



EMPFEHLUNG

Leitlinie zum Schutz von Endlagern gegen Hochwasser

INHALTSVERZEICHNIS

1	Hintergrund	3
2	Schutzziele	3
3	Konsequenzen von Hochwassern auf Endlager und deren Relevanz für die Einhaltung der Schutzziele	4
4	Hochwasserursachen	5
5	Bemessungsgrundlagen	9
5.1	Einleitung	9
5.2	Bemessungsgrundlagen abhängig von der Standortlage	9
5.2.1	Ermittlung der am konkreten Standort möglichen Hochwasserursachen	9
5.2.2	Festlegung der Bemessungsgrundlage	11
5.2.2.1	Lokaler Starkregen	11
5.2.2.2	Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten	12
5.2.2.3	Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten	13
5.2.2.4	Eisstau bei Flüssen	14
5.2.2.5	Mechanisch induzierte Welle (Wellenrücklauf von Wehr, Rückstau)	15
5.2.2.6	Lokale windinduzierte Welle	15
5.2.2.7	Meereswellen	16
5.2.2.8	Seiches	16
5.2.2.9	Tsunami	17
5.2.2.10	Sturmflut	17
5.2.2.11	Versagen von Dämmen (Wasserstraße) und Deichen (Überflutungsschutz)	18

5.2.2.12	Versagen künstlicher Wasserreservoirs (z. B. Staudämme, Talsperren, Wehre, Wasserbehälter) ...	18
5.2.2.13	Hoher Grundwasserstand	18
5.2.2.14	Kombinationen von Ereignissen, die zu Hochwasser führen können	19
5.3	Berücksichtigung des Klimawandels	22
5.3.1	Anwendung von Klimaänderungsfaktoren	23
5.3.2	Auslegung auf der Grundlage von Klimaprognoserechnungen	23
5.4	Umgang mit Unsicherheiten	24
6	Schutzmaßnahmen	25
7	Unterlagen	28
Anhang I	Berücksichtigung der Unsicherheiten in den unterschiedlichen Schritten der Standortgefährdungsanalysen	
Anhang II	Informationsmaterial zu Tsunamis	

1 Hintergrund

Der Schutz gegen Schäden durch Hochwasser ist eine Grundanforderung an die Auslegung kerntechnischer Anlagen. Als Grundlage diente bisher vor allem die Regel KTA 2207 [KTA 04], die für den sicheren Betrieb der Kernkraftwerke in Deutschland konzipiert und sinngemäß auch für Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung angewendet wurde. Die Fokussierung der Hochwasser-Leitlinie auf Endlager basiert auf der Tatsache, dass sich die dabei zugrunde zu legenden Zeiträume deutlich von der Restbetriebszeit der Kernkraftwerke (bis 2022) sowie den genehmigten Aufbewahrungszeiträumen der Zwischenlager (40 Jahre) unterscheiden. Dies gilt insbesondere für ein zukünftiges Endlager für hoch radioaktive Abfälle. Dieses soll gemäß Standortauswahlgesetz [SAG 13] und Nationalem Entsorgungsprogramm [NAP 15] ab 2031 errichtet werden und ca. 2050 in Betrieb gehen. Unter Berücksichtigung einer etwa 50- bis 70-jährigen Einlagerungsperiode und der anschließenden Verschlussphase ist somit von einer Betriebsphase des Endlagers bis in die Mitte des nächsten Jahrhunderts auszugehen.

Aufgrund dieser langen Zeiträume müssen aus Sicht der ESK auch der Einfluss des Klimawandels sowie neue Erkenntnisse in Bezug auf extreme Wetterlagen bei der Ermittlung des Bemessungswasserstands standortspezifisch berücksichtigt werden, da aktuelle Studien zeigen, dass infolge des Klimawandels in Zukunft sowohl mit einem weiteren Anstieg der Meeresspiegel (z. B. [GER 15]) und der Sturmflutwasserstände als auch mit häufigeren Starkregenereignissen und zunehmenden Intensitäten (z. B. [GER 16]) zu rechnen ist.

Diese Leitlinie stützt sich im Wesentlichen auf das aktuelle französische Regelwerk [ASN 13], da dieses aus Sicht der ESK den zurzeit umfassendsten Ansatz für die Ermittlung der Bemessungswasserstände darstellt.

2 Schutzziele

Die radiologischen Schutzziele, denen die technische Auslegung und der Betrieb des Endlagers für hoch radioaktive Abfälle entsprechen müssen, bestehen darin,

- jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden (§ 6 Abs. 1 der Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) und
- jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Stands von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der festgesetzten Grenzwerte so gering wie möglich zu halten (§ 6 Abs. 2 StrlSchV).

Hieraus abgeleitet gelten für das Endlager mit den technischen Einrichtungen in den über- und untertägigen Anlagen während der Betriebsphase des Endlagers für den Schutz gegen Hochwasser folgende grundlegenden Schutzziele:

- sichere Einhaltung der Unterkritikalität,
- sichere Abfuhr der Zerfallswärme,

- sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe und
- Vermeidung unnötiger Strahlenexposition, Begrenzung und Kontrolle der Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung.

Zusätzlich zu den o. g. Schutzziele müssen die technische Auslegung und der Betrieb zukünftig zu errichtender Endlager den Schutzziele des Bergbaus und den Anforderungen an den sicheren Betrieb eines Bergwerks gemäß Bundesberggesetz entsprechen.

3 Konsequenzen von Hochwasser auf Endlager und deren Relevanz für die Einhaltung der Schutzziele

Hochwasserereignisse können die Sicherheit eines Endlagers gefährden. Folgende Konsequenzen eines Hochwassers auf ein Endlager sind ohne entsprechenden Hochwasserschutz denkbar:

- 1 Unterbrechung der Zufahrt zum Endlager infolge eines Hochwassers,
- 2 Eindringen von Wasser in übertägige Infrastrukturanlagen,
- 3 Eindringen von Wasser in Gebäudeteile zur Lagerung/Konditionierung/Umverpackung der Abfälle,
- 4 Eindringen von Wasser in elektrische Anlagen, z. B.
 - a Anlagen zur untertägigen Stromversorgung inkl. Beleuchtung,
 - b Anlagen zur Steuerung der Grubenbewetterung,
 - c Anlagen zur Abluftfilterung der Wetter für den Fall eines radiologischen Ereignisses,
 - d Kommunikations- und Detektionsanlagen,
 - e Anlagen zur Grubenwasserhaltung,
 - f Anlagen zur Steuerung und zum Betrieb der Schachtförderanlage,
- 5 Eindringen von Wasser in die Schachtröhre, Überschreitung der Kapazität der Schachtwasserhaltung und daraus resultierende Überflutung von Teilen des Grubengebäudes sowie gegebenenfalls Schäden an den geotechnischen und geologischen Barrieren,
- 6 starker Anstieg des Grundwassers,
- 7 großflächige Zerstörung der Infrastruktur

Die Einhaltung der Unterkritikalität ist mit Ausnahme von Punkt 3 (Eindringen von Wasser in Gebäudeteile zur Lagerung/Konditionierung/Umverpackung der Abfälle) nicht gefährdet.

Im Fall von Abfallbehältern für hoch radioaktive Abfälle ist durch deren robuste Struktur davon auszugehen, dass die Behälterintegrität bei jeder der o. g. Auswirkungen erhalten bleibt und es somit nicht zu einer sekundären Ansammlung von spaltbarem Material mit Erreichung kritischer Massen kommt. Dies gilt sowohl für dickwandige selbstabschirmende Endlagerbehälter als auch für Transferbehälter für dünnwandige Kokillen für hoch radioaktive Abfälle im Fall der Bohrlochlagerung. Im Fall dünnwandiger Behälter für schwach und mittel radioaktive Abfälle ist davon auszugehen, dass kritische Aufkonzentrationen an spaltbarem Material aufgrund der sehr geringen Behälterinventare a priori ausgeschlossen sind.

Eine Gefährdung der sicheren Abfuhr der Zerfallswärme könnte bei Eindringen von Wasser in Gebäudeteile zur Lagerung/Konditionierung/Umverpackung der Abfälle (Punkt 3) dann vorliegen, wenn hierdurch die Einrichtungen zur kerntechnisch relevanten Wärmeabfuhr beeinträchtigt werden.

Auch bezüglich der Schutzziele „sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe“ und „Vermeidung unnötiger Strahlenexposition, Begrenzung und Kontrolle der Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung“ ist in Abhängigkeit der Stabilität der Behältertypen zu differenzieren:

- Im Fall von hoch radioaktiven Abfällen in selbstabschirmenden Endlagerbehältern oder bei dünnwandigen Kokillen, die von Transferbehältern umgeben sind, ist wie oben erwähnt davon auszugehen, dass die Behälterintegrität bei jeder der o. g. Auswirkungen erhalten bleibt und die o. g. Schutzziele erreicht werden. Abgesehen von dem Fall, dass sich diese Behälter im geöffneten Zustand befinden, d. h. vor allem bei der Umverpackung der Abfälle in der Konditionierungsanlage (Punkt 3), finden keine überflutungsbedingte Freisetzungen von Radionukliden statt.
- Im Fall von schwach und mittel radioaktiven Abfällen in vergleichsweise dünnwandigen Stahlblech- oder Betoncontainern wären Radionuklidfreisetzungen zusätzlich zu den o. g. Fällen nicht auszuschließen, wenn es zum Integritätsverlust der Behälter durch hochwasserbedingte Beschädigungen der Behälterhüllen kommt. Dies könnte bereits im Fall der Lagerung (Pufferhalle, Punkt 3; Füllort, Punkt 5) infolge Kollision der Behälter untereinander oder mit anderen festen Gegenständen sowie unter Umständen bei einem schwallartigen Eindringen des Hochwassers in die Schachtröhre geschehen, wenn diese Behälter sich nahe des Füllorts befinden.

Bei allen anderen Auswirkungen ist nicht von einer Freisetzung radioaktiver Stoffe auszugehen, da die Einschlusswirkung der Behälter erhalten bleibt.

Dennoch müssen für die Gewährleistung der Betriebssicherheit während Errichtung, Betrieb und Stilllegung [BMU 10] Schutzvorkehrungen gegen alle o. g. Auswirkungen getroffen werden. Diese gehen über die reine Verhinderung von Nuklidfreisetzungen hinaus.

4 Hochwasserursachen

Hochwasser kann durch folgende Phänomene verursacht werden, die je nach Standortlage einzeln, kombiniert oder gar nicht auftreten können. Darüber hinaus können sie einer zeitlichen Veränderung unterliegen.

- **Lokaler Starkregen** sind größere Niederschlagsmengen in Form von Regen, die – typischerweise in kurzer Zeit – unmittelbar auf das Anlagengelände fallen.
- **Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten** (bis ca. 500 km²) ist der Abfluss von Niederschlägen, die im Umland der Anlage fallen und von kleineren Fließgewässern (Bächen) abgeführt werden. Insbesondere bei lokalen Starkregenereignissen können dabei ansonsten unbedeutende Bäche über die

Ufer treten und die weitere Umgebung überfluten. In diesem Zusammenhang ist auch mit einem erhöhten Anfall von Treibgut zu rechnen.

