werden jedoch angesichts der vorherigen Ergebnisse nicht erreicht werden.

Aus Sicht der GRS wirkt sich die Situation einer lang anhaltenden Dürre, auf Grund der graduell sich verschlechternden Kühlwasserversorgung, eher kritisch auf die Anlagen aus. Langanhaltende Dürren sind jedoch nicht zwangsläufig durch langanhaltende hohe Temperaturen, sondern vor allem durch Niederschlagsarmut geprägt.

Auswirkungen von kurzfristigen extremen Temperaturereignissen

Typische Auswirkungen von kurzfristigen (extremen) Temperaturereignissen sind bei tiefen Temperaturen das Einfrieren von Kleinleitungen und Eisbildung in der Freiluftschaltanlage. Potenzielle Folgen dieser Ereignisse wurden in Abschnitt **5.2** diskutiert. Diese reichen vom Notstromfall bis hin zu schweren Störfällen. Die tatsächlich aufgetretenen Fälle in der Betriebserfahrung zeigen jedoch, dass es zwar zu einzelnen Fehlfunktionen kam, nicht jedoch zu redundanzübergreifenden Ausfällen. Die Freiluftschaltanlage ist zudem ein rein betriebliches System. Sicherheitstechnisch wichtige Systeme sind nach Kenntnis der GRS in Deutschland in Gebäuden verbaut oder erdverlegt. Ein redundanzübergreifender Ausfall sicherheitstechnisch wichtiger Systeme durch Vereisungen in Kleinleitungen erscheint daher wenig wahrscheinlich.

Typische Auswirkungen von kurzfristig (extrem) hohen Temperaturen traten in der deutschen Betriebserfahrung nicht auf. Bauteile, die sicherheitstechnisch wichtig sind und empfindlich gegenüber kurzfristig anstehenden hohen Temperaturen, wie z. B. elektronische Bauteile sind in Gebäuden verbaut, deren Kühlung durch Klimatisierung sichergestellt ist. Dadurch erscheint für Deutschland das Potenzial solcher Ausfälle gering.

Auswirkungen von langfristigen (extremen) Temperaturereignissen

Typische Auswirkungen von Hitzewellen sind Ausfälle elektrischer und elektronischer Komponenten. Ursache hierfür können direkte Schäden an den Komponenten auf Grund von Überhitzungen oder mittelbare Schäden durch langfristige Einwirkung hoher Temperaturen sein. Ein Beispiel für Letzteres sind Isolierungsschäden, die sich dann unter Umständen auch erst nach der Hitzewelle auswirken. In der deutschen Betriebserfahrung traten solche Fälle nicht auf. Über die Gründe dafür kann letztendlich nur spekuliert werden. Wie oben bereits angemerkt sind Bauteile, die sicherheitstechnisch wichtig sind und empfindlich gegenüber kurzfristig anstehenden hohen Temperaturen, wie z. B. elektronische Bauteile in Gebäuden verbaut, deren Kühlung durch Klimatisierung sichergestellt ist (vergleiche Abschnitt 5.6). Dadurch erscheint für Deutschland das Potenzial solcher Ausfälle gering.

Typische Fehlerquellen bei Kältewellen sind zum einen Vereisungen, die Ausfälle oder Fehlfunktionen an Systemen und Komponenten auslösen können, und zum anderen vermehrter Kondensatanfall an empfindlichen Stellen. Potenzielle Folgen dieser Ereignisse wurden in Abschnitt 5.2 diskutiert und reichen von einfachen betrieblichen Störungen hin zu schweren Störfällen. Gegenmaßnahmen wie in Abschnitt 5.5 diskutiert und die tatsächlich beobachteten Ereignisse sprechen dafür, dass während des Leistungsbetriebs der Anlagen Kältewellen und deren Folgen gut beherrscht werden können.

Im Hinblick auf Kältewellen erscheint die Situation grundsätzlich während längerer Stillstandsphasen kritischer, als während des Leistungsbetriebes, da die in der Anlage anfallende Abwärme (auch Nachzerfallswärme) sehr viel kleiner ist und stetig sinkt und somit der Heizbedarf der Anlage steigt. Bei sehr geringer Abwärme kann beispielsweise nicht mehr ausreichend warmes Wasser vor das Einlaufbauwerk zurückgefördert werden, um Vereisungen zu vermindern oder zu verhindern. Ebenso kann damit ein Eisstau (siehe auch Kapitel 4) unterhalb der Anlage nicht mehr gemildert oder verhindert werden. Zudem

hilft die geringere Abwärme nicht mehr so stark bei der Einhaltung der zulässigen Raumlufttemperaturen. In diesem Fall sind ggf. zusätzliche Maßnahmen zur Beheizung der Räume erforderlich.

Zeitspannen, die die Anlagen ohne Hilfe von außen beherrschen können

Im Folgenden wird von langfristig anstehenden hohen und tiefen Temperaturen ausgegangen und von Folgeeffekten, die nicht durch einmaliges Erreichen von Extremwerten auftreten. Dies können z. B. das langsame Aufheizen oder Auskühlen der Gebäude, die Entwicklung von Kühlwassertemperaturen oder ähnliche Phänomene sein. Die kurzfristigen Folgen muss die Anlage ohnehin ohne Hilfe von außen beherrschen können.

Hitze- bzw. Kältewellen sind mit einiger Sicherheit vorhersagbar und die weitere Entwicklung der Situation ist meist gut abschätzbar. Weder Hitze- noch Kältewellen führen per se zu einer Verschlechterung der Anlagensituation, d. h. der Anlagenzustand ändert sich nicht schlagartig, sodass genügend Zeit für Gegenmaßnahmen zur Verfügung steht. Diese langsame Entwicklung und gute Prognostizierbarkeit führt dazu, dass – bei entsprechender Vorausplanung – die Anlage in ihrer Sicherheit durch Hitze- und Kältewellen nicht beeinträchtigt wird. Für den Fall eines lange dauernden Notstromfalls ist die Anlage aus Sicht der GRS durch die Versorgung mit Diesel limitiert. Da die Anlagen Dieselvorräte für zumindest drei Tage bevorraten müssen /KTA 14c/²⁴, sind die Anlagen zumindest für diese Zeitdauer in der Lage sich selbst zu versorgen. Sofern die Anlagen die Anforderungen der KTA 3701 /KTA 14c/ erfüllen, stellt auch dies keine Einschränkung der Sicherheit dar.

Bewertung

Die RSK befasste sich in zwei Stellungnahmen /RSK 13/, /RSK 17/ mit langanhaltenden hohen und niedrigen Umgebungstemperaturen bzw. Effekten daraus. Sie kommt dort zu dem Ergebnis, dass die Phänomene entweder abgedeckt sind oder eine deutliche Robustheit plausibel ist.

²⁴ Dies ergibt sich aus der Forderung, dass bei Netzausfällen in Folge von EVA innerhalb von 3 Tagen ein Netzanschluss wiederhergestellt sein muss oder eine anderweitige Versorgungsmöglichkeit genutzt werden können muss. Siehe KTA 3701, Abschnitt 4.2.2(2)

Aus Sicht der GRS lässt sich auch auf Grund der Ergebnisse dieses Vorhabens kein weiterer Handlungsbedarf ableiten. Da sich eine Verschlechterung der Anlagensituation langsam und damit absehbar abzeichnet, kann rechtzeitig Hilfe von außen angefordert und erhalten werden, sofern entsprechende Pläne und Verträge im Vorfeld erarbeitet bzw. geschlossen wurden. Zu dieser Einschätzung kommt auch die RSK in der Stellungnahme /RSK 13/.

6 Biologische Einwirkungen

6.1 Darstellung der Einwirkung durch biologische Einwirkungen und verwandte Phänomene

6.1.1 Grundlagen

Biologische Einwirkungen gehören zu den naturbedingten Einwirkungen von außen und beschreiben alle durch tierische oder pflanzliche Organismen hervorgerufenen Einwirkungen. Biologische Einwirkungen können in sehr unterschiedlicher Form auftreten. Pflanzen bzw. Pflanzenteile, Muscheln oder Fische können unter anderem den Kühlwassereinlauf verstopfen, was zu einer Reduzierung des Kühlwasserdurchsatzes und damit zu einer Beeinträchtigung der primären Wärmesenke führen kann. Nagetiere können beispielweise elektrische Kabel beschädigen und Vogelschwärme können die Schaltanlage beeinträchtigen. Zudem wird mikrobiologisch induzierte Korrosion als biologische Einwirkung betrachtet, da sie alle Arten von Korrosion umfasst, die von Mikroorganismen ausgelöst oder beeinflusst werden.

6.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch biologische Einwirkungen

In Deutschland sind Ereignisse in Kernkraftwerken aufgetreten, deren Ursache auf biologische Einwirkungen zurückzuführen ist. Die meisten dieser Ereignisse beeinträchtigten die Kühlwasserversorgung.

Die Auswirkungen naturbedingter Einwirkungen von außen wurden in Deutschland durch mehrere Untersuchungen ausgewertet.

Im Rahmen des Berichts „Report on External Hazards related events at NPPs“ /JRC 13/ wurde eine Ereignissuche in den Datenbanken IRS, SAPIDE und VERA durchgeführt, um jeweils die internationale, französische und deutsche Betriebserfahrung mit naturbedingten Einwirkungen von außen auszuwerten. Zwischen 1967 und 2007 wurden insgesamt 36 Ereignisse in Deutschland festgestellt. Davon sind 28 % dieser Ereignisse auf biologische Einwirkungen zurückzuführen und stellen damit die häufigste Ereignisursache dar. Ähnliches gilt für Frankreich, wo biologische Einwirkungen mit 36 % ebenfalls die häufigste Ursache für Einwirkungen von außen sind. Bei den im IRS gemeldeten Ereignissen stellen biologische Einwirkungen die zeithäufigste Ursache (22 %) dar.

Aufgrund der Ereignisse im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Dai-Ichi wurde die RSK-Stellungnahme „Ausfall der primären Wärmesenke“ veröffentlicht /RSK 12/. In diesem Zusammenhang wurde beschlossen, die Robustheit der bestehenden Auslegung der Nebenkühlwasserversorgung unter Berücksichtigung aktueller Betriebserfahrung zu betrachten. Zu diesem Zweck wurde die internationale und deutsche Betriebserfahrung der jeweiligen Datenbanken IRS und VERA ausgewertet. Aus der nationalen Betriebserfahrung wurden zehn meldepflichtige Ereignisse identifiziert, bei denen es zur Verblockung der Nebenkühlwasserversorgung gekommen ist. Vier dieser zehn Ereignisse waren auf biologische Einwirkungen zurückzuführen. Als eine der typischen Ursachen für die Beeinträchtigung der primären Wärmesenke lässt sich die Bildung biologischer Fremdkörper identifizieren /RSK 12/. *„Ein in den letzten Jahren zunehmend zu beobachtendes Phänomen ist die Bildung von Muscheln in den Kühlwassersystemen der Anlage. Die Siebeinrichtungen halten Muschellarven nicht zurück und die Larven wachsen - teilweise in erheblichen Mengen - in den Systemen heran. Diese Muscheln können in die Kühler der Anlage eingetragen werden und deren Kühlwirkung verringern bzw. die Kühler blockieren. Eine chemische Bekämpfung, z. B. mittels Stoßchlorierung, ist aus Umweltschutzgründen unzulässig, so dass dieses Phänomen nur durch sorgfältige Beobachtung des Systemzustandes und rechtzeitige Entfernung solcher Muschelbestände beherrscht werden kann.“* Im Rahmen der RSK-Stellungnahme wurde unter anderem empfohlen, die Funktionsfähigkeit der sicherheitstechnisch relevanten Wärmetauscher durch eine geeignete Instrumentierung zu überwachen. Dazu gehört auch eine rechtzeitige Erkennbarkeit von Einwirkungen, die den Wärmeübergang der Wärmetauscher unzulässig beeinflussen, z. B. infolge von Fouling, schleichender Verstopfung der Wärmetauscherrohre oder Muschelbefall.

6.2 Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu biologischen Einwirkungen

6.2.1 Nationale Betriebserfahrung

Mit Hilfe der internen GRS-Datenbank „Vertiefte Auswertung meldepflichtiger Ereignisse“ (VERA) wurde untersucht, welche Ereignisse durch biologische Einwirkungen in Deutschland aufgetreten sind.

Es wurden bis Ende 2015 13 Meldepflichtige Ereignisse in deutschen Anlagen gemeldet, bei denen biologische Einwirkungen eine Rolle spielten. Diese sind in **Tab. 6.1** dokumentiert. Die Tabelle gibt eine Übersicht zu den Ursachen, den betroffenen Systemen und den Auswirkungen auf die Anlagen. Eine sicherheitstechnische Bewertung der Auswirkungen ist damit nicht verbunden.

Tab. 6.1 Aufgetretene nationale Ereignisse mit biologischen Einwirkungen

| Kurzbeschreibung | Ursachen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Leckage an Entlüftungsleitung des Motorluftkühlers einer Nebenkühlwasserpumpe | MIC | NKWS | Gering |
| Leckage an Entleerungsleitung des Nebenkühlwassersystems | MIC | NKWS | Gering |
| Leckage an Entwässerungsleitung des Nebenkühlwassersystems | MIC | NKWS | Gering |
| Leckage an Rohrleitungsstutzen des Nebenkühlwassersystems | MIC | NKWS | Gering |
| Leckage an Probenahmeleitung des Nebenkühlwassersystems | MIC | NKWS | Gering |
| Korrosion an Schraubverbindungen der Nebenkühlwasserpumpen | MIC | NKWS | Gering |
| Laubanfall in der Kühlwasserreinigungsanlage | Biologisches Treibgut | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Schädigung und Leckage an Zwischenkühlerrohr. Niveauabfall in den Ausgleichbehältern | Weichtiere | NKWS und ZKWS | Gering |
| Marder im Außenbereich der Generatorausleitung. Ständer-Erdschlussüberwachung angesprochen | Nagetiere | Generator | TUSA |
| Verminderung des Nebenkühlwasserdurchsatzes. Umstellung des Betriebskreises. | Biologisches Treibgut | NKWS | Gering |
| Kühlwasserseitige Verschmutzung der Ladeluftkühler eines Notstromdieselmotors | Wasserpflanzen und Weichtiere | Notstromdiesel | Gering |
| Laub- und Grasanfall in der Kühlwasserreinigungsanlage. Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen | Biologisches Treibgut | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verminderung des Nebenkühlwasserdurchsatzes. Umstellung des Betriebskreises des Zwischenkühlsystems | Biologisches Treibgut | NKWS und ZKWS | Gering |
| Leckage an Entlüftungsleitung des Motorluftkühlers einer Nebenkühlwasserpumpe | MIC | NKWS | Gering |

Tab. 6.2 Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach Art der biologischen Einwirkung

| Kategorie | Biologische Einwirkung | Anzahl Ereignisse | Anteil (%) |
|-----------|------------------------|-------------------|------------|
| A | MIC | 6 | 43 % |
| B | Biologisches Treibgut | 4 | 29 % |
| C | Weichtiere | 2 | 14 % |
| D | Wasserpflanzen | 1 | 7 % |
| E | Nagetiere | 1 | 7 % |

Tab. 6.3 Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach Art der Auswirkung

| Auswirkungen | Anzahl Ereignisse | Anteil (%) |
|----------------------|-------------------|------------|
| Gering | 10 | 77 % |
| Manuelle Abschaltung | 2 | 15 % |
| TUSA | 1 | 7 % |

Tab. 6.4 Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach betroffenem System

| Betroffene Systeme | Anzahl Ereignisse | Anteil(%) |
|--------------------|-------------------|-----------|
| Nebenkühlwasser | 9 | 60 % |
| Zwischenkühlsystem | 2 | 13 % |
| Hauptkühlwasser | 2 | 13 % |
| Generator | 1 | 7 % |
| Notstromdiesel | 1 | 7 % |

Die Auswirkung „Gering“ meint, dass es allenfalls zu betrieblichen Störungen kam, die jedoch nicht so gravierend waren, dass sich der Betriebszustand der Anlage geändert hätte.

Die in **Tab. 6.1** aufgeführten Ereignisse wurden gemäß der Klassifizierung biologischer Einwirkungen der *Western European Nuclear Regulators Association* (WENRA) /WEN 15/ sortiert. Um die sicherheitstechnische Bedeutung derartiger Ereignisse auszuwerten, wurden diese in betroffene Systeme und in Auswirkungen auf die Anlagen eingeteilt. Die Ergebnisse sind in den **Tab. 6.2** bis **Tab. 6.4** aufgelistet. Dabei werden manche Ereignisse hinsichtlich Ereignisursache bzw. hinsichtlich des betroffenen Systems doppelt gezählt.

Auswertung und Bewertung nach Ereignisursachen

Die Auswertung der nationalen Betriebserfahrung zeigt, dass *mikrobiologisch induzierte Korrosion* (MIC) die Ursache in 43 % der Ereignisse darstellt (Kategorie A). Das am häufigsten betroffene System ist das Nebenkühlwassersystem. Die sich hieraus potenziell ergebenden Auswirkungen auf die Anlagen sind als eher gering einzuschätzen. So kann es zwar zu vereinzelt Ausfällen von sicherheitstechnisch wichtigen Systemen kommen, dies ist jedoch durch das Einzelfehlerkonzept abgedeckt. Der Grund für die Häufigkeit liegt an den meldepflichtigen Ereignissen zu Schäden an ferritischen Rohrleitungen in Nebenkühlwassersystemen in den Jahren 2005 und 2006 aufgrund mikrobiologisch induzierter Korrosion. In den meisten Fällen wurden die Schädigungen durch Leckagen entdeckt. Weitere damit verbundene Überprüfungen ergaben Hinweise auf Wanddickenschwächungen. Zu diesem Thema wurden die GRS-Weiterleitungsnachrichten 2005/06 /GRS 05/ und 2007/02 /GRS 07/ geschrieben, die diese Problematik zusammenfassen und entsprechende Empfehlungen ableiten. Handlungsbedarf darüber hinaus lässt sich nicht ableiten.

Biologisches Treibgut verursachte 29 % der Ereignisse und stellt die zweithäufigste Ursache dar (Kat. B). In diesen Fällen kam es zum Laub- bzw. Graseintrag in die Haupt- und Nebenkühlwassersysteme. Die tatsächlichen Auswirkungen auf den Betriebszustand der Anlagen waren in zwei Fällen gering, es kam lediglich zur Umschaltung auf andere verfügbare Stränge. In zwei weiteren Fällen hingegen kam es auf Grund stark verminderter Kühlwassermengen zu manuellen Abschaltungen der Anlagen. Diese zwei Fälle demonstrieren das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle von Kühlwassersystemen durch biologisches Treibgut. Auch gesicherte Nebenkühlwassersysteme sind potenziell davon betroffen.

