nagra.

TECHNISCHER BERICHT 24-02

Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage – Sicherheitsbericht

Mai 2025

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

nagra.

TECHNISCHER BERICHT 24-02

Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage – Sicherheitsbericht

Mai 2025

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

Die Unterlagen zum Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage (RBG BEVA) finden Sie digital auf drbg.ch.

Fragen an die Nagra, die sich aus der Begutachtung des RBG BEVA ergeben, werden im Nagra Arbeitsbericht NAB 26-02 sowie auf drbg.ch beantwortet.

ISSN 1015-2636

Copyright © 2025 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten. Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw.

Zweck des Berichts

Die Nagra beantragt eine Rahmenbewilligung für eine Brennelementverpackungsanlage am Standort Zwilag (Gemeinde Würenlingen, Kanton Aargau). Beim vorliegenden Dokument handelt es sich um den gemäss Art. 23 KEV erforderlichen Sicherheitsbericht. Der Bericht begründet die Festlegungen zu den Grundzügen des Projekts.

Zusammenfassung: Ein sicherer Standort – ein machbares Vorhaben

Für hochaktive Abfälle ist für die geologische Tiefenlagerung eine Umverpackung in Endlagerbehälter notwendig. Die Umverpackung erfolgt am Standort Zwilag (Gemeinde Würenlingen, Kanton Aargau) in der Brennelementverpackungsanlage. Für die Realisierung dieser Anlage ist eine eigenständige Rahmenbewilligung erforderlich.

Eine Rahmenbewilligung kann nach Art. 13 KEG erteilt werden, *wenn der Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt werden kann*. Der vorliegende Sicherheitsbericht zeigt auf, dass dieser Schutz am gewählten Standort gewährleistet ist und die Anlage sicher ausgelegt und betrieben werden kann.

- **Der Standort ist geeignet für den Bau und Betrieb.**
  - Bereits bei früheren nuklearen Bauvorhaben hat sich der Standort als geeignet erwiesen. Der Baugrund ist gut tragfähig und wenig setzungsempfindlich.
  - Das Areal ist ausreichend bemessen, um die notwendigen Funktionen bzw. Bauten entsprechend ihren Anforderungen aus Sicherheit, Strahlenschutz und Sicherung innerhalb des Areals zu realisieren.
  - Die standortspezifischen Gefährdungen, d. h. die Einwirkungen infolge Naturgefahren oder zivilisatorischen Gefahren, sind ausreichend untersucht und bekannt. Der Standort zeichnet sich durch ein geringes Gefährdungspotenzial aus, selbst bei Ereignissen, die statistisch nur einmal in 10'000 Jahren auftreten.

- **Die Brennelementverpackungsanlage kann sicher ausgelegt und betrieben werden.**
  - Die einzelnen Bestandteile sowie zugehörige Betriebsprozesse sind seit Jahrzehnten bewährt und haben sich bei anderen Kernanlagen in der Schweiz als sicher erwiesen.
  - Die radioaktiven Stoffe werden durch ein gestaffeltes Barrieren- und Schutzkonzept von der Umwelt isoliert, eingeschlossen und abgeschirmt. So wird bei der Auslegung der Anlage sichergestellt, dass die gesetzlichen Dosisgrenzwerte für Personal, Bevölkerung und Umwelt deutlich unterschritten werden.
  - Das nukleare Gefährdungspotenzial ist selbst bei einem allfälligen Störfall sehr klein, da ausschliesslich seit Jahrzehnten zwischengelagerte hochaktive Abfälle umgeladen werden, deren Radionuklidinventar und Wärmeentwicklung im Vergleich zu Kernkraftwerken klein ist. Zudem ist die Kontrolle der Reaktivität selbst unter konservativsten Randbedingungen ausreichend gegeben.
  - Die Organisationsstruktur ist sicherheitsgerichtet und orientiert sich an denjenigen von anderen Schweizer Kernanlagen (z. B. Zwilag). Sie trägt zusammen mit einer über alle Ebenen gelebten Sicherheitskultur zum sicheren Betrieb bei.

Am Standort kann der *Schutz von Mensch und Umwelt* gewährleistet werden. Damit ist die Voraussetzung für die Erteilung der Rahmenbewilligung erfüllt.

Abstract: A safe site – a feasible project

High-level waste must be repackaged in disposal canisters before it can be emplaced in a deep geological repository. Repackaging will take place in the encapsulation plant for spent fuel assemblies to be located at the site of the Zwilag, Switzerland's centralised interim storage facility, in the community of Würenlingen, Canton Aargau. A separate general licence is required to construct and operate this plant.

In line with Art. 13 of the Swiss Nuclear Energy Act (KEG), the general licence can be granted *if the protection of humans and the environment can be ensured*. The present safety report demonstrates that this protection can be ensured at the selected site and that the plant can be designed and operated safely.

- **The site is suitable for construction and operation.**
  - The site has already proven to be suitable in connection with previous nuclear construction projects. The geological subsurface has a high load-bearing capacity and is resistant to settlement.
  - The area is sufficiently dimensioned to allow realisation of the necessary functions and buildings in accordance with requirements relating to safety, radiation protection and security.
  - The site-specific hazards, i.e. effects caused by natural events or human actions, have been sufficiently investigated and are well understood. The site is characterised by a low hazard potential, including events that are statistically expected to occur only once every 10,000 years.

- **The encapsulation plant can be designed and operated safely.**
  - The individual components and associated operating processes have been tried and tested for decades, and their safety has been demonstrated at other nuclear facilities in Switzerland.
  - The radioactive substances will be isolated, enclosed and shielded from the environment by means of a successive barrier and protection concept. This means that the encapsulation plant can be designed to ensure that the doses for workers, the population and the environment will remain well below the legally prescribed dose limits.
  - The nuclear hazard potential is very low, even in the event of an accident, as only high-level waste is repackaged, which will have been held in interim storage for decades, and its radionuclide inventory and heat generation are correspondingly low compared to those of nuclear power plants. In addition, the reactivity will be sufficiently controlled even under the most conservative boundary conditions.
  - The organisational structure is safety-oriented and based on that of other Swiss nuclear facilities such as the Zwilag interim storage facility. Together with a safety culture that is practised at all levels, this will contribute to the safe operation of the encapsulation plant.

The protection of humans and the environment at the site can be ensured, thus fulfilling the requirement for the granting of the general licence.

Résumé: Un site sûr – un projet réalisable

Les déchets de haute activité doivent être reconditionnés dans des conteneurs pour stockage définitif avant d'être placés dans un dépôt en couches géologiques profondes. Ce reconditionnement se fera dans l'installation de conditionnement (INCO) pour assemblages de combustible usés, sur le site du dépôt intermédiaire (Zwilag) dans la commune de Würenlingen (AG). Une autorisation générale spécifique est nécessaire pour la réalisation de cette installation.

En vertu de l'art. 13 LENu, une autorisation générale peut être accordée *si la protection de l'homme et de l'environnement peut être assurée*. Le présent rapport de sûreté montre que cette protection peut être assurée sur le site prévu et que l'installation peut être conçue et exploitée de manière sûre.

- **Le site convient pour la construction et l'exploitation.**
  - Ce site s'est déjà avéré adéquat pour de précédents projets d'installations nucléaires. Le terrain de fondation dispose d'une bonne portance et est peu sensible au tassement.
  - Le périmètre prévu est suffisamment étendu pour bénéficier des fonctions requises et accueillir les bâtiments nécessaires, en tenant compte des exigences relatives à la sûreté, à la protection contre les rayonnements et à la sécurité.
  - Les risques spécifiques au site, c.-à-d. liés à des dangers naturels ou des événements civilisationnels, ont fait l'objet d'investigations approfondies et ont été identifiés. Ce site se distingue par un faible potentiel de danger, y compris concernant des événements dont la probabilité d'occurrence n'est que d'une fois en 10'000 ans.

- **L'installation de conditionnement peut être conçue et exploitée de manière sûre.**
  - Les différents éléments ainsi que les processus d'exploitation correspondants ont fait leurs preuves depuis des décennies et se sont avérés sûrs dans d'autres installations nucléaires de Suisse.
  - Les substances radioactives sont isolées de l'environnement, scellées et blindées au moyen d'un concept de protection à plusieurs niveaux et d'un système de barrières multiples. L'installation peut ainsi être conçue de manière à rester nettement en dessous des valeurs limites légales concernant les doses pour le personnel, la population et l'environnement.
  - Le potentiel de danger nucléaire est très faible, y compris en cas d'incident éventuel, du fait que seuls seront reconditionnés les déchets de haute activité entreposés pendant plusieurs décennies dont l'inventaire de radionucléides et le développement de chaleur sont faibles, en comparaison avec les assemblages de combustible usés dans les centrales nucléaires. De plus, la maîtrise de la réactivité est largement assurée, y compris dans les conditions limites les plus conservatrices.
  - La structure organisationnelle est axée sur la sûreté et basée sur celle d'autres installations nucléaires suisses (p.ex. Zwilag). Elle contribue à la sûreté des activités, avec une culture de sûreté solidement ancrée à tous les niveaux.

La protection de *l'homme et de l'environnement* peut être assurée sur le site prévu. Les conditions pour l'octroi de l'autorisation générale sont ainsi remplies.

Inhaltsverzeichnis

Zweck des Berichts I

Zusammenfassung: Ein sicherer Standort – ein machbares Vorhaben II

Abstract: A safe site – a feasible project III

Résumé: Un site sûr – un projet réalisable IV

Inhaltsverzeichnis V

1 Einleitung und Hintergrund 1
1.1 Gegenstand des Gesuchs für eine Rahmenbewilligung 2
1.2 Qualitätsmanagement für Standorteignung und Rahmenbewilligung 3

2 Zweck und Grundzüge des Projekts 4
2.1 Standort 4
2.2 Zweck der Anlage 4
2.3 Projektgrundzüge: Ungefähre Grösse und Lage der wichtigsten Bauten 5
2.4 Maximal zulässige Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage 6
2.5 Nachweis für die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle 6
2.6 Frist für die Einreichung des Baugesuchs 6

3 Beschreibung der exemplarischen Umsetzung des Vorhabens 7
3.1 Konzeptionelle Beschreibung der BEVA und deren Betriebsabläufe 7
3.2 Weitere Bauten 8
3.3 Projektperimeter 8

4 Charakterisierung der Standorteigenschaften und Einwirkungen von aussen 12
4.1 Beschreibung des Standorts und dessen Umgebung 12
4.2 Einwirkungen bei Störfällen in der Nachbarschaft 20
4.3 Meteorologie und Klima 27
4.4 Hydrologie 28
4.5 Geologie und Baugrundverhältnisse 31
4.6 Seismizität 33
4.7 Zusammenfassende Bewertung und Standorteignung 36

5 Auslegungsgrundlagen zur nuklearen Sicherheit und Einordnung des Gefährdungspotenzials einer BEVA 37
5.1 Nukleartechnische Schutzziele 37
5.2 Gestaffeltes Barrieren- und Schutzkonzept 38
5.3 Gefährdungspotenzial einer BEVA und Einordnung der Schutzziele 39
5.4 Fazit 42

6 Strahlenschutztechnische Auslegungsgrundsätze ... 43
6.1 Grundsätze des Strahlenschutzes ... 43
6.2 Strahlenexposition in der Umgebung (Gefährdungspotenzial) ... 44
6.3 Vorschlag für den quellenbezogenen Dosisrichtwert am Standort ... 44
6.4 Einhaltung der Immissionsgrenzwerte und deren Überwachung ... 44
6.5 Gegenwärtige radiologische Standortsituation ... 45
6.6 Fazit ... 45

7 Wichtigste personelle und organisatorische Angaben ... 46
7.1 Grundsätze der Organisation ... 46
7.2 Entwicklung der Organisation ... 47
7.3 Menschliche und organisatorische Faktoren (HOF) ... 48
7.4 Fazit ... 49

8 Literaturverzeichnis ... 50

Tabellenverzeichnis ... VII

Figurenverzeichnis ... VII

Abkürzungsverzeichnis ... VIII

1 Einleitung und Hintergrund

Für hochaktive Abfälle (HAA) ist für die geologische Tiefenlagerung eine Umverpackung in Endlagerbehälter notwendig. Die Umverpackung erfolgt am Standort Zwilag (Gemeinde Würenlingen, Kanton Aargau) in der Brennelementverpackungsanlage (BEVA), für deren Realisierung eine eigenständige Rahmenbewilligung erforderlich ist. Die in der BEVA endlagerfähig verpackten hochaktiven Abfälle werden im geologischen Tiefenlager (gTL) am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel, Kanton Zürich) eingelagert (Nagra 2024d).

Die BEVA stellt ein notwendiges Funktionsglied zwischen der Zwischenlagerung und der geologischen Tiefenlagerung im Bereich der hochradioaktiven Abfallentsorgung für abgebrannte Brennelementen (BE) und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA-HAA) dar. Die BEVA als unabdingbares Glied in der Entsorgungskette ist in Fig. 1-1 dargestellt.

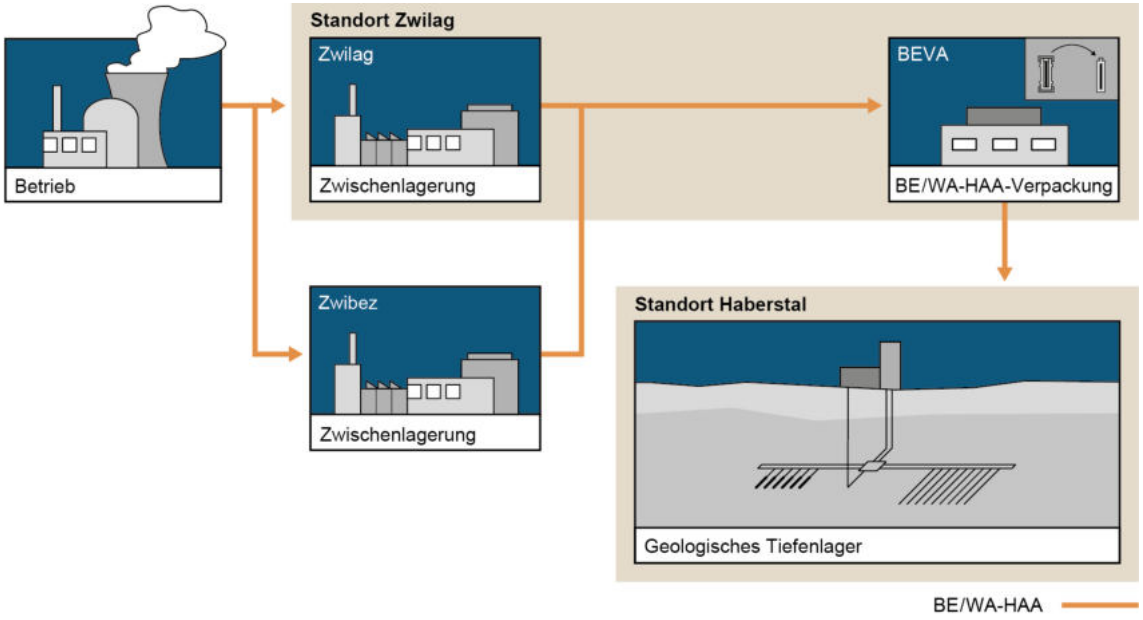

Fig. 1-1: Übergeordnete Elemente der Entsorgung in der Schweiz

Modellhafte Darstellung der Entsorgungskette für hochaktive Abfälle: Abgebrannte Brennelemente (BE) und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA-HAA) aus dem Betrieb der Kernkraftwerke werden zwischengelagert und von den Zwischenlagern (Zwilag und Zwibez) zur BEVA transferiert. Dort werden sie in Endlagerbehälter verpackt und anschliessend zum geologischen Tiefenlager transportiert, wo sie im HAA-Lagerteil eingelagert werden (in Anlehnung an das Entsorgungsprogramm, Nagra 2021).

1.1 Gegenstand des Gesuchs für eine Rahmenbewilligung

Für den Bau und Betrieb einer Kernanlage ist gemäss Kernenergiegesetz (Art. 12 KEG 2003) eine Rahmenbewilligung des Bundesrats erforderlich. Zur Einleitung des Bewilligungsverfahrens ist ein Gesuch mit den notwendigen Unterlagen gemäss Art. 42 KEG einzureichen. Die Kernenergieverordnung (KEV) definiert diese Unterlagen, wobei vorliegender Sicherheitsbericht gemäss Art. 23 KEV (2004) zur vollständigen Dokumentation eines Rahmenbewilligungsgesuchs (RBG) gehört und im Berichtsaufbau im Wesentlichen den Anforderungen der KEV folgt.

Der Sicherheitsbericht hat die Aufgabe, nachvollziehbar darzulegen, dass alle gesetzlich geforderten Sicherheitsaspekte durch einen geeigneten Standort und eine geeignete Auslegung der beantragten Anlage auf Stufe Konzept erfüllbar sind und in einer späteren Bauphase umgesetzt werden können. Der Bericht befasst sich somit mit der detaillierten Charakterisierung des Standorts und den standortspezifischen Einwirkungen von aussen, die quantitativ anhand einer Gefährdungsanalyse untersucht und bewertet werden. Zudem enthält er die für das Gefahrenpotenzial einer BEVA wesentlichen Grundzüge des Sicherheitsdispositivs der geplanten Kernanlage, d. h. die sicherheitstechnischen Auslegungsgrundlagen zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit, die strahlenschutztechnischen Auslegungsgrundlagen sowie die wichtigsten personellen und organisatorischen Grundsätze. Die RBG-relevanten und anzuwendenden Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Normen sind in den jeweiligen Kapiteln, d. h. jeweils bei den einzelnen Themen, dokumentiert. Auf detailliertere Referenzberichte, z. B. die standortspezifischen Gefährdungsanalysen, wird aufgebaut und eindeutig im Bericht verwiesen.

Die BEVA stellt zwar eine für die Schweiz neuartige Kernanlage zur tiefenlagergerechten Verpackung von über mehrere Jahrzehnte zwischengelagerten HAA dar, deren einzelne Bestandteile – mit Ausnahme des Verschlusses der Endlagerbehälter – jedoch bereits innerhalb anderer Kernanlagen in der Schweiz seit Jahrzehnten dem Prinzip nach sicher und erprobt im Einsatz stehen. Am Standort Zwilag lassen sich zudem kompakte Anlagen auf und neben dem Areal der Zwilag errichten. Im Verbund mit den bestehenden Anlagen und der bewährten Organisation der Zwilag besteht somit zukünftig die Möglichkeit, Synergien zwischen den Anlagen zu realisieren.

Im RBG, in dem der Standort und der Rahmen des Projekts anhand seiner Grundzüge festgelegt werden (Art. 14 KEG), wird für das Gesuch eine weitgehend[1] autonome BEVA zugrunde gelegt, d. h., alle für den sicheren und unabhängigen Betrieb der BEVA notwendigen Funktionen werden im Vorhaben berücksichtigt. Das exemplarische Vorhaben orientiert sich am Realisierungsplan des Entsorgungsprogramms 2021 (Nagra 2021) und wird anhand einer konzeptionellen Beschreibung der BEVA und deren Betriebsabläufe sowie weiterer Anforderungen skizziert. Die Machbarkeit wird anhand einer exemplarischen Anordnung relevanter Bauwerke bzw. Flächen auf dem Anlagenperimeter aufgezeigt.

Der Sicherheitsbericht gibt den Stand der Bewertungen in der Phase RBG wieder und dient als Grundlage für die Weiterentwicklung und Optimierung der BEVA am Standort für die nachfolgenden Bewilligungsschritte. Eventuell notwendige Anpassungen und Präzisierungen werden bei fortgeschrittenem Wissens- und Projektierungsstand gemäss dem etablierten Stand von Wissenschaft und Technik vorgenommen. Sicherheitsanalysen bzw. -nachweise zu endgültigen, zum heutigen Zeitpunkt noch offenen Aspekten sind Gegenstand weiterer Sicherheitsbewertungen im Rahmen künftiger Bewilligungsschritte.

---

[1] Beispielsweise zählt die Konditionierung der beim BEVA-Betrieb anfallenden radioaktiven Abfälle (SMA) nicht zur Autonomie. Diese Abfälle werden in bestehende Konditionierungsanlagen der Zwilag bzw. PSI überführt.

1.2 Qualitätsmanagement für Standorteignung und Rahmenbewilligung

Untersuchungen, Analysen und Nachweise sowie deren Dokumentation, die im Hinblick auf die Standorteignung und für die Erstellung der Dokumente im Zuge des RBG durchgeführt wurden, wurden durch eine systematische Qualitätssicherung begleitet, unterstützt und freigegeben. Damit werden sowohl relevante Anforderungen und Erwartungen aus gesetzlichen, behördlichen und öffentlichen Bereichen[2] als auch die Ansprüche der Nagra selbst an die Qualität der Gesuchs- und Referenzdokumente sichergestellt und entsprechend berücksichtigt.

Für die Erarbeitung des RBG inkl. der Referenzdokumentation wurde ein Kernteam von hochqualifizierten Fachpersonen mit dem für ihre Aufgaben erforderlichen Wissen und Sicherheitsbewusstsein zusammengestellt. Das Team wurde bei seiner Arbeit durch Experten der Schweizer Kernenergiebranche sowie durch weitere nationale und internationale Experten bzw. Firmen unterstützt. Die Verantwortung für die Expertenbeauftragung, die Koordination der Arbeiten und die Qualitätssicherung der Ergebnisse bzw. deren Dokumentation liegt beim Kernteam. Zusätzlich erarbeiten und prüfen die beauftragten Experten und Firmen ihren Arbeitsfortschritt und die Ergebnisse im Rahmen ihrer eigenen, zertifizierten Qualitätssicherungsprogramme. Bei der Auftragsvergabe an qualifizierte Auftragnehmende wurde dabei darauf geachtet, dass die Aufgabe genügend klar definiert ist und die Schnittstellen zu anderen Aufgaben gut beherrschbar sind sowie eine Begleitung durch eine ebenfalls qualifizierte Projektleitung stets gewährleistet ist.

Die Beauftragung und Abwicklung der Arbeiten sowie die Erstellung der RBG-Dokumente erfolgt innerhalb eines klar definierten Management-Systems der Nagra, welches seit 2005 als Qualitätsmanagement-System gemäss ISO 9001 zertifiziert ist. Innerhalb dieses Systems sind u. a.

- Prozesse und Abläufe definiert (beispielsweise Qualifikationsbeurteilung und Qualitätskontrolle von externen Experten / Firmen, Erstellung und Prüfung der Gesuchsunterlagen etc.).
- Anforderungen an die einzelnen Aufgaben (Umfang, Detailierungsgrad etc.) sowie an die auszuführenden Bearbeitenden (Qualifikation, Erfahrung etc.) spezifiziert.
- Funktionen und Rollen der Organisationseinheiten bzgl. Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Schnittstellen (insbesondere Fortschritts- und Qualitätsprüfungen, Entscheidungen bzw. Entscheidungsfindung) geregelt und festgelegt.

Das Hauptziel ist die Etablierung wiederholbarer, robuster Arbeitsprozesse, um eine permanente Verbesserung des Projekts und der Gesuchsunterlagen zu erreichen. Umfangreiche und systematische Reviews (intern und/oder extern) spielen dabei eine zentrale Rolle und stellen einen formellen Prozess dar, bei dem Prüfergebnisse und daraus resultierende Massnahmen, Entscheide bzw. Anpassungen dokumentiert werden. Ebenso führt das System dazu, dass das Qualitätsbewusstsein für die internen Arbeitsabläufe sowie für die externe Berichterstattung bereits in der Planungsphase entscheidend gefördert wird. In Anbetracht der Langfristigkeit des Vorhabens ist dieser Aspekt bereits heute – und auch in den nachfolgenden Phasen – von Bedeutung.

[2] Die Datengrundlage orientiert sich am Informationsstand per 31.01.2024.

2 Zweck und Grundzüge des Projekts

Die mit der Rahmenbewilligung zu treffenden Festlegungen, die den Rahmen für die weitere Projektentwicklung definieren, sind in Art. 14 KEG vorgegeben. Im Dispositiv der Rahmenbewilligung, in dem die Festlegungen formal festgehalten werden, könnten die Festlegungen aus Sicht der Nagra wie folgt übernommen werden:

- Bewilligungsinhaberin (Art. 14 Abs. 1 Bst. a KEG): siehe Kap. 3 in Nagra (2024d)
- Standort (Art. 14 Abs. 1 Bst. b KEG): siehe Kap. 2.1
- Zweck der Anlage (Art. 14 Abs. 1 Bst. c KEG): siehe Kap. 2.2
- Grundzüge des Projekts (Art. 14 Abs. 1 Bst. d KEG), d. h. gemäss Art. 14 Abs. 2 KEG die ungefähre Grösse und Lage der wichtigsten Bauten: Kap. 2.3
- maximal zulässige Strahlenexposition für Personen in der Umgebung der Anlage (Art. 14 Abs. 1 Bst. e KEG): siehe Kap. 2.4

Diese Angaben stellen eine Grundlage sowohl für die Charakterisierung als auch für die sicherheitstechnische Bewertung des Standorts in Bezug auf Einwirkungen von aussen und somit für den Nachweis der Standorteignung für einen sicheren Betrieb sowie die Sicherung der Kernanlage (Nagra 2025b) dar. Weitergehende Festlegungen erfolgen nach KEG im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens. Somit ist sichergestellt, dass im langen Realisierungsverlauf zukünftige Erfahrungen und der etablierte Stand der Technik berücksichtigt werden können.

Im Zusammenhang mit den Festlegungen gemäss Art. 14 KEG wird auf Folgendes hingewiesen: Werden die quantitativen Angaben zur Grösse der wichtigsten Bauten bzw. die flächenbezogenen Angaben zum Projektperimeter mit der Rahmenbewilligung gegenüber den Angaben in diesem Bericht reduziert, kann dies zu (erheblichen) Einschränkungen bei der weiteren Projektentwicklung führen. Die Erweiterung der Angaben kann indes den Handlungsspielraum erhöhen.

2.1 Standort

Der Projektperimeter, der mit der Rahmenbewilligung raumplanerisch festgelegt wird und **auf dem die BEVA entsprechend dem Zweck gebaut und betrieben wird, befindet sich am Standort Zwilag (Gemeinde Würenlingen, Kanton Aargau)**. Er liegt südöstlich des Zwilag-Hauptkomplexes und in unmittelbarer Nachbarschaft zum Gelände «Ost» des Paul Scherrer Instituts (PSI). Er umfasst eine Gesamtfläche von ca. 3 ha und ist in Fig. 2-1 dargestellt. Weiterführende Erläuterungen, beispielsweise zur Unterteilung des Projektperimeters und dem Platzbedarf, finden sich in Kap. 3.3. Eine Charakterisierung des Standorts und dessen Umgebung erfolgt zusammen mit der standortspezifischen Analyse der Einwirkungen von aussen in Kap. 4.