- **Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten** (mehr als 500 km²) bezeichnet den Abfluss von Wasser in einem nahe gelegenen größeren Fließgewässer (Fluss). Der Abfluss kann dabei aus aktuellen Regenfällen respektive Starkregen und/oder aus Schneeschmelze im Einzugsgebiet resultieren.
- **Eisstau bei Flüssen** resultiert aus dem Aufstauen von Eisschollen an Hindernissen wie z. B. Flussverengungen, engen Flussbiegungen oder Brücken. Ein Eisstau kann auf zweierlei Weise zu einer Überflutungsursache werden: (a) Durch die Eisbarriere wird das Wasser gestaut, so dass es zu einer Überflutung eines flussaufwärts gelegenen Standorts kommt. (b) Beim Brechen der Eisbarriere entsteht eine Flutwelle, die flussabwärts zu Überflutungen führt.
- **Mechanisch induzierte Wellen (Wellenrücklauf von Wehr, Rückstau)** sind flussabwärts oder flussaufwärts laufende Wellen, die durch abrupte Durchflussänderungen in Flüssen oder Kanälen, z. B. beim plötzlichen Öffnen oder Schließen von Wehren entstehen.
- **Lokale windinduzierte Wellen** sind Wellen, die sich auf Gewässern durch aktuelle lokale Windeinwirkung ausbilden können. Damit die Wellen eine aus sicherheitstechnischer Sicht relevante Größe erreichen, muss das Gewässer eine Mindestgröße aufweisen, die z. B. bei großen Flüssen, Seen und an der Küste gegeben ist.
- **Meereswellen** wandern nach ihrer Entstehung über weite Entfernungen und können auch an Küsten, die von dem erzeugenden Windfeld aktuell nicht betroffen sind, eine Überflutungsursache darstellen (Fernwellen und Dünung). Ein linearer Massentransport findet bei windinduzierten Wellen erst statt, wenn diese im Flachwasser brechen.

Monsterwellen (auch Riesenwellen, Kaventsmänner oder Freakwaves) sind außergewöhnlich hohe, einzelne marine Wasserwellen. Da diese nur auf offener See vorkommen und beim Einlaufen in flache Randmeere, wie die Nordsee, weit vor der Küste brechen, sind sie für deutsche Endlagerstandorte in Küstennähe nicht relevant. Sie werden daher in dieser Leitlinie nicht weiter betrachtet.

- **Seiches** sind stehende Wellen, die in geschlossenen oder halbgeschlossenen Becken, z. B. Seen, Buchten oder Häfen auftreten. Auslöser solcher stehenden Wellen können z. B. Windeinwirkung, Luftdruckschwankungen oder Erdbeben sein.
- **Tsunamis** sind Wellen auf dem Meer oder auf Seen, die durch die Verlagerung großer Wassermassen entstehen. Im Gegensatz zu windinduzierten Wellen transportieren Tsunamis Wassermassen über große Distanzen. Daher spielen neben der Höhe des Wasserstands dynamische Einwirkungen bei Tsunamis eine wesentliche Rolle. Auch sind bei Tsunamis die Ausbreitungsgeschwindigkeiten sowie die Wellenlängen/Perioden deutlich größer als bei Windwellen.

Tsunamis können verursacht werden durch a) spontanen vertikalem Versatz von ozeanischen Platten (Seebeben), b) spontanen Gasausstoß von Vulkanen, c) einen Einschlag großer Meteoriten auf die wasserbedeckte Erdoberfläche, d) Abrutschen instabiler Sedimente an Schelfrändern oder Abrutschen von Erd- oder Gesteinsmassen an Steilhängen in Gebirgsseen, Fjorden oder enge Meeresbuchten und e) kurzzeitige extreme Luftdruckschwankungen (Meteotsunamis).

Aufgrund der im globalen Vergleich relativ geringen tektonischen und vulkanischen Aktivität im nördlichen Atlantik werden Tsunamis der beiden ersten Entstehungsursachen in dieser Leitlinie nicht weiter betrachtet.

Die extremen primären Auswirkungen eines Einschlags großer Meteoriten (Überflutung von Teilkontinenten, extreme Feuerstürme, jahrelange auswurfbedingte Verdunkelung der Atmosphäre) stehen in keinem Verhältnis zu den vergleichsweise geringen sicherheitstechnischen Risiken, die von einem im Betrieb befindlichen Endlager ausgehen. Insofern wird auch diese Art von Tsunamis in dieser Leitlinie nicht weiter betrachtet.

Meteotsunamis und Tsunamis, die durch Hangrutschungen ausgelöst werden, sind jedoch für deutsche Küstenstandorte nicht auszuschließen und daher bei der Hochwasserauslegung zu berücksichtigen.

- **Sturmfluten** sind außergewöhnlich hohe Wasserstände an der Küste, die aus einer Überlagerung eines hohen Tidestands (Flut, Springflut) mit Windstau und einem luftdruckbedingten erhöhten lokalen Meeresspiegel resultieren. Typischerweise kommen zu dem aus der Sturmflut resultierenden Wasserstand noch Meereswellen und lokale windinduzierte Wellen hinzu.
- **Versagen von Dämmen (Wasserstraße) und Deichen (Überflutungsschutz)**, d. h. eines (künstlich geschaffenen) Wasserbauwerks entlang von Kanälen, Küsten und Flüssen. Ein großer Teil der Kanalhaltungen verläuft in sog. Dammlage, bei der sich der Kanalwasserstand über der Oberfläche des seitlich angrenzenden Geländes befindet. In Dammstrecken von Kanälen ist das Gewässerbett zumeist mit einer Kanaldichtung ausgekleidet, um Wasserverluste zu minimieren. In staugeregelten Flüssen existiert häufig eine natürliche Selbstdichtung des Gewässerbetts infolge Kolmation. Deiche und Hochwasserschutzwände werden entlang von Flüssen und Küsten zum Schutz der dahinter liegenden Flächen vor Hochwasser errichtet. Sie sind nicht andauernd mit Wasser beaufschlagt.
- **Versagen künstlicher Wasserreservoirs (z. B. Staudämme, Talsperren, Wehre, Wasserbehälter)**. Staudämme und Talsperren sind künstlich geschaffene Absperrbauwerke, die als Teil einer Stauanlage zumeist im Lauf von Fließgewässern errichtet werden, um einen Stausee entstehen zu lassen. Absperrbauwerke gibt es bei Talsperren in Form eines Staudamms oder einer Staumauer, an Staustufen und an Wehren. Sie dienen dem Aufstau eines Wasserlaufs mit dem Ziel diesen zu regulieren und/oder der Wasserversorgung. Sie sperren in der Regel einen Talquerschnitt ab. Wasserbehälter werden für die Trinkwasserversorgung errichtet und betrieben.

Ein Hochwasserrückhaltebecken ist eine Stauanlage, deren Hauptzweck die Regulierung der Abflussmenge eines Fließgewässers bei Hochwasser ist. Es dämpft die abfließende Hochwasserwelle,

indem es übermäßige Wasserfrachten zwischenspeichert und nach Abklingen eines Ereignisses wieder kontrolliert abgibt. Das Becken ist im Normalfall leer (sog. Trockenbecken oder grünes Becken) oder teilweise gefüllt (Dauerstaubecken).

- Darüber hinaus sind auch **hohe Grundwasserstände** zu betrachten. Ein hoher Grundwasserstand kann sich aus unterschiedlichen Ursachen einstellen. Insbesondere tritt er im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen in nahe gelegenen größeren Fließgewässern auf.

Einen Überblick über denkbare Auslöser der verschiedenen Hochwasserursachen gibt die Tabelle 1.

Tabelle 1: Zuordnung der Hochwasserursachen

Hochwasserursache	Auslöser										
	Niederschlag	Schneeschmelze	Wind	Eisgang	Erdbeben	Dichteabnahme des Meerwassers	Gezeiten	Anregung der Resonanzfrequenz eines offenen Beckens	Luftdruckschwankungen	Unterseeische Hangrutschungen	Künstlich ausgelöste Flutwellen
Lokaler Starkregen	x										
Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten	x	x									
Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten	x	x									
Eistau bei Flüssen				x							
Mechanisch induzierte Wellen											x
Lokale windinduzierte Wellen			x								
Meereswellen			x								
Seiches			x		x			x	x		
Tsunami					x				x	x	
Sturmflut			x			x	x		x		
Versagen von Dämmen und Deichen					x						x
Versagen künstlicher Wasserreservoirs					x						x
Hoher Grundwasserstand	x	x									

5 Bemessungsgrundlagen

5.1 Einleitung

Nachfolgend wird die prinzipielle Vorgehensweise bei der Ermittlung des Bemessungshochwassers dargestellt, die die Komplexität des Zusammenspiels der für ein Hochwasserereignis maßgeblichen Einflussfaktoren adäquat berücksichtigt. Die Eignung der im konkreten Anwendungsfall eingesetzten Rechenmodelle ist zu begründen. Vor diesem Hintergrund ist eine vierstufige Vorgehensweise anzuwenden:

Im ersten Schritt sind für den konkreten Standort alle potenziellen Hochwasserursachen zu identifizieren. Die Hochwasserursachen sind zu einem großen Teil abhängig von der Standortlage. Dabei sind im Wesentlichen vier verschiedene (typisierte) Standortlagen zu unterscheiden: Standort im Binnenland ohne Binnengewässer, Standort im Binnenland mit benachbarten großem Binnengewässer, Küstenstandorte und Standorte mit benachbarten künstlichen Hochwasserquellen (z. B. Stauseen). Kombination der o. g. typisierten Standortlagen sind möglich und müssen entsprechend berücksichtigt werden. Für die in Kapitel 4 genannten Hochwasserursachen ist eine Zuordnung in Abhängigkeit von der Standortlage vorzunehmen (s. Kapitel 5.2.1, Tabelle 2), die als Basis für die weiteren Betrachtungen dient.

In einem zweiten Schritt sind die Bemessungsgrundlagen für die zu betrachtenden Hochwasserursachen zu ermitteln. Die Vorgehensweise hierzu wird in Kapitel 5.2 erläutert.

Angesichts der langen Zeiträume, die von der Standortfestlegung bis zum Verschluss des Endlagers vergehen, muss auch der Einfluss des Klimawandels bei der Ermittlung des Bemessungswasserstands standortspezifisch berücksichtigt werden. Dabei ist vor allem mit einem Anstieg des Meereswasserspiegels und der Sturmflutwasserstände aber auch mit häufigeren Starkregenereignissen mit zunehmender Intensität zu rechnen. Das Vorgehen zur Ermittlung des Einflusses des Klimawandels auf den standortspezifischen Bemessungswasserstand erfolgt im dritten Schritt (s. Kapitel 5.3).

Da die Ermittlung der Bemessungswasserstände nicht nur aufgrund der langen Prognosezeiträume, der Unschärfe der zu treffenden Annahmen und Eingangsparameter sowie des komplexen Zusammenspiels vieler Parameter mit Unsicherheiten behaftet ist, müssen in einem vierten Schritt eine Fehlerbetrachtung und eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt werden, um die Robustheit der getroffenen Aussagen zu überprüfen und zu erhöhen (s. Kapitel 5.4).

5.2 Bemessungsgrundlagen abhängig von der Standortlage

5.2.1 Ermittlung der am konkreten Standort möglichen Hochwasserursachen

Da die Hochwassergefährdung stark von den regionalen (z. B. vorherrschenden meteorologischen Bedingungen) und lokalen (Topographie der Standortumgebung) Gegebenheiten abhängt, ist standortspezifisch zu prüfen, welche Hochwasserursachen hinsichtlich möglicher sicherheitsrelevanter Auswirkungen auf den Standort detailliert zu untersuchen sind. Um bei der Standortgefährdungsanalyse eine Fokussierung auf relevante Hochwasserursachen zu erleichtern, wird in dieser Leitlinie zwischen vier möglichen Lagen des Standorts unterschieden. Für jede Standortlage werden im Folgenden die zu

betrachtenden Hochwasserursachen aufgeführt. Da sich nicht alle Standortlagen gegenseitig ausschließen, sind gegebenenfalls für den zu untersuchenden Standort die Hochwasserursachen mehrerer Standortlagen zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für die Standortlage „Nahe künstlicher Hochwasserquellen“, die für jede der drei anderen Standortlagen zusätzlich zutreffen kann. Bei Flusstandorten mit Tideeinfluss sind sowohl die Hochwasserursachen für „Große Binnengewässer“ als auch die Hochwasserursachen für „Küste“ zu betrachten. Des Weiteren ist zu prüfen, welche Kombinationen unterschiedlicher Hochwasserursachen unter Berücksichtigung ihrer Häufigkeit einen relevanten Beitrag zur Standortgefährdung liefern können. In Tabelle 2 sind die Hochwasserursachen der jeweiligen Standortlage zugeordnet.

