



ARBEITSBERICHT NAB 24-21

Erdbebengefährdungsanalyse für den
Standort der Oberflächenanlage und die
Betriebsphase des geologischen
Tiefenlagers

November 2024



ARBEITSBERICHT NAB 24-21

Erdbebengefährdungsanalyse für den
Standort der Oberflächenanlage und die
Betriebsphase des geologischen
Tiefenlagers

November 2024

STICHWÖRTER

RBG, Rahmenbewilligungsgesuch, Etappe 3, gTL, Geologie,
Erdbebengefährdung

**Nagra | Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz
+41 56 437 11 11 | info@nagra.ch | 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.

Dieser Bericht wurde aufgrund von Erkenntnissen überarbeitet, die im Laufe der Projektentwicklung gewonnen wurden. Infolgedessen wurden bestimmte Formulierungen angepasst, um die Konsistenz der Berichte zu gewährleisten.

Zusammenfassung

Das Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager am Standort Haberstal stützt sich bei der Bewertung der Eignung des Standorts im Hinblick auf den sicheren Betrieb eines geologischen Tiefenlagers (gTL), sowie der Oberflächenanlagen (OFA) und Zugängen nach untertag auf quantitative, standortspezifische Gefährdungsanalysen ab. Mit dem vorliegenden Bericht wird die Erdbebengefährdung standortspezifisch analysiert und bewertet. Die möglichen Einflüsse von Erdbeben auf die Langzeitsicherheit, also nach Verschluss des gTL, werden separat in Nagra (2024c) behandelt.

Die gesetzlichen Anforderungen in Bezug auf die Bestimmung der Erdbebengefährdung sowie die behördlichen Vorgaben für deren Umsetzung sind in der Kernenergieverordnung (KEV 2004) sowie der Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2023) und in ENSI (2018) beschrieben. Diese werden mit dem vorliegenden Bericht erfüllt.

Die hier durchgeführte Bestimmung der Erdbebengefährdung dient der allgemeinen Darstellung der Standorteignung für den Bau & Betrieb eines gTL sowie der dazu erforderlichen OFA. Im Gegensatz zu Kernkraftwerken werden im geologischen Tiefenlager keine aktiven Sicherheitssysteme benötigt, die für die Einhaltung der Schutzziele erforderlich sind. Im geologischen Tiefenlager werden konditionierte und in Endlagerbehälter verpackte Abfälle angeliefert, wobei entsprechend aktueller Planung über- wie untertage nur ein Endlagerbehälter für hochaktive Abfälle (HAA) bzw. wenige Endlagerbehälter für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) pro Tag gehandhabt bzw. eingelagert werden. Es werden zu keiner Zeit offene radioaktive Stoffe im geologischen Tiefenlager gehandhabt. Die in den Lagerkammern eingelagerten Endlagerbehälter sind zudem bereits während der Betriebsphase durch die zeitnahe Verfüllung und Versiegelung der Lagerkammern vor Störfalleinwirkungen geschützt. Das in der Anlage vorhandene, nicht eingelagerte Nuklidinventar ist erheblich geringer als das Inventar eines Zwischenlagers. Generell ist das Gefährdungspotenzial eines geologischen Tiefenlagers somit sehr gering, insbesondere im Vergleich zu Kernkraftwerken, aber auch im Vergleich zu Konditionierungsanlagen und Zwischenlagern.

Geologische Situation

Der Bericht stützt sich ab auf einer breiten Datenbasis, die sich aus den Standortuntersuchungen ergibt. Diese sind in der Geosynthese (Nagra 2024e) dokumentiert. Wichtige spezifische Daten für die Bewertung des Standorts liefern die Auswertung der 3D-Seismik (Nagra 2024a) sowie die Tiefbohrungen im Umfeld des Standorts (Ammen & Palten 2021, Hinterholzer-Reisegger 2022, Nagra 2022). Zusätzlich stehen Bohrungen aus der Rohstoffexploration zur Verfügung.

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 Anzeichen für relevante tektonische Deformationen.

Nördlich und südlich der potenziellen Lagerzone befinden sich regionale Störungszonen, die mit der 3D-Seismik abgebildet wurden. Es haben sich aus den Standortuntersuchungen keine Hinweise ergeben, die auf eine Aktivität dieser Störungszonen in der jüngeren geologischen Vergangenheit hinweisen. Die beobachtete Seismizität weiter östlich, in Eglisau, findet in einem räumlich begrenzten Gebiet statt. Dort werden ausschliesslich kleine Beben, verteilt auf mehrere lokale Störungen, beobachtet. Eine Aktivierung des Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineaments, das nördlich an die OFA angrenzt, ist während der Betriebsphase des geologischen Tiefenlagers sehr unwahrscheinlich.

Methoden und Ergebnisse

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

Verschiebungsfährdung

Die 3D-Seismik zeigt im Bereich der OFA und UTA keine Störungen, die zu einem relevanten Bruch führen könnten. Nahe Segmente des Weiach-Glatfelden-Eglisau Lineaments sind nur im Muschelkalk und darunter abgebildet, jedoch nicht im Tiefenbereich der Zugangsbauwerke und der beispielhaft geplanten Tunnel auf Lagerebene. Aus den vorhandenen Daten ergeben sich keine Hinweise auf eine Gefährdung durch einen Bruch an der Oberfläche oder durch untertägige Anlagenteile.

Gefährdung durch Bodenbewegung

Die Bestimmung der Erdbebengefährdung durch Bodenerschütterung erfolgt nach dem Modell ENSI-2015 (Proseis 2015). Darin werden die seismischen Quellen, der Ausbreitungspfad, sowie die Verstärkung durch lokale Effekte beschrieben. 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. 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 unter Berücksichtigung des nationalen Erdbebengefährdungsmodells SUH2015 (Wiemer et al. 2016) abgeleitet. Das Modell ENSI-2015 entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Für den Standort werden die Resultate des ENSI-2015 Modells für die Quellen und Ausbreitungspfade verwendet. Für die Berechnung der lokalen Verstärkung werden Modelle mit dynamische Materialeigenschaften und Geschwindigkeitsprofile entwickelt, welche die unterschiedlichen Gegebenheiten bezüglich der oberflächennahen Schichten am Standort abdecken.

Die Erdbebengefährdung durch Bodenerschütterungen wird durch ein Spektrum der Bodenbeschleunigung, die am Standort mit einer Überschreitungshäufigkeit von 10^{-3} a^{-1} (entsprechend dem Nachweiserdbeben der Störfallkategorie 2, NESK 2) bzw. 10^{-4} a^{-1} (Nachweiserdbeben der Störfallkategorie 3, NESK 3) zu erwarten ist, spezifiziert.

Die Gefährdung durch Bodenerschütterungen in den untertägigen Anlagen des gTL sind etwa um einen Faktor 2 (oder mehr) geringer als an der Oberfläche, da u.a. die lokale Verstärkung durch weiche Sedimente entfällt.

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 bestehenden Sondierungen sowie weiteren Informationen, die den Baugrund bezüglich möglicher Naturgefahren beschreiben. Die am Standort vorkommenden Quartär-Schichten neigen im Allgemeinen nicht zur Bodenverflüssigung. Darüber hinaus liegt der Grundwasserspiegel nahe an der Oberkante Fels. Es ist daher keine Gefährdung durch Bodenverflüssigung gegeben. Zudem ist für den Standort keine Gefährdung durch Massenbewegungen bekannt (Nagra 2024f). Aus der Prognose für den Baugrund und dem geologischen Umfeld ergeben sich keine weiteren geologisch-induzierten Gefährdungen.

Gesamtbeurteilung

Die vorliegende standortspezifische Gefährdungsanalyse für den Einlagerungsbetrieb kommt zum Schluss, dass der Standort für den Betrieb des gTL und seiner assoziierten Strukturen geeignet ist. Eine Verschiebungsgefährdung kann auf Basis der vorliegenden umfangreichen Datenbasis ausgeschlossen werden. Die Auslegung von OFA und Untertageanlagen wird so erfolgen, dass bei Bodenbewegungen mit einer Überschreitungshäufigkeit von 10^{-3} a^{-1} bzw. 10^{-4} a^{-1} der Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. Aus dem geologischen Umfeld ergeben sich keine weiteren Gefährdungen für den Standort im Zusammenhang mit Erdbeben.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Figurenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Situation.....	2
1.3 Betrieb der OFA und des gTL	4
1.4 Grundlagen zur Erdbebengefährdung.....	4
2 Geologische Situation	6
2.1 Tektonik in der Nordschweiz.....	6
2.2 Regionale und lokale Strukturen	7
2.3 Neotektonik	8
2.4 Regionale Seismizität	9
3 Baugrundeigenschaften.....	11
3.1 Untergrundverhältnisse.....	11
3.2 Grundwasser	14
3.3 Dynamische Baugrundwerte.....	14
3.3.1 Scherdehnungsabhängige Materialwerte	14
3.3.2 Profile für die Scherwellengeschwindigkeit.....	15
4 Betrachtung der Gefährdungsbilder.....	18
4.1 Verschiebungsgefährdung	18
4.2 Erdbeben-induzierte Gefahren.....	20
4.2.1 Setzungen.....	20
4.2.2 Gravitative Massebewegungen.....	20
4.2.3 Bodenverflüssigung	20
4.3 Seismische Gefährdung	21
4.3.1 Einführung.....	21
4.3.2 Datenbasis ENSI-2015.....	22
4.3.3 Übertragung der Felsgefährdung	24
4.3.4 Felsgefährdung am Anlagenperimeter.....	25
4.3.5 Gefährdung an der Terrainoberfläche im Anlagenperimeter.....	26
4.3.5.1 Gefährdung durch horizontale Bodenbewegung	27
4.3.5.2 Gefährdung durch vertikale Bodenbewegung	30
4.3.6 Fazit	32

5	Schlussfolgerungen	33
6	Literaturverzeichnis	34
Anhang A	Tabellen	A-1

Tabellenverzeichnis

Tab. A-1:	Scherdehnungsabhängige Materialwerte des Lockergesteins für den Standort KKL ermittelt und hier auf den Anlagenperimeter übertragen.....	A-1
Tab. A-2:	Werte des mittleren V_s -Initialprofils, Schichtstärke h_i und Wichte des Bodens für die 1D-Standortanalysen in ProSHAKE; Mächtigkeit des Lockergesteins 50 m	A-2
Tab. A-3:	Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015 am Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Haberstal (UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung)	A-5
Tab. A-4:	Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung für den Anlagenperimeter, OK-Terrain (UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung)	A-6

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Lageplan des Anlagenperimeters sowie der Achsen des exemplarischen Lagerprojekts für ein geologisches Tiefenlager am Standort Haberstal	3
Fig. 1-2:	Exemplarische Umsetzung der Gesamtanlage mit dem Anlagenperimeter (blau), der die wichtigsten Bauten der Oberflächenanlage (OFA) enthält, der Untertanlage (UTA) und den Zugängen	4
Fig. 2-1:	Tektonische Karte der Nordschweiz mit Störungszonen und regionalen tektonischen Einheiten.....	6
Fig. 2-2:	Karte der Störungen im Perimeter der 3D-Seismik. Es werden Störungen auf den Horizonten Top Muschelkalk, Top Staffelegg sowie Top Opalinuston dargestellt.....	8
Fig. 2-3:	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 (swissnuclear 2013)	10
Fig. 3-1:	Geologisches Profil durch den Anlagenperimeter basierend auf Eisenlohr & Müller (2016) und dem geologischen Schichtmodell, Stand Februar 2022	13
Fig. 3-2:	(a) Scherdehnungsabhängiges Schubmodul und (b) Materialdämpfung der Schotterproben in KKL aus 10 bis 42 m Tiefe (swissnuclear 2013) jeweils mit <i>best estimate</i> (durchgezogen) sowie den Minimal- und Maximalwerten (gestrichelt)	15
Fig. 3-3:	Lithologisches Profil (links) und V_s -Log (schwarz) der Bohrung Stadel-3-1, das Initialprofil (rot), Schar der 30 Profile (grau) und die berücksichtigten Materialmodelle (rechts).....	17
Fig. 4-1:	Schnitte aus der 3D-Seismik mit Interpretation von Störungen mit Projektion der geplanten Zugangsbauwerke, den Strukturen des zentralen Bereichs (IL 5440) sowie der Lagerfelder SMA (IL 5381) und HAA (IL 5578).....	19

Fig. 4-2:	Komponenten der standortspezifischen Erdbebengefährdung: Erdbebenherde als Quellen für seismische Wellen, Ausbreitungspfade bis zum Referenzfels, lokale Verstärkung in den weichen Sedimenten darüber.....	21
Fig. 4-3:	Schematische Darstellung des Workflows für eine probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse und Schritte des Post-Processing	23
Fig. 4-4:	Gefährdungskonsistente Antwortspektren (<i>Uniform Hazard Spectra</i> , UHS) der horizontalen Felsgefährdung aus PEGASOS (2004), PRP (2013) und SED/PRP (= ENSI-2015) für 10^{-4} a^{-1} und 5 % Dämpfung am Standort KKB (Proseis 2015).....	24
Fig. 4-5:	Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015, 10^{-3} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Haberstal	25
Fig. 4-6:	Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015, 10^{-4} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Haberstal	25
Fig. 4-7:	Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit 10^{-3} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und resultierende Ergebnisse für Schotter-Mächtigkeiten von 10–50 m	28
Fig. 4-8:	Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit, 10^{-4} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und resultierende Ergebnisse für Schotter-Mächtigkeiten von 10–50 m	28
Fig. 4-9:	Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit 10^{-3} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und KKB.....	29
Fig. 4-10:	Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit 10^{-4} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und KKB.....	29
Fig. 4-11:	Multilineare Beziehung des V/H-Verhältnisses für den Anlagenperimeter sowie Werte am Standort KKB für 10^{-4} a^{-1}	30
Fig. 4-12:	Bodenantwortspektrum der vertikalen Beschleunigung für die Gefährdung ENSI-2015, 10^{-3} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und KKB.....	31
Fig. 4-13:	Bodenantwortspektrum der vertikalen Beschleunigung für die Gefährdung ENSI-2015, 10^{-4} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und KKB.	31

Abkürzungsverzeichnis

BIH	Baden-Ischer-Herden Lineament
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
ENSI-2015	Proseis (2015): Calculation of the Seismic Hazard at the Four NPP Sites Based on the Hybrid SED – PRP Model
gTL	Geologisches Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
IAEA	International Atomic Energy Agency
KEV	Kernenergieverordnung
KFT	Konstanz-Frick Permokarbondrog
KKB	Kernkraftwerk Beznau
KKL	Kernkraftwerk Leibstadt
KKW	Kernkraftwerk
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NESK	Nachweiserdbeben der Störfallkategorie (2 oder 3)
NL	Nördlich Lägern
OFA	Oberflächenanlage
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 (Uniform Hazard Spectrum)
UTA	Untertageanlagen
WGE	Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineament

1 Einleitung

Das geologische Tiefenlager (gTL) mit seinen Zugängen und die Oberflächenanlage (OFA) müssen als nukleare Anlage 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 des gTL und der OFA nicht in Frage stellt. Im vorliegenden Bericht wird die Gefährdung durch Erdbeben für den Bau und Betrieb von gTL und OFA für das Rahmenbewilligungsgesuch bestimmt. Die Auswirkung von möglichen Erdbeben auf die Langzeitsicherheit wird in Nagra (2024c) behandelt.

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

Die hier zusammengefassten Erkenntnisse basieren auf den geologischen Untersuchungen des Standortgebiets Nördlich Lägern, insbesondere der Neotektonik sowie der 3D-Seismik. Zudem können wir auf eine umfangreiche Datenbasis, die im Zusammenhang mit der Bewertung der Erdbebengefährdung der Schweiz sowie im speziellen auch der Standorte der Kernkraftwerke entwickelt wurde, aufbauen. Die tektonischen Grundlagen zum Standort werden in Kapitel 2 beschrieben. Dies basiert auf den in der Geosynthese (Nagra 2024e) zusammengetragenen Erkenntnissen und beinhaltet die Einordnung des Standortes in den tektonischen Kontext von regionalen Störungszonen sowie deren rezenter Aktivität.

1.1 Hintergrund

Für die Erlangung der Rahmenbewilligung des geologischen Tiefenlagers sind standortspezifische Gefährdungsanalysen durchzuführen. Die von Erdbeben ausgehenden Gefahren und Gefährdungsbilder aus dem Gebirge sind zu betrachten (ENSI 2018, Kap. 5.1, Bst. e):

«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, Kap. 5.1, Bst. f):

«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. Die Auswirkungen von Erdbeben auf die Langzeitsicherheit sind im Zuge der Szenarienanalyse für die Nachverschlussphase (Kap. 5.2) aufzuzeigen.»

