



# ARBEITSBERICHT NAB 24-22

Erdbebengefährdungsanalyse  
für den Standort der  
Brennelementverpackungsanlage

November 2024





# ARBEITSBERICHT NAB 24-22

Erdbebengefährdungsanalyse  
für den Standort der  
Brennelementverpackungsanlage

November 2024

## **STICHWÖRTER**

RBG, Rahmenbewilligungsgesuch, Etappe 3, BEVA, Referenzbericht,  
Geologie, Erdbebengefährdung

**Nagra | Nationale Genossenschaft  
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**  
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz  
+41 56 437 11 11 | [info@nagra.ch](mailto:info@nagra.ch) | [nagra.ch](http://nagra.ch)

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Aktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen.

Copyright © 2024 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten. Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw.

## Zusammenfassung

Das Rahmenbewilligungsgesuch für die Brennelementverpackungsanlage (BEVA) am Standort Zwiilag stützt sich bei der Bewertung der Eignung des Standorts im Hinblick auf den sicheren Betrieb einer BEVA auf quantitative, standortspezifische Gefährdungsanalysen ab. Mit dem vorliegenden Bericht wird die Erdbebengefährdung standortspezifisch analysiert und bewertet.

Die gesetzlichen Anforderungen in Bezug auf die Bestimmung der Erdbebengefährdung sowie die behördlichen Vorgaben für deren Umsetzung sind in der Kernenergieverordnung KEV (KEV 2004), der Richtlinie ENSI-G23 (ENSI 2021) sowie in ENSI (2018) beschrieben. Diese werden mit dem vorliegenden Bericht erfüllt.

Die instrumentelle, wie historisch belegte Aufzeichnung von Erdbeben in der Schweiz ergeben ein umfassendes Bild der seismischen Aktivität. Demnach ist die Aktivität auf die Zentralschweiz und das Wallis sowie den Oberrheingraben bei Basel konzentriert. Der Standort befindet sich in der seismisch ruhigsten Region der Schweiz. Dieses Bild wird durch die Betrachtung der Neotektonik gestützt. Am Standort gibt es keine Hinweise auf rezente tektonische Deformationen.

Der Standort in unmittelbarer Nähe von Kernkraftwerk Beznau (KKB), Zwischenlager Würenlingen AG (Zwiilag) und Paul Scherrer Instituts (PSI) hat sich zudem für die verschiedenen nukleartechnischen Anlagen bestens bewährt. Entsprechend liegen mit den Untersuchungen der Standorte für das KKB, der Zwiilag sowie weiterer Kernanlagen auf dem Areal des PSI in unmittelbarer Nähe aussergewöhnlich umfangreiche Daten vor, die für die Bewertung der Erdbebengefährdung herangezogen werden können.

Der Bericht stützt sich somit auf einer breiten Datenbasis ab, die sich aus den umfangreichen Untersuchungen im Zusammenhang mit den bestehenden Kernanlagen im Umfeld des Standorts und aus der Standortsuche der Nagra ergibt. Diese sind in der Geosynthese (Nagra 2024c), sowie dem Bericht zum Baugrund der BEVA (Nagra 2024b) dokumentiert. Wichtige weitere Grundlagen für die standortspezifische Bewertung sind 2D Seismik-Linien nahe dem und ältere Sondierbohrungen am Standort. Zusätzlich wurden am Standort des KKB umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die für die Einordnung des Standortes relevant sind (swissnuclear 2013, Proseis 2015).

## Methode und Ergebnisse

Die Erdbebengefährdung kann allgemein in 3 Komponenten gegliedert werden: (1) eine Verschiebungsfährdung für den Fall eines Bruches durch Teile der Anlage, (2) eine Gefährdung durch die Bodenbewegung infolge der Erdbebenwellen, sowie (3) eine Gefährdung durch geologisch-induzierte Prozesse wie Hangrutschungen oder Bodenverflüssigung, die durch Erdbeben hervorgerufen werden können. Diese drei Komponenten werden im Bericht separat betrachtet und bewertet.

### Gefährdung durch Bruch an der Oberfläche

Zur Betrachtung der Verschiebungsfährdung ist es notwendig Störungen auf die Möglichkeit eines Oberflächenbruches durch ein Erdbeben zu beurteilen. Die Nagra verfügt neben der 3D-Seismik des Standortgebiets Jura Ost auch über verschiedene 2D-Seismik-Linien, die den Standort gut abbilden. Aus diesen seismischen Schnitten gehen keine Strukturen hervor, die im Bereich der BEVA zu einem Oberflächenbruch führen könnten. Somit besteht am Standort Zwiilag keine Verschiebungsfährdung.

### **Gefährdung durch Bodenbewegung**

Die Bestimmung der Erdbebengefährdung durch Bodenbewegung erfolgt nach dem Modell ENSI-2015 (Proseis 2015). Darin werden die seismischen Quellen, der Ausbreitungspfad, sowie die Verstärkung der Wellen durch lokale Effekte berücksichtigt. Grundlage des ENSI-2015 Modells sind umfassende probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen, die entsprechend den Vorgaben des Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC) für die Standorte der Kernkraftwerke in der Schweiz durchgeführt wurden. Die Durchführung erfolgte in den Projekten PEGASOS und Pegasos Refinement Project (swissnuclear 2013). Dabei kam mit Level 4, die höchsten der in Senior Seismic Hazard Analysis Committee (1997) definierten Anforderungen zur Anwendung. Das Modell ENSI-2015 wurde anschliessend auch unter Berücksichtigung des nationalen Erdbebengefährdungsmodells SUIhaz2015 (Wiemer et al. 2016) abgeleitet. Das Modell entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Für den Standort der BEVA werden die Resultate des ENSI-2015 Modells, die für das 1.3 km nördlich liegende KKB ermittelt wurden, übertragen. Dabei werden für die Bestimmung der lokalen Verstärkung angepasste Geschwindigkeitsprofile entwickelt, die auf den bestehenden Sondierungen am Standort basieren. Die Übertragbarkeit der Gefährdungsannahmen nach ENSI-2015 für das KKB auf den Standort Zwiilag wird so verifiziert.

Die Erdbebengefährdung durch Bodenerschütterungen wird durch ein Spektrum der Bodenbeschleunigung, die am Standort mit einer Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  (entsprechend dem Nachweiserdbeben der Störfallkategorie 2, NESK 2) bzw.  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  (Nachweiserdbeben der Störfallkategorie 3, NESK 3) zu erwarten ist, spezifiziert. Aus den resultierenden Gefährdungsannahmen ergeben sich keine besonderen Herausforderungen für eine erdbebensichere Auslegung der Anlagen entsprechend der relevanten Vorgaben.

### **Gefährdung durch geologisch-induzierte Prozesse**

Die Bewertung der geologisch-induzierten Auswirkungen von Erdbeben erfolgt anhand von Sondierbohrungen am Standort sowie weiteren Informationen, die den Baugrund bezüglich möglicher Naturgefahren im Zusammenhang mit Erdbeben beschreiben. Der vorgefundene Schotter im flachen Untergrund weist eine gute Standfestigkeit auf und zeigt keine Tendenz zur Bodenverflüssigung. Darüber hinaus ergeben sich keine weiteren relevanten geologisch-induzierten Gefährdungen, die mit Erdbeben in Zusammenhang stehen könnten.

### **Gesamtbeurteilung**

Die vorliegende standortspezifische Analyse der Erdbebengefährdung kommt zum Schluss, dass der Standort für den Betrieb einer BEVA geeignet ist. Eine Verschiebungsfährdung kann für den Standort ausgeschlossen werden. Die Auslegung der BEVA wird analog zur Zwiilag so erfolgen, dass bei Bodenbewegungen mit einer Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  bzw.  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  der Schutz für Mensch und Umwelt gewährleistet wird. Aus dem geologischen Umfeld ergeben sich keine weiteren Gefährdungen für den Standort.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Figurenverzeichnis .....	V
Beilagenverzeichnis .....	VII
Abkürzungsverzeichnis .....	VIII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Situation.....	2
1.3 Grundlagen zur Erdbebengefährdung.....	3
<b>2 Geologische Situation .....</b>	<b>4</b>
2.1 Tektonik in der Nordschweiz.....	4
2.2 Regionale und lokale Strukturen .....	5
2.3 Neotektonik .....	9
2.4 Regionale Seismizität .....	9
<b>3 Baugrundeigenschaften.....</b>	<b>12</b>
3.1 Untergrundverhältnisse.....	13
3.1.1 Künstliche Auffüllungen .....	13
3.1.2 Natürliche Oberflächenschichten.....	13
3.1.3 Niederterrassenschotter.....	13
3.1.4 Moräne.....	13
3.1.5 Felsuntergrund .....	14
3.2 Grundwasserverhältnisse .....	14
3.3 Dynamische Baugrundwerte.....	15
3.3.1 Scherdehnungsabhängige Materialwerte .....	15
3.3.2 Profile für die Scherwellengeschwindigkeit.....	15
<b>4 Betrachtung der Gefahrenbilder .....</b>	<b>18</b>
4.1 Verschiebungsfährdung .....	18
4.2 Erdbeben-induzierte Gefahren.....	19
4.2.1 Setzungen.....	19
4.2.2 Gravitative Massenbewegungen.....	19
4.2.3 Bodenverflüssigung .....	20
4.3 Seismische Gefährdung .....	20
4.3.1 Einführung.....	20
4.3.2 Datenbasis ENSI-2015.....	21
4.3.3 Übertragbarkeit der Felsgefährdung.....	23
4.3.4 Felsgefährdung am Anlagenperimeter.....	24

4.3.5	Gefährdung an der Terrainoberfläche im Anlagenperimeter.....	25
4.3.5.1	Gefährdung durch horizontale Bodenbewegung .....	25
4.3.5.2	Gefährdung durch vertikale Bodenbewegung .....	29
4.3.6	Fazit .....	31
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>33</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Tabellen</b> .....	<b>A-1</b>

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Werte des mittleren $V_s$ -Initialprofils, Schichtstärke $h_i$ und Wichte des Bodens für die eindimensionalen Standortanalysen in der Software ProShake .....	16
Tab. A-1:	Scherdehnungsabhängige Materialwerte des Lockergesteins für den Standort KKB ermittelt und hier auf den Standort Zwilag übertragen .....	A-1
Tab. A-2:	Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015 am Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Zwilag (UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung).....	A-1
Tab. A-3:	Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung für den Anlagenperimeter, OK-Terrain (UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung) .....	A-2

## Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Lage des Anlagenperimeters der BEVA östlich neben der Zwilag sowie unweit des KKW Beznau, 1.3 km weiter nördlich .....	2
Fig. 2-1:	Tektonische Karte der Nordschweiz mit Störungszonen und regionalen tektonischen Einheiten.....	4
Fig. 2-2:	Störungszonen im lokalen Kontext der BEVA sowie ausgewählte Seismiklinien, welche die Datengrundlage für die kartierten Störungen darstellen.....	6
Fig. 2-3:	Ausschnitt des seismischen Profils 11-NS-10 mit der Projektion des BEVA-Standorts auf die Linie.....	7
Fig. 2-4:	Ausschnitt des seismischen Profils 11-NS-37 mit der Projektion des BEVA-Standorts auf die Linie.....	8
Fig. 2-5:	Darstellung des Schweizer Erdbebenkatalogs des SED (Fäh et al. 2011) inkl. einer Aktualisierung bis einschliesslich 30.09.2023 zusammen mit der modellierten Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden $M_w \geq 6$ in der Schweiz, basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen im Rahmen des PRP-Projekts .....	11
Fig. 3-1:	Karte mit den Baugrunduntersuchungen am Standort Zwilag und daraus abgeleitetes Modell (Profil A–A') des Baugrunds für den Projektperimeter der BEVA .....	12
Fig. 3-2:	Mächtigkeit des Quartärs am Standort, abgeleitet aus Sondierbohrungen .....	14
Fig. 3-3:	(a) Scherdehnungsabhängiges Schubmodul und (b) Materialdämpfung des Niederterrassenschotter am KKB jeweils mit <i>best estimate</i> (durchgezogen) sowie den Minimal- und Maximalwerten (gestrichelt).....	15
Fig. 3-4:	Verwendete $V_s$ -Profile für kleine Scherdehnungen mit dem Initialprofil, sowie einer Schar von 30 $V_s$ -Profilen mit COV=0.225 für den Anlagenperimeter .....	17
Fig. 4-1:	Komponenten der standortspezifischen Erdbebengefährdung.....	21

Fig. 4-2:	Schematische Darstellung des Workflows für eine probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse und Schritte des Post-Processing ( <i>Scenario spectra</i> resp. <i>Scenario time histories</i> ) .....	22
Fig. 4-3:	Gefährdungskonsistente Antwortspektren ( <i>Uniform Hazard Spectra</i> , UHS) der horizontalen Felsgefährdung aus PEGASOS (2004), PRP (2013) und SED/PRP (= ENSI-2015) für $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ und 5 % Dämpfung am Standort KKB .....	23
Fig. 4-4:	Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015, $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Zwilag .....	24
Fig. 4-5:	Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015, $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Zwilag .....	24
Fig. 4-6:	Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter und KKB .....	26
Fig. 4-7:	Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter und KKB .....	27
Fig. 4-8:	Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter für verschiedene Schotter-Mächtigkeiten .....	28
Fig. 4-9:	Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter für verschiedene Schotter-Mächtigkeiten .....	28
Fig. 4-10:	Multilineare Beziehung der V/H-Verhältnisse für den Anlagenperimeter und Überschreitungshäufigkeiten (a) $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ und (b) $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ sowie die entsprechenden Werte am Standort KKB .....	29
Fig. 4-11:	Bodenantwortspektrum der vertikalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter und KKB .....	30
Fig. 4-12:	Bodenantwortspektrum der vertikalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter und KKB .....	30

**Beilagenverzeichnis**

- Beilage 4-1 Linie 11-NS-10 (interpretiert und nicht interpretiert) 1:50'000  
(aus NAB 13-10, Beilage 5-5, Juni 2013)
- Beilage 4-2 Linie 11-NS-37 (interpretiert und nicht interpretiert) 1:50'000  
(aus NAB 13-10, Beil. 5-14, Juni 2013)
- Beilage 4-3 Linie 82-NX-40 (interpretiert und nicht interpretiert) 1:50'000  
(aus NAB 13-10, Beilage A-09, Juni 2013)

## Abkürzungsverzeichnis

BEVA	Brennelementverpackungsanlage
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
ENSI-2015	Proseis (2015): Calculation of the Seismic Hazard at the Four NPP Sites Based on the Hybrid SED – PRP Model
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
IAEA	International Atomic Energy Agency
KEV	Kernenergieverordnung
KKB	Kernkraftwerk Beznau
KKW	Kernkraftwerk
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NESK	Nachweiserdbeben der Störfallkategorie (2 oder 3)
OK	Oberkante
OMM	Obere Meeresmolasse
OSM	Obere Süsswassermolasse
PEGASOS	Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz
PRP	PEGASOS Refinement Project
SBN	Schwachbebennetz
SED	Schweizerischer Erdbebendienst
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SSHAC	Senior Seismic Hazard Analysis Committee
SUIhaz2015	Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland
UHS	gefährdungskonsistente Antwortspektrum ( <i>Uniform Hazard Spectrum</i> )

# 1 Einleitung

Die Brennelementverpackungsanlage (BEVA) muss nach KEV als Kernanlage gegen eine Reihe von Naturgefahren ausgelegt werden. Mit dem Rahmenbewilligungsgesuch wird die Eignung des Standorts dargestellt. Es wird gezeigt, dass die standortspezifische Gefährdung durch Naturgefahren die Eignung des Standorts für den Bau und Betrieb der BEVA nicht in Frage stellt. Im vorliegenden Bericht wird dazu die Gefährdung durch Erdbeben für den Betrieb der BEVA bestimmt.

Die hier zusammengefassten Erkenntnisse basieren auf den geologischen Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz, durchgeführt in den vorangegangenen Jahrzehnten. Wesentliche Beiträge wurden dazu auch im Zusammenhang mit den Untersuchungen für den Bau und Betrieb der direkt angrenzenden Kernanlagen (Zwilag, PSI, Bundeszwischenlager) bzw. des Kernkraftwerks Beznau in einer Luftlinienabstand von 1.3 km zum Anlagenperimeter geleistet. Besonders erwähnenswert sind auch die methodisch sehr umfassenden Untersuchungen zur Neubewertung der Erdbebengefährdung der vier Schweizer Kernkraftwerkstandorte (Nagra 2004, swissnuclear 2013, Proseis 2015) wie auch die vorliegenden Unterlagen im Zusammenhang mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für das Ersatzkernkraftwerk Beznau (EKKB).

## 1.1 Hintergrund

Für die Erlangung der Rahmenbewilligung der BEVA sind standortspezifische Gefährdungsanalysen durchzuführen. Die von Erdbeben ausgehenden Gefahren und Gefährdungsbilder aus dem Gebirge sind zu betrachten (ENSI 2018):

*Für Störfälle mit Ursprung ausserhalb der Anlage ist eine quantitative, standortspezifische Gefährdungsanalyse zur Bestimmung der Gefährdungshäufigkeit durch extern ausgelöste Ereignisse durchzuführen. Dazu sind mindestens die in der Richtlinie ENSI-A05, Kap. 4.6.1 sowie die in SIA 199 (Anhang E) angeführten Ereignisse, Gefahren und Gefährdungsbilder aus dem Gebirge, soweit sie auf die Anlage zutreffen, zu betrachten.*

Darüber hinaus ist die standortspezifische Erdbebengefährdung zu bestimmen (ENSI 2018):

*Die standortspezifische Erdbebengefährdung für das geologische Tiefenlager, die Oberflächenanlage und die Nebenzugangsanlage ist unter Berücksichtigung der Ergebnisse der erdwissenschaftlichen Untersuchungen und eines aktuellen Erdbebenkataloges zu bestimmen. Dazu ist eine Erdbebengefährdungsanalyse für den gewählten Standort zu erstellen, die auf den Modellen basiert, die den Erdbebengefährdungsannahmen gemäss ENSI (2016) zugrunde liegen. Die Übertragbarkeit von Modellen und Daten auf den gewählten Standort ist zu begründen. [...].*

Für die Bestimmung der Erdbebengefährdung von Kernanlagen werden in IAEA SSG-9 Empfehlungen gemacht. Für Kernanlagen, die keine Kernkraftwerke sind, wird darin ein abgestufter Ansatz (*graded approach*) zur Bestimmung der Erdbebengefährdung vorgeschlagen. Dieser soll der verringerten Komplexität der Anlage, dem geringeren Freisetzungspotential sowie der verminderten Gefahr, die von anderen Materialien vor Ort ausgehen, verglichen mit der von Kernkraftwerken Rechnung tragen. Dabei solle man sich zunächst an Attributen von Kernkraftwerken orientieren und, falls möglich, diese entsprechend der geringeren möglichen Konsequenzen anpassen (IAEA SSG-9, 9.1-9.2).