Tabelle 2: Zuordnung der Hochwasserursachen zur Lage des Endlagerstandorts

Hochwasserursache	Standortlage ¹			
	Binnenland ohne Binnengewässer	Binnenland mit großem Binnengewässer	Küste	Nahe künstlicher Hochwasserquellen
Lokaler Starkregen	x	x	x	x
Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten	x	x	x	x
Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten		x		
Eisstau bei Flüssen		x		
Mechanisch induzierte Wellen				x
Lokale windinduzierte Wellen		x	x	
Meereswellen			x	
Seiches		x	x	
Tsunami		x	x	
Sturmflut			x	
Versagen von Dämmen und Deichen		x	x	x
Versagen künstlicher Wasserreservoirs				x
Hoher Grundwasserstand	x	x	x	x

¹ Für Endlagerstandorte können auch mehrere Standortlagen zutreffen, dies gilt insbesondere für die Standortlage „Nahe künstlicher Hochwasserquellen“.

Im Regelfall ist davon auszugehen, dass die Hochwasserursachen „Lokaler Starkregen“, „Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten“ und „Hoher Grundwasserstand“ bei allen Standorten auftreten können. Allerdings

ist auch hierbei zu prüfen, ob tatsächlich alle Hochwasserursachen vorliegen. Beispielsweise ist es nicht zwingend, dass ein Standort in unmittelbarer Nähe zu einem lokalen Vorfluter (Bach, s. Fall „Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten“) liegt. Dies ist entsprechend in jedem Einzelfall zu prüfen.

Die weiteren zu betrachtenden Hochwasserursachen sind nur dann relevant, wenn der Standort entweder an einem großen Binnengewässer, der Küste und/oder in der Nähe künstlicher Hochwasserquellen (Dämme, Deiche, künstliche Wasserreservoirs) liegt.

Im Fall der Lage eines Endlagers in der Nähe einer Trichtermündung eines Flusses in ein Gezeiten beeinflusstes Meer (Ästuar) ist die Kombination der Hochwasserursachen bei großen Binnengewässern und an der Küste zu berücksichtigen.

5.2.2 Festlegung der Bemessungsgrundlage

5.2.2.1 Lokaler Starkregen

Starkniederschlagsereignisse werden in Abhängigkeit der Niederschlagsdauer durch maximale Niederschlagshöhen in Abhängigkeit von den Jährlichkeiten charakterisiert. Für die Auslegung von Endlagern sind Niederschlagsdauern von fünf Minuten und einer Stunde zu berücksichtigen. Für diese ist eine Jährlichkeit von $10^{-4}/a$ anzusetzen.

Für die Berechnungen sind Werte von Wetterstationen heranzuziehen, deren Lage repräsentativ für die Gegebenheiten am Standort ist.

Die Abflussraten sind nach einem geeigneten Niederschlags-Abfluss-Modell unter Zugrundelegung genauer Daten des Standorts zu berechnen.

Dabei können auch die am Standort vorhandenen Entwässerungssysteme (Kanalisation, Drainagesysteme) berücksichtigt werden, sofern deren Verfügbarkeit sichergestellt ist. Dabei ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Entwässerungssysteme weisen im Normalbetrieb Durchflussmengen auf, die bereits einen Teil ihrer Kapazität beanspruchen. Regenbedingte Durchflussströme müssen folglich zusätzlich durch das Entwässerungssystem abgeleitet werden.
- Bei Einleitung in bestehende Kanalisationssysteme ist das gesamte Entwässerungssystem bezüglich Kapazität und Zustand (z. B. Leckage, Rauigkeit) zu betrachten.
- Bei Kanalisations-/Regenwasserdrainagesystemen, die in Becken oder Fließgewässer münden, deren Wasserstand von den lokalen Regenfällen beeinflusst wird, ist der dort vorhandene Wasserstand zu berücksichtigen.

- Bei Kanalisations-/Regenwasserdrainagesystemen, die unmittelbar in Fließgewässer entwässern, deren Fließrate unabhängig von der örtlichen Wettersituation ist, ist die mittlere Abflussrate oder der mittlere Wasserstand des Fließgewässers anzusetzen.
- Bei Kanalisations-/Regenwasserdrainagesystemen, die in Gezeiten-beeinflusste Meere münden, ist der 10-jährliche Tidenhöchststand anzusetzen.

Mit dem Starkregenereignis können auch Erde und/oder Treibgut mobilisiert werden. Im Bereich der Anlage sind solche Stellen zu überprüfen und auszuweisen, an denen sich Erde und Treibgut ablagern können. Ein evtl. daraus resultierender Aufstau von Regenwasser auf dem Anlagengelände ist zu berücksichtigen.

5.2.2.2 Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten

Niederschläge, die im Umland der Anlage fallen und von kleineren Fließgewässern nahe dem Anlagengelände abgeführt werden, können zu einer Überflutung der Anlage führen. Maßgebend für die Auslegung der Anlage sind der sich auf dem Anlagengelände einstellende, maximale Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit des Hochwassers auf dem Anlagengelände.

Zur Ermittlung des maximalen Wasserstands und der Fließgeschwindigkeit ist der Hochwasserabfluss in einem, durch ein lokales Einzugsgebiet (bis ca. 500 km²) gespeisten Vorfluter (Bach, Teich, Graben, etc.) mit einer instantanen 10.000-jährlichen Abflussrate anzusetzen. Sofern sich diese Abflussrate nicht durch Extrapolation von Pegelmessungen ermitteln lässt, muss sie mit einer entsprechenden Niederschlag-Abfluss-Modellierung ermittelt werden.

Für eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung müssen die hydrologischen und hydrogeologischen Charakteristika des Einzugsgebiets berücksichtigt werden.

Zusätzlich zu berücksichtigen ist Folgendes:

- Falls erforderlich, sind die hydrologischen Bedingungen des Fließgewässers an seiner Mündung in den nächstgrößeren Vorfluter mit zu betrachten. Hierbei sind etwaige Hochwasserstände desjenigen Flusses zu betrachten, in den der Vorfluter, der das lokale Einzugsgebiet entwässert, mündet.
- Falls der Vorfluter in ein Fließgewässer mündet, welches von den Wetterbedingungen, die im lokalen Einzugsgebiet herrschen, unbeeinflusst ist, so ist die mittlere Abflussrate des Fließgewässers an der Mündung anzusetzen.
- Wenn der Vorfluter, der das lokale Einzugsgebiet entwässert, direkt in ein Gezeiten-beeinflusstes Meer mündet, kann der 10-jährliche Tidenhöchststand zur Ermittlung der Spitzenabflussrate genutzt werden.

Mit dem Abfluss aus dem lokalen Einzugsgebiet können durch das Fließgewässer auch Erde und/oder Treibgut mobilisiert werden. Im Bereich der Anlage sind solche Stellen zu überprüfen und auszuweisen, an denen sich

Erde und Treibgut ablagern können. Ein evtl. daraus resultierender Aufstau von Wasser auf dem Anlagengelände ist zu berücksichtigen.

5.2.2.3 Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten

Als großräumig werden Einzugsgebiete mit einer Fläche von mehr als 500 km² bezeichnet. Für den Hochwasserschutz hinsichtlich dieser Einzugsgebiete ist der sich im Bereich der zu schützenden Anlagenteile und Schutzbauwerke einstellende Wasserstand maßgeblich. Dieser ist mithilfe hydraulischer Modelle aus dem aus Regenfällen oder Schneeschmelze resultierenden Abfluss (Volumenstrom, typischerweise in m³/s) im betreffenden Fließgewässer zu ermitteln. Für die Auslegung von Endlagern ist dabei eine Jährlichkeit von 10^{-4/a} anzusetzen. Die Bestimmung eines Abflusses mit einer entsprechenden Jährlichkeit hat – sofern belastbare Daten vorliegen – bevorzugt über die Auswertung von Pegelmessungen zu erfolgen.

- Auswertung von Pegelmessungen: Die Messdaten (Wasserstände) eines repräsentativen Pegels in der Nähe des Standorts (sofern erforderlich auch mehrerer Pegel) sind in entsprechende Abflüsse umzurechnen. Aus dieser Abflussdatenreihe ist mittels geeigneter statistischer Verfahren ein Abfluss mit einer Jährlichkeit von 10^{-4/a} zu ermitteln. Falls im Einzugsgebiet mit nennenswerten Schneemengen zu rechnen ist, sind bei der statistischen Auswertung der Daten gegebenenfalls mehrere separate Datenpopulationen zu betrachten (z. B. jahreszeitliche Trennung der Pegeldata, um rein regenbedingten Abflüssen und Abflüssen resultierend aus Regen auf eine vorhandene Schneedecke Rechnung zu tragen).

Sind keine belastbaren Pegelmessdaten verfügbar, muss die Bestimmung des Abflusses auch über den Niederschlag im Einzugsgebiet erfolgen.

- Auswertung von Niederschlagsdaten im Einzugsgebiet: Durch statistische Auswertung der Niederschlagsmessdaten relevanter Wetterstationen im Einzugsgebiet des betrachteten Flusses ist ein Niederschlagsereignis mit einer Jährlichkeit von 10^{-4/a} zu ermitteln. Anhand geeigneter Niederschlag-Abfluss-Beziehungen muss aus den Niederschlägen ein resultierender Abfluss am Standort errechnet werden. Dabei sind unterschiedliche mögliche Randbedingungen im Einzugsgebiet (z. B. vorhandene Schneebedeckung oder bereits gesättigter Boden) zu berücksichtigen.

Auf Grundlage des ermittelten Abflusses mit einer Jährlichkeit von 10^{-4/a} ist mithilfe hydrologischer und hydraulischer Modelle der resultierende Wasserstand im Bereich der zu schützenden Anlagenteile und Schutzbauwerke zu bestimmen. Hierfür ist ein ausreichend großes Gebiet um den Standort hinsichtlich seiner topographischen und hydraulischen Eigenschaften zu modellieren. Die räumliche Auflösung des Modells muss eine Berücksichtigung wesentlicher hydraulischer Strukturen wie z. B. Dämme und Brücken erlauben. Bei der Modellierung sind die aus einem extremen Abfluss resultierenden Randbedingungen (z. B. Damnbrüche, Ansammlung von Treibgut an Engstellen oder Eröffnung von Retentionsflächen) zu berücksichtigen. Sollte aufgrund derartiger standortspezifischer Randbedingungen der aus einem Abfluss mit der Jährlichkeit 10^{-4/a} resultierende Wasserstand geringer sein als der Wasserstand aufgrund eines häufigeren Abflusses, bei dem es

nicht zur Flutung von Retentionsflächen kommt, so ist der Auslegung das Ereignis mit dem höheren Wasserstand zugrunde zu legen.

Neben dem maximalen Wasserstand ist auch der zu erwartende zeitliche Verlauf des Hochwasserereignisses am Standort zu ermitteln oder konservativ abzuschätzen. Informationen hinsichtlich der Dauer werden insbesondere für die Planung von Maßnahmen zur Versorgung mit Betriebsstoffen und zum Austausch des Personals (wenn aufgrund des Wasserstands von einer Insellage des Standorts auszugehen ist) und zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen (z. B. im Hinblick auf die Belastung von Deichen und Abdichtungen) benötigt.

Zusätzlich sind im Zusammenhang mit dem Oberflächenabfluss aus großräumigen Einzugsgebieten folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- die Einwirkung von Treibgut oder Eisgang auf Schutzbauwerke,
- die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit des Wassers auf dem Anlagengelände, falls dieses bei dem zu unterstellenden Hochwasserereignis nicht wasserfrei ist,
- der aus dem Hochwasser auch hinter Schutzbauwerken resultierende Grundwasseranstieg sowie eventuelles Qualmwasser¹,
- der unmittelbar aus dem Hochwasser oder aus dem Grundwasseranstieg resultierende Auftrieb,
- die Möglichkeit von Unterspülungen, Erosion und Setzungen,
- das eventuelle Versagen der betrieblichen und öffentlichen Kanalisation.

