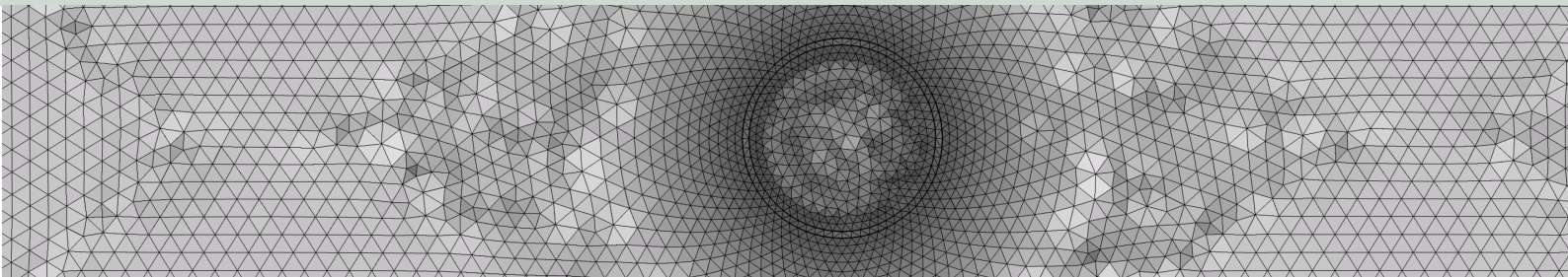




Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager

P.Y. Jeannin
A. Malard
U. Eichenberger

Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung

B. Rick

Dr. von Moos AG

November 2015

Disclaimer:

Die im Bericht dokumentierten Ansichten und Schlussfolgerungen sind diejenigen der Autoren und stimmen nicht notwendigerweise mit denen des ENSI überein.

Auftraggeber : Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
5200 Brugg

Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2

Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene

Expertenbericht zuhanden des
Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI

La Chaux-de-Fonds, den 12.11.2015

ISSKA
SISKA
ISSCA
SISKA



INSTITUT SUISSE DE SPÉLÉOLOGIE ET DE KARSTOLOGIE
SCHWEIZERISCHES INSTITUT FÜR SPELÄOLOGIE UND KARSTFORSCHUNG
ISTITUTO SVIZZERO DI SPELEOLOGIA E CARSOLOGIA
SWISS INSTITUTE FOR SPELEOLOGY AND KARST STUDIES

case postale 775 • CH-2301 La Chaux-de-Fonds • ☎ +41 (0)32 913 35 33 • info@isska.ch • www.isska.ch • Banque Raiffeisen IBAN CH73 8025 1000 0024 7288 3



Dr. von Moos AG
Geotechnisches Büro
Bachofnerstrasse 5, CH - 8037 Zürich

Beratende Geologen und Ingenieure

www.geovm.ch info@geovm.ch
Telefon +41 44 363 31 55 Fax +41 44 363 97 44

Filialen Mäderstrasse 8, CH - 5401 Baden
Dorfstrasse 40, CH - 8214 Gächlin en

Telefon +41 56 222 09 45 Fax +41 56 221 50 45
Telefon +41 52 681 43 27 Fax +41 52 681 43 25

Titel : Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene

Autoren : Pierre-Yves Jeannin, Arnaud Malard, Urs Eichenberger

Korreferat : Beat Rick (Geologiebüro Dr. von Moos AG)

Auftragsgeber : Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI
5200 Brugg

Stichwörter: Karst, Aquifere, Hydrogeologie, Epigener Karst, Hypogener Karst, Küstenkarst, Eozäner Karst, Karstgefährdung, Tiefenlager

Bevorzugte Zitierweise:

SISKA (2015): Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung. – Auftraggeber: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 5200 Brugg: 45 S

Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene

Inhaltverzeichnis

Kapitel 1 Grundlage.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Was ist Karst?.....	1
1.3 Epigener Karst.....	2
1.4 Hypogener Karst.....	8
1.5 Küstenkarst (« coastal karst »).....	10
1.6 Grenzen zwischen epigenem, hypogenem und Küstenkarst.....	12
1.7 Bedeutung der Karstphänomene in der Nordschweiz	13
Kapitel 2 Gefährdungsbilder im Karst und deren Identifizierungsmöglichkeiten.....	15
2.1 Gefährdungen der Langzeitsicherheit	15
2.2 Karstgefährdungen während Bau und Betrieb von Zugängen und Lagerbereichen.....	18
2.3 Karstbedingte Bautechnische Probleme in der Nordschweiz	20
2.4 Auswirkung auf die Umwelt.....	23
2.5 Vorhersage von Karstproblemen.....	23
2.6 Behandlung von erkannten Karstproblemen	32
Kapitel 3 Allgemeine Beurteilung der Machbarkeit und Einengung von Lagerstandorten hinsichtlich des Karsts und Vorschläge für die Etappe 3.....	33
3.1 Bemerkungen betreffend Karst und Hydrogeologie zu den NAGRA Berichten Etappe 2.....	33
3.2 Zusammenfassung der wichtigsten an Karst gebundenen Probleme	36
3.3 Untersuchungsziele für die Etappe 3	36
3.4 Beiträge der Untersuchungsmethoden.....	38
Referenzen.....	41
Anhänge	
Anhang 1 : KARSYS und KarstALEA	
Anhang 2 : Hinweise zur Verkarstung des Muschelkalkes	
Anhang 3: Eozäne Verkarstung der Nordwestschweiz	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Überblick von geophysikalischen Methoden, die für die Vorauserkundung von Karsterscheinungen beim Bau von Tiefenlagern potenziell anwendbar sind.	27
Tabelle 2	Skizze der Anwendungsbereiche der verschiedenen geophysikalischen Methoden	28
Tabelle 3	Überblick von Vorauserkundungsmethoden für die Identifizierung von Karsterscheinungen im Tunnelbau (aus Li et al. 2010).	29

Abbildungsverzeichnis

Figur 1	Zonen der epigenen Verkarstung (aus Doerfliger and Zwahlen 1998, verändert).	2
Figur 2	Speläogenetische Zonen im epigenen Karst: In einem gegebenen Moment der Entwicklung eines Karstsystems befindet sich ein Teil im Schachtbereich, ein anderer im Horizontalhöhlenbereich und noch ein anderer in der „Höhlenentwicklungs“ Zone („gestation“). In der Tiefe wird ein Initialbereich unterschieden. Die Verkarstung erfolgt rückschreitend von der Quelle zum Einzugsgebiet (vgl. speläogenetische Stadien). Die speläogenetischen Bereiche der vorhergehenden Phase werden als paläo-Bereiche bezeichnet (aus Filipponi et al. 2012).	4
Figur 3	Die speläogenetischen Bereiche eines verkarsteten Gebirges. Die Karströhrendichte wie auch die Morphologie der Karströhren hängen von den speläogenetischen Bereichen ab – Epikarstbereich, Epikarstschachtbereich, Schachtbereich, Horizontalhöhlenbereich (aus Filipponi et al. 2012).	5
Figur 4	Oben-links: Grundriss einer hypogenen Höhle (aus Klimchouk 2013); Oben-rechts: Vertikaler Profil durch eine sedimentarische Serie mit undurchlässigen (grau mit Scharfuren), teildurchlässigen (grau) und karstfähigen (hell grau) Sedimente. Braune Netze zeigen Stellen wo eine hypogene Verkarstung am Wahrscheinlichsten ist. Unten: Details der typischen Morphologie und Genese von hypogenen Höhlen.	9
Figur 5	Schema der wichtigsten Formen des Küstenkarsts (modifiziert nach Mylroie and Carew 1995). Achtung, dieses Schema ist nicht massstäblich, es ist vertikal stark überhöht.	11
Figur 6	Schema der unterschiedlichen „Karst-Typen“: Blau: epigener Karst; gelb: Küstenkarst; rot: hypogener Karst (modifiziert nach Ford and Williams 2007).	12
Figur 7	Bildung und Beispiel eines Tagesbruches. In gewissen Fällen kann der Bruch mehrere hundert Meter hoch steigen (aus http://www.pentes-tunnels.eu/didactpente-pente/description/fonti/index.html & Wikipedia.org)	16
Figur 8	Vorschlag von 12 Erkundungsbohrungen für geophysikalische Messungen vor und während des Vortriebes in Anordnung zweier um 30° verdrehter Hexagone. 6 Bohrungen liegen intern, 6 extern bez. des spiralförmigen Tunnels.	31

Kapitel 1 Grundlage

1.1 Einleitung

Mit dem vom Bundesrat im Jahr 2008 genehmigten Konzept "Sachplan geologische Tiefenlager" wurde das Standortwahlverfahren für die Tiefenlager festgelegt und dessen Umsetzung in Angriff genommen. Gemäss diesem Sachplanverfahren erfolgt die Auswahl von Standorten für geologische Tiefenlager in drei Etappen.

Ende 2008 hat die Nagra für Etappe 1 sechs geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) und drei für das geologische Tiefenlager für die hochaktiven Abfälle (HAA) vorgeschlagen. In Etappe 2 ist basierend auf einem sicherheitstechnischen Vergleich eine Einengung auf mindestens zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp für die weiteren Untersuchungen in Etappe 3 vorzunehmen.

Anfangs 2015 hat die Nagra für Etappe 2 zwei geologische Standortgebiete vorgeschlagen, in welchen jeweils sowohl das SMA- als auch das HAA-Lager angeordnet werden können. Auch eine Kombination beider Lagertypen, ein sogenanntes Kombilager, ist jeweils möglich. Es handelt sich dabei um die Standortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost.

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI überprüft die von der Nagra eingereichten Unterlagen und die Vorschläge für die in Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete.

Im Auftrag des ENSI wurden durch die Experten der Dr. von Moos AG und der SISKa karstspezifische Fragestellungen überprüft. Im vorliegenden Bericht werden die Grundlagen (Terminologie, Entwicklung von Karstsystemen, Gefährdungsbilder im Karst und deren Identifizierungsmöglichkeiten) zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene zusammengefasst.

Die Experten haben ausschliesslich die hydrogeologischen Grundlagen, die Karstsituation und deren bautechnische Beurteilung bei der Planung der Zugangsbauwerke (Stufe Vorstudie gemäss SIA 112) überprüft. Es werden Anmerkungen zu den hydrogeologischen Grundlagenberichten der Etappe 2 SGT angefügt die noch nicht abschliessend zu verstehen sind und karstspezifische Untersuchungsziele für Etappe 3 SGT formuliert, die aber nicht abschliessend sind.

1.2 Was ist Karst?

Seit einigen Jahren unterscheidet man in der wissenschaftlichen Literatur betreffend Karst drei Typen der Verkarstung: Epigener, hypogener und Mischwasser „mixing zone“-Karst. Einige Autoren (Florea and Vacher 2006, Klimchouk and Ford 2000) unterscheiden auch eine Verkarstung auf Basis der geologischen Entwicklung des verkarsteten Gesteins: „eogenetisch“ für Gesteine welche nie überdeckt wurden (z.B. Bahamas oder Florida), d.h. Gesteine mit hoher Porosität und „telogenetisch“ für Gesteine welche eine Diagenese erlebten, bevor sie exponiert und der Erosion ausgesetzt wurden (z.B. aktuelle Verkarstung im Jura). Solche Gesteine sind weniger porös und kompakter zementiert.

Die drei Typen (epigen, hypogen und „mixing zone“) betreffen potentiell die Standortgebiete für ein Tiefenlager in der Schweiz. In der folgenden Beschreibung wird die Unterscheidung „eogenetisch – telogenetisch“ nur untergeordnet eine Rolle spielen.

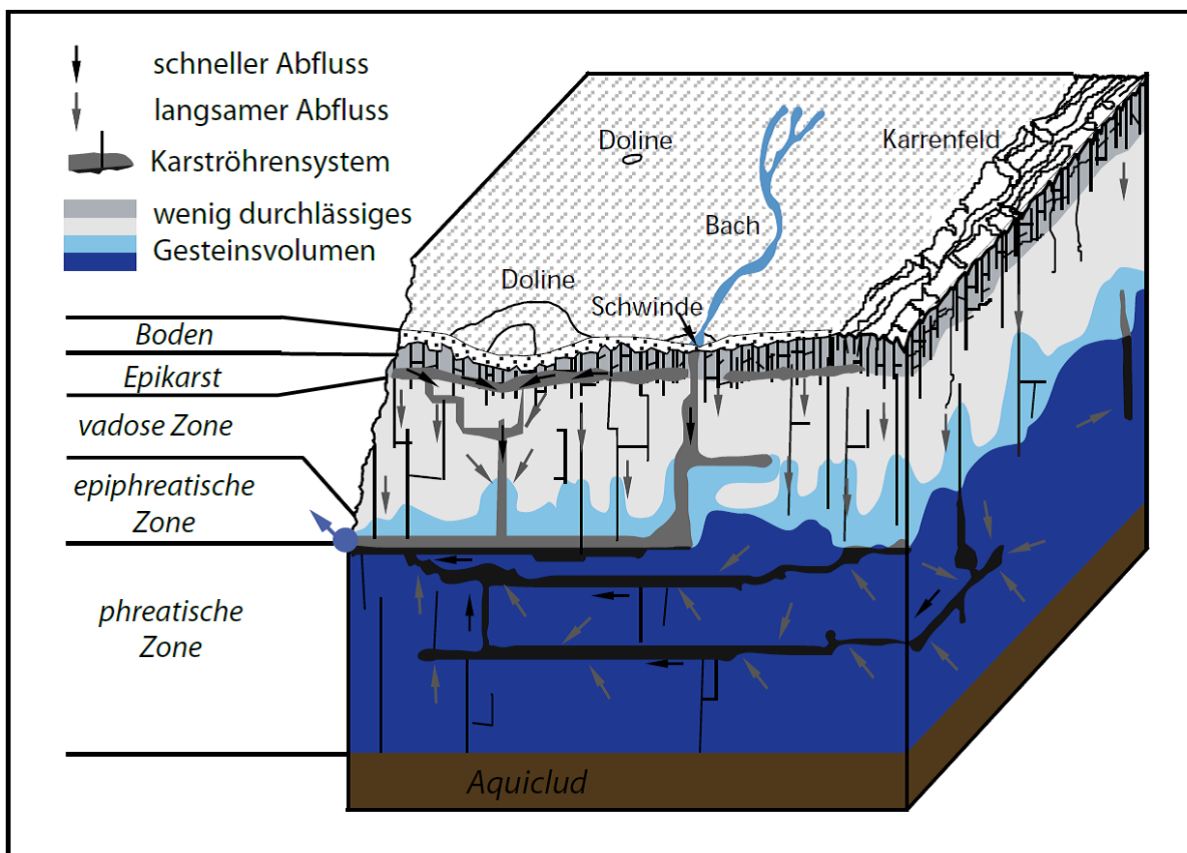
Damit sich in einer Gesteinsformation ein Karstsystem entwickeln kann, muss das Gestein bezüglich Wasser eine gewisse Löslichkeit aufweisen. Diese Bedingung ist vor allem bei Karbonatgesteinen (Kalkstein, Dolomit) sowie Evaporiten (Gips, Anhydrit, Steinsalz) erfüllt. (Filipponi *et al.* 2012). Unter speziellen Bedingungen wird selten auch Karst in Sandsteinen und Quarziten beobachtet.

1.3 Epigener Karst

1.3.1 Beschreibung

Die epigene Verkarstung erfolgt unter Einwirkung von meteorischem Wasser, welches mehr oder weniger mit biogenem CO₂ aus dem pedologischen Horizont angereichert ist. Sie betrifft hauptsächlich Gestein, welches heute aufgeschlossen ist oder in der Vergangenheit einen Aufschluss bildete. Die Karströhren entwickeln sich als Entwässerungsnetz mit Hauptwasserläufen und Zuflüssen („branchwork“) bis zu einem Austrittspunkt. Es handelt sich dabei um ein selbstregulierendes unterirdisches Entwässerungssystem, das die Abflusskapazität durch Lösung des Umgebungsgesteins anpasst. Mit Ausnahme der Regionen, in welchen der Hauptwasserspiegel im Verlauf des Pleistozän angehoben wurde, entwickelt sich die epigene Verkarstung nicht sehr tief unter dem heutigen Quellniveau (i.a. weniger als 100 m, manchmal 300 – 500 m, in Ausnahmefällen bis ung. 1000 m).

In einem Kalkmassiv zeigen sich die Charakteristika der epigenen Verkarstung wie folgt (Figur 1):



Figur 1 Zonen der epigenen Verkarstung (aus Doerfliger and Zwahlen 1998, verändert).

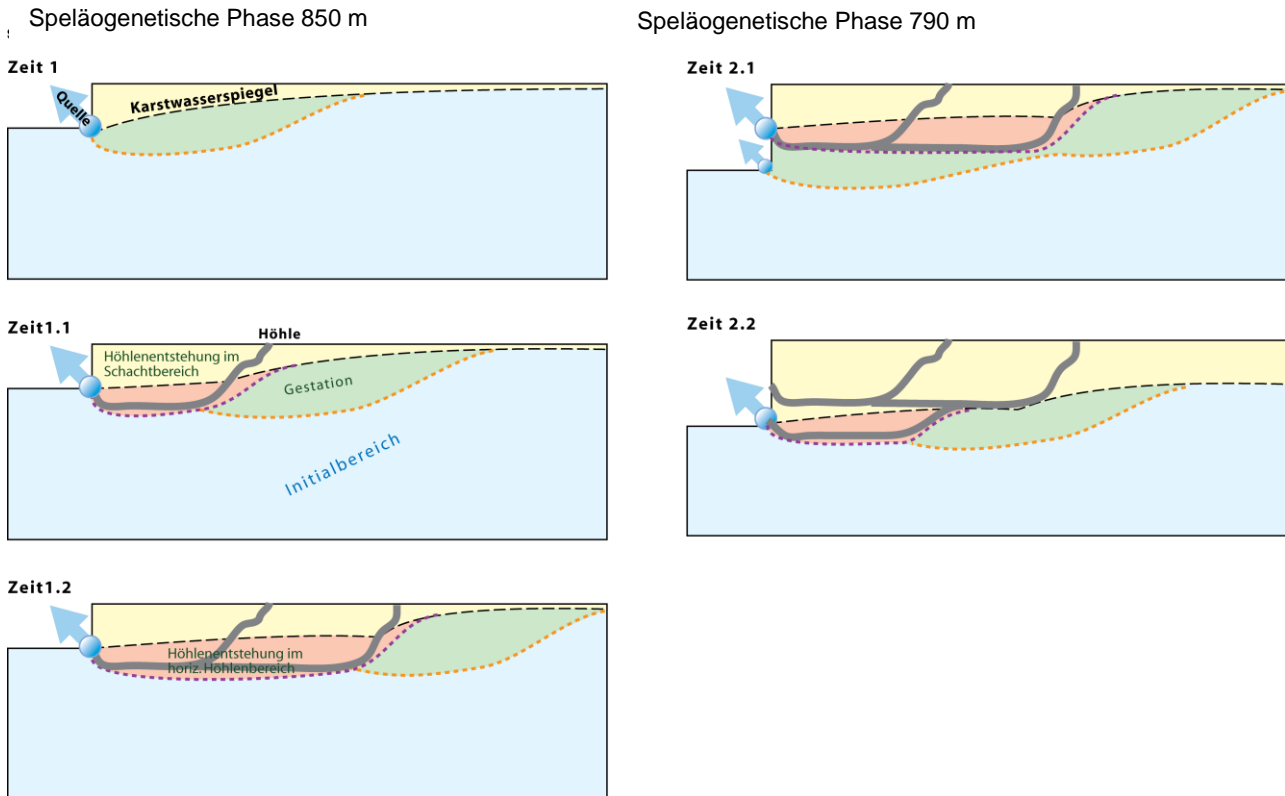
- Im **Epikarst** (einige Meter mächtig) werden zwei Horizonte unterschieden: Ein vadoser Horizont nahe der Oberfläche mit hoch durchlässigem, stark verwittertem Gestein mit vertikalem Durchfluss. Dieser Horizont ist i.a. einige Meter mächtig.
- Die Basis des Epikarst bildet ein tieferer, gesättigter Horizont: der Epikarst-Grundwasserkörper, mit eher langsamem Durchfluss, max. einige Meter mächtig. Ein Teil des Wassers dieses Grundwasserkörpers infiltriert vertikal nach unten durch feine Klüfte. Seine Obergrenze variiert; es bildet sich ein horizontal ausgelegtes Entwässerungsnetz, welches eine laterale Migration des Wassers zu den Schächten des Epikarst ermöglicht.
- Das Auftreten der **vadosen Zone** entspricht den tieferen Klüften und Schächten des Epikarst welche nach unten zu grösseren aber weniger häufigen Schächten der vadosen Zone konvergieren. In der Schweiz beträgt der Abstand zwischen den Schächten ca. 20 bis 50 m im Epikarst und ca. 100 – 200 m in der darunter liegenden vadosen Zone. Die Mächtigkeit der vadosen Zone beträgt oft einige 100 m. In Gebirgsregionen kann sie 2 bis 3 km mächtig sein.
- Das mögliche Auftreten einer gesättigten Zone, der **phreatischen Zone** (oder « gesättigte Zone ») entspricht dem gefluteten Teil der verkarsteten Gesteinsvolumen. Die phreatische Zone wird durch ein Netz von subhorizontalen Karströhren Richtung Hauptquellen entwässert. Dieses Netz ist ständig überflutet, es entwickelt sich bis einige zehn Meter unter die Obergrenze der gesättigten Zone.
- Im oberen Teil der gesättigten Zone besteht ein Bereich, der durch den wechselnden Karstwasserspiegel benetzt wird, die **epiphreatische Zone**. Die Karströhren bilden darin oft ein stark undulierendes System (« montagnes russes » oder « loops ») dessen Amplituden oft mehrere 10 m erreicht (manchmal mehrere 100 m). Die Kulminationspunkte, welche nur im überfluteten Zustand erweitert werden, zeigen oft Spuren vadosen Abflusses (canyons).

Der tiefere Teil der phreatischen Zone wird auch Zone der initialen Verkarstung genannt (Figur 2), da der Verkarstungsprozess dort noch wenig fortgeschritten ist und alle im Gestein vorhandenen Diskontinuitäten ungefähr uniform erweitert werden.

Diese Zone kann sich im Gestein mehrere 100 m bis zu einigen 1000 m unter das Niveau der Hauptquellen (dem sog. **Vorfluterniveau**) erstrecken. Die Verkarstung ist dort noch schwach ausgebildet wegen der Abnahme der Aggressivität meteorischer Wässer und der schwachen hydraulischen Gradienten (geringer Durchfluss).

In allen Zonen entwickeln sich die Karströhren (Figur 3) vor allem entlang bestimmter Diskontinuitäten, welche besonders auf Verkarstung anfällig sind. Man nennt sie „Initialfugen“. Es handelt sich um bestimmte stratigraphische Horizonte (Schichtfugen) oder um tektonische Diskontinuitäten. Der Einfluss der Initialfugen auf die Entwicklung des Karstnetzwerks ist besonders gross in der phreatischen Zone, wo die Gradienten klein sind und eine pseudohorizontale Entwässerung vorliegt. Mehr als 70 % der Karströhren entwickeln sich auf solchen Initialfugen, deren Volumen kaum einige % des gesamten Gesteinsvolumens ausmachen.

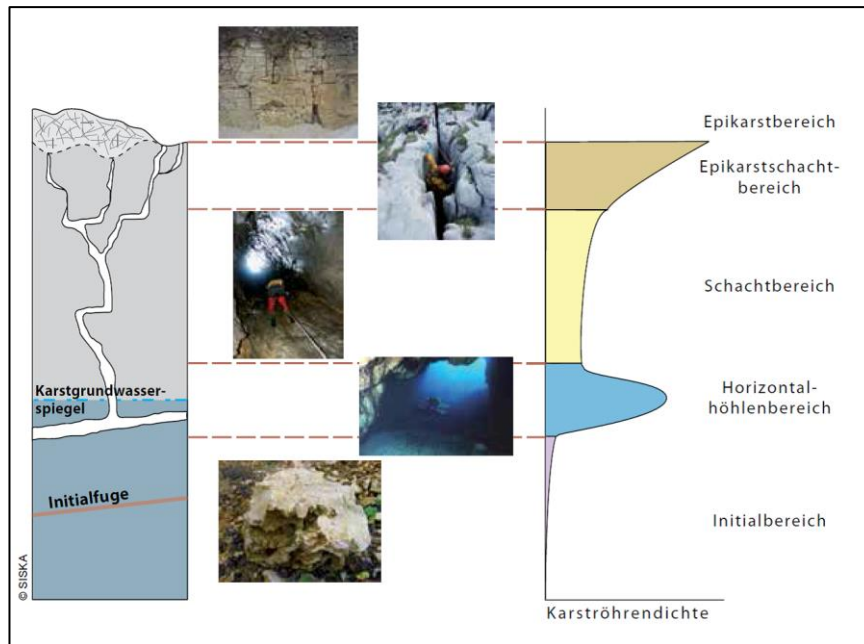
Die Entwicklung der Karströhren wird so durch den geologischen Aufbau bestimmt und durch die hydraulischen Bedingungen, welche stark vom Vorfluterniveau (fix oder im Laufe der Zeit variabel) und den Einzugsgebieten abhängen. Diese Parameter können im regionalen Massstab identifiziert und modelliert werden um die wichtigsten Charakteristika des Karsts zu bestimmen und zu lokalisieren (KarstALEA-Methode, Anhang 1).



Figur 2 Speläogenetische Zonen im epigenen Karst: In einem gegebenen Moment der Entwicklung eines Karstsystems befindet sich ein Teil im Schachtbereich, ein anderer im Horizontalhöhlenbereich und noch ein anderer in der „Höhlenentwicklungs“ Zone („gestation“). In der Tiefe wird ein Initialbereich unterschieden. Die Verkarstung erfolgt rückschreitend von der Quelle zum Einzugsgebiet (vgl. speläogenetische Stadien). Die speläogenetischen Bereiche der vorhergehenden Phase werden als paläo-Bereiche bezeichnet (aus Filipponi et al. 2012).

The **vadose cave development zone** is located above the water table.
 The **phreatic cave development zone** is located near the water table. Cave development occurs under low to moderate hydraulic gradient and turbulent flow conditions.
 The **cave gestation zone** is located within the first tens of metres of the phreatic zone. Karst conduits develop under steep hydraulic gradient but laminar flow conditions.
 The **cave inception zone** is located below the gestation zone with low hydraulic gradient and slow laminar flow. This is the zone in which inception horizons are being prepared.

Karströhren können ganz oder teilweise mit Wasser oder Sedimenten verfüllt sein. Tropfsteine gehören sicher zu den bekanntesten und spektakulärsten Sedimentverfüllungen von Karströhren. Für den Untertagbau sind jedoch klastische Sedimente bedeutender.



Figur 3 Die speleogenetischen Bereiche eines verkarsteten Gebirges. Die Karströhrendichte wie auch die Morphologie der Karströhren hängen von den speleogenetischen Bereichen ab – Epikarstbereich, Epikarstschachtbereich, Schachtbereich, Horizontalhöhlenbereich (aus Filipponi et al. 2012).

1.3.2 Zur Tiefenentwicklung eines epigenen (aktiv durchflossenen) Karstsystems

Einfachheitshalber wird bei der Anwendung der KarstALEA-Methode angenommen (Anhang 1), dass sich die Karströhren der phreatischen Zone in den ersten 30 bis 60 m der gesättigten Zone entwickeln. Diese Röhren zeigen eine charakteristische Anordnung in einem „loop system“, d.h. pseudo-sinusförmig um Achsen, welche in den Ebenen der Initialflächen liegen. Die Amplituden der „loops“ erreichen gewöhnlich einige 10 m. Der obere Teil der phreatischen Zone ist der wichtigste für die Entwicklung der Karströhren, unabhängig davon, ob das Grundwasser gespannt oder frei ist. Die Amplituden der Loops sind i.a. gering (einige % der Weglänge), da im Abflussnetz der phreatischen Zone die Tendenz auf hydraulisch optimale Wege mit kurzer Distanz hinzielt.