Die durch *Weichtiere bzw. Wasserpflanzen* verursachten Ereignisse liegen bei 14 % bzw. 7 %; insgesamt liegen dazu zwei Ereignisse (Kat. C und D) vor. Beim ersten Ereignis kam es zu Schäden an einem Zwischenkühlerrohr durch Muschelbewuchs, was zu einer Le-

ckage führte und daraufhin zum Füllstandsabfall in den Ausgleichsbehältern des Zwischenkühlsystems. Diese Leckage wurde bei der Analyse der Betriebsaufzeichnungen während der Revision festgestellt. Die Leckagemenge lag noch unterhalb des Eingreifgrenzwertes gemäß Prüfhandbuch. Im zweiten Ereignis wurden Muscheln und Wasserpflanzen an den Kühlwassereintrittsseiten der Ladeluftkühler eines Notstromdiesels festgestellt. Die Verstopfung der Ladeluftkühler wurde während einer wiederkehrenden Prüfung entdeckt und beseitigt. Beide Ereignisse hatten nur geringe tatsächliche Auswirkungen auf die Anlage. Potenzielle Auswirkungen auf die Anlage wären redundanzübergreifende Ausfälle, auch wenn bei den zwei bisher national aufgetretenen Ereignissen nur einzelnen Redundanten betroffen waren. Die Auswertung der internationalen Betriebserfahrung in Abschnitt 6.2.2 verdeutlicht dieses Potenzial.

Durch *Nagetiere* wurden ein Ereignis (7 %) verursacht (Kat. E). Infolge von durch einen Marder verursachten Schäden wurde der Generator vom Netz getrennt, nachdem die Ständer-Erdschlussüberwachung angesprochen hatte. Dies hatte eine Turbinenschnellabschaltung zur Folge. Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle ist aus Sicht der GRS nicht gegeben.

Auswertung und Bewertung nach betroffenen Systemen

In 60 % der Ereignisse war das *Nebenkühlwassersystem* betroffen. Ausfälle im Nebenkühlwassersystem können bei redundanzübergreifendem Ausfall zu schweren Störungen führen. Abhängig vom Anlagenzustand vor Ausfall von mehr als einer Redundanz des Nebenkühlwassersystems und davon wie viele Redundanzen zeitgleich oder verzögert ausfallen, ergeben sich potenziell erhebliche Störungen bis schwere Unfälle in der Anlage. Das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle ist abhängig von der Ausfallursache.

Das *Zwischenkühlsystem* und das *Hauptkühlwassersystem* waren jeweils in 13 % der Ereignisse betroffen. Während das *Hauptkühlwassersystem* allein betriebliche Aufgaben hat, ist das *Zwischenkühlsystem* von erheblicher Bedeutung für die nukleare Sicherheit der Anlage. Beim Zwischenkühlsystem ergeben sich bei redundanzübergreifendem Ausfall die gleichen potenziellen Folgen wie beim Nebenkühlwassersystem. Auch hier ist das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle abhängig von der Ausfallursache. Die Untersuchung zur Ausfallursache (s. o.) legt jedoch nahe, dass zumindest in Bezug auf biologische Einwirkungen ein solches Potenzial für das Zwischenkühlsystem gering ist.

Der *Generator* sowie die *Notstromdiesel* waren jeweils in 7 % der Fälle betroffen. Während der Generator allein betriebliche Aufgaben hat, sind die Notstromdiesel von erheblicher sicherheitstechnischer Bedeutung. Bei redundanzübergreifendem Ausfall von Notstromdieseln ergeben sich auch hier potenziell erhebliche Störungen bis schwere Unfälle in der Anlage. In Bezug auf biologische Einwirkungen ist jedoch zu bedenken, dass erstens die Notstromdiesel nur bei Wegfall des Fremdnetzes benötigt werden und zweitens die beobachtete Ereignisursache nicht als potenziell redundanzübergreifend angesehen wird.

Auswertung und Bewertung nach tatsächlichen Auswirkungen

77 % der Ereignisse hatten nur geringe tatsächliche Auswirkungen auf die Anlagen. Dies bedeutet, dass die Anlagen ihren Betriebszustand nicht verlassen haben und ggf. nur eine Umschaltung auf eine andere Redundanz erfolgte. In 15 % der Ereignisse war eine manuelle Abschaltung der Anlage notwendig, während eine Turbinenschnellabschaltung in 8 % der Ereignisse ausgelöst wurde. Aus den tatsächlichen Auswirkungen lässt sich somit nur ableiten, dass in der nationalen Betriebserfahrung biologische Einwirkungen nur eine geringe Relevanz hatten. Das Potenzial für gravierendere Ereignisabläufe, insbesondere zu redundanzübergreifenden Ausfällen von sicherheitstechnischen Systemen bleibt aber zumindest in Hinblick auf biologisches Treibgut bestehen.

6.2.2 Internationale Betriebserfahrung

Es wurde eine Recherche in der IAEA Datenbank „*International Reporting System for Operating Experience*“ (IRS) durchgeführt, welche Ereignisse durch biologische Einwirkungen in Kernkraftwerken weltweit aufgetreten sind.

Aus der internationalen Betriebserfahrung wurden 25 Ereignisse identifiziert, die in der **Tab. 6.5** dokumentiert sind. Die Tabelle gibt eine Übersicht der Ursachen, der betroffenen Systeme und der Auswirkungen auf die Anlagen. Eine sicherheitstechnische Bewertung der Auswirkungen ist damit nicht verbunden. Die Auswirkung „Gering“ meint, dass es allenfalls zu betrieblichen Störungen kam, die jedoch nicht so gravierend waren, dass sich der Betriebszustand der Anlage geändert hätte.

Tab. 6.5 Internationale Betriebserfahrung zu biologischen Einwirkungen

| Kurzbeschreibung | Ursachen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Verstopfung der Siebtrommeln. Verminderung des Kühlwasserdurchsatzes | Fische/ Quallen | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung des Trommelsiebes. Verminderung des Kühlwasserdurchsatzes. Abschaltung einer Hauptkühlwasserpumpe | Wasserpflanzen | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall von zwei Hauptkühlwasserpumpen | Wasserpflanzen | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Verstopfung der Siebbänder. Verminderung des Kühlwasserdurchsatzes. Ausfall einer Hauptkühlwasserpumpe | Wasserpflanzen | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Erhöhter Anfall von Pflanzen an Siebtrommeln. Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen | Wasserpflanzen | HKWS | RESA |
| Verstopfung der Siebtrommeln. Verminderung des Kühlwasserdurchsatzes | Wasserpflanzen | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung der Siebtrommeln. Vollständiger Ausfall des Nebenkühlwassersystems | Wasserpflanzen | NKWS | Manuelle Abschaltung |
| Ausfall elektrischer Komponenten aufgrund Vogelnester | Flugschwärme | Freiluft-Schaltanlage | Leistungsabsenkung |
| Durchdringendes Leck an Wärmetauscher im Kühlsystem eines Notstromdiesels | MIC | NKWS und Notstromdiesel | Unverfügbarkeit Notstromdiesel |
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen | Wasserpflanzen | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Verstopfung des Hauptkühlwassersystems | Weichtiere | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Ausfall von zwei Hauptkühlwasserpumpen. Druckanstieg im Kondensator. Ausfall von zwei Hauptspeisewasserpumpen | Weichtiere | HKWS und Speisewasser | RESA |
| Verstopfung der Siebbänder. Verminderung des Kühlwasserdurchsatzes | Fische/ Quallen | HKWS | Manuelle Abschaltung |

| Kurzbeschreibung | Ursachen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall von zwei Hauptkühlwasserpumpen | Fische/Quallen | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Korrosion in Armaturen des Nebenkühlwassersystems | MIC | NKWS | Gering |
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen | Biologisches Treibgut | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Abschaltung von zwei Hauptkühlwasserpumpen. Kavitation der Nebenkühlwasserpumpen | Wasserpflanzen | HKWS und NKWS | Manuelle Abschaltung |
| Schädigung und Leckage an einer Kühlwasserleitung | Weichtiere | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung des Nebenkühlwassersystems. Verminderung des Durchsatzes | Weichtiere | NKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung eines Regelventils des Notspeisewassersystems. Füllstandabfall der Dampferzeuger | Weichtiere | Speisewasser | RESA |
| Verstopfung des Nebenkühlwassersystems. Beeinträchtigung des Kühlsystems eines Notstromdiesels | Weichtiere | NKWS und Notstromdiesel | Gering |
| Verstopfung der Siebbänder der Kühlwasserreinigungsanlage | Fische/Quallen | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall von zwei Hauptkühlwasserpumpen | Fische/Quallen | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen | Fische/Quallen | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung der Wärmetauscherrohre | Weichtiere | NKWS | Gering |

Die in **Tab. 6.5** aufgeführten Ereignisse wurden gemäß der Klassifizierung biologischer Einwirkungen der WENRA /WEN 15/ sortiert. Um die sicherheitstechnische Bedeutung derartiger Ereignisse auszuwerten, wurden diese in betroffene Systeme und in Auswirkungen auf die Anlagen eingeteilt. Die Ergebnisse sind in den **Tab. 6.6** bis **Tab. 6.8** dargestellt.

Tab. 6.6 Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach Art der biologischen Einwirkung

| Kategorie | Biologische Einwirkung | Anzahl Ereignisse | Anteil (%) |
|-----------|------------------------|-------------------|------------|
| F | Wasserpflanzen | 8 | 32 % |
| G | Weichtiere | 7 | 28 % |
| H | Fisch/Quallen | 6 | 24 % |
| I | MIC | 2 | 8 % |
| J | Flugschwärme | 1 | 4 % |
| K | Biologisches Treibgut | 1 | 4 % |

Tab. 6.7 Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach Auswirkung

| Auswirkungen | Anzahl der Ereignisse | Anteil (%) |
|--------------------------------|-----------------------|------------|
| Manuelle Abschaltung | 11 | 42 % |
| Leistungsabsenkung | 7 | 27 % |
| Gering | 4 | 15 % |
| RESA | 3 | 12 % |
| Unverfügbarkeit Notstromdiesel | 1 | 4 % |

Tab. 6.8 Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach betroffenem System

| Betroffene Systeme | Anzahl der Ereignisse | Anteil (%) |
|----------------------|-----------------------|------------|
| Hauptkühlwasser | 17 | 59 % |
| Nebenkühlwasser | 7 | 24 % |
| Speisewasser | 2 | 7 % |
| Notstromdiesel | 2 | 7 % |
| Freiluftschaltanlage | 1 | 3 % |

Auswertung und Bewertung nach Ereignisursachen

Die Auswertung der internationalen Betriebserfahrung zeigt, dass *Wasserpflanzen, Fische/Quallen* und *Weichtiere* die häufigsten Ursachen darstellen (Kat. F, G und H). Diese verursachen zusammen 84 % der Ereignisse. Der größte Teil der Ereignisse führte zur Verstopfung der Kühlwasserreinigungsanlage und damit zur Reduzierung des Kühlwasserdurchsatzes und gegebenenfalls zum Ausfall der Haupt- oder Nebenkühlwasserpumpen. Damit besitzen Ereignisse, die durch Wasserpflanzen, Weichtiere und Fische oder Quallen ausgelöst werden, das Potenzial zu redundanzübergreifenden Ausfällen. Bemerkenswert hinsichtlich der betroffenen Systeme ist das Ereignis, welches das Speisewassersystem betraf. Dieser Fall wird bei der Auswertung und Bewertung nach betroffenen Systemen näher beschrieben.

Die durch *mikrobiologisch induzierte Korrosion* verursachten Ereignisse liegen bei 8 % (Kat. I). Sie verursachten jeweils ein durchdringendes Leck an einem Wärmetauscher im Kühlsystem eines Notstromdiesels und die Beeinträchtigung von Armaturen des Nebenkühlwassersystems. Die Internationale Betriebserfahrung unterscheidet sich hier nicht wesentlich von der deutschen Betriebserfahrung. Ein Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle ist hier nicht ersichtlich.

Durch *Flugschwärme* wurde ein Ereignis (Kat. J) ausgelöst, dies entspricht 4 % der Ereignisse. Elektrische Komponenten in der Schaltanlage fielen aufgrund von Vogelnestern aus. Ein Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle wird hier nicht gesehen.

Durch *biologisches Treibgut* kam es in 4 % der Fälle bzw. bei einem Ereignis zur Verstopfung des Kühlwassereinlaufbauwerks (Kat. K). Dies führte zu einer Leistungsabsenkung in der Anlage. Dies ist analog zur Auswertung der nationalen Betriebserfahrung ein Indiz für das Potenzial zu redundanzübergreifenden Ausfällen durch biologisches Treibgut.

Auswertung und Bewertung nach betroffenen Systemen

Hinsichtlich der betroffenen Systeme ergibt sich, dass das *Hauptkühlwassersystem* in 59 % der Ereignisse betroffen war. Da das Hauptkühlwassersystem nur betriebliche Aufgaben hat, ergibt sich hieraus keine besondere sicherheitstechnische Bedeutung.

Das *Nebenkühlwassersystem* war in 24 % der Ereignisse betroffen und stellt das am zweithäufigsten betroffene System dar. Ausfälle im Nebenkühlwassersystem können bei redundanzübergreifendem Ausfall zu schweren Störungen in der Anlage führen. Das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle ist abhängig von der Ausfallursache. Besonders bemerkenswert ist das folgende Ereignis, das das Nebenkühlwassersystem betraf:

- Mehrere Wärmetauscher des Nachwärmeabfuhrsystems waren infolge einer massiven Verstopfung durch Muscheln unverfügbar. Die Ursache war die Abschaltung des benötigten Chlorsystems im Nebenkühlwassersystem für einen längeren Zeitraum.

Das *Speisewassersystem* war in 7 % der Ereignisse bzw. bei zwei Ereignissen betroffen. Da das Hauptspeisewassersystem rein betriebliche Aufgaben wahrnimmt, ist eine sicherheitstechnische Bedeutung nicht unmittelbar gegeben. Allerdings war bei einem Ereignis das Notspeisewassersystem betroffen, das sicherheitstechnische Aufgaben hat. Auffallend sind die folgenden Ereignisse, bei denen das Speisewassersystem betroffen war:

- Eine Verstopfung der Kühlwasserreinigungsanlage auf Grund von Weichtieren wurde festgestellt. Dies führte zum Ausfall von zwei Hauptkühlwasserpumpen und daraufhin zum Druckanstieg im Kondensator. Zwei Hauptspeisewasserpumpen fielen aufgrund eines Hochdrucksignals in den Druckleitungen aus. Eine Reaktorschnellabschaltung (RESA) wurde ausgelöst.
- Beim Anfahrbetrieb fielen die Hauptspeisewasserpumpen aus. Die daraufhin gestarteten Notspeisewasserpumpen²⁵ konnten jedoch das Absinken des Füllstands in den Dampferzeugern nicht verhindern, wodurch eine Reaktorschnellabschaltung ausgelöst wurde. Als Ereignisursache wurde die Verstopfung eines Regelventils des Notspeisewassersystems durch Muscheln ermittelt. Die Muscheln wurden durch das Nebenkühlwassersystem eingetragen.

Ein redundanzübergreifender Ausfall des Notspeisewassersystems führt zu einem Ausfall der sekundärseitigen Wärmeabfuhr und kann damit potenziell zu schweren Unfällen führen.

Die *Notstromdiesel* waren in 7 % der Ereignisse bzw. bei zwei Ereignissen betroffen. Die Notstromdiesel sind von erheblicher sicherheitstechnischer Bedeutung. Bei redundanzüber-

²⁵ In der betreffenden Anlage dienen die Notspeisewasserpumpen auch als An und Abfuhrpumpen

greifendem Ausfall von Notstromdieseln ergeben sich auch hier potenziell erhebliche Störungen bis schwere Unfälle in der Anlage. In Bezug auf biologische Einwirkungen ist jedoch zu bedenken, dass die Notstromdiesel nur bei Wegfall des Fremdnetzes benötigt werden.

Die *Freiluftschaltanlage* war in 3 % der Ereignisse bzw. bei einem Ereignis betroffen. Die Freiluftschaltanlage ist ein System mit ausschließlich betrieblichen Aufgaben.

Auswertung und Bewertung nach tatsächlichen Auswirkungen

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Anlagen ergibt sich, dass eine manuelle Abschaltung in 42 % der Ereignisse nötig war. In 27 % der Ereignisse wurde die Leistung der Anlagen abgesenkt, während die Auswirkungen in 15 % der Ereignisse als gering einzuschätzen sind. Eine Reaktorschnellabschaltung wurde in 12 % der Ereignisse ausgelöst. In 4 % der Fälle war ein Notstromdiesel aufgrund mikrobiologisch induzierter Korrosion unverfügbar.

Bei zwei der in **Tab. 6.5** aufgeführten Ereignisse wurden in der IRS Datenbank die Einstufung gemäß INES-Skala angegeben:

- Aufgrund der Beeinträchtigung der Kühlwasserversorgung durch einen erhöhten Anfall von Pflanzenteilen kam es zur Abschaltung der Hauptkühlwasserpumpen. Dabei wurde eine Reaktorschnellabschaltung ausgelöst. Die Pflanzenteile wurden auf ein vorangegangenes Hochwasser in zwei Nebenflüssen und eine Sturmflut zurückgeführt. Dieses Ereignis wurde als INES-1 eingestuft.
- Große Mengen an Wasserpflanzen gelangten in die Kühlwassereinläufe. Dadurch fielen beide Stränge des Nebenkühlwassersystems aus. Die Anlage wurde von Hand abgeschaltet. Der erhöhte Anfall von Wasserpflanzenteilen wurde durch das hochwasserbedingte Ablassen von Wasser an einem, kurz vor der Anlage gelegenen, Stauwehr hervorgerufen. Infolge der erhöhten Durchströmung eines normalerweise nur schwach durchströmten Flussarms wurden die Wasserpflanzen losgerissen und gelangten in den Kühlwassereinlauf. Das Ereignis wurde als INES-2 eingestuft.

6.2.3 Vergleich der nationalen und internationalen Betriebserfahrung

Beim Vergleich der deutschen und internationalen Betriebserfahrung ist festzustellen, dass die Ereignisse durch biologische Einwirkungen in den deutschen Anlagen am häufigsten auf mikrobiologisch induzierter Korrosion zurückzuführen sind. Im Gegensatz sind die Ereignisse

in ausländischen Anlagen meistens auf Wasserpflanzen, Fische/Quallen und Weichtiere zurückzuführen. Da allerdings die IRS-Datenbank nicht alle internationalen Ereignisse enthält, sind Auswertungen auf Basis dieser Datenbank nicht zwingend statistisch belastbar.

Auffällig beim Vergleich ist zudem, dass es bei internationalen Ereignissen häufiger als bei nationalen Ereignissen zu mehr als nur geringen Auswirkungen auf die Anlagen kam. So führten biologische Einwirkungen sehr oft zu Leistungsabsenkungen, manuellen Abschaltung und in einzelnen Fällen auch zur RESA. Zwei der Internationalen Ereignisse haben eine INES Einstufung größer Null. Da allerdings die Einstufung von Ereignissen nach der INES-Skala nicht zwingend in der IRS-Datenbank aufgeführt bzw. gemeldet wird, ist nicht klar, ob nicht auch noch weitere Ereignisse eine INES Einstufung größer Null haben. Allerdings verdeutlicht die Einstufung von Ereignissen in die Stufen größer Null das Potenzial biologischer Einwirkungen erhebliche sicherheitstechnische Bedeutung zu bekommen.