5.2.2.4 Eisstau bei Flüssen

Bei lange anhaltenden niedrigen Wassertemperaturen kann sich in einem Fluss Treibeis bilden. Wird der Transport von Eiskristallen und Eisschollen behindert, kann sich ein Eisstau bilden, der durch weitere Ansammlung von Eisschollen in eine Eisversetzung (starke Einengung des Abflussquerschnitts durch zusammengefrorenes Treibeis über die gesamte Flussbreite) übergeht. Durch die Einengung des Abflussquerschnitts kann es dabei zu einem schnellen Aufstauen von Wasser flussaufwärts der Eisversetzung mit Überflutungsgefahr flussaufwärtiger Standorte kommen. Beim Versagen der Eisversetzung kann zudem eine Flutwelle entstehen, die eine Überflutungsgefahr flussabwärtiger Standorte darstellt. Die schädigende Wirkung der Flutwelle wird dabei durch mitgeführtes Treibeis verstärkt.

Da Eisversetzungen seltene Ereignisse sind, die aus einem Wechselspiel zwischen hydro-meteorologischen Einflüssen und Eismechanik resultieren, ist ihre probabilistische Erfassung bisher nicht befriedigend möglich. Eine Methodik, die eine quantitative Prognose für die Bildung oder das Versagen einer Eisversetzung einschließlich der resultierenden Wasserständen erlaubt, wird aufgrund der komplexen Zusammenhänge auch in absehbarer Zukunft nicht verfügbar sein. Der Auslegung eines Endlagers kann daher kein Eishochwasser mit einer vorgegebenen Jährlichkeit und einem zugehörigen Wasserstand zugrunde gelegt werden. Ungeachtet

¹ Als „Qualmwasser“ oder „Drängewasser“ wird Wasser bezeichnet, das aufgrund des Niveauunterschieds bei Hochwasser durch wasserführende Bodenschichten unter dem Deich auf die Landseite gedrückt wird und dort aus dem Boden austritt. Neben dem unerwünschten Wassereintrag in eigentlich durch den Deich geschützte Bereiche kann Qualmwasser durch Auswaschung des Untergrunds auch die Standsicherheit des Deiches beeinträchtigen.

des im Voraus nicht zu ermittelnden Wasserstands ist ein Endlager gemäß Kapitel 6 gegen Überflutung aufgrund von Eisstau zu schützen. Dies muss durch geeignete administrative Maßnahmen sichergestellt werden.

5.2.2.5 Mechanisch induzierte Welle (Wellenrücklauf von Wehr, Rückstau)

Dem Überflutungsschutz gegen mechanisch induzierte Wellen ist der maximale Wasserstand zugrunde zu legen, der sich durch Wellen aufgrund abrupter Durchflussänderungen an Wasserbauwerken im angrenzenden Fließgewässer einstellen kann. Bei der Ermittlung des Wasserstands im Bereich der zu schützenden Anlagenteile und Schutzbauwerke sowie seines zeitlichen Verlaufs ist von den ungünstigsten Ausgangsbedingungen hinsichtlich der Wasserführung im Fließgewässer (Wasserstand und Durchfluss) zu Beginn des Ereignisses auszugehen.

Bei der Identifizierung möglicher Quellen für mechanisch induzierte Wellen sind Schiffsschleusen, Wehranlagen und andere Wasserbauwerke mit hydraulischer Funktion sowohl flussabwärts als auch flussaufwärts des Standorts zu berücksichtigen. Die Länge des jeweils zu betrachtenden Gewässerabschnitts hängt von der Größe der Wasserbauwerke und den sich aus der Geometrie des Flussbetts ergebenden Ausbreitungsbedingungen für Wellen ab.

5.2.2.6 Lokale windinduzierte Welle

Der Bemessungswind für die Bestimmung der lokalen Windwellen ist definiert als 10.000-jährliche Windgeschwindigkeit gemittelt über zehn Minuten und in einer Höhe von zehn Metern. Sie errechnet sich mittels statistischer Erhebungen von extremen Windstärken unabhängig von der Windrichtung. Sofern die lokale Topografie die Windgeschwindigkeit am Standort beeinflussen kann, ist diese zu berücksichtigen.

Wenn die lokalen windinduzierten Wellen zu einem Übertreten der Schutzbauwerke führen, sind die Wassermengen zu berechnen, die über diese Bauwerke hinwegfließen. Unter Einbeziehung der Windrichtung wird diese Wassermenge für jede einzelne Anlaufänge ermittelt. Die Wahl der zur Berechnung der Übertretungsmenge verwendeten physikalischen Ansätze muss begründet werden (Gültigkeitsbereich, Erhöhung des Ergebnisses usw.).

Auch die für die Einbeziehung des Winds in die übertretenden Durchflussströme verwendete Methode muss begründet werden (z. B. Anwendung eines Erhöhungskoeffizienten auf einen Übertretungsdurchflussstrom, wenn dieser Durchflussstrom mittels empirischer Formel ermittelt wird und die Wirkung des Windes dabei unberücksichtigt bleibt).

5.2.2.7 Meereswellen

Charakterisiert werden die Wellenverhältnisse an einer Küste durch zwei unterschiedliche Wellentypen. Ozeanwellen, erzeugt von Winden auf hoher See, die sich über die Entstehungszone hinaus ausbreiten und lokale Windwellen (s. Kapitel 5.2.2.6), die küstennah erzeugt werden. Letztere werden signifikant durch die Morphologie der Küste beeinflusst. Abhängig von der Exposition und der Beschaffenheit des Standorts ist es möglich, die Untersuchung je nach der Dominanz der beiden Wellenarten zu vereinfachen. Dabei ist die Bemessung der maximalen Wellenhöhe entweder auf der Grundlage von Ozeanwellen oder lokaler Windwellen vorzunehmen.

Die Bereiche, in denen sich lokale Windwellen entwickeln können, sind durch die lokale Geometrie des Küstengewässerkörpers festgelegt. Zu betrachten sind alle Bereiche, die eine für die Entstehung signifikanter lokaler Windwellen ausreichende Ausdehnung aufweisen. Es ist dabei zu unterstellen, dass der Bemessungswind lokale Windwellen in jedem dieser Bereiche erzeugen kann.

Der Einfluss der Meeresströmung auf die Ausbildung der lokalen Windwellen ist zu berücksichtigen. So können die lokalen Windwellen durch vorherrschende Strömungen gestärkt oder geschwächt werden. Wenn die Wellensteilheit die Bedingungen der Wellenbrechung erfüllt, werden für die lokalen Bemessungswindwellen die Wellenhöhen an der Brandungsgrenze festgelegt.

Die zur Bemessung herangezogene 10.000-jährliche Ozeanwelle muss in ausreichender Entfernung zur Küste ermittelt werden, damit ihre Charakteristik von den physikalischen Phänomenen, die im seichten küstennahem Wasser auftreten, insbesondere der Brandung, nicht beeinflusst wird. Hierzu sind langjährige Messreihen zu Wellenhöhen durch geeignete Verfahren zu extrapolieren. Wenn die Wellensteilheit die Bedingungen der Wellenbrechung erfüllt, werden für die lokalen Bemessungsozeanwellen die Wellenhöhen an der Brandungsgrenze festgelegt.

Die Berechnung der Ozeanwellenausbreitung erfolgt mit Modellen, welche die dominanten physikalischen Phänomene küstennaher Wellenausbreitung und die Existenz von Küsten- und Hafengebäuden berücksichtigen. Wo nötig, wird das Eindringen der Welle in ein Hafenbecken oder in die Wasserzulauf- oder Ablaufkanäle sowie die Interaktion der Welle mit den Küstengebäuden berücksichtigt. Die Ausbreitung der Wellen wird für stationäre und ungünstige Randbedingungen simuliert.

5.2.2.8 Seiches

Das Risiko von Seiches ist auf der Grundlage von Erfahrungswerten, z. B. bezüglich des Wasserstands, zu ermitteln. Wenn dieses Risiko an ufernahen Standorten nicht ausgeschlossen werden kann, muss dieses Phänomen bei der Berechnung des Bemessungswasserspiegels berücksichtigt werden. Der Bemessungswasserspiegel muss um den Wert erhöht werden, der der errechneten Höhe einer maximalen jährlichen Seiches entspricht (statistische oder empirische Ermittlung, je nach verfügbarer Datenlage).

5.2.2.9 Tsunamis

Meteotsunamis sind in der Vergangenheit in Nord- und Ostsee aufgetreten. Sie sind daher bei Auslegung eines küstennahen Endlagers zu berücksichtigen. Gleichmaßen wird zumindest für die deutsche Nordseeküste das Risiko eines durch Sedimentabrutschungen entstehenden Tsunamis als nicht vernachlässigbar angesehen. Das gleiche gilt für Tsunamis, die durch Abrutschen von Erd- oder Gesteinsmassen von Steilhängen in Gebirgsseen entstehen. Daher sind diese Arten von Tsunamis bei der Auslegung eines Endlagers an der Küste oder an Seen, die von Steilhängen umgeben sind, ebenfalls zu berücksichtigen.

Als Bemessungsgrundlage sind die Höhe in der Vergangenheit aufgetretener Tsunamis und deren Auswirkung am Endlagerstandort oder einer topographisch vergleichbaren Region heranzuziehen.

Mit Tsunamiwellen können auch Erde und/oder Treibgut mobilisiert werden. Dies ist bei der Auslegung der Schutzmaßnahmen gemäß Kapitel 6 zu berücksichtigen.

5.2.2.10 Sturmflut

Der Sturmflut-Bemessungsmeeresspiegel setzt sich zusammen aus:

- dem Höchststand der theoretischen Gezeiten und
- einer 10.000-jährlichen Sturmflut.

Die Bemessungssturmflut ist die 10.000-jährliche Erhöhung des Meeresspiegels über das Niveau der berechneten theoretischen Gezeiten. Die theoretischen Gezeiten errechnen sich aus prognostizierbaren Änderungen des Meeresspiegels, hauptsächlich bestimmt durch die astronomischen Gezeiten, die durch die Gravitationswirkung von Sonne und Mond (Springflut) verursacht werden. Sturmfluten sind wesentlich beeinflusst durch die Wetterbedingungen (Luftdruckschwankungen) und die Einwirkung des Winds auf die Meeresoberfläche (Windstau). Mithilfe statistischer Untersuchungen müssen Daten zu extremen Sturmfluten während eines Gezeitenhochwassers ermittelt werden. Die Auswahl der entsprechenden Beobachtungsreihen ist unter den Aspekten Umfang des Datensatzes (möglichst lange Datenreihen), Zuverlässigkeit der Werte (insbesondere für die stärkste Sturmflut) und repräsentativer Charakter der Daten für diesen Standort vorzunehmen. Es ist sicherzustellen, dass das ermittelte Bemessungsereignis alle historisch dokumentierte Sturmflutereignisse abgedeckt

Mit der Sturmflut können auch Erde und/oder Treibgut mobilisiert werden. Dies ist bei der Auslegung der Schutzmaßnahmen gemäß Kapitel 6 zu berücksichtigen.

5.2.2.11 Versagen von Dämmen (Wasserstraße) und Deichen (Überflutungsschutz)

Ursächlich für das Versagen von Dämmen/Deichen sind z. B. ein extremer Wasseranstieg, ein Böschungsbruch oder ein Erosionskanal. Bei Stauhaltungsdämmen kann Hochwasser ein Aufreißen der Kolmationsschicht sowie eine Überströmung des im Allgemeinen nur bis Mittelwasserstand reichenden kolmatierten Bereichs bewirken. Leckagen in den Dichtungen können z. B. durch Schiffsanfahrten verursacht werden. In allen genannten Fällen kommt es zu einem unkontrollierten Abfluss von Wasser in die umliegenden Bereiche.

Die Konsequenzen eines Dammbbruchs bei Kanälen bzw. eines Deichbruchs ist mit geeigneten Simulationsmodellen zu ermitteln, aus denen Überflutungshöhen, Strömungsgeschwindigkeiten sowie räumliche und zeitliche Ausbreitung des Wassers bestimmt werden. Die resultierenden Überflutungshöhen am Endlagerstandort sind die Bemessungsgrundlagen.

Infolge eines Damm-, Deichbruchs können auch Erde und/oder Treibgut mobilisiert werden. Dies ist bei der Auslegung der Schutzmaßnahmen gemäß Kapitel 6 zu berücksichtigen.

