

Fichtner GmbH & Co. KG  
Sarweystrasse 3  
70191 Stuttgart  
Deutschland

## Seismologisches Gutachten PSW Happurg



(Abbildung: Google Earth)

1. November 2010

### STUDER ENGINEERING

Jost A. Studer, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH/SIA

Thujastrasse 4 · CH-8038 Zürich  
Tel. +41-44-481 06 00 · Fax +41-44-481 06 02

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Methodik</b>	<b>3</b>
1.1	Allgemeines	3
1.2	Einführung zum Projekt PSW Happurg	3
1.3	Seismische Gefährdungsanalyse	4
1.3.1	Deterministische seismische Gefährdungsanalyse	5
1.3.2	Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse (PSHA)	6
1.4	Probabilistische seismische Gefährdungsschätzung der Bundesrepublik Deutschland	7
<b>2</b>	<b>Erdbeben und Seismizität</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Geologische und tektonische Verhältnisse</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Seismotektonische Modelle</b>	<b>11</b>
4.1	Entwicklung der seismotektonischen Modelle	11
4.2	Bestimmung der Parameter der Quellregionen	13
<b>5</b>	<b>Abminderungsbeziehungen</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Berechnung der Bemessungsspektren</b>	<b>15</b>
6.1	Logic Tree Analyse	15
6.2	Ergebnisse der Gefährdungsberechnung	16
6.3	Bemessungsspektren des Standorts PSW Happurg	17
<b>7</b>	<b>Grundlagen zur Abschätzung des Restrisikos gemäss DIN 19700</b>	<b>21</b>
7.1	Einführung zur Abschätzung des Restrisikos	21
7.2	Vorgehensweise zur Abschätzung von Erdbeben mit größeren Wiederkehrperioden	21
7.3	Bedeutungsbeiwerte bzw. Erhöhungsfaktoren für die Absperrbauwerke des PSW Happurg	22
7.4	Antwortspektren für Erdbeben mit größeren Wiederkehrperioden für das Ober- und Unterbecken des PSW Happurg	23
<b>8</b>	<b>Beurteilung der seismischen Gefährdung</b>	<b>26</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>27</b>
9.1	Literaturliste	27
9.2	Grünthal, G., Bosse, Ch. & Stromeyer, D. (2009) Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland	29

# 1 Einleitung und Methodik

## 1.1 Allgemeines

Entsprechend DIN 19700 (2004) wird der Erdbebensicherheitsnachweis für Talsperren bezüglich des Bemessungserdbebens und des Betriebserdbebens gefordert. Die Absperrbauwerke des Projektes PSW Happurg sind alle der Talsperrenklasse 1 zuzuordnen. Die Sperrenhöhe liegt zwar im Mittel unter 15 m, aber das Stauvolumen beträgt über 1 Mio. m<sup>3</sup>. Die entsprechenden mittleren Wiederholungsperioden der Nachweiserdbeben betragen 2'500 Jahre für das Bemessungserdbeben und 500 Jahre für das Betriebserdbeben. Die entsprechende Erdbebeneinwirkung wird im vorliegenden Bericht anhand einer standortspezifischen Gefährdungsanalyse ermittelt.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes des Deutschen GeoForschungsZentrums Potsdam GFZ sind flächendeckend für Deutschland die seismischen Gefährdungen für beliebige Standorte für einen Felsuntergrund mit modernen probabilistischen Methoden berechnet worden (Grünthal et al. 2009). In Grünthal et al. (2009) wird auf eine Internet-Plattform hingewiesen, anhand derer für auszuwählende geographische Koordinatenpaare die standortspezifischen Antwortspektren für die Gefährdungsniveaus gemäß DIN 19700 (2004) bereitgestellt werden.

Der vorliegende Kurzbericht beschreibt die seismische Gefährdung für einen Felsuntergrund an den Standorten des Pumpspeicherkraftwerkes Happurg:

Oberbecken (Auslass)	Koordinaten: N: 49.480°, E: 11.464°
Unterbecken (Krafthaus)	Koordinaten: N: 49.487°, E: 11.475°

In der seismischen Gefährdungsanalyse wird des PSW Happurg als ein Standort betrachtet, obwohl es sich um zwei Becken mit unterschiedlichen Stauanlagen handelt. Aufgrund der räumlichen Nähe und einer Distanz von ca. 1 km zueinander, sind die Unterschiede in der Erdbebenanregung vernachlässigbar klein. Es sind jedoch die unterschiedlichen geologischen Standortverhältnisse zu berücksichtigen.

Der Bericht gibt für den Standort PSW Happurg das Antwortspektrum des Betriebserdbebens und des Bemessungserdbebens sowie Erdbeben höherer Wiederkehrperioden zur Abschätzung des Restrisikos an. Alle Informationen zur seismischen Gefährdung und große Teile der Beschreibungen beruhen auf der Studie Grünthal et al. (2009) und sind spezifisch für das Projekt PSW Happurg aufbereitet.

## 1.2 Einführung zum Projekt PSW Happurg

Die E.ON Wasserkraft GmbH (EWK) betreibt ca. 30 Kilometer östlich von Nürnberg das Pumpspeicherkraftwerk (PSW) Happurg. Das PSW Happurg liegt im Landschaftsschutzgebiet LAU 04 „südlicher Jura mit Moritzberg und Umgebung“ und besteht aus einem Unterbecken mit Krafthaus, zwei Druckrohrleitungen und einem Oberbecken (siehe Abb. 1.1). Die Anlage ging 1958 im Teilausbau mit zunächst 80 MW in Betrieb. Seit der Fertigstellung des Endausbaus im Jahr 1963 beträgt die Anlagenleistung 160 MW.

Das Oberbecken des Pumpspeicherkraftwerkes mit einem Nutzinhalt von rund 1.8 Mio. m<sup>3</sup> liegt ca. 200 m oberhalb des Unterbeckens auf der Kuppe des Deckersberges. Das Oberbecken wird von einem ca. 1.6 km langen und an der Luftseite bis zu 23 m hohen Ringdamm umgeben. Die Wassertiefe des Oberbeckens beträgt derzeit bis max. 13 m, ausgenommen im wesentlich tieferen Einlauftrichter des Einlaufbauwerkes. Das Unterbecken wird vom Happurger See gebildet, dessen nördlicher Abschluss vom Krafthaus begrenzt wird.

Die Talsohle des Happurger Tals wird von ca. 10 m mächtigem Hangschutt bedeckt (siehe Abb. 1.2). Unterhalb der Talsohle stehen mächtige dichte und feste Opalinustonschichten an, die auf Liastonien aufliegen. In der Bergkuppe des Deckersberges folgt auf diese Schichten eine Doggersandsteinschicht.

Darüber folgt eine ca. 10 m mächtige Ornatentonschicht, die wiederum von ca. 60 mächtigen Kalksteinen des oberen Juras (Weißjurakalke) überlagert wird. Die obersten Schichten des Jurakalksteins bestehen aus Wechselfolgen von Kalk-, Mergel- und Dolomitsteinen. Die obersten Jurakalksteine waren einer intensiven Verkarstung unterzogen. Die Karsthohlräume sind teilweise mit Sanden und Tonen gefüllt. Die Untergrenze der Verkarstung liegt bei etwa 540 müNN, also fast 20 m unter der heutigen Sohle des Oberbeckens.

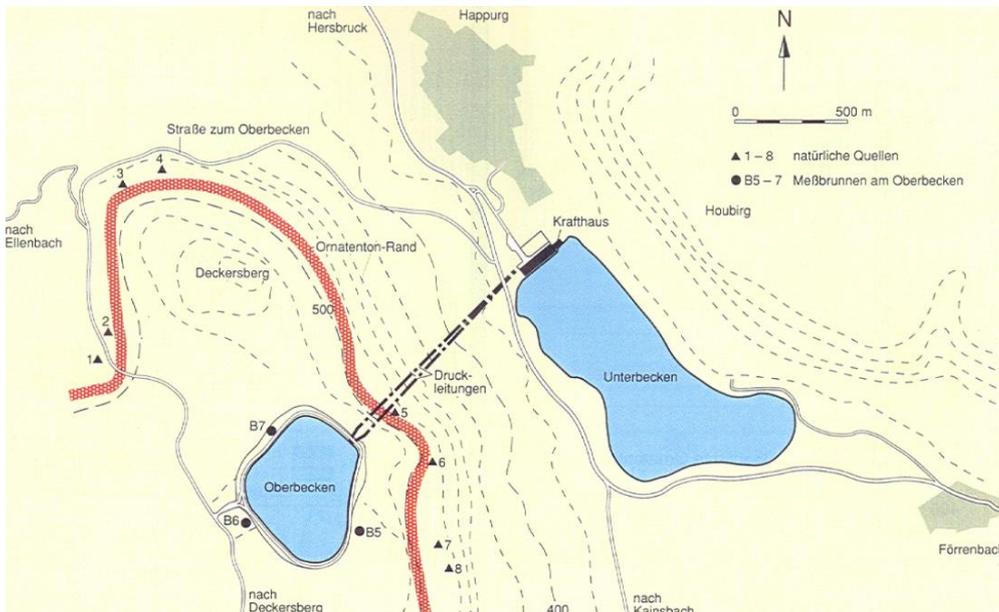


Abb. 1.1: Lageplan des PSW Happurg.

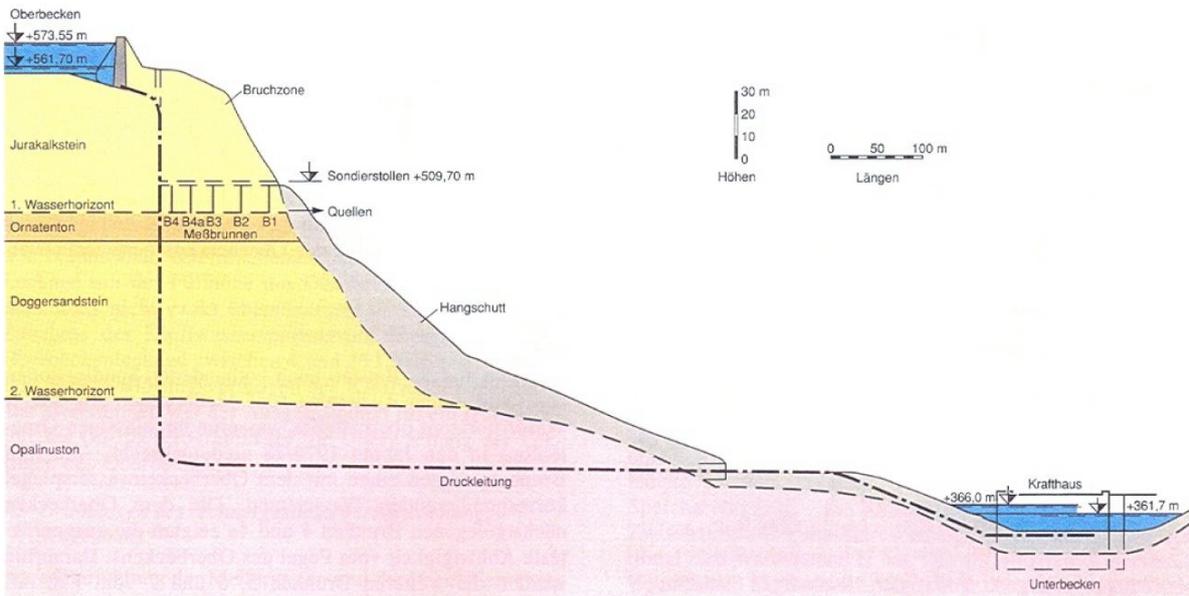


Abb. 1.2: Geologisches Längsprofil des PSW Happurg.

### 1.3 Seismische Gefährdungsanalyse

In der Vergangenheit wurde vorrangig die seismische Gefährdung mit deterministischen Methoden bestimmt. Das Vorgehen bestand in der Analyse verschiedener möglicher Erdbebenszenarien, von denen das mit der größten Anregung für die Bemessung verwendet wurde.

In den Vergangenen 20 Jahren hat die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse an Bedeutung gewonnen und ist zum Standardverfahren in der Ingenieurseismologie geworden. Die probabilistische Analyse erlaubt, explizit die Überschreitenswahrscheinlichkeit einer bestimmten Erdbebenerschütterung an einem Standort zu bestimmen. Damit lassen sich unterschiedliche Erdbebensicherheitsniveaus festlegen und nicht, wie bei der deterministischen Analyse, nur die maximale Einwirkung.