6.3 Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung

Eine systematische Ermittlung der Standortgefährdung aufgrund von biologischen Einwirkungen im Sinne eines abdeckenden Ereignisses wurde bisher in Deutschland nicht durchgeführt. Jedoch sollen die Auswirkungen auf die Anlagen durch biologische Einwirkungen im Rahmen von Vorsorgemaßnahmen abgedeckt werden.

Die nachstehenden Anforderungen hinsichtlich biologischer Einwirkungen sind in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke Anhang 3 „Anforderungen an den Schutz gegen Einwirkungen von innen und außen sowie aus Notstandsfällen“ /BMU 15/ enthalten:

(1) *Insbesondere folgende biologische Einwirkungen sind standortspezifisch zu berücksichtigen:*

- *Muschelbewuchs,*
- *Anfall größerer Mengen von Algen, Quallen oder Fischen,*
- *Anfall größerer Mengen von Laub oder Gras als Treibgut,*
- *Anfall größerer Mengen biologischen Treibguts infolge von Hochwasser,*
- *mikrobiologische Korrosion.*

- (2) *Durch geeignete Maßnahmen oder Einrichtungen ist sicherzustellen, dass biologische Einwirkungen die Sicherheit der Anlage nicht unzulässig beeinträchtigen. Insbesondere ist die Verstopfung von Kühlwasser- und Lüftungssystemen zu verhindern.*
- (3) *Sicherheitstechnisch wichtige Kühlwasser- und Lüftungssysteme müssen einfach zu reinigen und zu warten sein.*
- (4) *Die notwendigen Reinigungseinrichtungen sind in der Anlage vorzuhalten.*
- (5) *Der Vorfluter ist im Hinblick auf eine Veränderung der biologischen Verhältnisse regelmäßig zu überprüfen.*

Eine entsprechende KTA für den Schutz gegen biologische Einwirkungen liegt nicht vor. Es wird allerdings in der KTA 3301 „Nachwärmeabfuhrsysteme von Leichtwasserreaktoren“ /KTA 14a/ gefordert, dass *„die Einrichtungen zur Nachwärmeabfuhr an eine primäre Wärmesenke müssen so ausgelegt und angeordnet werden, dass die NWA bei bestimmungsgemäßem Betrieb, bei Störfällen sowie bei den am Standort der Reaktoranlage in Betracht zu ziehenden Einwirkungen von außen (z. B. Hochwasser, Dürre, Eisbildung, Treibgutanschwemmung, Muschelbewuchs, Erdbeben) oder Notstandsfällen sichergestellt ist (...).“* Bei Nachwärmeabfuhrsystemen mit Fluss- oder Meerwasser sind *„Vorkehrungen und Maßnahmen vorzusehen, die durch Rückhaltung von Treibgut, Algen, Heu, Muscheln o. ä. die erforderliche Entnahme von Kühlwasser sicherstellen.“*

Von der *International Atomic Energy Agency (IAEA)* wurde bisher keine spezifische Richtlinie bezüglich biologischer Einwirkungen veröffentlicht. Die Richtlinie NS-G-1.5 /IAE 03/ enthält Empfehlungen für den Schutz gegen naturbedingte Einwirkungen von außen. Hinsichtlich biologischer Einwirkungen werden unter anderem eine Untersuchung der potenziellen Auswirkungen der Umgebungsbedingungen sowie geeignete Auslegungsmaßnahmen empfohlen, um die Verstopfung von den Wassereinflüssen und das Eindringen von biologischen Einwirkungen in Kühlsystemen zu vermeiden. Des Weiteren sollen die Betriebs- und Instandhaltungsprozeduren die Überwachung und den Schutz vor solchen Ereignissen sicherstellen.

Die WENRA Reference Levels beinhalten im Rahmen des *„Issue T: Natural Hazards“* /WEN 15/ Empfehlungen im Hinblick auf die Berücksichtigung von naturbedingten Einwirkungen von außen und bieten eine Klassifizierung von biologischen Einwirkungen, unter der die Ereignisauswertung aus den Datenbanken (siehe Abschnitt 6.2) durchgeführt wurde.

6.4 Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse

Der Bericht des Öko-Instituts e.V. „Screening zu neuen Erkenntnissen zur Risikoanalyse“ /OKO 15/ enthält hinsichtlich des Gefährdungspotenzials für Kernkraftwerke eine Kurzanalyse verschiedener naturbedingter Einwirkungen von außen. Die Untersuchung zielt darauf ab, ob neue fundierte Erkenntnisse vorliegen, die zu einer Neubewertung bekannter naturbedingter Einwirkungen von außen führen müssten. Bezüglich biologischer Einwirkungen wiesen mehrere Forschungsarbeiten darauf hin, dass sich Algen, Quallen und Muscheln in den letzten Jahrzehnten unter menschlichem Einfluss schneller und weiter in neue Regionen ausbreiten. Da neue Erkenntnisse für diese biologischen Einwirkungen identifiziert wurden, wurde eine vertiefte Untersuchung zu ihren potenziellen sicherheitstechnischen Auswirkungen angeregt. Die weiteren biologischen Einwirkungen (Flugschwärme, Nagetiere, biologisches Treibgut und mikrobiologisch induzierte Korrosion) wurden nicht untersucht. Diesbezüglich wurde seitens des Öko-Instituts ein vergleichbares Screening angeregt.

6.5 Ergebnisse und Bewertung

Im Gegensatz zu anderen naturbedingten Einwirkungen von außen, wie Erdbeben und Hochwasser, wurde eine Standortgefährdung aufgrund von biologischen Einwirkungen bisher in Deutschland nicht ermittelt. Jedoch sollen die Auswirkungen auf die Anlagen durch biologische Einwirkungen im Rahmen von Vorsorgemaßnahmen, wie im Abschnitt **6.3** ausgeführt, abgedeckt werden. Die biologischen Einwirkungen sind vielfältig aber meist mit tatsächlich geringen sicherheitstechnischen Auswirkungen. Dennoch ergab die Auswertung der nationalen und internationalen Betriebserfahrung in Abschnitt **6.2**, dass es biologische Einwirkungen wie biologisches Treibgut, Fisch- oder Quallenschwärme, Weichtiere oder Wasserpflanzen (zum Teil auch als Treibgut) gibt, die potenziell zu redundanzübergreifenden Ausfällen von sicherheitstechnisch wichtigen Systemen führen können. Es ist daher zielführend, die Robustheit der Anlagen im Rahmen von Vorsorgemaßnahmen gegen diese Einwirkungen allgemein zu erhöhen bzw. zu erhalten.

Eine systematische Ermittlung eines abdeckenden oder mehrerer abdeckender Ereignisse(s) im Sinne einer Standortgefährdungsanalyse (Gefährdungskurve) kann mit heutigem Kenntnisstand nicht durchgeführt werden, da hierfür derzeit keine Methoden verfügbar sind.

Mögliche Vorsorgemaßnahmen können sowohl administrativer als auch technischer Natur sein. Als administrative Maßnahmen sind z. B.

- die Erhöhung der Anzahl der Kontrollgänge am Einlaufbauwerk, wenn mit vermehrtem Anfall von biologischem Treibgut zu rechnen ist (z. B. bei Hochwassern),
- die Verdichtung von Monitoringmaßnahmen im Einlaufbauwerk und in der Umgebung des Standortes hinsichtlich der dort vorkommenden Spezies,
- die Verdichtung wiederkehrender Prüfungen und Instandhaltung und
- regelmäßige Abgleiche laufend erhobener Daten wie z. B. Kühlwasserdurchfluss im Hinblick auf schleichende Verschlechterung der Werte

zu benennen.

Als technische Maßnahmen sind z. B.

- eine günstige Konstruktion des Einlaufbauwerks zur Verringerung des Eintrags biologischen Treibguts,
- zusätzliche Fanggitter um dieses Treibgut fern zu halten,
- Grob- und Feinrechen und
- Taprogge-Anlagen

zu benennen.

Auch die RSK empfiehlt in ihrer Stellungnahme „Ausfall der primären Wärmesenke“ /RSK 12/ Maßnahmen zur Überprüfung und ggf. Verbesserung der Zuverlässigkeit der primären Wärmesenke im Hinblick auf Blockaden des Kühlwasserzulaufs und nimmt dabei auch Bezug auf biologische Einwirkungen.

Aus Sicht der GRS ergeben sich aus den Ergebnissen dieses Vorhabens keine neuen sicherheitstechnisch relevanten Erkenntnisse zu biologischen Einwirkungen.

7 Kombinationen naturbedingter Einwirkungen

7.1 Darstellung der Kombination von naturbedingten Einwirkungen

7.1.1 Grundlagen

Durch das Tohoku-Erdbeben vom 11. März 2011 in Japan und den dadurch ausgelösten Tsunami rückte die Frage nach der sicherheitstechnischen Bedeutung von Kombinationen naturbedingter Einwirkungen in den Fokus.

Einwirkungskombinationen umfassen abhängige sowie unabhängige Einwirkungen. Unter abhängigen Einwirkungen versteht man sowohl Einwirkungen, die in einem kausalen Zusammenhang stehen, als auch Ereignisse, die aufgrund derselben Ursache auftreten. Unter unabhängigen Einwirkungen versteht man das zufällige Auftreten von mindestens zwei Einwirkungen, die zu grundsätzlich anderen Auswirkungen führen können als die einzelnen Einwirkungen. Hierzu können auch zeitversetzte Einwirkungen zählen.

7.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch Kombinationen naturbedingter Einwirkungen

In Deutschland sind Ereignisse in Kernkraftwerken aufgetreten, deren Ereignisursachen auf die Kombination naturbedingter Einwirkungen zurückzuführen waren. Dabei handelte es sich in den meisten Fällen um Kombinationen meteorologischer oder hydrologischer Einwirkungen mit biologischen Einwirkungen oder/und Treibgut.

Die Einwirkungskombination von Erdbeben und Hochwasser wurde für Einrichtungen zum Hochwasserschutz, die nicht gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt sind, im deutschen Regelwerk berücksichtigt. Eine vertiefte Untersuchung plausibler Kombinationen und ihrer möglichen Auswirkungen, die bei den einzelnen Einwirkungen jeweils nicht zu unterstellen sind, liegt bisher nicht vor.

7.2 Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu Kombinationen naturbedingter Einwirkungen

7.2.1 Nationale Betriebserfahrung

Mit Hilfe der internen GRS-Datenbank „Vertiefte Auswertung meldepflichtiger Ereignisse“ (VERA) wurde untersucht, welche Ereignisse durch Kombinationen naturbedingter Einwirkungen von außen in Deutschland aufgetreten sind.

Aus der nationalen Betriebserfahrung wurden 7 meldepflichtige Ereignisse identifiziert, die in **Tab. 7.1** dokumentiert sind. Die Tabelle gibt eine Übersicht zu den Einwirkungen, den betroffenen Systemen und den Auswirkungen auf die Anlagen. Die Ursachen bzw. die Einwirkungen wurden gemäß der WENRA-Klassifizierung sortiert /WEN 15/. Die abhängigen und unabhängigen Einwirkungen sind jeweils durch Pfeile bzw. Summenzeichen dargestellt. Die Auswirkung „Gering“ meint, dass es allenfalls zu betrieblichen Störungen kam, die jedoch nicht so gravierend waren, dass sich der Betriebszustand der Anlage geändert hätte.

Tab. 7.1 Nationale Betriebserfahrung zu Kombinationen naturbedingter Einwirkungen

| Kurzbeschreibung | Einwirkungen | Einwirkungstypen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Regenwassereintrag ins Reaktorgebäude und Maschinenhaus. Unterspülungen mit Geländeabsackungen | Regen → Bodensetzungen | Meteorologisch → Geologisch | Entwässerungssystem | Gering |
| Schmutzanfall durch Sturm bei Niedrigwasser. Abschaltung von drei Hauptkühlwasserpumpen | Starkwind, Sturm + Niedrigwasser → Treibgut | Meteorologisch + Hydrologisch → Treibgut | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Laubeintrag ins Nebenkühlwassersystem. Verminderung des Durchsatzes | Flusshochwasser → Biologisch/Treibgut | Hydrologisch → Biologisch/Treibgut | NKWS | Gering |
| Fehlende Schmierwasserversorgung einer Nebenkühlwasserpumpe aufgrund von Schwebstoffen | Flusshochwasser → Treibgut | Hydrologisch → Treibgut | NKWS | Gering |
| Laub- und Grasanfall in der Kühlwasserreinigungsanlage. Ausfall von Hauptkühlwasserpumpen | Flusshochwasser → Biologisch/Treibgut | Hydrologisch → Biologisch/Treibgut | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Laubeintrag ins Nebenkühlwassersystem. Verschmutzung eines Zwischenkühlers | Flusshochwasser → Biologisch/Treibgut | Hydrologisch → Biologisch/Treibgut | NKWS und ZKWS | Gering |
| Schmutzeintrag in den Kühlwasser-einlauf. Ausfall der Nebenkühlwasserpumpen | Regen → Treibgut | Meteorologisch → Treibgut | NKWS | Manuelle Abschaltung |

Um die sicherheitstechnische Bedeutung derartiger Ereignisse auszuwerten, wurden die aufgetretenen Ereignisse hinsichtlich der betroffenen Systeme und der tatsächlichen Auswirkungen auf die Anlagen eingeteilt. Die Ergebnisse sind in den **Tab. 7.2** bis **Tab. 7.4** dargestellt. Dabei werden manche Ereignisse hinsichtlich Ereignisursache bzw. hinsichtlich des betroffenen Systems doppelt gezählt.

Tab. 7.2 Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach Art der Einwirkungskombination

| Kategorie | Einwirkungskombinationen | Anzahl Ereignisse | Anteil (%) |
|-----------|--------------------------------------------------------|-------------------|------------|
| L | Hydrologisch → Biologisch/ Treibgut | 4 | 57 % |
| M | Meteorologisch + Hydrologisch → Biologisch/Treibgut | 1 | 14 % |
| N | Meteorologisch → Treibgut | 1 | 14 % |
| O | Meteorologisch → Geologisch | 1 | 14 % |

Tab. 7.3 Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach Auswirkung

| Auswirkungen | Anzahl Ereignisse | Anteil (%) |
|----------------------|-------------------|------------|
| Gering | 4 | 57 % |
| Manuelle Abschaltung | 2 | 29 % |
| Leistungsabsenkung | 1 | 14 % |

Tab. 7.4 Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach betroffenem System

| Betroffene Systeme | Anzahl Ereignisse | Anteil (%) |
|---------------------|-------------------|------------|
| Nebenkühlwasser | 4 | 50 % |
| Hauptkühlwasser | 2 | 25 % |
| Zwischenkühlsystem | 1 | 13 % |
| Entwässerungssystem | 1 | 13 % |

Auswertung und Bewertung nach Ereignisursachen

Die Auswertung der nationalen Betriebserfahrung zeigt, dass *biologische Einwirkungen* sowie *Treibgut* bedingt durch *hydrologische Einwirkungen* in vier Ereignissen bzw. in 57 % der Ereignisse auftraten (Kat. L). In solchen Fällen kam es zum Laub- oder Schmutzeintrag in die Haupt- und Nebenkühlwassersysteme infolge von Flusshochwasser. Der redundanzübergreifende Ausfall von mehreren Strängen des gesicherten Nebenkühlwassers kann zu schweren Störungen bis hin zu Unfällen in der Anlage führen. Die besondere sicherheitstechnische Bedeutung ist hier im potenziell redundanzübergreifenden Ausfall mehrerer Stränge bedingt durch das Treibgut zu sehen. Dies kann auch bei Flusshochwassern, die kleiner sind als das Bemessungshochwasser, potenziell auftreten.

Biologische Einwirkungen sowie *Treibgut* bedingt durch unabhängige *meteorologische* und *hydrologische Einwirkungen* trat in einem Ereignis bzw. in 14 % der Ereignisse auf (Kat. M). In diesem Ereignis kam es zum erhöhten Schmutzanfall in der Kühlwasserreinigungsanlage durch einen Sturm während einer Flussniedrigwasserphase. Dies führte zum plötzlichen Anstieg der Zulaufhöhendifferenz. Daraufhin wurde die Hälfte der Hauptkühlwasserpumpen abgeschaltet und die Reaktorleistung reduziert. Auch hier ist das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle von Systemen zu sehen. Bemerkenswert ist die Kombination von Treibgut mit einer Niedrigwasserphase.

Treibgut bedingt durch *meteorologische Einwirkungen* trat in einem Ereignis bzw. in 14 % der Ereignisse auf (Kat. N). Hierbei kam es zum Treibgut anfall im Kühlwassereinlaufbauwerk aufgrund starker Regenfälle. Während das Regenereignis selbst anscheinend keine besonderen Auswirkungen auf die Anlage hatte, wirkte das Folgeereignis. Es kam bedingt durch den Schmutzeintrag zum Ausfall von Nebenkühlwasserpumpen. Auch hier ist das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle von Systemen zu sehen. Bemerkenswert ist hier die Kombination von Treibgut ohne nennenswerte Hoch- oder Niedrigwasserphase.

Ein Kausalzusammenhang zwischen *meteorologischen* und *geologischen Einwirkungen* trat bei einem Ereignis bzw. in 14 % der Ereignisse auf (Kat. O). Infolge eines Starkregenereignisses kam es zum Eindringen von Regenwasser ins Reaktorgebäude, ins Maschinenhaus und in einen Lagerbereich im konventionellen Bereich. An vier Stellen auf dem Gelände entstanden punktuelle Unterspülungen mit Geländeabsackungen. Das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle geht hier vom auslösenden Ereignis (Regen) aus. Die Kombination mit punktuellen Unterspülungen führt zu keiner Verschlechterung der Situation. Auch Unterspülungen durch Regenereignisse, die zu Instabilitäten in Gebäuden führen würden, sind

schwer vorzustellen. Dafür bräuchte es größere Wassermengen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit, die auf das Anlagengelände gelangen müssten, z. B. aus (kleinen) Bächen (Sturzflut).

Auswertung und Bewertung nach betroffenen Systemen

Das *Nebenkühlwassersystem* war in der Hälfte der Ereignisse betroffen. Ausfälle im Nebenkühlwassersystem können bei redundanzübergreifendem Ausfall zu schweren Störungen führen. Abhängig vom Anlagenzustand vor Ausfall von mehr als einer Redundanz des Nebenkühlwassersystems und davon wie viele Redundanten zeitgleich oder verzögert ausfallen, ergeben sich potenziell erhebliche Störungen bis schwere Unfälle in der Anlage. Das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle ist abhängig von der Ausfallursache.

Das *Hauptkühlwassersystem* war in 25 % der Ereignisse betroffen. Das Hauptkühlwassersystem hat allein betriebliche Aufgaben. Ein Ausfall führt somit allenfalls zu einer Leistungsreduktion oder Abschaltung der Anlage.