Entsprechend des abgestuften Ansatzes soll für das Rahmenbewilligungsgesuch der BEVA eine Ermittlung der Erdbebengefährdung basierend auf der umfangreichen existierenden Datenbasis bzw. auf Basis existierender Erdbebengefährdungsstudien erfolgen.

## 1.2 Situation

Die BEVA dient der Umverpackung von Brennelementen und hochaktiven Abfällen aus den Transport- und Lagerbehältern in spezielle Endlagerbehälter (Nagra 2025). Die BEVA soll in unmittelbarer Nähe bestehender Kernanlagen der Zwiilag, PSI Hotlabor sowie des Bundeszwischenlagers errichtet werden. Darüber hinaus befindet sich das KKB etwa 1.3 km nördlich des Standortes (Fig. 1-1). Die Lage wird im Folgenden kurz als Standort resp. Standort Zwiilag bezeichnet.

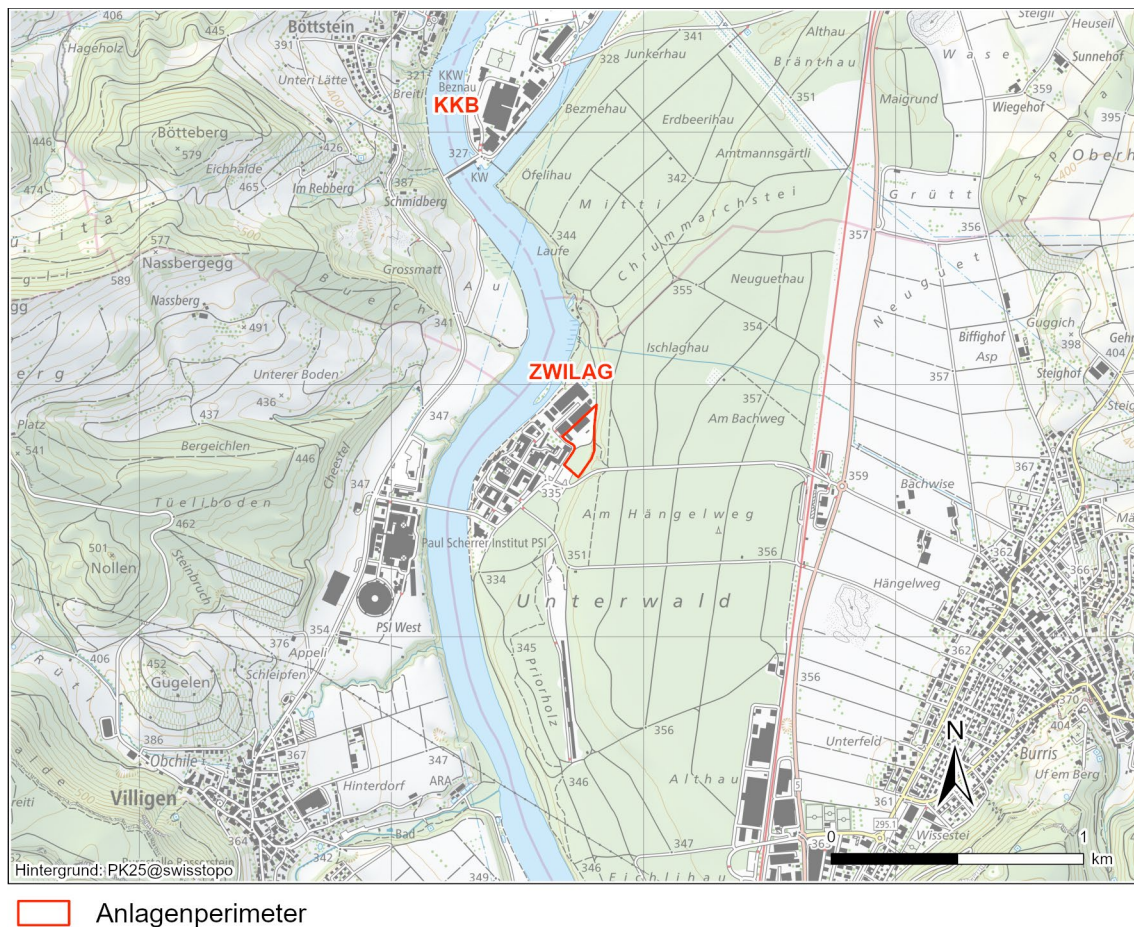


Fig. 1-1: Lage des Anlagenperimeters der BEVA östlich neben der Zwiilag sowie unweit des KKW Beznau, 1.3 km weiter nördlich

### 1.3 Grundlagen zur Erdbebengefährdung

Bei einem Erdbeben kommt es zu einer plötzlichen Freisetzung gespeicherter tektonischer Spannungen entlang einer Störungszone. Dabei werden seismische Wellen abgegeben, die an der Oberfläche als Bodenbewegung wahrgenommen werden.

Die Gefährdung durch Erdbeben lässt sich somit in eine Verschiebungsgefährdung, die vom Bruch an der Quelle (Erdbebenherd) selbst ausgeht, und einer Gefährdung, die von den Erdbebenwellen (infolge der Ausbreitung bis zum betrachteten Standort) ausgeht, unterscheiden. Während die tatsächliche Verschiebung auf eine schmale Zone um den Bruch herum beschränkt ist, kann die Zone, die potenziell durch die Erdbebenwellen gestört wird, grossräumig sein.

Die Wechselwirkung der seismischen Wellen mit Infrastruktur kann zu erhöhten Lastfällen führen, die durch eine geeignete Auslegung berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich können Erdbebenwellen auch mit der geologischen Umgebung wechselwirken, was je nach lokalen Gegebenheiten, zu sekundärer Gefährdung, z.B. durch gravitative Massenbewegungen oder Bodenverflüssigung, führen könnte.

Zur Bestimmung der Verschiebungsgefährdung ist es gemäss IAEA SSG-9, Ziffer 7.3 (IAEA 2022) notwendig festzustellen ob es in der Umgebung des Standorts, bzw. im Bereich des Anlagenperimeters eine Störungszone gibt, die als *capable* zu betrachten ist, also fähig ist, um eine Verschiebung im Erdbebenherd hervorzurufen und damit potenziell eine Gefährdung darstellen kann:

*The first question in assessing the potential for fault displacement is whether a fault (buried or outcropping) within the site vicinity and/or within the site area is to be considered capable (i.e. whether the fault has a significant potential for producing displacement at or near the ground surface).*

In Kapitel 4.1 wird entsprechend dieser Empfehlung dargelegt, dass es am Standort keine solche Störungszone gibt und damit auch keine Verschiebungsgefährdung besteht.

Für die Bestimmung der Gefährdung durch Bodenbewegung ist es notwendig, mögliche Quellen von Erdbeben sowie den Ausbreitungspfad der Erdbebenwellen genau zu beschreiben. Bei auf weichen Sedimenten gegründeten Infrastrukturen muss zusätzlich noch die lokale Verstärkung berücksichtigt werden. Für letztere sind am Standort Baugrunduntersuchungen durchzuführen. Die vorliegenden Untersuchungen werden in Kapitel 3 zusammengefasst. Die geologisch-induzierten Gefährdungen werden in Kapitel 4.2 diskutiert. Die Bestimmung der Gefährdung durch Bodenbewegung erfolgt schliesslich in Kapitel 4.3.

## 2 Geologische Situation

### 2.1 Tektonik in der Nordschweiz

Der Anlagenperimeter liegt in der Talebene des unteren Aaretals, welches in den Tafeljura bzw. die Vorfaltenzone eingeschnitten ist und durch glaziale und interglaziale Prozesse seine heutige Gestalt erhielt. Die tektonische Situation in der Nordschweiz (Fig. 2-1) wurde durch vier Hauptereignisse geprägt: (i) die Bildung von Permokarbontrögen im späten Paläozoikum, (ii) die Bildung des Oberrheingrabens im späten Eozän, (iii) die Entstehung des Hegau-Bodensee-Grabens im mittleren Miozän und (iv) die Jurafaltung, die vor 4 Millionen Jahren weitestgehend abgeschlossen war. Eine detaillierte Beschreibung dieser Ereignisse findet sich in Nagra (2024c) und wird hier nicht weiter ausgeführt.

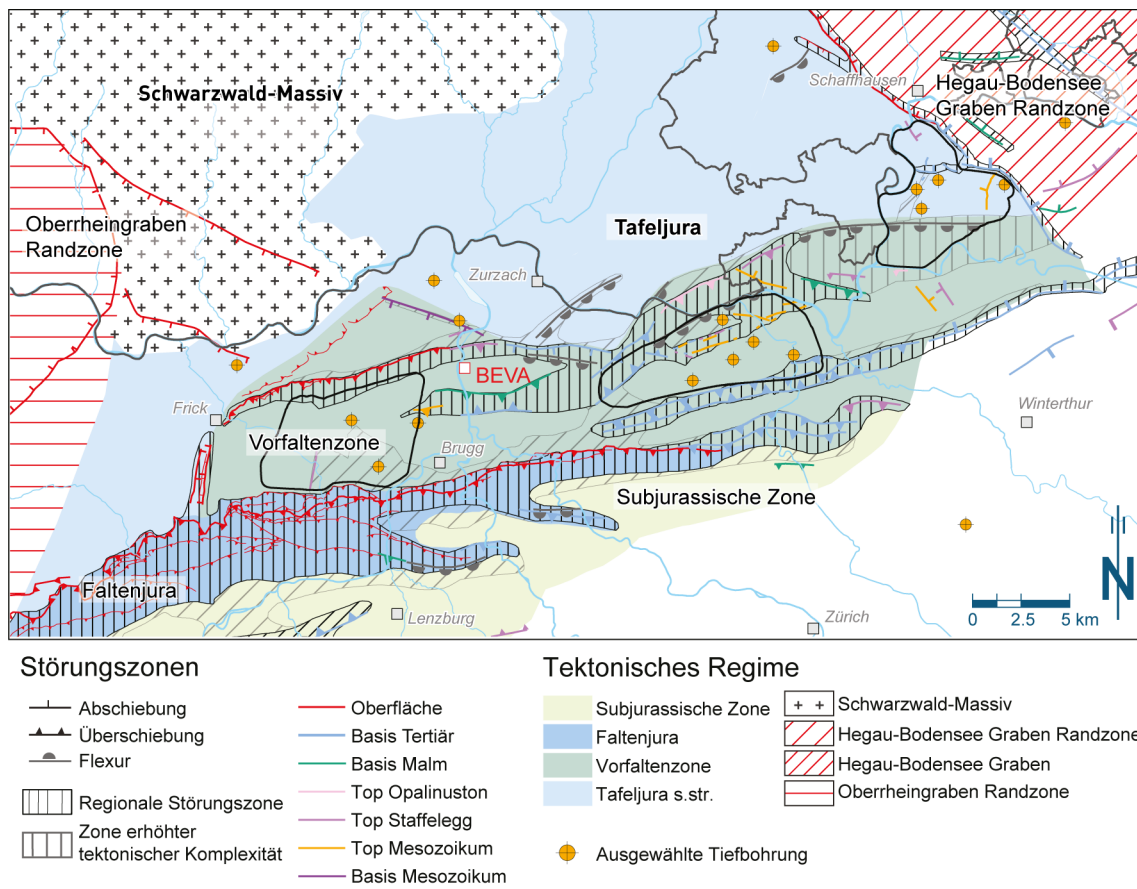


Fig. 2-1: Tektonische Karte der Nordschweiz mit Störungszonen und regionalen tektonischen Einheiten

## 2.2 Regionale und lokale Strukturen

Der Standort befindet sich zwischen der Jurahauptüberschiebung im Süden und der Mandach-Überschiebung im Norden und damit in der Vorfaltenzone (Fig. 2-1). Diese stellt einen tektonischen Übergangsbereich zwischen dem Tafeljura im Osten und dem Faltenjura im Süden dar. Die Sedimentgesteine dieser Einheit (Mesozoikum und Känozoikum) sind über weite Strecken flach bis wenig steil einfallend gelagert (Madritsch et al. 2013).

Die Erkenntnisse aus der Interpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12 tragen wesentlich zu einem besseren Verständnis der Region des unteren Aaretals bei (Madritsch et al. 2013). Ein gutes Abbild des Standortes ist insbesondere durch die 2D Seismik-Linie 11-NS-10 gegeben (Madritsch et al. 2013). Ergänzt wird dieses Profil durch die Linie 11-NS-12 weiter östlich, sowie 82-NX-40 weiter westlich, die etwa O-W verlaufende Linie 11-NS-37 südlich sowie durch die 3D-Seismik weiter westlich (Fig. 2-2). Ältere seismische Linien wurden reprozessiert und können ergänzend betrachtet werden (Madritsch et al. 2013).

Entgegen der Hypothese des Tals als N-S streichende Transferstörung (Bitterli et al. 2000) zeigen sich im Aaretal auf der Seismik der querenden Streichlinien keine markanten Störungen (Madritsch et al. 2013). Andere, aufgrund von geologischen Oberflächendaten bekannte Strukturen in diesem Gebiet, treten auf der Seismik überhaupt nicht Erscheinung (z. B. die Endingen Flexur). Im Folgenden werden die bekannten regionalen bzw. lokalen Strukturen im Umfeld des Standorts diskutiert.

Die Jura-Hauptüberschiebung ist Teil des Faltenjura und ist dessen vorderste Deformationszone. Entlang der Verwerfung beissen die triassischen Evaporite aus, die das basale Décollement im östlichen Jura bilden (Sommaruga et al. 2017). Die Jura-Hauptüberschiebung liegt etwa 7 km südlich des Standorts.

Der Permokarbondrog weist eine Halbgrabenstruktur auf mit der Hauptstörung im Norden, unterhalb der Mandach-Überschiebung (Bitterli-Brunner 1987, Laubscher 1986). Die Mandach-Überschiebung befindet sich etwa 8 km nördlich der Jurahauptüberschiebung. Sie verläuft grob in Ost-West-Richtung und kann an der Oberfläche über ~15 km verfolgt werden (Diebold et al. 2006, Bitterli-Dreher et al. 2007, Bitterli et al. 2000). Ihr Versatz nimmt im unteren Aaretal ostwärts ab (Laubscher 1986, Madritsch et al. 2013) und wird klassischerweise als listrische Überschiebung, welche in den Triassischen Evaporiten wurzelt, interpretiert. Die Lokalisierung der Mandach-Überschiebung wird stark durch die Trograndstörung beeinflusst. Laubscher (1985) hat auf Grund der Biegung des Mesozoischen Stapels oberhalb der Mandach-Überschiebung auf eine post-Mesozoische, prä-Miozäne Abschiebung entlang der Trograndstörung geschlossen. Die prä-Miozäne Abschiebung wird an der östlichen Fortsetzung der Mandach-Überschiebung deutlich, wo keine Überschiebung mehr beobachtet wird.

Die Unterendingen-Störung wurde durch die Nagra 2D-Seismik gut abgebildet (Madritsch et al. 2013). Es handelt sich um eine Abschiebung im Bereich des Mesozoikums. Sie verläuft etwa O-W und wurde als Verlängerung der Vorwald-Störung, die im Kristallin vom Schwarzwald her streicht, diskutiert. Gemäss dem seismischen Abbild auf dem Profil 11-NS-12 erfuhr die Struktur nach Ende des Mesozoikums nochmals eine extensive bis transtensive Reaktivierung (Madritsch et al. 2013).

2-3 km südlich des Standorts verläuft die Siggenthal-Antiklinale. Sie tritt an der Oberfläche auf der Ostseite des Aaretals auf. 3D-seismische Daten zeigen, dass diese Struktur von Westen nach Osten wächst (Nagra 2024d, Madritsch et al. 2013). Die Antiklinale besteht aus einer süd- und einer nordvergenten Aufschiebung im Mesozoikum. Die Siggenthal-Antiklinale kann mit keiner grösseren Grundgebirgsverwerfung in Verbindung gebracht werden und wird klassischerweise als in den Triassischen Evaporiten wurzelnd interpretiert.

In der Seismiklinie 11-NS-10 (Fig. 2-3) sowie der 3D-Seismik lassen sich die oben beschriebenen Strukturen deutlich erkennen. Im Bereich des Anlagenperimeters, zwischen der Mandach-Überschiebung und der Siggenthal Antiklinale, ist das Mesozoikum ruhig gelagert und es lassen sich in der mesozoischen Abfolge der Vorfaltenzone seismisch keine weiteren Strukturen erkennen (Seismiklinie 11-NS-37, Fig. 2-4). Diese Beobachtungen dienen als Basis für die Bewertung der Verschiebungsgefährdung in Kap. 4.1.

