



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz

PEGASOS Refinement Project PRP

Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz

PEGASOS Refinement Project PRP

Zusammenfassung:

Veranlassung

Die schweizerischen Kernkraftwerke (KKW) gehören zu den erdbebensichersten Bauten der Schweiz. Sie sind so geplant, gebaut und nachgerüstet, dass sie auch starken Erdbeben standhalten. Ihre Sicherheit wird mit modernsten Analysemethoden immer wieder überprüft. Einer entsprechenden Forderung des ENSI (damals «Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen», HSK) nachkommend, untersuchten die Betreibergesellschaften in den Jahren 2001 bis 2004 mit dem Projekt PEGASOS (Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz) die Erdbebengefährdung an den Standorten der KKW vertieft. Das ENSI beurteilte das Projekt PEGASOS überwiegend positiv und ergriff basierend auf den Projektergebnissen Massnahmen zur weiteren Verbesserung der Erdbebensicherheit der Schweizer KKW. Das ENSI wies aber auch auf mögliche Verfeinerungen hin, mit welchen voraussichtlich eine Reduktion der beträchtlichen Streubreiten der Gefährdungsergebnisse erzielt werden könnte.

Das PEGASOS Refinement Project PRP

Nach Abschluss des Projekts PEGASOS wurden national und weltweit in bedeutendem Umfang Erdbebedaten gesammelt und seismologische Modelle erarbeitet. Mit dem Ziel, die Streubreite der Gefährdungsergebnisse unter Einbezug der neuen Daten und Modelle zu reduzieren, starteten die Kernkraftwerksbetreiber im Jahr 2008 das «PEGASOS Refinement Project» (PRP). Die Schwerpunkte der Verfeinerungen lagen in den neuen Abminderungsgesetzen und in den standortspezifischen Baugrunduntersuchungen. Die gegenüber dem Projekt PEGASOS weitgehend unveränderten Expertenteams wurden wiederum beauftragt, Modelle für ihre Teilaufgaben zu entwickeln, die der Einschätzung der Fachwelt entsprechen. Gefordert war ein vorurteilsfreier Umgang mit den natur- und modellbedingten Unsicherheiten der Berechnung. Eine wichtige Bedingung bestand darin, dass die beauftragten Experten noch immer unabhängig waren und ihre Einschätzungen wiederum allein nach wissenschaftlichen Kriterien vornahmen.

Der Projektschlussbericht wurde dem ENSI Ende 2013 zur Prüfung eingereicht. Als Resultate wurden für die vier Standorte Gefährdungskurven und Beschleunigungsspektren erstellt. Überwiegend resultierten im PRP gegenüber PEGASOS geringere Streubreiten der Gefährdungskurven und ein geringeres Gefährdungsniveau. Die Aufschlüsselung (Deaggregation) der Gefährdungsergebnisse in Teilbeiträge bestätigte die Erkenntnis aus PEGASOS, wonach standortnahe Erdbeben mit relativ kleinen Magnituden zwischen 5 und 6 die Gefährdung stärker beeinflussen als weiter entfernte und stärkere Beben.

Beurteilung durch das ENSI

Das ENSI verfolgte das Projekt PRP von Projektbeginn an mit einem Team erfahrener Experten. In seinem abschliessenden Prüfbericht stellte das ENSI fest, dass mit den im PRP erarbeiteten Daten und Modellen der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der probabilistischen Erdbebengefährdungsanalyse erweitert wurde. Die in den eigentlichen Projektschwerpunkten, den Abminderungsmodellen (Teilprojekt 2) und den Standorteinflüssen (Teilprojekt 3), erarbeiteten Verfeinerungen wurden vom ENSI als fachgerecht anerkannt. Demgegenüber wurde das Teilprojekt 1 (Seismische Quellen) nach Ansicht des ENSI nicht ausreichend tief bearbeitet. Nachdem spät im Projektablauf erkannt worden war, dass sich die Modelländerungen im Teilprojekt 1 bedeutend auf die berechnete Erdbebengefährdung auswirkten, konnten die Experten ihre Einschätzungen nicht mehr hinterfragen bzw. bestätigen. Die Gefährdungsberechnung (Teilprojekt 4) wurde auf angemessene Weise bearbeitet und der Software-Einsatz entsprach der vom ENSI genehmigten Planung. Dennoch konnte das ENSI die Erdbebengefährdungsergebnisse des PRP aufgrund der Vorbehalte zur Bearbeitung des Teilprojekts 1 nicht akzeptieren.

Aufgrund der Vorbehalte zum PRP-Teilprojekt 1 liess das ENSI in einer Sensitivitätsanalyse diesen Modellteil durch den entsprechenden Modellteil des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED) ersetzen. Es zeigte sich, dass die Resultate dieses kombinierten «SED-PRP-Modells» oberhalb der Resultate der Rechenmodelle des PRP und des SED liegen. Im Mai 2016 verfügte das ENSI die Inkraftsetzung der als «Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015» bezeichneten Resultate des SED-PRP-Modells. Gleichzeitig forderte das ENSI die KKW-Betreiber auf, die Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage und insbesondere auf das Risiko zu bewerten. Dazu sind, betreffend Erdbeben, bis Ende 2018 die nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima im März 2011 vom ENSI geforderten Sicherheitsnachweise, bis Mitte 2019 die probabilistische Sicherheitsanalyse und bis Ende September 2020 die deterministische Störfallanalyse zu aktualisieren.

Résumé

Contexte

Les centrales nucléaires helvétiques font partie des structures les plus résistantes de Suisse du point de vue parasismique. Elles ont été conçues, construites et entretenues de manière à résister aussi à de forts séismes. Leur sécurité est constamment vérifiée à l'aide des méthodes d'analyse les plus récentes. Avec le projet PEGASOS (acronyme allemand correspondant à «analyse probabiliste de l'aléa sismique aux sites des centrales nucléaires suisses»), les sociétés exploitantes ont examiné en détail, entre 2001 et 2004, l'aléa sismique propre aux sites des centrales nucléaires, comme requis par l'IFSN (anciennement «Division principale de la sécurité des installations nucléaires»). L'IFSN a émis un avis globalement positif sur le projet PEGASOS et a pris, basées sur les conclusions du projet, des mesures visant à améliorer la sécurité sismique des centrales nucléaires suisses. Dans le même temps, l'IFSN a identifié des possibilités d'affiner les analyses, ce qui permettrait une réduction de l'ampleur des incertitudes dans les résultats de l'étude d'aléa.

PEGASOS Refinement Project PRP

Après la clôture du projet PEGASOS, un volume important de données sismiques a été collecté et de nouveaux modèles sismologiques ont été élaborés en Suisse et dans le monde. Dans le but de réduire l'incertitude dans les résultats de l'étude d'aléa et en prenant en considération ces nouvelles données et ces nouveaux modèles, les exploitants de centrales nucléaires ont démarré en 2008 le «PEGASOS Refinement Project» (PRP). De nouvelles lois d'atténuation de même que des analyses de sous-sol spécifiques aux sites ont été l'axe essentiel de l'affinement du modèle. Les équipes d'experts, essentiellement restées inchangées par rapport au projet PEGASOS, ont eu pour mission de développer à nouveau des modèles qui reflètent l'état actuel des connaissances. Un traitement sans préjugé des incertitudes relatives à la variabilité des phénomènes en présence ainsi que celles liées au modèle a été exigé. Pour cela, l'indépendance des experts mandatés ainsi qu'un fondement purement scientifique de leurs estimations représentent des conditions importantes.

Le rapport de fin de projet a été soumis à l'IFSN pour revue fin 2013. Les résultats sont constitués de courbes d'aléa et de spectres de fréquences propres aux quatre sites. Par rapport à PEGASOS, l'ampleur des incertitudes et le niveau de l'aléa ont été réduits. Le séquençage des résultats de l'aléa confirme les conclusions du projet PEGASOS, à savoir que les séismes proches du site ayant une magnitude entre 5 et 6 sur l'échelle de Richter influencent de manière plus importante l'aléa que les séismes plus lointains et plus forts.

Evaluation de l'IFSN

L'IFSN a suivi le projet PRP depuis son commencement à l'aide d'une équipe d'experts. Dans son rapport final, l'IFSN a observé que les données et modèles élaborés dans le cadre de PRP ont permis de contribuer à l'avancement de l'état de la science et de la technique dans le domaine de l'analyse probabiliste de l'aléa sismique. Les affinements réalisés dans les modèles d'atténuation (sous-projet 2) et les influences propres aux sites (sous-projet 3) ont été jugés appropriés par l'IFSN. À l'inverse, l'IFSN a jugé que le sous-projet 1 (sources sismiques) n'a pas été suffisamment approfondi. Tard dans l'avancement du projet, dès lors qu'il a été réalisé que les changements dans le modèle du sous-projet 1 auraient des conséquences significatives sur le calcul de l'aléa sismique, les experts n'ont pas pu remettre en question/confirmer leurs estimations. Le calcul de l'aléa (sous-projet 4) a été traité de manière appropriée et l'utilisation du logi-

ciel de calcul s'est faite conformément au calendrier validé par l'IFSN. Cependant, au vu des réserves concernant le traitement du sous-projet 1, l'IFSN n'a pas pu accepter les résultats de l'étude de l'aléa sismique PRP.

En raison des réserves concernant le sous-projet 1, l'IFSN a procédé à une analyse de sensibilité en remplaçant cette partie du modèle par la partie correspondante du modèle du Service Sismologique Suisse (SED). Cette analyse a montré que les résultats du modèle hybride «SED-PRP» sont plus élevés que les résultats du modèle PRP et du modèle SED. En mai 2016, l'IFSN a décidé la mise en vigueur des résultats du modèle hybride «SED-PRP» (en allemand: «Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015»). Dans le même temps, l'IFSN a requis des exploitants de centrales nucléaires qu'ils évaluent l'impact de ces nouvelles hypothèses d'aléa sur la sécurité de l'installation et en particulier sur le risque. Pour ce faire, l'analyse de sécurité sismique requise après la catastrophe de Fukushima en mars 2011 est à actualiser jusqu'à fin 2018, l'étude probabiliste de sécurité «séisme» jusqu'à mi-2019 et l'analyse déterministe de séisme jusqu'en septembre 2020.

