

Arbeitsbericht NAB 22-41

**Beherrschung möglicher
karstbedingter Wasserzutritte
während des Baus und Betriebs
eines geologischen Tiefenlagers**

Dezember 2022

Arbeitsbericht NAB 22-41

**Beherrschung möglicher
karstbedingter Wasserzutritte
während des Baus und Betriebs
eines geologischen Tiefenlagers**

Dezember 2022

STICHWÖRTER

Verkarsteter Baugrund, Wasserzutritt, Beherrschung, Bau, Betrieb, geologisches Tiefenlager, Abdichtungsmassnahmen

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle
Hardstrasse 73
Postfach
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.

Zusammenfassung

Die Lagerebene des geologischen Tiefenlagers wird mit Zugangsbauwerken erschlossen. In allen Standortgebieten müssen diese auch in Gesteinseinheiten erstellt werden, welche aufgrund Ihrer Zusammensetzung Karsthohlräume aufweisen könnten. Das ENSI (2018) weist deshalb darauf hin, dass im Rahmen der Risikoanalysen von Etappe 3 verschiedene Varianten von Zugangskonfigurationen betrachtet werden könnten.

Der Bericht zeigt auf, dass auch die in Etappe 3 durchgeführten erdwissenschaftlichen Untersuchungen keine Hinweise auf wasserführende Karsthohlräume ergeben haben. Das Auftreten von wasserführenden Karsthohlräumen erscheint in den Standortgebieten deshalb als unwahrscheinlich, kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Der Bericht erläutert, wie wasserführende Karsthohlräume am geplanten Standort detektiert werden können. Er geht weiter darauf ein, welche bautechnische Möglichkeiten zur Beherrschung von Karstwasserzutritten während der Planung (Optimierung der Linienführung), dem Bau- und der Betriebsphase bestehen.

Mit den beschriebenen und bewährten Möglichkeiten der Hohlraumdetektion und den bautechnischen Massnahmen lassen sich in allen Standortgebieten sichere Zugänge erstellen. Mit der Rahmenbewilligung wird das Projekt in den Grundzügen festgelegt. Welche Zugangskonfiguration umgesetzt wird und die exakte Lage der Zugangsbauwerke, wird erst mit der Baubewilligung festgelegt. Da die aktuellen Lagerprojekte technisch sicher realisiert werden können, werden für das Rahmenbewilligungsgesuch keine Varianten von Zugangskonfiguration betrachtet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Figurenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage.....	1
1.2 Inhalt des Berichts.....	1
1.3 Begriffsdefinitionen	2
1.4 Konfigurationen der Zugangsbauwerke	3
2 Gefährdung durch karstbedingte Wasserzutritte in den Standortgebieten	5
2.1 Verkarstung in den Standortgebieten	7
2.1.1 Verkarstungsfähige Gesteinseinheiten und Verkarstung im Standortgebiet Jura Ost.....	7
2.1.2 Verkarstungsfähige Gesteinseinheiten und Verkarstung im Standortgebiet Nördlich Lägern und Zürich Nordost.....	9
2.2 Gefährdung durch karstbedingte Wasserzutritte unter Annahme eines nicht verfüllten Karströhrensystems.....	13
3 Detektieren von Karsthohlräumen	15
4 Beherrschung von Karstwasserzutritten während der Bauphase	21
4.1 Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten während der Planung.....	22
4.2 Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten vor Vortriebsbeginn.....	23
4.2.1 Injektionen von der Oberfläche.....	23
4.2.2 Gefrierverfahren von der Oberfläche	25
4.3 Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten während des Vortriebs.....	27
4.3.1 Dem Vortrieb vorausseilende Injektionen.....	27
4.3.2 Dem Vortrieb vorausseilendes Gefrierverfahren.....	28
4.3.3 Nachinjektionen	29
4.4 Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten durch den Innenausbau.....	29
4.4.1 Abdichtungskonzepte für Schächte.....	31
4.4.2 Abdichtungskonzepte für eine Zugangsrampe.....	33

5	Beherrschung von Wasseranfall während der Betriebsphase	37
5.1	Wasseranfall während des Betriebs für eine Zugangsrampe	38
5.2	Massnahmen zur Beherrschung des Wasseranfalls während des Betriebs für eine Zugangsrampe	39
5.2.1	Möglichkeiten der baulichen Intervention.....	39
5.2.2	Möglichkeiten der betrieblichen Intervention.....	39
6	Schlussfolgerungen.....	41
7	Literaturverzeichnis.....	43

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Zusammenstellung von Karsthohlraumdetektionsmethoden und die zu erwartende Detektionsauflösung.....	17
-----------	---	----

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Konfigurationen für die Zugangsbauwerke der geologischen Tiefenlager an den drei Standorten	4
Fig. 2-1:	Klassifizierung des Baugrunds hinsichtlich Verkarstung.....	6
Fig. 2-2:	Verkarstungsfähige und verkarstete Gesteinseinheiten im Standortgebiet Jura Ost am Beispiel der Bohrung Bözberg-1-1	8
Fig. 2-3:	Verkarstungsfähige und verkarstete Gesteinseinheiten im Standortgebiet Nördlich Lägern am Beispiel der Bohrung Stadel-2-1.....	9
Fig. 2-4:	Verkarstungsfähige und verkarstete Gesteinseinheiten im Standortgebiet Zürich Nordost am Beispiel der Bohrung Marthalen-1-1	10
Fig. 2-5:	Beobachtete Lösungshohlräume in den Tiefenbohrungen der Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost.....	12
Fig. 2-6:	Beobachtete Öffnungsweiten der Karsthohlräume in den Bohrkernen der Nagra-Tiefbohrungen	12
Fig. 2-7:	Beispiel eines sedimentverfüllten Karsthohlraums	13
Fig. 3-1:	Jede Projektphase weist eigene Untersuchungsziele auf, weshalb in den einzelnen Projektphasen jeweils geeignete Untersuchungsmethoden eingesetzt werden	15
Fig. 3-2:	Darstellung der unterschiedlichen Messanordnungen für die Karsthohlraumdetektion	16
Fig. 3-3:	Schematische Darstellung des Detektionspotentials von wassergefüllten Karsthohlräumen.....	19
Fig. 4-1	Überblick über die bautechnischen Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten in Abhängigkeit von der Hohlraumgrösse	21
Fig. 4-2:	Injektionsarbeiten in einem (Paläo-)Karstaquifer unterscheiden sich von Arbeiten in einem Kluftaquifer durch das Vorhandensein von Karsthohlräumen, die meist nur durch direktes Anbohren und Injizieren erfolgreich abgedichtet werden können	25
Fig. 4-3:	Typische Tunnel-Abdichtungskonzepte	30
Fig. 4-4:	Schachtabdichtungskonzept.....	32
Fig. 4-5:	Abdichtungskonzept für einen Tunnel (Bauphase bis und mit Inbetriebnahme des abgedichteten Tunnels für den weiteren Vortrieb in den wenig durchlässigen Rahmengesteinen bzw. Opalinuston)	35
Fig. 5-1:	Darstellung der unterschiedlichen Abdichtungskonzepte der Zugangsbauwerke für ein geologisches Tiefenlager als Bestandteil möglicher Zugangskonfigurationen in den Standortgebieten	37

Abkürzungsverzeichnis

ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EUU	Erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag
HEB	Haupterschliessungsbereich
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NTB	Nagra Technischer Bericht
NZA	Nebenzugangsanlage
OFA	Oberflächenanlage
OPA	Opalinuston
PUP	Primärer Untersuchungsperimeter
SBM	Schachtbohrmaschine
SPV	Sprengvortrieb
SGT-E3	Sachplan geologische Tiefenlager – Etappe 3

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In ENSI (2017) wird vorgegeben, dass die im Rahmen der Etappe 2 SGT beschriebenen Massnahmen zur Beherrschung der Karstgefährdung hinsichtlich «sichere bautechnische Umsetzung und die Wirksamkeit» in Etappe 3 SGT vertieft zu untersuchen und zu belegen sind. Dabei sollen die «erwarteten Gebirgsverhältnisse» berücksichtigt werden (ENSI 2018). Des Weiteren wird in ENSI (2018) gefordert, dass «Varianten, z.B. für Zugangskonfigurationen, in die [Risiko-]Analyse einzubeziehen sind». Dabei sind die Beurteilungen und Empfehlungen des ENSI und seiner Experten zu beachten.

In allen drei in Etappe 3 SGT zu untersuchenden Standortgebieten Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost müssen zur Erschliessung der Lagerebene verkarstungsfähige Gesteinseinheiten durchörtert werden. Dabei weisen nur die «Felsenkalke» und der «Massenkalk» in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost tatsächlich Verkarstungseigenschaften auf.

1.2 Inhalt des Berichts

Der Bericht zeigt, dass vortriebsverhindernde, karstbedingte Wasserzutritte¹ nicht erwartet werden. Falls solche wider Erwarten auftreten sollten, sind diese jedoch mit verschiedenen Methoden detektierbar und können während des Baus und Betriebs der Zugangsbauwerke des Tiefenlagers mit bewährten Baumassnahmen beherrscht werden.

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut:

- Im Kapitel 1 werden projektspezifische Begrifflichkeiten dargelegt und die Abgrenzung des Berichts vorgenommen.
- Im Kapitel 2 wird die Verteilung der verkarstungsfähigen Gesteine und die Verkarstung in den Standortgebieten diskutiert. Es wird begründet, dass Karsthohlräume, die zu relevanten Wasserzutritten führen könnten, nicht erwartet werden, jedoch in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost nicht vollständig ausgeschlossen werden können.
- Im Kapitel 3 werden die Möglichkeiten und Grenzen der Detektion von wassergefüllten Karsthohlräumen vorgestellt. Der Karsthohlraumdetektion kommt eine besondere Rolle zu, um Massnahmen zur bautechnischen Beherrschung der Karstgefährdungen auch direkt in den Karsthohlräumen anwenden zu können (Kapitel 1).
- Im Kapitel 4 wird dargelegt, mit welchen Massnahmen während des Baus der Zugangsbauwerke allfällige vortriebsverhindernde Karstwasserzutritte verhindert und beherrscht werden können und für den Betrieb langfristig, günstige Bedingungen geschaffen werden.
- Im Kapitel 5 wird der Umgang mit Karstwasserzutritten während der Betriebsphase diskutiert.
- Kapitel 6 schliesst mit den Schlussfolgerungen zu den Gefährdungen durch Karstwasserzutritte und dem möglichen Umgang mit diesen.

¹ Andere Karstgefährdungen, wie Schlammeinbrüche oder Instabilitäten im Zusammenhang mit sedimentverfüllten Hohlräumen, werden in diesem Bericht nicht explizit betrachtet.

1.3 Begriffsdefinitionen

Verkarstung

Als Verkarstung wird die Gesamtheit der Prozesse verstanden, die zur Entwicklung einer Karstlandschaft und/oder unterirdisch zur Entwicklung eines Karstaquifers führt. Der dominante Prozess ist die Lösung von Gestein. Verkarstung ist eine Überprägung der Landschaft und des Gebirges mit der Herausbildung karstspezifischer Erscheinungen (z.B. Karsthohlräume) und Eigenschaften. Das Gebirge weist infolge Verkarstung eine räumlich und zeitlich starke Variabilität in den Gebirgseigenschaften auf, d. h., die Verkarstung führt zu einer heterogenen Überprägung des Gebirges.

Paläo-Verkarstung

Die Paläo-Verkarstung beschreibt eine Verkarstung aus der erdgeschichtlichen Vergangenheit, die durch die Überlagerung mit jüngeren Sedimenten beendet und konserviert wurde. Von einer Paläo-Verkarstung können sowohl die Karsterscheinungen an der Oberfläche (Paläo-Karstlandschaft) sowie das Karströhrensystem (Paläo-Karstaquifer) im Untergrund erhalten bleiben. Die Paläo-Karsthohlräume können vollständig mit Sedimenten verfüllt vorliegen.

Verkarstungsfähige Gesteinseinheit

Eine verkarstungsfähige Gesteinseinheit ist ein Gestein, das bezüglich Wasser oder schwachen Säuren (z.B. kohlensäurehaltiges Wasser) eine gute Löslichkeit aufweist. Im humid-gemässigten Klima gelten Karbonatgesteine (Kalksteine, Dolomit, Marmor) und Evaporitgesteine (Gips, Anhydrit und Steinsalz) als potenziell verkarstungsfähig. Die Verkarstungsfähigkeit einer Gesteinseinheit hängt unter anderem von der Löslichkeit der Gesteinskomponenten, dem Volumenanteil der löslichen Komponenten und der Lösungsrate ab. Der Übergang von einer nicht verkarstungsfähigen zu einer verkarstungsfähigen Gesteinseinheit ist oft fließend. Für Karbonate wird zwischen nicht verkarstungsfähigen (< 80 Vol.-% Karbonatanteil) und verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten (> 80 Vol.-% Karbonatanteil) unterschieden (z.B. Ford & Williams 2007), wobei die Gesteinseinheiten eine Mindestmächtigkeit von 10 m aufweisen (z.B. Filipponi et al. 2022).

Nicht jede verkarstungsfähige Gesteinseinheit ist auch wirklich verkarstet. Das Vorkommen von verkarstungsfähigen Gesteinen ist nur eine Voraussetzung dafür, dass Verkarstungsprozesse stattfinden können.

Karstaquifer

Ein Karstaquifer ist ein grundwasserführender geologischer Körper (Aquifer), in dem die Zirkulation und die Speicherung von Grundwasser in Karsthohlräumen, wasserwegsamem Trennflächen sowie im wasserwegsamem Porenraum erfolgt, wobei die Zirkulation durch das Karströhrensystem dominiert wird.

Karsthohlraum

Karsthohlräume sind Lösungshohlräume, die im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Karstaquifers entstanden sind. Sie weisen Durchmesser von wenigen Zentimeter bis mehrere Dekameter auf. Isolierte, nicht zu einem (Paläo-)Karstaquifer gehörende Lösungshohlräume werden nicht als Karsthohlräume verstanden.

Die Bezeichnungen «Karsthohlraum» und «Karströhre» werden weitgehend als Synonyme verwendet.

Ein Karsthohlraum ist bautechnisch relevant, wenn er Gefährdungsbilder hervorruft, die bautechnische Massnahmen erfordern. Diese hängen nicht nur von den Eigenschaften des Karsthohlraumes, sondern auch von den Projektparametern ab (Geometrie des Bauvorhabens und Baumethode). Die Hohlraumeigenschaften, wie z.B. Hohlraumgrösse, Wasserführung und Sedimentfüllung, die dazu führen, dass ein Karsthohlraum bautechnisch relevant wird, sind projektspezifisch zu definieren (z.B. Filipponi et al. 2022). Dies bedeutet, dass einerseits nicht jeder Karsthohlraum eine Gefährdung darstellt, andererseits, dass nicht in jedem Projekt die gleichen Hohlraumeigenschaften eine Gefährdung darstellen.

(Berg-)Wasserzutritt

Wasser, welches während der Bau- und/oder Betriebsphase kurzzeitig oder dauerhaft an einer Stelle (z.B. Kluft oder Karsthohlraum) aus dem Gebirge in das Untertagebauwerk eintritt. Es wird zwischen einem initialen und permanenten Wasserzutritt unterschieden.

Bergwasseranfall

Der Bergwasseranfall ist die Summe der Wassermenge pro Zeiteinheit, die aus dem Gebirge in das Untertagebauwerk, bezogen auf einen Tunnelabschnitt, zufliesst.

Wassereinbruch

Als Wassereinbruch wird ein Wasserzutritt mit auslegungsüberschreitender Schüttung (Wasservolumen/Zeit) verstanden, der auch zu einer temporären Einstellung des Vortriebes bzw. des Betriebs führt. Es müssen zusätzliche Massnahmen getroffen werden, um die Situation zu beherrschen bzw. die Gefährdung zu beheben.

1.4 Konfigurationen der Zugangsbauwerke

Die Erschliessung der geologischen Tiefenlager erfolgt mit standortspezifischen Zugangskonfigurationen (Nagra 2019). In den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost sind als Zugangskonfiguration jeweils drei Schächte vorgesehen (Fig. 1-1). Als Variante könnte der Zugangsschacht durch eine Zugangsrampe ersetzt werden.

In der Standortregion Jura Ost sind als Erschliessungsbauwerke ein Lüftungsschacht und eine Rampe vorgesehen. Die Rampe enthält im Querschnitt ein Betriebs- und ein Zugangsabteil und substituiert damit zwei Schächte (Betriebs- und Zugangsschacht). Die Rampe verläuft weitgehend im Opalinuston. Da dieser nicht verkarstungsfähig ist (vgl. Kapitel 2.1.1), ist auch nicht mit karstbedingten Wasserzutritten zu rechnen. Daher wird in diesem Bericht die Rampe in Jura Ost nicht weiter betrachtet.

Die bei diesen Zugangskonfigurationen zur Anwendung kommenden Tunnel- und Schachtnormalprofile haben Ausbruchdurchmesser von bis zu ca. 12 m bzw. ca. 14 m.

Im Rahmen der weiteren Projektentwicklung nach Einreichen des Rahmenbewilligungsgesuchs wird das Lagerprojekt stufengerecht konkretisiert und insgesamt optimiert. Die definitive Festlegung der Zugangskonfiguration erfolgt erst in der Baubewilligung EUU.

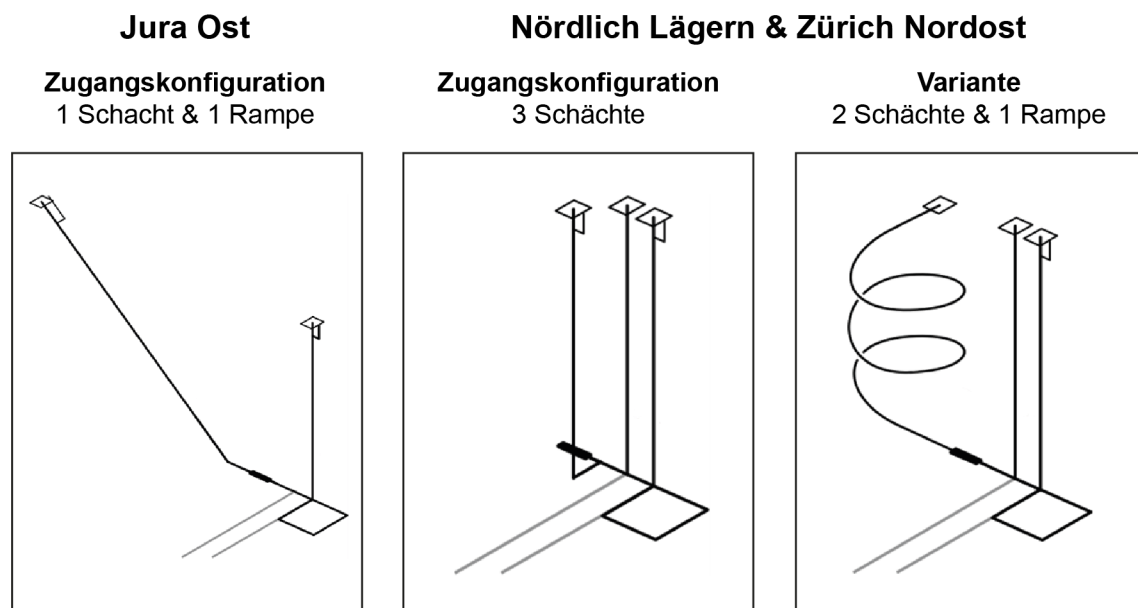


Fig. 1-1: Konfigurationen für die Zugangsbauwerke der geologischen Tiefenlager an den drei Standorten

2 Gefährdung durch karstbedingte Wasserzutritte in den Standortgebieten

Aus geotechnischer Sicht weisen Karbonatgesteine grundsätzlich gute bis ausgezeichnete Bedingungen für die Realisierung von Untertagebauwerken auf. Gleichzeitig können Karsterscheinungen in diesen Gesteinen zu Ereignissen führen, welche in anderen Gebirgstypen nicht oder nur in geringerem Ausmass vorkommen (z.B. Benson & Yuhr 2016). Die resultierenden Gefährdungsbilder können Personen, Sachwerte, die Bauwerke selbst sowie die Umwelt während der Bau- und Betriebsphase betreffen. Sie können zu bautechnischen Schwierigkeiten, Bauverzögerungen und Mehrkosten führen sowie die Arbeitssicherheit, die Umwelt oder Funktion und Nutzung beeinträchtigen.

Die karsttypischen Gefährdungsbilder in einem verkarsteten Baugrund stehen im Zusammenhang mit Karsthohlräumen, wobei diese nicht als isolierte Hohlräume im Gebirge zu betrachten sind (z.B. Filipponi et al. 2022, Ford & Williams 2007). Sie bilden ein verbundenes System aus Karsthohlräumen unterschiedlicher Grössen. Nicht jeder Karsthohlraum stellt per se eine Gefährdung dar. Die Gefährdung, welche beim Bau von untertägigen Bauwerken von Karsthohlräumen ausgeht, hängt unter anderem von den Hohlraumeigenschaften (Geometrie und Grösse, Wasserführung, Sedimentfüllung), von der Geometrie und Orientierung der Bauwerke und den angewandten Baumethoden ab (z.B. Filipponi et al. 2012, Marinos 2001, Milanović 2000). Ein verkarstetes Gebirge besteht aus Gebirgsbereichen mit und ohne Karsthohlräumen, wobei in der Regel die Mehrheit der vorkommenden Karsthohlräume keine wesentliche Beeinträchtigung des Baubetriebes oder der Nutzung des Bauwerks verursacht, d.h. bautechnisch nicht relevant wird (Fig. 2-1). Dagegen können die im Vergleich eher selten vorkommenden grossen Hohlräume ein grosses Schadenspotenzial darstellen. Deshalb sind die tatsächlichen Karstgefährdungen abhängig von den zu durchörternden Gebirgsbereichen.

Zudem bedeutet das alleinige Vorhandensein einer verkarstungsfähigen Gesteinseinheit nicht, dass diese zwangsläufig verkarstet ist oder sie in der erdgeschichtlichen Vergangenheit verkarstet wurde. Ausserdem muss die Verkarstung auch nicht zwangsläufig die ganze verkarstungsfähige Gesteinseinheit erfassen. Damit ein Gebirgsbereich verkarstet resp. sich ein Karstaquifer entwickeln kann, müssen aus speläogenetischem Gesichtspunkten vier Voraussetzungen erfüllt sein (z.B. Ford & Williams 2007):

1. Vorhandensein von verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten
2. signifikanter Grundwasserfluss durch den Gebirgsbereich
3. Lösungspotenzial des Wassers bezüglich der zu lösenden Minerale
4. hinreichend lange bestehende hydraulisch (2) und hydrochemisch (3) günstige Bedingungen, damit sich die Hohlräume bilden können

In der Planungsphase eines Untertagebauwerks stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, um verkarstete Gebirgsbereiche auszuschneiden sowie die zu erwartende Bandbreite der Eigenschaften der Karsthohlräume zu prognostizieren (z.B. Filipponi et al. 2012, Pinillos Lorenzana 2015, Zhang et al. 2018, Dall’Alba et al. 2022). Neben der Prognose der Karstgefährdung gibt es verschiedene Methoden zur Detektion von Hohlräumen (Kapitel 3).

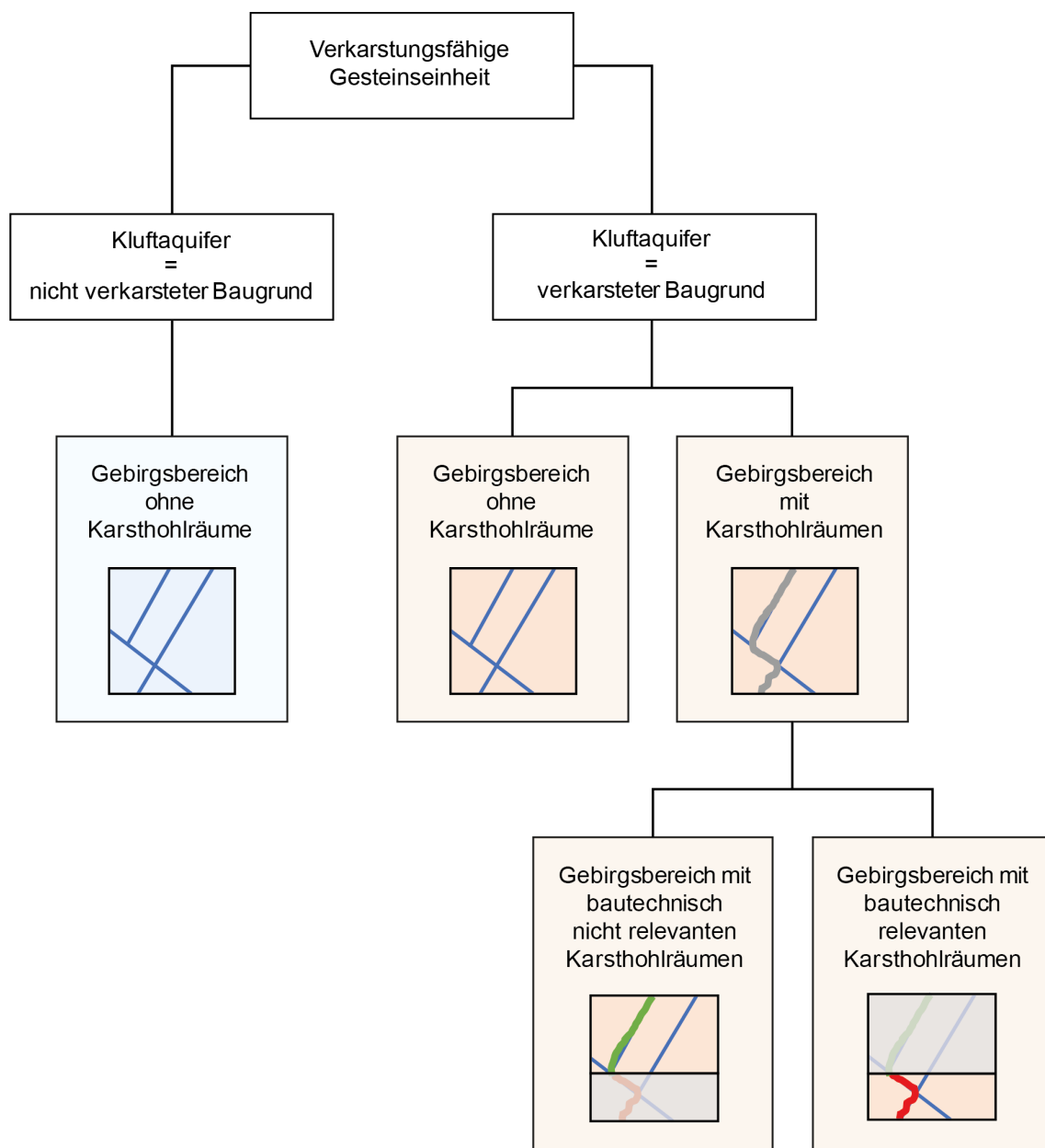


Fig. 2-1: Klassifizierung des Baugrunds hinsichtlich Verkarstung

2.1 Verkarstung in den Standortgebieten

In allen drei Standortgebieten kommen verkarstungsfähige Gesteinseinheiten mit einer Mächtigkeit > 10 m vor. Abgesehen von der Zugangsrampe in Jura Ost, durchörtern alle Zugangsbauwerke verkarstungsfähige Gesteinseinheiten (Kapitel 1.4).

2.1.1 Verkarstungsfähige Gesteinseinheiten und Verkarstung im Standortgebiet Jura Ost

Im Standortgebiet Jura Ost können insbesondere die Gerstenhübel-Bank (Wildeg-Formation) und der Hauptrogenstein als verkarstungsfähige Gesteinseinheit betrachtet werden (Fig. 2-2)².

Bei der Gerstenhübel-Bank handelt es sich um eine rund 30 m mächtige karbonatreiche Gesteinseinheit der kalkmergelig dominierten Wildeg-Formation (Bläsi et al. 2013). Wegen des hohen Karbonatgehalts (> 80 Vol.-%, z.B. Nagra 2022a) wird sie als verkarstungsfähig betrachtet. In Tiefbohrungen wurden keine Hinweise auf eine Verkarstung der Gerstenhübel-Bank gefunden (Nagra 2022a Dossier II, III & VII). Eine Verkarstung der Gesteinseinheit wird auch unter speläogenetischen Gesichtspunkten als unwahrscheinlich betrachtet (z.B. Lage mehrere hundert Meter unter dem Vorfluterniveau, eingebettet in wenig durchlässigen Gesteinseinheiten). Dies schliesst nicht aus, dass lokal (isolierte) Lösungshohlräume vorkommen können. Diese werden im Kontext dieses Berichts jedoch als erweiterte Trennflächen und nicht als Karsthohlräume betrachtet.

Im östlichen Teil des Standortgebiets Jura Ost, wo der Schachtstandort liegt, verläuft der Fazieswechsel vom karbonatreichen Hauptrogenstein zur mergeligen Klingnau-Formation (z.B. Nagra 2014a, Gonzalez & Wetzel 1996). Damit verbunden ist eine generell geringe Verkarstungsfähigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit respektive ein geringes Verkarstungspotenzial (Karbonatanteil < 80 Vol.-%, z.B. Nagra 2022a). So wurden auch in Tiefbohrungen keine Hinweise auf eine Verkarstung des Hauptrogensteins gefunden (Nagra 2022a Dossier II, III & VII). Eine Verkarstung der Gesteinseinheit wird auch unter speläogenetischen Gesichtspunkten als unwahrscheinlich betrachtet (z.B. Lage mehrere hundert Meter unter dem Vorfluterniveau, eingebettet in wenig durchlässigen Gesteinseinheiten). Dies schliesst nicht aus, dass lokal (isolierte) Lösungshohlräume vorkommen können. Diese werden im Kontext dieses Berichts jedoch als erweiterte Trennflächen und nicht als Karsthohlräume betrachtet.

Damit sind am Schachtstandort in Jura Ost nur erweiterte Trennflächen und keine Karsthohlräume zu erwarten.

² Da die im Standortgebiet vorkommende und verkarstungsfähige Villigen-Formation durch die Zugangsbauwerke nicht durchörtert wird, wird sie in diesem Bericht nicht diskutiert. Dasselbe gilt für die verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten unterhalb des Opalinustons.

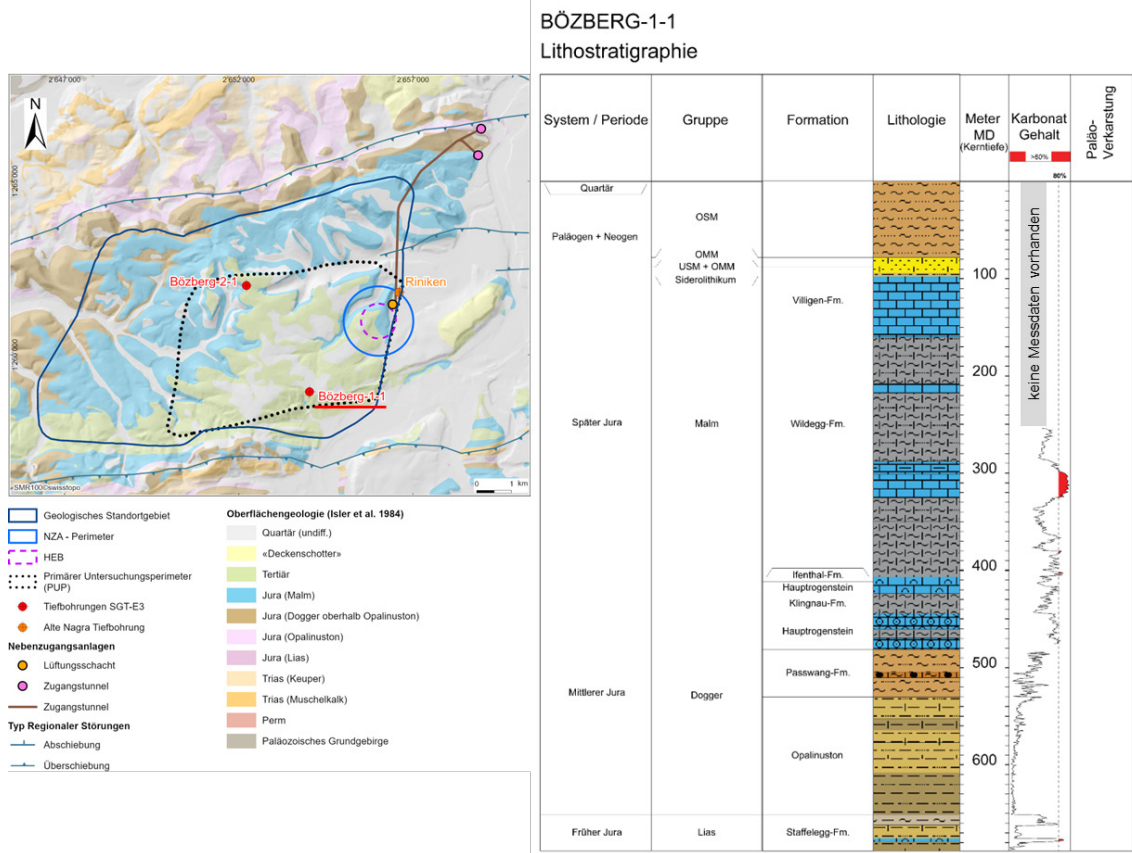


Fig. 2-2: Verkarstungsfähige und verkarstete Gesteinseinheiten im Standortgebiet Jura Ost am Beispiel der Bohrung Bözberg-1-1

Links Oberflächengeologie, rechts die Lithostratigraphie der Bohrung (Hinweis: Die verkarstungsfähige Villigen Formation wird durch das Schachtbauwerk nicht durchörtert. Dieses beginnt in der Wildeggen Formation.)

2.1.2 Verkarstungsfähige Gesteinseinheiten und Verkarstung im Standortgebiet Nördlich Lägern und Zürich Nordost

Anders stellt sich die Situation in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost dar. Während in Nördlich Lägern als verkarstungsfähige Gesteinseinheiten Malmkalke («Felsenkalke» und «Massenkalk», Villigen-Formation) und die «Herrenwis-Einheit» vorkommen (Fig. 2-3), kommen in Zürich Nordost nur die Malmkalke vor (Fig. 2-4).

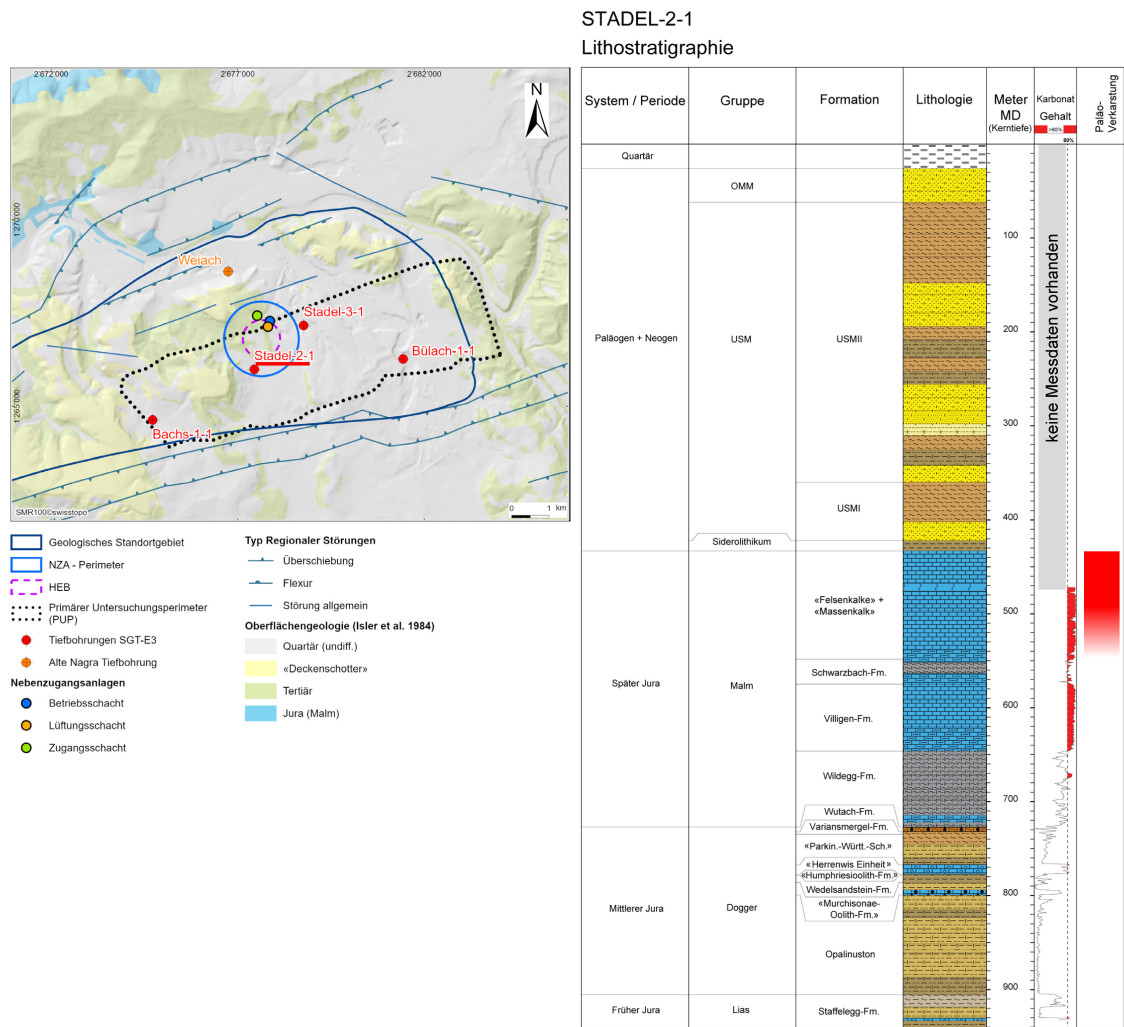


Fig. 2-3: Verkarstungsfähige und verkarstete Gesteinseinheiten im Standortgebiet Nördlich Lägern am Beispiel der Bohrung Stadel-2-1

Links Oberflächengeologie, rechts die Lithostratigraphie der Bohrung.

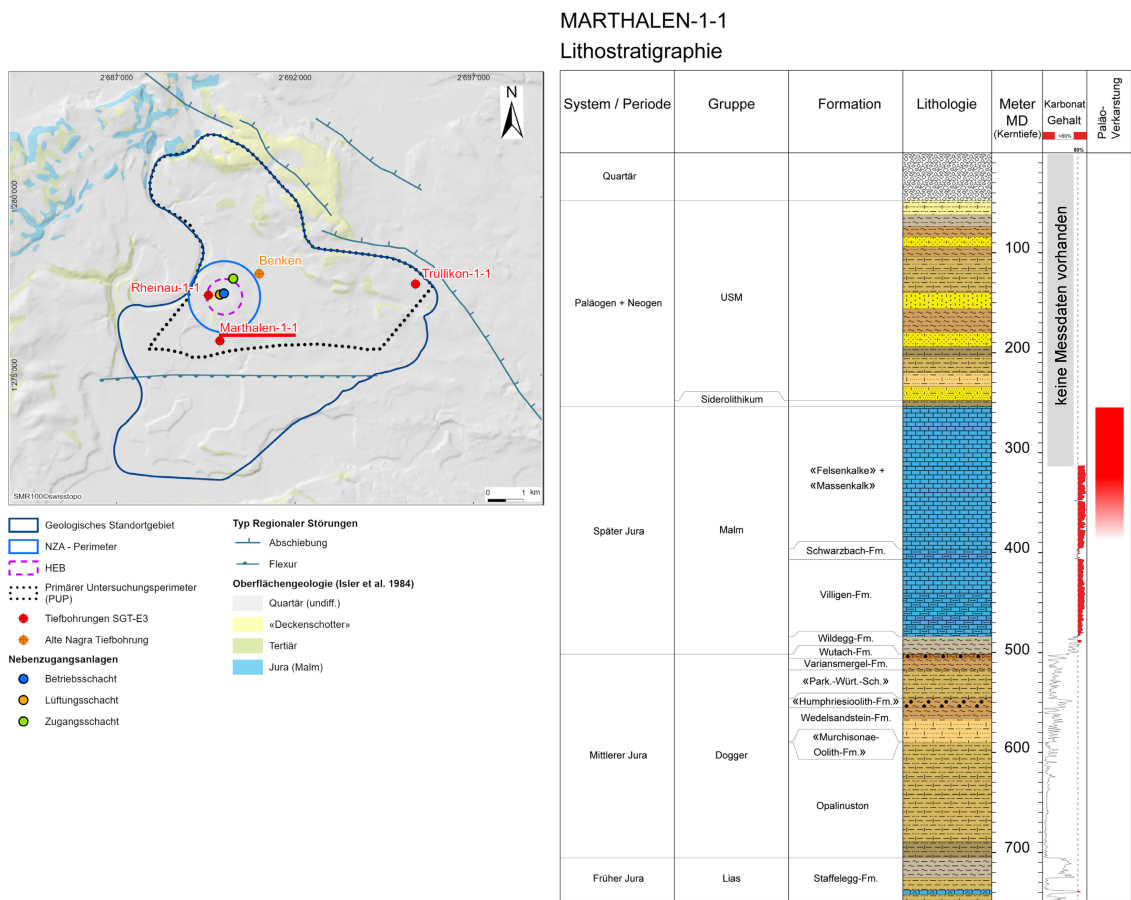


Fig. 2-4: Verkarstungsfähige und verkarstete Gesteinseinheiten im Standortgebiet Zürich Nordost am Beispiel der Bohrung Marthaalen-1-1
Links Oberflächengeologie, rechts die Lithostratigraphie der Bohrung.

Die «Herrenwis-Einheit», bestehend aus bioklastischem Kalkstein (Korallenkalk) mit mergeligen Zwischenlagen und ist im östlichen Bereich des Standortgebiet Nördlich Lägern als Plattform ausgebildet (Tiefbohrungen Bülach-1-1 und Stadel-3-1 rund 40 m mächtig, Nagra 2021a, 2022b). Im Bereich der Schächte ist die Einheit noch als eine rund 10 m mächtige karbonatreiche Einheit vorhanden (Fig. 2-3). Obschon in Stadel-2-1 der Karbonatgehalt der Einheit knapp unterhalb 80 Vol.-% liegt, wird sie in diesem Bericht als verkarstungsfähig angenommen. In der Bohrung Bülach-1-1 weisen Sedimentverfüllungen von Porenräumen darauf hin, dass das Riff (Plattform) zeitweise exponiert gewesen sein könnte (Nagra 2021a). Die Tiefbohrungen ausserhalb der Karbonatplattform weisen keine solche Hinweise auf (Stadel-2-1). Deshalb wird mindestens für die Bereiche ausserhalb der Plattform keine Überprägung durch Paläo-Karsthohlräume angenommen. Des Weiteren weisen die hydrogeologischen Bohrlochversuche weder auf eine verkarstungsbedingte erhöhte Durchlässigkeit noch auf einen erhöhten Grundwasserfluss hin. Eine rezente Verkarstung der Gesteinseinheit wird auch unter speläogenetischen Gesichtspunkten als unwahrscheinlich betrachtet (z.B. Lage mehrere hundert Meter unter dem Vorfluter-niveau, eingebettet in wenig durchlässigen Gesteinseinheiten). Dies schliesst nicht aus, dass lokal (isolierte) Lösungshohlräume vorkommen können. Diese werden im Kontext dieses Berichts jedoch als erweiterte Trennflächen und nicht als Karsthohlräume betrachtet.

Demgegenüber besteht für die Malmkalke weitgehender Konsens, dass sie in der Nordostschweiz eine Paläo-Verkarstung aufweisen (z.B. Bitterli et al. 2000, Guendon 1984). So wurden auch in den Tiefbohrungen verschiedene Karsthohlräume erbohrt und dokumentiert (z.B. Nagra 2021a Dossier II & III, Nagra 2021c Dossier II & III). Hingegen fehlen in den Bohrungen Hinweise auf eine rezente Verkarstung der Malmkalke. Des Weiteren weist der Malmaquifer im Standortgebiet nicht die typische Hydrodynamik eines Karstaquifers auf. Die hohen Verweilzeiten der Grundwässer deuten auf eine sehr geringe Dynamik mit geringen Fliessgeschwindigkeiten hin (z.B. Waber et al. 2014).

Die Beobachtungen in den Tiefbohrungen zeigen, dass Karsthohlräume nur in den Formationen «Felsenkalk» und «Massenkalk» vorkommen (Fig. 2-5). Sowohl in der Schwarzbach- als auch in der Villigen-Formation sind keine Karsthohlräume zu beobachten. Diese Beobachtung passt mit der paläo-geographischen (Höhenlage der Paläo-Vorfluter) und der speläogenetischen Vorstellung der Paläo-Verkarstung (Verkarstungsbasis) in den Standortgebieten zusammen.

Die Verteilung der beobachteten Karsthohlräume ist in den Bohrungen nicht gleichmässig, sondern teilweise an Störungen gebunden (z.B. Nagra 2021a Dossier II & III). Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass nahe der Paläo-Karstoberfläche eine grössere Karströhrendichte zu erwarten ist, während in tieferen Bereichen die Karsthohlräume selten vorkommen.

Bedingt durch die grosse räumliche Heterogenität eines verkarsteten Gebirges, erlauben die Beobachtungen in den Tiefenbohrungen nur bedingt Aussagen über die Eigenschaften der Paläo-Karsthohlräume entlang der Tunnelachse der Zugangsbauwerke. Obwohl in den neuen Tiefbohrungen keine wasserführenden Karsthohlräume angebohrt wurden (Fig. 2-5), kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass solche vorkommen. Mit den Beobachtungen aus den Bohrungen kann die Bandbreite und die Verteilung der Hohlraumeigenschaften nicht vollständig abgedeckt werden. Die Bandbreite der vorkommenden Grössen der Karsthohlräume kann mit wenigen Quadratzentimetern bis zu rund hundert Quadratmetern³ angenommen werden (z.B. Ford & Williams 2007, Bitterli 1996, Hunkeler 1982). Die Häufigkeitsverteilung der Hohlraumgrössen in einem verkarsteten Gebirgsbereich ist nicht gleichmässig, sondern nimmt mit der Hohlraumgrösse ab. Grosse Hohlräume können als selten vorkommend betrachtet werden, während kleine Hohlräume häufiger vorkommen. Mangels geeigneter kleinräumiger Daten wird in diesem Bericht zur Abschätzung der Karstwasserzutritte eine gleichmässige Verteilung der Hohlraumgrössen von wenigen Quadratzentimetern bis zu hundert Quadratmeter angenommen (Kapitel 2.2). Diese deckt die zu erwartete Bandbreite der Hohlraumgrössen ab, erlaubt jedoch nur eine qualitative Aussage über die Wahrscheinlichkeit einer Karsthohlraum anzufahren – grosse Hohlräume sind überproportional seltener als kleinere.

³ Die Grösse von Karsthohlräumen wird üblicherweise als Flächenquerschnitt [m²] senkrecht zur Längserstreckung des Hohlraums angegeben. Die Angabe der Grösse eines Karsthohlraums als Volumen [m³] ist wenig aussagekräftig, da Karsthohlräume nicht als isolierte Hohlräume vorkommen, sondern Teil eines Karströhrensystems sind.

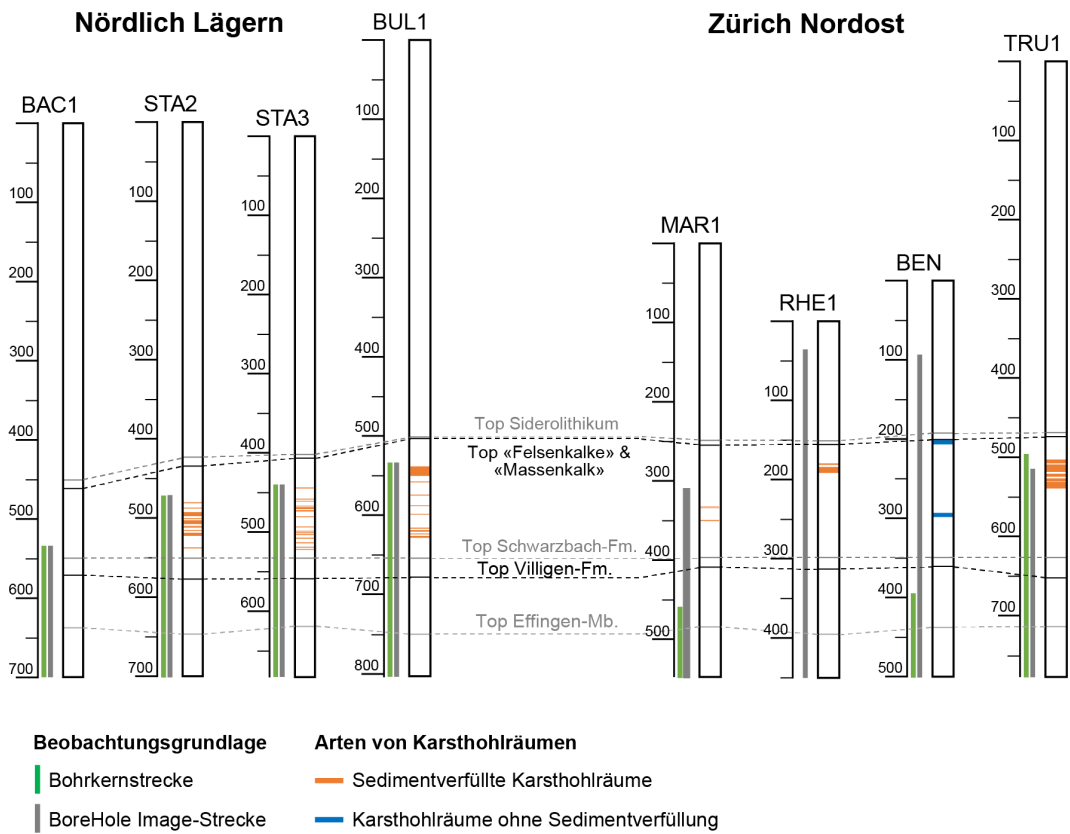


Fig. 2-5: Beobachtete Lösungshohlräume in den Tiefenbohrungen der Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost
Bohrungen wurden auf Top Schwarzbach-Formation ausgerichtet.

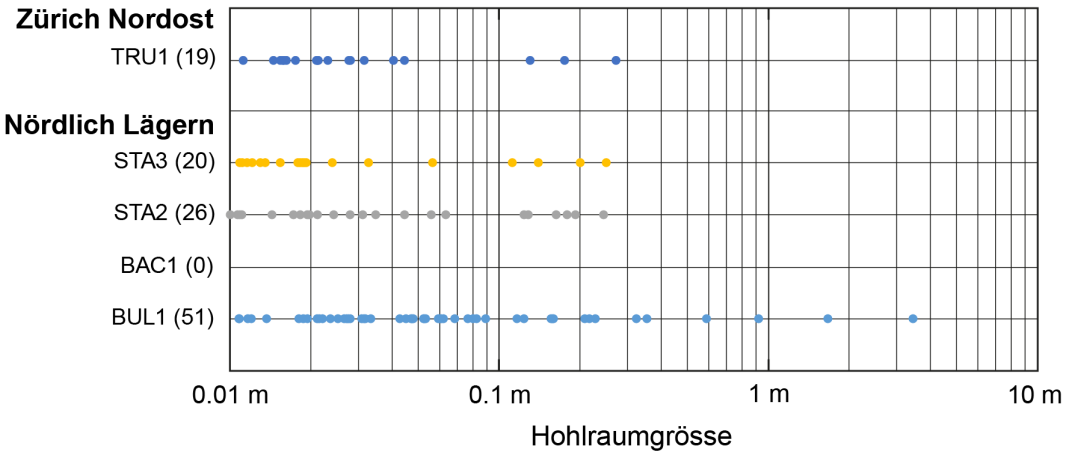


Fig. 2-6: Beobachtete Öffnungsweiten der Karsthohlräume in den Bohrkernen der Nagra-Tiefbohrungen
In Klammern die Anzahl in den Bohrkernen beobachteten Karsthohlräume. Alle in den Bohrkernen beobachteten Karsthohlräume sind sedimentverfüllt (Annahme: Öffnungsweite im Kern entspricht dem Hohlraumdurchmesser).

Paläo-Karsthohlräume können ganz oder teilweise mit Sedimenten verfüllt sein oder auch keine Sedimente beinhalten (z.B. Osborne 2003). Die allermeisten in den Tiefbohrungen angetroffenen Karsthohlräume sind mit Sedimenten verfüllt (z.B. Fig. 2-5 und Fig. 2-7). Des Weiteren zeigen Beobachtungen der Paläo-Karsthohlräume in den Malmkalken der Nordschweiz, die während dem Bau von Tunnels angefahren wurden, dass auch diese überwiegend vollständig mit Sedimenten verfüllt sind (z.B. alter und neuer Bözberg Eisenbahntunnel, Cholfirst Tunnel oder Galgenbuck Tunnel). Die in den Tiefbohrungen beobachteten verfüllten Lösungshohlräume weisen sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf (z.B. Nagra 2021a Dossier VII). Die hydrogeologischen Beobachtungen aus den Tiefbohrungen weisen darauf hin, dass der Paläo-Karstaquifer seine karsttypischen hydraulischen Eigenschaften verloren hat (z.B. Nagra 2021 Dossier VII, Nagra 2021c Dossier VII). Das Karströhrensystem wurde durch Sedimente mindestens zum Teil «plombiert». Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, dass sedimentfreie oder teilverfüllte Hohlräume nicht vorkommen können. Für die Abschätzung der möglichen Karstwasserzutritte (Kapitel 2.2) wird deshalb konservativ angenommen, dass die Karsthohlräume nicht mit Sediment verfüllt sind. Die Karsthohlräume liegen heute unter dem Grundwasserspiegel und werden daher als vollständig mit Wasser gefüllt betrachtet.



Fig. 2-7: Beispiel eines sedimentverfüllten Karsthohlraums
TRU1, 505 m (Nagra 2021b)

2.2 Gefährdung durch karstbedingte Wasserzutritte unter Annahme eines nicht verfüllten Karströhrensystems

Obschon nicht erwartet wird, dass beim Bau der Zugangsbauwerke bedeutende wasserführende Karsthohlräume angefahren werden, können diese in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost nicht vollständig ausgeschlossen werden (Kapitel 2.1).

Die Gefährdungsbilder, die im Zusammenhang mit karstbedingten Wasserzutritten stehen, hängen weitgehend von der zu erwartenden Schüttung aus dem jeweiligen Hohlraum ab (z.B. Filippini et al. 2012). Aus bautechnischer Sicht wird zwischen einem initialen und einem permanenten Wasserzutritt unterschieden (z.B. SIA 1998). Der initiale Wasserzutritt ist die Schüttung, die unmittelbar nach dem Anfahren einer wasserführenden Struktur in den Tunnel fließt. In den meisten Fällen nimmt die Schüttung nach einer gewissen Zeit ab und stabilisiert sich auf einem niedrigeren Niveau, das dem permanenten Wasserzutritt entspricht. Die hohe hydraulische Durchlässigkeit des Karströhrensystems führt dazu, dass nicht nur der initiale Wasserzutritt, sondern auch der permanente Wasserzutritt aus dem Karströhrensystem hoch sein kann (z.B. Bollinger & Kellerhals 2007, Jeannin et al. 2007).

Für die Zugangsbauwerke können zwei Ereignisszenarien zu karstbedingten Wasserzutritten unterschieden werden:

- Ein wasserführender Karsthohlraum wird beim Vortrieb angefahren.
- Ein wasserführender Karsthohlraum wird im Vortrieb angetroffen, abgedichtet und eine Ausbruchsisicherung sowie Verkleidung erstellt. Zu einem späteren Zeitpunkt (z.B. in der Betriebsphase) wird die Verkleidung undicht (z.B. Beschädigung der Abdichtung).

Für beide Ereignisszenarien ist der initiale Wasserzutritt gefährdungsrelevant und muss beherrscht werden. Die Gefährdung durch einen permanenten Karstwasserzutritt ist von untergeordneter Bedeutung, da er kleiner ist als der jeweilige initiale Wasserzutritt, weshalb er im Rahmen dieses Berichts nicht beurteilt wird.

Zur Prognose von Wasserzutritten aus Karsthohlräumen können verschiedene Methoden verwendet werden (z.B. Jeannin et al. 2015, Zhuo 2016, Dall'Alba et al. 2022). Die Methoden weisen zum Teil unterschiedliche Konzeptionalisierungen eines Karstaquifers auf und verwenden unterschiedliche Modellierungsansätze, wobei der initiale Karstwasserzutritt weitgehend von den hydraulischen Eigenschaften des unmittelbar angefahrenen Bereichs des Karströhrensystems abhängt (im Gegensatz zum permanenten Wasserzutritt, der vom hydraulischen Verhalten des "ganzen" Karströhrensystems abhängt) (z.B. Filippini et al. 2022). Die Prognose von Karstwasserzutritten und Plausibilisierung anhand von Zuflussraten von «Karstwasserereignissen» während des Tunnelbaus (z.B. Seelisbergtunnel (Schneider 1984), Sondierstollen Twann (Bollinger & Kellerhals 2007), Umfahrungstunnel Flims (Jeannin et al. 2007), Tunnel Engelberg (Reber 2006), Hochwasserentlastungsstollen Sarneraai (pers. Mitteilung, Gilgen, S. 2021)) erlauben folgende generelle Aussagen bezüglich der zu erwartenden Wasserzutritte in der phreatischen Zone:

- Die erwartenden initialen Schüttungen aus Karsthohlräumen hängen weitgehend von der Querschnittsfläche des angefahrenen Karsthohlraums ab.
- Die initialen Schüttungen können für die Erstellung der Zugangsbauwerke eine Gefährdung darstellen (grosse Wassermengen sowie hohe Drücke).
- Bereits Karsthohlräume mit Durchmessern von einigen Dezimetern könnten zu initialen Zuflussraten von mehreren 100 Litern pro Sekunde führen, wobei aus grösseren Karsthohlräumen auch Schüttungen im Bereich von Kubikmeter pro Sekunde möglich wären.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass nicht erwartet wird, dass beim Bau der Zugangsbauwerke wasserführende Karsthohlräume angefahren werden, ohne dass dies vollständig ausgeschlossen werden kann. Die damit verbundenen möglichen Zuflussraten können eine bautechnische Gefährdung darstellen. Entsprechend sind Karsthohlräume beim Vortrieb mit geeigneten Methoden zu detektieren (Kapitel 3) und mit bautechnischen Massnahmen zu beherrschen.

3 Detektieren von Karsthohlräumen

Bautechnische Massnahmen zur Beherrschung der Karstgefährdungen müssen zum Teil direkt in den Karsthohlräumen angewendet werden, um erfolgreich zu sein (Kapitel 4). Deshalb reicht es nicht aus, zu wissen, dass ein Gebirge verkarstet ist, sondern es ist nötig, die relevanten Karsthohlräume zu detektieren. Entsprechend kommt der Karsthohlraumdetektion eine besondere Stellung zu. Sie erfolgt im Zuge des Projektfortschritts entsprechend den Zielen der Projektphasen. Je nach Projektphase und Erkundungsziel können unterschiedliche Erkundungsmethoden zum Einsatz kommen (Fig. 3-1):

- **Erkundung vor Baubeginn**
Bei der Erkundung vor Baubeginn sind Karsthohlräume zu detektieren, die zu vortriebsverhindernden Wasserzutritten führen können.
- **Vorauserkundung während des Baus**
Bei der Vorauserkundung sind Karsthohlräume zu detektieren, die zu vortriebsverhindernden und auslegungsüberschreitenden Wasserzutritten führen können.
- **Nacherkundung**
Die Nacherkundung erfolgt dem Vortrieb nachlaufend zur Feststellung evtl. weiterer Ertüchtigungsmassnahmen.

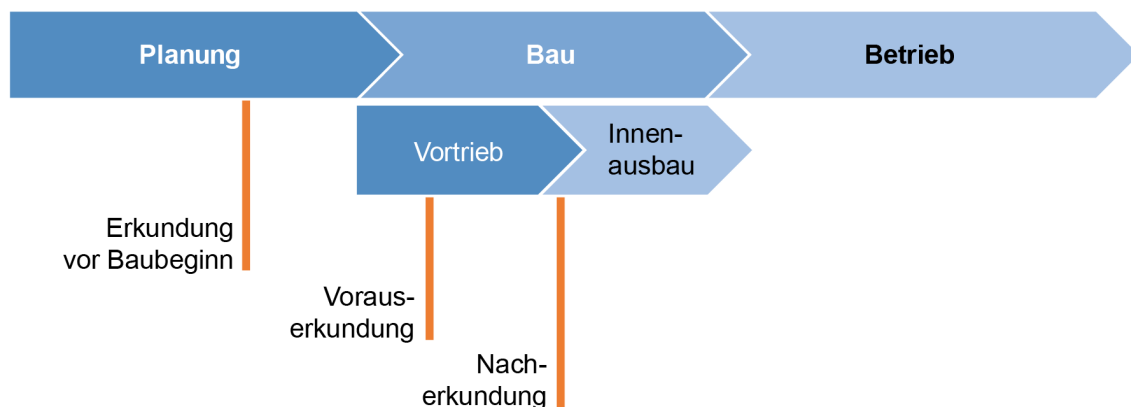


Fig. 3-1: Jede Projektphase weist eigene Untersuchungsziele auf, weshalb in den einzelnen Projektphasen jeweils geeignete Untersuchungsmethoden eingesetzt werden

Heute stehen verschiedene Methoden mit unterschiedlichen Detektionsmöglichkeiten zur Verfügung (z.B. Waltham et. al 2005, Smith 2005, Kirschke et al. 2011, Filipponi et al. 2012, Benson & Yuhr 2016, Chalikakis et al. 2011, Jeannin et al. 2015, Bin et al. 2017). Die Auswahl der geeigneten Erkundungsmethode oder einer Kombination von Methoden hängt vom Detektionsziel, den räumlichen Gegebenheiten (z.B. in welcher Tiefenlage erkundet werden soll) und der Grösse des zu erkundenden Gebirgsvolumens ab. Daneben werden auch wirtschaftliche Überlegungen und Bauabläufe bei der Methodenauswahl berücksichtigt.

Die Detektionsmethoden lassen sich unter anderem gruppieren anhand:

- der gemessenen Gebirgseigenschaften (z.B. Dichte, seismische Wellengeschwindigkeit, elektrischer Widerstand etc.)
- der Erkundungstiefe/-radius und der Auflösung (z.B. Hohlräume mit einem Durchmesser > 1 m in einer Distanz von 10 bis 30 m)
- des Messstandorts und der räumlichen Anordnung des Messsystems (2)

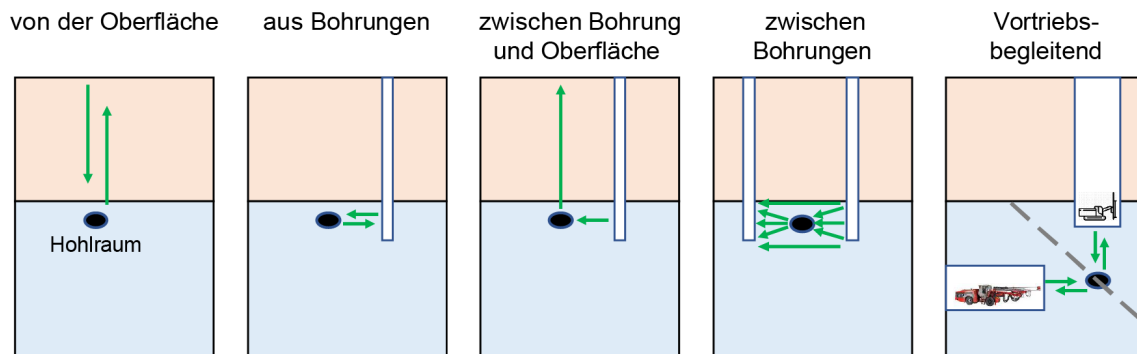


Fig. 3-2: Darstellung der unterschiedlichen Messanordnungen für die Karsthohlräumdetektion

In Tab. 3-1 wird eine Auswahl von Methoden mit zugehörigen Detektionsmöglichkeiten vorgestellt. Die Tabelle, respektive Fig. 3-3 zeigen, dass mit den heute verfügbaren Hohlräumdetektionsmethoden zwar nicht alle Karsthohlräume in einem Untersuchungsgebiet detektiert werden können, die grösseren Hohlräume, die zu grösseren Karstwasserzutritten führen können, sind jedoch detektierbar. Es ist zu erwarten, dass die technischen Entwicklungen der nächsten Jahre die Detektionssicherheit weiter verbessern werden.

Die Detektion von Hohlräumen ist mit Bohrungen möglich, wobei zur sicheren Hohlräumdetektion eine sehr grosse Anzahl von systematisch angeordneten Bohrungen mit dem Ziel eines Direktaufschlusses nötig wäre (z.B. Xu & Yan 2004, Ziegler 2008), weshalb ein entsprechendes Erkundungsprogramm, das nur auf wenigen Erkundungsbohrungen basiert, oft nur bedingt erfolgreich ist (z.B. Xeidakis et al. 2004).

Die Interpretation von geophysikalischen Messungen erlaubt es, Verdachtszonen abzuleiten, welche stets durch eine zweite unabhängige Methode bestätigt werden sollten (z.B. Benson & Yuhr 2016). Ein übliches Vorgehen ist die Überprüfung der geophysikalischen Verdachtszonen durch gezieltes Anbohren (z.B. Kielbassa et al. 2015).

Die Auswahl der geeigneten Detektionsmethoden hängt neben dem Erkundungsziel wesentlich von der geometrischen Anordnung und Linienführung des zu erkundenden Bauwerks ab. So lassen sich z.B. an einem Schachtstandort bereits vor Baubeginn die meisten Bohrlochmethoden von der Oberfläche aus anwenden. Dies ist entlang einer Zugangsrampe jedoch nur vortriebsbegleitend wirtschaftlich umsetzbar. Hinzu kommt, dass bei einer Rampe – geometrisch bedingt – der zu erkundende verkarstete Gebirgsbereich volumenmässig um ein Vielfaches grösser ist als bei einem Schachtbauwerk.

Tab. 3-1: Zusammenstellung von Karsthohlraumdetektionsmethoden und die zu erwartende Detektionsauflösung

Methode zur Karsthohlraumdetektion		Messung von der Oberfläche	Messung aus dem Bohrloch	Messung zwischen Oberfläche und Bohrloch	Messung zwischen Bohrungen	Messung aus dem Vortrieb
Bohrung	Detektionsradius	Bohrdurchmesser	-	-	-	Bohrdurchmesser
	Detektionsgrösse	> mm	-	-	-	> mm
	Bei den Bohrungen handelt sich um die einzige hier aufgeführte Erkundungsmethode, die einen direkten Nachweis des Vorhandenseins eines Karsthohlraumes ermöglicht. So werden Bohrungen auch eingesetzt, um mittels geophysikalischer Methoden identifizierte Verdachtskörper hinsichtlich des tatsächlichen Vorhandenseins von Hohlräumen zu überprüfen (z.B. Kirschke et al. 2011). Die Bohrungen können von der Oberfläche oder aus dem Vortriebsbereich angelegt werden. Anhand des Bohrverfahrens wird zwischen zerstörenden und gekernten Bohrungen unterschieden (ggf. mit Preventer). Während bei Kernbohrungen die Hohlräume im Bohrkern beschrieben werden können, können in destruktiven Bohrungen die Hohlräume anhand von Loggingverfahren (z.B. optical oder acoustic Imager) kartiert werden (z.B. Pesendorfer & Löw 2007, Ziegler 2008). Das Anbohren der Hohlräume ermöglicht auch, diese mit zusätzlichen Methoden zu erkunden (z.B. Vermessung grosser Hohlräume über das Bohrloch durch Laser- oder Echolotvermessung) oder hydraulisch zu charakterisieren (z.B. durch hydrogeologische Bohrlochversuche) (z.B. Blumtritt & Heyn 2004). Der Erkundungsradius einer Bohrung beschränkt sich auf das unmittelbare Bohrloch, dafür ist die Detektion von Lösungshohlräumen > mm Durchmesser möglich. Bohrungen erlauben es ebenfalls, Trennflächen zu erkennen und zu kartieren, die bevorzugt verkarstet sind, sogenannte Initialfugen (z.B. Lowe 1992, Filippini et al. 2009).					
Seismische Methoden	Erkundungsradius	-	-	-	10 – 20 m	15 – 25 m
	Auflösung				ca. 1 m ²	(ca. 1 m ²)
	Unter seismischen Methoden werden geophysikalische Verfahren zur Untersuchung des Baugrunds durch natürlich oder künstlich ausgelöste elastische Wellen zusammengefasst, die sich durch das Gebirge ausbreiten und von Empfängern aufgezeichnet werden. Zur Detektion von Karsthohlräumen können die seismischen Methoden von der Oberfläche, von einem Bohrloch, zwischen Bohrloch und Oberfläche, zwischen mehreren Bohrlöchern oder vom Vortrieb aus angewendet werden (z.B. Peng et al. 2021, Dickmann 2005). Die Methoden von der oder zur Oberfläche werden in diesem Bericht nicht weiter ausgeführt, da die Distanz zu den Malmkalken zu gross ist, um Karsthohlräume zu detektieren. Bei der seismischen Cross-Hole-Tomographie werden Sender und Empfänger in benachbarten Bohrungen installiert. Durch systematisches Verschieben der Sender- und Empfängerpositionen entlang der Bohrlöcher ist eine Vielzahl an Messanordnungen möglich. Die gesammelten Daten werden zu einem zweidimensionalen Modell ausgewertet, was eine räumliche Positionierung und Orientierung und Ausdehnung der detektieren Hohlräume ermöglicht. Bei Bohrlochabständen von rund 10 m können so in einem kompakten Kalkstein wassergefüllte Hohlräume im Meter-Bereich detektiert werden. Bei hochfrequenten Signalen sind auch geringere Hohlraumgrössen im mehrere Dezimeter-Bereich detektierbar, wobei die Eindringtiefe respektive die Bohrlochabstände signifikant reduziert sind (z.B. Maurer et al. 2000). Analog der Bohrlochseismik werden bei der Tunnelseismik die Sender und Empfänger in einem sich im Bau befindendem Tunnel installiert. Die Anordnung ist so, dass der Bereich vor der Ortsbrüst erkundet werden kann. In den letzten Jahren wurden verschiedene Systeme entwickelt (z.B. ITA 2018), mit denen erfolgreich nur grössere, gegenüber der Tunnelachse streichende Karsthohlräume erkundet wurden.					

Tab. 3-1: Fortsetzung

Methode zur Karsthohlraumdetektion		Messung von der Oberfläche	Messung aus dem Bohrloch	Messung zwischen Oberfläche und Bohrloch	Messung zwischen Bohrungen	Messung aus dem Vortrieb
Sonic Imaging	Erkundungs-radius	-	<15 m	-	-	-
	Auflösung		ca. 0.08 m ² (bei rund 5 m Erkundungsradius)			
Beim Sonic Imaging handelt es sich um eine Untersuchungsmethode, bei der mittels Schall-reflexionen der Nahbereich einer Bohrung untersucht wird (z.B. Kumar et al. 2019, Wielemaker & Garrard 2021). Die Methode wird eingesetzt, um Trennflächen zu kartieren, findet aber auch zur Detektion von Karsthohlräumen Anwendung (z.B. Liu et al. 2020). Mit dem Sonic Imaging kann ein Gebirgsbereich von bis zu 15 m erkundet werden. Die Auflösung bezüglich Karsthohlraumdetektion nimmt mit der Eindringtiefe ab von einigen 10er cm² im Nahbereich rund 1 m² in Distanzen von mehreren Metern.						
Georadar	Erkundungs-radius	-	ca. 20 m	-	10 m	10 – 20 m
	Auflösung		ca. 0.1 m ² (bei rund 5 m Erkundungsradius)		ca. 0.5 m ²	ca. 1 m ²
Unter elektromagnetischen Verfahren werden im weiteren Sinn alle geophysikalischen Methoden zusammengefasst, welche die Erkundung der elektrischen Leitfähigkeits- und Dielektrizitätskonstantenverteilung im Untergrund zum Ziel haben. Dazu zählt unter anderem die Georadar-Methode, bei welcher hochfrequente elektromagnetische Wellen emittiert und deren Laufzeiten und Amplituden gemessen werden, die von dielektrischen Diskontinuitäten an Gesteinsgrenzen und auch Karsthohlräumen reflektiert werden (z.B. Schmidt et al. 2017). Die Georadare erreichen in kompakten Kalksteinen eine Erkundungstiefe von rund 10 bis 20 m, weshalb das Verfahren aus Bohrungen oder aus dem Vortrieb zum Einsatz kommen könnten. Bei der Georadar-Reflexions-Methode im Bohrloch werden ein Sender und ein Empfänger im gleichen Bohrloch eingeführt. Das Auflösungsvermögen hängt von der Erkundungstiefe ab. Bei einer Erkundungstiefe von rund 5 bis 10 m werden idealerweise Karsthohlräume > 0.1 m² detektiert. Bei geringeren Erkundungstiefen können auch Hohlräume mit einigen wenigen dm² Querschnittsfläche erkannt werden (z.B. Richter et al. 2008). Durch den Georadar-Einsatz in nur einem Bohrloch ist keine Beschreibung der räumlichen Lage und Ausdehnung des Hohlraumes möglich (z.B. Schmidt et al. 2017, 2021). Mit der cross-hole Georadar-Anordnung wird das Gebirge zwischen mehreren Bohrungen bezüglich der elektromagnetischen Geschwindigkeits- und Dämpfungsverteilung erkundet. Die gesammelten Daten werden zu einem dreidimensionalen Modell zusammengefügt, was eine räumliche Positionierung, Orientierung und Ausdehnung der detektieren Hohlräume ermöglicht. Bei einem Bohrlochabstand von rund 5 m ist mit einer Auflösung bezüglich Karsthohlräume von rund > 0.05 m² zu erwarten (z.B. Richter et al. 2008, Maurer et al. 2000, Schmidt et al. 2017, 2021). Der Einsatz von Georadar aus dem Tunnel erlaubt es, im Tunnel-Nahbereich oder vor der Ortsbrust Karsthohlräume zu detektieren. Die Erkundungstiefe und das Auflösungsvermögen ist mit dem «einfach» Bohrlochgeoradar vergleichbar (z.B. Schmidt et al. 2017).						

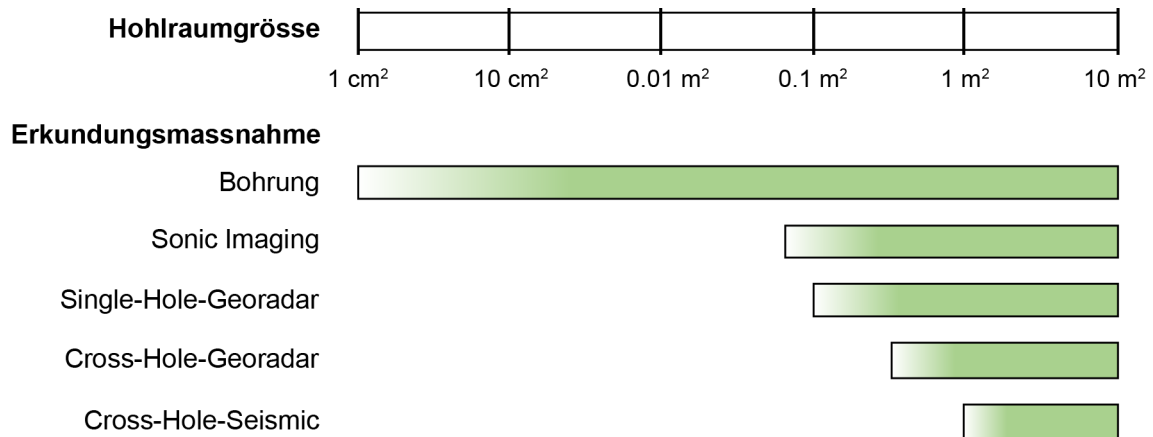


Fig. 3-3: Schematische Darstellung des Detektionspotentials von wassergefüllten Karsthöhlräumen

Annahmen zum Erkundungsradius: bei Bohrungen der Bohrdurchmesser, bei einbohrlochgeophysikalischen Methoden 5 m, bei Cross-Hole-Methoden 10 m

Mit den verfügbaren Hohlraumdetektionsmethoden und den Erkundungsbedingungen (z.B. bis zu 500 m unterhalb der Oberfläche) können im Radius von einigen Metern wassergefüllte Karsthöhlräume grösser rund 0.1 m² detektiert werden (Fig. 3-3). Als "Detektionslücke" sind daher Hohlräume kleiner 0.1 m² zu betrachten, die auf eine Entfernung von einigen Metern um eine Bohrung mit den heutigen Methoden nicht detektiert werden können. Es ist jedoch zu erwarten, dass die technischen Entwicklungen der nächsten Jahre die Detektionssicherheit weiter verbessern werden.

4 Beherrschung von Karstwasserzutritten während der Bauphase

Im Kapitel 2.1 wurde gezeigt, dass an den Schachtstandorten in Nördlich Lägern und Zürich Nordost das Anfahren von wassergefüllten Karsthohlräumen nicht erwartet wird, aber nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.

Karstwasserzutritte können in der Bauphase durch verschiedene Massnahmen vermieden oder auf ein bautechnisch akzeptables Mass reduziert werden (Fig. 4-1). Die Massnahmen lassen sich unterteilen in:

- Massnahmen während der Planung (Kapitel 4.1)
- Massnahmen vor Vortriebsbeginn (Kapitel 4.2)
- Massnahmen während dem Vortrieb (Kapiteln 4.3)
- Massnahmen im Zuge des Innenausbaus (Kapitel 4.4)

Eine nachhaltige, bautechnisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung ist in vielen Fällen eine projektspezifische Kombination von Massnahmen in verschiedenen Projektphasen. In diesem Bericht werden die grundlegenden Methoden skizziert und gezeigt, wie karstbedingte Wasserzutritte aus bautechnischer Sicht beherrscht werden können.

Verschiedene Massnahmen zur Beherrschung von Karstwasserzutritten sind angepasst auch für andere Arten von Wasserzutritten anwendbar (z.B. bei Wasserzutritten aus Störungszonen). Auf diesen Umstand wird bei der Beschreibung der Massnahmen nicht explizit eingegangen.

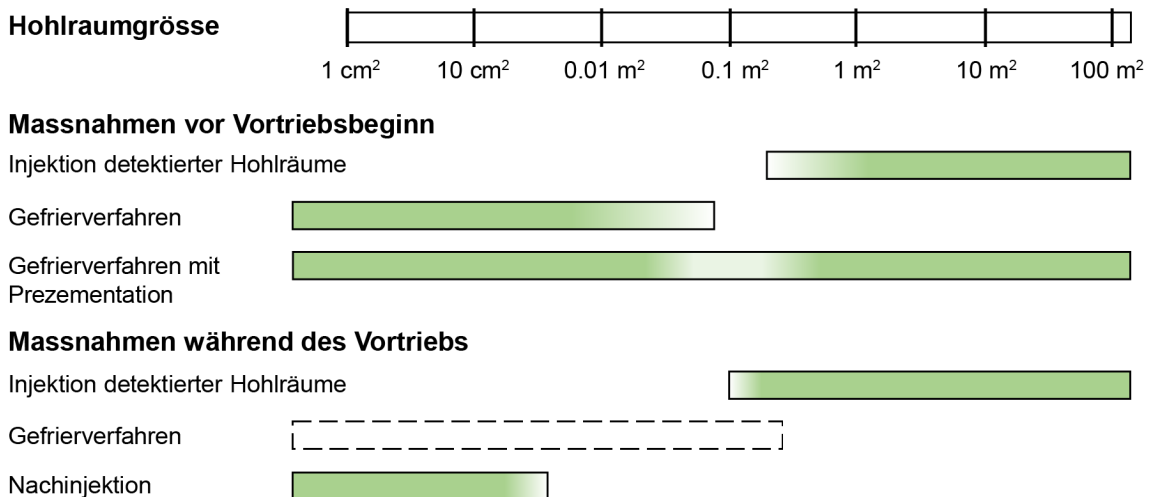


Fig. 4-1 Überblick über die bautechnischen Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten in Abhängigkeit von der Hohlraumgrösse

Quellenangaben zu den einzelnen Methoden sind in den entsprechenden Unterkapiteln zu finden.

4.1 Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten während der Planung

In erster Linie soll Gefährdungen ausgewichen werden. Durch Karstgefährdungs-Prognosemethoden (z.B. Filipponi et al. 2012) lassen sich Gebirgsbereiche mit erhöhter Vorkommenswahrscheinlichkeit von Karsthohlräumen abgrenzen und bei der Planung berücksichtigen. Dies erlaubt es, bei der Festlegung der Linienführung eines Bauwerks darauf zu achten, dass Bereiche mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit von Karsthohlraumvorkommen gemieden werden oder nur über eine kurze Distanz durchfahren werden. Ergänzend werden für diese Bereiche ein Erkundungsprogramm und Bauhilfsmassnahmen geplant.

Die Wahl der Vortriebsmethode und der Bauhilfsmassnahmen für den Vortrieb durch wasserführende Gesteinseinheiten sind miteinander verknüpft. Es wird davon ausgegangen, dass ein Schacht in den Standortgebieten entweder im Sprengvortrieb oder mit einer Schachtbohrmaschine abgeteuft wird. Bauhilfsmassnahmen zur Reduktion von Wasserzutritten bei einem Vortrieb mit einer Schachtbohrmaschine werden dabei bevorzugt von der Oberfläche aus ausgeführt. Das Abteufen im Sprengvortrieb bietet eine höhere Flexibilität, da der Vortriebsbereich uneingeschränkt für das Anwenden von Bauhilfsmassnahmen zugänglich ist, wobei auch hier bevorzugt Bauhilfsmassnahmen vorgängig zum Vortrieb direkt ab der Oberfläche ausgeführt werden, um den Vortrieb nicht unterbrechen zu müssen.

Das Auffahren einer Rampe kann ebenfalls sowohl konventionell (z.B. Sprengvortrieb) als auch maschinell mit einer Tunnelbohrmaschine erfolgen. In Gegensatz zu einem konventionellen Vortrieb ist der Zugang zur Ortsbrust bei einem maschinellen Vortrieb stark eingeschränkt, sodass der Einsatz von vortriebsbegleitenden Bauhilfsmassnahmen zur Reduktion des Wasserzutritts nur bedingt möglich ist.

Je nach Zugangsconfiguration, gewählter Vortriebsmethode, den geologischen Verhältnissen entlang der Bauwerksachse und einer Kosten-Risiko-Beurteilung:

- werden ausschliesslich Massnahmen vor Vortriebsbeginn ausgeführt (vgl. Kapitel 4.2.1, 4.2.2)
- wird eine Kombination aus Massnahmen vor Vortriebsbeginn, vortriebsbegleitend (vgl. Kapitel 4.3.1 und 4.3.2) und dem Vortrieb nachlaufend angewendet (vgl. Kapitel 4.3.3)

Schliesslich besteht auch die Möglichkeit, komplett auf Baumassnahmen vor Vortriebsbeginn zu verzichten; dies vor allem dann, wenn Erkundungen vor Baubeginn entlang der Bauwerksachse die aktuelle Karstprognose erhärten sollten.

Da die Abdichtungsmassnahmen von zentraler Bedeutung für sicheres und wirtschaftliches Erstellen und Betreiben der Zugangsbauwerke sind, wird durch entsprechende organisatorische Massnahmen sichergestellt, dass die geforderte Ausführungsqualität erreicht wird.

4.2 Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten vor Vortriebsbeginn

Mit den Massnahmen vor Vortriebsbeginn sollen allfällige Karstwasserzuflüsse zu dem noch zu erstellenden Hohlraum auf ein Mass verringert werden, welches den Vortrieb nicht verhindert.

Vor Vortriebsbeginn bedeutet, dass Massnahmen von der Oberfläche ausgeführt werden. Diese Massnahmen haben u.a. die folgenden Vorteile gegenüber vortriebsbegleitender oder -nachlaufender Massnahmen:

- Sie werden in weitgehend ungestörten Gebirgsverhältnissen eingesetzt (z.B. keine erhöhte hydraulischen Gradienten zum Ausbruchsrund).
- Sie behindern oder stoppen einen laufenden Vortrieb nicht.

Es kann zwischen systematischen und gezielten Massnahmen unterschieden werden. Systematische Massnahmen werden unabhängig von den vorkommenden Gebirgsverhältnissen ausgeführt. Gezielte Massnahmen kommen nur lokal zum Einsatz, z.B. in Bereichen mit einer erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit. Oft wird eine Kombination der beiden Methoden eingesetzt.

Zur Abdichtung des Baugrundes können sowohl Injektionen (Kapitel 4.2.1) als auch das Gefrierverfahren (Kapitel 4.2.2) als Bauhilfsmassnahmen angewendet werden. Dabei können Injektionen sowohl systematisch als auch gezielt eingesetzt werden. Das Gefrierverfahren kann nur systematisch eingesetzt werden.

4.2.1 Injektionen von der Oberfläche

Bei Injektionsarbeiten von der Oberfläche aus wird unter Druck ein Injektionsmittel in die Hohlräume eines Gebirgsbereichs gepresst, um diesen abzudichten oder zu verfestigen (z.B. Schwalt et al. 2014).

Das Ziel der Injektionsarbeiten ist es, das Gebirge so weit abzudichten, dass im Bereich des Ausbruchsvolumens während des Vortriebs keine Karstwasserzutritte zu erwarten sind, die den Vortrieb verhindern. Dieser Bereich umschliesst sowohl den auszubrechenden als auch den umschliessenden Gebirgsbereich, in dem Felsanker zu liegen kommen könnten. Je nach Tiefenlage der verkarsteten Gesteinseinheiten in den Standortgebieten sind Bohrungen z.B. in der Region Nördlich Lägern von bis zu 500 Meter Tiefe erforderlich.

Der Erfolg von Injektionsarbeiten hängt dabei vom Injektionsziel und der Erbohrbarkeit der wasserführenden Strukturen ab (z.B. Marinos 2001). In einem (Paläo-)Karstaquifer sind das naturgemäss einerseits wasserführende Trennflächen und andererseits wasserführende Karsthohlräume (Fig. 4-2) (z.B. Goeppert & Goldscheider 2019). Insbesondere das Abdichten von Karsthohlräumen stellt eine Herausforderung dar. Obschon Karsthohlräume hydraulisch oft mit den umgebenden Trennflächen verbunden sind, ist ein Injektionserfolg meist nur durch direktes Anbohren und Ausinjizieren des Karsthohlraums möglich (Fig. 4-2).

Das direkte Anbohren von Karsthohlräumen hängt einerseits von der Detektierbarkeit der Hohlräume (Kapitel 3) als auch von der Bohrgenauigkeit ab. Bei einer Bohrgenauigkeit von rund 1 % bei einer Bohrgenauigkeitskontroll-Häufigkeit alle 50 m würde dies Hohlräumen mit einem Querschnittsdurchmesser grösser 0.5 m entsprechen. Aus diesem Grund können mit Injektionen von der Oberfläche nicht alle allfällig vorkommenden, bautechnisch relevanten, wasserführenden Karsthohlräume abgedichtet werden.

Injektionsarbeiten zur Abdichtung von Karsthohlräumen sind auf hohe Durchlässigkeiten und der Verbundenheit des Karströhrensystems angewiesen. Dennoch ist es möglich, mit geeigneten

Injektionsmitteln und -konzepten angebohrte Karsthohlräume erfolgreich abzudichten (z.B. Milanović 2000, Warner 2004).

Für das Injizieren von Karsthohlräumen stehen heute verschiedene Injektionsmittel zur Verfügung (z.B. BASF 2011). Unter den gegebenen Randbedingungen ist der Einsatz von zementösen Injektionsmitteln vielversprechend. Durch Zugabe von chemischen Zusatzmitteln kann zudem bei grösseren Hohlräumen ein Auswaschen verhindert werden (z.B. Wannenmacher et al. 2021). Bei sehr grossen Hohlräumen sind zusätzliche Behelfsmassnahmen nötig. Dazu zählt beispielsweise das Vorverfüllen des Hohlraumes mit Rollkies. Die aufschäumenden chemischen Injektionsmittel, die heute zum Abdichten von Wassereintritten aus offenen Strukturen angewendet werden, sind im Falle der hier diskutierten Karsthohlräume nicht zielführend anwendbar, da der Wasserdruck in der entsprechenden Tiefe ein Aufschäumen des Injektionsmittels verhindert.

Der Ansatz des Injizierens von detektieren Karsthohlräumen von der Oberfläche aus ist sowohl bei einem Schacht- als auch bei einem Rampenbauwerk möglich, wobei der Aufwand bei einer Rampe wesentlich grösser ist. Injektionen von der Oberfläche wurden für den Schachtbau in verschiedenen Projekten erfolgreich im verkarteten Untergrund eingesetzt, z.B. Tara Zinkmine Boliden AG (Irland), Wasserkraftwerk Uma Oya (Sri Lanka).

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass Injektionen von der Oberfläche aus für grössere, detektierte Hohlräume ($> 0.25 \text{ m}^2$) erfolgreich einsetzbar sind (Fig. 4-1). Der Aufwand, kleinere und nicht detektierte Hohlräume mittels eines systematischen Bohrrasters anzubohren und zu injizieren, ist sehr gross und in der Praxis nicht umsetzbar. Da in den Standortgebieten keine aktiven Karstaquifere mit hohen Fliessgeschwindigkeiten in den Karsthohlräumen erwartet werden, sondern ein Paläo-Karstaquifer mit einer limitierten Konduktivität und sehr kleinen Grundwasserfliessgeschwindigkeiten, sind grundsätzlich gute Voraussetzung für eine Injektion detektierter Karsthohlräume gegeben.

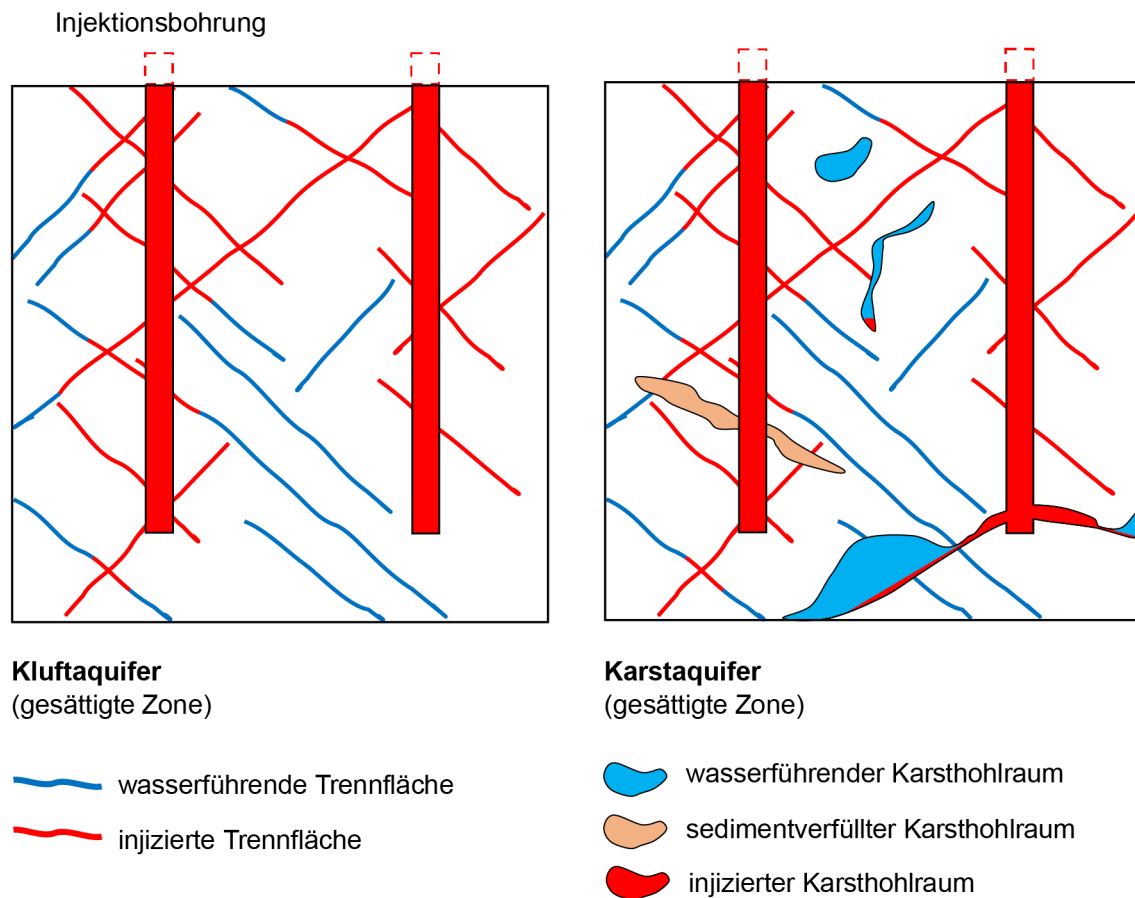


Fig. 4-2: Injektionsarbeiten in einem (Paläo-)Karstaquifer unterscheiden sich von Arbeiten in einem Kluftaquifer durch das Vorhandensein von Karsthohlräumen, die meist nur durch direktes Anbohren und Injizieren erfolgreich abgedichtet werden können

4.2.2 Gefrierverfahren von der Oberfläche

Gefrierverfahren eignen sich für eine temporäre Verfestigung und Abdichtung eines wasser-gesättigten Gebirges im räumlichen Umfeld eines Bauwerkes (z.B. Orth 2019). Dafür werden in einem systematischen Raster Bohrungen abgeteuft, und nach dem Wärmetauscherprinzip wird dem Gebirge Wärme entzogen und damit das Gebirgswasser gefroren. Als Abkühlflüssigkeit wird üblicherweise Chlor-Calcium-Sole mit ca. $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder flüssiger Stickstoff mit einer Siedetemperatur von $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet.

Mit dem Gefrierverfahren von der Oberfläche aus kann das Gebirge so weit abgedichtet werden, dass im Bereich des Ausbruchsvolumens keine bautechnisch relevanten Wasserzutritte während des Vortriebs mehr vorkommen. Dieser Bereich umschliesst sowohl Teile des auszubrechenden als auch des diesen umschliessenden Gebirgsbereichs. Im Gegensatz zu Injektionsmassnahmen wird das Gefrierverfahren nur bedingt an einzelnen Karsthohlräumen angewendet werden. Es wird ein grösserer geschlossener Gefrierkörper hergestellt, in dessen Schutz der Vortrieb erfolgt. Beim Gefrierverfahren wird der Gefrierkörper über die gesamte Dauer der Vortriebsarbeiten so lange aufrechterhalten, bis das Bauwerk mit einer druckwasserhaltenden Vollabdichtung fertig gebaut ist.

Voraussetzung für die Anwendung des Gefrierverfahrens ist, dass die Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers gering ist (z.B. Alzoubi et al. 2020). Da in Karströhren wesentlich höhere hydraulische Durchlässigkeiten und Fliessgeschwindigkeiten als nur geklüftete Gebirgsbereiche aufweisen, wird das Gefrierverfahren in einem aktiven Karstaquifer nur selten eingesetzt. Hingegen weist ein Paläo-Karstaquifer, wie er in den Standortgebieten erwartet wird, das Verhalten eines Kluftaquifers auf. Die Karsthohlräume in einem Paläo-Karstaquifer sind zum Teil mit Sedimenten verfüllt, weshalb die karstaquifertypischen hydraulischen Eigenschaften unterdrückt sind. Lokal könnten diese jedoch noch erhalten sein. Aus der zum Teil unterbrochenen Konduktivität des Paläo-Karströhrensyste.ms und dem sehr kleinen hydraulischen Gradienten resultieren im noch nicht durch den Vortrieb gestörten Gebirge sehr geringe Fliessgeschwindigkeiten in den Karsthohlräumen.

Um den Gefrieraufwand zu reduzieren, kann vor dem Einbau der Gefrierrohre die Gebirgsdurchlässigkeit durch Injektionen im zu gefrierenden Gebirge verringert werden (z.B. Dorn & Kaledin 2013). Dieses Vorgehen mit systematisch angeordneten Bohrungen hat sich in Poren- und Kluftaquiferen bewährt, ist jedoch im verkarsteten Gebirge bedingt anwendbar (vgl. Kapitel 4.2.1). Bei einem verkarsteten Untergrund werden zusätzlich grössere Karsthohlräume detektiert, direkt erbohrt und vor dem Gefrieren durch Injektionen verfüllt (vgl. Kapitel 4.2.1).

Im Gegensatz zu Injektionsmassnahmen ist es beim Gefrierverfahren nicht zwingend notwendig, die wasserführenden Karsthohlräume anzubohren, um einen Massnahmenerfolg zu haben. Das Gefrieren des Wassers in einem Karsthohlraum ist auch über eine Materialbrücke hinweg möglich, wobei mehr Energie (Zeit) aufgewendet werden muss, als wenn die wasserführenden Strukturen direkt erschlossen sind. Dabei hängt der Gefrieraufwand auch von der Hohlraumgrösse, der Gebirgstemperatur und der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges ab.

Mit dem Gefrierverfahren in Kombination mit vorgängigem Injizieren des Baugrundes werden auch Schächte von mehr als 800 m Tiefe aufgefahen (z.B. Dorn & Kaledin 2013, van Heyden & Wegner 2015).

Die rein technische Anwendung des Gefrierverfahrens von der Oberfläche ist an und für sich sowohl für ein Schacht- als auch ein Tunnelbauwerk möglich. Die Anwendung im verkarsteten Baugrund der Standortgebiete ist jedoch nur für ein Schachtbauwerk sinnvoll umsetzbar, da der Ausbruch eines Bauwerkes im vorgängig erstellten Gefrierkörper erfolgt. Ein solcher Gefrierkörper für eine lange Rampe wäre nur mit hohem Aufwand realisierbar.

Es kann festgehalten werden, dass das Gefrierverfahren von der Oberfläche mit senkrecht abgeteufte.n Bohrungen mit entsprechendem Aufwand für den Schachtbau erfolgreich einsetzbar ist. Kleinere, nicht direkt angebohrte Hohlräume werden dabei über Materialbrücken ebenfalls Teil des Gefrierkörpers. Um den Gefrieraufwand zu reduzieren, werden grössere, detektierte Hohlräume vorab mittels Injektionen verfüllt.

4.3 Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten während des Vortriebs

Auch während des Vortriebs stehen verschiedene Massnahmen zur Verfügung, um Wasserzutritte zum aufgefahrenen Hohlraum zu minimieren. Es kann zwischen Massnahmen unterschieden werden, die während des Vortriebs vorausseilend und nachlaufend ausgeführt werden. Das Ziel von vorausseilenden Massnahmen ist es, sicherzustellen, dass das Anfahren von Karsthohlräumen nicht zu Wasserzutritten führt, die den Vortrieb behindern, weil die Förderleistung der installierten Pumpen nicht reicht, das Bergwasser abzufördern. Die dem Vortrieb nachlaufenden Massnahmen haben zum Ziel, den Wasserzutritt so weit zu reduzieren, dass für den Bau der Innenschale günstige Verhältnisse geschaffen werden. Konkret können folgende Massnahmen – auch kombiniert – eingesetzt werden:

- vorausseilende Massnahmen:
 - vorausseilende Injektionen (Kapitel 4.3.1)
 - vorausseilende Gefrierverfahren (Kapitel 4.3.2)
- nachlaufende Massnahmen:
 - Nachinjektionen (Kapitel 4.3.3)

Die Massnahmen sind mit Einschränkungen sowohl für Schacht- als auch für Tunnelbauwerke mit unterschiedlichen Vortriebsmethoden anwendbar.

4.3.1 Dem Vortrieb vorausseilende Injektionen

Vorausseilende Injektionen sind sowohl bei einem Schacht- als auch einem Tunnelbauwerk als Massnahme einsetzbar. Bei dem Vortrieb vorausseilenden Injektionen werden von der Schachtsohle oder Tunnelortsbrust aus in Vortriebsrichtung Bohrungen erstellt und ein Injektionsmittel wird verpresst, um das Gebirge abzudichten (in der Regel über ca. 15 bis 25 m lange Bohrungen) (z.B. BASF 2011). Bei einer systematischen Anordnung der Injektionsbohrungen wird auch von «Cover-Drilling» gesprochen. Dieser Ansatz hat sich in Poren- oder Kluftaquiferen bewährt, ist aber im Falle eines (Paläo-)Karstaquifers häufig nur bedingt zielführend (z.B. Reichl et al. 2009), da die Wahrscheinlichkeit, einen kleinräumigen Karsthohlraum mit systematischen Bohrungen anzubohren, gering ist. In einem verkarsteten Gebirge wird deshalb oft eine systematische «Vorausinjektion» in Kombination mit einem gezielten Anbohren und Injizieren von zuvor detektierten Karsthohlräumen ausgeführt (vgl. Kapitel 3).

Während bei den Injektionsbohrungen von der Oberfläche (Kapitel 4.2.1) die in der Tiefe vorherrschenden Wasserdrücke von untergeordneter Bedeutung sind, spielen diese bei den vorausseilenden Bohrungen aus der Schachtsohle oder der Tunnelortsbrust eine bedeutende Rolle. Die Wasserdrücke in den verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten machen es erforderlich, dass die Bohrungen mit Preventer ausgeführt werden, um einen unkontrollierten, unter Druck stehenden Wasserzufluss zum im Bau befindlichen Bauwerk zu verhindern (z.B. Aeschbach 2004, Wannenmacher et al. 2022).

Welche Karsthohlräume vorausseilend abgedichtet werden können, hängt einerseits von den Detektionsmöglichkeiten und den Möglichkeiten, diese Hohlräume anzubohren, ab. Von der Ortsbrust sind wassergefüllte Karsthohlräume grösser 0.1 m² detektierbar (vgl. Kapitel 3) und auf kurze Bohrdistanz auch anzubohren. Daher kann angenommen werden, dass unter heutigen technischen Voraussetzungen vorausseilend solche Hohlräume detektiert, angebohrt und injiziert werden können (Fig. 4-2).

Die Injektionsarbeiten in kurzen Bohrungen sind in der Regel einfacher durchzuführen als in langen Bohrungen (Kapitel 4.2.1). Besonders die geringere Pumpdistanz erlaubt es, flexibler und schneller auf die Gebirgsverhältnisse und die Injektionsverläufe zu reagieren, wobei die grundsätzlichen Hausforderungen von Injektionsarbeiten im verkarsteten Baugrund unverändert bestehen bleiben (vgl. Kapitel 4.2.1).

Vorausseilende Injektionen aus dem Vortrieb bedingen immer eine Unterbrechung der Vortriebsarbeiten. Eine gewisse Limitierung ist bei maschinellen Vortrieben gegeben, da der Zugang zur Ortsbrust durch den Bohrkopf behindert wird, was insbesondere beim gezielten Anbohren von detektierten Karsthohlräumen eine grosse Erschwernis darstellt.

Vorausseilende Injektionen erlauben im systematisch Bohrraster angewendet, das Abdichten von Wasserzutritten aus dem Kluftsystem. Um Karsthohlräumen abzudichten, müssen diese zuerst detektiert werden, um gezielt angebohrt und injiziert zu werden. Den beschränkten Detektionsmöglichkeiten ist es geschuldet, dass im Kontext der verkarsteten Gesteinseinheiten in den Standortgebieten durch vorausseilende Injektionen nicht alle bautechnisch relevanten Karstwasserzutritte ausgeschlossen werden können. Dennoch stellen bei Schachtbauwerken vorausseilende Injektionen eine alternative oder ergänzende Massnahme zu den Massnahmen von der Oberfläche dar. Im Rampenbau stellen vorausseilende Injektionen oft die einzige wirtschaftliche Lösung dar, um den verkarsteten Baugrund für den Vortrieb abzudichten.

4.3.2 Dem Vortrieb vorausseilendes Gefrierverfahren

Das in Kapitel 4.2.2 beschriebene Gefrierverfahren lässt sich je nach geologischen Verhältnissen, Projekt und Linienführung auch beim Schachtbau dem Vortrieb vorausseilend umsetzen (z.B. Orth 2019, Dorn & Kaledin 2013). Dafür wird der Vortrieb gestoppt, Nischen für die Installation der Gerätschaften für das Gefrieren ausgebrochen und die Bohrungen für das Gefrieren ausgeführt. Es gelten die gleichen methodischen Prinzipien wie bei einer Ausführung von der Oberfläche.

Im Gegensatz zu Bohrungen von der Oberfläche müssten die Bohrungen für das vorausseilende Gefrierverfahren im hydrogeologischen Kontext der Standortgebiete mit Preventer ausgeführt werden, um einen unkontrollierten Wasserzufluss jederzeit verhindern zu können.

Das Gefrierverfahren wird üblicherweise nur vortriebsvorausseilend in Streckenvortrieben (Tunnelbau) mit einer kurzen Gefrierstrecke angewendet (z.B. Albula-Tunnel II). Bei langen Gefrierstrecken sind bautechnisch mehrere Gefrier- und Vortriebsetappen nötig, da längere horizontale Bohrungen nicht mit der nötigen Bohrgenauigkeiten durchgeführt werden können. Der Einsatz des vorausseilenden Gefrierverfahrens eignet sich deshalb nur für die Durchörterung klar definierter, relativ kurzer Abschnitte und wird deshalb kaum als Massnahme über längere Distanzen eingesetzt (z.B. Niu et al. 2022).

Für den Bau eines Schachts stellt das dem Vortrieb vorausseilende Gefrierverfahren keine echte Alternative dar, wenn der Baugrund mittels einer Gefrierkampagne von der Oberfläche aus vor Vortriebsbeginn abgedichtet werden kann.

Ein dem Vortrieb vorausseilendes systematisches Gefrieren des Baugrunds über einen längeren Streckenabschnitt wird deshalb – Stand heute – weder für den Schacht- bzw. Rampenbau als zielführend erachtet.

4.3.3 Nachinjektionen

Nachinjektionen sind gezielte Injektionsarbeiten, die dem Ausbruch nachlaufen. Das Injektionsziel ist es allfällige bautechnisch relevante Wasserzutritte abzudichten, resp. den Wasserzutritt zum Bauwerk so weit zu reduzieren, damit im Bauwerk einerseits Folgearbeiten «trocken» ausgeführt und andererseits angestrebte Abdichtungsziele mit Bezug auf zulässige langfristige Bergwasserentnahmemengen eingehalten werden können (z.B. Wannenmacher et al. 2016). Erfahrungen aus verschiedenen Untertageprojekten zeigen, dass trotz Nachinjektionen mit einem Bergwasserzufluss von rund 5 l/s pro km gerechnet werden muss (z.B. Schwalt et al. 2014). Dieser Bergwasseranfall ergibt sich als Summe von einer Vielzahl von kleinen Tropf- und Feuchtstellen und nicht vollständig abdichtbarer Wasserzuflüsse und steht nur bedingt mit Wasserzutritten aus Karsthohlräumen im Zusammenhang.

Obschon für Nachinjektionen meist nur wenige Meter lange Bohrungen ausgeführt werden, ist der Injektionsaufwand, verglichen zu vorausseilenden Injektionen, meist grösser, da die Arbeiten gegen fließendes Wasser ausgeführt werden müssen. Nachinjektionen können sowohl bei Schacht- als auch bei Rampenbauwerken ausgeführt werden. Sie sind, sofern erforderlich, auch in Kombination mit dem Gefrierverfahren möglich.

4.4 Massnahmen zur Beherrschung von karstbedingten Wasserzutritten durch den Innenausbau

Die in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 beschriebenen Bauhilfsmassnahmen haben das Ziel, Wasserzutritte aus dem Gebirge bis zum Einbau einer Innenschale auf eine bautechnisch beherrschbare Zuflussrate zu reduzieren.

Je nach Wahl und Anwendungsort der beschriebenen Bauhilfsmassnahmen und geologischen Verhältnissen muss im Vortrieb und im rückwärtigen Bereich eines Schacht- oder Tunnelbauwerks mit einem unterschiedlichen permanenten Wasseranfall in der Bauphase gerechnet werden (z.B. Schwalt et al. 2014). Dieses Wasser muss mindestens während der Bauzeit des jeweiligen Zugangs an die Oberfläche gepumpt und entsorgt werden. Je nach Abdichtungskonzept für das definitive Bauwerk kann sich dieser Wasseranfall unter Umständen auch über die Betriebsdauer des entsprechenden Zugangs fortsetzen.

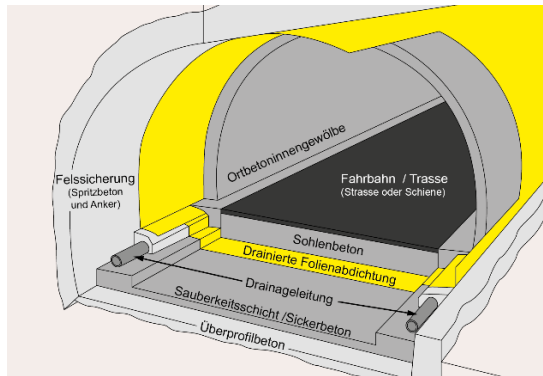
Die folgenden Ausführungen zeigen, wie ein Zugang für dessen gesamte Offenhaltezeit gegen Wasserzutritt abgedichtet werden kann und stellen die entsprechenden Abdichtungskonzepte für den Innenausbau vor.

Für die Abdichtung dieser Untertagebauwerke kann entweder eine drainierende Abdichtung oder eine druckwasserhaltende Abdichtung eingesetzt werden (z.B. SIA 2009, Glocker 2011). Beide gewährleisten ein innen trockenes Bauwerk (Fig. 4-3).

Bei Tunnelbauwerken bestehen heute die Dichtsysteme grösstenteils aus Kunststoffdichtungsbahnen. Ein Tunnel kann rein technisch bis zu einem anstehenden Wasserdruck von bis ca. 3 bis 4 bar druckhaltend mit einer Rundumabdichtung auf Folienbasis ausgebaut werden (z.B. Glocker 2011). Solche Systeme wurden z.B. für die Abdichtung des Uetlibergtunnels der Westumfahrung Zürich verbaut (z.B. Schnell et al. 2022). Bei höheren anstehenden Wasserdrücken ist ein drainiertes Abdichtungssystem auf Folienbasis (System Regenschirmabdichtung) erforderlich, welches je nach Anforderung auch im Sohlbereich mit einer Folie zu einer drainierten Rundumabdichtung ergänzt werden kann. Solche Systeme werden oft bei tiefliegenden Tunnels verbaut, wie zum Beispiel bei den Bauwerken des Gotthard Basistunnel (z.B. Ehrbar et al. 2016). Dabei fliesst dem Bauwerk über seine ganze Nutzungsdauer Bergwasser zu, das zuverlässig abgeleitet werden muss. Sammlung und Ableitung des Bergwassers müssen dabei kontinuierlich durch betrieblichen und baulichen Unterhalt gewährleistet sein, sonst kann es zu einer Überbeanspruchung der Innenschale bis hin zu deren Einsturz kommen. Der Vorteil eines drainierten

Abdichtungssysteme besteht darin, dass durch die Ableitung von Bergwasser die gesamte Inneschale nicht auf den anstehenden Wasserdruck bemessen werden muss. Für die Nutzung des Bauwerks wird dennoch ein stets trockener Innenraum im Bauwerk geschaffen.

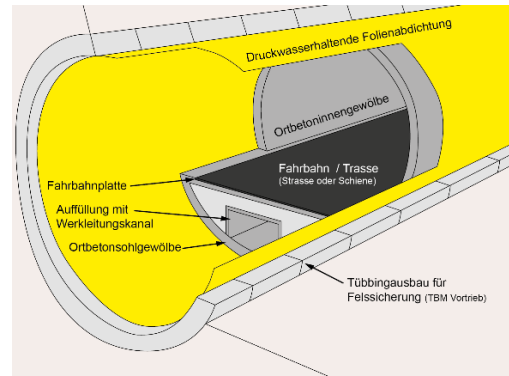
Drainiertes Bauwerk



Einlagiges drainiertes Folienabdichtungssystem

Anwendungsbereich: Bei höheren Bergwasserdrücken, wo druckwasserhaltende Foliensysteme nicht mehr funktionieren

Dichtes Bauwerk



Zweilagiges nachinjizierbares Folienabdichtungssystem

Anwendungsbereich: Für druckwasserhaltende Abdichtungen bei anstehenden Wasserdrücken bis ca. 3 – 4 bar

Fig. 4-3: Typische Tunnel-Abdichtungskonzepte

Links: drainiertes Abdichtungssystem mit einer Regenschirmabdichtung ergänzt mit einer Folie in der Sohle mit seitlicher Drainage zur Druckentlastung. Rechts: komplett druckwasserhaltendes Abdichtungssystem

Bei drainierten Systemen spricht man sowohl von Regenschirmabdichtung, wenn die Folien nur zum Schutz des Fahrtraums vor Wasser verbaut werden, als auch von einer komplett drainierten Rundumabdichtung (wie in Fig. 4-3 dargestellt), wenn die «gelbe Abdichtungsfolie» auch noch in der Sohle verlegt wird und der Sohlbeton damit auch zuverlässig vor dem Angriff von potenziell korrosivem Bergwasser geschützt werden kann.

Im Unterschied zum Bau eines Tunnels bzw. einer Rampe ist beim Bau eines Schachts ein druckwasserhaltender Innenausbau, analog der Abdichtung eines (Verkehrs-)Tunnels, aufgrund der im Vergleich zur Zugangsrampe viel kürzeren Länge mit vertretbarem Aufwand möglich. Die druckwasserhaltende Abdichtung kommt vor allem zur Ausführung, wenn ein Bauwerk auf sehr lange Sicht unterhaltsarm betrieben werden soll. Derselbe Ausbaustandard kann bei einem längeren, wasserführenden Tunnelabschnitt bzw. einer Rampe heute aus ökonomischen Gründen nicht gerechtfertigt werden.

Im Folgenden werden diese Abdichtungskonzepte für Schächte und Tunnel vorgestellt. Dies geschieht auch vor dem Hintergrund, dass

- in allen Standortregionen Schächte ab Baubeginn erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag bis zum Verschluss des Tiefenlagers über eine sehr lange Offenhaltezeit benötigt werden
- alle Schachtbauwerke eines Tiefenlagers nach Fertigstellung mehr als 100 Jahre möglichst unterhaltsarm betrieben werden sollen und dass über die gesamte Offenhaltezeit dieser Bauwerke dem Bauwerk zusickerndes Bergwasser gefasst, zur Oberfläche abgepumpt, aufbereitet und abgeleitet werden müsste
- eine Zugangsrampe in der Region Nördlich Lägern oder Zürich Nordost gegen Bergwasserzuflüsse so abgedichtet werden müsste, dass mit einem drainierten Abdichtungssystem in der Betriebsphase die Ableitung des noch vorhandenen Bergwasseranfalls durch Auslegung der Pumpenkapazität sicher gewährleistet werden kann.

4.4.1 Abdichtungskonzepte für Schächte

Eine druckwasserhaltende Innenschale für Wasserdrücke von 80 bis 90 bar (Übergang zum Opalinuston), die in Nördlich Lägern zu erwarten sind, kann, in Anlehnung an Konzepte aus dem internationalen Bergbau, mit einer Stahlblechabdichtung und einem Betongewölbe gewährleistet werden (z.B. Dorn & Kaledin 2013, Zlotvanik 2011). Entsprechende Ausbaukonzepte werden unter anderem auch beim Wasserkraftwerksbau umgesetzt, wo in Druckschächten und -stollen komplett wasserdichte Stahlrohre als Abdichtungshaut verbaut werden. Diese stellen sicher, dass kein Wasser aus einer Druckleitung mit Innendrücken von z.T. weit über 100 bar in das umliegende Gebirge auslaufen.

Durch diesen Ausbaustandard mit dem Einbau einer Dichthaut aus Stahl wird eine hohe Sicherheit gegen Wasserzutritte zum Bauwerk erreicht. Im Vergleich zu einem drainierten System reduzieren sich auch die Betriebskosten zur Ableitung und Aufbereitung von Bergwasser über die Nutzungsdauer der Schachtbauwerke. Zudem kann der Aufwand für Rückfallebenen (Pumpstationen, Leitungen usw.) zur Ableitung eventuell anfallender Bergwässer stark reduziert werden.

Bei einem vollständig wasserdicht ausgeführten Schacht sind folgende Aspekte von Relevanz:

- Der Innenausbau eines Schachts (Betoninnenring) ist gegenüber einem maximal anstehenden Wasserdruck auslegbar und kann zudem in höchster Ausführungsqualität nach erfolgtem Einbau der Stahldichtungshaut betoniert werden.
- Die Tragstruktur (Betoninnenring) wird durch die Dichthaut zuverlässig und nachhaltig vor potenziell korrosiven Bergwässern geschützt, was der Nutzungsdauer des Bauwerkes zugutekommt.
- Die wasserdichte Stahlblechverkleidung stellt sicher, dass dem Bauwerk kein Bergwasser zufließt.
- Der Einbau einer Stahlverkleidung ist einfacher als der einer Kunststoffdichtungsbahn und kann vor jeder Betonieretappe zuverlässig kontrolliert werden. Zudem kann eine Stahlverkleidung im Gegensatz zu einer Kunststoffdichtungsbahn nicht durch Armierungs- und Betonierarbeiten verletzt werden.

- Der Korrosionsschutz der Stahlverkleidung kann durch entsprechende Materialwahl dem zu erwartenden korrosivem Bergwasser angepasst und bei Bedarf noch mit Spezialbeschichtungen versehen werden, welche über die Lebensdauer des Bauwerks der Dichtigkeit zugutekommen.
- Es werden grundsätzlich keine Pumpleistungen benötigt, um permanent dem Bauwerk zuströmendes Bergwasser abzuführen.

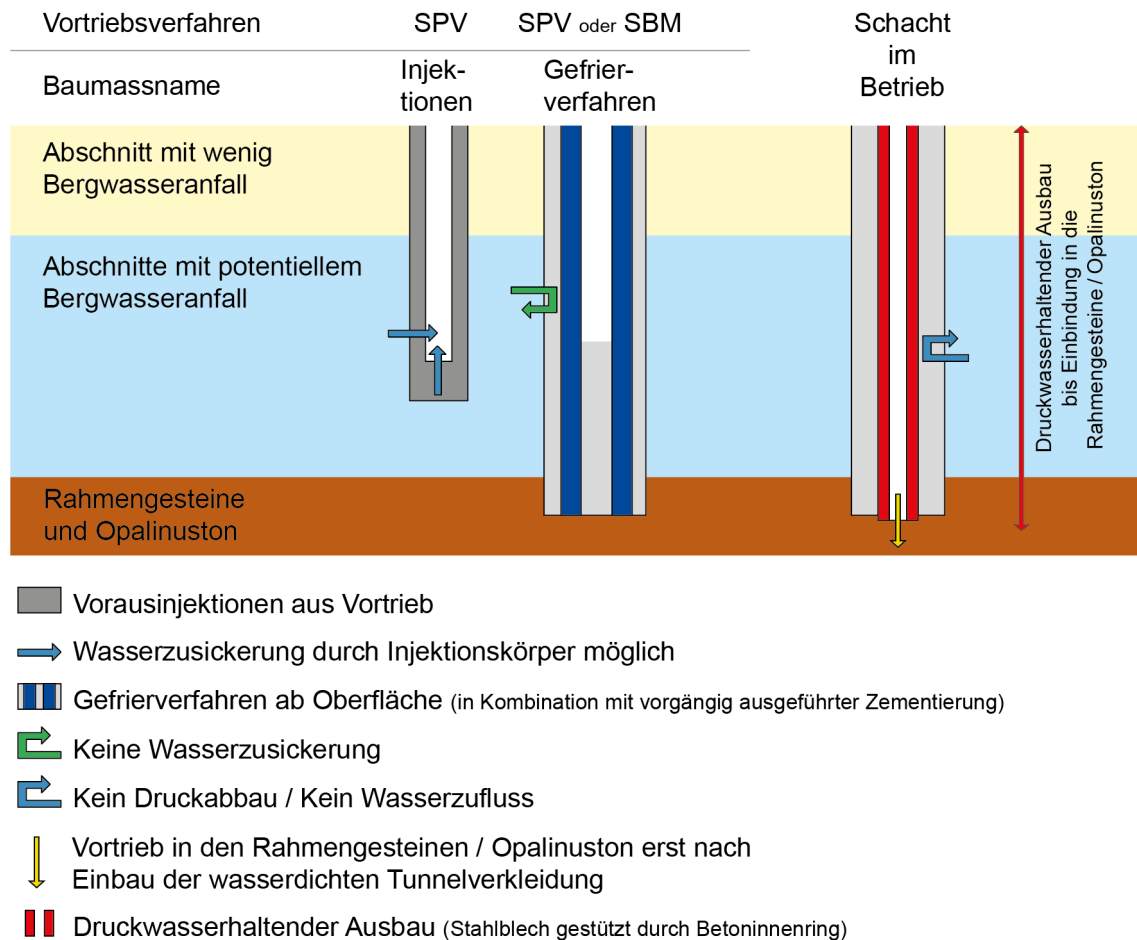


Fig. 4-4: Schachtabdichtungskonzept

Bauphase bis und mit Inbetriebnahme des komplett abgedichteten Bauwerkes für den weiteren Vortrieb in den wenig durchlässigen Rahmengesteinen

Fig. 4-4 zeigt, wie ein Schacht im verkarsteten Baugrund bzw. in einem potentiell wasserführenden Gebirgsbereich abgeteuft und abgedichtet werden kann. Eine Abdichtungshaut aus Stahlblech kann im Zuge des Einbaus der Schachtverkleidung unabhängig vom zum Einsatz kommenden Vortriebsverfahren eingebracht und voll verschweisst werden. Ein Beispiel für diese Art des Schachtausbaus bzw. eines druckwasserhaltenden Ausbaus ist der Schacht Rheinberg in Deutschland, bei dem eine Aufnahme des Wasserdrucks mit verschweissten Stahlblechen und einem Betoninnenring realisiert wurde (vgl. www.redpathdeilmann.com).

Das Abdichtungskonzept in Fig. 4-4 zeigt zudem, dass der Schachtvortrieb in den wasserdichten Rahmengesteinen erst weitergeführt wird, wenn ein Schacht in den potenziell wasserführenden hangenden Gesteinseinheiten komplett abgedichtet ist. Mit diesem Vorgehen kann ein Eintrag von Bergwasser in den Opalinuston und damit ins Tiefenlager unabhängig vom Erstellungszeitpunkt eines Zugangs zur Lagerebene ausgeschlossen werden.

Besondere Aufmerksamkeit wird bei dieser Bauweise auf die Einbindung der Abdichtungshaut im Übergangsbereich von den potentiell wasserführenden Gesteinseinheiten zum darunter liegenden wenig durchlässigen Gebirge gelegt. In diesem Übergangsbereich kommen Abdichtungsinjektionen zum Einsatz, welche im Zuge der Ausarbeitung der jeweiligen Schachtprojekte standort- und tiefenabhängig ausgelegt werden. Allfällige Umläufigkeiten in diesem Bereich sollen dabei jederzeit erkennbar sein und durch Nachinjektionen abgedichtet werden können.

Anstelle eines Innenausbaus mit Stahlblech und Innenbeton kommen heute auch Stahlguss-tübbinge für den Schachtbau im wasserführenden Gebirge zum Einsatz. Verschraubte oder verschweisste Tübbinge übernehmen dabei sowohl die Funktion der Abdichtung als auch die Tragfunktion. Beispiele hierfür sind die Schächte einer Nickelmine in Norilsk (Russland) mit einer Teufe von rund 2'000 m (Dorn & Kaledin 2013).

Beiden Systemen gemein ist, dass sie durch eine geeignete Materialwahl, Beschichtungen und durch Verfüllung des Ringspaltes zwischen Gebirge und Abdichtungshaut mittels Zementinjektionen sowie, wenn erforderlich, auch noch mittels einer Asphaltfuge gegen Korrosion geschützt werden können.

4.4.2 Abdichtungskonzepte für eine Zugangsrampe

Die zurzeit auf dem Markt erhältlichen druckwasserhaltenden Abdichtungssysteme auf Basis von Kunststoffdichtungsbahnen sind nicht für Wasserdrücke grösser ca. 3 bis 4 bar ausgelegt (z.B. SIA 2009, Glocker 2011). Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass eine Zugangsrampe in Nördlich Lägern oder Zürich Nordost mit einem drainierten Kunststoffabdichtungssystem (vgl. Fig. 4-5) bis und mit Einbindung in die dichten Rahmengesteine ausgeführt werden würde. Oberflächennahe Abschnitte dieses Tunnels könnten dagegen auch mit einer druckhaltenden Vollabdichtung ausgeführt werden. Eine Zugangsrampe in Jura Ost, der weitgehend im Opalinuston verläuft, wird, abgesehen von den oberflächennahen Abschnitten, ohne eine Abdichtungshaut drainiert realisiert.

Bei einer drainiert abgedichteten Rampe sind folgende Aspekte von Relevanz:

- Der Innenausbau des Tunnels (Betoninnenring) ist auf den Gebirgsdruck ausgelegt und stellt wie bei einem Schacht die Hohlraumstabilität sicher. Der Betonring kann zudem, nach erfolgtem Einbau der Abdichtung, geschützt von Bergwasser in hoher Ausführungsqualität eingebaut werden.
- Die Tragstruktur (Betoninnenring) kann analog zu einem Schacht durch die Dichthaut und mit einer entsprechenden Materialwahl (Abdichtungsfolie und Beton) vor potenziell korrosiven Bergwässern geschützt werden.
- Die Tunnelabdichtung schützt lediglich den Innenbeton vor direktem Kontakt mit dem Bergwasser. Sie ist Bestandteil eines Systems aus Abdichtungsfolie und Leitungen, mit welchen Bergwasser zu einer Sammel- und Pumpleitung im Tunnel zur endgültigen Ableitung an die Oberfläche geführt werden muss. Die Leitungen sind regelmässig zu unterhalten, damit es zu keinem Wasserdruckaufbau auf das Gewölbe kommt.

- Eine Abdichtung aus Kunststoff ist gegenüber einer aus Stahl weniger langzeitbeständig gegenüber höheren Temperaturen und ist einem Alterungsprozess unterworfen. Eine Auslegung auf die erforderliche Nutzungsdauer von 30 bis maximal 50 Jahre einer Zugangsrampe (welche nur für die Dauer der Einlagerung benötigt wird) ist trotzdem möglich. Diese Nutzungsdauer beträgt zudem nur rund die Hälfte der heute im Tunnelbau geforderten Nutzungsdauer von 100 Jahren für Infrastrukturprojekte für Strasse und Bahn, wo solche Abdichtungssysteme standardmässig zum Einsatz kommen.
- Der Einbau von Kunststoffabdichtungsbahnen ist aufwändig und aus Erfahrung – trotz Qualitätskontrollen – nicht vor Einbaufehlern und unsachgemäss ausgeführten Folgearbeiten im Nahfeld der Abdichtungshaut gefeit. Fehlstellen in der Abdichtung werden erst mit Verzögerung auf den Einbau des Innenbetons ersichtlich und können im Nachhinein mit Nachabdichtungen saniert werden.
- Es werden immer Pumpen benötigt, um dem Bauwerk zuströmendes Bergwasser an die Oberfläche zu befördern.

Die Abdichtung und die Verkleidung eines Tunnels sind so ausgelegt, dass nachträgliche Ertüchtigungsmassnahmen (auf Basis eines entsprechenden Überwachungs- und Unterhaltsplans) jederzeit möglich sind. Beispielsweise können Injektionsstutzen zum Injizieren durch die Abdichtung bereits bei deren Verlegen mit eingebaut werden. Weitere Massnahmen sind der systematische Einbau von nachinjizierbaren Dammringen (Abschottungen), um die Längsläufigkeit hinter der Abdichtung zu reduzieren.

Das in Fig. 4-5 beschriebene Abdichtungskonzept eine Rampe zeigt ausserdem, dass der Tunnelvortrieb in den wenig durchlässigen Rahmengesteinen erst weitergeführt wird, wenn die Rampe in den potenziell wasserführenden hangenden Gesteinseinheiten bis zur Einbindung des Bauwerks in die weniger durchlässigen Rahmengesteinen komplett mit dem drainierten Abdichtungssystem abgedichtet ist. Mit diesem Abdichtungssystem wird der Eintrag von Bergwasser in den Opalinuston und damit ins Tiefenlager ausgeschlossen, unabhängig vom Erstellungszeitpunkt der Rampe.

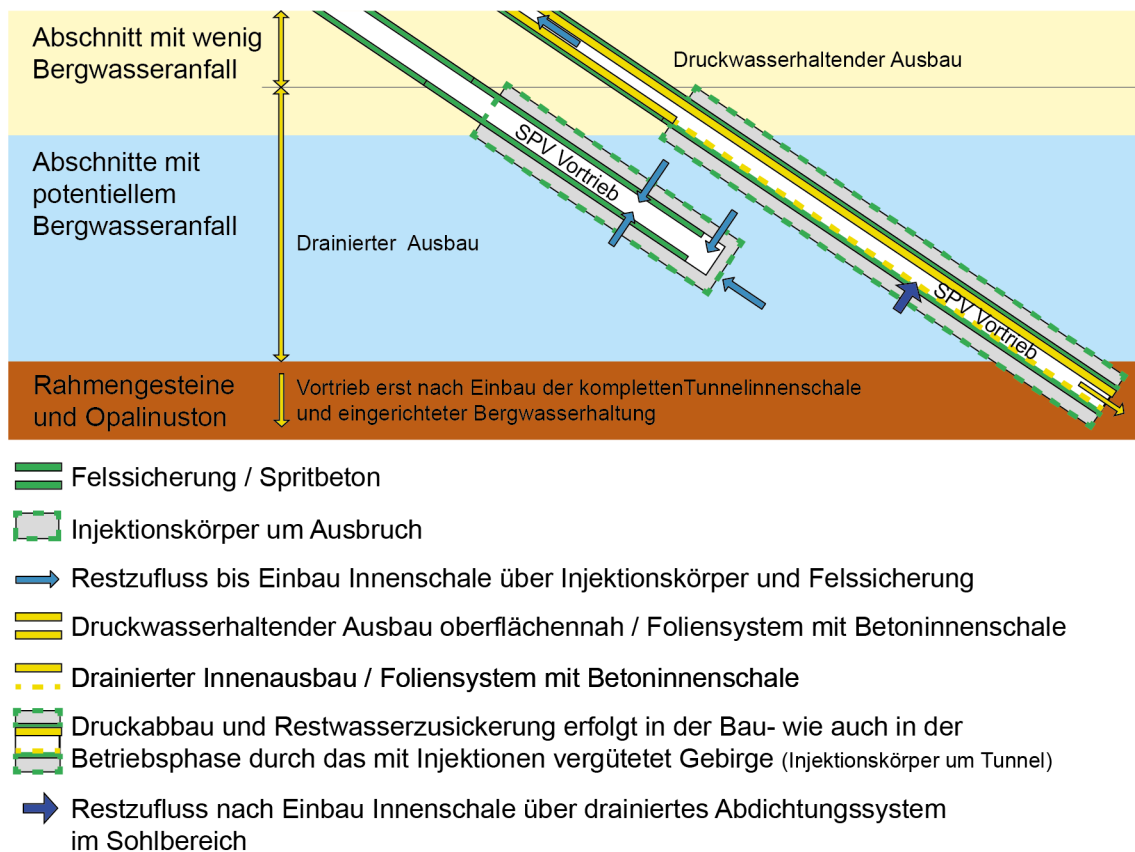


Fig. 4-5: Abdichtungskonzept für eine Rampe (Bauphase bis und mit Inbetriebnahme des abgedichteten Tunnels für den weiteren Vortrieb in den wenig durchlässigen Rahmengesteinen)

5 Beherrschung von Wasseranfall während der Betriebsphase

Wie viel Bergwasser bei einem Bauwerk nach seiner Fertigstellung langfristig anfällt, gesammelt und an die Oberfläche gepumpt werden muss, hängt vom Gebirge und dem Abdichtungskonzept des realisierten Bauwerks ab (vgl. Kapitel 4.4).

Allfällige radiologische Konsequenzen eines Bergwasserzutritts im Sinne einer Risikobetrachtung bei Flutung der Lagerebene sind nicht Gegenstand dieses Berichts. Die Flutung eines Tiefenlagers kann per Auslegung verhindert werden, weil ein komplettes Versagen eines wasserdicht ausgebauten Schachtbauwerks weitgehend ausgeschlossen werden kann. Eine separate Abhandlung im Sinne eines What-if-Szenarios ist in Mayer et al. (2020) zu finden.

Da sich die Abdichtungskonzepte der Zugangsbauwerke (Schacht oder Rampe) unterscheiden (vgl. Kapitel 4.4), unterscheiden sich auch die Massnahmen zur Beherrschung von Wasserzuflüssen während der Betriebsphase (Fig. 5-1).

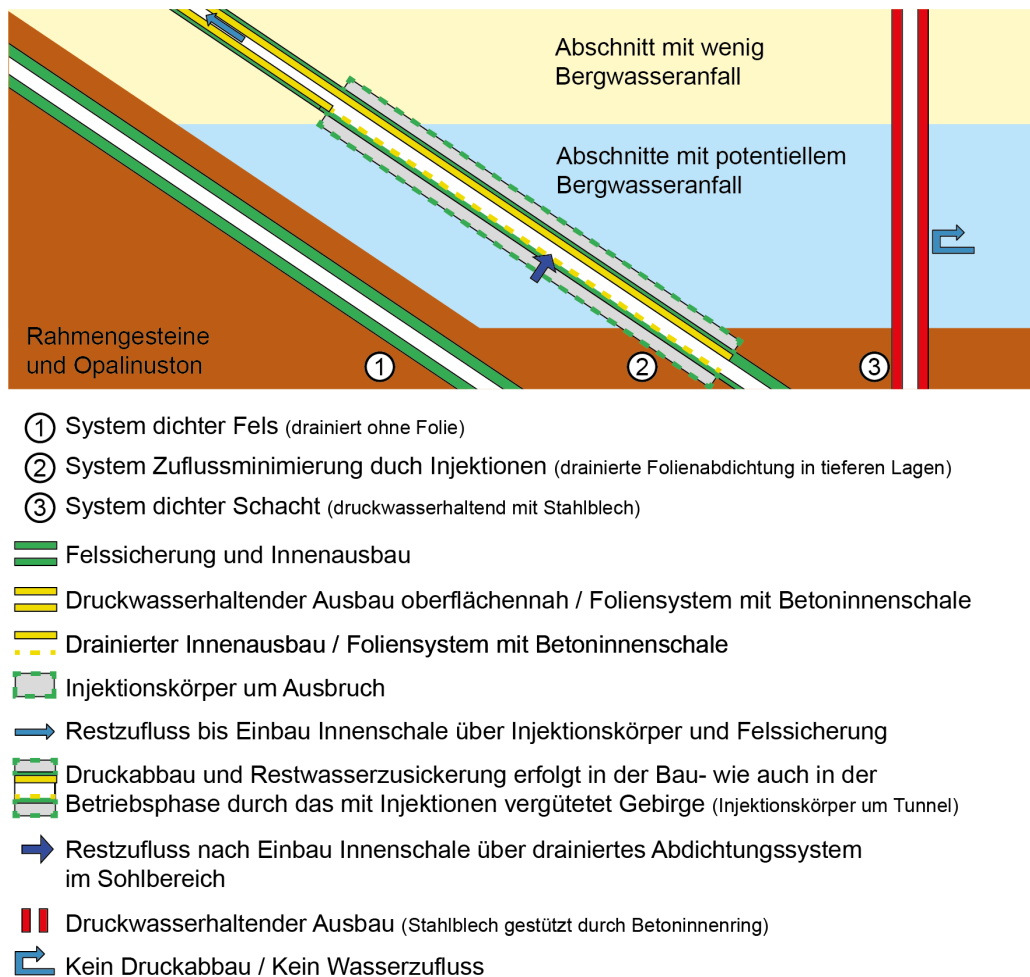


Fig. 5-1: Darstellung der unterschiedlichen Abdichtungskonzepte der Zugangsbauwerke für ein geologisches Tiefenlager als Bestandteil möglicher Zugangskonfigurationen in den Standortgebieten

In Jura Ost kämen die Systeme 1 und 3 zur Anwendung, an den anderen Standorten die Systeme 2 und 3.

Fig. 5-1 zeigt von links nach rechts drei Arten von Zugängen nach untertag und illustriert das jeweilige Abdichtungskonzept des Bauwerkes. Daraus ergeben sich – wie oben gezeigt – unterschiedliche zu erwartende Restwasserzusicckerungen, die über die Offenhaltungszeit des Bauwerks permanent abgeführt werden müssen:

- Schächte in allen Standorten: Die Schächte werden gemäss heutiger Annahme mit einer Vollabdichtung aus Stahl ausgebaut, weshalb mit keinem Bergwasseranfall gerechnet werden muss.
- Rampe im Standortgebiet Jura Ost: Die Rampe verläuft drainiert im Opalinuston ab der Oberfläche bis zu den Bauten auf Lagerebene. In der Betriebsphase fällt hier somit kein Bergwasser an, das abgefordert werden müsste. Oberflächennahe kurze Tunnelabschnitte können zudem druckwasserhaltend und mit Gefälle zu den Portalen ausgeführt werden.
- Rampen in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost (Variante, vgl. Fig. 1-1): Die Rampen werden oberflächennah druckwasserhaltend und in den tieferen Lagen drainiert abgedichtet. Es wird aktuell nach den Abdichtungsmassnahmen mit einem permanenten Wasserzufluss in der Grössenordnung von 5 l/s pro km in der Betriebsphase zum Bauwerk gerechnet (vgl. Schwalt et al. 2014).

5.1 Wasseranfall während des Betriebs für eine Zugangsrampe

Im Falle einer Rampe mit einer drainierten Abdichtung in den Regionen Nördlich Lägern oder Zürich Nordost müsste über die ganze Nutzungsdauer mit einem Bergwasseranfall von bis zu 5 l/s pro km über die ganze Tunnellänge gerechnet werden (vgl. Schwalt et al. 2014). Dieser Wert stellt dabei eine Planungsannahme für einen mit Abdichtungsinjektionen im Vortrieb erzielbaren Abdichtungserfolg dar und ist ein Erfahrungswert aus ausgeführten Bauwerken in ähnlichen, aber nicht komplett übertragbareren geologischen Verhältnissen. Somit müsste nach heutiger Planung von maximal ca. 50 l/s Wasseranfall bei einer 10 km langen Zugangsrampe, wie sie in Nördlich Lägern nötig wäre, gerechnet werden.

Dieses Bergwasser müsste gefasst, zur Oberfläche transportiert, aufbereitet und im Normalfall einem Gewässer zugeführt werden. Für die Betriebsphase würde eine entsprechende Pumpenkapazität bereitgestellt, wie dies bei anderen Grossprojekten schon umgesetzt wurde, wie z.B. beim Schacht Sedrun I des Projektes AlpTransit Gotthard AG: Pumphöhe 800 m, Förderkapazität 1'000 l/s (z.B. Keller 2001).

Während des Betriebs des geologischen Tiefenlagers bzw. einer Zugangsrampe werden der Bergwasseranfall und das Ableitsystem eines drainierten Tunnels permanent überwacht und kontrolliert. Dadurch wird sichergestellt, dass Veränderungen des Bergwasseranfalls frühzeitig erkannt und entsprechende bauliche Massnahmen für den Unterhalt bzw. die Aufrechterhaltung der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks rechtzeitig getroffen werden (z.B. Nachinjektionen vgl. Kapitel 4.3.3).

Ursachen für eine Zunahme der Bergwasseranfälle während des Tunnelbetriebs können u.a. die Degradation des Injektionskörpers, einhergehend mit Beschädigungen an den verbauten Abdichtungsfolien oder die Verstopfung des Ableitsystems durch Versinterung sein. Ohne Massnahmen könnte beides allein und/oder in Kombination bis zu einem Teileinsturz des Innengewölbes und zu einer Überschreitung der installierten Pumpenkapazität mit folgender Flutung des Bauwerks führen.

Mittels eines Unterhalts- und Überwachungsplans mit Fokus auf sich ändernde Bergwasserzuflüsse (Menge, Mineralisation, Temperatur, Orte der Zuflüsse), die Zustandsbeobachtung der Tunnelverkleidung (inkl. Beanspruchung) können jedoch jederzeit bauliche und betriebliche Massnahmen getroffen werden, um das Bauwerk für den weiteren Betrieb zu ertüchtigen und, wenn erforderlich, Pumpenkapazität temporär nachzurüsten.

5.2 Massnahmen zur Beherrschung des Wasseranfalls während des Betriebs für eine Zugangsrampe

5.2.1 Möglichkeiten der baulichen Intervention

Bauliche Interventionsmassnahmen dienen dazu, Leckagen während der Betriebs- und Beobachtungsphase zu beheben. Bei lokalen Wasserzutritten werden dazu gezielte Abdichtungsinjektionen ausgeführt, um den Zufluss zum Bauwerk zu reduzieren bzw. im besten Falle abzudichten. Diese Massnahmen gehören im Falle eines geologischen Tiefenlagers zum Bestandteil des Erhaltungskonzepts, welches zukünftig für die Anlage zu definieren ist. Im Falle einer Sanierung würden voraussichtlich, wie im Untertagbau üblich, eine gezielte Entspannung des Wasserdrucks in Kombination mit gezielten Nachinjektionen zur Ausführung kommen.

Es ist zu beachten, dass solche Abdichtungsmassnahmen gegen Bergwasser in der Betriebsphase bei neu auftretenden Bergwasserzuflüssen selten zu einem vollständigen Abdichtungserfolg führen (Tropf- oder Feuchtstellen). Die nach einer solchen Intervention verbleibende Restwassermenge muss abgeleitet und gepumpt werden.

5.2.2 Möglichkeiten der betrieblichen Intervention

Die Massnahmen zur betrieblichen Intervention umfassen das Sammeln, Ableiten, Aufbereiten und Abpumpen des zufließenden Bergwassers. Installierte Sammelbecken, Bergwasserleitungen, Aufbereitungsanlagen und Pumpen werden, je nach Zugangskonfiguration, auf die zu behandelnden Wassermengen ausgelegt.

Für den Fall eines Ereignisses in der Phase des Einlagerungsbetriebs und damit einhergehendem Eindringen von Wasser über die Zugänge würde der Betrieb unterbrochen. Die Wiederaufnahme der Einlagerung erfolgt erst, wenn das zugeflossene Bergwasser abgefordert und die Sanierung der Leckagestelle abgeschlossen sind. Um entsprechende Sanierungen und allfällige Leckagen mit gebührender Sicherheit ausführen zu können, muss dafür ein redundantes Pumpensystem installiert werden.

6 Schlussfolgerungen

In allen drei Standortgebieten kommen verkarstungsfähige Gesteinseinheiten vor, wobei im Bereich der Zugangsbauwerke nur die «Felsenkalke» und der «Massenkalk» in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost Verkarstungseigenschaften aufweisen. Obschon sehr unwahrscheinlich, kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass im Bereich der Zugänge zur Lagerebene grössere, wasserführende Karsthohlräume vorkommen. Durch Vorerkundungsmassnahmen und einer allfälligen Verschiebung der Linienführung kann die Wahrscheinlichkeit, dass Zugangsbauwerke solche Karsthohlräume antreffen, reduziert werden.

Mit Schächten lassen sich in allen drei Standortregionen Zugänge zur Lagerebene des geologischen Tiefenlagers sicher, nachhaltig und vor allem komplett wasserdicht bauen. Dies ist durch Anwendung einerseits der verschiedenen Möglichkeiten der Hohlraumdetektion und andererseits der Möglichkeiten der Gebirgsabdichtung gewährleistet. Gebirgsabdichtungen können mit Injektionen oder mit dem Gefrierverfahren bzw. als Kombination beider Verfahren erfolgen. Beide Verfahren haben sich beim Schachtbau in anspruchsvollen geologischen Verhältnissen bewährt.

Auch für den Betrieb lassen sich mit druckwasserhaltenden dichten Schachtverkleidungen langfristig sichere und unterhaltsarme Bauwerke realisieren. Durch die wasserdichte Ausführung des Bauwerks werden permanente Bergwasserzuflüsse zuverlässig verhindert, und es entfallen aufwändige Wasserhaltungs- und Entsorgungsmassnahmen für die Bergwässer. Die Verkleidung kann so dimensioniert werden, dass sie auch grosse Wasserdrücke aufnehmen kann. Der runde Schachtquerschnitt ist für die Beanspruchung ideal und die im Vergleich zu einem Zugangstunnel sehr kurze Bauwerkslänge des Schachts führt zu einer effizienteren Konstruktion. Druckdichte Schachtauskleidungen haben sich im Bergbau in analogen Beanspruchungssituationen seit Langem bewährt.

In den Regionen Nördlich Lägern und Zürich Nordost lassen sich bei Bedarf bei den dort prognostizierten geologischen Verhältnissen auch Zugangskonfigurationen mit Zugangsrampen realisieren. Da für eine Rampe eine Erkundung und Abdichtung des Baugrundes sukzessive aus dem Vortrieb heraus erfolgt, stehen für die Baugrundverbesserung nur Injektionen zur Verfügung. Sowohl ein dem Vortrieb vorausseilendes Gefrieren als auch ein Gefrieren von der Oberfläche wird aus heutiger Sicht wegen der auszuführenden Vortriebslänge in einer möglichen wasserführenden Gesteinseinheit ausgeschlossen.

Für die Zugangsrampe kommt aktuell nur eine drainierte Rundumabdichtung mit Abdichtungsfolie in Frage. Ein druckhaltendes Foliensystem ist bei hohen Wasserdrücken ausführungstechnisch nicht verlässlich realisierbar. Bei einer drainierten Zugangsrampe ist mit einem höheren Aufwand für die Instandhaltung, Wasserhaltung und Wasseraufbereitung zu rechnen als bei einem Schachtbauwerk, das druckwasserhaltend realisiert werden kann. Eine drainierte Verkleidung ist nicht auf den Bergwasserdruck auszulegen. Die Gefahr einer Funktionsstörung der Drainage mit Folge eines Druckaufbaus kann bei einem Ereignisfall nie gänzlich ausgeschlossen werden. Der Ereignisfall kann jedoch beherrscht werden. Im Fall eines Wassereintruchs kann der Einlagerungsbetrieb jederzeit gestoppt und nach einer Sanierung der Schadstelle wieder aufgenommen werden.

Die aktuellen Lagerprojekte der Nagra gehen in Nördlich Lägern und Zürich Nordost von reinen Schachterschliessungen und in Jura Ost von einer Erschliessung mit einer Rampe im Opalinuston und einem Schacht aus. In allen drei Standorten können sowohl Schächte als auch Rampen sicher gebaut werden. Deshalb spielen Zugangsvarianten für den Standortvergleich keine Rolle. Welche Zugangskonfiguration dereinst für das geologische Tiefenlager zur Realisierung kommt, wird erst im Zuge der weiteren Projektierung mit der Baubewilligung auf Basis der dann vorliegenden baulichen und betrieblichen Sicherheitsanalysen festgelegt. Dabei werden auch die Empfehlungen des ENSI (ENSI 2017, Kap. 2.11) und seiner Experten (ENSI 2016) beachtet.

7 Literaturverzeichnis

- Aeschbach, M. (2004): Lötschberg Basistunnel – Gebirgsabdichtung einer wasserführenden Zone mit hohem Wasserdruck aus Umweltschutzgründen. AlpTransit-Tagung 2004, SIA/D 0202
- Alzoubi, M.A., Xu, M., Hassani, F.P., Poncet, S. & Sasmito A.P. (2020): Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 104, 103534. doi:10.1016/j.tust.2020.103534
- BASF (2011): Pre-Excavation Grouting in Rock Tunneling. BASF Construction Chemicals Europe Ltd.
- Benson, R.C. & Yuhr, L.B. (2016): Site Characterization in Karst and Pseudokarst Terraines. Practical Strategies and Technology for Practicing Engineers, Hydrologists and Geologists. Springer. ISBN: 978-94-017-9923-2
- Bin, L., Zhengyu, L., Shucai, L., Lichao, N., Maoxin, S., Huaifeng, S., Kerui, F., Xinxin, Z. & Yonghao, P. (2017): Comprehensive surface geophysical investigation of karst caves ahead of the tunnel face: A case study in the Xiaohayan section of the water supply project from Songhua River, Jilin, China. *Journal of Applied Geophysics*. doi:10.1016/j.jappgeo.2017.06.013
- Bitterli, T. (1996): Höhlen der Region Basel - Laufen. Speläologisches Inventar der Schweiz, Band III. 1996th ed., Basel. Speläologische Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften Speläologisches Inventar der Schweiz
- Bitterli, T., Graf, H.R., Matousek, F. & Wanner, M. (2000): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1050 Zurzach. Erläuterungen. Schweizerische geologische Kommission
- Bläsi, H., Deplazes, G., Schnellmann, M. & Traber D. (2013): Sedimentologie und Stratigraphie der Effinger Schichten. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-16
- Blumtritt, J. & Heyn, T. (2004): Ermittlung der Lage und Ausbreitung von Karsthohlräumen im Rahmen von Erkundungsarbeiten für unterirdische Verkehrswege mittels optischer Bohrlochbefahrungen. Bauen in Boden und Fels. 4. Kolloquium 20. und 21. Januar 2004, Ostfildern. 429-434
- Bollinger, D. & Kellerhals, P. (2007): Umfahrungstunnel Twann (A5) – Druckversuche in einem aktiven Karst. *Bulletin für angewandte Geologie*, 12/2, 49-61
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R. & Bosch, F.P. (2011): Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, 19(6): 1169-1180 p
- Dall’Alba, V., Neven, A., de Rooijb, R., Filipponi, M. & Renard P. (2022): Probabilistic estimation of tunnel inflow from a karst conduit network. *Engineering Geology*. doi: 10.2139/ssrn.4064476
- Dickmann, T. (2005): Seismic Prediction while Tunnelling in Hard Rock – Seismische Voraus- erkundung beim Vortrieb von Tunneln im Festgestein. 65. Annual Meeting of the German Geophysical Society, 1-12

- Ehrbar, H., Gruber, L.R., Sala, A. & Zbinden, P. (2016): Tunneling the Gotthard – Erfolgsgeschichte Gotthard-Basistunnel. Fachgruppe für Untertagebau. ISBN 978-3-033-05485-1
- ENSI 33/457 (2016): Prüfbericht zum Arbeitsbericht NAB 14-50 Bautechnische Risikoanalyse. ENSI
- ENSI 33/540 (2017): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. ENSI
- ENSI 33/649 (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. ENSI
- Filipponi, M., Bauer, S., Höfer-Öllinger, G. & Jörin U. (2022): Karstnomenklatur für Ingenieur-geologen und Bauingenieure. Buchschmiede. ISBN: 978-3-99139-294-1
- Filipponi, M., Jeannin, P.-Y. & Tacher, L. (2009): Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology* 106, 86-99
- Filipponi, M., Renard, P., Dall’Alba-Arnau, V. & Neven, A. (2022): Probabilistische Prognose von Karstwasserzutrit-ten beim Bau von Untertagebauwerken. *Geomechanik und Tunnelbau*. doi: 10.1002/geot.202200029
- Filipponi, M., Parriaux, A., Schmassmann, S. & Jeannin, P.Y. (2012): KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagebau: Bundesamt für Strassen.
- Ford, D. & Williams, P. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, West Sussex, England. John Wiley & Sons Ltd
- Glocker, W. (2011): Empfehlung Abdichtungen im Untertagebau. Verband für Abdichtungen im Tunnelbau
- Goeppert, N. & Goldscheider, N. (2019). Improved understanding of particle transport in karst groundwater using natural sediments as tracers. *Water Research*, 115045. doi:10.1016/j.watres.2019.115045
- Gonzalez, R. & Wetzel, A. (1996): Stratigraphy and paleogeography of the Hauptrogenstein and Klingnau Formations (middle Bajocian to late Bathonian), northern Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 89/1, 695-720. doi:10.5169/seals-167921
- Guendon, J.-L. (1984): Les paléokarsts des Alpes occidentales du Trias à l'Éocène. *Revue de Karstologie et de Spéléologie Physique* 4 / 1, 2-10. doi: 10.3406/karst.1984.938
- Hunkeler, E. (1982): *Höhlen und Stollen im Kanton Schaffhausen. Ein Führer durch den Untergrund*, Schaffhausen. Meier
- ITA (2018): ITAtech Report n°10 - Geophysical ahead investigation Methods - Seismic Methods. International Tunnelling and Underground Space Association. ISBN: 978-2-9701122-7-3
- Jeannin, P.-Y., Häuselmann, P. & Wildberger, A. (2007): Modellierung des Einflusses des Flimserstein-Tunnels auf die Karstquelle des Lag Tiert (Flims, GR). *Bulletin für Angewandte Geologie*, 12, 39-48.

- Jeannin, P.-Y., Malard, A., Rickerl, D. & Weber, E. (2015): Assessing karst-hydraulic hazards in tunneling – the Brunnmühle spring system –Bernese Jura, Switzerland. In: *Environ Earth Sci* 74 (12), S. 7655–7670. DOI: 10.1007/s12665-015-4655-5
- Keller, F. (2001): Gefährdungsbilder auf Grund von Gebirgsdrainage beim Untertagebau und Ausführung von Felsinjektionen als Massnahme im Allgemeinen und am Beispiel des Schachts Sedrun (Gotthard Basistunnel). *Bulletin angewandte Geologie* Vol. 6/1; S. 3-24
- Kielbassa, S., Prischmann, F. & Beer, N. (2015): Karst investigation and treatment measures for the high-speed track on the Swabian Jura / Karsterkundungs- und Sanierungsmaßnahmen für den Hochgeschwindigkeitsfahrweg auf der Schwäbischen Alb. *Geomechanics and Tunneling*, 8(2), 129-145. doi:10.1002/geot.201510011
- Kirschke, D., Lorenz, K., Richter, T. & Seidel, K. (2011): Geophysikalische Prospektions-technologie zur Vorauserkundung von Störungen, Hohlräumen und Verkarstungen. In: *Taschenbuch für den Tunnelbau*. ISBN 978-3-86797-087-7
- Kumar, R., Bennett, N., Donald, A., Martinez, G. & Velez E., (2019): 3D Borehole Sonic Imaging for Input to Structural Modeling-A Quantitative Approach. Society of Petroleum Engineers. SPE-194810-MS
- Liu, L., Shi, Z.M., Peng, M., Tsoflias, G.P., Liu, C.C., Tao, F.J. & Liu, C.S. (2020): A borehole multifrequency acoustic wave system for karst detection near piles. *Journal of Applied Geophysics*, 177, 104051. doi:10.1016/j.jappgeo.2020.104051
- Lowe, D.J. (1992): The origin of limestone caverns: in inception horizon hypothesis. PhD Thesis. Manchester Polytechnic, UK
- Marinos, P.G. (2001): Tunnelling and Mining in Karstic Terrane; an engineering challenge. The 8th Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Engineering and Environmental Impacts of Karst, Louisville, 3-16, *Geotechnical & Environmental Applications of Karst Geology & Hydrology*, Beck & Herring eds., Balkema, Lisse, 3-16.
- Maurer, H., Löw, S. & Lützenkirchen, V. (2000): Möglichkeiten und Grenzen der geophysikalischen Bohrlochtomographie zur Vorauserkundung. *Felsbau* 18/5, 134-140
- Mayer, G., Steinbach, T. & Zuidema, P. (2020): Wassereinbruch in ein geologisches Tiefenlager während der Einlagerungsphase: Analyse der radiologischen Konsequenzen für die Bevölkerung. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-22
- Milanović, P. (2000): Geological engineering in karst. Dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunneling. Zebra Publ. Ltd, Belgrade. ISBN: 978-86-748-9125-4
- Nagra (2014): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier II: Sedimentologische und tektonische Verhältnisse. Nagra Technischer Bericht NTB 14-02
- Nagra (2019): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 3: Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NAB 19-08
- Nagra (2021a): TBO Bülach-1-1: Data Report. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-08 Dossier I – X

- Nagra (2021b): TBO Trüllikon-1-1: Data Report. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-09 Dossier I – X
- Nagra (2021c): TBO Marthalen-1-1: Data Report. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-20 Dossier I – X
- Nagra (2022a): TBO Bözberg-1-1: Data Report. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-21 Dossier I – X
- Nagra (2022b): TBO Stadel-3-1: Data Report. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-01 Dossier I – X
- Niu, F., Cai, Y., Liao, H., Li, J., Tang, K., Wang, Q., Wang, Z., Liu, D., Liu, T., Liu, C., Yang, T. (2022): Unfavorable Geology and Mitigation Measures for Water Inrush Hazard during Subsea Tunnel Construction: A Global Review. *Water* 2022, 14, 1592. <https://doi.org/10.3390/w14101592>
- Orth, W. (2019): Thermische und mechanische Bemessung von Frostkörpern. *Mitteilung der Geotechnik Schweiz.* 1-10
- Osborne, R.A. (2003): Paleokarst: cessation and rebirth. Eds.: Gabrovšek, F. (Ed.). 2002. *Evolution of karst: from prekarst to cessation.* Postojna-Ljubljana, Založba ZRC, 97-115
- Peng, D., Cheng, F., Liu, J., Zong, Y., Yu, M., Hu, G. & Xiong, X. (2021): Joint tomography of multi-cross-hole and borehole-to-surface seismic data for karst detection. *Journal of Applied Geophysics*, 184, 104252. doi:10.1016/j.jappgeo.2020.104252
- Pesendorfer, M. & Löw, S. (2007): Detection efficiency of long horizontal predrillings to identify water conductive structures. *Felsbau* 25/04, 18-27
- Pinillos Lorenzana, L M. (2015): Túneles en macizos calcáreos karstificados: impacto en las obras subterráneas de los fenómenos kársticos, su evaluación y tratamiento. Universidad Politécnica de Madrid
- Reber, T. (2006): Der Tunnel Engelberg - Unwetter Untertag. Schweizerische Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik
- Reichl, I., Seegers, J., Lotter, M. & Prosser, M. (2009): Improvement of karstified rock through the example of the Irlahüll Tunnel on the new railway line Nuremberg - Ingolstadt. *Geomechanik Und Tunnelbau*, 2(5), 430-438. doi:10.1002/geot.200900045
- Richter, T., Boll, S. & Weh, M. (2008): Geophysikalische Vorauserkundung von Verkarstungs- und Störungszonen bei der TVM-Auffahrung des Katzenbergtunnels. *Geomechanik Und Tunnelbau*, 1(5), 450-459. doi:10.1002/geot.200800049
- Rust, S. & Ziegler, H.-J. (2014): Formationsspezifische Baugrundmodelle für das Standortgebiet Nördlich Lägern als Proxi für den Faziesraum Ost. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-30
- Schmidt, M., Richter, T. & Lehmann P. (2017): Innovative Geophysik-Technologien zur Störungs-, Karst- und Hohlraumerkundung im Tunnelbau. *Geomechanik und Tunnelbau*, 10/4. doi: 10.1002/geot.201700017
- Schmidt, M., Zenz, R. & Richter, T. (2021): Innovative geophysikalische Vorauserkundungstechnologie in verkarstungsfähigen und kristallinen Gesteinen. *Geomechanik und Tunnelbau*, 14/5. doi: 10.1002/geot.202100049

- Schneider, T.R. (1984): Geologischer Schlussbericht Seelisbergtunnel. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 65
- Schnelli, O., Marti, D., Mauerhofer, S. & Bolliger, J. (2022): Uetliberg Tunnel: Schlüssel der Westumfahrung Zürich. Tunnel, 4/022, 58-65
- Schwalt, M., Stadler, G., Hertweck, M. & Blank, K. (2014): Injektionen Zugangsbauwerke. Stand der Technik und mögliche Anwendungen im Zuge des Baus der Zugangsbauwerke. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-102.
- SIA (2004): SIA 197, Projektierung Tunnel – Grundlagen. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich
- SIA (1998): SIA 199, Erfassen des Gebirges im Untertagbau. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich
- SIA (2009): SIA 272, Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagbau. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich
- Smith, D.V. (2005): The State of the Art of Geophysics and Karst: A General Literature Review. U.S. Geological
- van Heyden, T. & Wegner, B. (2015): Modern freeze technology in action as five shafts are sunk at two project sites. Mining Report, 151/1, 32-37
- Waber, H.N., Heidinger, M., Lorenz, G. & Traber, D. (2014): Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-63
- Waltham, T., Bell, F.G. & Culshaw, M.G. (2005): Sinkholes and subsidence. Karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer
- Wannenmacher, H., Entfellner, M. & Hauer, H. (2022): Drilling and Grouting Works for pressurised Groundwater Conditions of the Semmering Base Tunnel. Geotechnical and Geological Engineering. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02160-3>
- Wannenmacher, H., Hosseini, A.H., Wenner, D., Rahbar, A. & Shahrokhi, Z. (2016): Water Ingress and Reduction Measures in the Headrace Tunnel at the Uma Oya Multipurpose Project. Conference Hydro 2016. 6p
- Wannenmacher, H., Kratz, T., Passmann, S. & Liebertrau, N. (2021): Combined Cement-Polyurethane Grouting Operations in Tunnel and Shaft Construction. Tunnel 4/2024
- Warner, J. (2004): Practical handbook of grouting: soil, rock and structures. John Wiley and Sons. ISBN: 978-0-471-46303-0
- Wielemaker, E. & Garrard, R. (2021): Advanced sonic logging in evaluating rock integrity for examining suitable radioactive waste disposal sites. GET 2021 – 2nd Geoscience & Engineering in Energy Transition Conference

- Xeidakis, G.S., Torok, A., Skias, S. & Kleb, B. (2004): Engineering geological problems associated with karst terrains: their investigation, monitoring and mitigation and design of engineering structures on karst terrains. Bulletin of the Geological Society of Greece. 1932-1941
- Xu, R. & Yan, F. (2004): Karst geology and engineering treatment in the Geheyan Project on the Qingjiang River, China. Engineering Geology 76 / 1-2, 155–164.
DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.06.012
- Zhang, K., Tannant, D.D., Zheng, W., Chen, S. & Tan, X. (2018): Prediction of karst for tunnelling using fuzzy assessment combined with geological investigations. Tunnelling and Underground Space Technology 80, 64-77. DOI: 10.1016/j.tust.2018.06.009
- Zhuo, Y. (2016): Risk prediction of water inrush of karst tunnels based on BP neural network. In: Proceedings of the 4th International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering. Wuhan, China
- Ziegler, H.J. (2008): Die Detektionseffizienz von Vorausbohrungen im Tunnelbau. Geomechanik und Tunnelbau, 1/5, 431-435. <https://doi.org/10.1002/geot.200800046>
- Zlotvanik, D. (2011): Deep freeze – Growth in potash sector revives shaft-sinking specialist. CIM Magazine, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 34-35