Für die Bestimmung der Erdbebengefährdung von Kernanlagen werden in IAEA (2022) Empfehlungen gemacht. Für Kernanlagen, die keine Kernkraftwerke sind (wie das gTL und die OFA),

wird darin ein abgestufter Ansatz (*graded approach*) zur Bestimmung der Erdbebengefährdung vorgeschlagen. Dieser soll der verringerten Komplexität der Anlage, dem geringeren Freisetzungspotenzial sowie der verminderten Gefahr, die von anderen Materialien vor Ort ausgeht, 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 2022, Ziffern 9.1-9.2).

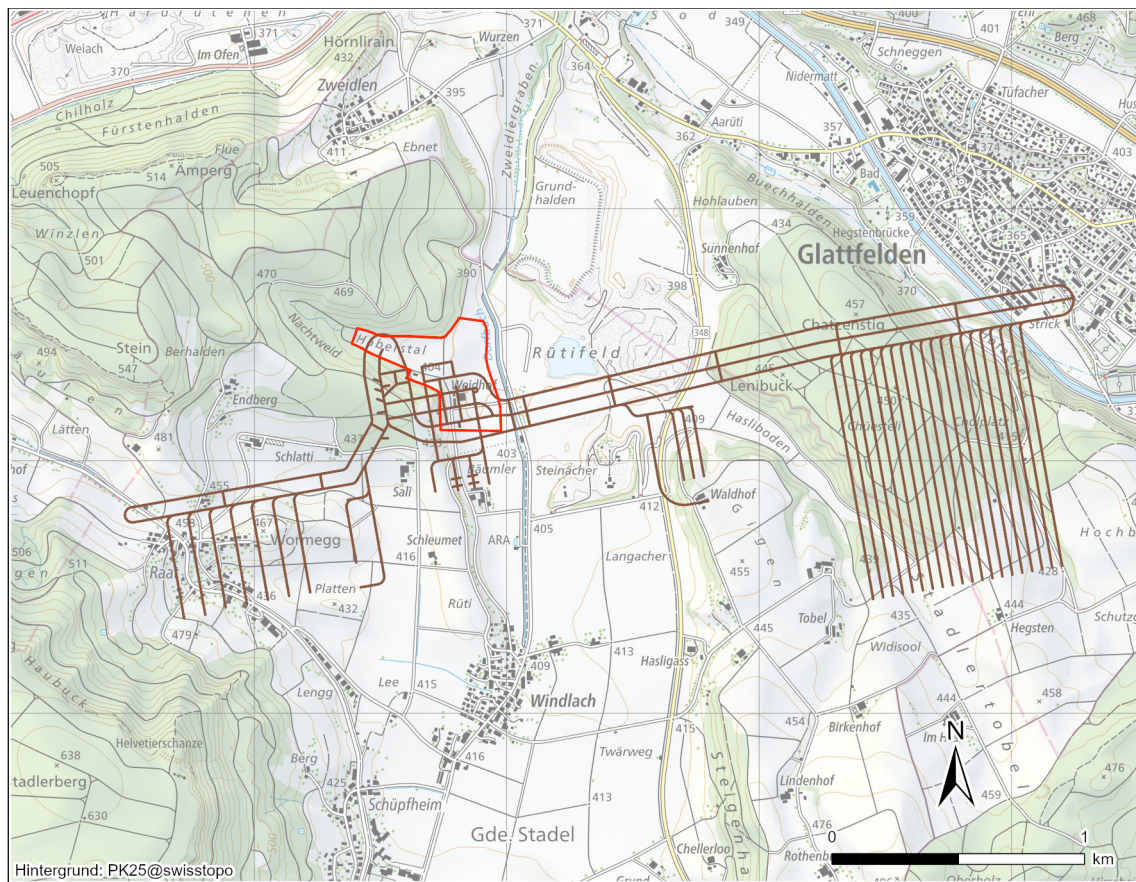
Entsprechend des abgestuften Ansatzes soll für das Rahmenbewilligungsgesuch der OFA und des gTL eine Ermittlung der Erdbebengefährdung basierend auf der umfangreichen existierenden Datenbasis bzw. auf Basis existierender Erdbebengefährdungsstudien erfolgen.

1.2 Situation

Die Nagra-gTL AG beantragt eine Rahmenbewilligung für ein gTL am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel, Kt. ZH). An der Oberfläche stellt der Projektperimeter den raumplanerisch festzulegenden Standort (Art. 14 Abs. 1 Bst. b KEG) für die Realisierung der OFA dar (Nagra 2025b). Der Projektperimeter enthält den Anlagenperimeter, in dem die wichtigsten Bauten gemäss Art. 14 Abs. 2 KEG zum Liegen kommen. Für den sicherheitstechnischen Standortvergleich (Nagra 2023a) und die Nachweise für die Betriebs- und die Nachverschlussphase sowie für die technische Machbarkeit (Nagra 2024b) wurde ein exemplarische Lagerprojekt ausgearbeitet, dessen Lage zusammen mit dem Anlagenperimeter in Fig. 1-1 dargestellt ist. Die Festlegungen zur Lage der wichtigsten Bauten, Positionierung der Lagerfelder, Art und Anzahl der Zugangsbauwerke erfolgen im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens nach der Rahmenbewilligung.

Die OFA dient als Zugang zum gTL sowie zu Bau, Erschliessung und Versorgung der Untertaganlagen (UTA). Dementsprechend umfasst die OFA sämtliche Anlagenmodule, die während der Bau-, Betriebs- und Beobachtungsphase benötigt werden, um Material und Personen zu und von den Untertaganlagen zu befördern. Ebenfalls umfasst die OFA verschiedene Anlagen für die Ver- und Entsorgung der untertägigen Anlagen, wie z.B. Lüftung, Energieversorgung, Kälteversorgung (Nagra 2024b).

Das gTL besteht aus den Testbereichen, dem Pilotlager, sowie den Hauptlagern (Art. 64, KEV) für die schwach- und mittelaktiven Abfälle sowie für die Brennelemente und hochaktiven Abfälle (Nagra 2024b). Zusätzlich sind in einem zentralen Bereich verschiedene Versorgungseinrichtungen, die zum Bau und Betrieb des gTL notwendig sind, untergebracht. Gesamtheitlich werden die Bauten untertage als Untertaganlage (UTA) bezeichnet. OFA und UTA zusammen bilden die Gesamtanlage. Gemäss des exemplarischen Lagerprojektes erstreckt sich die UTA lateral über insgesamt etwa 3 km und ist mit drei Schächten als Zugang mit der OFA verbunden (Fig. 1-2). Zur besseren Lesbarkeit wird im Bericht nur die Unterscheidung zwischen OFA und gTL gemacht, wobei hier das gTL stellvertretend für die Untertaganlage verwendet wird. Die Lager-ebene im Opalinuston befindet sich mehr als 800 m unter der Oberfläche der OFA (Nagra 2023b).



Geologisches Tiefenlager

— Exemplarisches Lagerprojekt

□ Anlagenperimeter

Fig. 1-1: Lageplan des Anlagenperimeters sowie der Achsen des exemplarischen Lagerprojekts für ein geologisches Tiefenlager am Standort Haberstal

Der westliche Teil des Anlagenperimeters liegt im Haberstal, der daran angrenzende östliche Teil liegt im Dorfbachtal.

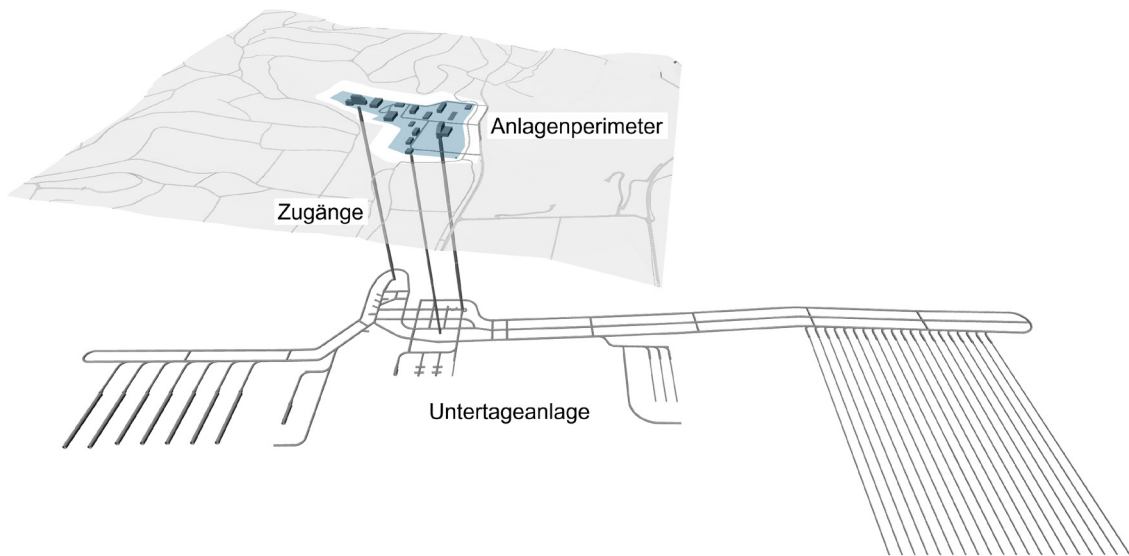


Fig. 1-2: Exemplarische Umsetzung der Gesamtanlage mit dem Anlagenperimeter (blau), der die wichtigsten Bauten der Oberflächenanlage (OFA) enthält, der Untertageanlage (UTA) und den Zugängen

1.3 Betrieb der OFA und des gTL

Der Einlagerungsbetrieb des Tiefenlagers ist gemäss dem Realisierungsplan (Nagra 2021) für einen Zeitraum von etwa 25 Jahren vorgesehen. Die radioaktiven Abfälle werden bereits verpackt in die Bereitstellungshalle angeliefert, wo die Annahme, Bereitstellung und weitere Verbringungen ins gTL stattfindet (Nagra 2024b). Der Transport der Abfälle nach untertag erfolgt gemäss derzeitiger Planung per Schachtförderanlage. Die SMA-Endlagerbehälter werden in SMA-Lagerkavernen eingelagert, welche kontinuierlich verfüllt werden (Nagra 2024g). Die HAA-Endlagerbehälter werden in HAA-Lagerstollen eingelagert, welche kontinuierlich verfüllt und versiegelt werden (Nagra 2021).

1.4 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, recht 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 An-

lagenperimeters eine Störungszone gibt, die als *capable* zu betrachten ist, also fähig ist, 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 der OFA bzw. des gTL 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 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 und ein Untergrundmodell für die Betrachtung der lokalen Effekte entwickelt. Die geologisch-induzierten Gefährdungen werden in Kapitel 4.2 diskutiert. Die Bestimmung der Gefährdung durch Bodenbewegung erfolgt in Kapitel 4.3.

2 Geologische Situation

2.1 Tektonik in der Nordschweiz

Der Anlagenperimeter liegt in einem Seitental des Windlacherfelds, einem breiten glazial geformten Tal, das der Vorfaltenzone des Jura zuzuordnen ist. 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 (2025a) und wird hier nicht weiter ausgeführt.

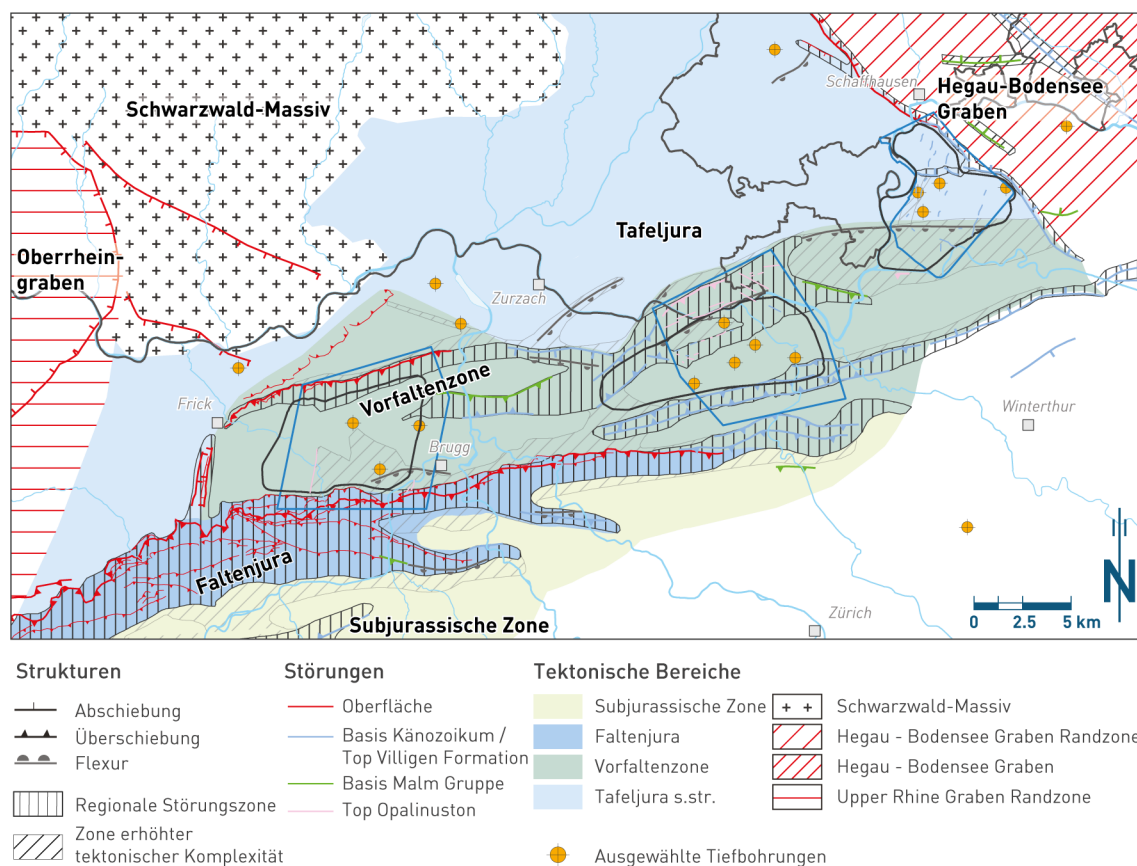


Fig. 2-1: Tektonische Karte der Nordschweiz mit Störungszonen und regionalen tektonischen Einheiten

2.2 Regionale und lokale Strukturen

Die potenzielle Lagerzone ist im Verlauf ihrer geologischen Geschichte weitgehend unverformt geblieben. Dies gilt sowohl für die Zonen über dem tiefsten Teil des Konstanz-Frick-Trogs (KFT), als auch für die nördlich anschliessende Grabenschulter. Der flach nach Süden einfallende mesozoische Schichtverband zeigt hier nur an wenigen Stellen seismisch erkennbare Versätze. Diese erreichen zudem in der Regel lediglich die stratigraphisch ältesten Teile des Schichtstapels.

Die potenzielle Lagerzone wird von zwei regionalen Störungszonen begrenzt (Fig. 2-2). Sowohl das Baden-Irchel-Herders Lineament (BIH) im Süden als auch die Weiach Flexur im Norden, welche mit der Siglistorf Antiklinale assoziiert ist, liegen oberhalb einer Trogrand-Störung des KFT (Malz et al. 2016, Nagra 2019, Nagra 2024a). Der KFT hat unterhalb des Standorts eine Halbgrabenstruktur mit der Hauptstörung im Süden, wahrscheinlich unterhalb des BIH (Naef & Madritsch 2014). Sowohl die Siglistorfer Antiklinale als auch das BIH streichen ungefähr ONO-WSW und sind nur aus seismischen Daten bekannt.

Das BIH ist eine regionale Störungszone deren Lokalisierung stark vom KFT beeinflusst wird (Malz et al. 2016, Nagra 2024a). In einer ersten post-Mesozoischen Phase wurden die Trogstörungen als Abschiebungen reaktiviert. Dies zeigt sich deutlich an der östlichen Fortsetzung des BIH, wo nur die Abschiebung erhalten ist (Madritsch et al. 2013, Pietsch et al. 2015, Laubscher 1985).

Die Siglistorf Antiklinale wird als listrische Aufschiebung, welche entlang der Muschelkalk-Gruppe abgesichert ist, interpretiert (Nagra 2024e). Die 2D-Bilanzierung ergab einen Versatz von etwa 200 m entlang der Antiklinale (Pietsch et al. 2015). Altersdatierungen von Adern an der Oberfläche, welche wahrscheinlich mit der Siglistorf Antiklinale zusammenhängen (Madritsch et al. 2024) geben Hinweise auf eine, im Vergleich mit der Aktivität an der Jura Hauptfaltung (14.5-4.3 Ma, Looser et al. 2021), relative späte Bildung (ca. 7-8 Ma).

Die Interpretation der 3D-Seismik hat das Weich-Glatfeld-Eglisau Lineament hervorgehoben (Nagra 2024a). Dieses ist stark segmentiert, streicht O-W und fällt sehr steil ein. Das WGE wird sowohl im Grundgebirge wie auch im Mesozoischen Stapel beobachtet (Nagra 2024a). Aufgrund der lateralen Ausdehnung des WGE von ca. 9 km wird es als regionale Störung betrachtet (Fig. 2-2).