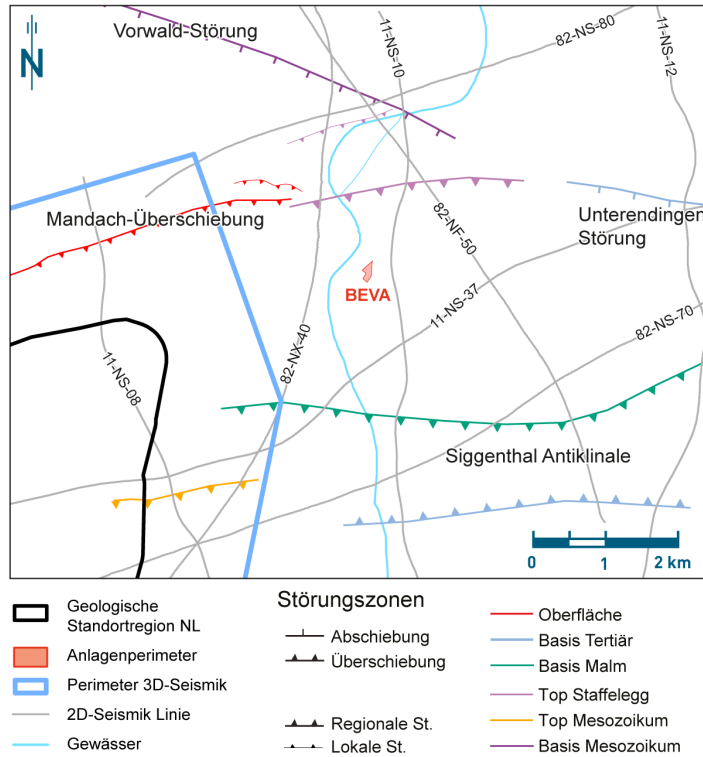


Fig. 2-2: Störungszonen im lokalen Kontext der BEVA sowie ausgewählte Seismiklinien, welche die Datengrundlage für die kartierten Störungen darstellen

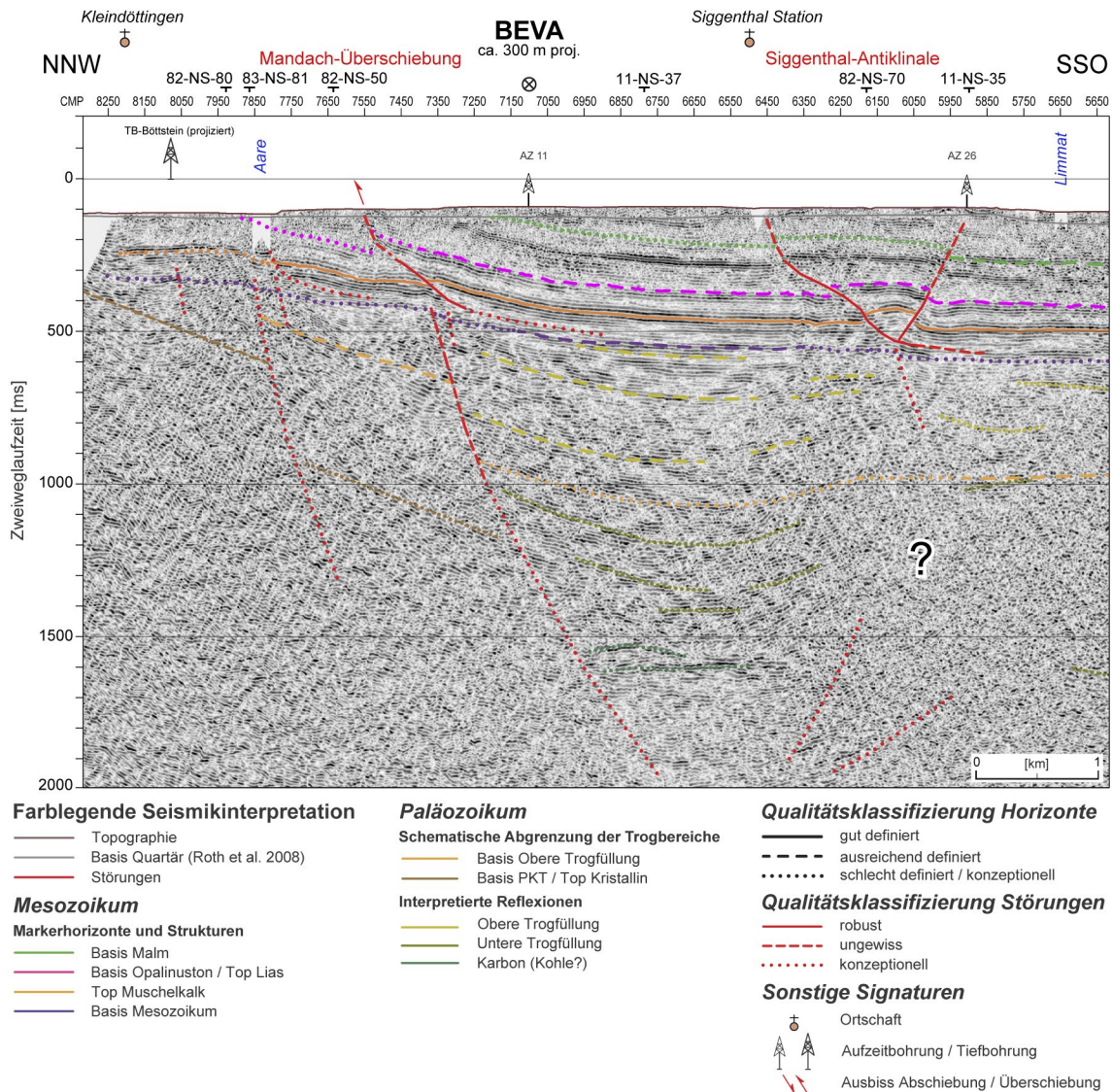
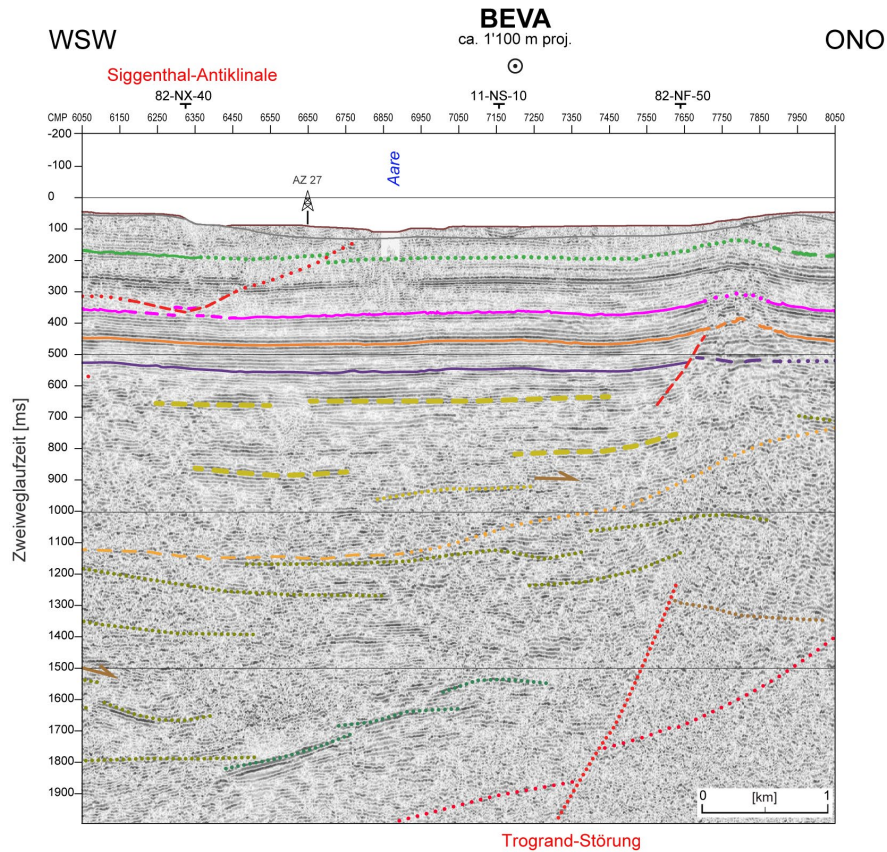


Fig. 2-3: Ausschnitt des seismischen Profils 11-NS-10 mit der Projektion des BEVA-Standorts auf die Linie  
(Madritsch et al. 2013)



**Farblegende Seismikinterpretation**

- Topographie
- Basis Quartär (Roth et al. 2008)
- Störungen

**Mesozoikum**

- Markerhorizonte und Strukturen**
- Basis Malm
  - Basis Opalinuston / Top Lias
  - Top Muschelkalk
  - Basis Mesozoikum

**Paläozoikum**

**Schematische Abgrenzung der Trogbereiche**

- Basis Obere Trogfüllung
- Basis PKT / Top Kristallin

**Interpretierte Reflexionen**

- Obere Trogfüllung
- Untere Trogfüllung
- Karbon (Kohle?)

**Qualitätsklassifizierung Horizonte**

- gut definiert
- - - ausreichend definiert
- ... schlecht definiert / konzeptionell

**Qualitätsklassifizierung Störungen**

- robust
- - - ungewiss
- ... konzeptionell

**Sonstige Signaturen**

- ▲ ▲ Aufzeitbohrung / Tiefbohrung
- ↙ Winkeldiskordanz im Permokarbondrog

Fig. 2-4: Ausschnitt des seismischen Profils 11-NS-37 mit der Projektion des BEVA-Standorts auf die Linie (Madritsch et al. 2013)

### 2.3 Neotektonik

Untersuchungen zur Neotektonik der Nordschweiz und besonders der geologischen Standortgebiete werden in Nagra (2024a) beschrieben. Dabei wurde eine Vielzahl komplementärer Methodiken verwandt, um mögliche Evidenzen für rezente Deformationen zu sammeln. Im Folgenden werden die Resultate im Hinblick auf die Erdbebengefährdung zusammengefasst. Für eine vollständige Darstellung wird auf Nagra (2024a) verwiesen.

#### Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)

Die Nagra hat das von Swisstopo betriebene Netz von GNSS Stationen mit 11 Permanent-Stationen in der Nordschweiz ergänzt (Studer & Zanini 2013). Die vom sogenannten NaGNet ermittelten Geschwindigkeitsvektoren der einzelnen Stationen sind klein oder gar im Bereich der Messgenauigkeit. Insbesondere ist keine differenzielle Horizontalbewegung an den regionalen tektonischen Elementen wie z.B. der Jura-Hauptüberschiebung feststellbar.

#### Nivellement-Messungen

Vertikale Bewegungen werden über das NaGNet hinaus mit präzisen Nivellement-Messungen periodisch überwacht. Im Allgemeinen zeigt sich ein Trend von zunehmender Hebung zu den Alpen hin, nach Norden ist hingegen eine Senkung zu verzeichnen (bezogen auf den Referenzpunkt in Laufenburg). Im Rahmen der Messgenauigkeit gibt es keine Evidenzen für differenzielle Bewegungen in den geologischen Standortregionen oder dem Standort.

#### Geomorphologie

Eiszeiten haben zu einer starken Überprägung der quartären Landschaften geführt, bei der u.a. Felsrinnen erodiert und ausgedehnte Schotterkörper abgelagert wurden. Prinzipiell können diese als Markerhorizonte dienen. Da direkte Hinweise auf Versätze an der Oberfläche fehlen, wurde die Analyse auf gestörte Morphologie über diskrete Versätze hinaus ausgedehnt (Nagra 2024a). Obwohl es in den geologischen Standortgebieten punktuell Anzeichen von rezenter Deformation gibt, lassen sich für den Standort keine konkreten Deformationen im Quartär nachweisen. Im Terrassensystem des Aaretal in der Nähe des Standorts zeigt sich auf LiDAR-Daten eine leichte Wölbung der Oberfläche, die an anderen Stellen des Aaretals nicht beobachtet wird. An dieser Stelle sind von den 2D-Seismiklinien keine Strukturen bekannt (Madritsch et al. 2013).

#### 2D-Seismik

Der östliche Verlauf der Mandach-Überschiebung wurde mittels Quartärseismik vertieft untersucht (Nagra 2024a). Die identifizierten Strukturen im Mesozoikum lassen sich jedoch nicht bis ins Quartär verfolgen. Daraus folgt, dass kaum auf Deformation im Quartär geschlossen werden kann.

### 2.4 Regionale Seismizität

Die Seismizität in der Schweiz wird durch ein sehr dichtes Netzwerk seismischer Stationen, das durch den Schweizerischen Erdbebendienst (SED) betrieben wird, überwacht. Für die Standortgebiete wurde dieses Netz seit 2012 durch die Installation weiterer Stationen für das Nagra Schwachbebennetz (SBN) verdichtet (Plenkens & SED 2014). Durch die lokale Verdichtung des Netzwerks können auch kleinste Beben zuverlässig detektiert und lokalisiert werden. Die Vollständigkeitsmagnitude im regionalen Umfeld des Standorts liegt bei  $M_c = 0.7$  oder besser (Diehl et al. 2023).

Komplettiert wird die derzeitige seismische Überwachung durch eine über 500-jährige historisch dokumentierte Zeitreihe von verspürten Beben, die im ECOS-2009 Katalog zusammengefasst wurde (Fäh et al. 2011). Damit verfügt die Schweiz, und insbesondere auch die Nordschweiz, über eine der umfangreichsten und detailliertesten Aufzeichnungen der seismischen Aktivität weltweit.

Auf Grundlage dieser robusten Datenbasis lassen sich folgende Aussagen abstützen (vgl. Fig. 2-5):

- Die Schweiz ist ein Land mit allgemein mittlerer seismischer Gefährdung und mit regional variierender seismischer Aktivität.
- Die Seismizität wird bestimmt durch die Kollision von Europa mit Afrika, der daraus resultierenden Hebung der Alpen und damit verbundener Tektonik (Nagra 2024a, Nagra 2024c).
- Schwerpunkte der Seismizität sind der südliche Ausläufer des Oberrheingraben im Gebiet um Basel sowie das Rhonetal im Wallis.
- Im regionalen Kontext der Nordschweiz sind tektonische Phänomene, wie z.B. der Bodensee-Hegau-Graben, von einer gewissen Bedeutung (Nagra 2024a, Diehl et al. 2023).
- Die Region um den Standort zeichnet sich durch eine im Vergleich zu anderen Regionen der Schweiz deutlich geringere seismische Aktivität aus und gehört zu den seismisch ruhigsten Gebieten der Schweiz.
- Im Umkreis des Standorts lassen sich keine aufgezeichneten Erdbeben mit bekannten lokalen Strukturen in Verbindung setzen.

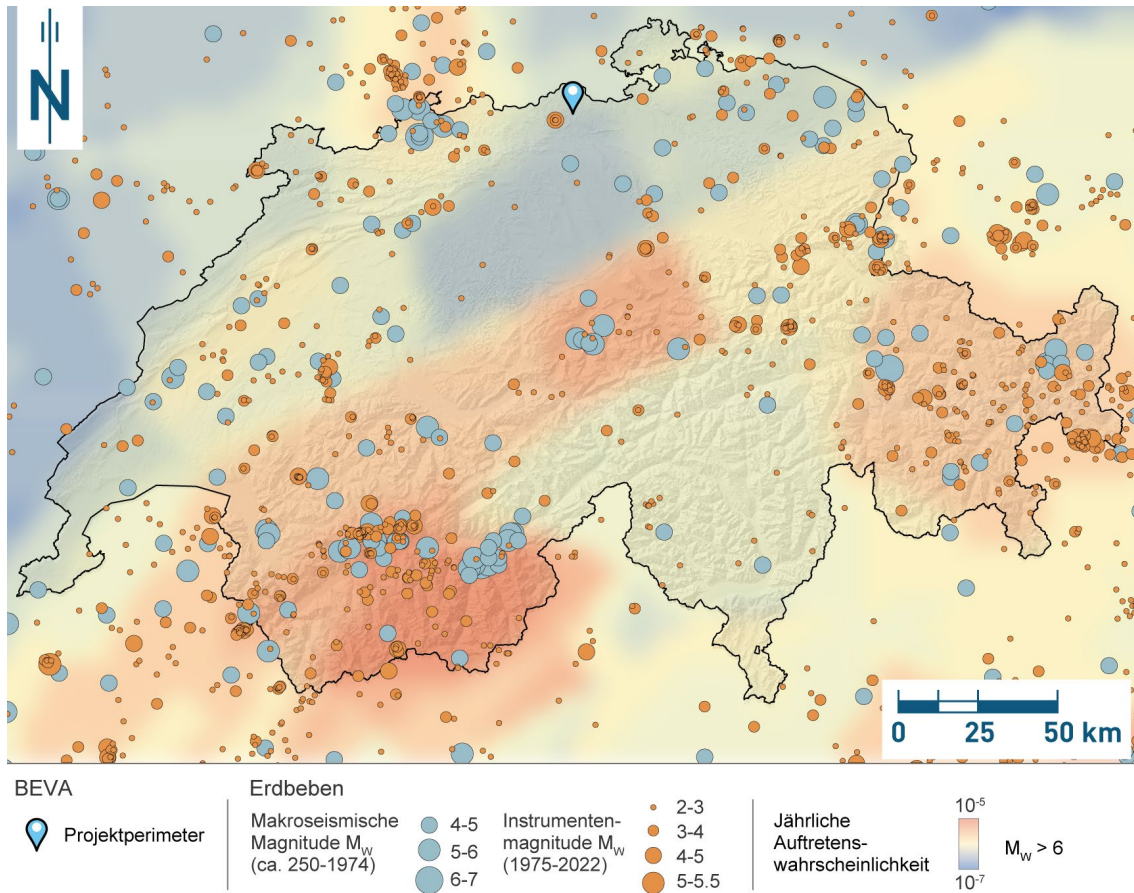


Fig. 2-5: Darstellung des Schweizer Erdbebenkatalogs des SED (Fäh et al. 2011) inkl. einer Aktualisierung bis einschliesslich 30.09.2023 zusammen mit der modellierten Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden  $M_w \geq 6$  in der Schweiz, basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen im Rahmen des PRP-Projekts

In Farbe gezeigt ist die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Erdbebens mit  $M_w \geq 6$  in einem Gebiet von  $0.05^\circ$  Länge  $\times$   $0.05^\circ$  Breite (entspricht ca.  $21 \text{ km}^2$ ) für Herdtiefen  $< 15 \text{ km}$ . Zum Vergleich sind die effektiv erfassten Erdbeben mit  $M \geq 2$ , bzw. historisch dokumentierte Erdbeben mit  $M \geq 4$  dargestellt.