Abhängig von der Datengrundlage haben beide Vorgehensweisen ihre Vor- und Nachteile. Beide Methoden basieren im Allgemeinen auf seismotektonischen Quellmodellen, die von der historischen und instrumentierten Seismizität abgeleitet sind. In den folgenden Abschnitten werden die deterministische und die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse kurz erläutert.

### 1.3.1 Deterministische seismische Gefährdungsanalyse

Das Vorgehen bei der deterministischen seismischen Gefährdungsanalyse umfasst folgende 5 Schritte und ist in Abb. 1.3 schematisch dargestellt:

1. Identifikation der historischen und instrumentierten Seismizität vergangener Erdbeben innerhalb eines Radius von ca. 200 km um den betrachteten Standort.
2. Identifikation und Charakterisierung aller Erdbebenquellen, die signifikante Erschütterungen am Standort hervorrufen können. Die Einteilung kann in Quellgebiete, Verwerfungen oder in Punktquellen erfolgen. Die Quellcharakterisierung beinhaltet die Quellgeometrie und das Erdbebenpotenzial der maximal möglichen Magnitude.
3. Für jedes seismische Quellgebiet wird eine passende Abminderungsbeziehung gewählt, die das Abklingverhalten der Erdbebenerschütterungen von der Quelle zum Standort beschreibt. In der Berechnung wird die kürzeste Distanz zwischen dem Standort und der jeweiligen Quellzone verwendet. Für die seismotektonische Quellzone, in der sich der Standort befindet, wird in Abhängigkeit der Nahbereichscharakteristik ein minimaler Abstand zwischen Quellzone und Standort festgelegt. Dieser minimale Abstand liegt im Allgemeinen zwischen 0 km und 25 km.
4. Das maßgebende Erdbeben wird für den Standort bestimmt, indem die maximalen Erdbebenereignisse entsprechend Punkt 1 in den definierten Quellzonen entsprechend Punkt 2 an die Stelle der kürzesten Entfernung zum Standort entsprechend Punkt 3 verschoben werden. Das maximale historische Erdbeben ist im Allgemeinen nicht das stärkste mögliche Erdbeben einer Quellzone. In der Praxis wird häufig die maximal ermittelte Magnitude um einen gewissen Beitrag erhöht, z. B. um 0.5 Einheiten der Magnitude, um Unsicherheiten in der Ermittlung der maximalen Magnitude abzudecken. Dies ist jedoch nur eine erfahrungsbasierte Annahme.
5. Die Gefährdung wird dann in Form der maximalen Bodenerschütterung am Standort durch das maßgebende Erdbeben bestimmt.

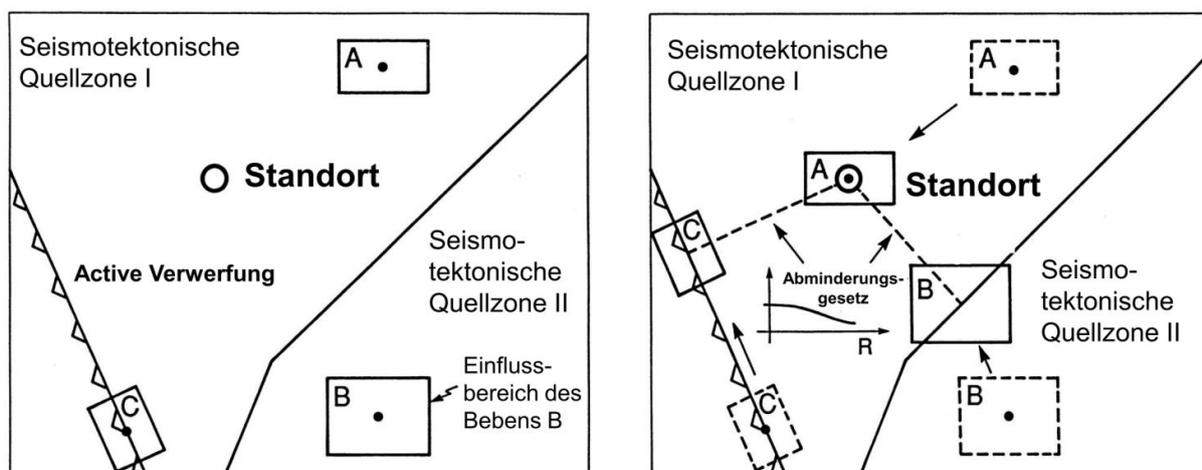


Abb. 1.3: Vorgehen bei der deterministischen seismischen Gefährdungsanalyse (Studer et al. 2007).

Die deterministische seismische Gefährdungsanalyse ist eine relativ einfache Methode. Diese bietet eine Handhabung zur Ermittlung der maximalen möglichen Erdbebenanregung am Standort. Die Methode gibt keine Aussagen zur Überschreitenswahrscheinlichkeit maßgebender Erdbeben.

Die deterministische Analyse beinhaltet einige subjektive Entscheidungen, insbesondere in Verbindung mit der Festlegung der maßgebenden Erdbeben einer Quellzone. Es gibt verschiedene Methoden, das maßgebende Erdbeben zu bestimmen. Alle Methoden benötigen ein ingenieurmäßiges Verständnis der Problematik und sind keine exakten Berechnungen. Die deterministische seismische Gefährdungsanalyse ist heute noch von Bedeutung bei der Bestimmung maximaler Erdbebeneinwirkungen für die Bemessung von Bauwerken, deren Versagen katastrophale Folgen hätte. Sie ist von ICOLD im Bulletin 72 zugelassen und wird in vielen Ländern in der Praxis noch verwendet (ICOLD 1989). Für die Bestimmung der Erdbebenanregung kurzer und mittlerer Wiederholungsperioden ist diese Methode nicht geeignet, da keine Aussagen über die Überschreitenswahrscheinlichkeit gewonnen werden können.

### 1.3.2 Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse (PSHA)

Die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse ist eine Methode, in der Unsicherheiten identifiziert und quantifiziert werden können, um ein umfassendes Bild der seismischen Gefährdung zu ermitteln. Die probabilistische seismische Gefährdung besteht entsprechend Abb. 1.4 aus folgenden Schritten:

1. Identifikation der historischen und instrumentierten Seismizität vergangener Erdbeben innerhalb eines Radius von ca. 200 km um den betrachteten Standort. Dieser Schritt ist gleich wie bei der deterministischen Analyse. Zusätzlich muss der Erdbebenkatalog auf Unsicherheiten und Vollständigkeit geprüft werden. Magnituden müssen vereinheitlicht werden, und doppelte Einträge müssen bereinigt werden.
2. Identifikation und Charakterisierung aller Erdbebenquellen, die signifikante Erschütterungen am Standort hervorrufen können. Die Einteilung kann in Quellgebiete, Verwerfungen oder in Punktquellen erfolgen. Die Quellcharakterisierung beinhaltet die Quellgeometrie und das Erdbebenpotenzial mit der Beschreibung der zeitabhängigen Seismizität und der maximalen Magnitude sowie der wahrscheinlichen Verteilung innerhalb der seismischen Quelle. Im Allgemeinen wird eine gleichmäßige Verteilung der Seismizität in der Quellregion angenommen. Diese räumliche Verteilung wird dann mit der Quellgeometrie kombiniert, um die entsprechende Verteilung der Herdabstände zum Standort zu erhalten.
3. Die zeitliche Verteilung des Erdbebenauftritts wird für jede Zone evaluiert. Die zeitabhängige Seismizität beschreibt für jede Quellzone, mit welcher mittleren Wiederholungsperiode eine bestimmte Magnitude überschritten wird.
4. Die Erdbebenerschütterungen am Standort werden mittels Abminderungsbeziehungen für jedes Erdbeben in allen möglichen Quellzonen berechnet. Die Unsicherheiten der Abminderungsbeziehungen werden explizit berücksichtigt.
5. Unsicherheiten des Erdbebenherdes, der Erdbebenstärke und der Abminderungsbeziehungen werden zusammengefasst und fließen in die Berechnung ein. In der Gefährdungsberechnung erfolgt dann eine Integration über die Überschreitenswahrscheinlichkeit der Erdbebenmagnitude an einem Quellpunkt und über die Distanz zum Erdbebenherd.

Aufgrund des probabilistischen Berechnungsvorgehens erlaubt die Methode eine Wichtung der unterschiedlichen Elemente verschiedener Modelle mittels einer logischen Verknüpfung. Unsicherheiten können auf diesem Wege auch angegeben bzw. quantifiziert werden.

Von den Gefährdungskurven der PSHA können uniforme Gefährdungsspektren (UHS, uniform hazard spectra) abgeleitet werden, die direkt für die Bemessung in pseudodynamischen Berechnungsmethoden, z. B. Antwortspektrenverfahren oder Ersatzkraftverfahren, verwendet werden können. UHS Spektren sind konservativ, da sie eine Umhüllende verschiedener möglicher Erdbeben der gleichen Wiederholungsperiode darstellen. Das Spektrum eines einzelnen Erdbebens wird schmaler als das UHS-Spektrum sein. Diese Methoden sind geeignet zur Bemessung von Strukturen, bei denen eine geringe Schädigung, d.h. nur kleine Rissbildung im Beton, auftritt und annähernd ein elastisches Verhalten vorliegt. Im Falle starker struktureller Schädigungen oder bei maßgebendem nichtlinearem Materi-

alverhalten ist eine Zeitverlaufsberechnung erforderlich, die eine repräsentative Erdbebenanregung widerspiegelt. Diese können aus den UHS-Spektren abgeleitet werden. Die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse bietet hierbei die Möglichkeit der Deaggregation. Für eine Erdbebenanregung einer bestimmten mittleren Wiederholungsperiode kann über eine Zerlegung der Gefährdungsberechnung die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion über die Magnitude und die Distanz aufgetragen werden. Die Erdbebenanregung einer mittleren Wiederholungsperiode ist nicht mit einer einzigen Magnitude-Distanz-Beziehung verbunden, sondern über diese Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Die Auswertung dieser Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erlaubt die Identifikation des vorherrschenden Erdbebenszenarios mit Magnitude und Distanz zum betrachteten Standort.

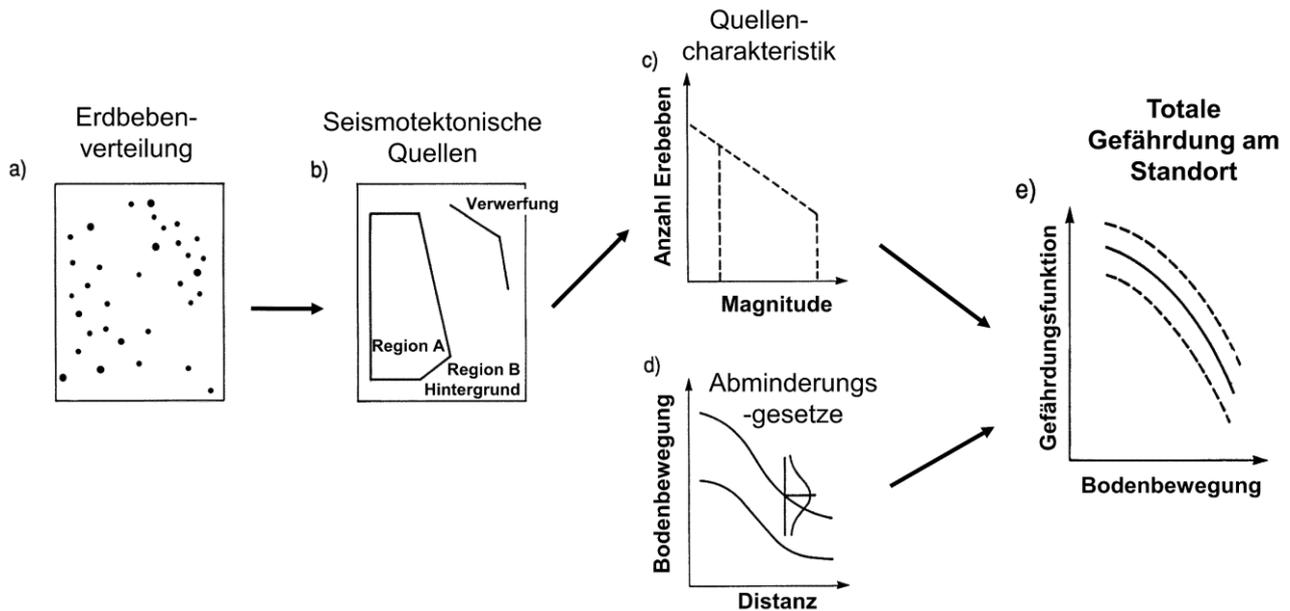


Abb. 1.4: Vorgehen der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse (Studer et al. 2007).