Neben den drei regionalen Störungen sind die Eglisau Störung und die Zweideln Störung als lokale Störungen zu erwähnen (Nagra 2024a). Sie verlaufen grob NW-SO, also in einem typischen herzynischen Streichen. Ihre Ausrichtung lässt sich vom Grundgebirge bis in den mesozoischen Sedimentstapel verfolgen. Sie sind vor allem in der Muschelkalk-Gruppe ausgeprägt. In der 3D-Seismik lässt sich die Eglisau Störung bis zur Basis Malm, die Zweideln Störung bis zum Top Opalinuston verfolgen (Fig. 2-2) (Nagra 2024a). Das Alter der einzelnen Verschiebungsereignisse ist nicht bekannt, aber die Gesamtversätze dieser sehr alten Störungen sind auch während der alpinen Orogenese auf maximal wenige 10er Meter beschränkt geblieben.

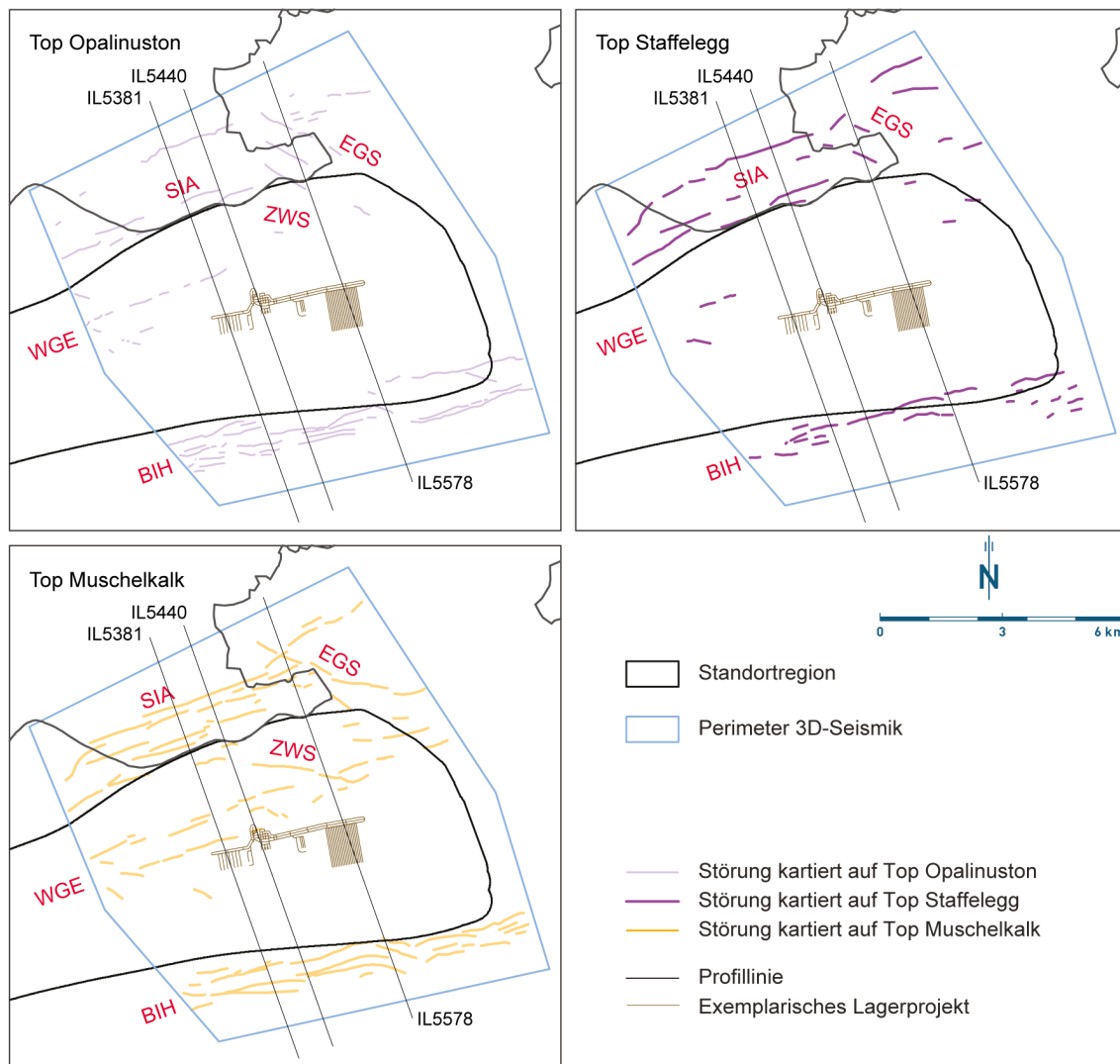


Fig. 2-2: Karte der Störungen im Perimeter der 3D-Seismik. Es werden Störungen auf den Horizonten Top Muschelkalk, Top Staffelegg sowie Top Opalinuston dargestellt

Die eingezeichneten Profilschnitte der 3D-Seismik sind in Fig. 4-1 dargestellt. Abkürzungen: BIH: Baden-Irchel-Herdern Lineament, EGS: Eglisau-Störung, SIA: Siglistorf Antiklinale, WGE: Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineament, ZWS: Zweidlen Störung

2.3 Neotektonik

Untersuchungen zur Neotektonik der Nordschweiz und besonders der geologischen Standortgebiete werden in Nagra (2024d) 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 (2024d) verwiesen.

Global Navigation Satellite System (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 zwischen 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 (relativ zum Bezugspunkt in Laufenburg). Im Rahmen der Messgenauigkeit gibt es keine Evidenzen für differenzielle Bewegungen im Umfeld des Standorts.

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 2024d). Obwohl es in den geologischen Standortgebieten punktuell Anzeichen von rezenter Deformation, z.B. im Zusammenhang mit dem Baden-Irchel-Herdern Lineament gibt, lassen sich für den Standort keine konkreten Deformationen im Quartär nachweisen.

2.4 Regionale Seismizität

Die Seismizität in der Schweiz wird durch ein sehr dichtes Netzwerk seismischer Stationen, dass 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 (Plenkers & 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 einen mehr als 500 Jahre umfassenden historisch dokumentierten Katalog von verspürten Beben, die im ECOS-2009 Katalog zusammengefasst wurden (Fäh et al. 2011). Damit verfügt die Schweiz, und insbesondere auch die Nordschweiz, über eine der umfangreichsten und detailliertesten Aufzeichnungen der seismischen Aktivität weltweit. Der ECOS-2009 Katalog wurde für die Berechnungen der Erdbebengefährdung für die KKW-Standorte in der PRP-Studie zugrunde gelegt. Da es in der Schweiz und den benachbarten Regionen keine signifikanten seismischen Aktivitäten seit der Publikation des ECOS-2009 gab, kann dieser nach wie vor als repräsentativ für Gefährdungs- und Risikostudien erachtet werden.

Auf Grundlage dieser robusten Datenbasis lassen sich folgende Aussagen abstützen (vgl. Fig. 2-3):

- 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 2024d, Nagra 2024e).

- 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 2024d, Diehl et al. 2023).
- Die untersuchten Standortregionen und damit auch der Standort des gTL und der OFA zeichnen sich durch eine im Vergleich deutlich geringere seismische Aktivität aus und gehören zu den seismisch am wenigsten aktiven Gebieten der Schweiz.
- In Eglisau gibt es einen Erdbebenherd, der kontinuierlich und räumlich beschränkt kleine Beben produziert. Die Beben sind ungewöhnlich flach und sind in den oberen 2 km und verteilt auf mehreren kleinen Störungen lokalisiert (Nagra 2024d). Die Beben in Eglisau sind auch in historischen Aufzeichnungen dokumentiert und haben in Eglisau bis zu Intensität VI (leichte Schäden) auf der Europäischen Makroseismischen Skala erreicht (Fäh et al. 2011).

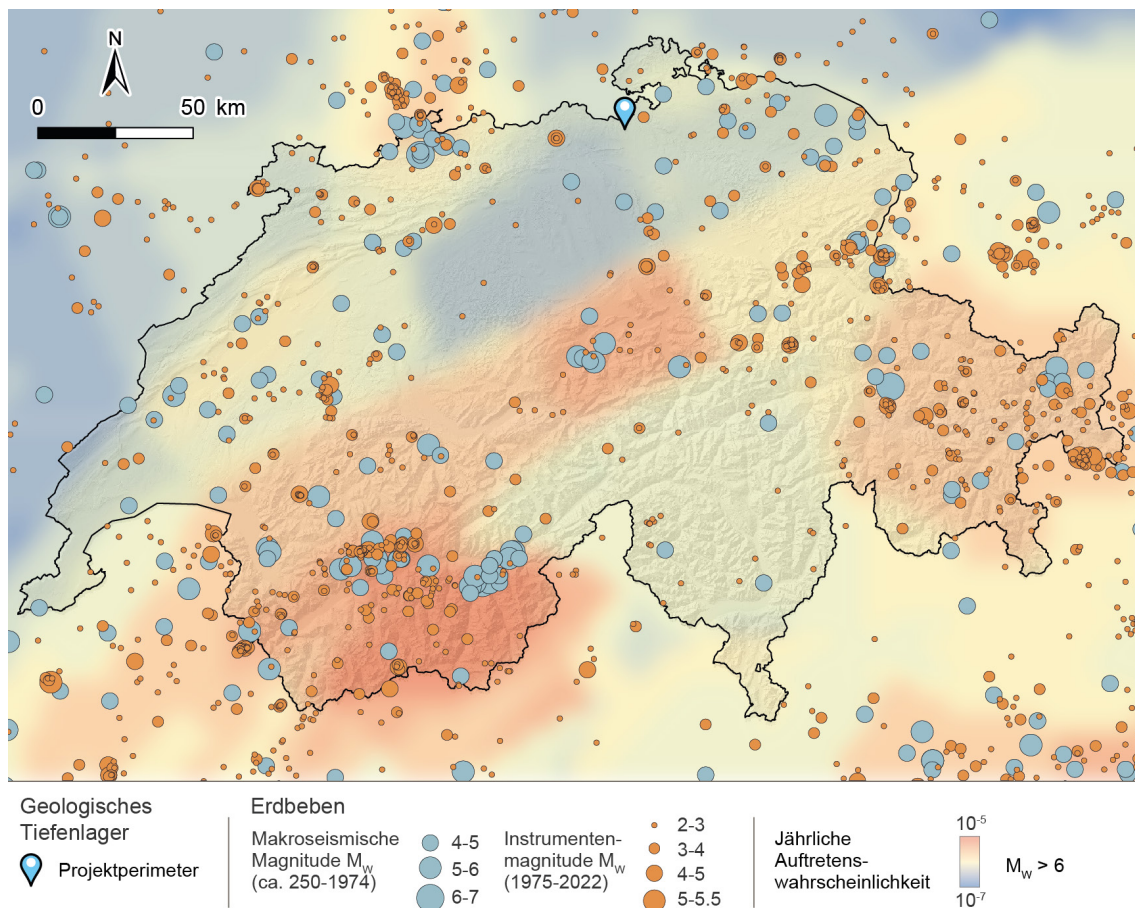


Fig. 2-3: Darstellung des Schweizer Erdbebenkatalogs des SED (Fäh et al. 2011) inkl. einer Aktualisierung bis einschliesslich 30.09.2023 zusammen mit der modellierten Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden $M_w \geq 6$ in der Schweiz, basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen im Rahmen des PRP-Projekts (swissnuclear 2013)

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

3 Baugrundeigenschaften

Die Kenntnisse der flachen Untergrundverhältnisse am Standort basieren auf verschiedenen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Rohstoffexploration, insbesondere des Kiesabbaus (Eisenlohr & Müller 2016). Diese werden ergänzt durch die Tiefbohrungen der Nagra, insbesondere der Bohrungen Stadel-3-1 und Stadel-2-1.

Für das Baugesuch wird die 2. Stufe der Umweltverträglichkeitsprüfung verlangt, mit welcher basierend auf dem Pflichtenheft der 1. Stufe (Nagra 2025c) konkrete Massnahmen zur Einhaltung der Umweltgesetze definiert werden. Grundlage dafür ist die bis zur Baubewilligung zu definierende genaue Lage, Grösse und Auslegung der Anlagen. Dazu hat die Nagra die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse bereits weiter untersucht. Die Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Grundlagen für das RBG noch nicht vor. Diese werden bei der weiteren Projektentwicklung im Hinblick auf die Baubewilligung berücksichtigt.

3.1 Untergrundverhältnisse

Während der Glazial-Interglazial-Zyklen im Quartär haben sich durch Erosion Felsrinnen gebildet. Die Sohle der Felsrinne unter dem Windlacherfeld reicht bis in die Untere Süsswassermolasse (USM). An den Talflanken des Haberstals ist der darüber folgende Schichtstapel aus Molassefels bis zur Oberen Süsswassermolasse (OSM) erhalten geblieben. Die glazialen Felsrinnen im Windlacherfeld wurden im Zuge der letzten Eiszeit (Würm) mit sandig-kiesigen Niederterrassenschotter verfüllt. Die Untergrundverhältnisse sind in Fig. 3-1 dargestellt und werden nachfolgend beschrieben.

Oberflächenschichten

Die maximal ca. 1 m mächtigen Oberflächenschichten bestehen aus Ober- und Unterboden, sowie lokal vorhandenen künstlichen Auffüllungen. Sie sind mehrheitlich feinkörnig zusammengesetzt und erfahrungsgemäss als locker gelagert, schlecht tragfähig und setzungsempfindlich einzustufen.

Gehängeablagerungen und Bachschutt

An den Talflanken sowie im zentralen Teil des Haberstals sind unter den geringmächtigen Oberflächenschichten Gehängeablagerungen resp. Bachschutt zu erwarten. Die Mächtigkeit dürfte in der Regel zwischen wenigen Metern bis zu maximal ca. 10 m betragen. Entlang der Talflanken dürfte es sich dabei vorwiegend um eher feinkörnige Gehängeablagerungen aus tonigem Silt resp. siltigem Sand mit Kies, Steinen und Blöcken handeln. In der Talmitte ist eher mit Bachschutt aus siltig-sandigem Kies mit Steinen resp. siltigem Sand mit Kies zu rechnen, welcher im Übergang zum Dorfbachtal mit dem Niederterrassenschotter des Windlacherfelds verzahnt ist. Das Schichtpaket der Gehängeablagerungen resp. des Bachschutts ist generell als locker bis mitteldicht gelagert, wenig tragfähig und setzungsempfindlich einzustufen.

Niederterrassenschotter

Im Übergang zum Dorfbachtal folgt östlich direkt unter den Oberflächenschichten resp. unter geringmächtigem Bachschutt der Niederterrassenschotter. Dieser besteht weitestgehend aus sandigem Kies mit Steinen, welcher lokal nagelfluhartige Verkittungen aufweist. Im Anlagenperimeter sind Schottermächtigkeiten von bis zu etwa 50 m zu erwarten (Nagra 2023a). Richtung Osten nimmt die Schottermächtigkeit zum zentralen Bereich des Windlacherfelds hin auf bis über 70 m zu. Es ist davon auszugehen, dass der Schotter mit den Gehängeablagerungen bzw. dem

Bachschutt im Übergang vom Dorfbachtal zum Haberstal verzahnt ist und im Haberstal nicht vorkommt.

Der Niederterrassenschotter ist in der Regel dicht bis sehr dicht gelagert und stellt einen gut tragfähigen Baugrund mit kleiner Setzungsempfindlichkeit dar.

Obere Meeresmolasse

An der nördlichen Talflanke des Haberstal ist die Obere Meeresmolasse (OMM) lokal direkt an der Terrainoberfläche aufgeschlossen. Ansonsten ist die Felsoberfläche im Bereich des Haberstals, wo keine Kiesablagerung erfolgte, bei ca. 0-10 m u.T. zu erwarten. Im Übergang zum Dorfbachtal ist die OMM erodiert und fehlt somit.

Die obere OMM besteht vorwiegend aus Sandsteinen, untergeordnet aber auch aus Mergeln und Konglomeraten. Die Gesteine der OMM sind in diesem Gebiet diagenetisch bedingt teilweise nur sehr schlecht zementiert und zerfallen bei mechanischer Beanspruchung zum Teil zu Lockergestein. In Oberflächennähe wird der variierende Zementierungsgrad zudem durch Verwitterung überprägt. Die schlecht zementierten oder verwitterten Partien der OMM weisen in geotechnischer Hinsicht zum Teil lockergesteinsähnliche Eigenschaften auf.

