



ARBEITSBERICHT NAB 24-40

Geologische Prognose mit bautechnischer
Empfehlung für den Standort der
Brennelementverpackungsanlage

Mai 2024

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



ARBEITSBERICHT NAB 24-40

Geologische Prognose mit bautechnischer
Empfehlung für den Standort der
Brennelementverpackungsanlage

Mai 2024

STICHWÖRTER

RBG, Rahmenbewilligungsgesuch, Etappe 3, gTL, BEVA,
Brennelementverpackungsanlage, Referenzbericht, Baugrund,
bautechnische Bewertung

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

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

Layoutanpassung Deckblatt entsprechend BEVA Berichten im Juli 2024

Zusammenfassung

Die Nagra reicht ein Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) für eine Brennelementverpackungsanlage (BEVA) am Standort Zwiilag (Würenlingen, Kt. AG) ein. In den Gesuchsunterlagen des RBG ist gemäss Kernenergieverordnung (KEV 2004) der Standort zu charakterisieren, wobei gemäss ENSI 33/649 (ENSI 2018) insbesondere die Baugrundverhältnisse für die BEVA und gegebenenfalls notwendige weitere Bauten im vorgesehenen Projektperimeter (Nagra 2025) zu beurteilen sind. Diesbezüglich werden im vorliegenden Bericht, basierend auf vorhandenen geologischen und hydrogeologischen Grundlagen und aktuellen Datenreihen, die Grundlagen für die weitere Projektierung im Sinne einer Voruntersuchung gemäss SIA 267, Ziffer 3.2.2.1 (SIA 2013b) erarbeitet. Diese umfassen insbesondere die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Projektperimeter sowie eine bautechnische Bewertung und Diskussion der Naturgefahren sowie der Meteorwasserversickerung für den Standort im Hinblick auf das Bauvorhaben. Da die vorhandene Datenlage aufgrund der benachbarten Anlagen für eine Voruntersuchung ausreichend ist, wurden im Rahmen des vorliegenden Berichts keine neuen Untersuchungen ausgeführt. Ergänzende Baugrunduntersuchungen sind im Hinblick auf die spezifische Ausführungsplanung bei Bedarf in späteren Projektierungsphasen vorzunehmen.

Der Projektperimeter liegt in der Talebene des unteren Aaretals, welches vom Gletscher in früheren Eiszeiten trogförmig in den Felsuntergrund des Tafeljuras eingetieft wurde. Der Felsuntergrund aus Kalken sowie Ton- und Kalkmergeln wurde in Sondierungen im nördlichen Projektperimeter in rund 22 - 25 m Tiefe erbohrt. Die Felsoberfläche fällt in Richtung Süden ab. Vom Gletscher wurde über dem Fels vorwiegend tonig-siltige, generell dicht bis sehr dicht gelagerte Moräne abgelagert, welche heute nur noch reliktsch vorhanden ist. Über der Moräne tritt im Projektperimeter ursprünglich rund 15 - 20 m mächtiger, sogenannter Niederterrassenschotter auf, welcher grösstenteils aus mitteldicht bis dicht gelagertem, sauberem Kies mit reichlich Sand sowie Steinen und Blöcken inklusive grosser Blöcke besteht. Darüber folgen geringmächtige, siltig-sandige, locker gelagerte Überschwemmungssedimente resp. natürliche Oberflächenschichten. Im Zuge der baulichen Tätigkeiten wurden diese und stellenweise auch der Schotter abgetragen und teilweise durch künstliche Auffüllungen ersetzt. Zudem können im Untergrund verbliebene Bauhilfsmassnahmen (z.B. Lockergesteinsnägel) nicht ganz ausgeschlossen werden. Weiter sind im Projektverlauf bestehende Werkleitungen zu ermitteln und entsprechend zu sichern.

Die gut durchlässigen Schotter bilden den Grundwasserleiter für den ausgedehnten, mächtigen Grundwasserstrom des unteren Aaretals. Das Grundwasser fliesst in Richtung Nordosten ab. Im nördlichen-mittleren Bereich des Projektperimeters liegt der mittlere Grundwasserspiegel des Grundwasserstroms rund 11 m u.T. Der gesamte Projektperimeter ist gemäss der Gewässerschutzkarte dem Gewässerschutzbereich A_u zugeordnet.

Die Lage und das Ausmass der einzelnen Baukörper innerhalb des Projektperimeters sind aktuell noch nicht bekannt. Es wird daher im Bericht von einer exemplarischen Projektumsetzung ausgegangen. Gemäss aktuellen Annahmen kommt der Baukörper der BEVA im nördlichen-mittleren Teil des Projektperimeters zu liegen. Die in der exemplarischen Umsetzung vorgesehene Fundationskote der BEVA liegt bei 326 m ü.M und somit über dem mittleren Grundwasserstand. Sollte in der weiteren Projektierung aus bautechnischer Sicht eine Absenkung der Fundationskote erforderlich werden, ist dies bis zum mittleren Grundwasserstand möglich, ohne dass eine gewässerschutzrechtliche Ausnahmegewilligung erforderlich ist (Anhang 4, Ziff. 211 GSchV 1998).

In Bezug auf die Foundation dürften die Bodenplatten grösstenteils in den Schotter, jedoch je nach räumlicher Lage teilweise auch in künstliche Auffüllungen zu liegen kommen. Zur Gewährleistung eines einheitlichen Tragfähigkeitsverhaltens mit möglichst kleinen Setzungen und vor allem Setzungsdifferenzen resp. Gebäudeverkippen empfiehlt es sich, in Bereichen mit

künstlichen Auffüllungen im Fundationsbereich die Gebäudelasten konsequent bis in den gut tragfähigen, wenig setzungsempfindlichen Schotter abzuleiten.

Der Projektperimeter ist nicht im Prüfperimeter für Bodenaushub des Kantons Aargau und auch nicht im Kataster der belasteten Standorte eingetragen. Allfällige dennoch vorhandene verschmutzte Aushubmaterialien (z.B. bauschutthaltige Auffüllungen) werden gesetzes- und vollzugskonform weiterverwendet oder entsorgt.

Bezüglich Naturgefahren kann eine Überflutung des Projektperimeters durch die Aare ausgeschlossen werden. Bei einem extremen Aare-Hochwasser (Häufigkeit 10^{-4} pro Jahr) müsste jedoch für den Projektperimeter ein Grundwasserspiegel von 328.7 m ü.M. angenommen werden. Der Baukörper der BEVA muss daher bezogen auf Einwirkungen durch das Grundwasser mindestens bis zu dieser Kote auf Dichtigkeit und Auftrieb dimensioniert werden. Gefährdungen durch Steinschlag, Fels- oder Bergsturz, permanente Rutschungen, Muren, Übersarung, Lawinen und Blitzfluten sind für den Projektperimeter nicht relevant. Lokale Hangmuren von feinkörnigeren, natürlichen Oberflächenschichten aus der Terrassenkante am östlichen Rand des Projektperimeters können bei extremen Niederschlägen aber nicht vollständig ausgeschlossen werden. Diese Gefahr ist jedoch mit einfachen baulichen Massnahmen zu beherrschen. Da der Untergrund im Bereich der erforderlichen Baugruben aus vergleichsweise dicht gelagertem Niederterrassenschotter mit ausreichender Mächtigkeit besteht, sind zudem kein Quellen des Untergrunds sowie keine Subrosionsprozesse zu erwarten. Der Schotter weist zudem keine Tendenz zu Bodenverflüssigung auf.

Die Versickerungsverhältnisse im Projektperimeter werden als günstig eingestuft (gut durchlässiger Schotter, tief liegender Grundwasserspiegel). Abhängig von der Belastungsklasse kann das anfallende Meteorwasser in genügendem Abstand zu bestehenden Gebäuden und in Bereichen mit durchlässigem Schotteruntergrund in einem unterirdischen Versickerungsschacht bzw. über humusierte Mulden zur Versickerung gebracht werden.

Basierend auf den im vorliegenden Bericht dargestellten geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sowie der bautechnischen Bewertung resp. der Bewertung der Naturgefahren zeigt sich, dass der Standort hinsichtlich des Baugrunds und der möglichen Gefahren (im Sinne der SIA 267 (SIA 2013a)) als Projektperimeter für den Bau und den Betrieb einer BEVA geeignet ist.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Figurenverzeichnis	IV
Beilagenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Allgemeines.....	1
1.1 Einleitung und Bewertungsgegenstand.....	1
1.2 Grundlagen	2
2 Geologische Verhältnisse.....	4
2.1 Geologische Übersicht.....	4
2.2 Künstliche Auffüllungen	4
2.3 Natürliche Oberflächenschichten.....	4
2.4 (Niederterrassen-)Schotter.....	5
2.5 Moräne.....	5
2.6 Felsuntergrund	5
3 Grundwasserverhältnisse.....	6
3.1 Hydrogeologische Übersicht	6
3.2 Grundwassermächtigkeit und -durchlässigkeit.....	6
3.3 Grundwasserspiegel	8
3.4 Grundwasserschutz	9
4 Bautechnische Verhältnisse	11
4.1 Projekt.....	11
4.2 Baugrundwerte.....	11
4.3 Foundation	13
4.4 Aushub.....	16
4.5 Baugrubenabschluss	17
4.6 Bauwasserhaltung.....	18
4.7 Trockenhaltung und Dichtigkeit Untergeschosse	18
4.8 Bauüberwachung	18
4.9 Weitere Empfehlungen und Hinweise	19
5 Naturgefahren	20
6 Meteorwasserversickerung	23
7 Literaturverzeichnis	24

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1:	Bereits vorhandene Sondierungen im Standortgebiet.....	3
Tab. 3-1:	Abgeschätzte charakteristische Grundwasserstände.....	8
Tab. 4-1:	Baugrundwerte für ungestörte Verhältnisse	12

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Lage des Projektperimeters.....	1
Fig. 3-1:	Ausschnitt aus der Grundwasserkarte 1:25'000 des Kantons Aargau.....	7
Fig. 3-2:	Situation mit Grundwassermessstellen sowie Pegelmessstelle Aare.....	8
Fig. 3-3:	Ganglinien Wasserspiegel Aare und Grundwasserspiegel von 1991 - 2022	9
Fig. 3-4:	Ausschnitt aus der Gewässerschutzkarte 1:25'000 des Kantons Aargau	10
Fig. 4-1:	Tragfähigkeits- und Setzungsabschätzung für mitwirkende quadratische Bodenplattenbereiche und Einzelfundamente im Schotter (Bemessungsniveau)	14
Fig. 4-2:	Tragfähigkeits- und Setzungsabschätzung für mitwirkende streifenförmige Bodenplattenbereiche und Streifenfundamente im Schotter (Bemessungsniveau)	15

Beilagenverzeichnis

Beilage 1	Situation 1:2500, Übersicht, Lage der vorhandenen Sondierungen
Beilage 2	Situation 1:1000, Lage der vorhandenen Sondierungen
Beilage 3	Profil A-A' 1:1000/200, 5-fach überhöht, geologisch bearbeitet
Beilage 4	Profil B-B' 1:1000/200, 5-fach überhöht, geologisch bearbeitet
Beilage 5	Profil C-C' 1:1000/200, 5-fach überhöht, geologisch bearbeitet

Anmerkung: Nur in der digitalen Version dieses Berichtes (PDF) sind die Beilagen enthalten und unter dem Büroklammersymbol abgelegt.