#### 1.4 Probabilistische seismische Gefährdungsschätzung der Bundesrepublik Deutschland

Die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse von Grünthal et al. (2009) basiert auf der Methodik von Cornell (1968, 1971) und McGuire (1976). Sie ist die erste Gefährdungsstudie, die aleatorischen Variabilitäten und epistemische Unsicherheiten in der PSHA für eine deutschlandweite Untersuchung berücksichtigt. Um die epistemischen Unsicherheiten in den seismischen Quellzonen auszuweisen, wurden sieben Modelle entwickelt. Zwei von diesen Modellen beruhen einzig auf der großräumigen tektonischen Architektur und dem tektonischen Regime. Die anderen Modelle, d. h. die der kleinräumigen Quellregionen, berücksichtigen zusätzlich die beobachtete seismische Aktivität und die Einbeziehung neotektonisch aktiver Bruchstörungen. Für jede Quellregion eines jeden Modells werden ihre spezifischen Parameter eingeführt. Ihre epistemischen Unsicherheiten werden wiederum in einem Logischen Baum behandelt. Die erste Verzweigungsebene beschreibt einen Satz von Dämpfungsrelationen der Bodenbeschleunigung unter Berücksichtigung des tektonischen Regimes in jeder Quelle. Auf der Grundlage eines Momentmagnituden-basierten Bebenkatalogs für Mitteleuropa für den Zeitraum 1000 AD bis 2004 werden die Magnitudenhäufigkeitsparameter ( $v$ - $\beta$ -Paare und  $m_{\max}$ ) bestimmt. Zur Behandlung der Unsicherheiten in  $v$  und  $\beta$  wurde eine neuartige Vorgehensweise entwickelt, welche drei  $v$ - $\beta$ -Paare mit ihren Gewichten vorsieht. Zur Quantifizierung der maximal erwarteten Magnituden in jeder Quelle wurde das EPRI-Verfahren (eine Bayes'sche Schätzung) angewandt, welches in einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von  $m_{\max}$  mündet.

## 2 Erdbeben und Seismizität

Die wichtigste Eingangsgröße der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse sind die Seismizitätsdaten. Der Analyse Grünthal et al. (2009) liegt der Erdbebenkatalog CENEC zu Grunde (Grünthal et al. 2009a). Darin sind die verschiedenen Erdbebenkataloge Deutschlands und der Nachbarländer berücksichtigt. Abb. 2.1 zeigt die Erdbebenverteilung Deutschlands und angrenzender Länder des verwendeten Erdbebenkataloges CENEC.

Mit dem Erdbebenkatalog CENEC sind Ereignisse in einem Umkreis von über 200 km um den Projektstandort PSW Happurg abgedeckt. Die gelisteten Erdbeben umfassen einen Zeitraum ab dem Jahr 1000 bis zum Jahr 2004 (Grünthal et al. 2009a). Alle Magnituden des zusammengesetzten verwendeten Kataloges sind auf die Momentenmagnitude  $M_w$  harmonisiert, wobei Grünthal et al. (2009b) den Grad der erreichten Harmonisierung beschreiben. Ferner wurden nur statistisch voneinander unabhängige Erdbebenereignisse verwendet. Vor- und Nachbeben zu einem Erdbebenereignis wurden entfernt. Zur Qualitätskontrolle der Erdbebendaten wurde der Katalog auf Vollständigkeit geprüft. Für Erdbeben der Magnitude  $M_w$  größer 5.0 wurde die Vollständigkeit in Abhängigkeit der Region bis ins 19. Jh. bzw. 14. Jh. nachgewiesen.

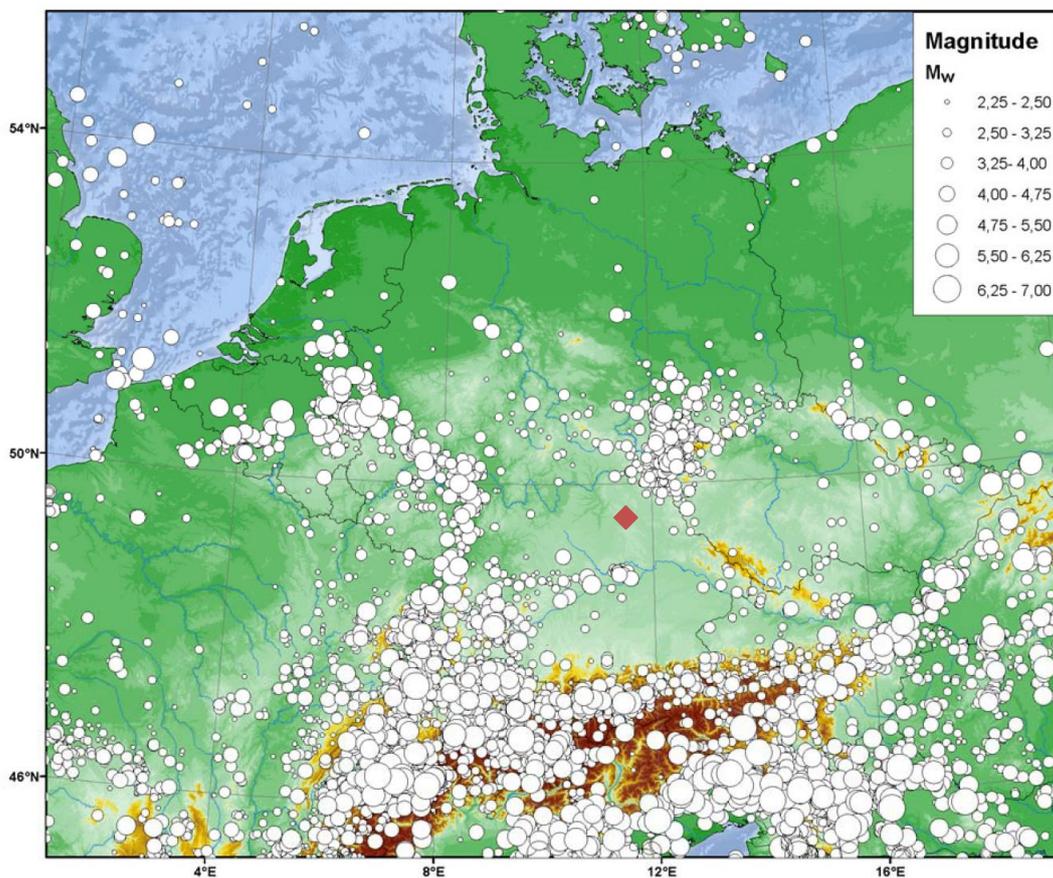


Abb. 2.1: Beobachtete Seismizität im Untersuchungsgebiet (aus Grünthal et al. 2009), rote Raute Standort PSW Happurg.

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 2.1) ist Teil der stabilen NW-europäischen kontinentalen Lithosphärenplatte. Diese weist eine moderate seismische Aktivität auf, die bestimmten tektonischen Elementen zugeordnet werden kann. In Europa nördlich des alpidischen Gürtels ist die Seismizität innerhalb Deutschlands am größten. Die flächenmäßige Verteilung der Epizentren der Beben in Deutschland samt Umgebung zeigt eine deutlich ausgeprägte seismische Aktivität des känozoischen Riftsystems des Oberrhein-Grabens mit der Niederrheinischen Bucht. Die höchste Seismizitätsrate innerhalb Deutschlands weist während der letzten 100 Jahre das Gebiet der Hohenzollernalb auf, wo die

Seismizität mit dem so genannten Mitteleuropäischen Beben am 16. November 1911 (Lokalmagnitude  $M_L = 6,1$ ;  $M_W = 5,7$ ) einsetzte. Diese Region ist ca. 200 km vom Projektstandort Happurg entfernt.

Die Tiefenverteilung der Erdbeben in Deutschland beinhaltet vor allem Erdbeben kleinerer Magnituden. Es bilden sich zwei Tiefenbereiche mit lokalen Maxima, einmal der Bereich 8 - 10 km und der Bereich 20 - 26 km. Damit handelt es sich in Deutschland im Allgemeinen um flache Erdbeben. Die Herdtiefen von Erdbeben größerer Stärke konnten aufgrund der geringen Datenbasis nicht verifiziert werden. Es ist aber auch davon auszugehen, dass es sich um verhältnismäßig flache Erdbebentiefen handelt.

### 3 Geologische und tektonische Verhältnisse

Zu den geologisch tektonischen Verhältnissen liegt eine Reihe an Vorarbeiten vor. An dieser Stelle soll nur auf die Publikation Grünthal et al. (2009) hingewiesen werden, die eine gute Zusammenfassung zu den Verhältnissen in Deutschland gibt. Auf die geologischen Verhältnisse am Standort des PSW Happurg geht kurz der Bericht Langhagen & Wawrzyniak (2006) ein.

Abb. 3.1 zeigt die tektonischen Störungen in Deutschland und angrenzenden Gebieten, die dem seismotektonischen Modell der probabilistischen seismischen Gefährdungsstudie zu Grunde liegen. Geologisch befindet sich der Projektstandort des PSW Happurg im Bereich der Juraformationen. Detaillierte Untersuchungen zu aktiven Verwerfungen bzw. Störungen am Standort des PWS Happurg lagen bei der Erstellung der vorliegenden Studie nicht vor.

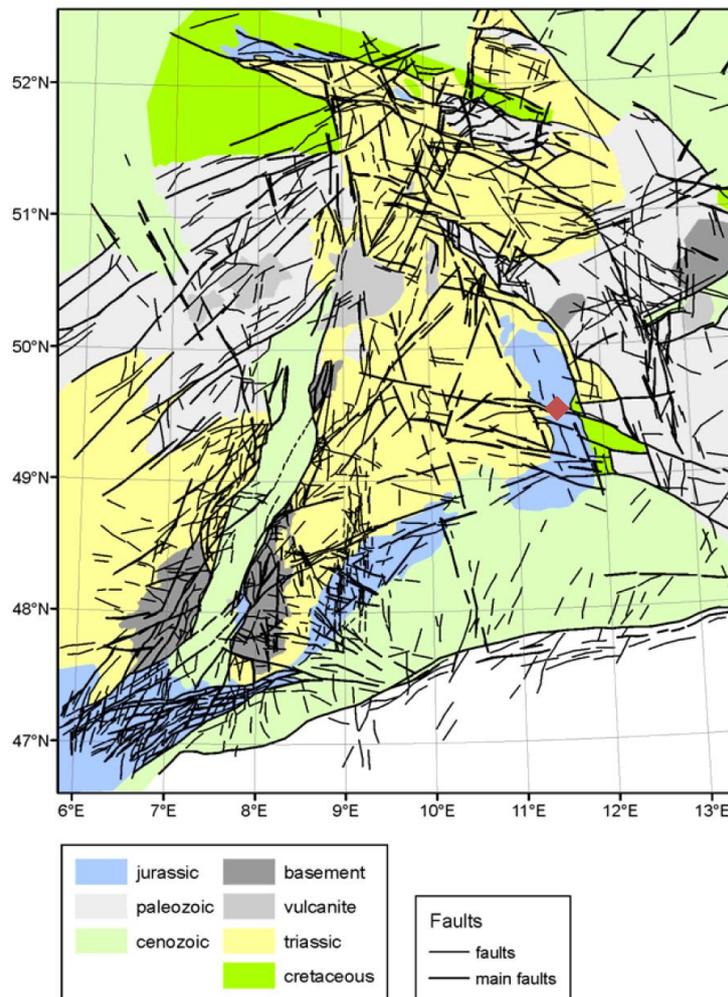


Abb. 3.1: Bruchstrukturelemente bzw. tektonische Störungen in Gesamtdeutschland; rote Raute - Projektstandort Happurg (nach Wetzels & Franzke 2001, 2003 sowie Pohl et al., 2006).

## 4 Seismotektonische Modelle

### 4.1 Entwicklung der seismotektonischen Modelle

In der Gefährdungsstudie wurden sieben seismotektonische Modelle entwickelt, um die epistemischen Unsicherheiten in den seismischen Quellzonen zu berücksichtigen. Die Grundlagen zur Modellierung bilden die Seismizität und die geologisch tektonischen Verhältnisse. Zwei von diesen seismotektonischen Modellen beruhen einzig auf der großräumigen tektonischen Architektur und dem tektonischen Regime im Raum Deutschland. Eines der großräumigen Quellmodelle ist in Abb. 4.1 dargestellt. Die genaue Bezeichnung der Regionen ist in Grünthal et al. (2009) aufgelistet. Des Weiteren sind 5 kleinräumige Quellregionenmodelle entwickelt worden, die zusätzlich die beobachtete seismische Aktivität und neotektonisch aktive Bruchstörungen berücksichtigen. Vier der kleinräumigen Quellregionenmodelle sind in Abb. 4.2 und Abb. 4.3 dargestellt. Beispielhaft sei darauf hingewiesen, dass das Quellregionenmodell in Abb. 4.2 insgesamt 89 Quellregionen beinhaltet, die weit über Deutschlands Grenzen hinaus gehen und nicht komplett in der Abbildung dargestellt ist.