5.2.2.12 Versagen künstlicher Wasserreservoirs (z. B. Staudämme, Talsperren, Wehre, Wasserbehälter)

Das durch einen Staudamm talaufwärts der Anlage aufgestaute Wasser kann das Anlagengelände im Falle eines Dammbbruchs überfluten. Maßgebend für die Auslegung der Anlage sind der sich auf dem Anlagengelände einstellende, maximale Wasserstand (Bemessungsgrundlage) und die Fließgeschwindigkeit des unkontrolliert ablaufenden Wassers. Letztere wird wesentlich durch die Topographie des zwischen dem Damm und der Anlage liegenden Geländes bestimmt.

Für eine Dammbbruchprognose stehen verschiedene Modelle zur Verfügung. Die Simulation der initiierten Flutwelle dient zur Bestimmung von Überflutungshöhen, Strömungsgeschwindigkeiten sowie der räumlichen und zeitlichen Ausbreitung des Wassers.

Zur Bemessung des maximal möglichen Wasserabflusses an einem spezifischen Standort ist das aufgestaute Wasservolumen bzw. das Bemessungshochwasser, für das eine Anlage ausgelegt ist, sowie die Topographie des Abflussbereichs zugrunde zu legen und mittels eines geeigneten Simulationsmodells zu berechnen.

Infolge des Versagens künstlicher Wasserreservoirs können auch Erde und/oder Treibgut mobilisiert werden. Dies ist bei der Auslegung der Schutzmaßnahmen gemäß Kapitel 6 zu berücksichtigen.

5.2.2.13 Hoher Grundwasserstand

Eine stark erhöhte Grundwasserneubildung infolge einer Überflutung, verursacht durch einen lokalen Starkregen oder verstärkten Oberflächenabfluss (z. B. Flusshochwasser), kann zu einem in der Regel zeitlich verzögerten Anstieg des Grundwasserspiegels führen. Die Geschwindigkeit dieses Grundwasseranstiegs ist

maßgeblich von der Bodenart und dem Schichtaufbau bestimmt. Auch technische Maßnahmen, wie z. B. die Einstellung von Grundwasserhaltungsmaßnahmen oder die gezielte Flutung von ehemaligen Bergbauregionen, können zu einem Grundwasseranstieg führen.

Als Bemessungswasserstand ist der Höchststand des Grundwasserspiegels zu ermitteln. Der Bemessungswasserstand muss entweder ermittelt werden auf Basis maximal verfügbarer langjähriger Beobachtungsdaten zum Grundwasserstand und der Grundwasserneubildung, die aus natürlichen Überflutungsursachen mit einer Wahrscheinlichkeit von $10^{-4}/a$ resultieren und mithilfe standortspezifischer hydrogeologischer Modelle simuliert werden. Alternativ kann aus den vorhandenen Daten im Sinne einer Extremwertstatistik auf einen 10.000-jährlichen Grundwasserhöchststand extrapoliert werden.

Im Zusammenhang mit aufsteigendem Grundwasser sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- resultierende Auftriebskräfte an Fundamenten und allen im Erdreich verlegten Anlagenteilen, die zum Versagen des Tragwerks führen können,
- zusätzlicher statischer Wasserdruck auf unterirdische Anlagenteile,
- Wassereintritt in unterirdische Anlagenteile.

5.2.2.14 Kombinationen von Ursachen, die zu Hochwasser führen können

Neben individuellen Überflutungsursachen sind auch mögliche Kombinationen unterschiedlicher Überflutungsursachen bei der Auslegung eines Endlagers zu berücksichtigen. Solche Kombinationen sind dann zu unterstellen, wenn zwischen den Ursachen ein kausaler Zusammenhang besteht oder ihr zufälliges gleichzeitiges Auftreten aufgrund der Wahrscheinlichkeit und des möglichen Schadensausmaßes sicherheitstechnisch relevant ist. Ein kausaler Zusammenhang liegt dann vor, wenn es gemeinsame Auslöser gibt (Korrelation) oder eine Ursache durch eine andere ausgelöst wird (Folge). In Tabelle 3 sind die denkbaren Überflutungsursachen mit kausalem Zusammenhang dargestellt. Für den konkreten Standort ist zu prüfen, ob die jeweilige Kausalität auftreten kann.

- Überflutungsursachen mit einem gemeinsamen Auslöser: Überflutungen sind meist keine isolierten Ereignisse, sondern resultieren aus Phänomenen, die gleichzeitig mehrere Einwirkungen verursachen. Neben der Kombination unterschiedlicher Einwirkungsarten (z. B. Überflutung und Starkwind) sind für den Überflutungsschutz insbesondere auch mögliche Verstärkungseffekte und Wechselwirkungen zweier oder mehrerer gleichzeitig wirkender Überflutungsursachen zu berücksichtigen. Z. B. kann ein Sturmtief an einem Küstenstandort sowohl zu starken Niederschlägen auf dem Anlagengelände als auch gleichzeitig zu einer Sturmflut führen. Bei der Kombination der Überflutungsursachen sind grundsätzlich die jeweiligen Bemessungsereignisse anzusetzen. Hiervon darf abgewichen werden, wenn belastbare Informationen zum Korrelationsverhalten der betrachteten Überflutungsursachen vorliegen.
- Überflutungsursache als Folgeeinwirkung einer bereits auftretenden Überflutung: Als Folge einer Überflutungsursache können weitere Überflutungsursachen auftreten (z. B. Versagen von Dämmen und Deichen infolge Oberflächenabfluss in einem großräumigen Einzugsgebiet). Bei der Bewertung, welche

Kombinationen unterstellt werden müssen, sind die Randbedingungen für das Eintreten der unterschiedlichen Folgeursachen (z. B. Mindestdauer der primären Überflutung, erforderliche Strömungsgeschwindigkeit) zu berücksichtigen. Bei der Kombination ist für die primäre Überflutungsursache das Bemessungsereignis zu unterstellen. Für die Folgeursache ist die sich aus dem Bemessungsereignis der primären Überflutungsursache ergebende Stärke der Folge anzusetzen.

- Zufällig gleichzeitig auftretende Überflutungsursachen: Zufällig können auch kausal nicht zusammenhängende Überflutungsursachen gleichzeitig auftreten. Es ist daher zu prüfen, ob aus solchen Kombinationen sicherheitstechnische Auswirkungen resultieren können, die über die Auswirkungen der Einzeleinwirkungen (auf dem Bemessungsniveau) hinausgehen. Für diese Untersuchung sind alle am Standort möglichen Kombinationen von Überflutungsursachen mit einer Jährlichkeit der Ereigniskombination von $10^{-4}/a$ zu betrachten, die die beiden folgenden Bedingungen erfüllen: (a) Die Kombination wurde nicht bereits aufgrund eines kausalen Zusammenhangs berücksichtigt. (b) Mindestens eine der Einwirkungen ist von längerer Dauer (Größenordnung mehrere Tage), damit ein gleichzeitiges Auftreten der Einwirkungen innerhalb eines Jahres ausreichend wahrscheinlich ist.

Für die Auslegung des Überflutungsschutzes sind zwei mögliche Effekte eines gleichzeitigen Auftretens unterschiedlicher Überflutungsursachen zu berücksichtigen:

- Die Kombination aus beiden Überflutungsursachen führt im Bereich der zu schützenden Anlagenteile und Schutzbauwerke zu einem höheren Wasserstand. In diesem Fall ist der aus der Kombination resultierende Wasserstand zu ermitteln (z. B. Sturmflut und lokale windinduzierte Wellen).
- Die Überflutungsursachen wirken unterschiedlich auf den Standort ein und erfordern daher unterschiedliche Schutzmaßnahmen. In diesem Fall sind die wechselseitigen Rückwirkungen der Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen (z. B. Behinderung der Geländeentwässerung durch außerhalb des Deiches anstehendes Hochwasser).

Kombinationen von Überflutungsursachen mit anderen Einwirkungen von außen werden in dieser Leitlinie nicht betrachtet.

Tabelle 3: Überflutungsursachen mit kausalem Zusammenhang

Überflutungsursachen mit einem gemeinsamen Auslöser (Auslöser sind in der Tabelle nicht genannt) sind in der oberen rechten Hälfte der Tabelle mit einem G gekennzeichnet. Überflutungsursachen, die als Auslöser einer Folgeursache auftreten, sind in der unteren linken Hälfte der Tabelle durch Pfeile gekennzeichnet, deren Richtung auf die jeweilige Folgeursache hinweist.

	Lokaler Starkregen	Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten	Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten	Eisstau bei Flüssen	Mechanisch induzierte Wellen	Lokale windinduzierte Wellen	Meereswellen	Seiches	Tsunami	Sturmflut	Versagen von Dämmen und Deichen	Versagen künstlicher Wasserreservoir	Hoher Grundwasserstand
Lokaler Starkregen		G	G			G				G	G		
Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten			G			G				G	G		
Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten				G	G						G	G	G
Eisstau bei Flüssen											G		
Mechanisch induzierte Wellen													
Lokale windinduzierte Wellen							G			G	G		
Meereswellen										G	G		
Seiches					↖				G				
Tsunami								↘					
Sturmflut													G
Versagen von Dämmen und Deichen			↖	↖					↖	↖		G	
Versagen künstlicher Wasserreservoir			↖										
Hoher Grundwasserstand			↖										

5.3 Berücksichtigung des Klimawandels

Die voraussichtlichen Folgen des Klimawandels müssen angesichts der langen Zeiträume, die von der Standortfestlegung bis zum Verschluss des Endlagers vergehen, bei der Ermittlung des Bemessungswasserstands berücksichtigt werden, selbst wenn diese naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet sind. Der klimaabhängige Bemessungswasserstand der verschiedenen Hochwasserursachen hängt ab von ihrerseits klimawandelabhängigen Auslösern, die in Tabelle 4 genannt sind.

Tabelle 4: Auslöser von Hochwasserursachen mit Abhängigkeit vom Klimawandel

Hochwasserursache	Auslöser						
	Niederschlag	Schneeschmelze	Wind	Eisgang	Dichteabnahme des Meerwassers	Luftdruckschwankungen	Unterseeische Hangrutschungen
Lokaler Starkregen	x						
Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten	x	x					
Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten	x	x					
Eisstau bei Flüssen				x			
Mechanisch induzierte Wellen							
Lokale windinduzierte Wellen			x				
Meereswellen			x				
Seiches			x			x	
Tsunami						x	x ¹
Sturmflut			x		x	x	
Versagen von Dämmen und Deichen							
Versagen künstlicher Wasserreservoirs							
Hoher Grundwasserstand	x	x					

¹ Durch die klimawandelbedingte Erwärmung von Meerwasser kann es zu verstärkten spontanen Ausgasungen von submarinem Methanhydrat kommen. Durch die hiermit verbundene Verringerung der Stabilität von schelfrandnahen Sedimentmassen können vermehrt Hangrutschungen ausgelöst werden und resultierende Tsunamis entstehen (Storegga-Effekt).

5.3.1 Anwendung von Klimaänderungsfaktoren

Eine dem Klimawandel angepasste Berechnung der jeweiligen Bemessungswasserstände ist aufgrund der Verwendung von regionalen Klimaszenarien und entsprechenden Wasserhaushaltsmodellen unter Verwendung von Klimaextremwertstatistiken mit sehr großem Aufwand verbunden. Daher darf während Phase 1 und 2 ([SAG 13]: §13 und 14) der folgende vereinfachte Ansatz verwendet werden. Die aus dem Klimawandel resultierenden, erhöhten Bemessungswasserstände können aus Vorsorgegründen über einen pauschalen Zuschlag – Klimaänderungsfaktor – zum derzeit gültigen Bemessungswert berücksichtigt werden (s. [TRA 11], [KLI 13]).