Das *Zwischenkühlsystem* war in 13 % der Ereignisse betroffen. Beim Zwischenkühlsystem ergeben sich bei redundanzübergreifendem Ausfall die gleichen potenziellen Folgen wie beim Nebenkühlwassersystem. Auch hier ist das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle abhängig von der Ausfallursache.

Das *Entwässerungssystem* war in 13 % der Ereignisse betroffen. Das Entwässerungssystem nimmt keine sicherheitstechnisch wichtige aktive Funktion wahr, allerdings führte das Versagen des Entwässerungssystems im Ereignis zu einer Überflutung in sicherheitstechnisch wichtigen Bereichen.

Auswertung und Bewertung nach tatsächlichen Auswirkungen

Die tatsächlichen Auswirkungen auf die Anlagen sind in 57 % der Ereignisse als eher gering einzuschätzen. Dies bedeutet, dass die Anlagen ihren Betriebszustand nicht verlassen haben und ggf. nur eine Umschaltung auf eine andere Redundanz erfolgte. In 29 % der Ereignisse wurden die betroffenen Anlagen manuell abgeschaltet, während die Leistung der Anlagen in 14 % der Ereignisse abgesenkt wurde. Aus den tatsächlichen Auswirkungen lässt sich somit nur ableiten, dass in der nationalen Betriebserfahrung Kombinationen von Einwirkungen nur eine geringe Relevanz hatten. Das Potenzial für gravierendere Ereignisabläufe, insbesondere zu redundanzübergreifenden Ausfällen von sicherheitstechnischen Systemen

bleibt aber zumindest in Hinblick auf Ereigniskombinationen unter Beteiligung von (biologischem) Treibgut bestehen.

7.2.2 Internationale Betriebserfahrung

Mit Hilfe der Datenbank „*International Reporting System for Operating Experience*“ (IRS) wurde untersucht, welche Ereignisse durch Kombinationen naturbedingter Einwirkungen in Kernkraftwerken weltweit aufgetreten sind.

Aus der internationalen Betriebserfahrung wurden 20 Ereignisse identifiziert, die in **Tab. 7.5** dokumentiert sind. Die Tabelle gibt eine Übersicht zu den Einwirkungen, den betroffenen Systemen und den Auswirkungen auf die Anlagen. Die Ursachen bzw. die Einwirkungen wurden gemäß der WENRA-Klassifizierung sortiert [WEN 15]. Die abhängigen und unabhängigen Einwirkungen sind jeweils durch Pfeile bzw. Summenzeichen dargestellt. Die Auswirkung „Gering“ meint, dass es allenfalls zu betrieblichen Störungen kam, die jedoch nicht so gravierend waren, dass sich der Betriebszustand der Anlage geändert hätte.

Da die internationale Betriebserfahrung auch deutsche Ereignisse enthält, kommt es gelegentlich zu Überschneidungen. Andererseits ist die IRS-Datenbank auch nicht vollständig in dem Sinne, dass alle Ereignisse der internationalen Betriebserfahrungen gemeldet werden, sondern lediglich ausgewählte Ereignisse. Dies schränkt die statistische Auswertung der Ereignisse der IRS-Datenbank ein.

Tab. 7.5 Internationale Betriebserfahrung zu Kombinationen naturbedingter Einwirkungen

| Kurzbeschreibung | Einwirkungen | Einwirkungstypen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Verstopfung eines Siebbandes. Beschädigung einer Nebenkühlwasserpumpe | Regen → Treibgut | Meteorologisch → Treibgut | NKWS | Gering |
| Regenwassereintrag ins Reaktorgebäude und Maschinenhaus. Unterspülungen mit Geländeabsackungen ²⁶ | Regen → Bodensetzungen | Meteorologisch → Geologisch | Entwässerungssystem | Gering |
| Ausfälle von Nebenkühlwasserpumpen und Zwischenkühlpumpen | Erdbeben → Tsunamiwelle | Erdbeben → Hydrologisch | NKWS, ZKWS und Freiluftschaltanlage | RESA. Stromausfall |
| Zerstörung eines Schweröltanks des Hilfsdampferzeugers | Erdbeben → Tsunamiwelle | Erdbeben → Hydrologisch | Hilfsdampfversorgung | RESA |
| Überflutung eines Batterieraumes. Ausbreitung radioaktiver Stoffe außerhalb des Kontrollbereichs | Erdbeben → Tsunamiwelle | Erdbeben → Hydrologisch | Freiluftschaltanlage | RESA. Stromausfall. Ausbreitung von Radioaktivität |
| Ausfall einer Nebenkühlwasserpumpe und eines Notstromdiesels aufgrund Überflutung | Erdbeben → Tsunamiwelle | Erdbeben → Hydrologisch | NKWS und Schaltanlage | RESA. Stromausfall. Unverfügbarkeit Notstromdiesel |
| Verstopfung des Trommelsiebess. Abschaltung einer Hauptkühlwasserpumpe | Regen → Biologisch/Treibgut | Meteorologisch → Biologisch/Treibgut | HKWS | Leistungsabsenkung |

²⁶ WLN 2012/03 „Regenwassereintrag in das Kernkraftwerk Brunsbüttel am 04.09.2011“ /GRS 12/

| Kurzbeschreibung | Einwirkungen | Einwirkungstypen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall von zwei Hauptkühlwasserpumpen | Starkwind, Sturm → Biologisch | Meteorologisch → Biologisch | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall einer Hauptkühlwasserpumpe | Starkwind, Sturm → Biologisch/Treibgut | Meteorologisch → Biologisch/Treibgut | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Anfall von Pflanzen an Siebtrommeln. Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen ²⁷ | Flusshochwasser + Sturmflut → Biologisch/Treibgut | Hydrologisch → Biologisch/Treibgut | HKWS | RESA |
| Treibgutanteil in Siebeinrichtungen. Beeinträchtigung der Kühlwasserversorgung | Starkwind, Sturm + Umgebungsbrand + Regen → Treibgut | Meteorologisch + Umgebungsbrand → Treibgut | HKWS und NKWS | RESA |
| Verstopfung der Siebtrommeln. Verminderung des Kühlwasserdurchsatzes | Starkwind, Sturm → Biologisch | Meteorologisch → Biologisch | HKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung der Siebtrommeln. Vollständiger Ausfall des Nebenkühlwassersystems | Flusshochwasser → Biologisch | Hydrologisch → Biologisch | NKWS | Manuelle Abschaltung |
| Stromausfall aufgrund Umgebungsbedingungen | Regen + Niedrige Temperaturen + Starkwind, Sturm | Meteorologisch + Meteorologisch | Freiluftschaltanlage | RESA. Stromausfall |

²⁷ Ereignis als INES 1 eingestuft

| Kurzbeschreibung | Einwirkungen | Einwirkungstypen | Betroffene Systeme | Auswirkungen |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Unverfügbarkeit von Haupt- und Nebenkühlwasserpumpen | Erdbeben → Tsunamiwelle | Erdbeben → Hydrologisch | HKWS und NKWS | RESA |
| Ausfall von Sicherheitssystemen aufgrund Umgebungsbedingungen ²⁸ | Starkwind, Sturm + Sturmflut | Meteorologisch + Hydrologisch | NKWS und Freiluftschaltanlage | RESA, Stromausfall |
| Abschaltung von zwei Hauptkühlwasserpumpen. Kavitation der Nebenkühlwasserpumpen | Starkwind, Sturm → Biologisch | Meteorologisch → Biologisch | HKWS und NKWS | Manuelle Abschaltung |
| Verstopfung der Siebbänder. Ausfall der Kühlwasserversorgung | Regen + Starkwind, Sturm + Biologisch | Meteorologisch + Hydrologisch + Biologisch | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Verblockung der Kühlwasserentnahme. Ansammlung von Sulzeis aufgrund Starkwinde | Starkwind, Sturm + Vereisung | Meteorologisch + Meteorologisch | HKWS | Leistungsabsenkung |
| Überflutung des Pumpenhauses. Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen | Schneeefall + Starkwind, Sturm + Sturmflut | Meteorologisch + Hydrologisch | HKWS | Manuelle Abschaltung |

²⁸ Ereignis als INES 2 eingestuft

Tab. 7.6 Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach Art der Einwirkungskombination

| Kategorie | Einwirkungskombinationen | Anzahl der Ereignisse | Ereignisse (%) |
|-----------|--------------------------------------------------|-----------------------|----------------|
| P | Meteorologisch → Biologisch/Treibgut | 6 | 30 % |
| Q | Erdbeben → Hydrologisch | 5 | 25 % |
| R | Hydrologisch → Biologisch | 2 | 10 % |
| S | Meteorologisch + Meteorologisch | 2 | 10 % |
| T | Meteorologisch + Hydrologisch | 2 | 10 % |
| U | Umgebungsbrand + Meteorologisch → Treibgut | 1 | 5 % |
| V | Meteorologisch + Hyd- rologisch + Biologisch | 1 | 5 % |
| W | Meteorologisch → Geologisch | 1 | 5 % |

Tab. 7.7 Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach Auswirkung

| Auswirkungen | Anzahl der Ereignisse | Ereignisse (%) |
|-----------------------------------------|-----------------------|----------------|
| RESA | 9 | 33 % |
| Leistungsabsenkung | 5 | 19 % |
| Stromausfall | 5 | 19 % |
| Manuelle Abschaltung | 4 | 15 % |
| Gering | 2 | 7 % |
| Ausbreitung von Radioakti- vität | 1 | 4 % |
| Unverfügbarkeit von Not- stromdiesel | 1 | 4 % |

Tab. 7.8 Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach betroffenem System

| Betroffene Systeme | Anzahl der Ereignisse | Ereignisse (%) |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Hauptkühlwasser | 11 | 42 % |
| Nebenkühlwasser | 8 | 31 % |
| Freiluftschaltanlage | 4 | 15 % |
| Zwischenkühlsystem | 1 | 4 % |
| Entwässerungssystem | 1 | 4 % |
| Hilfsdampfversorgung | 1 | 4 % |

Um die sicherheitstechnische Bedeutung derartiger Ereignisse auszuwerten, wurden die aufgetretenen Ereignisse hinsichtlich der betroffenen Systeme und der Auswirkungen auf die Anlagen eingeteilt. Dabei ist zu beachten, dass ein Ereignis mehrere Systeme betreffen kann oder mehrere Auswirkungen auf die Anlage haben kann. Die Ergebnisse werden in den **Tab. 7.6** bis **Tab. 7.8** dargestellt.

Auswertung und Bewertung nach Ereignisursachen

Die Auswertung der internationalen Betriebserfahrung zeigt, dass *biologische Einwirkungen* sowie *Treibgut* bedingt durch *meteorologische Einwirkungen* 30 % der Ereignisse darstellen (Kat. P). In solchen Fällen kam es zum Eintrag von biologischem oder sonstigem Treibgut in die Haupt- und Nebenkühlwassersystemen infolge von meteorologischen Ereignissen. Der redundanzübergreifende Ausfall von mehreren Strängen des gesicherten Nebenkühlwassers kann zu schweren Störungen bis hin zu Unfällen in der Anlage führen. Die besondere sicherheitstechnische Bedeutung ist hier im potenziell redundanzübergreifenden Ausfall mehrerer Stränge bedingt durch das Treibgut zu sehen. Dies kann auch bei meteorologischen Ereignissen, die kleiner sind als die Bemessungsergebnisse, potenziell auftreten.

Die durch die Kombination von *Erdbeben* und *Hochwasser* verursachten Ereignisse liegen bei 25 % bzw. bei fünf Ereignissen (Kat. Q). Hierbei ist zu beachten, dass vier dieser Ereignisse beim Tohoku-Erdbeben in Japan aufgetreten sind. Die Kombination von Erdbeben und nachfolgender Tsunamiwelle ist international sehr geläufig, in Deutschland jedoch von geringer Relevanz. Tsunamis in der Nordsee sind eher zu erwarten durch submarine Hangrutschungen, wie z. B. das Storegga-Ereignis. Als Tsunamiursache kommen in der Nordsee

vielleicht zusätzlich noch Meteoriteneinschläge oder meteorologische Ursachen (Luftdruckschwankungen) in Frage. Diese Tsunamis wären dann allerdings nicht als Kombinationen von Ereignissen zu betrachten, da

- die relevanten submarinen Hangrutschungen nicht die Anlage selbst betreffen,
- Meteoriteneinschläge, die groß genug sind um Tsunamis auszulösen, im Nahfeld der Anlage den Tsunami vernachlässigbar erscheinen lassen und Meteoriteneinschläge im Fernfeld der Anlage in ihren direkten Auswirkungen (Druckwelle und Erdbeben) diese nicht betreffen,
- Relevante Luftdruckschwankungen als Auslöser von Meteotsunamis großflächig und im Bereich des Atlantiks auftreten müssen und damit die Anlage selbst nicht betreffen.

10 % der Ereignisse bzw. zwei Ereignisse sind auf die kausal verknüpfte Kombination von *hydrologischen* und *biologischen Einwirkungen* zurückzuführen (Kat. R). Beide Ereignisse wurden in der INES-Skala ungleich null eingestuft (INES 1 bzw. INES 2) und werden in Abschnitt **6.2.2** zusammengefasst dargestellt. In solchen Fällen kam es Eintrag von biologischem Treibgut in die Haupt- und Nebenkühlwassersysteme infolge von hydrologischen Ereignissen. Der redundanzübergreifende Ausfall von mehreren Strängen des gesicherten Nebenkühlwassers kann zu schweren Störungen bis hin zu Unfällen in der Anlage führen. Die besondere sicherheitstechnische Bedeutung ist hier im potenziell redundanzübergreifenden Ausfall mehrerer Stränge bedingt durch das Treibgut zu sehen. Dies kann auch bei hydrologischen Ereignissen, die kleiner sind als die Bemessungsereignisse, potenziell auftreten.

Mehrere unabhängige *meteorologische Einwirkungen* traten bei 10 % der Ereignisse bzw. zwei Ereignissen (Kat. S) auf. Beim ersten Ereignis kam es zum Ausfall der externen Stromversorgung aufgrund der Kombination aus Regenfällen, niedrigen Temperaturen und Starkwind. Beim zweiten Ereignis brach die Eisdecke des Flusses durch Starkwind auf und führte zur Ansammlung von Sulzeis und zur Verblockung des Kühlwassereinlaufbauwerks. Insbesondere der zweite Fall ist analog zu den Fällen mit Treibgut zu betrachten und hat damit potenziell redundanzübergreifende Auswirkungen.

Das unabhängige Auftreten *meteorologischer* und *hydrologischer Einwirkungen* stellt 10 % bzw. zwei Ereignisse dar (Kat. T). Beim ersten Ereignis kam es zum Ausfall von Sicherheitssystemen und zu Schäden an der Schaltanlage aufgrund des Zusammentreffens von schwerem Sturm und Gezeitenhochwasser. Diese führte zu so hohen Wellen, dass die Deiche überspült und mehrere Gebäudeteile überflutet wurden. Dieses Ereignis wurde mit INES-2

eingestuft. Beim zweiten Ereignis kam es zur Überflutung des Pumpenhauses aufgrund von Schneefall und einer Kombination aus Sturm und Sturmflut mit hohen Wellen und zu einem nachfolgenden Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen. Beide Ereignisse verdeutlichen die Bedeutung einer Auslegung gegen Sturmflut unter Berücksichtigung aller Begleitumstände. In der KTA 2207 wird eine solche Auslegung unter Berücksichtigung aller Begleitumstände gefordert. Darüber hinaus ergeben sich hieraus keine weiteren Erkenntnisse.

5 % bzw. ein Ereignis wurde durch mehrere unabhängige *meteorologische Einwirkungen* sowie einen *Umgebungsbrand* verursacht (Kat. U). Hierbei kam es zum erhöhten Schmutzanfall an den Siebeinrichtungen der Kühlwasserversorgung nach einem starken Regenfall und Sturm. Der Schmutz stammte aus einem Nebenfluss, der in der Nähe des Kühlwassereinflaßes mündet und aufgrund eines vorangegangenen Brandes in dessen Einzugsgebiet eine erhöhte Menge an Treibgut aufwies. Obwohl der Umgebungsbrand nicht selbst auf das Kraftwerk wirkte, trug er dennoch zu einer Verschlimmerung bei, da erst dadurch die erhöhten Treibgutmengen ermöglicht wurden. In sonstiger Hinsicht unterscheidet sich dieses Ereignis nicht wesentlich von den Ereignissen der Kategorien P und R. Das Treibgut hat auch hier wieder potenziell redundanzübergreifende Ausfälle zur Folge.

Bei 5 % der Ereignisse bzw. bei einem Ereignis traten *meteorologische, hydrologische* sowie *biologische Einwirkungen* zufällig gemeinsam auf (Kat. V). Es kam zum Ausfall der Kühlwasserversorgung aufgrund niedrigen Meeresspiegels, der durch starken Wind noch verstärkt wurde, und eines großen Fischeschwarmes, der in das Kühlwasserentnahmebecken geraten war. Dieses Ereignis verdeutlicht das Potenzial von zufälligen Kombinationen äußerer Einwirkungen, die sich – ungünstig überlagert – gegenseitig verstärken und so auch potenziell zu redundanzübergreifenden Ausfällen führen können.

Ein Kausalzusammenhang zwischen *meteorologischen* und *geologischen Einwirkungen* wurde in 5 % bzw. bei einem Ereignis festgestellt (Kat. W). Dieses Ereignis wurde bereits bei der Nationalen Betriebserfahrung zusammengefasst (Kat. O).

Auswertung und Bewertung nach betroffenen Systemen

Bezüglich der betroffenen Systeme ergibt sich, dass das *Hauptkühlwassersystem* in 42 % der Ereignisse betroffen war. Das Hauptkühlwassersystem hat allein betriebliche Aufgaben. Ein Ausfall führt somit allenfalls zu einer Leistungsreduktion oder Abschaltung der Anlage.

Der Anteil der Ereignisse, bei denen das *Nebenkühlwassersystem* betroffen war, liegt bei 31 %. Ausfälle im Nebenkühlwassersystem können bei redundanzübergreifendem Ausfall zu schweren Störungen führen. Die Folgen eines redundanzübergreifenden Ausfalls im Nebenkühlwassersystem sind abhängig vom Anlagenzustand vor Ausfall von mehr als einer Redundanz des Nebenkühlwassersystems und davon wie viele Redundanzen zeitgleich oder verzögert ausfallen

Die Freiluftschaltanlage war in 15 % der Ereignisse betroffen. Die Freiluftschaltanlage hat alleine betriebliche Aufgaben. Ein Ausfall der Freiluftschaltanlage kann zu einem Notstromfall führen, sofern der Lastabwurf auf Eigenbedarf nicht durchgeführt wird oder nicht funktioniert.

Das *Zwischenkühlsystem* war in 4 % der Fälle betroffen. Beim Zwischenkühlsystem ergeben sich bei redundanzübergreifendem Ausfall die gleichen potenziellen Folgen wie beim Nebenkühlwassersystem. Auch hier ist das Potenzial für redundanzübergreifende Ausfälle abhängig von der Ausfallursache.