Die seismotektonischen Modelle sind in Grünthal et al. (2009) und weiterer Literatur eingehend beschrieben (z. B. Ahorner & Rosenhauer 1986, Grünthal et al. 1998, Wetzel & Franzke 2001, 2003, Grünthal 2004, Pohl et al. 2006, Burkhard & Grünthal 2009).

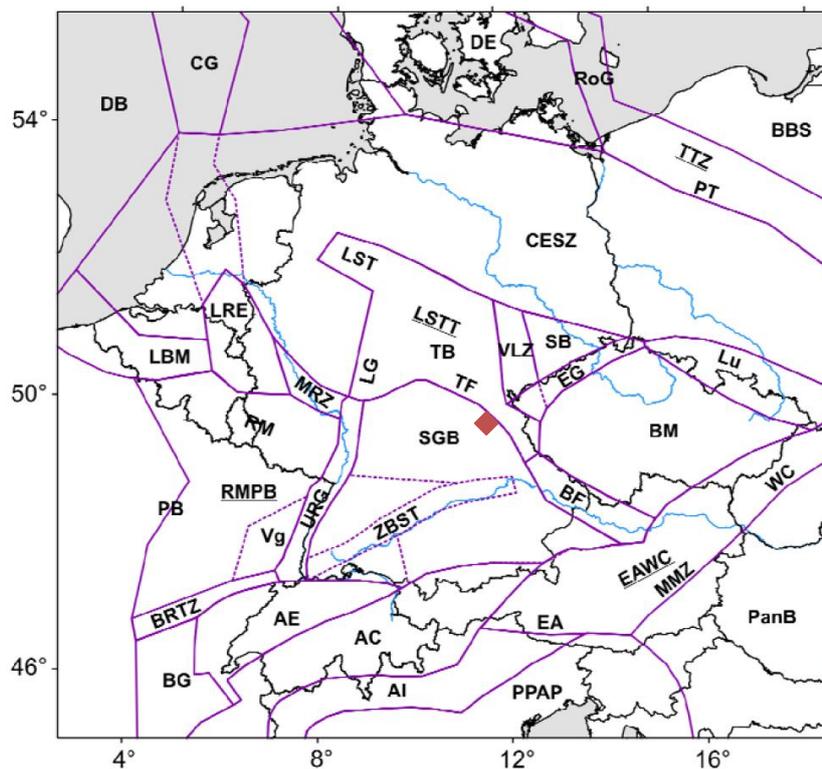


Abb. 4.1: Seismotektonische Grossregion - abgeleitet nach der großräumigen tektonischen Architektur (aus Grünthal et al. 2009), rote Raute Projektstandort Happurg.

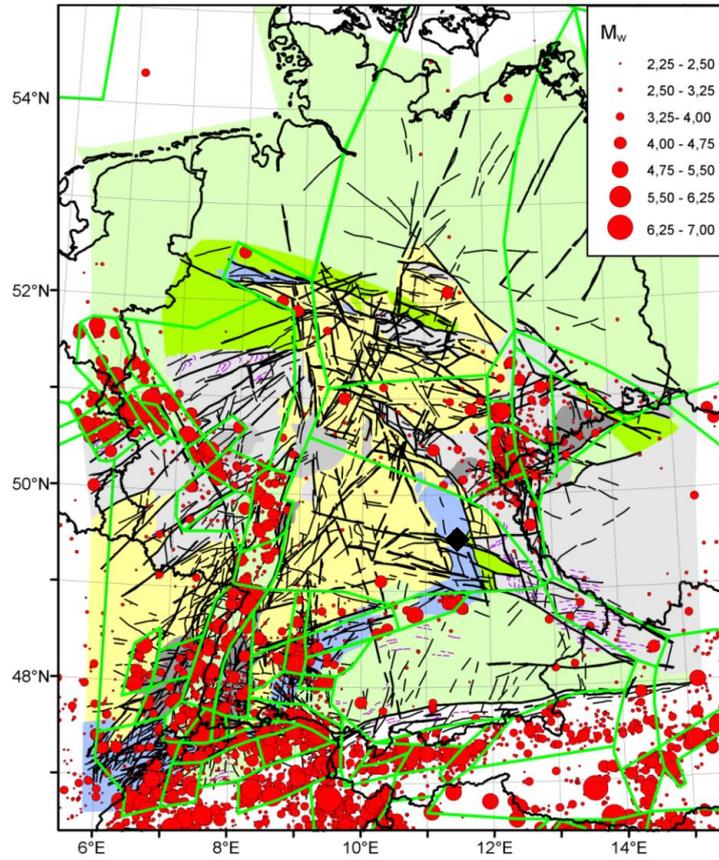


Abb. 4.2: Kleinräumiges Quellregionenmodell unter Nutzung verschiedener Datengrundlagen (aus Grünthal et al. 2009), schwarze Raute Projektstandort Happurg.

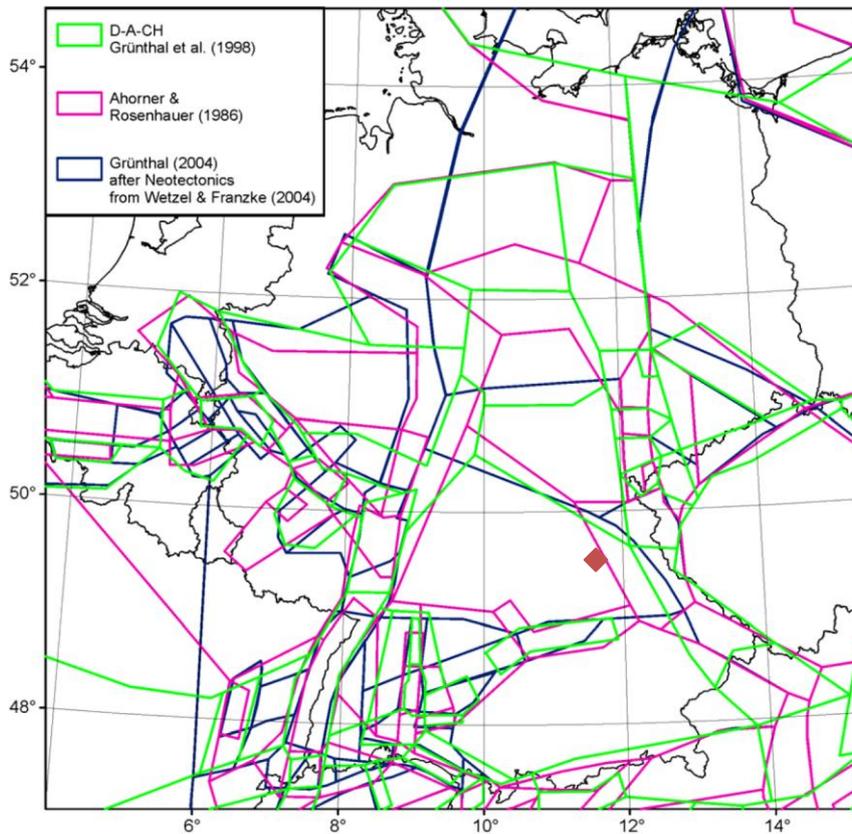


Abb. 4.3: Überlagerung der drei kleinräumigen Quellregionenmodelle zur Illustration der Unsicherheiten in der Modellbildung (aus Grünthal et al. 2009), rote Raute PSW Happurg.

Die unterschiedlichen seismotektonischen Modelle werden in einem logischen Baum miteinander Verknüpft. Damit können Unsicherheiten bei der Quellregionmodellierung abgedeckt werden. Auf die Verknüpfungen der Quellregionenmodelle in der Gefährdungsberechnung wird in Kapitel 6.1 näher eingegangen. Weltweit zeigt sich, dass in Gebieten geringer Seismizität die Unsicherheiten grösser als in stark seismischen Regionen sind. Dies bedeutet, alternative Modellvorstellungen in die Berechnung einzubeziehen, wobei die Modellvielfalt die Unsicherheit in den Modellen ausdrückt. Die Region des Projektes PSW Happurg liegt im weltweiten Vergleich in einem sehr gering seismisch aktiven Gebiet.

#### **4.2 Bestimmung der Parameter der Quellregionen**

Für jede Quellregion eines jeden Modells werden die spezifischen Quellparameter bestimmt. Zu den Parametern gehören die jährliche Rate aller Ereignisse  $\nu_0$  ab einer gewissen Magnitude  $m_0$ , der Anstieg der jährlichen Rate  $\beta$  in Abhängigkeit von der Magnitude und die maximale Magnitude der Quellregion  $m_{\max}$ . Die Zusammenhänge der Häufigkeitsparameter beruhen auf der klassischen Beziehung nach Gutenberg & Richter (1954). Die Abschätzung der Häufigkeitsparameter erfolgte mit der Methode der maximalen Wahrscheinlichkeit (Maximum Likelihood) nach Weichert (1980). Für die Herdtiefenverteilung wurden Bereiche angesetzt, über die in der Gefährdungsberechnung integriert wurde. Damit wird die Tiefenverteilung als aleatorische Variabilität in der Berechnung berücksichtigt. Für die Diskussion der Quellparameter und ihrer Unsicherheiten wird auf Grünthal et al. (2009) verwiesen.

## 5 Abminderungsbeziehungen

Die Auswahl geeigneter Relationen zur Beschreibung der Amplitudenabnahme von Starkbodenbewegungsparametern mit der Entfernung, auch Abminderungsbeziehung, Attenuation Relation oder Ground Motion Prediction Equation GMPE bezeichnet, stellt einen entscheidenden und gleichzeitig kritischen Teil der PSHA dar. Neben dem zu Grunde liegenden Erdbebenkatalog und dem hieraus abgeleiteten Parametern sind die Abminderungsbeziehungen die wichtigste Ausgangsgröße. Innerhalb der Abminderungsbeziehungen ist es wiederum der Parameter  $\varepsilon$ , welcher für eine vorgegebene Starkbodenbewegungsamplitude deren berechnete Eintreffens- oder Überschreitenswahrscheinlichkeit bestimmt.

Zur Berücksichtigung der epistemischen Modellunsicherheit in den Abminderungsbeziehungen werden verschiedene für das Untersuchungsgebiet geeignete Modelle ausgewählt und mit ihren zu bestimmenden Wichtungen in den Logischen Baum eingefügt. Im Rahmen der vorliegenden Studie können im Hinblick auf die Auswahl geeigneter Abminderungsbeziehungen die Empfehlungen von Scherbaum et al. (2005) zu Grunde gelegt werden.

Hierbei erhielten die Modelle nach Abrahamson & Silva (1997), Berge-Thierry et al. (2003) und Spudich et al. (1999) die Präferenz. Das Modell nach Abrahamson & Silva (1997) wird von Scherbaum et al. (2005) als sehr zuverlässig eingeschätzt. Da es jedoch hauptsächlich auf kalifornischen Daten beruht und die tektonische Situation in Mitteleuropa eine grundsätzlich andere ist, erhält dieses Modell nur ein Gewicht von 20 %. Spudich et al. (1999) nutzen weltweite Daten aus Extensionszonen. Da signifikante Anteile dieses tektonischen Regimes in den seismisch aktivsten Gebieten Deutschlands präsent sind, erhielt das Modell nach Spudich et al. (1999) ein Gewicht von 30 %. Die Daten von Spudich et al. (1999) wurden durch Pankow & Pechmann (2004, 2006) neu angepasst, so dass letztlich deren Modell in die PSHA einfließt. Berge-Thierry et al. (2003) nutzen vornehmlich Daten aus Europa und dem Mittleren Osten, so dass dieses Modell mit dem größten Gewicht von 50 % eingeht. Eine Übersicht der verwendeten Abminderungsbeziehungen ist in Tab. 5.1 aufgelistet.

Tab. 5.1: Charakteristika der ausgewählten Abminderungsbeziehungen nach Grünthal et al. (2009).