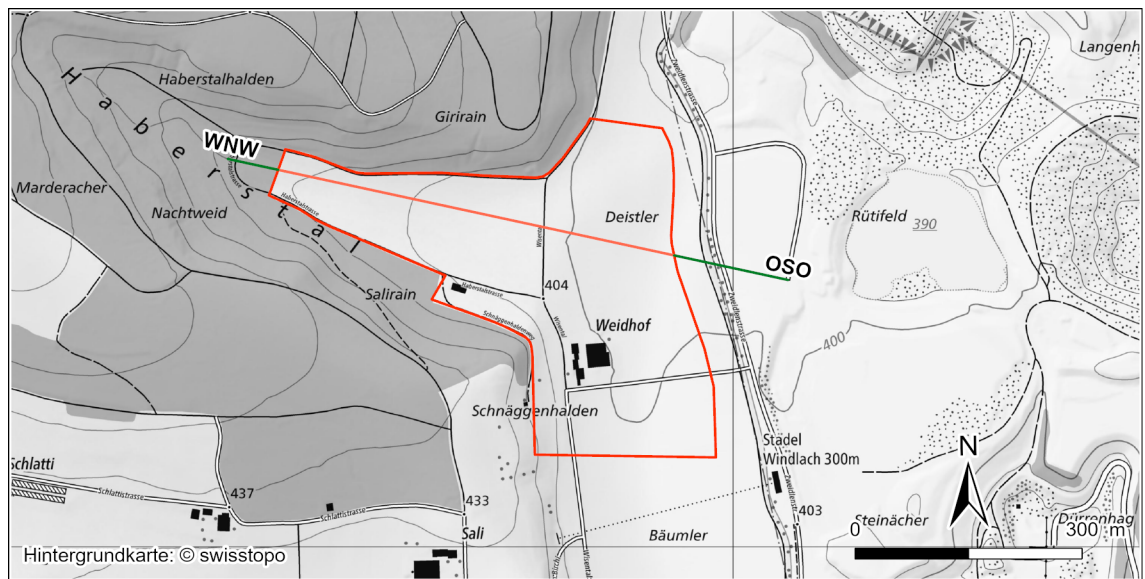
Die gut zementierte und unverwitterte OMM ist sehr gut tragfähig sowie praktisch setzungsunempfindlich.

Untere Süsswassermolasse

Die Untere Süsswassermolasse (USM) besteht in diesem Gebiet aus einer Wechsellagerung von Mergeln, Sand- und Siltsteinen, wobei der Mergelanteil gegenüber der OMM deutlich grösser ist. Im Bereich des Dorfbachtals ist die Oberkante USM erodiert und mit Niederterrassenschotter verfüllt. Bohrungen zur Rohstoffexploration zeigen die Oberkante der USM auf Kote ca. 370 m ü.M. an (Fig. 3-1).

Es ist zu erwarten, dass die Schichten der USM in diesem Gebiet, analog der OMM, teilweise ebenfalls nur sehr schlecht zementiert sind (Eisenlohr & Müller 2016). Dies lässt auf eine primäre, diagenetisch bedingte schlechte Zementierung schliessen.

Die verwitterten sowie die schlecht oder nicht-zementierten Partien der USM weisen zum Teil lockergesteinsähnliche Eigenschaften auf. Die unverwitterte und gut zementierte USM ist dem gegenüber sehr gut tragfähig sowie praktisch setzungsunempfindlich.



- Anlagenperimeter
 — Profilline innerhalb Perimeter
 — Profilline ausserhalb Perimeter

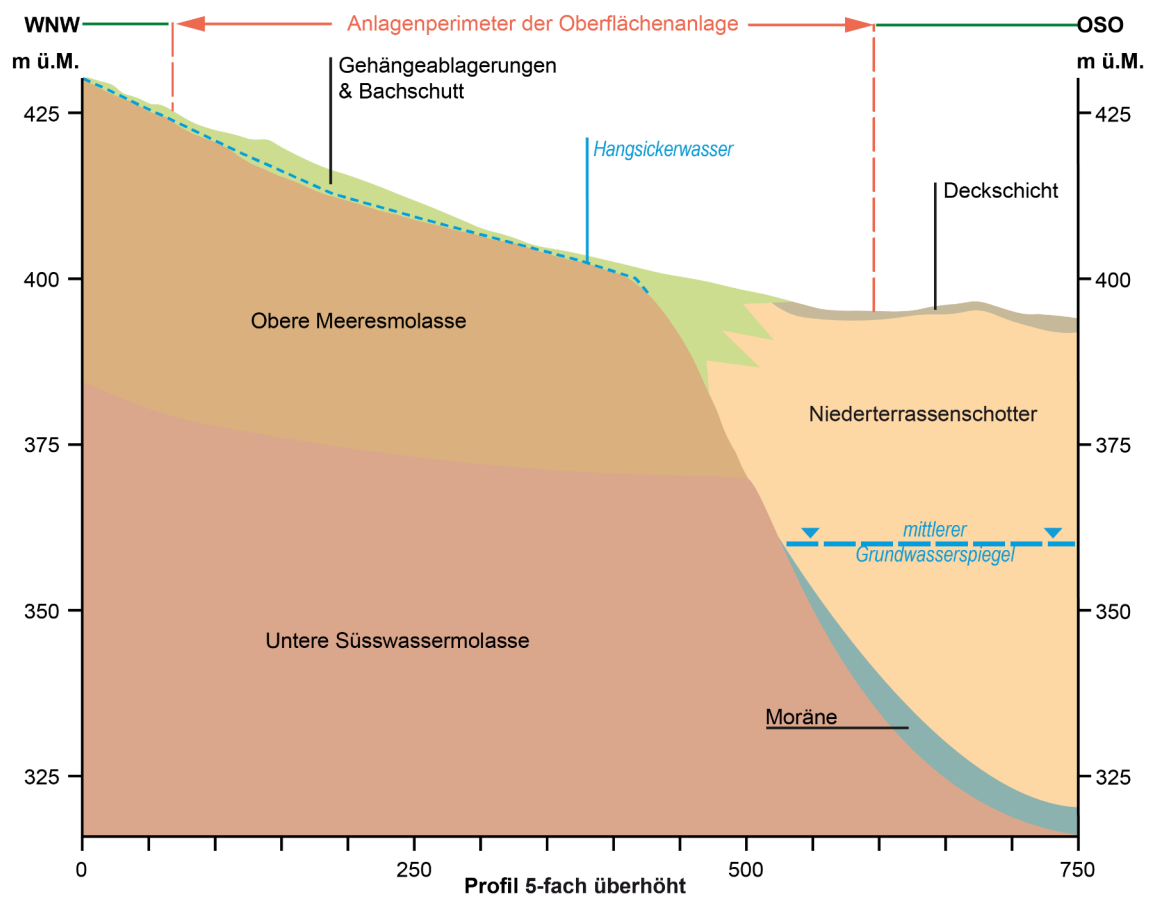


Fig. 3-1: Geologisches Profil durch den Anlagenperimeter basierend auf Eisenlohr & Müller (2016) und dem geologischen Schichtmodell, Stand Februar 2022

3.2 Grundwasser

Der Anlagenperimeter liegt am östlichen Rand des Grundwasserstroms von Windlach. Die Niederterrassenschotter des Windlacherfelds stellen einen gut durchlässigen Poren- resp. Lockergesteinsgrundwasserleiter dar. Der darunter liegende Fels der OMM und der USM sind dagegen vergleichsweise schlecht durchlässig und wirken grundsätzlich stauend (Eisenlohr & Müller 2016). Im Bereich des Windlacherfelds liegt der Grundwasserspiegel bei etwa 360 m ü.M. (Nagra 2025c).

Aufgrund der Randlage ist gemäss der Grundwasserkarte des Kantons Zürich im Standortareal ein Lockergesteinsgrundwasser mit nur einer «geringen Mächtigkeit» (< 2 m) vorhanden. Für den westlichen Teil des Standortareals im Haberstal wird kein nutzbares Grundwasser ausgewiesen. Der Baugrund für die OFA befindet sich daher oberhalb des Grundwassers. Im westlichen Teil ist lediglich mit geringen Mengen an Hangsickerwasser in den Gehängeablagerungen resp. Bachschutt sowie mit Fels- resp. Kluftwasser in der Molasse zu rechnen (Nagra 2025c).

3.3 Dynamische Baugrundwerte

Am Standort liegen noch keine Untersuchungen der dynamischen Eigenschaften des Lockergesteinsschichten vor. Zur Festlegung der dynamischen Eigenschaften hinsichtlich der Berechnung der Erdbebengefährdung beziehen wir uns daher auf die umfangreichen Charakterisierungen des Quartärs am Standort des Kernkraftwerk Leibstadt (KKL). Die Quartärschichten dort bestehen ebenso wie am Standort der OFA aus Niederterrassenschotter und der Wasserspiegel liegt ebenfalls deutlich unterhalb der Geländeoberkante (swissnuclear 2013). Die Gegebenheiten in Leibstadt sind daher im Bezug zu den dynamischen Eigenschaften ähnlich denen im Dorfbachtal.

Im Zuge der weiteren Projektentwicklung im Hinblick auf die Baubewilligung werden die dynamischen Eigenschaften standortspezifisch untersucht und in der Auslegung der Strukturen berücksichtigt.

3.3.1 Scherdehnungsabhängige Materialwerte

Die scherdehnungsabhängigen Materialmodelle des Niederterrassenschotter im Dorfbachtal werden identisch zu den Werten des Niederterrassenschotter am Standort KKL angenommen. Die KKL-Materialmodelle für das Schubmodul G und die Bodendämpfung ξ wurden im Rahmen des PRP-Projekts mit umfassenden Untersuchungen erhärtet (swissnuclear 2013). Es werden sowohl die *best estimate* Werte als auch die Minimal- und Maximalwerte in den Berechnungen berücksichtigt (Fig. 3-2 bzw. Tab. A-1).

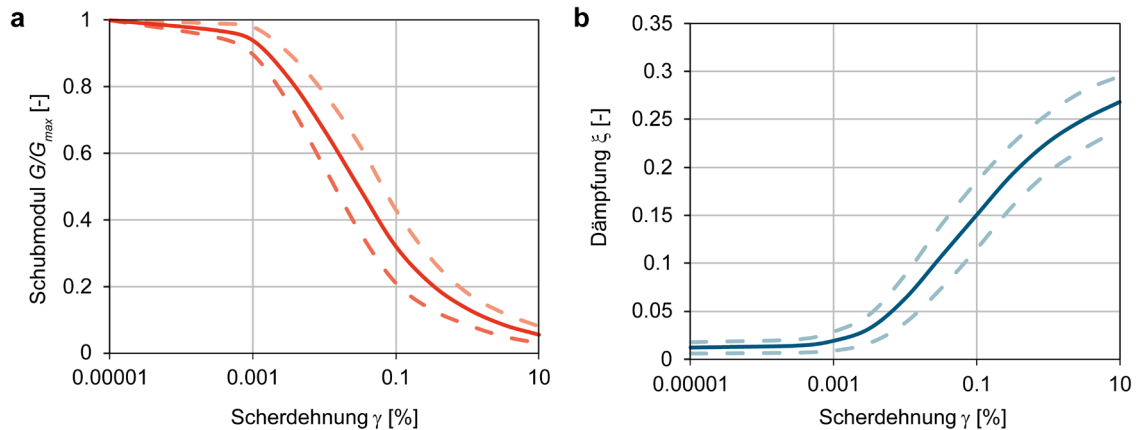


Fig. 3-2: (a) Scherdehnungsabhängiges Schubmodul und (b) Materialdämpfung der Schotterproben in KKL aus 10 bis 42 m Tiefe (swissnuclear 2013) jeweils mit *best estimate* (durchgezogen) sowie den Minimal- und Maximalwerten (gestrichelt)

Diese werden für die Niederterrassenschotter am Standort Haberstal angenommen.

3.3.2 Profile für die Scherwellengeschwindigkeit

Das Geschwindigkeitsmodell für den Standort wurde zusammengesetzt aus einem kalibrierten Modell für die Tiefbohrung Stadel-3-1 sowie einem geschätzten Geschwindigkeitsprofil für die Quartärschichten basierend auf dem Modell für KKL (swissnuclear 2013).

Tiefbohrungen

Aus den Tiefbohrungen liegen Bohrlochmessungen der Geschwindigkeiten von P-Wellen und S-Wellen vor. Es handelt sich dabei um *Sonic Logs*, welche die Variation der P- und S-Wellengeschwindigkeiten entlang des Bohrlochs erfassen. Der Frequenzbereich der *Sonic Logs* liegt dabei im Bereich von Kilohertz und somit deutlich über dem für die Ausbreitung von Erdbebenwellen relevanten Frequenzbereich. Zusätzlich liegen jedoch VSP-Messungen (*Vertical Seismic Profiling*) vor, die zur Kalibration der *Sonic Logs* herangezogen wurden. Die originalen P-Wellen Logs wurden überarbeitet (Filterung, Inter-/Extrapolation, Kalibrierung an VSP) und in 1D V_p -Geschwindigkeitsmodelle überführt. V_s -Geschwindigkeitsmodelle wurden daraus und dem V_p/V_s -Verhältnis, ermittelt aus den *Sonic Logs*, berechnet. Pro Bohrung wurde ein V_p/V_s Modell erstellt und so V_s -Modelle auf Basis der vorliegenden V_p -Geschwindigkeitsmodelle berechnet.

Quartärschichten

Analog zu den scherdehnungsabhängigen Materialwerten werden für die V_s -Profile der Niederterrassenschotter die entsprechenden Werte aus den Untersuchungen im Zusammenhang mit dem PRP am Standort KKL angenommen (swissnuclear 2013). Dabei werden sowohl die *best estimates*, wie auch die Bandbreite zwischen den Minimal- und Maximalwerten durch eine Schar von Modellen berücksichtigt. Die Tiefenabhängigkeit der V_s -Profile wird dabei ebenfalls übertragen.

Zusammengesetzte V_s -Modelle

Basierend auf den Tiefbohrungen und den in der 3D-Seismik identifizierten Horizonten wurden für die exemplarisch projektierten Zugangsbauwerke zum gTL Prognoseprofile erstellt (Nagra 2023a). Diese sind entsprechend der geringen Abstände der Schachtachsen sehr ähnlich und stimmen im Wesentlichen mit dem von Stadel-3-1 überein. In Bezug auf die seismischen Eigenschaften sind lediglich die Unterschiede der Quartärmächtigkeit bedeutsam.

Gemäss der Prognose ist im Haberstal (mit dem Zugangsschacht gemäss des exemplarischen Lagerprojekts) mit 5 m Quartär-Sedimenten zu rechnen. Im Dorfbachtal (mit Betriebs- und Lüftungsschacht gemäss des exemplarischen Lagerprojekts) ist mit einer signifikanten Menge Niederterrassenschotter zu rechnen. Die Quartärmächtigkeiten werden dort mit 23 resp. 45 m prognostiziert (Nagra 2023a).

Es wurden Initialprofile mit unterschiedlicher Quartärmächtigkeiten gewählt, um die Variabilität der anzutreffenden Sedimentschichten im Anlagenperimeter abzudecken. Varianten mit einer Quartärmächtigkeit von 10 m, 30 m und 50 m wurden dazu berücksichtigt. Das *best estimate* Profil je nach Rechenmodell des Lockergesteins wurde mit einem Variationskoeffizienten von $COV = 0.225$ entlang der gesamten Tiefe gestreut, um eine Schar von 30 Profilen der Scherwellengeschwindigkeit zu generieren und so ein grosses Band abzudecken.

Für das Materialmodell der Molasseschichten (OMM sowie USM) werden die in der Software SHAKE verfügbaren Modulreduktions- und Dämpfungskurven des Modells "Rock (Idriss)" verwendet (Schnabel et al. 1970). Das *best estimate* V_s -Profil wurde anhand der Ergebnisse der Tiefbohrung Stadel-3-1 bestimmt und vereinfacht linearisiert (Fig. 3-3).

Der Horizont des Referenzfels mit einer V_s von 1'800 m/s ist in einer Tiefe von 400 m unterhalb Terrainoberkante festgelegt worden. Diese Tiefe entspricht dem Top Malm in der Bohrung Stadel-3-1 und wurde mit den Geschwindigkeitslogs der Tiefbohrungen festgelegt. Der Bereich unterhalb von 400 m wird als elastischer Halbraum modelliert.

Der Grundwasserspiegel wurde für die verschiedenen Quartärmächtigkeiten (10–50 m) jeweils an der Felsoberkante festgelegt. Es wurde keine Sensitivitätsstudie bzgl. der Variation der Kote des Grundwasserspiegels innerhalb der Lockergesteinsschichten veranlasst. Bei der Variation der Lockergesteinsmächtigkeit wurde lediglich für die entsprechenden Schichten das Materialmodell (Schotter, Fels) ausgetauscht. Dagegen wurde das V_s -Profil des Initialprofils nicht variiert.

Fig. 3-3 enthält eine Zusammenstellung mit dem Prognoseprofil für den Lüftungsschacht, dem ermitteltem V_s -Profil sowie die betrachtete Schar der 30 V_s -Profile bis zum Referenzfels bei 400 m Tiefe und deren Statistik (16-Perzentil-, Median- und 84-Perzentilwerte). Die numerischen Werte der zugrunde gelegten Parameter sind in Tab. A-2 dokumentiert.