### 3 Baugrundeigenschaften

Für den Standort liegen, bedingt durch die benachbarten bestehenden Kernanlagen, umfangreiche geologische und hydrogeologische Untersuchungen, inkl. langer Zeitreihen von Grundwasserständen sowie bautechnische Prognosen vor. Eine detaillierte Beschreibung der Baugrundverhältnisse findet sich in Nagra (2024b). Hier werden nur die wesentlichen Aussagen, die für die Bestimmung der Erdbebengefährdung unmittelbar relevant sind, diskutiert.

Im Rahmen der Bautätigkeiten für das Zwilag sowie umliegender Bauten wurden umfangreiche Sondierungen durchgeführt, die zu einem umfassenden Bild des Baugrunds beitragen. Zu nennen sind dabei insbesondere die Sondierbohrungen der Jahre 1990, die das Quartär bis in den Felsuntergrund durchteuften (Fig. 3-1).

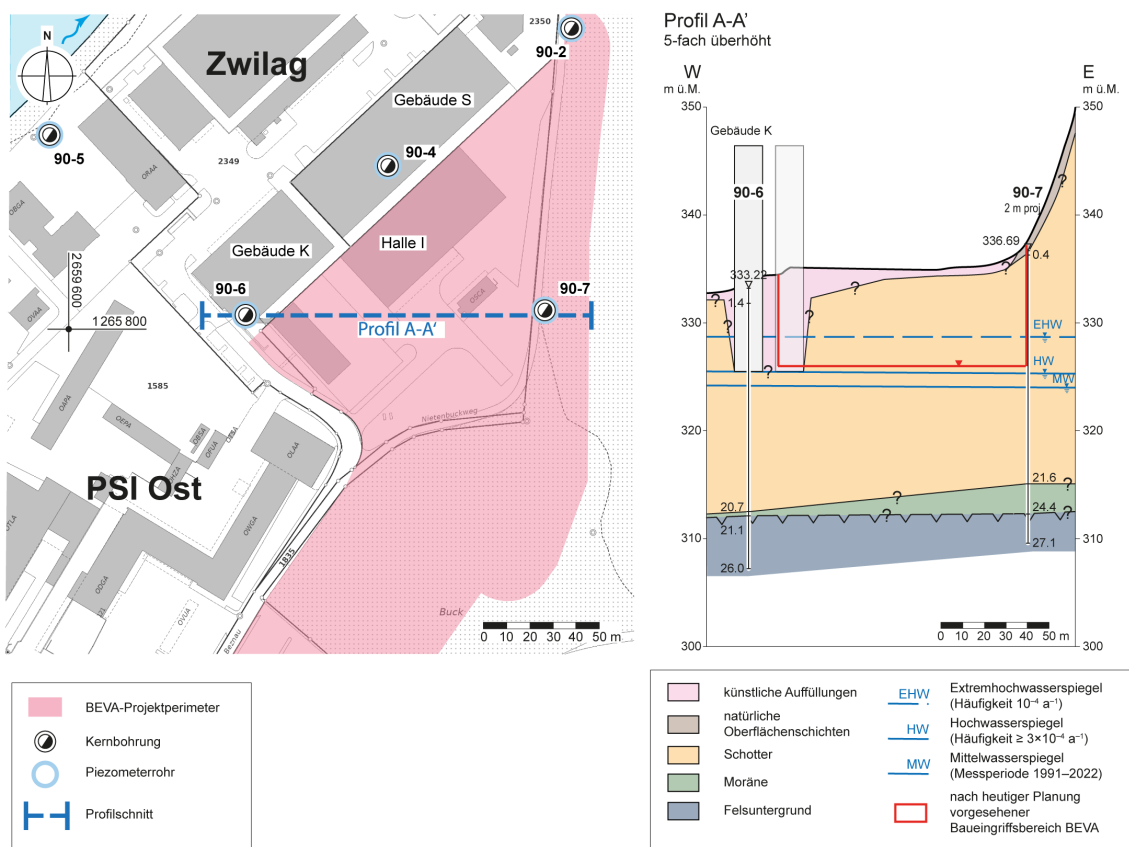


Fig. 3-1: Karte mit den Baugrunduntersuchungen am Standort Zwilag und daraus abgeleitetes Modell (Profil A–A') des Baugrunds für den Projektperimeter der BEVA (Nagra 2024b)

## **3.1      Untergrundverhältnisse**

### **3.1.1     Künstliche Auffüllungen**

Im Anlagenperimeter sind ab der Terrainoberfläche zunächst künstliche Auffüllungen (Gebäudehinterfüllungen, Kieskoffer etc.) zu erwarten. Diese bestehen gemäss älteren Sondierungen grösstenteils aus sauberem, z.T. auch leicht bis mässig siltigem Kies mit reichlich Sand und z.T. einzelnen Steinen.

### **3.1.2     Natürliche Oberflächenschichten**

Die natürlichen Oberflächenschichten bestehen aus grösstenteils tonigem Silt mit reichlich bis viel Sand sowie z.T. wenig Kies und organischen Resten. Im Zuge der baulichen Tätigkeiten wurden sie grösstenteils abgetragen und durch künstliche Auffüllungen ersetzt bzw. mit solchen überschüttet. Im mittleren, aktuell bewaldeten, bisher unbebauten Bereich des Anlagenperimeters dürften natürliche Oberflächenschichten ab der Terrainoberfläche anstehen.

### **3.1.3     Niederterrassenschotter**

Unter den Auffüllungen bzw. den Oberflächenschichten folgt ab ca. 0.4-10.0 m Tiefe der Niederterrassenschotter. Die ursprüngliche, natürliche Schotterobergrenze lag im nördlichen Anlagenperimeter vor der Bebauung des Zwilag-Areals auf ca. Kote 331.8-334.4 m ü.M. resp. ca. 1.0-1.4 m unter Terrain. Im Hinterfüllungsbereich der Gebäude ist die Schotterobergrenze heute entsprechend tiefer zu erwarten. Im mittleren sowie im südlichen Projektperimeter dürfte der Schotter in ca. 0.4-1.4 m Tiefe anstehen, entsprechend ca. Kote 334.6-335.6 m ü.M. Die ursprüngliche natürliche Schottermächtigkeit beträgt im Anlagenperimeter ca. 15-20 m, lokal im östlichen Hangbereich auch über 20 m.

Der Schotter setzt sich grösstenteils aus sauberem Kies mit reichlich Sand sowie Steinen und Blöcken zusammen. In den älteren Sondierungen wurden teilweise Blöcke mit bis zu 60 cm Durchmesser festgestellt, wobei erfahrungsgemäss vereinzelt auch noch etwas grössere Blöcke auftreten können. Der Anteil der Steine und Blöcke beträgt schichtweise bis ca. 30 Gew.-%. Im obersten Meter des Schotterkomplexes sowie schichtweise auch in grösserer Tiefe ist der Schotter schwach siltig ausgebildet. Der Schotter weist in den obersten rund 1-2 m eine mittlere und darunter eine hohe Lagerungsdichte auf und ist entsprechend als gut tragfähig und nur wenig setzungsempfindlich zu beurteilen.

### **3.1.4     Moräne**

In den älteren Kernbohrungen (Nrn. 90-4, 90-6 und 90-7) wurden unter dem Schotter, ab ca. 15-21 m Tiefe, Überreste von Moränen angetroffen. Die Mächtigkeit der Moräne beträgt in diesen Bohrungen zwischen ca. 0.5 und 5 m. In der weiter südwestlich liegenden Bohrung Nr. 11-1 wurde hingegen keine Moräne erbohrt. Beim Moränenmaterial handelt es sich vorwiegend um tonigen Silt mit viel Feinsand und unterschiedlichem Kiesanteil sowie z.T. Steinen. Schichtweise kann der Kiesanteil auch gewichtsmässig überwiegen. Die Moräne weist erfahrungsgemäss eine hohe bis sehr hohe Lagerungsdichte auf und ist als kaum setzungsempfindlich und gut tragfähig zu beurteilen.

### 3.1.5 Felsuntergrund

Der Felsuntergrund wurde in den Sondierungen im nördlichen Anlagenperimeter in rund 22-25 m Tiefe erreicht (siehe Fig. 3-2). Es handelt sich dabei um detritische, eisenoolithische oder spätige Kalke sowie Ton- und Kalkmergel, welche stratigrafisch dem Effingen-Member (Wildeg-Formation, unterer Malm) bzw. dem obersten Dogger (Variansmergel-Formation) zuzuordnen sind. Ungefähr der oberste halbe Meter des Felsuntergrundes erschien in den älteren Bohrungen verwittert. Das Schichteinfallen beträgt rund 10-15° Richtung Süden. Der Felsuntergrund ist als praktisch inkompressibel und somit als sehr gut tragfähig zu beurteilen.



Fig. 3-2: Mächtigkeit des Quartärs am Standort, abgeleitet aus Sondierbohrungen

### 3.2 Grundwasserverhältnisse

Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters variiert im Anlagenperimeter gemäss den älteren Sondierungen zwischen etwa 7 und 14 m. In der Grundwasserkarte des Kantons Aargau (Abteilung für Umwelt Aargau 2023) ist für den Perimeter durchwegs eine grosse Grundwassermächtigkeit angegeben. Der mittlere Grundwasserspiegel im Bereich des Anlagenperimeters liegt dabei circa bei Kote 324 m ü.M. (Nagra 2024b).

In den Bohrungen Nrn. 90-1 bis 90-7 wurden 1990 zahlreiche Kurzpumpversuche durchgeführt (Jäckli AG 1991). Diese ergaben Durchlässigkeitsbeiwerte  $k$  von  $1 \cdot 10^{-3}$  bis  $1 \cdot 10^{-2}$  m/s, was einer hohen bis sehr hohen Durchlässigkeit entspricht. Für weitere Details zum Grundwasser am Standort sei auf Nagra (2024b) verwiesen.

### 3.3 Dynamische Baugrundwerte

Im Anlagenperimeter liegen, im Gegensatz zu den Standorten der Schweizer Kernkraftwerke, keine umfassenden Untersuchungen zur Ermittlung der bodendynamischen Baugrundeigenschaften (Feld- und Laborversuche) vor. Die Prognose zu den bodendynamischen Baugrundwerten stützt sich auf ingenieurmässige Auswertungen der bestehenden Grundlagen aus den nah gelegenen Kernanlagen (Zwilag, PSI) sowie des KKB ab.

#### 3.3.1 Scherdehnungsabhängige Materialwerte

Die scherdehnungsabhängigen Materialmodelle des Lockergesteins werden identisch zu den Werten des Niederterrassenschotter am Standort KKB angenommen (swissnuclear 2010). Die KKB-Materialmodelle für das Schubmodul  $G$  und die Bodendämpfung  $\xi$  wurden im Rahmen des PRP-Projekts mit umfassenden Untersuchungen erhärtet. Es werden sowohl die *best estimate* Werte als auch die Minimal- und Maximalwerte in den Berechnungen berücksichtigt (Fig. 3-3 bzw. Tab. A-1).

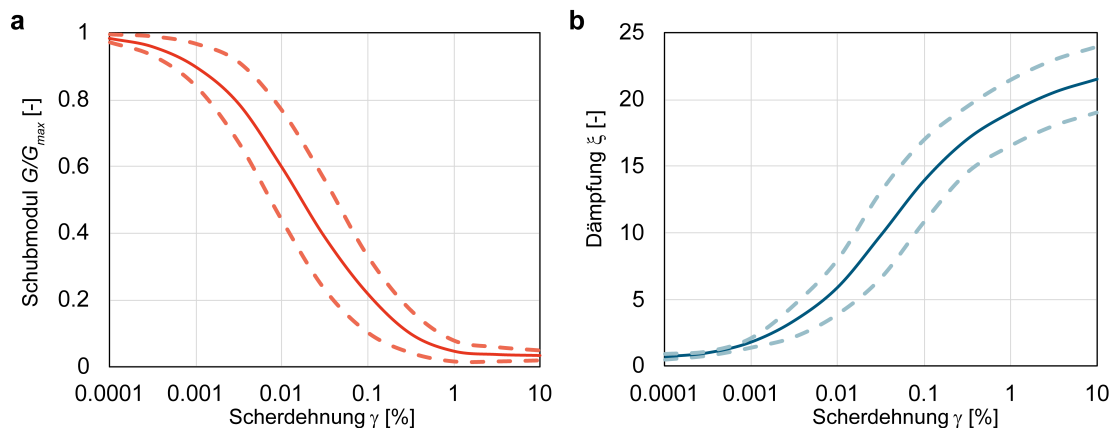


Fig. 3-3: (a) Scherdehnungsabhängiges Schubmodul und (b) Materialdämpfung des Niederterrassenschotter am KKB jeweils mit *best estimate* (durchgezogen) sowie den Minimal- und Maximalwerten (gestrichelt)

Zahlenwerte sind in Tab. A-1 enthalten.

#### 3.3.2 Profile für die Scherwellengeschwindigkeit

Aus der Vielzahl verfügbarer Grundlagen wurden für den Anlagenperimeter eine Schar von 30 Profilen für die Scherwellengeschwindigkeit  $V_s$  generiert (siehe Fig. 3-4). Diese Profilschar weist einen Variationskoeffizienten von  $COV = 0.225$  entlang der gesamten Tiefe auf und deckt damit ein grosses Unsicherheitsband ab.

Die Mächtigkeit des Niederterrassenschotter wurde im Referenzfall mit 20 m angenommen. Dieser Wert stimmt gut mit den vorhandenen Untersuchungen im nördlichen Bereich des An-

lagenperimeters überein (Fig. 3-2). In Anbetracht der Ausdehnung bzw. der Ungewissheiten für den mittleren und südlichen Anlagenperimeter wurde die Mächtigkeit des Lockergesteins zwischen 15-25 m in einer Sensitivitätsstudie variiert.

Tab. 3-1 dokumentiert die Werte des mittleren Initialprofils für eine Mächtigkeit des Niederterrassenschotters von 20 m und die angesetzten Materialmodelle pro Schicht. Für das Materialmodell des Fels werden die in der Software SHAKE verfügbaren Modulreduktions- und Dämpfungskurven "Rock (Idriss)" verwendet (Schnabel et al. 1970). Der Bereich unterhalb von 40 m wird als elastischer Halbraum modelliert.

Der Grundwasserspiegel wurde 8 m unterhalb der Geländeoberkante angenommen; es wurde keine Sensitivitätsstudie bzgl. einer Variation der Kote des Grundwasserspiegels veranlasst.

Die numerischen Werte der 30 Profile der Scherwellengeschwindigkeit für eine Mächtigkeit von 20 m des Lockergesteins sind in Fig. 3-4 ersichtlich. Bei der Sensitivitätsstudie mit 15-25 m Niederterrassenschotter wurde in den entsprechenden Bodenschichten das Materialmodell (Schotter, Fels) getauscht; der Wert von  $V_s$  beim Initialprofil wurde jedoch nicht modifiziert.

Tab. 3-1: Werte des mittleren  $V_s$ -Initialprofils, Schichtstärke  $h_i$  und Wichte des Bodens für die eindimensionalen Standortanalysen in der Software ProShake

Material	Tiefe $z$ [m]	$h_i$ [m]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	Materialgesetz
Schotter oberhalb Grundwasserspiegel	0	0.75	19.6	280	Schotter
	0.75	0.75	19.6	280	Schotter
	1.5	0.75	19.6	320	Schotter
	2.25	0.75	19.6	320	Schotter
	3	1	19.6	400	Schotter
	4	1	19.6	400	Schotter
	5	1	19.6	460	Schotter
	6	1	19.6	490	Schotter
Schotter unterhalb Grundwasserspiegel	7	1	19.6	520	Schotter
	8	1.5	21.6	570	Schotter
	9.5	2	21.6	640	Schotter
	11.5	2.5	21.6	690	Schotter
	14	3	21.6	710	Schotter
Fels (Kalk, Mergel)	17	3	21.6	740	Schotter
	20	5	26	1800	Fels
	25	5	26	1800	Fels
	30	5	26	1800	Fels
Halbraum	35	5	26	1800	Fels
	40	-	26.5	1800	Elastisch

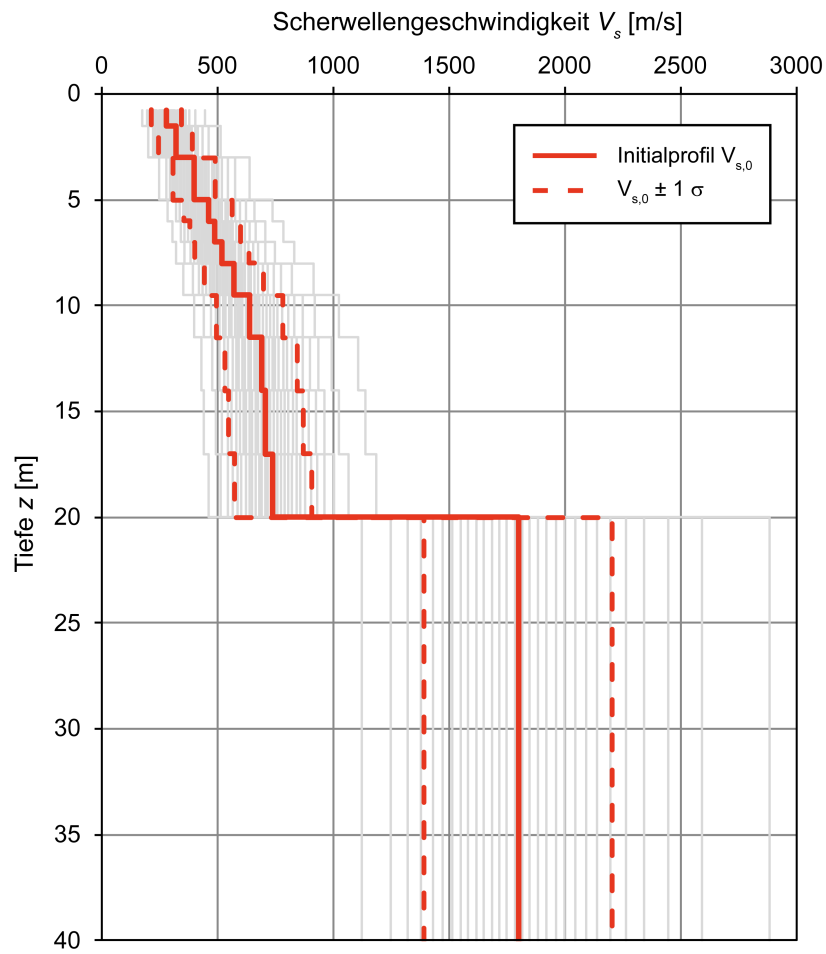


Fig. 3-4: Verwendete  $V_s$ -Profile für kleine Scherdehnungen mit dem Initialprofil, sowie einer Schar von 30  $V_s$ -Profilen mit  $COV=0.225$  für den Anlagenperimeter

## 4 Betrachtung der Gefahrenbilder

### 4.1 Verschiebungsgefährdung

Eine Verschiebungsgefährdung setzt aktive oder zumindest reaktivierbare Störungszonen im Bereich der Gebäude oder näheren Umgebung voraus. Ein Versatz der Bruchfläche könnte dabei Schäden an Gebäude- bzw. Anlagenteilen verursachen. Ein solcher Versatz müsste zudem relativ rasch entstehen (z.B. durch ein Erdbeben) und grössere Versätze produzieren, um tatsächlich Schäden auszulösen.