Abminderungsbeziehung	Magnitudentyp	Entfernungsmetrik	tektonisches Regime	Komponente	Wichtung
Abrahamson & Silva (1997)	$M_W$	Rupturdistanz	Aufschiebung, Seitenverschiebung	geometrisches Mittel	20 %
Berge-Thierry et al. (2003)	$M_S$	Hypozentraldistanz	-	beide Komponenten	50 %
Pankow & Pechmann (2004, 2006)	$M_W$	Joyner-Boore-Distanz	Abschiebung	geometrisches Mittel	30 %

## 6 Berechnung der Bemessungsspektren

### 6.1 Logic Tree Analyse

Eine umfassende Behandlung der Unsicherheiten, sowohl in den Ausgangsgrößen und Ausgangsmodellen als auch den berechneten Bodenbewegungsparametern, ist unmittelbarer Bestandteil moderner und aussagekräftiger PSHA. Unsicherheiten in den Quellregionenmodellen sind epistemischer Art und verlangen, in Form des Logischen Baumes Eingang in die PSHA zu finden.

Im Logischen Baum werden verschiedene Knotenebenen unterschieden (Abb. 6.1). Die erste Knotenebene für die vorliegende Untersuchung beschreibt die prinzipielle Unterscheidung zwischen grundsätzlich angewendeten Methoden, d. h. die Nutzung groß- und kleinräumiger Modelle. Das großräumige Quellmodell wurde in zwei Varianten ausgewiesen, welche die zweite Knotenebene beschreiben. In der dritten Knotenebene besteht die Möglichkeit, verschiedene kleinräumige Modelle zu nutzen. Für den Logischen Baum ergeben sich somit 528 separate Quellregionen in den 7 Quellenmodellen, die in die Rechnung einfließen. Der Ansatz der großräumigen Modelle geht nur zu 15 % in die Gefährdungsberechnung ein, während die kleinräumigen Modelle mit 85 % weitaus höher gewichtet sind. Kleinräumige Modelle bilden die lokale Seismizität detaillierter ab.

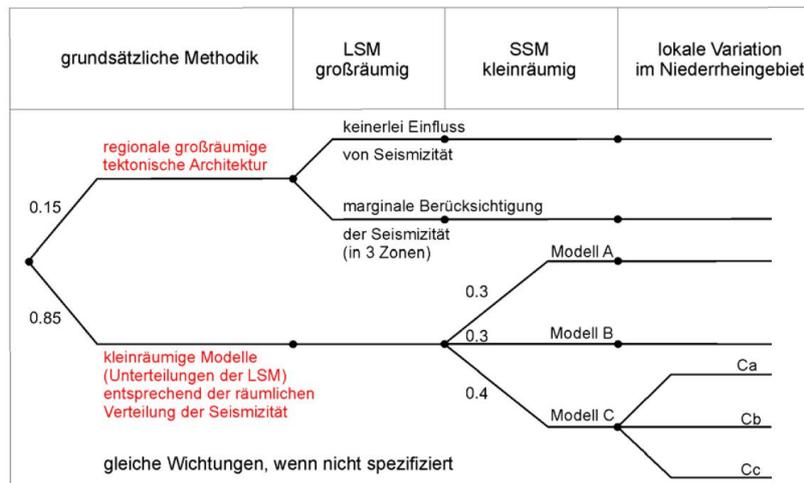


Abb. 6.1: Logischer Baum für die Quellregionenmodelle zur Behandlung ihrer epistemischen Unsicherheiten (aus Grünthal et al. 2009).

Für jede seismische Quelle sind als Bestandteil der Berechnungsprozedur die entsprechenden quell-spezifischen Parameter mit ihren Unsicherheiten zu berücksichtigen. Dabei sind die epistemischen Unsicherheiten in einem für jede Quellregion speziellen Logischen Baum zu behandeln – über die aleatorischen Unsicherheiten ist dagegen zu integrieren. Die Struktur des Logischen Baumes pro Quellregion ist in Abb. 6.2 dargestellt.

Die erste Verzweigungsebene bezeichnet die epistemische Unsicherheit in den Modellen der Starkbodenbewegungsmodelle, wobei das Modell von Berge-Thierry et al. (2003), das hauptsächlich auf Daten aus Europa fußt, die höchste Wichtung von 50 % erhält. Wegen der bedeutenden Abschiebungsanteile der Beben in den wichtigsten Bebengebieten Deutschlands geht das Modell von Pankow & Pechmann (2004, 2006) mit einem Gewicht von 30 % in die Berechnung ein. Für das Modell von Abrahamson & Silva (1997) verbleiben somit 20 % Gewicht. Für jede Quelle kommt das für sie typische tektonische Regime, d. h. die spezifischen Anteile von Abschiebung (NF), Seitenverschiebung (SS) und Aufschiebung (RF) zur Anwendung.

Die nächste Verzweigungsebene beschreibt die Unsicherheit in den  $v$ - $\beta$  Paaren, wobei die Quellparameter  $v_0$  und  $\beta$  zu einem Eingangsparameter, dem  $v$ - $\beta$  Paar, zusammengefasst und dessen Unsicher-

heiten durch drei Verzweigungen im Logischen Baum durch die Paare  $(v_-, \beta_-)$ ,  $(v, \beta)$  sowie  $(v_+, \beta_+)$  berücksichtigt werden. Die Wichtung dieser Paare ergibt sich durch folgende statistische Überlegung: 68 % Wahrscheinlichkeit einer Normalverteilung befindet sich innerhalb einer Standardabweichung  $\sigma$  um dem Mittelwert  $\mu$  und kann damit dem Intervall  $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$  zugeordnet werden. Für die Intervalle  $(-\infty, \mu - \sigma)$  und  $(\mu + \sigma, +\infty)$  verbleiben dann jeweils 16 %. Die Punktschätzung des Parameters  $\beta$  bekommt daher das Gewicht 0,68, während die unteren und oberen Grenzparameter das Gewicht 0,16 erhalten.

Die Verteilung des dritten Aktivitätsparameters,  $m_{max}$  wurde in fünf Teile mit jeweils gleichem Gewicht (20 %) aufgeteilt. Die diskretisierten Werte der jeweiligen Teile gehen in die Berechnung ein.

Aus der Kombination der 45 Endzweige im Logischen Baum der Abminderungsbeziehungen mit den 7 Endzweigen des Logischen Baums der Quellenmodelle ergeben sich in Summe 315 Endzweige.

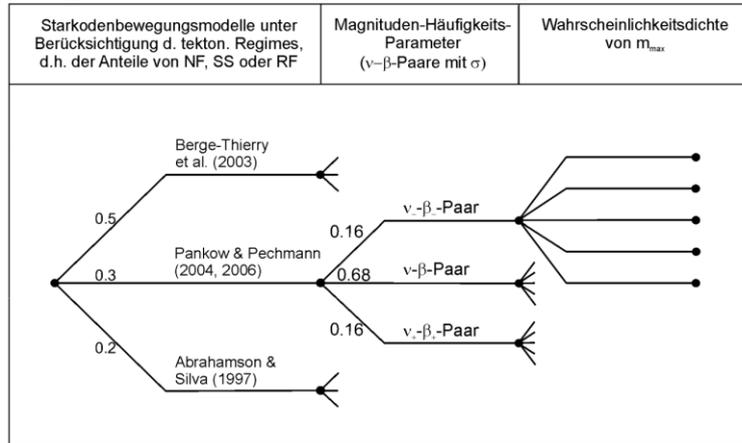


Abb. 6.2: Struktur des Logischen Baums pro seismischer Quelle (aus Grünthal et al. 2009).

## 6.2 Ergebnisse der Gefährdungsberechnung

Das wesentliche Resultat der probabilistischen seismischen Gefährdungsstudie von Grünthal et al. (2009) ist die Erstellung einer Serie von Gefährdungskarten von Deutschland für unterschiedliche mittlere Wiederholungsperioden der Erdbebenanregung. So wurde die Gefährdung für die mittleren Wiederholungsperioden von 100 Jahren, 500 Jahren, 1'000 Jahren und 2'500 Jahren ermittelt. Stellvertretend zeigt Abb. 6.3 die seismischen Gefährdungskarten von Deutschland für die Spitzenbodenbeschleunigung auf Fels für das 50 % Fraktile für die mittleren Wiederholungsperioden von 500 Jahren und 2'500 Jahren. Diese mittleren Wiederholungsperioden entsprechen dem Betriebs- bzw. Bemessungserdbeben des Projektes PSW Happurg (vgl. DIN 19700).

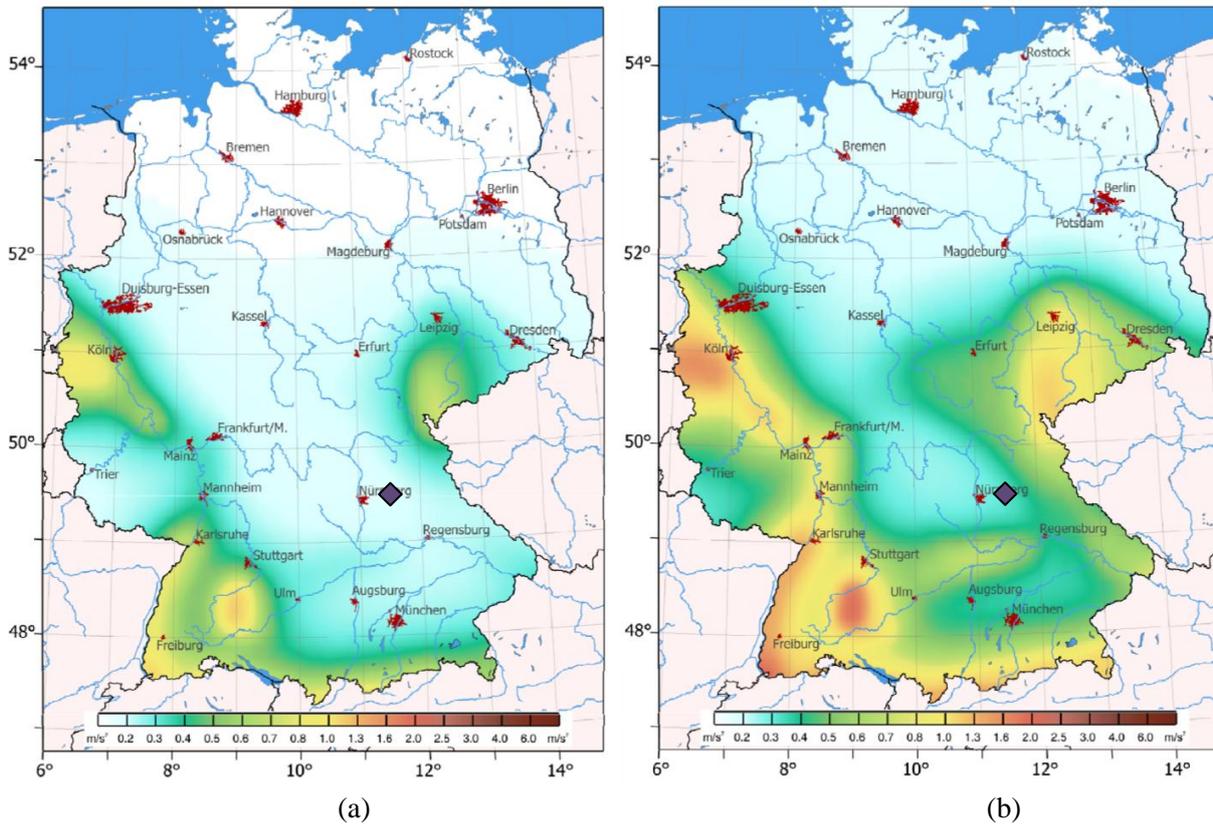


Abb. 6.3: Karte der Spitzenbodenbeschleunigung für einen Felsuntergrund für das 50 % Fraktile mit einer mittleren Wiederholungsperiode von a) 500 Jahren und b) 2'500 Jahren (aus Grünthal et al., 2009) mit Markierung des Projektstandortes PSW Happing.

### 6.3 Bemessungsspektren des Standorts PSW Happing

Für den Erdbebennachweis sind gemäß DIN 19700 das Betriebs- und das Bemessungserdbeben nachzuweisen. Die Antwortspektren werden nach der Arbeitshilfe zum Nachweis der Erdbebensicherheit von Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren in Baden-Württemberg (LUBW 2010) und DIN 4149 (2005) ermittelt. Dazu wurden die Bemessungswerte der Bodenbeschleunigungen an den Standorten des PSW Happing durch Grünthal et al. (2009) bestimmt. Diese Bemessungswerte der Bodenbeschleunigung (siehe Tab. 6.1) dienen dann als Einhängewerte für die Spektrenform nach DIN 4149 (2005). DIN 4149 (2005) gibt für die Region um Nürnberg keine Geologische Untergrundklasse an. Anhand der Zustandsbeurteilung des PSW Happing (Langhagen & Wawrzyniak 2006) kann die Untergrundklasse R (Fels) abgeleitet werden.