Zur Anpassung an den Klimawandel ist dieser wie folgt zu berücksichtigen:

1. Auf die nach Kapitel 5.2 anzusetzenden Intensitäten von Hochwasserursachen (z. B. Bemessungswasserstände) wird ein Klimaanpassungsfaktor von 1,2 angewandt.
2. Durch eine detaillierte Analyse kann im Einzelfall begründet werden, dass von dem Faktor 1,2 abgewichen wird. Dies ist möglich, wenn für das jeweilige Gebiet die mögliche Veränderung bereits durch regionale, gebietsspezifisch angepasste Klimaänderungsfaktoren auf der Basis regionaler Klimaszenarien mit Extremwertstatistik bereits berücksichtigt ist.
3. Zukünftige neue Erkenntnisse hinsichtlich des Klimawandels werden im Rahmen der Überarbeitungen dieser Leitlinie berücksichtigt.

5.3.2 Auslegung auf der Grundlage von Klimaprognoserechnungen

Nach erfolgter untertägiger Erkundung während des Standortauswahlverfahrens, spätestens jedoch im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zum ausgewählten Endlagerstandort, hat der Vorhabenträger bzw. der Antragsteller die Bemessung der Hochwasserauslegung für die übertägigen Anlagen des Endlagers auf der Basis der Ergebnisse von rechnergestützten Klimaprognoserechnungen vorzunehmen.

Ausgehend von einem oder mehreren globalen Klimamodell(en) sind regionale Klimamodelle nach Stand von Wissenschaft und Technik zu entwickeln. Die Ergebnisse der Klimamodellierung dienen dazu, entsprechende Korrekturen an Hochwasserbemessungen nach Kapitel 5.2 hinzuzufügen, soweit die Hochwasserursachen einer Veränderung durch den Klimawandel unterliegen (s. Tabelle 4). Bei der Auswahl der Klimaszenarien, die die Grundlage für die Klimaprognoserechnungen bilden, sind solche auszuwählen, die international anerkannt sind (IPCC²) und zum Zeitpunkt der Modellierung wahrscheinliche ökonomische, ökologische und soziale Randbedingungen beinhalten. Die Auswahl der unterstellten Klimaszenarien ist zu begründen.

Es sind Klimaprognoserechnungen bis zum voraussichtlichen Ende der Verschlussphase des Endlagers durchzuführen. Die Ergebnisse werden zur Anfangsauslegung der übertägigen Bauwerke gegen Hochwasser herangezogen. Gegen Hochwasserursachen, die aus diesen Klimarechnungen resultieren, ist das Endlager von

² IPCC = International Panel on Climate Change (www.ipcc.ch)

Betriebsbeginn an auszulegen. Sofern bereits Ergebnisse regionaler Klimamodellierungen vorliegen, können diese verwendet werden, falls deren Eignung für den jeweiligen Standort ausgewiesen werden kann.

Bei der Regionalisierung von globalen Klimamodellen sind mehrere Verfahren parallel anzuwenden und im Ergebnis bezüglich der Adäquatheit für den gegebenen Endlagerstandort zu vergleichen. Die Auswahl des wahrscheinlichsten Ergebnisses ist zu begründen. Bei Ergebnisstreuungen sind für die Auslegung Mittelwerte heranzuziehen, da bei der Bemessung der Hochwasserauslegung bereits 10.000-jährliche und damit stark konservative Ereignisse zugrunde gelegt werden.

Primärer Ergebnisparameter bei Klimaprognoserechnungen für Hochwasserursachen bei Standorten im Binnenland ist die klimabedingte Änderung der Niederschlagsintensitäten. Im Fall der Hochwasserursachen „Lokaler Starkregen“, „Oberflächenabfluss in lokalen Einzugsgebieten“, „Oberflächenabfluss in großräumigen Einzugsgebieten“ und „Hoher Grundwasserstand“ sind die Bemessungszuschläge aus hydrologischen Modellierungen zu ermitteln.

Im Fall von küstennahen Standorten ist bei der Auslegung gegen die Hochwasserursachen „Meereswellen“, „Lokale windinduzierte Wellen“, „Seiches“ und „Sturmflut“ als klimawandelbedingter Auslegungsaufschlag die Veränderung des globalen Meeresspiegels zugrunde zu legen. Im Fall der Ursache „Sturmflut“ ist zu ermitteln, ob aufgrund des Klimawandels mit einer zukünftigen Veränderung der küstennahen Windintensität zu rechnen ist.

Die Ursachen „Lokale windinduzierte Wellen“ und „Seiches“ im Binnenland müssen analog behandelt werden.

Im Rahmen der regulatorisch vorgeschriebenen, periodischen Optimierung des Endlagerkonzepts sind die Ergebnisse der Modellierung auf ihre Aktualität im Hinblick auf den sich fortentwickelnden Stand von Wissenschaft und Technik zu überprüfen. Dies betrifft die Berücksichtigung von Fortschritten bei rechnergestützten Klimaprognosen, die Adäquatheit von Klimaszenarien und hydrologischen Modellen. Falls notwendig sind weitere Modellierungen mit aktualisierten Randbedingungen durchzuführen und, hierauf fußend, ggf. die Auslegung der übertägigen Anlagenteile oder die Einplanung der Auslegungsreserven entsprechend anzupassen.

5.4 Umgang mit Unsicherheiten

Bei allen Schritten zur Festlegung der Standortgefährdung und damit der Bemessungsgrundlage sind die mit den jeweiligen Daten, Methoden und Annahmen verbundenen Unsicherheiten zu ermitteln. Auf dieser Grundlage sind die Auswirkungen der Unsicherheiten auf das Gesamtergebnis der Untersuchung zu quantifizieren oder, falls das nicht möglich ist, qualitativ zu bewerten.

Im Hinblick auf die Vorgehensweise zur expliziten Berücksichtigung von Unsicherheiten ist es notwendig, zwischen aleatorischen Unsicherheiten, die aus der natürlichen Streuung von Daten resultieren, und

epistemischen Unsicherheiten, die auf der mangelnden Kenntnis z. B. hinsichtlich der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse basieren, zu unterscheiden.

- Aleatorischen Unsicherheiten wird im Allgemeinen durch die Anwendung etablierter statistischer Verfahren ausreichend Rechnung getragen.
- Epistemische Unsicherheiten zeigen sich häufig darin, dass es unterschiedliche Modelle für einen Prozess gibt oder dass Annahmen getroffen werden müssen. Die Quantifizierung oder qualitative Bewertung der Auswirkungen dieser Unsicherheiten auf das Gesamtergebnis der Standortgefährdungsermittlung muss z. B. durch Sensitivitätsanalysen oder durch einen Logischen Baum erfolgen. Sofern Teile der Gefährdungsermittlung sich auf Expertenmeinungen („expert judgement“) stützen, ist für deren Erhebung ein strukturierter, nachvollziehbarer Prozess zu wählen, der sicherstellt, dass der aktuelle wissenschaftliche Kenntnisstand optimal genutzt wird.

Hinweise, wie die Berücksichtigung der Unsicherheiten in den unterschiedlichen Schritten der Standortgefährdungsanalysen erfolgen kann, sind im Anhang I enthalten.

6 Schutzmaßnahmen

Um die in Kapitel 3 beschriebenen möglichen Konsequenzen eines Hochwassers auf ein Endlager gar nicht erst entstehen zu lassen, zu verhindern bzw. entsprechend zu minimieren sind entsprechende Schutzmaßnahmen vorzusehen.

Es ist ein dreistufiges Schutzkonzept zu verfolgen. Dies bedeutet, dass zunächst angestrebt wird durch die Auswahl des Endlagerstandortes, insbesondere des Standortes der Oberflächenanlagen, die Gefährdung durch ein potenzielles Hochwasser auszuschließen bzw. weitestgehend zu minimieren (1. Stufe). Wenn dies nicht ausreichend möglich ist gilt es auf der 2. Stufe, mögliche Gefährdungen durch bauliche Maßnahmen auszuschließen bzw. zu reduzieren. Insbesondere muss eine Gefährdung des/der Schächte durch geeignete Maßnahmen sicher verhindert werden, sofern eine Überflutung des Standortes nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Ergänzend zu diesen zwei Maßnahmen, die bereits bei der Standortwahl und Auslegung/Errichtung des Endlagers zu berücksichtigen sind (Auswahl Endlagerstandort und bauliche Maßnahmen) werden auf der 3. Stufe des zugrunde gelegten Schutzkonzepts temporäre Maßnahmen beschrieben, um die zuvor beschriebenen Schutzmaßnahmen in ihrer Wirkung zu unterstützen.

Es gilt somit zunächst den Standort des Endlagers möglichst so auszuwählen, dass aus einem potenziellen Hochwasser keine oder nur eine geringe Gefährdung des Endlagers resultiert. Da der Endlagerstandort aber von den im Standortauswahlgesetz [SAG 13] beschriebenen Kriterien bestimmt wird, die vor allem die Langzeitsicherheit des Endlagers im Fokus haben, kann es hier zu Zielkonflikten kommen. Bei der Wahl des Endlagerstandorts ist gemäß dem in dieser Leitlinie zugrunde gelegten Schutzkonzept anzustreben, dass die obertägigen Anlagen des Endlagers weder in einer Senke noch in unmittelbarer Nähe eines Flusses, an einem Berghang oder unterhalb einer Talsperre errichtet werden.

Auf der 2. Stufe des zugrunde gelegten Schutzkonzepts gilt es, mögliche Gefährdungen durch bauliche Maßnahmen auszuschließen bzw. zu reduzieren. Für die in Kapitel 3 beschriebenen Konsequenzen eines Hochwassers auf ein Endlager sind daher folgende Schutzmaßnahmen vorzusehen:

- Da ein „Absaufen“ des Schachts auf jeden Fall zu verhindern ist, sind für auslegungüberschreitende Ereignisse bauliche Vorkehrungen zu treffen, damit der Schacht gegen zulaufendes Wasser verschlossen werden kann. Diese Maßnahmen gelten für alle weiteren Schächte, falls diese nicht durch entsprechend kurzfristig zu errichtende Dammvorrichtungen (siehe unten) unter Tage vom Einlagerungsbereich abgetrennt werden können. Der Schachtsumpf des Einlagerungstransportschachts ist für den Fall eines Wasserzutritts auszulegen und mit entsprechend leistungsfähigen Pumpen auszustatten.
- Die tiefsten Strecken sind ansteigend aufzufahren. Es sind ergänzend Dammvorrichtungen vorzusehen, die bei auslegungüberschreitenden Ereignissen den temporären Verschluss der vom Füllort wegführenden Strecken sowie die Verbindungen zu weiteren Grubenteilen/zum Wetterschacht ermöglichen.
- Das Anlagengelände ist ggf. durch einen Deich oder ähnliche Hochwasserschutzbauwerke gegen den unplanmäßigen Zutritt von Wasser zu schützen.
- Besteht aufgrund der Lage des Endlagerstandorts die Gefahr einer Überflutung aufgrund einer Eisversetzung sind entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen (z. B. Einsatz von Luftsprudelanlagen, Sicherung von gefährdeten Deichabschnitten, Eissprengung etc.). Um diese Maßnahmen rechtzeitig veranlassen zu können, ist neben dem Kontakt zu den zuständigen Stellen beim Vorliegen entsprechender meteorologischer Bedingungen eine ständige Beobachtung des Wasserstands und der Eisverhältnisse an zuvor identifizierten kritischen Stellen des Flusses erforderlich.
- Für die gezielte Ableitung des oberflächlich abfließenden Hochwassers nach insbesondere Starkregenereignissen sind eine entsprechende Kanalisation sowie ausreichend große Auffangbecken vorzusehen.
- Um das Eindringen von Wasser in die Gebäude zu verhindern, sind entsprechende Schutzvorrichtungen an diesen vorzusehen bzw. die Gebäudeöffnungen entsprechend hoch anzuordnen. Für eine Konditionierungs-/Verpackungsanlage sind Auffangvorrichtungen vorzuhalten für den Fall, dass Wasser dennoch zutritt und kontaminiert wird.
- Zum Schutz der elektrischen Einrichtungen sind Maßnahmen anhand der einschlägigen Regelwerke vorzusehen.
- Es sind Anlagen zur Evakuierung des Personals aus der Grube vorzusehen.
- Die Zufahrten zum Endlager sind – in Abhängigkeit der Topographie des Endlagerstandorts – erhöht anzulegen und entsprechend gegen Hochwasser auszulegen. Parallel dazu sind Räumlichkeiten vorzusehen, die einen mehrtägigen Aufenthalt des Betriebspersonals auf dem Endlager ermöglichen und gegebenenfalls Boote für den Personalwechsel vorzuhalten.