Abkürzungsverzeichnis

AfU	Abteilung für Umwelt
ALG	Abteilung für Landschaft und Gewässer
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BEVA	Brennelementverpackungsanlage
EHW	Extremhochwasserstand
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
GSchG	Gewässerschutzgesetz
GSchV	Gewässerschutzverordnung
HW	Hochwasserstand
KbS	Kataster der belasteten Standorte
m ü.M.	Meter über Meer
m u.T.	Meter unter Terrain
MW	Mittelwasserstand
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NTB	Nagra Technischer Bericht
OKT	Oberkante Terrain
PSI	Paul Scherrer Institut
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
VSA	Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

1 Allgemeines

1.1 Einleitung und Bewertungsgegenstand

Die Nagra reicht ein Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) für eine Brennelementverpackungsanlage (BEVA) am Standort Zwiilag (Würenlingen, Kt. AG) ein. Der Projektperimeter ist in Fig. 1-1 gezeigt. Er grenzt direkt an die Zwiilag an und befindet sich in unmittelbarer Nachbarschaft zum PSI.



Projektperimeter

Fig. 1-1: Lage des Projektperimeters

Gemäss exemplarischer Umsetzung wird die BEVA im nördlichen-mittleren Bereich des Projektperimeters zu liegen kommen (vgl. (Nagra 2025)).

Im RBG ist gemäss Kernenergieverordnung (KEV 2004) der Standort zu charakterisieren, wobei gemäss ENSI 33/649 (ENSI 2018) insbesondere die Baugrundverhältnisse für die BEVA und gegebenenfalls notwendige weitere Bauten im vorgesehenen Projektperimeter (Nagra 2025) zu beurteilen sind.

Im vorliegenden Bericht werden die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Projektperimeter dargestellt, im Hinblick auf das Bauvorhaben eine bautechnische Bewertung abgegeben und Naturgefahren sowie das Thema Meteorwasserversickerung diskutiert. Die Erarbeitung der Grundlagen erfolgt im Sinne einer Voruntersuchung gemäss SIA 267, Ziffer 3.2.2.1 (SIA 2013b).

1.2 Grundlagen

Projektunterlagen, Datengrundlage

Aufgrund der benachbarten Anlagen von Zwiilag, Paul Scherrer Institut (PSI) und Kernkraftwerk Beznau liegen aus der Umgebung des Projektperimeters umfangreiche, geologische und hydrogeologische Untersuchungen inklusive längerer bis heute reichender Zeitreihen von Grundwasserständen sowie bautechnische Prognosen vor (durchgeführt durch die Jäckli Geologie AG und die AXPO). Der vorliegende Bericht wurde ausschliesslich anhand dieser vorhandenen Grundlagen erstellt. Ergänzende Baugrunduntersuchungen sind im Hinblick auf die spezifische Ausführungsplanung bei Bedarf in späteren Projektierungsphasen vorzunehmen.

In der Tab. 1-1 sind die wichtigsten quantitativen Angaben über die einzelnen Sondierungen zusammengestellt. Die Lage der Sondierungen ist aus dem Situationsplan ersichtlich (Beilage 1).

Tab. 1-1: Bereits vorhandene Sondierungen im Standortgebiet

KB: Rotationskernbohrung, RKB: Rammkernbohrung, R: Rammsondierung, P: Piezometerrohr (ø 4½")

Sondierung	Terrainhöhe	Sondierart, Piezometerrohr	OK Piezometerrohr	Sondiertiefe	Wasserspiegel		
					Tiefe	Kote	Datum
Nr.	[m ü.M.]		[m ü.M.]	[m]	[m u.T.]	[m ü.M.]	
90-1	331.71	KB, P	331.71	22.5	7.76	323.95	26.11.1990
90-2	335.20	KB, P	334.96	24.0	11.39	323.81	26.11.1990
90-3	330.71	KB, P	330.65	14.4	6.58	324.13	26.11.1990
90-4	333.36	KB, P	333.10	23.5	9.35	324.01	26.11.1990
90-5	331.37	KB, P	331.27	18.0	7.14	324.23	26.11.1990
90-6	333.22	KB, P	333.15	26.0	9.07	324.15	26.11.1990
90-7	336.69	KB, P	336.54	27.1	12.77	323.92	26.11.1990
11-1	335.34	KB, P	335.23	23.0	11.23	324.11	04.03.2014
17-1	334.81	R	-	5.0	> 4.40	< 330.41	11.04.2017
17-2	334.80	R	-	4.5	kein Wasser		11.04.2017
17-3	334.66	R	-	3.2	kein Wasser		10.04.2017
17-4	334.80	R RKB	- -	3.0 1.4	kein Wasser		10.04.2017
17-5	335.15	R	-	2.5	kein Wasser		10.04.2017
17-6	335.14	R RKB	- -	3.0 2.8	kein Wasser		10.04.2017
20-1	332.99	KB, P	332.85	11.5	8.63	324.22	26.02.2020
20-2	332.81	KB, P	332.64	9.5	8.89	323.92	26.02.2020
20-3	333.31	KB, P	333.22	9.3	9.11	324.20	26.02.2020
20-4	334.55	KB, P	334.36	10.5	> 10.19	< 324.36	26.02.2020
20-5	334.54	KB, P	334.37	12.5	10.34	324.20	26.02.2020
20-6	334.60	KB, P	334.51	10.0	> 10.09	< 324.51	26.02.2020

2 Geologische Verhältnisse

2.1 Geologische Übersicht

Der Projektperimeter liegt in der Talebene des unteren Aaretals, welches vom Gletscher in früheren Eiszeiten trogförmig in den Felsuntergrund des Tafeljuras eingetieft wurde. Der Gletscher lagerte dabei Moräne ab, die im Zuge des Gletscherrückzugs mit sogenannten Hochterrassenschottern bedeckt wurde. Die Hochterrassenschotter und auch Teile der Moräne wurden während 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. Dabei wird der östliche Randbereich des Projektperimeters von einer steilen (Schotter-)Terrassenkante geprägt. Nacheiszeitlich eingetretene Überschwemmungen führten zur Bildung einer geringmächtigen Deckschicht aus vorwiegend siltig-sandigen Überschwemmungssedimenten. Diese wurde im Zuge baulicher Tätigkeiten grösstenteils durch künstliche Auffüllungen ersetzt bzw. überschüttet.

2.2 Künstliche Auffüllungen

Insbesondere im heute bebauten, nördlichen sowie im aktuell als Parkplatz genutzten, südlichen Teil des Projektperimeters (vgl. Fig. 1-1) sind ab der Terrainoberfläche zunächst künstliche Auffüllungen (Gebäudehinterfüllungen, Kieskoffer etc.) zu erwarten. Diese bestehen gemäss älteren Sondierungen grösstenteils aus sauberem, z.T. auch leicht bis mässig siltigem Kies mit reichlich Sand und z.T. einzelnen Steinen. In den im Hinterfüllungsbereich der bestehenden Gebäude abgeteuften Kernbohrungen wurden teilweise auch Betonreste (Spritzbeton) erbohrt. Im Nahbereich der früheren Baugruben kann zudem das Vorhandensein von noch im Untergrund verbliebenen Bauhilfsmassnahmen (z.B. Lockergesteinsnägel, Spundwände) nicht ganz ausgeschlossen werden.

Die Mächtigkeit der künstlichen Auffüllungen beträgt im Hinterfüllungsbereich der bestehenden Gebäude K und S¹ bis zu ca. 10 m. Ausserhalb dieser ehemaligen Baugruben sowie allfälligen, angrenzenden Geländevertüfungen dürften die dort vorhandenen künstlichen Auffüllungen hingegen nur ca. 0.5 - 1.0 m mächtig sein.

Gemäss durchgeführten Rammsondierungen weisen die Kieskoffer resp. künstlichen Auffüllungen im Bereich der heutigen Halle I¹ der Zwilag mehrheitlich eine mittlere bis hohe Lagerungsdichte auf. Diese künstlichen Auffüllungen weisen demgemäss eine mittlere Tragfähigkeit und mässige Setzungsempfindlichkeit auf. Im Bereich von Geländevertüfungen oder Platzbefestigungen ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass im Projektperimeter auch wenig verdichtete sowie rollige Auffüllungen vorhanden sind.

2.3 Natürliche Oberflächenschichten

Vor der ersten Bebauung des Areals betrug die Mächtigkeit der natürlichen Oberflächenschichten ab der ursprünglichen Terrainoberfläche gemäss den älteren Sondierungen rund 0.4 - 1.4 m. Im Zuge der baulichen Tätigkeiten wurden die Oberflächenschichten bestehend aus grösstenteils tonigem Silt mit reichlich bis viel Sand sowie z.T. wenig Kies und organischen Resten jedoch grösstenteils abgetragen und durch künstliche Auffüllungen ersetzt resp. mit solchen überschüttet. In der neueren Rammkernbohrung Nr. 17-6 innerhalb des Projektperimeters wurden unter dem dort vorhandenen Kieskoffer in ca. 7 m Tiefe lokal noch 0.4 m mächtige Reste der natürlichen Oberflächenschichten angetroffen.