Tab. 6.1: Horizontale Spitzenbodenbeschleunigungen  $a_g$  nach Grünthal et al. (2009) für den Standort PSW Happing auf Fels (A-R).

mittlere Wiederholungsperiode	Spitzenbodenbeschleunigung $a_g$ für Gründung auf Fels (Untergrund A-R)
PGA 500 Jahre	0.18 m/s <sup>2</sup>
PGA 2'500 Jahre	0.33 m/s <sup>2</sup>

#### *Oberbecken*

Das Absperrbauwerk des Oberbeckens ist direkt auf Fels fundiert. Daraus ergeben sich die entsprechenden Antwortspektren in Abb. 6.4 bzw. Tab. 6.2.

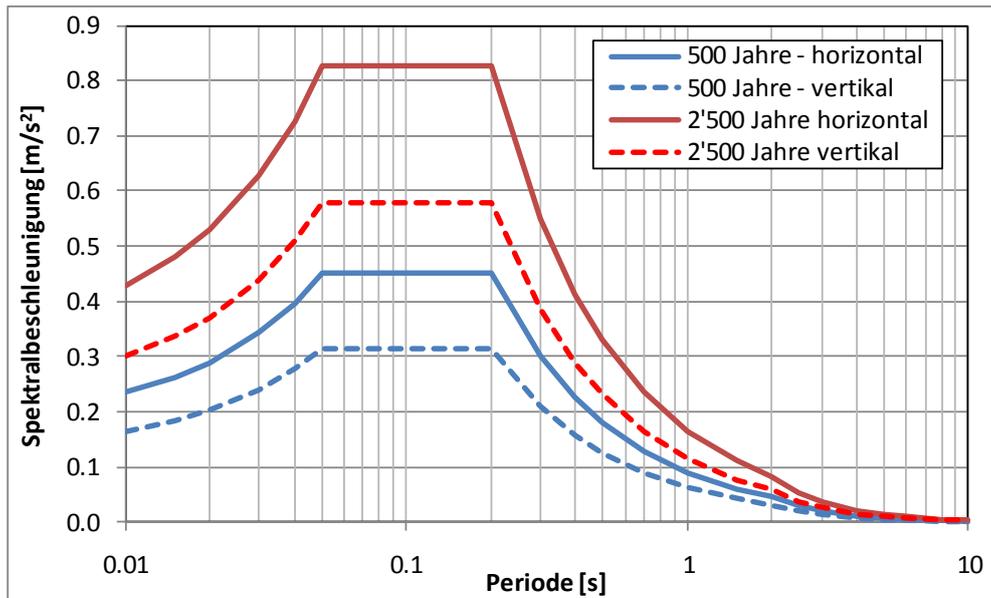


Abb. 6.4: Antwortspektren des Absperrbauwerk des Oberbeckens auf Fels (Untergrund A-R) des Projektes PSW Happurg für 500 und 2'500 Jahre mittlerer Wiederholungsperiode in horizontaler und vertikaler Bewegungsrichtung.

Tab. 6.2: Antwortspektrum für das Absperrbauwerk des Oberbeckens auf Fels (Untergrund A-R) des Projektes PSW Happurg für mittlere Wiederholungsperioden 500 und 2'500 Jahre in horizontaler und vertikaler Bewegungsrichtung.

Periode [s]	Antwortspektrum Oberbecken auf Fels (Untergrund A-R)			
	500 Jahre		2'500 Jahre	
	horiz.	vert.	horiz.	vert.
0.00	0.18	0.13	0.33	0.23
0.01	0.23	0.16	0.43	0.30
0.02	0.29	0.20	0.53	0.37
0.03	0.34	0.24	0.63	0.44
0.04	0.40	0.28	0.73	0.51
0.05	0.45	0.32	0.83	0.58
0.10	0.45	0.32	0.83	0.58
0.20	0.45	0.32	0.83	0.58
0.30	0.30	0.21	0.55	0.39
0.40	0.23	0.16	0.41	0.29
0.50	0.18	0.13	0.33	0.23
0.70	0.13	0.09	0.24	0.17
1.00	0.09	0.06	0.17	0.12
1.50	0.06	0.04	0.11	0.08
2.00	0.05	0.03	0.08	0.06
2.50	0.03	0.02	0.05	0.04
3.00	0.02	0.01	0.04	0.03
4.00	0.01	0.01	0.02	0.01

**Unterbecken**

Das Unterbecken wird von dem Happurger See gebildet. Das Krafthaus liegt am nördlichen Ufer. Das Krafthaus und die Absperrung sind auf ca. 10 m mächtigem Hangschutt geründet. Es wird eine dichte Lagerung des Hangschuttes angenommen, so dass die Bodeneigenschaften den Untergrundverhältnis-

sen B-R entsprechen. Es wird das Antwortspektren für das Untergrundverhältnisse B-R nach LUBW (2010) und DIN 4149 (2005) mit den entsprechenden Untergrundfaktoren und Spektrenparametern ermittelt. Der Standortfaktor für die Untergrundverhältnisse B-R beträgt  $S = 1.25$ .

Abb. 6.5 bzw. Tab. 6.3 zeigen die Antwortspektren für das Unterbecken auf einer steifen Lockergesteinsschicht der Untergrundverhältnisse B-R mit Wiederholungsperioden von 500 und 2'500 Jahren.

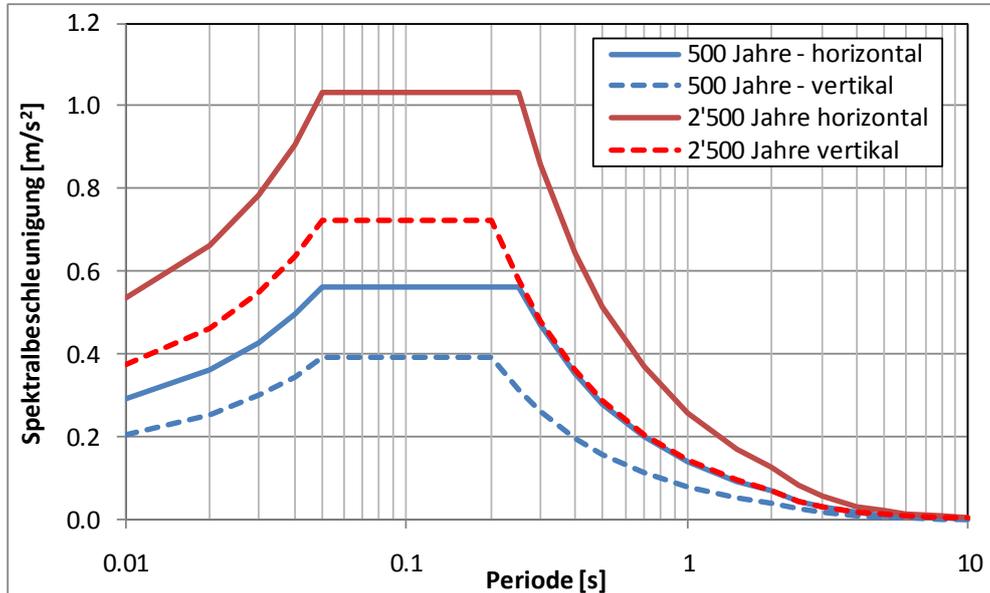


Abb. 6.5: Antwortspektren für das Unterbecken auf steifer Lockergesteinsschicht (Untergrund B-R,  $S = 1.25$ ) des Projektes PSW Happurg für 500 und 2'500 Jahre mittlerer Wiederholungsperiode in horizontaler und vertikaler Bewegungsrichtung.

Tab. 6.3: Antwortspektren für des Unterbeckens auf steifer Lockergesteinsschicht (Untergrund B-R,  $S = 1.25$ ) des Projektes PSW Happurg für mittlere Wiederholungsperioden 500 und 2'500 Jahre in horizontaler und vertikaler Bewegungsrichtung.

Periode [s]	Antwortspektrum Unterbecken auf steifer Lockergesteinsschicht (Untergrund B-R)			
	500 Jahre		2'500 Jahre	
	horiz.	vert.	horiz.	vert.
0.00	0.23	0.16	0.41	0.29
0.01	0.29	0.20	0.54	0.38
0.02	0.36	0.25	0.66	0.46
0.03	0.43	0.30	0.78	0.55
0.04	0.50	0.35	0.91	0.64
0.05	0.56	0.39	1.03	0.72
0.10	0.56	0.39	1.03	0.72
0.20	0.56	0.39	1.03	0.72
0.30	0.47	0.26	0.86	0.48
0.40	0.35	0.20	0.65	0.36
0.50	0.28	0.16	0.52	0.29
0.70	0.20	0.11	0.37	0.21
1.00	0.14	0.08	0.26	0.14
1.50	0.09	0.05	0.17	0.10
2.00	0.07	0.04	0.13	0.07
2.50	0.05	0.03	0.08	0.05
3.00	0.03	0.02	0.06	0.03
4.00	0.02	0.01	0.03	0.02

**Hinweis:**

Streng genommen sind die Spektrenformen der DIN 4149 (2005) für Wiederholungsperioden von 500 Jahre bis etwa 1'500 Jahre gültig. Bei höheren Wiederholungsperioden ist mit etwas höheren langperiodischen Anteilen zu rechnen. Gleichwohl wird die Wahl der DIN 4149-Spektren für praktische Bedürfnisse als zulässig erachtet. Die Spektren von Normen sind generell konservativer als standortspezifische Spektren, welche stets schmalbandiger sind. Bei Normspektren werden auch verschiedene Standorte mit gleichem Untergrund- und Bodenverhältnissen abgedeckt. Auch wenn in Deutschland die verschiedenen Untergrund- und Bodenklassen recht differenziert sind, decken die einzelnen Klassen doch recht breite Bereiche ab, was die Unsicherheiten erhöht. Diese Unsicherheiten werden durch die Form und die Breite der Normspektren berücksichtigt. Betrachtet man die UHS-Spektren von Grünthal et al. (2009), so stellt man fest, dass diese für den Felsuntergrund schmalbandiger sind als die DIN Spektren, und dass sich die Formen der Spektren mit 500 und 2500 Jahren Wiederholungsperiode allenfalls marginal zu den DIN 4149-Spektren unterscheiden. Dieser Unterschied ist im Vergleich zu anderen Unsicherheiten gering und wird durch die Konservativitäten in der Bemessung abgedeckt.

Die vorliegende Ableitung der Betriebs- und Bemessungsspektren genügt DIN 19700:10/11 (2004) und ist kompatibel zur ICOLD Richtlinie 72 (ICOLD 1989).

## 7 Grundlagen zur Abschätzung des Restrisikos gemäss DIN 19700

### 7.1 Einführung zur Abschätzung des Restrisikos

Nach DIN 19700-10 (2004), Abschnitt 11, sind verbleibende Risiken infolge des Überschreitens des Bemessungserdbebens zu bewerten und in Abhängigkeit der lokalen Bedingungen durch flankierende konstruktive, bewirtschaftungsseitige und / oder organisatorische Maßnahmen zu mindern. Genaue Angaben zum Vorgehen und zur Bewertung des seismischen Restrisikos sind in DIN 19700-10 (2004) nicht näher spezifiziert. Dabei dürfen die Sperre und sicherheitsrelevante Anlagen wohl stärker beschädigt werden als beim Bemessungserdbeben, aber es darf kein unkontrollierter Wasseraustritt aus dem Reservoir auftreten.

Die Erdbebengefährdung an einem Standort hängt von folgenden Faktoren ab:

- Regionale Gefährdung
- Einfluss der lokalen Geologie
- Einfluss der lokalen Topographie

Die regionale Gefährdung ist durch die Gefährdungsanalyse Grünthal et al. (2009) abgedeckt. Der Einfluss der lokalen Geologie bzw. des Untergrundes wird durch die Wahl der entsprechenden Spektren gemäss den Untergrundbedingungen nach DIN 4149 berücksichtigt. Der Einfluss der lokalen Topographie wird in den heutigen Normenwerken nicht berücksichtigt. Er wird als geringer als derjenige Einfluss betrachtet, der auf die lokalen Untergrundverhältnisse zurückzuführen ist. Aufgrund der topographischen Verhältnisse am Standort des Oberbeckens des PSW Happurg mit der seichten Hügelkuppe des Deckersberges und flachen Ausläufern kann der Einfluss einer topographischen Verstärkung vernachlässigt werden, bzw. wird in der Wahl der hohen Wiederkehrperiode für die Restrisikobetrachtung mit berücksichtigt.