2.2 Zweck der Anlage

Der Zweck der Anlage ist die Verpackung radioaktiver Abfälle.

Dieser Zweck umfasst alle damit im funktionalen Zusammenhang stehenden Handlungen, wie z. B. den Umgang mit bzw. das Umladen von radioaktiven Abfällen (BE und WA-HAA), den Empfang von und Umgang mit Transport- und Lagerbehältern (TLB), das Verschliessen der Endlagerbehälter (ELB) inkl. ihrer Nachbehandlung sowie Vorbereitung und Abtransport der ELB. Zudem kann in der BEVA die Behandlung entladener TLB – u. a. die Entnahme und Zerlegung der BE-Körbe sowie die Reinigung, Dekontamination, Zerlegung und Freimessung der TLB – in Betracht gezogen werden, oder die TLB werden verschlossen und zur Behandlung abtransportiert.

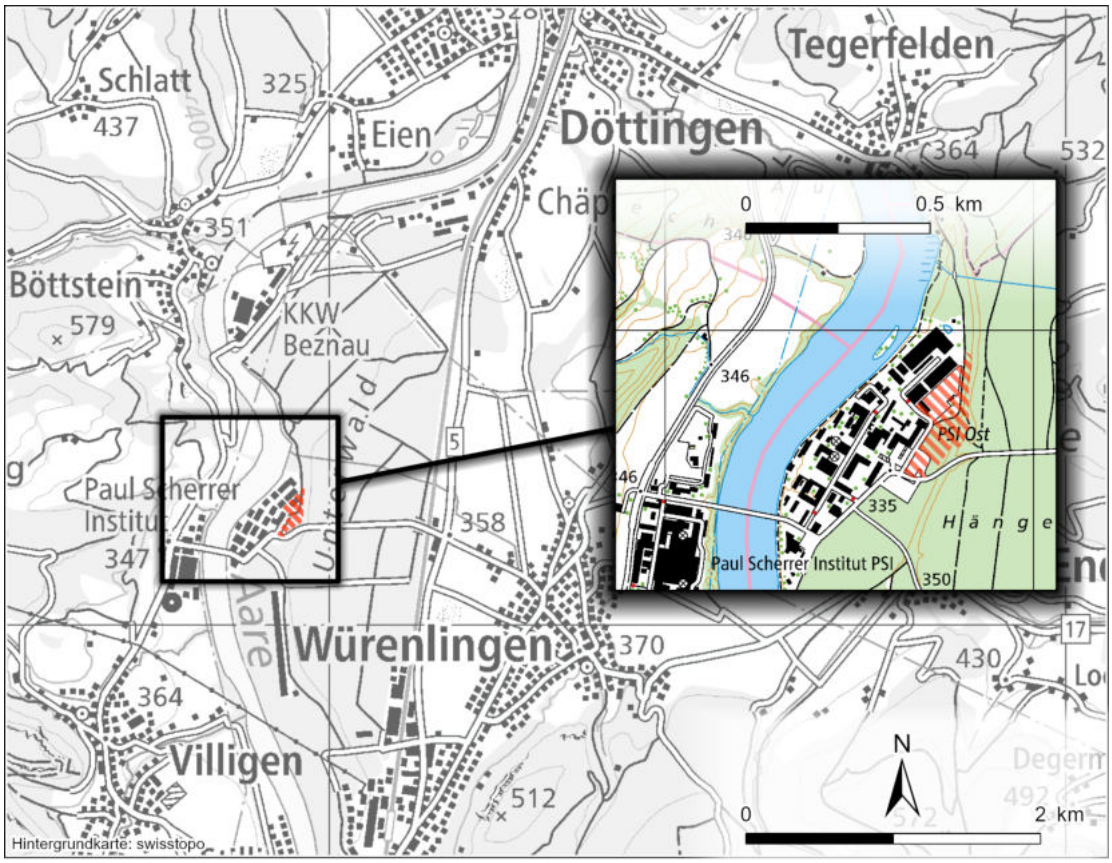

Fig. 2-1: Projektperimeter am Standort Zwilag in der Gemeinde Würenlingen

2.3 Projektgrundzüge: Ungefähre Grösse und Lage der wichtigsten Bauten

Das wichtigste Bauwerk ist die Brennelementverpackungsanlage. Sie hat eine ungefähre Grundfläche von (50 – 70) m × (90 – 110) m und eine ungefähre Höhe von (30 – 50) m (über gewachsenem Terrain).

Darin beinhaltet sind alle Räumlichkeiten zur Erfüllung des Zwecks der Anlage. Dies umfasst – neben der Funktion Umladung der HAA von TLB in ELB – weitere Funktionen, wie z. B.:

- Annahme, Handhabung, Pufferung von TLB, ELB und Transportbehältern (voll und leer)
- Verschluss, Nachbehandlung und Bereitstellung bestückter ELB
- Betriebs- und Servicefunktionen (z. B. Strahlenschutz, Wartung, Instandhaltung etc.)
- Ver- und Entsorgung (Energie, Lüftung, Wärme etc.)
- Sicherheit, Sicherung und Safeguards (inkl. Bewältigung von Betriebsstörungen / Störfällen)

Die BEVA wird auf dem Projektperimeter (vgl. Kap. 3.3) so platziert, dass die erforderliche Sicherheit und Sicherung der Anlage bzw. des Areals sowie zweckmässige Arbeitsabläufe realisiert werden. Die Platzierung der BEVA innerhalb des Projektperimeters sowie die Festlegung der effektiven Grösse erfolgen im Bauprojekt. Das Baugesuch wird hierzu die notwendigen Angaben umfassen. Die Beschreibung einer exemplarischen Umsetzung erfolgt in Kap. 3.

2.4 Maximal zulässige Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage

Die Rahmenbewilligung legt die maximal zulässige Strahlenexposition für Personen in der Umgebung der Anlage fest (Art. 14 Bst. e KEG). Gemäss Botschaft zum KEG (Kap. 8.4.1.3, Botschaft KEG 2001) ist damit der quellenbezogene Dosisrichtwert (qbDR) im Sinne von Art. 7 der Strahlenschutzverordnung (StSV) gemeint.

Am Standort der BEVA (vgl. Kap. 2.1) werden bereits heute zwei unabhängige Kernanlagen – die Zwilag und das PSI – betrieben. Gemäss den aktuellen Abgabereglementen dieser Kernanlagen (ENSI 2019a und ENSI 2019b) beträgt der qbDR für die Gesamtheit der am Standort von PSI und Zwilag lokalisierten Anlagen 0.3 mSv pro Jahr.

Innerhalb des festgelegten und einzuhaltenden qbDR für den Standort von 0.3 mSv pro Jahr sollen die Abgaben der BEVA integriert werden. Dafür ist eine einvernehmliche Regelung für die gemeinsame Nutzung des qbDR des Standorts anzustreben, mit allen am Standort vorhandenen Kernanlagen. **Als qbDR bzw. für die maximal zulässige Strahlenexposition für Personen in der Umgebung der Anlagen wird vorgeschlagen, den Wert von 0.3 mSv pro Jahr für den Standort (PSI, Zwilag und BEVA) unverändert beizubehalten.** Der qbDR am Standort entspricht in Übereinstimmung mit internationalen Empfehlungen dem in ENSI-G15 vorgegebenen Wert (ENSI 2010) und liegt unterhalb des Grenzwerts von 1 mSv/Jahr für nichtberuflich strahlenexponierte Personen (Art. 22 StSV).

Die gemeinsame Nutzung eines qbDR bzw. die Eingliederung der BEVA in den bestehenden Wert für den Standort ist ohne Beschränkungen möglich (siehe Kap. 6.2 und 6.5).

2.5 Nachweis für die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle

Gemäss Art. 13 Abs. 1 Bst. d KEG und Art. 23 Bst. e KEV ist aufzuzeigen, dass radioaktive Abfälle, die neu innerhalb des mit dem RBG beantragten Projekts anfallen, entsorgt werden können. Die beim Betrieb und der Stilllegung der BEVA ggf. anfallenden radioaktiven Abfälle sind bereits in dem «Modellhaften Inventar radioaktiver Materialien» (MIRAM, Nagra 2023) enthalten. Deren Entsorgung in einem gTL ist somit berücksichtigt.

2.6 Frist für die Einreichung des Baugesuchs

Das Baugesuch für die BEVA wird so abgestimmt und eingereicht, dass die BEVA mit Inbetriebnahme des HAA-Lagerteils des gTL betriebsbereit ist. Gemäss aktuellem Realisierungsplan (Nagra 2021) ist dies 2055 der Fall.

Durch den langen Zeithorizont sind indes unvorhersehbare Entwicklungen (z. B. infolge gesellschaftspolitischer Anliegen oder gesetzliche Anpassungen) mit erheblichen Auswirkungen auf den Realisierungsplan nicht ausgeschlossen. Dies gilt insbesondere für die Realisierung des gTL und damit gekoppelt auch für die BEVA. Die durch den Bundesrat festzulegende Frist für die Einreichung des Baugesuchs (Art. 14 Abs. 3 KEG) muss unvorhersehbare Entwicklungen abdecken. **Mit einer Frist von 50 Jahren bis zur Einreichung des Baugesuchs** wird möglichen zukünftigen Entwicklungen Rechnung getragen.

3 Beschreibung der exemplarischen Umsetzung des Vorhabens

Die nachfolgende Beschreibung der exemplarischen Umsetzung stellt die Grundlage der sicherheitstechnischen Bewertung für den Nachweis der Standorteignung für einen sicheren und zweckmässigen Betrieb der BEVA im RBG dar. Neben der BEVA, die in Kap. 3.1 zusammen mit einem beispielhaften Betriebsablauf beschrieben wird, sind weitere, konventionelle Bauten erforderlich, die in Kap. 3.2 zusammengefasst werden. Eine mögliche Umsetzung des Vorhabens innerhalb des Projektperimeters wird in Kap. 3.3 skizziert.

3.1 Konzeptionelle Beschreibung der BEVA und deren Betriebsabläufe

Das BEVA-Auslegungskonzept orientiert sich an den betrieblichen und sicherheitstechnischen Anforderungen (siehe Kap. 5, 6 und 7), die sich für eine sichere, effiziente und qualitätsgeprüfte Verpackung von hochaktiven Abfällen ergeben. Die im Folgenden vorgestellte Anlage und dazugehörigen Betriebsprozesse beschreiben die Anlage im Normalbetrieb. Die Anlage wird entsprechend dem Gefährdungspotenzial (vgl. Kap. 5.3) so ausgelegt, dass sie für die Beherrschung von möglichen Störfällen adäquate Einrichtungen und Systeme beinhalten wird.

Anlagenbeschrieb

Im Zentrum der BEVA befindet sich die Umladezelle[3] inklusive eines Interventionsraums. Für die optimale Beladung der ELB besitzt die Umladezelle jeweils mehrere Andockstationen für TLB und ELB[4]. Um die Umladezelle herum befinden sich die Vor- und Nachbereitungsräume für TLB bzw. ELB sowie die Räumlichkeiten für den tiefenlagergerechten ELB-Verschluss. Um diesen Kern der BEVA sind verschiedene Service- und Hilfsräume (Bedienräume, Klima- und Lüftungsanlagen etc.) angeordnet sowie die Empfangsbereiche mit den dazugehörigen Arbeitsplätzen für den An- und Abtransport der TLB bzw. ELB. Die genaue Anordnung und Grösse der Räume wird im Rahmen der Bau- und Betriebsbewilligung geplant, optimiert und festgelegt. Dabei werden einerseits dem dann etablierten Stand von Wissenschaft und Technik Rechnung getragen und andererseits die bewährten Erfahrungen mit Umladezellen (beispielsweise Zwilag oder la Hague) berücksichtigt.

Betriebsabläufe

Die BEVA-bezogenen Prozesse werden aus heutiger Sicht grob in drei Hauptprozesse eingeteilt:

- TLB-bezogene Prozesse, die bereits in den Zwischenlagern anfangen[5] und die An- und Ablieferung wie auch Handhabung der TLB in der BEVA sicherstellen.
- Verpackungsprozesse, die alle Aktivitäten innerhalb der Umladezelle sowie das Verschliessen und die Nachbehandlung der beladenen ELB beinhalten.
- ELB-bezogene Prozesse, die die Anlieferung leerer und den Abtransport beladener ELB in Transportbehältern sowie deren Handhabung innerhalb der BEVA abdecken.

---

[3] Die Umladezelle kann je nach Anforderung auch in mehrere Zellen unterteilt werden.

[4] Für eine optimale Beladung der Endlagerbehälter müssen diese mit BE unterschiedlicher Wärmeleistung beladen werden können. Dies bedingt, dass gleichzeitig der Zugriff auf mehrere TLB und ELB möglich ist.

[5] Die Betriebsprozesse der Zwilag/Zwibez sind nicht Bestandteil des RBG und werden hier demnach auch nicht erläutert bzw. haben lediglich informativen Charakter (z. B. zur Verdeutlichung der Schnittstellen).

Die bis in den Eingangsbereich der BEVA angelieferten TLB werden im TLB-Empfangsbereich angenommen und vom Transportfahrzeug abgeladen. Nach der entsprechenden Vorbereitung wird der TLB unter die Umladezelle gefahren, angehoben und dicht an die Andockstation der Umladezelle angedockt. Auf der anderen Seite der Umladezelle – im ELB-Empfangsbereich – werden die leeren ELB angenommen und vorbereitet, soweit notwendig in einen Abschirmbehälter gestellt und in gleicher Weise wie die TLB an die Umladezelle angedockt. Innerhalb der Umladezelle werden die angedockten Behälter geöffnet, sodass sichergestellt ist, dass es ausserhalb der Umladezelle keinerlei Kontamination gibt. Um eine eventuelle Kontamination der Behälteröffnungen während der Umladung zu vermeiden, werden diese entsprechend geschützt. Die Behälter sind nun geöffnet, und der Umladevorgang kann beginnen, d. h., es werden die BE oder WA-HAA aus den TLB entnommen und in die ELB eingesetzt. Die Vorgaben, welche BE aus welchen TLB in welchen ELB zu platzieren sind, werden im vorgängig erstellten und freigegebenen Beladeprogramm festgehalten. Alle Arbeiten in der Umladezelle werden überwacht.

Ist ein ELB gemäss Vorgaben beladen, wird der Schutz der Behälteröffnung entfernt und die Umladezelle sowie der Behälter geschlossen. Der ELB wird abgedockt, bei Bedarf auf Kontaminationsfreiheit geprüft und anschliessend zum ELB-Fertigstellungsbereich gefahren, in dem der ELB endgültig tiefenlagergerecht verschlossen wird (beispielsweise verschweisst). Nach einer ggf. erforderlichen Nachbehandlung und nachfolgender Kontrolle des Verschlusses stellen die ELB eine dichte Barriere dar (vgl. Kap. 5.2). Die ELB werden anschliessend – wenn vorhanden – aus dem Abschirmbehälter entnommen und nach dem Nachweis der Kontaminationsfreiheit in einem Transportbehälter, der die Anforderungen für den Transport auf dem öffentlichen Verkehrsnetz erfüllt[6], gestellt und so in einem Bereitstellungsbereich gelagert bzw. für den Abtransport vorbereitet.

Die leeren TLB werden ebenfalls verschlossen, von der Umladezelle abgedockt, der Nachweis der Kontaminationsfreiheit erbracht und zur Entsorgung in die Zwilag transferiert.

3.2 Weitere Bauten

Für den Betrieb der BEVA sind weitere Bauten erforderlich. Da in diesen keine Aktivitäten mit radioaktiven Stoffen erfolgen, werden die Bauten als sogenannte konventionelle Bauten bezeichnet. Hierzu zählen Büros, Räume für Service, Archiv, Empfang und Öffentlichkeitsarbeit sowie Strahlen- und Notfallschutz als auch Räumlichkeiten oder Flächen für konventionelle Lager- und Werkstätten sowie Parkplätze.

3.3 Projektperimeter

Auf dem Projektperimeter sind gemäss den Ausführungen der vorhergehenden Kapitel zwei Funktionsgruppen mit dazugehörigen Bauten sowie Verkehrs- und Logistikflächen unterzubringen und funktional anzuordnen. Darunter fällt (i) das Areal für die BEVA, inkl. Sicherungsareal[7] und Wachzentrale, sowie (ii) rein konventionell genutzte Flächen für Administration, Lagerung und Parkplätze.

Der in Kap. 2.1 eingeführte Projektperimeter setzt sich aus drei funktional unterschiedlich genutzten Teilflächen zusammen: dem Anlagenperimeter, dem Eingliederungssaum und einer Installationsfläche. Die Anordnung dieser Flächen ist in Fig. 3-1 verdeutlicht.

---

[6] Der Transport der ELB zum gTL erfolgt in dafür vorgesehenen Transportbehältern, die zum einen in Kombination mit dem ELB ein robustes Transportgut (ADR Typ B) darstellen und zum anderen eine entsprechende Abschirmung der radioaktiven Strahlung sicherstellen (ADR 1957, SDR 2002).

[7] Die Kernanlage BEVA muss gesichert werden, wofür ein Sicherungsareal mit Sicherungsperimeter und zugehöriger Ausrüstung, Wache und Zugangskontrolle eingerichtet wird (vgl. Nagra 2025b).

Fig. 3-1: Übersichtskarte des Projektperimeters, inkl. Unterteilung in Anlagenperimeter, Installationsfläche und Eingliederungssaum

Anlagenperimeter

Der Anlagenperimeter, auf dem die BEVA als wichtigste Baute entsprechend dem Zweck gebaut und betrieben wird, nimmt mit ca. 2 ha die grösste Fläche in Anspruch. Der Flächenbedarf des Anlagenperimeters ergibt sich aus den Platzanforderungen der auf ihr zu errichtenden Funktionsgruppen mit dazugehörigen Bauten, Anlagen, Verkehrs- und Logistikflächen.

Der Anlagenperimeter wird plan hergestellt, flächig befestigt und als Verkehrs- und Betriebsfläche ausgelegt. Im Osten wird der Hang dafür angeschnitten und gesichert. Im Norden des Perimeters wird aufgrund der Ausdehnung der BEVA und dem dort vorhandenen Platzangebot ein Sicherungsareal eingerichtet, innerhalb dessen die BEVA mit zugehörigen Nebengebäuden, welche funktionsbedingt im/beim Sicherungsareal angeordnet sind, betrieben werden. Der verbleibende südliche Teil des Anlagenperimeters ist mit den konventionellen Bauten für Administration, Lagerflächen sowie Parkplätzen belegt.

Eine mögliche Lage der BEVA und den in Kap. 3.2 erläuterten konventionellen Bauten ist in Fig. 3-2 exemplarisch dargestellt. Mit der Anordnung der BEVA und des Sicherungsareals direkt angrenzend an das Zwilag-Hauptareal können kurze Wege für den Transfer[8] der TLB von der Halle H der Zwilag zur BEVA als auch der An-/Abtransport von ELB und von Verbrauchsmaterialien mittels Zufahrtsschleuse und des bestehenden Anschlusses an das öffentliche Verkehrsnetz genutzt werden.

Eingliederungssaum

Im Eingliederungssaum, der eine Fläche von ca. 0.5 ha umfasst, werden Massnahmen für die Sicherheit und Sicherung des Anlagenperimeters und die Landschaftseingliederung umgesetzt. Er ist 20 m breit und grenzt östlich an den Anlagenperimeter an. Im Eingliederungssaum verläuft ein Waldweg entlang des Anlagenperimeters, der den vormaligen Nietenbuckweg ersetzt und so die Durchgängigkeit für Fussgänger und Radfahrer wiederherstellt. Ausserdem stellt er im Bereich des Sicherungsperimeters die regulativ geforderte Einsehbarkeit der Umgebung von der Anlage aus sicher (Nagra 2025b). Östlich angrenzend an den Waldweg soll die Fläche im Eingliederungssaum freigehalten werden, um die BEVA und andere Gebäude und Einrichtungen (insbesondere die Sicherungsanlagen) vor Windwurf und Waldbränden zu schützen. Waldseitig wird ein Übergang für eine Landschaftseingliederung des Projektperimeters realisiert.

Installationsfläche

Die Installationsfläche nimmt temporär ca. 0.4 ha des heutigen PSI-Parkplatzes, nördlich der Forschungsstrasse in Anspruch. Sie dient während Phasen mit Bautätigkeit beispielsweise als Lager für Geräte und Baumaterial sowie für die Ver- und Entsorgung der Baustelle.

[8] Der Antransport der TLB aus der Zwilag zur BEVA kann ausschliesslich über Betriebsareale der Zwilag bzw. der BEVA erfolgen und stellt damit ein Transfer direkt zwischen den beiden Kernanlagen dar.

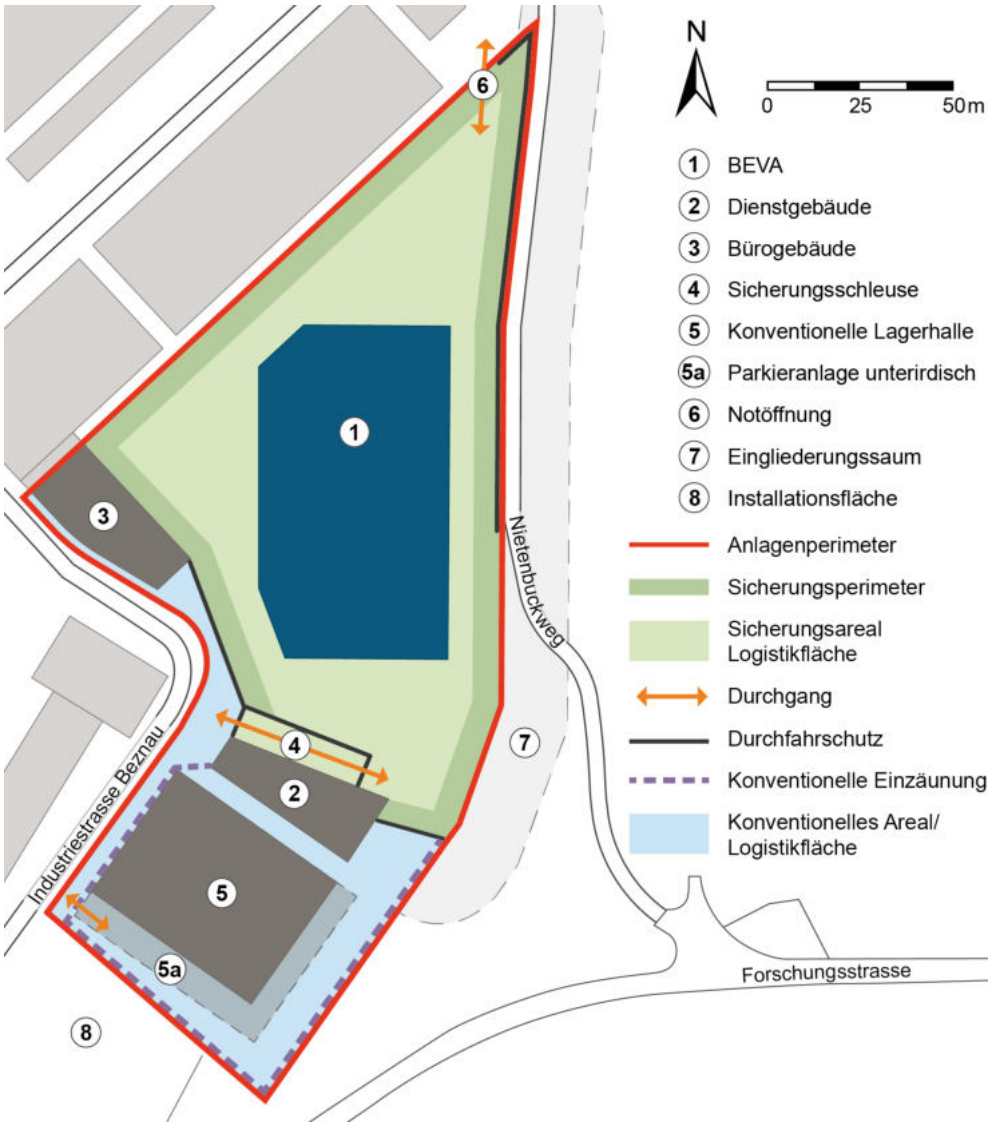

Fig. 3-2: Schematische Darstellung einer exemplarischen Anordnung der Bauten auf dem Anlagenperimeter

Exemplarisch dargestellt sind: die BEVA im Sicherungsareal mit Sicherungsperimeter und Zugangsschleuse, die konventionellen Bauten für Administration, Lagerhalle und Parkflächen sowie zugehörige Logistikflächen. Ein möglicher neuer Verlauf des Nietenbuckwegs ist angedeutet.

4 Charakterisierung der Standorteigenschaften und Einwirkungen von aussen

Im Folgenden werden der Standort und dessen Umgebung charakterisiert, die Einwirkungen von aussen (EVA) bewertet und damit die Standorteignung für den Bau und Betrieb der BEVA aufgezeigt[9]. Für die Erstellung des Spektrums der zu unterstellenden EVA werden grundsätzlich die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben und Verordnungen berücksichtigt[10].

4.1 Beschreibung des Standorts und dessen Umgebung

4.1.1 Lage

Die Lage im Unteren Aaretal und die unmittelbare Umgebung des Standorts ist in Fig. 2-1 gezeigt. Nordwestlich, angrenzend an die Zwilag und das Gelände «Ost» des PSI, verläuft die Aare. Die nächsten Dorfkerne Böttstein, Villigen und Würenlingen liegen rund 2 km vom Projektperimeter entfernt (siehe Fig. 4-3). Die Entfernung zur deutsch-schweizerischen Grenze beträgt ca. 7 km (Luftlinie). Die Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt liegen (Luftlinie) ca. 1.25 km bzw. ca. 7.6 km entfernt. Die Distanz zum gTL beträgt etwa 18 km (Luftlinie) in östlicher Richtung.