- Die entsprechenden Gründungsmaßnahmen und die statische Berechnung der Fundamente der Bauwerke müssen die durch ein überproportional ansteigendes Hochwasser verursachten Veränderungen bodenmechanischer Eigenschaften berücksichtigen.
- Bei Vorhersage von Unwetterereignissen, die trotz der zuvor beschriebenen Vorkehrungen eine Gefährdung des Endlagers durch ein Hochwasser bedeuten können, sind entsprechende Maßnahmen vorzusehen. Dies sind im Wesentlichen organisatorische Maßnahmen wie die Außerbetriebnahme von Anlagen oder Anlagenteilen – wie insbesondere der Konditionierungs-/Verpackungsanlage im Vorfeld eines vorhergesagten Unwetters – sowie eine entsprechende Planung für Hochwasser im Rahmen des Alarm- und Gefahrenabwehrplans (z. B. verstärkte Streifengänge durch das Wachpersonal) und die Einbindung in die kommunalen Katastrophenschutzplanung.

Auf der 3. Stufe des zugrunde gelegten Schutzkonzepts gilt es, für den Fall, dass die beschriebenen Schutzmaßnahmen nicht ausreichen, weitere Maßnahmen zu ergreifen. Die genannten organisatorischen Maßnahmen sind umzusetzen und zu überwachen. Als weitere Maßnahmen sind mobile Pumpen und temporäre Abdichtungsvorrichtungen sowie eine entsprechende Notstromversorgung vorzuhalten, falls elektrische Anlagen trotz der beschriebenen Schutzmaßnahmen ausfallen bzw. es zu Überflutungen einzelner Gebäudeteile kommt.

7 Unterlagen

- [ASN 13] Autorité de Sûreté Nucléaire:
Guide no. 13 „Protection of Basic Nuclear Installations Against External Flooding“, Version of 08/01/2013
- [BMU 10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle
Stand 30. September 2010
- [GER 15] Climate Service Center
Climate-Focus-Paper
Global Sea Level Rise
- [GER 16] Guy P. Brasseur, Daniela Jacob, Susanne Schuck-Zöller
Klimawandel in Deutschland
Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven
- [KLI 13] KLIWA (2013), Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft Fachvorträge
beim 5. KLIWA-Symposium, Würzburg, 06. und 07. Dezember 2012:
Katzenberger B.: Hochwasser – Abflussprojektionen und Auswertungen
KLIWA-Heft Band 19
- [KTA 04] Kerntechnischer Ausschuss (KTA):
KTA 2207 „Schutz von Kernkraftwerken gegen Hochwasser“, Sicherheitstechnische Regel des
KTA, November 2004
- [NAP 15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und
radioaktiver Abfälle
(Nationales Entsorgungsprogramm)
August 2015
- [SAG 13] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 41, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2013
Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde
radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG)
23. Juli 2013
- [TRA 11] Bundesanzeiger Jahrgang 64 Nr. 32a, ausgegeben am 24. Februar 2012,
Kommission für Anlagensicherheit (KAS):
TRAS 310 „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und
Hochwasser“, Sicherheitstechnische Regel, 15. Dezember 2011

Nicht zitierte Unterlagen:

- [BMU 15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, BAnz AT 30.03.2015 B2, März 2015.
- [DIN 01] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN):
DIN EN 12056-3:2001-01 „Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden - Teil 3: Dachentwässerung, Planung und Bemessung; Deutsche Fassung EN 12056-3:2000“, Deutsche Norm, Januar 2001.
- [DIN 04] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN):
Normenreihe DIN 19700-xx:2004-07 „Stauanlagen“ bestehend aus Teil 10: „Gemeinsame Festlegungen“, Teil 11: „Talsperren“, Teil 12: „Hochwasserrückhaltebecken“, Teil 13: „Staustufen“, Teil 14: „Pumpspeicherbecken“ und Teil 15: „Sedimentationsbecken“, Deutsche Norm, Juli 2004.
- [DIN 08] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN):
DIN 25449:2008-02 „Bauteile aus Stahl- und Spannbeton in kerntechnischen Anlagen - Sicherheitskonzept, Einwirkungen, Bemessung und Konstruktion“, Deutsche Norm, Februar 2008.
- [DIN 11] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN):
Normenreihe DIN 18195 „Bauwerksabdichtungen“ bestehend aus Teil 1: „Grundsätze, Definitionen, Zuordnung der Abdichtungsarten“ (Dezember 2011), Teil 2: „Stoffe“ (April 2009), Teil 3: „Anforderungen an den Untergrund und Verarbeitung der Stoffe“ (Dezember 2011), Teil 4: „Abdichtungen gegen Bodenfeuchte (Kapillarwasser, Haftwasser) und nichtstauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden, Bemessung und Ausführung“ (Dezember 2011), Teil 5: „Abdichtungen gegen nichtdrückendes Wasser auf Deckenflächen und in Nassräumen, Bemessung und Ausführung“ (Dezember 2011), Teil 6: „Abdichtungen gegen von außen drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser, Bemessung und Ausführung“ (Dezember 2011), Teil 7: „Abdichtungen gegen von innen drückendes Wasser, Bemessung und Ausführung“ (Juli 2009), Teil 8: „Abdichtungen über Bewegungsfugen“ (Dezember 2011), Teil 9: „Durchdringungen, Übergänge, An- und Abschlüsse“ (Mai 2010), Teil 10: „Schutzschichten und Schutzmaßnahmen“ (Dezember 2011) und Beiblatt 1: „Beispiele für die Anordnung der Abdichtung“ (März 2011), Deutsche Norm.
- [DIN 16] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN):
DIN 1986-100:2016-12 „Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke - Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056“, Deutsche Norm, Dezember 2016.

- [GDV 07] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV):
VdS 3521:2007-09 (01) „Schutz vor Überschwemmungen - Leitfaden für Schutzkonzepte und Schutzmaßnahmen bei Industrie- und Gewerbeunternehmen“, VdS Schadenverhütung GmbH, Köln, September 2007.
- [IAE 03] International Atomic Energy Agency (IAEA):
NS-G-1.5 „External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants“, Safety Guide, IAEA Safety Standards Series, November 2003
- [IAE 11] International Atomic Energy Agency (IAEA):
SSG-18 „Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations“, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series, November 2011
- [IAE 16] International Atomic Energy Agency (IAEA):
NS-R-3 (Rev. 1) „Site Evaluation for Nuclear Installations“, Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series, Februar 2016.
- [IAE 16a] International Atomic Energy Agency (IAEA):
SSR-2/1 „Safety of Nuclear Power Plants: Design“, Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series, Februar 2016.
- [KAS 11] Kommission für Anlagensicherheit (KAS):
TRAS 310 „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser“, Sicherheitstechnische Regel, Dezember 2011.
- [KTA 10] Kerntechnischer Ausschuss (KTA):
KTA 2501 „Bauwerksabdichtungen von Kernkraftwerken“, Sicherheitstechnische Regel des KTA, November 2011.
- [WEN 14] Western European Nuclear Regulators Association (WENRA):
„WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors - Update in Relation to Lessons Learned from TEPCO Fukushima Dai-Ichi Accident“, Report, September 2014.
- [WEN 14] Western European Nuclear Regulators Association (WENRA):
„WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors - Update in Relation to Lessons Learned from TEPCO Fukushima Dai-Ichi Accident“, Report, September 2014.
- [WEN 16] Western European Nuclear Regulators Association (WENRA):
„Guidance on External Flooding - Annex to the Guidance Head Document on Natural Hazards“, Guidance Document - Issue T: Natural Hazards, Oktober 2016.

Anhang I Berücksichtigung der Unsicherheiten in den unterschiedlichen Schritten der Standortgefährdungsanalysen

Im Folgenden werden die Unsicherheiten der einzelnen Arbeitsschritte der Standortgefährdungsermittlung hinsichtlich der Möglichkeit ihrer Berücksichtigung und gegebenenfalls Reduzierung diskutiert. Als letzter Schritt vor der Festlegung der Bemessungsgrundlage ist die Plausibilität des Ergebnisses der Standortgefährdungsermittlung durch einen Vergleich mit dokumentierten Ereignissen in der Region (unter Berücksichtigung der Übertragbarkeit der historischen Randbedingungen) und, sofern verfügbar, mit Abschätzungen der maximal möglichen Überflutungsereignisse (im Sinne einer Probable Maximum Flood) zu überprüfen.

- **Datengrundlage:** Die mit der Bereitstellung der für die Standortgefährdungsermittlung erforderlichen Daten verbundenen Unsicherheiten resultieren hauptsächlich aus der Begrenztheit der verfügbaren Messungen und Beobachtungen sowie aus der Messunsicherheit der einzelnen Datenpunkte selbst. Pegelmessungen und meteorologische Messdaten stehen im Allgemeinen nur für Zeiträume von einigen Dekaden bis hin zu etwa 150 Jahren zur Verfügung. Zudem können diese Zeitreihen Lücken und fehlerhafte Datenpunkte aufweisen.
 - Messunsicherheit: Die Messunsicherheit beinhaltet einen zufälligen und einen systematischen Anteil. Der zufällige Anteil (Streuung) lässt sich als klassische aleatorische Unsicherheit mit den üblichen statistischen Verfahren behandeln. Systematische Fehler können z. B. aus fehlerhafter Kalibration der Messinstrumente, ungeeigneten Messinstrumenten oder ungeeigneten Messmethoden resultieren. Sofern solche Fehler erkannt werden, ist wie unter „Korrektur fehlerhafter Daten“ beschrieben zu verfahren.
 - Begrenztheit der Datensätze: Für sich genommen stellt die Begrenztheit der Datensätze keine Unsicherheit dar, die explizit zu berücksichtigen wäre. Die relativ kurzen Zeiträume, für die Messdaten zur Verfügung stehen, sind jedoch eine der wesentlichen Unsicherheitsquellen bei der Extrapolation der Datenreihen zu seltenen Ereignissen (mit Jährlichkeiten von z. B. $10^{-4}/a$). Es sind daher Maßnahmen zu ergreifen, um die standortspezifische Datengrundlage zu verbessern und so die Streuung bei der Extrapolation zu reduzieren. Dies kann z. B. dadurch erfolgen, dass Daten aus der weiteren Umgebung des Standorts und aus geeigneten anderen Regionen herangezogen werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die dortigen Bedingungen auf den Standort übertragbar sind. Des Weiteren können auch dokumentierte historische Informationen (z. B. Hochwassermarken) in die Auswertung einbezogen werden, wenn geeignete statistische Methoden (z. B. Peak Over Threshold) zur Anwendung kommen. Gegebenenfalls besteht auch die Möglichkeit, Paläo-Daten (z. B. Sedimentablagerungen) zur Abschätzung der Stärke sehr seltener Ereignisse zu nutzen. In diesem Fall sind die Unsicherheiten aufgrund der dabei getroffenen Annahmen zu berücksichtigen.
 - Annahmen zum Füllen von Lücken: Abhängig von den verwendeten statistischen Verfahren kann es erforderlich sein, Lücken in den Datensätzen mit geeigneten Werten aufzufüllen. Die hierfür gewählten Vorgehensweisen und dabei getroffenen Annahmen sind nachvollziehbar zu

begründen. Die Sensitivität der Ergebnisse auf unterschiedliche mögliche Ersatzwerte ist zu überprüfen. Die sich aus einer plausiblen Variation der Ersatzwerte ergebenden Unsicherheiten sind bei der Ermittlung des Gesamtergebnisses der Standortgefährdungsanalyse zu berücksichtigen.