Insgesamt werden in den folgenden Abschnitten der vorliegenden Studie Antwortspektren ermittelt, die höhere Wiederkehrperioden als das Bemessungserdbeben aufweisen und als Grundlage für die Restrisikoabschätzung und -bewertung herangezogen werden können.

### 7.2 Vorgehensweise zur Abschätzung von Erdbeben mit größeren Wiederkehrperioden

Nach EC 8 (EN 1998-1 2004) besteht eine Korrelation zwischen der Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. Wiederkehrperiode eines Erdbebens und dessen Bodenbeschleunigung. Der Zusammenhang ist im Abschnitt 2.1 (4) des EC 8-Teil 1 (EN 1998-1 2004) als Anmerkung erläutert:

*Für die meisten Standorte darf angenommen werden, dass die jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit,  $H(a_{gR})$  des Referenz-Spitzenwertes der Bodenbeschleunigung mit  $a_{gR}$  gemäß*

$$H(a_{gR}) \sim k_0 a_{gR}^{-k}$$

*zusammenhängt, wobei der Wert des Exponenten  $k$  von der Seismizität abhängt, jedoch im Allgemeinen in der Größenordnung von 3 liegt. Wenn, in diesem Fall, die Erdbebeneinwirkung als Funktion des Referenz-Spitzenwertes der Bodenbeschleunigung  $a_{gR}$  definiert wird, darf der Wert des Bedeutungsbeiwerts  $\gamma_I$ , mit dem die Referenz-Erdbebeneinwirkung multipliziert werden muss, um die gleiche Überschreitungswahrscheinlichkeit für  $T_L$  Jahre zu erhalten, wie für  $T_{LR}$  Jahre, für die die Referenz-Erdbebeneinwirkung definiert ist, als*

$$\gamma_I \sim (T_{LR}/T_L)^{-1/k}$$

*berechnet werden. Alternativ darf der Bedeutungsbeiwert  $\gamma_I$  zur Multiplikation mit der Referenz-Erdbebeneinwirkung, um eine Überschreitungswahrscheinlichkeit der Erdbebeneinwirkung,  $P_L$ , in  $T_L$  Jahren zu erhalten, bei unterschiedlicher Referenz-Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P_{LR}$  über ebenfalls  $T_L$  Jahren wie folgt überschlägig bestimmt werden:*

$$\gamma_I \sim (P_L/P_{LR})^{-1/k}.$$

### 7.3 Bedeutungsbeiwerte bzw. Erhöhungsfaktoren für die Absperrbauwerke des PSW Happurg

Zur Abschätzung der Antwortspektren größerer Erdbeben wird der Berechnungsansatz nach EC 8 verwendet. Dieses Vorgehen wird für eine Abschätzung des Restrisikos als durchweg ausreichend angesehen. Es werden Spektren für Wiederkehrperioden in der Größenordnung von 5'000 und 10'000 Jahren ermittelt, wobei die Form des Bemessungsspektrums für 2'500 Jahre beibehalten wird. Auch dies ist als Näherungslösung bei einer Abschätzung als sachgerecht zu erachten.

Anhand des in Abschnitt 7.2 gegebenen funktionalen Zusammenhanges der seismischen Gefährdung können Spektren für größere Wiederkehrperioden für den Standort des PSW Happurg abgeschätzt werden. Grundlage dazu bilden die Spitzenbodenbeschleunigungen der Antwortspektren des GFZ Potsdam (vgl. Grünthal et al. 2009) mit den Wiederkehrperioden von 500 Jahren und 2'500 Jahren. Die Berechnung der Spitzenbodenbeschleunigungen für die Wiederkehrperioden von 5'000 Jahren und 10'000 Jahren ergeben sich dann für den Standort des PSW Happurg auf Fels wie folgt:

Gegeben entsprechend der probabilistischen Gefährdungsanalyse des GFZ Potsdam (Grünthal et al. 2009) für den Standort PSW Happurg sind:

$$\begin{aligned} \text{Spitzenbodenbeschleunigung - 500 Jahre} & \quad a_{g,500} = 0.18 \text{ m/s}^2 \\ \text{Spitzenbodenbeschleunigung - 2'500 Jahre} & \quad a_{g,2500} = 0.33 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Berechnung des Bedeutungsbeiwertes  $\gamma_{I,2500}$  für die Wiederkehrperiode für 2'500 Jahre in Bezug zur Wiederkehrperiode von 500 Jahren:

$$\gamma_{I,2500} = a_{g,2500} / a_{g,500} = 0.33 / 0.18 = 1.833$$

Berechnung des Exponenten k:

$$\gamma_I = (T_{LR}/T_L)^{-1/k}$$

$$\ln \gamma_I = -1/k \cdot \ln (T_{LR}/T_L)$$

$$k = -\ln (T_{LR}/T_L) / \ln \gamma_I$$

$$k = -\ln (500/2500) / \ln 1.833$$

$$k = 2.656$$

Berechnung der Bedeutungsbeiwerte und Spitzenbodenbeschleunigungen für die Erdbebenwiederkehrperioden 5'000 Jahre und 10'000 Jahre:

$$a_{g,5000} = \gamma_{I,5000} a_{g,500}$$

$$a_{g,5000} = (T_{LR,500}/T_{L,5000})^{-1/k} a_{g,500}$$

$$a_{g,5000} = (500/5'000)^{-1/2.656} \cdot 0.18 \text{ m/s}^2$$

$$a_{g,5000} = 2.380 \cdot 0.18 = 0.43 \text{ m/s}^2$$

$$a_{g,10000} = \gamma_{I,10000} a_{g,500}$$

$$a_{g,10000} = (T_{LR,500}/T_{L,10000})^{-1/k} a_{g,500}$$

$$a_{g,10000} = (500/10'000)^{-1/2.656} \cdot 0.18 \text{ m/s}^2$$

$$a_{g,10000} = 3.089 \cdot 0.18 = 0.56 \text{ m/s}^2$$

Tab. 7.1: Übersicht der Spitzenbodenbeschleunigungen  $a_g$  S als Einhängewert für das Antwortspektrum für den Standort des PSW Happurg auf Fels (mit  $S = 1.0$ ).

Wiederkehrperiode T [Jahre]	Bedeutungsbeiwert $\gamma_I$ [-]	Spitzenbodenbeschleunigung auf Fels (A-R) für PSW Happurg $a_g$ S [m/s <sup>2</sup> ]
500	1.000	0.18
2'500	1.833	0.33
5'000	2.380	0.43
10'000	3.089	0.56

Die Spektrenformen entsprechen der Formen der Bemessungsspektren nach DIN 4149 (2005) mit den zugehörigen Eckperioden und dem Einhängewerten der Spitzenbodenbeschleunigung  $a_g$  S.

## 7.4 Antwortspektren für Erdbeben mit größeren Wiederkehrperioden für das Ober- und Unterbecken des PSW Happurg

Abb. 7.1 und Abb. 7.2 zeigen die Antwortspektren verschiedener Wiederkehrperioden für den Standort des PSW Happurg auf Felsuntergrund (A-R) für die horizontale und vertikale Bewegungsrichtung. Das Absperrbauwerk des Unterbeckens ist auf einer harten Lockergesteinsschicht gegründet mit dem Untergrundverhältnis B-R. Abb. 7.3 und Abb. 7.4 zeigen die Spektren für das Unterbecken auf harter Lockergesteinsschicht für die Untergrundverhältnisse B-R. Tab. 7.2 zeigt noch einmal tabellarisch die Antwortspektren höherer Wiederkehrperioden.

Das Antwortspektrum für eine Wiederkehrperiode von 2'500 Jahren entspricht dem Bemessungserdbeben. Das Antwortspektrum mit der Wiederkehrperiode von 500 Jahren entspricht dem Betriebserdeben. Die Bestimmung der Antwortspektren erfolgt entsprechend dem Vorgehen der Arbeitshilfe zum Nachweis der Erdbebensicherheit von Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren in Baden-Württemberg (LUBW 2010).

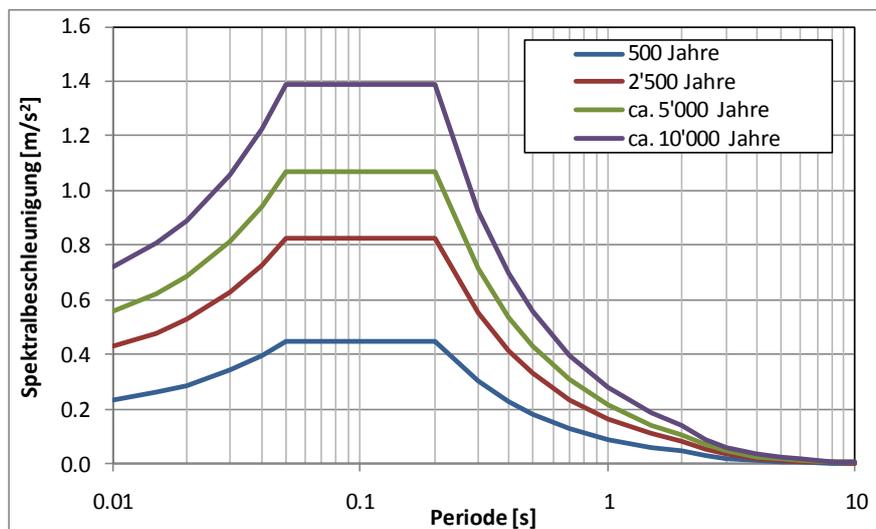


Abb. 7.1: Horizontale Antwortspektren für verschiedene Wiederkehrperioden für das Oberbecken des PSW Happurg auf Felsuntergrund (A-R).

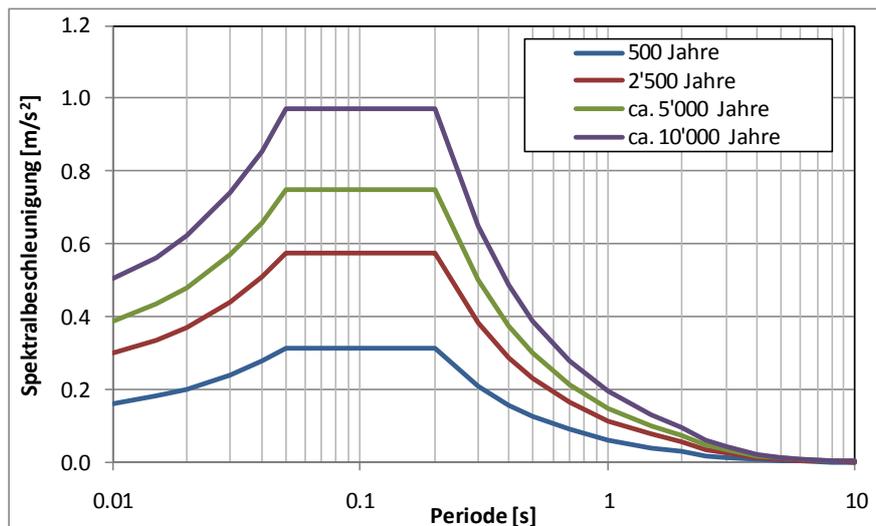


Abb. 7.2: Vertikale Antwortspektren für verschiedene Wiederkehrperioden für das Oberbecken des PSW Happurg auf Felsuntergrund (A-R).

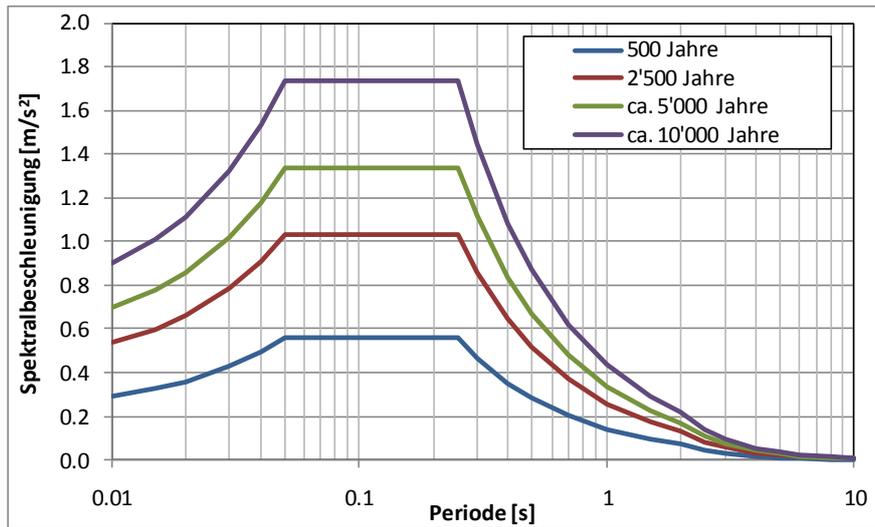


Abb. 7.3: Horizontale Antwortspektren für verschiedene Wiederkehrperioden für die Absperrbauwerke des Unterbeckens des PSW Happurg auf harter Lockergesteinsschicht (B-R).