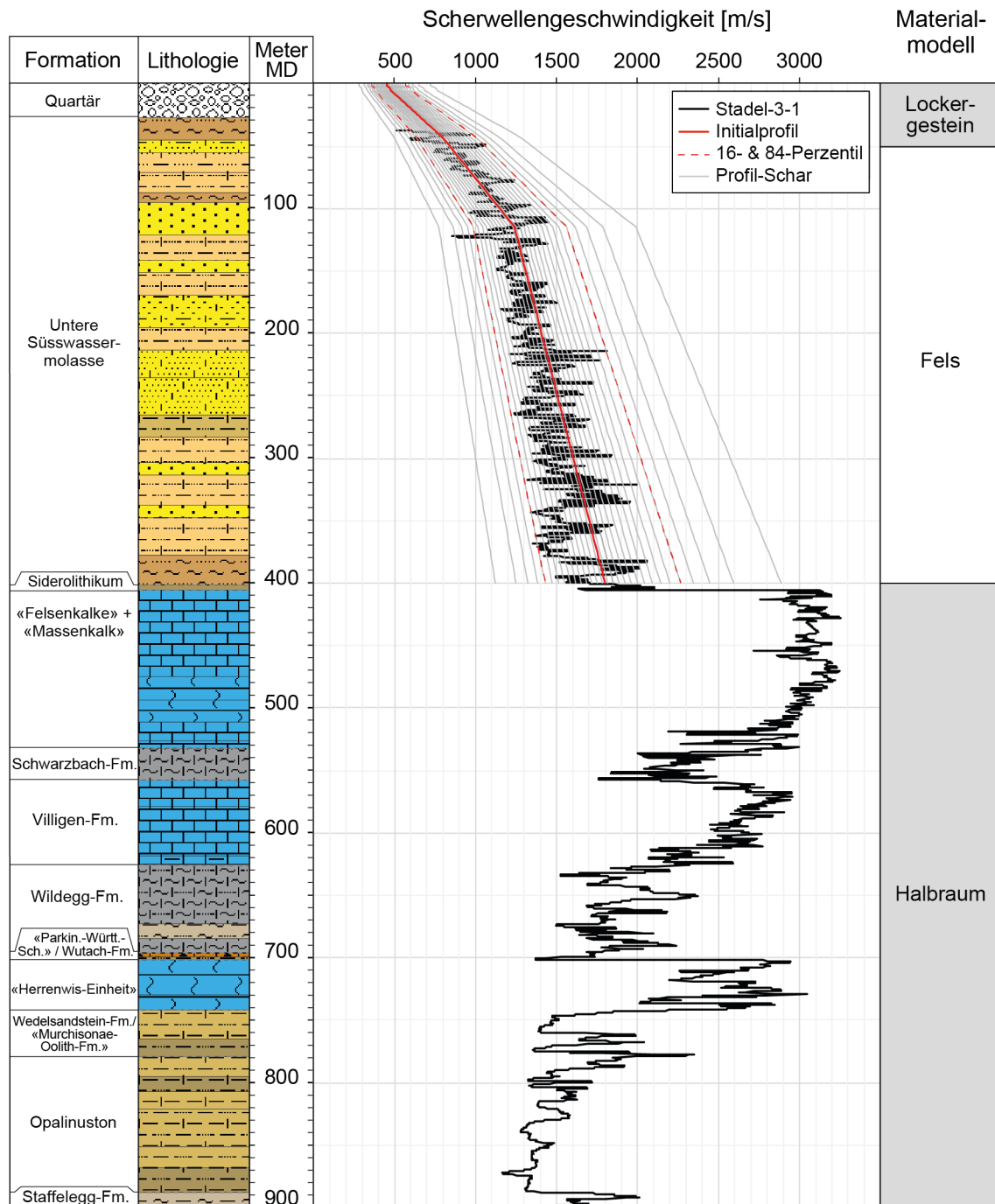


Fig. 3-3: Lithologisches Profil (links) und V_s -Log (schwarz) der Bohrung Stadel-3-1, das Initialprofil (rot), Schar der 30 Profile (grau) und die berücksichtigten Materialmodelle (rechts)

4 Betrachtung der Gefährdungsbilder

4.1 Verschiebungsgefährdung

Die Verschiebungsgefährdung beschreibt die Gefährdung, die durch einen möglichen Bruch an der Oberfläche oder durch Anlagenteile besteht. Eine Verschiebungsgefährdung setzt eine aktive oder zumindest reaktivierbare Störung 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 erkennbare Schäden auszulösen.

Eine wichtige Basis für die Beurteilung der Verschiebungsgefährdung am Standort Haberstal inkl. der UTA liefert die 3D-Seismik (Nagra 2024a). Durch Interpretation der 3D-Seismik wurden Störungszonen kartiert (Fig. 4-1). Der Anlagenperimeter und Haupteinschliessungsbereich im Untergrund befinden sich am Rand des Bereichs, in dem keine Störungen in der 3D-Seismik kartierbar waren. Durch deren Randlage werden die Bereiche, die sich für die Lagerfelder eignen, nicht eingeschränkt. Im Bereich des Anlagenperimeters ist ein Segment des Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineaments in der Formation des Muschelkalks und darunter durch die 3D-Seismik abgebildet (Fig. 4-1). Im Sedimentstapel unterhalb des Anlagenperimeters ist dieses Segment bis zum Muschelkalk nicht kartierbar (Nagra 2024a).

Zusätzlich zur Auswertung der 3D-Seismik wurden Betrachtungen der Geomorphologie durchgeführt. Im Umkreis der OFA gibt es verschiedene Deckenschotter, die während der letzten 2 Millionen Jahre abgelagert wurden. Im Falle von tektonischen Deformationen innerhalb dieses Zeitraums würden sich Versätze an der Basis der Deckenschotter ergeben (Hammer et al. 2019). Im Rahmen der erneuten Untersuchungen wurde der Umkreis der OFA nach Hinweisen für solche Versätze untersucht. Es konnten keine Hinweise auf Versätze gefunden werden, die mit dem Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineament in Zusammenhang gebracht werden können (Nagra 2024d).

Durch Nivellement-Messungen wird ein grossräumiges Muster von Senkungen nördlich und Hebungen südlich des Rheins festgestellt. Die im Bereich des Standorts festgestellten Hebungen, bzw. der Übergang zu Senkungen nördlich des Standorts, stellt jedoch keine differentielle Deformation 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 (Nagra 2024d).

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Die 3D-Seismik zeigt im Bereich der OFA, des gTL und assoziierte Anlagenteile keine Störungen, die zu einem Bruch an der Oberfläche oder durch Teile der UTA führen könnten.
- Segmente des Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineament sind im Bereich des exemplarischen Lagerprojekts nur im Muschelkalk und darunter abgebildet, jedoch nicht im Tiefenbereich der Zugangsbauwerke und der geplanten Strukturen auf Lagerebene.
- Aus Untersuchungen der Geomorphologie lassen sich keine Anzeichen von diskreten Versätzen in den letzten 2 Millionen Jahren nachweisen.

Aus den vorhandenen Daten ergeben sich keine Hinweise auf eine Gefährdung durch einen Bruch an der Oberfläche oder durch untertägige Anlagenteile. Damit ergibt sich für den Standort keine Verschiebungsgefährdung.

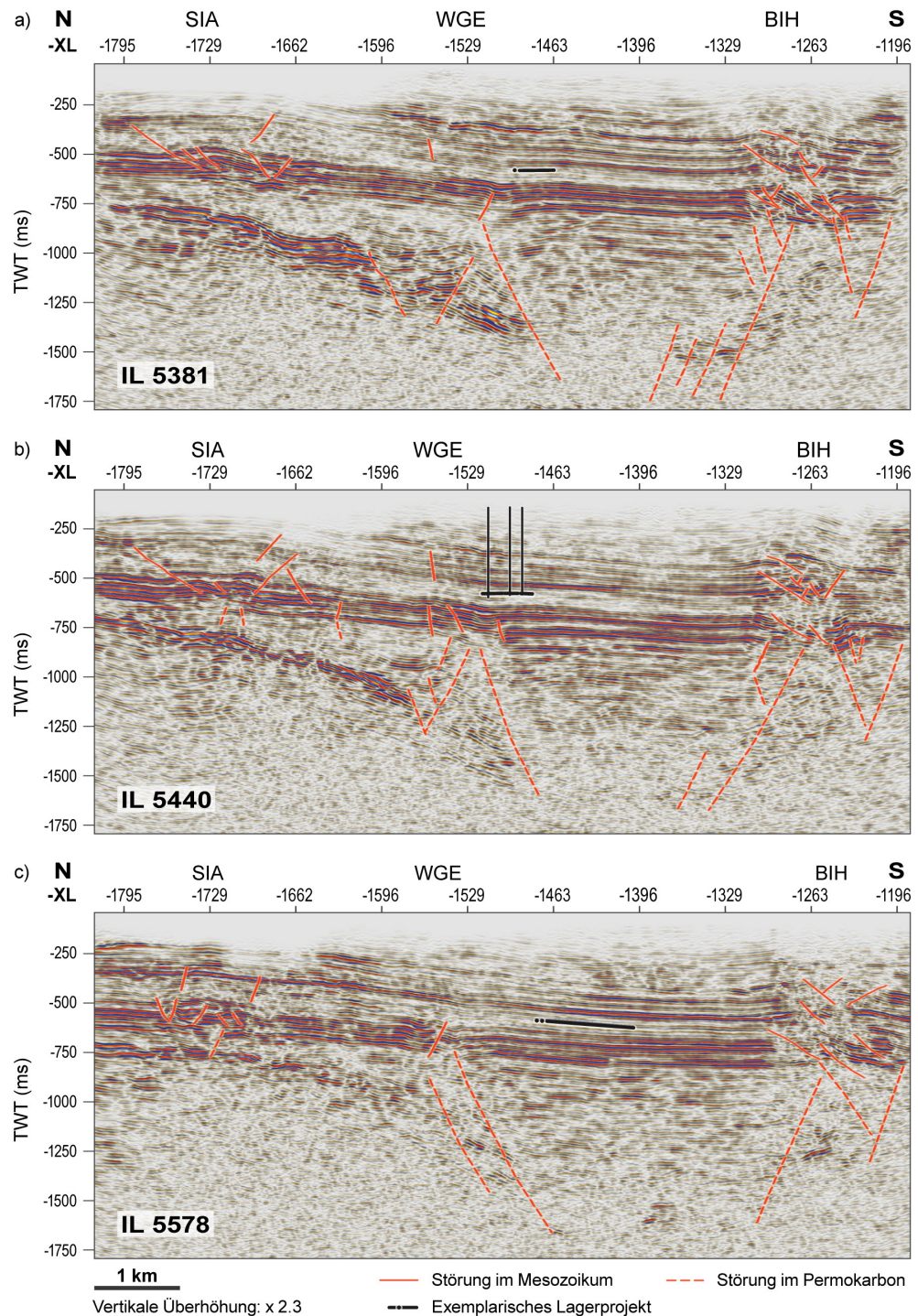


Fig. 4-1: Schnitte aus der 3D-Seismik mit Interpretation von Störungen mit Projektion der geplanten Zugangsbauwerke, den Strukturen des zentralen Bereichs (IL 5440) sowie der Lagerfelder SMA (IL 5381) und HAA (IL 5578)

Die Lage der Schnitte ist in Fig. 2-2 dargestellt. SIA bezeichnet die Siglistorfer Antiklinale, WGE das Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineament und BIH das Baden-Irchel-Herdern Lineament.

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

Die obersten Schichten des Baugrunds sind wenig tragfähig und setzungsempfindlich (siehe auch Abschnitt 3.1). Die Fundation erfolgt dagegen auf den tieferen, tragfähigen und wenig setzungsempfindlichen Schichten. Daher sind auch keine wesentlichen Setzungen im Zusammenhang mit Erdbeben zu erwarten. Weitergehende Betrachtungen benötigen geotechnische Laboruntersuchungen, die zum derzeitigen Projektfortschritt noch nicht vorliegen, jedoch im Rahmen weiterer Baugrunduntersuchungen im Hinblick auf die Baubewilligung vorgesehen sind.

4.2.2 Gravitative Massebewegungen

In Nagra (2024f) werden basierend auf den geologischen und hydrogeologischen Bedingungen am Standort die gravitativen Gefahren qualitativ beschrieben und bewertet. In der nahen Umgebung des Anlagenperimeters sind keine Felshänge/-böschungen vorhanden. Daher können Gefahren durch Steinschlag, Fels- oder gar Bergsturz im Anlagenperimeter ausgeschlossen werden.

In der nahen Umgebung des Anlagenperimeters steht zum Teil schlecht zementierter Molassefels an. Aktuell ist das umliegende Gelände bewaldet. Permanente und mittel- resp. tiefgründige Rutschungen können aufgrund der Geländemorphologie, der Lagerungsverhältnisse sowie der Materialzusammensetzung ausgeschlossen werden. Das Auftreten von flachgründigen, kleinräumigen, spontanen Rutschungen oder kleinräumigen Hangmuren kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, insbesondere im Zusammenhang mit extremen Niederschlagsereignissen. Diese Gefahren können jedoch mit einfachen baulichen und organisatorischen Massnahmen beherrscht werden.

4.2.3 Bodenverflüssigung

Ein Potenzial für Bodenverflüssigung besteht nur in gesättigten, nichtbindigen Bodenschichten. Besonders empfindlich sind saubere Sande oder Silte mit schlechter Sortierung und geringer Lagerungsdichte. Der Grundwasserspiegel wird bei ca. 360 m ü.M. erwartet (Kapitel 3.2). Demnach sind nur Bereiche mit grösserer Quartärmächtigkeit im Bereich des Dorfbachtals zu betrachten.

Der Untergrund im Bereich der erforderlichen Baugruben im Dorfbachtal besteht unterhalb des Grundwasserspiegels aus dicht gelagertem Niederterrassenschotter. Aufgrund der hohen Lagerungsdichte und der guten Wasserdurchlässigkeit weist der Schotter keine Tendenz zu Bodenverflüssigung auf.

Im Rahmen von PRP wurden auf Grundlage der umfangreichen Datenbasis für die Standorte der Kernkraftwerke Berechnungen zur Bodenverflüssigung durchgeführt (swissnuclear 2013). Für den Standort des Kernkraftwerks Gösgen 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 diese Berechnungen für den Standort des Kernkraftwerks Gösgen auch auf die anderen KKW-Standorte übertragen lässt. Da das Lockergestein am Standort Haberstal vergleichbar mit denen der KKW-Standorte ist (insbesondere KKL), wird eine Bodenverflüssigung im Bereich der Schotter als sehr unwahrscheinlich eingestuft.

4.3 Seismische Gefährdung

4.3.1 Einführung

Im folgenden Kapitel soll die seismische Gefährdung am Standort Haberstal 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. 4-2), gesamthaft zu beschreiben.

Für das Rahmenbewilligungsgesuch des gTL müssen diese Analysen für Bodenbewegungen infolge von Erdbeben mit einer Überschreitungshäufigkeit von 10^{-3} a^{-1} bzw. 10^{-4} a^{-1} (entsprechend den sogenannten Nachweiserdbeben der Störfallkategorien 2 und 3 (NESK2 resp. NESK3)) durchgeführt werden (Kap. 8.2 Bst. d ENSI-G03).

Die einzelnen Schritte solcher Gefährdungsstudien sind schematisch in Fig. 4-3 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.

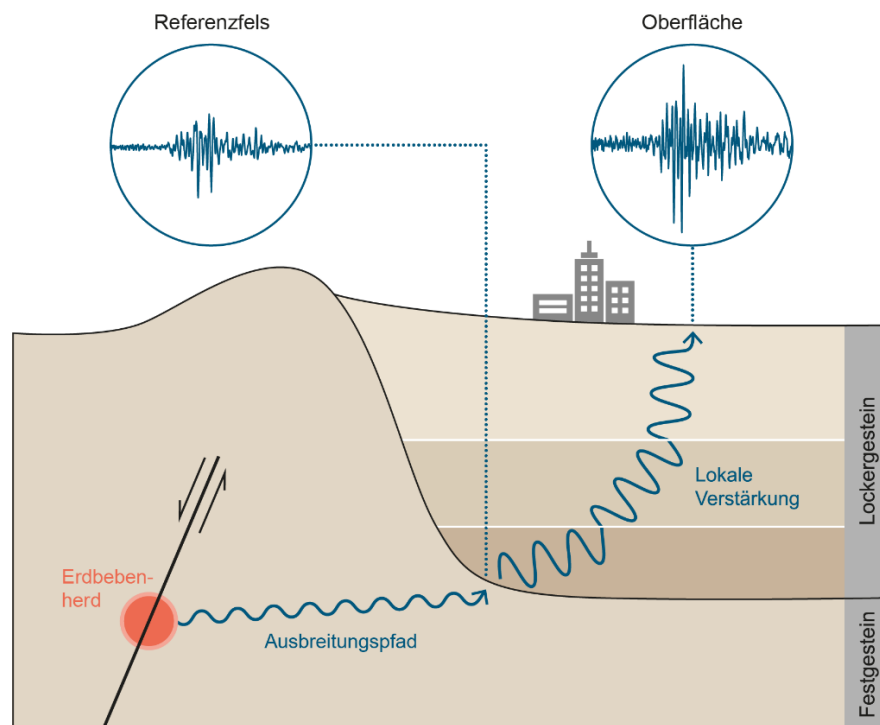


Fig. 4-2: Komponenten der standortspezifischen Erdbebengefährdung: Erdbebenherde als Quellen für seismische Wellen, Ausbreitungspfade bis zum Referenzfels, lokale Verstärkung in den weichen Sedimenten darüber

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 SUH2015 (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.