Das Entwässerungssystem und die Hilfsdampfversorgung waren in jeweils 4 % der Fälle betroffen. Beide Systeme haben alleine betriebliche Aufgaben. Das Entwässerungssystem nimmt keine sicherheitstechnisch wichtige aktive Funktion wahr, allerdings führte das Versagen des Entwässerungssystems im Ereignis zu einer Überflutung in sicherheitstechnisch wichtigen Bereichen.

Auswertung und Bewertung nach tatsächlichen Auswirkungen

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Anlagen lässt sich erkennen, dass eine Reaktorschnelabschaltung bei 33 % der Ereignisse ausgelöst wurde. Bei 19 % der Ereignisse wurde die Leistung der Anlagen abgesenkt. Die externe Stromversorgung fiel in 19 % der Ereignisse aus. Eine manuelle Abschaltung erfolgte in 15 % der Fälle, während die Auswirkungen auf die Anlagen in 7 % der Ereignisse gering waren. Dies bedeutet, dass die Anlagen ihren Betriebszustand nicht verlassen haben und ggf. nur eine Umschaltung auf eine andere Redundanz erfolgte. Das Tohoku-Erdbeben und der dadurch ausgelöste Tsunami lösten bei einem

Ereignis (Anlage Tokai-2) sowohl eine geringe Ausbreitung von Radioaktivität außerhalb des Kontrollbereichs als auch die Unverfügbarkeit eines Notstromdiesels (jeweils 4 % der Ereignisfolgen) aus. Allerdings ist das Tohoku-Erdbeben auch als Auslöser für die schweren Kernschäden in den Kernkraftwerken Fukushima Dai-ichi 1-3 zu betrachten.

Aus den tatsächlichen Auswirkungen der internationalen Betriebserfahrung lässt sich damit ableiten, dass Kombinationen von Einwirkungen (Erdbeben in Verbindung mit Tsunami, Sturmflut + Tide) erhebliche Relevanz besitzen. Ein erhebliches Potenzial für gravierendere Ereignisabläufe, insbesondere zu redundanzübergreifenden Ausfällen von sicherheitstechnischen Systemen, wird auch hinsichtlich Ereigniskombinationen unter Beteiligung von (biologischem) Treibgut (inklusive Treibeis/Sulzeis) gesehen.

7.3 Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung

Die Standortgefährdung aufgrund von naturbedingten Einwirkungskombinationen von außen und ihrer möglichen Auswirkungen wurde bisher nicht ermittelt. Jedoch enthalten die nationalen und internationalen Regelwerke sowie sonstige Veröffentlichungen die folgenden Vorgaben:

Die Einwirkungskombination von Erdbeben und Hochwasser wird in KTA 2207 /KTA 04/ berücksichtigt. Für Einrichtungen zum Hochwasserschutz, die nicht gegen das Bemessungserdbeben nach KTA 2201.1 /KTA 11/ ausgelegt sind, ist zu prüfen, ob bei einer Einwirkungskombination aus einem Hochwasser mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $10^{-2}/a$ und einer Erdbebeneinwirkung auf dem Inspektionsniveau (40 % des Beanspruchungsniveaus des Bemessungserdbebens) ihre sicherheitstechnische Funktion gewährleistet ist. Weitere Einwirkungskombinationen werden im deutschen Regelwerk nicht explizit betrachtet.

Laut der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 15/ Anhang 3 „Anforderungen an den Schutz gegen Einwirkungen von innen und außen sowie aus Notstandsfällen“ sind Kombinationen mehrerer zu unterstellender Einwirkungen untereinander oder Kombinationen dieser Einwirkungen mit anlageninternen Ereignissen der Auslegung der entsprechenden Einrichtungen zu Grunde zu legen. Diese Kombinationen müssen dann unterstellt werden, wenn die zu kombinierenden Ereignisse in einem kausalen Zusammenhang stehen können oder wenn ihr gleichzeitiges Eintreten auf Grund der Wahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes in Betracht zu ziehen ist.

Die WENRA fordert im Dokument „*Safety Reference Levels for Existing Reactors*“ /WEN 14/, dass plausible Kombinationen interner und externer Einwirkungen, die zu möglichen Betriebsstörungen oder Auslegungsereignisse führen könnten, in der Auslegung der Anlage zu Grunde zu legen sind. Deterministische und probabilistische Analysen sowie ingenieurmäßige Bewertung können für die Auswahl der Einwirkungskombinationen verwendet werden. Darüber hinaus sind gemäß dem „*Guidance Document Issue T: Natural Hazards*“ /WEN 15/ Auslegungsereignisse für einzelne, abhängige oder unabhängige Einwirkungen festzulegen. Die abhängigen Einwirkungen sind entweder über eine Ursache-Wirkungs-Beziehung oder dieselbe Ursache verbunden. Die WENRA bietet eine ausführliche Klassifizierung möglicher naturbedingter Einwirkungen /WEN 15/, gemäß derer die Ereignisauswertung in Abschnitt 7.2 durchgeführt wurde.

7.4 Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse

Eine vertiefte Untersuchung plausibler Einwirkungskombinationen und ihrer möglichen Auswirkungen liegt bisher nicht vor.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde untersucht, welche Kombinationen naturbedingter Einwirkungen auftreten könnten. Zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einwirkungen wurde eine Matrix konzipiert, die in **Abb. 7.1** dargestellt ist. Dabei wurde unterschieden nach:

- Kausaler Zusammenhang:
 - Eine Einwirkung ist ein (mögliches) Folgeereignis einer Einwirkung (hellorange Feldmarkierung),
 - Zwei Ereignisse treten (möglicherweise) auf Grund gemeinsamer Ursache auf (dunkelorange Feldmarkierung),
- Zufällig gemeinsam oder zeitversetzt auftretende Ereignisse (blaue Feldmarkierung),
- Ereignisse, die sich gegenseitig ausschließen (grüne Feldmarkierung),
- Ereignisse, die nach Ansicht der GRS beim gemeinsamen Auftreten nicht zu einer nennenswerten Belastung führen, sind weiß hinterlegt.

Es ergaben sich immer wieder Grenzfälle, bei denen situationsabhängig a priori nicht eindeutig ist, in welche der Kategorien sie einzuordnen sind. Zum Beispiel ist es oft nicht eindeutig, ob ein Ereignis als Folgeereignis oder ob es auf Grund gemeinsamer Ursache aufgetreten ist bzw. sein könnte. Hierzu wurde die Annahme getroffen, dass ein Ereignis im Zweifelsfall zuerst in die Kategorie „Folgeereignis“, dann in die Kategorie „gemeinsame Ursache“ und erst danach in die Kategorie „zufälliges gemeinsames Auftreten“ einzuordnen ist.

Felder in **Abb. 7.1**, die mit einem „X“ markiert sind, bezeichnen Kombinationen, die in der nationalen bzw. internationalen Betriebserfahrung tatsächlich aufgetreten sind. Kombinationen, die bisher nicht aufgetreten sind, wurden nach ingenieurmäßiger Bewertung einsortiert, sofern für sie ein kausaler Zusammenhang (Folgeereignis oder Ereignis auf Grund gemeinsamer Ursache) besteht bzw. bestehen könnte oder sie bei gemeinsamem oder zeitversetztem Auftreten zu einem erhöhten Schadensausmaß führen könnten. Beispielsweise können starke Schneefälle zu erhöhten Dachlasten führen und negative Auswirkungen haben, sofern ein Erdbeben auftreten sollte. Das Auftreten dieser Kombination ist auch mit einem längeren Zeitversatz möglich.

-  kausal verknüpft - B mögliches Folgeereignis von A
-  kausal verknüpft - A und B gemeinsame Ursache
-  zufälliges gemeinsames Auftreten (ggf. zeitversetzt)
-  schließen sich gegenseitig aus
-  X Es liegen Ereignisse vor

| | | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|----------|--------------|-----------------|-------------------|---------------|-----------|--------------------|----------|-------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-----------|-------|-------------------|---------|--------------------|-----------------------|-----------------|----------------|--|--|
| | | Erdbeben | Tsunamiwelle | Flusshochwasser | Hohes Grundwasser | Niedrigwasser | Sturmflut | Salzwassereintritt | Treibgut | Regen | Hohe Temperaturen | Niedrige Temperaturen | Niedriges Grundwasser | Trockenheit | Vereisung | Blitz | Starkwind / Sturm | Tornado | Schneefall / Hagel | Biologische Einflüsse | Bodenseetzungen | Umgebungsbrand | | |
| B | Erdbeben | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Tsunamiwelle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Flusshochwasser | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Hohes Grundwasser | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Niedrigwasser | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Sturmflut | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Salzwassereintritt | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Treibgut | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Regen | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| | Hohe Temperaturen | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| | Niedrige Temperaturen | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | |
| | Niedriges Grundwasser | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | |
| | Trockenheit | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| | Vereisung | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | |
| | Blitz | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | |
| | Starkwind / Sturm | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | |
| | Tornado | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | |
| | Schneefall / Hagel | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| Biologische Einflüsse | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | |
| Bodenseetzungen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | |
| Umgebungsbrand | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | |

Abb. 7.1 Mögliche Einwirkungskombinationen

7.5 Ergebnisse und Bewertung

Kombinationen verschiedener naturbedingter Einwirkungen wurden bisher in Deutschland und international nur punktuell betrachtet. In Bezug auf die Einwirkung „Erdbeben“ werden in Deutschland beispielsweise weitere äußere Einwirkungen betrachtet, sofern sie Folgeereignisse sind oder zu zusätzlichen Lasten führen wie z. B. Bodensetzungen unabhängig von Erdbeben, nicht jedoch andere (nur zeitlich begrenzt unabhängig auftretende) Lasten wie z. B. extreme Schnee- und Windlasten. Die Einwirkungskombination von Erdbeben auf Inspektionsniveau und hundertjährigem Hochwasser wurde für Einrichtungen zum Hochwasserschutz, die nicht gegen das Bemessungserdbeben ausgelegt sind, im deutschen Regelwerk berücksichtigt.

Unberücksichtigt blieb bisher national und international im Allgemeinen die Fragestellung, ob die Kombination zweier (oder mehrerer) äußerer Einwirkungen, die geringere Lasten als das jeweilige Bemessungsereignis verursachen, bei gemeinsamem (oder zeitverzögertem) Auftreten zu Problemen führen kann. Die kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten solcher Ereignisse, sofern sie ermittelt werden können, können auch bis zu $10^{-4}/a$ betragen.

Bisher existierte keine Methodik zur systematischen Ermittlung von Kombinationen naturbedingter Einwirkungen, die betrachtet werden sollten. Insofern ist verständlich, dass es in dieser Hinsicht derzeit noch keine Gefährdungsanalysen gibt. Dieser Bericht versucht diese Fragestellung von zwei Seiten anzugehen:

- Einerseits werden aufgetretene Ereigniskombinationen der nationalen und internationalen Betriebserfahrung ausgewertet,
- andererseits werden auf Grund ingenieurtechnischer und generischer Überlegungen plausible Ereigniskombinationen abgeleitet.

Die Ergebnisse dieses Screening der Betriebserfahrung und der abgeleiteten plausiblen Ereigniskombinationen ist in **Abb. 7.1** dargestellt.

Aus der internationalen Betriebserfahrung sind Ereignisse mit Kombinationen von Einwirkungen von außen bekannt, die zu redundanzübergreifenden Ausfällen von Sicherheitssystemen geführt haben. In der Folge kam es auch zu schweren Kernschäden. Besonders zu beachten sind hier die Folgen des Tohoku-Erdbebens, das in Folge des

ausgelösten Tsunami zu Kernschäden in den Blöcken 1-3 des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi führte. Auch andere Ereignisse der internationalen Betriebserfahrung, wie z. B. der totale Ausfall des Nebenkühlwassers durch biologisches Treibgut (beschrieben in Abschnitt 6.2.2), verdeutlichen die unter Umständen erhebliche sicherheitstechnische Bedeutung von Kombinationen von Einwirkungen von außen.

Abgesehen von Ausfällen von Sicherheitssystemen durch Überflutung als Folge eines Erdbebens und dadurch ausgelösten Tsunami scheinen Kombinationen von Einwirkungen unter Beteiligung von (biologischem) Treibgut oder Schwärmen (Fische, Quallen, etc.) die am häufigsten auftretenden Kombinationen zu sein. Hierbei verstärken – zumindest gemessen an der Betriebserfahrung – diese Einwirkungen die Auswirkungen der jeweils anderen beteiligten Einwirkung, sodass auch Einwirkungen unterhalb der Bemessungsereignisse zu deutlichen Einschränkungen führten. Diese Kombinationen traten sowohl kausal verknüpft als auch zufälligerweise gleichzeitig auf.

Die am häufigsten von Kombinationen betroffenen Systeme sind die Hauptkühlwasser- bzw. Nebenkühlwasserversorgung. Hierbei handelt es sich oft um Kombinationen unter Beteiligung einer biologischen Einwirkung und/oder Treibgut, die zu (partiellen) Ausfällen der Kühlwasserversorgung führen. Daher erscheint es zielführend, die Robustheit der Kühlwasserversorgung sicherzustellen. Dies kann durch technische und administrative Maßnahmen, wie z. B.

- günstige Konstruktion des Einlaufbauwerks,
- ausreichende Kapazität in den Rechenanlagen,
- zusätzliche Gitter im Zulauf,
- Monitoring der Umgebung der Anlage auf Ereignisse, die zu erhöhtem Treibgut anfall führen könnten (z. B. Hochwasser, starker Regen oder Wind während der Heuernte, Waldbrände im Oberlauf, etc.),
- vermehrte Kontrollgänge, wenn mit höherem Treibgut anfall zu rechnen ist,
- vergrößerte Kapazitäten, um Treibgut schon vor den Rechenanlagen aus dem Kühlwasserzulauf zu entfernen,

erreicht werden.

Abgesehen von speziellen Maßnahmen hinsichtlich der Kühlwasserversorgung kann durch eine robuste Auslegung der Anlagen gegen einzelne äußere Einwirkungen auch unwahrscheinlichen Kombinationen von Einwirkungen entgegen gewirkt werden.

Bei der Auswertung der nationalen und internationalen Betriebserfahrung wurden zudem folgende Fakten festgestellt:

- Es traten Kombinationen von mehr als zwei (unabhängigen) naturbedingten Einwirkungen auf.
- Es traten Kombinationen auf, bei denen eine naturbedingte Einwirkung zeitlich weit vor der anderen lag und es dennoch zu einer Überlagerung der Auswirkungen kam.
- Es traten Kombinationen auf, bei denen eine äußere Einwirkung die Anlage zwar nicht unmittelbar selbst betraf, jedoch die Auswirkungen anderer naturbedingter Einwirkungen auf die Anlage verstärkte.

Angesichts dieser Befunde erscheint es derzeit nicht möglich, auf deterministische Weise für Einwirkungskombinationen Bemessungsereignisse oder gar ein abdeckendes Spektrum von Ereignissen hinreichend präzise zu definieren. Dies kann nach Lage der Dinge nur standortspezifisch im Rahmen von probabilistischen Gefährdungsanalysen erfolgen.

Auch die RSK empfiehlt in ihrer Stellungnahme „Ausfall der primären Wärmesenke“ /RSK 12/

- Maßnahmen zur Überprüfung und ggf. Verbesserung der Zuverlässigkeit der primären Wärmesenke im Hinblick auf Blockaden des Kühlwasserzulaufs,
- Maßnahmen zur Stärkung der Zuverlässigkeit der primären Wärmesenke im Hinblick auf den Eintritt von seltenen Einwirkungen von außen und
- Maßnahmen zur Beherrschung des Ausfalls der primären Wärmesenke.

Diese Empfehlungen werden von der RSK in der Stellungnahme /RSK 17/ wieder aufgegriffen. Die ersten beiden Empfehlungen werden als standortspezifische Aspekte im Rahmen der Auslegung von der RSK in /RSK 17/ nicht weiter betrachtet. Die dritte Empfehlung wird von der RSK für diejenigen Anlagen, die über eine diversitäre Wärmesenke verfügen als erfüllt angesehen. Für die Anlagen ohne diversitäre Wärmesenke sieht die

RSK die Empfehlung bei sachgerechter Umsetzung und anlagenspezifischer Bestätigung der Wirksamkeit der Maßnahmen durch das vorgestellte Konzept des VGB als erfüllt an. Die Robustheit der Anlagen insgesamt war Teil der Stellungnahmen /RSK 13/ und /RSK 17/. Aus Sicht der GRS ergibt sich hier kein weiterer Handlungsbedarf, sofern die ersten beiden Empfehlungen aus /RSK 12/ im Aufsichtsverfahren weiterverfolgt werden und die dritte Empfehlung aus /RSK 12/ für alle Anlagen umgesetzt ist.

8 Zusammenfassung

Ein Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, festzustellen, ob nach Stand von Wissenschaft und Technik Methoden zur Durchführung von Standortgefährdungsanalysen im Hinblick auf naturbedingte Einwirkungen von außen mit einer Wiederkehrhäufigkeit von $10^{-4}/a$ vorliegen und ob sich hieraus neue sicherheitstechnisch relevante Erkenntnisse ergeben. Ein weiteres Ziel des Vorhabens war die Ermittlung eines abdeckenden Hochwasserereignisses.

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

Hinsichtlich **lokaler Starkregenereignissen** beruht die bisherige Auslegung der Kernkraftwerke in Deutschland auf konventionellem Regelwerk. Dieses berücksichtigt Ereignisse mit Wiederkehrperioden von bis zu 100 Jahren. Dem WENRA Reference Level Issue T /WEN 14/ entsprechend, wird für naturbedingte Einwirkungen von außen die Berücksichtigung eines Ereignisses mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $10^{-4}/a$ gefordert. Entsprechende Anforderungen empfiehlt auch die RSK. Eine Möglichkeit solche Ereignisse bezüglich extremer Niederschläge abzuleiten, wurde in Abschnitt **2.5** entwickelt und vorgestellt. Durch standortspezifische Gefährdungsanalysen auf Basis einer Schar von Starkregenereignissen unterschiedlicher Zeitdauern mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von $10^{-4}/a$ können gefährdete Stellen identifiziert werden.

Bei Einwirkung von lokalen Starkregenereignissen auf dem Anlagengelände ist festzustellen, dass sich der sich einstellende Wasserstand auf dem Gelände, mit Ausnahme von Geländesenken, im Bereich weniger Zentimeter (im Bericht werden etwa 7 cm mittlerer Wasserstand abgeleitet) bewegt. Zu vermehrtem Wassereintrag in Gebäude kann es zum einen bei Wasserstand auf dem Gelände durch Versagen von Gebäudeabdichtungen, z. B. bei Rohr- und Kabeldurchdringungen unterhalb Geländeoberkante, oder durch Türöffnungen ohne ausreichend hohe Schwelle kommen und zum anderen durch das Versagen von innenliegenden Dachentwässerungen. Diese Möglichkeiten wurden bereits in der Weiterleitungsnachricht 2012/03 /GRS 12/ identifiziert und Empfehlungen hinsichtlich der Überprüfung der kritischen Stellen ausgesprochen. Auch in der RSK /RSK 17/ wurden diese Punkte intensiv beraten und die Vorkehrungen der Anlagen gegen den Eintrag von Regenwasser vorgestellt und diskutiert. Weitergehender Handlungsbedarf lässt sich hier aus Sicht der GRS nicht ableiten.