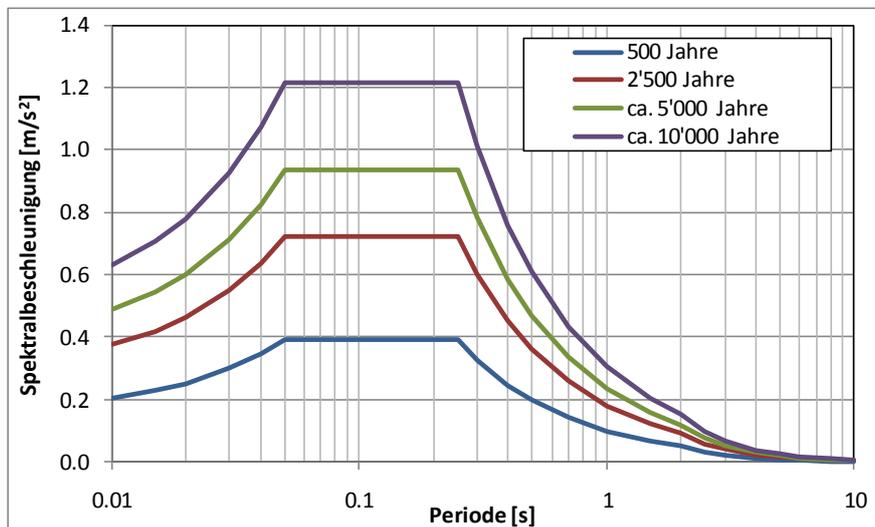


Abb. 7.4: Vertikale Antwortspektren für verschiedene Wiederkehrperioden für die Absperrbauwerke des Unterbeckens des PSW Happurg auf harter Lockergesteinsschicht (B-R).

Der vorliegende Bericht stellt Grundlagen zur Risikoabschätzung der Absperrbauwerke des PSW Happurg infolge von Erdbeben zur Verfügung. Basis sind in DIN 19700 enthaltene Vorgaben bzw. Anforderungen.

Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die genannten Erdbebenbelastungen für Wiederkehrintervalle größer als 2500 Jahre als Abschätzung anzusehen und zu bewerten sind. Ferner wird darauf hingewiesen, dass die Betrachtung derartiger Szenarien im Rahmen der Nachweisführung von Stauanlagen gemäß DIN 19700 nicht näher benannt oder explizit gefordert ist.

Tab. 7.2: Übersicht der Antwortspektren verschiedener höherer Wiederkehrperioden für den Standort PSW Happurg für die Untergrundverhältnisse Fels (A-R) und festes Lockergestein (B-R).

Periode [s]	Antwortspektrum Unterbecken auf Fels (Untergrund A-R)				Antwortspektrum Unterbecken auf steifer Lockergesteinsschicht (Untergrund B-R)			
	ca. 5'000 Jahre		ca. 10'000 Jahre		ca. 5'000 Jahre		ca. 10'000 Jahre	
	horiz.	vert..	horz..	vert.	horz.	vert.	horiz.	vert.
0.00	0.43	0.30	0.56	0.39	0.54	0.37	0.70	0.49
0.01	0.56	0.39	0.72	0.51	0.70	0.49	0.90	0.63
0.02	0.69	0.48	0.89	0.62	0.86	0.60	1.11	0.78
0.03	0.81	0.57	1.06	0.74	1.02	0.71	1.32	0.92
0.04	0.94	0.66	1.22	0.86	1.18	0.82	1.53	1.07
0.05	1.07	0.75	1.39	0.97	1.34	0.94	1.74	1.22
0.10	1.07	0.75	1.39	0.97	1.34	0.94	1.74	1.22
0.20	1.07	0.75	1.39	0.97	1.34	0.94	1.74	1.22
0.30	0.71	0.50	0.93	0.65	1.12	0.78	1.45	1.01
0.40	0.54	0.37	0.70	0.49	0.84	0.59	1.09	0.76
0.50	0.43	0.30	0.56	0.39	0.67	0.47	0.87	0.61
0.70	0.31	0.21	0.40	0.28	0.48	0.33	0.62	0.43
1.00	0.21	0.15	0.28	0.19	0.33	0.23	0.43	0.30
1.50	0.14	0.10	0.19	0.13	0.22	0.16	0.29	0.20
2.00	0.11	0.07	0.14	0.10	0.17	0.12	0.22	0.15
2.50	0.07	0.05	0.09	0.06	0.11	0.07	0.14	0.10
3.00	0.05	0.03	0.06	0.04	0.07	0.05	0.10	0.07
4.00	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.05	0.04

## 8 Beurteilung der seismischen Gefährdung

Der Standort des PSW Happurg zeigt eine verhältnismässig geringe seismische Gefährdung. Nach DIN 19700-10 (2004) kann bei einem Bemessungswert der Bodenbeschleunigung  $a_g$  des Bemessungsbebens von unter 4 % der Erdbeschleunigung  $g$  ( $0.39 \text{ m/s}^2$ ) auf den Nachweis gegenüber Erdbeben verzichtet werden (DIN 19700-10 2004 Abschnitt 8.4). Dies ist im Projekt Happurg mit einem Bemessungswert der Bodenbeschleunigung von  $0.34 \text{ m/s}^2$  für das Bemessungsbeben der Fall (siehe Kapitel 6.3). Somit kann auf die Nachweise gegenüber Erdbeben bei der Berechnung der Pumpspeicheranlagen verzichtet werden.

Im Rahmen der Restrisikobetrachtung wird jedoch empfohlen, eine Erdbebenberechnung der Sperrbauwerke unter Ansatz einer Bodenbeschleunigung und dem zugehörigen Spektrum mit einer Wiederkehrperiode grösser 2'500 Jahren entsprechend Kapitel 7 der vorliegenden Studie zu führen.

## 9 Anhang

### 9.1 Literaturliste

- Abrahamson, N. & Silva, J. (1997) Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. *Seismological Research Letters* 68 (1), 94-127.
- Ahorner, L. & Rosenhauer, W. (1986) Regionale Erdbebengefährdung. In: Realistische Seismische Lastannahmen für Bauwerke, Kap. 9. Abschlussbericht an das Institut für Bautechnik Berlin, T 1829, König und Heunisch, Beratende Ingenieure, IRB Verlag Stuttgart, 1986.
- Berge-Thierry, C., Cotton, F., Scotti, O., Griot-Pommera, D.-A. & Fukushima, Y. (2003) New Empirical Response Spectral Attenuation Laws for Moderate European Earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering* 7 (2), 193-222.
- Burkhard, M. & Grünthal, G. (2009) Seismic source zone characterization for the seismic hazard assessment project PEGASOS by the Expert Group 2 (EG 1b). *Swiss Journal of Geosciences* 102 (1), 149-188, 2009.
- Cornell, C. A. (1968) Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 58 (5), 1583-1606, 1968.
- Cornell, C. A. (1971) Probabilistic analysis of damage to structures under seismic loads. In: *Dynamic Waves in Civil Engineering*, D. A. Howells, I. P. Haigh & C. Taylor (eds.), John Wiley & Sons, New York, 473-488, 1971.
- DIN 19700-10 (2004) Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Juli 2004. Beuth Verlag GmbH.
- DIN 19700-11 (2004) Stauanlagen – Teil 11: Talsperren. Deutsches Institut für Normung e.V. Juli 2004. Beuth Verlag GmbH.
- DIN 4149 (2005) Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Deutsches Institut für Normung e.V. April 2005. Beuth Verlag GmbH.
- EN 1998-1 (2004) Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.
- Grünthal, G., Mayer-Rosa, D. & Lenhardt, W. (1998) Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz. *Bautechnik* 75 (10), 753-767, 1998.
- Grünthal, G. (2004) The history of historical earthquake research in Germany. *Annali di Geophysicae* 47 (2/3), 631-643, 2004.
- Grünthal, G., Bosse, C. & Stromeyer, D. (2009) Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland: Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700:2004-07 'Stauanlagen'. Scientific Technical Report STR 09/07, Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, 81 pp.
- Grünthal, G., Wahlström, R. & Stromeyer, D. (2009a) The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) – updated and expanded to the last millennium. *Journal of Seismology* 13 (4), 517-541.
- Grünthal, G., Wahlström, R. & Stromeyer, D. (2009b) Harmonization check of  $M_w$  within the central, northern, and northwestern European earthquake catalogue (CENEC). *Journal of Seismology* 13 (4), 613-632, 2009.
- Gutenberg, B. & Richter, C. F. (1954) *Seismicity of the Earth*, 310 pp., Princeton Univ. Press, Princeton, N. J., 1954.
- ICOLD (1989) Selecting Seismic Parameters for Large Dams. ICOLD Bulletin 72, International Commission on Large Dams, Paris.
- Langhagen, K. & Wawrzyniak, C. (2006) Zustandsbeurteilung Oberbecken, Bericht Nr. 4. CDM Amann Infutec Consult AG & Co. KG, Alsbach.
- LUBW (2010) Arbeitshilfe zum Nachweis der Erdbebensicherheit von Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren in Baden-Württemberg. 2. revidierter Entwurf. Bearbeitungsstand August 2010.
- McGuire, R. (1976) FORTRAN computer program for seismic risk analysis. Open-File Report 76-67, United States Department of the Interior Geological Survey, 1976.
- NAGRA (2008) Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, Geologische Grundlagen. Technischer Bericht 08 – 04, 393 S., Wettingen.

- Pankow, K. L. & Pechmann, J. C. (2004) The SEA99 Ground Motion Prediction Relations for Extensional Tectonic Regimes: Revisions and a New Peak Ground Velocity Relation. *Bulletin of the Seismological Society of America* 94 (1), 341-348.
- Pankow, K. L. & Pechmann, J. C. (2006) Erratum: The SEA99 ground-motion predictive relations for extensional tectonic regimes: Revisions and a new peak ground velocity relation. *Bulletin of the Seismological Society of America* 96 (1), 364.
- Pohl, D., Wetzel, H.-U. & Grünthal, G. (2006) Tektonische Untersuchungen im Raum Vogtland-Leipzig mit Hilfe von Fernerkundung. In: Seyfert, E. (ed.): *Geoinformatik und Erdbeobachtung, Tagungsband der 26. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Band 15: Vorträge*, Berlin, 277-286, 2006.
- Scherbaum, F., Bommer, J. J., Bungum, H., Cotton, F. & Abrahamson, N. A.: Composite ground-motion models and logic trees: methodology, sensitivities, and uncertainties, *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(5), 1575-1593, 2005.
- Spudich, P., Joyner, W. B., Lindh, A. G., Boore, D. M., Margaris, B. M. & Fletcher, J. B. (1999) SEA99: A Revised Ground Motion Prediction Relation for Use in Extension Tectonic Regimes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 89 (5), 1156-1170, 1999.
- Studer, J.A., Laue, J. & Koller, M.G. (2007) *Bodendynamik, Grundlagen, Kennziffern, Probleme*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- Weichert, D. H. (1980) Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observations periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 70 (4), 1337-1346, 1980.
- Wetzel, H.-U. & Franzke, H. J. (2001) Geologische Interpretation eines ESR-1 Radarmosaiks von Deutschland. *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung* 10, 503-510, 2001.
- Wetzel, H.-U. & Franzke, H. J. (2003) Lassen sich über die Fernerkundung weitere Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9°-Ost) gewinnen? *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 12, 23. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung vom 9.-11.09. 2003 in Bochum*, 339-348, 2003.

9.2 Grünthal, G., Bosse, Ch. & Stromeyer, D. (2009) Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland



HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM  
**DEUTSCHES**  
**GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

G. Grünthal, Ch. Bosse, D. Stromeyer

**Die neue Generation der  
probabilistischen seismischen  
Gefährdungseinschätzung  
der Bundesrepublik Deutschland**

Version 2007 mit Anwendung für die  
Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700:2004-07  
„Stauanlagen“

Scientific Technical Report STR09/07