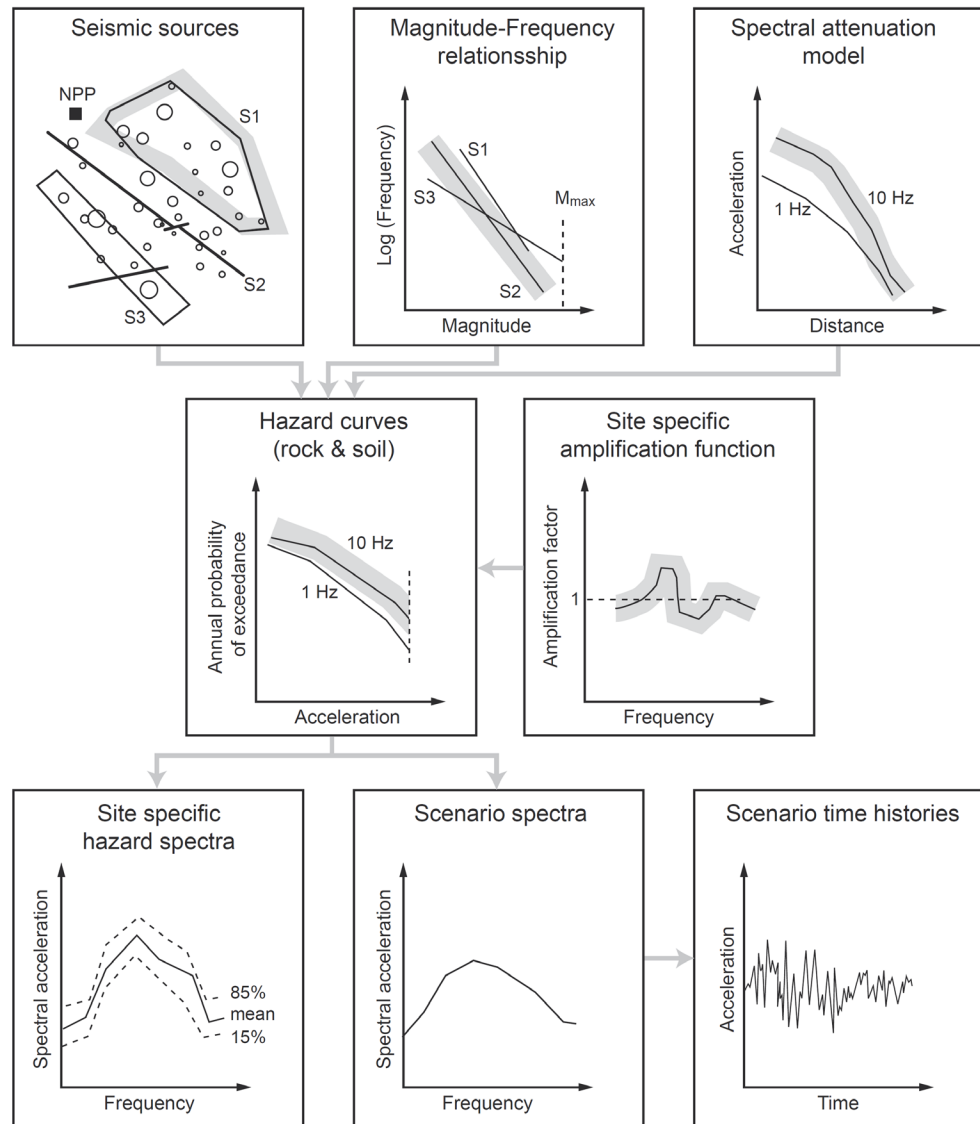


Fig. 4-3: Schematische Darstellung des Workflows für eine probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse und Schritte des Post-Processing

(*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. 4-4 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.

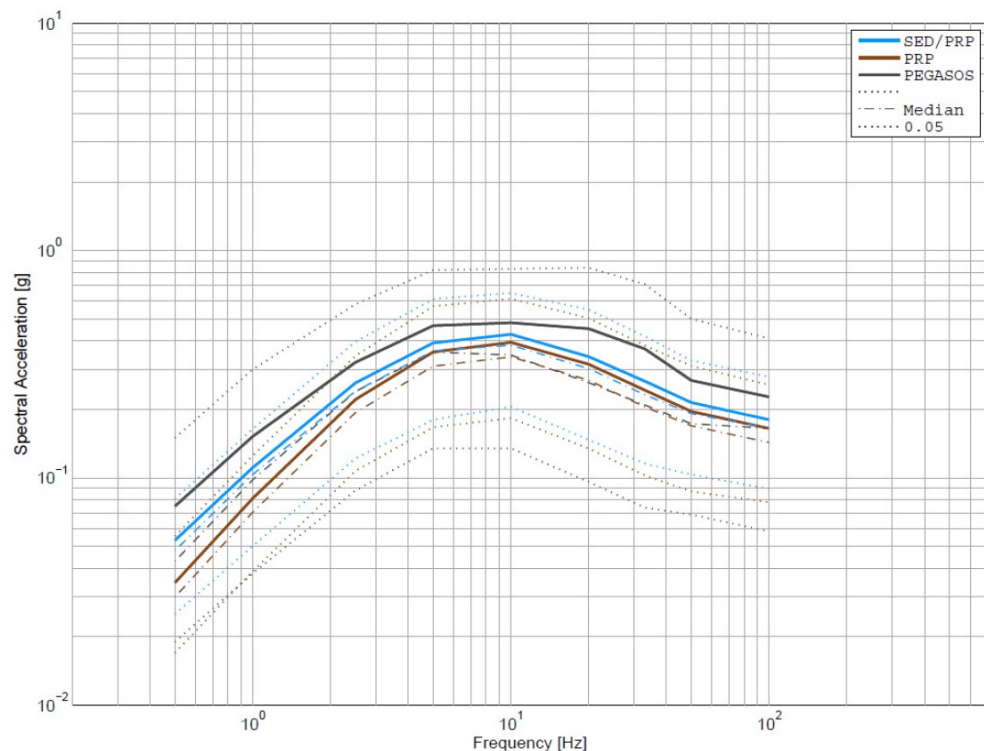


Fig. 4-4: Gefährdungskonsistente Antwortspektren (*Uniform Hazard Spectra*, UHS) der horizontalen Felsgefährdung aus PEGASOS (2004), PRP (2013) und SED/PRP (= ENSI-2015) für 10^{-4} a^{-1} und 5 % Dämpfung am Standort KKB (Proseis 2015)

4.3.3 Übertragung der Felsgefährdung

Mit dem ENSI-2015 Modell liegt ein anerkanntes Modell vor, welches die Erdbebengefährdung an den Standorten der Schweizer Kernkraftwerke beschreibt. Darin wurden die Quellterme und Ausbreitungspfade möglicher Erdbebenquellen umfangreich beschrieben. Es liegt daher nahe zu prüfen, inwiefern Resultate des ENSI-2015 Modells für die Bewertung der seismischen Gefährdung herangezogen werden können.

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 7'705 Zellen mit Abmessungen von $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (ca. $4.5 \times 4.5 \text{ km}$) diskretisiert. In Anbetracht des geringen Abstands zwischen den Standorten KKB und Haberstal von ca. 18 km soll die Gefährdung am Referenzfels für den Standort KKB auf den Standort Haberstal übertragen werden. Dabei wird angenommen, dass die Erdbebenherde sowie die Ausbreitungspfade für beide Standorte vergleichbar sind.

Entsprechend dieser Annahme folgt, dass auch die Scherwellengeschwindigkeit am Referenzfels vom Standort KKB auf den Standort Haberstal übertragen und somit als 1'800 m/s angenommen wird. Mittels dieser vereinfachenden Annahme können, die für den Standort KKB berechneten, spektralen Beschleunigungen für die Ausbreitungspfade möglicher Quellen auch auf den Standort Haberstal übertragen werden (vgl. Fig. 4-3). Damit kann von der umfangreichen Analyse der Ausbreitungspfade, die im Rahmen von PRP vorgenommen wurde, profitiert werden. Diese Annahme ist aus geophysikalischer Sicht zulässig, da die Erdkruste regionale Eigenschaften auf-

weist. Sie ist auch aus ingenieurmässigen Überlegungen sinnvoll, da sich so eine robuste Ausgangslage für die standortspezifischen Berechnungen ergibt.

4.3.4 Felsgefährdung am Anlagenperimeter

Die numerischen Werte der gefährdungskonsistenten Antwortspektren nach ENSI-2015 am Standort KKB am Referenzfels sind in Tab. A-3 dokumentiert sowie in Fig. 4-5 und Fig. 4-6 für Überschreitungshäufigkeiten von 10^{-3} a^{-1} bzw. 10^{-4} a^{-1} dargestellt. Diese Werte werden im Folgenden für die Berechnungen für den Standort Haberstal zugrunde gelegt.

Für die Lagerebene des gTL werden diese Werte der spektralen Beschleunigung als die seismische Gefährdung für die Nachweiserdbeben (NESK2 & NESK3) direkt übernommen.

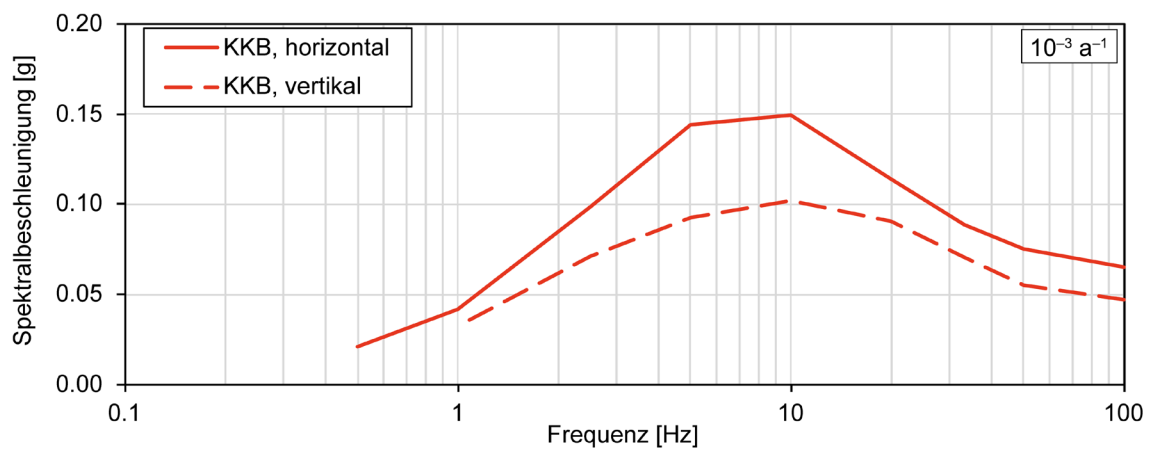


Fig. 4-5: Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015, 10^{-3} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Haberstal

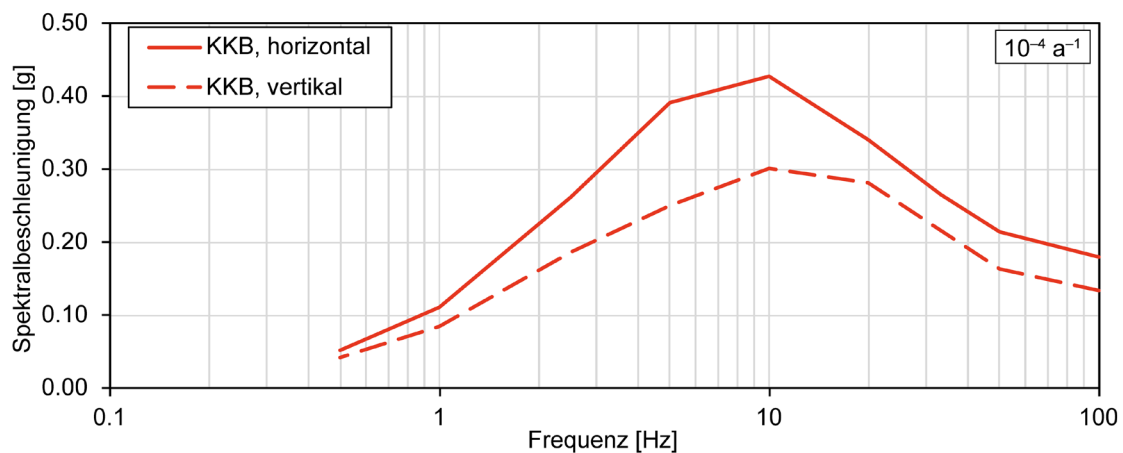


Fig. 4-6: Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015, 10^{-4} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Haberstal

4.3.5 Gefährdung an der Terrainoberfläche im Anlagenperimeter

Die horizontale Anregung sowie die daraus resultierenden Antwortspektren an der Oberkante Terrain beim Anlagenperimeter wurde anhand von 1-D äquivalent-linearen Standortanalysen mit dem Programm ProShake (EduPro Civil Systems 2017) ermittelt. Zu diesem Zweck wurden 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} a^{-1} bzw. 10^{-4} a^{-1} durchgeführt.

In Anbetracht der grossen Unschärfe in der aktuellen Projektphase bzw. der möglichen Variation der Mächtigkeit des Niederterrassenschotters im Anlagenperimeter werden in diesem Bericht Bodenprofile mit verschiedener Quartärmächtigkeit untersucht: 10 m, 30 m und 50 m. Auf dieser Weise ist es möglich eine grosse Bandbreite von Grundfrequenzen des Baugrundes abzudecken.

Für die Ermittlung der Erdbeben-Zeitverläufe werden Aufzeichnungen der Horizontalkomponenten von drei Ereignissen verwendet. Die erforderlichen Erdbeben-Zeitverläufe werden aus der Swissnuclear-Datenbank der 30 Erdbeben-Zeitverläufe entsprechend der KKB NESK3 Erdbengefährdung (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

Sowohl für das NESK2 als auch für das NESK3 werden 558 äquivalent-lineare Analysen pro angenommener Schottermächtigkeit durchgeführt. Die Menge der Analysen setzt sich aus der Kombination von 30 Profilen sowie des *best estimate* Profils der Scherwellengeschwindigkeit (Kap. 3.3.2), drei verschiedenen Materialkennwerten (Minimum, *best estimate*, Maximum) und sechs Erdbeben-Zeitverläufen zusammen.

Der Mittelwert des horizontalen Bodenantwortspektrums an der Terrainoberfläche wurde aus einer Gewichtung der Rechenergebnisse aus den drei KKL-Materialmodellen bestimmt. Dabei wurden dem *best estimate* 40 % Gewichtung und den minimalen bzw. maximalen Werten jeweils 30 % Gewicht zugeordnet. Die Gewichtung wurde aus ingenieurmässigen Überlegungen und Erfahrungswerten aus dem PRP-Projekt festgelegt. Die Sensitivität des Resultats für eine abweichende Gewichtungsannahme der KKL-Materialmodelle von $\pm 20\%$ liegt innerhalb der Unschärfe solcher Analysen. Diese Berechnungen wurden für die drei Modelle für die Mächtigkeit des Niederterrassenschotters durchgeführt. Schliesslich wird eine Umhüllende dieser drei Bodenantwortspektren gebildet, die im Folgenden als massgebend für die Gefährdung am Anlagenperimeter angenommen wird. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Fig. 4-7 (Überschreitungshäufigkeit 10^{-3} a^{-1}) und Fig. 4-8 (Überschreitungshäufigkeit 10^{-4} a^{-1}) zusammengestellt.

In Fig. 4-9 resp. Fig. 4-10 ist der Vergleich des umhüllenden Bodenantwortspektrums für den Anlagenperimeter mit dem Bodenantwortspektrum für das KKB entsprechend ENSI-2015 dargestellt. Die numerischen Werte sind in Tab. A-4 dokumentiert. Die Resultate liegen generell nahe beieinander. Im Bereich oberhalb von etwa 4 Hz weisst der Standort KKB bis zu 35 % höhere spektrale Beschleunigungen aus. Die Bodenantwortspektren für den Anlagenperimeter weisen lediglich im Frequenzbereich unterhalb von 4 Hz einen marginal erhöhten Energieinhalt gegenüber den KKB-Bodenantwortspektren auf. Der breite Plateaubereich der ermittelten Spektralbeschleunigung für den Anlagenperimeter decken das grosse Unsicherheitsband der lokalen Baugrundverhältnisse in Bezug zur Quartärmächtigkeit ab.

Die Bodenantwortspektren für den Anlagenperimeter weisen den Spitzenwert als Plateau der Spektralbeschleunigung bei 4-10 Hz auf. Dies steht in guter Übereinstimmung mit dem erwarteten Wert der Grundfrequenz aus der vereinfachten Beziehung für eine Mächtigkeit des Lockergesteins zwischen 10-50 m:

$$f = \frac{V_s}{4 \cdot H} \approx 3 \div 12 \text{ Hz},$$

wobei V_s die mittlere Scherwellengeschwindigkeit und H die Mächtigkeit der Lockergesteins-schicht ist.

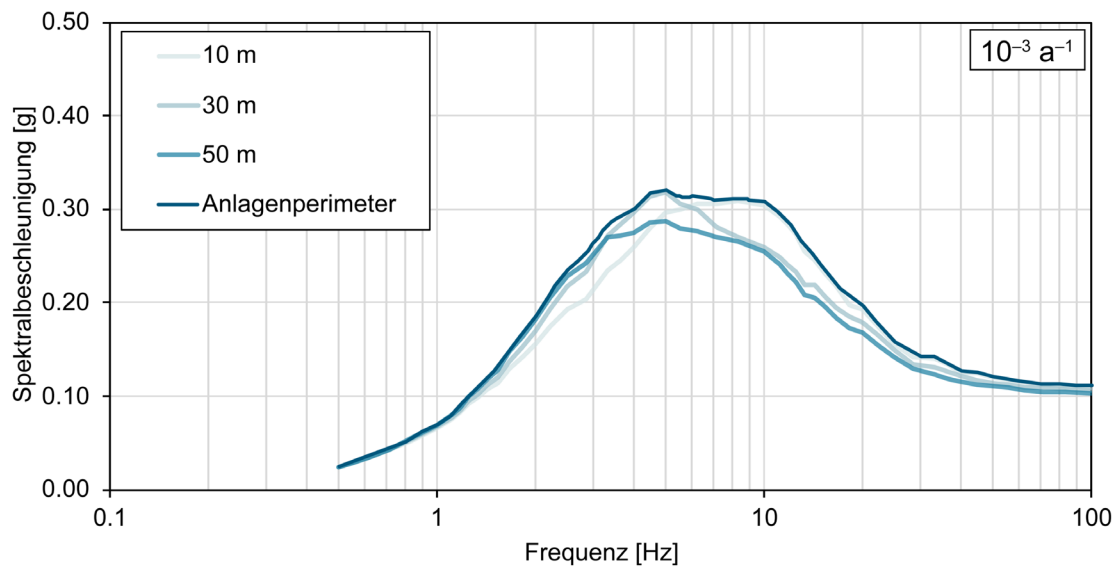


Fig. 4-7: Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit 10^{-3} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und resultierende Ergebnisse für Schotter-Mächtigkeiten von 10–50 m

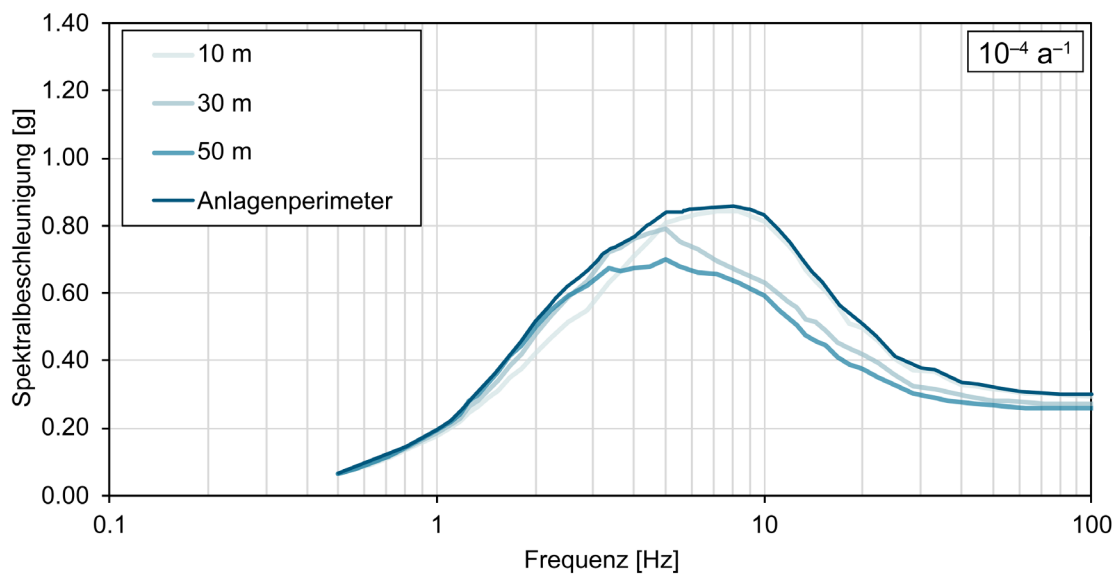


Fig. 4-8: Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit, 10^{-4} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und resultierende Ergebnisse für Schotter-Mächtigkeiten von 10–50 m

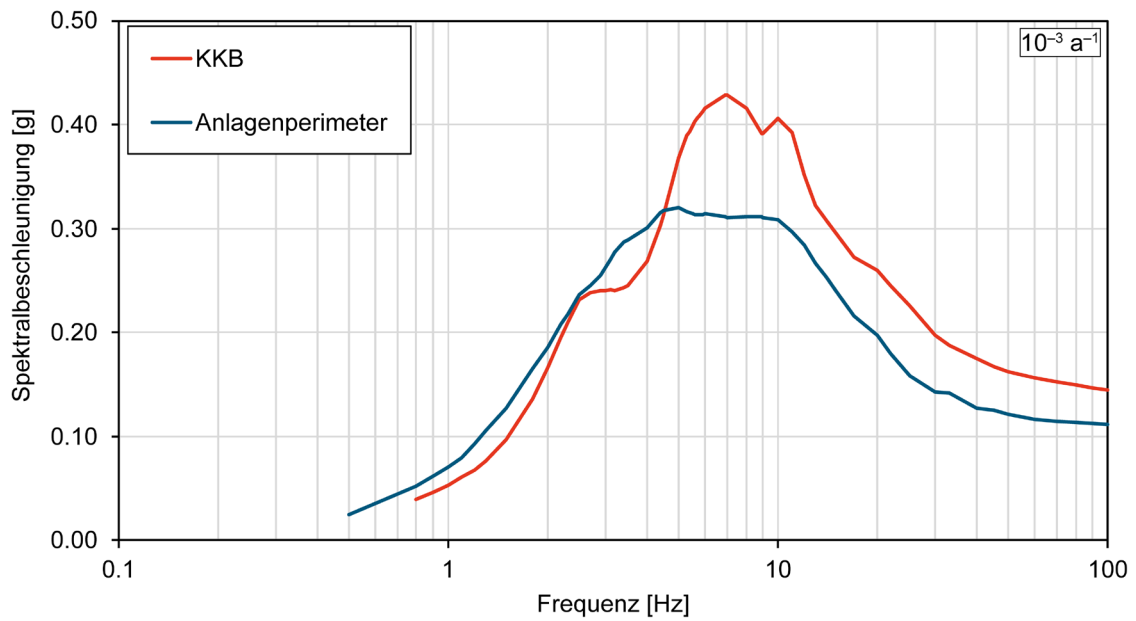


Fig. 4-9: Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit 10^{-3} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und KKB

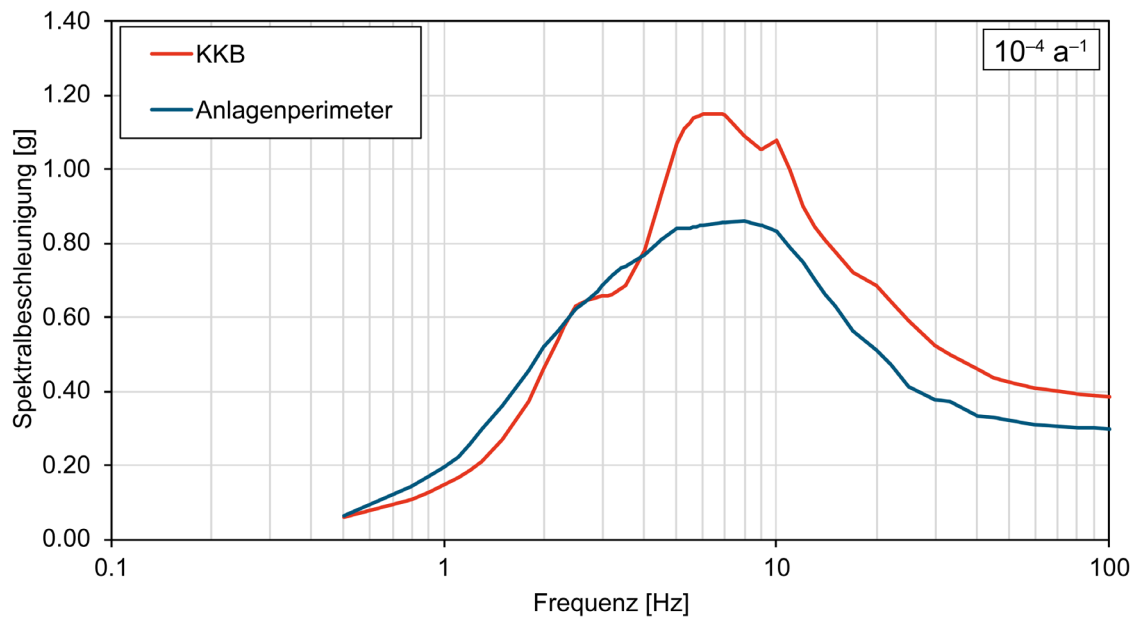


Fig. 4-10: Bodenantwortspektrum der horizontalen Beschleunigung für die Überschreitungshäufigkeit 10^{-4} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und KKB

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 Beschleunigung 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 für das NESK3 (Überschreitungshäufigkeit 10^{-4} a^{-1}) verwendet und konservativ vereinfacht. Die resultierende multilineare Beziehung in logarithmischer Frequenzskala ist in Fig. 4-11 ersichtlich. Das V/H-Verhältnis wird dabei für NESK2 und NESK3 identisch angenommen. In Anbetracht der grossen Unsicherheiten wurde der Plateaubereich mit der maximalen V/H-Amplifikation für den Anlagenperimeter breiter als für den Standort KKB gewählt.

Die resultierenden Bodenantwortspektren der vertikalen Beschleunigung für den Anlagenperimeter und für Überschreitungshäufigkeiten von 10^{-3} a^{-1} resp. 10^{-4} a^{-1} sind in Fig. 4-12 resp. Fig. 4-13 dargestellt und in Tab. A-4 aufgeführt.

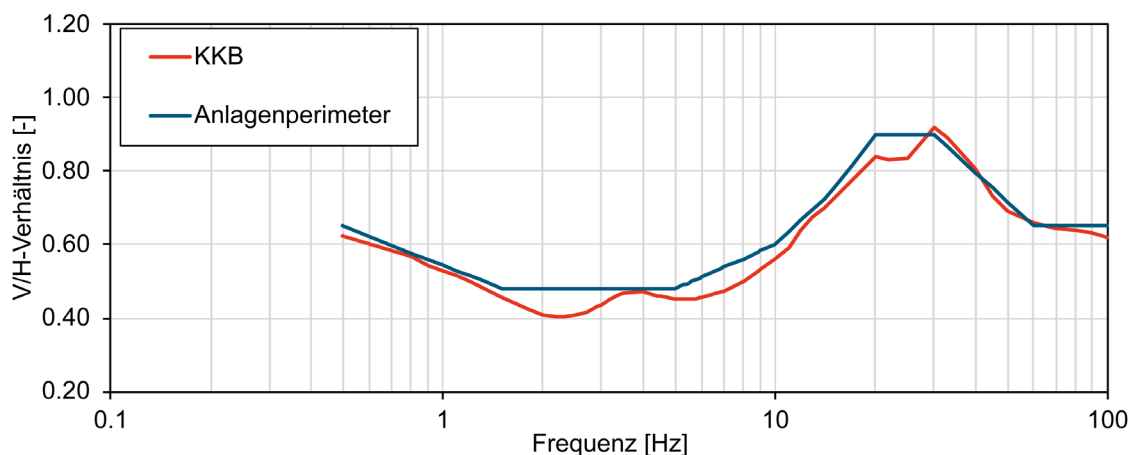


Fig. 4-11: Multilineare Beziehung des V/H-Verhältnisses für den Anlagenperimeter sowie Werte am Standort KKB für 10^{-4} a^{-1}

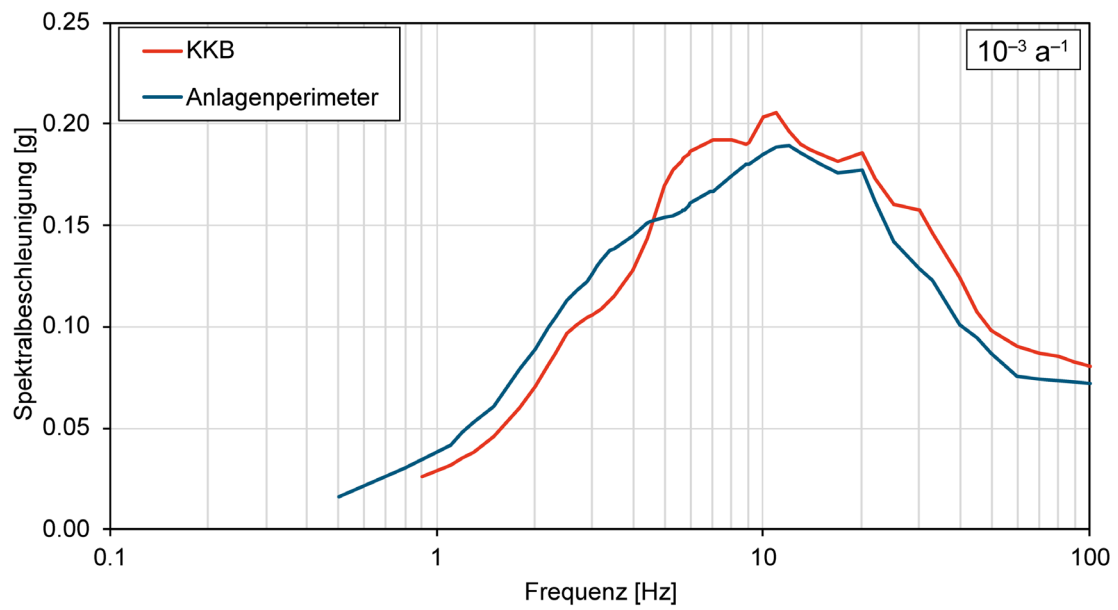


Fig. 4-12: Bodenantwortspektrum der vertikalen Beschleunigung für die Gefährdung ENSI-2015, 10^{-3} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und KKB

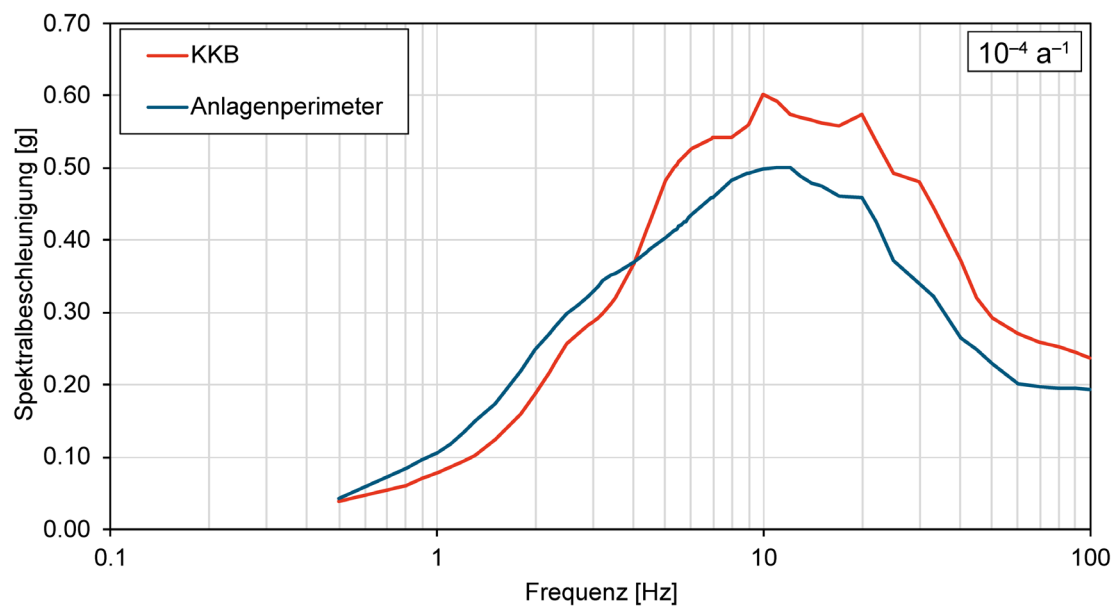


Fig. 4-13: Bodenantwortspektrum der vertikalen Beschleunigung für die Gefährdung ENSI-2015, 10^{-4} a^{-1} , UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung, OK-Terrain für Anlagenperimeter und KKB.

4.3.6 Fazit

Die seismische Gefährdung am Standort, quantifiziert durch Bodenantwortspektren mit Überschreitungshäufigkeiten von 10^{-3} a^{-1} und 10^{-4} 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 Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Bericht wurde die Eignung des Standorts Haberstal für den Betrieb des geologischen Tiefenlagers sowie der zugehörigen Untertage- und Oberflächenanlagen im Hinblick auf die Erdbebengefährdung bewertet. Auf Basis einer vorläufigen Beurteilung des Baugrunds und des geologischen Umfelds sowie einer intensiven geologisch-tektonischen Charakterisierung der geologischen Standortregion konnte eine belastbare Bewertung erstellt werden.

Die Verschiebungsfährdung, also die Gefährdung, welche durch die Möglichkeit eines Bruches an der Oberfläche oder auch im Untergrund durch Teile der Anlage ausgeht, wurde auf Grundlage der 3D-Seismik bewertet, welche den Standort und die Untertageanlage vollständig abbilden. An der Oberfläche und im Bereich der Untertageanlage gibt es keine Hinweise auf grössere Störungszonen, die zu einer relevanten Verschiebung führen könnten. Für den Standort ist demnach von keiner Verschiebungsfährdung auszugehen.

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

Für die seismische Gefährdung wurde auf die umfassenden probabilistische Erdbebengefährdungsstudien für die Standorte der Schweizer Kernkraftwerke zurückgegriffen. Dabei wurden die Komponenten der Erdbebenherde sowie der Ausbreitung der seismischen Wellen vom Standort KKB am Fels auf den Standort Haberstal übertragen. Die Bodenantwortspektren für den Referenzfels werden als die seismische Gefährdung der Untertageanlage angenommen. Für die Bestimmung der lokalen Verstärkung wurde auf die Untersuchungen des Baugrunds am Standort KKL zurückgegriffen, wo in Bezug auf die quartären Talfüllungen vergleichbare Verhältnisse vorliegen.

Die ermittelten Bodenantwortspektren für das NESK2 und NESK3, welche die seismische Gefährdung an der Terrainoberkante am Standort Haberstal beschreiben, sind vergleichbar mit denen von anderen Standorten von Kernanlagen. Sie stellen damit keine besonderen Gefährdungen dar und der Standort ist aus Sicht der seismischen Gefährdung als geeignet zu beurteilen.

Aus Sicht der Erdbebengefährdung ist daher die Eignung des Standorts für den Betrieb des geologischen Tiefenlagers und seiner zugehörigen Oberflächenanlage nachgewiesen. Die Bewertung der möglichen Einflüsse von Erdbeben auf die Langzeitsicherheit in der Nachverschlussphase wurde hier nicht behandelt und erfolgt in Nagra (2024c).

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

- 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.
- Ammen, M. & Palten, P.-J. (2021): TBO Bülach-1-1: Data Report Dossier I Drilling. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-08 I.
- 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.
- Eisenlohr, T. & Müller, P. (2016): Standortareal NL-6-SMA-HAA-Kombi Geologisch-geotechnischer Bericht: Baugrundbeschreibung und geotechnische Beschreibung der oberflächennahen Abschnitte der Zugangsbauwerke (Rampe, Schächte). Nagra Arbeitsbericht NAB 16-65.
- 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 (2023): Geologische Tiefenlager. Ausgabe Dezember 2020 (Änderung vom 1. November 2023). Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d. 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.
- Hammer, P., Ibele, T., Naef, H. & Madritsch, H. (2019): Geomorphologische Analyse der Basis der Höheren Deckenschotter im Gebiet Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 15-57.
- Hinterholzer-Reisegger, P. (2022): TBO Stadel-2-1: Data Report Dossier I Drilling. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-02 I.
- IAEA (2022): Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations. IAEA Safety Standards Series No. SSG-9 (Rev. 1). International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna.
- 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 2022. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Laubscher, H.P. (1985): The eastern Jura: Relations between thin-skinned and basement tectonics, local and regional. Nagra Technical Report NTB 85-53.
- Madritsch, H., Looser, N., Schneeberger, R., Wohlwend, S., Guillong, M. & Malz, A. (2024): Reconstructing the evolution of foreland fold-and-thrust 1 belts using U-Pb calcite dating: an integrated case-study 2 from the easternmost tip of the Jura Mountains (Switzerland). Tectonics.
- 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.
- Malz, A., Madritsch, H., Meier, B. & Kley, J. (2016): An unusual triangle zone in the external northern Alpine foreland (Switzerland): structural inheritance, kinematics and implications for the development of the adjacent Jura fold-and-thrust belt. Tectonophysics 670, 127-143.
- Naef, H. & Madritsch, H. (2014): Tektonische Karte des Nordschweizer Permokarbondrogs: Aktualisierung basierend auf 2D-Seismik und Schwere-Daten. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-17.
- Nagra (2019): Preliminary horizon and structure mapping of the Nagra 3D seismics NL-16 (Nördlich Lägern) in time domain. Nagra Arbeitsbericht NAB 18-35.
- Nagra (2021): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.
- Nagra (2022): TBO Stadel-3-1: Data Report Summary Plot. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-01.
- Nagra (2023a): Bautechnisches Dossier Standortvergleich – Band 3: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 3.
- Nagra (2023b): Bautechnisches Dossier Standortvergleich – Band 6: Technischer Beschrieb und Pläne Lagerprojekte. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 6.
- Nagra (2024a): 3D Seismic Interpretation of Stratigraphic Horizons and Structures in Time Domain Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-18.
- Nagra (2024b): Anlagen- und Betriebskonzept für das geologische Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NTB 24-11.
- Nagra (2024c): Geologic Scenarios for the Evaluation of Earthquake Impact on the Deep Geological Repository. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-28.
- Nagra (2024d): Geological long-term evolution: Neotectonics. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-13.
- Nagra (2024e): Geosynthesis of Northern Switzerland. Nagra Technischer Bericht NTB 24-17.

- Nagra (2024f): Hydrologische Verhältnisse am Standort der Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-31.
- Nagra (2024g): Phenomenological Description of the Evolution of a Geological Repository for Radioactive Waste in Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-20 Rev. 1.
- Nagra (2025a): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Integrales Überwachungskonzept. Nagra Technischer Bericht NTB 24-07.
- Nagra (2025b): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-01.
- Nagra (2025c): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Umweltverträglichkeitsbericht 1. Stufe mit Pflichtenheft für die 2. Stufe. Nagra Technischer Bericht NTB 24-05.
- Pietsch, J., Madritsch, H., Kley, J., Malz, A., Jordan, P. & Heuberger, S. (2015): Regionale geologische Profile durch die Nordschweiz und 2D-Bilanzierung der Fernschubdeformation im östlichen Faltenjura: Arbeitsbericht zu SGT Etappe 2. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-105.
- 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.
- Studer, M. & Zanini, M. (2013): Aufbau und Betrieb eines eigenständigen CORS-GNSS Netzes. Kurzbericht (für interessierte Dritte). Nagra Arbeitsbericht NAB 10-14.
- 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 KKL ermittelt und hier auf den Anlagenperimeter übertragen

Dehnung	Minimalwert	Best estimate	Maximalwert	Minimalwert	Best estimate	Maximalwert
γ	G/G_{max}	G/G_{max}	G/G_{max}	ξ_{soil}	ξ_{soil}	ξ_{soil}
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1.00E-7	1.000	1.000	1.000	0.006	0.012	0.018
3.20E-6	0.948	0.969	0.990	0.006	0.012	0.018
1.00E-5	0.897	0.939	0.980	0.006	0.017	0.018
3.20E-5	0.749	0.825	0.900	0.007	0.014	0.021
1.00E-4	0.557	0.669	0.780	0.009	0.019	0.029
3.20E-4	0.360	0.490	0.620	0.017	0.032	0.047
1.00E-3	0.210	0.320	0.430	0.038	0.063	0.088
3.20E-3	0.130	0.205	0.280	0.074	0.107	0.140
1.00E-2	0.085	0.133	0.180	0.115	0.150	0.185
3.20E-2	0.050	0.085	0.120	0.160	0.193	0.225
1.00E-1	0.030	0.055	0.080	0.195	0.226	0.256
3.20E-2				0.220	0.250	0.280
1.00E-1				0.240	0.268	0.295

Tab. A-2: Werte des mittleren V_s -Initialprofils, Schichtstärke h_i und Wichte des Bodens für die 1D-Standortanalysen in ProSHAKE; Mächtigkeit des Lockergesteins 50 m

Material	Tiefe z [m]	h_i [m]	Wichte [kN/m ³]	V_s [m/s]	Materialmodell
Lockergestein (Schotter) oberhalb GWSp.	0	0	19.6	450.0	Schotter
	2	2	19.6	450.0	Schotter
	4	2	19.6	470.0	Schotter
	6	2	19.6	476.5	Schotter
	8	2	19.6	493.6	Schotter
	10	2	19.6	510.7	Schotter
	12	2	19.6	527.8	Schotter
	14	2	19.6	544.9	Schotter
	16	2	19.6	562.0	Schotter
	18	2	19.6	579.1	Schotter
	20	2	19.6	596.3	Schotter
	22	2	19.6	613.4	Schotter
	24	2	19.6	630.5	Schotter
	25	1	19.6	639.0	Schotter
	26	1	19.6	647.6	Schotter
	28	2	19.6	664.7	Schotter
	30	2	19.6	681.8	Schotter
	32	2	19.6	698.9	Schotter
	35	3	19.6	724.6	Schotter
	38	3	19.6	750.2	Schotter
Fels (USM)	41	3	19.6	775.9	Schotter
	45	4	19.6	806.8	Schotter
	50	5	19.6	837.8	Schotter
	55	5	26	868.7	Fels
	60	5	26	899.7	Fels
	65	5	26	930.6	Fels
	70	5	26	961.5	Fels
	75	5	26	992.5	Fels
	80	5	26	1023.4	Fels
	85	5	26	1054.4	Fels
	90	5	26	1085.3	Fels
	95	5	26	1116.2	Fels
	100	5	26	1147.2	Fels
	105	5	26	1178.1	Fels
	110	5	26	1209.1	Fels

Material	Tiefe z [m]	h_i [m]	Wichte [kN/m ³]	V_s [m/s]	Materialmodell
Fels (USM)	115	5	26	1240.0	Fels
	120	5	26	1249.8	Fels
	125	5	26	1259.6	Fels
	130	5	26	1269.5	Fels
	135	5	26	1279.3	Fels
	140	5	26	1289.1	Fels
	145	5	26	1298.9	Fels
	150	5	26	1308.8	Fels
	155	5	26	1318.6	Fels
	160	5	26	1328.4	Fels
	165	5	26	1338.2	Fels
	170	5	26	1348.1	Fels
	175	5	26	1357.9	Fels
	180	5	26	1367.7	Fels
	185	5	26	1377.5	Fels
	190	5	26	1387.4	Fels
	195	5	26	1397.2	Fels
	200	5	26	1407.0	Fels
	205	5	26	1416.8	Fels
	210	5	26	1426.7	Fels
	215	5	26	1436.5	Fels
	220	5	26	1446.3	Fels
	225	5	26	1456.1	Fels
	230	5	26	1466.0	Fels
	235	5	26	1475.8	Fels
	240	5	26	1485.6	Fels
	245	5	26	1495.4	Fels
	250	5	26	1505.3	Fels
	255	5	26	1515.1	Fels
	260	5	26	1524.9	Fels
	265	5	26	1534.7	Fels
	270	5	26	1544.6	Fels
	275	5	26	1554.4	Fels
	280	5	26	1564.2	Fels
	285	5	26	1574.0	Fels
	290	5	26	1583.9	Fels
	295	5	26	1593.7	Fels

Material	Tiefe z [m]	h_i [m]	Wichte [kN/m ³]	V_s [m/s]	Materialmodell
Fels (USM)	300	5	26	1603.5	Fels
	305	5	26	1613.3	Fels
	310	5	26	1623.2	Fels
	315	5	26	1633.0	Fels
	320	5	26	1642.8	Fels
	325	5	26	1652.6	Fels
	330	5	26	1662.5	Fels
	335	5	26	1672.3	Fels
	340	5	26	1682.1	Fels
	345	5	26	1691.9	Fels
	350	5	26	1701.8	Fels
	355	5	26	1711.6	Fels
	360	5	26	1721.4	Fels
	365	5	26	1731.2	Fels
	370	5	26	1741.1	Fels
	375	5	26	1750.9	Fels
	380	5	26	1760.7	Fels
	385	5	26	1770.5	Fels
	390	5	26	1780.4	Fels
	395	5	26	1790.2	Fels
	400	5	26	1800.0	Fels
Halbraum	400	-	26.5	1800.0	Elastisch

Tab. A-3: Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung nach ENSI-2015 am Referenzfels, bestimmt für den Standort KKB und übertragen auf den Standort Haberstal (UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung)

Frequenz [Hz]	Überschreitungshäufigkeit 10^{-3} a^{-1}		Überschreitungshäufigkeit 10^{-4} 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-4: Bodenantwortspektrum der horizontalen und vertikalen Beschleunigung für den Anlagenperimeter, OK-Terrain (UHS, Mittelwerte, 5 % Dämpfung)

Frequenz [Hz]	Überschreitungshäufigkeit 10^{-3} a^{-1}		Überschreitungshäufigkeit 10^{-4} a^{-1}	
	$S_{a, \text{horizontal}}$ [g]	$S_{a, \text{vertikal}}$ [g]	$S_{a, \text{horizontal}}$ [g]	$S_{a, \text{vertikal}}$ [g]
100	0.111	0.072	0.299	0.194
90.0	0.112	0.073	0.301	0.196
80.0	0.113	0.073	0.302	0.196
70.0	0.114	0.074	0.305	0.198
60.0	0.116	0.075	0.310	0.202
50.0	0.121	0.087	0.320	0.229
45.0	0.125	0.094	0.329	0.248
40.0	0.127	0.101	0.333	0.265
33.0	0.142	0.123	0.373	0.323
30	0.143	0.129	0.378	0.340
25	0.158	0.142	0.414	0.373
22	0.180	0.162	0.473	0.426
20	0.197	0.177	0.510	0.459
17	0.216	0.176	0.565	0.460
15	0.240	0.180	0.632	0.474
14	0.253	0.183	0.662	0.479
13	0.266	0.185	0.702	0.489
12	0.284	0.189	0.750	0.500
11	0.297	0.189	0.790	0.502
10	0.308	0.185	0.832	0.499
9	0.310	0.180	0.848	0.494
8.9	0.311	0.180	0.850	0.493
8	0.311	0.174	0.859	0.482
7	0.310	0.167	0.855	0.460
6.9	0.311	0.167	0.855	0.458
6	0.314	0.161	0.849	0.435
5.9	0.313	0.159	0.848	0.432
5.75	0.313	0.158	0.845	0.426
5.7	0.313	0.157	0.845	0.425
5.6	0.313	0.157	0.843	0.422
5.5	0.314	0.156	0.842	0.418
5.4	0.315	0.155	0.842	0.415
5.3	0.316	0.155	0.842	0.413
5	0.320	0.154	0.842	0.404

Frequenz [Hz]	Überschreitungshäufigkeit 10^{-3} a^{-1}		Überschreitungshäufigkeit 10^{-4} a^{-1}	
	$S_a, \text{horizontal}$ [g]	$S_a, \text{vertikal}$ [g]	$S_a, \text{horizontal}$ [g]	$S_a, \text{vertikal}$ [g]
4.5	0.317	0.152	0.808	0.388
4.4	0.315	0.151	0.800	0.384
4	0.301	0.144	0.769	0.369
3.5	0.289	0.139	0.736	0.353
3.4	0.287	0.138	0.735	0.353
3.2	0.277	0.133	0.715	0.343
3.1	0.270	0.130	0.700	0.336
3	0.263	0.126	0.685	0.329
2.9	0.255	0.122	0.670	0.322
2.7	0.245	0.118	0.646	0.310
2.5	0.236	0.113	0.622	0.299
2.3	0.218	0.105	0.585	0.281
2.2	0.208	0.100	0.565	0.271
2	0.186	0.089	0.518	0.249
1.8	0.165	0.079	0.457	0.219
1.5	0.127	0.061	0.362	0.174
1.3	0.106	0.053	0.297	0.149
1.2	0.093	0.048	0.259	0.133
1.1	0.079	0.042	0.222	0.117
1	0.070	0.038	0.197	0.107
0.9	0.062	0.035	0.172	0.096
0.8	0.052	0.030	0.145	0.084
0.5	0.025	0.016	0.065	0.042