Zur Bewertung der Verschiebungsgefährdung sollen Hinweise auf Störungszonen betrachtet werden, die möglicherweise einen Bruch hervorbringen können, der bis an die Oberfläche reicht (IAEA 2022). Das Potential für Oberflächenverschiebungen wurde in Rahmen des RBGs für das Ersatzkernkraftwerk Beznau (EKKB) untersucht. In Bezug auf das Potenzial für Oberflächenverschiebungen hielt der Gesuchsteller EKKB fest, dass für das Gebiet des vorgeschlagenen Kernkraftwerks keine Störungen bekannt sind, die als *capable* zu betrachten sind. Die nächstgelegene Störung ist die Mandach-Überschiebung, deren Ausbisslinie an der Felsoberfläche durch den südlichsten Teil der Beznau-Insel zieht. Es wurde dargestellt, dass die Mandach-Überschiebung nicht als aktive Störung zu betrachten ist. Dazu wurde anhand von geomorphologischen Untersuchungen (Kartierung der Felsoberfläche) (Interoil 2009), sowie LiDAR Aufnahmen im Bereich der Niederterrasse (Fraefel 2008) dargelegt, dass keine Indizien für tektonische Bewegungen im Gebiet des unteren Aaretals in den letzten 20'000 Jahren vorliegen. Geodätische Messungen lassen allenfalls eine grossräumige regionale Kippbewegung in der Grössenordnung von 0.1 mm/Jahr erkennen. Daraus wurde abgeleitet, dass am Standort des EKKB keine Verschiebungsgefährdung besteht. Das ENSI stimmte dieser Beurteilung im Gutachten zum RBG des EKKB zu (ENSI 2010). Die Quellenmodelle, die den Resultaten des PRP bzw. ENSI-2015 zugrunde liegen, liefern gleichfalls kein Indiz auf *capable faults* in der Nähe des Standorts.

Zur Aktualisierung der oben beschriebenen Betrachtungen bzw. deren Übertragung auf den Standort können verschiedene 2D-Seismiklinien der Nagra herangezogen werden (Fig. 2-2). Diese wurden im Zuge der Standortsuche für das geologische Tiefenlager erstellt und dienen insbesondere der Abbildung von Strukturen in den Schichtstapeln des Känozoikums und des Mesozoikums. Die Seismiklinien östlich (Line 11-NS-10, Fig. 2-3 und Beilage 4-1) sowie westlich (Line 82-NX-40, Beilage 4-3) des Anlagenperimeters zeigen keine Anzeichen von Störungen unterhalb der Basis Malm. In geringerer Tiefe führt die komplexe interne Struktur des Malm zu Unterbrechungen der Reflektivität, die nicht mit Störungen in Zusammenhang stehen. Darüber hinaus sind unterhalb des Opalinuston keine weiteren Störungen im Bereich des Anlagenperimeters sichtbar. Weiterhin gibt es im Sockel keine Anzeichen, die auf die Anwesenheit von seismisch nicht abgebildeten Strukturen hinweisen. Das Fehlen von seismisch kartierbaren Störungen in grösserer Tiefe (unterhalb des Opalinuston) unterstützen die Interpretation der flacheren Einheiten als ein strukturell ungestörtes Intervall.

Die 2D-Seismiklinie 11-NS-37 (Fig. 2-4 und Beilage 4-2), welche etwa 1.1 km südlich des Anlagenperimeters und etwa parallel zur Siggenthal Antiklinale verläuft (Madritsch et al. 2013), unterstützt diese Beobachtungen. Sie zeigt eine ungestörte Zone von mindestens 2.5 km Breite, wo eine kontinuierliche Reflektivität das Fehlen von Anzeichen seismisch kartierbarer Störungen anzeigt. Der Anlagenperimeter befindet sich etwa 2 km nördlich der Siggenthal Antiklinale und liegt damit ausserhalb von ihrem Einflussbereich.

Durch geodätische Messungen wurde bereits 2010 eine grossräumige Kippbewegung mit etwa 0.1 mm/Jahr festgestellt. Diese Interpretation wird auch durch die nun vorliegenden längeren Zeitreihen der Nivellement-Messungen bestätigt (Nagra 2024a). Die im Bereich des Standorts festgestellten Hebungen bzw. der Übergang zu Senkungen im Bereich des Rheins stellt keine

differentielle Deformation im Bereich des Standorts dar, sondern sind als Teil der grossräumigen tektonischen Prozesse im Zusammenhang mit der alpinen Tektonik zu interpretieren. Eine Lokalisierung der Deformation am Standort ist nicht feststellbar.

### **Fazit**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es am Standort keine Störungszone gibt, die zu einer Oberflächenverschiebung führen könnte. Zudem lassen sich auch im lokalen Kontext keine Deformationen innerhalb der letzten 20'000 Jahre nachweisen, die auf solche lokalisierten Deformationvorgänge hindeuten. Regional ist eine Kippbewegung der Geländeoberfläche mit einer Rate von etwa 0.1 mm/Jahr nachweisbar, die jedoch zu keinen differentiellen Deformationen im Bereich des Standorts führt. Damit ergibt sich für den Standort keine Verschiebungsgefährdung.

## **4.2 Erdbeben-induzierte Gefahren**

Die indirekten Auswirkungen von Erdbeben auf das geologische Umfeld im Anlagenperimeter werden in diesem Kapitel adressiert.

### **4.2.1 Setzungen**

Infolge seismisch induzierter Schubverzerrungen kann es in Lockersedimenten zu einer Verdichtung des Korngefüges kommen, die zu bleibenden vertikalen Setzungen des Baugrunds führt. In der vorliegenden Arbeit werden die seismischen Setzungen infolge der Erdbebengefährdung nach ENSI-2015 in Anlehnung an die Empfehlungen KTA 2201.2 (KTA 2012) berechnet. Demnach beträgt die erdbebeninduzierte Bodenverdichtung der Sedimentschichten im Anlagenperimeter lediglich 0.3 cm. Mit einer Projektierungsannahme des BEVA-Gebäudes mit einem Untergeschoss würde sich der Betrag dieser Setzung noch weiter reduzieren. Damit ergeben sich keine Einschränkungen für die Standorteignung.

### **4.2.2 Gravitative Massenbewegungen**

#### **Steinschlag, Fels- oder Bergsturz**

Da in der Umgebung des Anlagenperimeters keine Felshänge/-böschungen vorhanden sind, können Gefahren durch Steinschlag, Fels- oder gar Bergsturz ausgeschlossen werden. Die westlich der Aare im Gebiet «Cheestel» vorhandenen Felsböschungen liegen bereits zu weit von der Aare entfernt, um bei einem allfälligen Bergsturzereignis überhaupt das westliche Ufer erreichen zu können.

#### **Rutschungen**

Permanente Rutschungen können aufgrund der Geländemorphologie sowie der Untergrundverhältnisse ausgeschlossen werden. Bezüglich spontaner Rutschungen und Hangmuren gilt es zu berücksichtigen, dass der Standort relativ nahe an einer Terrassenkante liegt. Diese weist eine Böschungshöhe von knapp 20 m und eine Böschungsneigung von teilweise bis zu über 30° auf. Gemäss Nagra (2024b) ist das Potenzial für Hangmuren aufgrund der Untergrundverhältnisse aber generell sehr gering und kann mit einfachen baulichen Massnahmen beherrscht werden.

### 4.2.3 Bodenverflüssigung

Ein Potenzial für Bodenverflüssigung besteht nur in sauberen Sanden oder Silten mit schlechter Sortierung, geringer Lagerungsdichte und hoher Empfindlichkeit gegenüber einer Änderung des Wassergehalts.

Der Untergrund im Bereich der erforderlichen Baugruben besteht aus dicht gelagertem Niederterrassenschotter. Dieser ist auch der Grundwasserleiter. Aufgrund der hohen Lagerungsdichte und der guten Wasserdurchlässigkeit weist der Schotter keine Tendenz zu Bodenverflüssigung auf. Zudem können aufgrund der Materialzusammensetzung (keine löslichen Bestandteile enthalten) und der Mächtigkeit des Schotters Subrosionsprozesse ausgeschlossen werden (Nagra 2024b).

Im Rahmen von PRP wurden auf Grundlage der umfangreichen Datenbasis für die Standorte der Kernkraftwerke Berechnungen zur Bodenverflüssigung durchgeführt (swissnuclear 2013). Für den Standort KKG kam man zum Schluss, dass die Permeabilität der Schotter gross genug ist, um ein kritisches Ansteigen von Porendrücken zu vermeiden. Allenfalls in Linsen auftretende Instabilitäten infolge grösserer Porendrücke werden durch den Lockergesteinskörper getragen. In (swissnuclear 2013) wurde zudem dargestellt, dass sich die Berechnung für den Standort KKG auch auf die anderen KKW-Standorte übertragen lässt. Da das Lockergestein am Standort vergleichbar mit denen am Standort KKB ist, wird eine Bodenverflüssigung als sehr unwahrscheinlich eingestuft und diese wäre auf Linsen mit feinkörnigem Material beschränkt. Somit besteht am Standort keine Gefährdung durch Bodenverflüssigung.

## 4.3 Seismische Gefährdung

### 4.3.1 Einführung

Im folgenden Kapitel soll die seismische Gefährdung am Standort bewertet werden. Dabei werden probabilistische seismische Gefährdungsstudien einbezogen. Das Ziel solcher Studien ist die Einflüsse der möglichen Erdbebenquellen, den Ausbreitungspfad zum untersuchten Standort, sowie die lokalen Einflüsse, welche eine Verstärkung verursachen können (Fig. 4-1), gesamthaft zu beschreiben.

Für das Rahmenbewilligungsgesuch der BEVA müssen diese Analysen für Bodenbewegungen infolge von Erdbeben mit einer Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  bzw.  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  (entsprechend den sogenannten Nachweiserdbeben der Störfallkategorien 2 und 3 (NESK2 resp. NESK3)) durchgeführt werden (Kap. 5.1.2 ENSI-G23 (ENSI 2021)).

Die einzelnen Schritte solcher Gefährdungsstudien sind schematisch in Fig. 4-2 dargestellt. Zuerst werden die seismischen Quellen in einem ausreichend gross gewählten Einflussbereich identifiziert und mit Hilfe von spezifischen Magnitude-Häufigkeit-Verteilung und anderen Parametern charakterisiert. Zweitens werden geeignete Bodenbewegungsmodelle (engl. *Ground Motion Prediction Equations*) gewählt, um die Fortpflanzung der seismischen Wellen zwischen Quelle und Standort zu beschreiben. In einem dritten Schritt wird die Gefährdung am Standort in der Tiefe des Referenzfels (engl. *Bedrock*) ausgewertet.

Mit Hilfe von Feld- bzw. Laborversuchen werden Kenntnisse über die oberflächennahen Sedimentschichten gewonnen und die bodendynamischen Eigenschaften des Baugrundes beschrieben. Damit werden die Standorteffekte (Amplifikationen der seismischen Wellen) berechnet und so die Erdbebengefährdung an der Terrainoberfläche ermittelt.

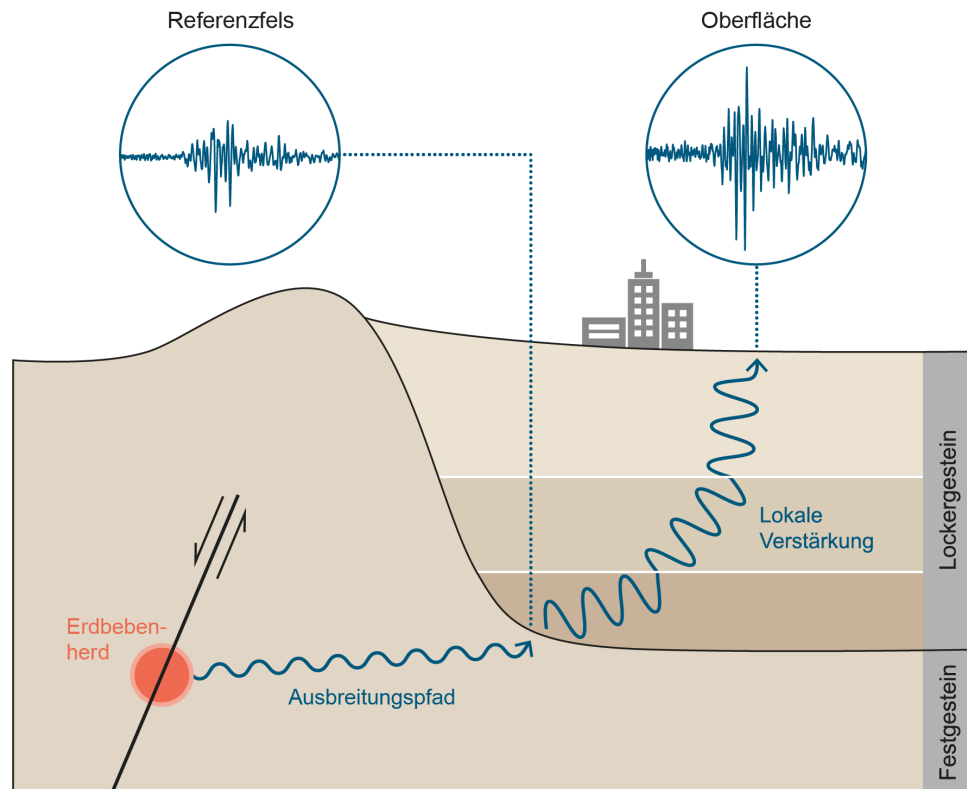


Fig. 4-1: Komponenten der standortspezifischen Erdbebengefährdung

Erdbebenherde als Quellen für seismische Wellen, Ausbreitungspfade bis zum Referenzfels, lokale Verstärkung in den weichen Sedimenten darüber.

#### 4.3.2 Datenbasis ENSI-2015

In Anbetracht der fortwährenden Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik verlangte das ENSI im Jahre 1999 von den Kernkraftwerksbetreibern, die Erdbebengefährdung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik neu zu bewerten. Zur Umsetzung der Forderung des ENSI gaben die Kernkraftwerksbetreiber das Projekt PEGASOS (Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz) in Auftrag. In Anlehnung an die Vorgaben des Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC) für probabilistische Studien zur seismischen Gefährdung (Senior Seismic Hazard Analysis Committee 1997, Kammerer & Ake 2012, Ake et al. 2018) wurde in diesem Projekt die Erdbebengefährdung unter Berücksichtigung des Kenntnisstandes der internationalen Fachwelt ermittelt. Dazu wurden Experten von verschiedenen fachtechnischen Organisationen aus dem In- und Ausland beigezogen.

Das Projekt wurde vom ENSI von Anfang an mit einem Expertenteam begleitet. Das ENSI kam zum Schluss, dass mit dem Projekt PEGASOS die methodischen Vorgaben erfüllt wurden und dass hinsichtlich verschiedener Aspekte (Qualitätssicherung, Erweiterung der Methode auf die Charakterisierung der Standorteinflüsse) sogar ein neuer Stand der Technik erreicht wurde. Doch stellte das ENSI auch fest, dass die in den PEGASOS-Ergebnissen ausgewiesene Bandbreite der Ungewissheiten recht gross ist und durch weitere Untersuchungen verkleinert werden könnte.

Mit dem Ziel, die Unschärfe der PEGASOS-Ergebnisse zu reduzieren, starteten die Kernkraftwerksbetreiber im Jahr 2008 das von swissnuclear geleitete „PEGASOS Refinement Project“ (PRP). Die Hauptthemen des Projekts waren, wie bereits bei PEGASOS, die Charakterisierung

der Erdbebenherde, die Wellenausbreitung und die seismologischen Bodeneigenschaften an den Standorten der Kernkraftwerke. Das PRP berücksichtigte neueste Erkenntnisse der Seismologie und die Resultate der durchgeführten Messungen der seismologischen Bodeneigenschaften an den Standorten der Kernkraftwerke.

Mit Abschluss des PRP im Jahr 2013 und nach Prüfung der Ergebnisse hat das ENSI im Frühjahr 2016 neue seismische Gefährdungen für die Schweizer Kernkraftwerke festgelegt. Aufgrund von Vorbehalten zum PRP-Teilprojekt 1 liess das ENSI in einer Sensitivitätsanalyse diesen Modellteil durch den entsprechenden Modellteil von SUH<sub>haz</sub>2015 (Wiemer et al. 2016), des Modells des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED), ersetzen. Im Mai 2016 verfügte das ENSI (ENSI 2016) die Inkraftsetzung der als «ENSI-2015» bezeichneten Resultate für die vier KKW-Standorte der Schweiz.