Hinsichtlich **Eishochwasser** lässt sich feststellen, dass diese mit den statistischen Verfahren zur Ermittlung des Bemessungshochwassers nicht ausreichend erfasst werden. Anhand der Auswertung von historischen Eishochwassern kann festgestellt werden, dass auf fast allen Flüssen in Deutschland, an denen die derzeit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke liegen, in der Vergangenheit Eishochwasser aufgetreten sind. Eisbildungen und Eisstau traten auch in jüngerer Zeit auf, auch wenn die Gefährdung auf Grund der Tendenz zu mildereren Wintern, den erhöhten zivilisatorischen Wärmeeintrag in die Flüsse und durch Flussbegradigungen und Stauhaltung aus Sicht der GRS abnimmt.

Da die Entstehung von Eishochwassern komplex ist und sehr viele Einflussfaktoren hat, existieren derzeit keine Verfahren, die Orte der Entstehung von Eisstau oder gar die Höhe entsprechender Eishochwasser vorherzusagen. Daher ist eine Ermittlung von Hochwasserereignissen bedingt durch Eisstau mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $10^{-4}/a$ derzeit aus Sicht der GRS nicht mit hinreichender Aussagezuverlässigkeit durchführbar. Im Vorfeld kann der Betreiber einer Anlage nur in der Nähe gelegene Stellen im Fluss identifizieren, die in besonderem Maße für die Entstehung von Eisstau bekannt sind, wie z. B. Engstellen im Fluss, und durch administrative Maßnahmen Vorsorge leisten.

Die Einleitung von Kühlwasser während des Leistungsbetriebs in den Fluss kann die Bildung von Eisstau für weite Strecken unterhalb der Anlage verzögern oder sogar ganz ausschließen; abhängig von der Temperatur, Windgeschwindigkeit und der treibenden Eismasse. Die Bildung von Eisstau oberhalb der Anlage und anschließende Flutwellen bei einem Bruch des Eisstaus sind dadurch jedoch nicht zu verhindern. Charakteristisch für Überflutungen aus dem Bruch eines Eisstaus oberhalb der Anlage sind der schnelle Wasserspiegelanstieg an der Anlage und die kurze Überflutungsdauer durch eine einzelne Flutwelle. Der Betreiber der Anlage kann diesen Phänomenen bzw. ihren Auswirkungen aus Sicht der GRS nur durch administrative Maßnahmen im Vorfeld begegnen. Diese administrativen Maßnahmen umfassen unter anderem:

- Kontakt zu den zuständigen Behörden bei drohendem Eisstau um über die Entwicklung der Lage informiert zu sein,
- vorsorgliche Durchführung temporärer Hochwasserschutzmaßnahmen, sofern das Hochwasserschutzkonzept solche Maßnahmen vorsieht und
- das vorsorgliche Abfahren der Anlage.

Als Ergebnis der RSK-Beratung zur „Bewertung der Umsetzung der RSK-Empfehlungen im Nachgang zu Fukushima“ /RSK 17/ ist festzuhalten, dass die RSK bei Vorliegen von standortspezifischen Nachweisen, auf Grundlage der Argumentation der Betreiber, das Hochwasser-Robustheitslevel 1 als erfüllt ansieht. Die Anlagen weisen damit über den Bemessungswasserstand hinaus deutliche Reserven im Schutz gegen Hochwasser auf. Nach dem Bruch eines Eisstaus oberhalb der Anlage kann als sekundärer Effekt Eis in den Vorfluter eingetragen werden. Die RSK sieht auch in Bezug auf den Eintrag von Eis in den Vorfluter eine deutliche Robustheit als plausibel an /RSK 17/.

Aus Sicht der GRS lässt sich über die oben beschriebenen administrativen Maßnahmen hinaus, unter Berücksichtigung der Feststellungen der RSK, kein weiterer Handlungsbedarf ableiten.

Hinsichtlich **(langfristig) anstehender hoher und tiefer Temperaturen** lässt sich feststellen, dass bei der Einwirkung hoher und tiefer Temperaturen nicht nur der (einmalig) anstehende Extremwert betrachtet werden sollte, sondern auch die langfristige Einwirkung von hohen und tiefen Temperaturen und die damit verknüpften Folgewirkungen. Daraus ergibt sich, dass in Bezug auf hohe und tiefe Temperaturen nicht von einem extremen Ereignis ausgegangen werden kann, sondern vielmehr eine Schar von Ereignissen länger andauernden Hitze- oder Kältewellen hinsichtlich Temperaturen und Zeitdauern zu ermitteln sind. Ein mögliches Verfahren zur Ableitung solcher Ereignisse auf der Basis einer generalisierten Extremwertverteilung wurde im Abschnitt **5.4** vorgestellt.

Je länger hohe bzw. tiefe Temperaturen anstehen, umso stärker fallen Folgewirkungen ins Gewicht. Bei Hitzewellen sind dies insbesondere fallende Wasserstände und wärmeres Kühlwasser sowie ggf. Abweichungen von den geplanten Raumtemperaturen. Bei Kältewellen sind dies ebenso Abweichungen von den geplanten Raumtemperaturen aber auch vermehrte Eisbildung an neuralgischen Stellen sowie in Verbindung mit Schneefall ggf. Behinderungen der Zugänglichkeit der Anlage. Grundsätzlich sind der Verlust der Netzanbindung und der Ausfall der Eigenbedarfsversorgung nicht auszuschließen, so dass aus Sicht der GRS ein (langanhaltender) Notstromfall denkbar ist.

Typische Fehlerquellen bei Hitze- und Kältewellen sind

- Hitzewellen: Ausfälle elektrischer und elektronischer Komponenten.
- Kältewellen: Vereisungen, die Ausfälle oder Fehlfunktionen an Systemen und Komponenten auslösen können und vermehrter Kondensatanfall an empfindlichen Stellen.

Hitze- bzw. Kältewellen und die weitere Entwicklung der Situation sind mit hinreichender Aussagezuverlässigkeit vorhersagbar. Insbesondere entwickeln sich Anlageparameter wie die Temperatur der Gebäude und des Kühlwassers nur langsam; der Anlagenzustand ändert sich damit nicht innerhalb von Stunden, sondern von Tagen, so dass ausreichend Zeit für Gegenmaßnahmen zur Verfügung steht.

Bezüglich Hitzewellen zeigen die Ergebnisse in Abschnitt 5.6, dass die Temperaturen der Umgebung nicht der limitierende Faktor für einen sicheren Anlagenbetrieb sind. Die Untersuchung der Aspekte „Notstromversorgung“ und „Einhaltung der Raumluftbedingungen in sicherheitstechnisch wichtigen Räumen“ führte zu dem Ergebnis, dass selbst bei sehr hohen Kühlwassertemperaturen die erforderliche Kühlung sichergestellt ist. Angesichts der Ergebnisse in Abschnitt 5.4 ist das Erreichen solch hoher Kühlwassertemperaturen unplausibel. Anhand der vorliegenden Resultate ist die Situation eher kritisch bei einer lange anhaltenden Dürre und damit verbundenem Niedrigwasserstand, die nicht notwendigerweise mit lange anhaltenden hohen Temperaturen verknüpft sein muss.

Die Untersuchungen bezüglich Kältewellen zeigen, dass diese während längerer Stillstandsphasen kritischer sind als während des Leistungsbetriebes.

Die RSK befasste sich in zwei Stellungnahmen mit langanhaltenden hohen und niedrigen Umgebungstemperaturen bzw. Effekten daraus. Sie kommt dort zu dem Ergebnis, dass die Phänomene entweder abgedeckt sind oder eine deutliche Robustheit plausibel ist.

Aus Sicht der GRS lässt sich aus den Ergebnisse dieses Vorhabens kein weiterer Handlungsbedarf ableiten. Da sich eine Verschlechterung der Anlagensituation langsam und damit absehbar abzeichnet, kann rechtzeitig Hilfe von außen angefordert und erhalten

werden, sofern entsprechende Pläne und Verträge im Vorfeld erarbeitet bzw. geschlossen wurden. Diese Einschätzung stimmt mit der Einschätzung der RSK /RSK 13/ überein.

Hinsichtlich **biologischer Einwirkungen** lässt sich feststellen, dass nach Stand von Wissenschaft und Technik keine Verfahren zur Ermittlung der Standortgefährdung im Sinne der WENRA-Anforderungen vorliegen. Aufgrund der Vielfältigkeit der möglichen biologischen Einwirkungen und ihrer meist geringen sicherheitstechnisch wichtigen Auswirkungen auf die Anlagen können aus Sicht der GRS die Anforderungen an die Auslegung der Anlagen gegen biologische Einwirkung durch allgemeine Vorsorgemaßnahmen erfüllt bzw. erhalten werden.

Mögliche Vorsorgemaßnahmen können sowohl administrativer als auch technischer Natur sein. Als administrative Maßnahmen sind z. B.

- die Erhöhung der Anzahl der Kontrollgänge am Einlaufbauwerk, wenn mit vermehrtem Anfall von biologischem Treibgut zu rechnen ist (z. B. bei Hochwassern),
- die Verdichtung von Monitoringmaßnahmen im Einlaufbauwerk und in der Umgebung des Standortes hinsichtlich der dort vorkommenden Spezies,
- die Verdichtung wiederkehrender Prüfungen und Instandhaltung und
- regelmäßige Abgleiche laufend erhobener Daten wie z. B. Kühlwasserdurchfluss im Hinblick auf schleichende Verschlechterung der Werte

zu benennen.

Als technische Maßnahmen sind z. B.

- eine günstige Konstruktion des Einlaufbauwerks zur Verringerung des Eintrags biologischen Treibguts,
- zusätzliche Fanggitter um dieses Treibgut fern zu halten,
- Grob- und Feinrechen und
- Taprogge-Anlagen

zu benennen.

Auch die RSK empfiehlt in ihrer Stellungnahme „Ausfall der primären Wärmesenke“ /RSK 12/ Maßnahmen zur Überprüfung und ggf. Verbesserung der Zuverlässigkeit der primären Wärmesenke im Hinblick auf Blockaden des Kühlwasserzulaufs und nimmt dabei auch Bezug auf biologische Einwirkungen.

Aus Sicht der GRS ergeben sich aus den Ergebnissen dieses Vorhabens keine neuen sicherheitstechnisch relevanten Erkenntnisse.

Hinsichtlich der **Kombinationen verschiedener naturbedingter Einwirkungen** lässt sich feststellen, dass nach Stand von Wissenschaft und Technik keine Verfahren zur systematischen Ermittlung der Standortgefährdung im Sinne der WENRA-Anforderungen vorliegen.

Bei der Auswertung der nationalen und internationalen Betriebserfahrung im Hinblick auf Kombinationen von äußeren Einwirkungen wurden folgende Besonderheiten festgestellt:

- Es traten Kombinationen von mehr als zwei (unabhängigen) naturbedingten Einwirkungen auf.
- Es traten Kombinationen auf, bei denen eine naturbedingte Einwirkung zeitlich weit vor der anderen lag und es dennoch zu einer Überlagerung der Auswirkungen kam.
- Es traten Kombinationen auf, bei denen eine äußere Einwirkung die Anlage zwar nicht unmittelbar selbst betraf, jedoch die Auswirkung anderer naturbedingter Einwirkungen auf die Anlage verstärkte.

Bei der generischen deterministischen Festlegung von zu betrachtenden Einwirkungskombinationen naturbedingter Einwirkungen gibt es mehrere offene Aspekte:

- Für zahlreiche Einzeleinwirkungen (z. B. biologische Einwirkungen) lassen sich keine Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte „Intensitäten“ ermitteln,
- bei der deterministischen Kombination von zwei Einwirkungen ist es unklar, welche Überschreitenswahrscheinlichkeiten für die Einzeleinwirkungen zu wählen sind und
- standortspezifisch sind die Auswirkungen auf die Anlage bei gleichem Einwirkungs-niveau deutlich unterschiedlich,

Angesichts dieser Untersuchungen ist es derzeit für Einwirkungskombinationen nicht möglich, Bemessungsereignisse oder ein abdeckendes Spektrum von Ereignissen auf

deterministischem Wege hinreichend präzise zu definieren. Dies kann nach Einschätzung der GRS nur standortspezifisch im Rahmen von probabilistischen Gefährdungsanalysen erfolgen. Dennoch können generische Empfehlungen für Vorsorgemaßnahmen gegen Kombinationen von Einwirkungen abgeleitet werden.

Die am häufigsten von Kombinationen betroffenen Systeme sind die Hauptkühlwasser- bzw. Nebenkühlwasserversorgung. Hierbei handelt es sich meist um Kombinationen unter Beteiligung einer biologischen Einwirkung und/oder Treibgut, die zu (partiellen) Ausfällen der Kühlwasserversorgung führen. Daher ist es aus Sicht der GRS zielführend, die Robustheit der Kühlwasserversorgung gegen diese Einwirkungen sicherzustellen. Dies kann, wie oben bei den einzelnen Einwirkungen beschrieben, durch technische und administrative Maßnahmen erreicht werden. Abgesehen von speziellen Maßnahmen hinsichtlich der Kühlwasserversorgung kann durch eine robuste Auslegung der Anlagen gegen einzelne äußere Einwirkungen auch unwahrscheinlichen Kombinationen von Einwirkungen Rechnung getragen werden.

Auch die RSK empfiehlt in ihrer Stellungnahme „Ausfall der primären Wärmesenke“ /RSK 12/

- Maßnahmen zur Überprüfung und ggf. Verbesserung der Zuverlässigkeit der primären Wärmesenke im Hinblick auf Blockaden des Kühlwasserzulaufs,
- Maßnahmen zur Stärkung der Zuverlässigkeit der primären Wärmesenke im Hinblick auf den Eintritt von seltenen Einwirkungen von außen und
- Maßnahmen zur Beherrschung des Ausfalls der primären Wärmesenke.

Diese Empfehlungen werden von der RSK in der Stellungnahme /RSK 17/ wieder aufgegriffen. Die ersten beiden Empfehlungen werden als standortspezifische Aspekte im Rahmen der Auslegung von der RSK in /RSK 17/ nicht weiter betrachtet. Die dritte Empfehlung wird von der RSK für diejenigen Anlagen, die über eine diversitäre Wärmesenke verfügen als erfüllt angesehen. Für die Anlagen ohne diversitäre Wärmesenke sieht die RSK die Empfehlung bei sachgerechter Umsetzung und anlagenspezifischer Bestätigung der Wirksamkeit der Maßnahmen durch das vorgestellte Konzept des VGB als erfüllt an. Die Robustheit der Anlagen insgesamt war Teil der Stellungnahmen /RSK 13/ und /RSK 17/. Aus Sicht der GRS ergibt sich hier kein weiterer Handlungsbedarf, sofern die ersten beiden Empfehlungen aus /RSK 12/ im Aufsichtsverfahren weiterverfolgt werden und die dritte Empfehlung aus /RSK 12/ für alle Anlagen umgesetzt ist.

Hinsichtlich des **abdeckenden Hochwasserereignisses** wurde eine Methode entwickelt und auf die vorhandenen Daten von Niederschlägen und Pegelabflüssen angewendet. Die Methode korreliert die gemessenen Niederschläge eines Gebietes mit dem gemessenen Pegelabfluss aus diesem Gebiet. Diese Korrelation ersetzt komplexe hydrologische Abflussmodelle durch einfache Niederschlags-Abfluss-Beziehungen.

Im Ergebnis führt die hier entwickelte Methode zu einem wesentlich höheren abdeckenden Abfluss am betrachteten Pegel als bisherige Untersuchungen mittels Extremwertstatistik. Es wurde ein Niederschlagsereignis angesetzt, das seltener als einmal in 10.000 Jahren auftritt. Auch der Abfluss, der nach dem in KTA 2207 beschriebenen Verfahren ermittelt wird, wird um den Faktor 3,7 übertroffen. Dies ist vor Allem durch die konservative Wahl des angesetzten abdeckenden Niederschlags begründet.

Das entwickelte Modell ist allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet, so dass die Aussagekraft dieses vereinfachten Ansatzes nur gering ist. Aus Sicht der GRS ist eine Verwendung des hier entwickelten Modells für Hochwasseranalysen nicht zielführend. Auch der hier gewählte konservative Ansatz des abdeckenden Niederschlagsereignisses ist zu hinterfragen. Um zu einem realistischen und doch abdeckenden Ergebnis zu kommen, müssten sehr viel detailliertere statistische Auswertungen der Niederschlagsstatistiken erfolgen. Der Einsatz komplexer hydrologischer Abflussmodelle des Einzugsgebietes ist aus Sicht der GRS eine sinnvolle Methode zur Ermittlung eines abdeckenden Hochwasserereignisses.

Literaturverzeichnis

- /ASN 13/ Autorité de Sûreté Nucléaire: Protection of Basic Nuclear Installations Against External Flooding, Guide N° 13, 08.01.2013
- /BEC 14/ Becker, Andreas: Das Münsterereignis: 292 l/qm binnen 7 Stunden – Klimatologische Einordnung solcher Ereignisse beim DWD derzeit und in Zukunft, Deutscher Wetterdienst. 9. Extremwetterkongress. HafenCity Hamburg, 09.10.2014.
- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, Bekanntmachung vom 3. März 2015, BAnz AT 30.03.2015 B2.
- /BOC 73/ Bock, R.; Cordes, F.; Dudziak, H.; Franzius, L.; Günneberg, F.; Grothues-Spork, H.; Wismaer H.: Wirkung von Eis auf die Bauwerke und die Schifffahrt, Mittel zur Verhütung der Bildung von Eis und Beherrschung seiner Verlagerung Deutsche Beiträge zu PIANIC-Schifffahrtkongress 1973, Ottawa.
- /BRI 09/ Van den Brink, H.W., Können, G.P.: Estimating 10.000-year return values from short time series, International Journal of Climatology, 2009.
- /CAR 08/ Eis im Wasserbau – Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen, Heft 37 der Dresdner Wasserbaulichen Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und technische Hydrodynamik der technischen Universität Dresden, D. Carstensen, 2008.
- /DIN 94/ Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 4049-3: Hydrologie Teil 3: Begriffe der quantitativen Hydrologie. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN e.V. in DIN-Taschenbuch 211: Wasserwesen-Begriffe-Normen, Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich.
- /DWD 02/ Deutscher Wetterdienst: Starkniederschläge in Sachsen im August 2002, Eine meteorologisch-synoptische und klimatologische Beschreibung des Auguthochwassers im Elbegebiet, Deutscher Wetterdienst Offenbach, Oktober 2002

- /FUB 06/ Verein Berliner Wetterkarte: Einige bemerkenswerte Klimaereignisse aus Chroniken nach R. Henning (1904), Beiträge des Instituts für Meteorologie der FU Berlin, Dezember 2006.
- /FUE 13/ Fuentes, M. et al.: Nonparametric Spatial Models for Extremes: Application to Extreme Temperature Data, Extremes, März 2013, Vol. 16, Issue 1.
- /FUR 08/ Furrer EM, Katz RW: Improving the simulation of extreme precipitation events by stochastic weather generators, Water Resources Research 44: W12439, 2008.
- /GAR 82/ Modellversuche über Eisversetzungen bei Jasebeck/ Elbe, Bericht Nr. 535 des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, G. Garbrecht, 1982.
- /GKD 16/ Gewässerkundlicher Dienst Bayern
<http://www.gkd.bayern.de/>
- /GRS 05/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland (WLN 2005/06): Mikrobiologisch induzierte Korrosion an Komponenten in Nebenkühlwassersystemen von Kernkraftwerken, April 2005.
- /GRS 07/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland (WLN 2005/06): Schäden an Rohrleitungen in Nebenkühlwassersystemen für sicherheitstechnisch wichtige Kühlstellen, Juli 2007.
- /GRS 08/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Krauß, M., Thuma, G.: Untersuchungen zu extremen Wetterereignissen und Witterungsbedingungen, GRS-A-3426, Dezember 2008.
- /GRS 12/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland (WLN 2012/03): Regenwassereintrag in das Kernkraftwerk Brunsbüttel am 04.09.2011, April 2012.