¹ Die Lage der Gebäude K und S sowie Halle I ist in Beilage 2 ersichtlich.

Im mittleren, aktuell bewaldeten, bisher unbebauten Bereich des Projektperimeters dürften natürliche Oberflächenschichten (Überschwemmungssedimente, Bodenbildungen) aus tonigem Silt mit reichlich bis viel Sand sowie z.T. wenig Kies und organischen Resten resp. tonig-siltigem Sand mit Kies ab der Terrainoberfläche anstehen.

Die natürlichen Oberflächenschichten weisen generell nur eine geringe Lagerungsdichte auf und sind daher als setzungsempfindlich und nur wenig tragfähig zu beurteilen.

2.4 (Niederterrassen-)Schotter

Unter den Auffüllungen bzw. den Oberflächenschichten folgt ab ca. 0.4 - 10.0 m Tiefe der Niederterrassenschotter. Die ursprüngliche, natürliche Schotterobergrenze lag im nördlichen Projektperimeter vor der Bebauung auf einer Kote von ca. 331.8 - 334.4 m ü.M. resp. ca. 1.0 - 1.4 m u.T. Im Hinterfüllungsbereich der Gebäude ist die Schotterobergrenze heute entsprechend tiefer zu erwarten. Im mittleren, bisher nicht bebauten sowie im südlichen, aktuell als Parkplatz genutzten Projektperimeter dürfte der Schotter in ca. 0.4 - 1.4 m Tiefe, entsprechend einer Kote von ca. 334.6 - 335.6 m ü.M. anstehen. Im östlichen Hangbereich des mittleren und südlichen Projektperimeters steigt die Schotterobergrenze entsprechend der Terrainoberfläche steil an und erreicht am Perimeterrand eine Kote von bis zu ca. 350.1 m ü.M. Die ursprüngliche, natürliche Schottermächtigkeit beträgt im Projektperimeter ca. 15 - 20 m, lokal im östlichen Hangbereich auch über 20 m.

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

2.5 Moräne

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

2.6 Felsuntergrund

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

3 Grundwasserverhältnisse

3.1 Hydrogeologische Übersicht

Der Projektperimeter liegt über dem ausgedehnten, bis zu über 2 km breiten und lokal bis zu über 20 m mächtigen Grundwasserstrom des unteren Aaretals (vgl. Fig. 3-1). Als Grundwasserleiter wirkt der gut durchlässige Niederterrassenschotter. Die grösstenteils feinkörnige Moräne sowie der Felsuntergrund bilden den Grundwasserstauer. Die Speisung des Grundwasserstroms erfolgt durch seitlichen, unterirdischen Zufluss, direkte Versickerung von Niederschlägen und durch Infiltration von der im Bereich des Projektperimeters am linken Rand des Grundwasserstroms verlaufenden Aare. Das Grundwasser fliesst mit einem Gefälle von ca. 0.15% in Richtung Nord-osten.

Der Aare-Grundwasserstrom wird in zahlreichen Grundwasserfassungen zu Trink- und Brauchwasserzwecken genutzt. Die abstromseitig dem Projektperimeter nächstgelegene Fassung ist die Trinkwasserfassung «Unterwald» (Nr. 34.000.047, konzessionierte Entnahmemenge 50 l/s resp. 3'000 l/min) der Gemeinde Döttingen, welche ca. 1 km nördlich des Projektperimeters liegt. Rund 0.7 km südöstlich des Projektperimeters, nicht im direkten Abstrombereich, befindet sich die Trinkwasserfassung «Am Hengelweg» (Nr. 34.000.329, konzessionierte Entnahmemenge 83.33 l/s resp. 5'000 l/min) der Gemeinde Würenlingen.

3.2 Grundwassermächtigkeit und -durchlässigkeit

Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters (benetzter Schotter) variiert im Projektperimeter gemäss den älteren Sondierungen zwischen etwa 7 und 14 m. In der Grundwasserkarte des Kantons Aargau (Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau 2023b) ist für den Projektperimeter durchwegs eine grosse Grundwassermächtigkeit angegeben (vgl. Fig. 3-1).

In den Bohrungen Nr. 90-1 bis 90-7 wurden im Jahr 1990 zahlreiche Kurzpumpversuche durchgeführt. Diese ergaben Durchlässigkeitsbeiwerte k von 1×10^{-3} bis 1×10^{-2} m/s, was einer hohen bis sehr hohen Durchlässigkeit entspricht.

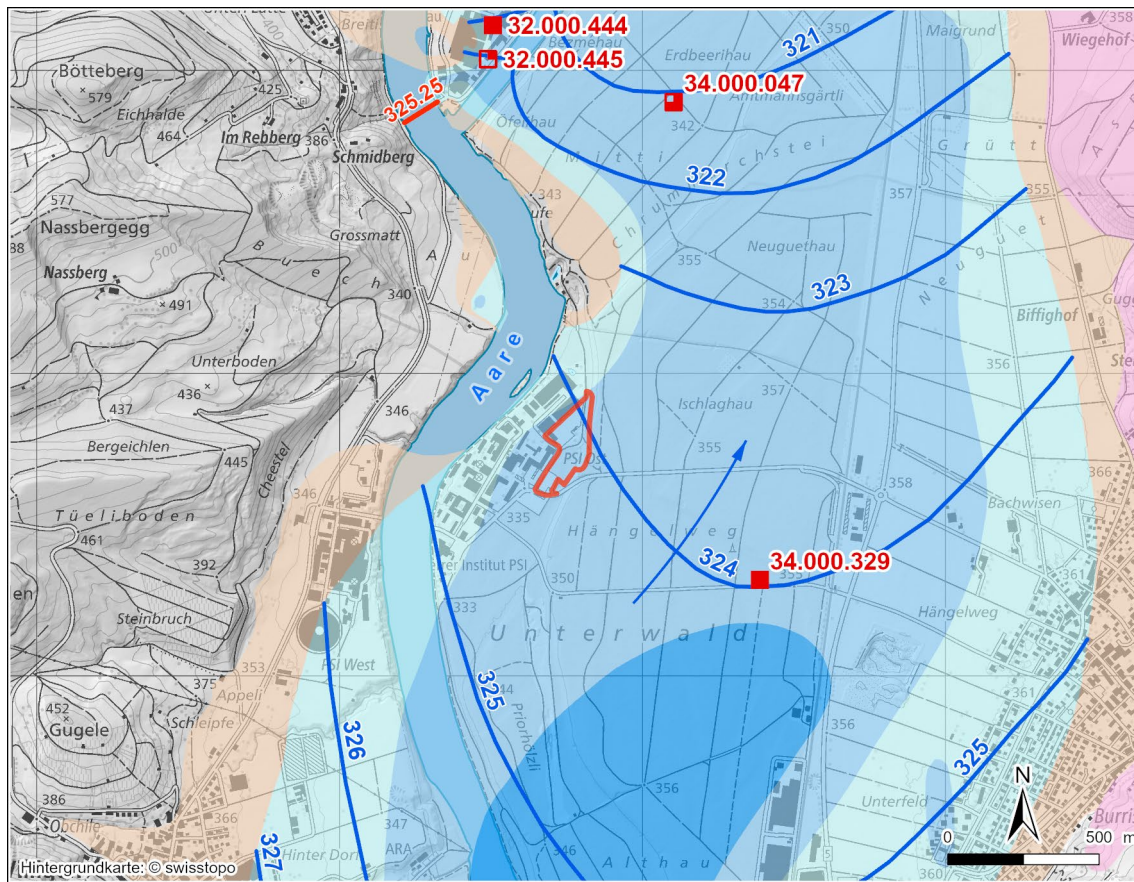


Fig. 3-1: Ausschnitt aus der Grundwasserkarte 1:25'000 des Kantons Aargau
(Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau 2023b)

3.3 Grundwasserspiegel

Die charakteristischen Grundwasserstände können aufgrund der Grundwasserkarte des Kantons Aargau (Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau 2023b), längerfristiger Grundwasserspiegelbeobachtungen in diversen Piezometerrohren und Grundwasserfassungen (Datenreihe 1991 - 2022, durchgeführt durch die AXPO; siehe auch Fig. 3-2 und Fig. 3-3) sowie abgeleitet² von einer Extremhochwasser-Modellierung (Andres et al. 2021) für den Projektperimeter abgeschätzt werden. Die abgeschätzten Grundwasserstände sind in Tab. 3-1 zusammengestellt.

Tab. 3-1: Abgeschätzte charakteristische Grundwasserstände

Bereich Projektperimeter	Mittelwasserstand, MW	Hochwasserstand, HW (Häufigkeit: ≥ 3 × 10 ⁻² pro Jahr)	Extremhochwasserstand, EHW (Häufigkeit: 10 ⁻⁴ pro Jahr)
Nördlichster Rand	323.9 m ü.M.	325.3 m ü.M.	328.7 m ü.M.
Nördlicher-mittlerer Bereich	324.2 m ü.M.	325.5 m ü.M.	328.7 m ü.M.
Südwestlichster Rand	324.4 m ü.M.	325.7 m ü.M.	328.7 m ü.M.

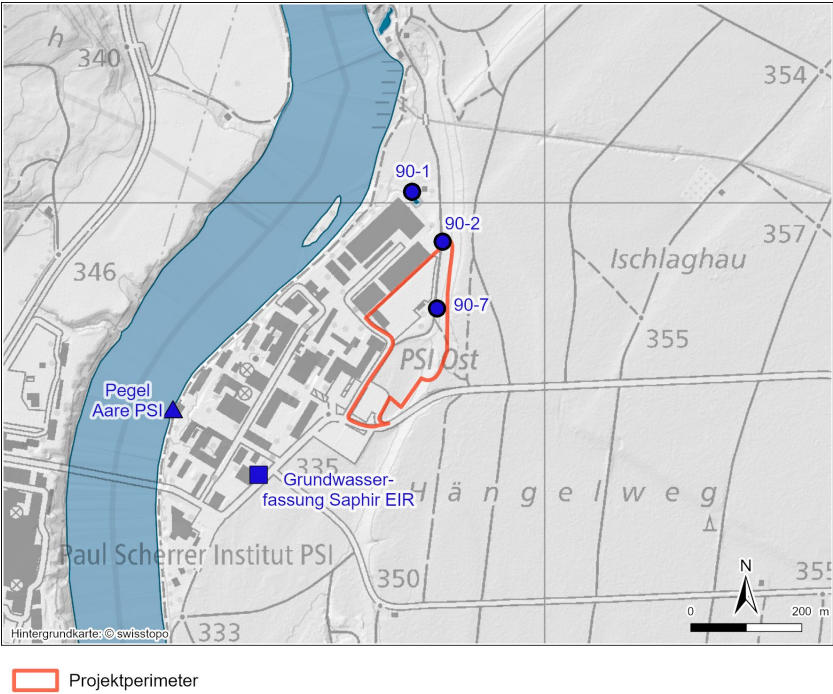


Fig. 3-2: Situation mit Grundwassermessstellen sowie Pegelmessstelle Aare

² Beschreibung Herleitung vgl. Kapitel 5.

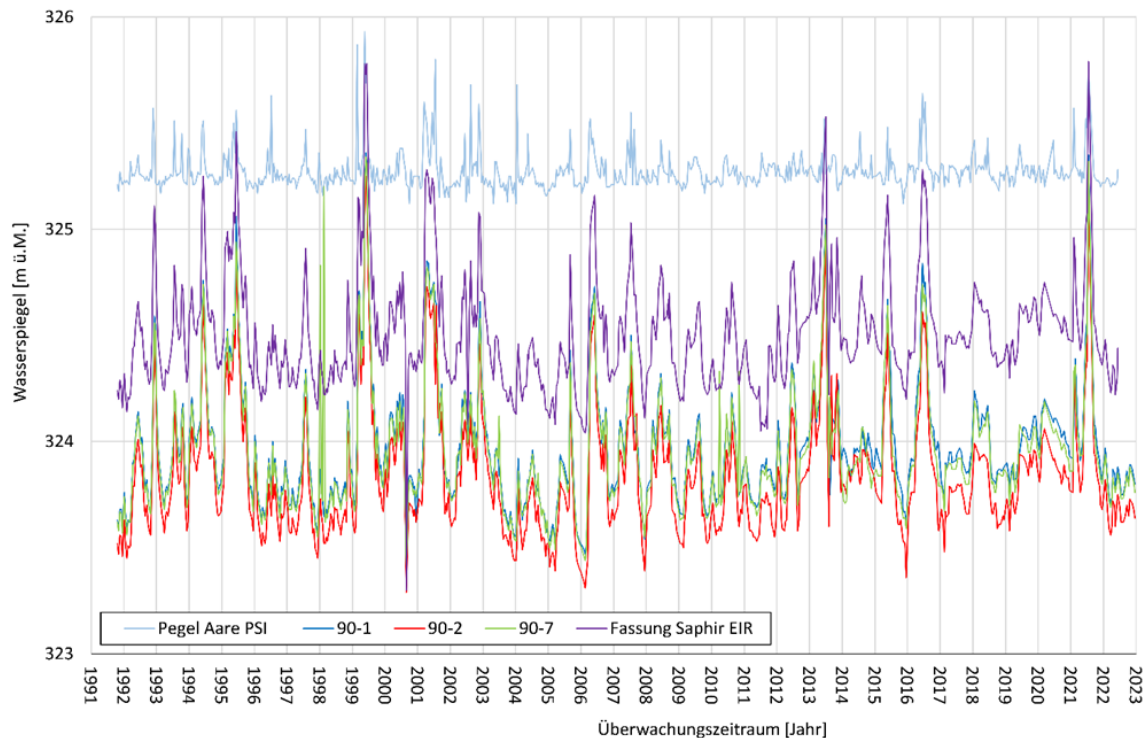


Fig. 3-3: Ganglinien Wasserspiegel Aare und Grundwasserspiegel von 1991 - 2022

3.4 Grundwasserschutz

Der gesamte Projektperimeter ist gemäss der Gewässerschutzkarte des Kantons Aargau (Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau 2023a) dem Gewässerschutzbereich A_u zugeordnet (vgl. Fig. 3-4).

Ca. 20 m südöstlich des südlichsten Punkts des Projektperimeters, südlich angrenzend an die heutige Forschungsstrasse (vgl. Beilage 1) liegt der nordwestliche Rand des Grundwasserschutzareals Unterwald (Würenlingen). Rund 600 m nordöstlich und somit abstromseitig des nördlichsten Punkts des Projektperimeters liegt der Südrand des Grundwasserschutzareals Unterwald (Döttingen).

Bezüglich des qualitativen Gewässerschutzes muss während der Bauausführung darauf geachtet werden, dass keine Verschmutzungen des Grundwassers und des Grundwasserleiters auftreten. Da der Schotter während der Bauphase entblösst wird, ist er auf Verschmutzungen besonders anfällig. Weitere qualitative Schutzmassnahmen sowohl während der Bau- als auch während der Betriebsphase sind ausführlich im Bericht NAB 22-33 (Nagra 2022) dargestellt.

In quantitativer Hinsicht dürfen gemäss der Gewässerschutzverordnung im Gewässerschutzbereich A_u keine Bauten erstellt werden, die unter dem mittleren Grundwasserspiegel liegen (Anhang 4, Ziffer 211 GSchV 1998). Ausnahmegewilligungen sind unter bestimmten Voraussetzungen möglich.

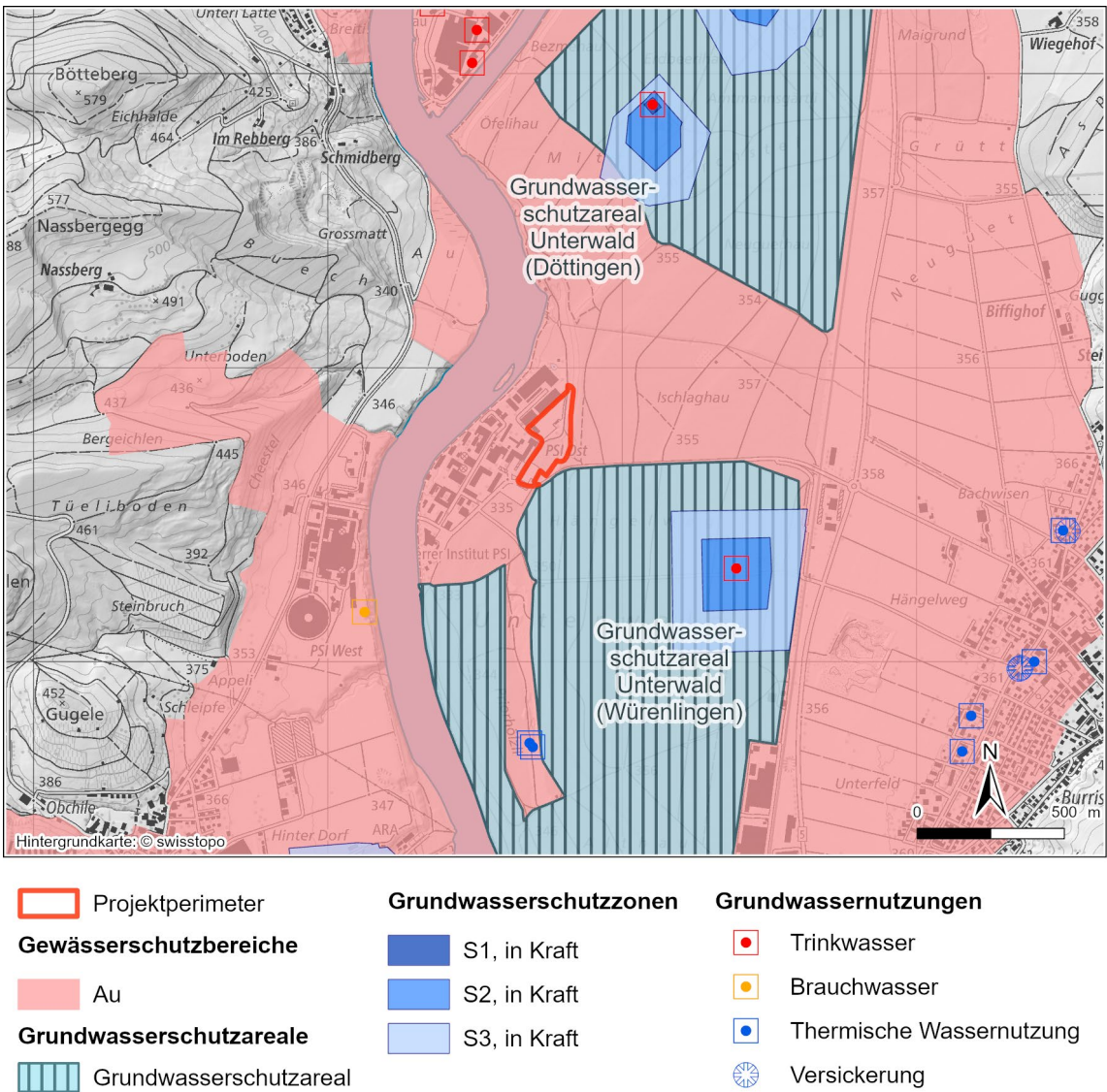


Fig. 3-4: Ausschnitt aus der Gewässerschutzkarte 1:25'000 des Kantons Aargau (Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau 2023a)

4 Bautechnische Verhältnisse

4.1 Projekt

Die in den folgenden Abschnitten dokumentierte bautechnische Beurteilung erfolgt für den gesamten Projektperimeter (vgl. Fig. 1-1). Die Lage und das Ausmass der BEVA und einzelnen Baukörper innerhalb des Projektperimeters sind aktuell noch nicht bekannt. Es wird daher im Folgenden von einer exemplarischen Umsetzung ausgegangen. Nach heutiger Planung kommen die Baukörper im nördlichen-mittleren Teil des Projektperimeters zu liegen (vorgesehener Baueingriffsbereich, vgl. Beilagen 3 bis 5). Die in der exemplarischen Umsetzung vorgesehene Fundationskote der BEVA liegt bei 326 m ü.M. und somit über dem Mittel- bzw. Hochwasserstand. Einzig bei einem Extremhochwasser ist ein höherer Grundwasserspiegel zu erwarten. Sollte in der weiteren Projektierung aus bautechnischer Sicht eine Absenkung der Fundationskote erforderlich werden, ist dies bis zum mittleren Grundwasserstand möglich, ohne dass eine gewässerschutzrechtliche Ausnahmebewilligung erforderlich ist (Anhang 4, Ziffer 211 GSchV 1998).

4.2 Baugrundwerte

Für erdstatische Berechnungen können die aufgrund der Sondierergebnisse geschätzten Baugrundwerte gemäss SIA 267 (Geotechnik; SIA 2013b) der nachfolgenden Tab. 4-1 verwendet werden. Es handelt sich dabei um geschätzte Mittelwerte mit Angabe von Extremwerten.

Die charakteristischen Werte sind im angegebenen Streubereich spezifisch für den jeweiligen geotechnischen Nachweis bzw. die geotechnische Bemessung und die zu betrachtenden Gefährdungsbilder festzulegen (vgl. SIA 267, Ziffer 3.4.2.2 und Ziffer 4.2, SIA 2013b). Der charakteristische Wert muss dabei nicht dem Mittelwert entsprechen. Eine Hilfsformel für die Berechnung der charakteristischen Werte bezogen auf übliche geotechnische Fragestellungen (z.B. Foundation, Böschungsstabilität) ist in den Anmerkungen zur Tab. 4-1 angegeben.

Tab. 4-1: Baugrundwerte für ungestörte Verhältnisse

(geschätzte Mittelwerte X_m , in Klammer Extremwerte X_{extr})Für die Bestimmung der charakteristischen Werte X_k wird folgende Formel verwendet werden:

$$X_k = X_m - \alpha (X_m - X_{extr})$$

Faktor für Zuverlässigkeit α : $\alpha = 0.40$ für Kohäsion c' (berechneter Wert ist auf die ganze Zahl abzurunden) $\alpha = 0.20$ für übrige Parameter

* scheinbare Kohäsion infolge natürlicher Bodenfeuchtigkeit (geht bei Durchnässung oder Austrocknung vollständig verloren)

** technische Kohäsion infolge hoher Lagerungsdichte (geht bei Auflockerung vollständig verloren)

Bodenbeschreibung	Raumlast	Kohäsion	Reibungs- winkel	Zusammendrückungsmodul	
				Erstbelastung	Wiederbelast.
	γ	c'	φ'	ME	ME'
	[kN/m ³]	[kN/m ²]	[°]	[MN/m ²]	[MN/m ²]
<i>Künstliche Auffüllungen</i>					
• sandiger Kies, <i>verdichtet</i>	20 (21)	0	(36) 38	(30) 40 (60)	120
• sandiger Kies, <i>wenig bzw. kaum verdichtet</i>	20 (21)	0	(33) 36	–	–
<i>Natürliche Oberflächenschichten</i>					
• toniger Silt mit Feinsand	19 (20)	(3) 5 (15)	(26) 28	(7) 12 (20)	20
<i>Schotter</i>					
• siltig-sandiger Kies mit Steinen und Blöcken, mitteldicht gelagert (oberste Schotterpartie)	20 (21)	(1) 3 (5) *	(36) 38	(45) 50 (80)	150
• sandiger Kies mit Steinen und Blöcken inkl. grosse Blöcke, dicht gelagert	21 (22)	(4) 8 (15) **	(37) 39	(50) 80 (120)	240
<i>Felsuntergrund aus Ton- und Kalkmergeln</i>					
• verwittert	23 (24)	–	–	100 - 200	–
• unverwittert	24 (25)	–	–	500 - 2'000	–

Erdbeben

Für die erdbebengerechte Projektierung nicht nuklearer Gebäude ist gemäss SIA 261 (Einwirkungen auf Tragwerke; SIA 2020) der Untergrund im Untersuchungsgebiet aufgrund der Sondiererergebnisse und bezogen auf das vorliegende Vorhaben der Baugrundklasse E zuzuordnen. Die BEVA selbst wird gemäss den Vorgaben der ENSI-G23 für Kernanlagen (ENSI 2021) bemessen. Die dafür notwendigen Bemessungsgrundlagen werden für das Baugesuch dokumentiert. Eine stufengerechte Abschätzung der Erdbebengefährdung findet sich in Nagra 2024b.

4.3 Foundation

Die locker gelagerten natürlichen Oberflächenschichten sowie allfällige auftretende, wenig verdichtete, locker gelagerte künstliche Auffüllungen sind als schlecht tragfähig und setzungsempfindlich einzustufen. Mitteldicht gelagerte künstliche Auffüllungen können als Baugrund von mittlerer Tragfähigkeit und nur mässiger Setzungsempfindlichkeit bezeichnet werden. Der Schotter ist gut tragfähig und nur wenig setzungsempfindlich. Eine Flachfundation im Schotter ist problemlos möglich.

Gemäss exemplarischer Umsetzung kommt die Unterkante Bodenplatte grösstenteils in den Schotter, jedoch je nach räumlicher Lage des Bauwerks teilweise auch in künstliche Auffüllungen oder in Bereiche mit heute bestehenden Bauten zu liegen.

Zur Gewährleistung eines einheitlichen Tragfähigkeitsverhaltens mit möglichst kleinen Setzungen und vor allem Setzungsdifferenzen resp. Gebäudeverkippen empfiehlt es sich, in Bereichen mit künstlichen Auffüllungen im Fundationsbereich die Gebäudelasten konsequent bis in den Schotter abzuleiten. Zur Übertragung der Bauwerkslasten stehen bei Übertragungstiefen bis maximal rund 2 m vertiefte Einzel- und Streifenfundamente (mit Magerbeton gefüllte Schächte und Gräben) unter tragenden Stützen und Wänden im Vordergrund. Bei Übertragungstiefen < 1 m ist auch ein Materialersatz des Schichtpakets «künstliche Auffüllungen / Oberflächenschichten» durch einen schichtweise eingebrachten, einwandfrei verdichteten Kieskoffer (mit Geotextil unterlegt) denkbar. Bei Übertragungstiefen $> 2 - 3$ m wäre schon aus wirtschaftlichen Gründen eine Lösung mit Mikropfählen / kurzen Pfählen zu prüfen.

Beim Baukörper der geplanten BEVA, die in den Bereich heute bestehender Bauten reicht, wird davon ausgegangen, dass die bestehenden Bauten vorgängig abgebrochen werden und die Baugrube mit künstlichen Auffüllungen, je nach Anforderungen mit verdichtbarem Material, verfüllt wird. Weiter sind die genaue Lage bereits vorhandener Werkleitungen zu erheben und entsprechend notwendige Sicherungsmassnahmen vorzunehmen.

In den nachfolgenden Figuren sind die möglichen Bodenpressungen (Bemessungsniveau) für mitwirkende quadratische Bodenplattenbereiche und Einzelfundamente (Fig. 4-1) bzw. für streifenförmige Bodenplattenbereiche und Streifenfundamente (Fig. 4-2) im Schotter zusammengestellt. Es wurden für die charakteristischen Baugrundwerte folgende Partialfaktoren festgelegt:

- Kohäsion c' $\gamma_c = 1.5$
- Reibungswinkel φ' $\gamma_\varphi = 1.2$
- Raumlast γ_e $\gamma_\gamma = 1.0$
- Zusammendrückungsmodul ME $\gamma_E = 1.0$

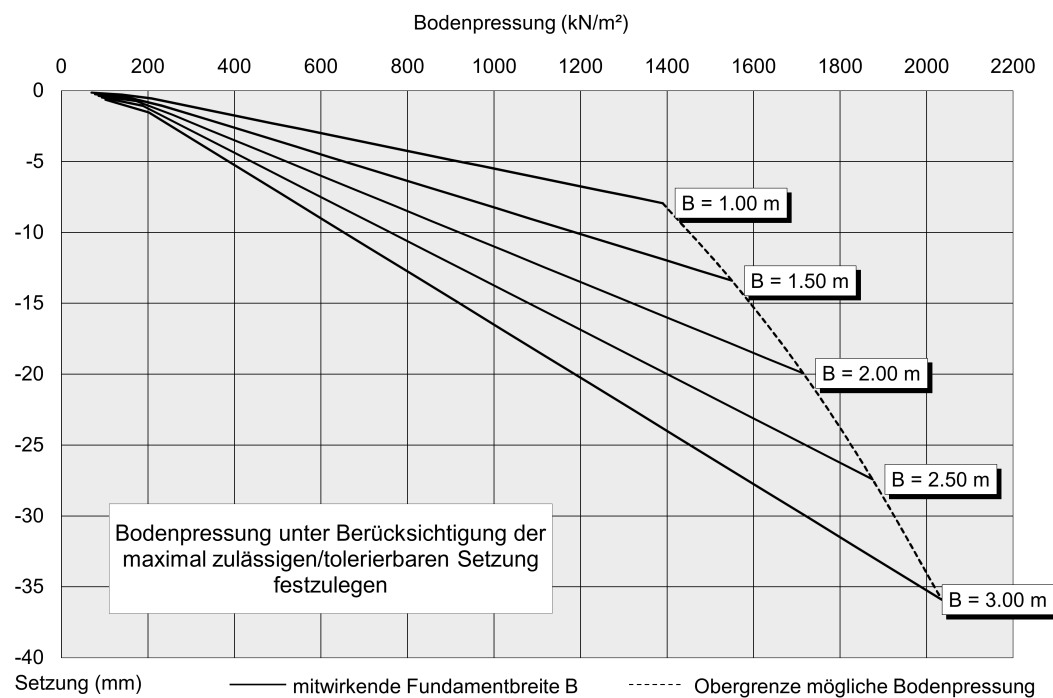
Für eine erste Abschätzung der Tragfähigkeit wurde angenommen, dass die Bodenplatte über dem Wasserspiegel liegt (vgl. Kap. 4.1) und eine Stärke von ca. 1.5 m aufweist. Zudem wurde eine Aushubtiefe von 9 m angenommen.

Für weitere Tragfähigkeits- und Setzungsabschätzungen können die Baugrundwerte der Tab. 4-1 verwendet werden.

Annahmen:

Kohäsion c_d'	($\gamma_c = 1.5$)	0.0	kN/m ²	
Winkel der inneren Reibung φ_d'	($\gamma_{\tan\varphi} = 1.2$)	33.6	°	
Raumlast γ_d	($\gamma_\gamma = 1.0$)	20	kN/m ³	Raumlast ohne Auftrieb
effektiver Überlagerungsdruck q		38	kN/m ²	Bodenplatte, Stärke 1.5 m *)
Zusammendrückungsmodul ME_d	($\gamma_E = 1.0$)	80	MN/m ²	Erstbelastung
Zusammendrückungsmodul ME'_d	($\gamma_E = 1.0$)	240	MN/m ²	Wiederbelastung
effektive Vorbelastung		180	kN/m ²	Annahme: 9 m Aushub
Konzentrationsfaktor Spannungsausbreitung		0.5		

mitwirkende Fundamentbreite (m)	Boden- pressung (kN/m ²)	Anteil Wieder- belastung (kN/m ²)	Anteil Erst- belastung (kN/m ²)	Setzung		
				Wiederbel. (mm)	Erstbelast. (mm)	Total (mm)
1.00	1390	180	1210	0	-8	-8
1.50	1550	180	1370	-1	-13	-14
2.00	1715	180	1535	-1	-19	-20
2.50	1875	180	1695	-1	-26	-27
3.00	2035	180	1855	-1	-35	-36



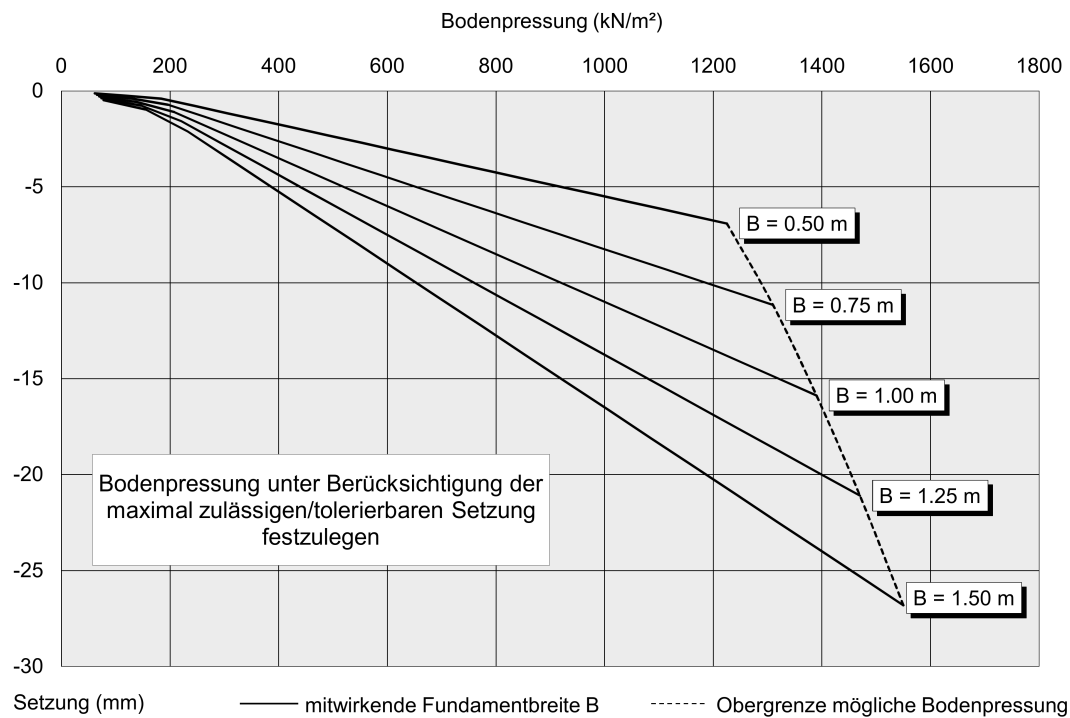
*) Annahme Stärke Bodenplatte für die Baukörper der BEVA mindestens 1.5 m

Fig. 4-1: Tragfähigkeits- und Setzungsabschätzung für mitwirkende quadratische Bodenplattenbereiche und Einzelfundamente im Schotter (Bemessungsniveau)

Annahmen:

Kohäsion c_d'	($\gamma_c = 1.5$)	0.0	kN/m ²	
Winkel der inneren Reibung φ_d'	($\gamma_{\tan\varphi} = 1.2$)	33.6	°	
Raumlast γ_d	($\gamma_\gamma = 1.0$)	20	kN/m ³	Raumlast ohne Auftrieb
effektiver Überlagerungsdruck q		38	kN/m ²	Bodenplatte, Stärke 1.5 m *)
Zusammendrückungsmodul ME_d	($\gamma_E = 1.0$)	80	MN/m ²	Erstbelastung
Zusammendrückungsmodul ME'_d	($\gamma_E = 1.0$)	240	MN/m ²	Wiederbelastung
effektive Vorbelastung		180	kN/m ²	Annahme: 9 m Aushub
Konzentrationsfaktor Spannungsausbreitung		1.0		

mitwirkende Fundamentbreite (m)	Boden- pressung (kN/m ²)	Anteil Wieder- belastung (kN/m ²)	Anteil Erst- belastung (kN/m ²)	Setzung		
				Wiederbel. (mm)	Erstbelast. (mm)	Total (mm)
0.50	1225	180	1045	0	-7	-7
0.75	1310	180	1130	-1	-11	-12
1.00	1390	180	1210	-1	-15	-16
1.25	1470	180	1290	-1	-20	-21
1.50	1550	180	1370	-1	-26	-27



*) Annahme Stärke Bodenplatte für die Baukörper der BEVA mindestens 1.5 m

Fig. 4-2: Tragfähigkeits- und Setzungsabschätzung für mitwirkende streifenförmige Bodenplattenbereiche und Streifenfundamente im Schotter (Bemessungsniveau)

4.4 Aushub

Belastungen Boden

Als «Boden» wird der Ober- und Unterboden bis in etwa 1 m Tiefe bezeichnet.

Der Projektperimeter ist nicht im Prüfperimeter Bodenaushub des Kantons Aargau (Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau 2023d) verzeichnet. Hinweise auf eine Belastung des Bodens liegen somit nicht vor. Im Rahmen der Bauarbeiten ist der Boden im Bereich der bewaldeten Flächen im mittleren Projektperimeter und im nördlichen Projektbereich innerhalb dort vorhandener Rabatten abzutragen. Im Hinblick auf eine gesetz- und vollzugskonforme Wiederverwendung bzw. Entsorgung dieses Bodenmaterials empfiehlt sich vor Baubeginn eine entsprechende Bodenuntersuchung durchzuführen. Bezüglich einer Bodenverwertung ist für den Boden aus dem Waldbereich der Wurzelbestand zu berücksichtigen.

Verschmutzungen Untergrund

Der Projektperimeter ist nicht im Kataster der belasteten Standorte (KbS) des Kantons Aargau (Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau 2023c) eingetragen. Allfällig vorhandene verschmutzte Aushubmaterialien (z.B. bauschutthaltige künstliche Auffüllungen) müssen aber einer gesetz- und vollzugskonformen Weiterverwendung resp. Entsorgung zugeführt werden. Wie in Kap. 2.2 erwähnt, ist insbesondere im Bereich von Hinterfüllungen mit Fremdstoffen oder Resten früherer Bauhilfsmassnahmen zu rechnen.

Baggerfähigkeit und Abbaubarkeit

Die auszuhebenden Schichten sind grösstenteils als normal baggerfähig einzustufen. Zu Erschwernissen können höchstens frühere Bauhilfsmassnahmen vom Bau der angrenzenden Gebäude (Anker, armierte Spritzbetonschicht etc.), Fundamentreste oder allfällige im Schotter eingebettete Blöcke inklusive grosse Blöcke führen.

Verwendung des Aushubmaterials

Die sandig-kiesigen künstlichen Auffüllungen können im unverschmutzten und trockenen Zustand als Hinterfüllungs- und Schüttmaterial eingesetzt werden. Allfällige feinkörnige Partien der künstlichen Auffüllungen sowie die natürlichen Oberflächenschichten eignen sich hingegen kaum für eine Weiterverwendung vor Ort.

Der Schotter stellt ein hochwertiges Aushubmaterial dar, welches als Baumaterial, Schütt- oder Koffermaterial verwendet werden kann. Die Frostsicherheit kann aber nicht als gegeben angenommen werden. Für die Verwendung als Bau- und Koffermaterial müsste die Grobfraktion an Steinen (und allenfalls Blöcken) vorgängig abgesiebt werden.

Schutz der Aushubsohle

Der Schotter ist auf Meteorwasserzutritt unempfindlich. Es empfiehlt sich dennoch, die Aushubsohle mit einer durchgehenden Magerbetonschicht abzudecken.

4.5 Baugrubenabschluss

Höhe Baugrubenwände

Bei der exemplarischen Umsetzung sind je nach Lage der Baukörper innerhalb des Projektperimeters Aushubtiefen von rund 9 m u.T. (nördlicher Bereich Ebene mit OKT bei ca. 335 m ü.M.) zu erwarten. Es ist davon auszugehen, dass der Projektperimeter in allen Bereichen eingeebnet wird, Planungsannahme wäre 335 m ü.M. Daraus folgt, dass im östlichen Hangbereich (mit OKT bei bis zu ca. 350.5 m ü.M.) oberhalb der eigentlichen Baugrube im Bauzustand gesicherte Hanganschnitte für den Bau von Stützmauern (Endzustand) mit im ungünstigsten Fall bis rund 16 m Höhe zu erwarten sind. Die entsprechend notwendigen Betrachtungen der Gesamtstabilität und die daraus erforderlichen Sicherungsmassnahmen sind bezogen auf den konkreten Einzelfall zu betrachten. Bei den nachfolgenden generellen Empfehlungen für eine Baugrube im Bereich der Ebene ohne wesentlichen Hanganschnitt werden diese nicht berücksichtigt.

Freie Abböschungen

Bei ausreichenden Platzverhältnissen können grundsätzlich freie Abböschungen gewählt werden. Es empfiehlt sich, im Schichtpaket «künstliche Auffüllungen / natürliche Oberflächenschichten» eine maximale Böschungsneigung von 2:3 (34°) nicht zu überschreiten. Im Schotter kann eine maximale Böschungsneigung von 1:1 (45°) angenommen werden (Angaben gelten bis zu einer maximalen Böschungshöhe von ca. 3 - 4 m), wobei die Gesamtstabilität der Böschung nachzuweisen ist. Bei Böschungshöhen von mehr als 4.0 m ist ca. auf halber Höhe eine stabilisierend wirkende Berme von mind. 0.8 - 1.0 m Breite vorzusehen, was entsprechende Platzverhältnisse im Projektperimeter voraussetzt. Die Böschungen sind mit einer Plastikfolie oder mit einer leicht (z.B. mit Rabitz-Netz) armierten Spritzbetonschicht abzudecken, damit sie vor Meteorwasser geschützt sind und nicht im Laufe der Zeit Material (vor allem Steine und Blöcke) herunterkollern kann.

Auflasten und Materialdeponien müssen aus Stabilitätsgründen genügend weit von der Böschungskrone entfernt angeordnet werden. Der Abstand muss mindestens so gross sein wie die vertikale Böschungshöhe.

Vertikaler Baugrubenabschluss

Dort wo die Platzverhältnisse für eine freie Böschung unzureichend sind (z.B. entlang der bestehenden Zwiilag-Gebäude K und S), muss ein adäquater vertikaler Baugrubenabschluss erstellt werden, z.B. durch eine ausgefachte, rückverankerte bzw. gespriesste Rühlwand mit gebohrten Trägern. Die Standfestigkeit des Schotter ist bei nahezu vertikalen Böschungen beschränkt, insbesondere in sandarmen, z.T. rolligen Zwischenschichten. Dies gilt auch für allfällige rollig ausgebildete künstliche Auffüllungen resp. Gebäudehinterfüllungen. Diesem Umstand ist bei der Grösse der Ausfachungs-/Betonier-Etappen gebührend Rechnung zu tragen.

Denkbar ist auch eine Kombination mit einem geböschten Voraushub und einem vertikalen Baugrubenabschluss für den tieferen Baugrubenteil.

Für die Dimensionierung von vorgespannten Ankern empfiehlt es sich, in den künstlichen Auffüllungen resp. in den natürlichen Oberflächenschichten eine maximale Ankertraglast (Bruch des Untergrunds im Bereich des Verankerungskörpers) von vorläufig ca. 300 - 400 kN und im Schotter von 650 - 850 kN vorzusehen. Im Schotter sind zur Begrenzung des Zementverbrauchs (unkontrolliertes Wegfliessen der Zementsuspension) so genannte «Sack»-Anker zu verwenden. Bei der Verwendung von Sackankern sind die oben angegebenen maximalen Ankertraglasten um ca. 20 - 30% zu reduzieren. Die Werte sind anhand von Spannproben der ersten Anker zu verifizieren (SIA 267, Ziff. 10.7, (SIA 2013b); SIA 267/1, Ziff. 6.2.4, SIA 2013a). In jedem Fall

sind mehrfach injizierbare Anker und die Verankerungsstrecke nicht kleiner als 6 m zu wählen. Längere Verankerungsstrecken liefern erfahrungsgemäss nur unwesentlich grössere Ankertraglasten.

Als Dimensionierungsgrundlage für den vertikalen Baugrubenabschluss können die Baugrundwerte der Tab. 4-1 verwendet werden. Es ist darauf zu achten, dass die Baugrubenwand wasserdurchlässig ausgebildet resp. perforiert wird, damit sich zu keiner Zeit ein Wasserdruck hinter der Wand aufbauen kann.

4.6 Bauwasserhaltung

Gemäss den Annahmen der exemplarischen Umsetzung kommen die Aushubsohlen, abgesehen vom Extremhochwasserstand (vgl. Kap. 5), über den höchsten Grundwasserspiegel in den gut wasserdurchlässigen, sandig-kiesigen Schotter, allenfalls auch in gut wasserdurchlässigem Materialersatz zu liegen. Das Meteorwasser wird voraussichtlich direkt im Untergrund versickern, d.h. es muss keine Bauwasserhaltung vorgesehen werden.

Die Ableitung des in betonierten Baugrubenvertiefungen anfallenden Meteorwassers hat nach SIA Empfehlung 431 (SIA & VSA 1997) zu erfolgen. Danach sollte das Baugrubenabwasser unter Vorschaltung eines Absetzbeckens (mit Neutralisationsanlage) in die Schmutzwasserkanalisation abgeleitet werden. Eine Einleitung in einen Meteor- oder Reinabwasserkanal ist nur mit Bewilligung der zuständigen Behörde und unter Einhaltung der Einleitbedingungen gestattet.

4.7 Trockenhaltung und Dichtigkeit Untergeschosse

Im Hinblick auf einen Extremhochwasserstand des Grundwassers und auf die Gewährleistung von Naturgefahrenereignissen mit einer Häufigkeit von bis zu 10^{-4} pro Jahr sind die Baukörper im Projektperimeter mindestens bis zu einer Kote von 328.7 m ü.M. (maximaler Grundwasserspiel bei einem Aare-Extremhochwasser, vgl. Kap. 3.3, Tab. 3-1) dicht und auf Auftrieb dimensioniert zu erstellen.

Zur einwandfreien Trockenhaltung der unterirdischen Gebäudeteile sind die übrigen, oberhalb 328.7 m ü.M. liegenden Gebäudeaussenwände entweder mit Sickerplatten oder Noppenfolien gegen Staunässe zu schützen. Alternativ ist die Gebäudehinterfüllung mit sehr gut wasserdurchlässigem Material vorzunehmen.

In beiden Fällen ist die Baugrubensohle vor dem Einbringen der Gebäudehinterfüllung zu reinigen. Anschliessend ist eine ca. 25 cm mächtige Geröllschicht einzubauen (zur grossflächigen Verteilung und Versickerung des lokal einfallenden Wassers). Bei Verwendung von feinkörnigem Hinterfüllungsmaterial muss die Geröllschicht mit einem Geotextil abgedeckt werden.

4.8 Bauüberwachung

Im Rahmen der Bauüberwachung sind vor, während und nach Abschluss der Bauarbeiten die notwendigen Messungen und Beobachtungen durchzuführen. Ein entsprechendes Überwachungskonzept ist auszuarbeiten. Für die Festlegung der zulässigen Deformationen (Melde- und Alarmwerte) ist das Schadenpotenzial im möglichen Einflussbereich der Baugrube (z.B. Strassen, Werkleitungen) zu ermitteln und zu berücksichtigen.

Zu einer einwandfreien Überwachung der Baugrubenwände und der im Hangbereich erforderlichen Hangsicherungen (Bauzustand) sowie gegebenenfalls auch der permanenten Stützmauern (Endzustand) gehören periodische Kontrollen von Verformungen (geodätische Messungen, Inklinometermessungen) und die Überprüfung der Ankerkräfte.

Bei der nach heutiger Planung vorgesehenen Baugrubentiefe von rund 9 m sowie gegebenenfalls bei zusätzlichen Hanganschnitten für Stützmauern im Hangbereich ist selbst bei der Wahl eines deformationsarmen Baugrubenabschlusses in der näheren Umgebung der Baugrube mit gewissen Setzungen und Verschiebungen zu rechnen. Es empfiehlt sich deshalb, von den benachbarten Infrastrukturen, empfindlichen Werkleitungen und Gebäuden im Sinne einer vorsorglichen Beweisaufnahme vor Beginn der Bauarbeiten eine Zustandsaufnahme durchführen zu lassen. Ferner sollten an exponierten Bauwerken und Werkleitungen Messbolzen versetzt werden, welche vor, während und nach den Bauarbeiten geodätisch überwacht werden.

Mit der Überwachung können kritische Bauphasen frühzeitig erkannt und allfällige nötige Gegenmassnahmen rechtzeitig eingeleitet werden. Zudem lassen sich ungerechtfertigte nachträgliche Forderungen zurückweisen und berechnete Forderungen können quantifiziert werden.

4.9 Weitere Empfehlungen und Hinweise

Für die Ausarbeitung des Fundations- und Baugrubenkonzepts in den folgenden Projektierungsphasen ist ein darin erfahrener Ingenieur zu beauftragen. Beim weiteren Vorgehen sind in Bezug auf weitere Baugrunduntersuchungen sowie die Beachtung potenzieller geotechnischer Risiken die Vorgaben der SIA 267 (SIA 2013b) stufengerecht zu berücksichtigen.

5 Naturgefahren

Hochwasser

Der Projektperimeter liegt gemäss der Gefahrenkarte Hochwasser des Kantons Aargau (Abteilung Landschaft und Gewässer (ALG) Aargau 2023, Stand April 2023) nicht in einem Bereich, welcher durch Hochwasser gefährdet ist.

Im Hinblick auf eine Beurteilung der standortspezifischen Gefährdung von kritischen Bauten, Anlagen und Infrastrukturen durch Extremhochwasser an Aare und Rhein wurde jedoch unter anderem auch das Areal des PSI resp. Der Zwilag detaillierter untersucht. Die Ergebnisse des Projekts EXAR, welche im Gegensatz zur üblichen Gefahrenbeurteilung (max. 300- bis 500-jährliche Ereignisse), auch Extremereignisse mit einer Häufigkeit von bis zu 10^{-4} pro Jahr und weniger berücksichtigt, sind in Andres et al. (2021) und WSL (2021) dokumentiert.

Gemäss WSL (2021) wird dabei die Hochwassergefährdung bei den betrachteten Szenarien wie folgt beurteilt:

«Im Beurteilungssperimeter des Paul-Scherrer-Instituts (PSI) in Villigen zwischen den Transferpunkten Stilli und Rheinmündung können alle niederschlagsbedingten Hochwasserereignisse durch die Aare abgeführt werden, ohne das Gelände des PSI zu überschwemmen. Weder eine 1000- noch eine 10 000-jährliche Flut setzen die untersuchten Standorte unter Wasser. Zu einer Überflutung des Referenzpunktes auf dem Areal kommt es nur, wenn die gut 200 Meter lange PSI-Stahlbetonbrücke bei einem 100 000-jährlichen Hochwasser gleichzeitig durch Schwemmholz verklaust wird. Bei einer Verklausung der beiden Brückenpfeiler liegt der aufgestaute Wasserspiegel im Bereich der Brückenplatte. Das Wasser tritt dabei am rechten Ufer auf einer Länge von 500 Metern im Oberwasser der verklausten Brücke aus, durchströmt das PSI-Areal und fliesst anschliessend wieder zurück in die Aare. Dabei würde der rechtsufrige Referenzpunkt mit einer Fliesstiefe von 20 bis 25 Zentimetern überflutet.»

Für Häufigkeiten von bis zu 10^{-4} pro Jahr kann somit eine Hochwassergefährdung durch Überflutung ausgeschlossen werden, zumal der Projektperimeter noch gut 2 m und mehr höher liegt als der in der EXAR-Studie betrachtete Referenzpunkt auf Kote 332.46 m ü.M.

Gemäss Andres et al. (2021) wäre für ein 1'000-jährliches Ereignis am Standort maximal ein Aarespiegel von ca. 328.0 m ü.M. und für ein 10'000-jährliches Ereignis maximal von ca. 328.7 m ü.M. zu erwarten. Da die Terrainoberfläche im Projektperimeter auf ca. 335 m ü.M. liegt, wäre eine Geländeüberflutung selbst bei einem 100'000-jährlichen oder noch selteneren Ereignis auszuschliessen. Ein extremes Aare-Hochwasser hätte gleichzeitig aber auch einen Anstieg des Grundwasserspiegels zur Folge. Die Resultate von durchgeführten Messungen (Fig. 3-3 in Kap. 3.3) zeigen, dass der Grundwasserspiegel im Projektperimeter kurzzeitig bis fast auf Aarespiegelniveau ansteigen kann.

Als 'Worst-Case'-Betrachtung für Extremereignisse mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr müsste für den Projektperimeter deshalb ein Extremhochwasserspiegel des Grundwassers von 328.7 m ü.M. angenommen und die Baukörper der BEVA bis zu dieser Kote auf Dichtigkeit und Auftrieb dimensioniert werden (vgl. Kap. 4.7).

Weitere Details zum Thema Hochwasser im Projektperimeter finden sich im Bericht NAB 24-36 (Nagra 2024a).

Oberflächenabfluss

Unabhängig von einer Hochwassergefährdung können starke Niederschläge oder eine Schneeschmelze zu erheblichen Oberflächenabflüssen führen, welche zu Überflutungen des Projektperimeters und schlimmstenfalls Untergeschossen führen können. Hinweise bezüglich der Gefährdung durch den Oberflächenabfluss gibt die Gefährdungskarte Oberflächenabfluss des Bundesamts für Umwelt (BAFU 2023). Generell ist im Bereich des Projektperimeters das Gelände grösstenteils flach und besteht aus sickerfähigem Untergrund. Lokal, z.B. am Fuss der Schotterterrasse, am östlichen Rand des Projektperimeters ist jedoch ein erhöhter Oberflächenabfluss nach Starkniederschlägen nicht vollständig auszuschliessen. Gemäss NAB 24-36 (Nagra 2024a) ist dieser aber begrenzt und kann mit baulichen Massnahmen beherrscht werden.

Steinschlag, Fels- oder Bergsturz

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

Rutschungen

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

Bezüglich spontaner Rutschungen resp. Hangmuren gilt es zu berücksichtigen, dass der östliche Rand des Projektperimeters im Bereich einer (Schotter-)Terrassenkante verläuft. Diese weist eine Böschungshöhe von insgesamt knapp 20 m und eine Böschungsneigung von teilweise bis zu über 30° auf. Aufgrund der Untergrundverhältnisse (geringmächtige, natürliche Oberflächenschichten über mehr als 20 m mächtigem Niederterrassenschotter), der Materialzusammensetzung (Schotter bestehend grösstenteils aus dicht gelagertem, sauberem Kies mit reichlich Sand sowie Steinen und Blöcken, vgl. Kap. 2.4), dem daraus resultierenden inneren Reibungswinkel von > 30° (vgl. Kap. 4.2), der guten Wasserdurchlässigkeit (vgl. Kap. 3.2) und dem tief liegenden Grundwasserspiegel (vgl. Kap. 3.3) ist das Potenzial für Hangmuren aber generell sehr gering. Lokale Hangmuren von feinkörnigeren, natürlichen Oberflächenschichten aus dieser Terrassenkante können bei extremen Niederschlägen aber nicht vollständig ausgeschlossen werden. Mit einfachen baulichen Massnahmen kann eine solche Gefahr jedoch beherrscht werden. Aktuell ist die natürlich entstandene Terrassenkante bewaldet.

Muren, Übersarung, Lawinen, Blitzfluten

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

Weitere gravitative Naturgefahren (Lawinen, Blitzfluten) werden aufgrund der Topografie und des geringen Gefälles in der Umgebung des Projektperimeters, des Bewuchses und der Niederschlagsmengen für den Projektperimeter ebenfalls als nicht relevant beurteilt.

Weitere Naturgefahren

Der Untergrund im Bereich der erforderlichen Baugruben besteht aus vergleichsweise dicht gelagertem Niederterrassenschotter mit einer Mächtigkeit von mindestens rund 15 m. Dieser ist aufgrund seiner Materialzusammensetzung (nur sehr geringer Anteil an Tonmineralen, ansonsten keine quellfähigen Minerale enthalten; vgl. Kap. 2.4) nicht quellfähig. Aufgrund der hohen Lagerungsdichte und der guten Wasserdurchlässigkeit (vgl. Kap. 2.4 und 3.2) weist der Schotter zudem keine Tendenz zu Bodenverflüssigung auf. Zudem können aufgrund der Materialzusammensetzung (keine löslichen Bestandteile enthalten) und der Mächtigkeit des Schotters Subrosionsprozesse ausgeschlossen werden.

6 Meteorwasserversickerung

Grundsätzliches

Zur Grundwasserneubildung und zur Entlastung der Kanalisation muss nach Art 7 Abs. 2 GSchG 1991 nicht verschmutztes Abwasser von Dächern, Strassen und Plätzen wenn möglich vor Ort versickert werden. Ist dies aufgrund der örtlichen Verhältnisse nicht möglich, so kann das anfallende Meteorabwasser mit Bewilligung der zuständigen Behörde in eine geeignete Vorflut eingeleitet werden.

Die «Richtlinie Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter» (VSA 2019) sowie der Ordner «Siedlungsentwässerung» der Abteilung für Umwelt des Departements Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau enthalten die wichtigsten Grundsätze zur Entsorgung von Regenwasser und praktische Hilfen zu deren Umsetzung.

Zulässigkeit einer Versickerung von Meteorabwasser

Ob Meteorabwasser versickert werden darf, hängt einerseits von der zu erwartenden Belastung des Meteorabwassers und andererseits von der «Vulnerabilität» des Grundwassers ab, d.h. von der vorhandenen Schutzwirkung der Schichten über dem Grundwasser.

Als gering belastet gilt gemäss der oben genannten VSA-Richtlinie einzig Dachabwasser von Gründächern ohne pestizidhaltige Materialien und von Dachaufbauten aus inerten Materialien mit maximal 5 Flächen-% Blei-, Kupfer-, Zink- und Zinninstallationen. Solches gering belastete Meteorabwasser darf direkt versickert werden. Meteorabwasser von anders aufgebauten oder anders genutzten Flächen gilt als mittel oder stark belastet und muss entweder über eine Bodenpassage versickert oder aber vor einer Versickerung behandelt werden.

Versickerungsverhältnisse

Im Projektperimeter liegen günstige Versickerungsverhältnisse vor (gut durchlässiger Schotter, tief liegender Grundwasserspiegel). Abhängig von der Belastungsklasse (vgl. oben) kann das anfallende Meteorwasser in genügendem Abstand zu bestehenden Gebäuden und in Bereichen mit durchlässigem Schotteruntergrund in einem unterirdischen Versickerungsschacht bzw. über humusierte Mulden zur Versickerung gebracht werden.

Für die Schaffung von oberflächlichem Retentionsvolumen kommen z.B. nicht begehbare Flachdächer in Frage. Diese können zudem extensiv begrünt werden.

Wege und Plätze können mit durchlässigen Belägen versehen werden, so dass das Wasser via die sandig-kiesige Fundationsschicht flächenhaft im Untergrund versickern kann. Der nicht versickerbare Anteil des Wassers ist möglichst auf angrenzende Grünflächen zu leiten, wo das Wasser verlaufen und diffus versickern kann. Dabei ist das Gelände niveaumässig so zu gestalten, dass das Wasser überall vom Gebäude wegfliessen, insbesondere auch um eine Überflutung der Untergeschosse zuverlässig zu verhindern (vgl. Kap. 5).

7 Literaturverzeichnis

Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau (2023a): Gewässerschutzkarte des Kantons Aargau, online verfügbar unter ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html, Stand am 01. Juli 2023.

Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau (2023b): Grundwasserkarte des Kantons Aargau, online verfügbar unter ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html, Stand am 01. Juli 2023.

Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau (2023c): Karte Kataster der belasteten Standorte (KbS), online verfügbar unter ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html, Stand am 01. Juli 2023.

Abteilung für Umwelt (AfU) Aargau (2023d): Karte Prüfperimeter Bodenaushub, online verfügbar unter ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html, Stand am 01. Juli 2023.

Abteilung Landschaft und Gewässer (ALG) Aargau (2023): Gefahrenkarte Hochwasser des Kantons Aargau, online verfügbar unter ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html, Stand am 01. Juli 2023.

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

BAFU (2023): Gefährdungskarte Oberflächenabfluss, Ereignisse mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von grösser 100 Jahre, online verfügbar unter <https://s.geo.admin.ch/7b964248d0>, Stand am 01. Juli 2023.

ENSI (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

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

GSchG (1991): Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG), vom 24. Januar 1991, Stand am 01. Januar 2022. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.20, Schweiz.

GSchV (1998): Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.201, Schweiz.

KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Februar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.

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

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

Nagra (2024b): Seismizität am Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-22.

Nagra (2025): Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage - Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-01.

SIA (2013a): Geotechnik - Ergänzende Festlegungen. Schweizer Norm SIA 267/1, SN 505 267/1. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

SIA (2013b): Geotechnik. Schweizer Norm SIA 267, SN 505 267. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

SIA (2020): Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizer Norm SIA 261, SN 505 261. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

SIA & VSA (1997): Entwässerung von Baustellen. SIA Empfehlung 431, SN 509 431. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein und Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Zürich.

VSA (2019): Richtlinie Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA, Glattbrugg.

WSL (Hrsg.) (2021): Extremhochwasser an der Aare. Wichtigste Erkenntnisse und Resultate des Projekts EXAR. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.