Summary

Background

Swiss nuclear power plants (NPPs) are amongst the most earthquake-proof structures in Switzerland. They have been designed, built and upgraded so that they can withstand even strong earthquakes. Their safety is subject to constant checking using state-of-the-art analysis methods. To comply with an ENSI requirement, the nuclear power plant operators carried out a thorough investigation into the seismic hazard at the NPP sites from 2001 to 2004 within the scope of the PEGASOS (German acronym for «probabilistic seismic hazard analysis for Swiss nuclear power plant sites») project. ENSI's assessment of the PEGASOS project was mainly positive. Based on the project results, ENSI took measures to further enhance the earthquake safety of the Swiss NPPs. ENSI also highlighted potential refinements which could help to decrease the substantial spread of the hazard results.

The PEGASOS Refinement Project PRP

After completion of the PEGASOS project, substantial new seismic data were gathered and significant new seismic models were developed both in Switzerland and worldwide. In 2008, the NPP operators launched the «PEGASOS Refinement Project» (PRP) with the aim of reducing the spread of the hazard analysis results by incorporating the new data and models. The emphases of the refinements related to the new ground motion attenuation laws and in the new site-specific soil investigations. The expert teams, which were mainly unchanged since PEGASOS, were again required to develop models reflecting the view of the technical community. The expert teams were required to adopt an unbiased approach to uncertainties of both natural and model-induced origin within the calculation. An important requirement was that the contracted experts remained independent and would again base their assessments solely on scientific criteria.

The final project report was submitted for review to ENSI at the end of 2013. The results of the project comprised hazard curves and uniform hazard spectra compiled for each of the four sites. In comparison with PEGASOS, the level of the computed seismic hazard was generally lower while the spread of the hazard results was also generally smaller. A breakdown (disaggregation) of the seismic hazard results into partial contributions confirmed the findings of the PEGASOS project according to which nearby earthquakes with relatively low magnitudes between 5 and 6 have higher hazard contributions than stronger and more distant earthquakes.

Assessment by ENSI

ENSI closely followed the PRP project from its inception with an experienced expert team. In its final review report ENSI acknowledged that the state-of-the-art in probabilistic seismic hazard assessment was further improved by the PRP project. ENSI assessed the achieved refinements in the project focal points – the «ground motion characterization» (subproject 2) and the «site response characterization» (subproject 3) – to be well-founded. In contrast, the «seismic source characterization» (subproject 1) was not investigated in sufficient detail, according to ENSI. After it became evident late in the project that the model modifications in subproject 1 had a significant influence on the computed seismic hazard, the experts did not have the opportunity to question or to confirm their assessments anymore. The «seismic hazard computation» (subproject 4) was conducted in an appropriate manner and the applied software met the accepted specification. Nevertheless, due to the concerns regarding subproject 1, ENSI could not accept the final results of the PRP.

Due to the reservations concerning PRP subproject 1, ENSI initiated a sensitivity analysis in which the model for subproject 1 was replaced by the corresponding model of the Swiss Seismological Service (SED). The results of this combined «SED-PRP model» were found to be higher than the results of both the PRP and the SED model. In May 2016, ENSI ordered the implementation of the results of the «SED-PRP model», denoted as seismic hazard assumptions ENSI-2015 (in German «Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015»). At the same time ENSI required the NPP operators to assess the consequences on the safety of the nuclear power plant and, in particular, on the risk. To this end the NPP operators must update the following in respect of earthquakes: a) by the end of 2018 the safety cases originally required by ENSI after the Fukushima reactor catastrophe in March 2011, b) by mid-2019 the probabilistic safety analysis, and c) by the end of September 2020 the deterministic safety analysis.

Inhaltsverzeichnis

1 Veranlassung für das PRP	10
1.1 Ausgangslage nach Abschluss des Projekts PEGASOS	10
1.2 Neue Erkenntnisse	10
2 Das PEGASOS Refinement Project PRP	11
2.1 Zielsetzung	11
2.2 Projektorganisation	11
2.3 Teilprojekt 1: Seismische Quellen	13
2.4 Teilprojekt 2: Abminderungsgesetze	14
2.5 Teilprojekt 3: Standorteinflüsse	15
2.6 Teilprojekt 4: Gefährdungsberechnung	15
2.7 Teilprojekt 5: Erdbebenszenarien	16
2.8 Zeitlicher Ablauf des PRP	16
3 Resultate des PRP	16
3.1 Gefährdungskurven	16
3.2 Antwortspektren der Bodenbeschleunigung (UHS)	17
3.3 Deaggregation der Gefährdung	18
3.4 Sensitivitätsstudien	19
4 Beurteilung durch das ENSI	19
4.1 Prüfvorgehen	19
4.2 Prüfergebnis	20
5 Erwägungen	20
5.1 Sensitivitätsstudie mit SED-PRP-Modell	20
5.2 Untersuchungen nach Fukushima	22
6 Entscheid und Massnahmen	23
Abkürzungen	24
Referenzen	24

1 Veranlassung für das PRP

1.1 Ausgangslage nach Abschluss des Projekts PEGASOS

Für den sicheren Betrieb der Schweizer Kernkraftwerke (KKW) sind fundierte Kenntnisse der Erdbebensicherheit unerlässlich. Bereits beim Bau der KKW wurde der Erdbebensicherheit grosse Aufmerksamkeit geschenkt. Für Kernanlagen gelten weitaus strengere Bestimmungen als für Normalbauten. Die Methoden zur erdbebensicheren Bemessung von Bauten und Komponenten sowie der Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Anlagen wurden im Laufe der Jahre immer wieder weiterentwickelt. Die Schweizer KKW sind so geplant, gebaut und nachgerüstet, dass sie auch starken Erdbeben standhalten. Sie gehören zu den erdbebensichersten Bauten der Schweiz.

Das ENSI (damals «Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen» HSK) forderte die Kernkraftwerkbetreiber im Jahre 1999 auf, die Erdbebengefährdung nach dem fortschrittlichsten Stand der methodischen Grundlagen neu zu bestimmen und dabei insbesondere die Unschärfe der Rechenergebnisse umfassend zu quantifizieren. Das daraufhin von den Kernkraftwerkbetreibern durchgeführte Projekt PEGASOS (Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz) gründete auf der strengsten Anforderungsstufe einer damals in den USA vom «Senior Seismic Hazard Analysis Committee» (SSHAC) neu entwickelten Methode der strukturierten Expertenbefragung [1]. Mit dem wissenschaftlich geprägten Projekt PEGASOS betrat die Schweiz Neuland. Bis heute wurde in keinem anderen europäischen Land eine Studie dieser Art durchgeführt.

Das ENSI beurteilte das Projekt PEGASOS überwiegend positiv und ergriff basierend auf den Projektergebnissen Massnahmen zur weiteren Verbesserung der Erdbebensicherheit der Schweizer KKW. In seinem Prüfbericht wies das ENSI aber auch auf mögliche Verfeinerungen hin und zeigte Modellbereiche auf, in welchen mit vertieften Abklärungen die in PEGASOS recht gross ausgefallene Bandbreite der Unsicherheiten reduziert werden könnte.

Der auf Englisch verfasste Schlussbericht des Projektes PEGASOS wurde 2006 veröffentlicht und kann heute von der Website der Swissnuclear¹ bezogen werden. Ein zusammenfassender Bericht auf Deutsch ist auf der Website des ENSI aufgeschaltet [2].

1.2 Neue Erkenntnisse

Nach Abschluss des Projekts PEGASOS im Jahre 2004 wurden sowohl national als auch weltweit in bedeutendem Umfang Erdbeben­daten gesammelt und seismologische Modelle erarbeitet. Insbesondere die folgenden Entwicklungen sprachen dafür, die Gefährdungsermittlung weiter zu verfeinern:

- Der Katalog der historischen Erdbeben im Einflussbereich auf die Schweiz wurde vom Erdbe­bendienst an der ETH Zürich aktualisiert. Dazu gehört auch die verfeinerte Einschätzung der Erdbebenstärken (Magnituden), welche die Gefährdungsermittlung massgeblich beeinflussen.
- Die Anzahl der Erdbebenaufzeichnungsstationen nimmt weltweit laufend zu. Zahlreiche neuere Messdaten aus starken Erdbeben konnten registriert und ausgewertet werden.
- Erdwissenschaftler und Erdbebenexperten entwickelten auf der Grundlage der neuen Daten neue Abminderungsgesetze. Im Vordergrund standen dabei mit «Next Generation Attenuation Models» (NGA) bezeichnete Forschungsarbeiten.

¹ Die Swissnuclear ist die Fachgruppe Kernenergie der Swisselectric, einer Organisation schweizerischer Stromverbundunternehmen, die Schweizer Kernkraftwerke betreiben oder Aktionär der Betreiber­gesellschaften sind

- Die geotechnischen Eigenschaften des Baugrunds an den KKW-Standorten waren im Projekt PEGASOS relativ grob bekannt. Mit Bohrungen und mit Messungen am Standort und in Prüflabors konnte die Datenbasis erheblich verdichtet werden.

2 Das PEGASOS Refinement Project PRP

2.1 Zielsetzung

Mit dem Ziel, die Unschärfe der PEGASOS-Ergebnisse zu reduzieren, wurde das PEGASOS-Verfeinerungsprojekt PRP im Jahr 2008 von den Kernkraftwerkbetreibern gestartet. Die Hauptthemenkreise des von der Swissnuclear geleiteten PRP waren wie bereits bei PEGASOS die Charakterisierung der Erdbebenherde, der Wellenausbreitung und der lokalen Effekte an den Standorten der Kernkraftwerke.

Das besondere Ziel des PRP war es, die neuen seismologischen Daten und Modelle zu nutzen und damit die Streubreite der Gefährdungsergebnisse zu reduzieren. Eine mehrfache Berücksichtigung gleicher oder ähnlicher Unsicherheitseinflüsse sollte vermieden werden. Die Schwerpunkte der Verfeinerungen lagen in den neuen Abminderungsgesetzen und in den standortspezifischen Baugrunduntersuchungen.

Der Umgang mit den Unsicherheiten der Berechnung sollte weiterhin den höchsten Anforderungen (Stufe 4) der SSHAC-Empfehlungen [1] genügen. Die Aufgabe der, gegenüber PEGASOS weitgehend unveränderten, renommierten Expertenteams aus dem In- und Ausland, bestand wiederum darin, Modelle in ihrem Aufgabenbereich zu entwickeln, welche den Kenntnisstand der massgebenden Fachwelt gesamthaft abbilden. Dabei galt es erneut, systematisch zu unterscheiden zwischen den Unsicherheiten, die naturbedingt und zufälliger Art und somit nicht eliminierbar sind (aleatorische Unsicherheiten), und den Unsicherheiten, die mit der Modellbildung verknüpft sind und durch Steigerung des Wissens verkleinert werden könnten (epistemische Unsicherheiten).

2.2 Projektorganisation

Bild 1 zeigt die Projektorganisation mit den beteiligten Projekt- und Expertengruppen. Die technische Bearbeitung erfolgte in den fünf Teilprojekten (Subprojects) SP1 bis SP5 und wurde Ende 2013 mit dem Bericht [3][1] abgeschlossen. Eine wichtige Bedingung bestand darin, dass die beauftragten Experten unabhängig waren und damit ihre Einschätzungen nach rein wissenschaftlichen Kriterien vornehmen konnten.

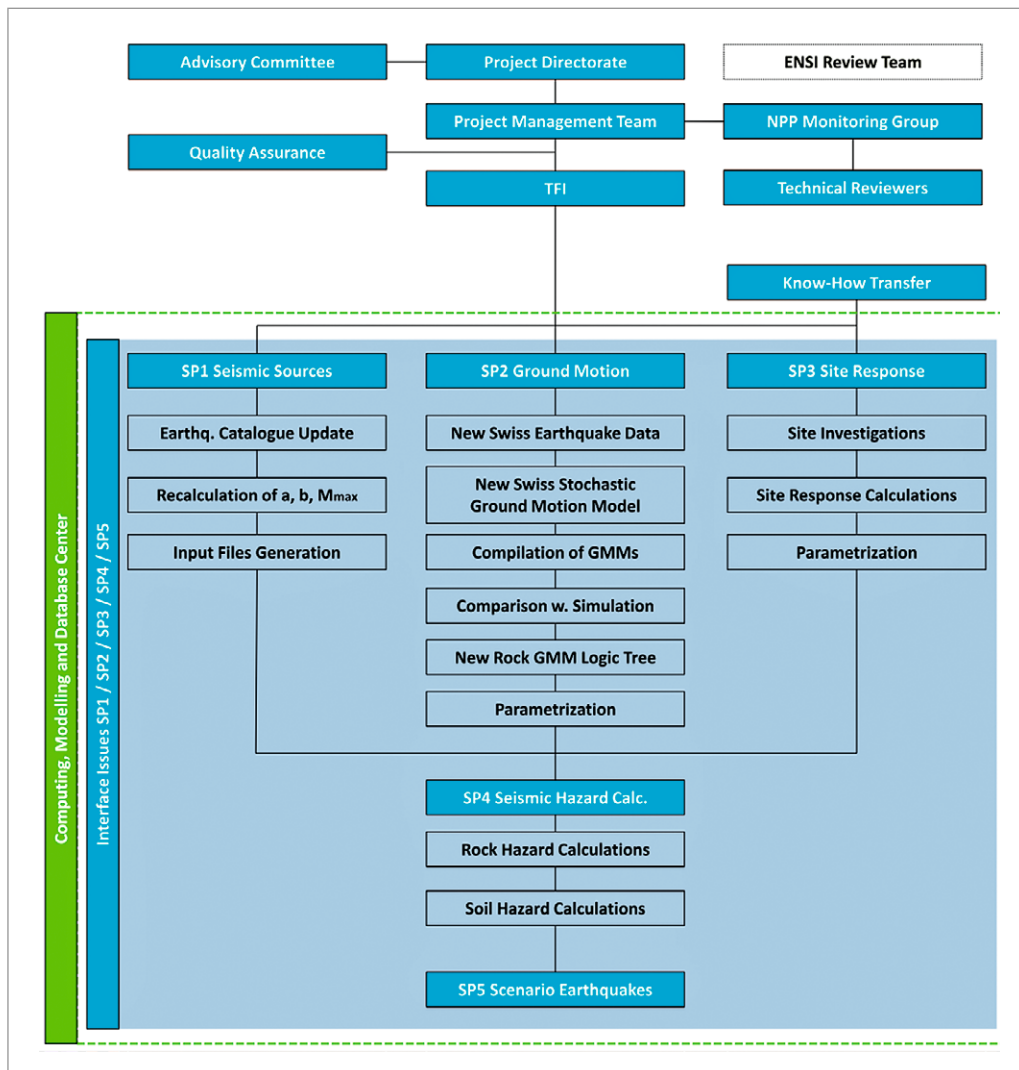
Die verschiedenen Begleitemps hatten folgende steuernde, beratende und beaufsichtigende Aufgaben:

Das *Project Management Team (PMT)* war verantwortlich für die Organisation und Durchführung des Projekts. Es fällte die für den Projektablauf massgebenden Entscheide, im Rahmen des Projektbudgets und des Zeitplans und in Abstimmung mit dem Technical Facilitator/Integrator (TFI). Es organisierte die Workshops und Meetings, den Informationsfluss und die Dokumentation.

Der *Technical Facilitator/Integrator (TFI)* hatte die technische Gesamtverantwortung. Er überblickte und begleitete die von den Experten entwickelten Modelle. Er leitete und unterstützte die Diskussion und den Erfahrungsaustausch unter den Experten. Er sorgte für eine kompetente Bearbeitung der Schnittstellen und für die nachvollziehbare Dokumentation der Prozesse.

Die *Quality Assurance (QA)* stellte sicher, dass alle Projektarbeiten formal korrekt nach den projektspezifischen QA-Richtlinien durchgeführt und dokumentiert wurden.

Bild 1:
Projektorganisation PRP,
aus [3].



Das *ENSI Review Team (ENSI-RT)* war ein vom ENSI im Rahmen der behördlichen Überprüfung beauftragtes Expertenteam. Es besuchte die Projekt-Workshops als Beobachter, verfasste zu jedem Workshop einen Prüfbericht und führte eine abschliessende Prüfung des Projektschlussberichts durch.

Das *Project Directorate* verkörperte den Auftraggeber Swissnuclear. Seitens des Projektes wirkte es als übergeordnete Überwachungsstelle und legte die Projektziele fest. Es prüfte und genehmigte die Projektplanung mit den vorgesehenen Leistungen, den Kostenbudgets und dem Zeitplan und es überprüfte den Projektfortschritt.

Das *Advisory Committee* bestand aus weltweit anerkannten Experten mit breiter Erfahrung im Bereich der Erdbebengefährdungsanalyse. Es besuchte ausgewählte Projekt-Workshops als Beobachter und unterstützte das Project Directorate bei Bedarf beratend.

Die *NPP Monitoring Group* bestand aus Vertretern der vier Schweizer Kernkraftwerke. Sie verfolgte die Projektentwicklung beobachtend. Sie stellte sicher, dass die spezifischen Bedürfnisse der KKW für die spätere Anwendung berücksichtigt wurden.

Die *Technical Reviewers* unterstützten das PMT und die Monitoring Group bei Bedarf mit ihrem Fachwissen und ihrer Erfahrung. Sie nahmen an ausgewählten Projekt-Workshops als Beobachter teil und sie verfassten Stellungnahmen zu technischen Fragen zuhanden des PMT.

Mit dem *Know-how-Transfer* sollte das erarbeitete Wissen möglichst breit an Fachleute weiter-

gegeben und für die Zukunft erhalten werden. Zu diesem Zweck wurden Ausbildungsseminare durchgeführt, welche einem grösseren Kreis interessierter Fachpersonen zugänglich waren.

2.3 Teilprojekt 1: Seismische Quellen

Aus den Daten der Erdbebenkataloge und aus weiteren seismotektonischen und geophysikalischen Grundlagen entwickelten die Experten Modelle für die in der Gefährdungsanalyse zu berücksichtigenden Erdbebenherde, die so genannten seismischen Quellen. Als seismische Quelle wurden sowohl diskrete (linienförmige) Verwerfungen als auch Flächenquellen, d.h. Gebiete mit homogenen seismischen Eigenschaften, identifiziert. Für jede Quelle wurden die seismischen Eigenschaften ermittelt. Zum Beispiel wurde die Erdbebenaktivität jeder Quelle in Form einer Magnituden-Häufigkeits-Beziehung bestimmt. Bild 2 zeigt ein Beispiel eines Quellenmodells aus dem PRP.