4.1.2 Talmorphologie und Topographie

Das Untere Aaretal ist ein sehr alt angelegtes Tal. Neben fluvialen Prozessen wirkten zeitweise auch glaziale Erosionsprozesse an der Talformation mit. Allerdings erreichten Gletscher vermutlich nur wenige Male innerhalb der letzten 2 Millionen Jahre die Region. Die heutige Talformation ist wahrscheinlich auf einen Gletschervorstoss zurückzuführen, der mit einer grösseren Tiefenerosion verbunden war. Dabei entstand ein in den Felsen eingekerbtes U-förmiges Trogtal – am Standort Richtung Süd-Nord bzw. Süd-Südwest zu Nord-Nordost – mit einer flachen Sohle und steilen Flanken. Auf der Ostseite steigt die Talflanke flach an, während sich auf der Westseite eine hügelige Landschaftsstruktur anschliesst. Das Gelände des Standorts liegt auf einer Höhe von ca. 335 m ü. M. (siehe Fig. 4-1, inkl. Profilschnitt durch das Tal).

Der Gletscher lagerte dabei eine Moräne ab, die im Zuge des Gletscherrückzugs mit sogenannten Hochterrassenschottern bedeckt wurde. Die Hochterrassenschotter und auch Teile der Moräne wurden in der letzten Eiszeit von Schmelzwasserströmen stellenweise abgetragen. Die Schmelzwasserströme lagerten in der Folge auf tieferem Niveau erneut Schotter ab, die geologisch als Niederterrassenschotter bezeichnet werden. Nacheiszeitlich eingetretene Überschwemmungen führten zur Bildung einer geringmächtigen Deckschicht aus vorwiegend sandigen Überschwemmungssedimenten. Diese wurde im Zuge der Bebauung grösstenteils durch künstliche Auffüllungen ersetzt bzw. überschüttet. Weitere Informationen zu den Grundwasserverhältnissen und der geologischen Prognose finden sich in Kap. 4.4.2 bzw. Kap. 4.5.

---

[9] Eine generische Sicherheitsbetrachtung der Einwirkungen von innen (EVI) ist in Nagra (2024e) dokumentiert.

[10] Es wird auf die in Art. 8, Abs. 3 KEV und Art. 5 Abs. 1 UVEK genannten Störfälle mit Ursprung ausserhalb der Anlage eingegangen, soweit sie für die BEVA bzw. den Standort relevant sind und zutreffen. Dabei werden auch Folgeereignisse betrachtet (z. B. Flusshochwasser und Ufererosion, Explosion und Waldbrand). Kombinationen von Einzelereignissen – die kausal zusammenhängen können wie hohe Temperaturen, Trockenheit und niedriger Flusswasserspiegel – sind bei einer BEVA nicht relevant, da die Schutzziele *Kontrolle der Reaktivität* und *Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle* keine aktiv oder passiv zu begrenzenden Grössen bei den vorgesehenen und bereits vorgängig zwischengelagerten hochaktiven Abfällen darstellen (vgl. Kap. 5.3)

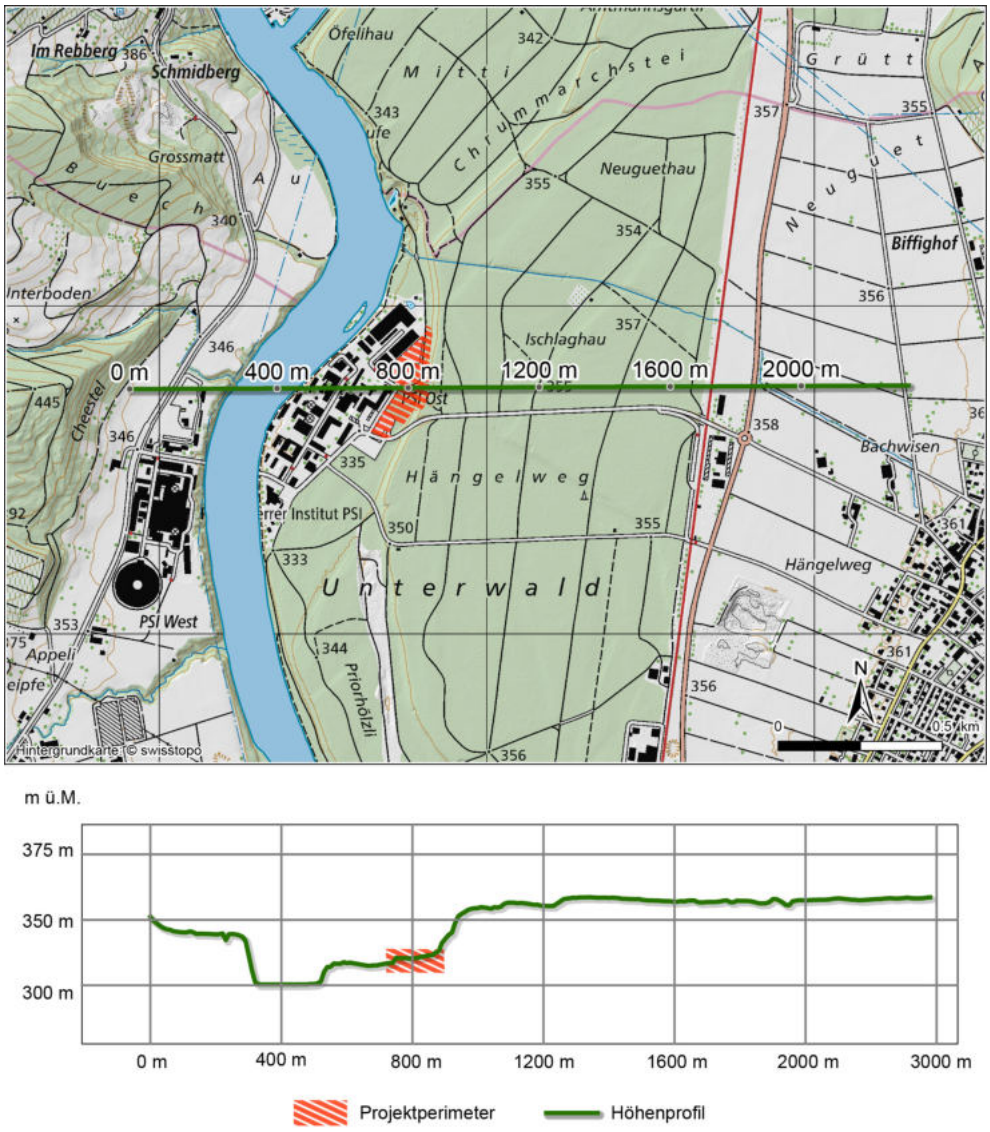

Fig. 4-1: Topographie des Gebiets Unteres Aaretal

Die grüne Linie entspricht der Verlaufsachse des Höhenprofils (ca. 6.5-fach überhöht).

4.1.3 Boden- und Landnutzung

Die Boden- und Landnutzung sind in Tab. 4-1 für die entsprechenden im Umkreis von 3 km liegenden Gemeinden[11] separat aufgelistet. Dabei ist der Verkehr in die Siedlungsfläche der Gemeinden mit einbezogen. Demnach wird der Boden von den Gemeinden zu 30 % landwirtschaftlich genutzt, 42 % sind bewaldet und 15 % überbaut (Siedlungen, Arbeitszonen und Verkehr). Die restliche Fläche umfasst Industrie, Brachland, Gewässer oder Kiesgruben. Ein graphischer Überblick über die Boden- bzw. Landnutzung ist in Fig. 4-2 gezeigt.

[11] Gemeinden, deren Fläche nur marginal den äusseren Betrachtungsradius tangieren, sind nicht berücksichtigt.

Tab. 4-1: Boden- und Landnutzung in den Gemeinden um den Standort der BEVA

W: Wald, LZ: Landwirtschaftszone, S: Schutzzone, MD: Materialabbau und Deponie, WA: Wohn- und Arbeitszone, A: Arbeitszone, O: Zone für öffentliche Bauten und Anlagen

Gemeinden	**Gesamt-fläche**	**W**	**LZ**	**S**	**MD**	**WA**	**A**	**O**	**Rest**
	[km^2]								
Böttstein	7.4	2.45	2.33	0.25	0.29	0.86	0.26	0.07	0.88
Döttingen	6.9	2.42	1.92	0.06	0.23	0.88	0.56	0.08	0.73
Villigen	11.2	5.43	3.55	0.48	0.50	0.55	0.22	0.07	0.41
Würenlingen	9.4	4.39	2.49	0.19	0.13	1.00	0.64	0.13	0.43
Gesamtfläche	34.9	14.69	10.29	0.98	1.15	3.29	1.68	0.35	2.45
Gesamtfläche [%]	100	42.09	29.49	2.82	3.30	9.44	4.82	1.01	7.03

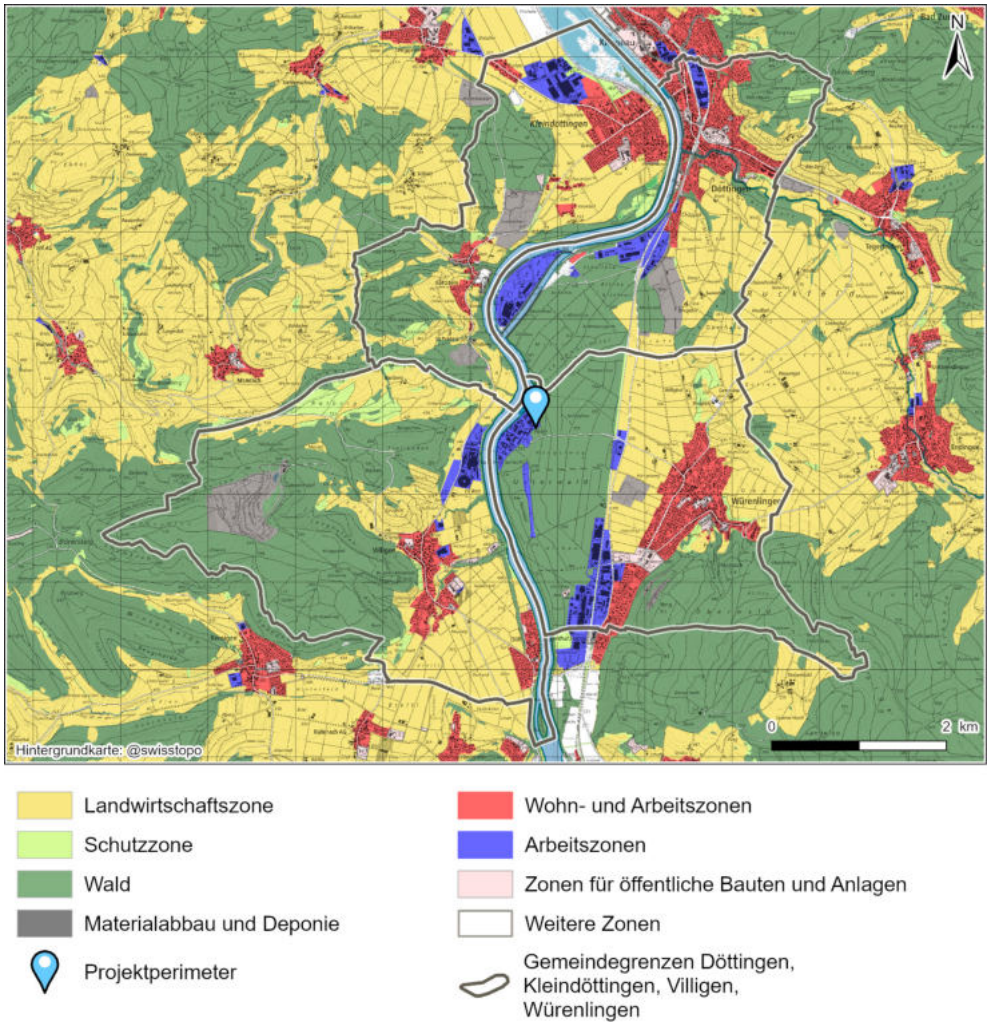

Fig. 4-2: Übersicht über die Boden- und Landnutzung im Umkreis des Standorts

4.1.4 Bevölkerung und Besiedlung

Der Standort liegt in einem dünn besiedelten Gebiet (vgl. Fig. 4-3). Im Umkreis von 1 km befindet sich lediglich das PSI-Gästehaus. In einem Umkreis von 1 km bis 3 km liegen die Ortsteile Böttstein, Eien, Villigen, Stilli, Chäppeli und Würenlingen mit insgesamt etwa 8'300 Einwohnern. Fig. 4-3 zeigt die Siedlungen in der Nähe des Standorts der BEVA und die Bevölkerungsverteilung im Untersuchungsgebiet. Die Bevölkerungsdichte in der Umgebung entspricht etwa dem durchschnittlichen Wert des Kantons Aargau (5.0 Pers./ha).

Die Bevölkerung in den vier angrenzenden Gemeinden hat seit den 90er Jahren um 40 % zugenommen[12]. Gemäss der Prognose «Aargauer Bevölkerungsprojektionen 2020 – 2050» wächst die Bevölkerung des Kantons Aargau weiter, von rund 0.685 Millionen Einwohner im Jahr 2020 auf knapp 0.905 Millionen Einwohner im Jahr 2050 (Statistik Aargau 2020). Das entspricht einem Wachstum um knapp 220'000 Personen oder 32 Prozent im gesamten Kanton Aargau. Basierend auf dieser Annahme wächst die Bevölkerung in den vier angrenzenden Gemeinden auf 20'500 Einwohner im Jahr 2050 (bzw. im 3 km Umkreis auf etwa 11'000 Einwohner).

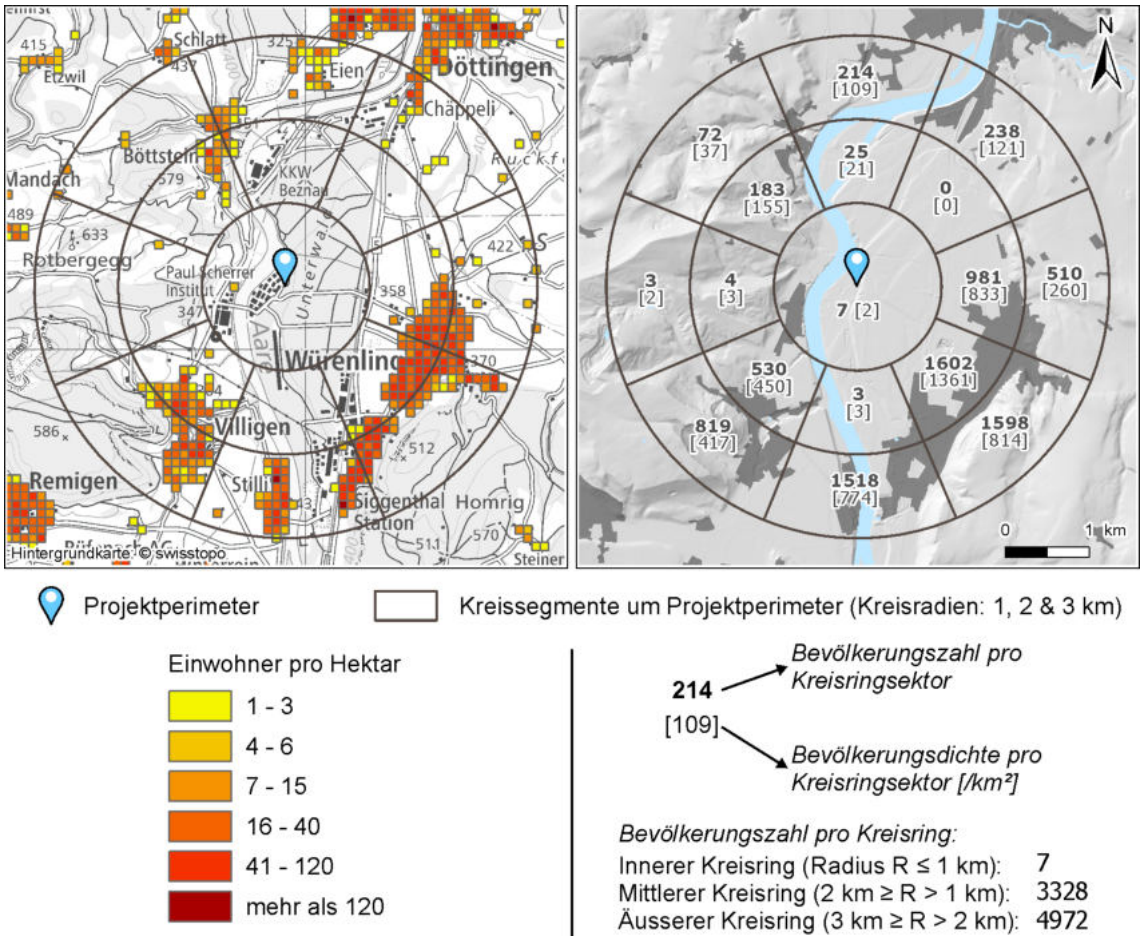

Fig. 4-3: Ständige Wohnbevölkerung (links) und Bevölkerungsanzahl und -dichte (rechts) in der Nähe des Standorts der BEVA

BFS, Statistik der Bevölkerung (STATPOP), Daten für 2022, veröffentlicht am 24.08.2023 (Bevölkerung und Haushalte ab 2010 | Bundesamt für Statistik (admin.ch))

[12] Daten und Publikationen - Kanton Aargau (ag.ch); Zugriff Juni 2023)

4.1.5 Verkehrsinfrastruktur und Betriebe in der Umgebung

In diesem Kapitel werden die Verkehrswege (inkl. Luftverkehr), die Rohrleitungsanlagen und die der Störfallverordnung unterliegenden Betriebe in der Umgebung beschrieben. Ausgehend davon werden in Kap. 4.2 die Einwirkungen bei Störfällen in der Nachbarschaft abgeleitet.

Eisenbahnanlagen und Durchgangsstrassen

Die Hauptstrasse Nr. 5 (gemäss Onlinekarten Kanton Aargau: K113) führt von Lausanne und der Aare entlang nach Koblenz und ist vom Standort in etwa 1 km östlich erreichbar. Etwa 7 km nördlich verläuft die Hauptstrasse Nr. 7 (K130 und K131), welche von der deutschen Grenze bei Basel bis zur österreichischen Grenze bei St. Margrethen führt. Die Autobahn A3 ist über die Hauptstrasse Nr. 5 in ca. 14 km via Brugg erreichbar. Der Standort ist von der Hauptstrasse Nr. 5 über die zweispurige Forschungsstrasse erschlossen. Vom Standort aus ist es auch möglich, über die PSI-Brücke auf die Westseite der Aare zu gelangen. Die Nebenstrasse K442 verbindet die beiden Ortschaften Kleindöttingen und Villigen. Sie führt zu der Hauptstrasse Nr. 5 in Südrichtung und zu der Hauptstrasse Nr. 7 in Nordrichtung.

Etwa 900 m östlich des Standorts verläuft die Eisenbahnstrecke Turgi – Koblenz. Die Haltestelle Siggenthal-Würenlingen liegt etwa 3 km vom Standort entfernt. In ca. 900 m Entfernung befindet sich ein Güterumschlagplatz der Zwilag. Alle weiteren Eisenbahnstrecken sind etwa 6 km Luftlinie im Norden (Eglisau – Koblenz – Laufenburg) oder etwa 5 km im Süden (Baden – Turgi – Brugg) vom Standort entfernt. Eine Übersicht über die Verkehrs- und Transportwege ist in Fig. 4-4 gezeigt. Eine Bewertung von Transportunfällen erfolgt in Kap. 4.2.1 bzw. Kap. 4.2.2.

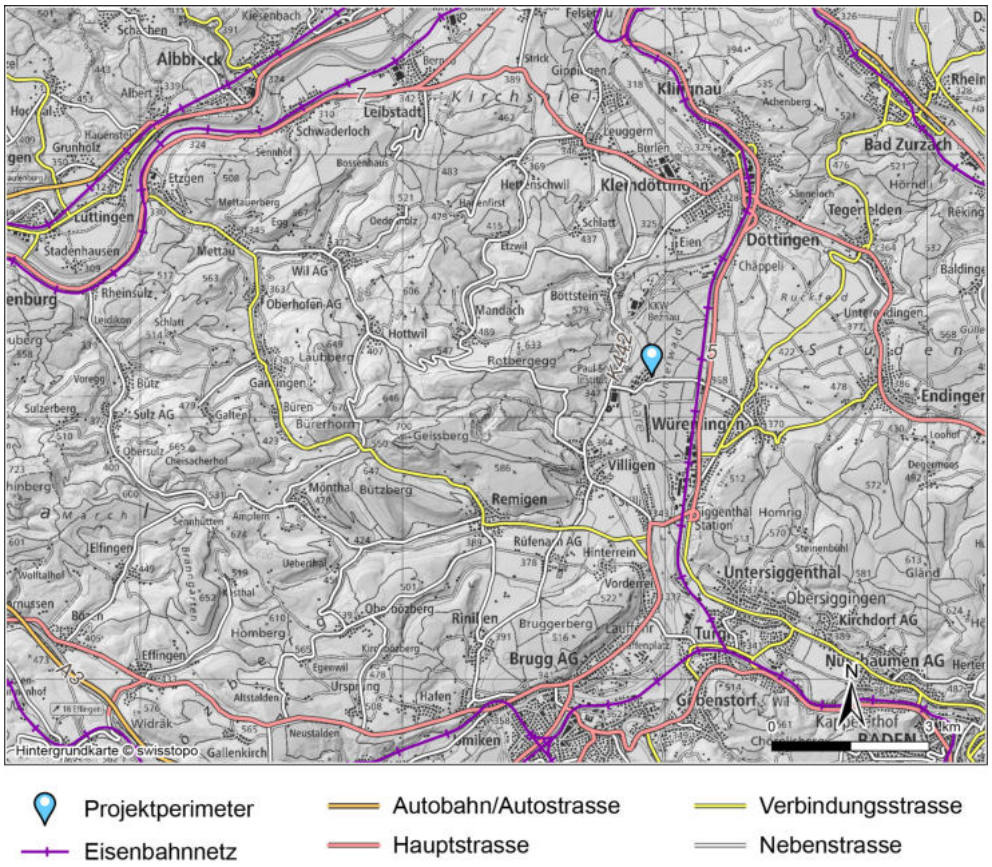

Fig. 4-4: Verkehrs- und Transportwege im Umkreis zum Standort

Luftverkehr

Der Standort liegt ca. 24 km vom internationalen Flughafen Zürich-Kloten und ca. 53 km vom Flughafen Basel-Mülhausen entfernt (Luftlinie). Er liegt damit, bei Berücksichtigung eines Umkreises von 50 km gemäss ENSI-A05 (ENSI 2018), im Einflussbereich des An- und Abflugverkehrs des Flughafens Zürich-Kloten, der zum überwiegenden Teil mit Verkehrsflugzeugen angeflogen wird. Der Standort befindet sich im Kontrollnahbezirk des Flughafens Zürich-Kloten. Die Flugbewegungen an den grossen Schweizer Flughäfen sind seit den 1990er Jahren aufgrund der infrastrukturellen und sicherheitsbedingten Begrenzungen nur unwesentlich gestiegen, und es ist davon auszugehen, dass sich dies auch in den nächsten Jahrzehnten nicht wesentlich ändert. Im Jahr 2019[13] haben in Zürich 262'026 Flugbewegungen stattgefunden (Nagra 2024a).

Weiterhin gibt es in der näheren und weiteren Umgebung einen Regionalflugplatz (Birrfeld, ca. 10 km Luftlinie), mehrere Flugfelder (Fricktal-Schupfart, Olten, Buttwil, Winterthur, Schaffhausen) und ein Heliport (Würenlingen) für kleine Motorflugzeuge, Helikopter und Segelflugzeuge. Der Regionalflugplatz bzw. die Flugfelder haben allesamt – infolge der Flughöhe und Entfernung, insbesondere aber aufgrund der begrenzten Höchststartmasse – keine Relevanz für den Standort. Der nächstgelegene Militärflugplatz, der auch für zivile Zwecke nutzbar ist, ist Dübendorf in etwa 34 km Entfernung (Luftlinie). Eine Übersicht über die Infrastruktur der Luftfahrt zeigt Fig. 4-5.

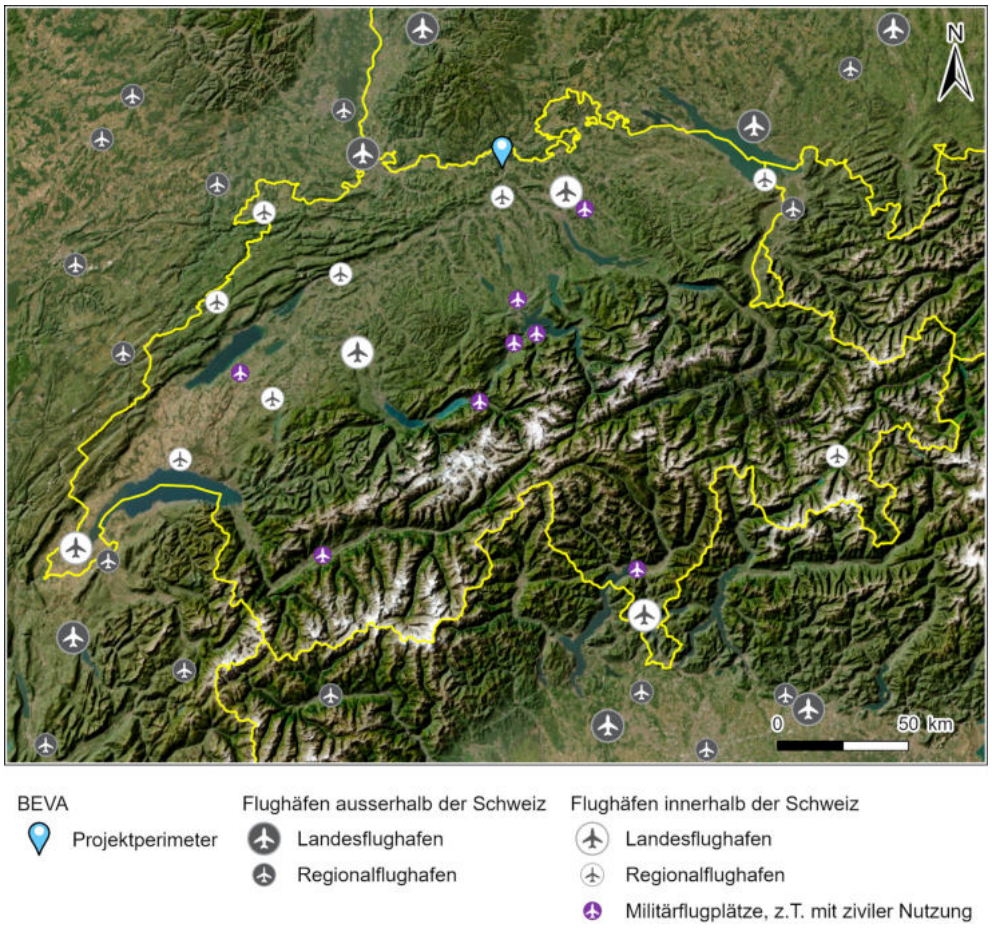

Fig. 4-5: Übersichtskarte zur Infrastruktur der Luftfahrt

[13] Das Jahr 2019 ist aufgrund der COVID-Pandemie das repräsentative Jahr für die Ermittlung der Flugbewegungen zum Zeitpunkt der Erarbeitung.