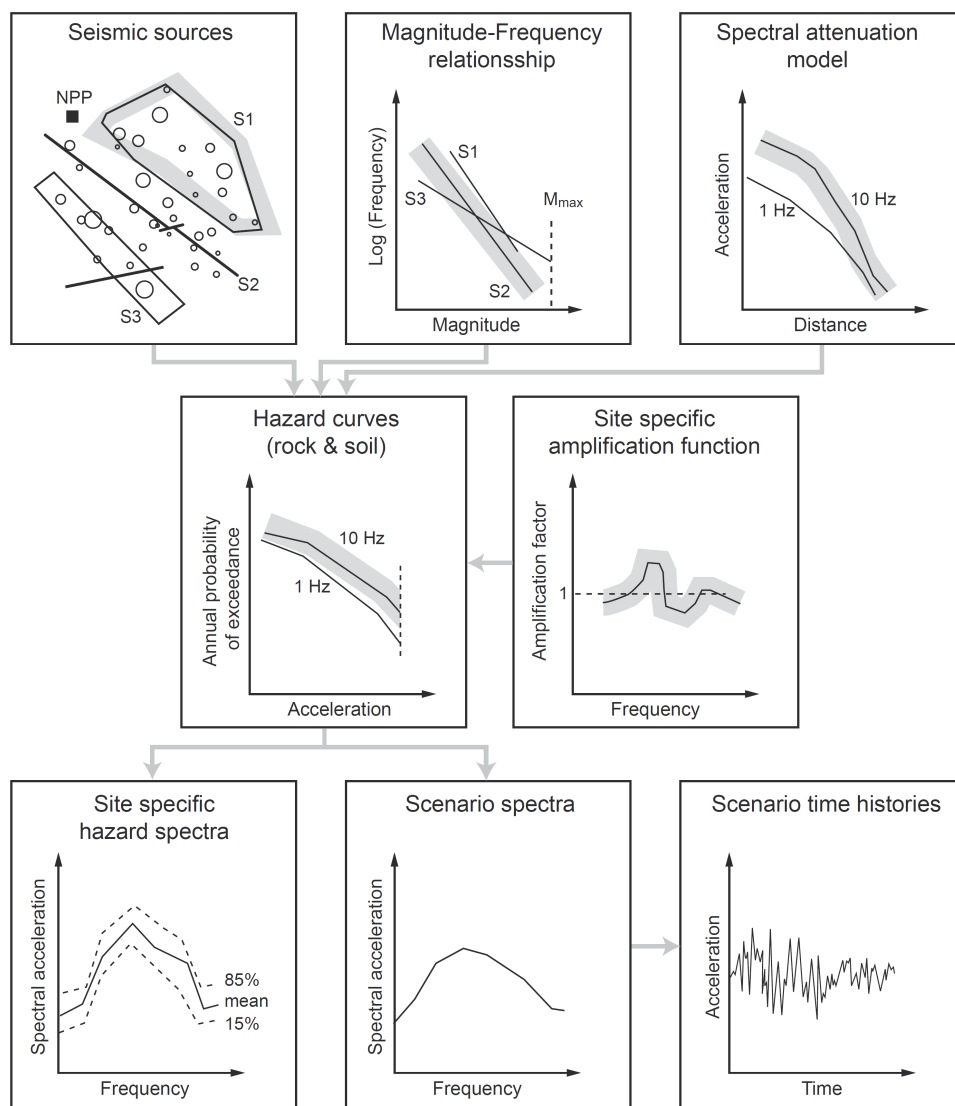


Fig. 4-2: Schematische Darstellung des Workflows für eine probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse und Schritte des Post-Processing (*Scenario spectra* resp. *Scenario time histories*)

(swissnuclear 2013)

Ein Vergleich der Ergebnisse aus PRP und ENSI-2015 für die vier Schweizer KKW Standorte ist in Proseis (2015) dokumentiert. Fig. 4-3 zeigt die gefährdungskonsistenten Antwortspektren (*Uniform Hazard Spectra* UHS) der horizontalen Bodenbeschleunigung in der Tiefe (Referenzfels) am Standort KKB. Das UHS aus ENSI-2015 hüllt die Werte von PRP über das gesamte Frequenzspektrum ein, was den konservativen Charakter von ENSI-2015 unterstreicht. Beide Kurven liegen unterhalb der von PEGASOS, da mittels der zusätzlichen Charakterisierung der Standorte, die in PRP und ENSI-2015 einfluss, Konservativitäten reduziert werden konnten.

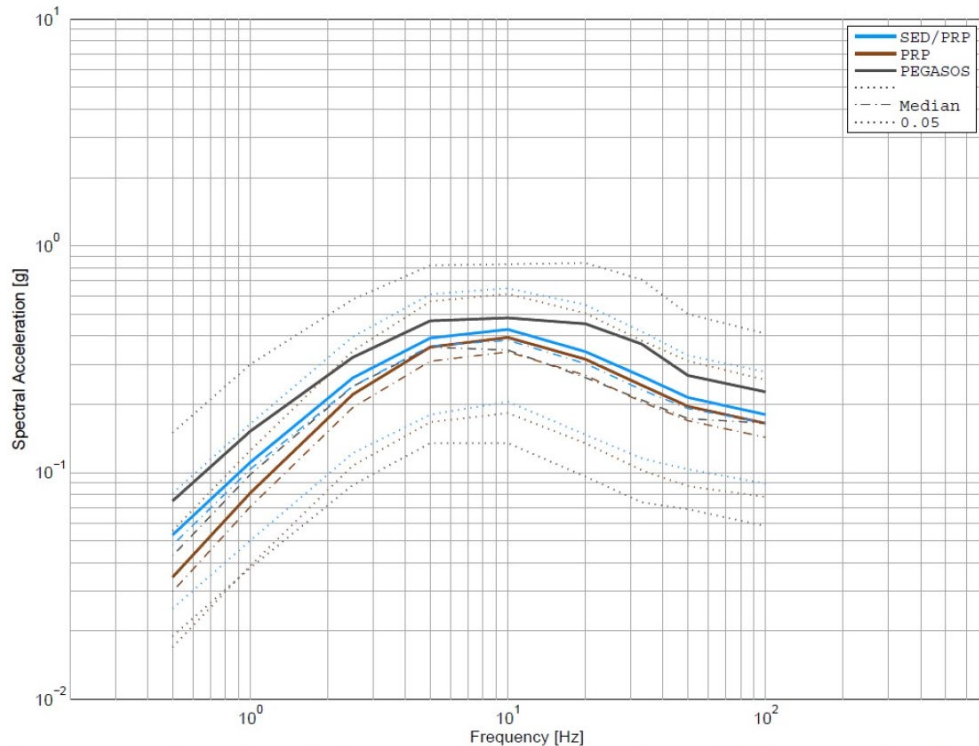


Fig. 4-3: Gefährdungskonsistente Antwortspektren (*Uniform Hazard Spectra*, UHS) der horizontalen Felsgefährdung aus PEGASOS (2004), PRP (2013) und SED/PRP (= ENSI-2015) für  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  und 5 % Dämpfung am Standort KKB (Proseis 2015)

### 4.3.3 Übertragbarkeit der Felsgefährdung

Die seismische Gefährdung am Referenzfels für die Erdbebengefährdungsmodelle PRP bzw. ENSI-2015 wurde mit dem Berechnungsprogramm Frisk88 (Risk Engineering Inc. 2003) bestimmt. Das gesamte Einzugsgebiet wurde in Frisk88 in einem Raster von 7705 Zellen mit Abmessungen von  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (ca.  $4.5 \times 4.5 \text{ km}$ ) diskretisiert. In Anbetracht des Luftabstands von ca. 1.3 km zwischen den beiden Standorten kann angenommen werden, dass die seismischen Erschütterungen am Referenzfels für das KKB und den Anlagenperimeter identisch sind. Die Scherwellengeschwindigkeit am Referenzfels wird daher vom Standort KKB auf den Standort übertragen und als 1800 m/s angenommen.

### 4.3.4 Felsgefährdung am Anlagenperimeter

Die numerischen Werte des ENSI-2015 UHS-Antwortspektrums am Fels am Standort KKB ist in Tab. A-2 dokumentiert und in Fig. 4-4 und Fig. 4-5 für Überschreitungshäufigkeiten von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  bzw.  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  dargestellt. Für den Referenzfels am Anlagenperimeter werden diese Werte für die horizontale wie die vertikale Anregungsrichtung direkt übernommen.

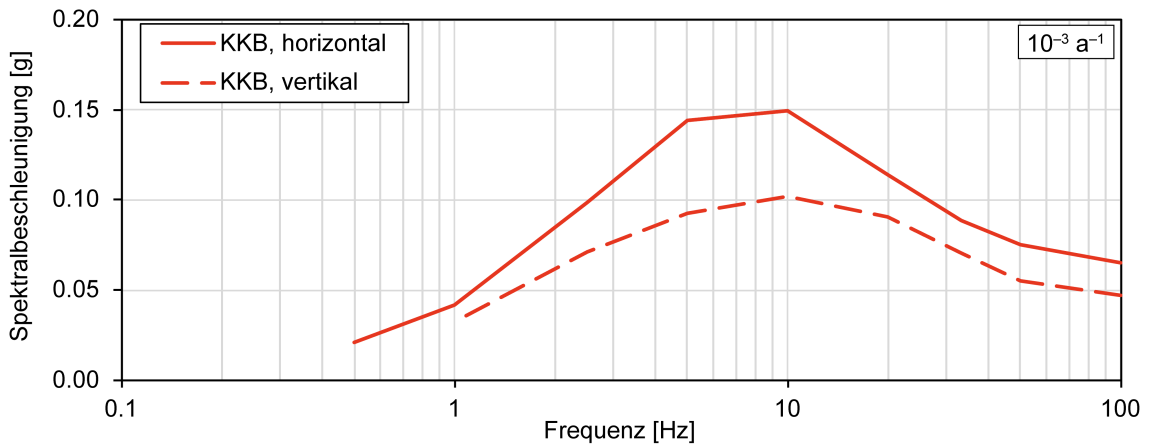


Fig. 4-4: Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015,  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Zwilag

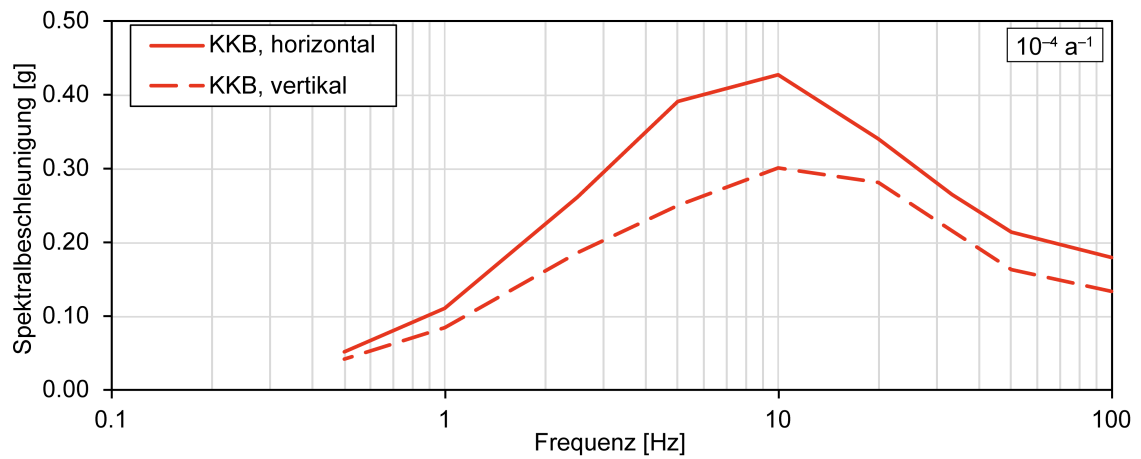


Fig. 4-5: Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015,  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Zwilag

### 4.3.5 Gefährdung an der Terrainoberfläche im Anlagenperimeter

Die horizontale Anregung sowie die daraus resultierenden Antwortspektren an der Oberkante Terrain beim Anlagenperimeter wird anhand von 1-D äquivalent-linearen Standortanalysen mit dem Programm ProShake (EduPro Civil Systems 2017) ermittelt. Zu diesem Zweck werden als seismischer Input Erdbeben-Zeitverläufe an der Tiefe des Referenzfels zugrunde gelegt. Die Analysen wurden für die Nachweiserdbeben der Störfallkategorien 2 und 3 (NESK2 bzw. NESK3) mit einer Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  bzw.  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  durchgeführt.

Für die Ermittlung der Erdbeben-Zeitverläufe werden Aufzeichnungen der Horizontalkomponenten von drei Ereignissen verwendet. Die erforderlichen Erdbeben-Zeitverläufe<sup>1</sup> werden aus der Swissnuclear-Datenbank der 30 Erdbeben-Zeitverläufe entsprechend der KKB NESK3 Erdbebengefährdung (swissnuclear 2017) entnommen.

Mittels eines heuristischen Optimierungsverfahrens (Trial-and-Error-Technik) werden die Erdbeben-Zeitverläufe so lange bearbeitet, bis ihre Antwortspektren mit dem NESK2 bzw. NESK3-Spektrum am Fels übereinstimmen (*Spectral Matching Methodik* nach (Zafeirakos & Gerolymos 2013)) ohne dabei jedoch die allgemeinen nicht-stationären Merkmale des ursprünglichen Erdbeben-Zeitverlaufs nach den Änderungen der spektralen Anpassung zu ändern.

#### 4.3.5.1 Gefährdung durch horizontale Bodenbewegung

Die Gefährdung durch horizontale Bodenbewegung an der OK-Terrain beim Anlagenperimeter wird anhand bodendynamischer Berechnungen mit ProShake (EduPro Civil Systems 2017) berechnet.

Sowohl für das NESK2- als auch für das NESK3-Erdbeben werden 540 äquivalent-lineare Analysen durchgeführt. Die Menge der Analysen setzt sich aus der Kombination von 30 Profilen der Scherwellengeschwindigkeit, drei verschiedenen Materialkennwerten und sechs Erdbebenzeitverläufen zusammen. Bei jeder Berechnung in ProShake wird ein dehnungsabhängiges  $V_s$ -Profil (engl. *strain compatible soil profile*) ermittelt. Darüber hinaus ist es möglich, den Verlauf der horizontalen Bodenbeschleunigung in der Tiefe und das resultierende Bodenantwortspektrum (*outcrop motion*) in einer beliebigen Schicht zu ermitteln. Bei der Modellierung werden äquivalent-lineare Materialmodelle verwendet, welche mögliche moderate Nichtlinearitäten im Boden bei hohen Beschleunigungen abdecken.

Der Mittelwert des horizontalen Bodenantwortspektrums an der Terrainoberfläche wurde aus einer Gewichtung der Rechenergebnisse aus den drei KKB-Materialmodellen für den Niederterrassenschotter bestimmt. Dabei wurden dem Mittelwert 40 % Gewichtung und den minimalen bzw. maximalen Werten jeweils 30 % Gewicht zugeordnet. Die Gewichtung zwischen den Materialmodellen wurde aus ingenieurmässigen Überlegungen und Erfahrungswerten aus dem PRP-Projekt festgelegt. Die Sensitivität des Resultats für eine abweichende Gewichtung von  $\pm 20 \%$  liegt bei weniger als 1 % und damit innerhalb der Unschärfe solcher Analysen.

Das Ergebnis für den Anlagenperimeter und eine Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  bzw.  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  ist in Fig. 4-6 und Fig. 4-7 zu sehen und in Tab. A-3 aufgeführt. Die Grössenordnung der Antwortspektren ist plausibel und steht in guter Übereinstimmung mit den Werten für den Standort KKB. Die Antwortspektren weisen im Frequenzbereich oberhalb von 10 Hz einen Trend mit erhöhten Beschleunigungen gegenüber den Werten von KKB auf, im Frequenzbereich unterhalb von 8 Hz liegen sie etwas tiefer. Die Unterschiede sind jedoch gering und im Bereich der Unschärfe solcher Analysen.

<sup>1</sup> Es wurden Seed07, Seed10 und Seed28 ausgewählt

Die Bodenantwortspektren am Anlagenperimeter weisen den Maximalwert (Plateau) der Beschleunigung bei 6-10 Hz auf. Dies steht in guter Übereinstimmung mit dem erwarteten Wert der Grundfrequenz<sup>2</sup> aus der vereinfachten Beziehung:

$$f = \frac{V_s}{4 \cdot H} \cong \frac{500 \div 600}{4 \cdot 20} = 6.3 \div 7.5 \text{ Hz},$$

wobei  $V_s$  die mittlere Scherwellengeschwindigkeit und  $H$  die Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht ist.

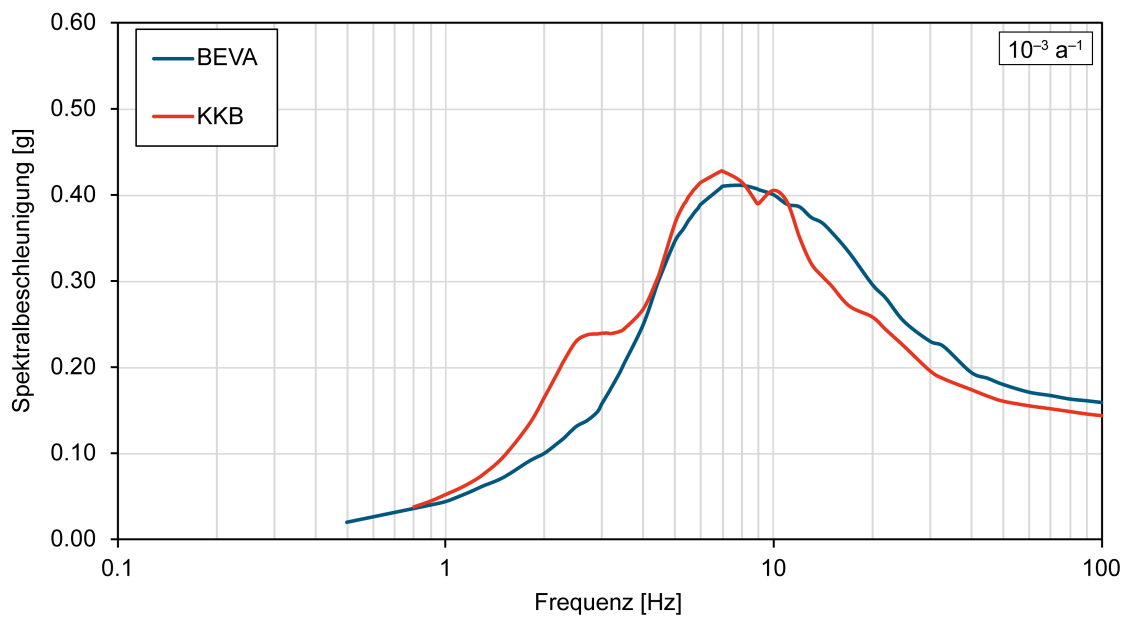


Fig. 4-6: Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter und KKB

<sup>2</sup> Die im Rahmen des PRP-Projekts berechnete Grundfrequenz am Standort KKB liegt bei 2.3-2.5 Hz.