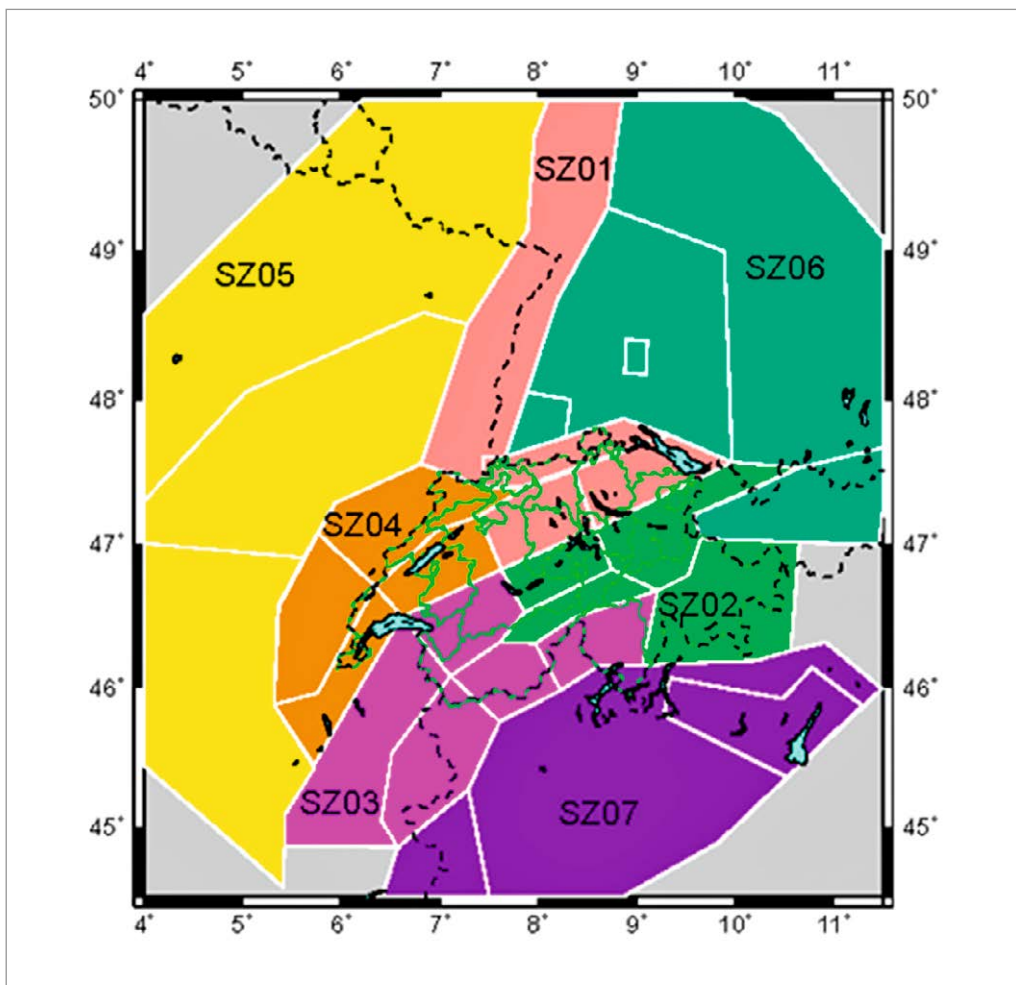


Bild 2:
Beispiel eines im Teilprojekt 1 verwendeten seismischen Quellenmodells [3]. Die Flächenquellen sind auf einer geographischen Karte dargestellt.

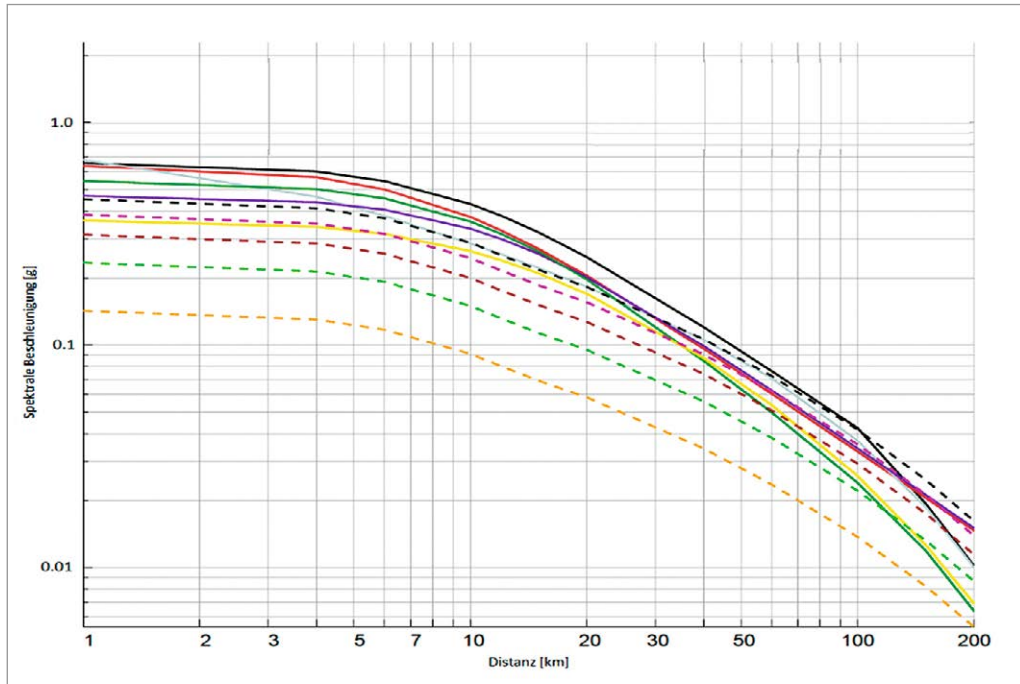
Die seismischen Quellen wurden im PRP im Wesentlichen aus PEGASOS übernommen. Eine wichtige Änderung war dennoch zu berücksichtigen: Der Schweizerische Erdbebendienst hatte die in PEGASOS verwendete Version des Erdbebenkatalogs (ECOS02) aufgrund neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse aktualisiert. Im Projekt PRP war die neue Version (ECOS09) als Grundlage zu verwenden. Die Experten des Teilprojekts 1 hatten deshalb zu beurteilen, inwiefern ihre Quellenmodelle dem aktualisierten Erdbebenkatalog anzupassen waren. Sie kamen zum Schluss, dass die in ihren Modellen gewählten Zonierungen auch im Rahmen des PRP verwendbar blieben. Die jeder Quelle zugewiesene Magnituden-Häufigkeits-Beziehung musste

aber den aktualisierten Daten gemäss ECOS09 angepasst werden. Dazu war auch die Neubeurteilung der in den Quellen zu erwartenden maximalen Erdbeben-Magnituden erforderlich.

2.4 Teilprojekt 2: Abminderungsgesetze

Die mit zunehmender Distanz vom Erdbebenherd zu verzeichnende Abnahme der Bodenerschütterung wird mit Abminderungsgesetzen beschrieben (Bild 3). Diese Beziehungen zwischen Bodenerschütterung und Distanz werden auf Referenzbedingungen bezogen, wie sie für Fels in einer tiefer gelegenen Bodenschicht gelten, und sind zudem abhängig von der Erdbeben-MagnITUDE und der Schwingungsfrequenz.

Bild 3:
Beispielhafte Darstellung von im PRP betrachteten Abminderungsgesetzen, vereinfacht aus [3]; Beziehung zwischen der spektralen Bodenbeschleunigung für die Frequenz von 5 Hertz und der Distanz zwischen Erdbebenherd und Standort, hier dargestellt für Erdbeben der Magnitude $M_w = 6$.



Im Teilprojekt 2 wurden zahlreiche neue Erkenntnisse ausgewertet. Hintergrund war, dass in den vergangenen Jahren die Datenbasis an Erdbebenaufzeichnungen national und weltweit stark erweitert wurde und darauf basierend neue Modellierungsansätze entstanden. Die folgenden Arbeiten haben im Teilprojekt 2 bedeutend zur Verfeinerung der Erdbebengefährdungsanalyse beigetragen:

- Alle neueren Erdbebenaufzeichnungen des Schweizerischen Erdbebendienstes aus der Zeitperiode 2000–2008 wurden untersucht und mitberücksichtigt. Dabei wurden auch die seismischen Standorteigenschaften bei den Messgeräten vertieft analysiert.
- Die in internationalen Forschungsprojekten in neuerer Zeit, vorwiegend für seismisch aktive Regionen, entwickelten Abminderungsgesetze (Ground Motion Prediction Equations, GMPE) wurden systematisch bezüglich ihrer Eignung für die Schweizer Standorte evaluiert. In einem mehrstufigen Verfahren wurde ein Satz von zehn GMPEs für die Verwendung im PRP ausgewählt.
- Spezifisch für die Schweiz wurde ein neues Abminderungsmodell mit einer unabhängigen Methode entwickelt. Es basiert auf der Theorie der Zufallsschwingungen und wird als «Point Source Stochastic Model» (PSSM) bezeichnet.
- In Bezug auf die Übertragung der, für spezifische Regionen entwickelten, Abminderungsgesetze auf die Standorte der KKW wurden als massgebende Parameter, zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Felsqualitäten im Untergrund, die Schwerwellengeschwindigkeit v_s und der Abminderungsterm Kappa für hochfrequente Schwingungsanteile erkannt.

- Neuste geophysikalische Modelle und Berechnungsmethoden zur Simulation des Bruchvorgangs in der Erdkruste und der Ausbreitung der Erdbebenwellen an die Erdoberfläche (Finite Fault Simulations, FFS) wurden in die Untersuchungen einbezogen.
- Bei der Berücksichtigung der Unsicherheiten wurde besonders darauf geachtet, dass Streubreiten in den Teilprojekten 2 und 3 nicht doppelt gezählt wurden.

2.5 Teilprojekt 3: Standorteinflüsse

Der Einfluss des Baugrunds auf die lokale Ausbreitung der Bodenerschütterung wurde in diesem Teilprojekt für jeden KKW-Standort spezifisch untersucht. Dabei wurde der Verlauf der Bodenbeschleunigung durch die verschiedenen Bodenschichten unterhalb des Kraftwerks (vom Referenzfelsniveau bis zur Terrainoberfläche) betrachtet.

Im Rahmen des PRP wurden an allen vier KKW-Standorten zahlreiche neue Bohrungen im Baugrund bis weit in den Felsuntergrund durchgeführt. Die Bohrprofile wurden sowohl am Standort als auch im Labor messtechnisch ausgewertet. In Kombination mit ergänzenden geophysikalischen Messungen an der Terrainoberfläche wurden daraus repräsentative Bodenprofile hergeleitet (Bild 4). Mit numerischen Modellen wurde anschliessend das dynamische Verhalten der oberflächennahen Bodenschichten und die daraus resultierende Veränderung der Erdbebenanregung im Bodenprofil vom Felsuntergrund bis an die Oberfläche berechnet.

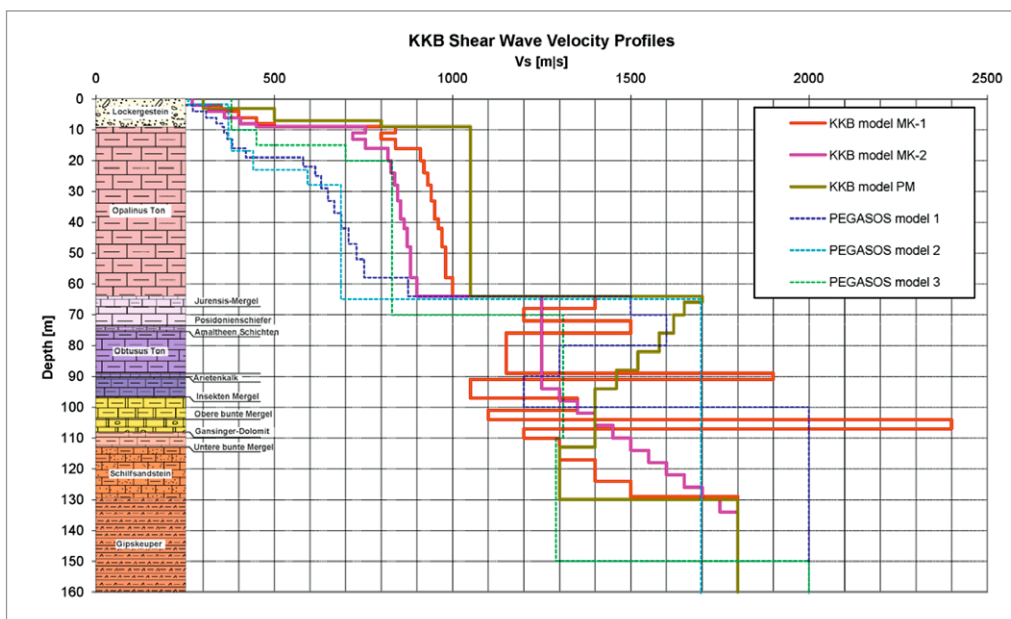


Bild 4: Beispiel für die standortspezifischen Bodenprofile, aus [3]; Unterschiedliche Interpretationen der Scherwellengeschwindigkeiten im Baugrund des KKW Beznau, im Tiefenbereich bis 160 m unter Terrainoberfläche.

2.6 Teilprojekt 4: Gefährdungsberechnung

Das Teilprojekt 4 führte die eigentliche Berechnung der Erdbebengefährdung durch. Dazu wurden die in den Teilprojekten 1, 2 und 3 entwickelten Modelle übernommen und als Eingabe verwendet. Neu im Rahmen des PRP wurde in Anbetracht der Vielzahl von berechneten Modellkombinationen die Technik der Monte-Carlo-Simulation verwendet.

Die berechneten Gefährdungsergebnisse wurden mit den zugehörigen Streubereichen grafisch übersichtlich aufbereitet und in Teilbeiträge von Erdbebenruppen ähnlicher Magnitude und Distanz aufgeschlüsselt. Ferner wurde im Teilprojekt 4 untersucht, wie sich einzelne Modellteile oder Berechnungsannahmen auf die Gefährdungsergebnisse auswirkten. In solche Sensitivitätsana-

lysen hatten die Experten der Teilprojekte 1 bis 3 bereits im Projektverlauf Einsicht erhalten. In Kapitel 3 wird näher auf die berechneten Gefährdungsergebnisse eingegangen.

2.7 Teilprojekt 5: Erdbebenszenarien

Es wurde damit begonnen, aus den Gefährdungsergebnissen weitere Eingabedaten für die Berechnung des Bauwerkverhaltens im Erdbebenfall abzuleiten. Von besonderem Interesse waren zeitliche Verläufe der Bodenbeschleunigung, welche die berechnete Erdbebengefährdung konform repräsentieren. Gegenüber PEGASOS wurden die Arbeiten des Teilprojekts 5 als neues Element in das Projekt aufgenommen. Sie wurden als Folgeprojekt ausserhalb der für das PRP sonst geltenden Qualitätsanforderung, SSHAC Stufe 4, verfolgt und im Schlussbericht [3] nicht dokumentiert. Es war vorgesehen, die Arbeiten nach Abschluss des PRP weiterzuführen.

2.8 Zeitlicher Ablauf des PRP

Das PRP wurde mit dem Kickoff-Meeting vom 1. bis 3. September 2008 gestartet und seitens der Swissnuclear mit dem Schlussbericht [3] Ende Dezember 2013 abgeschlossen.

Anfänglich war eine kürzere Projektdauer von weniger als vier Jahren vorgesehen. Die Untersuchungen des Teilprojekts 2 erwiesen sich jedoch als wesentlich aufwändiger als erwartet. Insbesondere die standortspezifischen Korrekturen der Abminderungsgesetze (v_s -Kappa-Korrekturen) hatten entscheidenden Einfluss auf die Gefährdungsergebnisse im Bereich der hohen Schwingungsfrequenzen. Die Untersuchungen dazu hatten Forschungscharakter und waren entsprechend zeitaufwändig.

3 Resultate des PRP

Die Resultate der Gefährdungsberechnungen sind im Band 2 des Berichts [3] separat dokumentiert. Dargestellt sind die Gefährdungskurven und Antwortspektren der Bodenbeschleunigung, die als Deaggregation bezeichnete Aufschlüsselung der Gefährdungsergebnisse nach Teilbeiträgen sowie die Ergebnisse von Sensitivitätsstudien und Resultatvergleichen.

3.1 Gefährdungskurven

Die standortspezifische Gefährdungskurve stellt dar, wie häufig damit zu rechnen ist, dass Erdbeben an dem betrachteten Ort dazu führen, dass bestimmte Werte der Bodenerschütterung überschritten werden. Im PRP sind dabei auch aussergewöhnlich seltene, extrem starke Erdbeben erfasst. Der Bereich der ausgewiesenen Überschreitungshäufigkeiten reicht von ca. $1 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr bis hin zu lediglich $1 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr. Die Bodenerschütterung ist im PRP anhand der «spektralen Beschleunigung» in Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz und für den Frequenzbereich von 0,5 Hertz bis 100 Hertz ausgewiesen, wobei der 100-Hertz-Wert auch als Näherung für die Starrkörperbeschleunigung bzw. «peak ground acceleration» (PGA) verwendet ist.

Für jeden der vier KKW-Standorte (Beznau, Gösgen, Leibstadt und Mühleberg) sind die Gefährdungskurven für das Referenzfelsniveau, für das Fundamentniveau des Reaktorgebäudes und für die Terrainoberfläche berechnet. Für die horizontale und die vertikale Beschleunigungskomponente sind separate Gefährdungskurven ermittelt. Neben der Mittelwertkurve (Mean) ist für jede Gefährdungskurve die Unsicherheitsverteilung anhand der Mediankurve (50%-Fraktile) und weiterer Fraktilkurven im Bereich von 5% bis 95% angegeben.

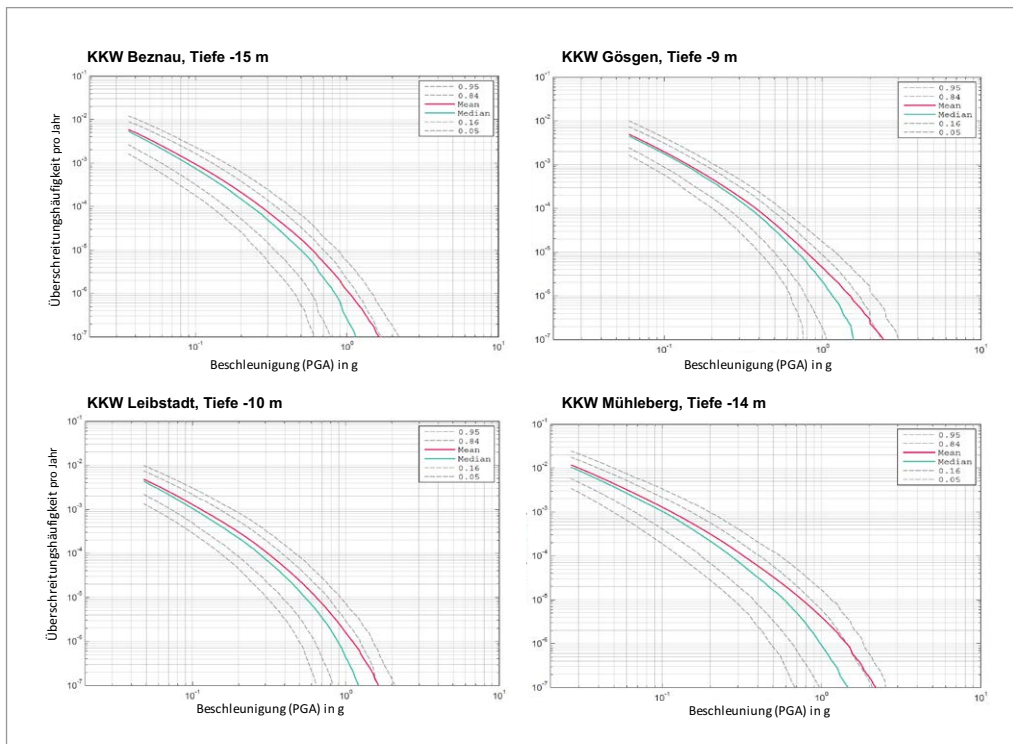


Bild 5: Gefährdungskurven aus PRP, an den vier Standorten; horizontale Beschleunigungs-komponente (PGA) auf Fundamentniveau des Reaktorgebäudes.

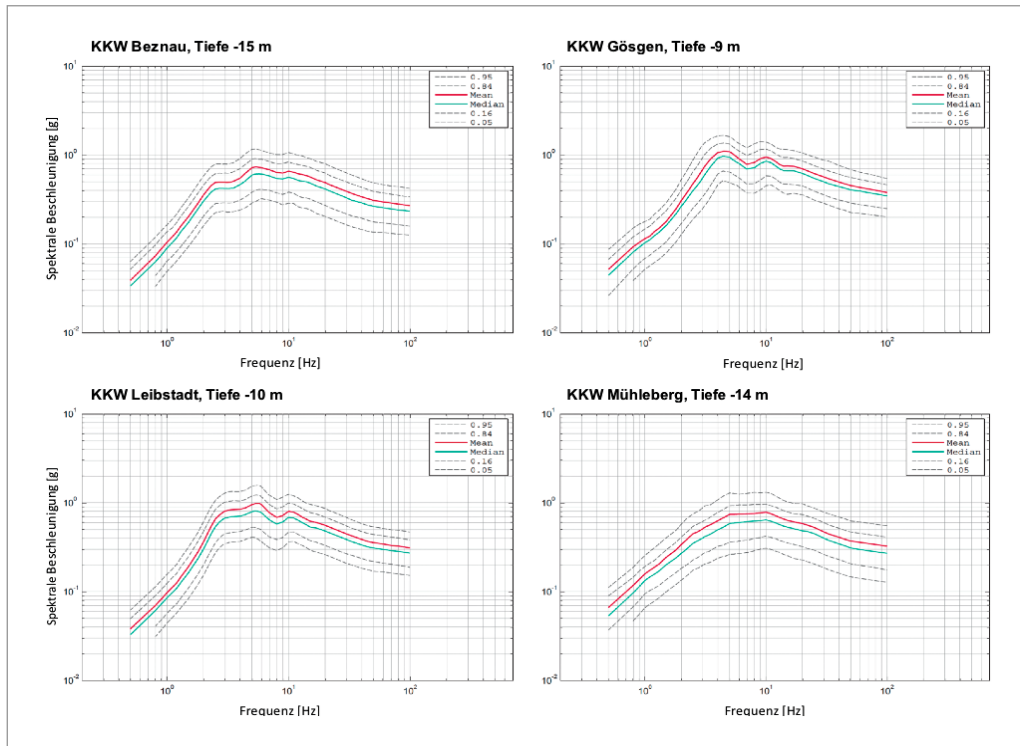
Bild 5 zeigt für die vier Standorte anhand des Niveaus des Reaktorgebäudefundamentes und der Horizontalkomponente der PGA typische Beispiele zu den im PRP berechneten Gefährdungskurven, inklusive der zugehörigen Streubreiten. Überwiegend resultierten im PRP gegenüber PEGA-SOS geringere Streubreiten der Gefährdungskurven und ein geringeres Gefährdungsniveau.

3.2 Antwortspektren der Bodenbeschleunigung (UHS)

Die Antwortspektren der Bodenbeschleunigung oder engl. «uniform hazard spectra» (UHS) sind eine alternative Darstellung der ansonsten in den Gefährdungskurven vollumfänglich enthaltenen Information. Sie sind von praktischer Bedeutung und eignen sich zum Beispiel als Grundlage für die Beurteilung oder Festlegung der Erdbebeneingabe (Bemessungserdbeben) in die Berechnung der Bauwerke. In der Darstellung als UHS ist die Abhängigkeit der Bodenbeschleunigung von der Schwingungsfrequenz für eine feste Überschreitungshäufigkeit der Bodenbeschleunigung erkennbar. Bild 6 zeigt typische Beispiele von UHS, berechnet für das Niveau des Reaktorgebäudefundaments an den vier Standorten. Die Bodenerschütterung hat ihre stärksten Schwingungsanteile im Frequenzbereich zwischen 2 und 20 Hertz.

Bild 6

«Uniform hazard spectra» aus PRP, an den vier Standorten; horizontale Beschleunigungskomponente auf Fundamentniveau des Reaktorgebäudes, Überschreitungshäufigkeit $1 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr, 5% Dämpfung.

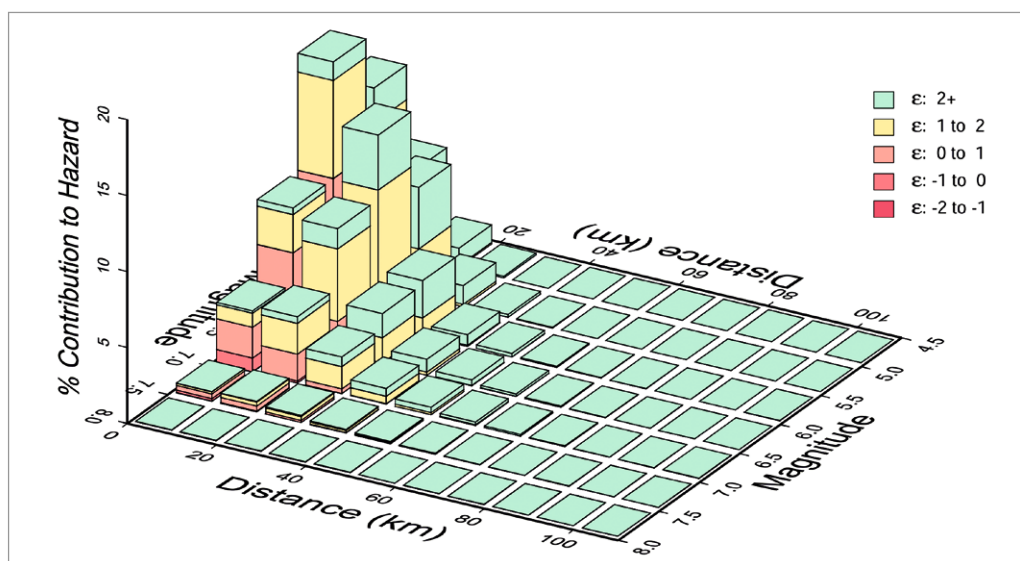


3.3 Deaggregation der Gefährdung

Im Rahmen der Auswertung und Interpretation der Rechenergebnisse wurde die ermittelte Erdbebengefährdung deaggregiert, das heisst in Teilbeiträge aufgelöst. Als Parameter wurden dabei die Erdbebenmagnitude, die Distanz zwischen Erdbebenherd und Standort sowie die Anzahl Standardabweichungen in der für jedes Magnitude-Distanz-Szenario definierten Verteilung der Bodenerschütterung, verwendet. Durch die Deaggregation ist erkennbar, welche Erdbebenszenarien massgeblich zur berechneten Gefährdung beitragen. Generell bestätigt die Deaggregation die Erkenntnis aus PEGASOS, wonach für alle Schweizer KKW die standortnahen Erdbeben mit relativ kleinen Magnituden zwischen 5 und 6 mehr zur Gefährdung beitragen als weiter entfernte und stärkere Beben. Anhand eines Beispiels für das KKW Gösgen zeigt Bild 7 ein typisches Ergebnis einer Deaggregation.

Bild 7:

Deaggregation der Erdbebengefährdung aus PRP, an einem Beispiel für das KKW Gösgen; Referenzfelsniveau, horizontale Beschleunigungskomponente (PGA), Überschreitungshäufigkeit $1 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr.



3.4 Sensitivitätsstudien

Die mit den Gefährdungsergebnissen durchgeführten Sensitivitätsstudien führen zu folgenden Erkenntnissen:

- Bedeutende seismische Quellen

Die Sensitivitätsstudien bestätigen die aus der Deaggregation der Erdbebengefährdung gewonnene Erkenntnis, dass die standortnahen seismischen Quellen die Gefährdung massgeblich bestimmen. In den meisten Fällen liefert die Flächenquelle, in welcher der Standort liegt, den grössten Beitrag an die Gefährdung.

- Einfluss der Experten

Der Einfluss der einzelnen Experten erweist sich im Vergleich zu der Unsicherheit, die die einzelnen Experten bzw. Expertengruppen ihren eigenen Modellen zuordneten, als eher gering. Dies deutet darauf hin, dass die Experten bei der Festlegung ihrer Modellparameter keine extremen Positionen vertraten.

- Unsicherheitsbeiträge

Die systematische Aufschlüsselung der Gefährdungsergebnisse in Einzelbeiträge zeigt auf, welche Modellteile und Modellparameter in den Teilprojekten 1 bis 3 massgeblich zu den resultierenden Streubreiten beitragen. Diesbezüglich hervorzuheben sind im Teilprojekt 1 die maximal möglichen Erdbebenmagnituden in den standortnahen Flächenquellen, im Teilprojekt 2 die Abminderungsgesetze und deren Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Felsqualitäten im Untergrund (v_s -Kappa-Korrektur) sowie im Teilprojekt 3 die Bodenprofile und die Materialgesetze für die Bodenschichten.

Ein Gesamtvergleich der Beiträge der drei Teilprojekte an die Unsicherheit zeigt eine relativ ausgewogene Verteilung. Dieses Ergebnis ist eine Folge der Verfeinerungen im Teilprojekt 2 und steht im Gegensatz zum Projekt PEGASOS, wo die eingeschätzten Unsicherheiten in den Abminderungsmodellen überwiegend an die Streuung der Gefährdungsergebnisse beitrugen.

4 Beurteilung durch das ENSI

4.1 Prüfvorgehen

Das ENSI überprüfte das PRP von Projektbeginn an. Der Richtlinie ENSI-A05 folgend und in Anlehnung an die dem PRP zugrundeliegenden Empfehlungen des «Senior Seismic Hazard Analysis Committee» (SSHAC) [1] war das Prüfvorgehen des ENSI in eine begleitende (participatory) und eine abschliessende (late-stage) Review unterteilt. Zur fachtechnischen Unterstützung der Prüfarbeiten beauftragte das ENSI ein Expertenteam mit ausgewiesener Erfahrung im Bereich der probabilistischen Erdbebengefährdungsanalyse. Das als ENSI Review Team (ENSI-RT) bezeichnete Expertenteam setzte sich aus drei externen Experten und einem Mitarbeiter des ENSI zusammen. Alle Teammitglieder waren zuvor auch schon mit der Überprüfung des Projektes PEGASOS beauftragt.

Während der Participatory-Review besuchte das ENSI jeden Workshop des PRP als Beobachter, unterrichtete die Projektleitung am Ende des Workshops über die festgestellten Stärken und Schwächen und verfasste anschliessend einen Prüfbericht zuhanden der Swissnuclear. Mit diesem Vorgehen wurde möglichst vermieden, dass die Experten der einzelnen Teilprojekte in ihrer erdwissenschaftlichen Meinungsbildung durch die Prüfkommentare des ENSI beeinflusst wurden. Inhalte der Late-stage-Review waren die vertiefte Prüfung der abschliessenden Projektdokumentation, die Nachforderung und Auswertung zusätzlicher Informationen zum Projekt, die Einordnung der Prüfkommentare aus der Participatory-Review und die Erstellung des abschliessenden Berichtes des ENSI zum PRP.

4.2 Prüfergebnis

Im Kern gelangte das ENSI in dem auf Englisch verfassten abschliessenden Prüfbericht [4] zu folgenden Schlüssen.