- Korrektur fehlerhafter Daten: Offensichtlich fehlerhafte Messwerte in Datenreihen werden entweder korrigiert oder gelöscht. Eine Korrektur erfordert Kenntnisse über den Grund des Fehlers. Anhaltspunkte für den möglichen Grund können u. a. die Meta-Daten der Messstation liefern (z. B. Hinweis auf den Austausch eines Messinstruments im Falle eines Sprungs in der Datenreihe). Ist der Grund nicht feststellbar, empfiehlt es sich, die betreffenden Daten zu löschen. In beiden Fällen ist hinsichtlich der Berücksichtigung der Unsicherheiten wie bei lückenhaften Datensätzen zu verfahren.
- **Ermittlung der Bemessungsgrundlage**: Von einzelnen Überflutungsursachen abgesehen, bei denen die Bemessungsgrundlage deterministisch festgelegt wird, sind der Auslegung seltene Ereignisse mit einer Jährlichkeit von $10^{-4}/a$ zugrunde zu legen. Da die verfügbaren Daten auf deutlich geringere Zeiträume begrenzt sind, ist eine Extrapolation mittels Verfahren der Extremwertstatistik erforderlich. Bei dieser statistischen Auswertung stellen insbesondere Trends in den Daten, die Wahl des Extrapolationsverfahrens, die Wahl der Methode zur Anpassung der Parameter der Extrapolationsfunktion und gegebenenfalls Annahmen hinsichtlich anzusetzender Maximalwerte Quellen für Unsicherheiten dar.
 - Trends: Trends in den Datensätzen können sich nicht nur aufgrund des Klimawandels ergeben, sondern z. B. auch durch veränderte Landnutzung oder wasserbauliche Maßnahmen. Ungeachtet der Ursache sind Trends, sofern sie identifiziert werden können, zu berücksichtigen. Dies erfolgt üblicherweise durch Separieren des Trends vom verbleibenden Datenanteil. Der trendbereinigte Anteil wird dann der extremwertstatistischen Auswertung unterzogen und anschließend wieder mit dem Trend kombiniert. Die Unsicherheit, die sich hierbei ergibt, ist das anzusetzende Trendmodell, da die diesbezüglichen Annahmen nicht notwendigerweise mit der Realität übereinstimmen müssen. Diese Unsicherheiten sind durch eine Sensitivitätsanalyse bzw. durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Trendmodelle zu berücksichtigen.
 - Extrapolationsverfahren: Für die Extrapolation der Messdaten kann auf verschiedene Extrapolationsfunktionen zurückgegriffen werden, die zu jeweils unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Stärke seltener Ereignisse führen. Die für eine Überflutungsursache „richtige“ Extrapolationsfunktion lässt sich im Allgemeinen jedoch nicht aus den zugrunde liegenden physikalischen Prozessen ableiten. Daher verbleibt bezüglich der Wahl der Extrapolationsfunktion eine Unsicherheit, auch wenn bestimmte Extrapolationsfunktionen für bestimmte Phänomene (z. B. Pearson-III-Verteilung für Hochwasserabflüsse) besonders häufig verwendet werden. Um dieser Unsicherheit hinsichtlich der wissenschaftlich vertretbaren Extrapolationen Rechnung zu tragen, sind mehrere unterschiedliche Extrapolationsfunktionen zu verwenden. Die Anzahl und konkrete Wahl der verwendeten Extrapolationsfunktionen ist nachvollziehbar zu begründen. Die unterschiedlichen Ergebnisse der Extrapolationen sind mittels einer Sensitivitäts-

analyse hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Ergebnis der Standortgefährdungsanalyse zu bewerten oder als Verzweigungen eines Logischen Baums bei der Festlegung der Bemessungsgrundlage zu berücksichtigen.

- **Parameteranpassung:** Neben der Wahl der Extrapolationsfunktion ergibt sich eine weitere Unsicherheit aus dem Verfahren, mit dem diese an die Daten angepasst wird. Zur Bestimmung der Funktionsparameter der Extrapolationsfunktion stehen mehrere etablierte Methoden, wie z. B. Maximum-Likelihood-Methode, Momentenmethode oder Methode der kleinsten Quadrate, zur Verfügung. Jede dieser Methoden hat ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Dennoch besteht prinzipiell eine Wahlmöglichkeit, deren Auswirkungen auf das Gesamtergebnis zu berücksichtigen sind. Wie bei den Extrapolationsfunktionen selbst kann diese Berücksichtigung durch eine Sensitivitätsanalyse oder im Rahmen eines Logischen Baums erfolgen.
- **Maximalwerte:** Einige Extrapolationsfunktionen weisen eine obere Schranke auf, was auch dem erwarteten Verhalten der meisten natürlichen Phänomene entspricht. Der entsprechende Maximalwert ergibt sich normalerweise aus der Anpassung der Extrapolationsfunktion an die Daten. Es besteht jedoch prinzipiell auch die Möglichkeit, für die Parameter der Extrapolationsfunktion Randbedingungen vorzugeben, so dass ein bestimmter Maximalwert nicht überschritten wird. Wird von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht, so ist die Wahl des Maximalwerts nachvollziehbar zu begründen. Außerdem sind die Auswirkungen auf das Ergebnis der Standortgefährdungsanalyse zu quantifizieren (Sensitivitätsanalyse) oder, falls das nicht möglich ist, qualitativ zu bewerten (Verzweigung im Logischen Baum).

Für Überflutungsursachen, wie z. B. Tsunami, bei denen die Bemessungsgrundlage deterministisch festgelegt wird, ist eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der in die Festlegung eingehenden Annahmen durchzuführen.

- **Berücksichtigung von Einwirkungskombinationen:** Im Zusammenhang mit Einwirkungskombinationen kommen zwei wesentliche Unsicherheitsquellen zum Tragen: (1) die Auswahl der berücksichtigten Einwirkungskombinationen selbst und (2) die Ermittlung der anzusetzenden Stärke der einzelnen Einwirkungen. Während die Unsicherheiten hinsichtlich der einzelnen Einwirkungen analog zu den oben definierten Anforderungen zu berücksichtigen sind, gibt es für die Berücksichtigung der aus der Auswahl der (nicht) betrachteten Kombinationen resultierenden Unsicherheiten derzeit kein etabliertes Verfahren.
- **Berücksichtigung des Klimawandels:** Die Berücksichtigung des Klimawandels erfolgt nach dieser Leitlinie in zwei Schritten: Für die erste Standortbewertung werden die auf Basis der verfügbaren Daten ermittelten Bemessungseinwirkungen um pauschale Klimaänderungsfaktoren erhöht. Im Rahmen einer detaillierten Standortuntersuchung sind dann die Bemessungseinwirkungen bereits unter Berücksichtigung regionaler Klimamodelle zu ermitteln.

Hinsichtlich der Berücksichtigung des Klimawandels mit pauschalen Klimaänderungsfaktoren gilt das zu Beginn des Kapitels 5.4 unter dem Stichwort „Epistemische Unsicherheiten“ zu Expertenmeinungen

Geschriebene. Eine detailliertere Berücksichtigung von Unsicherheiten ist in diesem Schritt nicht erforderlich.

Bei der Ermittlung der Bemessungseinwirkungen unter Verwendung von Klimaprojektionen und regionalen Klimamodellen kommen hinsichtlich der Ausgangsdaten und Klimamodelle die oben beschriebenen Ansätze zur Berücksichtigung aleatorischer und epistemischer Unsicherheiten zur Anwendung. D. h. aleatorische Unsicherheiten werden mit klassischen statistischen Mitteln behandelt, während epistemische Unsicherheiten, wie z. B. die Wahlmöglichkeit hinsichtlich der verwendeten globalen Klimamodelle und der daran angekoppelten regionalen Klimamodelle sowie der mit den Klimamodellen selbst verbundenen Unsicherheiten, durch Sensitivitätsanalysen oder Logische Bäume Rechnung getragen wird. Unsicherheiten bei globalen und insbesondere auch regionalen Klimamodellen resultieren u. a. aus

- nicht oder nicht umfassend bekannten physikalischen Prozessen, wie z. B. der Rückkopplung von Wolken und Eisflächen,
- der Kalibrierung der Modelle mit den derzeit verfügbaren Beobachtungsdaten,
- der begrenzten räumlichen Gitterauflösung und der daraus resultierenden Vernachlässigung kleinskaliger Prozesse,
- Vereinfachungen, die notwendig sind, um die Rechenzeit zu begrenzen.

Hinsichtlich der als Ausgangsbasis für die Klimaprojektionen dienenden Representative Concentration Pathways (RCP), also der vier postulierten zukünftigen Konzentrationsverläufe klimawirksamer Gase in der Atmosphäre, kann die Unsicherheit aufgrund der Wahl eines bestimmten RCP ebenfalls mittels Sensitivitätsanalysen oder eines Logischen Baums berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Festlegung der vier RCP selbst lässt sich die Unsicherheit jedoch nicht quantifizieren, da es sich um postulierte Konzentrationsverläufe handelt.

Anhang II Informationsmaterial zu Tsunamis

Folgende **Historische Ereignisse**, in denen eine Sedimentabrutschung einen Tsunami ausgelöst hat, sind zu erwähnen:

- Im Juni 1858 traf ein Tsunami die Küsten der Nordsee. Von Sylt, Helgoland und Wangerooge gibt es Augenzeugenberichte dazu. Der Tsunami muss südwestlich im Atlantik entstanden sein. Für die wahrscheinlichste Ursache wird eine unterseeischer Hangabrutschung vermutet, bei dem mehrere Kubikkilometer Gestein auf den Meeresgrund stürzten.
- Die bekannteste Tsunami-Katastrophe aus der Nordsee ereignete sich vor 7.000 - 8.000 Jahren. (Storegga-Ereignis). Auf einer Länge von 800 Kilometern rutschte der Kontinentalhang vor Norwegen ab. Über 5.000 Kubikkilometer Material gerieten in Bewegung und lösten einen heftigen Tsunami aus, der England, Schottland und Norwegen traf.

Auch in Seen können Tsunamis vorkommen. Z. B. in den Schweizer Seen.

In den Sedimenten zahlreicher Schweizer Seen wurden historische und prähistorische Bergstürze und Rutschungen gefunden, die Flutwellen ausgelöst haben. Dabei handelt es sich um chaotisch durchmischte Ablagerungen, die sich von normalen Sedimenten unterscheiden. Dank der Möglichkeit, ihr Alter zu bestimmen, können sie im Nachhinein einem Ereignis zugeordnet werden. Die Höhe einer Flutwelle kann durch numerische Modelle berechnet und mit historischen Berichten verglichen werden.

Auch in deutschen Seen können Flutwellen nicht ausgeschlossen werden.

Für die Bemessung eines Tsunamis wird eine Meeresspiegelmessung im tiefen Ozean vor der Küste herangezogen. Dort, bei Wassertiefen von mehreren tausend Metern, ist eine Tsunamiwelle mehrere hundert km/h schnell, aber nur wenige bis einige zehn Zentimeter hoch und um die hundert Kilometer lang. Erst an der Küste oder im Flachwasserbereich türmt sich die Tsunamiwelle zu einer meterhohen Wasserfront auf. Um den geringen Meeresspiegelanstieg des tiefen Ozeans dennoch zuverlässig und präzise feststellen zu können, werden Druckfühler am Meeresboden platziert die Veränderungen der Höhe des Meeresspiegel oberhalb der Sensoren erfassen können. Durch das Gewicht des zusätzlichen Wassers erhöht sich der Druck am Meeresboden dabei geringfügig um wenige tausendstel Prozent, eine minimale Veränderung, die von den hochpräzisen PACT-Bodeneinheiten zuverlässig gemessen wird. Druckschwankungen aufgrund der wesentlich kürzeren, aber auch höheren Seegangswellen mitteln sich dabei aufgrund der Einsatztiefe der Bodendrucksensoren heraus. Ähnlich wie bei einem Faxgerät werden die Informationen in einem akustischen Modem in eine Folge von Tönen – dem sog. Telegramm - umgesetzt und an ein zweites Modem übertragen. Letzteres ist, nahe der Meeresoberfläche, mit einer Boje verbunden, von wo aus die Daten per Satellit an das Warnzentrum weitergeleitet werden. (Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung)