

Arbeitsbericht NAB 22-33

**Schutz von Grund- und
Oberflächenwasser im Fall einer
BEVA bei der Zwiilag**

September 2022

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
Postfach 280
5430 Wettingen
Telefon 056 437 11 11
www.nagra.ch

Arbeitsbericht NAB 22-33

**Schutz von Grund- und
Oberflächenwasser im Fall einer
BEVA bei der Zwilag**

September 2022

STICHWÖRTER

BE/HAA(WA)-Verpackungsanlage, BEVA, Standort Zwilag,
Grundwasserschutz, Hochwasser, Überflutung, Risikoanalyse

**Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle**

Hardstrasse 73
Postfach 280
5430 Wettingen
Telefon 056 437 11 11
www.nagra.ch

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

"Copyright © 2022 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."

Das Wesentliche in Kürze

Die vorliegende Gefährdungs- bzw. Risikoanalyse wurde auf Ansuchen des Kantons Aargau erstellt und legt – ausgehend von einer Betrachtung aller zu berücksichtigender Störfälle und Naturgefahren – den Schwerpunkt auf die wasserinduzierten Gefährdungen. Dabei werden mögliche generelle sowie auch spezifische bauliche und technische Massnahmen zur Vermeidung möglicher Gefahren beschrieben und bewertet, insbesondere zum Schutz des Grundwassers.

Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

- Die Durchführung einer umfangreichen, quantitativen Gefährdungsanalyse ergab, dass:
 - das Grundwasser tief genug steht, sodass eine BEVA trocken gegründet werden kann
 - ein extremer Anstieg des Grundwasserspiegels bis zur Gründung der BEVA und deren Untergeschoss äusserst selten ist und wenn, nur von kurzer Dauer
 - eine Überflutung des Standorts durch die Aare ausgeschlossen werden kann
 - eine klimatologische Gefährdung durch lokale Starkniederschläge und Murgänge ausgeschlossen werden kann
- Die Auslegung der BEVA berücksichtigt:
 - dass von den Transport- und Lagerbehältern in die Endlagerbehälter ausschliesslich feste, wasserunlösliche Abfälle (verglaste Abfälle in Stahlkokillen und verbrauchte Brennelemente) umgeladen werden
 - ein Mehrfachbarrierenkonzept, das unter allen Ereignissen und Einwirkungen den Einschluss der radioaktiven Stoffe und damit den Schutz des Grundwassers sicherstellt
 - ein spezifisches, gestaffeltes Dichtungskonzept zum Schutz des Grundwassers, sodass kein Wasser ein- oder austreten kann
- Als Fazit kann festgestellt werden:
 - Eine Überflutung des Standorts durch die Aare ist ausgeschlossen.
 - Die BEVA wird sicher gegen Grundwasserspiegelanstieg und Oberflächenwasser ausgelegt.
 - Der Schutz des Grundwassers wird u.a. durch ein spezifisches, gestaffeltes Dichtungskonzept zuverlässig sichergestellt.
 - Die massive Auslegung der BEVA gegen Erdbeben und Flugzeugabsturz deckt andere allfällige Gefahren ab.
 - Eine unzulässige Freisetzung von radioaktiven Stoffen kann ausgeschlossen werden.

Zusammenfassung

Für die geologische Tiefenlagerung müssen die hochaktiven Abfälle, bestehend aus Brennelementen (BE) und verglasten Abfällen in Stahlkokillen aus der Wiederaufbereitung (HAA(WA)) entsprechend den Anforderungen der Langzeitsicherheit verpackt werden. Diese Verpackung erfolgt in der sogenannten BE/HAA(WA)-Verpackungsanlage (kurz Brennelementverpackungsanlage BEVA). Der Bau und Betrieb der BEVA sind im Zeitraum 2050 bis 2075 vorgesehen.

Als Standort für die BEVA kommen grundsätzlich der Standort des geologischen Tiefenlagers oder das zentrale Zwischenlager in Würenlingen (Zwilag) infrage. Für beide möglichen Standorte hat die Nagra im Jahr 2019 Varianten vorgeschlagen (Nagra 2019a). Zu den Varianten in der Region Jura Ost (JO) haben der Kanton Aargau und die Regionalkonferenz Jura Ost Stellung genommen. Kanton und Regionalkonferenz weisen darauf hin, dass bei Errichtung und Betrieb der BEVA bei der Zwilag dem Grundwasserschutz besondere Beachtung geschenkt werden muss und umfassende Massnahmen zum Schutz des Grundwassers umzusetzen wären.

Die Nagra nimmt diese Rückmeldung auf und legt in dieser Studie beispielhaft ein Grundwasserschutzkonzept vor, in dem die Auslegung der BEVA bei der Zwilag eine Gefährdung des Grundwassers zuverlässig ausschliesst. Die Studie spannt den Rahmen etwas weiter. Sie zeigt, ausgehend von einer Beschreibung der Auslegungsgrundlagen einer BEVA, die Ausgangslage am Standort Zwilag für alle gegebenenfalls zu berücksichtigenden Naturgefahren. Dabei liegt der Schwerpunkt auf die auf Wasser zurückzuführenden Gefährdungen. Für die identifizierten Naturgefahren wird eine Ereignisanalyse durchgeführt. Für die wasserinduzierten Gefährdungen werden abdeckende bauliche und technische Massnahmen zur Vermeidung und/oder Beherrschung der möglichen Gefahren konzipiert und bewertet.

In mittel- und unmittelbarer Nähe des Standorts der Zwilag wurden und werden seit über 70 Jahren Kernanlagen sicher betrieben. Das Paul Scherrer Institut (PSI), die Zwilag und das Kernkraftwerk Beznau werden hierbei vom Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) und weiteren Bundes- und Kantonsstellen beaufsichtigt und überwacht. Zur Überwachung dient auch ein umfangreiches Mess- und Monitoringsystem in und um die Anlagen, insbesondere auch des Grundwassers. Die Erfahrungen aus diesen Anlagen bzw. deren Auslegung sind in die Massnahmenkonzeption für eine BEVA eingeflossen.

Im heutigen Planungsstand der BEVA sieht die Nagra die Umsetzung eines robusten mehrstufigen Abdichtungssystems zum Grundwasserschutz vor. Dies ergänzt das vorhandene Barrierensystem zum Einschluss der unlöslichen, festen, radioaktiven Stoffe in den Abfällen. Das mehrstufige Barrieren- und Abdichtungssystem der BEVA besteht aus heutiger Sicht aus einer massiven, aus Stahlbeton erstellten Umladezelle mit verschweisster Edelstahlauskleidung, einer fugenlosen, wasserdichten Mehrfachbeschichtung der Bodenbeläge (insbesondere in den Untergeschossen) sowie der Kombination einer massiven, wasserundurchlässigen Betonwanne mit einer hochwertigen Abdichtung mit Verbundfolien an den erdberührenden Bauteilen («Gelbe Wanne», hochgezogen über die Geländeoberkante). Das letzte Umsetzungsbeispiel des Systems «Gelbe Wanne» in nuklearen Anlagen findet sich gleich nebenan beim Bundeszwischenlager auf dem Gelände des PSI, das momentan gebaut wird.

Das heutige Konzept wird in der weiteren Planung unter Beizug von Spezialisten weiterentwickelt, um zum Zeitpunkt der Realisierung der BEVA (ab 2050) den aktuellen Stand der Technik zu berücksichtigen und eine Dichtigkeit sowie adäquaten Schutz zu gewährleisten.

Bei der Beurteilung von wasserinduzierten Gefährdungen spielen die Eigenschaften des Standorts eine wesentliche Rolle. Eine Überflutung des Standorts der BEVA durch die Aare ist ausgeschlossen. Eine Grundwasserexposition des Gebäudes ist äusserst selten und wenn, nur von kurzer Dauer und demnach ohne Einfluss auf die Konstruktion. Die BEVA ist mit dem

beschriebenen Konzept sicher gegen Hochwasser und Grundwasserspiegelanstieg ausgelegt. Eine klimatologische Gefährdung (bspw. Starkniederschläge) bzw. Gefährdung durch sonstige, insbesondere gravitative, Naturgefahren (bspw. Murgänge), kann infolge der robusten Bauwerkskonstruktion der BEVA wegen ihrer Auslegung gegen Erdbeben und Flugzeugabsturz ausgeschlossen werden.

Die baulichen Massnahmen werden von organisatorischen und betrieblichen Vorkehrungen flankiert, wie die Implementierung eines Qualitätssicherungssystems, der Einsatz von speziell ausgebildetem Personal, die Erstellung von Notfallplänen etc.

Mit den in der vorliegenden Studie beschriebenen baulichen, technischen und organisatorischen Vorsorgemassnahmen kann somit eine Gefährdung von Mensch und Umwelt ausgeschlossen werden. Eine Freisetzung von Radionukliden über den Wasserpfad ist sowohl im Normalbetrieb als auch im Ereignisfall (Störfall) ausgeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

Das Wesentliche in Kürze	I
Zusammenfassung.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Figurenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Kontext	1
1.2 Ziel und Vorgehen	1
1.3 Einleitender Diskurs zu Zuverlässigkeit und Risiko.....	2
2 Kernanlagen: Sicherheitsprinzip und Auslegungsgrundlagen.....	5
3 Ausgangslage	9
3.1 Standorteigenschaften.....	9
3.1.1 Umgebung und Lage.....	9
3.1.2 Datengrundlage.....	10
3.1.3 Talmorphologie und -geschichte	10
3.1.4 Topographie.....	11
3.1.5 Hydrologie und Grundwasserspiegel.....	12
3.1.6 Klimatologie	15
3.2 Anlagenbeschrieb und Betriebskonzept.....	16
3.2.1 Lage	16
3.2.2 Aufbau und Betriebskonzept	17
3.2.3 Nukleare Sicherheit und Strahlenschutz.....	19
4 Sicherheitsanalyse.....	23
4.1 Ermittlung des Spektrums der zu unterstellenden Störfälle.....	23
4.2 Identifikation relevanter, abdeckender Ereignisse.....	23
4.3 Standortspezifische Gefährdungsanalyse bezüglich hydrologischer und meteorologischer Extremereignisse.....	29
4.3.1 Hydrologie	29
4.3.2 Extrema der Klimatologie.....	34
4.3.3 Weitere Naturgefahren.....	37
4.3.4 Zusammenfassung	38
5 Massnahmen und Bewertung	41
5.1 Schutzmassnahmen während der Bauphase	42
5.2 Schutzmassnahmen während der Betriebsphase.....	43
5.2.1 Massnahmen zum Schutz von/vor Grund- und Oberflächenwasser	43
5.2.2 Massnahmen bezüglich Grundwassereinflüssen	46
5.2.3 Hochwasser.....	48

5.2.4	Massnahmen bezüglich Meteorwasser	49
5.2.5	Hangrutschung.....	49
5.2.6	Bewertung.....	49
6	Literaturverzeichnis	51
Anlage A	Topografie	A-1
Anlage B	Oberflächenabfluss und Dorfbach Würenlingen (Fotographien)	B-1
Anlage C	Mögliche Abdichtungssysteme zum Schutz des Grundwassers.....	C-1
C.1	«Gelbe Wanne»	C-3
C.2	Kunststoffdichtungsbahn	C-4
C.3	Variantenbewertung und Empfehlung	C-5

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1:	Klassierte Wiederkehrperioden und Häufigkeiten mit verbaler Umschreibung.....	3
Tab. 4-1:	Das für die Analyse zu berücksichtigende (übergeordnete) Ereignis- und Störfallspektrum	25
Tab. 4-2:	Spitzenabflüsse der Aare am Standort.....	30
Tab. 4-3:	Zusammenfassung der Werte der Einwirkungen mit 10'000-jährlicher Wiederkehrperiode	39
Tab. C-1:	Abdichtungsklassen, Abdichtungssysteme für Unterterrain resp. Untertagbau gemäss SIA 272.	C-2

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Sicherheitsebenen der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (bezogen auf die BEVA)	7
Fig. 3-1:	Lage des vorgeschlagenen Standorts der BEVA bei der Zwiilag (vgl. auch Fig. 3-5)	9
Fig. 3-2:	Topographie des Gebiets Unteres Aaretal	12
Fig. 3-3:	Isohypsen der Grundwasseroberfläche bei Mittelwasser (Grundwasserkarte) inklusive Angaben zur Grundwasserfassung	14
Fig. 3-4:	Gewässerschutzkarte (Ausschnitt der Region)	15
Fig. 3-5:	Zwiilag-Areal und Positionierung der BEVA.....	16
Fig. 3-6:	Querschnitt (oben) und Grundriss (unten) mit der Übersicht der wichtigsten Module einer BEVA.....	18
Fig. 3-7:	Barrierenkonzzept für den Einschluss und die Rückhaltung der Nuklide sowie den Schutz der Barrieren untereinander	21
Fig. 4-1:	Gefährdungskurve für Spitzenabflüsse der Aare an der Messstation Stilli (Mittelwert und Vertrauensbereiche, gestrichelte Linie) (links) und der zu den blauen und weissen Punkten zugehörige Wasserspiegel (rechts).....	30
Fig. 4-2:	Überflutungshöhe bei einem Hochwasser ohne Verklausung (links) und mit Verklausung der PSI-Brücke (rechts).....	32
Fig. 4-3:	Gefährdungskarte Oberflächenabfluss mit einer Wiederkehrperiode grösser 100 Jahre	33
Fig. 4-4:	Höhenprofile mit Angabe Unterkante Gebäude und bisherigen und maximal erwartbarem Grundwasserhöchststand.	34
Fig. 5-1:	Situation Bauwerke im Grundwasser.	42

Fig. 5-2:	Schematische Darstellung möglicher objektnaher bzw. -ferner Massnahmen zur Vermeidung oder Beherrschung von wasserinduzierten Belastungen, wie hohes Grundwasser (links), Flusshochwasser/Überflutung (Mitte) oder Niederschlag (rechts).....	45
Fig. 5-3:	Mehrfachbarrierensystem für die Rückhaltung radioaktiver Stoffe (Umladezelle und umgebende Bereiche) und Dichtungssystem für den Grundwasserschutz	48
Fig. A-1:	Topographie des Gebiets in einer Farbkodierung	A-1
Fig. B-1:	Dorfbach Würenlingen	B-1
Fig. B-2:	Bachprofil im Bereich Unterbodenweg	B-1
Fig. B-3:	Bachprofil im Wald (nach dem Bahndamm, beispielhaft)	B-2
Fig. B-4:	Durchlass Unterbodenweg (links) und Durchlass Bahndamm (rechts).....	B-2
Fig. B-5:	Strassen- und Eisenbahndamm	B-3
Fig. B-6:	Lage in der näheren Umgebung (Felder).....	B-3
Fig. B-7:	Die Forschungsstrasse durchbricht den Hang Richtung Südwesten.....	B-4
Fig. C-1:	Systemaufbau SikaProof® A (aus Planungsrichtlinie SikaProof®).....	C-3
Fig. C-2:	Rissversuch zur Prüfung von FPO-SikaProof® Abdichtungsbahnen.....	C-4
Fig. C-3:	Konstruktion mit aussenliegender Kunststoffdichtung für eine offene Baugrube (links) und eine geschlossene Baugrube (rechts)	C-5

Abkürzungsverzeichnis

BABS	Bundesamt für Bevölkerungsschutz
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BE	Abgebrannte Brennelemente
BEVA	BE/HAA(WA)-Verpackungsanlage
BFE	Bundesamt für Energie
BZL	Bundesz Zwischenlager für Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung
ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
HAA(WA)	Hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung
IAEA	International Atomic Energy Agency, Wien
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
MTO	Mensch, Technik und Organisation
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NTB	Nagra Technischer Bericht
OFI	Oberflächeninfrastruktur
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SSK	Strukturen, Systeme und Komponenten
StSG	Strahlenschutzgesetz
StSV	Strahlenschutzverordnung
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TB	Transportbehälter
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

1 Einleitung

1.1 Kontext

Im Zwischenlager Würenlingen AG (Zwilag) werden hochradioaktive Abfälle, bestehend aus abgebrannten Brennelementen (BE) und verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (HAA(WA)), in Transport- und Lagerbehältern zwischengelagert¹. Durch die Zwischenlagerung reduziert sich die Nachzerfallswärme dieser Abfälle, sodass diese einer Tiefenlagerung zugeführt werden können. Gleichzeitig reduziert sich auch die Aktivität dieser Abfälle um das 500- bis 1'000-fache. Für die geologische Tiefenlagerung müssen die BE und HAA(WA) entsprechend den Anforderungen der Langzeitsicherheit des Tiefenlagers verpackt werden. Die Umverpackung der BE bzw. HAA(WA) von den Transport- und Lagerbehältern in Endlagerbehälter erfolgt in einer sogenannten BE/HAA(WA)-Verpackungsanlage (kurz BEVA). Der Umladeprozess erfolgt abgeschirmt, trocken in einer entsprechend ausgelegten Umladezelle².

Wie bereits in Nagra (2019a, 2019b, 2020) gezeigt wurde, muss die Verpackung der radioaktiven Abfälle nicht zwingend am Standort des geologischen Tiefenlagers erfolgen. Eine BEVA kann auch am aktuellen Lagerort der Abfälle, der Zwilag, errichtet und betrieben werden³. In Zusammenhang mit einem geologischen Tiefenlager in Jura Ost haben der Kanton Aargau und die Regionalkonferenz in ihren Stellungnahmen (FG OFI Jura Ost 2021, Kanton Aargau 2021) zu den von der Nagra in Etappe 3 vorgelegten Vorschlägen zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur explizit darauf hingewiesen, dass bei Errichtung und Betrieb der BEVA bei der Zwilag dem Grundwasserschutz besondere Beachtung geschenkt werden muss und umfassende Massnahmen zum Schutz des Grundwassers umzusetzen wären.

1.2 Ziel und Vorgehen

Ziel des vorliegenden Berichts ist es aufzuzeigen, dass während Bau und Betrieb einer BEVA bei der Zwilag das übergeordnete Sicherheitsziel stets eingehalten und eine Gefährdung von Mensch und Umwelt durch Freisetzung radioaktiver Stoffe oder infolge ionisierender Strahlung sowie eine Gefährdung des Grundwassers jederzeit ausgeschlossen werden können. Um dies in diesem Bericht umfassend, aber stufengerecht aufzuzeigen, werden zunächst in Form einer Risikostudie alle zu berücksichtigenden Ereignisse⁴ identifiziert, hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials quantifiziert und anschliessend bewertet. Im Besonderen wird dabei auf die standortspezifischen, extern durch Wassergefahren induzierten sowie die von der Anlage ausgehenden Gefahren und Konsequenzen für Mensch und Umwelt generell – und speziell auch für das Grundwasser – eingegangen. Die Risikoanalyse stützt sich dabei auf eine breite Wissensbasis bestehend aus einer Vielzahl vorhandener Sicherheitsnachweise ab, die für die in der Region bereits seit Jahrzehnten

¹ Hochaktive Abfälle werden auch im Zwischenlager für hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente des Kernkraftwerks Beznau sowie im Nasslager des Kernkraftwerks Gösgen gelagert.

² Die Umladung stützt sich dabei auf die Erfahrungen in der Heissen Zelle der Zwilag, in der bis heute über 700 BE störungsfrei umgeladen wurden und noch über 400 BE in den nächsten Jahren umgeladen werden. Erfahrungen zum trockenen Umladen liegen auch aus der Heissen Zelle der Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague vor, in der bisher über 75'000 BE (ca. 1'200 BE pro Jahr) umgeladen wurden.

³ Der Prozess der Verpackung der Abfälle in Endlagerbehälter ist funktional unabhängig vom Prozess der Einlagerung und kann daher unabhängig vom Ort des geologischen Tiefenlagers erfolgen. In Nagra 2020 wurde dargelegt, dass nur die Oberflächenanlage beim Tiefenlager oder der aktuelle Standort der Abfälle (Zwilag) weiter zu betrachtende Standortoptionen für eine BEVA sind.

⁴ In der Kerntechnik unterscheidet man "Einwirkungen von innen" und "Einwirkungen von aussen".

in Betrieb befindlichen Kernanlagen (Paul Scherrer Institut, Kernkraftwerk Beznau, Zwiilag) vorliegt (für die jeweiligen Referenzen siehe Kap. 3.1 und 4.3).

Basierend auf den Ergebnissen dieser systematischen Analyse werden abdeckende bauliche und technische Massnahmen zur Vermeidung und/oder Beherrschung der möglichen Gefahren auf Konzeptebene vorgestellt und daraus Auslegungsvarianten abgeleitet und bewertet. Die Auslegungsgrundsätze berücksichtigen zudem die Umsetzung eines Mehrfachbarrierensystems. Anhand dieses Systems wird konzeptionell aufgezeigt, wie die standortspezifischen Gefahren im Raum Zwiilag vermieden bzw. beherrscht und der Grundwasserschutz eingehalten werden können.

1.3 Einleitender Diskurs zu Zuverlässigkeit und Risiko

Die Auslegung einer Kernanlage wie der BEVA erfolgt nach den Vorgaben von Gesetzgeber, Aufsichts- und Genehmigungsbehörden nach dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die Auslegung eines konventionellen Gebäudes oder einer konventionellen Anlage erfolgt mit Schwerpunkt auf die Zuverlässigkeit bezüglich konventioneller Sicherheit. Bei der Auslegung einer Kernanlage wird über die Zuverlässigkeit hinaus ein starker Fokus auf die Störfallbeherrschung gelegt. Dabei wird anhand eines abdeckenden Störfallspektrums⁵ aufgezeigt, dass die Auswirkungen innerhalb der Vorgaben der Strahlenschutzverordnung bleiben. Die Vorgaben sind risikobasiert⁶, indem Störfälle, die häufiger auftreten können, ein geringeres Schadensausmass haben müssen als Störfälle, die seltener auftreten können: das Gesamtrisiko muss immer unterhalb des zulässigen Risikos liegen, was nachzuweisen ist. Das Gesamtrisiko umfasst somit alle denkbaren Ereignisse.

Dieses Vorgehen bedingt, dass die zuständigen Fachleute sehr früh auch mit Ereignissen umgehen, die aufgrund der hohen Ansprüche des Gesetzgebers nur mit sehr geringer Häufigkeit vorkommen. Aufgrund ihrer Seltenheit sind sie schwer vorstellbar und präzise zu ermitteln. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) setzt in der nationalen Risikoanalyse 2020 (BABS 2020) das Risiko für die Schweiz und die Schweizer Bevölkerung in den nationalen Kontext.

Ein häufig im Risikokontext anzutreffender Begriff ist die «Wiederkehrperiode», die auch über die Verwendung in den Medien, bspw. «Jahrhundertsturm», «100-jährliche Hochwasser», einer grösseren Öffentlichkeit bekannt geworden ist. Die Wiederkehrperiode ist der Kehrwert der Häufigkeit, d.h. ein 100-jährliches Hochwasser-Ereignis hat eine Häufigkeit von 10^{-2} pro Jahr. In der Kerntechnik (gemäss Art. 8 Abs. 4^{bis} KEV) sind Jährlichkeiten zwischen 10^{-3} und 10^{-4} , d.h. 1'000- und 10'000-jährliche Ereignisse, zu betrachten. Dies sind praktisch überall noch nie beobachtete Ereignisse und eine korrekte Einordnung bedarf gründlicher Abwägungen. Das schon erwähnte Bundesamt für Bevölkerungsschutz gibt eine Hilfestellung, um den Häufigkeitsbegriff greifbar zu machen, wie in Tab. 1-1 gezeigt. Die verbale Umschreibung hilft, eine Häufigkeit einzuordnen.

⁵ Summe aller möglichen Störfälle mit Ursprung innerhalb und ausserhalb der Anlage, siehe Art. 8 KEV 2004.

⁶ Risiko ist das Produkt von Häufigkeit und Schadensausmass.

Tab. 1-1: Klassierte Wiederkehrperioden und Häufigkeiten mit verbaler Umschreibung
In Anlehnung an Tabelle 2 aus BABS (2020)

Umschreibung	Wiederkehrperiode (einmal in x Jahren)	Häufigkeit (1/Wiederkehrperiode)
Tritt in der Schweiz durchschnittlich wenige Male pro Menschenleben ein.	≤ 30	$\geq 3 \times 10^{-2}$
Tritt in der Schweiz im Durchschnitt etwa einmal pro Menschenleben ein.	$> 30 - 100$	$< (1 - 3) \times 10^{-2}$
Hat sich in der Schweiz schon ereignet, kann aber schon mehrere Generationen zurückliegen.	$> 100 - 300$	$< (3 - 10) \times 10^{-3}$
Hat sich in der Schweiz vielleicht noch nicht ereignet, ist aber aus anderen Ländern bekannt.	$> 300 - 1'000$	$< (1 - 3) \times 10^{-3}$
Es sind weltweit mehrere Ereignisse bekannt.	$> 1'000 - 3'000$	$< (3 - 10) \times 10^{-4}$
Weltweit sind nur wenige Ereignisse bekannt.	$> 3'000 - 10'000$	$< (1 - 3) \times 10^{-4}$
Weltweit sind nur einzelne Ereignisse bekannt, sie sind jedoch auch in der Schweiz denkbar.	$> 10'000 - 30'000$	$< (3 - 10) \times 10^{-5}$
Weltweit sind – wenn überhaupt – nur einzelne Ereignisse bekannt. Ein solches Eintreten gilt selbst weltweit als sehr selten, ist jedoch auch in der Schweiz nicht völlig auszuschliessen.	$> 30'000$	$< 3 \times 10^{-5}$

Einen alternativen Zugang zum Thema bietet wiederum die Zuverlässigkeit. Während das Risiko den Fall des «Nicht-Funktionierens» behandelt, beschreibt die Zuverlässigkeit den Fall des «Funktionierens». Die Summe aus Zuverlässigkeit und Risiko ist eins, d.h. deckt alle möglichen Anlagenverhalten ab. Tritt eine Einwirkung mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr ein, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie nicht eintritt, 0.9999.

Die Legislative legt mit Hilfe der Aufsichts- und Genehmigungsbehörden Grundsätze für die Auslegung konventioneller und nuklearer Anlagen fest. Hierbei hat sie die herausfordernde Aufgabe, gesetzliche Vorgaben für die aus ihrer Sicht erforderliche Zuverlässigkeit und somit auch das akzeptable Risiko festzusetzen. Die Fachleute haben dann die Aufgabe, die Anlagen so auszulegen, dass sie diese Vorgaben erfüllen. Dies muss in geeigneter Form gegenüber den Aufsichts- und Genehmigungsbehörden nachgewiesen werden. Die Behörden prüfen diese Nachweise und genehmigen Bau und Betrieb, wenn alle Anforderungen erfüllt werden.

Die Entwicklung eines Konzepts für den Grundwasserschutz einer BEVA erfolgt in diesem Kontext nach einer sicherheitsorientierten Philosophie, die die Betrachtung von Worst-Case-Szenarien und möglichen Konsequenzen einschliesst.

2 Kernanlagen: Sicherheitsprinzip und Auslegungsgrundlagen

Ein geologisches Tiefenlager inklusive seiner zugehörigen, übertägig angeordneten Bauwerke stellt eine Kernanlage dar und unterliegt damit den betreffenden Gesetzen und Regelwerken. Diese Regelwerke mit ihrer hohen regulatorischen Dichte und Tiefe bilden den entsprechenden rechtlichen Rahmen. Dazu zählen das Kernenergiegesetz (KEG 2003), die Kernenergieverordnung (KEV 2004), das Strahlenschutzgesetz (StSG 1991), die Strahlenschutzverordnung (StSV 2017), die Verordnung über den Umgang mit radioaktivem Material (UraM 2017) und verschiedene Verordnungen des Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (bspw. UVEK 2009) und Richtlinien⁷ des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI 2022). Neben den spezifischen kerntechnischen Regelwerken für Kernanlagen⁸ gelten auch Gesetze, Verordnungen, Richtlinien, Normen und Regelwerke aus anderen Bereichen, wie dem Bauwesen, dem Maschinenbau, der Elektrotechnik und der Qualitätssicherung in Organisationen, bspw. Gewässerschutzgesetz (GSchG 1991), Gewässerschutzverordnung (GSchV 1998), Umweltschutzgesetz (USG 1983), ISO- und SIA-Normen, Richtlinien der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF 2015), Störfallverordnung (StFV 1991), Umweltschutzrichtlinien.

Die Gesamtheit der anwendbaren Gesetze und rechtlichen Regelwerke bildet die Grundlage für ein koordiniertes, gestaffeltes Bewilligungsverfahren (Kapitel 4 KEG), welches sich in die Rahmen-, Bau- und Betriebsbewilligung sowie die Verfügung für die Stilllegung gliedert. Inhaltlich umfasst das Bewilligungsverfahren sowohl allgemeine als auch spezifische Anforderungen an Auslegung, Bau und Betrieb der Kernanlagen. Diese Anforderungen betreffen die Herstellung, die Montage, die Inbetriebsetzung, die Instandhaltung der Kernanlage und ihrer Komponenten sowie den Umfang der Sicherheitsnachweise. Bereits bei der Planung einer Kernanlage und für die verschiedenen Bewilligungsschritte werden umfangreiche und systematische Sicherheitsnachweise durch den Gesuchsteller erstellt. Die eingereichten Dokumente werden durch die zuständigen Aufsichtsbehörden stufengerecht geprüft (ggf. auch begleitet durch internationale Fachexperten).

Es liegt in der Verantwortung des Betreibers einer Kernanlage, die Sicherheit seiner Anlage zu gewährleisten (Art. 22 Abs. 1 KEG), diese fortlaufend zu überprüfen, systematisch zu bewerten (Art. 33 KEV) und wo notwendig zu verbessern (Art. 22 Abs. 2 KEG). Das übergeordnete Sicherheitsziel fordert gemäss Art 4 KEG den Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefährdungen durch ionisierende Strahlen. Zudem dürfen radioaktive Stoffe nur in nicht gefährdendem Umfang freigesetzt werden. Insbesondere muss Vorsorge gegen eine unzulässige Freisetzung radioaktiver Stoffe sowie gegen eine unzulässige Bestrahlung von Personen im Normalbetrieb und bei Störfällen getroffen werden. Die Einhaltung dieses Sicherheitsziels wird mit einer entsprechenden Sicherheitsvorsorge gewährleistet, welche sich an dem Schutzzielkonzept und der Einhaltung der

⁷ Bspw. präzisiert die Richtlinie ENSI-G23 die *Auslegungsgrundsätze für andere Kernanlagen als Kernkraftwerke* (ENSI 2021a) und berücksichtigt somit explizit den anderen Charakter und das geringere Gefährdungspotenzial dieser Kernanlagen.

⁸ Zu den Kernanlagen in der Schweiz im Aufsichtsbereich des ENSI gehören alle Kernkraftwerke, Forschungsreaktoren, Teile des Paul Scherrer Instituts (PSI), das zentrale Zwischenlager für radioaktive Abfälle (Zwilag) und das Bundeszwischenlager (BZL) in Würenlingen.

darin definierten Schutzziele⁹ orientiert. Jedes Schutzziel wird durch verschiedene Sicherheitsfunktionen erfüllt. Diese Sicherheitsfunktionen können auf vielfältige Art, bspw. durch technische wie auch organisatorische Massnahmen, umgesetzt werden. Die Erfüllung der Sicherheitsfunktionen ist für verschiedene Anlagenzustände, wie Normalbetrieb, Betriebsstörung, Auslegungstörfall oder auslegungsüberschreitenden Störfall (vgl. auch Fig. 2-1), aufzuzeigen.

Aufgrund des unterschiedlichen Zwecks und deshalb signifikant unterschiedlichen Gefährdungspotenzials eines Kernkraftwerks gegenüber einer BEVA oder einem Tiefenlager unterscheiden sich die Sicherheitsfunktionen zur Erfüllung der Schutzziele deutlich voneinander. Aktive Sicherheitsfunktionen zum Schutz der Barrieren für den Einschluss der radioaktiven Stoffe, wie in einem Kernkraftwerk, sind in einer BEVA nicht notwendig, da die treibenden Kräfte Reaktivität und Nachzerfallswärme nicht vorhanden sind¹⁰. Zudem sind die maximal in einer BEVA vorhandene Aktivität, die Wirksamkeit des Einschlusses und die Immobilität des Inventars sowie die kleinen in der BEVA vorhandenen Energiedichten zu beachten (vgl. Kap. 3.2)¹¹.

Im Konzept der gestaffelten Sicherheitsvorsorge der International Nuclear Safety Advisory Group der IAEA¹² wird die Sicherheitsvorsorge zur Erfüllung der Schutzziele und Sicherheitsfunktionen in Kernanlagen in fünf Sicherheitsebenen untergliedert. Jede Sicherheitsebene umfasst auf spezifische Anlagezustände und damit verbundene Störungen ausgerichtete Sicherheitsvorkehrungen mit spezifischen Zielen. Das Konzept der gestaffelten Sicherheitsvorsorge besteht somit aus mehreren hintereinander gestaffelten Ebenen von Vorkehrungen, von denen jeweils die nächste dazu dient, ein Versagen der Vorkehrungen auf der davor liegenden Ebene aufzufangen. Die ersten vier Sicherheitsebenen bilden dabei die anlageninterne, die Ebene fünf die anlagen-externe Sicherheitsvorsorge (d.h. anlageninterne bzw. -externe Massnahmen). In Fig. 2-1 ist das Konzept der gestaffelten Sicherheitsvorsorge schematisch dargestellt, wobei nur diejenigen Ebenen gezeigt sind, die für eine BEVA infolge des im vorhergehenden Absatz erläuterten, niedrigeren Gefährdungspotenzials relevant sind.

Ein weiteres wesentliches Element zur Erfüllung der Schutzziele und des Sicherheitsziels bildet das Barrierenkonzept. Dieses Konzept soll die anlageninterne und -externe Freisetzung und Ausbreitung von radioaktiven Stoffen verhindern und fordert, dass radioaktive Stoffe zu jeder Zeit durch unabhängige Barrieren eingeschlossen sind. Als Barrieren zählen bspw. der Einschluss der radioaktiven Stoffe in dichten Behältnissen (Brennstoffmatrix und Hüllrohre bzw. Glasmatrix und Edelstahlumhüllung sowie in robusten Behältern mit Primär- und Sekundärdeckelsystemen

⁹ Gemäss Art. 1 Bst. d der UVEK-Verordnung über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (UVEK 2009) zählen zu den grundlegenden Schutzziele zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit (1) die Kontrolle der Reaktivität, (2) die Kühlung der Brennelemente, (3) der Einschluss radioaktiver Stoffe und (4) die Begrenzung der Strahlenexposition. Die Einhaltung der Schutzziele dient dem Schutz der Barrieren, welche die radioaktiven Stoffe von der Umwelt trennen. Für den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers und seiner zugehörigen, übertägig angeordneten Bauwerke (bspw. BEVA) sind aufgrund der langen Zwischenlagerzeit noch vor der Umverpackung nur die beiden letzten Schutzziele von Bedeutung (vgl. auch Nagra 2013, Seite 30).

¹⁰ So sind bspw. in einer BEVA keine Sicherheitssysteme zur Sicherstellung der Kernnotkühlung bzw. keine bedeutenden Massnahmen zur Gewährleistung der Unterkritikalität und der Nachwärmeabfuhr erforderlich, da sie weder Reaktor noch Reaktorkern hat.

¹¹ Das Radionuklidinventar in der BEVA ist im Vergleich zu den entsprechenden anderen Kernanlagen der Schweiz klein (Nagra 2013): 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 kurz- und kürzestlebigen Nuklide sind bis zu deren Verpackung in einer BEVA praktisch alle vollständig zerfallen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass im Vergleich zu Kernkraftwerken oder auch zur Zwiilag stets deutlich weniger BE in einer BEVA vorhanden sind (in der Zwiilag bei vollständiger Beladung ca. 218 TLB, also rund 50-mal mehr als in einer BEVA mit einem BE-Äquivalent von ca. 4 TLB).

¹² International Atomic Energy Agency in Wien.

(Transport- und Lagerbehälter)) als auch bauliche Strukturen, wie die Umladezelle und die sie umgebenden Gebäudeteile. Auch im Fall der BEVA wird ein aus mehreren gestaffelten Barrieren bestehendes Konzept umgesetzt (vgl. Kap. 3.2.3, Fig. 3-7). Die Erfüllung des Barrierenkonzepts spiegelt sich auch in den fünf Sicherheitsebenen wider.

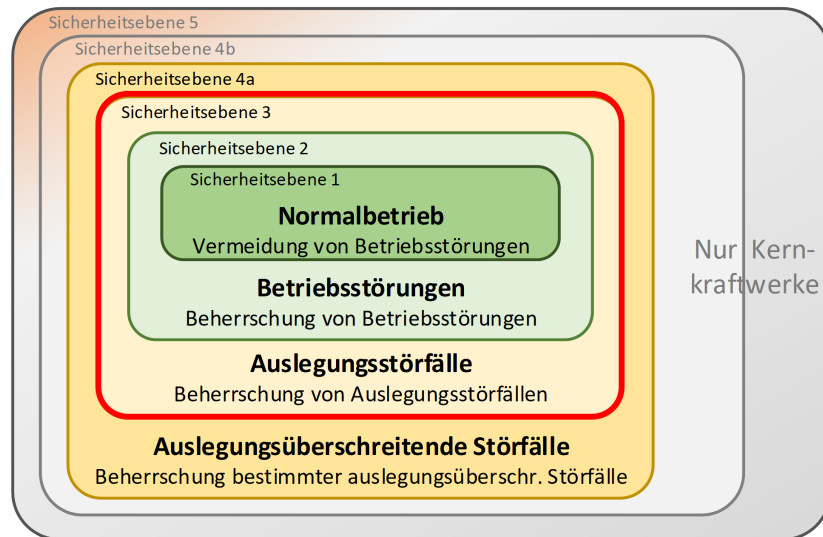


Fig. 2-1: Sicherheitsebenen der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (bezogen auf die BEVA)

Ebene 4b ist nur für Kernkraftwerke von Bedeutung, da diese Ebene sich auf (schwere) Kernschäden bezieht. Folglich gilt dies auch für die Ebene 5, die anlagenexternen Massnahmen für die Bewältigung schwerer Notfälle mit grösserer Freisetzung radioaktiver Stoffe in der Umgebung.

Im Sicherheitskonzept einer Kernanlage werden zudem die Einflüsse von Mensch, Technik und Organisation (MTO-System) ganzheitlich berücksichtigt. Die Sicherheit einer Kernanlage hängt also nicht allein von deren technischer Ausführung ab, sondern auch von den Fähigkeiten und dem Verhalten des Personals, welches die Anlage betreibt und in einer Organisation mit entsprechender Sicherheitskultur eingebunden ist.

Neben den organisatorischen Anforderungen an das MTO-System Kernanlage, wie beispielsweise Anforderungen an die Aus- und Weiterbildung des Personals, bestehen qualitative und quantitative Sicherheitsanforderungen an technische Strukturen, Systeme und Komponenten. Zu den qualitativen Anforderungen zählen Qualifikation von Komponenten, Redundanz, Robustheit, Zuverlässigkeit, räumliche Trennung und Diversität (Art. 10 KEV). Zu den quantitativen Sicherheitsanforderungen zählt der Nachweis der Einhaltung der Dosislimite nach Art. 123 StSV (2017) durch Sicherheitsanalysen. Bei Kernanlagen werden die Ereignisse bezüglich ihrer Häufigkeit¹³ in sogenannte Störfallkategorien eingeordnet. Die Auslegungsstörfälle decken dabei

¹³ In diesem Dokument werden die Begriffe Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit bedeutungsgleich verwendet (frequentistische Interpretation der Wahrscheinlichkeit). Die Häufigkeit gibt die erwartete Anzahl Ereignisse pro Jahr an (bspw. 10^{-4} pro Jahr). Die Häufigkeit entspricht dem Kehrwert der mittleren jährlichen Wiederkehrperiode. Die Wiederkehrperiode steht für eine Zeitspanne in Jahren, in der ein bestimmtes Ereignis gemäss statistischen Berechnungen oder Schätzungen im Durchschnitt einmal erreicht oder überschritten wird (bspw. 1-mal in 10'000 Jahren gleichbedeutend mit dem 10'000-jährlichen Ereignis). Die Überschreitungshäufigkeit bezieht sich auf eine Häufigkeit für einen Intensitätswert grösser gleich x.

einen Häufigkeitsbereich von 10^{-1} bis 10^{-6} pro Jahr ab (vgl. rote Umrandung in Fig. 2-1). Es werden also Ereignisse bzw. Ereigniskombinationen mit einer Häufigkeit bis 10^{-6} pro Jahr bei der Auslegung von Kernanlagen (und damit auch bei der BEVA) berücksichtigt. Die Strahlenschutzgesetzgebung verlangt zudem eine Begrenzung der Strahlenexposition (Art. 9 StSG) durch Einhaltung der radiologischen Schutzziele und die Optimierung des Strahlenschutzes (Art. 4 StSV). Dies bedeutet, dass die blosser Einhaltung von Grenzwerten im Normalbetrieb (inkl. Betriebsstörungen) sowie je Störfallkategorie nicht ausreichend ist. Dem Optimierungsgebot folgend, soll die BEVA so ausgelegt werden, dass auch bei Störfällen mit Häufigkeiten kleiner als 10^{-4} pro Jahr (zwischen 10^{-4} und 10^{-6} pro Jahr) eine erhebliche (luftgetragene) Radionuklidfreisetzung ausgeschlossen werden kann, und die resultierende Dosis für nicht-beruflich strahlenexponierte Personen unter 1 mSv liegt (also mindestens zwei Grössenordnungen unter der Dosislimite von 100 mSv). Eine wassergetragene Freisetzung von Radionukliden ist für eine BEVA aufgrund fehlender wasserführender Systeme in der Umladezelle (vgl. Kap. 3.2) sowie der nach innen und aussen gerichteten Abdichtungsmassnahmen (vgl. Kap. 5.2) ausgeschlossen. Der Schutz von Grund- und Oberflächenwasser kann im Fall einer BEVA jederzeit gewährleistet werden.

Die BEVA wird, wie existierende Schweizer Kernanlagen, die keine Kernkraftwerke sind, gemäss den entsprechenden Regelwerken (insbesondere der Richtlinie ENSI-G23 (ENSI 2021a)) geplant, gebaut, betrieben, stillgelegt und rückgebaut.

3 Ausgangslage

3.1 Standorteigenschaften

3.1.1 Umgebung und Lage

Beim vorgeschlagenen Standort der BEVA bei der Zwiilag handelt es sich um heute weitgehend freie Teile des Areals der Zwiilag. Das Areal befindet sich in unmittelbarer Nähe des Paul Scherrer Instituts. Die genannten Einrichtungen befinden sich im Kanton Aargau im Unteren Aaretal rechtsseitig der Aare. Administrativ ist die Zwiilag der Gemeinde Würenlingen und das Paul Scherrer Institut der Gemeinde Villigen zugeordnet.

Der Standort (vgl. Fig. 3-1) ist durch das Fliessgewässer Aare, durch einen umgebenden grossen Wald, durch stabile geologische Formationen und durch die sehr gute Erschliessung durch Strassen gekennzeichnet. Im 20 km Umkreis leben über 400'000 Menschen. Das Kernkraftwerk Beznau liegt ca. 1.5 km flussabwärts vom Standort. Gesamthaft handelt es sich um ein naturnahes Gebiet. Die weitere Region ist überwiegend landwirtschaftlich geprägt (Resun AG 2008b).



Fig. 3-1: Lage des vorgeschlagenen Standorts der BEVA bei der Zwiilag (vgl. auch Fig. 3-5)

3.1.2 Datengrundlage

Der Standort wurde aufgrund der existierenden kerntechnischen Anlagen in der Region umfassend auf potenzielle Einwirkungen und Gefährdungen untersucht. Solche Untersuchungen finden sich bspw. im Sicherheits- und im Umweltverträglichkeitsbericht für das Ersatzkernkraftwerk¹⁴ Beznau (Resun AG 2008a, 2008b), in den Sicherheitsberichten und periodischen Sicherheitsüberprüfungen für das Kernkraftwerk Beznau sowie in Bewertungen des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI 2021b). Es wurden verschiedene schweizweite Gefährdungsstudien (wie die Probabilistische Erdbeben-Gefährdungs-Analyse für die KKW-Standorte in der Schweiz PEGASOS, Abrahamson et al. 2004 und das PEGASOS Refinement Project PRP, Renault et al. 2014) sowie die Studie Extremhochwasser an der Aare (EXAR, Andres et al. 2021), in den Post-Fukushima-Untersuchungen zu klimatologischen Einwirkungen für das Kernkraftwerk Beznau (ENSI 2022) bzw. für alle Schweizer Kernkraftwerke oder im Windbankprojekt für die Einwirkung Wind (Graber & Bürki 1996) durchgeführt. Ausserdem liegen direkt für den Standort diverse Analysen und Sicherheitsberichte vor (Zwilag 1994, HSK 1999, ENSI 2014, ENSI 2017). Darüber hinaus hat das ENSI teilweise eigene Studien umgesetzt, wie bspw. die Gefährdungsanalyse für Flugzeugabsturz (ENSI 2018a).

Im Rahmen des Umweltverträglichkeitsberichts für das Ersatzkernkraftwerk Beznau (Resun AG 2008b) sowie der Planungsstudien der Nagra (Nagra 2014a, 2014b, 2014c) wurde nicht nur die umliegende Pflanzenwelt intensiv erfasst, wie bspw. die Klassifizierung pflanzensoziologischer Einheiten, sondern auch die Tierwelt. So wurden bspw. Wildtierkorridore in der Nähe des Standorts identifiziert. Für die Verlängerung der Wasser-Konzession für das Kernkraftwerk Beznau und der Beantragung von wasserbaulichen Massnahmen wurde ausserdem der Fischbestand in der Aare untersucht, siehe bspw. auch Rey et al. (2013) oder Resun AG (2008b).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der vorgeschlagene Standort der BEVA bei der Zwilag eine ausserordentlich grosse Untersuchungstiefe aufweist. Zudem stellt das Untere Aaretal aufgrund der verschiedenen kerntechnischen Anlagen in der Region auch radiologisch eines der am intensivsten überwachten Gebiete in der Schweiz dar.

In diesem Bericht sind Werte und Aussagen aus Sicherheitsberichten für das Kernkraftwerk Beznau, das Ersatzkernkraftwerk Beznau und der Zwilag durch einen Fachexperten zusammengefasst und für den BEVA-Standort plausible Werte und Aussagen abgeleitet worden. Dies betrifft insbesondere Kap. 3.1 und 4.3. Für das Rahmenbewilligungsgesuch werden diese Werte und Aussagen noch einmal explizit überprüft und gegebenenfalls ergänzt.

3.1.3 Talmorphologie und -geschichte

Das Untere Aaretal ist ein sehr alt angelegtes Tal. Durch dieses Tal flossen bereits vor mehr als 5 Millionen Jahren die vereinigten Flusssysteme der Aare, Reuss, Limmat und teilweise des Rheins. Seit ca. 2.9 Millionen Jahren wird die Erosionsgeschwindigkeit der Aare im Bereich des Tafeljuras durch die Absenkung des Oberrheingrabens bestimmt. Zwar hat die Aare über die Jahrhunderttausende wechselhafte Mäander geformt, die sich heraushebenden Strukturen in Standortnähe aber immer nahezu rechtwinklig durchschnitten.

¹⁴ Das Ersatzkraftwerk war in der Nähe des Kernkraftwerks Beznau geplant.

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 Fels eingekerbtes U-förmiges Trogtal mit einer relativ flachen Sohle und steilen Flanken (Resun AG 2008a). Der Gletscher lagerte dabei 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.

3.1.4 Topographie

Das Aaretal verläuft in der näheren Umgebung des Standorts Richtung Süd-Nord bzw. Süd-Südwest zu Nord-Nordost. Die Aare hat sich in diesem Winkel in die Schichten des Tafeljuras eingeschnitten. 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. In der näheren Umgebung werden Höhen von knapp 700 m erreicht (siehe Fig. 3-2, inkl. Schnitt durch das Tal sowie Fig. A-1 in Anhang A).

Die Felsoberkante im Bereich des Standorts liegt zwischen 310 bis knapp 320 m ü.M. Prinzipiell fällt die Felsoberkante in südwestlich-nordöstlicher Richtung ab, wobei es verschiedene Felsbuckel von mehreren Höhenmetern gibt. Die Lockergesteinsfüllung im Aaretal besteht zuoberst aus vorwiegend sandigen Sedimenten. Darunter finden sich die bereits genannten Niederterrassenschotter als überwiegend sandreiche Kiese, in denen das Grundwasser fliesst (vgl. Kap. 3.1.5). Die Niederterrassenschotter-Obergrenze lag vor der Bebauung bei einer Kote von ca. 332 bis 334 m ü.M. Ausserdem sind im Unteren Aaretal die Hochterrassenschotter weit verbreitet. Sie bestehen vorwiegend aus sandigem Kies und unterscheiden sich zum Niederterrassenschotter durch einen höheren Feinanteil sowie durch die Verkittung mit Nagelfluh. Die Hochterrassenschotter erreichen Mächtigkeiten von bis zu 10 m (Resun AG 2008a).

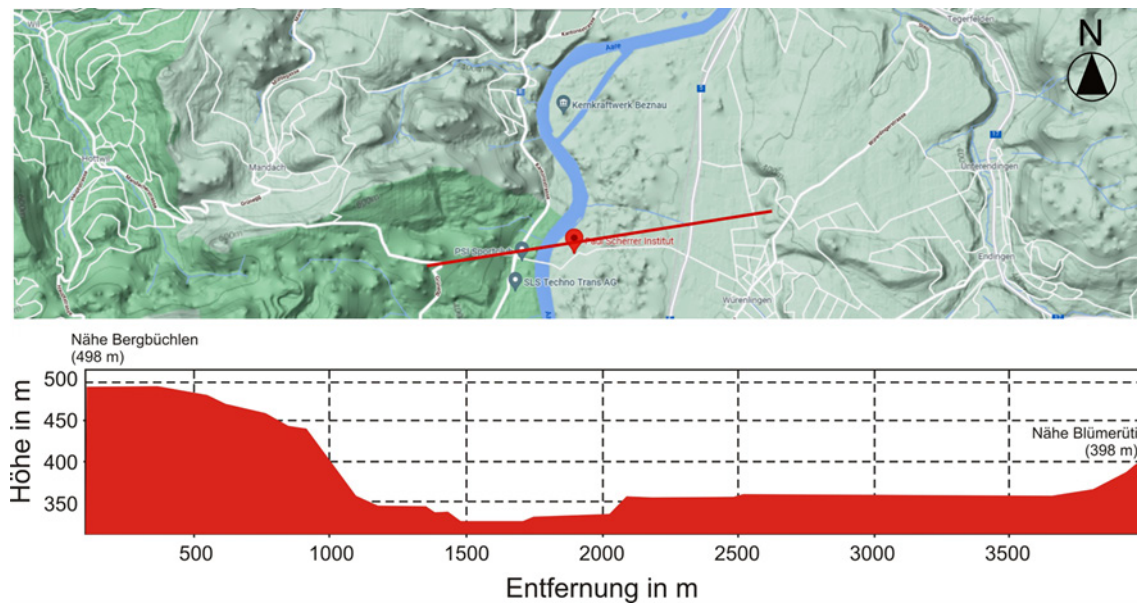


Fig. 3-2: Topographie des Gebiets Unterer Aaretal

Die rote Linie ist die Achse des dargestellten Profils, der rote Punkt das Areal der Zwiilag bzw. des Paul Scherrer Instituts.

3.1.5 Hydrologie und Grundwasserspiegel

Oberflächenwasser

Das Oberflächenwassersystem im Gebiet des vorgeschlagenen Standorts der BEVA wird von der Aare dominiert. Gleichwohl gibt es weitere kleine Zuflüsse im angeschlossenen Waldgebiet (siehe auch Ingenieure Bart AG 2010). Die Aare-Messstation Untersiggenthal, Stilli ist seit 1975 in Betrieb und stellt digitale Werte zur Verfügung. Unter Verwendung von früheren Messstationen in Döttingen und Stilli liegt eine Pegelmessreihe (monatlich) seit 1904 vor, bereits ab 1879 war ein Limnigraph (Wasserstandsschreiber) in der Nähe des heutigen Messstandorts in Betrieb. Der Normalpegel der Aare in Untersiggenthal liegt bei ca. 326 m ü.M. Der geplante Standort der BEVA hat eine Geländehöhe von 335 m ü.M. und liegt damit 9 m oberhalb des Normalpegels.

Grundwasser

Für das Untere Aaretal liegen umfangreiche Untersuchungen (inkl. Resultate von Rechenmodellen) zum Grundwasserverhalten¹⁵ vor. Diese sind im Rahmen der Prüfung der Kapazität des Grundwassers zur Kühlung des Kernkraftwerks Beznau über Brunnenwasserpumpen, zur Prüfung von baulichen Massnahmen am Wehr-Oberwasserkanal und für Untersuchungen möglicher Verunreinigungen des Grundwassers durch schwere Kernunfälle durchgeführt worden.

¹⁵ Grundwasser ist unterirdisches Wasser, welches die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschliesslich oder nahezu ausschliesslich von der Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt wird.

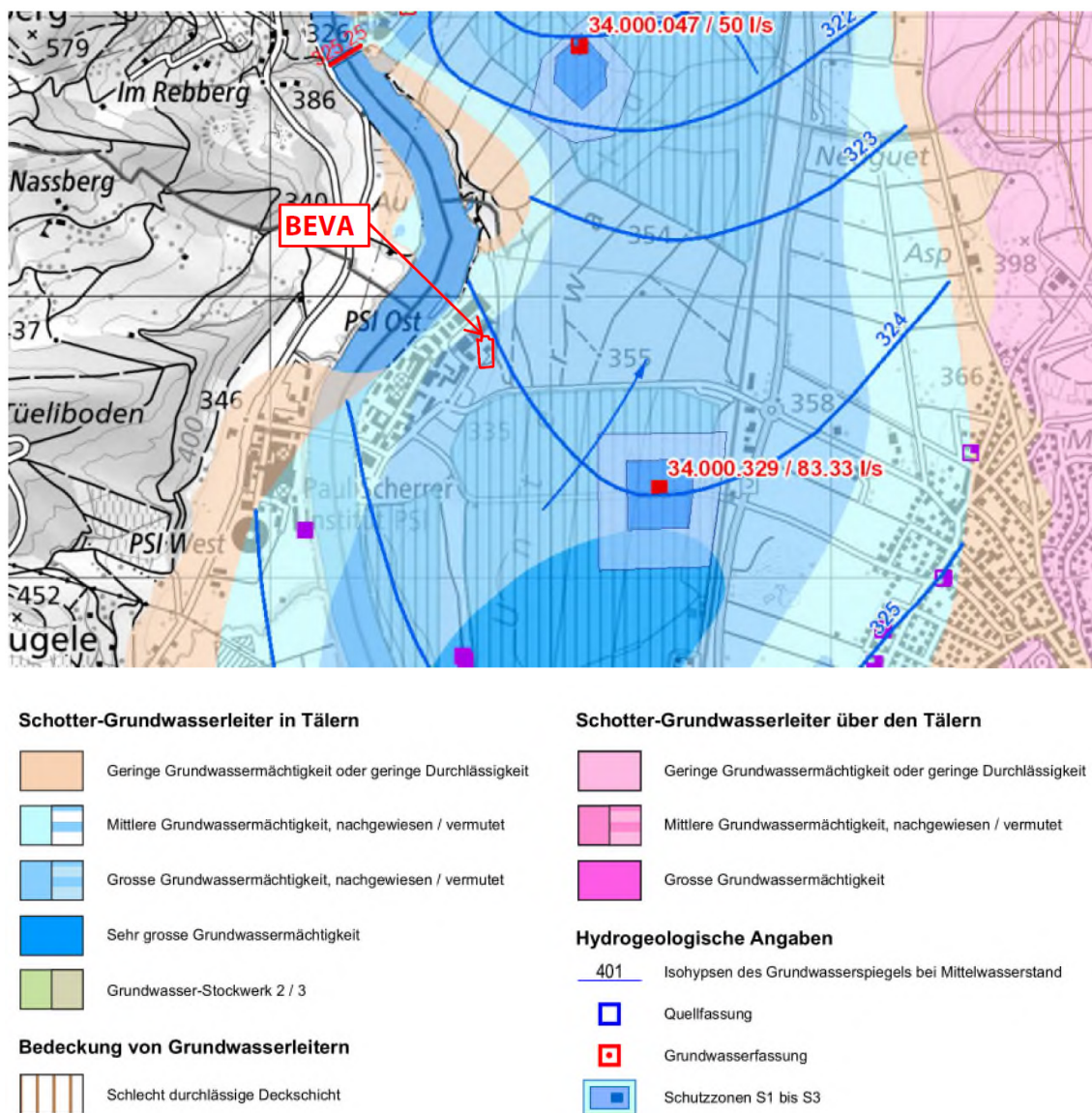
Die Grundwassermächtigkeit beträgt im Unteren Aaretal im Allgemeinen ca. 10 – 15 m, im Bereich von lokalen, schmalen Rinnen sogar mehr als 20 m. In der Nähe des Talrands nimmt sie auf weniger als 5 m ab. Der tägliche Grundwasserabfluss liegt bei knapp 40'000 m³/Tag und beträgt ca. ein Promille des Oberflächenabflusses der Aare. Der Grundwasserstrom des Unteren Aaretals wird in der näheren und weiteren Umgebung durch verschiedene, teils sehr kapazitive Grundwasserfassungen intensiv zu Trink- und Brauchwasserzwecken genutzt (Resun AG 2008a).

Die Grundwasser-Fliessgeschwindigkeit liegt bei ca. 7 m pro Tag. Die Durchlässigkeit der Niederterrassenschotter (vgl. Kap. 3.1.4) ist generell hoch bis sehr hoch, kann abschnittsweise aber deutlich reduziert sein. Die Grundwasserströmung verläuft leicht quer zur Fliessrichtung der Aare, wobei genaue Karten vorliegen (Resun AG 2008a).

Der mittlere Grundwasserspiegel liegt auf Höhe des Standorts bei ca. 324 m ü.M. (siehe Fig. 3-3) und damit ca. 11 m unterhalb des Terrains beim Standort einer BEVA mit 335 m ü.M. Die Schwankungen des Grundwasserspiegels 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 langjährigen Extremamplituden liegen bei 2 bis 3 m (vgl. Kap. 4.3.1).

Ein Auszug der Gewässerschutzkarte für die Region ist in Fig. 3-4 gezeigt. Wie dargestellt befindet sich das Standortareal im Gewässerschutzbereich A_U¹⁶. Der Grundwasserleiter wird ober- und unterstrom des Standortareals genutzt (vgl. Grundwasserfassungen mit Schutzzonen in Fig. 3-3 und Fig. 3-4).

¹⁶ Das BAFU hat letztmalig mit Schreiben vom 16. Juni 2020 (BAFU 2020) an Regierungsrat Attiger vom Kanton Aargau gemeinsam mit dem ENSI (für nukleare Aspekte) bestätigt, dass eine Oberflächeninfrastruktur – die eine BEVA enthalten würde – bei geeigneter baulicher Umsetzung im Gewässerschutzbereich A_U genehmigungsfähig ist.



¹⁷ Isohypsen sind Höhenlinien resp. Niveaulinien und dienen der Abbildung eines dreidimensionalen landschaftlichen Reliefs auf zweidimensionalen Karten. Alle auf einer Isohypse dargestellten Punkte befinden sich im Gelände auf der gleichen Höhe.

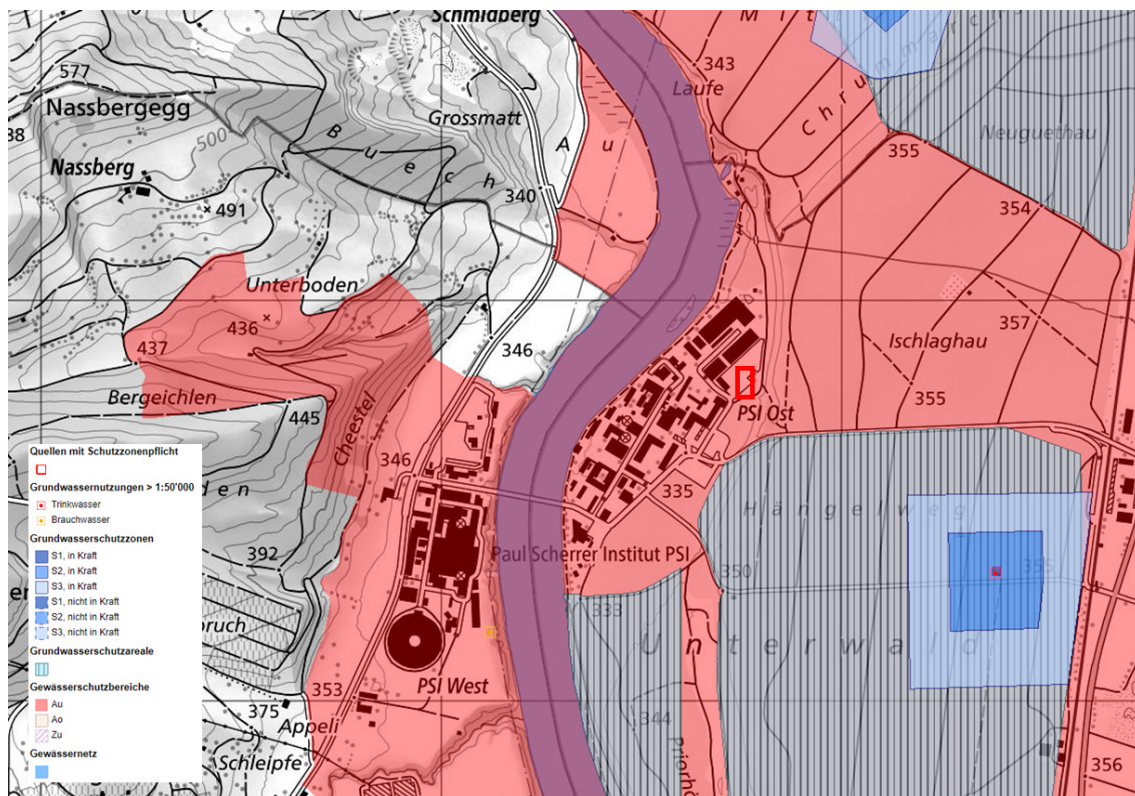


Fig. 3-4: Gewässerschutzkarte (Ausschnitt der Region)

3.1.6 Klimatologie

Die Schweiz und das Schweizer Mittelland liegen klimatisch in einer Übergangszone zwischen dem atlantischen Seeklima und dem Kontinentalklima. Vorherrschend ist die durch Westwinde vom Atlantik herangeführte feucht-milde Meeresluft. Die Alpen bilden eine markante Klimascheide zwischen dem Klima nördlich und südlich davon (Meteo Schweiz 2022b). Die klimatologischen Parameter in der Nähe des Standorts wurden insbesondere in den letzten Jahren mehrmals statistisch untersucht, bspw. in Berichten für das Ersatzkraftwerk Beznau (bspw. Resun AG 2008a, Meteo Schweiz 2009), für Post-Fukushima-Aktionen für das Kernkraftwerk Beznau oder der Periodischen Sicherheitsüberprüfungen des Kernkraftwerks Beznau und der Reviews (ENSI 2021b).

Die Erfassung von meteorologischen Grunddaten erfolgt an verschiedenen Messstationen am und in der näheren Umgebung zum Standort (Leibstadt, Buchs, Würenlingen, Beznau) sowie verschiedenen untergeordneten Messstationen (Hydraulisches Kraftwerk, Böttstein). Die Meteorologie im Unteren Aaretal ist typisch für die Region Nordschweiz bzw. das Schweizerische Mittelland. Der Jahresmittelwert der Temperatur beträgt ca. 10 °C. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit liegt bei 75 %. Pro Jahr werden 79 Tage mit Frost erwartet.

Die mittlere monatliche Niederschlagsmenge in Beznau (1.5 km vom Standort entfernt) lag für den Zeitraum von 1989 bis 2007 zwischen 70.8 (April und September) und 95.7 mm (Dezember). Die durchschnittliche Anzahl Regentage pro Monat lag für diese Periode zwischen 9.4 (September) und 11.8 Tagen (Dezember). Diese Werte sind vergleichbar mit den Werten der Messorte Basel und Buchs.

Am Standort überwiegen, bedingt durch die örtlichen topographischen Verhältnisse des Aaretals, die Windrichtungen Nord-Nordost, Süd und Süd-Südwest. Die Windgeschwindigkeit wurde im 1.5 km entfernten Beznau von 1988 bis 2007 auf 10 und 70 m Höhe gemessen. Die höchsten Windstundenmittelwerte pro Monat liegen auf 10 m Höhe zwischen 7.1 m/s (Juni) und 8.4 m/s (Oktober). Auf 70 m Höhe liegen die Werte zwischen 9.9 (November) und 12.7 m/s (Januar).

3.2 Anlagenbeschrieb und Betriebskonzept

3.2.1 Lage

Gemäss aktuellem Projektstand ist eine Platzierung der BEVA mit einer ungefähren Grundfläche von $55 \times 90 \text{ m}^2$ neben der Zwiilag gut realisierbar (südlich des Zwiilag-Areals, vgl. Fig. 3-5). Damit können – neben der Optimierung des bedarfsgerechten Transfers der Transport- und Lagerbehälter (TLB) von der Zwiilag zur BEVA als auch der An-/Abtransporte von Endlagerbehältern (ELB) und gegebenenfalls von Verbrauchsmaterialien der BEVA mittels des bestehenden Anschlusses an das öffentliche Verkehrsnetz – auch Synergien mit den bestehenden Gebäuden und Einrichtungen der Zwiilag optimal genutzt werden.

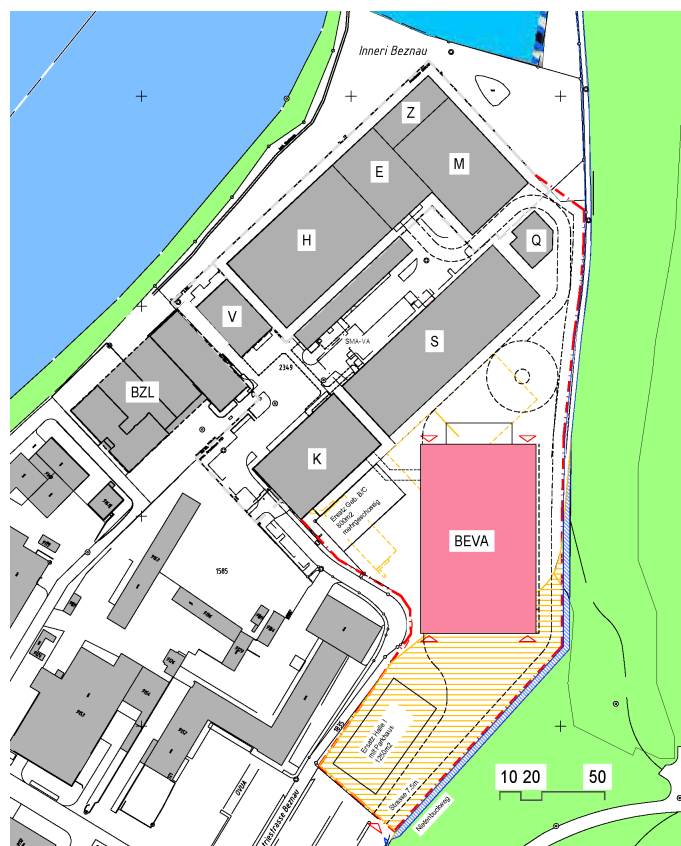


Fig. 3-5: Zwiilag-Areal und Positionierung der BEVA

Zu sehen ist die Zwiilag mit der TLB-Lagerhalle (Gebäude H), Konditionierungsanlage (Gebäude K), Mittelaktivlager (Gebäude M), Schwach- und Mittelaktivlager (Gebäude S), Heisse Zelle (Gebäude Z), Empfangsgebäude (Gebäude E), Plasmaanlage (Gebäude V) und Zentrale Kaltwasserversorgungsanlage (Gebäude Q). Weiterhin sind das Bundeszwischenlager auf dem PSI-Gelände (Gebäudegruppe BZL) sowie die neu zu errichtenden Bauwerke (bspw. BEVA, rotes Rechteck, andere im Umriss) eingezeichnet.

3.2.2 Aufbau und Betriebskonzept

Der modulare Aufbau und die Funktions- bzw. Betriebsweise der BEVA wird anhand Fig. 3-6 erläutert¹⁸. In der Mitte der Anlage befindet sich die Umladezelle inklusive des darüberliegenden Interventionsraums (primäre bauliche Barriere) mit jeweils drei für die optimale Beladung erforderlichen Andockstationen für TLB und ELB. Um die Umladezelle herum (sekundäre bauliche Barriere) sind verschiedene Service- und Hilfsräume (Bedienräume, Klima- und Lüftungsanlagen, Andockräume, Schweisstationen etc.) angeordnet (vgl. Fig. 3-6). Rechts und links davon befinden sich die Empfangsbereiche mit den dazugehörigen Arbeitsplätzen für die Behältervor- und -nachbereitung.

Die von der Zwiag bereitgestellten und bis in den Eingangsbereich der BEVA transferierten TLBs werden im TLB-Empfangsbereich angenommen (bspw. Entfernen der Transportsicherungen sowie Kontrollmessungen im Rahmen des Strahlenschutzes¹⁹), abgeladen, aufgerichtet, in einen Transportwagen eingesetzt und in den Vorbereitungsraum gefahren. Nach dem Ablassen des Sperrraumgases über die Lüftung der Umladezelle wird der TLB in den Raum unter der Umladezelle gefahren, wo die Schrauben des Primärdeckels gelöst und entfernt werden²⁰. Nun wird der TLB durch den Transportwagen angehoben und mit Hilfe von Dichtungen luftdicht an die Andockstation zur Umladezelle angedockt.

Auf der anderen Seite der Umladezelle, im ELB-Empfangsbereich, werden die leeren Endlagerbehälter vor dem Andocken an die Umladezelle (analog dem TLB-Prozess) in einen Transportbehälter verpackt, der die Funktion der Abschirmung und Schutz innerhalb der BEVA und für den Transport auf dem öffentlichen Verkehrsnetz erfüllt. Nachdem beide Behälter luftdicht an die Umladezelle angedockt und die Deckel der Andockstationen entfernt wurden, können die Primärdeckel der Behälter von der Umladezelle aus entfernt werden. Die Behälter sind nun geöffnet und der Umladevorgang kann beginnen, d.h. es werden die BE oder HAA(WA) aus den TLB entnommen und in die ELB eingesetzt²¹. Gemäss aktueller Planung und Sicherheitsvorsorge wird immer nur ein BE oder ein HAA(WA) gleichzeitig gehandhabt, d.h. es befindet sich immer nur ein BE oder HAA(WA) ausserhalb der Behälter. Alle Arbeiten in der Umladezelle werden durch das Personal im Serviceraum ferngesteuert und per Kamera bzw. direktem Sichtkontakt mittels Bleiglasfenster überwacht.

¹⁸ Es wird das gemäss Planungsstand aktuelle Konzept mit seiner momentanen Detaillierungstiefe vorgestellt. Der Designprozess ist ein iterativer Prozess, bei dem periodisch das Konzept und die Auslegung (sicherheitstechnisch) überprüft und gemäss Bewilligungsverfahren stufengerecht und im erforderlichen Tiefgang je Genehmigungsstufe ausgearbeitet werden. Konzepte und Design werden dabei ggf. auch – bspw. infolge neuer Entwicklungen in Wissenschaft und Technik sowie insbesondere im Bereich der nuklearen Sicherheit – angepasst.

¹⁹ Kontrollmessungen im Rahmen des Strahlenschutzes (Dosisleistungsmessungen, Wischtests etc.) an Behältern – aber auch an Ausrüstungen, Systemen oder Fahrzeugen/Transporteinheiten – erfolgen routinemässig an verschiedenen Stationen des Prozesses (insbesondere bei Zonenübergängen), werden in diesem Kurzbeschrieb aber nicht immer explizit aufgeführt.

²⁰ Ggf. wird vor Öffnung der TLB eine Gasprobe aus dem Innenraum des TLB entnommen und analysiert (Prüfung auf Spaltgase/Integrität der Hüllrohre).

²¹ Für eine optimale Beladung der Endlagerbehälter müssen diese mit BE unterschiedlicher Wärmeleistung beladen werden können. Dies bedingt, dass gleichzeitig der Zugriff auf mehrere TLB möglich ist. Deshalb sind gemäss heutiger Planung in der BEVA mehrere Andockstationen für TLB und für ELB vorgesehen.

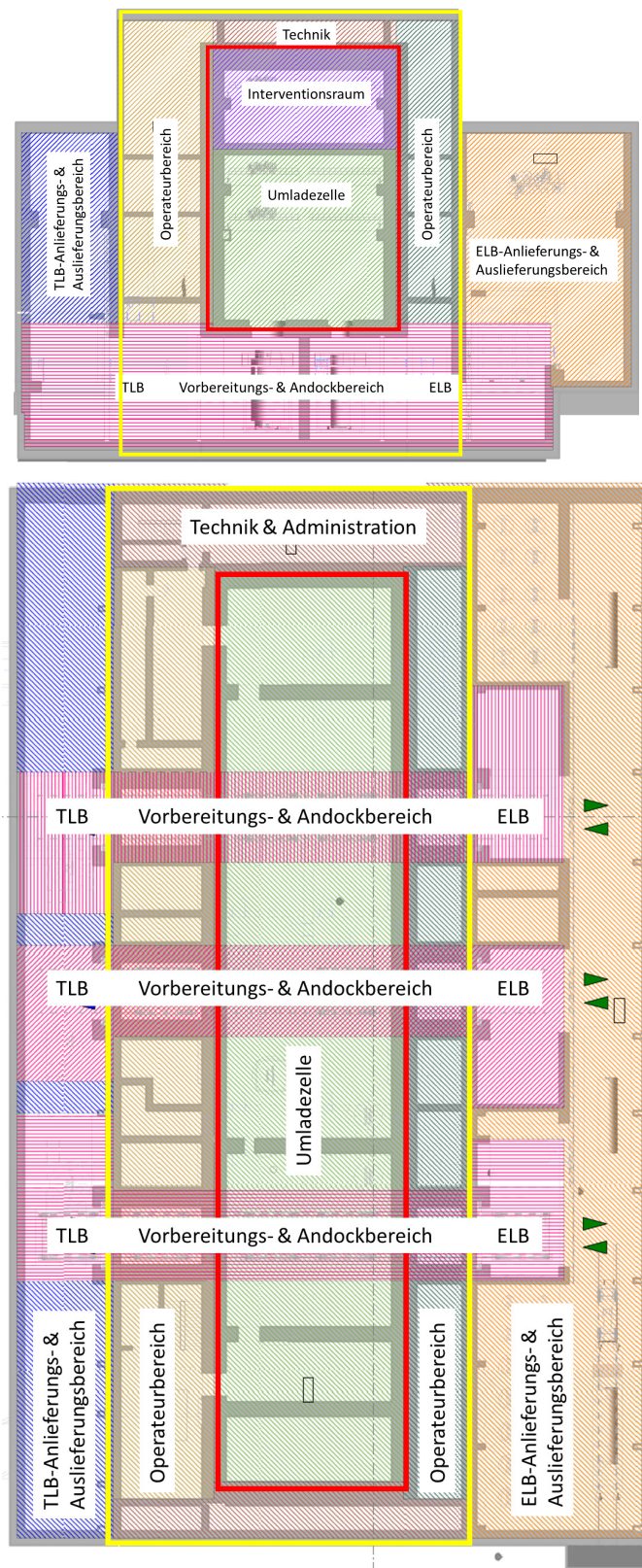


Fig. 3-6: Querschnitt (oben) und Grundriss (unten) mit der Übersicht der wichtigsten Module einer BEVA

Rot umrandet = primäre bauliche Barriere, Gelb umrandet = sekundäre bauliche Barriere

Ist ein ELB gemäss Vorgaben vollständig bestückt, wird der Primärdeckel auf den Behälter aufgesetzt und dicht verschlossen. Nachfolgend wird die Andockstation mit ihrem Deckel luftdicht verschlossen, der Behälter abgedockt und anschliessend zur Schweissstation gefahren, in welcher der Sekundärdeckel aufgesetzt und verschweisst wird. Nach der thermischen Behandlung und nachfolgenden Kontrolle der Schweissnaht am ELB wird der Transportbehälter verschlossen. Die ELB stellen nun eine zusätzliche Barriere dar und werden verpackt im Transportbehälter in einem Bereitstellungsbereich gelagert bzw. für den Abtransport vorbereitet. Die leeren TLB werden ebenfalls mit dem Primärdeckel verschlossen, von der Umladezelle abgedockt und von der BEVA zurück in die Zwiilag transportiert. In der Zwiilag werden die TLB konventionell entsorgt oder wiederverwertet, wobei der radioaktive Abfall unter anderem aus der Dekontamination und Zerlegung der TLB sachgerecht entsorgt wird. Entgegen den früheren Konzepten aus Nagra (2013) soll die Reinigung und Zerlegung der TLB in der Zwiilag hauptsächlich trocken erfolgen.

3.2.3 Nukleare Sicherheit und Strahlenschutz

Um jederzeit einen sicheren BEVA-Betrieb zu gewährleisten, d.h. den Einschluss der radioaktiven Stoffe sowie die Begrenzung der Strahlenexposition von Mensch und Umwelt sicherzustellen (vgl. Kap. 2), werden diverse komplementäre Massnahmen getroffen. Generell berücksichtigen die Auslegung und der Betrieb der BEVA das Konzept der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (Defence in Depth) mittels Mehrfachbarrierensystems bestehend aus folgenden, unabhängigen Barrieren (vgl. auch Fig. 3-7):

1. Abfallmatrix: Die Radionuklide sind in einer wasserunlöslichen Matrix (Keramik- oder Glasmatrix für BE bzw. HAA(WA)) fest eingebunden.
2. Umschliessung: Die Abfallmatrix ist entweder in einem Hüllrohr (BE)²² oder in einem Stahlzylinder (HAA(WA)) eingeschlossen. Das Hüllrohr bzw. der Stahlzylinder ist gasdicht verschweisst. Zudem zeigen sie ein duktiles²³ Materialverhalten und weisen damit eine hohe Robustheit gegenüber mechanischen Belastungen auf.
3. Behälter: Die Brennelemente und die Stahlzylinder sind – ausserhalb der Umladezelle – immer eingeschlossen in einem äusserst robust ausgelegten und gasdicht verschlossenen Behälter. Als Behälter zählen der Transport- und Lagerbehälter sowie der Endlagerbehälter, der zusätzlich stets in einem Transportbehälter verpackt ist.
4. Bauliche Barrieren:
 - a) Umladezelle, mit dichter Edelstahlauskleidung (primäre bauliche Barriere): Die Behälter werden dicht an die Umladezelle angedockt und die Brennelemente und Stahlzylinder nur in dieser Zelle gehandhabt. Die aus massiven Stahlbetonwänden bestehende Umladezelle dient zum einen dem Schutz der Barrieren (Abfallmatrix und Umschliessung) und zum anderen stellt sie den Einschluss bzw. die Rückhaltung der Radionuklide sicher.
 - b) Strukturen um die Umladezelle (sekundäre bauliche Barriere): bestehend aus Stahlbetonwänden zur Aufnahme der Neben-, Technik- und Serviceräume.

Die radioaktiven Stoffe sind somit jederzeit durch mehrere Barrieren von der Umwelt isoliert, d.h. eingeschlossen und abgeschirmt. Aus diesem Grund werden die BE und HAA(WA) in Behältern transportiert (TLB und ELB), die selbst eine Barriere darstellen. Der Zugang zum Inhalt

²² Die Abfallmatrix (keramische Brennstofftabletten) und das sie umschliessende, gasdicht verschweisste Hüllrohr bilden den sogenannten Brennstab. Mehrere Brennstäbe werden in einem Brennelement zusammengefasst, welches in der Umladezelle der BEVA gehandhabt wird.

²³ Die 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.

dieser Behälter erfolgt nur in den dafür vorgesehen Einrichtungen. So wird sichergestellt, dass selbst bei Störungen neben der Abfallmatrix und der Umschliessung immer eine weitere Barriere (Behälter oder Umladezelle) vorhanden ist und die radioaktiven Stoffe von der Umwelt abgeschirmt und eingeschlossen sind (Gewährleistung des Barrierenkonzepts). Zum Schutz gegen Einwirkungen von aussen²⁴ sind der Umladebereich und gegebenenfalls die sekundäre bauliche Barriere entsprechend robust ausgelegt (vgl. Fig. 3-6 und Fig. 3-7).

Neben diesen Barrieren sind weitere Systeme für die Rückhaltung von radioaktiven Stoffen vorhanden. Hierzu zählen die entsprechend dem Strahlenschutzkonzept erforderliche Einrichtung von kontrollierten Zonen²⁵ 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 kontrolliert (Schleusensystem) und überwacht. Ein Zonenübergang ist nur an definierten Orten möglich und mit entsprechenden Massnahmen (Kontroll- und Freimessungen etc.) verbunden.

Für den reibungsfreien und sicheren Betrieb einer BEVA sind weitere technische Systeme erforderlich, wie bspw. Stromversorgung, Abwassersysteme etc. sowie Administrations- und Sozialeinrichtungen als auch Servicebereiche. Da die Zwiilag unter anderem eine Heisse Zelle (ähnlich der Umladezelle) betreibt, die grundsätzlich demselben Zweck dient wie der Umladebereich der BEVA²⁶, sind bei der Zwiilag alle erforderlichen technischen Systeme und administrativen Einrichtungen vorhanden. Die Zwiilag verfügt somit bereits heute über alle nötigen technischen Systeme und administrativen Einrichtungen, die auch für eine BEVA benötigt würden. Sie könnten auch für den BEVA-Betrieb «mitbenutzt» bzw. mit wenig Aufwand an die Anforderungen der BEVA angepasst/erweitert werden, bei gleichbleibend hoher Sicherheit für die Zwiilag und die BEVA.

Im Hinblick auf den Wasserhaushalt der BEVA stellt dies eine Vereinfachung dar. Arbeitsschritte, die Systeme mit flüssigen Medien benötigen, werden ausserhalb der primären Barriere der BEVA und auf dem Zwiilag-Areal realisiert. Ein Wassereintrag in die Umladezelle kann somit ausgeschlossen werden. Das geplante Konzept sieht auch keine wasserhaltigen Brandschutzsysteme^{27,28} vor. Zusammen mit dem Konzept der *trockenen* Umverpackung²⁹ wird der Bereich innerhalb der primären Barriere zu einem neutralen Bereich in Bezug auf den Wasserhaushalt. Überflutungen können in diesem Bereich ausgeschlossen werden. Ein Kontakt der Brennelemente in den Behältern oder der Umladezelle mit Wasser ist ausgeschlossen. Eine Kontamination des Grundwassers ist – auch aufgrund der in Kap. 5.2 vorgestellten Massnahmen – nicht möglich.

²⁴ Auslegungsbestimmend sind insbesondere der Flugzeugabsturz (Vollschutz) und das Erdbeben (Sicherheits-erdbeben, 10'000-jährliches Ereignis).

²⁵ Abhängig von der erwarteten Dosisleistung (Einrichtung von Überwachungsbereichen) und Kontaminationsgefahr (Einrichtung von kontrollierten Zonen).

²⁶ Der Unterschied liegt im Durchsatz der Anlagen, während bei der Zwiilag in der Regel mit mehrmonatigen Abständen sogenannte Umladekampagnen (Umladung von Brennelementen aus TB in TLB) durchgeführt werden, muss die BEVA auf einen viel höheren Durchsatz (d.h. Produktion von ELB) ausgelegt werden. In der Regel wird ein ELB pro Tag angestrebt.

²⁷ Es werden trockene Brandlöschsysteme je nach Gefahrgut (bspw. Gaslöschanlagen etc.) verwendet. Dies trifft insbesondere auf die Umladezelle zu.

²⁸ Für den hypothetischen Fall, dass in einzelnen äusseren Bereichen (bspw. Empfangsbereiche, für die Umladezelle technisch ausgeschlossen) durch die Feuerwehr mit Wasser gelöscht würde, würde das zum Einsatz kommende Löschwasser in bestimmten dafür vorgesehenen Kellerräumen gesammelt und nach Entscheidungsmessung entweder mittels (mobilen) Pumpen in die konventionelle oder in die nukleare Abwasserbehandlung (des Zwiilag) abgegeben. Grundsätzlich kann aufgrund der wasserundurchlässigen Wanne kein Löschwasser nach aussen austreten (vgl. auch Kap. 5).

²⁹ Die Reinigung der Umladezelle erfolgt trocken, bzw. die anfallenden Mengen potenzieller Dekontaminationsflüssigkeiten sind prozessbedingt begrenzt und erfolgen in einem kontrollierten Umfeld.

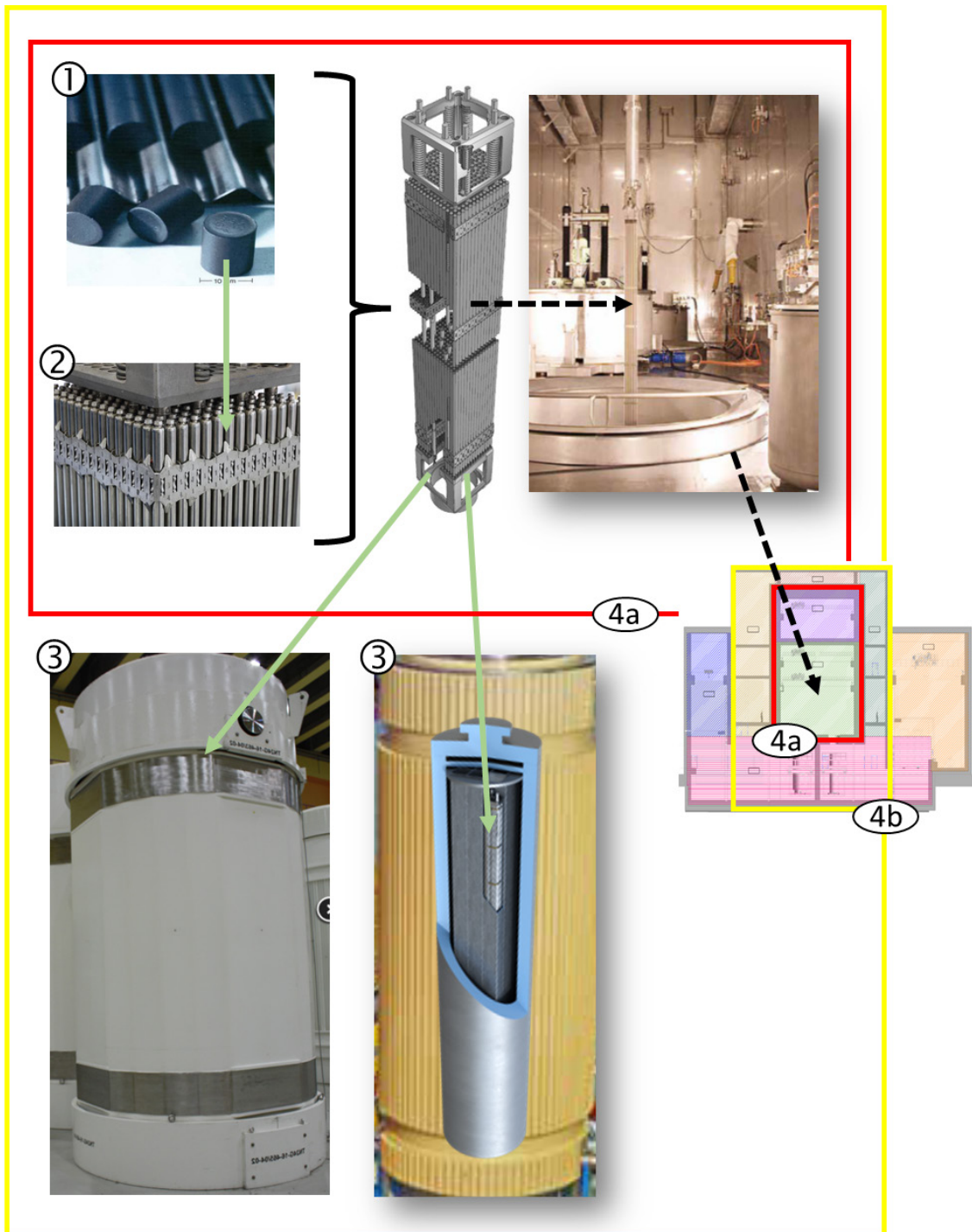


Fig. 3-7: Barrierenkonzept für den Einschluss und die Rückhaltung der Nuklide sowie den Schutz der Barrieren untereinander

(1) Wasserunlösliche Abfallmatrix (Brennstoffmatrix), (2) gasdichte Umschliessung (Hüllrohre im Brennelement), (3) robuste und dichte Behälter (Transport- und Lagerbehälter aus dem Zwilag (links), Endlagerbehälter verpackt im Transportbehälter (rechts)), (4) robuste bauliche Barrieren (Umladezelle, hier dargestellt die Umladezelle des Zwilag (4a) und Strukturen um die Umladezelle in der BEVA (4b)).

4 Sicherheitsanalyse

4.1 Ermittlung des Spektrums der zu unterstellenden Störfälle

Die Bestimmung des Spektrums der zu unterstellenden Ereignisse bzw. Störfälle ergibt sich unter Berücksichtigung standort- und anlagentechnischer Gegebenheiten. Für die Erstellung werden grundsätzlich die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben und Verordnungen (insbesondere KEG, KEV und UVEK) berücksichtigt. Darüber hinaus werden diese mit den Details der Richtlinie ENSI-A01 (ENSI 2018c) ergänzt sowie mit Vorgaben und Hinweisen von internationalen Fachdokumentationen (u.a. IAEA, EGOS³⁰) abgeglichen. Daher wird – auch unter Berücksichtigung der langjährigen Erfahrungen bei Sicherheitsanalysen für Kernanlagen im In- und Ausland – nach heutigem Kenntnisstand davon ausgegangen, dass der in Tab. 4-1 zusammengefasste Ereigniskatalog für die Beurteilung der potenziell zu betrachtenden Gefährdungen abdeckend ist.

Die in Tab. 4-1 aufgelisteten systematisch erfassten Störfälle werden in Störfälle mit Ursprung innerhalb bzw. ausserhalb der Anlage (sogenannte Einwirkungen von innen bzw. von aussen) unterteilt. Dabei werden gleichartige Störfälle soweit möglich in Gruppen zusammengefasst. Neben dem Einzelereignis sind auch Folgeereignisse zu berücksichtigen und zu beurteilen. Die Ereignisse können dabei auf die baulichen Strukturen, die relevanten Systeme, die Abfälle und die Behälter, in denen die Abfälle verpackt sind, sowie auf konventionelle und radioaktive Rückstände aus dem Anlagenbetrieb (Betriebsabfälle) und auf (konventionelle) Betriebsmittel einwirken. Die Beurteilung erfolgt im Wesentlichen hinsichtlich einer möglichen Freisetzung radioaktiver und nicht-radioaktiver umweltgefährdender Stoffe in die Umgebung, wobei der Fokus in diesem Bericht insbesondere auf den Schutz des Grundwassers gelegt wird. Die letzte Spalte der Tab. 4-1 ordnet den jeweiligen Ereignissen ein massgebendes, d.h. abdeckendes³¹ Ereignis zu und listet bedeutende Auslegungsgrundsätze auf, die in der Diskussion der Massnahmen in Kap. 5 erläutert werden.

4.2 Identifikation relevanter, abdeckender Ereignisse

Für den Fokus der vorliegenden Studie, d.h. die Bewertung standortspezifischer Gefährdungen, sind die anlagenspezifischen, internen Gefährdungen (d.h. die Einwirkungen von innen) nicht von Bedeutung. Dies auch vor dem Hintergrund, dass (i) die Auslegung der Anlage und das zugrundeliegende Sicherheitskonzept unabhängig vom gewählten Standort bezüglich innerer Gefahren gleich³² bzw. gleichwertig erfolgt und (ii) die Auswirkungen dieser Ereignisse (bspw. auf das Grundwasser) durch das umhüllende Belastungsspektrum abgedeckt sind (siehe nachfolgenden Absatz). In Tab. 4-1 sind die Ereignisse mit Einwirkungen von innen in hellgrauer Farbe hinterlegt und werden in der nachfolgenden Analyse nicht weiter betrachtet. Bezüglich der Ereignisse anlageninterner Brand (Löschwasser) und Versagen von Wasserhaltungs-/Wasserentsorgungssystemen (interner Wassereinbruch) wird auf die Ausführung in Kap. 3.2 bzw. Kap. 5 verwiesen,

³⁰ Expert Group on Operational Safety (EGOS), eine Arbeitsgruppe der NEA: Mitarbeit an der "hazard database" für Betriebssicherheitsanalysen eines geologischen Tiefenlagers.

³¹ Ein abdeckendes Ereignis ist das bezüglich der zu erwartenden Belastung bedeutendste Ereignis im Hinblick auf die Einhaltung der Schutzziele. Bspw. ist der Flugzeugabsturz mit Kerosinbrand abdeckend gegenüber dem Fahrzeugbrand.

³² Bspw. die Vermeidung von Brandlasten, die Verwendung nicht bzw. schwer entflammbarer Materialien und die Einhausung brennbarer Materialien (Bauwerke, Geräte, Fördermittel, Systeme, Komponenten ...) in Kombination mit der Vermeidung bzw. Begrenzung von Explosions- und Zündquellen sollen die Brandentstehung sowie das Ausmass eines Brands verhindern bzw. begrenzen. Diese Massnahmen werden standortunabhängig umgesetzt.

in denen dargelegt wird, dass keine wasserführenden Systeme innerhalb der BEVA (insbesondere innerhalb der Umladezelle und der sie umgebenden Bereiche) geplant sind bzw. potenziell anfallendes (Lösch)Wasser gezielt in dafür vorgesehenen Bereichen gesammelt und dann entsorgt werden kann (vgl. auch Fussnote 27 bis 29).

Ein umhüllendes Belastungsspektrum für die mechanischen und thermischen Einwirkungen von aussen wird infolge der Sicherheitsvorsorge (vgl. Kap. 2) und der in den Richtlinien ENSI (2021a) sowie ENSI (2020) geforderten Auslegung der BEVA (bzw. der relevanten Bereiche) auf die Belastungen eines 10'000-jährlichen Erdbebens (dem sogenannten Sicherheitserdbeben) und die Belastungen infolge eines Flugzeugabsturzes samt Kerosinbrand definiert³³. Diese beiden Ereignisse werden somit als abdeckend bezüglich der mechanischen und thermischen Einwirkungen von aussen angesehen und sind in Tab. 4-1 in **roter** Hintergrundfarbe gekennzeichnet. Die durch das umhüllende Belastungsspektrum für diesen Standort als abdeckend zu bewertenden anderen Einwirkungen von aussen sind in Tab. 4-1 mit **dunkelgrauer** Farbe hinterlegt und werden in der nachfolgenden Analyse nicht weiter betrachtet. Dieser Ansatz des umhüllenden Spektrums wird auch in den Sicherheitsanalysen anderer Kernanlagen angewandt und ist in späteren Bewilligungsphasen stets zu überprüfen und nachzuweisen.

Gemäss der Zielsetzung des Berichts verbleiben als relevante Ereignisse somit die extern durch Wasser induzierten Gefahren, welche durch eine standortspezifische, quantitative Gefährdungsanalyse in Kap. 4.3 vertieft analysiert und bezüglich deren Häufigkeit und des zu erwartenden Belastungsausmasses bewertet werden. Dabei ist gemäss Art. 8 Abs. 4^{bis} KEV für die Bewertung *«jeweils von einem Naturereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-3} pro Jahr sowie einem Naturereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr auszugehen»*. In Kap. 4.3 wird somit für die zu betrachtenden Ereignisse der Fokus auf diese Häufigkeiten gelegt, d.h. das 10'000-jährliche Ereignis. In Tab. 4-1 sind die Ereignisse in **blauer** Hintergrundfarbe hervorgehoben. Zusätzlich werden auch die (Wasser)Gefahren infolge meteorologischer Ereignisse (d.h. extremer Wetterbedingungen) sowie gravitative Gefahren, bspw. induziert durch extreme Wetterbedingungen nachfolgend bewertet.

In Kap. 4.3 werden somit u.a. folgende Ereignisse quantitativ bewertet:

- externe Überflutung (infolge hoher Flusswasserpegel, Niederschlag, Versagen von wasserbaulichen Einrichtungen (Flutwelle))
- Grundwasser – Hochwasser
- gravitative Ereignisse (Gebirge/Gestein/Boden):
 - Hangrutschung, Murgang, Bergsturz, Lawine
 - Bodenveränderung/Bodenverfestigung (Schrumpfen/Aufquellen)/Subrosion
- meteorologische Ereignisse (Extreme Wetterbedingungen), insbesondere:
 - ausgeprägt harte Sommer-/Winterbedingungen (Trockenheit/Vereisung)
 - extremer Niederschlag
 - extreme Schneelasten
 - extremer Hagel

³³ Auch bei einem Flugzeugabsturz sind die radioaktiven Stoffe nach wie vor infolge der Auslegung der Umladezelle sowie der Behälter sicher in diesen eingeschlossen, sodass eine Kontamination des Löschwassers ausgeschlossen werden kann (Löschwasser gelangt nicht in die Umladezelle oder die Behälter).

Tab. 4-1: Das für die Analyse zu berücksichtigende (übergeordnete) Ereignis- und Störfallspektrum

EVA: Einwirkungen von aussen, EVI: Einwirkungen von innen, Erläuterung zur farblichen Codierung siehe Haupttext.

Ereignis- und Stöfallspektrum	Art		Mögliche Folgeereignisse <i>(kursiv geschriebene Ereignisse sind auch als eigenständige Ereignisse in der Liste aufgeführt)</i>	Auslegungsgrundsatz bzw. massgebendes abdeckendes Ereignis
	EVA	EVI		
Hydrologische Ereignisse: Externe Überflutung (des Geländes inkl. kombinierte Ereignisse wie Brückenklause, Geschiebefracht und Dammbruch)				
Versagen von wasserbaulichen Einrichtungen (Schwallwelle)	×		• <i>Verlust der externen Stromversorgung</i> • Einschränkung Zugänglichkeit (Areal/Gebäude) • Unterspülen und Auftrieb von Gebäuden • Eindringen von Wasser in Gebäude • Ufererosion • Brände	Auslegung gemäss Prinzip des trockenen Standorts (oberhalb Grundwasser sowie max. Hochwasser) und Wannenkonzept (siehe Kap. 5)
Hohe Flusswasserpegel (Niederschläge/ Schneeschmelze)	×			
Starke Niederschläge	×			Auslegung Dach- und Geländeentwässerung (siehe Kap. 5)
Brand und Explosion (inkl. heisse Gase, Rauch und Wärmestrahlung)				
Brand	×	×	• <i>Menschliche Fehlhandlung (Beeinträchtigung)</i> • Einschränkung Zugänglichkeit (Areal/Gebäude) • Löschwasseransammlung	Flugzeugabsturz Löschwassersammel- und -rückhalteeinrichtungen
Explosion	×	×	• <i>Externer/interner Brand (inkl. Rauchentwicklung)</i> • <i>Erschütterungen</i> • <i>Menschliche Fehlhandlungen</i> • Trümmereinwirkung	Flugzeugabsturz
Gravitative Ereignisse (Gebirge/Gestein/Boden)				
Hangrutschung, Murgang, Bergsturz	×		• Einschränkung Zugänglichkeit (Areal/Gebäude) • Schnee-/Fels-/Geröll-/Schlamm-Einwirkungen • Verstopfung Wasserabflüsse	Flugzeugabsturz
Bodenveränderung/Bodenverfestigung (Schrumpfen/Aufquellen)/Subrosion	×			Geeigneter Baugrund

Tab. 4-1: Fortsetzung

Ereignis- und Stöfallspektrum	Art		Mögliche Folgeereignisse <i>(kursiv geschriebene Ereignisse sind auch als eigenständige Ereignisse in der Liste aufgeführt)</i>	Auslegungsgrundsatz bzw. massgebendes abdeckendes Ereignis
	EVA	EVI		
Erdbeben (Erschütterungen & differenzielle Bewegungen)				
Erdbeben	×		• <i>Verlust der externen Stromversorgung</i> • <i>Hangrutschung, Murgang, Bergsturz</i> • <i>Externer/interner Brand (inkl. Rauchentwicklung)</i> • <i>Explosion/Druckwelle</i> • <i>Menschliche Fehlhandlung (Beeinträchtigung)</i> • <i>Bodenveränderung/Bodenverfestigung</i> • <i>Einschränkung Zugänglichkeit (Areal/Gebäude)</i> • <i>(Ufer)Erosion/Flussbettverlagerung</i> • <i>BE-/HAA(WA)-Absturz/Kollision von Behältern</i>	Auslegung gemäss Erdbebengefährdung (SSE, Sicherheitserdbeben, Häufigkeit $H = 10^{-4}$)
Erschütterungen	×		(siehe Erdbeben)	Erdbeben
Differenzielle Bewegungen	×		(siehe Erdbeben)	Erdbeben
Technik (Fehlfunktion/Versagen von Systemen), Versagen ...				
der Transport-, Hebe- und Handhabungssysteme		×	• Teil- oder Totalausfall des/der Systeme • BE-/HAA(WA)-Absturz • Kollision von Behältern	Robuste, ggf. redundante Systeme bspw. • Fail-Safe-Systeme (Kran) • redundante externe Netzeinspeisung • Isolation und Brandschutzklappen • etc.
des Steuerungs-, Regelungs-, Leit- & Kommunikationssystems		×		
des Stromversorgungssystems (inkl. externer Stromversorgung)	×	×		
des Lüftungssystems		×		
des Wasserhaltungs- bzw. -entsorgungssystems (interner Wassereinbruch)		×	• <i>Interne Überflutung/Wasserausbreitung</i> • <i>Ausfall elektrischer Komponenten/Systeme</i>	• Adäquate Auslegung und Anordnung der SSK, Auslegungsgemäss ist im Gebäude kein Wasser vorhanden.

Tab. 4-1: Fortsetzung

Ereignis- und Stöfallspektrum	Art		Mögliche Folgeereignisse <i>(kursiv geschriebene Ereignisse sind auch als eigenständige Ereignisse in der Liste aufgeführt)</i>	Auslegungsgrundsatz bzw. massgebendes abdeckendes Ereignis
	EVA	EVI		
Menschliche Fehlhandlungen				
Menschliche Fehlhandlungen, beeinträchtigtes Personal		×	• Diverse Folgeereignisse	• optimierte MTO • entsprechend ausgebildetes Personal • Hohe Sicherheitskultur/Audits • periodische Weiterbildung & Schulungen
Versagen von Wartungs- und Instandhaltungsroutinen		×	• Ausfall/Nichtverfügbarkeit (sicherheitsrelevanter) Systeme	
Einwirkungen aus der Umgebung auf das Gelände/Bauwerk				
Unfall eines Gefahrguttransports auf Strasse & Schiene	×		• <i>Externer/interner Brand (inkl. Rauchentwicklung)</i> • <i>Explosion/Druckwelle</i> • <i>Menschliche Fehlhandlung (Beeinträchtigung)</i> • Einwirkung explosiver und/oder toxischer Gase • Freisetzung von Chemikalien	Flugzeugabsturz
Unfall Gasleitung/Pipeline	×			
Unfälle in Industrie- und Militäranlagen ³⁴	×			
Ereignisse in Kernanlagen (Zwilag, PSI, KKB)	×			
Flugzeug- oder Helikopterabsturz				
(Gross)Flugzeugabsturz	×		• <i>Externer/interner Brand (inkl. Rauchentwicklung)</i> • <i>Explosion/Druckwelle</i> • <i>Verlust der externen Stromversorgung</i> • <i>Erschütterungen</i> • <i>Menschliche Fehlhandlungen</i> • Trümmereinwirkung (Geschosse) • BE-/HAA(WA)-Absturz/Kollision von Behältern	Auslegung gegen Flugzeugabsturz (Vollschutz)
Militärflugzeugabsturz	×			
(Klein)Flugzeug und Helikopterabsturz	×			

³⁴ Militäranlagen gibt es in dieser Region nicht und können daher als Auslöser eines Ereignisses ausgeschlossen werden.