Der von Verkehrsflugzeugen zu benutzende Luftraum ist strukturiert und wird von Skyguide als Flugsicherungsdienst betreut. Der Verkehr erfolgt auf festgelegten Routen und wird ständig überwacht und aktiv beeinflusst, wozu Verkehrsflugzeuge über Einrichtungen zum Instrumentenflug verfügen. Eine Bewertung von Unfällen im Luftverkehr erfolgt in Kap. 4.2.3.

Betriebe

Für die Standortbewertung hinsichtlich Einwirkungen aus Betrieben (bzw. Arbeitsstätten) in der Umgebung der Anlage werden die Betriebe in einem Umkreis von 3 km um den Standort der BEVA berücksichtigt, die der Störfallverordnung (StFV 1991) unterstellt sind. Die Standorte der Betriebe sind in Fig. 4-6 aufgezeigt. Im Umkreis von 3 km um den Standort der BEVA befinden sich insgesamt vier Betriebe, welche der Störfallverordnung unterstellt sind. Diese sind das KKW Bezau, die Zwilag, das PSI[14] und ein Zementwerk der Holcim (Schweiz) AG in Würenlingen.

Die Auswirkungen von Störfällen in den betreffenden oben genannten Betrieben auf die BEVA bzw. den Projektperimeter werden in Kap. 4.2.4 dargelegt und bewertet.

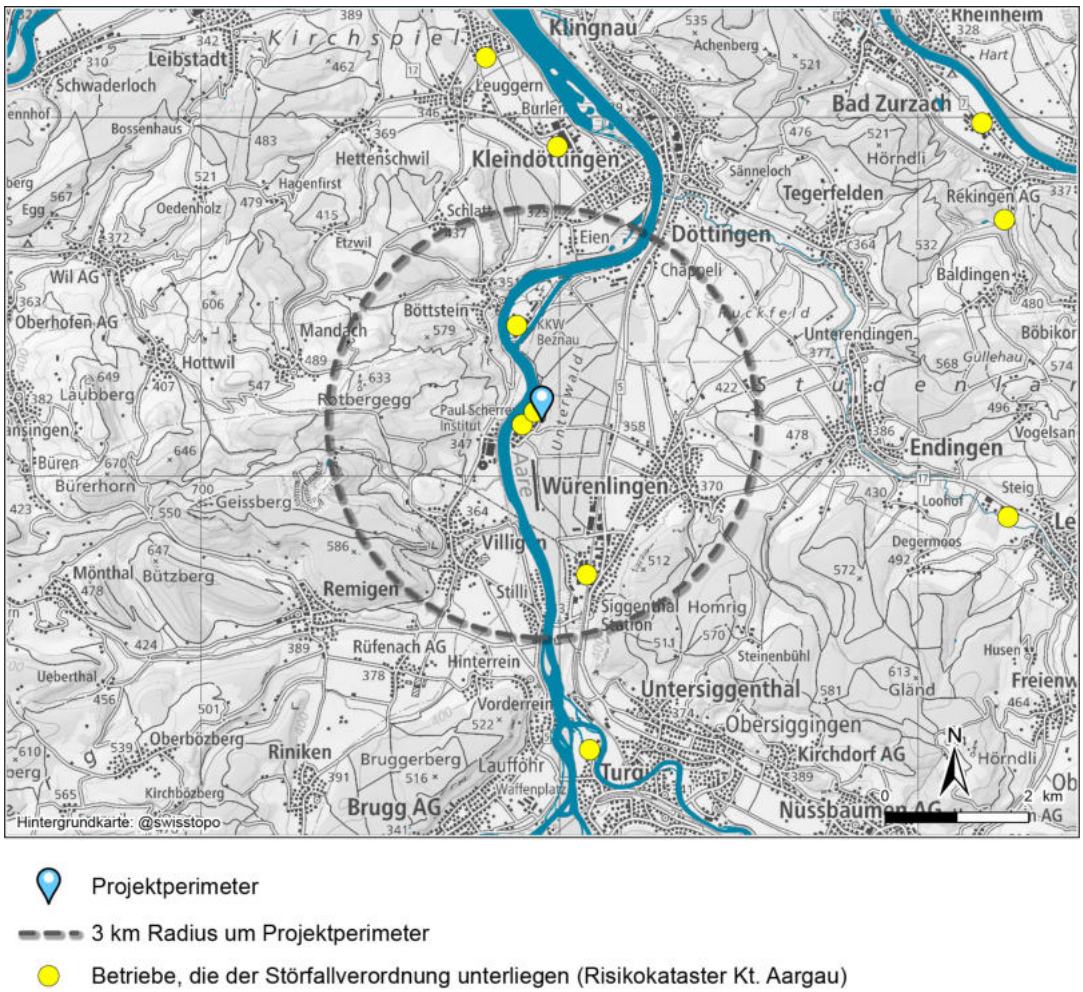

Fig. 4-6: Standorte der StFV-Betriebe im Umkreis von 3 km um den Projektperimeter

[14] Das PSI betreibt das Bundeszwischenlager, welches der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung der gesamten Schweiz dient. Das Hotlabor sowie die Anlagen für die Behandlung, Konditionierung und Lagerung radioaktiver Abfälle sind Kernanlagen und werden durch das ENSI beaufsichtigt.

Rohrleitungen

Nahe dem Standort verlaufen zwei im Boden verlegte Erdgasleitungen. Die Erdgashochdruckleitung TRAWO (Zuzgen – Winterthur/Ohringen), die das Netz der Erdgas Ostschweiz AG in Winterthur mit der Transitgasleitung Niederlande – Italien verbindet, verläuft östlich des geplanten Projektperimeters im Wald (gezeigt in Fig. 4-7). Sie hat einen minimalen Abstand von etwa 350 m von der BEVA, die damit ausserhalb des 300 m betragenden Konsultationsbereichs der Gasleitung liegt. Die Leitung weist einen maximalem Betriebsdruck von 70 bar auf. In ost- und südlicher Richtung im Waldgebiet, in einem geringeren Abstand von ca. 80 m zur BEVA verläuft die ebenfalls in Fig. 4-7 gezeigte REFUNA-Erdgasleitung. Sie wird von der TRAWO gespeist und versorgt das 30-MW-Reserveheizkraftwerk des PSI-Ost. Die Leitung weist einen maximalen Betriebsdruck von bis zu 5 bar auf. Die technischen Angaben bzw. die Leistungskennzahlen zu beiden Gasleitungen sind in Tab. 4-2 zusammengefasst. Eine Bewertung der Gasleitungen erfolgt in Kap. 4.2.5.

In unmittelbarer Nähe der BEVA verläuft die Leitung der Fernwärmeversorgung REFUNA zum PSI. Der darin beförderte Heissdampf stellt bei einem Platzen der Leitung keine Gefahr für die BEVA dar und wird demnach nicht weiter betrachtet.

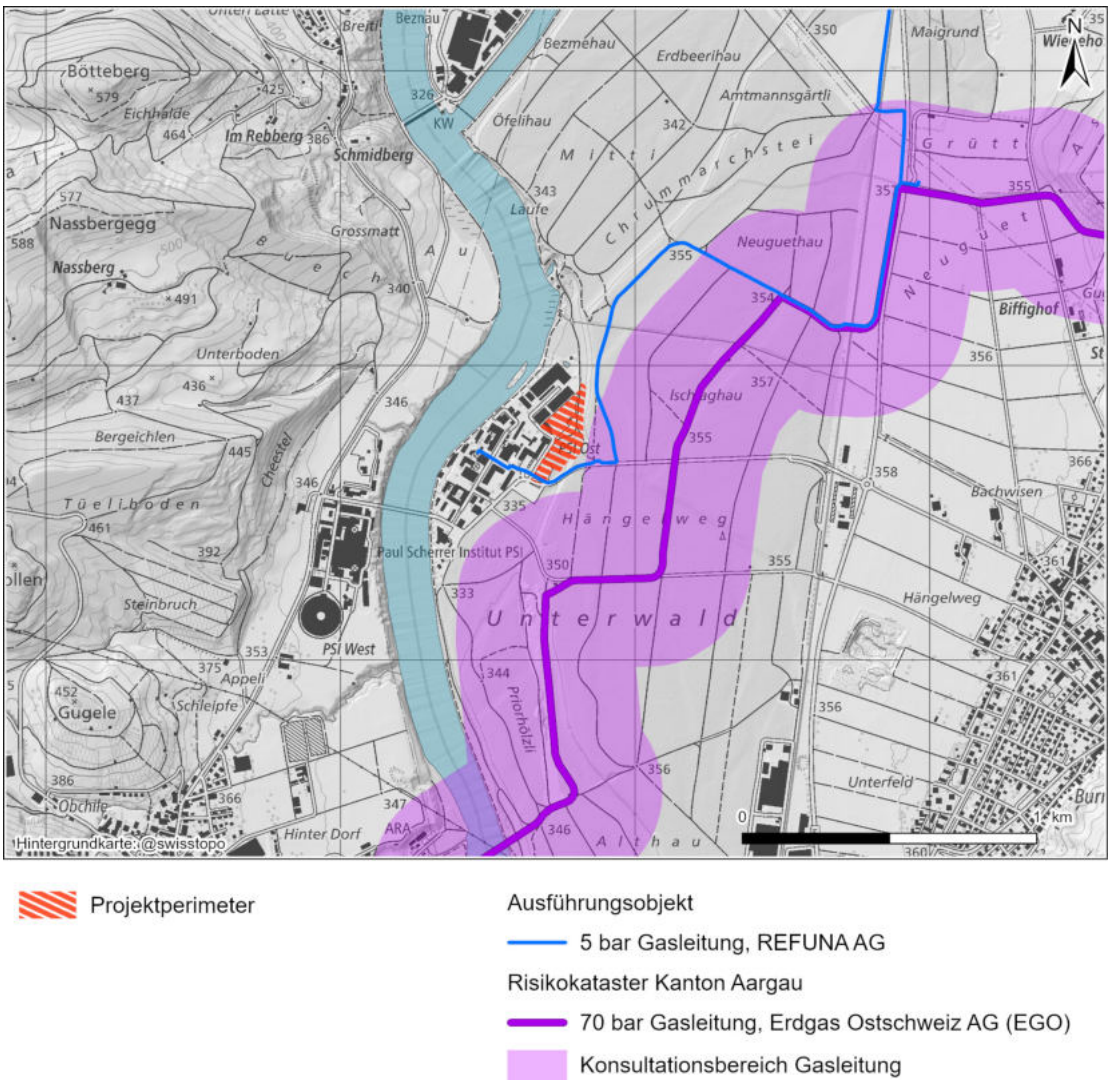

Fig. 4-7: Verlauf der Erdgasleitungen TRAWO (70 bar) und REFUNA (5 bar)

Tab. 4-2: Leistungskennzahlen der in unmittelbarer Umgebung befindlichen Gasleitungen

Angabe	**5 bar Gasleitung**	**70 bar Hochdruckgasleitung**
Baujahr	2024	1997
Material / Typ	PE 100 S5, Gerofit	StE 480.7 TM
Nennweite	DN 160	DN 700
Aussendurchmesser	160 mm	711.2 mm
Rohrwandstärke	14.6 mm	10.0 mm
Innendurchmesser	130.8 mm	691.2 mm
Betriebsdruck	max. 5 bar	max. 70 bar
Überdeckung	1.4 m	1.5 bis 4.0 m (nach Plan Nr. 92-09)
Minimaler Abstand zur BEVA	ca. 80 m	ca. 350 m

4.2 Einwirkungen bei Störfällen in der Nachbarschaft

4.2.1 Transportunfälle bei Eisenbahnanlagen

In Nagra (2024b) ist eine systematische Bewertung denkbarer Transportunfälle (Bahnkesselwagen) auf der Bahnstrecke Turgi – Koblenz (vgl. Fig. 4-4) dokumentiert. Dabei wird auf die unfallbedingte Freisetzung grosser Mengen an brennbaren, explosiven, ätzenden, gesundheitsschädlichen und oxidierenden Stoffen[15] eingegangen und die sich daraus ergebenden nachbarschaftsbedingte Gefährdung der BEVA am konservativsten Punkt minimaler Distanz durch Brand, Explosion oder luftgetragene Toxizität bewertet. Die Untersuchungen stützen sich dabei auf bestehende quantitative Untersuchungen anderer Kernanlagen ab, die aufgrund ihrer konservativen Annahmen und ihres generischen Charakters (beispielsweise keine Berücksichtigung der Abschattung infolge standortspezifischer, topographischer Gegebenheiten oder vorgelagerter Bauten) auf den Standort der BEVA ohne Einschränkung übertragbar sind.

Die Resultate zeigen, dass alle aus den untersuchten Gefahren und Unfallabläufen ermittelten Überdruckspitzen, Wärmestromdichten und Konzentrationen gefährlicher Stoffe am Standort weit unterhalb kritischer Werte[16] liegen und somit auf die Baustrukturen, die Betriebsabläufe und die nukleare Sicherheit der BEVA keinen nachteiligen Einfluss haben. Begründet ist dies durch den grossen Abstand zwischen BEVA und Schiene (vgl. Fig. 4-4). Unter Berücksichtigung der Standorteigenschaften, d. h. den topologischen, in einem Abschirmeffekt resultierenden Verhältnissen (vgl. Fig. 4-1) und dem zwischen BEVA und Schiene liegenden dichten, verzögernd und hemmend wirkenden Mischwald (vgl. Fig. 4-2), würden die konservativ für eine unbebaute Ebene abgeschätzten Auswirkungen am Ort der BEVA weiter reduziert.

---

[15] Anhand der Leitstoffe Propan, Benzin und Chlor.

[16] Der maximal am Standort ermittelte Überdruck ist kleiner 60 mbar, die maximale Wärmestromdichte (für 17 s) ist kleiner als 4 kW/m^2. Zum Vergleich: Bei 34 bis 70 mbar zersplittern i. d. R. Fensterscheiben, bei 10 kW/m^2 erfolgt noch keine Zündung von Holz, Wellpappe und Papier bei unendlich langer Einwirkung (ohne Flammenkontakt).

Ein Waldbrand als Folge eines Transportunfalls wird in Kap. 4.2.6, in dem eine spezifische Einordnung zur Gefährdung durch verschiedene Waldbrandauslöser geführt wird, diskutiert.

Aus Transportunfällen bei Eisenbahnanlagen ergeben sich für den Bau und Betrieb einer BEVA keine Gefährdungen. Der Standort ist geeignet.

4.2.2 Transportunfälle auf der Strasse

Unfallkonsequenzen bei einem Strassentransport auf der Hauptstrasse Nr. 5, bei der die transportierte Gefahrgutmenge systembedingt deutlich geringer ist als auf der Schiene, werden durch die Unfallkonsequenzen der Schiene, deren Distanz zum Standort zudem kleiner ist als bei der Strasse (vgl. Fig. 4-4), abgedeckt.

Das Potenzial von Unfällen auf Nebenstrassen wird im Folgenden diskutiert: Auf der Forschungsstrasse, die den Standort von der Hauptstrasse Nr. 5 erschliesst, erfolgen laut PSI-Mitteilung für die verschiedenen PSI-Labore und die Zwilag nur kleine Chemieanlieferungen mit geringem Gefährdungspotenzial. Das PSI wird ausschliesslich mit geringen Mengen an Gasen und Heizöl bzw. Diesel beliefert, es erfolgen keine Benzinantransporte. Auf der gegenüberliegenden Aareseite verläuft die Nebenstrasse Villigen – Böttstein – Döttingen in ca. 500 m Entfernung zum Standort. Aufgrund ihrer engen kurvigen Dorfdurchfahrten ist sie für Schwerlastverkehr schlecht geeignet und wird folglich nicht durch Schwerlastverkehr befahren. Auf dieser Strecke werden somit keine gefährlichen Gütertransporte (von bedeutender Menge) durchgeführt.

Aus Transportunfällen auf der Strasse ergeben sich für den Bau und Betrieb einer BEVA keine Gefährdungen. Der Standort ist geeignet.

4.2.3 Unfälle im Luftverkehr (unfallbedingter Flugzeugabsturz)

Zur Charakterisierung des Standorts in Bezug auf das Potenzial der Gefährdung durch einen unfallbedingten Flugzeugabsturz werden in Nagra (2024a) die jährlichen Absturzhäufigkeiten von Flugzeugen jeweils für die zu untersuchenden Flugzeug- sowie Gewichtskategorien gemäss den Vorgaben in ENSI-A05 (ENSI 2018) ermittelt. Die Bestimmung der Absturzhäufigkeiten erfolgt für die folgenden drei Flugzeugkategorien:

- Verkehrsflugzeuge
- strahlgetriebene Kampfflugzeuge
- Leichtflugzeuge und Hubschrauber

Zur Ermittlung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten von Verkehrsflugzeugen werden die jährlichen Flugbewegungen der in der Nähe des Standorts befindlichen Flughäfen (d. h. Starts und Landungen) sowie die jährlichen Transitflugbewegungen in einem definierten Umkreis um den Standort zugrunde gelegt. Die Anzahl jährlicher Flugbewegungen wird grundsätzlich unter Berücksichtigung der Schwankungen in der Vergangenheit sowie der erwarteten zukünftigen Schwankungen ermittelt. Für die Bestimmung der Flugbewegungen in Flughafennähe werden alle Flughäfen innerhalb eines Radius von 50 km um den Anlagenstandort berücksichtigt (vgl. Fig. 4-5). Hinsichtlich der jährlichen Transitflugbewegungen sind alle Luftkorridore in einem Radius von 100 km um den Anlagenstandort zu betrachten. Darüber hinaus werden weitere Randbedingungen, wie z. B. die mittlere Flughöhe in Flughafennähe bei Starts und Landungen sowie bei Transitflügen über dem zu betrachtenden Standort, ermittelt. Die jährliche Absturzhäufigkeit von Kampfflugzeugen sowie Leichtflugzeugen und Hubschraubern wird direkt aus der Absturzstatistik dieser Flugzeugkategorien für das Gebiet der Schweiz berechnet.

In Tab. 4-3 sind die in Nagra (2024a) ermittelten jährlichen Absturzhäufigkeiten für die verschiedenen Flugzeugkategorien, bezogen auf eine normierte Trefferfläche, zusammengestellt. Für eine für Verkehrsflugzeuge nach den Flugphasen Start/Landung und Transitflug einzeln aufgeschlüsselte Betrachtung der Absturzhäufigkeiten wird auf Nagra (2024a) verwiesen.

Mit der beschriebenen Vorgehensweise ergibt sich gemäss den ENSI-Berechnungsvorschriften für eine normierte virtuelle Trefferfläche eine unfallbedingte Absturzhäufigkeit über alle Flugzeugkategorien von 1.24E-10 $a^{-1}m^{-2}$. Die Bestimmung der jährlichen Absturzhäufigkeiten in Bezug auf die virtuelle Trefferfläche der geplanten BEVA wird in den späteren Bewilligungsschritten durchgeführt, da im Zuge der Rahmenbewilligung weder die genaue Anordnung noch die konkreten Abmessungen der Bauwerke festgelegt werden (vgl. Kap. 2).

Auch wenn sich in einigen hundert Metern Entfernung des Standorts vor über 50 Jahren ein durch einen Terroranschlag verursachter Flugzeugabsturz[17] ereignete, so zeigen die Ergebnisse der Analyse, basierend auf den Anforderungen der ENSI-A05, insgesamt, dass das Gefährdungspotenzial für einen unfallbedingten Flugzeugabsturz für den Standort grundsätzlich als gering eingestuft wird. Darüber hinaus sind die ermittelten jährlichen Absturzhäufigkeiten von Flugzeugen am Standort der BEVA vergleichbar mit denen an anderen Standorten von Kernanlagen in der Schweiz und bestätigen somit die Eignung des Standorts für den Bau und Betrieb einer BEVA.

Im Hinblick auf den zukünftigen Flugverkehr aller drei Flugzeugkategorien ist zu erwarten, dass die resultierenden Ergebnisse aus der Analyse auch für die Zukunft repräsentativ sind. So ist derzeit nicht mit einem relevanten Anstieg der Anzahl der Flugbewegungen am Flughafen Zürich zu rechnen. Gleichzeitig hat die Sicherheit in der Luftfahrt stetig zugenommen und sich seit Jahren positiv entwickelt. Auch ein Kapazitätsaufbau ist aufgrund der bereits hohen Auslastung des Flugverkehrs am Flughafen Zürich nicht geplant, sodass auch in Zukunft vergleichbare Absturzhäufigkeiten auf einem konstant niedrigen Niveau zu erwarten sind.

Unabhängig von den ermittelten Absturzhäufigkeiten werden sicherheitsrelevante Teile der BEVA entsprechend gegen Flugzeugabsturz ausgelegt (vgl. Kap. 5.3.4). Die Anforderungen zum Schutz der Anlage gegen Flugzeugabsturz werden im Baubewilligungsverfahren festgelegt.

Tab. 4-3: Zusammenstellung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten der verschiedenen Flugzeugkategorien, bezogen auf eine normierte Trefferfläche

Flugzeugkategorie	**Absturzhäufigkeit [$a^{-1}m^{-2}$]**	**Verteilung [%]**
Verkehrsflugzeuge davon	**1.00E-11**	**8.1**
> 300 t	*3.63E-13*	*0.3*
> 100 t bis ≤ 300 t	*9.27E-13*	*0.7*
> 50 t bis ≤ 100 t	*7.55E-12*	*6.1*
≤ 50 t	*1.19E-12*	*1.0*
Kampfflugzeuge	**4.21E-12**	**3.4**
Leichtflugzeuge & Hubschrauber	**1.10E-10**	**88.5**
Summe	**1.24E-10**	**100**

[17] Absturz einer Convair CV-990 am 21. Februar 1970 im Würenlinger Unterwald.

4.2.4 Störfälle bei anderen Betrieben

Die in Kap. 4.1.5 identifizierten Betriebe, die der Störfallverordnung unterstellt sind, werden nachfolgend einzeln eingeordnet und bewertet.

Zwischenlager für radioaktive Abfälle (Zwilag)

Die Zwilag besitzt eine gültige Rahmen- und Betriebsbewilligung und erfüllt alle Sicherheitskriterien in nuklearer und konventioneller Hinsicht. Die Überprüfung der im Zwilag möglichen Unfallszenarien zeigt, dass diese äusserst gering sind, da sowohl keine bedeutenden Explosionsquellen oder Brandlasten als auch keine toxischen Stoffe in relevantem Umfang vorhanden sind. Die zwischengelagerten radioaktiven Stoffe sind eingeschlossen, unterkritisch und hätten auch im Fall einer Freisetzung keinen Einfluss auf die Integrität der BEVA. Ein hypothetischer Einsturz von Bauten (Trümmersturz) hat aufgrund der Abstände sowie der adäquaten Auslegung der BEVA gegen schwere seltene Ereignisse wie ein Erdbeben oder den Flugzeugabsturz keine Auswirkungen auf die in ihr gehandhabten HAA. Es gibt somit keine Hinweise auf Gefährdungen, die von der Zwilag für die BEVA ausgehen können.

Für die Zwilag wurde im November 2018 zudem ein Kurzbericht gemäss StFV erstellt (Zwilag 2018). Dort wird festgehalten, dass innerhalb des Areals hauptsächlich Säuren und Laugen für den Betrieb des Plasmaofens und für die Dekontamination von radioaktiv verschmutzten Oberflächen eingesetzt werden. Weiterhin werden auch verschiedene Gase und Diesel gelagert. Bei Lagerung und Anwendung dieser Stoffe wurden keine Risiken mit grösserem Ausmass festgestellt. Mit den bereits bestehenden, umfassenden Sicherheitsmassnahmen können Störfälle mit einem schwerwiegenden Ausmass verhindert werden, bzw. die Störfallszenarien führen ausserhalb des Betriebsareals zu keinen Personenschäden (Zwilag 2018).

Paul Scherrer Institut

Es gibt keine Hinweise auf Gefährdungen (Brand, Explosionen, toxischen Stofftransport), die bei einem Unfall innerhalb der (nichtnuklearen) Betriebsteile des PSI auf das Hotlabor des PSI (PSI 2021) oder die Zwilag ausgehen. Diese Aussage trifft demnach auch auf die weiter entfernte, robust ausgelegte BEVA zu.

Das Hotlabor, in dem Untersuchungen unter hohen Alpha-Aktivitäten (Brennstoffversuche) einen wesentlichen Teil der Tätigkeiten darstellen, erfüllt alle Sicherheitskriterien in nuklearer und konventioneller Hinsicht. Es hat beim ENSI im Jahr 2014 als dem KEG-unterstellte Kernanlage ein Gesuch auf weitere Bewilligung eingereicht. Auf der Basis dieses Gesuchs wurden seitdem erhebliche materielle und prozessuale Anstrengungen unternommen, um das Forschungslabor auf einen entsprechend der aktuellen Kernenergie- und Strahlenschutzgesetzgebung geforderten Stand zu dokumentieren, nachzurüsten und zu modernisieren. Die für die Sicherheit des Hotlabors relevanten Vorkehrungen gegen Brand, Explosionen, eine mögliche Ausbreitung von chemisch gefährdenden Substanzen sowie eine radioaktive Freisetzung sind auf sehr hohem Niveau.

Mit der durch das ENSI explizit bestätigten aktualisierten Betriebsbewilligung wird die Erreichung des nachgerüsteten hohen Sicherheitsniveaus des Hotlabors bestätigt. Es gibt keine Hinweise auf Gefährdungen mit externer Wirkung auf die BEVA.

Kernkraftwerk Beznau

Das Kernkraftwerk Beznau (KKB) erfüllt alle Sicherheitskriterien in nuklearer und konventioneller Hinsicht. Das alle 10 Jahre mittels periodischer Sicherheitsüberprüfung nachgewiesene und erreichte Sicherheitsniveau der beiden KKB-Blöcke gibt keine Hinweise auf Gefährdungen, die von dieser Anlage für die BEVA ausgehen könnten.

Im KKB werden organische und anorganische Stoffe, Säuren und Laugen innerhalb der Betriebs-, Instandhaltungs- und Reinigungsprozesse genutzt. Für diese Stoffkategorien gibt es jeweils zulässige Maximalmengen sowie spezifisch sichere Lagerorte und Einsatzbestimmungen, welche auch ausgereiften Brand- und Explosionsschutzkonzepten unterliegen. Die betrieblichen Bedingungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Sicherheit bei Transport, Lagerung und Umgang der nichtnuklearen brennbaren, explosiven und sonstigen aggressiven Hilfsstoffe werden zudem periodisch vom ENSI, den kantonalen Brandschutzbehörden und der SUVA inspiziert und kontrolliert.

Das KKB stellt auch durch seine örtliche Distanz für die BEVA keine Gefährdung dar.

Holcim (Schweiz) AG

Das Zementwerk Holcim in Würenlingen ist der Störfallverordnung unterstellt, da Zementwerke aufgrund der grossen umgesetzten Stoffmengen ein erhöhtes Potenzial für Luft- und Gewässeremissionen in sich tragen. Dabei spielen bei Zementwerken generell in der Vergangenheit insbesondere Stickoxid-, Schwefeldioxid-, Staub- sowie Schwermetallabgaben eine Rolle, da sie die Gewässer- und Luftqualität massgeblich beeinträchtigen. Diese Herausforderung wurde in den letzten Jahrzehnten durch eine konsequente Modernisierung der Filtertechnologie sowie sowohl durch teilweise Rückführung von Ofenabgasen in den Brenner als auch durch ein verbessertes Brauchwassermanagement (z. B. geschlossene Kreisläufe) im Rahmen der gesetzlich bewilligten Schadstoffgrenzwerte gelöst. Diese Verbesserungsmassnahmen wurden ebenfalls für das Werk in Würenlingen konsequent umgesetzt.

Brände oder Explosionen mit massivem Schadstoffaustrag oder sonstigen schädlichen Auswirkungen auf die Umgebung werden in diesem Industriezweig durch geeignete Massnahmen seit Jahrzehnten erfolgreich vermieden. Das hochmoderne Holcim-Werk in Würenlingen stellt für die ca. 2.2 km entfernte BEVA keine Gefahr dar.

Weitere Betriebe im grösseren Umkreis

Weitere Betriebe ausserhalb des 3 km Radius sind von ihrer Lokalität in Fig. 4-6 einsehbar. Sie stellen aufgrund ihrer grossen Distanz keine Gefahren für die BEVA dar.

Militäranlagen

Nach Auskunft des eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) geht von militärischen Anlagen und Objekten sowie allfälligen militärischen Aktivitäten in der Umgebung der Anlage (beispielsweise Transporte) kein Gefährdungspotenzial aus, das die Eignung des Standorts in Frage stellen würde.

Fazit

Die Gefährdungsanalyse bzgl. der in der Nachbarschaft befindlichen Betriebe bzw. Anlagen kommt zum Schluss, dass der Standort für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet ist.

4.2.5 Störfälle bei Rohrleitungen

Untersuchungen bzgl. Unfällen bei unterirdisch verlegten Gasleitungen zeigen, dass fast 100 % der Unfälle aufgrund Beschädigungen durch Bauarbeiten zurückzuführen sind. Ein Totalversagen der TRAWO-Erdgasleitung im Würenlinger Unterwald ist aufgrund des nicht bebaubaren Waldgebietes prinzipiell nicht zu unterstellen. Typische Forstarbeiten an Waldwegen, Abflussrinnen etc. verlaufen ausschliesslich oberflächennah. Tiefergehende Arbeiten (mit Schädigungspotenzial der Leitung) im Bereich der markierten Erdgasleitungsschneise sind zudem bewilligungspflichtig.

Trotz der geringen Wahrscheinlichkeit eines Gasleitungsunfalls wird in Nagra (2024b) für beide in der Nachbarschaft verlaufenden Gasleitungen (vgl. Kap. 4.1.5) konservativerweise der massgebende Störfall[18] unterstellt und dabei die sich daraus ergebende Gefährdung für die BEVA am konservativsten Punkt minimaler Distanz durch Explosion und Wärmestrahlung bewertet. Die Analysen stützen sich auf die Grundlagen bzw. Rechenvorschriften der schweizerischen Erdgaswirtschaft ab. Aufgrund des generischen Charakters der Analysen (z. B. keine Berücksichtigung der Abschattung infolge standortspezifischer, topographischer Gegebenheiten oder vorgelagerter Hindernisse) sind die Ergebnisse als konservativ zu bewerten.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich aus einem Totalversagen am konservativsten Punkt minimaler Distanz zur BEVA mit nachfolgender Störfallausprägung durch Feuerball, Gaswolkenexplosion und Fackelbrand keine nachteiligen Auswirkungen am Standort in Form unzulässig hoher Wärmestromdichten oder Überdruckimpulse ergeben. Alle zu den Unfallabläufen ermittelten Druckspitzen und Wärmestromdichten liegen weit unterhalb kritischer Werte[19], die auf die Baustrukturen und die Betriebsabläufe der BEVA keinen nachteiligen Einfluss haben. Da die BEVA zudem durch eine ca. 20 m tiefe Böschung abgetrennt unterhalb des Waldplateaus erstellt wird (vgl. Fig. 4-1), dürften sowohl bei einem Feuerball als auch beim Fackelbrand zusätzliche Abschirmeffekte bzgl. der 70 bar Hochdruckgasleitung wirksam werden. Somit wäre bei solch einem Ereignis von jeweils noch niedrigeren Wärmestromdichten bzw. Wärmedosen und Überdrücken auszugehen, als es die unter den Bedingungen ebenen und freien Geländes durchgeführten Abschätzungen in Nagra (2024b) ausweisen.

Ein Waldbrand als Folge des Gasleitungsunfalls wird in Kap. 4.2.6, in dem eine spezifische Diskussion zur Gefährdung durch verschiedene Waldbrandauslöser geführt wird, diskutiert.

Aus Störfällen im Zusammenhang mit Rohrleitungen (Gasleitungen) ergeben sich für den Bau und Betrieb einer BEVA keine Gefährdungen. Der Standort ist geeignet.

4.2.6 Waldbrandgefährdung

Die Nähe zum Waldrand ist keine ungewöhnliche Randbedingung für Kernanlagen. Eine systematische Einordnung und Bewertung der Waldbrandgefährdung erfolgt in Nagra (2024b), deren Ergebnisse nachfolgend zusammenfassend wiedergegeben werden.

Aufgrund der geographischen, topographischen, standörtlichen und waldbaulichen Voraussetzungen ist die Wahrscheinlichkeit eines Waldbrands in unmittelbarer Nähe zum Projektperimeter als gering einzuschätzen. Dies begründet sich darin, dass der Würenlinger Unterwald im Schweizer Mittelland liegt, und in dieser Region Waldbrände nachweisbar selten sind[20] sowie eine relativ hohe Luftfeuchtigkeit und dauerhaft gute Wasserversorgung durch die Nachbarschaft der Aare vorliegt. Im Unterwald, der direkt an den Projektperimeter grenzt, trat seit mind. Mitte der 1950er Jahren, also nach Beginn der kerntechnischen Aktivitäten, kein Waldbrand auf.

---

[18] Totalversagen der Erdgasleitung, definiert durch eine Leckgrösse grösser oder gleich dem Leitungsdurchmesser.

[19] Der maximal am Standort ermittelte Überdruck beträgt kleiner 0.1 bar. Die maximale Wärmestromdichte (für 17 s) beträgt kleiner 15 kW/m^2. Zum Vergleich: Bei 0.07 bis 0.14 bar wird das Versagen von Befestigungen für Wellblech mit anschliessendem Verbeulen sowie ein Versagen von Holzpaneelen mit anschliessendem Bruch beobachtet. Bei 10 kW/m^2 erfolgt noch keine Zündung von Holz, Wellpappe und Papier bei unendlich langer Einwirkung (ohne Flammenkontakt). Bei 30 kW/m^2 kommt es nach ca. 30 Minuten zu Verformungen von Stahlprofilen.

[20] Gemäss zentraler Waldbranddatenbank «Swissfire» ist im Mittelland die Waldbrandhäufigkeit sowie die durch Brand versehrte Fläche seit Jahrzehnten äusserst gering. Für den Kanton AG wurden seit dem 18. Jahrhundert bis zum Jahr 2018 insgesamt 98 kleinere Waldbrände einer Gesamtfläche von ca. 21 ha bilanziert, was eine niedrige Häufigkeit an Waldbränden bedeutet.

Aus Anforderungen der Sicherheit, Sicherung und Raumwirksamkeit ist zwischen dem Anlagenperimeter und dem Unterwald ein 20 m breiter sogenannter Eingliederungssaum vorgesehen (vgl. Fig. 3-1). In diesem verlaufen ein Waldweg (Nietenbuckweg) und eine Freihaltefläche. Der Eingliederungssaum ist somit durch eine deutlich niedrigere und begrenztere Brandlast charakterisiert als der natürliche Wald. Infolge baulicher Massnahmen für die Sicherung als auch für die Bereitstellung von Verkehrs- und Logistikfläche grenzt die BEVA zudem nicht direkt an den Eingliederungssaum an, sondern weist einen zusätzlichen Abstand auf (gemäss heutiger Planung von mehr als 10 m, vgl. Fig. 3-2). Durch diesen, gesamthaft etwa 30 m betragenden Abstand zum topographisch bedingt erhöht liegenden (vgl. Fig. 4-1), natürlichen Wald werden die potenziellen Auswirkungen eines perimeternahen Waldbrandes auf die BEVA, insbesondere die thermische Strahlung und die thermische Dosis, reduziert. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass ein solcher Streifen mit einer Breite von mehr als 30 m in etwa einer Baumlänge entspricht, sodass in diesem Fall eine Brandausbreitung nur noch über Funkenflug erfolgen kann. Auf dem Anlagenperimeter befinden sich zudem keine bedeutenden natürlichen Brandlasten, auf die ein Brand übergreifen kann.

Unter diesen Bedingungen, d. h. unter diesem Abstand, stellt ein Waldbrand keine Gefahr für die strukturelle Integrität der BEVA dar. Grundsätzlich bietet Beton einen guten Schutz gegen Brand. Insgesamt wird eine Degradation der ohnehin in Massivbauweise erstellten BEVA-Strukturintegrität durch einen Waldbrand ausgeschlossen.

Unabhängig davon wird bei der Entstehung eines Brandes im Unterwald oder infolge eines Unfalls auf den Verkehrswegen dieser zeitnah bekämpft. Zieht man die geringe Distanz der direkt benachbarten Betriebsfeuerwehr des PSI und der örtlichen Feuerwehren (Würenlingen, Villigen Geissberg und Döttingen) in Betracht und berücksichtigt die sehr gute Zugänglichkeit für Löscheinsätze im Unterwald, so kann eine unkontrollierte und weitläufige Ausbreitung eines lokalen Waldbrandes im Unterwald bis hin zum Projektperimeter praktisch ausgeschlossen werden. Durch die unmittelbare Nähe der Aare stehen – auch in Trockenperioden – zudem praktisch unbegrenzte Löschwasserreserven zur Verfügung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein Waldbrand im Würenlinger Unterwald keine Gefährdung für die nukleare Sicherheit der BEVA darstellt. Der Standort ist für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet.

4.2.7 Gefährdungspotenzial infolge gravitativer Gefahren

In Nagra (2024g) und Nagra (2024h) werden, basierend auf den geologischen und hydrogeologischen Bedingungen am Standort, die gravitativen Gefahren qualitativ beschrieben und bewertet. Die Bewertung kommt aufgrund der im Folgenden zusammengefassten Ergebnisse zum Schluss, dass der Standort für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet ist.

Steinschlag, Fels- oder Bergsturz

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

Rutschungen

Permanente Rutschungen können aufgrund der Geländemorphologie sowie der Untergrundverhältnisse im Anlagenperimeter ebenfalls ausgeschlossen werden.

Bezüglich spontaner Rutschungen resp. Hangmuren gilt es zu berücksichtigen, dass der östliche Rand des Anlagenperimeters im Bereich einer (Schotter-)Terrassenkante verläuft. Diese weist eine Böschungshöhe von insgesamt knapp 20 m (vgl. auch Fig. 4-1) und eine Böschungsneigung von teilweise bis zu über 30° auf. Aufgrund der Untergrundverhältnisse (geringmächtige, natürliche Oberflächenschichten über mehr als 20 m mächtigem Niederterrassenschotter), der Materialzusammensetzung (Schotter, bestehend grösstenteils aus dicht gelagertem, sauberem Kies mit reichlich Sand sowie Steinen und Blöcken, vgl. Kap. 4.5), dem daraus resultierenden inneren Reibungswinkel von grösser 30°, der guten Wasserdurchlässigkeit und dem tief liegenden Grundwasserspiegel (vgl. Kap. 4.4.2) ist das Potenzial für Hangmuren generell sehr gering. Lokale Hangmuren von feinkörnigeren, natürlichen Oberflächenschichten aus dieser Terrassenkante können bei extremen Niederschlägen aber nicht vollständig ausgeschlossen werden. Mit einfachen baulichen Massnahmen kann die Gefahr einer Rutschung jedoch beherrscht werden und stellt keine Gefahr für die BEVA dar. Aktuell ist die natürlich entstandene Terrassenkante bewaldet.

Muren, Übersarung, Lawinen und Blitzfluten

Eine Gefährdung des Projektperimeters durch Muren oder Übersarung kann ausgeschlossen werden, da in der Umgebung des Projektperimeters keine Gerinne mit relevantem Gefälle und kein relevantes Sammelgebiet vorhanden sind. Eine Gefahr für Übersarung besteht lediglich unterhalb der Felshänge/-böschungen im Gebiet westlich der Aare, wobei Übersarungen aus diesem Gebiet den Projektperimeter nicht mehr erreichen würden.

Weitere gravitative Naturgefahren (Lawinen, Blitzfluten) werden aufgrund der Topografie und des geringen Gefälles in der Umgebung des Projektperimeters, des Bewuchses und der Niederschlagsmengen ebenfalls als nicht relevant beurteilt. Der Standort ist geeignet.

4.3 Meteorologie und Klima

Zur Charakterisierung des Standorts in Bezug auf das Potenzial meteorologischer und klimatologischer Gefährdungen werden die Verhältnisse sowohl qualitativ als auch quantitativ über die statistische Auswertung von Messdaten spezifischer Parameter in Nagra (2024i) beschrieben und ausgewertet. Bei der Ermittlung der Gefährdung wird auf bestehende Datensätze und Auswertungen zurückgegriffen, und es werden neue extremwertstatistische Analysen mit erweiterten Datensätzen durchgeführt. Die Methode, Daten (inkl. Datenqualität) und Bewertung orientieren sich dabei am Vorgehen bestehender standortspezifischer Gefährdungsanalyen anderer Schweizer Kernanlagen. Dabei werden folgende Gefährdungen behandelt, deren Kernergebnisse nachfolgend zusammengefasst werden:

- maximale und minimale Lufttemperatur
- Wind und Tornado
- Niederschlag (Starkregen, Schnee, Schneelast, Hagel und vereisender Regen)
- Blitze

Allgemein lässt sich feststellen, dass das Klima am Standort den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage entspricht und darüber hinaus die Meteorologie am Standort typisch für die Region Nordschweiz bzw. das Schweizer Mittelland ist.

Die Ergebnisse der extremwertstatistischen Analyse zeigen zudem, zusammen mit den zahlreichen bereits bestehenden Studien, dass für den Standort keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen bzgl. extremer meteorologischer und klimatologischer Verhältnisse, bei denen auch erwartbare Einflüsse des Klimawandels entsprechend berücksichtigt wurden, vorliegen. Die standortspezifischen Parameter, die für ein Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr in Tab. 4-4 zusammengefasst sind, liegen innerhalb der üblichen, für die Auslegung von kerntechnischen Bauten und Strukturen festgelegten Grenzwerte.

Insgesamt ist der Standort somit durch stabile meteorologische und klimatologische Verhältnisse gekennzeichnet. Der Standort ist für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet.

Tab. 4-4: Gefährdungsannahmen (Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr) am Standort unter Berücksichtigung des Klimawandels

(Nagra 2024i)

Gefährdungen	Gefährdungsannahmen
Hohe Lufttemperatur	+44.5 °C
Tiefe Lufttemperatur	-30.0 °C
Extremer Wind	Tornado: 50 m/s, Wind: 33.5 m/s
Starkregen	106 mm/2h
Schneelast	2.0 kN/m^2
Hagel (Durchmesser, Geschwindigkeit)	15 cm, 53 m/s
Vereisender Regen (Flächenlast)	0.45 kN/m^2
Blitze (Stromstärke)	250 kA

4.4 Hydrologie

4.4.1 Oberflächengewässer

Das Oberflächenwassersystem im Gebiet des Standorts wird von der Aare dominiert, gleichwohl gibt es weitere kleine Zuflüsse im angrenzenden Waldgebiet (beispielsweise den Dorfbach nördlich des Anlagenperimeters, vgl. Fig. 4-1). Der Normalpegel der Aare beim Standort liegt unter 326 m ü. M (Nagra 2024g). Der Standort der BEVA hat eine Geländehöhe von 335 m ü. M. und liegt damit mehr als 9 m oberhalb des Normalpegels.

4.4.2 Grundwasser

Der Projektperimeter liegt über dem ausgedehnten, bis zu über 2 km breiten und lokal bis zu über 20 m mächtigen Grundwasserstrom des unteren Aaretals. Als Grundwasserleiter wirkt der Niederterrassenschotter, der eine hohe bis sehr hohe Durchlässigkeit aufweist. Die grösstenteils feinkörnige Moräne sowie der Felsuntergrund bilden den Grundwasserstauer (vgl. Kap. 4.5). Die Speisung des Grundwasserstroms erfolgt durch seitlichen, unterirdischen Zufluss, durch direkte Versickerung von Niederschlägen und durch Infiltration von der im Bereich des Projektperimeters am linken Rand des Grundwasserstroms verlaufenden Aare. Das Grundwasser fliesst mit einem Gefälle von ca. 0.15 % in Richtung Nordosten. Im Bereich des Projektperimeters liegt der mittlere Grundwasserspiegel rund 11 m unter Terrain. Die Schwankungen des Grundwasser-

spiegels sind als Folge der ausgleichenden Wirkung der Aare im Allgemeinen gering. In den Pumpwerken der näheren Umgebung werden bei normalen Wasserständen jahreszeitliche Schwankungen von lediglich ca. 1 bis 1.5 m registriert. Die Fliessgeschwindigkeit liegt bei ca. 7 m pro Tag. Der gesamte Projektperimeter ist gemäss der Gewässerschutzkarte dem Gewässerschutzbereich A_u zugeordnet. Für weitere Details zum Grundwasser am Standort wird auf Nagra (2024g) verwiesen.

4.4.3 Externe Überflutung

Die Charakterisierung des Standorts in Bezug auf das Potenzial einer externen Überflutung anhand der standortspezifischen Bedingungen ist sowohl quantitativ als auch qualitativ in Nagra (2024h) beschrieben. Dabei werden folgende Gefährdungen behandelt, deren Kernergebnisse nachfolgend zusammengefasst sind:

- Überflutung der Anlage infolge Ausuferung der Aare, ausgelöst durch grossräumige Starkniederschläge oder durch ein Versagen relevanter wasserbaulicher Einrichtungen in der Aare ober- oder unterhalb des Anlagestandorts
- Überflutung der Anlage durch Oberflächenabfluss aus dem umgebenden Einzugsgebiet, ausgelöst durch lokale Starkniederschläge
- Gravitative Gefahren, induziert durch Starkniederschläge oder als Folge extremer Abflüsse in anliegenden Flussgerinnen (dokumentiert in Kap. 4.2.7)

Gefährdung durch Aare-Hochwasser

In der breit angelegten EXAR-Studie (Extremhochwasser Aare-Rhein) wurden die Grundlagen für die Beurteilung der standortspezifischen Hochwassergefährdung der Aare hergeleitet (Andres et al. 2021). Im Rahmen der EXAR-Studie wurden für 10'000-jährliche Niederschlagsereignisse die Auswirkungen möglicher Abflussszenarien im Einzugsgebiet der Aare untersucht und anhand von Gefährdungskurven beurteilt. Die Abflussszenarien werden dabei unterschieden zwischen ausschliesslich durch Niederschlagsereignisse ausgelöste Extremhochwasser (Initialereignisse) und solchen in Kombination mit Bauwerkversagens-, Schwemmholzprozessen und morphologischen Prozessen.

Die Ergebnisse der Studie weisen nach, dass sämtliche Initialereignisse (hydrologische Hochwasserereignisse) im Gerinne der Aare abgeleitet werden können und nicht zu einer Überflutung im Bereich des Anlagenperimeters führen (vgl. Fig. 4-8). Dies gilt auch bei kombiniertem Versagen von wasserbaulichen Einrichtungen in der Aare[21]. Der Standort der BEVA ist somit vor Hochwasser geschützt. Dies gilt zudem für Szenarien, bei denen eine Verklausung der PSI-Brücke durch Schwemmholzfrachten betrachtet wird, deren Häufigkeiten deutlich kleiner als 10^{-4} pro Jahr betragen. Auch bei diesen Szenarien findet kein Zufluss in den Anlagenperimeter und damit keine Überflutung statt. Folgeanalysen des Zwilag und des PSI haben ferner gezeigt, dass auch bei solchen Abflussszenarien im Uferbereich mit der gegenwärtigen Befestigung keine kritische laterale Erosion zu erwarten ist (Kuhlmann et al. 2022).

[21] Das Versagen wasserbaulicher Einrichtungen wurde ebenfalls im Rahmen der EXAR-Studie modelliert. Für den Beurteilungsperimeter PSI oder Beznau haben solche Ereignisse aber keine Auswirkungen. Beispielsweise würde die Flutwelle infolge eines Sperrenbruchs des Sihlsees spätestens bei den Sihl-Durchlässen am Hauptbahnhof Zürich zu einer grossflächigen Überschwemmung führen, wodurch stromabwärts beim Anlagenperimeter nur ein stark gedämpfter Anstieg des Abflusses der Aare zu erwarten wäre (Andres et al. 2021).

Bei einem extremen (Fluss-)Hochwasser besteht wahrscheinlich nur ein zeitlicher Abstand von wenigen Stunden zwischen oberflächiger (Fluss-)Hochwasserspitze und Grundhochwasserspitze. Aus diesem Grund kann konservativ angenommen werden, dass (Fluss-)Hochwasser und ein Anstieg des Grundwassers im Bereich der BEVA gleichzeitig auftreten. Die bisher beobachteten langjährigen Hochwasserstände des Grundwassers liegen bei 325.5 m ü. M. Für ein 10'000-jährliches Grundwasser-Hochwasserereignis wurde für den Standort eine Höhe von 328.7 m ü. M. ermittelt (abgeleitet vom 10'000-jährlichen Hochwasserspiegel gemäss Andres et al. (2021)).

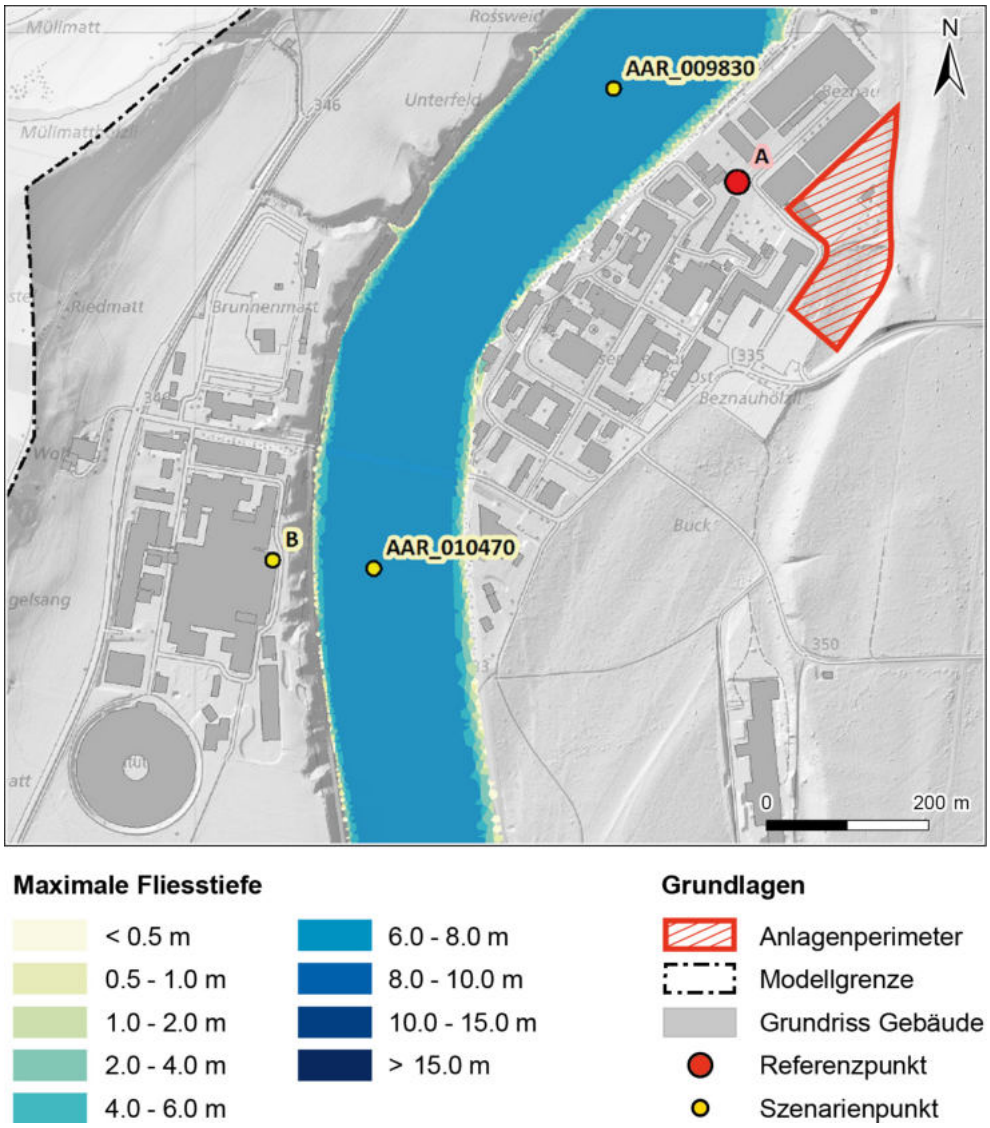

Fig. 4-8: Maximale Fliesstiefen während der gesamten Simulationsdauer für ein Hochwasserszenarium mit einer Überschreitungshäufigkeit von ca. 10^{-4}/Jahr

Das Wasser wird ausschliesslich im Gerinne der Aare abgeleitet und führt nicht zu einer Überflutung im Bereich des Anlagenperimeters (Andres et al. 2021).

Starkniederschläge (Oberflächenabfluss)

Starkniederschlagereignisse führen zu keiner Gefährdung der BEVA. Ein möglicher Oberflächenabfluss aus der Umgebung fliesst topographisch bedingt nicht in bedeutenden Mengen zum Standort. Das Wasser versickert im Wald oder wird aufgrund der erhöht liegenden Bahnlinie und der Döttingerstrasse auf der östlichen Ebene von Würenlingen zurückgehalten. D. h., die erhöht liegende Bahnlinie und Strasse weisen für die aus Osten kommenden, flächigen Abflüsse eine Barrierewirkung auf, erwirken somit in den Flächen östlich von Strasse und Bahn eine Retention. Der Oberflächenabfluss aus der Ebene Würenlingen erreicht somit den Standort der BEVA nicht. Der begrenzte Abfluss durch den Dorfbach gelangt entweder entlang des Bachlaufs ausreichend nördlich des Standorts in die Aare, versickert im Wald bzw. wird durch Retentionsmulden im Wald zurückgehalten, die bei Überlaufen, bedingt durch die Topologie, in Richtung Norden entwässern. Dies gilt auch bei Verklausung der Bachdurchlässe im Unterlauf. Für eine detaillierte Betrachtung und Diskussion wird auf Nagra (2024h) verwiesen.

Durch die spezielle Lage der Wasserscheide im Unterwald und die Rückhaltewirkung von Strasse und Bahn mit den ausgedehnten Retentionsflächen für Abflüsse aus dem obliegenden Gebiet reduziert sich das effektiv beitragende Einzugsgebiet für Zuflüsse zum Anlagenperimeter auf die bewaldeten Flächen westlich von Würenlingen bzw. südlich der Wasserscheide. Da sich im bewaldeten Teil selbst bei hohen Intensitäten kaum wasserführende Gerinne bilden und sich keine grossen Retentionsräume in Richtung Anlagenperimeter entleeren, ist der unter konservativen Annahmen abgeschätzte Zufluss zum Anlagenperimeter sowohl bei kurzen intensiven Niederschlägen als auch bei Tagesniederschlägen sehr gering (kleiner 700 l/s, Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr) und gefährdet die nukleare Sicherheit der Anlage nicht.

Gesamtbeurteilung

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen einer externen Überflutung zeigen, zusammen mit den zahlreichen bereits bestehenden Studien, dass für den Standort keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen vorliegen:

- Der Standort ist vor Hochwasser geschützt, auch bei extremen Wasserständen der Aare. Dies gilt auch in Kombination mit dem Versagen von wasserbaulichen Einrichtungen.
- Ein starkniederschlagbedingter Oberflächenabfluss aus der Umgebung fliesst, topographisch bedingt, nicht in bedeutenden Mengen zum Anlagenperimeter.
- Durch Starkniederschläge induzierte gravitative Ereignisse wie grössere Hangrutschungen können infolge der lokalen geologischen Bedingungen ausgeschlossen werden (dokumentiert in Kap. 4.2.7).

Der Standort ist für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet.

4.5 Geologie und Baugrundverhältnisse

In Nagra (2024g) werden, basierend auf vorhandenen geologischen und hydrogeologischen Grundlagen und aktuellen Datenreihen, die Baugrundverhältnisse als Basis für die weitere Projektierung im Sinne einer Voruntersuchung gemäss SIA 267 detailliert beschrieben sowie eine bautechnische Bewertung durchgeführt. Die Bewertung kommt aufgrund der im Folgenden zusammengefassten Aussagen zu den geologischen Verhältnissen und der Grundwassersituation (vgl. Kap. 4.4.2) zum Schluss, dass der Standort hinsichtlich des Baugrunds für den Bau und den Betrieb einer BEVA geeignet ist.

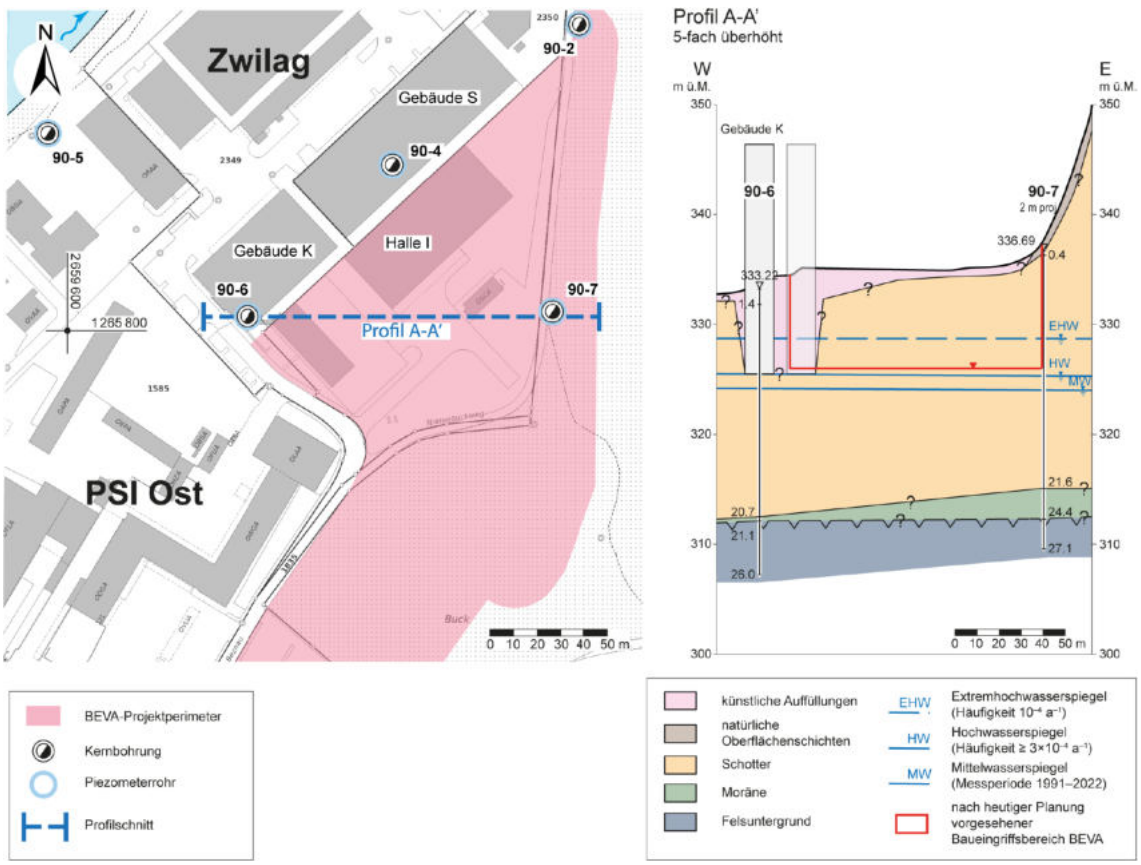

Fig. 4-9: Karte mit den Baugrunduntersuchungen am Standort Zwilag und daraus abgeleitetes Modell (Profil A–A') des Baugrunds für den Projektperimeter

Nagra (2024g)

Im Rahmen der Bautätigkeiten für die Zwilag sowie umliegender Bauten wurden umfangreiche Sondierungen[22] durchgeführt, die zu einem umfassenden Bild des Baugrunds beitragen, welches in Fig. 4-9 gezeigt und nachfolgend beschrieben wird.

Künstliche Auffüllungen

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

Natürliche Oberflächenschichten

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

[22] Zu nennen sind insbesondere die Sondierbohrungen im Jahr 1990, die das Quartär bis in den Felsuntergrund durchteuften.

Niederterrassenschotter

Unter den Auffüllungen bzw. den Oberflächenschichten folgt ab ca. 0.4 – 10.0 m Tiefe der Niederterrassenschotter. Im Hinterfüllungsbereich der Gebäude ist die Schotterobergrenze heute entsprechend tiefer zu erwarten. Die ursprüngliche natürliche Schottermächtigkeit beträgt im Anlagenperimeter ca. 15 – 20 m, lokal im östlichen Hangbereich auch über 20 m. Der Schotter setzt sich grösstenteils aus sauberem Kies mit reichlich Sand sowie Steinen und Blöcken zusammen. In den älteren Sondierungen wurden teilweise Blöcke mit Durchmesser bis zu 60 cm festgestellt, wobei erfahrungsgemäss vereinzelt auch noch etwas grössere Blöcke auftreten können. Der Anteil der Steine und Blöcke beträgt schichtweise bis ca. 30 Gew.-%. Im obersten Meter des Schotterkomplexes sowie schichtweise auch in grösserer Tiefe ist der Schotter schwach siltig ausgebildet. Der Schotter weist in den obersten rund 1 – 2 m eine mittlere und darunter eine hohe Lagerungsdichte auf und ist entsprechend als gut tragfähig und nur wenig setzungsempfindlich zu beurteilen.

Moräne

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

Felsuntergrund

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

4.6 Seismizität

Die Charakterisierung des Standorts in Bezug auf das Potenzial der Gefährdungen infolge eines Erdbebens ist detailliert in Nagra (2024c) gemäss den gesetzlichen und behördlichen Vorgaben dokumentiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammenfassend wiedergegeben und bezüglich der Standorteignung bewertet. Die Erdbebengefährdung wird dabei allgemein in drei Komponenten gegliedert, die separat betrachtet und bewertet werden:

- Verschiebungsgefährdung für den Fall eines Bruches durch Teile der Anlage (Kap. 4.6.1)
- Gefährdung durch die Bodenbewegung infolge der Erdbebenwellen (Kap. 4.6.2)
- Gefährdung durch geologisch-induzierte Prozesse wie Hangrutschungen oder Bodenverflüssigung, die durch Erdbeben hervorgerufen werden können (Kap. 4.6.3)

Für den Standort liegen mit den Untersuchungen der in unmittelbarer Nachbarschaft befindlichen Kernanlagen (KKB, Zwilag sowie PSI) umfangreiche Daten vor, die für die Bewertung der Erdbebengefährdung herangezogen und mit der breiten Datenbasis aus der Standortsuche der Nagra ergänzt werden. Die detaillierten geologischen Grundlagen sind in Nagra (2024g) dokumentiert (vgl. auch Kap. 4.5).

Die instrumentelle, wie historisch belegte Aufzeichnung von Erdbeben in der Schweiz ergeben ein umfassendes Bild der seismischen Aktivität. Gemäss Fig. 4-10 ist die Aktivität auf die Zentralschweiz und das Wallis sowie den Oberrheingraben bei Basel konzentriert. Der Standort der BEVA befindet sich in der seismisch ruhigsten Region der Schweiz. Diese Aussage wird durch die Betrachtung der Neotektonik (Nagra 2024f) gestützt, bei der mittels einer Vielzahl komplementärer Methoden geschlussfolgert werden kann, dass es am Standort keine Hinweise auf rezente tektonische Deformationen gibt.

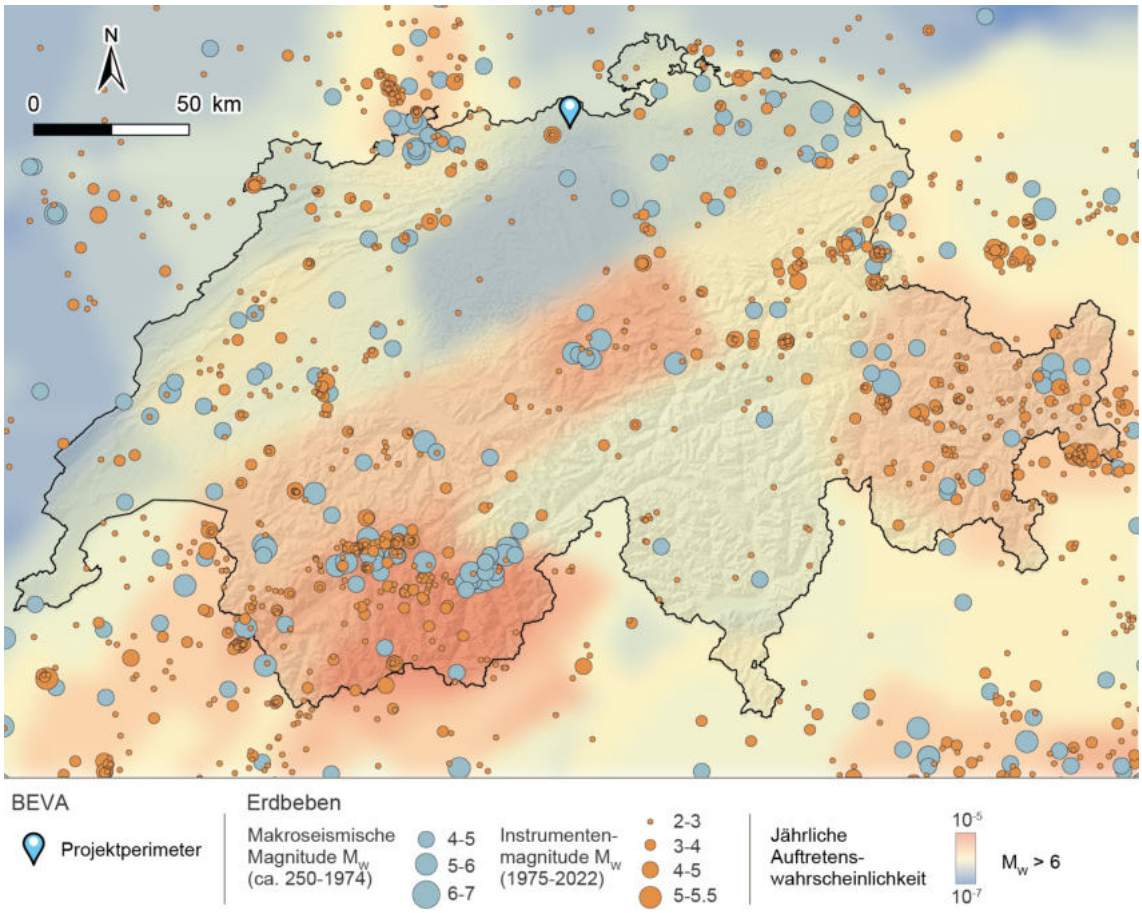

Fig. 4-10: Darstellung des Schweizer Erdbebenkatalogs des SED (Fäh et al. 2011) inkl. einer Aktualisierung bis einschliesslich 30.09.2023 zusammen mit der modellierten Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden $M_W \geq 6$ in der Schweiz, basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen 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 × 0.05° Breite (entspricht ca. 21 km^2) für Herdtiefen < 15 km. Zum Vergleich sind die effektiv erfassten Erdbeben mit $M \geq 2$, bzw. historisch dokumentierten Erdbeben mit $M \geq 4$ dargestellt.

4.6.1 Verschiebungsgefährdung

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

4.6.2 Gefährdung durch Bodenbewegung

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

Für den Standort werden die Resultate des ENSI-2015 Modells, die für das 1.25 km nördlich liegende KKB ermittelt wurden, übertragen. Dabei werden für die Bestimmung der lokalen Verstärkung angepasste Geschwindigkeitsprofile entwickelt, die auf den bestehenden Sondierungen am Standort basieren. Die Übertragbarkeit der Gefährdungsannahmen nach ENSI-2015 für das KKB auf den Standort der BEVA wird so verifiziert.

Die Erdbebengefährdung durch Bodenerschütterungen wird durch ein Spektrum der Bodenbeschleunigung, die am Standort mit einer Überschreitungshäufigkeit von 10^{-3} und 10^{-4} pro Jahr zu charakterisieren ist, spezifiziert. Die seismische Gefährdung am Standort 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. Aus den resultierenden Gefährdungsannahmen ergeben sich somit keine besonderen Herausforderungen für eine erdbebensichere Auslegung der BEVA entsprechend der relevanten Vorgaben. In Bezug auf die seismische Gefährdung ist die Standorteignung daher nachgewiesen.

4.6.3 Gefährdung durch geologisch-induzierte Prozesse

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

4.6.4 Gesamtbeurteilung

Hinsichtlich der Erdbebengefährdung weist der Standort gesamthaft keine Besonderheiten auf. Eine Verschiebungsgefährdung kann für den Standort ausgeschlossen werden. Aus dem geologischen Umfeld ergeben sich keine weiteren Gefährdungen. Die Analyse der Erdbebengefährdung kommt zum Schluss, dass der Standort für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet ist.

4.7 Zusammenfassende Bewertung und Standorteignung

Der Standort weist hinsichtlich der Eignung günstige Eigenschaften auf und hat sich für die verschiedenen benachbarten nukleartechnischen Anlagen bislang bestens bewährt.

Beurteilung der Naturgefahren am Standort

Der Standort liegt angrenzend an ein bestehendes Industrieareal in einem bewaldeten Gebiet im unteren Aaretal und ist ausreichend gegen Naturgefahren geschützt. Die geologischen und tektonischen Voraussetzungen des Terrains mit seinem Schotter- und Kiesbett auf Felsuntergrund haben sich bereits bei den früheren Bauvorhaben von Kernanlagen auf dem Areal als gut tragfähiger und wenig setzungsempfindlicher Baugrund erwiesen. Die umgebende Topologie zeigt eine Kote des Areals ausreichend weit oberhalb des Aare-Wasserspiegels sowie oberhalb des Grundwasserspiegels, sodass auch extreme Flusshochstände keine Gefahr für die BEVA und ihre Fundamente bedeuten. Ebenso sind die Neigung des umgebenden Geländes und die Bodenbeschaffenheit unkritisch: Hangrutschung, Bodenerosion und Meteorwasserabfluss stellen für die Anlage keine Gefährdung dar. Die Analysen zeigen, dass Hochwasser als externes auslösendes Ereignis daher ausgeschlossen werden kann. Die seismische Gefährdung des regionalen Untergrundes ist ebenfalls sehr gut erforscht und weist gesamthaft keine Besonderheiten auf. Eine Verschiebungsgefährdung kann zudem ausgeschlossen werden. Die Region ist seit Jahrzehnten mit mehreren meteorologischen Stationen sehr genau überwacht. Aktuell durchgeführte Extremwetteranalysen – wobei potenzielle Auswirkungen des Klimawandels einbezogen wurden – bestätigen die langjährigen Erfahrungswerte. Der Gefahr eines auf das Areal übergreifenden Waldbrandes wird mit ausreichender Distanz der BEVA zum Waldrand bzw. mit der Reduzierung von Brandlasten (Freihaltung) begegnet.

Beurteilung der zivilisatorischen Gefahren am Standort

Im näheren Umfeld sind keine zivilisatorischen Gefährdungsquellen für die BEVA auszumachen. Relevante Betriebe, die der Störfallverordnung unterliegen, befinden sich in ausreichend grossem Abstand. Von militärischen Anlagen und Objekten sowie allfälligen militärischen Aktivitäten in der Umgebung der Anlage (z. B. Transporte) geht ebenso kein Gefährdungspotenzial aus. Die Abklärung bei den direkt angrenzenden Anlagen des PSI und der Zwilag ergaben keine Gefahrenpotenziale für die BEVA. Für die 70 bar Hochdruckgasleitung sowie 5 bar Gasleitung sind die entsprechenden Unbedenklichkeitsnachweise für Brand- und Explosionseinwirkung infolge eines Totalversagen der Gasleitung erbracht. Östlich des Standorts verläuft in ca. 900 m Distanz einerseits die Bahnlinie Turgi – Koblenz als auch parallel dazu die Hauptstrasse Nr. 5, auf welchen unregelmässig Gefahrguttransporte durchgeführt werden. Auch ein unterstellter maximaler Gefahrguttransportunfall (Explosion und Brand) hat keine Auswirkungen auf die BEVA.

Die über die letzten Jahrzehnte von den nahe gelegenen KKW Leibstadt und Beznau sowie durch das PSI und Zwilag aktualisierten Häufigkeitsanalysen für einen Flugzeugabsturz decken sich mit den aktuellen Analysen für die BEVA. Es ergeben sich durchwegs sehr niedrige Absturzhäufigkeiten für alle Grössenklassen heutiger Flugzeuge. Aufgrund der limitierten Pistenausbaumöglichkeiten des Flughafens Zürich ist auch künftig nicht mit einer wesentlich grösseren Anzahl von regionalen Flugbewegungen zu rechnen. Für die massgeblichen Militärmaschinen ist die Absturzhäufigkeit ebenfalls sehr niedrig.

Fazit

Die sicherheitstechnische Eignung aus dem Blickwinkel natürlicher und zivilisatorischer Gefahren sowie hinsichtlich der Standorteigenschaften hat sich ausnahmslos bestätigt. Die standortspezifischen Untersuchungen zeigen übereinstimmend, dass der Standort für den Bau und den Betrieb einer BEVA geeignet ist.

5 Auslegungsgrundlagen zur nuklearen Sicherheit und Einordnung des Gefährdungspotenzials einer BEVA

Damit eine Kernanlage in der Schweiz betrieben werden darf, wird gemäss Art. 4 KEG der Schutz von «Mensch und Umwelt vor Gefährdungen durch ionisierende Strahlen» gefordert. Diesem Anspruch folgend, dürfen somit radioaktive Stoffe «nur in nicht gefährdendem Umfang freigesetzt werden», und «es muss insbesondere Vorsorge getroffen werden gegen eine unzulässige Freisetzung radioaktiver Stoffe sowie gegen eine unzulässige Bestrahlung von Personen im Normalbetrieb und bei Störfällen».

Der Schutz von Mensch und Umwelt wird im Zuge des RBG anhand der Einhaltung der grundlegenden Schutzziele und dem der BEVA zugrunde liegenden gestaffelten Barrieren- und Schutzkonzepts dargelegt[23]. Dabei wird das Gefährdungspotenzial einer BEVA aufgezeigt und im Vergleich zu anderen Kernanlagen eingeordnet. Die Einordnung stützt sich dabei auf bestehende quantitative Analysen dieser Anlagen.

5.1 Nukleartechnische Schutzziele

Die Gewährleistung ausreichender nuklearer Sicherheit einer Kernanlage wird gemäss Art. 7 KEV und in Anlehnung an Art. 1 Bst. d der UVEK-Verordnung (UVEK 2009) durch die Einhaltung der grundlegenden Schutzziele

- Kontrolle der Reaktivität
- Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle
- Einschluss radioaktiver Stoffe
- Begrenzung der Strahlenexposition

gewährleistet. Diese Schutzziele werden nach Art. 2 Abs. 3 UVEK-Verordnung in jedem Fall eingehalten, wenn für Kernanlagen, die keine Kernkraftwerke sind, die Anforderungen nach Art. 7 und Art. 8 UVEK-Verordnung[24] erfüllt sind.

In den folgenden Kapiteln wird die Einhaltung der Schutzziele anhand des gestaffelten Barrieren- und Schutzkonzepts und des Gefährdungspotenzials einer BEVA – auf Basis dessen die Einhaltung der Dosiswerte gemäss Art. 7 der UVEK-Verordnung aufgezeigt wird – diskutiert. Zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit im Normalbetrieb und bei Störfällen wird zudem entsprechend Art. 7 KEV eine gestaffelte Sicherheitsvorsorge gefordert. Für die BEVA wird die gestaffelte Sicherheitsvorsorge, soweit diese für die Erfüllung der Anforderungen nach Art. 7 und 8 der UVEK-Verordnung erforderlich ist, entsprechend umgesetzt.

---

[23] Eine Rahmenbewilligung kann erteilt werden, wenn «der Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt werden kann» (Art. 13 KEG), die Bau- bzw. Betriebsbewilligung wird erteilt, wenn «der Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet wird» (Art. 16 bzw. 20 KEG).

[24] Art. 7 UVEK: «…für jeden angenommenen Störfall [ist] nachzuweisen, dass die Dosiswerte gemäss Art. 8 KEV und Art. 125 StSV eingehalten werden» und «die Strahlenexposition bei Störfällen durch Massnahmen gemäss Art. 9 StSG begrenzt wird».

Art. 8 UVEK: «…für jeden angenommenen Störfall [ist] nachzuweisen, dass die zur Umsetzung des Konzepts der gestaffelten Sicherheitsvorsorge getroffenen technischen und organisatorischen Schutzmassnahmen wirksam sind.» Insbesondere ist aufzuzeigen, «…dass die benötigten Bauwerke und Anlageteile die auf sie wirkenden Störfalllasten abtragen können.»

5.2 Gestaffeltes Barrieren- und Schutzkonzept

Um während der gesamten Betriebszeit der BEVA einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, d. h. den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe und die Begrenzung der Strahlenexposition von Mensch und Umwelt jederzeit sicherzustellen, werden die radioaktiven Stoffe durch ein gestaffeltes Barrierenkonzept aus folgenden, voneinander unabhängigen Barrieren (vgl. Fig. 5-1) eingeschlossen:

1. **Abfall- oder Brennstoffmatrix:** Die Radionuklide sind in einer wasserunlöslichen Matrix (Glas- oder Keramikmatrix für WA-HAA bzw. BE) fest eingebunden.

2. **Umschliessung:** Die Matrix ist entweder in einem Hüllrohr (BE)[25] oder in einem Stahlzylinder (WA-HAA) eingeschlossen. Das Hüllrohr bzw. der Stahlzylinder sind gasdicht verschweisst. Zudem zeigen sie ein duktiles[26] Materialverhalten und weisen damit eine entsprechende Robustheit gegenüber mechanischen Belastungen auf.

3. **Behälter oder Umladezelle:**

   – Die BE und die Stahlzylinder sind – ausserhalb der Umladezelle – immer in einem robust ausgelegten und ausreichend technisch dicht verschlossenen Behälter eingeschlossen. Als Behälter zählen die TLB sowie die ELB, die zusätzlich zum Schutz gegen äussere Einflüsse und zur Abschirmung in robusten Transportbehältern verpackt sind. Die Behälter dienen dem Schutz der Barrieren (Matrix und Umschliessung) und stellen sowohl den Einschluss bzw. die Rückhaltung von radioaktiven Stoffen im Ereignisfall als auch die erforderliche Abschirmung der Direktstrahlung sicher.

   – Die BE und Stahlzylinder werden nur in der ausgekleideten Umladezelle (z. B. Auskleidung aus Edelstahl), an der die Behälter dicht angedockt sind, gehandhabt. Die aus massiven Stahlbetonstrukturen bestehende Umladezelle dient dem Schutz der Barrieren (Matrix und Umschliessung) und stellt den Einschluss bzw. die Rückhaltung von radioaktiven Stoffen im Ereignisfall als auch die Abschirmung der Direktstrahlung sicher.

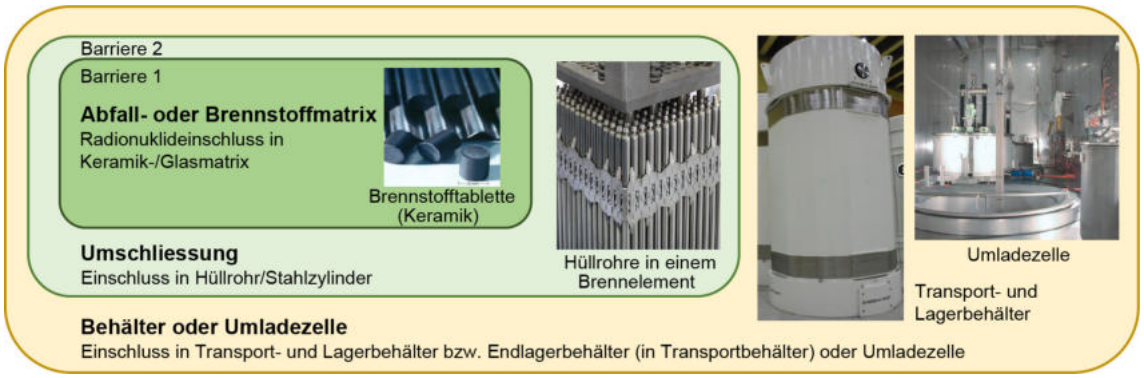

Fig. 5-1: Gestaffeltes Barrieren- und Schutzkonzept für den Einschluss und die Rückhaltung der Nuklide sowie den Schutz der Barrieren untereinander

[25] Die Abfallmatrix (keramische Brennstofftabletten) und das sie umschliessende, dicht verschweisste Hüllrohr bilden den sogenannten Brennstab. Mehrere Brennstäbe werden in einem Brennelement zusammengefasst, welches in der Umladezelle der BEVA gehandhabt wird.

[26] Duktilität ist die Eigenschaft eines Materials, sich infolge einer Belastung nach der Elastizitätsgrenze plastisch zu verformen, bevor es zu dessen Versagen kommt. Je höher die Duktilität, desto besser ist die Verformbarkeit.

Die radioaktiven Stoffe sind durch dieses gestaffelte Barrieren- und Schutzkonzept durch mehrere Barrieren von der Umwelt isoliert, eingeschlossen und abgeschirmt. Aus diesem Grund werden die BE und WA-HAA in entsprechend verschlossenen Behältern transportiert (TLB und ELB in TB), die selbst einen wirksamen Schutz darstellen. Der Zugang zum Inhalt dieser Behälter kann nur in den dafür vorgesehenen Einrichtungen, d. h. der Umladezelle, erfolgen (vgl. Kap. 3.1). Das Innere der Umladezelle ist der einzige Ort, an dem Direktstrahlung und Kontaminationen während der Umladevorgänge im Normalbetrieb bei geöffneten Behältern prozessbedingt auftreten.

Neben diesen Barrieren und Systemen (Behälter oder Umladezelle) sind weitere Systeme bzw. Massnahmen für die Rückhaltung von radioaktiven Stoffen vorhanden. Hierzu zählen die entsprechend dem Strahlenschutzkonzept (vgl. Kap. 6) erforderliche Einrichtung von kontrollierten Zonen[27] inkl. einer Unterdruckstaffelung und Abluftfilterung sowie eine radiologische Überwachung der Abluft. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass nur in der Umladezelle Kontamination vorkommt. In den anderen Bereichen der BEVA sind die radioaktiven Stoffe in Behältern dicht eingeschlossen.

5.3 Gefährdungspotenzial einer BEVA und Einordnung der Schutzziele

Das nukleare Gefährdungspotenzial einer BEVA ist im Vergleich zu anderen Kernanlagen klein bzw. sehr klein. Dies ist darin begründet, dass in der BEVA ausschliesslich abgebrannte BE[28] umgeladen werden, die bereits Jahrzehnte zwischengelagert wurden. Dies hat im Vergleich zu den anderen Kernanlagen der Schweiz zur Folge, dass

- das Radionuklidinventar in der BEVA klein ist:
  - Das Nuklidinventar in einem BE in der BEVA ist rund tausendmal kleiner als das in einem typischen BE eines in Betrieb befindlichen Kernkraftwerks, denn die in den BE im bestrahlten Kern eines Kernkraftwerks vorhandenen Nuklide mit kurzen und sehr kurzen Halbwertszeiten sind bis zu deren Verpackung in einer BEVA praktisch alle vollständig zerfallen[29].
  - Zudem ist zu berücksichtigen, dass im Vergleich zu Kernkraftwerken oder auch zur Zwilag stets deutlich weniger BE in der BEVA vorhanden sind[30].
- die Wärmeentwicklung der BE in der BEVA klein ist: Bereits zu Beginn der Zwischenlagerung darf die Temperatur der BE-Hüllrohre ca. 400 °C nicht überschreiten. Aufgrund der jahrzehntelangen Zwischenlagerung der BE ist zum Zeitpunkt der BE-Handhabung in der BEVA die Wärmeentwicklung und die BE-Temperatur[31] weiter gesunken.

Unter diesen Randbedingungen kann das Gefährdungspotenzial einer BEVA eingeordnet und bewertet werden. Im Folgenden wird dies anhand der Einhaltung der Schutzziele dargelegt sowie der Schutz von Mensch und Umwelt gegen eine unzulässige Strahlenexposition aufgezeigt.

---

[27] Abhängig von der erwarteten Dosisleistung (Einrichtung von Überwachungsbereichen) und Kontaminationsgefahr (Einrichtung von kontrollierten Zonen).

[28] Aufgrund des freisetzbaren Inventars stellt das BE gegenüber den verglasten hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung WA-HAA den radiologisch abdeckenden Betrachtungsfall dar.

[29] Dies betrifft die dosisrelevanten Nuklide, wie z. B. I-131, das eine Halbwertszeit von ca. 8 Tagen aufweist.

[30] In der Zwilag sind nach heutigem Stand bei vollständiger Beladung rund 50-mal mehr BE vorhanden als in einer BEVA mit einem BE-Äquivalent von ca. 4 TLB.

[31] Die Freisetzung von Radionukliden aus der Brennstoffmatrix ist stark von der Temperatur abhängig. Aufgrund des tieferen Temperaturniveaus sind die meisten dosisrelevanten Nuklide nicht flüchtig und damit in der Brennstoffmatrix eingeschlossen Der Freisetzungsanteil für Cäsium z. B. unterscheidet sich bei Temperaturen über 900 °C, wie sie im Reaktor eines KKW zu erwarten sind, gegenüber den zum Zeitpunkt der Handhabung in einer BEVA nach einer mehrjährigen Abklinglagerzeit zu erwartenden Temperaturen um mehr als 3 Grössenordnungen.

5.3.1 Kontrolle der Reaktivität

Bei Kernkraftwerken wird dieses Schutzziel passiv über eine entsprechende Auslegung und/oder mittels aktiver Sicherheitssysteme erfüllt. Hingegen ist die Kontrolle der Reaktivität bei der BEVA – wie auch bei der Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen im Zwilag – wegen der physikalischen Gegebenheiten (abgebrannter Brennstoff in nur unterkritischen Anordnungen) und mittels passiver Massnahmen selbst unter konservativsten Randbedingungen ausreichend gegeben. Die Sicherheit gegen eine unbeabsichtigte Kritikalität ist bereits mit der geometrischen Auslegung der TLB, der Beladungskonfiguration sowie durch das niedrige Gesamtspaltstoffinventar der TLB implementiert und freigegeben. Die Sicherheit gegen eine unbeabsichtigte Kritikalität bei den zu beladenden ELB ist dementsprechend unter Einbezug des jeweiligen ELB-spezifischen Beladeplans, der Kleinheit der Anordnung und des fehlenden Moderators gegeben und wird mit der Betriebsbewilligung nachgewiesen. Eine unbeabsichtigte Kritikalität während des Umladeprozesses ist somit ausgeschlossen. Dies gilt sowohl für den Normalbetrieb als auch unter Störfallbedingungen in der BEVA. Eine spezifische Auslegung der BEVA oder aktive Massnahmen sind daher für die Einhaltung dieses Schutzziels nicht notwendig.

5.3.2 Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle

Bei der BEVA ist – im Gegensatz zu KKW – die Nachzerfallswärme grundsätzlich durch die bereits vorgängige, in der Regel seit Jahrzehnten erfolgte Zwischenlagerung auf ein unkritisches Mass abgeklungen. Bereits bei der Zwischenlagerung im Zwilag wird eine ausreichende Wärmeabfuhr ausschliesslich durch passive natürliche Konvektion nachweislich auch im konservativen Fall sichergestellt. Dies gilt umso mehr für die nachgelagerte BEVA-Prozessführung. Die BEVA benötigt somit auch im Störfall keine aktiven Auslegungsmassnahmen zur Wärmeabfuhr. Aus diesen Gründen wird die Einhaltung des Schutzziels durch die vorgesehene passive Auslegung gewährleistet.

5.3.3 Einschluss radioaktiver Stoffe

Der permanente Einschluss der radioaktiven Stoffe wird bei der BEVA stets durch das gestaffelte Barrieren- und Schutzkonzept (vgl. Kap. 5.2) sichergestellt. Bei der Umverpackung von BE und WA-HAA in der Umladezelle werden der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle und die Abschirmung deren Strahlung in der Umladezelle durch die Barrieren Abfall- oder Brennstoffmatrix und Umschliessung (bspw. Hüllrohr) sowie die bauliche und technische Auslegung der Umladezelle übernommen. Der erforderliche Einschluss der radioaktiven Stoffe ist somit sowohl im Normalbetrieb als auch bei Störfällen gewährleistet.

5.3.4 Begrenzung der Freisetzung

Das in der Umladezelle gehandhabte Aktivitätsinventar ist infolge der langen Abklingzeiten und der begrenzten Anzahl gehandhabter HAA relativ klein. Beim Betrieb der BEVA liegen die treibenden Kräfte «Reaktivität» und «Nachzerfallswärme» nicht mehr in system- und anlagegefährdendem Masse vor[32]. Die in der Umladezelle gehandhabten HAA können somit nur noch mechanisch infolge eines Handhabungsunfalls oder Einwirkungen von aussen beschädigt werden. Solch ein Auslegungsstörfall stellt der Absturz eines BE während der Handhabung in der Umladezelle

[32] D.h., bei einer BEVA gibt es keine treibenden Kräfte, die die Integrität der Barrieren sowie die Umladezelle beschädigen können. Somit bedarf es auch keiner Systeme für eine gefilterte Druckentlastung der Umladezelle (die kein Containment darstellt), wie diese zum Schutz des Containments in KKW vorhanden sind (Schutzziel 4 «Begrenzung der Strahlenexposition»). Daher wird das Schutzziel 4 «Begrenzung der Strahlenexposition» bei der BEVA im Rahmen der «Begrenzung der Freisetzung» behandelt.

dar, der zwar aufgrund der nationalen und internationalen Erfahrung bei der Handhabung von BE und bei entsprechender Auslegung der Handhabungssysteme als sehr unwahrscheinlich einzustufen ist, aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann.

Generell wird auf die Erhaltung eines stabilen und sicheren Normalbetriebs der Anlage abgezielt, und es werden Voraussetzungen und Bedingungen geschaffen, um Betriebsstörungen und Störfälle nach Möglichkeit zu vermeiden bzw. zu begrenzen. So erfolgen Auslegung und Betrieb der BEVA unter Einbezug bewährter Betriebsverfahren, Werkstoffe, Techniken sowie Organisationsstrukturen und -abläufe vergleichbarer Anlagen. Dabei ist eine adäquate Auslegung der Umladezelle gegen schwere seltene Ereignisse wie ein Erdbeben oder den Flugzeugabsturz vorgesehen (ENSI 2021b). Auch nach diesen Ereignissen verbleibt der Absturz eines BE in der Umladezelle als abdeckender Störfall. Die Umladezelle wird nach heutigem Stand ein Lüftungssystem zur Unterdruckhaltung besitzen. Für die Abluft aus der Umladezelle ist ein Filtersystem vorgesehen, welches eine störfallbedingte Freisetzung von Radionukliden ausserhalb der Anlage zusätzlich minimiert und begrenzt.

Radiologische Konsequenzen eines BE-Absturzes

Die Gefährdung, d. h. die potenziell radiologische Konsequenz für Mensch und Umwelt für einen BE-Absturz, wird bereits heute in den KKW und in den Zwischenlagern quantitativ unter z. T. konservativen Annahmen abgeschätzt. Die von der Zwilag für einen solchen Störfall über alle Expositionspfade und bei einer Expositionszeit von einem Jahr abgeschätzte Individualdosis beträgt in 200 m Abstand zum Emissionsort ca. 0.09 mSv und nimmt mit zunehmendem Abstand rasch ab[33] (Zwilag 1999). Für die BEVA sind diese Abschätzungen aufgrund der noch späteren Handhabung derselben BE[34] im Fall eines BE-Absturzes abdeckend. Die Einhaltung der maximal zulässigen Betriebs- sowie Störfalldosiswerte gemäss Art. 123 StSV (2017) für Personen aus der Bevölkerung sind somit in jedem Fall auch bei einer BEVA eingehalten.

Der Vergleich mit den geltenden Dosisschwellen im Dosis-Massnahmenkonzept (BevSV 2020) für die Einleitung von Notfallmassnahmen zeigt zudem, dass die abgeschätzte Individualdosis um Grössenordnungen kleiner ist als diese Dosisschwellen[35]. Nach heutigem Stand sind somit für eine BEVA keine Notfallschutzmassnahmen erforderlich. Gleichwohl ist in der Region um den Standort der BEVA wegen der bestehenden Kernanlagen (PSI, Zwilag, KKB und KKL) die Infrastruktur im Hinblick auf einen Notfall bereits gut ausgebaut. Für die Betriebsbewilligung der Zwilag wurde festgehalten (Der Schweizerische Bundesrat 1996), dass weitergehende Massnahmen für den Notfallschutz im Fall der Zwilag nicht nötig sind. Dies ist bei entsprechender Auslegung und Betrieb auch auf eine BEVA zutreffend und bestätigt prinzipiell, dass Notfallschutzmassnahmen nicht notwendig sind.

---

[33] In 1 km Entfernung beträgt die Dosis noch 0.018 mSv. Der Hauptteil kommt über den Expositionspfad Ingestion (ca. 95 %). In den nächsten Ortschaften (Entfernung grösser als 1 km, siehe Fig. 4-3) wird somit die Dosisschwelle im Dosis-Massnahmenkonzept für die Bevölkerung (d. h. 10 mSv nach 7 Tagen, geschützter Aufenthalt) um einen Faktor von ca. 10'000 unterschritten.

[34] Gemäss Entsorgungsprogramm und dem darin enthaltenen Realisierungsplan ist der Betriebsbeginn der BEVA für 2060 geplant.

[35] Überschreitet die erwartete Dosis 1 mSv, besteht eine Meldepflicht gegenüber der Bevölkerung, die mit entsprechenden Verhaltensempfehlungen verbunden ist. Werden 10 mSv (oder mehr) innerhalb von 7 Tagen nach Ereignis überschritten, sind Sofortmassnahmen zu prüfen.

Grundwasserschutz

Das in Kap. 5.2 beschriebene Barrierensystem stellt den Einschluss der unlöslichen, festen, radioaktiven Stoffe in den Abfällen in der Umladezelle sicher. Da nur in der Umladezelle radioaktive Stoffe in fester und trockener Form gehandhabt werden und auch unter Störfallbedingungen keine flüssigen radioaktiven Stoffe in der BEVA vorkommen, kann eine Verschmutzung des Grundwassers mit radioaktiven Stoffen ausgeschlossen werden. Trotzdem sieht der heutige Planungsstand die Umsetzung eines adäquaten Grundwasserschutzkonzepts nach etablierten Stand der Technik vor (z. B. Nagra 2022).

5.4 Fazit

Die Schutzziele *Kontrolle der Reaktivität* und *Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle* stellen keine aktiv oder passiv zu begrenzenden Grössen bei den vorgesehenen und bereits vorgängig zwischengelagerten hochaktiven Abfällen dar. Es ist im Gegensatz zu den Bedingungen eines KKW als deutlicher sicherheitstechnischer Vorteil festzustellen, dass es durch die vergleichsweise kleine Restenergie im Abfall zu keiner bedeutenden Erwärmung und folglich zu keiner Zerstörung von Barrieren kommen kann. Der geeignete Standort (vgl. Kap. 4), das zugrundeliegende gestaffelte Barrierenkonzept zum *Einschluss radioaktiver Stoffe* und die internationalen sowie nationalen Erfahrungen im Umgang mit hochaktiven Abfällen zeigen, dass sich mithilfe entsprechender Auslegung eventuelle Betriebsstörungen und Störfälle vermeiden oder beherrschen lassen und eine unzulässige Strahlenexposition der Bevölkerung ausgeschlossen werden kann.

Künftiges Vorgehen

Da der effektive Betrieb der BEVA nach heutiger Planung noch Jahrzehnte in der Zukunft liegt (vgl. Fussnote 34), ist es wahrscheinlich, dass sich der Stand von Wissenschaft und Technik bis dahin weiterentwickelt. Deshalb werden zukünftige Entwicklungen bei der Planung, Auslegung und dem Betrieb einer BEVA (oder ähnlicher Anlagen) in der Art berücksichtigt, dass die BEVA dannzumal dem aktuellen etablierten Stand von Wissenschaft und Technik genügt. Weiterhin werden auch gewonnene Erfahrungswerte ähnlicher Anlagen in die Planung einbezogen.

6 Strahlenschutztechnische Auslegungsgrundsätze

In diesem Kapitel werden die strahlenschutztechnischen Auslegungsgrundsätze für den Normalbetrieb der Anlage dargestellt. Dabei wird auf Basis des Gefährdungspotenzials einer BEVA die voraussichtliche Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage diskutiert, wie sie entsprechend Art. 23 KEV verlangt wird. Damit ist gemäss Botschaft zum KEG (Botschaft KEG 2001, Kap. 8.4.1.3) der quellenbezogene Dosisrichtwert (qbDR) im Sinne von Art. 7 StSV gemeint.

6.1 Grundsätze des Strahlenschutzes

Die Grundsätze des Strahlenschutzes gelten entsprechend den Art. 8 bis 10 StSG (1991) für Mensch und Umwelt und sind universell für das Anlagepersonal selbst als auch für die Bevölkerung gültig. Die Vorgaben aus der Verordnung des EDI über den Umgang mit radioaktivem Material (UraM 2017) sowie die Anforderungen der ENSI-G12 (ENSI 2021a) gelten sinngemäss.

Rechtfertigung der Strahlenexposition

Eine Tätigkeit, bei der Menschen oder die Umwelt ionisierenden Strahlen ausgesetzt sind (Strahlenexposition), darf nur ausgeübt werden, wenn sie sich mit den damit verbundenen Vorteilen und Gefahren rechtfertigen lässt (Art. 8 StSG). In der Schweiz wird die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle gesetzlich verlangt. Aufgrund der mit der sicheren und langfristigen Entsorgung in einem gTL verbundenen gesellschaftlichen Vorteile ist im Sinne der Strahlenschutzgesetzgebung die Rechtfertigung einer möglichen Strahlenexposition durch die BEVA als notwendiges Glied in der Entsorgungskette (vgl. Kap. 1) in einem bestimmten Rahmen gegeben.

Im Rahmen der Auslegung und im Betrieb der BEVA werden Strukturen, Systeme und Komponenten sowie Prozesse so gewählt, dass die mit ihnen verbundenen Vorteile die strahlungsbedingten Nachteile deutlich überwiegen und gesamthaft für Mensch und Umwelt keine vorteilhaftere Alternative ohne oder mit geringerer Strahlenexposition zur Verfügung steht (Art. 3 StSV).

Dosisgrenzwerte, Begrenzung der Strahlenexposition und Optimierung

Das StSG und die StSV legen Dosisgrenzwerte sowohl für jene Personen fest, die aufgrund ihrer Tätigkeit innerhalb der BEVA als beruflich strahlenexponiertes Personal gelten, als auch für nichtberuflich strahlenexponierte Personen auf dem Betriebsareal sowie für die Bevölkerung. Zum Schutz für Personen aus der Bevölkerung wird unter Bezugnahme auf Art. 7 StSV ein qbDR für den gesamten Standort vorgeschlagen (vgl. Kap. 6.3). Der qbDR stellt ein Optimierungsinstrument dar, der die Einhaltung des Dosisgrenzwerts für die Bevölkerung gemäss Art. 22 StSV sicherstellt.

Es werden adäquate Massnahmen ergriffen, die nach der Erfahrung und dem etablierten Stand von Wissenschaft und Technik geboten sind, um die Strahlenexposition jeder einzelnen Person sowie der Gesamtheit der Betroffenen durch den Betrieb der Anlage und ihrer Stilllegung wirksam zu begrenzen, d. h. so gering wie vernünftigerweise erreichbar zu halten (Art. 9 StSG). Dies soll durch die intensive fachbezogene strahlenschutztechnische Mitarbeit und Begleitung des Vorhabens von Beginn an durch erfahrene Strahlenschutzfachpersonen erreicht werden. Dabei wird das Strahlenschutzkonzept der BEVA ein adäquates radiologisches Zonen- und Überwachungskonzept vorsehen, um die jeweiligen gesetzlich geforderten Dosisbegrenzungen innerhalb der Anlage, auf dem Anlageareal und in der Umgebung zu gewährleisten und nachzuweisen. Insbesondere die langjährigen Betriebserfahrungen aus vergleichbaren Anlagen wie der Zwilag oder dem Zwibez werden für die Auslegung und Optimierung der Strahlenschutzmassnahmen herangezogen, da diese Anlagen bereits heute in jedem Fall die gesetzlichen und behördlichen Grenz- und Richtwerte bei weitem unterschreiten.

6.2 Strahlenexposition in der Umgebung (Gefährdungspotenzial)

Die durch die BEVA verursachte Strahlenexposition für die Bevölkerung in der Umgebung der Anlage setzt sich zusammen aus der minimen Strahlenexposition infolge von luftgetragenen Abgaben radioaktiver Stoffe und der minimalen Direktstrahlung aus der Anlage. Allfällige in der kontrollierten Zone infolge der Dekontamination von Anlagenteilen und Ausrüstungen sowie auch bei der Personendekontamination anfallende radioaktiv kontaminierte Flüssigkeiten werden gesammelt, behandelt und gesetzeskonform entsorgt (bspw. mittels der vorhandenen Abfallbehandlungs- und Konditionierungsanlagen der Zwilag oder des PSI). Nebst der aus dem Normalbetrieb der Anlage resultierenden Strahlenexposition sind zudem diejenigen bei Störfällen zu betrachten, wobei letztere nach den in der StSV vorgegebenen Häufigkeiten einzuteilen und die vorgegebenen Dosisgrenzen einzuhalten sind (Art. 123 StSV).

Insgesamt handelt es sich bei der BEVA – wie bereits in Kap. 5.3 dargelegt – um eine Anlage mit sehr kleinem Gefährdungspotenzial. Nur im Inneren der Umladezelle können Direktstrahlung und Kontaminationen während der Umladevorgänge prozessbedingt auftreten. Der Schutz von Mensch und Umwelt vor radiologischen Auswirkungen und die Einhaltung der Grenz- und Richtwerte wird dabei im Wesentlichen durch hinreichende Wandstärken zur Abschirmung der Direktstrahlung aus und innerhalb der Anlage sowie durch den Einschluss der radioaktiven Stoffe mittels eines gestaffelten Barrieren- und Schutzkonzepts (Kap. 5.2) als auch durch hinreichend bemessene Rückhaltesysteme zur Begrenzung der Abgaben radioaktiver Stoffe erzielt. Zu letzterem zählen die entsprechend dem Strahlenschutzkonzept vorgesehene Einrichtung von kontrollierten Zonen inkl. einer Unterdruckstaffelung und Abluftfilterung sowie eine radiologische Überwachung der Abluft. Um eine Verschleppung von radioaktiven Partikeln auszuschliessen, wird der Material- und Personentransfer zwischen den Zonen entsprechend kontrolliert und überwacht. Es existiert dabei ein grosser und langer Erfahrungshintergrund für Heisse Zellen (z. B. Zwilag oder PSI), der aufzeigt, in welchem Rahmen sich die künftige strahlenschutztechnische Auslegung der Anlage bewegen wird.

Eine Reduktion der Strahlenexposition weit unterhalb der geforderten Grenz- und Richtwerte lässt sich somit allein durch eine (bereits in vergleichbaren Anlagen bewährte) konsequente strahlenschutztechnische Anlageauslegung erreichen. Es ist folglich davon auszugehen, dass die von der BEVA im Normalbetrieb verursachte Strahlenexposition für Mensch und Umwelt vergleichbar bzw. kleiner sein wird als ähnliche Anlagen (z. B. Zwilag, vgl. Kap. 6.5). Dies gilt ebenfalls für die bereits in Kap. 5.3.4 diskutierten maximal möglichen Freisetzungen infolge von Störfällen.

6.3 Vorschlag für den quellenbezogenen Dosisrichtwert am Standort

Ein Vorschlag für den quellenbezogenen Dosisrichtwert (qbDR) am Standort wurde bereits in Kap. 2.4 dokumentiert, sodass an dieser Stelle darauf verwiesen wird.

6.4 Einhaltung der Immissionsgrenzwerte und deren Überwachung

Die Immissionen und die Ortsdosisleistung ausserhalb der Anlage werden im Rahmen des bereits bestehenden (durch Zwilag und PSI), ggf. erweiterten radiologischen Überwachungsprogramms am Standort gemessen, und die Einhaltung des bisherigen langjährigen Immissionslevels wird verifiziert. Zur Überwachung der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte gehört im Sinne einer Kontrollmassnahme – wie sie in Art. 113 StSV vorgesehen sind – ebenfalls die Aufnahme von Nullmessungen während einiger Jahre vor der Betriebsaufnahme der BEVA. Hierfür können die langjährig aufgenommenen Messdaten der Zwilag und des PSI dienen.

Mittels dieser Messungen zur Immissionsüberwachung der Umgebung soll innerhalb der Gesamtüberwachung des Standorts insbesondere die Einhaltung des qbDR nachgewiesen werden.

6.5 Gegenwärtige radiologische Standortsituation

Die gegenwärtige und vergangene unbedenkliche radiologische Situation des Standorts ist durch die radiologische Umgebungsüberwachung des Zwilag und des PSI seit Jahrzehnten gut belegt und in den jährlichen ENSI-Strahlenschutzberichten sowie -Aufsichtsberichten ausführlich dokumentiert. Die Ergebnisse dieser Umgebungsüberwachung können vor Inbetriebnahme der BEVA als Nullmessungen gemäss Art. 113 StSV verwendet werden.

Zwilag

Entsprechend den Ergebnissen der über 20-jährigen Umgebungsüberwachung des Zwilag liegt bis heute keine künstliche Beeinflussung der Ausgangssituation vor. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für fiktive Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung des Zwilag lag mit weniger als 0.001 mSv deutlich unterhalb des quellenbezogenen Dosisrichtwerts gemäss Zwilag-Abgabereglement. Die Umgebungsüberwachung für den gesamten Standort zeigte keine dem Betrieb der beiden Anlagen (PSI und Zwilag) zuzuschreibende Erhöhung gegenüber der Untergrundstrahlung (ENSI 2023a).

Paul Scherrer Institut

Entsprechend den Ergebnissen der über 50-jährigen Umgebungsüberwachung des PSI bzw. dessen Vorgänger liegt bis heute keine künstliche Beeinflussung der Ausgangssituation vor. Aus den bilanzierten Abgaben radioaktiver Stoffe über die Fortluftanlagen und über das Abwassersystem wurde unter konservativen Annahmen für den ungünstigsten Aufenthaltsort ausserhalb des überwachten PSI-Areals eine Jahresdosis für fiktive Einzelpersonen der Bevölkerung von weniger als 0.008 mSv pro Jahr berechnet (ENSI 2023a). Diese potenzielle Jahresdosis lag deutlich unterhalb des qbDR gemäss PSI-Abgabereglement.

6.6 Fazit

Die langjährige Erfahrung im Zwilag, Zwibez sowie bei der BE-Handhabung in den KKW zeigt einheitlich, dass aus ähnlichen Arbeiten zur Umladung resp. Verpackung von BE keine bedeutende Strahlenexposition für Personal, Bevölkerung und die Umwelt resultiert. Gestützt auf diese Erfahrungen wird mit den aufgeführten nuklearen Auslegungsprinzipien und mit einem geeigneten Strahlenschutz- und Überwachungskonzept angestrebt, dass sowohl die Direktstrahlung, die Abgabe radioaktiver Stoffe aus der BEVA als auch die daraus resultierende Strahlenexposition der Bevölkerung auf jeden Fall vergleichbar niedrig liegen wie bei den korrespondierenden Anlageteilen zur BE-Handhabung in den KKW und den Anlagen Zwilag, Zwibez sowie dem Hotlabor.

Es kann demnach bereits heute mit grosser Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die mit dem Betrieb der BEVA einhergehende Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage ebenfalls äusserst gering sein wird im Vergleich zur durchschnittlichen effektiven Dosis der Schweizer Bevölkerung (ca. 6 mSv/a für eine Person, BAG 2021) und somit für Personal und Bevölkerung keine unzulässige Zusatzbelastung darstellt. Dies unterstützt und rechtfertigt die Fortführung des bestehenden quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Kalenderjahr für nicht strahlenexponierte Personen in der Umgebung des gemeinsamen Standorts. Die BEVA wird zum Zeitpunkt ihrer Errichtung und späteren Inbetriebnahme auf der Basis der kerntechnischen Erfahrungen einem Stand von Wissenschaft und Technik der 2050er Jahre entsprechen und so eine strahlenschutztechnisch optimal ausgelegte und ausgereifte Anlagencharakteristik aufweisen.

7 Wichtigste personelle und organisatorische Angaben

In diesem Kapitel werden gemäss Art. 23 KEV die wichtigsten personellen und organisatorischen Angaben zum Projekt dokumentiert. Diese Angaben beinhalten im Hinblick auf die späteren Bewilligungsschritte und in Anlehnung an Anhang 4 der KEV ein Grobkonzept zur Entwicklung der zukünftigen Betriebsorganisation mit einem geeigneten Personalstamm sowie Aspekte der Aus- und Weiterbildung. Wichtig ist der Nagra insbesondere die Absichtserklärung zur expliziten Berücksichtigung menschlicher und organisatorischer Faktoren. In den folgenden Kapiteln werden die beabsichtigten prinzipiellen Merkmale hinsichtlich einer systematischen Personal- und Organisationsentwicklung (Kap. 7.2) unter Einbezug der menschlichen und organisatorischen Faktoren (HOF, Kap. 7.3) exemplarisch skizziert.

7.1 Grundsätze der Organisation

Für die Projektabwicklung soll eine Organisation aufgebaut werden, die es erlaubt, die Projekt- und Bewilligungsabläufe so auszuführen, dass für die künftige Anlage relevante Anforderungen nachweislich adressiert und erfüllt werden bzw. eine ganzheitliche Bewertung ermöglicht wird. Der sukzessive Aufbau der Projektorganisation ist dabei flexibel und wird sich entsprechend den jeweiligen Projektphasen mit ihren unterschiedlichen Schwerpunkten anpassen, sodass hieraus letztlich eine geeignete Betriebsorganisation hervorgeht.

Dafür ist vorgesehen, eine angemessene personelle Begleitung der Projektphasen schrittweise mit den notwendigen Fach- und Methodenkompetenzen sowie erforderlichen Ressourcen sicherzustellen, sodass zum Zeitpunkt der Erteilung der Betriebsbewilligung eine adäquate Organisation mit dem vollständigen Personalbestand bei erforderlicher Fach- und Sachkunde zur Inbetriebnahme der Anlage etabliert ist. Dies schliesst sowohl im Vorfeld wie auch beim Betrieb externe Auftragnehmende bzw. Lieferanten mit ein, die ebenfalls entsprechend ihrer Aufgaben eine geeignete, qualitätsgesicherte Organisation mit adäquaten Kompetenzen und Ressourcen bereitzustellen haben. Interne Fachkräfte folgen dabei dem bereits bewährten, zertifizierten Managementsystem (der Nagra), bis die BEVA-Bau- und Betriebsorganisation ihr eigenes Managementsystem implementiert hat. Der sukzessive Aufbau und die Ausgestaltung der zum jeweiligen Projektstand angemessenen Organisation wird auf der Grundlage des schweizerischen Regelwerks unter Berücksichtigung der Erfahrungen in den bestehenden Anlagen – insbesondere dem Zwilag – erfolgen.

Die Umsetzung der Prinzipien einer zeitgemässen Sicherheitskultur innerhalb des gesamten Organisationsgefüges einschliesslich der Führung ist der Nagra von Beginn an ein zentrales Anliegen. So soll die Sicherheitskultur als Summe aller Merkmale und Ausrichtungen einer Organisation und deren Individuen sicherstellen, dass sicherheitsrelevante Themen die entsprechende Aufmerksamkeit und Priorität bereits in der Projektierungsphase erhalten. Dazu zählen u. a. Prinzipien wie eine hinterfragende Haltung, die explizite Berücksichtigung der Schnittstelle Mensch, Maschine und Organisation, eine professionelle Umgangskultur im Team, aber auch der offene und schuldzuweisungsfreie Umgang mit menschlichen, organisationalen und technischen Fehlern. Die Prinzipien sind aufgrund des Erfahrungsrückflusses und des Projektfortschritts während Bau und Betrieb zu vervollständigen.

7.2 Entwicklung der Organisation

Die Organisationseinheiten für Projektierung, Bau, Betrieb und Stilllegung sowie deren Aufgaben und Kompetenzen werden sukzessive gebildet und einen abgestimmten Übergang aufweisen. Zu beachten ist der für dieses Projekt relativ lange Zeitraum zwischen Rahmen- und Baubewilligung. Dieser bietet ausreichend Zeit für die Zusammenstellung und den Aufbau einer adäquaten, jeweils zeitgemässen Organisation im Zuge der Projektierungsphase unter Berücksichtigung von Massnahmen zum Wissenserhalt und -transfer. Hinsichtlich letzterem stellt die Zusammenarbeit mit der Zwilag eine wichtige Schnittstelle dar.

Auf Stufe RBG ist eine exakte und vollständige Festlegung der zukünftigen Betriebsorganisation weder sinnvoll noch nötig, da zu diesem Zeitpunkt u. a. noch nicht feststeht, welche konkreten Beschäftigungsprofile aus möglichen Synergien zwischen Zwilag und BEVA überlappend genutzt werden können und sollen. Im RBG werden jedoch allgemeine Angaben bezüglich der Vorgehensweise zur Entwicklung der Organisation skizziert.

7.2.1 Projektierung

Eine Projektorganisation mit geeigneten Kernkompetenzen wird aufgebaut[36] und besteht aus Fachgebieten zum nukleartechnischen Engineering, welche der Optimierung des Projekts (Vorstudie) und der Abstimmung mit weiteren Stakeholdern vor Ort (und deren Anforderungen) dient. Dabei stehen neben den Fragen zur Synergie zwischen den Kernanlagen, insbesondere BEVA und Zwilag, die Aspekte zur Sicherheit, Sicherung, Stilllegung, Umweltverträglichkeit und Raumplanung im Vordergrund. Hierbei werden auch HOF (Kap. 7.3) entsprechend berücksichtigt. Die Anforderungen aus ENSI (2023b) werden, soweit für eine BEVA anwendbar, zugrunde gelegt.

Die während der Vorstudie aufgebaute Projektorganisation wird zu einem vollständigen Projektunternehmen erweitert, in dem alle relevanten Disziplinen vertreten sind. Dieses Unternehmen ist für die Ausarbeitung der detaillierten Analysen, Nachweise und den folgenden Gesuchsunterlagen verantwortlich, die für das Baubewilligungsgesuch erforderlich sein werden.

Damit die benötigten Kernkompetenzen innerhalb der Organisation vorhanden sind, wird der Personalbestand des Projektunternehmens gemäss dem spezifischen Bedarf angepasst. Verbunden damit ist auch die rechtzeitige Vorbereitung geeigneter Ausbildungsmassnahmen (über alle Phasen). Die Unterstützung des Projekts durch externe, anerkannte Fachexperten sowie der Einbezug der Branchenerfahrung und -expertise wird dabei fortgeführt. Zu gegebener Zeit wird ein projektspezifisches Qualitätsmanagementprogramm gemäss Art. 25 KEV entwickelt.

7.2.2 Bau

Die in der Projektierungsphase aufgebaute Organisation wird gemäss derzeitiger Planung weitgehend beibehalten und um die organisatorischen Einheiten ergänzt, die für die Bauphase benötigt werden. Diese erweiterte Projektorganisation wird bau- und montagerelevante Disziplinen abdecken. Darin eingeschlossen sind insbesondere die Überwachung der Bautätigkeit sowie von Herstellung und Montage der Systeme und Komponenten auf Grundlage der Auslegungsspezifikationen und einzuhaltenden gesetzlichen und behördlichen Vorschriften. Zusätzlich zu dem für die Abwicklung erforderlichen Personalbestand wird externe Unterstützung durch anerkannte Fachexperten beigezogen. Es soll sichergestellt werden, dass die Gesamtorganisation den Herausforderungen und Risiken (auf der Baustelle) gewachsen ist und allfällige Ereignisse und Nonkonformitäten erkennen, analysieren, bewerten und korrigieren kann. Eine tragende Rolle spielt in dieser Phase auch das Qualitätsmanagement (nach Art. 25 KEV), dem dabei die besondere Bedeu-

[36] Bzw. ausgehend vom Kernteam aus der Projektphase Rahmenbewilligung (vgl. Kap. 1.2) aufgebaut und erweitert.

tung zukommt, in Kooperation mit dem technischen Personal mittels Vorort-Prüfungen aber auch Audits und Reviews für die sorgfältige Umsetzung aller spezifizierten Arbeiten besorgt zu sein. Insbesondere ist das Management der vielfältigen Schnittstellen zwischen den verschiedenen Stakeholdern (Hersteller, Lieferanten, Projekt-/Bauorganisation, Behörden) sicherzustellen.

Neben dem eigentlichen Bau und der Montage der Anlage werden organisatorische Massnahmen auch hinsichtlich der Inbetriebnahme bzw. des späteren Betriebs vorangetrieben, indem der Aufbau der Betriebsorganisation und die Rekrutierung sowie Ausbildung des dafür notwendigen Personals in Angriff genommen werden soll, sodass rechtzeitig eine entsprechend geschulte und mit der Anlage vertraute Betriebsorganisation bereitsteht. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit ein gezielter Wissenstransfer im zeitlichen Vorfeld durch die bereits bestehenden Kernanlagen (beispielsweise Zwilag / PSI) zur Vorbereitung und Ausbildung des Personals für den BEVA-Betrieb sowie zur Gewährleistung der Kontinuität in der Sicherheitskultur dienen könnte.

7.2.3 Betrieb

Die Betriebsorganisation entspricht den für eine BEVA relevanten Anforderungen aus Art. 30 KEV, wobei die behördlichen Anforderungen aus ENSI (2023b), soweit anwendbar, berücksichtigt und umgesetzt werden. Da die Bauorganisation ggf. bereits wichtige Fachbereiche, die auch für die Betriebsorganisation essenziell sind, enthält, wird die Betriebsorganisation auf der Bauorganisation aufbauen bzw. aus dieser hervorgehen. Ausgebaut werden müssen die Organisation und das Personal um betriebsspezifische Elemente, wie beispielsweise Qualitäts- und Betriebsvorgabe, Instandhaltung sowie Strahlenschutz und -überwachung[37].

7.2.4 Stilllegung

Die für die Stilllegung erforderliche Organisation wird während der Betriebsphase vorbereitet und eingerichtet und somit aus der zukünftigen Betriebsorganisation hervorgehen. Ein Grund dafür ist, dass das mit der Anlage und der Anlagenhistorie vertraute und kompetente Personal bei den Rückbauarbeiten (Dekontamination, Demontage und Abbau) und bei der Entsorgung der Komponenten und Strukturen eine bedeutende Rolle einnehmen kann (Nagra 2025a).

7.3 Menschliche und organisatorische Faktoren (HOF)

Für den sicheren Betrieb der BEVA ist es von Bedeutung, dass Mensch, Organisation und Technik gemeinsam eine Einheit bilden, um die Aufgaben und Funktionen sicherheitsgerichtet erfüllen zu können. Der Betreiber räumt den menschlichen und organisatorischen Faktoren in allen Phasen des Projekts den erforderlichen Stellenwert ein. Dies beinhaltet in der Projektierungsphase die Berücksichtigung der menschlichen und organisatorischen Faktoren in Form eines für die BEVA angemessenen *Human and Organisational Factors Engineering* (HOF-Engineering)[38]. Die Nagra nimmt somit von Beginn an eine dem Projekt angemessene, soziotechnische HOF-Sichtweise ein und übernimmt die Verantwortung zur langfristigen Etablierung einer stabilen Sicherheitskultur

---

[37] Die Anforderungen an die Organisation hängen dabei stark von der Auslegung, dem Grad der Automation sowie dem Einsatz von KI sowie der Entwicklung der Technik in diesen Bereichen ab. Aus heutiger Sicht können somit keine belastbaren Aussagen über die Betriebsorganisation gemacht werden. Denkbar ist eine Organisationsform in Anlehnung an die bestehende, bewährte Organisationsstruktur der Zwilag.

[38] Der Begriff Human and Organisational Factors (HOF) steht mit menschlichen und organisatorischen Aspekten im Zusammenhang und bezieht sich auf alle Gesichtspunkte von Arbeitssituationen, auf die eingewirkt werden kann, um die Schnittstellen zwischen Mensch und den zu erstellenden Systemen bzw. Maschinen optimal zu gestalten. Als Beispiel sei (i) die Arbeitsplatzgestaltung, d. h. die Schaffung eines ergonomischen Arbeitsumfelds, das die Effizienz und Sicherheit von Betrieb, Prüfung, Tests sowie Instandhaltung fördert, sowie (ii) ein Feedback-System, d. h. die Einführung von Feedback-Mechanismen, die es den Mitarbeitenden ermöglicht, ihre Erfahrungen und Beobachtungen zu teilen, um Verbesserungen und Optimierungen vorzunehmen, genannt.

in ihrer Unternehmung. Eine solche vorausschauende Projektierung hinsichtlich der relevanten Einrichtungen und Arbeitsvorgänge lässt sich in Anlehnung an die bewährte Projekt-/Betriebserfahrung von vergleichbaren Anlagen (z. B. Zwilag) gezielt ableiten.

Eine besondere Aufmerksamkeit wird der Rolle des künftigen Betriebs- und Instandhaltungspersonals zu widmen sein, im Hinblick auf die in Zukunft noch zu wählenden Technologien der Anlage. Die in den 2050er Jahren zur Verfügung stehenden (etablierten) Technologien und die dabei stets fortschreitende IT und Automatisierung (eventuell auch das Potenzial der KI) sind heute weder abschliessend bekannt noch hinsichtlich ihrer Konsequenzen auf die Organisation und das Personal sowie HOF bewertbar. Es muss davon ausgegangen werden, dass dies einen bedeutenden und neuen Einfluss auf das Arbeitsverhalten und auf HOF des künftigen Personals für Betrieb und Instandhaltung ausübt.

7.4 Fazit

Innerhalb des RBG geht es der Nagra primär darum aufzuzeigen, dass der Bau und sichere Betrieb einer BEVA mit einer entsprechenden Organisation und dem erforderlichen Personalstamm realisiert werden kann. Der Aufbau einer adäquaten Projektierungsorganisation stellt dabei einen ersten Schritt dar, an dem die späteren Bau- und Betriebsorganisationen anknüpfen und aufbauen können. Die für eine BEVA erforderlichen Organisationstruktur und -einheiten, deren Zusammenarbeit und eine über alle Ebenen gelebte Sicherheitskultur sind bereits heute in vergleichbaren Anlagen seit Jahrzehnten etabliert und können in Anlehnung an diese auch für eine BEVA umgesetzt werden. HOF-Aspekte werden dabei frühzeitig im Projekt adressiert und adäquat berücksichtigt. Das Ziel ist dabei die frühzeitige Sicherstellung der Qualität sowie der Optimierung und Fehlervermeidung bei der Durchführung der multidisziplinären Projektarbeiten.

8 Literaturverzeichnis

ADR (1957): Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR) vom 30. September 1957, Stand am 19. Juni 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 0.741.621, Schweiz.

Andres, N., Steeb, N., Badoux, A. & Hegg, C. (Hrsg.) (2021): Extremhochwasser an der Aare. Hauptbericht Projekt EXAR. Methodik und Resultate. WSL Berichte 104. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.

BAG (2021): Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz – Ergebnisse 2020. Bundesamt für Gesundheit BAG, Bern.

BevSV (2020): Verordnung über den Bevölkerungsschutz (Bevölkerungsschutzverordnung, BevSV) vom 11. November 2020, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 520.12, Schweiz.

Botschaft KEG (2001): Botschaft vom 28. Februar 2001 zu den Volksinitiativen «MoratoriumPlus - Für die Verlängerung des Atomkraftwerk-Baustopps und die Begrenzung des Atomrisikos (MoratoriumPlus)» und «Strom ohne Atom - Für eine Energiewende und die schrittweise Stilllegung der Atomkraftwerke (Strom ohne Atom)» sowie zu einem Kernenergiegesetz. Bundesblatt BBl 2001 2665, Schweiz.

Der Schweizerische Bundesrat (1996): Bau- und Betriebsbewilligung des Zentralen Zwischenlagers für radioaktive Abfälle in Würenlingen, vom 21.08.1996.

ENSI (2010): Strahlenschutzziele für Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G15/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

ENSI (2018): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-A05/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

ENSI (2019a): Reglement für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Überwachung von Radioaktivität und Direktstrahlung in der Umgebung des Paul Scherrer Instituts (PSI). BAG 438.0012.20, ENSI 22/1363 Rev. 1. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Brugg & Bundesamt für Gesundheit (BAG), Bern.

ENSI (2019b): Reglement für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Überwachung von Radioaktivität und Direktstrahlung in der Umgebung des Zentralen Zwischenlagers Würenlingen (ZZL). ENSI 32/633 Rev. 1. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

ENSI (2021a): Anlageninterner Strahlenschutz. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G12. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

ENSI (2021b): Auslegungsanforderungen an andere Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G23. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

ENSI (2023a): Aufsichtsbericht 2022 zur nuklearen Sicherheit in den schweizerischen Kernanlagen. ENSI-AN-11600. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

ENSI (2023b): Organisation von Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G07/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.

KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.

KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.

Kuhlmann, M., Ballmer, M., Vonwiller, L., Perona, P. & van Mol, R. (2022): Ufererosionsanalyse PSI/Zwilag. Numerische Modellierung basierend auf Gefährdungsszenarien der EXAR-Studie. Technischer Bericht ZWILAG Dok. Nr. ZWI 2510/D00288. TK Consult AG, Zürich.

Nagra (2021): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.

Nagra (2022): Schutz von Grund- und Oberflächenwasser im Fall einer BEVA bei der Zwilag. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-33.

Nagra (2023): Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM-RBG. Nagra Technischer Bericht NTB 22-05.

Nagra (2024a): Bestimmung der unfallbedingten Flugzeugabsturzhäufigkeiten am Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-38.

Nagra (2024b): Einwirkungen auf den Standort der Brennelementverpackungsanlage bei Störfällen in der Nachbarschaft. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-37.

Nagra (2024c): Erdbebengefährdungsanalyse für den Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-22.

Nagra (2024d): Erläuterungsbericht zu den Rahmenbewilligungsgesuchen. Nagra Technischer Bericht NTB 24-12 Rev. 1.

Nagra (2024e): Generische Sicherheitsbetrachtungen der Einwirkungen von innen für eine Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-34.

Nagra (2024f): Geological long-term evolution: Neotectonics. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-13.

Nagra (2024g): Geologische Prognose mit bautechnischer Empfehlung für den Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-40.

Nagra (2024h): Hydrologische Verhältnisse am Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-36.

Nagra (2024i): Meteorologische und klimatologische Verhältnisse am Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-35.

Nagra (2025a): Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage - Konzept für die Stilllegung. Nagra Technischer Bericht NTB 24-16.

Nagra (2025b): Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage - Sicherungsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-13.

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.

PSI (2021): Sicherheitsbericht des PSI Hotlabors. TM-43-04-15 Rev. 4. Paul Scherrer Institut, Villigen.

SDR (2002): Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (SDR) vom 29. November 2002, Stand am 1. Januar 2023. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 741.621, Schweiz.

Senior Seismic Hazard Anlysis 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.

Statistik Aargau (2020): Aargauer Bevölkerungsprojektionen 2020-2050. (stat.analysen, 4). Kanton Aargau, Aarau.

StFV (1991): Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV) vom 27. Februar 1991, Stand am 8. März 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.012, Schweiz.

StSG (1991): Strahlenschutzgesetz (StSG) vom 22. März 1991, Stand am 1. Juli 2023. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.50, Schweiz.

StSV (2017): Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 26. April 2017, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.501, Schweiz.

swissnuclear (2013): PEGASOS Refinement Project Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites - Summary Report. (Volumes 1 to 5).

UraM (2017): Verordnung des EDI über den Umgang mit radioaktivem Material, SR 814.554,. Systematische Sammlung des Bundesrechts, 30. Januar 2018.

UVEK (2009): Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen vom 17. Juni 2009, Stand am 1. Februar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SYS: SR 732.112.2, Schweiz.

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.

Zwilag (1999): Absturz einer Last in der Heissen Zelle. Ergänzungsbericht zum FSAR Band II Dok.-Nr.: ZWI 3124/D022, Rev. 00. Zwischenlager Würenlingen AG.

Zwilag (2018): Kurzbericht nach Störfallverordnung. Zwischenlager Würenlingen AG.

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1: Boden- und Landnutzung in den Gemeinden um den Standort der BEVA 14

Tab. 4-2: Leistungskennzahlen der in unmittelbarer Umgebung befindlichen Gasleitungen 20

Tab. 4-3: Zusammenstellung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten der verschiedenen Flugzeugkategorien, bezogen auf eine normierte Trefferfläche 22

Tab. 4-4: Gefährdungsannahmen (Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr) am Standort unter Berücksichtigung des Klimawandels 28

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1: Übergeordnete Elemente der Entsorgung in der Schweiz 1

Fig. 2-1: Projektperimeter am Standort Zwilag in der Gemeinde Würenlingen 5

Fig. 3-1: Übersichtskarte des Projektperimeters, inkl. Unterteilung in Anlagenperimeter, Installationsfläche und Eingliederungssaum 9

Fig. 3-2: Schematische Darstellung einer exemplarischen Anordnung der Bauten auf dem Anlagenperimeter 11

Fig. 4-1: Topographie des Gebiets Unteres Aaretal 13

Fig. 4-2: Übersicht über die Boden- und Landnutzung im Umkreis des Standorts 14

Fig. 4-3: Ständige Wohnbevölkerung (links) und Bevölkerungsanzahl und -dichte (rechts) in der Nähe des Standorts der BEVA 15

Fig. 4-4: Verkehrs- und Transportwege im Umkreis zum Standort 16

Fig. 4-5: Übersichtskarte zur Infrastruktur der Luftfahrt 17

Fig. 4-6: Standorte der StFV-Betriebe im Umkreis von 3 km um den Projektperimeter 18

Fig. 4-7: Verlauf der Erdgasleitungen TRAWO (70 bar) und REFUNA (5 bar) 19

Fig. 4-8: Maximale Fliesstiefen während der gesamten Simulationsdauer für ein Hochwasserszenarium mit einer Überschreitungshäufigkeit von ca. 10^{-4}/Jahr 30

Fig. 4-9: Karte mit den Baugrunduntersuchungen am Standort Zwilag und daraus abgeleitetes Modell (Profil A–A') des Baugrunds für den Projektperimeter 32

Fig. 4-10: 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) 34

Fig. 5-1: Gestaffeltes Barrieren- und Schutzkonzept für den Einschluss und die Rückhaltung der Nuklide sowie den Schutz der Barrieren untereinander 38

Abkürzungsverzeichnis

BE	Abgebrannte Brennelemente
BEVA	Brennelementverpackungsanlage
BFS	Bundesamt für Statistik
ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EVA	Einwirkungen von aussen
EVI	Einwirkungen von innen
EXAR	Extremhochwasser Aare-Rhein
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
WA-HAA	Hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung
HOF	Menschliche und organisatorische Faktoren
ISO	Internationale Organisation für Normung
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
KKW	Kernkraftwerken
KKB	Kernkrafwerk Beznau
PSI	Paul Scherrer Institut
qbDR	Quellenbezogener Dosisrichtwert
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
StFV	Störfallverordnung
StSG	Strahlenschutzgesetz
StSV	Strahlenschutzverordnung
Sv (mSv)	Sievert (Millisievert)
TLB	Transport- und Lagerbehälter
UVEK	Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
Zwibez	Zwischenlager Beznau
Zwilag	Zwischenlager Würenlingen AG