- /GRS 13/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Sperbeck, S. et al.: Untersuchungen zur deterministischen und probabilistischen Bewertung von Einwirkungen von außen (EVA-Ereignisse), GRS-A-3693, , November 2013.
- /GUD 14/ Gunarwardhana, L., Al-Rawas, G.: Trends in extreme temperature and precipitation in Muscat, Oman, Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water-Society Interactions, Proceedings of ICRWS 2014, Bologna, Italy, June 2014.
- /HAG 90/ Hager, M.; Kleine, E.: Eisbekämpfung am Beispiel der Elbe, Deutscher Beitrag zum PIANC-Schiffskongress 1990.
- /HAS 12/ Hasan, H. et al.: Modeling of Extreme Temperature Using Generalized Extreme Value (GEV) Distribution: A Case Study for Penang, Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol I, WCE 2012, 4.-6. Juli 2012, London.
- /IAE 03/ International Atomic Energy Agency (IAEA): NS-G-1.5: External events excluding Earthquakes in the design of nuclear power plants, 2003.
- /IPC 13/ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Kirtman, B., et al.: Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- /JEN 11/ Jensen, J. et al.: Untersuchungen zur deterministischen und probabilistischen Bewertung von Einwirkungen von außen, Unterauftrag: Untersuchungen an Referenzanlagen zu hydrologischen Einwirkungen, Februar 2011.
- /JOE 07/ Jöbstl C.: Eisstoßproblematik an Krems und Thaya – Grundlagenstudie, Diplomarbeit.

- /JRC 13/ Joint Research Center (JRC): Report on External Hazards related events at NPPs, Summary Report of an European Clearinghouse Topical Study, 2013.
- /KKK 11/ Kernkraftwerk Krümmel: Abschlussbericht, EU Stresstest - Sicherheitsüberprüfung unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima, Japan, 2011.
- /KOU 03/ Koutsoyiannis, Demetris: On the appropriateness of the Gumbel distribution on modelling extreme rainfall. In: Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop. Bologna, Italy, 2003.
- /KOU 04a/ Koutsoyiannis, Demetris: Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. In: *Hydrological Sciences Journal* 49 (4), S. 590. DOI: 10.1623/hysj.49.4.575.54430.
- /KOU 04b/ Koutsoyiannis, Demetris: Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records. In: *Hydrological Sciences Journal* 49 (4), S. 610. DOI: 10.1623/hysj.49.4.591.54424.
- /KTA 04/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 2207 - Schutz von Kernkraftwerken gegen Hochwasser, Sicherheitstechnische Regel des KTA, November 2004.
- /KTA 05/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3601, Lüftungstechnische Anlagen in Kernkraftwerken, Fassung 11/05.
- /KTA 11/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 2201.1 - Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen. Teil 1: Grundsätze, Sicherheitstechnische Regel des KTA, November 2011.
- /KTA 14a/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3301 - Nachwärmeabführsysteme von Leichtwasserreaktoren, Sicherheitstechnische Regel des KTA, November 2014.
- /KTA 14b/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3702, Notstromerzeugungsanlagen mit Dieselaggregaten in Kernkraftwerken, Fassung 2014-11.

- /KTA 14c/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3701, Übergeordnete Anforderungen an die elektrische Energieversorgung in Kernkraftwerken, Fassung 2014-11.
- /KYS 02/ Kyselý, J.: Probability estimates of extreme temperature events: Stochastic modelling approach vs. extreme value distributions, Stud. Geophys. Geod. 46, 2002.
- /LTV 09/ Landestalsperrenverwaltung Sachsen: Eisgefahren, Informationen – Maßnahmen – Zuständigkeiten, 01.2009.
- /LUT 04/ Luterbacher, J., et al.: European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500, Science Vol. 303, pp. 1499-1503, 2004.
- /MCK 16/ McKinnon, K.: Daily temperature distributions and the probability of extremes, IDAG workshop, Boulder, CO, 02.02.2016.
- /NLW 02/ Hochwasserschutz in Niedersachsen, Oberirdische Gewässer, Band 23 des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, 2002.
- /NRC 11/ United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC): Design-Basis Flood Estimation for Site Characterization at Nuclear Power Plants in the United States of America, NUREG/CR-7046, PNNL-2009, November 2011
- /OKO 15/ Öko-Institut e.V.: Naturbedingte Einwirkungen von außen. Screening zu neuen Erkenntnissen zur Risikoanalyse, Juli 2015.
- /RSK 12/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): RSK-Stellungnahme Ausfall der Primären Wärmesenke, 446. Sitzung am 05.04.2012.
- /RSK 13/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): RSK-Stellungnahme Einschätzung der Abdeckung extremer Wetterbedingungen durch die bestehende Auslegung, 462. Sitzung am 06.11.2013.

- /RSK 17/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): RSK-Stellungnahme Bewertung der Umsetzung von RSK-Empfehlungen im Nachgang zu Fukushima, 496. Sitzung am 06.09.2017/ASH 86/River and Lake Ice Engineering, G. Ashton, 1986.
- /SCH 11/ Schuh, Alfred: Eishochwasser an Oder und Elbe aus historischen und meteorologischen Gesichtspunkten und im Hinblick auf mögliche Gefährdungen, Dissertation, , 23.11.2011.
- /SCH 00/ Schmidt, M.: Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850 Eine Auswertung alter Quellen und Karten, Hrsg: Harzwasserwerke GmbH, Hildesheim, Kommissionsverlag Oldenburg, Industrieverlag München, 2000.
- /STR 57/ Strauch, T.; Träger, G.; Maasch, O.; Förster, K.: Einfluss des Eises auf den Binnenwasserstraßen und in den Binnen- und Seehäfen. Abwehrmaßnahmen, Beitrag zum 19. Internationalen Schifffahrtskongress der PIANC, 1957, London.
- /WEN 14/ Western European Nuclear Regulators Association: WENRA: Safety Reference Levels for Existing Reactors, Update in Relation to Lessons Learned from TEPCO Fukushima Dai-Ichi Accident. Report, September 2014.
- /WEN 15/ Western European Nuclear Regulators Association (WENRA): Guidance Document Issue T: Natural Hazards Head Document, April 2015.
- /WES 16/ Deutscher Wetterdienst: Wetterdaten und –Statistiken Express http://www.dwd.de/DE/leistungen/weste/westexl/weste_xl.html
Lizenz unter:
http://www.dwd.de/DE/leistungen/weste/nutzungsbedingungen/nutzungsbed_westexl.pdf
- /WET 14/ Wetter, O., et al.: The year-long unprecedented European heat and drought of 1540 - a worst case, Climatic Change, Vol. 125, Issue 3, pp. 349-363, August 2014.

- /WIL 01/ Wilcox, R. R., "Theil–Sen estimator", Fundamentals of Modern Statistical Methods: Substantially Improving Power and Accuracy, Springer-Verlag, pp. 207–210, ISBN 978-0-387-95157-7 , 2001.
- /WIL 05/ Wilson PW; Toumi R., A fundamental probability distribution for heavy rainfall, Geophysical Research Letters **32**: L14812.
- /WSA 09/ Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg: Eisbekämpfung durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes auf der Elbe, 2009, <http://www.wsa-lauenburg.wsv.de/Eisaufbruch/index.html>
- /WSD 10/ Wasser- und Schifffahrtsdirektion Süd: 175 Jahre Pegel Würzburg – Daten und Fakten, 2010 http://www.wsd-sued.wsv.de/wir_fuer_sie/publikationen/pdf/175_pegel_wuerzburg.pdf
- /WUE 13/ Stadt Würzburg: Das Hochwasser von 1342, http://wuerzburg.de/media/wuerzburg.de/org/med_878/1342_A3G.pdf, letzter Zugriff: 20.03.2013.
- /WZF 08/ Wetterzentrale Forum: Forumsbeitrag vom 11.11.2008, <http://www.wzforum.de/forum2/read.php?6,1453354,1454308>, zuletzt abgerufen am 10.04.2016.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 2.1 | Dargestellt ist das logarithmierte Ergebnis des Likelihood-Quotienten-Tests. Die Farben stellen den logarithmierten Wert des Tests an einer bestimmten Stelle im Parameterraum dar..... | 12 |
| Abb. 2.2 | Rote Symbole stellen die normierte Zufallsvariable G in Abhängigkeit von den empirischen Wiederkehrperioden dar. Die blaue Kurve ist der Fit der Gumbelverteilung. Die grünen Kurven stellen die 15%- bzw. 85%-Fraktile dar. | 13 |
| Abb. 2.3 | Dargestellt ist die kumulative Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Verhältnis 5-Minutenwert zu Tageswert. So wird z. B. in 90 % der Fälle der maximale 5-Minutenwert das 0,25-fache des Tageswertes nicht überschreiten. | 14 |
| Abb. 2.4 | Darstellung für die vier im Text beschriebenen Unterkategorien. Unterkategorie 1 ist blau, Unterkategorie 2 ist rot, Unterkategorie 3 ist grün und Unterkategorie 4 ist schwarz dargestellt | 15 |
| Abb. 3.1 | Vereinfachtes Ablaufdiagramm der Hochwasserermittlung am Pegel Schweinfurt aus extremen Niederschlägen..... | 25 |
| Abb. 3.2 | Schematische Darstellung der überlappenden Unterteilung des Einzugsgebiets des Mains oberhalb von Schweinfurt in kleinere, den betrachteten Pegeln zugeordnete Gebiete (TEGs) | 29 |
| Abb. 3.3 | 1. Beispielbild für Hochwasser am Pegel Roth und Vergleich mit dem Fit | 43 |
| Abb. 3.4 | 2. Beispielbild für Hochwasser am Pegel Roth und Vergleich mit dem Fit | 43 |
| Abb. 3.5 | 3. Beispielbild für Hochwasser am Pegel Roth und Vergleich mit dem Fit | 44 |
| Abb. 3.6 | Beispielbild für die Auftragung der Fitparameter, hier des Parameters a, gegen charakteristische Größen des Niederschlagsereignisses | 45 |
| Abb. 3.7 | Hochwasserablauf am Pegel Schweinfurt..... | 52 |
| Abb. 4.1 | Entstehungsprozess von Eishochwasser..... | 56 |
| Abb. 4.2 | Entwicklung eines Eisstaus, Eisstands oder einer Eisversetzung aus Treibeis /CAR 08/. | 57 |
| Abb. 5.1 | Jahresmaxima der Tagesmaximalwerte für die Jahre 1947 bis 2015 der Station Würzburg..... | 89 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abb. 5.2 | Extrapolation der Jahresmaxima der Tageshöchsttemperaturen mittels Gumbelverteilung und generalisierter Extremwertverteilung (GEV) | 90 |
| Abb. 7.1 | Mögliche Einwirkungskombinationen | 139 |
| Abb. A 1 | Streudiagramm der korrelierten Tagesniederschläge zweier Wetterstationen. Zusätzlich eingetragen sind die Korrelationsgeraden, die sich auf Grund des Theil-Sen- bzw. des modifizierten Theil-Sen-Schätzers ergeben. | 169 |
| Abb. A 2 | Darstellung der relativen Häufigkeiten von Tagesniederschlägen für zwei Wetterstationen ohne Berücksichtigung der Korrelation zwischen diesen zwei Wetterstationen..... | 170 |
| Abb. A 3 | Darstellung der relativen Niederschlagshäufigkeiten für zwei Wetterstationen unter Berücksichtigung der mittels TSS ermittelten Korrelation zwischen diesen beiden Wetterstationen. | 171 |
| Abb. A 4 | Darstellung der relativen Niederschlagshäufigkeiten für zwei Wetterstationen unter Berücksichtigung der mittels MTSS ermittelten Korrelation zwischen diesen beiden Wetterstationen. | 172 |
| Abb. A 5 | Schematische Darstellung der Gebietsabdeckung eines Einzugsgebiets | 173 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 3.1 | Einteilung des Einzugsgebiets des Mains in kleinere Gebiete (TEG) und Zuordnung zu den Pegeln..... | 31 |
| Tab. 3.2 | Angesetzte abdeckende Niederschlagsereignisse für die betrachteten Pegel in Liter pro Quadratmeter und Tag. | 37 |
| Tab. 3.3 | Angesetzte Laufzeiten der Hochwasserwelle zwischen zwei Pegeln | 40 |
| Tab. 3.4 | Anzahl der ermittelten Hochwasserereignisse und der davon berücksichtigten Ereignisse | 42 |
| Tab. 3.5 | Werte der ermittelten Parameter für jeden Pegel. Die Werte sind auf 4 Dezimalstellen gerundet | 46 |
| Tab. 3.6 | Beispiel für die Ermittlung des abdeckenden Hochwasserereignisses am Pegel Roth Kläranlage (Werte gerundet) | 49 |
| Tab. 3.7 | Hochwasserablauf an den Mainpegeln bis Kemmern | 50 |
| Tab. 3.8 | Hochwasserablauf an den Pegeln des Flusssystemes Pegnitz-Rednitz-Regnitz | 51 |
| Tab. 3.9 | Hochwasserablauf am Pegel Schweinfurt..... | 52 |
| Tab. 5.1 | Aufgetretene nationale Ereignisse mit tiefen Umgebungstemperaturen | 75 |
| Tab. 5.2 | Beispiel für die Bestimmung der Hitzewellen | 92 |
| Tab. 5.3 | Absolute Häufigkeiten von Hitzewellen der Typen A, B und C | 93 |
| Tab. 5.4 | Wärmesummen und durchschnittliche Wärmesumme (T_m) mit 10.000 Jahren Wiederkehrperiode für unterschiedliche Dauern zwischen 5 und 45 Tagen. | 95 |
| Tab. 6.1 | Aufgetretene nationale Ereignisse mit biologischen Einwirkungen..... | 106 |
| Tab. 6.2 | Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach Art der biologischen Einwirkung | 107 |
| Tab. 6.3 | Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach Art der Auswirkung..... | 107 |
| Tab. 6.4 | Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach betroffenem System | 107 |
| Tab. 6.5 | Internationale Betriebserfahrung zu biologischen Einwirkungen | 111 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 6.6 | Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach Art der biologischen Einwirkung | 113 |
| Tab. 6.7 | Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach Auswirkung | 113 |
| Tab. 6.8 | Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach betroffenem System | 113 |
| Tab. 7.1 | Nationale Betriebserfahrung zu Kombinationen naturbedingter Einwirkungen | 123 |
| Tab. 7.2 | Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach Art der Einwirkungskombination | 124 |
| Tab. 7.3 | Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach Auswirkung | 124 |
| Tab. 7.4 | Auswertung der nationalen Betriebserfahrung nach betroffenem System | 124 |
| Tab. 7.5 | Internationale Betriebserfahrung zu Kombinationen naturbedingter Einwirkungen | 128 |
| Tab. 7.6 | Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach Art der Einwirkungskombination | 131 |
| Tab. 7.7 | Auswertung der internationalen Betriebserfahrung nach Auswirkung | 131 |
| Tab. 7.8 | Auswertung der internationale Betriebserfahrung nach betroffenem System | 132 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Δ HQ | Änderung des Hochwasserabflusses |
| GNT | flächengewichteter Niederschlag eines Teileinzugsgebiets |
| HQ | Hochwasserabflussmenge |
| IAEA | International Atomic Energy Agency |
| INES | International Nuclear and Radiological Event Scale |
| IRS | International Reporting System for Operating Experience |
| MIC | Microbiological induced corrosion |
| MTSS | modifizierter Theil-Sen-Schätzer |
| N | Niederschlag |
| NKWS | Nebenkühlwassersystem |
| HKWS | Hauptkühlwassersystem |
| RESA | Reaktorschnellabschaltung |
| RSK | Reaktor-Sicherheitskommission |
| SAPIDE | Support à l'Analyse des Problèmes, Incidents et Difficultés d'Exploitation |
| TEG | Teileinzugsgebiet |
| TSS | Theil-Sen-Schätzer |
| VERA | Vertiefte Auswertung meldepflichtiger Ereignisse |
| WKP | Wiederkehrende Prüfung |
| ZKWS | Zwischenkühlwassersystem |

A Methoden

A.1 Theil-Sen-Schätzer

A.1.1 Theil-Sen-Schätzer

Ein Theil-Sen-Schätzer (TSS) dient der robusten Schätzung eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Zufallsvariablen x und y . Der TSS ist unempfindlich gegen Ausreißer in den Datenreihen in dem Sinne, dass er 29,3 % der Daten als zufällige Ausreißer enthalten kann, ohne seine Zuverlässigkeit zu verlieren /WIL 01/. Der TSS wird berechnet, indem man für jedes Punktpaar $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ den Median m aller Steigungen $m_{i,j} = (y_j - y_i) / (x_j - x_i)$ mit $(x_j - x_i) \neq 0$ bestimmt. Der Achsenabschnitt b wird bestimmt durch den Median aller Achsenabschnitte $y_i - mx_i$. Durch die Verwendung des Median wird der TSS robust gegen Ausreißer.

A.1.2 Modifizierter Theil-Sen-Schätzer

Im Zuge dieses Vorhabens wurde ein modifizierter Theil-Sen-Schätzer (MTSS) verwendet. Dies hat mehrere Gründe

- Die Verwendung des Median ignoriert die Informationen, die in den Ausreißern liegen.
- Von Interesse für dieses Projekt sind hauptsächlich Niederschlagsereignisse mit hohen Tagesniederschlägen.
- Bei (sehr) nahe bei einander liegenden Wetterstationen erwartet man, dass die Häufigkeitsverteilungen der Niederschläge, skaliert mit der Korrelationsfunktion, gut übereinstimmen und kein grundsätzlich anderes Verhalten zeigen.
- Bei (sehr) nahe bei einander liegenden Wetterstationen erwartet man einen linearen Zusammenhang der Niederschläge mit Achsenabschnitt $b = 0$.