Tab. 4-1: Fortsetzung

Ereignis- und Stöfallspektrum	Art		Mögliche Folgeereignisse <i>(kursiv geschriebene Ereignisse sind auch als eigenständige Ereignisse in der Liste aufgeführt)</i>	Auslegungsgrundsatz bzw. massgebendes abdeckendes Ereignis
	EVA	EVI		
Meteorologische Ereignisse (Extreme Wetterbedingungen)				
Blitzschlag	×		• <i>Externer Brand/Waldbrand</i> • <i>Verlust der externen Stromversorgung</i> • <i>Störung ungeschützter elektrischer Systeme</i>	Auslegung gemäss Blitzschutzkonzept
Ausgeprägt harte Sommerbedingungen (hohe Temperaturen/Trockenheit)	×		• <i>Externer Brand/Waldbrand</i> • <i>Menschliche Fehlhandlungen</i>	SSK-Auslegung gemäss Auslegungstemperaturen
Ausgeprägt harte Winterbedingungen (niedrige Temperaturen,Vereisungen)			• <i>Verlust der externen Stromversorgung</i> • <i>Einschränkung Zugänglichkeit des Areals</i> • <i>Vereisung von SSK (bspw. Lüftung, Wasserabläufe (Dächer, Gelände))</i> • <i>Ausfall/Einschränkung Löschwasserversorgung</i>	SSK-Auslegung gemäss Auslegungs- temperaturen inkl. administrativer Massnahmen (Räumung)
Extremer Niederschlag	×		• <i>Überflutung</i> • <i>Hangrutschung</i>	Überflutung & Auslegung Dach/Gelände- entwässerung (siehe Kap. 5)
Extreme Schneelasten	×			Flugzeugabsturz Administrative Massnahmen (Räumung)
Extremer Hagel	×			Flugzeugabsturz
Extreme Winde (inkl. mitgeführter Objekte)	×		• <i>Verlust der externen Stromversorgung</i> • <i>Windgetragene Gegenstände (Geschosse)</i>	Tornado
Tornados (inkl. mitgeführter Objekte)	×		• <i>Verlust der externen Stromversorgung</i> • <i>Windgetragene Gegenstände (Geschosse)</i>	Flugzeugabsturz

4.3 Standortspezifische Gefährdungsanalyse bezüglich hydrologischer und meteorologischer Extremereignisse

4.3.1 Hydrologie

Oberflächenwasser

Hochwasser, also die zeitlich beschränkte Überflutung von üblicherweise nicht mit Wasser bedecktem Land, können entstehen:

- durch Schwallwellen, ausgelöst durch das Versagen von wasserbaulichen Einrichtungen (Wehr- oder Dammbrüche), durch Gletscherabbrüche oder durch Hangrutschungen
- durch hohe Flusswasserpegel (Flusshochwasser), ausgelöst durch Schneeschmelze und/oder durch grossflächige Starkniederschläge im Einzugsgebiet
- durch lokale Starkniederschläge mit Oberflächenabflüssen

Sowohl für die Berechnungen von Schwallwellen als auch für Hochwasser durch Schneeschmelze und Starkniederschläge liegt für die Region vom Wasserschloss (oberhalb des vorgeschlagenen BEVA-Standorts) bis zum Wehr Klingnau (unterhalb des Standorts) ein kalibriertes Hochwassermodell der Aare in der Software Basement³⁵ vor. Mit dem Modell kann der Wasserpegel abhängig vom Abfluss sowohl für Schwallwellen als auch für Flusshochwasser berechnet werden.

Hochwasser durch Schwallwellen

Erste Hochwasseruntersuchungen für den Standort bezogen sich auf Schwallwellen und erfolgten in den 1960er Jahren für das damals geplante Kernkraftwerk Beznau. Dabei wurde ein Dammbruch des Wehrs Wildegg-Brugg mit einer Schwallwellenhöhe von 3.7 m am Standort Beznau angesetzt. Dieser Überflutungswert wurde später als deutlich zu konservativ auf 1.65 m über Gelände verringert. Sowohl ein Dammbruch des Sihlsees als auch die gleichzeitigen und sequentiellen Brüche aller vorgelagerten Dämme wurden für den Standort in den letzten Jahren noch einmal rechnerisch untersucht. Dabei zeigte die EXAR-Studie keine Überflutung für den geplanten Standort der BEVA (Andres et al. 2021).

Hochwasser durch hohe Flusswasserpegel (Flusshochwasser)

Insgesamt besitzt die Aare ein nivales Abflussregime, welches aber durch die Seen im Schweizer Mittelland erheblich gedämpft wird. Nivale Abflussregime werden massgeblich durch die Schneeschmelze geprägt. Innerhalb der letzten 30 Jahre ereigneten sich zwei Aare-Hochwasser am Standort mit einer Wiederkehrperiode von 100 oder mehr Jahren. Das grösste Hochwasser seit Messbeginn wies einen Spitzenabfluss von 2'656 m³/s auf und ereignete sich im August 2007. Aufgrund dieser Beobachtungen wurden für die Region seit 2007 zahlreiche zusätzliche Hochwasseruntersuchungen durchgeführt, die mit der EXAR-Studie (Andres et al. 2021) ein besonders hohes Qualitätsniveau erreichen. Allein Axpo hat von 2005 bis 2014 knapp 30 Inhouse-Dokumente und knapp 15 Studien durch externe Fachexperten zum Thema Hochwasser im Bereich Beznau erstellt. In vielen Studien wurden auch die historischen Hochwasser in statistischen Auswertungen berücksichtigt (bspw. EXAR (Andres et al. 2021)).

³⁵ Das Programm Basement, entwickelt von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich, löst die tiefengemittelten, zweidimensionalen Flachwassergleichungen. Es zeichnet sich u.a. durch das automatische Erkennen von wechselnd nassen und trockenen Bereichen, durch die Möglichkeit des Einbaus von Wehren und durch die Simulation von Mehrkorngeschieben und Schwebstoffen aus. Das Modell wurde an Hochwasserereignissen kalibriert und validiert.

Basierend auf den Abflussmessungen, statistischen Auswertungen und Niederschlags-simulationen, wurden Abfluss-Gefährdungskurven für den Standort erstellt. Die linke Abbildung in Fig. 4-1 zeigt die Gefährdungskurve für den Aare-Abfluss am Referenzpunkt A in der Nähe des Standorts gemäss Andres et al. (2021). Die Abbildung zeigt, dass ein Abfluss ohne Berücksichtigung von Verklausungen etc. von ca. 4'500 m³/s eine Wiederkehrperiode von 10'000 Jahren aufweist. Tab. 4-2 gibt die in Andres et al. (2021) explizit ermittelten Abflüsse und Wiederkehrperioden wieder. Die rechte Abbildung in Fig. 4-1 zeigt die aus der Gefährdungskurve und dem hydraulischen Modell berechnete Wasserspiegelkurve sowie die Lokalität des Referenzpunkts.

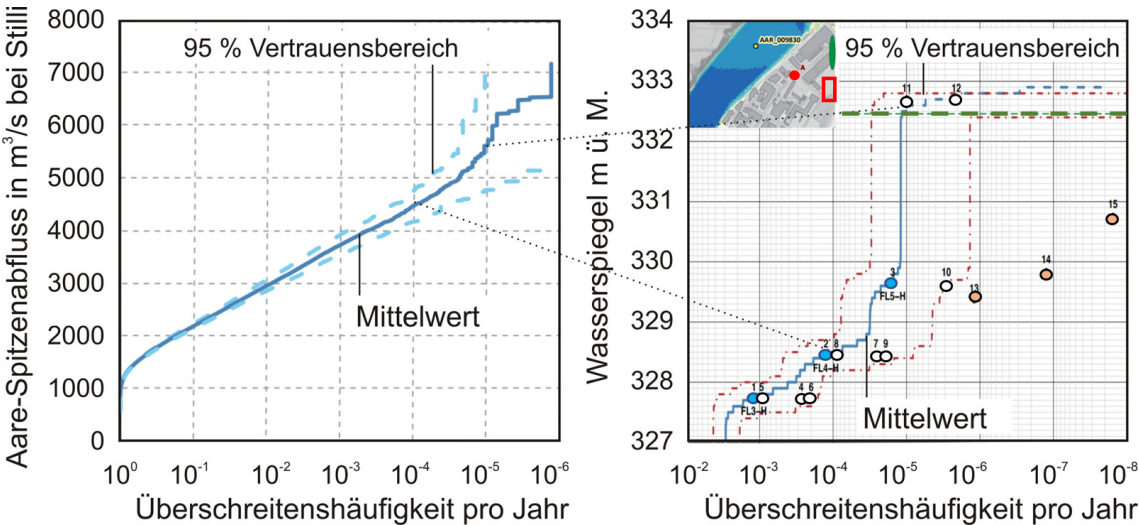


Fig. 4-1: Gefährdungskurve für Spitzenabflüsse der Aare an der Messstation Stilli (Mittelwert und Vertrauensbereiche, gestrichelte Linie) (links) und der zu den blauen und weissen Punkten zugehörige Wasserspiegel (rechts)
Andres et al. (2021)

Der rote Punkt und das rote Viereck auf der eingefügten Karte symbolisieren den Referenzpunkt der EXAR-Studie bzw. den geplanten Standort der BEVA.
Die blauen, weissen und orangen Punkte (rechte Figur) symbolisieren die Szenarien mit Spitzenabflusswerten gemäss Tab. 4-2, mit Verklausung der Brücke bzw. mit Wehrausfall Beznau. Die grüne gestrichelte Linie (rechte Figur) symbolisiert die Geländehöhe am Referenzpunkt.

Tab. 4-2: Spitzenabflüsse der Aare am Standort
Andres et al. (2021)

Spitzenabfluss der Aare [m³/s]	Häufigkeit [1/Jahr]
3'760	2.6×10^{-3}
4'399	2.6×10^{-4}
5'683	3.0×10^{-5}

Neben den in Andres et al. (2021) dokumentierten Berechnungen wurden für das Kernkraftwerk Beznau auch Extremszenarien rechnerisch untersucht, wie bspw. Abflüsse von 7'000 m³/s und 10'000 m³/s, und zwar sowohl als Reinwasser als auch mit Geschiebe und Verklausung. Selbst bei einem Abfluss von 7'000 m³/s mit vollständiger Verklausung des Wehrs Beznau würde eine Höhe von 332.5 m ü.M. am Standort der BEVA nicht überschritten und somit das Gelände am Standort trocken bleiben.

In Fig. 4-2 sind die Wasserstände auf dem Gelände des Paul Scherrer Instituts für einen Abfluss von 5'683 m³/s (siehe Tab. 4-2) gezeigt. Dies entspricht einer jährlichen Häufigkeit von 3×10^{-5} bzw. einer Wiederkehrperiode von 33'333 Jahren. Die EXAR-Studie kommt zu dem Ergebnis (Andres et al. 2021): *«Sämtliche hydrologischen Hochwasserereignisse können im BP³⁶ PSI im Gerinne der Aare abgeleitet werden und führen nicht zu einer Überflutung im Bereich des PSI.»* (siehe Fig. 4-2, links). Dies bestätigt die Ergebnisse der erwähnten früheren Berechnungen für das Kernkraftwerk Beznau.

Wird eine Verklausung der Brücke am Paul Scherrer Institut unterstellt, ergibt sich zwar eine geringe Überflutungshöhe auf dem Gelände des Paul Scherrer Instituts (Referenzpunkt ca. 20 – 25 cm überflutet, Andres et al. 2021), aber nicht auf dem im Vergleich zum Referenzpunkt höher gelegenen Gelände des zukünftigen Standorts der BEVA (siehe Fig. 4-2, rechte Abbildung). Die Wahrscheinlichkeiten von Verklausungen wurden sowohl in der EXAR-Studie (Andres et al. 2021) als auch durch Axpo (2013a, 2013b) untersucht und als sehr gering eingeschätzt, sodass ein solches Szenario im Grössenordnungsbereich kleiner 10^{-5} pro Jahr anzunehmen ist. Der geplante Standort der BEVA ist also keinem Aare-Überflutungshochwasser ausgesetzt.

³⁶ BP = Beurteilungsparameter.

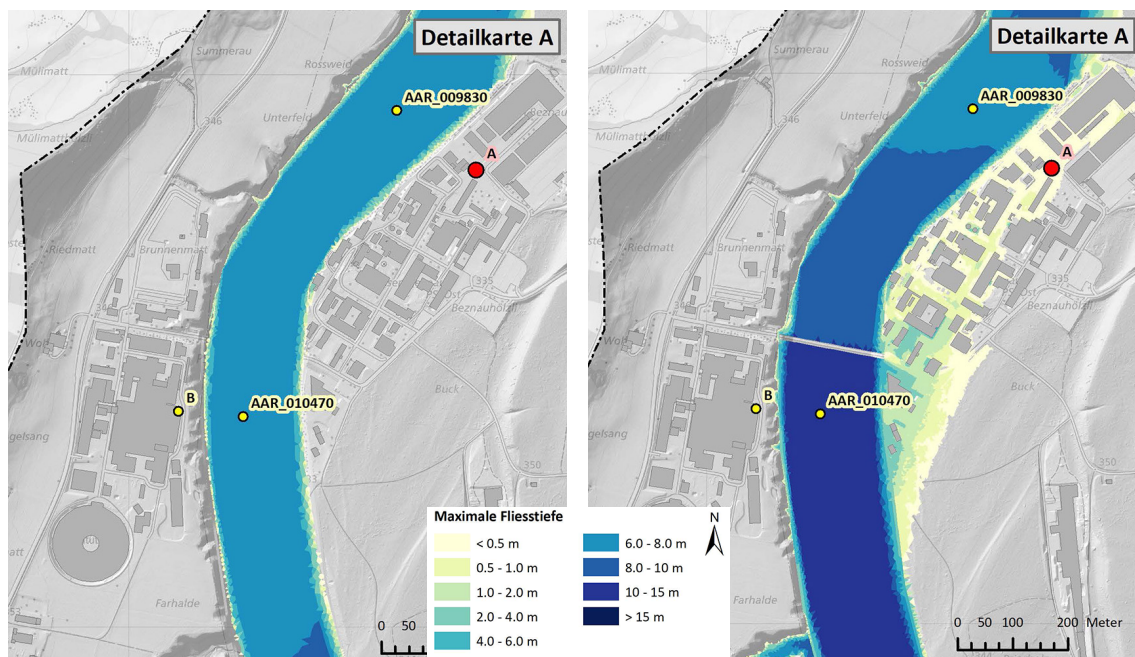


Fig. 4-2: Überflutungshöhe bei einem Hochwasser ohne Verklauung (links) und mit Verklauung der PSI-Brücke (rechts).

Die Abflussmenge entspricht $5'683 \text{ m}^3/\text{s}$, die jährliche Häufigkeit ohne und mit Verklauung beträgt 3.0×10^{-5} bzw. 2.1×10^{-6} (dies entspricht einem 33'333- bzw. 476'190-jährlichem Ereignis).

Der rote Punkt und das rote Viereck symbolisieren den Referenzpunkt der EXAR-Studie bzw. den geplanten Standort der BEVA.

Hochwasser durch lokale Starkniederschläge

Ein weiteres grundsätzlich denkbare Hochwasserszenario sind durch lokale Starkniederschläge ausgelöste Oberflächenabflüsse des Überschusswassers. Für die Schweiz liegen sowohl landesweit eine Oberflächenabflusskarte für 100-jährliche Ereignisse (BAFU 2022a, siehe Fig. 4-3) als auch regionale Hochwassermodelle für Seitenbäche für 300-jährliche Ereignisse vor (Ingenieure Bart AG 2010). Es zeigt sich, dass ein 100-jährliches Ereignis keine Überflutung des Standorts zur Folge hat. Ein abgeschätztes 10'000-jährliches Hochwasser der Seitenbäche (Oberdorfbach, Eichgraben und Dorfbach Würenlingen, siehe auch Fig. B-1) führt am Standort zu keiner Überflutung aufgrund des Fassungsvermögens des Bachs (Rinne, vgl. Fig. B-2 und Fig. B-3), der vorgeschalteten Durchlässe (vgl. Fig. B-4), die als Dämme wirken, und des Rückhaltevermögens des Walds (vgl. Fig. B-3). Oberflächenabflusssimulationen für ein 10'000-jährliches Starkniederschlagsereignis³⁷ zeigen, dass grossflächige Überflutungen ausgeschlossen werden können und nur lokale Wasseransammlungen in der Nähe des BEVA-Gebäudes von wenigen 10 cm zu erwarten sind. Dies ist zum einen mit der unmittelbaren Nähe der viel tiefer liegenden Aare (vgl. Kap. 3.1.5) als auch dem Fakt, dass der Oberflächenabfluss aus der Ebene Würenlingen nicht über den BEVA-Standort erfolgt, begründet.

³⁷ Die Modellierung beruht auf konservativen Annahmen, bspw. wurden die Kanisationskapazität sowie die Stellriemen (vgl. Kap. 5.2.3) für den Abschluss des Sicherungsperimeters, die ebenfalls auf die Ableitung des Oberflächenwassers wirken, vernachlässigt.

Zur Bewertung der Entwässerung von Starkniederschlägen direkt auf das Areal des Paul Scherrer Instituts wird zudem ein Vergleich mit dem Kernkraftwerk Beznau verwendet. Für Beznau wurde nur für sehr kurzzeitige 10'000-jährliche Niederschläge (60 min) eine hydraulische Überlastung des Regenabwassersystems ermittelt. Für länger andauernde 10'000-jährliche Niederschläge kann das Wasser kontrolliert abgeführt werden. Die hydraulische Überlastung führt zu einem Rückstau innerhalb der Kanalisation bzw. zu lokal geringen Überflutungshöhen auf dem Gelände. Die Bewaldung in der nahen Umgebung des Standorts der BEVA lässt ein erhebliches Wasserrückhaltepotenzial vermuten und die damit verbundene Verzögerung der Oberflächenabflüsse mit einer Anlaufzeit von mehr als 60 min schliesst eine flächendeckende Überflutung durch Überschusswasser aus diesen Gebieten aus. Die Gebiete östlich des Walds Richtung Würenlingen sind zudem durch einen Strassen- und einen Eisenbahndamm (vgl. Fig. B-5) abgegrenzt, sodass Oberflächenwasser auf die Felder (vgl. Fig. B-6) geleitet werden. Es wird davon ausgegangen, dass die heute vorhandene Kiesgrube zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der BEVA verfüllt ist und nicht als temporäres Wasserrückhaltevolumen zur Verfügung steht.

Es verbleiben Oberflächenabflüsse auf Fahrwegen in der Nähe des Standorts (Forschungsstrasse, nach dem Damm bzw. Brücke). Wie man aber am Höhenprofil erkennen kann (vgl. Fig. B-7), wendet sich die Forschungsstrasse kurz vor dem Paul Scherrer Institut nach Südwesten. Damit wird das Wasser vom BEVA-Standort weggeleitet.

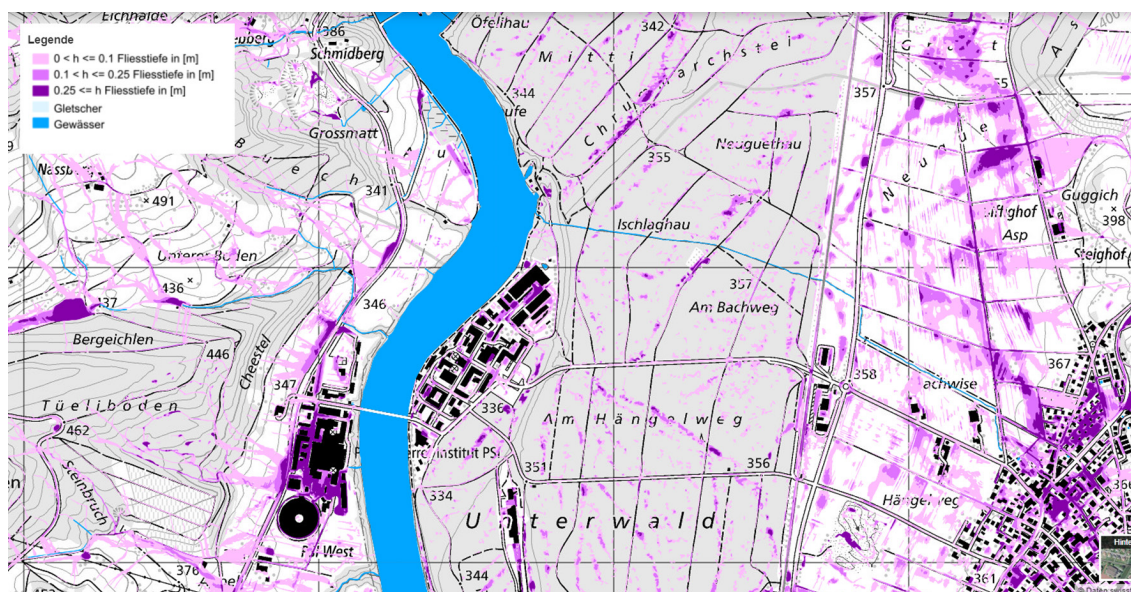


Fig. 4-3: Gefährdungskarte Oberflächenabfluss mit einer Wiederkehrperiode grösser 100 Jahre

BAFU (2022a)

Grundwasser

Neben oberflächigen Hochwassern können auch durch Grundwasseranstieg verursachte Hochwasser auftreten. Bei einem extremen Hochwasser besteht wahrscheinlich nur ein zeitlicher Abstand von wenigen Stunden zwischen oberflächiger Hochwasserspitze und Grundwasserspitze. Aus diesem Grund kann für die Auslegung konservativ angenommen werden, dass Hochwasser und durch Grundwasseranstieg verursachte Hochwasser im Bereich der BEVA gleichzeitig auftreten. Die bisher beobachteten langjährigen Extremamplituden des Grundwassers bis 325.5 m ü.M. liegen knapp unterhalb der vorgesehenen Gründungstiefe der BEVA von 326 m ü.M. (vgl. Fig. 4-4). Für ein 10'000-jährliches Grundwasser-Hochwasserereignis wurde für den Standort der BEVA eine Höhe von 328.7 m ü.M. ermittelt. Dadurch würde das Gebäude für kurze Zeit ca. 2.7 m im Grundwasser stehen.

Für die Region wurde eine 10'000-jährliche Aare-Trockenheit mit einem Minimalabfluss von 80 m³/s sowie eine Grundwassertrockenheit mit einem Grundwasserspiegel von 318.7 m ü.M. ermittelt.

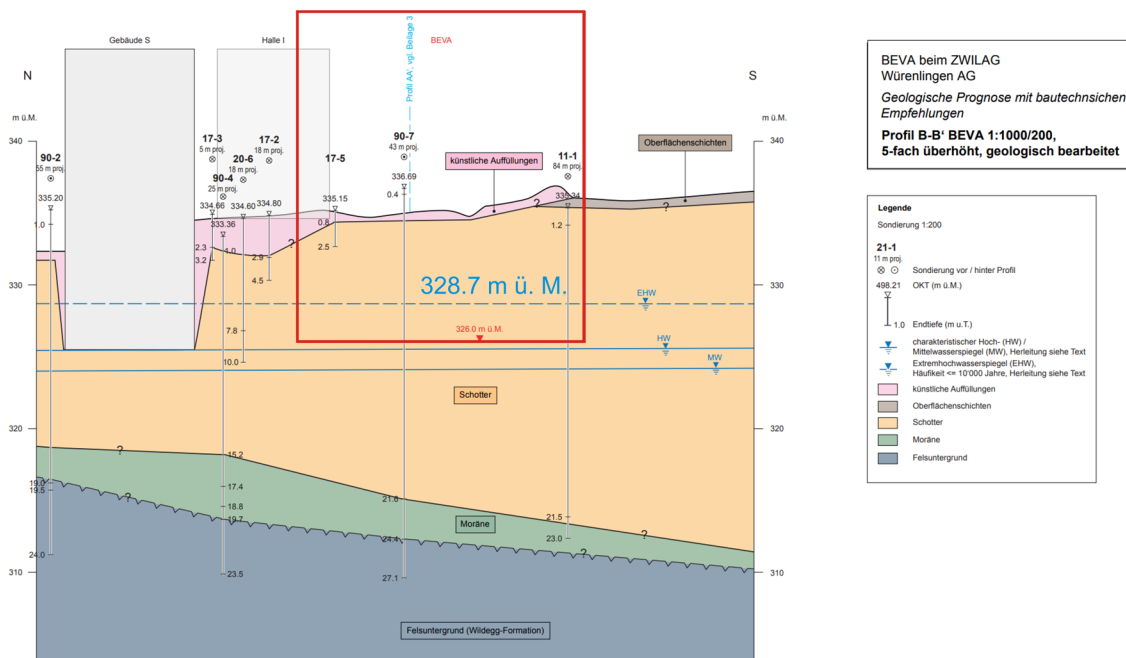


Fig. 4-4: Höhenprofile mit Angabe Unterkante Gebäude und bisherigen und maximal erwartbarem Grundwasserhöchststand.

4.3.2 Extrema der Klimatologie

Maximale Lufttemperaturen

Die maximale Lufttemperatur mit einer 10'000-jährlichen Wiederkehrperiode für die Messstation Beznau 2 m über dem Boden wurde mit ca. 42 °C ermittelt. Dabei wurde auch eine Veränderung des Klimas berücksichtigt. Beobachtete Maximalwerte liegen in der Schweiz bei 41.5 °C (Grono, 2003, konventionelle Wetterhütte) und in Deutschland bei 40.3 °C (Kitzingen 2015). Relevant für den Standort ist allerdings nicht Grono auf der Alpensüdseite, sondern die Alpennordseite. Der beobachtete Maximalwert dort liegt bei 39.7 °C (Genf, 2015).

Zurzeit gibt es eine wissenschaftliche Diskussion, ob sich die maximalen Lufttemperaturen durch eine erhöhte Austrocknung des Bodens verändern und damit Temperaturregimes vergleichbar mit dem Mittelmeer ergeben können. Dafür liegen aber bisher noch keine Zeitreihen vor. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass durch die Bewaldung, durch die reichhaltigen Grundwasservorkommen und durch die Aare eine Austrocknung des Bodens und damit eine Änderung des Temperaturregimes am Standort der BEVA nicht zu erwarten ist.

Minimale Lufttemperaturen

Statistische Auswertungen der Temperaturmessreihen in der Nähe des Standorts zeigen 10'000-jährliche Tiefsttemperaturen im Bereich von -20 °C. Die Datenreihen für die statistische Auswertung sind relativ kurz, sodass die grossen Kältewellen, wie bspw. der Januar 1987 mit -42.5 °C (korrigiert) in La Brévine, nicht berücksichtigt werden konnten. Zwar ist die Lage von La Brévine nicht mit jener am untersuchten Standort der BEVA vergleichbar, aber auch im Unteren Aaretal sind Kaltluftseen möglich. Diese Kaltluftseen werden normalerweise durch die Aufwärmung der von den Tälern herabströmenden kalten Luft durch die Aare verhindert. Wenn allerdings die Aare zufriert, wie vermutlich im Winter 1962/63, dann sind Kaltluftseen wie in anderen Muldenlagen möglich. Eine statistische Auswertung der Messungen der minimalen Flusstemperatur zeigt aber, dass dies unwahrscheinlich ist. Im Januar 1987 wurde in Tänikon im Kanton Thurgau ein Wert von -29.9 °C erreicht. Wird das Zufrieren der Aare unterstellt, ist solch ein Wert für den Standort möglich.

Wind

Bei Windeinwirkungen wird zwischen zyklonalen Stürmen und konvektiven Böenereignissen unterschieden. Zu letzterem zählen bspw. Tornados (siehe nachfolgendes Unterkapitel), aber auch starke Abwinde am Rande von Konvektionszellen, sogenannte Down Bursts. Down Bursts treten in der Schweiz viel häufiger auf als Tornados. Bei zyklonalen Ereignissen handelt es sich überwiegend um horizontale Windströmungen.

Die Windmessung erfolgt in der Regel auf Höhe 10 Meter über dem Grund. Die Richtung der häufigsten Winde am Standort ist Nord-Nordost und Süd-Südwest. Am Hochkamin des Paul Scherrer Instituts wurden typische maximale Windgeschwindigkeiten von 100 bis 120 km/h (29 bis 33 m/s) mit einer Wiederkehrperiode von 20 Jahren gemessen. Im Fall des Orkanwinds Lothar im Dezember 1999 wurde eine Spitzengeschwindigkeit von 154 km/h (42.8 m/s) ermittelt.

Für Sturmwinde wurde basierend auf Daten des Kernkraftwerks Beznau, des Paul Scherrer Instituts und der Messstation Kloten eine Böenspitze mit einer Wiederkehrperiode von 10'000 Jahren mit 167.4 km/h (46.5 m/s) bestimmt. Ausserdem liegen für die Schweiz ein Windatlas (BFE 2022) und eine Karte der Sturmgefährdung vor (Meteotest 2014).

Tornados

Für den Standort wird eine Tornadoklasse EF2 mit einer mittleren Wiederkehrperiode von ca. 10'000 Jahren basierend auf den Vorgaben der Richtlinie ENSI (2018b) ermittelt (Zwilag 2022). Daraus ergeben sich Windgeschwindigkeiten von ca. 180 km/h (50 m/s).

Niederschlag

Die Datengrundlage für die Ermittlung von extremen Niederschlagswerten wurde in den letzten Jahren in der Schweiz massiv ausgeweitet. Dies hat dazu geführt, dass gerade in diesem Zeitraum zahlreiche Extremwerte erfasst werden konnten (wie bspw. 10 min Niederschläge). Dies hat nichts mit einem veränderten Niederschlagsverhalten zu tun, sondern mit der erhöhten Wahrscheinlichkeit durch die grössere Dichte an Messstationen auch regional sehr hohe Niederschläge zu erfassen. Heute liegt für die Schweiz eine Karte der Niederschlagsextreme vor (Meteo Schweiz 2022a).

Niederschläge mit einer 10-minütigen Dauer und mehr als 60 Millimetern sind nördlich der Alpen in der Schweiz physikalisch nicht erklärbar, ergeben sich aber theoretisch aus der statistischen Extrapolation für ein 10'000-jährliches Ereignis. Der dabei ermittelte (konservative) Wert beträgt 82 mm. Maximale Stundenniederschläge wurden im Bereich 120 bis 130 mm ermittelt und sind physikalisch plausibel. Eine grosse zeitliche Granularität der Niederschlagswerte (10 min, 30 min, 60 min, 120 min, Tageswert) wurde 2012 vom ENSI in Auftrag gegeben. Für die 10'000-jährlichen Werte wurden folgende Werte ermittelt: 82.04 mm (10 min), 116.97 mm (30 min), 124.28 mm (60 min), 144.37 mm (120 min) und 193.13 mm (Tageswert). Diese Werte können mit der Kapazität der Abwassersysteme in Bezug gesetzt werden.

Die Auswirkungen lokaler Starkniederschläge wurden bereits in Kap. 4.3.1 im Abschnitt Hochwasser durch lokale Starkniederschläge diskutiert.

Schnee

Im Schweizer Mittelland werden kaum systematische Schneemessungen durchgeführt. Insofern liegen hier keine gesicherten standortspezifischen Untersuchungen vor. Die maximalen täglichen Neuschneehöhen im hochalpinen Raum sind aufgrund der deutlich unterschiedlicheren klimatischen Bedingungen für den Standort nicht direkt anwendbar. Die maximalen in der Schweiz gemessenen täglichen Neuschneehöhen von 1.3 m aus den Jahren 1999 am Berninapass und 2018 am Grimsel zeigen, dass trotz Klimaveränderungen Starkschneefälle möglich sind. Maximale 2- und 3-Tage Schneehöhen liegen bei ca. 2 m im hochalpinen Raum. Die grösste messtechnisch erfasste Schneehöhe in der Schweiz lag bei über 8 m.

Messstationen im nördlichen Flachland zeigen maximale tägliche Neuschneehöhen von 60 bis 80 cm, wobei auch hier regionale und messtechnische Besonderheiten zu beachten sind. Messungen aus alpinen Tälern mit höheren Werten sind aufgrund von Stauwirkungen und Niederschlagsabkühlungen nicht für den Standort repräsentativ. Statistisch extrapolierte Werte von 2 m für 10'000-jährliche Ereignisse sind physikalisch im Schweizer Mittelland nicht möglich. 5-Tages-Schneehöhen sind für den Standort nicht von Bedeutung, sondern werden im Wesentlichen im alpinen Raum verwendet, weil dort länger andauernde Frostperioden auftreten können. Diese sind im Mittelland nur mit Hochdruckgebieten aus Russland oder Skandinavien möglich, die wiederum nicht oder kaum zu Niederschlag führen. Für den BEVA-Standort betragen die 10'000-jährlichen Werte für einen 5-Tages-Schnee ca. 120 cm und für die maximale tägliche Schneehöhe ca. 86 cm. Die anzusetzende Flächenlast beträgt 2.6 kN/m².

Blitze

Für die nähere Umgebung des Standorts liegen statistische Auswertungen von Blitzen vor. Die Daten basieren auf dem Blitz-Informationsdienst (BLIDS) von Siemens. Darüber hinaus gibt es einen Blitzstromzähler im nahegelegenen Kernkraftwerk Beznau. Basierend auf diesen Auswertungen wurde ein extremer Blitz von 200 kA für eine Wiederkehrperiode von 10'000 Jahren ermittelt. Für den süddeutschen Raum werden in der Literatur maximal mögliche Blitzstärken für positive Wolken-Boden-Blitze von 400 kA genannt.

Hagel

Hagel ist eine Niederschlagsform aus Eis, wobei die einzelnen Hagelkörner eine Mindestgrösse von 0.5 cm besitzen müssen. Hagelkörner entstehen in Gewitterzellen bzw. -superzellen mit starken Aufwinden. Bei sehr starken Aufwinden von bis zu 150 km/h können Hagelkörner von 10 cm entstehen. Für die Schweiz liegen aufgrund langjähriger Forschungsarbeiten an der ETH Zürich und durch die Versicherer umfangreiche Auswertungen vor (bspw. PKG 2007, NCCS 2022). Für die Schweiz wurde für ein 10'000-jährliches Ereignis ein 15 cm Hagelkorn ermittelt.

Vereisender Regen

Für den vereisenden Regen wurden 10'000-jährliche Ereignisse basierend auf kanadischen Werten in Form von Eisdicken ermittelt. Diese Eisdicken können dann sowohl als Bauwerkslast als auch als eingeschränkte Begehrbarkeit der Gebäude und des Geländes interpretiert werden. Es wurden 10'000-jährliche Eisdicken von 5 cm vertikal bis 10 cm horizontal ermittelt, die als Flächenlast von 0.45 kN/m² anzusetzen wären.

4.3.3 Weitere Naturgefahren

Waldbrand

Insgesamt spielt Waldbrand im Vergleich zu anderen Ländern in der Schweiz eine unbedeutendere Rolle, aber trotzdem sind für das Schweizer Mittelland in den letzten 40 Jahren ca. 180 Waldbrandereignisse bekannt. Die Anzahl der Waldbrandereignisse nördlich der Alpen bzw. in den Zentralalpen ist allerdings klein gegenüber der Anzahl Ereignisse auf der Alpensüdseite. Insgesamt wurde für den Standort als 10'000-jährliches Ereignis ein Waldbrand mit einer Grösse von 0.9 km² und einer Dauer von 5 – 10 Stunden ermittelt.

Gravitative Naturgefahren

Aufgrund der in der Nähe des Standorts vorhandenen Topographie, des Gefälles, des Bewuchses, der Niederschlagsmengen und der sonstigen klimatologischen Faktoren können die meisten gravitativen Naturgefahren (Steinschläge, Muren, Blitzfluten, Lawinen, Hangrutschungen) ausgeschlossen werden. Im Fall eines nicht ausgeschlossenen, aber sehr unwahrscheinlichen Ereignisses würde darüber hinaus der Wald als Schutzwald wirken und die Intensität sich signifikant verringern.

- Steinschlag: ist gemäss der aktuellen kantonalen Gefährdungskarten keine Gefährdung für den Standort (BAFU 2022b). Darüber hinaus würde der Wald als Schutzwald wirken. In der Umgebung des Projektperimeters sind keine Felshänge/-böschungen vorhanden. Die westlich der Aare im Gebiet Cheestel vorhandenen Felsböschungen liegen zu weit entfernt, um bei einem allfälligen Bergsturzereignis überhaupt das westliche Ufer oder gar die andere Aare-seite erreichen zu können. Darüber hinaus werden die notwendigen Gefälle für Bergsturzereignisse nicht erreicht.
- Muren: stellen gemäss der aktuellen kantonalen Gefährdungskarte keine Gefährdung für den Standort dar (BAFU 2022b), da keine relevanten Gerinne und kein relevantes Sammelgebiet vorliegen. Die einzige in der Nähe des Standorts angegebene potenzielle Gefährdung ist eine Übersarung³⁸ im Bereich Brunnenmatt-Unterfeld in ca. 400 bis 500 m vom Standort auf der

³⁸ Eine Übersarung ist eine Ablagerung von Wildbachschutt ausserhalb des Gerinnes.

anderen Aareseite (BAFU 2022b) entfernt. Aufgrund der Entfernung kann eine Gefährdung für den Standort ausgeschlossen werden.

- Hangmuren sind im Bereich Cheestel, Mülimatthölzli möglich (800 m entfernt), erreichen den Standort aber nicht. Aufgrund der Bodenverhältnisse und des Böschungswinkels sind Hangmuren (10'000-jährliche Ereignisse) theoretisch auch am Standort möglich. Aufgrund des Stands von Wissenschaft und Technik ist aber bekannt, dass eine Bewaldung, wie sie am Standort anzutreffen ist, zu einer deutlichen Verringerung der Gefährdung durch Hangmuren führt (Dorren and Schwarz 2016, van Zadelhoff et al. 2021).
- Hangrutschungen und Gerinneverlegung: Hangrutschungen am Standort können ausgeschlossen werden. Theoretisch besteht die Möglichkeit von Hangrutschungen im Bereich des Westhangs der Aare auf Höhe Beznau. Dort werden Hangneigungen von ca. 30° erreicht (BAFU 2022b). Diese sind aber zu weit entfernt, um Auswirkungen auf den Standort der BEVA zu haben.
- Lawinen: Sind gemäss der aktuellen kantonalen Gefährdungskarte keine Gefährdung für den Standort (BAFU 2022b).

Bodenveränderung/Bodenverfestigung (Schrumpfen/Aufquellen)

Der Baugrund im Bereich der erforderlichen Baugruben besteht aus vergleichsweise dicht gelagertem Niederterrassenschotter. Dieser ist weder quellfähig noch weist er Tendenz zu Bodenverflüssigung auf. Zudem können Subrosionsprozesse ausgeschlossen werden.

4.3.4 Zusammenfassung

In Tab. 4-3 werden die Werte der 10'000-jährlichen Einwirkungen am Standort der BEVA basierend auf statistischen Auswertungen und Extrapolationen angegeben. In der rechten Spalte finden sich Bemerkungen zu Grenzen der statistischen Extrapolation. Potenzielle Änderungen der hydrologischen, klimatologischen und gravitativen Naturgefahren wurden in der Literatur diskutiert und sind soweit notwendig bereits in den angegebenen 10'000-jährlichen Werten berücksichtigt.

Wie in Kap. 2 beim Thema Sicherheitsebenen und Störfallkategorien erläutert, werden bei Ereignissen – insbesondere mit einer Wiederkehrperiode grösser 10'000 Jahren – sogenannte Sicherheitsmargen identifiziert und bei der Auslegung der Strukturen, Systeme und Komponenten einer Anlage berücksichtigt, sodass Kernanlagen auch sehr seltene Ereignisse (und darüber hinaus) sicher beherrschen. So wurde bereits beim Hochwasser darauf hingewiesen, dass ein Hochwasser mit einer Häufigkeit von einmal in einer Million Jahren das Erdgeschoss einer BEVA nicht erreicht (keine Geländeüberflutung). Deshalb können indirekt über den Nachweis solcher Häufigkeiten Unsicherheiten bei zugehörigen fluvialen Prozessen, wie Hangrutschungen oder Querschnittsveränderungen, abgedeckt werden. Solche erheblichen Sicherheitsmargen finden sich bei praktisch allen natürlichen Einwirkungen für Gebäudeauslegungen.

Die in Tab. 4-3 gezeigten Werte belegen, welchen Einwirkungen eine BEVA am Standort Zwilag ausgesetzt wäre. Auf Basis der Ausgangsdaten könnten Auslegungswerte abgeleitet werden.

Tab. 4-3: Zusammenfassung der Werte der Einwirkungen mit 10'000-jährlicher Wiederkehrperiode

Parameter	10'000-jährliche Wiederkehrperiode	Maximal/minimal möglicher Wert
Maximale Lufttemperatur 2 m über Boden	41.79 °C	
Minimale Lufttemperatur 2 m über Boden	-19.41 °C	-30 °C
Maximale Flusstemperatur	27.63 °C	28.9 °C (Leibstadt)
Minimale Flusstemperatur	-0.67 °C	Vereisung Aare möglich, aber unwahrscheinlich
Böen-Windgeschwindigkeit	46.5 m/s	
Tornado	49.1 m/s	
10 min Niederschlag	82.04 mm	60 bis 80 mm
30 min Niederschlag	116.97 mm	
60 min Niederschlag	124.28 mm	
120 min Niederschlag	144.37 mm	
24 Stunden Niederschlag	193.13 mm	
Maximale Schneehöhe	86.15 cm	
1 Tages-Neuschnee	75 cm	
5 Tages-Neuschnee	121 cm	
Schneelast	2.60 kN/m ²	
Waldbrand	Fläche: 0.9 km ² Dauer: 5 bis 10 h	
Blitze	200 kA	400 kA
Hagel	Hagelkorngrösse 15 cm Flächenlast 1.29 kN/m ²	
Vereisender Regen	Horizontal: 5 cm Vertikal: 10 cm Flächenlast: 0.45 kN/m ²	
Aare-Niedrigwasser	80 m ³ /s	
Grundwassertrockenheit	318.7 m ü.M.	

Tab. 4-3: Fortsetzung

Parameter	10'000-jährliche Wiederkehrperiode	Maximal/minimal möglicher Wert
Aare-Hochwasser	Abfluss: 4'500 m ³ /s Pegel: 328.5 m ü.M.	Der 10'000-jährliche Wert wurde aus EXAR interpoliert. Explizite 10'000-jährliche Werte liegen zwischen 4'200 bis 4'900 m ³ /s. Die Festlegung eines 10'000-jährlichen Ereignisses ist nicht einheitlich, sowohl hinsichtlich des exakten Abflusswerts als auch hinsichtlich der Berücksichtigung weiterer fluvialer Prozesse, wie Verklausungen. Bis zu einer Wiederkehrperiode von 10 ⁻⁸ übersteigt der Pegel den Wert von 333 m ü.M. nicht (d.h. keine Überflutung des Standorts).
Grundwasser-Hochwasser	Pegel: 328.7 m ü.M.	2.7 m über Unterkante Bodenplatte BEVA (326 m ü.M.)

5 Massnahmen und Bewertung

In diesem Kapitel werden Massnahmen zur Auslegung der BEVA gegen die zuvor genannten wasserinduzierten Ereignisse und die mögliche Gefährdung des Grundwassers (Kap. 4.3) beschrieben. Hierbei sind grundsätzlich zwei Phasen zu unterscheiden. Während der Bauphase werden in der BEVA keine nuklearen Materialien gehandhabt und Gefährdungen beschränken sich – wie auf jeder konventionellen Baustelle auch – auf Gefährdungen ausgehend von auf der Baustelle gelagerten und verwendeten wassergefährdenden Stoffen, Zementrückständen im Betonwasser oder verwendeten Hilfsstoffen. In dieser Phase werden gewöhnliche baustellen-spezifische Schutzmassnahmen gemäss den aktuellen Normen und Verordnungen ergriffen. Eine kurze summarische Zusammenfassung der vorzusehenden Standardmassnahmen wird in Kap. 5.1 vorgestellt.

Erst mit Beginn der Betriebsphase wird die BEVA zur Kernanlage und der Einschluss und die Rückhaltung von radioaktiven Stoffen müssen gemäss Kap. 2 sichergestellt werden. Hierbei ist der Schutz der Barrieren der Kernanlage vor interner und externer Einwirkung allgemein (vgl. Kap. 4.1) sowie insbesondere infolge interner und externer Wassereinwirkungen (vgl. Kap. 4.3) von Bedeutung (vgl. auch Konzept der gestaffelten Sicherheitsvorsorge in Kap. 2).

Externe Wassereinwirkungen können auf die gesamte Gebäudehülle der BEVA einwirken, d.h. Dach, Fassade/Wände, Kellerwände und Bodenplatte (siehe Fig. 5-1). Interne Ereignisse werden gemäss der Sicherheitsvorsorge auslegungsbedingt vermieden bzw. sind bezüglich ihrer Belastungen/Einwirkungen begrenzt (vgl. Kap. 3.2)³⁹. Alle im Weiteren vorgeschlagenen Massnahmen zielen darauf ab, die Gebäudehülle entsprechend wasserdicht auszubilden und den Wasseranfall potenziell intern auftretender Wasserereignisse gezielt zu sammeln (bspw. im Untergeschoss) und von dort kontrolliert abzuführen. Als Folge führen externe Wassereinwirkungen zudem zu Auftrieb und seitlichem Wasserdruck, wie in Fig. 5-1 schematisch verdeutlicht. In Anhang C werden verschiedene Dichtsysteme verglichen.

Im Kap. 5.2 wird auf die einzelnen Wassereinwirkungen (insbesondere Eindringen und Auftrieb) eingegangen und dargelegt, mit welchen Massnahmen diese in der Betriebsphase gehandhabt werden. Die genannten Massnahmen stellen Konzepte dar, die in den nächsten Projektphasen stets überprüft und stufengerecht verfeinert werden.

³⁹ Wenn überhaupt, sind diese nur durch Löschwasser bzw. sonstiges temporär eingebrachtes Wasser/Flüssigkeiten anzunehmen. Es wird erneut darauf hingewiesen, dass die Umladezelle immer wasserfrei bleibt.

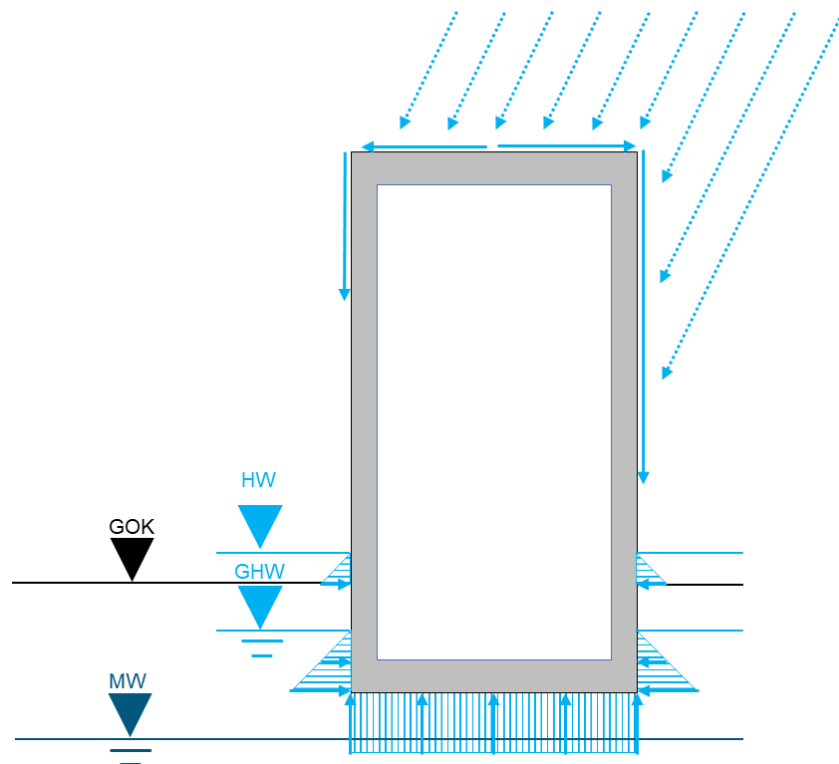


Fig. 5-1: Situation Bauwerke im Grundwasser.

GOK: Geländeoberkante, MW: Mittelwasserstand, HW: Hochwasser, GHW: Grundwasser-Hochwasser

5.1 Schutzmassnahmen während der Bauphase

Während der Bauphase der BEVA werden keine radioaktiven Abfälle gehandhabt, und es sind hinsichtlich einer allfälligen Grundwassergefährdung ausschliesslich konventionelle wassergefährdende Stoffe zu erwarten, deren sichere und professionelle Handhabung zum Baustellenalltag gehört (bspw. Treibstoff, Öl, Bauchemikalien). Hierbei werden die Schutzmassnahmen der SIA 431 "Entwässerung von Baustellen" (SIA 1997) bzw. der zum Ausführungszeitpunkt geltenden Norm umgesetzt, unter Berücksichtigung der besonderen Situation mit Bauen im Gewässerschutzbereich A_U. Die SIA 431 gibt unter anderem die Umsetzung folgender Massnahmen vor:

- Erarbeitung eines Entwässerungskonzepts
- Einholen der erforderlichen Bewilligungen
- Einrichten von Umschlags-, Installations- und Lagerplätzen im Freien mit dichtem Belag
- Auffangbecken und Ableitung des Abwassers; gegebenenfalls ist eine Behandlung vorzunehmen
- Entsprechende Instruktion des Baustellenpersonals
- Qualitätssicherung (Sicherstellung der Umsetzung der Vorgaben und Massnahmen, regelmässige Kontrollen, automatisierte Messungen)

Im Rahmen des Entwässerungskonzepts wird ein Notfallkonzept in Zusammenarbeit mit den Behörden entwickelt (bspw. Entwässerungsvorrichtungen mit Absperrklappen und Ausweichmöglichkeiten, Alarmierung bei Überschreitung der Grenzwerte). Aufgrund des tiefen Grundwasserspiegels (vgl. Kap. 3.1) und der vorgesehenen Gründungstiefe (vgl. Fig. 4-4) ist keine Wasserhaltung nötig, dennoch können bei Bedarf Sicherheitsmassnahmen zur Hochwasser- bzw. Meteorwassersicherung der Baustelle, insbesondere der Baugrube, vorgesehen werden (bspw. Sandsäcke).

5.2 Schutzmassnahmen während der Betriebsphase

Zum Erreichen des Sicherheitsziels und der untergeordneten Schutzziele gemäss Kap. 0 wird die gesamte BEVA im Hinblick auf den Einschluss und die Rückhaltung radioaktiver Stoffe entsprechend dem Mehrfachbarrierensystem ausgelegt (vgl. Kap. 3.2.3). Gemäss ENSI-G23 Kap. 5.2, Abs. c (ENSI 2021a) sind hierbei Einwirkungen infolge von Naturereignissen mit einer Jährlichkeit von 10^{-3} oder 10^{-4} pro Jahr als aussergewöhnliche Bemessungssituation nach der Norm SIA 260 (SIA 2003) zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird die BEVA auf ein 10'000-jährliches Erdbeben und ausserdem – als ein sehr seltenes abdeckendes Ereignis – auf einen unfallbedingten Flugzeugabsturz ausgelegt (vgl. Anlagenbeschrieb in Kap. 3.2). Hierfür ist insbesondere der Verstärkung der Bodenplatte und der Auslegung der Gebäudehülle Beachtung zu schenken (vgl. Kap. 5.2.2). Diese beiden externen Ereignisse mit einem hohen Lasteintrag führen somit dazu, dass die BEVA sehr widerstandsfähig ausgelegt wird, was generell auch dem Schutz vor Wassereinwirkungen dient sowie einem potenziellen Auftrieb im Ereignisfall entgegenwirkt.

5.2.1 Massnahmen zum Schutz von/vor Grund- und Oberflächenwasser

In der Bautechnik gibt es verschiedene Massnahmen, mit Einwirkungen wie Grund- und Oberflächenwasser umzugehen. Hierbei sind Massnahmen zur Vermeidung und Massnahmen zur Beherrschung zu unterscheiden. Bei der Vermeidung wird die Einwirkung durch Massnahmen reduziert oder sogar vollständig eliminiert. Bei der Beherrschung machen die Massnahmen die Auswirkungen der Einwirkung handhabbar. Typische Beispiele für vermeidende Massnahmen im Kontext Wasser wäre das Aufständern eines Hauses am Fluss, um auch bei Hochwasser trocken zu bleiben, oder das Überdachen eines Platzes, der bei Regen trocken bleiben soll. Eine Massnahme zur Beherrschung wäre beispielweise die Abdichtung eines Hauses am Fluss, das nicht aufgeständert werden kann. Solche Massnahmen können am Bauwerk direkt – das Haus wird selber aufgeständert/abgedichtet – oder um das Bauwerk herum – der Platz bleibt unverändert, ein Dach wird darüber gespannt – vorgenommen werden. Eine Zusammenfassung möglicher Massnahmen gegen wasserinduzierte Gefahren ist in Fig. 5-2 schematisch dargestellt. Die Auswahl der für ein Bauwerk passenden Massnahmen muss die Örtlichkeiten bzw. Standorteigenschaften (vgl. Kap. 3.1), die standortspezifische Gefahrensituation (vgl. Kap. 4.3), die vorgesehene Nutzung (vgl. Kap. 3.2) und alle massgeblichen Einwirkungen berücksichtigen (vgl. Kap. 4.1, insbesondere Tab. 4-1).

Für den Grund- und Oberflächenwasserschutz bzw. dem Schutz einer BEVA⁴⁰ vor wasserinduzierten Gefahren stehen generell folgende Massnahmen zur Verfügung:

- Grundwasser
 - Anheben der Gründung auf ein trockenes Niveau
 - Abdichten zur Vermeidung des Ein- bzw. Ausdringens von Wasser
 - direkt am Bauwerk (d.h. die Massnahme erfolgt am Bauwerk selbst)
 - um das Bauwerk herum (d.h. bauwerksferne Massnahme, bspw. ein Dichtschirm)
 - Drainage, Abführung, «Grundwasserabsenkung»
- Oberflächenwasser
 - Aufständern des Bauwerks
 - Abdichten direkt am Bauwerk
 - Eindeichen (d.h. bauwerksferne Massnahme)
- Niederschlag
 - Abdichten direkt am Bauwerk (bspw. Dach und Abläufe)
 - Überdachung, d.h. Fernhalten des Niederschlags
 - Stellriemen für die Umströmung des Bauwerks (Oberflächenabfluss)

In der Konzeptionierung des Grundwasserschutzes ist aus diesen Massnahmen eine Kombination auszuwählen, die die Anforderungen des Grundwasserschutzes erfüllt und sich möglichst gut mit den Massnahmen und Auslegungen zum Erfüllen anderer Anforderungen und Ansprüche ergänzt.

⁴⁰ Die genannten Massnahmen können natürlich auch für andere Gebäude am Standort angewendet werden.

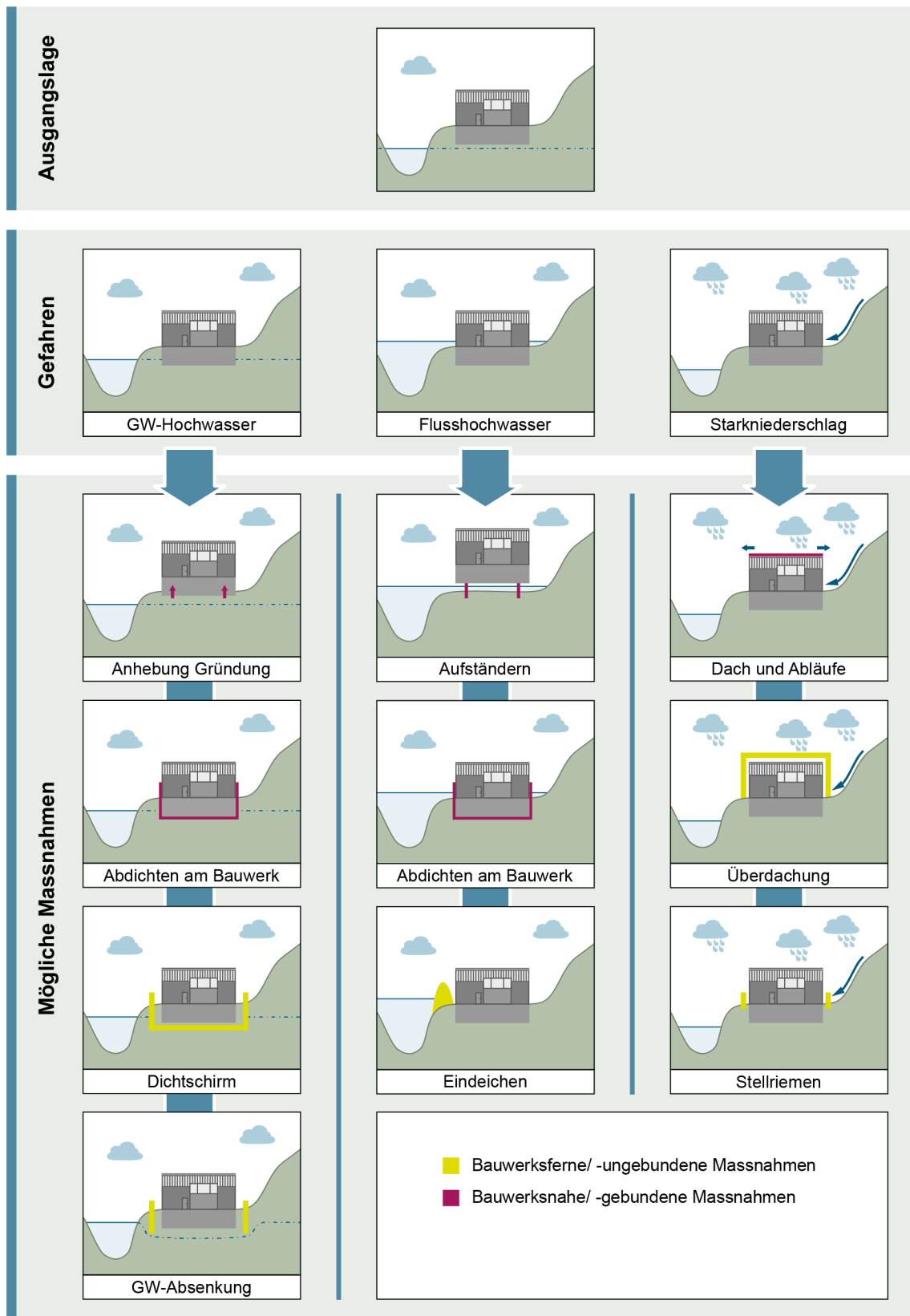


Fig. 5-2: Schematische Darstellung möglicher objektnaher bzw. -ferner Massnahmen zur Vermeidung oder Beherrschung von wasserinduzierten Belastungen, wie hohes Grundwasser (links), Flusshochwasser/Überflutung (Mitte) oder Niederschlag (rechts)

5.2.2 Massnahmen bezüglich Grundwassereinflüssen

Grundsätzlich wirkt Grundwasser auf zweierlei Weise: Auftrieb und Eindringen⁴¹. Der hier betrachtete Standort der BEVA zeichnet sich dadurch aus, dass eine trockene Gründung der BEVA erfolgen kann, was Auftrieb und Eindringen ausschliesst. Gemäss dem Auslegungsprinzip der grundsätzlichen Vermeidung von Belastungen (siehe Kap. 2) bedeutet dies, dass die Sohle so festgelegt wird, dass bei einem mittleren Grundwasserspiegel von 324 m ü.M. die Aussenwand bzw. die Bodenplatte der Anlage stets einen Abstand von 2.0 m zum Grundwasser aufweist (vgl. Fig. 4-4).

Massgeblicher Nutzungsanspruch an die BEVA im Kontext der Massnahmenauswahl ist die ebenerdige Befahrbarkeit mit den Transportern für TLB und ELB, welche die sicherste Variante darstellt. Weiterhin ist für die Auslegung gegen Erdbeben ein tiefer Schwerpunkt, d.h. eine tiefe Lage der Umladezelle im Gebäude, nützlich. Die Auslegung gegen Flugzeugabsturz profitiert von einer kleinen Gebäudeoberfläche. Das Ausweichen durch weiteres Anheben der Gründung wäre daher nachteilig. Angesichts der Nutzung des Grundwassers in der Umgebung des Standorts und der Klassierung als Grundwasserschutzbereich A_U ist eine grossräumige Grundwasserabsenkung/ Drainage mit dem Ziel der Dauertrockenhaltung der BEVA nicht mit dem Grundwasserschutz vereinbar.

Da die BEVA somit im Regelfall trocken gegründet ist, aber extreme Grundwasserstände (vgl. Fig. 4-4) ihr Untergeschoss erreichen können, ist als weitere Massnahme eine wasserdichte Ausbildung nach Stand von Wissenschaft und Technik vorzusehen. Hier ist die Abdichtung am Bauwerk selbst eindeutig vorteilhaft, da eine bauwerksferne Abdichtung eine grossräumige Beeinträchtigung des Grundwasserleiters bedeuten würde und zur Entfaltung der vollen Wirksamkeit den gesamten Grundwasserleiter grossräumig unterbrechen müsste. Die Wirkung dieser Massnahme ist jedoch nicht besser als die Abdichtung des Bauwerks selbst. Zudem bietet die Abdichtung am Bauwerk den Vorteil, dass die Rückhaltung von austretenden Stoffen aus der Anlage direkt im Bauwerk erfolgt und diese nicht in die unmittelbare Umgebung der BEVA gelangen. Weiterhin ist die BEVA über die gesamte Nutzungsdauer hinweg unterhaltsärmer. Aufgrund der Auslegung gegen Erdbeben und Flugzeugabsturz wird die BEVA bis in die Gründung als robuste schwere Tragkonstruktion ausgelegt, die auch einem Anstieg des Grundwasserspiegels auf den 10'000-jährlichen Extremwert von 328.7 m ü.M. bzw. einer Überschwemmung des Geländes (siehe Kap. 4.3.1) und den daraus resultierenden Auftriebskräften und seitlichem Wasserdruck standhält. Das Untergeschoss der BEVA wird als eine armierte wasserundurchlässige Betonwanne mit einer Wand-/Bodenstärke grösser 1 m ausgebildet. Die Umladezelle bzw. die die Umladezelle umgebenden Gebäudeteile weisen Stahlbetonwandstärken von mehr als 1.5 m auf.

Die Dichtigkeit der BEVA im Bereich der Aussenwände und Bodenplatte des Untergeschosses wird – neben dem bereits erwähnten wasserundurchlässigen Betonkonstrukt – durch zusätzliche Schutzschichten erhöht:

- Als Bestandteil der Betonwanne wird eine Frischbetonverbundfolie aussen mit dem wasserundurchlässigen Beton verbunden. Der Beton zusammen mit der Folie bilden die «Gelbe Wanne»⁴².

⁴¹ Grundsätzlich kann Grundwasser auch chemische Stoffe enthalten, welche die Bausubstanz angreifen. Da das Grundwasser aber überwacht und verwendet wird, ist davon nicht auszugehen. Selbst eine kurzzeitige chemische Verunreinigung würde keine relevanten Bauschäden verursachen.

⁴² Eine Zusammenstellung möglicher Dichtungssysteme und deren Vergleich ist in Anlage C dokumentiert. Das System der «Gelben Wanne» wurde als die qualitativ hochwertigste, dem Stand der Technik entsprechende Lösung ausgewählt.

- Innenräume von kerntechnischen Anlagen, in denen radioaktive Stoffe auftreten oder auftreten könnten, werden mit speziellen Mehrfachbeschichtungen versehen. Diese Mehrfachbeschichtungen verhindern das Eindringen von eventuell vorkommenden radioaktiven Stoffen in den Beton, lassen sich einfach reinigen und sind beständig gegen chemische und mechanische Einflüsse (Sika 2019). Das als Betonwanne ausgebildete Untergeschoss wird mit einer solchen Mehrfachbeschichtung versiegelt, sodass hierin gegebenenfalls Flüssigkeiten immer aufgefangen werden können.

Die radioaktiven Stoffe (sowie auch konventionelle wassergefährdende Stoffe) werden – neben den Barrieren der Abfälle selbst – also durch vier Dichtungsschichten vom Grundwasser getrennt, sodass das in Kap. 0 eingeführte Barrierenkonzept für den Einschluss und die Rückhaltung von Radionukliden erfüllt wird und dieses zudem auf den Grundsätzen der Redundanz und Diversität aufbaut. Die vier komplementären Dichtungsschichten, welche auch in Fig. 5-3 schematisch dargestellt werden, sind:

1. Umladezelle, bestehend aus massiven Betonwänden, welche mit einer dichten Edelstahlauskleidung versehen sind. Die Umladezelle ist somit Barriere und Dichtungsschicht.
2. Mehrfachbeschichtungen (Dichtungsschicht bei allen relevanten Böden, insbesondere im Untergeschoss)
3. Wasserundurchlässige Betonwanne
4. Frischbetonverbundfolie

Durch dieses System wird eine konstruktive Abdichtung gewährleistet. Die komplementären Dichtungsschichten wirken unabhängig und redundant. Die Weiterführung der Grundwasserabdichtung ist bis über Geländeoberkante vorgesehen⁴³, wobei Tür-/Toröffnungen entsprechend ausgebildet werden können. Somit wäre auch der hypothetische Fall einer kurzzeitigen geringfügigen Arealüberflutung und auch ein Wasserstau bei Starkregenereignissen konservativ abgedeckt (Sicherheitsmarge). Darüber hinaus können aufgrund der sicherheitsoptimierten Auslegung der Anlage sowie der zugehörigen Betriebsprozesse alle Arbeiten und Prozesse bei einem (Extrem)Ereignis unterbrochen bzw. (vorgängig) abgeschlossen und in einen sicheren Zustand überführt werden⁴⁴, da quasi alle externen Ereignisse, mit Ausnahme eines Erdbebens, eine erhebliche Vorwarnzeit besitzen.

⁴³ Die SIA 272 SIA 2009 fordert hier 12 cm. In der späteren Auslegung wird gegebenenfalls eine ausreichende Sicherheitsmarge im Sinne des Vorsorgeprinzips (vgl. Kap. 2) bereitgestellt.

⁴⁴ Bspw. wird das in der Umladezelle gehandhabte BE in einen Behälter eingesetzt und alle an die Zelle angedockten Behälter werden verschlossen.

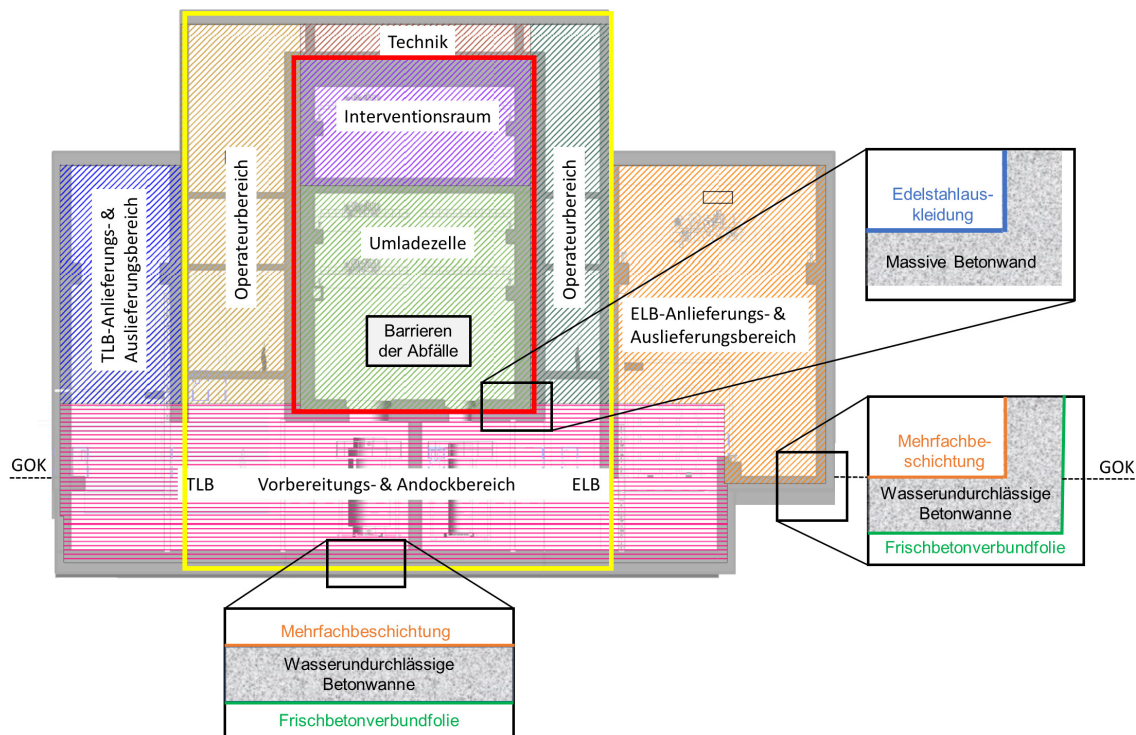


Fig. 5-3: Mehrfachbarrierensystem für die Rückhaltung radioaktiver Stoffe (Umladezelle und umgebende Bereiche) und Dichtungssystem für den Grundwasserschutz

Das vorgestellte Dichtungssystem (von innen nach aussen und umgekehrt) setzt die genannten Auslegungsgrundsätze gemäss der Sicherheitsvorsorge (vgl. Kap. 2) um. In den folgenden Planungs- und Genehmigungsphasen wird die Materialisierung und Umsetzung nach dem dann gültigen Stand der Bautechnik ausgelegt und umgesetzt.

5.2.3 Hochwasser

Gemäss Kap. 4.3.1 können alle niederschlagsbedingten Hochwasserereignisse durch die Aare abgeführt werden, ohne das Gelände des zu betrachtenden Perimeters zu überschwemmen. Weder ein 1'000- noch ein 10'000-jährliches Hochwasser setzen den Standort unter Wasser. Daher besteht für ein Eindeichen keine Notwendigkeit. Die zuvor genannte Massnahme des Hochziehens der Grundwasserabdichtung (über die Geländeoberkante) sowie die entsprechende Ausbildung von Tür-/Toröffnungen stellt sicher, dass auch bei einer hypothetischen kleinräumigen kurzzeitigen Überflutung des Areals, bspw. durch sehr starke Regenfälle, kein Wasser in die BEVA eindringen kann. Mit Hilfe von Stellriemen kann bei Überlastung der Geländeentwässerung als Oberflächenwasser abfliessender Niederschlag von exponierten Flächen gezielt abgeleitet bzw. von der BEVA weg geleitet werden (siehe auch Kap. 5.2.4).

Daneben hätte ein Aare-Hochwasser aber auch einen Anstieg des Grundwasserspiegels zur Folge, wie dies in Kap. 4.3.1 aufgezeigt und in Kap. 5.2.2 untersucht und in der Auslegung berücksichtigt wurde.

5.2.4 Massnahmen bezüglich Meteorwasser

Meteorwasser inklusive extreme Starkniederschlagsereignisse haben auf die Standsicherheit und die Gebäudeintegrität der BEVA keinen Einfluss. Das Meteorwasser wird über eine ausreichend dimensionierte und regelmässig überprüfte Entwässerung des abgedichteten Dachs abgeführt. Um den Aufstau von Regenwasser auf dem Dach bei Verstopfung der Entwässerung gering zu halten, sind Notüberläufe vorgesehen, welche regelmässig überprüft und falls erforderlich gereinigt werden. Angesichts der ohnehin massiven Gebäudehülle der BEVA lässt sich dies leicht umsetzen, sodass keine zusätzliche Überdachung notwendig ist. Die Geländeentwässerung um die BEVA wird ebenfalls so ausgelegt, dass Starkregenereignisse nicht zu einer Überflutung des Geländes führen können (vgl. Kap. 5.2.3).

Eine Überflutung des Standorts infolge Wasseraufstau ist aufgrund der vorhandenen Geländetopographie und des sickerfähigen Untergrunds des umgebenden Geländes eher unwahrscheinlich, kann aber insbesondere am Fuss der Schotterterrasse im Süden nicht ganz ausgeschlossen werden. Hier erlauben bauliche Massnahmen, wie beispielsweise eine Erweiterung der bereits für die Zwiilag vorhandenen Stellriemen, welche für eine Umströmung der Gebäude sorgen und einen Wasserzutritt in die Gebäude wirksam verhindern, eine Reduktion des Risikos. Auch wird das Eindringen von Wasser aufgrund von starkem Niederschlag oder aus anderen Wasserquellen durch eine entsprechende Auslegung der Gebäudeöffnungen, wie in Kap. 5.2.2 erwähnt, zuverlässig verhindert.

5.2.5 Hangrutschung

Permanente Rutschungen können gemäss Kap. 4.3.3 im betrachteten Gebiet ausgeschlossen werden. Einem allfälligen (aber eher unwahrscheinlichen) Risiko durch spontane Rutschungen von Böschungen resp. Hangmuren im Nahfeld der BEVA wird durch einfache bauliche Massnahmen Rechnung getragen werden.

5.2.6 Bewertung

Mit den vorgestellten Massnahmen wird die BEVA so ausgelegt, dass sie jeglichen auslegungsrelevanten externen und internen Einwirkungen durch Wasser insbesondere bis zur Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr widersteht. Die Massnahmen gewährleisten für die Ereignisse zudem einen deutlich höheren Schutz als durch KEV und StSV gefordert, da insbesondere alle durch Wasser induzierten Einwirkungen von aussen zu keinen Freisetzungen von radioaktiven Stoffen führen. Dies selbst dann nicht, wenn Wasser in die BEVA eindringen würde, da sich die Umladezelle selbst mehrere Meter über Terrain befindet. Die BEVA besitzt somit ausreichend Sicherheitsmargen, sodass gemäss dem Vorsorgeprinzip auch noch seltenere Ereignisse und die damit einhergehenden grösseren Belastungen bewältigt und somit die Einhaltung des Sicherheitsziels, der Schutzziele sowie der Schutz des Grundwassers auch für diese Ereignisse gewährleistet werden können. Eine Freisetzung von Radionukliden in das Grund- oder Oberflächenwasser kann ausgeschlossen werden. Dies gilt auch für konventionelle Gefahrstoffe, die gegebenenfalls in der BEVA, wie bei jeder Industrieanlage, für den Betrieb in entsprechend kleiner notwendiger Menge gelagert oder gehandhabt werden.

6 Literaturverzeichnis

- Abrahamson, N., Coppersmith, K., Koller, M., Roth, P., Sprecher, C., Toro, G. & Youngs, R. (2004): Probabilistic Seismic Hazards Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites (PEGASOS Project) Nagra, Wettingen, Juli 2004
- Andres, N., Steeb, N., Badoux, A. & Hegg, Ch. (eds.) (2021): Extremhochwasser an der Aare. Hauptbericht Projekt EXAR. Methodik und Resultate. Heft 104 Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf
- Axpo (2013a): Verklauungswahrscheinlichkeit am Stauwehr Beznau bei einem Aareabfluss von 4200 m³/s (HQ=10'000) TM-211-RN13020. Axpo. April 2013
- Axpo (2013b): Verklauungswahrscheinlichkeit für die Oberwasserkanalbrücke und Zunahme des Wasserpegels bei Vollverklauung TM-211-RN13091. Axpo. Dezember 2013
- BABS (2020): Bericht zur nationalen Risikoanalyse. Katastrophen und Notlagen Schweiz 2020. Bundesamt für Bevölkerungsschutz
- BAFU (2020): Antworten des Bundesamts für Umwelt auf Fragenkatalog des AdK vom 16.06.2020 zu Geologisches Tiefenlager: Fragekatalog an das BAFU zum Gewässerschutz bei Oberflächeninfrastrukturen. Bundesamt für Umwelt BAFU
- BAFU (2022a): Gefährdungskarte Oberflächenabfluss. Bundesamt für Umwelt BAFU
- BAFU (2022b): Naturgefahren
https://map.geo.admin.ch/?topic=bafu&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&E=2659216.04&N=1265532.29&zoom=8&catalogNodes=825,826,843,849,851,1505&layers=ch.bafu.silvaprotect-lawinen,ch.bafu.silvaprotect-hangmuren,ch.bafu.silvaprotect-murgang,ch.bafu.silvaprotect-sturz,ch.bafu.silvaprotect-uebersarung&layers_opacity=0.75,0.75,0.75,0.75,0.75&layers_visibility=false,true,true,true,false. Bundesamt für Umwelt BAFU
- BFE (2022): Windatlas der Schweiz
https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/EE_Windatlas/?lang=de
 Bundesamt für Energie BFE
- VKF (2015): Brandschutzvorschriften und Richtlinien (VKF) VKF 2015, Schweiz
- Dorren, L. & Schwarz, M. (2016): Quantifying the stabilizing effect of forests on shallow landslide-prone slopes using SlideforNET, INTERPRAEVENT Interprevent 2016, 78-79
- ENSI (2014): ENSI Gutachten zum Gesuch des Paul Scherrer Instituts um Erneuerung der Betriebsbewilligung für das Hotlabor ENSI 22/800. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg. März 2014
- ENSI (2017): Gutachten zum Gesuch des Paul Scherrer Instituts zur Bau- und Betriebsbewilligung für die Kernanlage "Stapelplatz Ost" (OSPA). ENSI 22/1280. Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg. Juli 2017
- ENSI (2018a): Neue Untersuchung zum Schutz der Schweizer KKW gegen einen vorsätzlichen Flugzeugabsturz abgeschlossen. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg

- ENSI (2018b): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang. ENSI-A05/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg. Ausgabe Januar 2018
- ENSI (2018c): Technische Sicherheitsanalyse für bestehende Kernanlagen: Umfang, Methodik und Randbedingungen. ENSI-A01/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg. Ausgabe September 2018 (Berichtigung vom 22. Januar 2020)
- ENSI (2020): Geologische Tiefenlager. ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg. Dezember 2020
- ENSI (2021a): Auslegungsgrundsätze für andere Kernanlagen als Kernkraftwerke. ENSI-G23/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg. Oktober 2021
- ENSI (2021b): Sicherheitstechnische Stellungnahme zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung 2017 des Kernkraftwerkes Beznau ENSI 14/3025. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, November 2021
- ENSI (2022): Extreme Wetterbedingungen
<https://www.ensi.ch/de/themen/extreme-wetterbedingungen/>
- ENSI (2022): ENSI Richtlinien in Kraft ENSI 2022, Schweiz
- FG OFI Jura Ost (2021): Bewertung der Standortvorschläge durch die Regionalkonferenz Jura Ost, definitive Stellungnahme (FG OFI Jura Ost)
- GSchG (1991): Gewässerschutzgesetz (GSchG) GSchG 1991, Stand am 01.01.22. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 814.20, Schweiz
- GSchV (1998): Gewässerschutzverordnung (GSchV) GSchV 1998, Stand am 01.01.21. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 814.201, Schweiz
- Graber, W. K. & Bürki, D. (1996): Projekt "WINDBANK unteres Aaretal". Klassifikation von Windfeldern als Grundlage zur Diagnose der aktuellen Ausbreitungssituation PSI-Bericht Nr. 96-11. Abteilung Luftfremdstoffe, Paul Scherrer Institut
- HSK (1999): Gutachten zum Gesuch der ZWILAG Zwischenlager Würenlingen AG um Erteilung der Betriebsbewilligung für die Konditionierungsanlage sowie für die Verbrennungs- und Schmelzanlage des Zentralen Zwischenlagers für radioaktive Abfälle in Würenlingen. HSK 27/45 Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, August 1999
- Ingenieure Bart AG (2010): Gefahrenkarte Hochwasser Aare Villigen - Klingnau Seitenbäche und Aare. Technischer Bericht, St. Gallen, Dezember 2010.
- Kanton Aargau (2021): Positionierung zu den Vorschlägen zur Kokretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung für Umwelt, 10. März 2021
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) KEG 2003, Stand am 01.01.22. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 732.1, Schweiz
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) KEV 2004, Stand am 01.01.22. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 732.1, Schweiz

- Meteo Schweiz (2009): Basisanalysen ausgewählter klimatologischer Parameter am Standort KKW-Beznau Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 224, Im Auftrag des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats, ENSI, 2009
- Meteo Schweiz (2022a): Karten Niederschlagsextrem
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/extremwertanalysen/karten-niederschlagsextreme.html>
- Meteo Schweiz (2022b): Klima der Schweiz
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klima-der-schweiz.html>
- Meteotest (2014): Karten der Sturmgefährdung in der Schweiz. Flächendeckende Darstellung der Böenspitzen in der Schweiz für verschiedene Wiederkehrperioden Geographisches Institut Universität Bern, im Auftrag von BAFU und MeteoSchweiz, 7. November 2014
- Nagra (2013): Standortunabhängige Betrachtungen zur Sicherheit und zum Schutz des Grundwassers: Grundlagen zur Beurteilung der grundsätzlichen Bewilligungsfähigkeit einer Oberflächenanlage für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NTB 13-01
- Nagra (2014a): UVP - Voruntersuchung für ein geologisches Tiefenlager HAA, Standortareal JO-3+-HAA, Jura Ost Sieber Cassina + Partner AG, 2014
- Nagra (2014b): UVP - Voruntersuchung für ein geologisches Tiefenlager Kombi, Standortareal JO-3+-Kombi, Jura Ost Sieber Cassina + Partner AG, 2014
- Nagra (2014c): UVP - Voruntersuchung für ein geologisches Tiefenlager SMA, Standortareal JO-3+-SMA, Jura Ost Sieber Cassina + Partner AG, 2014
- Nagra (2019a): Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager. Teil 1: Einführung und Grundlagen Nagra Arbeitsbericht NAB 19-08 Teil 1
- Nagra (2019b): Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager. Teil 2: Standortspezifische Vorschläge Nagra Arbeitsbericht NAB 19-08 Teil 2
- Nagra (2020): Verpackungsanlage hochaktiver Abfälle: Vor- und Nachteile verschiedener Standortvarianten Nagra Arbeitsbericht NAB 20-14
- NCCS (2022): Projekt «Hagelklima Schweiz». National Centre for Climate Services
- PKG (2007): Synthesebericht Elementarschutzregister Hagel, Untersuchungen zur Hagelgefahr und zum Widerstand der Gebäudehülle Präventionsstiftung der kantonalen Gebäudeversicherungen
- Renault, P., Abrahamson, N. A., Coppersmith, K. J., Koller, M., Roth, P. & Hölker, A. (2014): Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites. PEGASOS Refinement Project Rev.1 swissnuclear, Volume 1 bis 6, Dezember 2014
- Resun AG (2008a): Sicherheitsbericht, Ersatz Kernkraftwerk Beznau TB-042-RS080021, Version 2, Beilage zum Rahmenbewilligungsgesuch vom Dezember 2008

- Resun AG (2008b): Umweltverträglichkeitsbericht, Ersatz Kernkraftwerk Beznau TB-042-RS080023, Version 2, Beilage zum Rahmenbewilligungsgesuch vom Dezember 2008
- Rey, P., Ortlepp, J., Werner, S., Mürle, U., Becker, A. & Hesselschwerdt, J. (2013): Koordinierte Biologische Untersuchungen an der Aare zwischen Bielersee und Rhein 2011 - 2013. Fachbericht zum Untersuchungsprogramm zuhanden der Gewässerschutz- und Fischereifachstellen der Kantone Aargau, Bern und Solothurn. Dezember 2013
- SIA (1997): Entwässerung von Baustellen, SIA 431. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
- SIA (2003): Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, SIA 260. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
- SIA (2009): Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagbau, SIA 272. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
- SIA (2014): Abdichtungen und Entwässerungen - Allgemeine Grundlagen und Abgrenzungen. SIA 270. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
- Sika (2019): Industrieböden für höchste Ansprüche. Zwischenlager Würenlingen AG <https://bau.sika.com/de/referenzen/sb-ch-industrieboeden-fuer-hoechste-ansprueche.html>
- StFV (1991): Störfallverordnung (StFV) StFV 1991, Stand am 01.08.19. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 814.012, Schweiz
- StSG (1991): Strahlenschutzgesetz (StSG) StSG 1991, Stand am 01.01.22. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 814.50, Schweiz
- StSV (2017): Strahlenschutzverordnung (StSV) StSV 2017, Stand am 01.01.22. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 814.501, Schweiz
- USG (1983): Umweltschutzgesetz (USG) USG 1983, Stand am 01.01.22. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 814.01, Schweiz
- UVEK (2009): Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen UVEK. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Stand am 01.02.19
- van Zadelhoff, F. B., Albaba, A., Cohen, D., Phillips, C., Schaepli, B., Dorren, L. & Schwarz, M. (2021): Introducing SlideforMap, a probabilistic finite slope approach for modelling shallow landslide probability in forested situations. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-140>, in review
- UraM (2017): Verordnung des EDI über den Umgang mit radioaktivem Material (UraM) UraM 2017, Stand am 30.01.18. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 814.554
- Zwilag (1994): Sicherheitsbericht zum Gesuch um Erteilung der nuklearen Bau- und Betriebsbewilligung für das Zentrale Zwischenlager Würenlingen Zwischenlager Würenlingen AG, September 1994
- Zwilag (2022): Tornadohäufigkeit am Zwilag Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG, ZWI8120/D00004. With assistance of Peter Schulte und Donat Job

Anlage A Topografie

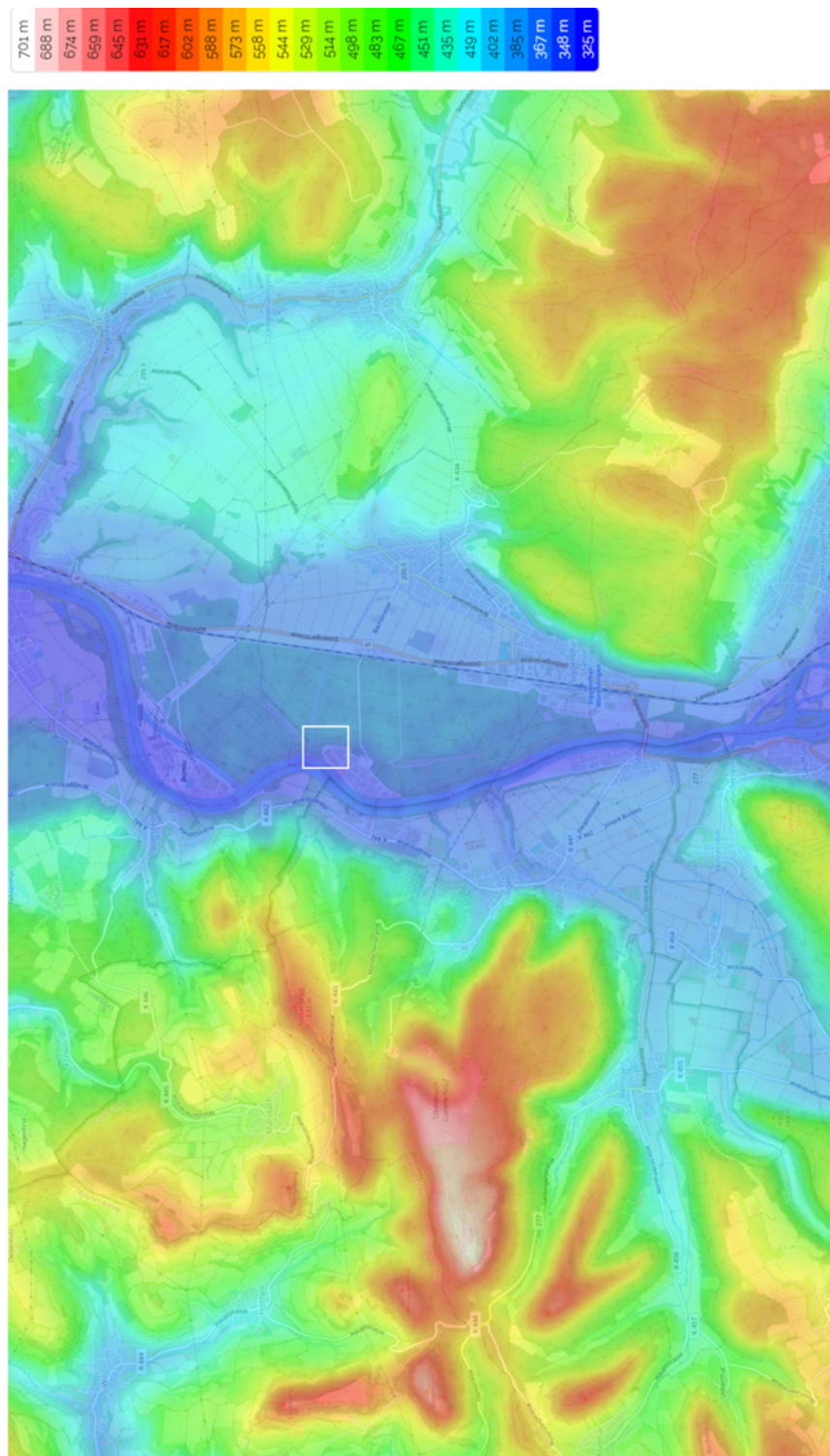


Fig. A-1: Topographie des Gebiets in einer Farbkodierung
Das weisse Viereck zeigt das Areal der Zwilag.

Anlage B Oberflächenabfluss und Dorfbach Würenlingen (Fotographien)

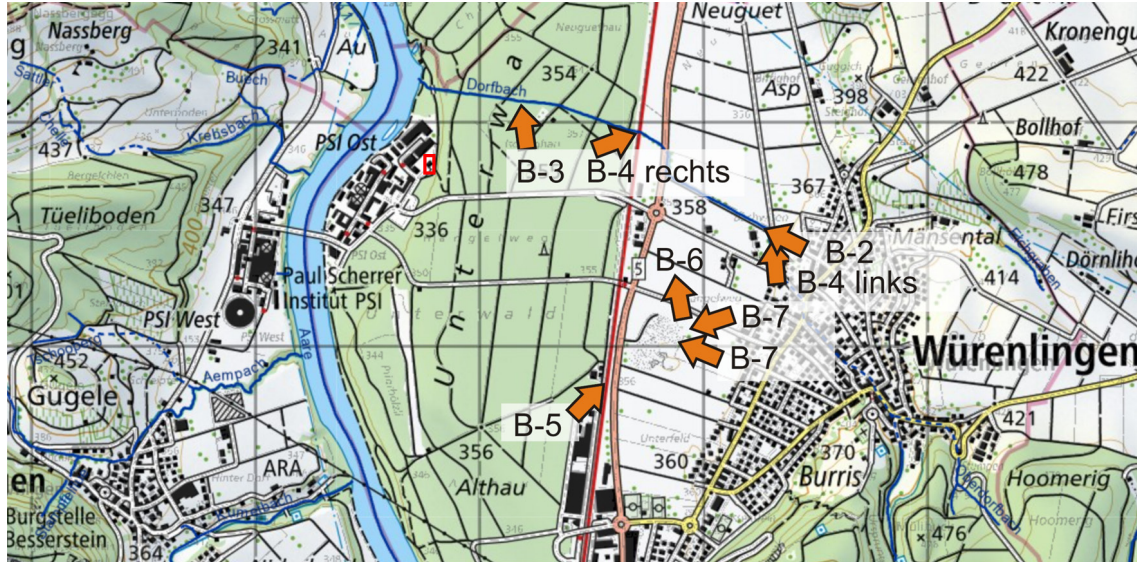


Fig. B-1: Dorfbach Würenlingen

Das rote Rechteck zeigt die Lage der BEVA. Die Pfeilspitzen verdeutlichen den Aufnahmeort und die Pfeile jeweils die Blickrichtung der nachfolgenden Photographien.



Fig. B-2: Bachprofil im Bereich Unterbodenweg



Fig. B-3: Bachprofil im Wald (nach dem Bahndamm, beispielhaft)



Fig. B-4: Durchlass Unterbodenweg (links) und Durchlass Bahndamm (rechts)



Fig. B-5: Strassen- und Eisenbahndamm



Fig. B-6: Lage in der näheren Umgebung (Felder)

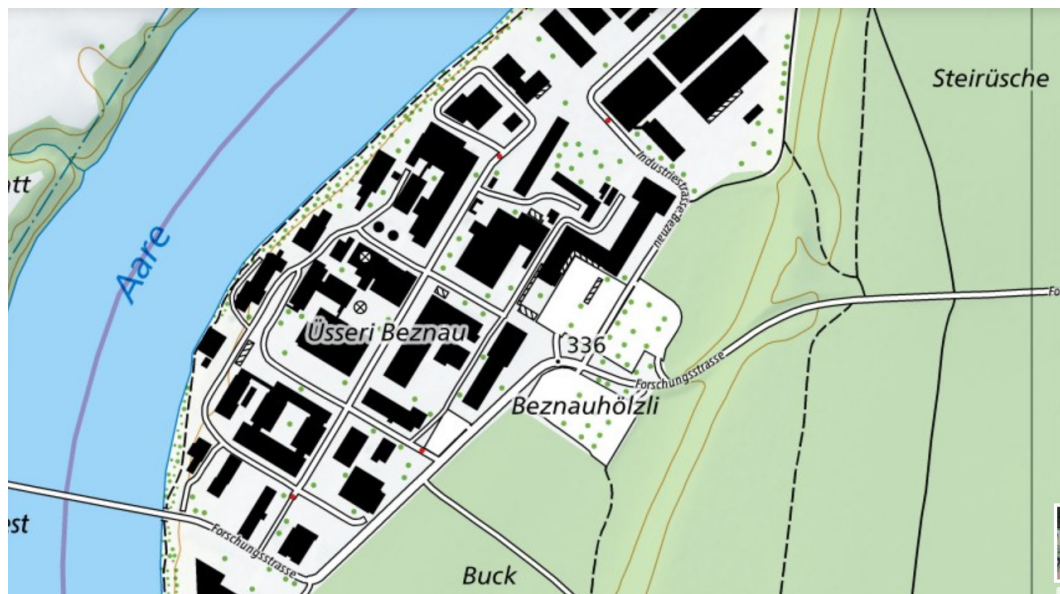


Fig. B-7: Die Forschungsstrasse durchbricht den Hang Richtung Südwesten

Anlage C Mögliche Abdichtungssysteme zum Schutz des Grundwassers

In der Schweiz regelt die SIA 272 «Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau» (SIA 2009) die Auslegung von Abdichtungssystemen. Das ENSI hat keine Richtlinie zu Abdichtungssystemen. Die SIA 272 unterscheidet Dichtigkeitsklassen für Bauwerke, für die dann Abdichtungssysteme vorgeschlagen werden. Bei der BEVA ist, in Anlehnung an die Erläuterungen in Kap. 3.2.3, die Dichtigkeitsklasse 1 vorzusehen, d.h. die BEVA ist *vollständig trocken*. Bei den Abdichtungssystemen unterscheidet die SIA 272 starre und flexible Abdichtungssysteme, wobei auch die Kombination beider Systeme möglich ist.

Im Hoch- und Tiefbau ist es bei hohen Ansprüchen an die Dichtheit heute Standard, starre und flexible Abdichtungssysteme zu kombinieren und damit zur Erhöhung der Sicherheit durch vorteilhafte Kombination von Wirkungen bzw. Schaffung von Redundanzen beizutragen. Hierbei sind die Hersteller von entsprechenden Systemen die Entwicklungstreiber und entsprechend kompetent. Tab. C-1 listet die verschiedenen Abdichtungssysteme auf und ordnet sie den Abdichtungsklassen zu. Die Systeme, die als *gut geeignet* bewertet wurden, werden nachfolgend kurz beschrieben und bewertet.

Tab. C-1: Abdichtungsklassen, Abdichtungssysteme für Unterterrain resp. Untertagbau gemäss SIA 272

Wasserdichte Betonkonstruktionen (WDB), Wasserdichte Mörtel (WDM), Gussasphalt (MA), Polymerbitumendichtungsbahnen (PDB), Kunststoffdichtungsbahnen (KDB), Dichtungsbahnen mit Tondichtungsschicht (TDB), Flüssigkunststoff (FLK), Kunststoff-modifizierte Bitumenabdichtungen (KMB), «Gelbe Wanne» (GW (WDB und SikaProof)).

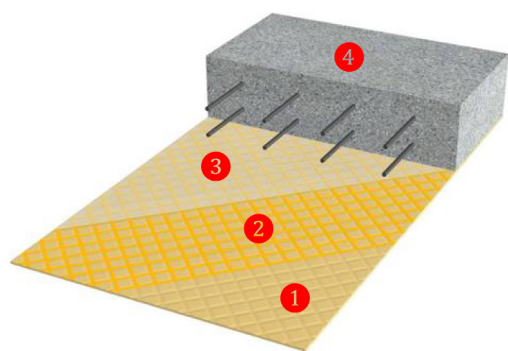
Legende der Symbole: ×× gut geeignet, × geeignet, (×) geeignet, jedoch nicht wirtschaftlich, - nicht zulässig, nicht empfehlenswert.

Dichtigkeitsklasse		Nutzung	Abdichtungssysteme								
			Starr (gem. SIA 272)			Flexibel (gem. SIA 272)					Kombi- nation
			WDB	WDM	MA	PDB	KDB	TDB	FLK	KMB	GW
1	Vollständig trocken	Hoher Ausbaustandard, Konstruktion nicht zugänglich	-	-	-	--	××	-	-	-	××
		Hoher Ausbaustandard, Konstruktion zugänglich	××	-	-	×	×	-	(×)	-	×
2	Trocken bis leicht feucht	Lager für nicht feuchtempfindliche Güter	×	-	-	×	(×)	××	(×)	××	×
3	Feucht	Räume mit untergeordneter Nutzung	×	××	-	×	(×)	×	(×)	×	(×)
4	Feucht bis nass	Stollen, Wände in Einstellhallen	×	-	-	(×)	(×)	×	(×)	×	(×)

C.1 «Gelbe Wanne»

Bei der «Gelben Wanne» handelt es sich um ein Zwei-Dichtungssystem mit einer Primärabdichtung, der Wanne aus wasserundurchlässigem Beton («Weisse Wanne») und einer Sekundärabdichtung, sprich eine zusätzliche Abdichtungsfolie, welche vor Herstellung der Weissen Wanne direkt auf dem Untergrund oder der Schalung verlegt wird (deshalb in der Praxis auch «Weisse Wanne Plus» genannt, Kombination von starrer und flexibler Abdichtung).

Die Abdichtungsfolie, die sogenannte Frischbetonverbundfolie ist keine eigenständige Abdichtung gemäss SIA 272 (SIA 2014), sondern wird immer in Kombination mit den genormten Abdichtungselementen eingesetzt. Insbesondere das System SikaProof® A erfüllt die Anforderungen der SN EN 13967 in Bezug auf Kunststoff- und Elastomerbahnen, welche gemäss SIA 270 (SIA 2014) im Anwendungsgebiet von unterirdischen Abdichtungen gegen nicht drückendes und drückendes Wasser einzuhalten sind. Die Eignung des Materials SikaProof® A wurde durch das Institut Dr. Lörcher nach deutscher Bundesbodenschutzverordnung nachgewiesen und ist in der Schweiz anerkannt. Fig. C-1 zeigt den mehrschichtigen Aufbau dieses Systems.



Systemaufbau

1. Geprägte FPO-Abdichtungsbahn
2. Dichtstoff gitternetzförmig
3. Vlieskaschierung
4. Stahlbeton

Fig. C-1: Systemaufbau SikaProof® A (aus Planungsrichtlinie SikaProof®)

Die Folie ist mit einem Vlies und einem gitternetzförmigen Dichtstoff kaschiert und wird vor den Bewehrungs- und Betonierarbeiten auf einem geeigneten Untergrund verlegt. Bei der Betonage dringt der Beton in das Vlies ein, sodass ein vollflächiger mechanischer Verbund hergestellt wird. Das enge und geschlossene Dichtstoffnetz stellt den geforderten Hinterlaufschutz sicher und vermeidet die Ausbreitung allfälliger Wassereintritte zwischen Beton und Abdichtungsbahn. Zudem können mögliche auftretende Risse oder Löcher (im Beton bzw. der Wanne) durch die hochflexiblen FPO-Membranen zuverlässig und dauerhaft überbrückt werden (vgl. Fig. C-2).



Fig. C-2: Rissversuch zur Prüfung von FPO-SikaProof® Abdichtungsbahnen

C.2 Kunststoffdichtungsbahn

Die Einsatzgebiete und die Anforderungen der Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) werden im Abschnitt 3.5 der SIA 272 festgehalten. Sie dienen u.a. der Abdichtung unter Terrain gegen Flüssigkeiten und Gase und bestehen aus PVC-P oder aus weichmacherfreien thermoplastischen Polyolefinen (TPO resp. FPO) auf der Basis von PE bzw. PP. Diese Abdichtungsart kann als Zusatz zu wasserdichten Betonkonstruktionen oder eigenständig eingesetzt werden. Dabei gibt es zwei Ausführungsvarianten:

- Abdichtung mit Verbund: Die KDB wird vollflächig und hohlraumfrei auf die Betonkonstruktion geklebt. Dabei müssen zuerst sämtliche Unebenheiten sowie die Feuchtigkeit im Untergrund vollständig entfernt werden. Besonders zu beachten sind die Einbaubedingungen, welche einer niederschlagsfreien Wetterlage sowie Luft-, Baustoff- und Untergrundtemperatur zwischen 3 °C und 30 °C bedürfen.
- Abdichtung ohne Verbund: Die KDB wird vor den Bewehrungs- und Betonierarbeiten verlegt. Es werden objektspezifisch Ausgleichs- und Drainageschichten im Hohlraum zwischen Dichtungsbahn und Untergrund eingebaut. Die Anforderungen an die Ausführungsbedingungen sind ähnlich wie bei der Variante mit Verbund, wobei auch Temperaturen ab 0 °C erlaubt sind.

Nach dem Einbau der Kunststoffdichtungsbahn ist gem. SIA 272 noch eine ausreichende Schutzschicht anzubringen, welche aus Beton, Mörtel, Drainagematten oder Wärmedämmung bestehen kann. Fig. C-3 zeigt das Aufbauprinzip mit aussenliegender Kunststoffabdichtung.

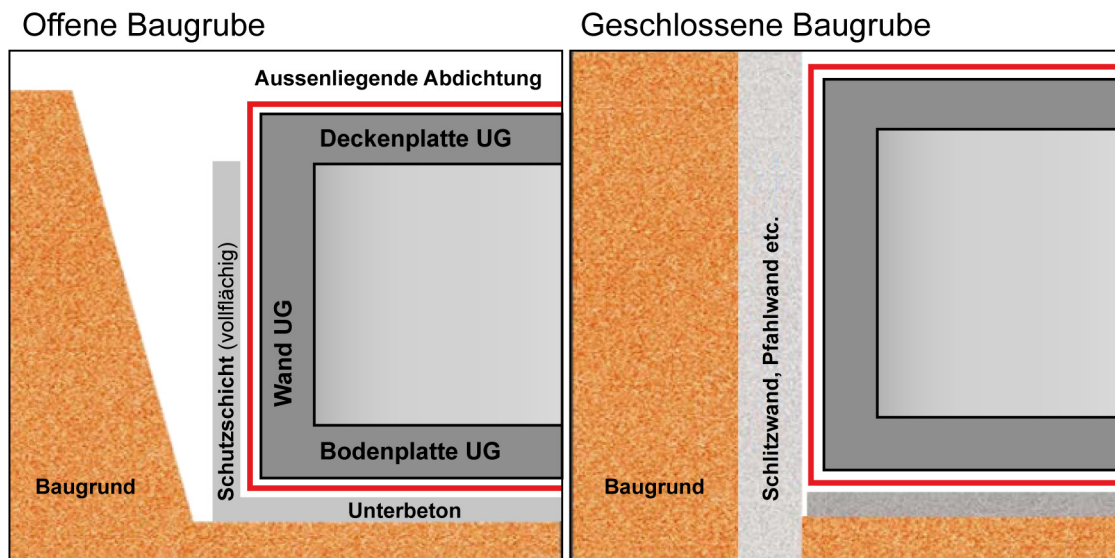


Fig. C-3: Konstruktion mit aussenliegender Kunststoffdichtung für eine offene Baugrube (links) und eine geschlossene Baugrube (rechts)

C.3 Variantenbewertung und Empfehlung

Beim Vergleich der beiden Systeme fällt auf, dass die Kunststoffdichtungsbahn eine Variante der «Gelben Wanne» ist, in welcher der Verbund zwischen dichtem Beton und Dichtungsbahn aufwändiger herzustellen ist sowie weitere Zusatzschichten zum Schutz (der Kunststoffbahnen) notwendig sind. Bei gleicher Effizienz bezüglich der Abdichtung macht das die Kunststoffdichtungsbahnen gegenüber der Gelben Wanne jedoch weniger attraktiv. Die «Gelbe Wanne» bietet baustellengerechte, d.h. einfacher zu erstellende Systemlösungen an.

Die «Gelbe Wanne» bietet durch die Kombination einer wasserdichten Betonkonstruktion mit Frischbetonverbundfolien eine hohe Sicherheit gegen permanente und temporäre Grundwasser-einwirkungen und wird als die qualitativ hochwertigste Lösung nach dem heutigen Wissensstand betrachtet. Die weitere Entwicklung hochwertiger Abdichtungssysteme bis zum Zeitpunkt der Realisierung der BEVA wird im Rahmen der Projektierung berücksichtigt. Nach Auskunft der Hersteller BASF und Sika ist die «Gelbe Wanne» auf absehbare Zeit das Mittel der Wahl. Zudem wurde das System «Gelbe Wanne» im Jahr 2018 bereits im Bundeszwischenlager erfolgreich realisiert und vom ENSI genehmigt.