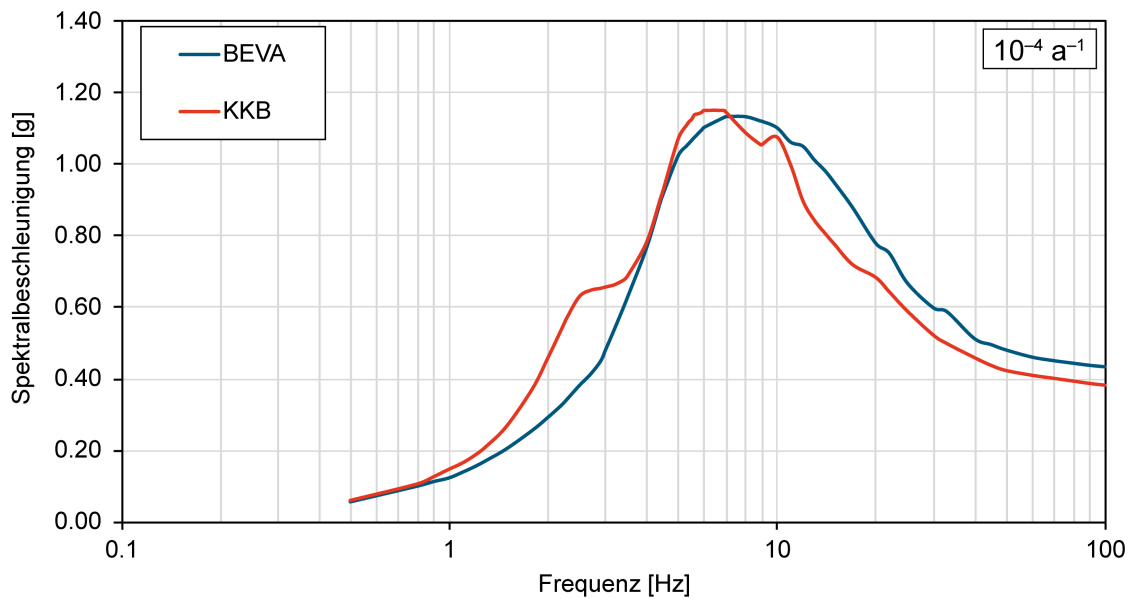


Fig. 4-7: Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter und KKB

Die Bodenantwortspektren in Fig. 4-6 und Fig. 4-7 wurden für eine Mächtigkeit des Lockergesteins (Schotter) von 20 m bestimmt. Diese Angabe wird für die erwarteten Baugrundverhältnisse im nördlichen Anlagenperimeter als repräsentativ erachtet, da der Baugrund aufgrund der früheren Untersuchungen dort gut bekannt ist.

Zur abdeckenden Betrachtung der zu erwartenden Mächtigkeitsschwankungen des Lockergesteins wurde eine Sensitivitätsstudie für dessen Mächtigkeiten von 15 m resp. 25 m durchgeführt, um das mögliche Unsicherheitsband aufzuzeigen. Die Parameterstudie wurde mit den *best estimate* Werten des KKB-Materialmodells für den Schotter durchgeführt.

Die Resultate für die horizontalen Bodenantwortspektren für Häufigkeiten von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  und  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  sind in Fig. 4-8 bzw. Fig. 4-9 dargestellt. Sie zeigen die geringe Sensitivität der Ergebnisse bei einer Variation der Mächtigkeit des Lockergesteins zwischen 15-25 m mit maximalen Unterschieden von etwa 15 % im Bereich von 10 Hz. Abweichungen in dieser Grössenordnung liegen innerhalb der Unschärfe bodendynamischer Analysen und bestätigen die Robustheit der Bodenantwortspektren. Generell ist aufgrund des Verlaufs der Felsoberkante im nördlichen Anlagenperimeter davon auszugehen, dass im mittleren bzw. südlichen Bereich eher mit einer grösseren Mächtigkeit des Schotters gerechnet werden kann. Die Bodenantwortspektren für eine Schotter-Mächtigkeit von 25 m werden weitgehend von den Resultaten für 20 m Schotter-Mächtigkeit eingehüllt.

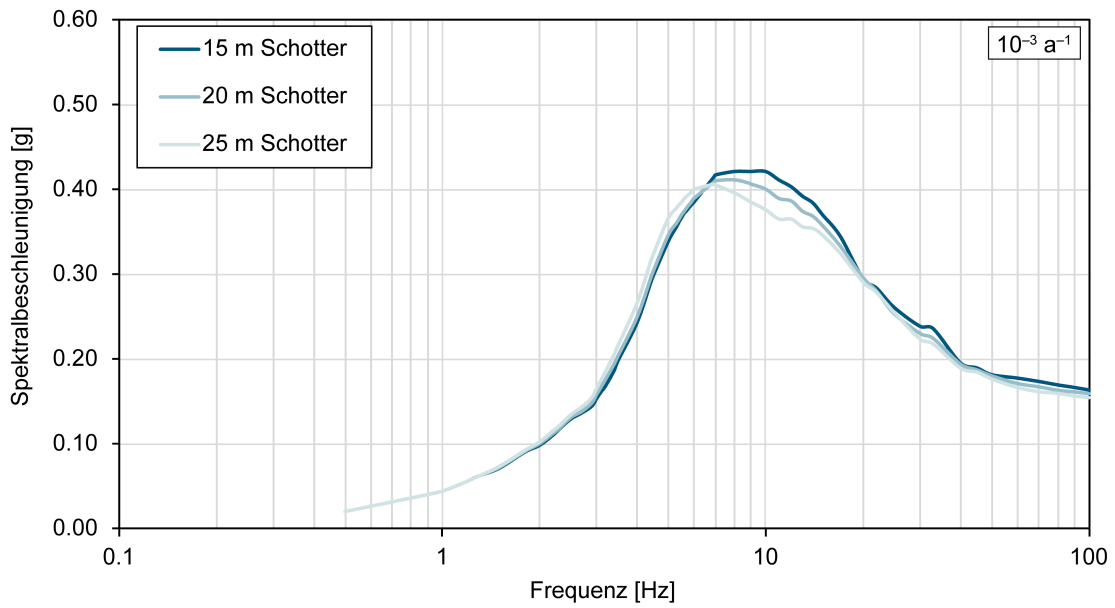


Fig. 4-8: Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter für verschiedene Schotter-Mächtigkeiten

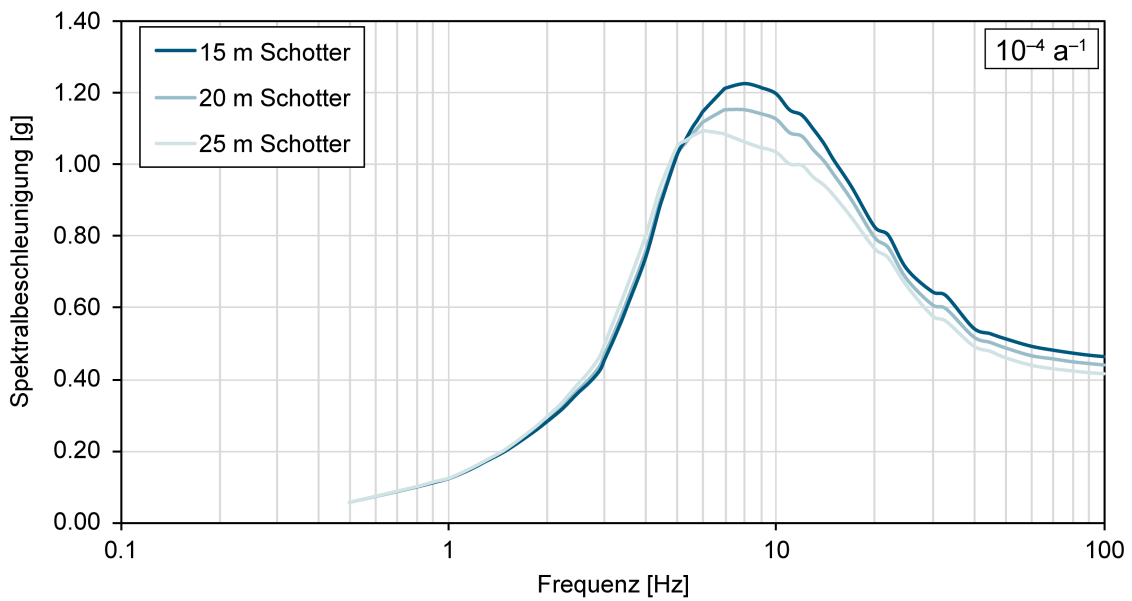


Fig. 4-9: Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter für verschiedene Schotter-Mächtigkeiten

### 4.3.5.2 Gefährdung durch vertikale Bodenbewegung

Die vertikalen Bodenantwortspektren werden, im Gegensatz zur horizontalen Anregung, nicht mit eindimensionalen Standortanalysen bestimmt. Stattdessen wird das V/H-Verhältnis der spektralen Beschleunigungen für die Terrainoberfläche des Standorts KKB als Grundlage für die vertikale Amplifikation der Bodenerschütterungen im Lockergestein (Terrainoberfläche) zugrunde gelegt.

Zur Bestimmung der vertikalen Antwortspektren wurde das V/H-Verhältnis aus den Daten des KKB verwendet und konservativ vereinfacht. Die resultierenden multilinearen Beziehungen in einer logarithmischen Skala sind in Fig. 4-10 dargestellt. Die Wahl des V/H-Verhältnisses für den Standort folgt im tieffrequenten Bereich dem KKB, bleibt im Bereich 1.5 bis 8 bzw. 9 Hz konstant und folgt in vereinfachter Weise dem KKB im hochfrequenten Bereich. Auf eine detaillierte Abstufung im Frequenzbereich 20-30 Hz wurde verzichtet.

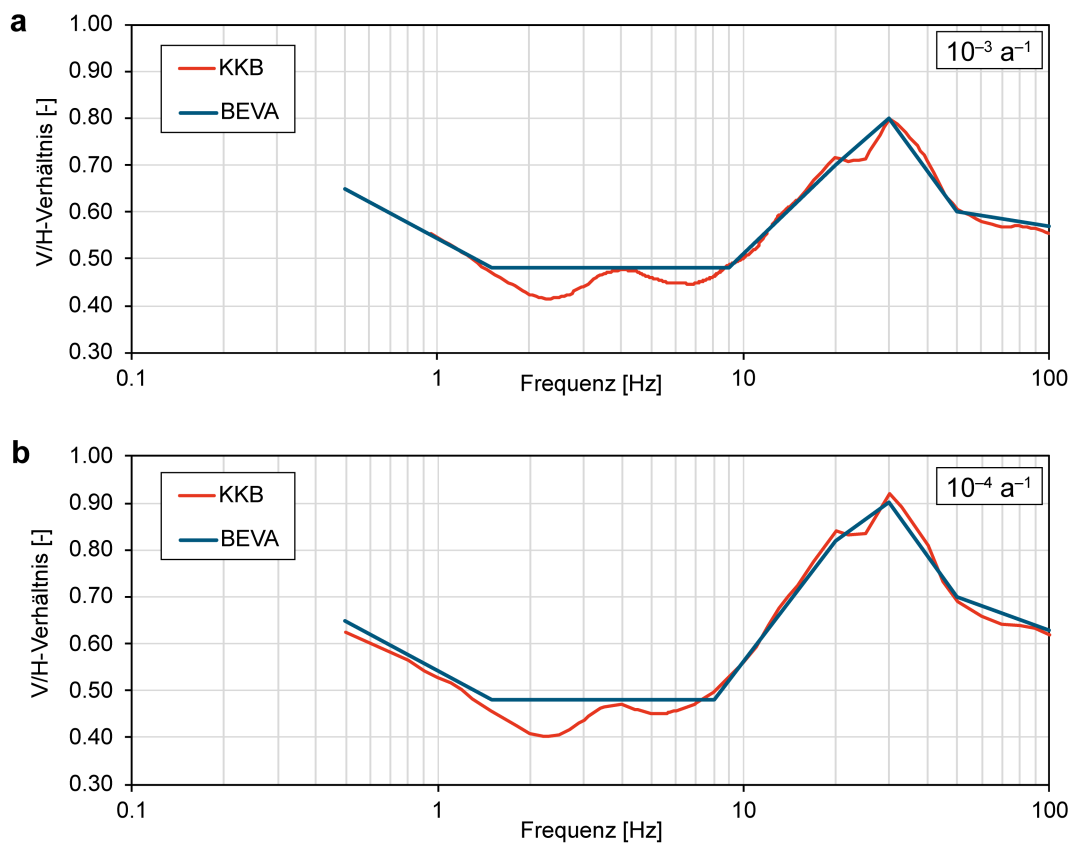


Fig. 4-10: Multilineare Beziehung der V/H-Verhältnisse für den Anlagenperimeter und Überschreitungshäufigkeiten (a)  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  und (b)  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  sowie die entsprechenden Werte am Standort KKB

Die resultierenden Bodenantwortspektren der vertikalen Beschleunigung für den Anlagenperimeter und eine Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  bzw.  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  sind in Fig. 4-11 bzw. Fig. 4-12 zu sehen und in Tab. A-3 aufgeführt. Auch in diesem Fall sind die ENSI-2015-Bodenantwortspektren am Standort KKB zur Prüfung der Plausibilität aufgeführt. Die Spektralbeschleunigung des vertikalen Bodenantwortspektrums beim Anlagenperimeter ist für Frequenzen  $<12 \text{ Hz}$  unterhalb 110 % des Wertes am Standort KKB. Oberhalb von 10 Hz liegen die

resultierenden Spektralbeschleunigungen bis zu 20 % über denen des KKB. Dies ist in Anbetracht des hier angewandten vereinfachten Ansatzes als im Bereich der Unschärfe zu bewerten.

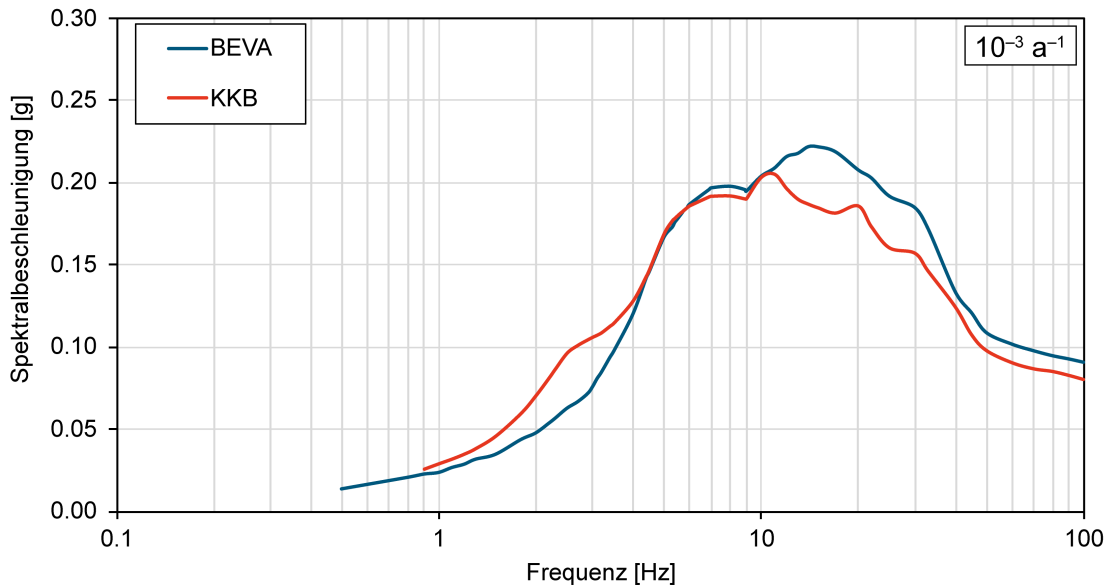


Fig. 4-11: Bodenantwortspektrum der vertikalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter und KKB

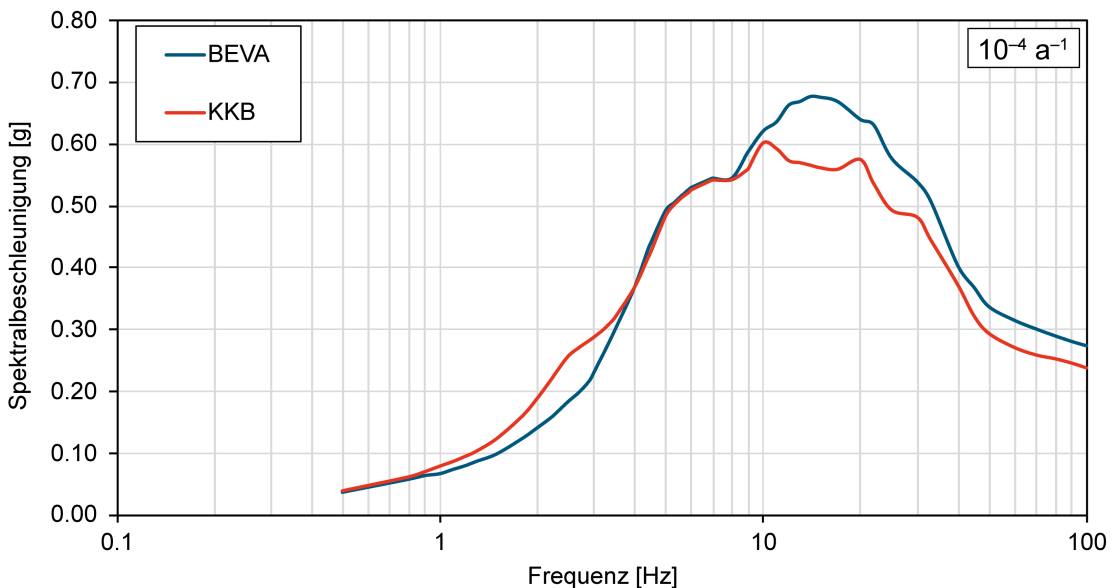


Fig. 4-12: Bodenantwortspektrum der vertikalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für den Anlagenperimeter und KKB

#### **4.3.6 Fazit**

Die seismische Gefährdung am Standort, quantifiziert durch Bodenantwortspektren mit Überschreitungshäufigkeiten von  $10^{-3} \text{ a}^{-1}$  und  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$ , ist vergleichbar mit der von anderen Kernanlagen in der Schweiz. Ferner stellt die lokale Situation des flachen Untergrunds keine ungewöhnliche Begebenheit in Bezug auf die seismische Gefährdung dar. In Bezug auf die seismische Gefährdung ist die Standorteignung daher nachgewiesen.