Die Verwendung des Mittelwertes der Steigungen anstelle des Medians führt dazu, dass Ausreißer in die Schätzung der Steigung mit einfließen, andererseits werden dadurch auch die Informationen aus den Ausreißern mitberücksichtigt. Da es aber speziell bei niedrigen Tagesniederschlägen viele Ausreißer gibt, werden diese überschätzt. Als Lösung bietet sich an, einen gewichteten Mittelwert der Steigung m auszurechnen.

$$m = \frac{\sum_{i,j} m_{i,j} w_{i,j}}{\sum_{i,j} w_{i,j}} \quad (\text{A.1})$$

Die Gewichtungsfunktion muss berücksichtigen, dass Steigungen für Punktpaare mit niedrigen Niederschlägen weniger stark berücksichtigt werden als Punktpaare mit hohen Niederschlägen. Es gibt sehr viele mögliche Gewichtungsfunktionen, die diese Anforderung erfüllen. Im Rahmen dieses Projektes wurde als Gewichtungsfunktion eine logistische Funktion der Form

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x-a)}} \quad (\text{A.2})$$

zugrunde gelegt. Da bei einem Punktpaar (x_i, y_i) und (x_j, y_j) vier unabhängige Variablen auftreten, muss die verwendete Gewichtungsfunktion diese ebenso berücksichtigen. Als Gewichtungsfunktion wurde

$$w_{i,j} = w(x_i, x_j, y_i, y_j) \quad (\text{A.3})$$

$$= \left(\frac{1}{1 + e^{-(x_i-a)}} + \frac{1}{1 + e^{-(x_j-a)}} \right) \left(\frac{1}{1 + e^{-(y_i-a)}} + \frac{1}{1 + e^{-(y_j-a)}} \right)$$

gewählt. Diese erfüllt die obigen Anforderungen. Der Parameter a wird iterativ so bestimmt, dass der Achsenabschnitt $b = 0$ wird.

Dies soll am Beispiel zweier Wetterstationen verdeutlicht werden. Die beiden Wetterstationen liegen weniger als 2 km voneinander entfernt, so dass man eine gute Korrelation der Tagesniederschläge und eine sehr ähnliche Niederschlagscharakteristik erwartet.

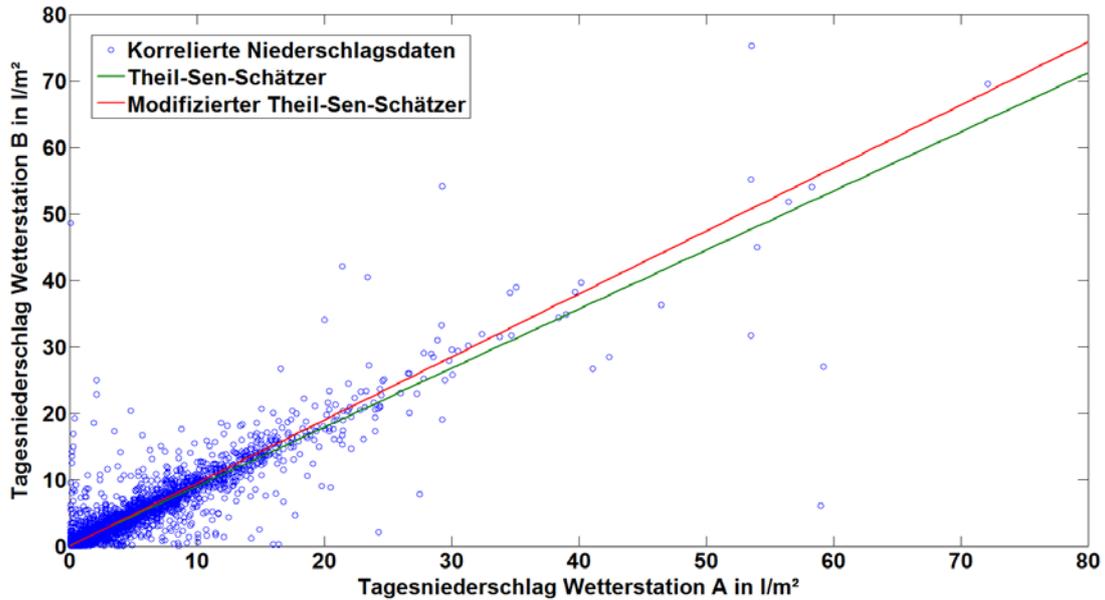


Abb. A.1 Streudiagramm der korrelierten Tagesniederschläge zweier Wetterstationen. Zusätzlich eingetragen sind die Korrelationsgeraden, die sich auf Grund des Theil-Sen- bzw. des modifizierten Theil-Sen-Schätzers ergeben.

Abb. A.1 zeigt das Streudiagramm dieser zwei Wetterstationen (blaue Kreise), sowie die Korrelationsgeraden, die sich aus der Verwendung des Theil-Sen-Schätzers (grüne Gerade) bzw. des modifizierten Theil-Sen-Schätzers (rote Gerade) ergeben. Aus dem Streudiagramm ergibt sich augenscheinlich eine gute Korrelation (trotz der Ausreißer) der Tagesniederschläge dieser zwei Wetterstationen. Die Korrelationsgeraden sind anscheinend beide geeignet um die Korrelation dieser Wetterstationen zu beschreiben. Als zusätzliches Kriterium der Güte der Korrelationsgeraden werden die Histogramme der Wetterstationen verglichen.

Bei Wetterstationen, die nahe beieinanderliegen erwartet man, wie oben beschrieben, eine ähnliche Häufigkeitsverteilung von Niederschlägen. Dabei muss allerdings die Korrelation zwischen diesen beiden Wetterstationen berücksichtigt werden. Dies passiert in dem Sinne, dass für Wetterstation A ein Histogramm mit 20 Klassen ($0\% \leq x_i < 5\%$, $5\% \leq x_i < 10\%$, ... $95\% \leq x_i \leq 100\%$ des maximalen Tagesniederschlags) erstellt wird und

diese Klassen entsprechend der ermittelten Korrelation transformiert und auf die Niederschläge der Wetterstation B angewendet werden²⁹. Zum Vergleich wird noch ein Histogramm ohne Transformation der Klassen erstellt.

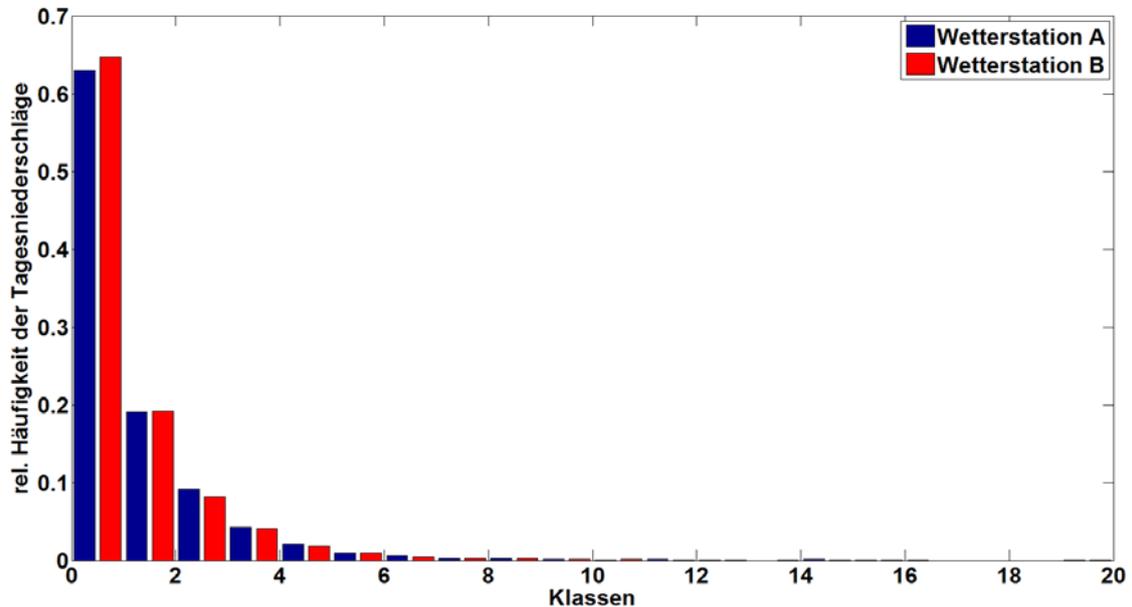


Abb. A.2 Darstellung der relativen Häufigkeiten von Tagesniederschlägen für zwei Wetterstationen ohne Berücksichtigung der Korrelation zwischen diesen zwei Wetterstationen.

Abb. A.2 zeigt die Histogramme der Wetterstationen A und B ohne Berücksichtigung der Korrelation, d. h. die Klassen wurden für Wetterstation B nicht transformiert. Deutlich zu sehen ist, dass die Annahme gleicher Häufigkeitsverteilung so nicht erfüllt ist. Wetterstation B zeigt hier eine stärkere Abnahme der relativen Niederschlagshäufigkeiten als Wetterstation A.

²⁹ Beispielsweise hatte Wetterstation A einen maximalen Tagesniederschlag von 100 l/m² und Wetterstation B hat einen Korrelationskoeffizienten von 0,8 zu Wetterstation A. Dann enthält die erste Klasse alle Niederschlagsereignisse mit <5 l/m² Niederschlag für Wetterstation A. Da bei Wetterstation B durchschnittlich niedrigere Tagesniederschläge zu erwarten sind, erwartet man bei Bildung der ersten Klasse für Wetterstation B die gleiche Häufigkeit wie bei Wetterstation A, allerdings für Tagesniederschläge <4 l/m².

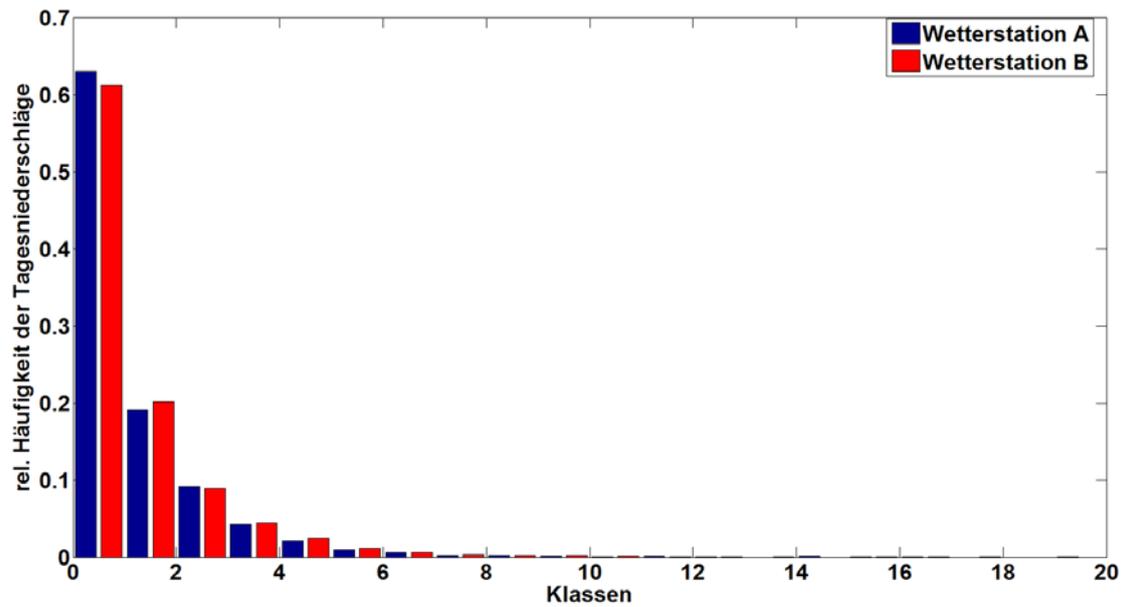


Abb. A.3 Darstellung der relativen Niederschlagshäufigkeiten für zwei Wetterstationen unter Berücksichtigung der mittels TSS ermittelten Korrelation zwischen diesen beiden Wetterstationen.

Abb. A.3 zeigt die Histogramme der Wetterstationen A und B unter Berücksichtigung der mittels TSS ermittelten Korrelation zwischen ihnen, d. h. die Klassen wurden entsprechend transformiert. Auch hier ist die Annahme gleicher relativer Niederschlagshäufigkeiten nicht haltbar. Wetterstation B zeigt hier eine schwächere Abnahme als Wetterstation A.

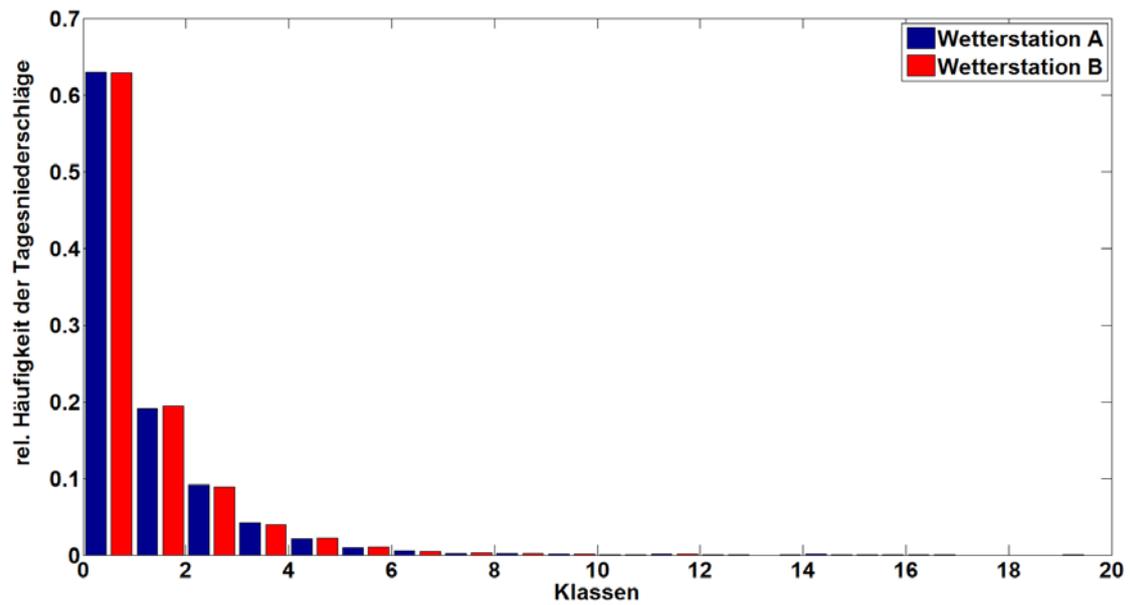


Abb. A.4 Darstellung der relativen Niederschlagshäufigkeiten für zwei Wetterstationen unter Berücksichtigung der mittels MTSS ermittelten Korrelation zwischen diesen beiden Wetterstationen.

Abb. A.4 zeigt die Histogramme der Wetterstationen A und B unter Berücksichtigung der mittels MTSS ermittelten Korrelation zwischen ihnen, d. h. die Klassen wurden entsprechend transformiert. Hier ist, bis auf statistische Schwankungen, kein qualitativ unterschiedliches Verhalten der Wetterstationen zu erkennen.

A.2 Flächengewichteter Niederschlag

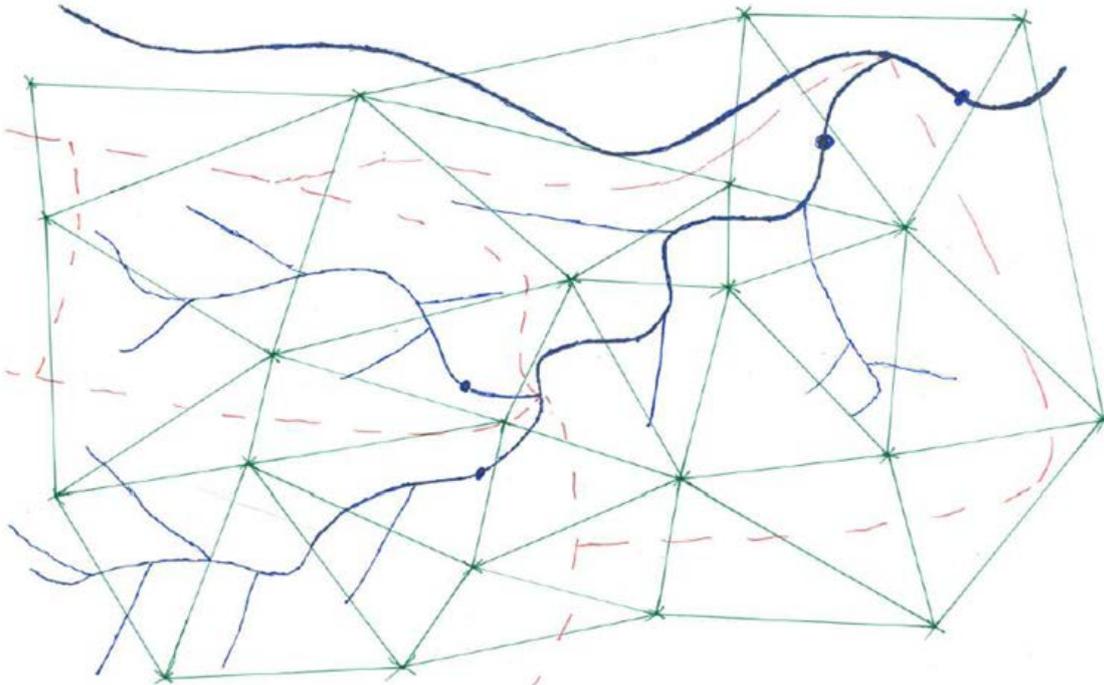


Abb. A.5 Schematische Darstellung der Gebietsabdeckung eines Einzugsgebiets

Abb. A.5 stellt die Gebietsabdeckung eines Einzugsgebietes eines Flusses dar. Wasserläufe sind blau eingezeichnet und die Grenzen des Einzugsgebietes werden rot gestrichelt dargestellt. Grüne Linien stellen die Verbindungen zwischen den Wetterstationen in und um das Einzugsgebiet dar. Die Wetterstationen liegen somit an den Knoten der grünen Linien.

Zur Ermittlung des flächengewichteten Niederschlags wird eine Triangulierung der Wetterstationen, wie in **Abb. A.5** dargestellt, vorgenommen. Die entstehenden Dreiecke sind nicht überlappend. Jedes Dreieck hat also Anteil an drei Niederschlagsmessstationen. Für jedes Dreieck wird die Fläche des Dreiecks bestimmt und das arithmetische Mittel der gemessenen Niederschläge an den Knotenpunkten gebildet. Der flächengewichtete Niederschlag des Einzugsgebietes ergibt sich dann als Summe über die Niederschlagsmittelwerte aller Dreiecke, die das Gebiet gemeinsam überdecken, gewichtet mit der Fläche des jeweiligen Dreiecks geteilt durch die Gesamtfläche aller Dreiecke.

$$N_{fg} = \frac{\sum_k F_k m_k}{\sum_k F_k} \quad (\text{A.4})$$

Dabei ist N_{fg} der flächengewichtete Niederschlag, F_k ist die Fläche des k -ten Dreiecks der Gebietsüberdeckung und m_k ist der arithmetische Mittelwert der drei Niederschlagsmessstationen des k -ten Dreiecks.

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

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

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-946607-57-1