- Im PRP wurden wichtige neue Daten und Modelle erarbeitet, welche den Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der probabilistischen Erdbebengefährdungsanalyse erweitern.
- Während der Projektentwicklung wurden im PRP wertvolle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu neuartigen Modellierungsansätzen aufgegriffen, was allerdings zu einem erhöhten Zeitbedarf mit entsprechender Verzögerung des Projektabschlusses führte.
- Das Teilprojekt 1 (Seismische Quellen) wurde nicht in angemessener, seiner Bedeutung für die Gefährdungsergebnisse entsprechender Tiefe bearbeitet. Demzufolge konnte das ENSI das Teilprojekt 1 gegenüber dem Projekt PEGASOS nicht als zulässige Verfeinerung einordnen.
- Die im eigentlichen Projektschwerpunkt, den Teilprojekten 2 (Abminderungsmodelle) und 3 (Standorteffekte), erarbeiteten Verfeinerungen wurden vom ENSI als fachgerecht anerkannt.
- Das Teilprojekt 4 (Gefährdungsberechnung) wurde auf angemessene Weise bearbeitet. Der Software-Einsatz entsprach der vom ENSI genehmigten Planung.
- Die Erdbebengefährdungsergebnisse des PRP konnte das ENSI aufgrund der Vorbehalte zum Teilprojekt 1 nicht zur Anwendung freigeben.
- Die Modelle der Teilprojekte 2 und 3 hingegen wurden für eine Gefährdungsberechnung in Kombination mit einem kompatiblen und akzeptierten SP1-Modell als grundsätzlich geeignet bewertet.

Die aus Sicht des ENSI zu knappe Bearbeitungstiefe im Teilprojekt 1 lag darin begründet, dass die mit dem PRP angestrebten Verfeinerungen bei Projektbeginn überwiegend in den Teilprojekten 2 und 3 vorgesehen waren. Im Teilprojekt 1 war lediglich der aktualisierte Katalog der historischen Erdbeben neu zu berücksichtigen. Der Einfluss auf die Gefährdungsergebnisse erwies sich dann aber doch als unerwartet gross. Er resultierte vor allem aus Modellannahmen, die mit den Katalogdaten verknüpft waren, wie zum Beispiel die Einschätzung der maximal möglichen Erdbebenmagnituden oder die Umrechnungsparameter zwischen verschiedenen Magnituden-Skalen, und die demzufolge ebenfalls vertieft zu untersuchen gewesen wären. Erst spät im Projektverlauf wurde erkannt, dass sich die Modelländerungen im Teilprojekt 1 bedeutend auf die berechnete Erdbebengefährdung auswirkten. Zu diesem Zeitpunkt waren die Expertenbefragungen im Teilprojekt 1 bereits abgeschlossen. Die Experten erhielten keine Gelegenheit mehr, ihre Einschätzungen unter Berücksichtigung der erkannten Bedeutung zu hinterfragen bzw. zu bestätigen.

Vor dem Hintergrund der Tragweite eines Entscheids zur Ablehnung der Erdbebengefährdungsergebnisse des PRP führte das ENSI, als Test für die Belastbarkeit der eigenen Prüfergebnisse, im Frühjahr 2015 eine direkte Befragung der Experten des Teilprojekts 1 durch. Die Vorbehalte des ENSI zur Bearbeitungstiefe im Teilprojekt 1 konnten dabei jedoch nicht ausgeräumt werden.

5 Erwägungen

5.1 Sensitivitätsstudie mit SED-PRP-Modell

Veranlasst durch die ablehnenden Schlussfolgerungen zu den Erdbebengefährdungsergebnissen des PRP initiierte das ENSI im Juli 2015 eigene Erdbebengefährdungsberechnungen. Das vom ENSI für diese Sensitivitätsanalyse verwendete, als SED-PRP-Modell bezeichnete Rechenmodell entsprach dem Rechenmodell des PRP, mit Ausnahme, dass der vom ENSI nicht akzeptierte Modellteil des Teilprojekts 1 durch den entsprechenden Teil des im September 2015 veröffentlichten, aktualisierten Rechenmodells des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED) ersetzt war.

Die Bilder 8 und 9 zeigen ausgewählte Gefährdungsergebnisse aus dieser Sensitivitätsstudie im Vergleich zu den Resultaten des PRP. Es ist ersichtlich, dass die mit dem kombinierten Modell bestimmten Gefährdungsergebnisse generell etwas höher liegen als die Resultate des PRP.

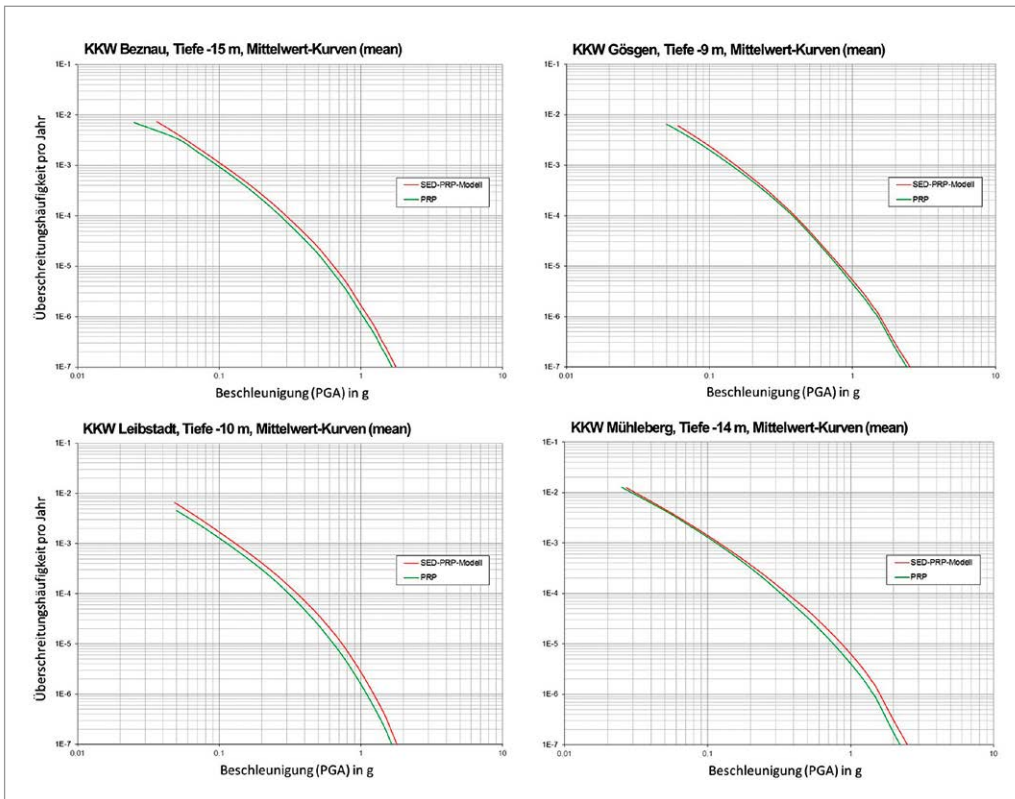


Bild 8
Mit dem SED-PRP-Modell ermittelte Gefährdungskurven im Vergleich zu den entsprechenden Resultaten des PRP; horizontale Beschleunigungskomponente (PGA) am Fundamentniveau des Reaktorgebäudes.

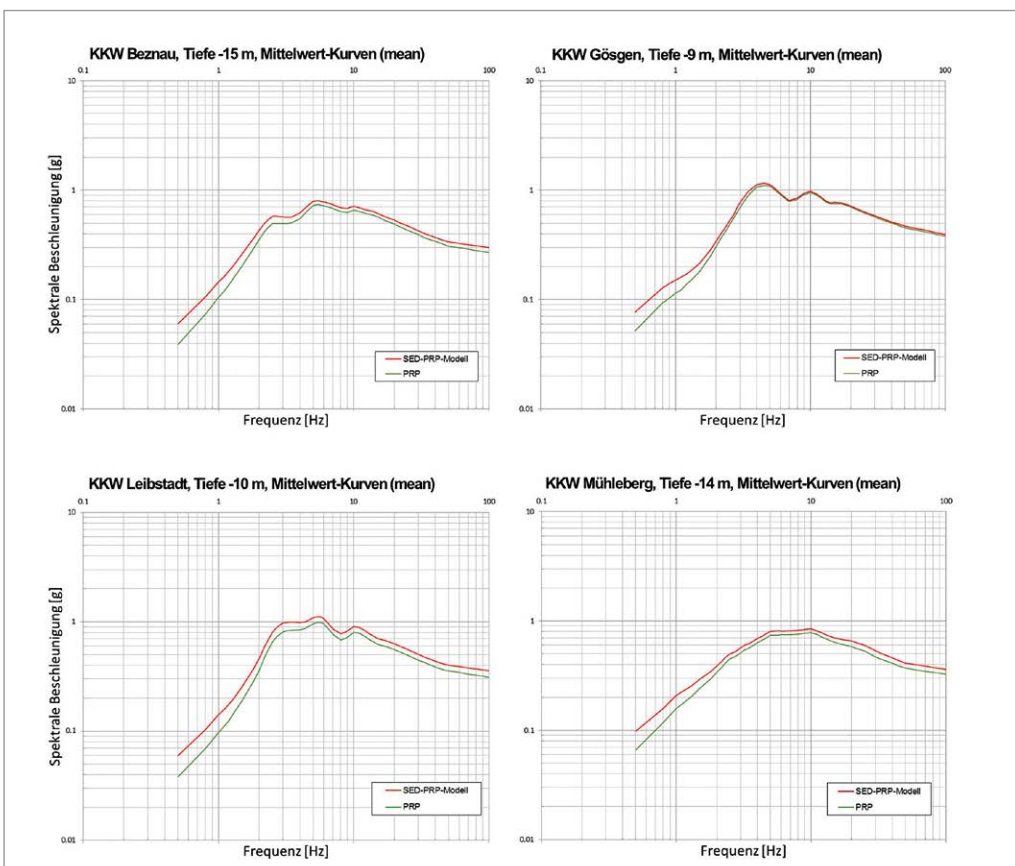


Bild 9:
Mit dem SED-PRP-Modell ermittelte «uniform hazard spectra» im Vergleich zu den entsprechenden Resultaten des PRP; horizontale Beschleunigungskomponente am Fundamentniveau des Reaktorgebäudes, Überschreitungshäufigkeit $1 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr, 5% Dämpfung.

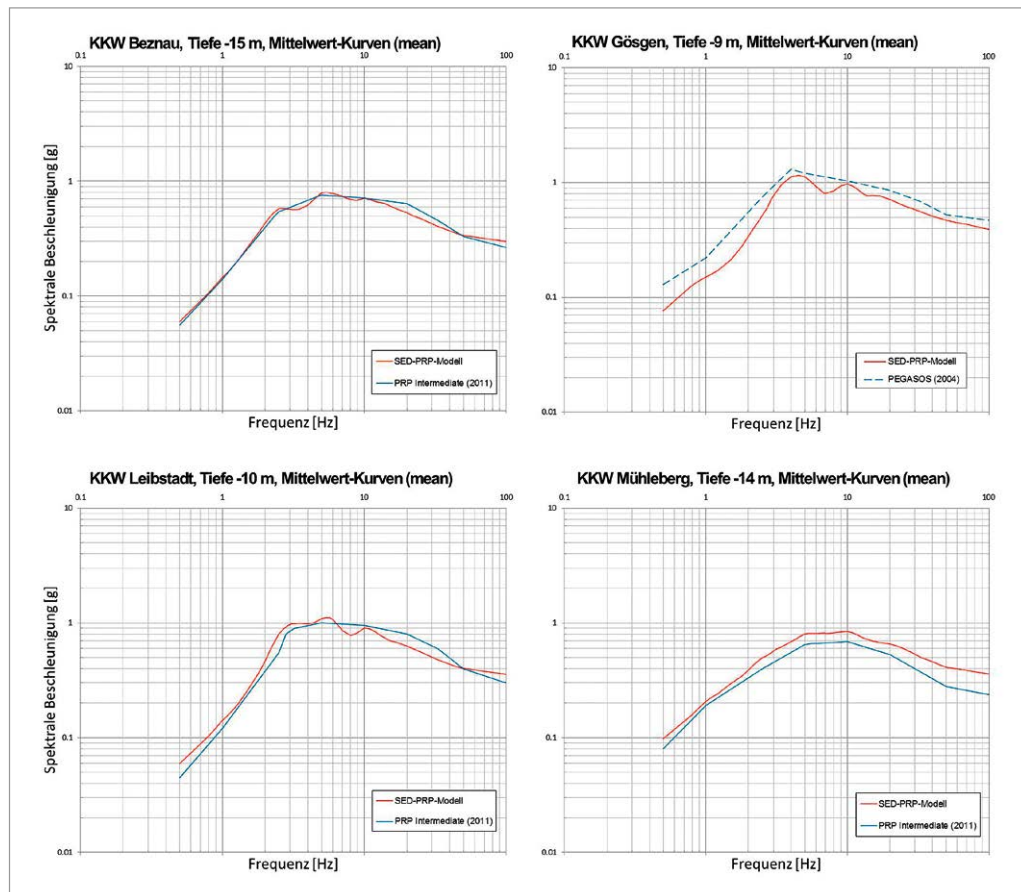
5.2 Untersuchungen nach Fukushima

Nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima im März 2011 forderte das ENSI von allen Schweizer Kernkraftwerken aktualisierte Nachweise der Erdbebensicherheit. Es verfügte dabei, dass die anzusetzenden Gefährdungsergebnisse auf Grundlage des aktuellen Standes des PRP zu ermitteln seien.

Die KKW schlossen die Nachweise termingerecht im März 2012 ab. Obwohl mit diesen Nachweisen eine ausreichende Erdbebensicherheit und die gesetzlich geforderte Beherrschung von Erdbebenereignissen mit einer Überschreitungshäufigkeit von $1 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr ausgewiesen wurde, konnten auch Verbesserungspotentiale aufgezeigt werden. Zahlreiche bauliche und organisatorische Massnahmen wurden seither ausgeführt und bewirken zusätzliche Sicherheitsreserven.

Anhand ausgewählter repräsentativer Spektren sind in Bild 10 die Resultate des SED-PRP-Modells und die in den Erdbebennachweisen 2012 verwendeten Gefährdungsergebnisse (PRP Intermediate Hazard, PRP-IH)² miteinander verglichen. Dargestellt sind für jeden der vier KKW-Standorte die «uniform hazard spectra» der Horizontalbeschleunigung auf dem Niveau des Reaktorgebäudefundamentes, jeweils als Mittelwerte für die Überschreitungshäufigkeit von $1 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr.

Bild 10
Repräsentativer standortspezifischer Vergleich der Gefährdungsergebnisse des SED-PRP-Modells mit den Gefährdungsannahmen der Erdbebennachweise 2012; «uniform hazard spectra» auf Fundamentniveau Reaktorgebäude, horizontale Beschleunigungskomponente, Überschreitungshäufigkeit $1 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr, 5% Dämpfung.



² Ausnahme: Das KKW Gösgen verwendete für die Erdbebennachweise anstelle des PRP-IH die höheren Gefährdungsergebnisse gemäss PEGASOS (2004).

Der hier betrachtete Fall liefert kein einheitliches Bild. Bei den Standorten Beznau und Leibstadt liegen die mit dem SED-PRP-Modell bestimmten Gefährdungsergebnisse nahe bei PRP-IH, bei Mühleberg hingegen höher. Bei Gösgen deckt die für die Erdbebennachweise 2012 angesetzte Gefährdung die Gefährdung gemäss SED-PRP-Modell ab.

Im Rahmen einer weiteren nach Fukushima initiierten Untersuchung, dem Stresstest der Europäischen Union, wurden im Jahre 2011 die Sicherheitsmargen der Schweizer Kernkraftwerke gegen externe Ereignisse analysiert. Mit dem Ziel, diese Analysen zu erweitern und zu vertiefen, nahm das ENSI in seinem Aktionsplan Fukushima einen entsprechenden Aktionspunkt auf, der im Rahmen des Projektes ERSIM (Erhöhung der Sicherheitsmargen) umgesetzt wird. ERSIM hat zum Ziel, die bestehenden Sicherheitsmargen der Schweizer Kernkraftwerke gegen externe Ereignisse sowohl in Bezug auf die Kühlung des Reaktors als auch die Kühlung der Brennelementbecken systematisch zu analysieren und Bereiche zu identifizieren, in welchen die verbleibenden Risiken weiter vermindert werden können.

Den seismischen Sicherheitsmargenanalysen waren bislang die Erdbebengefährdungsergebnisse PRP-IH in Form eines Erdbebens mit einer Überschreitungshäufigkeit von $1 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr zugrunde zu legen. Die Analysen zeigten auf, dass die Schweizer Kernkraftwerke über Sicherheitsmargen gegen Erdbeben verfügen.

6 Entscheid und Massnahmen

Aus nachfolgenden Überlegungen kam das ENSI zum Schluss, dass die Resultate des SED-PRP-Modells (vgl. Kapitel 5.1) eine geeignete Grundlage zur Beurteilung der Erdbebensicherheit der Schweizer Kernkraftwerke darstellen:

- Der Modellteil Teilprojekt 1 des SED-PRP-Modells ist eine Nachbildung des entsprechenden Teils des aktuellsten, der Öffentlichkeit im September 2015 vorgestellten Rechenmodells des schweizerischen Kompetenzzentrums für Erdbebenfragen, des SED.
- Die weiteren Modellteile des SED-PRP-Modells, insbesondere die Modellteile Teilprojekt 2 und 3, sind identisch mit den vom ENSI akzeptierten Teilen des PRP-Rechenmodells.
- Die Gefährdungsergebnisse des SED-PRP-Modells liegen generell oberhalb der Resultate des PRP-Rechenmodells und auch oberhalb der Resultate des SED-Rechenmodells. Die Anwendung der Resultate des SED-PRP-Modells anstelle der Resultate des PRP-Rechenmodells ist somit sicherheitsgerichtet.

Im Mai 2016 verfügte das ENSI die Inkraftsetzung der mit dem SED-PRP-Modell bestimmten Gefährdungsergebnisse und bezeichnete sie als «Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015». Gleichzeitig forderte das ENSI die KKW-Betreiber auf, betreffend Erdbeben bis Ende 2018 die nach Fukushima im März 2011 vom ENSI geforderten Sicherheitsnachweise, bis Mitte 2019 die probabilistische Sicherheitsanalyse und bis Ende September 2020 die deterministische Störfallanalyse zu aktualisieren sowie die Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage und insbesondere auf das Risiko zu bewerten. Dabei hat das Kernkraftwerk Mühleberg, vor dem Hintergrund der endgültigen Einstellung des Leistungsbetriebs auf Ende 2019, die auf Mitte 2019 oder später verlangten Untersuchungen lediglich auf die im Nachbetrieb benötigten Systeme auszurichten.

Abkürzungen

ECOS	Earthquake Catalogue of Switzerland
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
ENSI-RT	Review Team des ENSI
ERSIM	Erhöhung der Sicherheitsmargen
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FFS	Finite Fault Simulation
GMPE	Ground Motion Prediction Equation
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
IH	Intermediate Hazard
KKW	Kernkraftwerk
NGA	Next Generation Attenuation Models
PEGASOS	Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz
PGA	Peak Ground Acceleration
PMT	Project Management Team
PRP	PEGASOS Refinement Project
PSSM	Point Source Stochastic Model
QA	Quality Assurance
SED	Schweizerischer Erdbebendienst
SP	Subproject
SSHAC	Senior Seismic Hazard Analysis Committee
TFI	Technical Facilitator/Integrator
UHS	Uniform Hazard Spectrum
USA	United States of America

Referenzen

- [1] SSHAC; «Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts», U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6372, April 1997.
- [2] HSK; «Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz (Projekt PEGASOS)», HSK-AN-6252, Juni 2007.
- [3] Swissnuclear; «Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites – PEGASOS Refinement Project», Vol. 1 to 5, 20 December 2013.
- [4] ENSI; «ENSI Final Report: Review Approach and Comments Concerning the PEGASOS Refinement Project (PRP) and the PRP Summary Report», Aktennotiz ENSI-AN-9060, 22. April 2015.

ENSI-AN-9657

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 (0)56 460 84 00, www.ensi.ch