## 5 Schlussfolgerung

Im vorliegenden Bericht wurde die Standorteignung für den Betrieb einer Brennelementverpackungsanlage im Hinblick auf die Erdbebengefährdung bewertet. Auf Basis einer umfassenden Datenlage bezüglich des Baugrunds, des geologischen Umfelds bzw. der tektonischen Entwicklung der Region sowie umfassender probabilistischer Erdbebengefährdungsstudien für das KKB in lediglich 1.3 km Abstand konnte eine robuste Bewertung erzielt werden.

Die Verschiebungsfährdung, also die Gefährdung, die durch die Möglichkeit eines Bruches an der Oberfläche durch Teile der Anlage ausgeht, wurde auf Grundlage mehrerer 2D-Seismiklinien bewertet. Im Bereich des Standorts ist der mesozoische Sedimentstapel ruhig gelagert und zeigt zwischen der Mandach-Überschiebung im Norden und der Siggenthal Antiklinale im Süden keine Strukturen, die auf Strukturen mit dem Potenzial einen Bruch an der Oberfläche hervorzubringen hindeuten. Aus Untersuchungen zur Neotektonik ergeben sich darüber hinaus keine eindeutigen Hinweise für eine rezente Deformation an der Oberfläche. Es besteht daher am Standort keine Verschiebungsfährdung.

Basierend auf der Analyse des Baugrunds wurde dargelegt, dass keine Anzeichen von geologisch-induzierter Gefährdung wie gravitativer Massebewegungen, Setzungen oder Bodenverflüssigung bestehen.

Aufgrund der räumlichen Nähe zum KKB wurde die seismische Gefährdung am seismologischen Fels vom Standort KKB auf den Standort Zwilag übertragen. Dadurch konnte von der umfassenden Charakterisierung der Erdbebenherde sowie der Ausbreitungspfade, die für das KKB in aufwändigen Studien nach SSHAC Level 4 bestimmt wurden, profitiert werden. Die lokalen Effekte, welche durch die Lockergesteine in den obersten 20 m hervorgerufen werden, wurden mittels standortspezifischen 1-D äquivalent-linearen Analysen berechnet. Die Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Werten des Standortes KKB. Insgesamt ergeben sich für die seismische Gefährdung Bodenantwortspektren für das NESK2 und NESK3, die denen von ENSI-2015 für den Standort KKB weitestgehend entsprechend. Die Unterschiede liegen im Bereich der Ungewissheiten solcher Analysen.

Die Bewertung der Erdbebengefährdung für den Standort bestätigt damit die Übertragbarkeit der Gefährdungsannahmen nach ENSI-2015 für das KKB auf den Standort Zwilag. Aufgrund der umfassenden Qualitätssicherung, inkl. der Quantifizierung von Ungewissheiten, der den Gefährdungsannahmen nach ENSI-2015 für den Standort KKB zugrundeliegenden Modelle, bietet es sich an, diese auch für den Standort Zwilag zu verwenden.

Hinsichtlich der Erdbebengefährdung weist der Standort Zwilag gesamthaft keine Besonderheiten auf. Aus Sicht der Erdbebengefährdung ist daher die Eignung des Standorts für den Bau und Betrieb der Brennelementverpackungsanlage nachgewiesen worden. Die Auslegung der Strukturen im Anlagenperimeter erfolgt erst im Hinblick auf das Baugesuch und auf Basis der dann festzulegenden Gefährdungsannahmen in Bezug auf Erdbeben.

## 6 Literaturverzeichnis

- Abteilung für Umwelt Aargau (2023): Grundwasserkarte des Kantons Aargau, online verfügbar unter [ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html](http://ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html), Stand am Juli 2023.
- Ake, J., Munson, C., Stamatakos, J., Juckett, M., Coppersmith, K.J. & Bommer, J. (2018): Updated Implementation Guidelines for SSHAC Hazard Studies, NUREG-2213. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington.
- Bitterli, T., Graf, H.R., Matousek, F. & Wanner, M. (2000): Geologischer Atlas der Schweiz. Blatt 1050 Zurzach mit Erläuterungen. Bundesamt für Landestopografie Swisstopo.
- Bitterli-Brunner, P. (1987): Die Mandacher und Mettauer Aufschiebungen (Aargauer Tafeljura) aufgrund neuer Untersuchungen. Bulletin der Vereinigung Schweizerischer Petroleum-Geologen und -Ingenieure 53/124, 23-36.
- Bitterli-Dreher, P., Graf, H.R., Naef, H., Diebold, P., Matousek, F., Burger, H. & Pauli-Gabi, T. (2007): Geologischer Atlas der Schweiz. Blatt 1070 Baden mit Erläuterungen. Bundesamt für Landestopografie Swisstopo.
- Diebold, P., Bitterli-Brunner, P. & Naef, H. (2006): Geologischer Atlas der Schweiz. Blatt 1069/1049 Frick-Laufenburg mit Erläuterungen. Bundesamt für Landestopografie Swisstopo.
- Diehl, T., Madritsch, H., Schnellmann, M., Spillmann, T., Brockmann, E. & Wiemer, S. (2023): Seismotectonic evidence for present-day transtensional reactivation of the slowly deforming Hegau-Bodensee Graben in the northern foreland of the Central Alps. *Tectonophysics* 846, 229659. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229659.
- EduPro Civil Systems (2017): ProShake. Version 2.0.
- ENSI (2010): Gutachten des ENSI zum Rahmenbewilligungsgesuch der EKKB AG. Neubauprojekt Ersatzkernkraftwerk Beznau. ENSI 16/10. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2016): PEGASOS-Verfügung KKB. Verfügung: Erdbebengefährdungsannahmen ENSI-2015 für die Standorte der Schweizer Kernkraftwerke.
- ENSI (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2021): Auslegungsanforderungen an andere Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G23. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- Fäh, D., Giardini, D., Kästli, P., Deichmann, N., Gisler, M. & Schwarz-Zanetti, G., Alvarez-Rubio, S., Sellami, S., Edwards, B., Allmann, B., Bethmann, F., Wössner, J., Gassner-Stamm, G., Fritsche, S., Eberhard, D. (2011): ECOS-09 Earthquake Catalogue of Switzerland Release 2011 Report and Database. Public catalogue, 17.4.2011. Report SED/RISK/R/001/20110417. Swiss Seismological Service ETH Zurich.

- Fraefel, M. (2008): Geomorphic response to neotectonic activity in the Jura Mountains and the southern Upper Rhine Graben. Universität Basel, Basel.
- IAEA (2022): Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. (IAEA Safety Standards Series, SSG-9 (Rev. 1)). International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna.
- Interoil (2009): Projekt OPAL-Phase 2, Standortuntersuchungen in Beznau, Bericht IO08-TA0016 für die Nordostschweizerische Kraftwerke AG.
- Jäckli AG (1991): Geologische Baugrunduntersuchungen und Hydrogeologische Untersuchungen, Zwischenlager, Würenlingen/AG. Geologisches Büro Dr. Heinrich Jäckli AG.
- Kammerer, A.M. & Ake, J.P. (2012): Practical Implementation Guidelines for SSHAC Level 3 and 4 Hazard Studies. NUREG-2117, Rev. 1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- KTA (2012): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 2: Baugrund. Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 2201.2. KTA-Geschäftsstelle, Salzgitter.
- Laubscher, H.P. (1986): The eastern Jura: Relations between thin-skinned and basement tectonics, local and regional. *International Journal of Earth Sciences* 75/3, 535-553. DOI: 10.1007/BF01820630.
- Madritsch, H., Meier, B., Kuhn, P., Roth, P., Zingg, O., Birkhäuser, P., Heuberger, S. & Naef, H. (2013): Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-10.
- Nagra (2004): Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites (PEGASOS Project). Final Report Vol. 4: Elicitation summaries, seismic source characterisation (SP1). PEGASOS.
- Nagra (2024a): Geological long-term evolution: Neotectonics. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-13.
- Nagra (2024b): Geologische Prognose mit bautechnischer Empfehlung für den Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-40.
- Nagra (2024c): Geosynthesis of Northern Switzerland. Nagra Technischer Bericht NTB 24-17.
- Nagra (2024d): Interpretation 3D Seismic Survey Jura Ost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-17.
- Nagra (2025): Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage - Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-02.
- Plenkens, K. & SED (2014): Das neue Schwachbebennetz in der Nordschweiz: Standortsuche, Standortauswahl, realisierte Stationen. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-56.
- Proseis (2015): Calculation of the Seismic Hazard at the Four NPP Sites Based on the Hybrid SED-PRP Model. Report for ENSI. (PS-TA-1587), Zürich.
- Risk Engineering Inc. (2003): FRISKM. Appendix N – FRISKM User's Manual. Version 2.05.

- Schnabel, P.B., Lysmer, J. & Seed, H.B. (1970): SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. (Report No. EERC 72-12). Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Senior Seismic Hazard Analysis Committee (1997): Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis : Guidance on uncertainty and use of experts: Main report. NUREG/CR-6372. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington.
- Sommaruga, A., Mosar, J., Schori, M. & Gruber, M. (2017): The Role of the Triassic Evaporites Underneath the North Alpine Foreland. *In: Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins*. Elsevier, 447-466.
- Studer, M. & Zanini, M. (2013): Aufbau und Betrieb eines eigenständigen CORS-GNSS Netzes (für interessierte Dritte). Nagra Arbeitsbericht NAB 10-14.
- swissnuclear (2010): PEGASOS Refinement Project, Soil model for the Beznau site (KKB). (Technical Note, TP3-TN-1068, Revision 4), Olten.
- swissnuclear (2013): PEGASOS Refinement Project Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites - Summary Report. (Volumes 1 to 5).
- swissnuclear (2017): UHS compatible 30 acceleration time histories for hazard level 1E-4 and soil surface (0 m elevation), based on ENSI- 2015 hazard, for Beznau nuclear power plant site (KKB). (Technical Report, FGK-AN-17.092 30THs\_ENSI\_Hybrid\_KKB\_Report\_V5).
- Wiemer, S., Danciu, L., Edwards, B., Marti, M., Fäh, D., Hiemer, S., Wössner, J., Cauzzi, C., Kästli, P. & Kremer, K. (2016): Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland (SUIhaz2015). Swiss Seismological Service (SED), ETH Zurich.
- Zafeirakos, A. & Gerolymos, N. (2013): On the seismic response of under-designed caisson foundations. *Bull Earthquake Eng* 11/5, 1337-1372. DOI: 10.1007/s10518-013-9465-0.



## Anhang A Tabellen

Tab. A-1: Scherdehnungsabhängige Materialwerte des Lockergesteins für den Standort KKB ermittelt und hier auf den Standort Zwilag übertragen

Scher- dehnung $\gamma$ [-]	Minimal- wert $G/G_{\max}$ [-]	<i>Best Estimate</i> $G/G_{\max}$ [-]	Maximal- wert $G/G_{\max}$ [-]	Minimal- wert $\xi_{\text{soil}}$ [-]	<i>Best Estimate</i> $\xi_{\text{soil}}$ [-]	Maximal- wert $\xi_{\text{soil}}$ [-]
1.00E-6	0.973	0.985	0.997	0.005	0.007	0.009
3.16E-6	0.933	0.960	0.991	0.008	0.010	0.011
1.00E-5	0.842	0.900	0.969	0.014	0.018	0.021
3.15E-5	0.673	0.790	0.914	0.022	0.034	0.046
1.00E-4	0.441	0.600	0.770	0.039	0.059	0.080
3.16E-4	0.233	0.390	0.561	0.066	0.098	0.131
1.00E-3	0.104	0.220	0.333	0.108	0.139	0.170
3.16E-3	0.043	0.100	0.171	0.145	0.170	0.195
1.00E-2	0.017	0.048	0.080	0.165	0.190	0.215
3.16E-2	0.017	0.038	0.060	0.180	0.205	0.230
1.00E-1	0.020	0.035	0.050	0.190	0.215	0.240

Tab. A-2: Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015 am Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Zwilag (UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung)

Frequenz [Hz]	Überschreitungshäufigkeit $10^{-3} \text{ a}^{-1}$		Überschreitungshäufigkeit $10^{-4} \text{ a}^{-1}$	
	$S_a, \text{horizontal}$ [g]	$S_a, \text{vertikal}$ [g]	$S_a, \text{horizontal}$ [g]	$S_a, \text{vertikal}$ [g]
100	0.0648	0.0467	0.1801	0.1339
50.0	0.0752	0.0551	0.2144	0.1631
33.3	0.0889	0.0707	0.265	0.2163
20.0	0.1141	0.0904	0.3415	0.2817
10.0	0.1494	0.1017	0.4277	0.302
5.0	0.1443	0.0923	0.3922	0.251
2.5	0.0985	0.0714	0.2616	0.1864
1.0	0.0418	0.0323	0.1109	0.0842
0.5	0.0207	-	0.0531	0.0426

Tab. A-3: Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung für den Anlagenperimeter, OK-Terrain (UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung)

Frequenz [Hz]	Überschreitungshäufigkeit $10^{-3} \text{ a}^{-1}$		Überschreitungshäufigkeit $10^{-4} \text{ a}^{-1}$	
	$S_{a, \text{horizontal}}$ [g]	$S_{a, \text{vertikal}}$ [g]	$S_{a, \text{horizontal}}$ [g]	$S_{a, \text{vertikal}}$ [g]
100	0.160	0.091	0.433	0.273
90.0	0.162	0.093	0.437	0.280
80.0	0.164	0.095	0.443	0.289
70.0	0.168	0.098	0.450	0.300
60.0	0.172	0.102	0.460	0.314
50.0	0.181	0.109	0.480	0.336
45.0	0.188	0.121	0.495	0.367
40.0	0.195	0.134	0.512	0.403
33.0	0.225	0.172	0.587	0.507
30	0.231	0.185	0.598	0.538
25	0.254	0.192	0.667	0.576
22	0.281	0.203	0.751	0.630
20	0.297	0.208	0.779	0.639
17	0.334	0.219	0.879	0.668
15	0.358	0.222	0.947	0.675
14	0.369	0.222	0.982	0.676
13	0.375	0.218	1.012	0.668
12	0.387	0.216	1.050	0.662
11	0.390	0.209	1.062	0.635
10	0.401	0.204	1.102	0.620
9	0.407	0.195	1.120	0.587
8.9	0.408	0.196	1.121	0.583
8	0.412	0.198	1.133	0.544
7	0.411	0.197	1.133	0.544
6.9	0.409	0.196	1.131	0.543
6	0.390	0.187	1.103	0.529
5.9	0.386	0.185	1.096	0.526
5.75	0.381	0.183	1.086	0.521
5.7	0.379	0.182	1.082	0.519
5.6	0.375	0.180	1.075	0.516
5.5	0.371	0.178	1.067	0.512
5.4	0.366	0.176	1.059	0.508
5.3	0.361	0.173	1.051	0.504
5	0.347	0.167	1.024	0.492

Frequenz [Hz]	Überschreitungshäufigkeit $10^{-3} \text{ a}^{-1}$		Überschreitungshäufigkeit $10^{-4} \text{ a}^{-1}$	
	$S_a, \text{horizontal}$ [g]	$S_a, \text{vertikal}$ [g]	$S_a, \text{horizontal}$ [g]	$S_a, \text{vertikal}$ [g]
4.5	0.305	0.146	0.917	0.440
4.4	0.295	0.142	0.891	0.428
4	0.250	0.120	0.765	0.367
3.5	0.205	0.098	0.627	0.301
3.4	0.195	0.094	0.598	0.287
3.2	0.177	0.085	0.540	0.259
3.1	0.168	0.081	0.510	0.245
3	0.159	0.076	0.480	0.230
2.9	0.149	0.072	0.449	0.216
2.7	0.139	0.067	0.412	0.198
2.5	0.132	0.063	0.381	0.183
2.3	0.119	0.057	0.344	0.165
2.2	0.113	0.054	0.325	0.156
2	0.101	0.048	0.291	0.140
1.8	0.092	0.044	0.256	0.123
1.5	0.073	0.035	0.204	0.098
1.3	0.063	0.032	0.171	0.086
1.2	0.057	0.029	0.154	0.079
1.1	0.051	0.027	0.138	0.073
1	0.045	0.024	0.122	0.066
0.9	0.041	0.023	0.112	0.063
0.8	0.037	0.021	0.099	0.057
0.5	0.021	0.014	0.055	0.036