Für die Bewertung der Standortgebiete eines Tiefenlagers in der Nordost-Schweiz ist die Frage der Tiefe der Verkarstung zentral, da die Zugangsbauwerke durch den Malm bis in einige 100 m Tiefe unter das regionale Vorfluterniveau führen werden. Die Lage der Grenze zwischen der Höhlenentwicklungs-Zone (Gestation, mit zahlreichen Röhren von rel. grossem Durchmesser) und der tieferen Zone der Initialfugenentwicklung (mit seltenen Röhren von geringem Durchmesser) ist besonders wichtig.

In den folgenden Abschnitten fassen wir Konzepte aus der Literatur zusammen, welche aktive Karstsysteme in grosser Tiefe beschreiben. Es handelt sich hier nur um Beispiele der epigenen Verkarstung. Die Bildung tiefer Karstwasserleiter kann aber auch durch hypogene Verkarstung verursacht werden. Zwei Situationen werden unterschieden:

- I. Karströhren welche sich mehrere 100 m unter dem Vorfluterniveau entwickeln (z.B. mehr als 300 m unter dem Vorfluterniveau);
- II. Karströhren, welche sich unter einer mächtigen undurchlässigen Gesteinsschicht bilden.

1.3.2.1.1 **Entwicklung eines « loop-systems » unter dem Vorfluterniveau**

In einem von Ford and Ewers 1978 entwickelten Konzept bilden sich phreatische Karströhren, je weniger das Reservoir geklüftet ist, umso mehr in der Tiefe aus und reduzieren somit die Frequenz der Loops zwischen der oberen phreatischen Zone und dem Ausfluss.

Demselben Prinzip folgend schlägt Worthington 1991 vor, die Tiefe phreatischer Wasserleiter in Funktion der Mächtigkeit der gesättigten Zone, ihrer Entfernung vom Ausfluss und der Neigung der Aquifere zu modellieren. Jeannin *et al.* 2000 messen, in Bezug auf die Amplitudenhöhen der Loops, der Heterogenität der Öffnungen der Initialfugen mehr Bedeutung zu als der gesamten Zerklüftung des Massivs.

Später schlagen Kaufmann *et al.* 2014 vor, die bestehenden Modelle auf die Bildung tiefer Karströhren hin zu testen. Sie kommen zum Schluss, dass sich in der Tiefe Karströhren nur entwickeln, wenn, wie von Jeannin *et al.* 2000 vorgeschlagen, bereits bestimmte offene Initialfugen bestehen

Auch wenn die Konzepte von Ford and Ewers 1978 oder Worthington 1991 diskutabel sind, geben doch folgende Autoren Beispiele von phreatischen Karstwasserleitern in grosser Tiefe an:

Das System El Abra in Mexico wird oft zitiert. Nach Fish 1977 gibt es dort klare Evidenzen (Höhlen und Füllungen) für eine Tiefenzirkulation im 200 x 300 km grossen Karst-Grundwasserkörper. Sie scheint aber älteren Phasen anzugehören, in welchen sich phreatische Röhren in einer Tiefe von mehr als 300 m unter dem Vorfluterniveau entwickelten. Nach Fish 1977 hätte die Verkarstung in einem Zeitpunkt eingesetzt, in welchem der Aquifer noch unter den undurchlässigen Formationen des Tertiär gelegen hat und das System nicht vertikal gespiesen werden konnte. Die Grundwasserneubildung erfolgte durch eine Infiltration am Rand des Tertiär, in weit entfernten und höher gelegenen Kalkaufschlüssen.

In einer speläogenetischen Studie des Systems der Sieben Hengste (Helvetikum, Kanton Bern) zeigen Jeannin and Häuselmann 2005, dass in der sog. Faustloch-Phase (Alter 500'000 Jahre, Karströhren welche heute auf einer Höhe von 1440 m ü.M. liegen) ein phreatisches Entwässerungssystem sich über 15 km erstreckte und dies unter einer wenig permeablen Schicht (mergeliger Hohgantsandstein) von 800 m Mächtigkeit. Morphologische Studien ergeben, dass sich das aktive Karst-Netzwerk damals 300 m unter dem Vorfluterniveau in einer Entfernung von weniger als 6 km vom vermuteten Ausfluss entwickelte.

Weitere Beispiele phreatischer Karströhren tief unter dem Vorfluterniveau werden in der Literatur diskutiert: In Sarawak wurden Loop-Tiefen bis mehr als 100 m unter dem Vorfluterniveau gemessen (Farrant *et al.* 1995). Im Hölloch (SZ) können Loops von nahezu 190 m Tiefe gemessen werden (Worthington 1991).

Es scheint also naheliegend (siehe auch Kaufmann *et al.* 2014), dass die Amplituden der Loops von der Mächtigkeit der phreatischen Zone abhängen, von der Distanz zum Ausfluss, von der Orientierung und Neigung der Initialfugen und der Ausdehnung des Aquifers in der Tiefe (z.B. im Fall der Doux de Coly (F): loop = 50 m, Distanz Ausfluss = 2,5 km; im Fall der Dent de Crolles, loop = 100 m, Distanz zum Ausfluss = 1 km, im Fall der Siebenhengste, loop = 300 m, Distanz zum Ausfluss = <6 km.

1.3.2.1.2 *Entwicklung von aktiven Karstwasserleitern unter einer mächtigen, wenig permeablen Überdeckung*

Die zweite Frage bezieht sich auf die Entwicklung aktiver Karströhren (immer noch in epigenem Regime) unter mächtigen und ausgebreiteten wenig permeablen Überdeckungen (Typ Flysch, Molasse, mächtige Tonlagen etc.).

Beobachtungen an verschiedenen Systemen (unter anderem El Abra, Siebenhengste) belegen die Möglichkeit der Entwicklung tiefer aktiver Karstsysteme, nicht nur hunderte von Metern unter dem Vorfluterniveau, sondern auch mehrere 100 m unter einer undurchlässigen Schicht, welche heute teilweise abgetragen ist.

White 1969 erwähnt Beispiele von aktivem Karst unter einer mächtigen Überdeckung. (« capped → aquifer overlain by impervious rocks »). Der Autor weist darauf hin, dass es sich dabei oft um subhorizontale Gänge von grosser Ausdehnung und respektablen Durchmessern handelt. Solche Karstwasserleiter würden bis zu Tiefen von 1000 m unter der Oberfläche beobachtet. Er zitiert mehrere Beispiele:

- (i) Greenbrier Aquifer, West-Virginia (White and Schmidt 1966),
- (ii) Highland Rim Country von Tennessee,
- (iii) mächtige Mississippi-Aquifer im Norden Alabamas,
- (iv) Black Hills Aquifer in Dakota (Swenson 1968).

Diese Karst-Grundwasserkörper (ebenso wie der Edward Aquifer in Texas) können durchaus mit dem Malm und dem Dogger in den hinsichtlich eines Tiefenlagers zu diskutierenden Gebieten der Nordschweiz verglichen werden.

Palmer 1991 gibt weitere Beispiele aus den USA. Man muss dabei aber erwähnen, dass einige dieser Systeme einen hypogenen Ursprung haben, welcher zum Zeitpunkt der Publikation noch nicht bekannt war.

Im Schweizer Faltenjura können verschiedene Beispiele aktiver Verkarstung unter Synklinalen, welche mit mehreren 100 m Molassesedimenten gefüllt sind, aufgeführt werden: Unter dem Becken von Delémont (JU), unter St-Imier (BE) und in der Vallée des Ponts (NE) wurde eine rasche tiefe Karstwasserzirkulation zwischen den beiden Flanken der Synklinale nachgewiesen welche eine Verbindung unter dem Kern der Synklinalen aus mächtigen Molasse- und Quartärfüllungen (250 m in Saint-Imier, 300 m in der Vallée des Ponts) belegt.

Die Entwicklung aktiver Karstwasserleiter (vom epigenen Typ) unter dem regionalen Vorfluterniveau und auch unter mächtigen, undurchlässigen Ablagerungen, ist unter gewissen Bedingungen also möglich. Ihre Ausbildung ist stark durch die Geometrie der Karbonat-Aquifer und die Art deren Begrenzungen gesteuert. In einigen Fällen werden alte, hypogen gebildete Karstwasserleiter durch den rezenten Grundwasserfluss reaktiviert.

Die Standortgebiete für ein Tiefenlager müssen deshalb explizit, individuell und detailliert unter diesen Gesichtspunkten bewertet werden.

1.3.2.1.3 *Vorhersehbarkeit des epigenen Karst*

Die KarstALEA Methode (Anhang 1) wurde hauptsächlich für Tunnels in epigenem Karst entwickelt, welche über dem regionalen Vorfluterniveau liegen. Sie eignet sich weder für den hypoge-

nen Karst, noch für den tiefsten Bereich der epigenen Verkarstung. Sie müsste deshalb hinsichtlich der Verwendung bei den Zugangsbauwerken für Tiefenlager angepasst werden.

Die Anpassung der Methode und ihrer Anwendung auf die Standortgebiete ist unumgänglich, um die vorgesehenen Tunnelbauten in einen Karst-Zusammenhang zu stellen und die potentiell problematischen Zonen zu identifizieren. Dies würde auch die Planung und Auslage der zukünftigen Untersuchungen erleichtern, welche sich für eine indirekte (Geophysik) oder direkte Ortung (Bohrung) von Hohlräumen eignen.

1.4 Hypogener Karst

1.4.1 Beschreibung

Die hypogene Verkarstung beruht auf der Auflösung von Karbonatgesteinen durch aus der Tiefe diffus aufsteigende Wässer, welche entlang von Diskontinuitäten durch hydraulische Gradienten und erhöhte Temperatur bewegt werden. Tiefenwässer sind potentiell reich an CO_2 oder H_2S . Dieser Typ von Verkarstung ist (fast) unabhängig von der oberflächlichen Neubildung des Grundwassers und entwickelt sich oft in Zonen gespannten Grundwassers unter der Basis der epigenen Verkarstung.

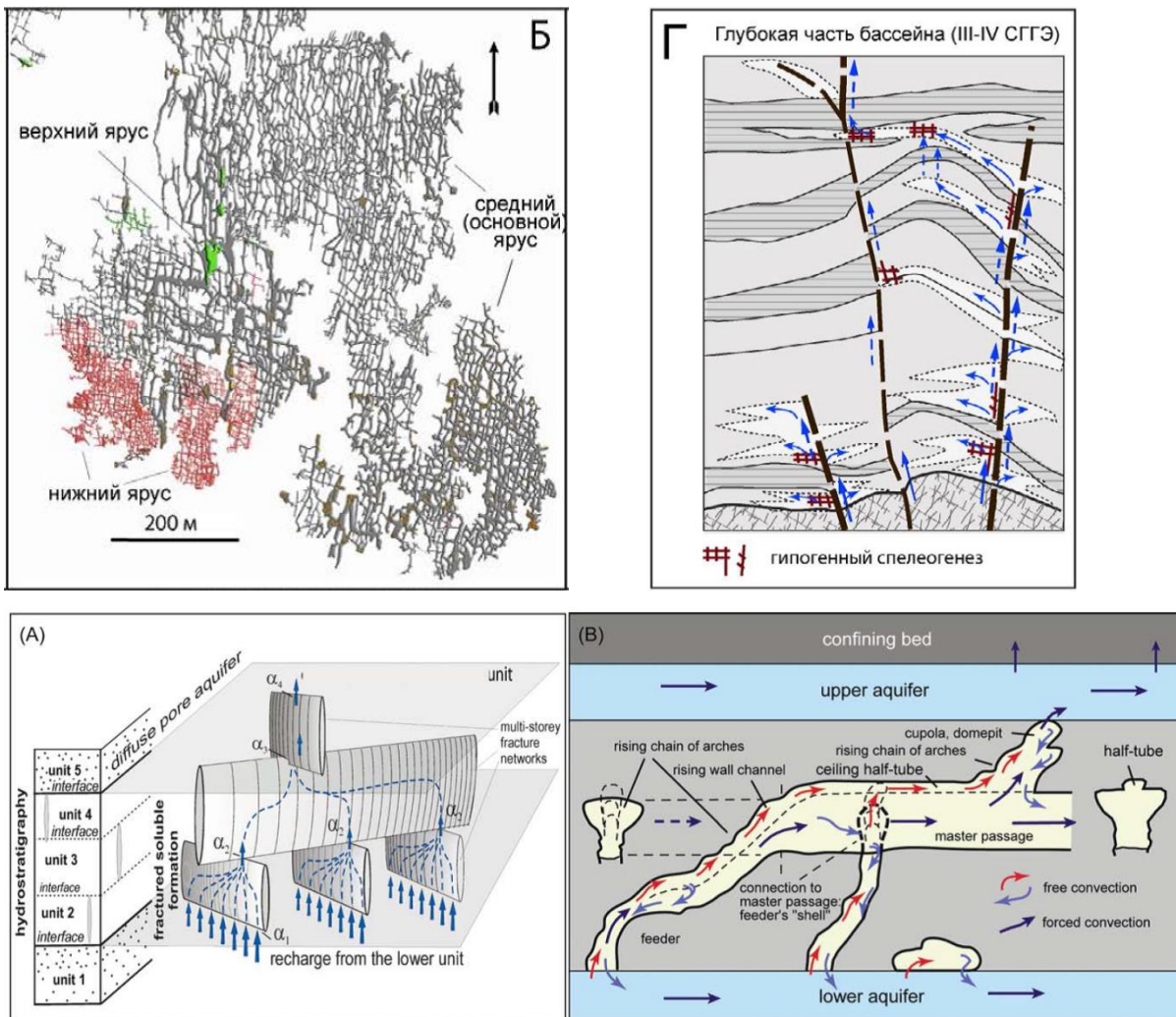
Oft entwickelt sich der hypogene Karst in der Kontaktzone zwischen aufsteigenden Tiefenwässern und meteorischem Wasser. Die Durchmischung erhöht die Lösungskapazität. Die Gegenwart einer hydrothermalen Zirkulation wirkt sich ebenfalls günstig für hypogene Verkarstung aus.

Im Gegensatz zur epigenen Verkarstung weist hypogener Karst kein hierarchisches Entwässerungssystem mit Hauptleiter und Zuflüssen von höheren Lagen Richtung eines Ausflusses auf. Vielmehr handelt es sich um Labyrinth-artige Strukturen („maze“) mit hoher Röhrendichte und starker Verzweigung (Figur 4).

Hypogener Karst ist oft im Spiel bei der Bildung von grossen Hohlräumen von mehreren 10 m bis 100 m Durchmesser, welche isoliert oder durch mannigfaltige kleine Röhren verbunden sind („spongework mazes“). Diese Hohlräume bilden entweder grosse Säle („chambers“) oder aufsteigende Schächte („rising shafts“ oder „Schlote“). Wie bei der epigenen Verkarstung entwickeln sich die Karstwasserleiter prinzipiell entlang von Initialfugen (tektonischen, stratigraphischen oder diagenetischen Schwächezonen). Wegen der Art der Zirkulation, dem azendenten Fluss und der oft homogenen Verteilung, sind Morphologie und Grösse der Hohlräume des hypogenen Netzes ebenfalls „homogen“ in einer Region verteilt.

Jedenfalls können sich Säle und Tunnels von grossem Volumen bilden, z.B. an Stellen wo sich verschiedene Grundwässer mischen. Neueste Studien weisen darauf hin, dass spezifische Formen von Karströhren in Verbindung gebracht werden können, mit einer speziellen Geologie oder bestimmten hydrologischen oder chemischen Verhältnissen (Klimchouk *et al.* 2015).

In Folge von Abtragung und Exhumation kommen hypogene Karstnetzwerke sukzessive auf die Höhe der Vorfluter eines Massifs zu liegen und übersteigen dieses. Sie werden dabei durch die Zirkulation meteorischen Wassers reaktiviert und neugeprägt (Erweiterung durch epigene Verkarstung).



Figur 4 *Oben-links: Grundriss einer hypogenen Höhle (aus Klimchouk 2013); Oben-rechts: Vertikales Profil durch eine Sedimentabfolge mit undurchlässigen (grau mit Schraffuren), teildurchlässigen (grau) und karstfähigen (hell grau) Sedimenten (aus Klimchouk 2013). Braune Netze zeigen Stellen, wo eine hypogene Verkarstung am Wahrscheinlichsten ist. Unten: Details der typischen Morphologie und Genese von hypogenen Höhlen (aus Klimchouk 2012).*

1.4.2 Vorhersehbarkeit des hypogenen Karst

Die prinzipiellen Faktoren, welche zu hypogenem Karst führen, sind bekannt. Jedoch besteht noch keine bewährte Methode zur Vorhersage der Karstwasserleiter (Lokalisierung, Charakterisierung). Klimchouk 2009 beschreibt eine Anzahl von Netzwerk- und Gang-Morphologien, welche klar darauf hinweisen, dass das Auftreten der Morphologien nicht zufällig ist.

Die Analyse der Standortgebiete durch einen Spezialisten des hypogenen Karsts, würde sicher Hinweise auf die riskantesten Orte, auf die Größe und Form der zu erwartenden Hohlräume liefern.

1.5 Küstenkarst (« coastal karst »)

1.5.1 Beschreibung

Die Mischung von Süßwasser epigener Herkunft mit Salzwasser erzeugt eine Aggressivität im Hinblick auf die Kalklösung und erzeugt deshalb Karsthohlräume. Dieser Typ der „mixing zone“ Verkarstung ist an Küsten gebunden, wo in verkarstungsfähigem Gestein ein Salzwasserkeil mit meteorischem Grundwasser in Kontakt kommt.

In einigen Fällen (z.B. Yucatan) konnte gezeigt werden, dass die „mixing zone“ Verkarstung bereits durch thermale Strömungen kontrolliert ist (Thomas 2010). Die Grenze zwischen hypogenem Karst und Küstenkarst ist entsprechend nicht immer ganz scharf.

In Küstenregionen bilden süsse Grundwasserkörper im Kontakt mit Salzwasser Linsen- oder Halblinsen förmige Körper (Custodio 1978) und die « mixing zone » Verkarstung kann entlang der unteren Grenzfläche oder am Top der Linsen in der phreatischen Zone einsetzen.

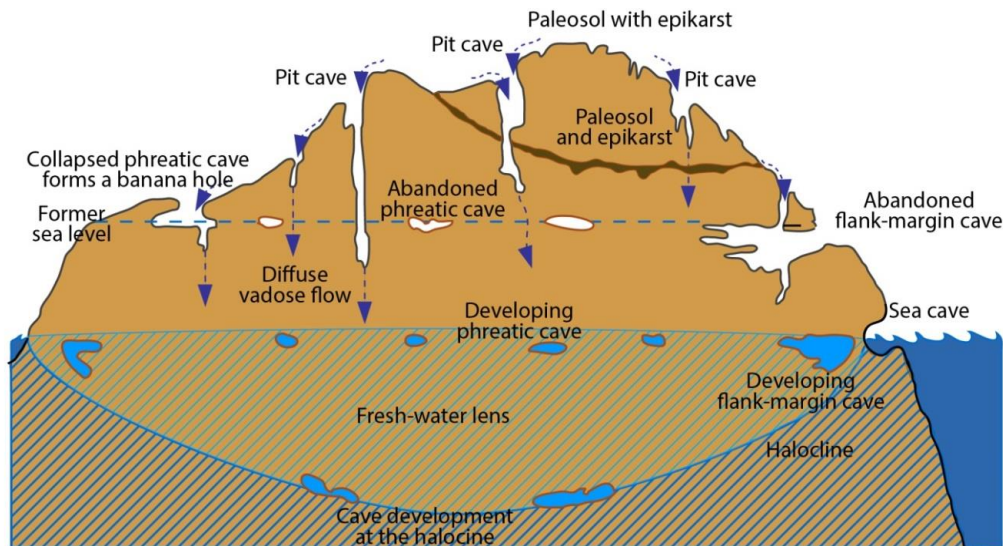
Küstenkarst (« coastal karst ») ist demnach vor allem an den Küstengürtel gebunden und weist spezielle Hohlraumformen auf. Drei verschiedene Höhlentypen werden unterschieden, wie Figur 5 zeigt (Myroie and Carew 2000):

- I. Die « *Sea caves* » welche sich in der intertidalen Zone unter mechanischer Einwirkung der Wellenenergie bilden. Hier ist die Korrosion nicht Hauptfaktor der Verkarstung, sondern eher Erosion. Die meerwärts gerichteten Öffnungen können mehrere 10 m bis 100 m gross werden.
- II. Die « *Flank margin caves* » entwickeln sich am Rande des Süßwasserkeils in Küstennähe, dort wo die meteorischen Wässer sich im Untergrund konzentrieren bevor sie ins Meer exfiltrieren.
- III. Die Höhlen vom Typ « *halocline caves* », welche sich durch Lösung entlang der Grenzfläche der salzigen oder meteorischen Grundwasserkörper bilden. In Wirklichkeit können Salz- und Süßwasser beide einzeln Kalzium-Karbonat gesättigt sein, ihre Mischung jedoch ist bez. der Kalzitlösung untersättigt. Solche brackischen Wässer sind aggressiv und führen zu Verkarstung.

Die « flank margin caves » und die « halocline caves » zeigen i.a. kein Entwässerungsnetz mit elliptischen oder mäandrierenden Gangformen. Eine hohe primäre Porosität (in Kalken mit geringer Subsidenz und Diagenese) und eine hohe Permeabilität, bei geringer Anisotropie, begünstigt die Bildung von ovalen horizontal angeordneten Sälen mit eher zufälligen Verbindungen und geringer vertikaler und grosse laterale Ausdehnung. Solche Höhlen können sich relativ schnell bilden und die Prozesse sind von der Lage des Meeresspiegels und der Zufuhr meteorischen Wassers abhängig, welcher die Lage der „mixing zone“ beeinflussen.

Die einschlägigsten Beispiele für Küstenkarst finden sich in Myroie 2005. Die am besten beschriebene Region mit solchem Karst befindet sich in Yucatàn (Mexico), wo sich einige der längsten Höhlennetze der Welt befinden (Bauer-Gottwein *et al.* 2011). Die „costal karsts“ in Florida und auf den Bahamas sind ebenfalls Objekt zahlreicher Beschreibungen (Roth *et al.* 2006). Einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Karst in Yucatan ist in Smart *et al.* 2002 gegeben, welcher zwischen den grossen Karbonat-Plattformen der Küstenregionen und karbonatischen Inseln unterscheidet.

Figur 5 verdeutlicht, wie diese Küstenkarste einerseits durch eine epigene Verkarstung mit Epikarst, vadoser- und gesättigter Zone gebildet werden und andererseits durch Mischwasserverkarstung („mixing zone“ Karst). Beide Typen der Verkarstung sind eogenetisch, d.h. in Kalken mit geringer Diagenese verbreitet, was zu bestimmten Besonderheiten führt (Baceta *et al.* 2001). In Abhängigkeit relativer Meeresspiegelschwankungen interferieren epigener und „mixing zone“ Karst und bilden relativ komplexe Formen.



Figur 5 Schema der wichtigsten Formen des Küstenkarsts (modifiziert nach Mylroie and Carew 1995). Achtung, dieses Schema ist nicht massstäblich, es ist vertikal stark überhöht.

Zwischen Malm und Oligozän befanden sich die Kalke in der Nordschweiz in einer Situation immer ziemlich nahe jener des Küstenkarsts (Nicod 1990). Die für diese Zeiten rekonstruierte Meeresküste liegt etwa 150 km im Süden und das Gebiet der Nordschweiz liegt flach mit exponierten Kalkflächen (Berger *et al.* 2005). Die Verkarstung, welche in jener langen Periode aktiv war, sollte deshalb im Lichte des Modells auf Figur 5 analysiert werden. Würde man jedes Element dieses Modells genauer charakterisieren, so könnte man die Charakteristik des Siderolitikums oder des „eozänen“ Karsts sicher besser verstehen. Beispielsweise wurden „Karst-Taschen“ beobachtet (Tabelle 1 im Anhang 3) welche sich über mehrere 10 m erstrecken und mit siderolitischen Material oder anderen Sedimenten verfüllt sind. Die Interpretation dieser Beobachtungen im Zusammenhang mit Küstenkarst Prozessen würde es erlauben, die kritischsten Punkte bez. des Vortriebs von Zugangsbauwerken zu identifizieren. Man müsste dabei besonders auf die Charakterisierung der Gangdichte und die Art der Hohlraumverbindungen achten.

1.5.2 Vorhersehbarkeit des Küstenkarst

Bis heute besteht keine Methode der Art « KarstALEA » für den Küstenkarst.

Wie oben bereits erwähnt würde eine gute Synthese der vorhandenen Kenntnisse (Beobachtungen an rezenten Küstenkarst-Systemen) erlauben, ein detailliertes konzeptuelles Modell der Karsthohlräume (Dimensionen, Formen, Lokalisierung...), der Verfüllungen (Natur, Volumen, Verfestigung..) und der dem Küstenkarst eigenen Oberflächenformen zu konstruieren.

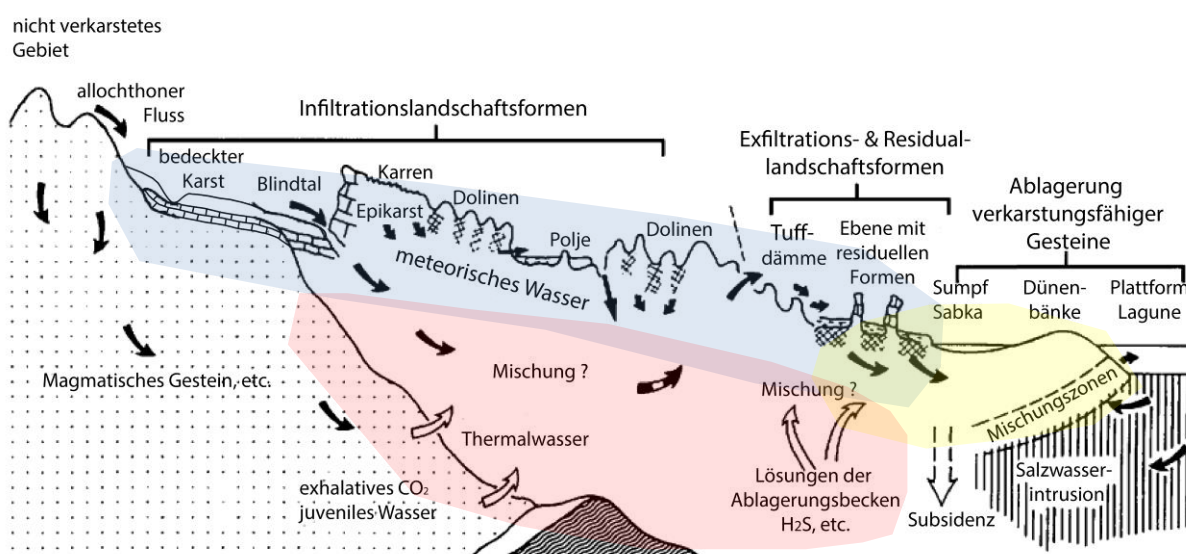
Ein solches Modell wäre ein wichtiger Bewertungsmaßstab für die Interpretation der vereinzelt Beobachtungen aus dem Eozänen Karst der Nordschweiz. Es wäre nützlich bei der Interpretation geophysikalischer Daten. Wie im Falle des hypogenen Karsts, würde die Beteiligung eines Spezialisten des Küstenkarsts eine effizientere Interpretation erlauben, insbesondere die Abschätzung der Häufigkeit, der Form und Grösse, der Art der Verbindungen und der Gefahren, welche die Verfüllungen des Karsts bergen.

1.6 Grenzen zwischen epigenem, hypogenem und Küstenkarst

Epigener Karst und Küstenkarst sind vorwiegend durch Eigenschaften der Landoberfläche bedingt (vor allem Lage der Grundwasserbildungszone und des Vorfluters, Figur 6). Hypogener Karst ist umgekehrt durch Eigenschaften des tieferen Untergrundes (Gas oder Wärme Quellen) bedingt. In gewissen Situationen sind die Bedingungen so, dass zwei (sogar drei) Verkarstungsprozesse gleichzeitig aktiv werden können. Bei Küstenkarst wurde gezeigt, dass es sich um eine Kombination von „mixing zone“ und epigener Verkarstung handelt. Eine Kombination mit hypogenem Karst ist auch denkbar: In Yucatan vermutet man zum Beispiel, dass thermalbedingte Grundwasserströmungen die Entwicklung von riesigen „Cenoten“ (Schloten) kontrolliert (Thomas 2010).

Bei epigener Verkarstung stellt sich immer die Frage des Verkarstungsgrades des Kalkes unterhalb des Hauptröhrensystems. Im initialen Bereich „inception domain“ kann eine hypogene Verkarstung eine grosse Rolle spielen. In vielen Fällen muss sogar angenommen werden, dass die Initialfugen eigentlich durch eine hypogene Verkarstung gebildet wurden (z.B. Verwitterung von Pyrit). Natürlich kann die vorherige Existenz von tiefen hypogenen Hohlräumen eine bedeutende Auswirkung auf die Eigenschaften einer späteren epigenen Verkarstung haben.

Eine Beurteilung der drei Typen von Verkarstung soll entsprechend systematisch unternommen werden. In vielen Fällen können ein oder zwei Typen mit relativ wenig Aufwand ausgeschlossen werden. Bei Tiefenlagern ist ein solcher Ausschluss schwieriger und die Daten müssen explizit in dieser Hinsicht studiert werden.



Figur 6 Schema der unterschiedlichen „Karst-Typen“: Blau: epigener Karst; gelb: Küstenkarst; rot: hypogener Karst (modifiziert nach Ford and Williams 2007).

1.7 Bedeutung der Karstphänomene in der Nordschweiz

Die oben beschriebenen Karst-Typen treten in der Nordschweiz auf und werden unter lokalen Namen beschrieben. Hier sind vier „Nordschweiz-Typen“ definiert, die gemäss den allgemeinen Karst-Typen klassifiziert werden können.

1.7.1 Aktiver Karst (Rezent)

Unter diesem Begriff werden Karst-Erscheinungen verstanden, die unter den heutigen Randbedingungen immer noch durch fliessendes Wasser aktiv geprägt werden. Es handelt sich vor allem um aktive Quellen (perennierende oder temporäre), phreatische und epiphreatische Karst-Röhren, aktive Versickerungsstellen, usw. In der Nordschweiz handelt es sich vor allem um epigenen Karst.

1.7.2 Plio-Pleistozäner Karst

Dieser Begriff bezeichnet Karst-Erscheinungen, die sich im Lauf des Quartärs und Pliozän (nach Ablagerung der Oberen Meeresmolasse) entwickelt haben. Die Randbedingungen der Verkarstung haben sich seither durch die Erosion der Molasse und die Eintiefung der Täler verändert. Auch Klimaveränderungen spielen dabei eine Rolle. Es handelt sich um fossile Höhlen, um alte Dolinen und Schächte, um Karströhren, die sich im Zusammenhang mit alten Vorflutern entwickelt haben (entweder oberhalb oder unterhalb des heutigen Vorfluter-Niveaus). In der Nordschweiz handelt es sich vor allem um epigenen Karst.

1.7.3 Eozäner Karst

Karst-Erscheinungen, die sich zwischen dem Malm (-140 Ma) und dem Oligozän (USM, -23 MA), eventuell sogar bis dem Miozän (-7 Ma) entwickelt haben, werden als "Eozäner Karst" bezeichnet. Die Verkarstung entwickelte sich unter meeresnahen und tropischen Flachland-Bedingungen (typischer „Coastal karst“). Im Grossen handelt es sich um eine Paläolandfläche mit Mulden, alten Sedimenten (Lösungsrückstände = Boluston, Bohnerz), aufgefüllten Klüften und aufgefüllten Höhlen. Im Laufe der Zeit (ca. 100 Ma) haben sich diese Bedingungen verändert, aber die aktuellen Kenntnisse über diese Schwankungen sind sehr bescheiden (Anhang 3).

1.7.4 Hypogener Karst (zeitlich nicht bedingt)

Dieser Begriff bezeichnet Karst-Erscheinungen, die vor allem mit aufsteigendem Wasser in Zusammenhang stehen, das seine korrosive Kraft aus tiefen Phänomenen bezieht (Wärme, CO₂ aus der Tiefe, H₂S...). Diese Verkarstung könnte seit der Malm-Zeit bestehen und könnte bis heute immer noch aktiv sein (an verschiedenen Stellen). Bisher wurde kein Beweis von bedeutenden Karsterscheinungen dieser Art in der Schweiz vorgelegt. Hinweise existieren trotzdem, vor allem eine Reihe von thermalen Quellen aus dem Malm und/oder Muschelkalk am Fuss des Juras. Die Beschreibung des Muschelkalk-Grundwasserleiters von Stober 2013 bringt viele Hinweise, die für eine hypogene Verkarstung des Muschelkalkes sprechen (Anhang 2).

1.7.5 Abgrenzung von verkarstungsfähige Formationen

Die KarstALEA-Broschüre (Filipponi *et al.* 2012, Kapitel 5.2) beschreibt die wichtigsten Parameter und die Verkarstungsfähigkeit der Formationen in der Schweiz. Eine ausführliche Beschreibung der Verkarstungscharakteristika von verschiedenen Lithologien ist im Anhang IV und VIII von Filipponi *et al.* 2012) zu finden. Die folgenden Abschnitte fassen sie zusammen.

Die wichtigsten Parameter für eine Entwicklung der Verkarstung sind die Löslichkeit, die Festigkeit (um Öffnungen offen zu halten), die laterale Verbreitung (zur Ermöglichung der Zirkulation), die Existenz einer Neubildungszone und die Anwesenheit von aggressivem Wasser (CO₂, H₂S). Unter guten Bedingungen kann eine kompakte dünne Bank mit geringem Karbonatgehalt (z.B. 10 %) verkarstet werden, z. B. wenn sie kontinuierlich ist und zwei Bereiche mit grosser hydraulischer Potentialdifferenz miteinander verbindet.

Die verkarstungsfähigen Gesteinsformationen in der Nordschweiz stammen grösstenteils aus dem Malm und dem Muschelkalk. Jedoch sind auch der Hauptrogenstein und der Arietenkalk verkarstungsfähig. Gipskarst tritt in den Sulfatführenden Schichten des Gipskeupers und des mittleren Muschelkalk auf.

Mehrere Formationen enthalten entweder untergeordnet Kalkbänke (z.B. Effingerschichten) oder einen Kalkgehalt (z.B. OMM) welche sie zu mindest potentiell verkarstungsfähig machen. Es ist zwar wenig wahrscheinlich, dass sich in diesen Formationen grosse Hohlräume bilden, aber Karströhren (teils eingestürzt) können darin durchaus bestehen und zu hohen Entwässerungsgeschwindigkeiten führen.

Damit das Gefährdungsbild Karst für Untertagebauten in der Nordschweiz korrekt beurteilt werden kann, müssen die betroffenen Formationen identifiziert und die Auswirkungen quantitativ abgeschätzt werden.

Für die Gesamtsicherheit der Tiefenlager ist die Einschätzung der Verkarstungsfähigkeit potenzieller „harter Bänke“ in Wirt- und Rahmengesteinen besonders wichtig. Die als „Wirtgestein“ oder „Rahmengestein“ eingestuft Serien müssen konsequenterweise aufmerksam auf potenzielle „harte Bänke“ überprüft werden.

In Bezug auf die beiden am meisten verkarstungsfähigen Serien, ist der Malm klar von epigener Verkarstung und Küstenkarst betroffen. Indizien weisen auch auf die Möglichkeit einer hypogenen Verkarstung hin, besonders am Jura-Süd Fuss. Es ist darum wichtig, dass ein synthetisches Karst-Modell charakteristische Zonen präsentiert, in welchen die verschiedenen Verkarstungsmechanismen typischerweise auftreten.

Der Muschelkalk war i.a. der hypogenetischen- und lokal der epigenen Verkarstung ausgesetzt. Die epigene bezieht sich vermutlich vor allem auf die Aufschlussregionen. Die hypogene Komponente muss aber untersucht und bewertet werden (siehe auch Anhang 2). Das momentan grösste identifizierte Risiko bildet die Gegenwart von grossen Hohlräumen welche durch Fontis¹ durch die stratigraphische Serie brechen und ggf. den Opalinuston erfassen könnte. Es ist sowohl eine aktuelle wie eine zukünftige Gefährdung, die abgeschätzt werden müsste.

Ein umfassendes Modell der Verkarstung in den als Standorte weiter zu untersuchenden Regionen sollte demnach in SGT Etappe 3 entwickelt werden, um die Summe der Risiken so optimal wie möglich bewerten zu können, im Hinblick auf eine bessere Prognose des Wasserandrangs (Beherrschbarkeit, Arbeitssicherheit, Vorauserkundung) und die Sicherheit der Bauwerke.

¹ Siehe Kapitel 2.1.2, Seite 16

Kapitel 2

Gefährdungsbilder im Karst und deren Identifizierungsmöglichkeiten

Karstgefährdungen geologischer Tiefenlager betreffen hauptsächlich zwei Themen: 1) Gefährdungen der Langzeitsicherheit nach dem Verschluss (Betrachtungszeitraum 1 Mio Jahre für HAA und 100'000 Jahre für SMA); 2) Gefährdungen während dem Bau und Betrieb, inkl. der Zugangsbauwerke und des Lagerbereichs.

Die Gefährdung durch die potenzielle hypogenetische Verkarstung des Muschelkalks betrifft beide Themen.

2.1 Gefährdungen der Langzeitsicherheit

Karst könnte aus Sicht der Experten grundsätzlich die Langzeitsicherheit des Lagers aus drei Gründen beeinträchtigen: 1) Weil schnellere (verkarstete) Wasserfliesswege als angenommen existieren; 2) weil, im Lauf der Zeit, grosse Hohlräume unterhalb des Opalinustons sich entwickeln können (hypogene Verkarstung), die durch Fontis die Kontinuität, Stabilität und Undurchlässigkeit des Opalinustons beeinträchtigen können; 3) weil sich während der nächsten Million Jahre die Verkarstung entwickeln könnte und so die Bedingungen im Umfeld des Lagers stark verändern könnte. Alle drei Gründe sind teilweise miteinander verknüpft.

2.1.1 Schnellere Fliesswege als vermutet

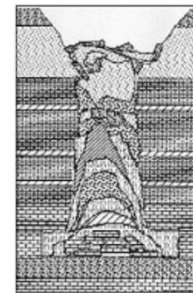
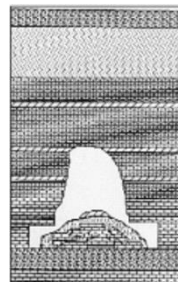
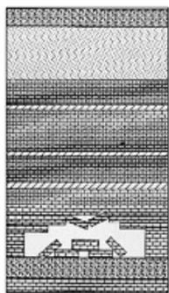
Hier unterscheiden wir zwei Hauptmöglichkeiten:

1. Röhren mit erhöhten Fliessgeschwindigkeiten können besonders im Malm (eventuell auch in weiteren karstfähigen Formationen wie dem Muschelkalk, Stober 2013) existieren. In den hydrogeologischen Modellen (NAB 13-023) wurden die geschätzten Fliessgeschwindigkeiten ohne solche Röhren errechnet. Modelle mit äquivalenten (homogenen) Durchlässigkeiten sind nicht geeignet, um solche erhöhten Fliessgeschwindigkeit abzuschätzen. Dies betrifft das Wirtgestein aber nur am Rande und sollte die gesamte Sicherheit des Lagers nicht beeinträchtigen.
2. Die Verkarstung von dünnen Kalkschichten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich könnte den abgeschätzten Schutz bedeutend verringern. Eine solche Verkarstung erscheint aus heutiger Sicht zwar unwahrscheinlich. Dieser Aspekt sollte trotzdem noch explizit und aufmerksam in weiteren Etappen angeschaut werden.

2.1.2 Tiefe Hohlräume mit Fontis

Es gibt Hinweise, auf eine hypogene Verkarstung des Muschelkalkes (Anhang 2). Sollte dies der Fall sein, könnten grosse Hohlräume im Muschelkalk existieren oder sich im Lauf der Zeit erweitern und durch „Fontis“² sich im Untergrund nach oben entwickeln (Figur 7).

Häufig bewirken Fontis Nachbrüche im Dekameterbereich in den Formationen welche einen Hohlraum überlagern. Einige Beispiele zeigen dass selbst Verbrüche bis zu mehreren hundert Metern möglich sind. Die Distanz zwischen Muschelkalk und Opalinuston misst weniger als 200 m und enthält teilweise lösliche und mechanisch wenig stabile Formationen. Ein fortschreitender Einbruch ist deshalb durchaus möglich. Instabilitäten, welche aus der Lösung von Material im Keuper entstehen sind ebenfalls nicht auszuschliessen.



1. Rupture du toit de la cavité 2. Formation de la cloche de fontis 3. Remontée de la cloche de fontis 4. Rupture brutale des terrain mobilisables : effondrement en surface



Figur 7 Bildung und Beispiel eines Tagbruches. In gewissen Fällen kann der Bruch mehrere hundert Meter hoch steigen
(aus <http://www.pentes-tunnels.eu/didactpente/pente/description/fonti/index.html> & [Wikipedia.org](http://de.wikipedia.org))

² Das Wort "Fontis" wurde im Bergbauwissen definiert und kann durch "Deckeneinsturz" eines Hohlraumes oder im Tunnelbau mit "Verbruch in der Kalotte" übersetzt werden, der nach oben, d.h. in Richtung der Terrainoberfläche propagiert und letztlich zu einem Tagbruch führen kann. Beispiele dazu gibt es wie erwähnt im Bergbau aber auch im Tunnelbau in Lockergesteinen über grössere Vertikaldistanzen (mehrere Dekameter bis einige Hectometer). Im Fall einer hypogenen Verkarstung des Muschelkalkes könnten grosse Hohlräume im Muschelkalk existieren, die durch Deckeneinsturz bis zum Opalinuston steigen könnten. Es ist sowohl eine aktuelle wie eine zukünftige Gefährdung, die abgeschätzt werden müsste.

Schlüssel-Parameter einer Gefährdung durch Fontis sind:

- die Lage der potenziellen Hohlräume im Muschelkalk
- die Grösse der Hohlräume
- die Geometrie der Hohlräume
- die Festigkeit der Kalkdecke und der überlagernden Schichten
- der Wasserdurchfluss durch den Hohlraum
- die potenzielle Mischung von tiefen und untiefen Wässern
- die Dauer (Alter des Hohlraumes)

Diese Parameter sollten genauer untersucht und wo möglich quantifiziert werden.

2.1.3 Karst Entwicklung während der „Sicherheitsdauer“ des Lagers

Die Verkarstung (alle Karsttypen) ist ein rel. schneller Prozess (Klimchouk *et al.* 2000). Die Bedingungen, wie wir sie uns im Rahmen der Langzeitentwicklung vorstellen, führen gezwungenermassen zu Veränderungen der Faktoren, welche die Verkarstung kontrollieren. Konsequenterweise sollte untersucht werden, wie die Verkarstung auf solche Veränderungen reagiert und welche zusätzlichen Risiken daraus erwachsen. Es ist wenig wahrscheinlich (aber nicht ausgeschlossen), dass sich die Verkarstung im Bereich der vorgesehenen Endlager massgebend beschleunigt. Dies wurde in der bisherigen Bewertung nicht berücksichtigt.

Die Verkarstung kann sich in den beiden wichtigsten Karstwasserträgern (Muschelkalk und Malm) unabhängig entwickeln.

Im Malm (epigener Karst) spielen hauptsächlich die Landschaftsentwicklung und die Lage des Vorfluters eine Rolle. Die Studie der Langzeitstabilität (NTB 14-02, Dossier III) liefert Szenarien, welche für die Bewertung oder Modellierung der Verkarstung des Malms in Betracht gezogen werden sollten. Es gilt dabei zu beachten, dass die Anzapfung der Donau durch den Rhein im Aquifer des Malms vermutlich ihr Gleichgewicht noch nicht gefunden hat und auf diesem Niveau vermutlich eine relativ rasche Entwicklung erfolgen wird.

Für den Muschelkalk ist ein Vorfluterniveau durch die Quellen bei Cannstatt (Stuttgart) gegeben (Stober 2013). Die aktuellen Kenntnisse der hydraulischen Potentiale weisen auf einen Grundwasserfluss aus der Region Zürich-Bodensee Richtung Neckar hin.

Auf die Dauer könnte dieser Abfluss zur Anzapfung der Karstsysteme des Muschelkalks im Rheintal und der Region der Wiese (eventuell des Rheins selber) durch den Neckar im Niveau des Muschelkalkes führen. Im Zeitraum von mehreren Hunderttausend Jahren kann eine solche Entwicklung nicht ausgeschlossen werden, insbesondere wenn die exponierten Oberflächen durch die Erosion vergrössert werden.

Aus diesen Überlegungen ist es möglich, dass eine aktive und rel. rasch sich entwickelnde Karstzirkulation direkt unter den Standorten besteht und zu Fontis führen kann.

Dabei sollte man nicht vergessen, dass auch geringmächtige Bänke im einschliesswirksamen Gebirgsbereich von einer sich entwickelnden Verkarstung erfasst werden können.

Die Entwicklung der Verkarstung muss deshalb unbedingt in Etappe 3 untersucht und bewertet werden. Zwei Elemente sind dabei wichtig: Das regionale Vorfluterniveau und die Entwicklung der Aufschlussgebiete verkarstungsfähiger Formationen.

2.2 Karstgefährdungen während Bau und Betrieb von Zugangsbauwerken und Lagerbereichen

Das folgende Kapitel berücksichtigt nur den Malm-Kalk, der während dem Bau und Betrieb die einzige zu durchörternde verkarstungsfähige geologische Einheit darstellt.

Einige Methoden wurden entwickelt zur Abschätzung der Karstgefährdung. Die neuesten sind KARSYS und KarstALEA. Sie gelten für epigenen Karst bis in eine Tiefe von etwa 100 m unterhalb des Vorfluterniveaus.

Beide sind im Anhang 1 kurz vorgestellt.

Diese Methoden sind wohl im Moment die vollständigsten, die es zur Bewertung der Wahrscheinlichkeit eines Auftretens von Karst und der damit verbundenen bautechnischen Probleme im Tunnelbau im Karst gibt.

Ihre Anwendung setzt allerdings voraus, dass eine Anzahl von Daten im Gebiet vorhanden ist, deren Existenz im Falle der möglichen Standortgebiete von Tiefenlagern noch nicht abgeklärt wurde. Im Moment können KARSYS und KarstALEA nicht direkt zur Bewertung einer Gefährdung im Küstenkarst oder hypogenem Karst angewendet werden.

Zur Erweiterung der Methoden in diesen zwei Bereichen sind seit 2013 Diskussionen mit Spezialisten von hypogenen- und Küstenkarst im Gange.

Die bestehende Basis (Kombination von 4 Modellen) scheint dieselbe zu bleiben aber die Interpretationsmodelle, insbesondere jenes der Speläogenese, müssen angepasst werden ebenso wie die Art der Verknüpfung der Modelle.

- In diesem Kapitel beschreiben wir einige Elemente welche in den bestehenden Methoden angepasst werden sollten und die Auftretenswahrscheinlichkeit und spezifische bautechnische Probleme betreffen. Die Liste ist weder vollständig noch durch Anwendung in der Realität kalibriert.

2.2.1 Auftretenswahrscheinlichkeit und Charakterisierung von Karsterscheinungen in der Nordschweiz

In Kapitel 1 wurde die Verkarstung des Malm beschrieben, als Zusammenspiel einer anerkannten Küstenverkarstung (eozäner Karst, Anhang 3), einer epigenen Verkarstung bis auf eine Tiefe von 500 bis 800 m und eventuell einer hypogenen Verkarstung. Letztere dürfte auf einige tektonisierte Zonen begrenzt sein, welche Wässer und Gasen das Aufsteigen (aus Permokarbon und Muschelkalk) in den Malm ermöglichen. Ein hypogenes Karstelement ohne Tiefenzufluss ist denkbar aber wenig wahrscheinlich. Potentielle Quellen für aggressive Wässer müssten dann in den Schichten zwischen OPA und der Oberfläche (TOC-reiche Molasse inbegriffen) liegen.

Will man ein kohärentes und vollständiges Modell aller Karstphänomene im Bereich der Tiefenlager erstellen, so müssen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens und die Charakteristiken ebenfalls untersucht werden. Ein solches Modell erscheint uns unumgänglich zu sein um eine Voraussage machen zu können, zu entscheiden, welche zusätzlichen Untersuchungen (Geophysik, Bohrungen) nötig sind, und um solche angemessen zu interpretieren. Eine solche Bewertung sollte die folgenden Arbeitsschritte enthalten:

A. Potentielle hypogene Verkarstung im Malm

- 1) Studie der möglichen hypogenen Verkarstung der Malmkalke in der Nordschweiz mit Untersuchung der Indizien für potentielle Quellen aggressiver Wässer einerseits und des Auftretens von hypogenen Karstformen andererseits. Die Untersuchung der Temperaturen und des Wärmeflusses könnten in diesem Zusammenhang wertvolle Hinweise liefern.

Diese Studie sollte auch die Verhältnisse des Muschelkalkes und eventuell des Arietenkalks mit einbeziehen. Ziel ist es, zu zeigen, dass entweder die Annahme getroffen werden kann, dass hypogene Verkarstung nicht auftritt oder dass eine solche potenziell in die Überlegungen einbezogen werden muss. Im letzteren Fall, welcher uns heute weniger wahrscheinlich erscheint, sollte die hypogene Verkarstung charakterisiert werden.

B. Küstenkarst im Malm

- 1) Studie des Eozänen Karsts zur Definition seiner Charakteristika und zur Bewertung des Einflusses von Küstenkarst. Der Einbezug eines Spezialisten des Küstenkarsts ist hier notwendig.
- 2) Eine minutiöse Beschreibung des eozänen Karstes, so detailliert wie möglich, und ein vollständiges Karstmodell für den Bereich der Nordschweiz, mit unterscheidbaren Phasen, ihren charakteristischen Formen und Füllungen.
- 3) Recherche nach vergleichbaren, gut dokumentierten Fällen weltweit, welche für die Größenordnung, die Verteilung, Dichte und Formen der Karströhren und ihrer Wechselbeziehungen im Modell als Massstab gelten könnten.
- 4) Integration der Hauptelemente der eozänen Verkarstung in ein 3D Modell, Identifikation von Gebieten erhöhter Auftretenswahrscheinlichkeit, Bestimmung der Unsicherheiten im Modell, Beschreibung der Charakteristika aller Elemente des Modells und, in Abhängigkeit der möglichen Auswirkungen und der Unsicherheiten, weitere Untersuchungen (Geophysik, Bohrungen, Aufschlüsse...).

C. Epigene Verkarstung

Unter gewissen Umständen ist eine aktive (epigene) Verkarstung unter dem Vorfluterniveau (bis in grosse Tiefen) und unter einer mächtigen Molasse-Überdeckung möglich.

Die Methode KarstALEA, entwickelt hauptsächlich für Tunnels über oder in Nähe des regionalen Vorfluterniveaus, kann angewendet werden, setzt aber einige Anpassungen voraus. Etappenweise könnte wie folgt vorgegangen werden:

- 1) Erstellen einer grösseren, dokumentierten Liste von Fällen epigener, tiefer und/oder überdeckter Karstzirkulation basierend auf Färbversuchen, Bohrungen, Tunneln, speläologischen oder anderen Beobachtungen. Fallspezifische Untersuchung der möglichen Genese unter Einwirkung einer mehr als 100 m unter dem Vorfluter liegenden Zirkulation
- 2) Bewertung der bestehenden und möglichen epigenen Karstzirkulation mit der KARSYS-Methode im regionalen oder sogar überregionalen Massstab. In dieser grossmassstäblichen Modellierung sollten die Karstwasserkörper des Muschelkalks, des Hauptrogensteins und ev. des Arietenkalks mit einbezogen werden.
- 3) Danach sollte ein Modell vom Typ KARSYS explizit für jedes Standortgebiet konstruiert werden. Dieses Modell bildet die Basis für den Aufbau eines KarstALEA Modells, welches

dann spezifisch die geologischen und hydrologischen Bedingungen im Tiefenbereich der Zugangsbauwerke und Lagerbereiche berücksichtigt.

- 4) Aufbau eines speläogenetischen Modells und eines Modells der Initialfugen auf Basis der zuvor als massgebend identifizierten Elemente der tiefen, epigenen Verkarstung. Einbezug der Einwirkung vorhergehender Verkarstungsphasen (Küstenkarst, ev. hypogener Karst) auf die aktive (epigene) Verkarstung.
- 5) Konstruktion eines 3D-Modells mit Verteilung der Auftretenswahrscheinlichkeit des epigenen Karsts für jedes Standortgebiet.

D. Kombination der 3 Modelle: epigenetischer Karst , Küstenkarst und hypogener Karst

Im Grunde genommen genügt es die verschiedenen 3D Modelle miteinander zu kombinieren, um ein vollständiges Bild der möglichen Verkarstung des Untergrundes zu erhalten. Zumindest wäre es angemessen die Interaktionen der Modelle zu kommentieren, bezüglich der, durch das Endlager und seiner Zugänge möglichen, neu geschaffenen Abflusswege.

2.3 Karstbedingte bautechnische Probleme in der Nordschweiz

Die Methode KarstALEA listet eine Reihe von bautechnischen Problemen auf, welche beim Tunnelbau im epigenen Karst auftreten können. Wir machen in der nachstehenden Liste ergänzende Hinweise im Bezug auf die Situation der Tiefenlager in der Nordschweiz.

A. Maximale Druckhöhe

Maximale Druckhöhe, die man aus einer Analyse des Karstgebirges abschätzen kann. Sie ist relativ gut bekannt.

B. Maximale Schüttung kurzfristig

Maximale Schüttungsmenge, die während einigen Sekunden bis Wochen nach dem Anschnitt eines Karsthohlraumes erwartet werden kann. Es handelt sich um einen nicht stationären Abfluss (Drainage eines lokalen hoch-durchlässigen Wasserreservoirs). Die Menge hängt vor allem vom Druck und Volumen des Wasser gefüllten Hohlraums, sowie von der Grösse des Anschnittes ab. Wegen hohem Druck muss unbedingt vermieden werden, dass grosse Hohlräume durch bedeutende Anschnitte direkt von Tunnels (bzw. Schachtbauten) angetroffen werden.

C. Maximale Schüttung langfristig

Maximale Schüttungsmenge, die während Monaten oder Jahren nach dem Anschnitt eines Karsthohlraumes erwartet werden kann. Es handelt sich um einen pseudostationären Ausfluss (Drainage eines Aquifers). Die Menge hängt (neben dem Einzugsgebiet) vor allem vom Druckunterschied zwischen dem Aquifer und dem Tunnel ab, und von der „Durchlässigkeit“ (oder hydraulischen Leitfähigkeit) dieser Verbindung. Wegen hohem Druckunterschied muss unbedingt vermieden werden, dass bedeutende Karströhren direkt vom Tunnel angeschnitten werden. Die Beziehungen zwischen epigenen Karströhren und Küstenkarst-Charakteristiken sollen geklärt werden.

D. Kontinuierlicher- oder temporärer Wasserzufluss

In der epiphreatischen Zone sind die Karströhren nur zeitweise wassergefüllt. Entsprechend sind sie nur temporär wasserführend. Dies betrifft nur Tunnelabschnitte, die oberhalb des regionalen

Vorfluters liegen (wenig bedeutend für die NAGRA Zugangsbauwerke in den vorgeschlagenen Standortgebieten). Alle geplanten Bauwerke im Malm liegen deutlich unterhalb des Vorfluters, und werden entsprechend kontinuierlich geflutet werden.

E. Maximales Wasservolumen

Karsthohlräume, die sich unter dem Bergwasserspiegel befinden, sind im Prinzip wassergefüllt. Werden diese Wasservolumen angeschnitten, so führt dies zu spontanen massiven Wassereintrüben. Diese Volumen können mit den vermuteten Volumen der Karströhren und Hallen abgeschätzt werden. Im Fall der Zugangsbauwerke in der Nordschweiz sind diese Volumen aus Sicht der Experten sehr bedeutend (>10 Mio m³).

F. Wasser Eigenschaften

Die physikalischen und chemischen Wasser-Eigenschaften können zu aggressivem Wasser oder umgekehrt zu „Sinter“- Wasser (übersättigt) führen. Dieses „Problem“ sollte vertiefter untersucht werden.

G. Maximale Volumen der Lockersedimente

Karsthohlräume, die sich in den vergangenen Verkarstungsphasen entwickelt haben, sind meistens mit Sedimenten aufgefüllt. Werden diese Sedimentpakete angeschnitten, so können sie als Schlamm rutschen und strömen. Diese Volumen können mit den vermuteten Volumen der Karströhren und Hallen der einzelnen Karst-Phasen (Typen) abgeschätzt werden. Theoretisch sollten in den potenziellen, epigenen Hohlräumen keine grossen Mengen von Sediment eingeschlossen werden. Beim aktuellen Kenntnisstand kann angenommen werden, dass nur im eozänen Karst (Küstenkarst) bedeutende Sedimentmengen zu finden sind. Der Küstenkarst muss entsprechend besser untersucht und charakterisiert werden, um die potenziellen Sedimentvolumen und Eigenschaften besser zu verstehen.

H. Korngrössenverteilung und Zusammensetzung der Sedimente

Die Korngrössenverteilung, wie auch die Mineralogie der Sedimente, führt zu mehr oder weniger problematischen Situationen für den Tunnel. Besonders heikel wären Sedimente, die schwellige Tonminerale enthalten. Gleiche Bemerkung wie im Punkt 7.

I. Bindige oder lose Sedimente

Die Eigenschaften der Sedimentverfüllungen in den Hohlräumen sind für den Tunnelbau relevant. Oft können sie aus der Korngrössenverteilung und Zusammensetzung abgeleitet werden. Manchmal können sie direkt gemessen werden. Gleiche Bemerkung wie im Punkt 7.

J. Sind Tagbrüche möglich?

Wenn Sedimentfüllungen, die angeschnitten werden, sich direkt bis zur Erdoberfläche erstrecken (aufgefüllte Schachthöhlen), kann ein Tagbruch entstehen. Tagbrüche, die über mehreren hundert Meter angestiegen sind, wurden an gewissen Stellen dokumentiert. Der tiefste bekannte Schacht der Welt ist >600 m tief, und Schachtserien bis zu 1500 m sind im vadosen Bereich ziemlich üblich. Diese Gefährdung ist im Prinzip sehr klein, gehört aber zur gesamten Betrachtung, welche alle Projektphasen eines Tiefenlagers einbezieht.

K. Maximaler Hohlraum-Durchmesser

Gewisse Karströhren sind gross, andere kleiner. Jede Verkarstungsphase hat typische Röhrengrössen. Die Grössenverteilung von Röhren eines „normalen“ Karstes, eines tropischen Meer-nahen Küstenkarstes (Eozän) und eines epigenen Karstes sind ziemlich verschieden. Das gesam-

te Modell der Verkarstung, inkl. Küstenkarst, sollte Hinweise zur Grösse der potenziellen angebotenen Karsterscheinungen liefern.

L. Mittlerer Hohlraum Durchmesser

Siehe 11: Maximale Durchmesser. Eventuell könnte man die Varianz der Durchmesser abschätzen.

M. Flächendeckungsgrad

Die Verkarstung kann die Landesoberfläche überall prägen und wird somit als „flächendeckend“ betrachtet. Unterirdisch ist dies nie vollständig der Fall. Es kann trotzdem sein, dass gewisse Flächen (stratigraphische - oder tektonische Horizonte) sehr stark verkarstet sind. Dies soll identifiziert und abgeschätzt werden. In diesem Zusammenhang soll der Küstenkarst besser charakterisiert, und potenzielle Initialfugen, die von der epigenen Verkarstung benützt werden, identifiziert werden.

N. Morphologie der Hohlräume

Hohlraumquerschnitte können von einem fast perfekten Kreis bis zu einer stark verflachten Ellipse variieren. Der Querschnitt-Typ kann die Auftretenswahrscheinlichkeit in einem Tunnel stark beeinflussen. Die Morphologie der Hohlräume von Küstenkarst und epigenem Karst sind recht unterschiedlich.

O. Orientierung der Hohlräume

Die Orientierung der Karströhren ist üblicherweise nicht isotrop. Sie kann die Auftretenswahrscheinlichkeit in einem Tunnel stark beeinflussen. Die Orientierung der Hohlräume von Küstenkarst sowie epigenem Karst, ist meistens horizontal. Die Eigenschaften der jeweiligen Karstphasen sollte es erlauben die Orientierung abzuschätzen.

P. Hohlraum Konnektivität

Karsthohlräume sind immer irgendwie verbunden, wenn sie sich entwickeln. Auffüllungen können sie trennen. Diese Konnektivität ist für die Wasserzirkulation besonders wichtig. In der Nordschweiz ist Küstenkarst im Malm höchstwahrscheinlich gegenwärtig. Die Hohlräume des Küstenkarsts sind nicht unbedingt verbunden, aber oft verfüllt. Wenn sich eine tiefe, epigene Verkarstung entwickelt, so sind die Hohlräume i.a. gut verbunden und voller Wasser. Eine wichtige Frage ist: „Wie sind die Hohlräume des Küstenkarsts, die eine hohe Auftretenswahrscheinlichkeit haben, mit jenen der epigenen Verkarstung verbunden?“.

Q. Wand Stabilität

Höhlen sind Karströhren, die ziemlich stabile Wände (und Decken) haben. Es gibt auch Karsthohlräume die weniger stabil sind. Sie sind selten von grossem Volumen, können aber grossräumig instabile Zonen bilden (z.B. Blocksturzzone von mehreren hundert Metern Durchmesser). Die Lithologien und geologischen Strukturen sollten in diesem Zusammenhang überprüft werden. Die Wahrscheinlichkeit von grossen, epigenen Hohlräumen scheint eher klein. Hohlräume des Küstenkarsts könnten eventuell beträchtlich sein.

2.4 Auswirkung auf die Umwelt

2.4.1 Welcher Aquifer wird potenziell beeinflusst?

Die durchquerten Aquifers sind per Definition potenziell bedroht. Bei Zugangsbauwerken zu einem Tiefenlager in der Nordschweiz ist nur der Malm-Aquifer betroffen.

2.4.2 Einfluss auf Quantität?

Die Veränderung des Fliessnetzes führt zu einer Veränderung der jeweiligen Wassermengen. Die *maximale Schüttung langfristig* bestimmt die Grössenordnung der Veränderung und der Quantität. Diese kann sich auf mehrere Quellen verteilen. Die Fliesssysteme aller Quellen des Malmaquifers in der Region müssen bestimmt und gemessen werden. Eine Auswirkung auf bestehende Quellen ist zu erwarten. Das Ausmass wird direkt von der Effizienz der Tunnelabdichtung abhängen.

2.4.3 Einfluss auf Qualität?

Jede potenzielle Veränderung der Wasserqualität ist hier gemeint. Erwartet werden vor allem Veränderungen durch Veränderungen des Fliessnetzes, eher als eine Verschmutzung der Gewässer (Baustelle im Ausflussbereich). Da der Malmaquifer tief unterhalb des Vorfluterniveaus erreicht wird, wird der Tunnel als Exfiltrationszone funktionieren. Entsprechend erscheint das Verschmutzungspotential (insbesondere für oberflächennahe Quellen) gering.

Die obige Liste (Punkte 1-17) ist nicht unbedingt vollständig und die angegebenen Abschätzungen müssen alle geprüft werden. Diese Prüfungen sollten erst durchgeführt werden, wenn der epigene Karst (aktiv und fossil), der Küstenkarst und der hypogene Karst im Gebiet besser charakterisiert worden sind.

2.5 Vorhersage von Karstproblemen

Karst-induzierte Probleme sind meistens an Hohlräume (evtl. leer, gefüllt mit Wasser und/oder Sediment) gebunden. Hohlräume sind auch Elemente, die man relativ gut aufspüren kann, obwohl der Detektierungserfolg immer noch beschränkt ist.

Verschiedene Methoden sind bisher zum Aufspüren von Karsthohlräumen entwickelt worden: Es gibt direkte Methoden (Bohrungen), indirekte Methoden (Geophysik) und konzeptuelle Methoden (KarstALEA). Je nach Voraussetzungen und zur Verfügung stehenden Mitteln, werden diese Methoden bei Oberflächenbauten, unterirdischen Bauwerken oder der Suche nach Grundwasser angewendet. Im Tunnelbau ist es i.A. das Ziel, solche Hohlräume effizient zu behandeln, bevor sie durch das Bauwerk angeschnitten werden. In anderen Fällen geht es darum, die Hohlräume zu erreichen, z.B. um daraus Wasser abzupumpen. Verschiedene Methoden (meist indirekte) sind in der Literatur gut beschrieben, aber ihre Limiten werden selten kritisch diskutiert. Artikel, die objektiv eine Liste von Anwendungen präsentieren mit Angaben zu Erfolg und Misserfolg, sind rar. Normalerweise findet man Fallbeispiele beschrieben, in welchen eine Methode oder Verbesserung einer Methode besonders schöne Resultate liefert. Dies ist dann auch eher unter nicht alltäglichen Umständen der Fall.

Die direkten Methoden bestehen prinzipiell in der Sondierung des Untergrundes durch Bohrungen, oder Grabungen, die mehr oder weniger systematisch angelegt werden. Beobachtungen aus Höhlen, Minen, Galerien, Schächten, Tunnels und anderen Aufschlüssen gehören auch dazu.

Indirekte Methoden reagieren auf die Diskontinuität, welche durch einen Hohlraum im Untergrund entsteht. Hohlräume sind durch den Kontrast detektierbar, welche sie (oder ihre Füllung) zum umgebenden Gestein erzeugen. Es handelt sich meistens um geophysikalische Methoden, welche von der Messung eines physikalischen Parameters (z.B. der Dichte) und dessen Variation im Untergrund Gebrauch machen. Hohlräume sind dabei nur interpretierte Signale, nicht direkt beobachtete Phänomene. Bei indirekten Methoden kann zwischen jenen unterschieden werden, welche aus der Luft (mittels Flugzeugen oder Satelliten) angewendet werden und jenen, welche auf oder im Boden ausgelegt werden. Auf dem Boden sind die wichtigsten: Elektrische Methoden, Georadar, Seismik oder andere akustische Methoden und Gravitationsmethoden. Die Methoden aus der Luft sind für die Fragen der Tiefenlager in der Nordschweiz unbedeutend.

Jede der Methoden deckt ein bestimmtes Anwendungsgebiet ab, mit Grenzen und Vorteilen, welchen das gesuchte Objekt mehr oder weniger entspricht.

Die folgenden Informationen stammen aus: Bates 1973, Heindl *et al.* 1984, Hoover 2003, Bosch and Müller 2005, Smith 2005, Dickmann and Tang 2006, Baldi *et al.* 2006, Goldscheider and Drew 2007, Chalikakis *et al.* 2011.

Die Wahl einer geophysikalischen Methode hängt ab von:

- der Grösse und Tiefe des Untersuchungsgebietes
- der nötigen Auflösung (Grösse der zu identifizierenden Objekte)
- der Natur der Hohlräume und ihrer Füllungen
- der Kosten
- der Anwendbarkeit der Methode (Infrastruktur, Interferenz, Störfaktoren)

In den folgenden Beschreibungen liegt der Akzent auf den direkten und indirekten Methoden, welche vom Boden aus oder in Stollen oder Bohrungen Anwendung finden, da dies den Bedingungen der Tiefenlager und Zugangsbauwerke entspricht.

Mit geophysikalischen Methoden können Hohlräume und/oder Füllungen nur ab einer bestimmten Grösse und bis zu einem bestimmten Abstand identifiziert werden: unter 10 m³ oder 3-5 m² und auf mehr als einige Zehner von Metern Abstand ist es praktisch unmöglich.

Die gemessenen physikalischen Parameter zeigen Anomalien an, welche durch Karströhren verursacht werden können, jene aber nicht ein-eindeutig abbilden. Keine Methode gibt direkt den Hohlraum an (am nächsten kommt vielleicht auf kurze Abstände die Mikrogravimetrie) und der Interpretationsspielraum ist gross.

Die Mehrheit der Methoden, d.h. der Messanordnungen und Interpretationsmethoden wurde für Oberflächenmessungen entlang von Messlinien (Profilen) entwickelt.

In den letzten 20 Jahren wurden Tomographie-Dispositive entwickelt, welche auf dichten Messpunkten in Bohrungen oder entlang nahe ausgelegter Profillinien beruhen.

Diese Methoden liefern genauere Resultate als konventionelle Oberflächendaten und erlauben eine Bewertung des Untergrundes in 3D, vergleichbar mit einem medizinischen „Scan“ am menschlichen Körper

Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene

Direkte Erkennung	Prinzip	Anwendungsgebiet	Vorteile	Grenzen der Anwendung	Referenzen
Bohrloch	Abteufen eines Lochs im Fels, sei es durch schaben (PCD Bohrmeissel) durch zertrümmern (Rollmeissel) oder durch schneiden eines Kerns (Bohrkrohne).	Grundbau, div. Ressourcen, Hydrogeologie, usw.	Probenmaterial aus dem Untergrund, Kalibrierung von geophysikalischen Messungen. Messungen sind an oder von der Bohrlochwandung aus im Gestein möglich: Verschiedenste Sonden ermöglichen die Messung von unzähligen Parametern. Der physische Bohrlochvortrieb (rop, torq) und die Volumenänderungen der Spülung liefern direkte Information über den Karst.	Informiert nur über den unmittelbaren Bereich um die Bohrung, eher teuer, teils destruktiv. Geringe Chance einen Karsthohlraum zu finden. Die Beobachtungen sind auf explodierbare und explorierte Hohlräume begrenzt.	
Indirekte Erkennung					
Geoelektrik	Prinzip	Anwendungsgebiet	Vorteile	Grenzen der Anwendung	Referenzen
Geoelektrische Profile	Mehrere Methoden existieren. Sie beruhen auf den unterschiedlichen Widerständen (resp. Konduktivitäten) der unterirdischen Raumerfüllung. Offene, trockene Hohlen haben oft höhere Widerstände als das umgebende Gestein. Wasser- oder Sediment-gefüllte Hohlräume sind nur in Ausnahmefällen erkennbar.	Grosse Zahl von Anwendungen, recht effizient um den geologischen Rahmen zu erkennen. Zur Detektion von Hohlräumen eher begrenzt.	Die Anwendung der Methode ist relativ einfach	Schlechte vertikale Auflösung und anfällig auf Komplikationen im Untergrund. Stark abhängig von der Auslage der Elektroden.	Monjoie 1979
Geoelektrische Tomographie (ERT & ERI)	Vergleichbar mit der Aufnahme geoelektrischer Profile, aber mit wesentlich mehr Elektroden, welche serienweise zur Einspeisung oder Registrierung der el. Ströme verwendet werden. Die verschiedenen Methoden unterscheiden sich in der Auslage der Elektroden und der Inversion der Signale.	Hauptsächlich für die Detektion untiefer Hohlräume verwendet.	Mehrere Kombinationen sind möglich und die Methode ist rel. einfach anzuwenden.	Geoelektrische Messungen erfassen immer ein relativ grosses Gesteinsvolumen welches mit grösserer Tiefe kubisch zunimmt und in dem eine Karströhre nur einen kleinen Prozentanteil ausmacht. Die Detektion der Röhren ist deshalb auf oberflächennahe Objekte begrenzt (Grössenordnung 10 m). Die Interpretation sollte auf einer 3D Inversion der Daten beruhen und nicht nur auf einer Serie von 2D Linien.	Roth et al. 2002 Van Schoor 2002 Zhou et al. 2002
Seismik	Prinzip	Anwendungsgebiet	Vorteile	Grenzen der Anwendung	Referenzen
Reflexionsseismik	Die Methode beruht auf der Reflexion akustischer Signale an Schicht- und Füllungsgrenzen. Die Signale werden von der Oberfläche in den Boden geschickt und nach Reflexion wieder an der Oberfläche registriert.	Auf der Suche nach Grundwasser können im Karst mit Seismik Diskontinuitäten erkannt werden.	Generell hat Seismik eine höhere Eindringtiefe als alle anderen geophysikalischen Methoden. In Stollen und Tunnels anwendbar (Methode TSP).	Nur grosse Karsthohlräume oder jene welche in extrem homogenem Kalk liegen, können seismisch erkannt werden. Die Heterogenität des Untergrundes und die Beschaffenheit der Oberfläche verkomplizieren das Bild. Die seismische Interpretation muss durch eine direkte Methode kalibriert werden. Eine Aufwendige Infrastruktur zur Datenaufnahme, Verarbeitung und Interpretation sind nötig und teuer.	Doll et al. 2005, Dickmann and Tang 2006, Baldi et al. 2006, Bechtel et al. 2007, Yang et al. 2013 [High Resolution Seismic Reflection Profiling HRSRP]
Refraktionsseismik	Methode basiert auf der Refraktion seismischer Signale (Wellen) an den Wandungen von Karsthohlräumen.	Die Refraktionsseismik wird zur Identifikation von Geschwindigkeitsanomalien und Unstetigkeiten im Untergrund benutzt.	Kann auch in kleinen Survey ausgelegt werden und erlaubt Schichtungen und lokale Heterogenität zu identifizieren (Epikarst)	Zur Interpretation der Schichtgrenzen müssen diese rel. flach sein (ruhige Geometrie) was im Karst nicht der Fall ist.	Karaman and Karadayilar 2004 [Kombination mit Geoelektrische Tomographie], Doll et al. 2005, Bosak and Benes, 2003, Bechtel et al. 2007
Hybrid-Seismik	Kombination von Refraktions- und Reflexionsseismik	Oberflächennahe Untersuchungen in stark variierenden Gesteinen	Identifikation von Hohlräumen durch Kombination ihrer Begrenzungs- und Verfüllungscharakteristik		Osyrov 2000
Seismische Resonanz	Methode basiert auf der Resonanzfrequenz von Hohlraumbegrenzungen (Wänden).	Im Vergleich zu Reflexion oder Refraktion sehr selten angewendet. Keine rezenten Beispiele.	Keine Vorteile dokumentiert	In der Erprobung, wenige Anwendungsbeispiele auf Quartär bezogen.	Frei 2012
Seismische Tomographie (Ultraschall)	Hochfrequente seismischer Wellen (>20 kHz) werden durch Heterogenität im Untergrund leichter zerstreut und gebremst als konventionelle Seismik. Die Dämpfung erfolgt im Kalk durch Präsenz von Mergel und Lockermaterial in Hohlräumen.	Im Karst kaum angewendet, wird diese Technik zur Prüfung von Betonbauten verwendet.	Objekte von 60 cm Durchmesser können von Bohrungen aus, welche 30 m auseinander stehen, erfasst werden.	Störungen durch allgegenwärtige Interferenzen (Städte, Strassen, Bahnlinien, menschliche Aktivitäten)	Bates 1973, Monjoie 1979

Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene

Gravimetrie	Prinzip	Anwendungsgebiet	Vorteile	Grenzen der Anwendung	Referenzen
Mikrogravimetrie	Die Methode basiert auf Veränderung der Erdbeschleunigung durch Dichtekontraste im Untergrund, wie sie durch Hohlräume entstehen können. Oft in Profilen ausgelegt können im Feld Differenzen von 5 microGal gemessen werden, was zur Bestimmung von Hohlräumen ausreicht, wenn dabei auch die Höhe ausreichend genau bekannt ist und die topographischen Korrekturen genau ausgeführt werden.	Zur Bestimmung von unterirdischen Hohlräumen und Dolinen unter Annahme der Dichte ihrer Füllungen.	Die Mikrogravimetrie ist vermutlich die effizienteste Methode zur Detektion grosser, oberflächennaher (< 20 m) Hohlräume.	Nach Palmer 1969, entspricht eine messbare Anomalie von 100 microGal einer unvertretenen Kammer von 10 m Durchmesser auf 30 m Tiefe, oder einer wassergefüllten Höhle von 15 m Durchmesser auf derselben Tiefe. Der Durchmesser eines Hohlraumes muss demnach etwa halb so gross sein, wie seine Tiefe, damit er erkennbar ist. Moderne Geräte können kleinere Anomalien feststellen, aber der Aufwand der Messung und Korrekturen steigt damit ebenfalls.	Smith 2005, Beres et al. 2001, Bitri et al. 2014
Elektromagnetische Methoden	Prinzip	Anwendungsgebiet	Vorteile	Grenzen der Anwendung	Referenzen
Elektromagnetik (EM & TEM),	Die Methode erzeugt ein magnetisches Feld durch die Anlage eines alternierenden elektromagnetischen Feldes im Boden. Die Frequenzen variieren von 0Hz bis 100 MHz. Entsprechend variiert die Eindringtiefe von 10 bis 900 m. Elektromagnetische Tomographie verwendet mehrere Elektroden zugleich, als Sender oder Rezeptoren. Verschiedenste Methoden bestehen, aber nur von wenigen bestehen kritische Besprechungen.		Hohe Auflösung ist möglich in gut leitendem Untergrund. Gute vertikale und laterale Auflösung im Vergleich mit elektrischen Methoden. Einfache Messeinrichtung, auch in Tunnels anwendbar.	Proximal zu Emmetoren schlechte Auflösung. Die Technik ist nur selten im Karst angewendet worden. Die Lokalisierung der Karstwasserleiter im Untergrund ist problematisch.	Bosch and Müller 2001, Xue et al. 2004, Smith 2005, Coppo et al. 2006, Guo and Luo 2014
Elektrische Widerstands Tomographie (ERT)	Als Profile (2D) oder im Netz (3D) dicht ausgelegte Elektroden messen die Widerstandsverteilungen im Untergrund	Siehe Beispiel von Port Miou: Prospektion mittels Widerstandstomographie wurden Galerien von bis zu 10 m Durchmesser auf 70 m Tiefe identifiziert. Auch geeignet für die Detektion von Störungszonen.	2D oder 3D Konduktivitätsmodelle ermöglichen die Identifizierung von Tonfüllungen im Karst (Paleokarst) in ungesättigten Zonen.	Bei geringem Widerstandscontrast und in gesättigten Zonen wenig geeignet.	Beispiel Port Miou, Tassy et al 2014
Magnetische Resonanz (MRS)	Messungen am magnetischen Feld, das wegen den Protonen des Grund/Karstwassers besteht, durch die Wechselwirkung mit einem kurz angelegten Störfeld bekannter Grösse.	Nützlich um die benetzte Zone eines Grundwasserkörpers zu messen.	Ein MRS liefert Information über den Wassergehalt des Untergrundes und seinen hydrodynamischen Zustand. In gewissen Fällen kann damit eine Permeabilitätsverteilung beschrieben werden. Die Methode erlaubt damit, zwischen hängendem Karstwasser und Karst in der phreatischen Zone zu unterscheiden.	Begrenzt durch die Bodenfeuchte und den gesamten Wasseranteil, welcher im Karst i.a. gering ist.	Chalikakis et al. 2011, Valla and Legchenko, 2003 Vouillamoz and Legchenko, 2003
Georadar (GPR)	Die Methode bedient sich hochfrequenter elektromagnetischer Wellen (Radar) welche Reflektoren im Untergrund abbilden.	Untersuchung in den ersten 10-25 m des Untergrundes (Leitungen, Böden und Epikarst). Häufigste Anwendung ist die Identifikation von Kabeln und Röhren in besiedeltem Gebiet.	Gute Auflösung nahe der Oberfläche (bis 5 m) lässt Karströhren unabhängig von ihrer Füllung erkennen. Gute laterale Auflösung und einfache Anwendung.	In der Tiefe rasch begrenzt, besonders bei gut leitenden Bodenschichten. A priori sind Messungen bis in Tiefen von 20-30m möglich, wenn direkt auf anstehendem Kalkfels gemessen werden kann (typischerweise in Tunnels oder Höhlen). Viele Interferenzmuster bei nicht abgeschirmten Antennen. Die Interpretation sollte auf einer 3D Inversion der Daten beruhen und nicht nur auf einer Serie von 2D Linien.	Collins et al. 1994, Chamberlain et al. 2000, Li et al. 2010
Spontane Polarisation (SP)	Die Methode beruht auf der Messung des elektrischen Feldes welches durch den Wasserfluss (unter Druck) in Karströhren entsteht.	Anwendung im Karst zur Unterscheidung zwischen aktiven Dolinen und solchen, die einfach verfüllt sind.	Effiziente Methode zur Identifizierung gesättigter Grundwasserkörper. Unter bestimmten Voraussetzungen können damit in geringer Tiefe wassergefüllte Karströhren identifiziert werden.	Stark Interferenz abhängig. Detektion in der vadosen Zone unmöglich. Nur qualitativ interpretierbare Signale, weder Grösse noch Tiefe und deshalb in Kombination mit anderen Techniken interessant.	Smith 2005 Adams and others, 2002, Vichabian and Morgan 2002, Bechtel et al. 2007

Bohrloch- und Tunnelgeophysik					
	Prinzip	Anwendungsgebiet	Vorteile	Grenzen der Anwendung	Referenzen
Logging	Verschiedensten Parameter werden mit aktiven oder passiven Sonden entlang der Bohrlochwandung im nahen Gestein aufgenommen. Aktive Sonden sind mit Emittieren und Rezeptoren ausgestattet (Schall, Elektronen, Neutronen) passive registrieren z.B. ein elektrisches Potential, el. Widerstand, natürliche Gammastrahlung, Temperaturen, oder tasten die Bohrlochwandung ab (Video, Laserscan, Dip Meter, Durchmesser). Zur Probenentnahme im Gestein oder im Bohrloch selber und zur Durchflussmessung bestehen auch die verschiedenen Geräte und Methoden. Oft werden Messungen direkt mit einander kombiniert und daraus z.B. Porosität oder Wassergehalte errechnet.	Bohrungen, deren Stabilität und Durchmesser ein Logging erlauben. Tunnelwandungen und Brust	Messungen sind relativ einfach und rasch durchgeführt. Einzelne Messungen erlauben Karströhren zu identifizieren (z.B. mittels Flow Meter oder Temperaturlog).	Die Untersuchungen werden durch die Bohrspülung und den Zustand (Rauheit, Filtrat) der Wandung beeinflusst. Auswaschungen und Einsturz verhindern die Datensammlung. Die Zeit auf Bohrplattformen ist teuer und somit werden die Messungen auf ein Minimum reduziert und die Sonden oft schnell gefahren (Datendichte reduziert). In Tunnels profitiert man von den Geräten der Bohrlochgeophysik. Methoden mit Auslagen die von der Oberfläche her kommen haben oft mit 3D Effekten zu kämpfen. Logging in schräg oder horizontalen Bohrungen ist oft problematisch, und auf alle Fälle deutlich teurer.	Smith 2005 Reider 1996 Schlumberger 1981
Elektromagnete	Anregung und Registrierung eine elektromagnetischen Feldes zwischen zwei Bohrungen.	Oft verwendete Methode aus dem Minenbau.	Auslage auch für Tunnels geeignet.	Methode kann nur in offenen Bohrungen (oder ev. mit Plastik-Verrohrung) funktionieren. Relativ kostenaufwendig.	Smith 2005, Tan et al. 2012
Video und Bohrloch-scan	Kontinuierliche Aufnahme der Bohrlochwandung mittels Video oder Laserscan	Alle unverrohrte Bohrungen	Schnelle Methode zur Identifizierung von Brüchen und Karströhren welche die Bohrung schneiden	Nur was an der Wandung sichtbar ist wird aufgezeichnet, trübe Spülung vereitelt Messungen. Nur offene Bohrlöcher sind brauchbar.	Smith 2005
Bohrloch-Seismik, Bohrloch Tomographie	Anwendung der seismischen Methoden zwischen Bohrlöchern oder zwischen Oberfläche und Bohrloch.	Alle Fragen mit Bezug zur Raumerfüllung zwischen Bohrungen. Kalibrierung von seismischen Messungen in der Umgebung (VSP).	Gute 3D Charakterisierung der Heterogenität zwischen Bohrungen. Die Identifizierung eines Karstsystems bedingt aber eine rel. hohe Datendichte.	Relativ teuer, da mehrere Bohrungen in nicht zu grosser Distanz vorliegen sollten. Aufwendige Infrastruktur zur Datenaufnahme, Verarbeitung und Interpretation nötig.	Smith 2005, Liu et al. 2003, Zhao et al. 2006

Tabelle 1 Überblick von geophysikalischen Methoden, die für die Vorauserkundung von Karsterscheinungen beim Bau von Tiefenlagern potenziell anwendbar sind.

Weniger häufig sind die Anwendungen von Methoden, welche für die Anwendung in Stollen oder Tunnels ausgelegt wurden. Dabei ist nicht nur die Auslage der Sensoren speziell, sondern auch die Interpretation, denn die Tunnelröhrengometrie führt zu speziellen räumlichen Propagationseffekten, die sich von jenen unterscheiden, welche von der quasi infiniten Oberfläche ausgehen.

Für die meisten geophysikalischen Methoden ist die Qualität der Grenzfläche wichtig, von welcher aus gemessen wird. Tunnelverkleidungen oder Bohrlochverrohrungen wirken wie starke Filter. Die Gegenwart von Armierungseisen im Spritzbeton z.B. verhindert bestimmte Anwendungen und Interpretationen werden durch nahe Heterogenität verunmöglicht.

Tabelle 1 gibt einen Überblick der möglichen anwendbaren geophysikalischen Methoden zur Bestimmung von Karströhren. Die Liste ist vermutlich unvollständig. Es geht aber bereits daraus hervor, dass die meist verlässlichen Methoden vermutlich die Seismik, die Gravimetrie, der Georadar und die geoelektrische Tomographie sind. Oft bringt erst die Kombination von verschiedenen Methoden eine gewisse Sicherheit in der Interpretation. Eine fundierte geologische und speläogenetische lokale Kenntnis sind ebenfalls Voraussetzung für eine sinnvolle Interpretation der geophysikalischen Messungen.

Tabelle 2 fasst summarisch die Anwendungsbereiche der verschiedenen Methoden zusammen. Diese Bewertung zeigt nicht das Potenzial, welches durch die Kombination von Messmethoden entsteht, und macht keine Angaben zum Umgebungsgestein oder zur Oberflächenbeschaffenheit.

Methoden	Electrical resistivity tomography (ERT)	Seismic resonance	Reflection seismic	Refraction seismic	Crosshole ultrasonic tomography	Surface wave analysis (SASW)	microgravity	TEM Electromag. prospecting	VLF Electromag. prospecting	Magnetic resonance sounding (MRS)	Ground penetrating Radar (GPR)	Spontaneous polarization (SP)	Induced polarization
Deep voids	X	XXX	XX	X		X	X	XX	XX	X	-	X	-
Shallow voids	XX X	X	X	XX		XXX	XXX	X	XXX	XX	XXX	XX	XX
Air-filled voids	XX	XXX	XX	XX	XXX	XXX	XX	X	XXX	-	XX	-	-
Partially water-filled voids	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	XX	X	X
Water-filled voids	X	XX	XX	XX	XX	X	X	XX	X	XXX	X	XX	XX
Mud-filled voids	X	XX	XX	XX	XX	XX	X	XX	X	X	XX	X	X
Voids underneath naked karst	XX	XX	XX	X		XX	XX	XX	X	X	XX	XX	XX
Voids underneath covered karst	X	X	X	X		XX	XX	X	X	X	XX	X	X

xxx : Gut geeignet xx : geeignet x : wenig geeignet - : ungeeignet

Tabelle 2 Skizze der Anwendungsbereiche der verschiedenen geophysikalischen Methoden

2.5.1 Geophysikalische Methoden in Tunnels

Li *et al.* 2010 stellen eine Synthese der Methoden welche im Tunnelbau Anwendung finden vor (Tabelle 3).

Category	Prediction method	Prediction objective	Prediction distance	Advantage	Disadvantage
Geological investigation	Engineering geology analysis	Engineering and hydrogeology of entire routine	Entire routine	Easy-going, disturbance-free for construction	Low accuracy
	Pilot excavation	Engineering and hydrogeology	Excavation scale	Capable of providing detailed information	Time-consuming
	Core drilling	Engineering and hydrogeology	30 m	Capable of providing detailed information	(1) Incapable of predicting the discontinuities parallel to tunnel axis and the geological condition; (2) Time-consuming
Geophysical prospecting	Seismic method	Mechanical parameters of rock mass, position of discontinuities	150 m	Capable of providing accurate position of vertical discontinuities	Incapable of predicting of horizontal discontinuities and water-bearing strata
	Electromagnetic method	Position of discontinuities, karst caves and water-bearing strata	50 m	Capable of predicting position of discontinuities, karst caves and water-bearing strata	Easily-disturbed
	Geological radar method	Change in rock properties	10–25 m	Capable of predicting fractured zones	Easily-disturbed

Tabelle 3 Überblick von Vorauserkundungsmethoden für die Identifizierung von Karsterscheinungen im Tunnelbau (aus Li *et al.* 2010).

Bezüglich der Seismik in Tunnels ist zu bemerken, dass die TSP Methode („Tunnel Seismic Prediction“, Dickmann and Tang 2006 sowie Baldi *et al.* 2006) auf Reflexionsseismik beruht, bei welcher P und S-Wellen im Verlauf des Vortriebes gemessen werden können, ohne längere Unterbrüche im Vortrieb zu verursachen. Wie bereits erwähnt, sind dabei auch die Interpretationstechniken auf die spezifische Tunnelgeometrie und ihre Störungen ausgelegt. Die Eindringtiefe beträgt einige Zehner von Metern und wird durch die Verschalung stark beeinflusst. Die Schwierigkeit der Interpretation liegt in der Vielzahl der 3D-Effekte welche die Reflektoren mit dem Tunnel zusammen erzeugen. Tunnelachsenparallele Reflektoren sind i.A. schwerer erkennbar als jene, welche mit der Achse einen hohen Winkel einschliessen.

Die elektromagnetische Tomographie findet in Tunnels Anwendung, die Beispiele scheinen aber noch nicht so zahlreich zu sein (Guo and Luo 2014). Die Interpretationswerkzeuge müssen dem Umstand Rechnung tragen, dass die Auslage in 3D von einer heterogenen Raumerfüllung umgeben ist. Die Interpretationssoftware und -Konzepte müssen (falls sie bestehen) noch den Beweis liefern, dass sie für die Detektion von Karströhren geeignet sind. Das vorgestellte Beispiel bezeichnet die Methode und eine praktische Anwendung. Leider sind die Interpretationen der geophysikalischen Daten nicht durch direkte Beobachtungen belegt.

Der Georadar (Yang *et al.* 2012) ist ebenfalls in Tunnels und Stollen anwendbar. Die Eindringtiefe ist aber auf wenige Meter beschränkt. Die Probleme der variablen Bodenschichten fallen dabei weg. Einige Autoren erwähnen Probleme wegen lateralen Effekten. Die Migration von Radardaten aus Tunnels hat mit denselben Schwierigkeiten zu kämpfen wie die Seismik.

2.5.2 Detektion von Karst für den Bau von Tiefenlagern in der Nordschweiz

Im Hinblick auf die uns bekannten Elemente bestehen zwei prinzipielle Probleme: die Präsenz von eozänem Karst (gesichert) und die eventuelle Präsenz von hypogenem Karst (wahrscheinlich im Muschelkalk, möglich im Malm). Ziel der vorgeschlagenen Methodik ist die Lokalisierung und Charakterisierung dieser Karsttypen.

Die Kombination von einem konzeptuellen Modell, den direkten Methoden (i.A. Bohrungen) und der Geophysik sollte es erlauben, den lokalen Karst vergleichsweise gut zu verstehen.

Eine geeignete Wahl von Methoden in innovativer Kombination, mit spezieller, ortsbezogener Auslage, dürfte es erlauben, eine geophysikalische Charakterisierung des Gesteinsvolumens, in welchem Zugangsstollen und Tiefenlager zu liegen kommen, vorzunehmen.

Die Interpretation dieser geophysikalischen Daten, im Hinblick auf die Charakterisierung des Karsts, setzt allerdings die Entwicklung eines umfassenden Modells der Verkarstung im Bereich der Nordschweiz voraus, so wie es in der ersten Hälfte dieses Kapitels beschrieben wurde.

In SGT Etappe 3 muss vor allem das konzeptuelle Vorgehen verbessert werden, indem einerseits eine Synthese der bestehenden allgemeinen Erkenntnisse, welche indirekt für das Verständnis des Karsts in der Nordschweiz nützlich sind, vorgenommen wird und andererseits eine Zusammenstellung sämtlicher Informationen gemacht wird, welche über den Karst Aufschluss geben (Bohrungen, Tunnels, Stollen, Steinbrüchen, Höhlen, Aufschlüsse usw.).

Die Anwendung der KarstALEA-Methode wird vorgeschlagen.

Diese Anwendung setzt gewisse Anpassungen der Methode voraus, denn sie wurde nicht für die vorgesehenen Tiefen und Verkarstungstypen ausgelegt. Ebenfalls erfordert die Anwendung von KarstALEA vorgängig die Erarbeitung eines regionalen KARSYS Modells.

Das regionale KARSYS hat folgende Zielsetzungen:

- Erstellen einer detaillierten hydrostratigraphischen Unterteilung des Malm (äquivalent zu einem ersten Initialfugen-Modell durch Untersuchung der in der Umgebung bestehenden epigenetischen Karsthöhlen, Fazieskorrelation und Verkarstungsanfälligkeit)
- Bestimmung von Ausmass und Geometrie des Malmaquifers
- Identifizierung der generellen Entwässerungsrichtung des epigenen Karsts der Umgebung der Lagerstätte (Studie der Speisung der Karstwasserkörper und deren Unterschiede in Abhängigkeit der geologischen Einheiten)
- Vorschlag eines unterirdischen Strömungsmodells

In der unmittelbaren Umgebung des Bauwerks soll das regionale KARSYS-Modell zu einem lokalen, detaillierteren KARSYS-Modell ausgebaut werden. Dieses lokale Modell unterstützt und ermöglicht die Anwendung der KarstALEA-Methode im Zugangs- und Tiefenlagerbereich.

Die Zielsetzungen des KarstALEA-Modells sind:

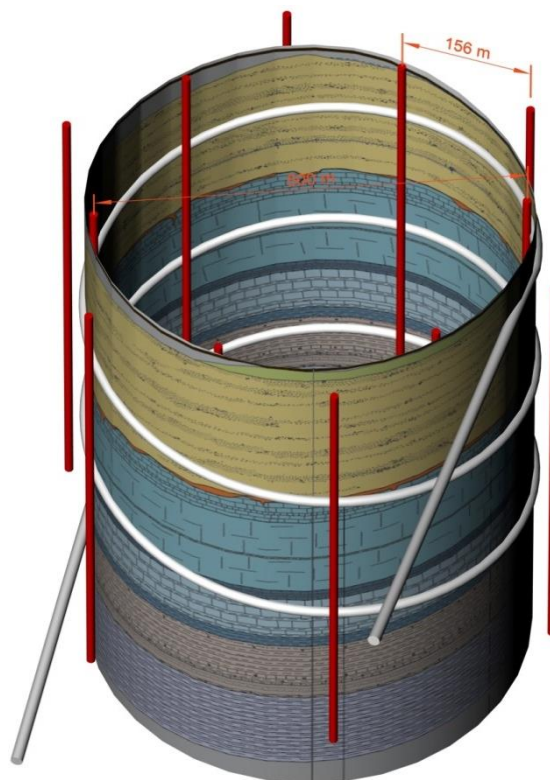
- Charakterisierung der Karsthohlräume (eozäne und epigenetische), welche möglicherweise durch das Bauwerk angeschnitten werden (Erstellen eines speläogenetischen Modells)
- Lokalisierung und Bestimmung der möglichen Verbreitung der Gänge im Bereich der Bauwerke
- Risikoabschätzung der Wassereinbrüche (mit oder ohne Sediment) in Abhängigkeit der hydrogeologischen Bedingungen und der Anschnitt-Szenarien

Diese Vorgehensweise wird erlauben, die Art der Karst-spezifischen Probleme klarer zu bestimmen und die Fragestellungen und Ziele für die folgenden Untersuchungen zu identifizieren. Eine Untersuchung der Anwendungen von geophysikalischen Methoden im Karst und ihrer Grenzen sollte parallel dazu ausgeführt werden. Diese sollte auch Diskussion mit Spezialisten der verschiedenen Methoden beinhalten.

Eine Strategie der Prospektion muss in dieser Etappe ebenfalls ausgearbeitet werden. Und es muss überlegt werden, ob nicht bereits dazu Testmessungen nützlich sein könnten.

Im Falle der Tiefenlager wird ja auch geprüft ob das Zugangsbauwerk als spiralförmige Rampe ausgeführt werden könnte. Unter der Annahme, dass eine geophysikalische (Bohrloch-) Tomographie das umgebende Gestein mit hoher Auflösung abbilden kann, könnte damit durch Bohrungen in der Tunnelachse und von den Tunnels aus eine 3D-Erfassung besser gewährleistet werden, als von der Oberfläche aus. Die Sensoren könnten dabei in fixen Bohrungen und in Bohrungen zur Vorauserkundung, sowie in den Tunnels selber, platziert werden. Figur 8 zeigt am Beispiel eines spiralförmigen Tunnels, wie die Bohrungen zur Erkundung platziert werden könnten. Ein Dispositiv von 12 Vertikalbohrungen mit je einer hexagonalen Anordnung im umschlossenen und umgebenden Raum der Spirale, könnte von der Oberfläche aus (oder als Schrägbohrungen von den Stollen aus) abgeteuft werden. Bei dieser Anordnung liegen die Bohrungen mal links, mal rechts des Tunnels und die Distanz zwischen den Bohrungen beträgt 150 m.

Die Möglichkeit von Bohrungen aus oberen Spiralen in den Bereich der tiefer liegenden, ist ebenfalls gegeben und müsste gegen eine Variante von Erkundungsbohrungen von der Oberfläche her abgewogen werden. Jedenfalls böte eine spiralförmige Tunnelführung interessante Konfigurationen zur 3D-Erfassung des Untergrundes.



Figur 8 Vorschlag von 12 Erkundungsbohrungen für geophysikalische Messungen vor und während des Vortriebes in Anordnung zweier um 30° verdrehter Hexagone. 6 Bohrungen liegen intern, 6 extern bez. des spiralförmigen Tunnels.

Sobald die Ziele der geophysikalischen Kampagnen genauer definiert worden sind, sollte die Auslage der Messkampagnen mit den Spezialisten der einzelnen geophysikalischen Methoden zusammen, im Hinblick auf Karstdetektion, definiert werden können.

2.6 Behandlung von erkannten Karstproblemen

Die Charakterisierung der 18 in Kapitel 2.2 erwähnten Karstgefährdungen muss im Hinblick auf eine Behandlung verbessert werden (Massnahmenkatalog). Dies hat Einfluss auf die Exkavationsmethoden, die Linienführung und die Methoden der Früherkennung.

Ausgehend von diesen Elementen sollten Szenarien der Behandlung einzelner Fälle aufgezeigt werden. Die Anzahl möglicher Fälle ist gross, im Moment zu gross um alle möglichen Szenarien aufzuzeigen.

Um ein hohes Sicherheitsniveau zu erreichen, sollte es eine Zielsetzung sein, garantiert alle Karströhren (klein oder gross, gefüllt oder leer) zu erkennen, welche sich in einem „Karst-Sicherheitsperimeter“, befinden. D.h. alle Karströhren, welche durch den Tunnel geschnitten werden oder sich in einem Abstand (z.B. 1 Tunneldurchmesser) von diesem befinden, sollten lokalisiert und ihr Charakter erkannt werden.

Die kritischen Fälle sind jene, in welchen der Tunnelvortrieb eine Karströhre schneidet, in welcher Wasser in grossen Mengen und/oder unter Druck angetroffen wird oder aus welcher Lockermaterial in den Tunnel dringt oder eine Kombination der beiden. Bereits eine kleine Karströhre kann problematisch sein, wenn der Wasserabfluss unter Druck beträchtlich ist.

Die verlässlichste Methode, um Infiltrationen in den Tunnel zu vermeiden, ist vermutlich die Injektion von Beton oder Bentonit in die Hohlräume. Die Machbarkeit von Injektionen bei 30 bis 60 Bar ist zu belegen; deren Prüfung ist nicht Gegenstand vorliegender Expertise.

Man kann sich vorstellen, dass bei verfüllten Karströhren unter Druck zuerst ein Teil der Verfüllung entleert werden muss und danach eine Injektion mit Beton erfolgen kann. Dabei muss unterschieden werden zwischen poröser, permeabler Verfüllung und feinkörniger wenig permeabler. Im ersten Fall kann in das Porenvolumen injiziert werden, im zweiten Fall kann höchstens ein Betonpfropf im entleerten Hohlraum injiziert werden, weil Injektionen in sehr feine Lockermaterialfüllungen (Siltfraktion) höchst problematisch wenn nicht unmöglich sind!

Auch wenn es gelingt, teilweise verfüllte Hohlräume mit Beton zusätzlich zu füllen, so ist die mögliche spätere Erosion der Füllung nicht ausgeschlossen!

Eine Alternative besteht in diesem Fall in der Umfahrung solcher Karstzonen (Achtung Langzeitentwicklung!). Dies erfordert aber, dass die Kenntnisse der Verkarstung in der Umgebung des Tunnels ausreichend sind.

Bei den anzuwendenden Strategien muss zwischen Bauphase, Beobachtungs- und Ausrüstungsphase sowie der Betriebsphase (mit Präsenz von Abfällen) unterschieden werden. Ein detailliertes Monitoring drängt sich von Beginn des Ausbruchs an auf, um die Entwicklung der Wasserinfiltration und der Öffnung durch eindringendes Füllmaterial zu erkennen, zu verfolgen und abdichten zu können.

Alle diese Szenarien hängen vom Bild des Karsts ab, das wir uns im Moment der entsprechenden Bauphasen machen können. Die Liste der potentiellen Gefahren muss in jedem Falle sukzessive den momentanen Erkenntnissen des Karsts angepasst werden können.

Die Behandlung der möglichen Fälle muss unbedingt in Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Spezialisten des Karsts erarbeitet und definiert werden. Die Nagra hat im Rahmen ihrer bautechnischen Risikoanalyse (NAB 14-50) die zentrale Bedeutung von Karstrisiken für die Zugangsbauwerke erkannt (Stufe Projektstudie); im Rahmen der weiteren Planung können nun die Folgerungen für die Detektion (Kap. 2.2.7) und Behandlung (Kap. 2.4) umgesetzt werden.

Kapitel 3

Allgemeine Bemerkungen zur Machbarkeit und der Einengung von Lagerstandorten im Hinblick auf Karstphänomene und Vorschläge für SGT Etappe 3

Kapitel 1 und 2 dieses Berichts beschreiben im Allgemeinen, welche Konsequenzen die Verkarsung von Gesteinen auf Bau, Betrieb und die Sicherheit eines Tiefenagers haben kann. Im hier folgenden Kapitel 3 kommentieren wir einige ausgewählte Aspekte zur Karstthematik verschiedener NAGRA-Berichte zu SGT Etappe 2.

Dieses Kapitel deckt drei Aspekte ab:

- 1) Einige Aussagen in den NAGRA-Berichten zur Karstthematik sind diskutabel. Wir sind der Meinung, dass diese Punkte für die Beurteilung der Sicherheit und Machbarkeit des Lagers und insbesondere für die aktuelle Einengung der Standorte im Rahmen von SGT Etappe 2 nicht wesentlich sind. Sie sind aber trotzdem nicht ohne Konsequenzen für den Bau und Betrieb des Lagers und sollten deshalb in Zukunft vertieft untersucht werden. Entsprechend sind unsere Bemerkungen im Kapitel 3.1 zusammengefasst.
- 2) Die wichtigsten Aspekte im Zusammenhang mit Karst, welche die Sicherheit und Machbarkeit des Lagers in Frage stellen könnten, sind im Kapitel 3.2 zusammengefasst.
- 3) Aus diesen beiden Punkten ergeben sich Untersuchungsziele im Zusammenhang mit Karst, die in SGT Etappe 3 unbedingt behandelt werden müssen. Das Kapitel 3.3 stellt diese Ziele vor und skizziert, welche Untersuchungen in Etappe 3 durchgeführt werden müssen.

3.1 Bemerkungen betreffend Karst und Hydrogeologie zu den NAGRA Berichten SGT Etappe 2

3.1.1 Bericht „Hydrogeologische Verhältnisse“, NTB 14-02, Dossier V

In diesem Bericht werden 3 Ansätze angewendet, die miteinander nicht immer konsistent sind: 1) Hydrochemie/Isotopen, 2) Hydraulik, 3) Hydrogeologische Modellierung. Ein vierter Ansatz wurde für die hydrogeologische Beurteilung im Baugrundmodell (NAB 14-072) angewendet. Seine Konsistenz mit den anderen Ansätzen ist nicht geprüft worden. Die Experten vermissen eine übergreifende Synthese; es fehlt eine einzige zusammenfassende Interpretation, die mit allen vier Ansätzen konsistent wäre, d.h. eine Skizze der Fliesssysteme im weiteren und nahen Umfeld der Standorte. Der Bericht zu den Wasserhaltungsrisiken bei den Zugangsbauwerken (Nagra NTB 14-2, Dossier V ist in diesem Punkt nicht umfassend. Für die Sicherheitsbetrachtungen spielt diese Unvollständigkeit in der aktuellen Planungsphase keine direkte Rolle. Dieser Aspekt hat trotzdem Konsequenzen für bautechnische Aspekte und die Umweltverträglichkeit des Projektes und soll entsprechend in SGT Etappe 3 deutlich verbessert werden.

Eine weitere Bemerkung betrifft die Messung und Analyse der K-Werte sowie der Druckhöhen (Potenziale). Eine kritische Diskussion der Daten (K-Werte und Druckhöhen) fehlt komplet. Zum Beispiel werden nirgends „scale effects“ besprochen, obwohl die verwendeten K-Werte über Intervalle von einigen Dezimetern bis zu mehreren Hektometern gemessen wurden (!).

Im Teil „Hydrochemie“ werden Beobachtungen und Interpretationen leider sehr schlecht getrennt. (beispielsweise ist in NTB14-02, Seite 16 ein Beispiel dieser Mischung zwischen Interpretation und Beobachtungen): *„Für die Beschreibung und Interpretation der Genese, der Verweilzeit im Untergrund und der Fliesssysteme der Grundwässer in der Region Nordschweiz und für die Erkennung möglicher Formations-übergreifender Fliesswege (cross-formation flow) wurden die beprobten Grundwässer entsprechend ihrem Auftreten und ihrem chemischen Typ für jede hydrogeologische Einheit in verschiedene Gruppen eingeteilt.“* Dies zeigt, dass der bestehende Datensatz von Anfang an in Grundwässer von unterschiedlichen Beprobungstiefen, unterschiedlicher Chemie und aus unterschiedlichen Formationen aufgeteilt wurde. Diese Trennung basiert auf einer Interpretation, dass Wässer unterhalb 100 m sich von Wässern oberhalb unterscheiden müssen, sowie dass Wässer einer Formation von jenen einer anderen Formation sich unterscheiden müssen.

Der Datensatz sollte ohne vorgegebene Meinung analysiert werden und Gruppen sollten aus der Analyse selber resultieren.

Im Teil Hydrochemie/Isotopen sollten C- und S-Isotopen untersucht werden, um den Ursprung des CO₂ und H₂S bestimmen zu können. In diesem Kapitel werden hauptsächlich Mittelwerte diskutiert, obwohl sich die Problematik eines Tiefenlagers auch mit Extremwerten auseinandersetzen müsste.

Unsicherheiten werden nur global als „bedeutend“ erwähnt, sind aber nirgends ausführlich abgeschätzt und diskutiert worden. Unterschiede und Widersprüchen zwischen Ergebnissen der drei Modellansätze (1. Hydrochemie/Isotopen, 2. Hydraulik, 3. Modellierung) werden nirgends ausführlich diskutiert, oder erwähnt!

Die Grundwassersimulationen sind zum grossen Teil nicht nachvollziehbar, weil die Möglichkeit einer Verkarstung in den Modellen gar nicht betrachtet wurde. Szenarien (auch vereinfachte) mit Karströhren müssen berücksichtigt werden, um die potenziellen Auswirkungen (vor allem auf abgeschätzte Fliessgeschwindigkeiten und Druckhöhen) und entsprechenden Unsicherheiten abschätzen zu können. Die zugrundegelegten Randbedingungen sind auch zum Teil sehr diskutabel (z.B. die Grundwasserneubildung in den verkarsteten Gebieten). Das Modell ist mit vielen Beobachtungen nicht konsistent (z.B. mit der Lage und Schüttung von existierenden Karstquellen).

Die im Kapitel 3.3. vorgeschlagenen Untersuchungsziele decken zum grossen Teil diese Schwäche ab.

3.1.2 NTB 14-02, Dossier III (Langzeitstabilität)

Dieser Bericht wird von den Experten im Allgemeinen als ausgezeichnet betrachtet. Es bleiben trotzdem einige Diskussionspunkte.

Einige Daten von Hebungsdaten oder rezenten Bewegungen variieren lokal stark. Südlich der Linie Olten-Schaffhausen ist die Hebung im allgemeinen positiv. Nördlich davon ist die Hebung teils positiv, teils negativ. Dies bedeutet, dass die Gradienten lokal stark sind. Dies könnte auf tektonische Bewegungen hinweisen. Auf dieser Schwelle ist die Erosion besonders stark und gerade dort liegen auch potentielle Standorte. Eine explizite Beurteilung der Situation und der Unsicherheiten ist deshalb wünschenswert. Zusätzliche Untersuchungen sind nützlich und nötig.

Zusätzlich zur Figur 1.3-1 des Rapports wären paleogeographische Reliefkarten aus verschiedenen Zeitabschnitten mit Angaben der Geologie interessant. Eigentlich ist der Einfluss der Geologie auf die Existenz von verschiedenen Schwellen und die Anlage von Tälern kaum diskutiert worden. Auf Seite 6, erster Abschnitt, versteht man dass die Eintiefung von Flussläufen schnell erfolgt, sobald sich die Verhältnisse talabwärts verändern. Alles werde dann von erosionsresistenten Schwellen kontrolliert welche die Tiefenerosion im Oberlauf hemmen.

Nach unserer Meinung wird solchen Schwellen im Bericht nicht genügend Aufmerksamkeit geschenkt. Wir denken an die Schwellen von Bingen und jene des Jura. Wichtige Informationen zur Entwicklung des Basisniveaus dieser Schwellen könnten durch eine Studie der Sedimente und der Höhlen im Bereiche der Schwellenzonen beschaffen werden. Man könnte ebenfalls Höhlen im Nahbereich von vermeintlich aktiven Brüchen untersuchen: durch die relative chronologische Einordnung der beobachteten Phänomene könnte vermutlich eine Altersdatierung neotektonischer Aktivität erzielt werden.

Das Kapitel 4.4 ist sehr spekulativ und für die präsentierten Szenarien wird der Grad der Unsicherheit nicht differenziert. Überall im Kapitel ahnt man die Unsicherheiten aber im Endeffekt werden die Szenarien entwickelt ohne jegliche Angabe von zu erwartenden Mittel- oder Extremwerten.

Wo ist die Grenze zwischen möglichen und eher unmöglich? Kommen die vorgesehenen Standorte in den Bereich dieser Grenze? Welches sind die Unsicherheiten und wie werden sie reduziert? Auf diese aktuellen, prinzipiellen Fragen antwortet der Bericht nicht sehr explizit.

Leider behandelt der Bericht auch nicht die Frage der Reliefveränderungen und ihren Einfluss auf den unterirdischen Abfluss und spezifisch die Entwicklung des Karst (Veränderung der Randbedingungen).

3.1.3 NTB 14-02, Dossier II (Geologie)

Die Experten erachten dies generell für einen sehr guten Bericht, klar formuliert, gut strukturiert und mit guten Figuren dokumentiert. Die Lektüre des Berichts wirft aber insbesondere hinsichtlich der Beurteilung von Karstfragen doch einige Fragen auf:

Es scheint, dass die Kontinuität der Kalkbänke nicht klar ist und sicher nicht einfach zu belegen ist. Insbesondere sind die Grundwasserströmungen unterhalb des OPA für die Sicherheit ein Schlüsselpunkt. In diesem Zusammenhang sollte in SGT Etappe 3 detailliert untersucht werden, inwieweit der Arietenkalk, der sehr kontinuierlich und kalkreich erscheint, verkarstet werden kann. Dies gilt auch für weitere „harte Bänke“.

Generell sollten die seismischen Profile und die stratigraphischen Korrelationen in 3D dargestellt werden. Man könnte so einfacher den Grad der Extrapolation in den Interpretationen der Beilagen und Anhänge verstehen. Der Leser möchte sich nämlich vergewissern, dass die präsentierten Interpretationen auch im 3D-Raum kohärent sind. Für jedes Standortgebiet müsste man ein detail-

liertes 3D-Modell haben und dazu eines oder zwei regionale 3D Modelle, zur Bewertung der grösseren Strukturen.

Die räumliche Beziehung zwischen den Permokarbon-Trögen und den tektonisierten Zonen im Jura ist nicht sehr gut sichtbar in diesem Bericht (NTB 14-02, Dossier II). Qualitativ ist sie beschrieben in Figur 4.4-2, aber nützlicher wäre eine 3D-Darstellung. Dieser Punkt sollte für jeden potentiellen Standort berücksichtigt werden. Für die Untersuchung der hypogenen Verkarstung ist die räumliche Beziehung zwischen verschiedenen Elementen besonders wichtig.

Die Fragen der Unsicherheiten in geologischen Modellen und in der seismischen Interpretation sind nicht explizit behandelt. Dies sollte in SGT Etappe 3 transparenter gemacht werden.

3.2 Zusammenfassung der wichtigsten an Karst gebundenen Probleme

In Betrachtung der gelesenen NAGRA-Berichte und basierend auf unseren heutigen Kenntnissen des Karsts, die in den Kapiteln 1 und 2 dieses Berichtes zusammengefasst sind, haben wir die folgenden potenziellen Probleme identifiziert.

3.2.1 Potenzielle Probleme bezüglich der gesamten Sicherheit

- 1) Schnellere Fliesswege als vermutet → A. vor allem im Muschelkalk und Malm
→ B. in „harten“ Bänken
- 2) Tiefe Hohlräume mit Fontis → A. Potenzieller hypogener Karst im Muschelkalk
→ B. Potenzieller hypogener Karst in harten Bänken
- 3) Karst-Entwicklung während der Sicherheitsdauer des Lagers

3.2.2 Karstgefährdungen während Bau und Betrieb

- 4) Potenzielle hypogene Verkarstung im Malm
- 5) Küstenkarst (Eozäner Karst) im Malm
- 6) Epigene Verkarstung im Malm
- 7) Karstgefährdungen im Zusammenhang mit dem Hauptrogenstein

Besonders kritisch sind Probleme 1B, 2A, 5 und 6, weil sie die Machbarkeit des Lagers direkt einträchtigen können und/oder zeigen eine bedeutende Auftretenswahrscheinlichkeit. Probleme 1A, 2B, 3, 4, und 7 sind weniger wahrscheinlich oder mit beschränkteren Konsequenzen zu betrachten. Alle Aspekte müssen trotzdem in SGT Etappe 3 genauer untersucht werden.

3.3 Untersuchungsziele für SGT Etappe 3

Die Kenntnisse betreffend den Karst sind für beide von der Nagra zur Weiterbearbeitung vorgeschlagenen Standortgebiete ähnlich. Deswegen unterscheiden wir nicht zwischen den Untersuchungszielen, die für den Standort Zürich Nordost und Jura Ost gelten.

Im folgenden Text sind die Untersuchungsziele aus den im Kapitel 3.2 erwähnten Problemen genauer formuliert. Jedes Untersuchungsziel ist kommentiert und mit den in NAB 14-83 vorgeschlagenen Untersuchungszielen (Anhänge 1 und 2) grob diskutiert.

3.3.1 1B und 2B : Harte Bänke

Die Untersuchungen müssen folgende Parameter der sog. harten Bänke besser dokumentieren: Existenz, Mächtigkeit, Fazies, Kontinuität, Verbindung mit grösseren Aquiferen (bei Störungen oder übertieften Tälern), Verbindung mit Aufschlüssen (recharge areas), Verbindung mit potenziellen hypogenen „Treibern“ (vor allem CO₂, H₂S, hydrothermale Grundwässer), plausibilisierte Abschätzung der Durchlässigkeit und Porosität, vernünftige Charakterisierung der Zerklüftung, direkte Beobachtung von Lösungsformen, Analyse von bestimmten Mineralien, Grundwasser Chemie und Isotopen.

3.3.2 2A: Karst im Muschelkalk

Die Untersuchungen müssen folgende Parameter vom Muschelkalk besser dokumentieren: Mächtigkeit, Fazies, Kontinuität, Verbindung mit anderen Aquiferen (bei Störungen oder übertieften Tälern), Verbindung mit Aufschlüssen („recharge areas“), Verbindung mit potenziellen hypogenen „Treibern“ (vor allem CO₂, H₂S, hydrothermale Grundwässer), plausibilisierte Abschätzung der Durchlässigkeit und Porosität, vernünftige Charakterisierung der Zerklüftung, direkte Beobachtung von Lösungsformen, Analyse von bestimmten Mineralien, Grundwasserchemie und Isotopen.

3.3.3 3: Karstentwicklung während der Sicherheitsdauer des Lagers

Die Untersuchungen müssen folgende Aspekte besser dokumentieren:

- Rekonstruktion der vergangenen Verkarstungsbedingungen (3D-Modelle der Geologie, Hydrogeologie, Initialfugen („inception horizons“), Speläogenese UND Verkarstungstyp (hypogen, Küstenkarst oder epigener Karst).
- Untersuchungen in Höhlen um die historische Entwicklung der Schwellen bei Bingen (D) und zwischen Basel und dem Bodensee besser zu dokumentieren. Solche Untersuchungen können auch Daten zu rezenten tektonischen Bewegungen, Hebung und der Talentwicklung beitragen.
- Modellierung von zukünftigen Verkarstungsszenarien im Zusammenhang mit Szenarien der zukünftigen Entwicklung von Vorflutern, Tälern und Hebungen. Diese benötigt 3D-Modelle der Geologie, Hydrogeologie, Initialfugen, Speläogenese und des Verkarstungstyps (hypogen, Küstenkarst oder epigener Karst).

3.3.4 4: Potenzielle hypogene Verkarstung im Malm

Die Untersuchungen müssen Parameter und Indikatoren der hypogenen Verkarstung des Malms besser dokumentieren:

Mächtigkeit, Fazies, Kontinuität, Verbindung mit anderen Aquiferen (bei Störungen oder übertieften Tälern), Verbindung mit potenziellen hypogenen „Treiber“ (vor allem CO₂, H₂S, hydrothermale Grundwässer), Verbindung mit Aufschlüssen und weiteren Aquiferen, plausibilisierte Abschätzung der Durchlässigkeit und Porosität, vernünftige Charakterisierung der Zerklüftung, direkte Beobachtung von Lösungsformen, Analyse von bestimmten Mineralien, Grundwasser Chemie und Isotopen.

Rekonstruktion der vergangenen Verkarstungsbedingungen (3D-Modelle der Geologie, Hydrogeologie, Initialfugen, Speläogenese und Verkarstungstyp (hypogen).

Interpretation anhand eines hypogenen Verkarstungsmodelles. Eine Zusammenstellung der dokumentierten Aufschlüsse und aller möglichen Kenntnissen von hypogenem Karst im Malm der Nordschweiz ist sehr wichtig. Ein hypogenes Verkarstungsmodell, das für die Nordschweiz gilt, soll daraus entwickelt werden. Dazu soll die KarstALEA-Methode entsprechend angepasst werden.

3.3.5 5: Küstenkarst (Eozäner Karst) im Malm

Gleich wie 3.3.4, aber Interpretation anhand eines Küstenkarst-Verkarstungsmodells.

Hier ist eine Zusammenstellung der dokumentierten Aufschlüsse und aller möglichen Kenntnisse von Eozänem Karst sehr wichtig. Ein Küstenkarstmodell, das für die Nordschweiz gilt, soll daraus entwickelt werden. Dazu soll die KarstALEA-Methode entsprechend angepasst werden.

3.3.6 6: Epigene Verkarstung im Malm

Gleich wie 3.3.4, aber Interpretation anhand eines epigenen Verkarstungsmodells, das aus der heutigen KarstALEA-Methode ziemlich direkt abgeleitet werden kann. Hier sollen zusätzlich potenzielle Interferenzen mit Küsten- und hypogenem Karst mit berücksichtigt werden.

3.3.7 7. Karstgefährdungen im Hauptrogenstein

Es muss zuerst abgeschätzt werden, ob und wie sich die Kalkfazies des Hauptrogenstein entwickelt, dies im Zusammenhang mit den ausgewählten Standorten. Im regionalen Karstmodell muss die Kalkfazies sowieso berücksichtigt werden. In lokalen Modellen ist der Vertiefungsgrad der Untersuchungen im Lauf der Etappe 3 SGT genauer zu definieren.

3.3.8 Fazit

Die meisten Untersuchungsziele sind für den Muschelkalk, die harten Bänke und den Malmkalk gleich oder sehr ähnlich. Sie sollen erlauben, die Verkarstung dieser Schichten zu beurteilen. Die skizzierten Modelle können teilweise für alle Schichten gleichzeitig konstruiert werden.

Die von der NAGRA geplanten Untersuchungsmittel (NAB 14-83: Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3) decken zum grossen Teil die Bedürfnisse der Karst-Untersuchungsziele ab. Trotzdem sind für den Karst spezifische Interpretationsverfahren sowie gezielte Messungen oder Beobachtungen notwendig.

3.4 Beiträge der Untersuchungsmethoden

3.4.1 3D-Seismik

3D-Seismik soll folgende Informationen beitragen: Mächtigkeit, Fazies, Kontinuität, Verbindung mit anderen Aquiferen (bei Störungen oder übertieften Tälern), Verbindung mit potenziellen hypogenen „Treibern“ (vor allem CO₂, H₂S, hydrothermale Grundwässer), Charakterisierung der Zerklüftung (?), grossräumige Lösungsformen, Anwesenheit von Fontis (im Kalk und in anderen Schichten).

Eventuell sollte der von der NAGRA vorgeschlagene Perimeter im Osten etwas erweitert werden, damit die Randbedingungen entlang der Neuhauser Störung genau und zuverlässig in 3D dargestellt werden können.

3.4.2 Tiefe Bohrungen (betrifft vor allem Muschelkalk und harte Bänke)

Betreffend den Karst sollen tiefe Bohrungen folgende Informationen bringen/ergänzen: Mächtigkeit, Fazies, Kontinuität, Verbindung mit potenziellen hypogenen „Treibern“ (vor allem CO₂, H₂S, hydrothermale Grundwässer), vernünftige Abschätzung der Durchlässigkeit und Porosität, vernünftige Charakterisierung der Zerklüftung, direkte Beobachtung von Lösungsformen, Analyse von bestimmten Mineralien, Grundwasserchemie und Isotopen in den jeweiligen Formationen (inkl. Zeitvariationen).

Achtung: Die Langzeitbeobachtung muss die jeweiligen Aquifere unbedingt getrennt erfassen. In mächtigen Aquiferen sollten eventuell mehrere Intervalle getrennt gemessen werden. Idealerweise sollten die Durchlässigkeit und Druckhöhe zwischen Packern alle 5 bis 10 m gemessen werden.

Der Anzahl an Daten soll ausreichend sein, damit die Heterogenität der jeweiligen Parameter abgeschätzt werden kann. Die Datenanalyse muss auch diesen Aspekt explizit betrachten.

3.4.3 Untiefe Bohrungen (betrifft vor allem den Malm)

Betreffend den Karst ist das Ziel von untiefen Bohrungen, die Verkarstung des Malms (inkl. Übergang Molasse-Malm) zu charakterisieren. Dies betrifft einerseits die Eigenschaften des Fels und der eingeschlossenen Füllungen, andererseits die Randbedingungen d.h. vor allem die Talentwicklung. Entsprechend sollen untiefe Bohrungen folgende Informationen bringen/ergänzen: Mächtigkeit, Fazies, Kontinuität, Verbindung mit potenziellen hypogenen „Treibern“ (vor allem CO₂, H₂S, hydrothermale Grundwässer), vernünftige Abschätzung der Durchlässigkeit und Porosität, vernünftige Charakterisierung der Zerklüftung, direkte Beobachtung von Lösungsformen, Analyse von bestimmten Mineralien, Grundwasserchemie und Isotopen im Malm (inkl. Zeitvariationen). Idealerweise sollten einige Bohrungen nahe an den geplanten Zugangsbauwerken im Malm abgeteuft werden. Die geplanten Bohrungssperimeter sind in diesem Zusammenhang eher zu weit entfernt.

Achtung: Die Durchlässigkeit und Druckhöhe im Malm müssen zwischen Packern, alle 5 bis 10 m, gemessen werden. Die Datendichte soll so gewählt werden, dass die Heterogenität der jeweiligen Parameter abgeschätzt werden kann. Die Datenanalyse muss auch diesen Aspekt explizit betrachten.

3.4.4 Sonstige Untersuchungen

Der Wissensstand über Karstprozesse in der Nordschweiz muss stufengerecht vertieft werden. In Etappe 3 geht es vor allem darum, so umfangreich wie möglich Informationen über die jeweiligen Verkarstungen der verschiedenen Karbonat-Schichten zusammenzustellen. Mindestens sollten folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

- Intensive Literaturrecherche (inkl. älterer und nicht publizierter Quellen) bezüglich Küstenkarst in der Nordschweiz (eozäne Sedimente) mit dem Ziel, ein Modell dieser Verkarstung erstellen zu können.

- Aufschlüsse von Malm, harten Bänken und Muschelkalk in einem Bereich von 30 bis 50 km um die Standortgebiete sollen untersucht werden. Hauptziel ist es, Hinweise auf die Verkarstung und deren Charakterisierung zusammenzustellen.
- Vermutlich sollte das Untersuchungsgebiet in die benachbarten Länder (D und F) erweitert werden. Spezialisten von Küstenkarst und hypogenem Karst sollen involviert werden.
- Höhlen in einem Bereich von 30 bis 50 km um die Standortgebiete sollen untersucht werden. Ziele sind dabei, Hinweise auf damalige tiefe Verkarstung zu identifizieren, sowie Rekonstruktionen von Talentwicklungen und Hinweise auf neotektonische Bewegungen zusammenzustellen.
- Höhlen im Bereich von Bingen (D) und zwischen Bodensee und Basel könnten Hinweise auf die Eintiefung des Rhein in diesen beiden Schwellengebieten liefern.
- Die bestehenden 3D Modelle der NAGRA (geologische und hydrogeologische) sollen systematisch geprüft und gegebenenfalls ergänzt werden, mit dem Ziel, eine vernünftige Abschätzung der regionalen sowie lokalen Verkarstungsbedingungen durchführen zu können.
- Ein regionales KARSYS-Modell, anhand von 3D geologischen Modellen, soll aufgebaut werden, und im Lauf des Projektes den Befunden angepasst werden.
- Ein regionales KarstALEA-Modell soll auch konstruiert werden, um eine gesamte Schätzung der Verkarstungen (3 Typen) zu eruieren. Dieses Modell muss nicht unbedingt sehr genau, aber umfassend sein. Genauere Modelle von (den) ausgewählten Standort(en) sollen gegen Ende der Etappe 3 erstellt werden. Sie werden in weiteren Realisierungsschritten die Projektentwicklung begleiten.
- Ein Inventar von Mineralien in den betroffenen Formationen soll zusammengestellt werden. Ziel ist es, Indikatoren von Küsten- oder hypogenem Karst zu finden.
- Ein Inventar von allen Grundwassereigenschaften soll aus Quellen, Brunnen, Bohrungen, usw. zusammengestellt werden. Ziel ist es, Indikatoren von Küsten- oder hypogener Verkarstung zu finden.
- Grundwasserströmungssimulationen müssen auch Extremfälle berücksichtigen, um eine Schätzung der Plausibilität und der Konsequenzen von gewissen Szenarien zu erlauben. Die Auswirkung einer Karstentwicklung sollte damit quantifiziert werden.

Als nächster Schritt sollten die Tabellen der Anhänge 1 und 2 von NAB 14-083 explizit mit den hier skizzierten Untersuchungszielen ergänzt werden. Damit kann ein detailliertes Arbeitsprogramm für die Etappe 3 vorbereitet werden. Erst danach können die eigentliche Untersuchungen beginnen. Die oben erwähnten Arbeiten müssen unter der Leitung eines ausgewiesenen Karstspezialisten durchgeführt werden.

Referenzen

- Adams AL, Zhou W, Wang J, Beck BF (2002): A differentiation of karst hazards based on ground penetrating radar and natural potential measurements. Abstracts with Programs, Geological Society of America, 34(2): 89 p.
- Baceta JI, Wright VP, Pujalte V (2001): Palaeo-mixing zone karst features from Palaeocene carbonates of north Spain: criteria for recognizing a potentially widespread but rarely documented diagenetic system. *Sediment. Geol.*, 139(3): 205-216 p.
- Baldi AM, Fuoco S, De Luca J (2006): Application of new seismic methodologies for the solution of geomechanic problems connected to the excavation of tunnels. Fifteenth international symposium on Mine Planning & Equipment Selection, Torino 2006.
- Bates ER (1973): Detection of subsurface cavities. *Miscellaneous Paper S73-40*, 40: 1-56 p.
- Bauer-Gottwein P, Gondwe BRN, Charvet G, Marìn LE, Rebolledo-Vieyra M et al. (2011): Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3): 507-524 p.
- Bechtel TD, Bosch FP, Gurk M (2007): Geophysical methods. In: Goldscheider N & Drew D, editor. *Methods in karst hydrogeology*. Taylor & Francis, London. pp. 171-199.
- Beres M, Luetscher M, Olivier R (2001): Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves. *Journal of Applied Geophysics*, 46(4): 249–262 p.
- Berger JP, Reichenbacher B, Becker D, Grimm M, Grimm K et al. (2005): Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 94(4): 697-710 p.
- Bitri A, Samyn K, Jacob T (2014): Cavity Investigation by Surface Wave Tomography and Microgravity. EA-GE Near Surface Geoscience 2014, Sep 2014, Athènes, Greece. 4.
- Bosak P, Benes V (2003): Geophysical characteristics of epikarst; case studies from Zagros Mts. (Iran) and the Koneprusy region (Czech Republic). *Acta Carsologica*, 32(2): 255-267 p.
- Bosch FP (2002): Shallow depth karst structure imaging with the Very Low Frequency- Electromagnetics GRADIENT method (VLF-EM GRAD) : A new contribution to aquifer protection strategies compared with other near surface mapping geophysics.. Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, PhD dissertation.
- Bosch FP, Müller I (2001): Continuous gradient VLF measurements; a new possibility for high resolution mapping of karst structures. *First Break*, 19(6): 343-349 p.
- Bosch FP, Müller I (2005): Improved karst exploration by VLF-EM-gradient survey: comparison with other geophysical methods. *Near Surface Geophysics*, 3: 299-310 p.
- Campbell CW, El Latif MA (1996): Application of Thermography to karst hydrology. *Journal of Cave and Karst Studies*, 58(3): 163-167 p.
- Chalikakis K, Plagnes V, Guerin R, Valois R, Bosch FP (2011): Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, 19(6): 1169-1180 p.
- Chamberlain AT, Sellers W, Proctor C, Coard R (2000): Cave Detection in Limestone using Ground Penetrating Radar. *J. Archaeol. Sci.*, 27: 957-964 p.
- Collins ME, Cum M, Hanninen P (1994): Using ground-penetrating radar to investigate a subsurface karst landscape in north-central Florida. *Geoderma*, 61(1-2): 1-15 p.

Coppo N, Schnegg PE, Défago M, GSCB (2006): Mapping a shallow large cave using a high-resolution Very Low Frequency Electromagnetic method. Proceedings of the 8th conference on limestone hydrogeology 2006, Neuchâtel Switzerland. pp. 71-74.

Custodio E (1978): Geohidrología de terrenos e islas volcánicas. CEDEX, Madrid.

Dickmann T, Tang SK (2006): Application and research of seismic investigation methods to predict rock mass conditions ahead of the face, unpubl. rep. Amberg Technologies AG, Trockenloostrasse 21, CH8105 Regensdorf-Watt.

Doerfliger N, Zwahlen F (1998): Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). Guide pratique, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Berne, Suisse.

Doll WE, Carr BJ, Sheehan JR, Mandell WA (2005): Overview of Karst Effects and Karst Detection in Seismic Data from the Oak Ridge Reservation, Tennessee. U.S. Geological Survey Karst Interest Group proceedings, Rapid City, South Dakota, September 12-15, 2005. 20-28.

Farrant A, Smart P, Whitaker F, Tarling D (1995): Longterm Quaternary uplift rates inferred from limestone caves in Sarawak, Malaysia. *Geology*, 23: 357-360 p.

Filipponi M, Schmassmann S, Jeannin PY, Parriaux A (2012): Karstalea: Wegleitung zur Prognose von Karstspezifischen Gefahren im Untertagbau. Bundesamt für Strassen ASTRA.

Fish JE (1977): Karst hydrogeology and geomorphology of the Sierra de El Abra and the Valles-San Luis Potosi region, Mexico. McMaster University Hamilton, Ontario, PhD dissertation. 469 p.

Florea LJ, Vacher HL (2006): Springflow Hydrographs: Eogenetic vs. Telogenetic Karst. *Ground Water*, 44(3): 352-361 p.

Ford D, Williams PW (2007): Karst hydrogeology and geomorphology. Antony Rowe, Ltd.

Ford DC, Ewers RO (1978): The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *International Journal of Speleology*, 10: 213-244 p.

Goldscheider N, Drew D (2007): Methods in karst hydrogeology. Taylor & Francis, London.

Guo J, Luo C (2014): Study on Application of Electromagnetic Tomography Advanced Geological Prediction in Tunnel Construction. *Journal of Networks*, 9(8): 2106-2113 p.

Hackert CL, Parra JO (2003): Estimating scattering attenuation from vugs or karsts. *Geophysics*, 68(4): 1182-1188 p.

Heindl LA, Legrand HE, Stringfield VT, Burdon DJ, LaMoreaux PE, Wilson BM, Astier JL, Castany G, Kudelin BI, Zebidi H, Schoeller H, Memon BA, Wilson BM (1984): Methods of investigation. In: P.E. La Moreaux, B.M. Wilson, B.A. Memon, editor. Guide to the hydrology of carbonate rocks - studies and reports in hydrology 41. UNESCO, Paris. pp. 158-260.

Hoover RA (2003): Geophysical choices for karst investigations. Proceedings of the 9th Multidisciplinary Conference on Sinkholes & the Engineering and Environmental Impact of Karst. 529-538.

Hossain AKMA, Easson G (2009): Microwave remote sensing of soil moisture in semi-arid environment. In: Pei-Gee Peter Ho, editor. Geoscience and remote sensing. InTech. pp. 529-553.

Jeannin PY, Bitterli T, Haeuselmann P (2000): Genesis of a large cave system: the case study of the north of lake thun system (canton bern, switzerland). In: Klimchouk AB, Ford DC, Palmer AN, Dreybrodt W, editors. Speleogenesis, evolution of karst aquifers. National Speleological Society, Huntsville, Alabama. pp. 338-347.

Jeannin PY, Häuselmann P (2005): Siebenhengste cave system, switzerland. In: Culver/White, editor. Encyclopedia of caves. Elsevier, Academic Press. pp. 500-509.

- Karaman A, Karadayılar T (2004): Identification of karst features using seismic P-wave tomography and resistivity anisotropy measurements. *Environmental Geology*, 45: 957-962 p.
- Kaufmann G, Gabrovsek F, Romanov D (2014): Deep conduit flow in karst aquifers revisited. *Water Resources Research*, 50: 4821-4836 p.
- Klimchouk A (2009): Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106: 100-117 p.
- Klimchouk A, Auler AS, Bezerra FHR, Cazarin CL, Balsamo F (2015): Functional organization and lithostratigraphic control of a large hypogene cave system in the Precambrian carbonates, NE Brazil. *International Conference on Groundwater in Karst*. pp. 42.
- Klimchouk AB, Ford DC (2000): Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. In: Klimchouk AB, Ford DC, Palmer AN, Dreybrodt W, editors. *Speleogenesis. evolution of karst aquifers*. Nat. Spel. Soc., Huntsville, Alabama, USA. pp. 54-64.
- Klimchouk AB, Ford DC, Palmer AN, Dreybrodt W (2000): *Speleogenesis. evolution of karst aquifers*. Nat. Spel. Soc., Huntsville, Alabama, USA.
- Klimchouk AB, (2012): *Speleogenesis hypogenetic*; in *Encyclopedia of caves*, Elsevier Inc. pp. 748-765.
- Klimchouk AB (2013): ГИПОГЕННЫЙ СПЕЛЕОГЕНЕЗ, ЕГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ И РОЛЬ В ЭВОЛЮЦИИ КАРСТА, Симферополь «ДИАЙПИ».
- Lange AL (1965): Cave detection by magnetic surveys. *Cave Notes*, 7(6): 41-54 p.
- Li S, Li S, Zhang Q, Xue Y, Liu B et al. (2010): Predicting geological hazards during tunnel construction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(3): 232-242 p.
- Liu HG, Liu J, Xu H, Song W (2003): Crosshole ultrasonic tomography and its application to karst investigation. *Acta Seismologica Sinica*, 16(4): 441-448 p.
- Monjoie A (1979): Méthodes de prospection appliquées aux phénomènes karstiques. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 102: 31-40 p.
- Myroie JE (2005): Coastal caves. In: Culver DC & White WB, editor. *Encyclopedia of caves*. Elsevier, Academic Press. pp. 122-127.
- Myroie JE, Carew JL (1995): Karst development on carbonate iselands. In: *American Association of Petroleum Geologists Memoir 63*, editor. *Unconformities and porosity in carbonate strata*. . pp. 55-76.
- Myroie JE, Carew JL (2000): *Speleogenesis in coastal and oceanic settings*. In: Klimchouk AB et al., editor. *Speleogenesis: evolution of karst aquifers*. National Speleological Society, Huntsville. pp. 226-233.
- NAGRA Arbeits-Bericht (NAB 14-83) (2014): *Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3*.
- NAGRA Technischer Bericht (NTB 14-02) (2014): *Geologische Grundlagen Dossier II: Sedimentologische und tektonische Verhältnisse*.
- NAGRA Technischer Bericht (NTB 14-02) (2014): *Geologische Grundlagen Dossier III: Geologische Langzeitentwicklung*
- NAGRA Technischer Bericht (NTB 14-02) (2014): *Geologische Grundlagen Dossier V: Hydrologische Verhältnisse*
- Nicod J (1990): Le Karst jurassien modèle géomorphologique spécifique. *Bulletin de la Société Neuchâtoise des Sciences Naturelles*, 113: 13-25 p.
- Palmer AN (1991): Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103: 1-21 p.

- Richer KA (1970): Comments on "A Microwave Radiometric Study of Buried Karst Topography". *Geol. Soc. America Bull.*, 81(2): 585-588 p.
- Roth MJS, Mylroie JE, Mylroie JR, Ersek V, Ersek C (2006): Flank margin cave inventory of the Bahamas. 12th Symposium on the Geology of the Bahamas and other carbonate regions. pp. 153-161.
- Roth MJS, Mackey JR, Mackey C, Nyquist JE (2002): A case study of the reliability of multielectrode earth resistivity testing for geotechnical investigations in karst terrains. *Engineering Geology*, 65(2-3): 225-232 p.
- Smart PL, Beddows PA, Doerr S, Smith LS, Whitaker F (2002): Hydrochemical processes and cave development on the caribbean coast, yucatan peninsula, mexico. In: Martin JB, Wicks CM, Sasowsky ID, editor. *Karst waters institute special publication 7: hydrogeology and biology of post-paleozoic carbonate aquifers*. pp. 79-83.
- Smith DV (2005): The State of the Art of Geophysics and Karst: A General Literature Review. U.S. Geological Survey Karst Interest Group proceedings, Rapid City, South Dakota, September 12-15, 2005. 10-16.
- Stober I (2013): Die thermalen Karbonat-Aquifere Oberjura und Oberer Muschelkalk im Südwestdeutschen Alpenvorland. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 18: 259-269 p.
- Swenson F (1968): New theory of recharge to the artesian basin of the Dakotas. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 79: 163-182 p.
- Tan H, Huang J, Qi S (2012): Application of cross-hole radar tomograph in karst Area . *Environmental Earth Sciences*, 66(1): 355-362 p.
- Thomas C (2010): Le karst du Yucatàn : rôle du flux géothermique, des failles, de l'eau de mer et des évaporites dans sa genèse. *Karstologia*, 55: 1-18 p.
- Valla P, Legchenko A (2002): Surface nuclear magnetic resonance; what is possible?. *Journal of Applied Geophysics*, 50(2): 1-2 p.
- Van Schoor M (2002): Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 50(4): 393-399 p.
- Vichabian Y, Morgan FD (2002): Self potentials in cave detection. *The Leading Edge*, 21(9): 866 p.
- Vouillamoz JM, Legchenko A, Albouy Y, Bakalowicz M, Baltassat JM et al. (2003): Localization of saturated karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. *Groundwater*, 41(5): 578-586 p.
- White WB (1969): Conceptual models for carbonate aquifers. *Ground Water*, 7(3): 15-21 p.
- White WB, Schmidt A (1966): Hydrology of a karst area in east-central West Virginia. *Water Resources Res*, 2: 549-560 p.
- Worthington SRH (1991): *Karst Hydrogeology of the Canadian Rocky Mountain*. Mc Master University, Hamilton, Ontario, Canada , PhD dissertation. 370 p.
- Xue G, Song J, Xian Y (2004): Detecting shallow caverns in China using TEM. *The Leading Edge*, 23(7): 694-695 p.
- Yang CZ, Chen YL, Wang YJ, Fang C (2012): The Application of Ground Penetrating Radar in the Karst Detection of Tunnel Bottom. *Advanced Materials Research*, 629: 471-476 p.
- Yang Y, Li Y, Cui D (2013): Identification of karst features with spectral analysis on the seismic reflection data. *Environmental Earth Sciences*, 71: 753-761 p.
- Zhao Y, Jian H, Zhao X (2006): Tunnel seismic tomography method for geological prediction and its application. *Applied Geophysics*, 3(2): 69-74 p.

Zhou W, Beck BF, Adams AL (2002): Selection of an effective electrode array to map sinkholes in karst terranes using electrical resistivity tomography. Abstracts with Programs, Geological society of America. 16.

Zurbuchen L, Kellenberger T (2008): Detection of cave entrances with airborne thermal imagery. Geophysical Research Abstracts, 10: SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-00347 p.

Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene

Anhang 1

KARSYS und KarstALEA

Autor: Pierre-Yves Jeannin

Korreferat : Beat Rick (Büro von Moos)

KARSYS und KarstALEA

KARSYS und KarstALEA sind zwei Methoden, die ab 2010 zur Bewertung der Verkarstung in Kalkgebirgen entwickelt wurden.

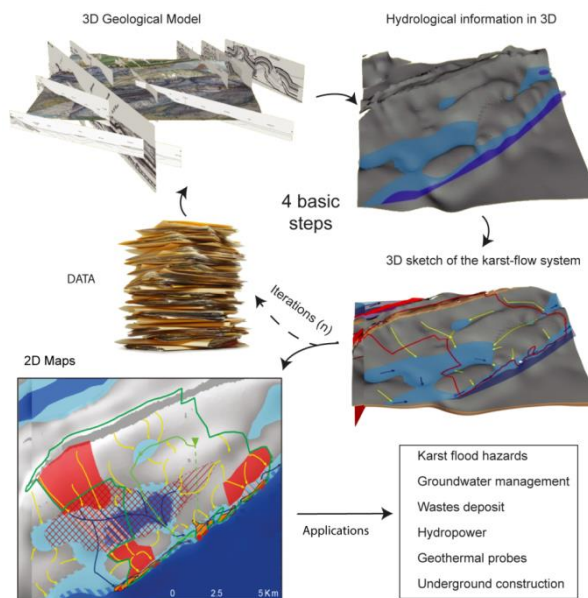
Die vorliegende Notiz fasst grob die Prinzipien beider, mit einander verknüpften Methoden zusammen. KarstALEA setzt grundsätzlich eine KARSYS- Untersuchung voraus. (Figur 5).

KARSYS : eine konzeptuelle Charakterisierung von Karst-Aquifers

KARSYS ist eine pragmatische Methode der systematischen Dokumentierung der Karst-Aquifers, welche durch das SISKa im Rahmen des Projektes Swisskarst 2010-2013¹ entwickelt wurde. KARSYS liefert, auf regionalen oder lokalen Karst angewendet, ein explizites, konzeptuelles Modell des Grundwasserreservoirs, der Karstwasserzirkulation und des Einzugsgebietes. KARSYS-Resultate können je nach Anwendung und Aufwand in drei verschiedenen Formen präsentiert werden: KARSYS Express, KARSYS Original 3D und KARSYS Extended.

1. Prinzipien

KARSYS ist eine deduktive 3D-Methode, welcher ein explizites, geologisches Modell des Gebietes und die hydraulischen Bedingungen, die zur Verkarstung führen, zu Grunde liegen. Vier Arbeitsschritte werden auf ein bestimmtes Gebiet angewendet (Figur 1): (i) Identifizierung der Karsteigenschaften des Grundwasserkörpers, (ii) Erarbeiten eines geologischen 3D-Modells der Karst-Aquifers, (iii) Erarbeiten eines hydrogeologischen 3D-Modells der Aquifers durch Integration der hydrologischen Daten und (iv) Bestimmung und Begrenzung der Einzugsgebiete. Die 4 Schritte werden in der Folge beschrieben.



Figur 1. Entwicklung des KARSYS Modells in 4 Etappen

¹ Forschungsprojekt durch den schweizerischen Nationalfonds unterstützt (Nationales Forschungsprojekt Nr.61)

1.1. Schritt 1 : Karsteigenschaften des Aquifers

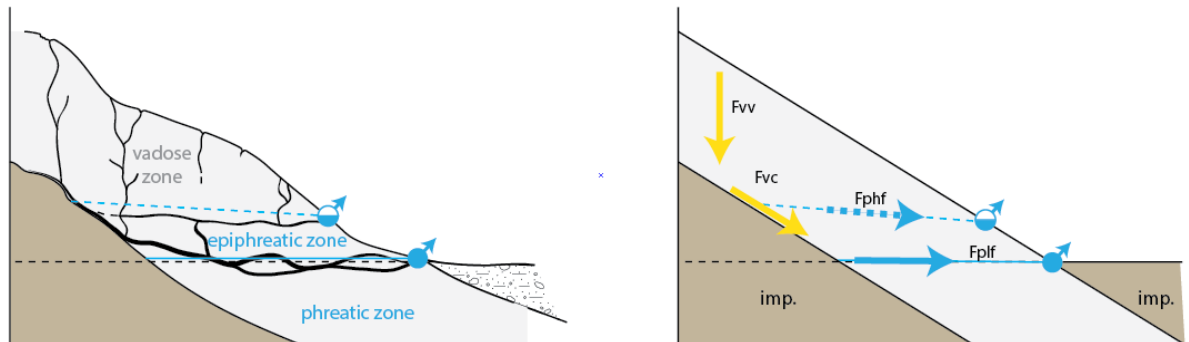
Zuerst werden die in Wasser löslichen Gesteine bestimmt. Bestehende Daten und Feldbeobachtungen werden dazu benützt. Diese Formationen werden als Karst-Aquifers angesprochen, im Gegensatz zu jenen, die wenig löslich sind und deshalb Wasserstauer bilden. Je nach Mächtigkeit und Tongehalt bilden sie lokale oder regionale Wasserstauer. Diese Informationen werden in einem hydro-stratigraphischen Profil des Gebiets zusammengestellt.

1.2. Schritt 2 : 3D-Modell der Aquifers

Auf Basis des hydro-stratigraphischen Profils wird nun ein 3D-Modell konstruiert, welches den tektonischen, strukturellen Gegebenheiten des Gebiets entspricht. Die Auflösung des Modells ist ein Kompromiss zwischen der Gebietsgrösse, den vorhandenen geologischen Daten und des Zwecks der Übung. Dieses Modell wird mit einem Programm konstruiert, welches die Berechnung von geologischen Volumen ermöglicht.

1.3. Schritt 3 : Hydrogeologisches 3D-Modell

In das geologische Modell werden nun die karst-hydrologischen Daten integriert. Dies sind permanente Quellen, Wasserstände aus Höhlen und aus Bohrungen, welche Karströhren schneiden. Die Extrapolation des Horizontes permanenter Quellen im Untergrund des Modells entspricht der Mindesthöhe der Obergrenze der phreatischen Zone, bei Niederwasserstand und hydraulischem Gradienten gleich Null. Dieser Gradient kann lokal variieren, je nach Bohrloch- oder Höhlendaten, die dann z.B. die Annahme einer hydraulischen Schwelle erlauben, welche im geologischen Modell nicht erkannt wurde. In der vadosen Zone der Grundwasserleiter wird eine vertikale Zirkulation angenommen, wo sie nicht durch Wasserstauer abgelenkt wird. Figur 2 zeigt das hydraulische Prinzip eines Karstwasserleiters.



Figur 2. Organisation des Abflusses in einem Karstsystem, schematisiert entsprechend der KARSYS-Methode; Fvv: vadoso vertikaler Abfluss; Fvc: vadoso kontrollierter Abfluss; Fplf: phreatischer Abfluss bei Niederwasser und Fphf: phreatischer Abfluss bei Hochwasser. Die Wasserstauer und nicht verkarsteten Formationen werden mit imp. bezeichnet.

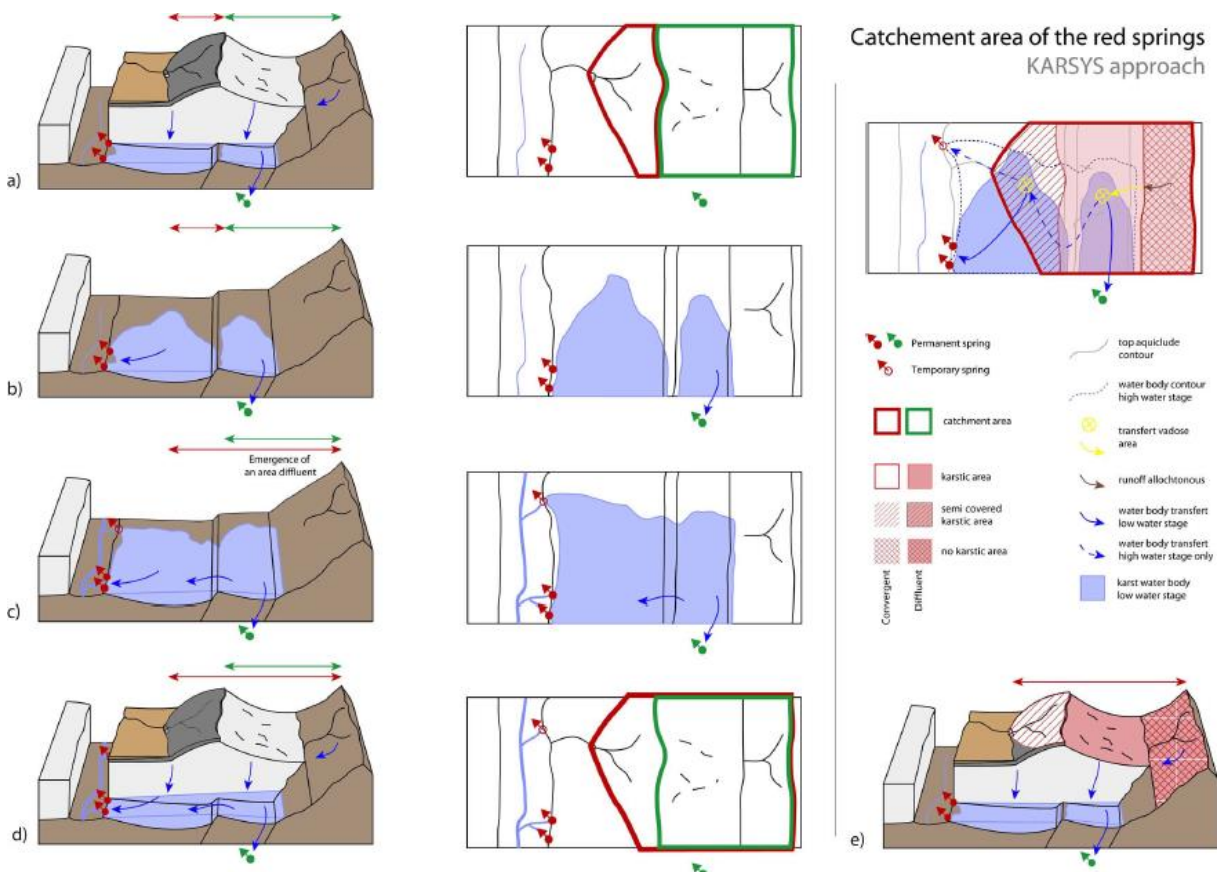
Je nach Zweck kann das hydrologische Modell für Hochwasser ausgelegt werden. Temporäre Überläufe und Anzeichen von Wasserständen in Bohrungen und Höhlen ermöglichen eine Bestimmung der Ausdehnung der epiphreatischen Zone, d.h. der Höhe bis zu der die Karstwasserröhren gefüllt werden.

Dieser Schritt verdeutlicht (i) die Verbreitung der Einzugsgebiete verschiedener isolierter Grundwasserkörper bei Niederwasser und (ii) die Divergenzen zwischen zwei oder mehreren Karstsystemen.

1.4. Schritt 4 : Begrenzung der Abflusssysteme

Ausgehend vom hydrogeologischen 3D-Modell und den hydraulischen Verhältnissen bei hoch- und Niederwasser können nun die verschiedenen Abflusssysteme identifiziert werden und ein möglicher Austausch zwischen ihnen kann als Funktion der Wasserstände formuliert werden.

Für jedes einzelne, bei Niederwasser erkannte System, wird an der Oberfläche ein Einzugsgebiet angegeben. Diese Begrenzung kann sich bei Hochwasser infolge des Austausches zwischen den Systemen verschieben.



Figur 3. Das Prinzip der Begrenzung der Abflusssysteme wird in diesem Beispiel auf die grüne Quelle angewendet. Bei Niederwasser werden zwei isolierte Systeme erkannt. Bei Hochwasser überströmt ein Teil des Wassers aus dem grünen System in die roten Quellen und diese drainieren nun auch das grüne Einzugsgebiet. KARSYS ist die einzige Methode, welche ohne Messungen an den Quellen solche Divergenz-Mechanismen aufzeigt und lokalisiert.

2. Anwendungen

2.1. KARSYS Express

In der Express-Anwendung werden für den KARSYS-Ansatz keine hydrogeologischen oder hydraulischen 3D-Modelle konstruiert. KARSYS Express beschreibt in 2D, durch Ausführung von Schritt 1 (siehe oben), die Verbreitung der Karstwasserkörper und die mögliche Zirkulation auf

Grund der lokalen Geologie. Nur die wichtigsten Systeme werden unterschieden und beschrieben. KARSYS Express wird auch jedes Mal bei weiterführenden Untersuchungen (KARSYS-Original 3D) angewendet um die Begrenzungen und die Auflösung der 3D Modelle sinnvoll zu wählen

Die Resultate von KARSYS-Express werden in Kartenform und als Beschreibung der Systeme geliefert.

2.2. KARSYS Original 3D

Das Format Original 3D enthält den Bau von geologischen und hydrogeologischen 3D-Modellen. Die Schritte 1, 2, 3 und 4 werden, wie oben beschrieben, auf das Gebiet von Interesse angewendet.

Die Resultate von KARSYS Original 3D sind informative 3D-Modelle die einfach zu handhaben sind. Hydrogeologische Karten auf die Aquifere ausgelegt und/oder die Systeme, je nach Gebietsgrösse oder Zweck der Dokumentation. Beschreibende Fichen pro Entwässerungssystem können ebenfalls geliefert werden.

2.3. KARSYS Extended

Je nach Zweck der Untersuchungen und Dokumentationen (z.B. Wasserreserven, Naturgefahren, Grund- oder Untertagebau, Hydroelektrizität, Geothermie, Speicher oder Deponien etc.) können die Produkte von KARSYS Original 3D zusätzlich spezifisch interpretiert werden. Es können zusätzliche Modelle konstruiert werden für hydrologische, hydraulische oder geothermische Anwendung oder speläogenetische Untersuchungen für initiale Verkarstung und die Anordnung von Karströhren. Alle Zusätze sind kohärent mit dem konzeptuellen KARSYS-Modell. Die KarstALEA Methode ist ein bewährtes Beispiel einer solchen KARSYS Extended Formel. Sie bezieht sich auf Risikovorhersagen für Untertagebauten.

KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau

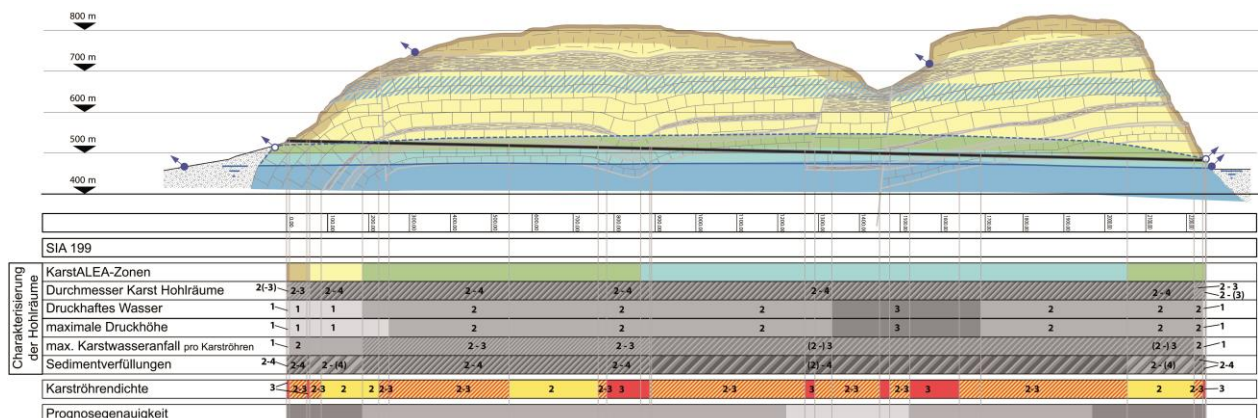
1. Kontext und Ziel

Der Tunnelbau im verkarsteten Gebirge führt häufig zu Problemen, welche schwere (Verzögerungen, technische Probleme, Sicherheit) und teure Folgen haben können. Gewisse Gesteine (insbesondere Kalk und Gips) können durch Sickerwässer gelöst werden, so dass sich mit der Zeit Hohlräume (Höhlen) bilden, welche zu einer Reihe spezifischer Probleme im Untertagbau führen.

Die Verkarstung führt zu drei Arten von Problemen:

- 1) Die Hohlräume selbst (z.B. Probleme der Verankerung und bei des Hohlraumstabilität, Verklemmen der TBM),
- 2) Die Sedimente in den Hohlräumen (z.B. schlammstromartige Entleerung der Hohlräume, Kriechen der Sedimente, Verkleben des Bohrkopfes),
- 3) Das Wasser, das unter hohem Druck stehen kann, und in grossen Mengen anfallen kann.

Das Anschneiden von Karsthohlräumen stellt ein Problem für die Ausführung des Bauvorhabens dar, kann aber auch Auswirkungen auf die Umwelt haben, im Speziellen die Quellen der Region.



Figur 4. Prognostisches Längsprofil. Die KarstALEA-Methode ermöglicht, ein prognostisches Längsprofil mit karstspezifischen Angaben zu erstellen. Die Wahrscheinlichkeit auf eine Karströhre zu stossen und Eigenschaften von Karsthohlräumen werden dem SIA-Format angefügt.

Das Hauptziel der KarstALEA-Wegleitung ist dem im Untertagbau aktiven Geologen eine praxisnahe Methode zur Beurteilung des verkarsteten Gebirges zur Verfügung zu stellen, welche die SIA-Norm 199 ergänzt. Im Wesentlichen verwendet die KarstALEA-Methode die Struktur und Daten, die im Rahmen der Anwendung dieser Norm erhoben werden. Durch eine spezifische Interpretation und gewisse ergänzenden Daten ermöglicht die KarstALEA-Methode, ein prognostisches Längsprofil mit karstspezifischen Angaben zu erstellen. Darin werden die Wahrscheinlichkeit auf eine Karströhre zu stossen für die verschiedenen Tunnelabschnitte sowie die Eigenschaften der zu erwartenden Karsthohlräume detailliert beschrieben (Grösse, Form, Wasserführung, allfällige Sedimentverfüllungen). Ein Beispiel eines solchen Längsprofils befindet sich in der Figur 4.

2. Anwendungsbereich

Die KarstALEA-Methode ist für die Kalkgebirge der Schweiz entwickelt worden. Die Anwendung in einem anderen Kontext ist mit gewissen Einschränkungen möglich, welche im Kapitel 4.7 der KarstALEA Wegleitung detaillierter beschrieben sind.

Die Prognosegenauigkeit hängt auf jeden Fall von der Genauigkeit der geologischen und hydrogeologischen Modelle des Massivs ab. Wenn vorhanden, werden speläologische Daten des Projektgebietes (Höhlenvermessung, Pläne) für die Karstprognose verwendet. Die Anwendung der KarstALEA-Methode ist aber ohne diese Daten möglich, da Information aus benachbarten oder vergleichbaren Karstsystemen für die Prognose verwendet werden können.

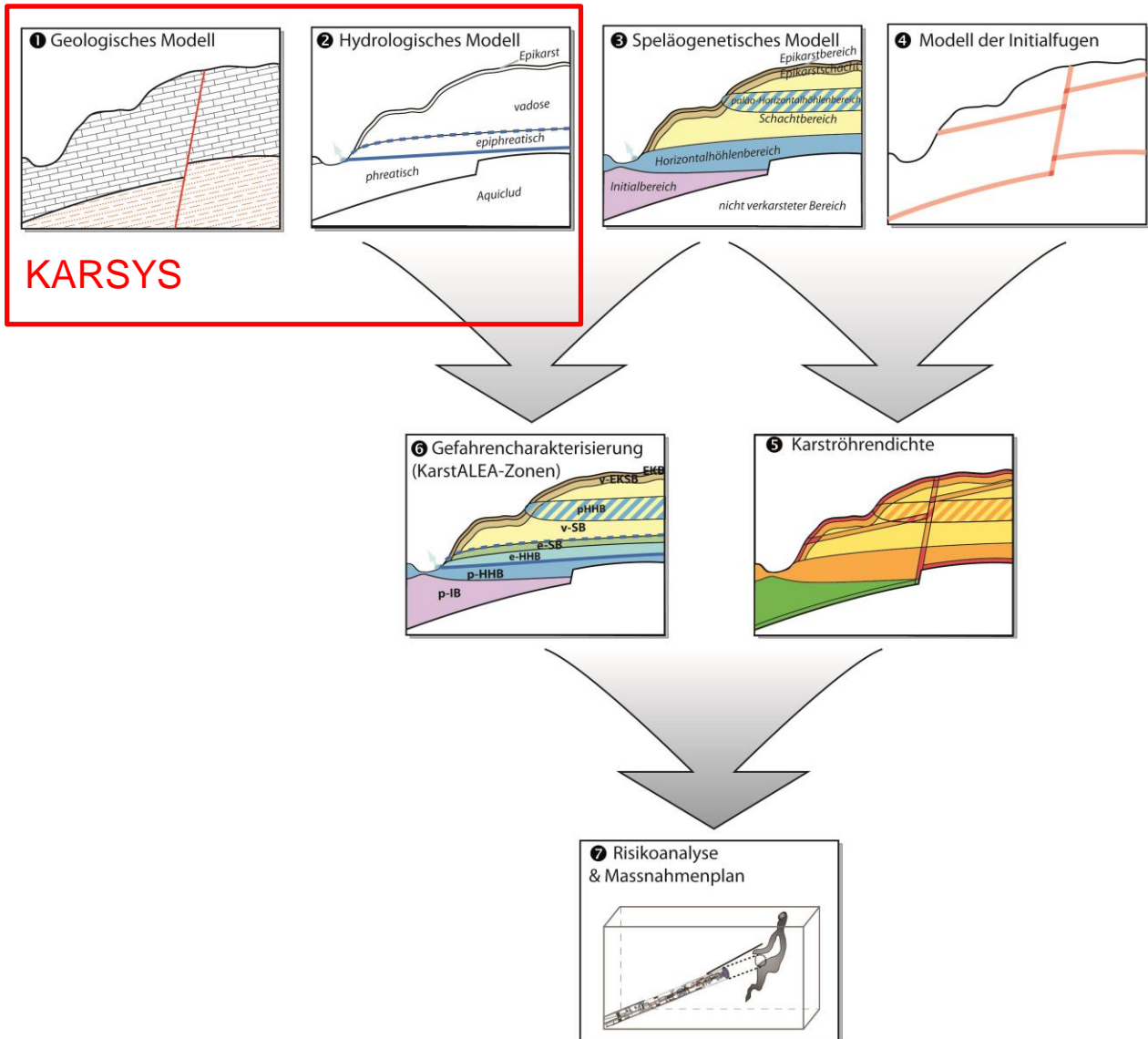
Zusätzlich zur Einschätzung der Wahrscheinlichkeit auf Karströhren zu stossen (Karströhrendichtezone), ermöglicht die KarstALEA-Methode die Hohlräume (Grösse, Form), die potenziell darin enthaltenen Sedimente (Art, Menge) und die Wasserführung des verkarsteten Gebirges zu charakterisieren. Dadurch können die karstbedingten Gefahren beurteilt werden (KarstALEA-Zonen). Basierend auf die Karströhrendichtezone und der Eigenschaften der Karströhren werden die Risiken beurteilt und der Massnahmenplan erstellt.

3. Grundlagen der Methode

Die KarstALEA-Methode basiert auf einer Reihe von allgemeinen Gesetzen, welche die Entstehung der Karströhrensysteme (Speläogenese) und die Zirkulation des Wassers im verkarsteten Gebirge (Hydrogeologie) bestimmen. Die Struktur der KarstALEA-Untersuchungen ist in der Figur 5 zusammengefasst. Die Methode wird auf eine iterative Weise angewendet, wobei während jeder Iteration sieben Arbeitsschritte ausgeführt werden, welche im Kapitel 6 der KarstALEA-Wegleitung beschrieben sind. Im Rahmen der ersten beiden Untersuchungsschritte werden ein geologisches (1) und ein hydrogeologisches (2) Modell des Gebirges erstellt, welche den Modellen gemäss der SIA-Norm 199 ähnlich sind. Diese beiden Modelle sind durch die Anwendung des KARSYS-Ansatzes erhalten. Die Neuheit der KarstALEA-Methode ist die Integration eines speläogenetischen Modells (3) und des Konzeptes der Initialfugen (4. Modell). Die Untersuchung der Geometrie der Höhlensysteme durch Höhlenforscher hat nämlich gezeigt, dass sich die Höhlen mehrheitlich entlang einer beschränkten Anzahl Trennflächen entwickelt haben. Diese Trennflächen sind in der Regel besonders verkarstungsanfällige Schichtfugen oder geringmächtige Schichten, aber auch Verwerfungen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich etwa 70 % der Karströhren entlang von Trennflächen entwickelt haben, die weniger als 10 % des Gebirgsvolumen darstellen. Weiter variiert die Karströhrendichte in Funktion der speläogenetischen Bereiche. So treten sie zum Beispiel in gewissen Höhenlagen gehäuft auf, welche früheren Vorfluterniveaus entsprechen (Paläo-Talböden). Die Eintiefung der Täler im Laufe der Zeit hat zu einer Abfolge von subhorizontalen Karströhrensystemniveaus geführt. Die Wahrscheinlichkeit eine Karströhre anzufahren ist im Schnittbereich der Karströhrenniveaus (3. Modell) und der Initialfugen (4. Modell) am höchsten. Sie ist auch im oberflächennahen Bereich erhöht.

Die Kombination des speläogenetischen Modells mit dem Modell der Initialfugen ermöglicht daher die räumliche Verteilung der Karströhrendichte auf eine probabilistische Weise zu beurteilen (5. Arbeitsschritt). Im 6. Arbeitsschritt werden das 2. (hydrogeologische) und das 3. (speläogenetische) Modell kombiniert, um die Karsthohlräume zu charakterisieren (KarstALEA-Zonen). Diese Informationen (Karströhrendichten und KarstALEA-Zonen) ermöglichen die

Gefahren und Risiken für das Bauwerk zu beurteilen und geeignete Massnahmen vorzuschlagen (7. Arbeitsschritt).



Figur 5. Ablauf der KarstALEA-Untersuchungen in sieben Arbeitsschritten. Vier 3D-Darstellungen des Gebirges (Modelle) werden erstellt (Arbeitsschritte 1 bis 4). Im Rahmen der Arbeitsschritte 5 und 6 werden die Karströhrendichtezonen ausgeschieden und die Karströhren charakterisiert (KarstALEA-Zonen). Im Rahmen des Arbeitsschrittes 7 werden – in Zusammenarbeit mit den planenden Ingenieuren – die Gefahren, Risiken und mögliche Massnahmen diskutiert. Diese sieben Arbeitsschritte werden im Laufe des Planungsfortschrittes iterativ wiederholt, wobei die Genauigkeit der Modelle laufend zunimmt.

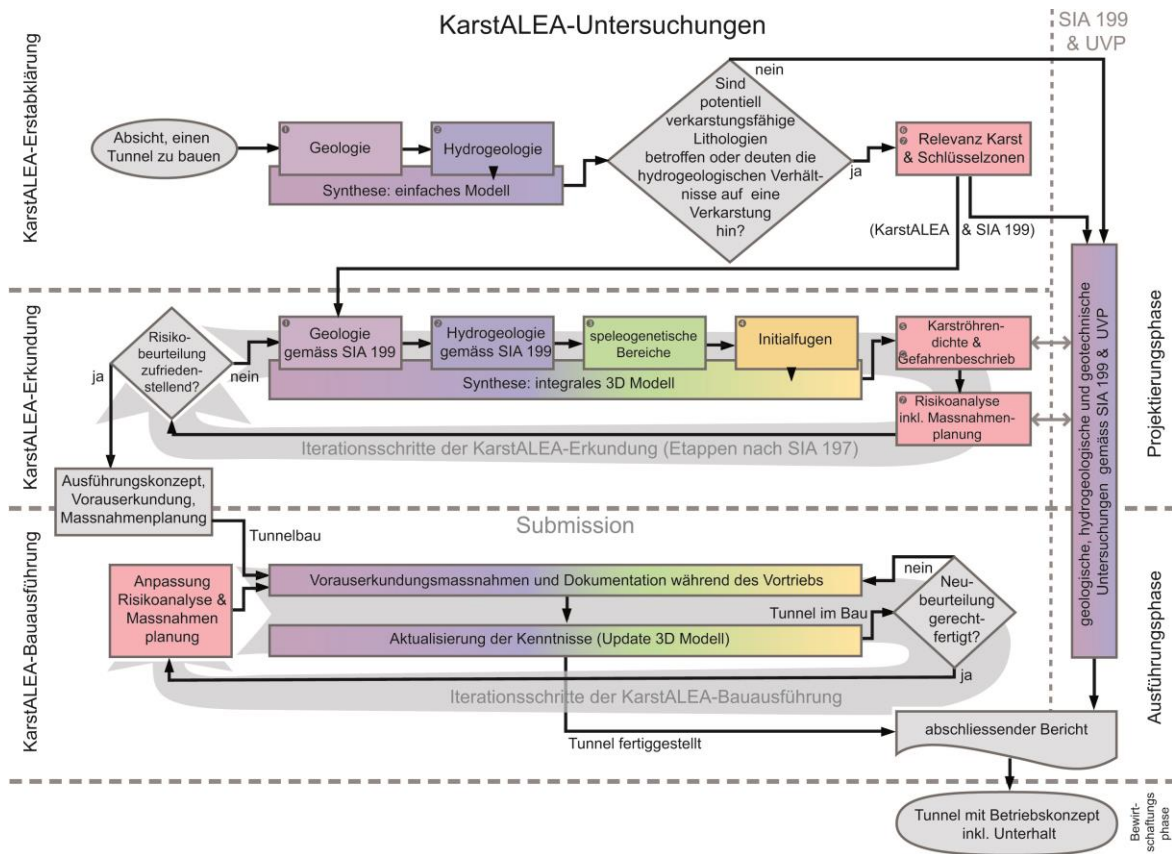
Die nötigen Daten für jede Iteration werden fortlaufend während der Teilphasen gemäss SIA 197 erhoben, um die praktischen Fragenstellungen in den jeweiligen Teilphasen zu beantworten.

Ein Teil der im Rahmen der KarstALEA-Methode verwendeten Konzepte ist Karstspezialisten schon lange bekannt. Die KarstALEA-Wegleitung kombiniert jedoch zum ersten Mal die bestehenden Kenntnisse gezielt, um die karstspezifischen Probleme im Untertagbau zu beurteilen. Die Details betreffend der Anwendung der Methode richten sich an die Tunnelgeologen. Gewisse Kapitel der KarstALEA-Wegleitung (1, 2, 4 und 8) ermöglichen jedoch auch der Bauherrschaft, den Planer und den Bauingenieuren sich einen Überblick über den Anwendungsbereich, die Grundlagen und die Möglichkeiten der Methode für die Realisierung eines Bauvorhabens zu verschaffen. Für die konkrete Ausführung der KarstALEA-

Untersuchungen wurden die Anhänge A1 bis A6 so konzipiert, dass der Geologe sich weitgehend darauf basieren kann, sofern er die Methode und deren Grundlagen ausreichend verstanden hat.

4. Die KarstALEA-Methode und die Phasen eines Projektes

Die KarstALEA-Methode wird in drei Hauptetappen angewendet:



Figur 6. Der Ablauf der KarstALEA-Untersuchungen. Die KarstALEA-Untersuchungen erfolgen in drei Hauptetappen: 1) KarstALEA Erstbeurteilung (Anfang der Vorstudie), 2) KarstALEA Erkundung (Projektierungsphase), 3) KarstALEA Bauausführung (Ausführungsphase).

- 1) Die Untersuchungen der 1. Etappe „KarstALEA Erstbeurteilung“ erfolgen ganz am Anfang der „Vorstudie“ oder während der „strategischen Planung“ (gemäß SIA 197). Dabei wird bestimmt, ob das geplante Bauwerk respektive die verschiedenen Varianten der Linienführung karstbedingte Risiken aufweist oder nicht. Falls mit karstbedingten Risiken gerechnet werden muss, stellt die KarstALEA-Methode eine geeignete Ergänzung der Untersuchungen gemäß SIA 199 dar. Falls karstbedingte Risiken ausgeschlossen werden können, werden die KarstALEA-Untersuchungen mit der „Erstbeurteilung“ abgeschlossen. Die Details betreffend dieser Untersuchungsetappe sind im Kapitel 5 der KarstALEA-Wegleitung beschrieben.
- 2) Die 2. Etappe „KarstALEA Erkundung“ geht mit der „Projektierungsphase“ einher. Im Rahmen der KarstALEA Erkundung werden die nützlichen karstspezifischen Informationen für die Submission des Vorhabens erarbeiten. Sie beinhaltet sieben Bearbeitungsschritte, welche in der Figur 2 illustriert werden und im Kapitel 6 der KarstALEA-Wegleitung detailliert beschrieben sind. Die sieben Arbeitsschritte werden iterativ wiederholt, wobei die Genauigkeit

der Prognose entsprechend der Bedürfnisse der Projektteilphasen des Projektes verbessert wird (Vorstudie, Vorprojekt, Auflagenprojekt, Bauprojekt).

- 3) Die 3. Etappe „KarstALEA Bauausführung“ betrifft die Ausführungsphase. Die Anwendung der KarstALEA-Methode entspricht weitgehend jener der KarstALEA Erkundung. Die verwendeten Daten und die Fragenstellungen ändern jedoch (Daten / Fragenstellungen die aus der Ausführung des Bauvorhabens hervorgehen). Während dieser Etappe werden gegebenenfalls die geplanten Massnahmen an die angetroffenen Verhältnisse und Probleme angepasst. Die KarstALEA-Modelle stellen dann eine wertvolle Entscheidungshilfe dar. Der Schlussbericht der KarstALEA Bauausführung beschreibt u.a. die karstspezifischen Massnahmen für die Bewirtschaftung des Bauwerks.

5. Vorteile der KarstALEA-Methode

Die KarstALEA-Methode führt insbesondere zu einer besseren Beurteilung der karstspezifischen Gefahren und Berücksichtigung der karstspezifischen Schwierigkeiten im Untertagbau (Tabelle 1). Sie liefert auch die grundlegenden Informationen für die Beurteilung und das Management von Auswirkungen des Bauvorhabens auf die Umwelt. Die untenstehende Tabelle fasst die wichtigsten Vorteile der Methode in Funktion der Projektphasen und die verschiedenen Beteiligten zusammen.

	Die wichtigsten Vorteile und Nutzen der KarstALEA-Methode
Grundsätzliches	Wissenschaftlich fundierte, praktisch anwendbare Methode. Geringer zusätzlicher Untersuchungsaufwand gegenüber der üblichen Untersuchungen gemäss SIA 199.
Projektierung	Differenzierte und phasengerechte Beurteilung der karstspezifischen Gefahren. Ermöglicht einen vorausschauenden, ganzheitlichen, wirtschaftlichen und nachhaltigen Umgang mit den karstspezifischen Gefahren. Hilft bei der Wahl der optimalen Linienführung (durch die Unterteilung des Gebirges in verschiedene Karströhrendichte-Zonen). Ermöglicht die Ausarbeitung eines angepassten Vorauserkundungskonzeptes und Massnahmenplans (durch die Unterteilung der Linienführung in KarstALEA-Zonen). Kann im Rahmen der Arbeiten gemäss SIA 199 ausgeführt werden.
Ausführung	Bautechnische und Vorauserkundungsmassnahmen können besser den Verhältnissen angepasst werden.
Bewirtschaftung	Karstspezifische Gefahren für den Betrieb sind besser bekannt und lokalisiert. Hilft bei der Ausarbeitung des Betriebskonzeptes.
Bauherrschaft	Bessere Planung unter Einhaltung der Termine und Kosten.
Planer & Unternehmer	Erhält eine differenziertere Beschreibung der anzutreffenden Verhältnisse im Karst.
Geologe	Verfügt über eine zielgerichtete Untersuchungsmethode für die Vorhersage von karstspezifischen Gefahren.
Kontrollbehörde	Kann Umweltauswirkungen eines Untertagbauprojektes gezielter überwachen.
Umwelt	Verringerung negativer Einwirkungen auf die Umwelt. Liefert wertvolle Hinweise für den Bereich Wasser der UVP (ersetzt diese aber nicht!).

Tabelle 1. Die wichtigsten Vorteile und Nutzen der KarstALEA-Methode

6. Referenzen

Filipponi M, Schmassmann S, Jeannin PY, Parriaux A (2012): KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau. Bundesamt für Strassen ASTRA. 200 S.

Filipponi M, Jeannin PY, Tacher L (2009): Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology* 106, 86-99.

Jeannin PY, Malard A, Rickerl D (2012): Assessing karst-hydraulic hazards in tunneling – the Brunnmühle spring system – Bernese Jura, Switzerland. *Environmental Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s12665-015-4655-5.

Jeannin PY., Eichenberger U., Sinreich M., Vouillamoz J., Malard a. & Weber E. (2013): KARSYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Assessment of groundwater reserves and resources in Switzerland. *Environmental Earth Sciences* 69(3): 999-1013.

Malard A., Jeannin PY., Vouillamoz J. & Weber E. (2015): An integrated approach for catchment delineation and conduit-network modeling in karst aquifers: application to a site in the Swiss tabular Jura. *Hydrogeology Journal* DOI: 10.1007/s10040-015-1287-5.

Malard A, Jeannin PY (2013): Swisskarst: aquifères karstiques de Suisse. Une approche pour une meilleure gestion et exploitation des eaux souterraines karstiques. *Aqua & Gas* 7/8: 22-27.

Malard A. & Jeannin PY. (2013): Characterisation of karst aquifers in Switzerland: the KARSYS approach. *European Geologist* 35: 59-63.

Updated list on <http://swisskarst.ch/index.php/fr/actualites/media-et-publication>

**Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick
auf Karstphänomene**

Anhang 2

**Hinweise zur Verkarstung des
Muschelkalkes und deren
potenziellen Konsequenzen für die
Standortauswahl der NAGRA**

Autor: Pierre-Yves Jeannin

Korreferat : Beat Rick (Büro von Moos)

Hinweise zur Verkarstung des Muschelkalkes und deren potenziellen Konsequenzen für die Standortauswahl der NAGRA

1. Einführung

In den NAGRA-Berichten zu SGT Etappe 2 wird der Muschelkalk als Haupt-Aquifer erkannt (steht explizit im Dossier V), und dabei wird überall angenommen, dass der Muschelkalk nur marginal verkarstet ist. Zum Beispiel in Fig. 5.1, wo der Muschelkalk als „Regionaler Kluftwasser-Aquifer (lokal auch Karst)“ bezeichnet ist, bedeutet die Klammer „(lokal auch Karst)“ eigentlich: „nur in der Nähe von Muschelkalk Aufschlüssen“ (siehe S. 53 §2 oder Seite 22 NAB 13-063). In anderen Worten ist es a priori ausgeschlossen, dass der Muschelkalk in der Tiefe verkarstet ist.

Diese Prämisse bzw. grundsätzliche Annahme einer Nicht-Verkarstung des Muschelkalk ist nicht belegt. Ganz im Gegenteil dazu finden sich in der Literatur (z.B. Stober 2013) klare Hinweise, dass der Muschelkalk regional und tief von einer hypogenen Verkarstung geprägt ist.

Aus diesem Grund werden hier explizit die Argumente, die auf diese Verkarstung hinweisen, zusammengefasst. Zusätzlich soll kurz skizziert werden, was sich für potenzielle Probleme für ein Lager stellen und welche weiteren Untersuchungen durchgeführt werden können, um diese Frage besser beantworten zu können.

2. Argumente die auf eine regionale und tiefe Verkarstung des Muschelkalks hinweisen

Theoretische Gedanken

Die Lösungskinetik von Kalzit ist bis etwa 80-90% der Sättigung linear. In diesem Bereich ist die Lösungsrate proportional zum Sättigungsdefizit. Bei höheren Sättigungswerten ist die Lösung stark verlangsamt (e.g. Dreybrodt 1990). Dies hat zur Folge, dass Wässer im Karst sehr weit in den Klüften und Röhren strömen können ohne gesättigt zu werden. Mit viel Zeit können diese Wässer entsprechend lange Röhren bilden.

Eine weitere Charakteristik der Kalklösung ist die sogenannte „Mischungskorrosion“. Thermodynamisch produziert die Mischung von zwei gesättigten Wässern eine untergesättigte Mischung (Bögli 1964 und Dreybrodt & Eisenlohr 2000).

Aus diesen beiden Tatsachen kann angenommen werden, dass nach einer gewissen Zeit, strömendes Wasser durch einen Kalkaquifer immer zu einem gewissen Grad zu Verkarstung führen wird. Da der Muschelkalk als Aquifer erkannt ist, kann angenommen werden, dass Grundwasser zirkuliert. Die Frage ist deshalb, seit wann dies der Fall ist.

Durchlässigkeitsmessungen

Die K-Werte, die in den NAGRA-Berichten vorgestellt werden (Abb. 1), zeigen klar, dass die Durchlässigkeit des Muschelkalks einerseits selten sehr klein ist, andererseits mit der Tiefe wenig abnimmt. Zum grossen Teil analysiert Stober 2013 die gleichen Messwerte wie die NAGRA. Die Abbildung 4 von Stober (2013), die weiter unten folgt (Abb. 2), zeigt ziemlich klar, dass die Durchlässigkeit des Muschelkalkes mit der Tiefe wenig abnimmt und Werte grösser als 10^{-7} m/s bis zu einer Tiefe von 1500 m unter dem Boden zeigt. Diese Werte sind deutlich grösser als Werte in Klufftaquiferen (z.B. Kristallin des Schwarzwald) wo die Mehrheit der gemessenen Werte bis in eine Tiefe von 1500 m unterhalb 10^{-8} m/s liegt, und alle unterhalb 10^{-6} m/s. Höhere K-Werte sind sehr wahrscheinlich durch Verkarstung verursacht, die sich anscheinend bis in eine Tiefe von etwa 1500 m bemerkbar macht (Abb. 1 & 2).

Stober (2013) schreibt: "In Tiefen oberhalb von etwa 600 m fallen die Durchlässigkeiten im Oberjura deutlich grösser aus als im oberen Muschelkalk. Unterhalb von etwa 1700 m u. Gel. ist die Gebirgsdurchlässigkeit im oberen Muschelkalk-Aquifer wesentlich höher als im Oberjura-Aquifer." Weiter schreibt sie: « Der obere Muschelkalk weist demnach auch noch in grösseren Tiefen (< 2.800 m u.Gel.) Hohlräume auf. So konnten nicht nur Haarrisse, Kluftrisse, Porositäten beobachtet werden, sondern auch grössere offene Klüfte und selbst Kavernen. Der obere Muschelkalk dürfte demnach bis in grössere Tiefen verkarstet sein. Eine Abnahme der Häufigkeit der verschiedenen Hohlraumtypen mit zunehmender Tiefe war für den oberen Muschelkalk nicht feststellbar. Diese Untersuchungsergebnisse passen zu den Ergebnissen der hydraulischen Tests, die nur eine vergleichsweise geringe Abnahme der Gebirgsdurchlässigkeit mit zunehmender Tiefe andeuten (Abb. 4)."

Diese Aussagen weisen klar auf eine Verkarstung (wahrscheinlich von hypogenem Typ) des Muschelkalks hin.

N.B. 1: Für Stober 2013 ist der Malm-Kalk bis zu einer Tiefe von etwa 800 bis 2000 m explizit noch verkarstet, wie es die K-Werte $> 10^{-6}$ m/s zeigen.

N.B. 2: Die K-Messwerte wurden von den Experten der SSKA weiter im Detail analysiert. Die Folgerung dieser Analyse passt mit den Ergebnissen von Stober (2013) sehr gut zusammen. Die Folgerung ist, dass man mit einer Verkarstung des Malms bis in einer Tiefe von 800-1000 m rechnen muss und dass der Muschelkalk sehr wahrscheinlich bei grösseren Tiefen (etwa 1500 m unter dem Boden) verkarstet ist.

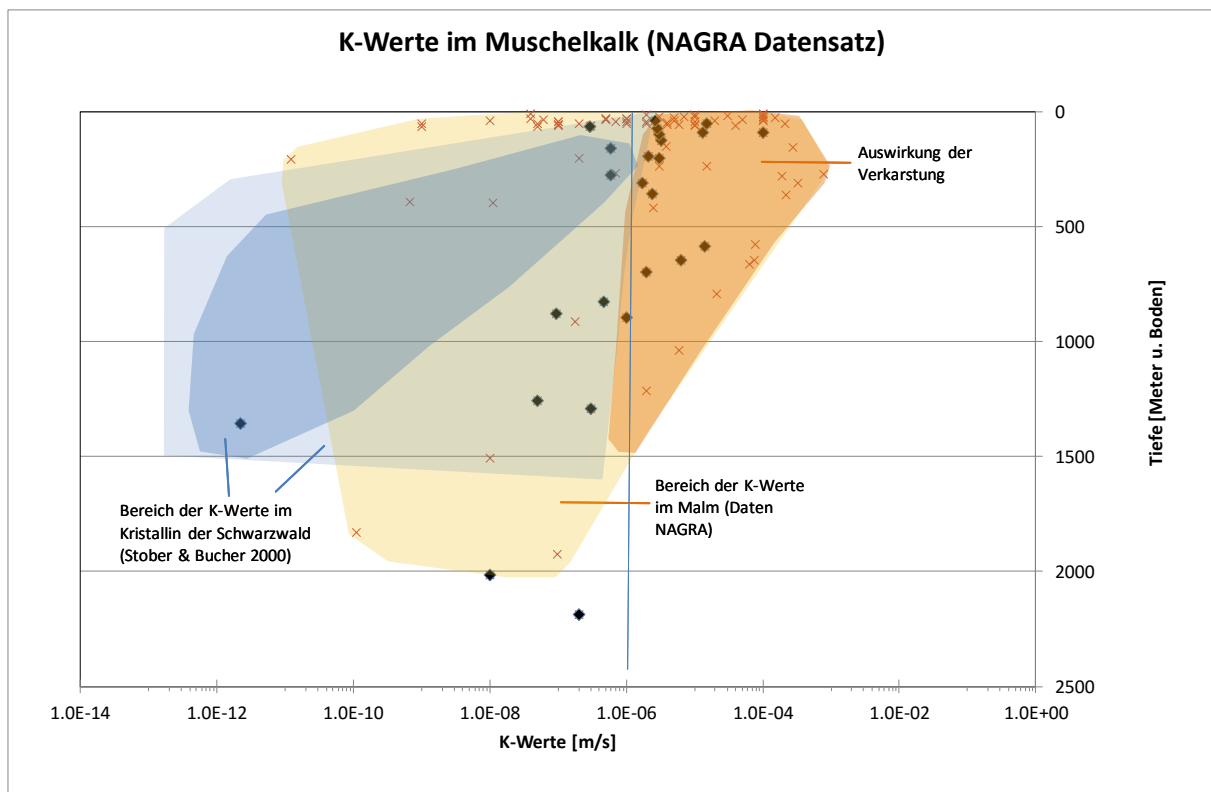


Abb. 1: K-Werte im Muschelkalk (schwarz) aus der NAGRA-Datensatz und Vergleich mit K-Werten im Malm (orange) und im Kristallin des Schwarzwaldes (blauer Bereich). Im Kristallin sind keine Werte über 10^{-6} m/s gemessen worden. Höhere K-Werte sind sehr vermutlich an Verkarstung verbunden (aus Stober 2013).

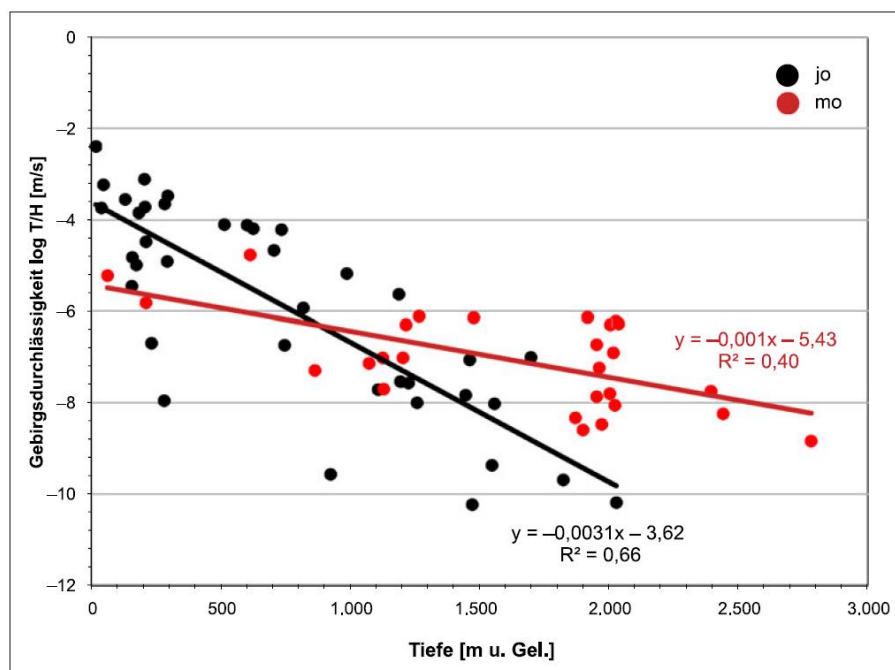


Abb. 2: Gebirgsdurchlässigkeit (T/H) des oberen Muschelkalk- (mo) und Oberjura-Aquifers (jo) in Abhängigkeit von der Tiefenlage (aus Stober 2013).

Regionale Druckhöhen und Fliesssysteme

Die Karte der Druckhöhen (Potenzial) im Muschelkalk-Aquifer (Abb. 3 und 4) zeigt eine klare Depression im Aquifer, die sich vom Bodensee nach Nord-Osten, und dann nach Norden unter die Schwäbischen Alb nach Bad-Cannstatt erstreckt.

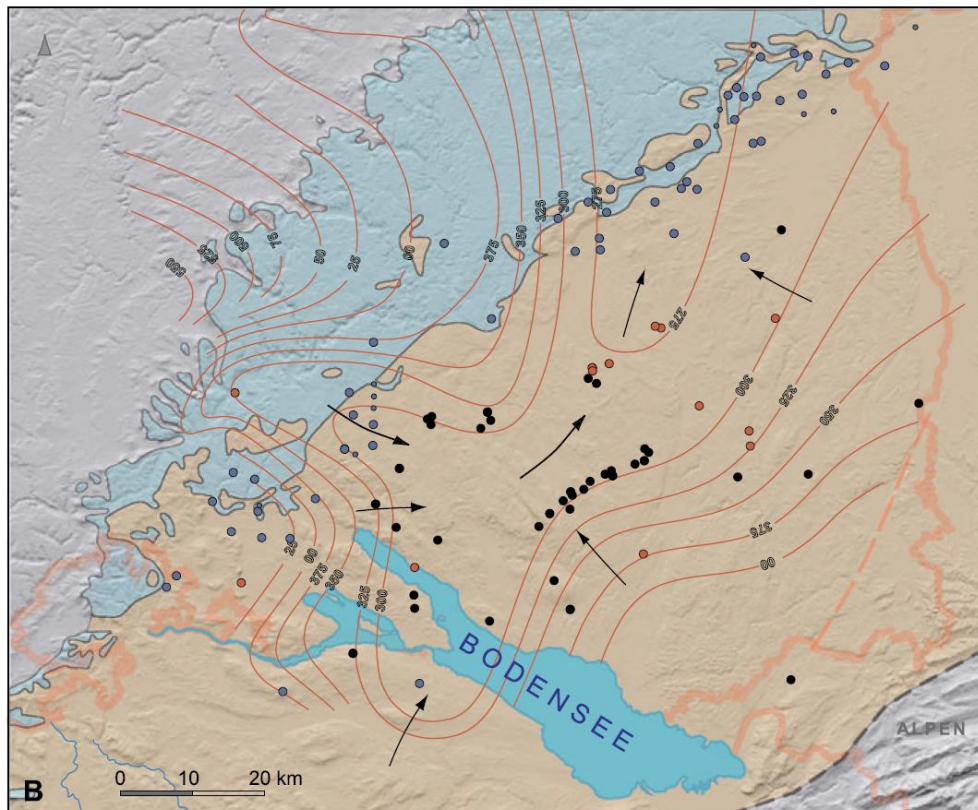


Abb. 3: Potenzial-Karte interpretiert aus Potenzial-Werten, die im Muschelkalk in Süd-Deutschland gemessen wurden (aus Stober 2013).

Die Autorin (Stober 2013) schreibt dazu: „Das geringe Längsgefälle der Potenzialdepression lässt auf nahezu stagnierende Wässer eventuell sogar auf ein Versickern über Störungssysteme letztlich ins Kristalline Grundgebirge schließen.“ Diese Aussage ist diskutabel: Die Autorin schreibt explizit, dass der Muschelkalk eine ziemlich hohe Durchlässigkeit aufweist. Im Allgemeinen kann ein flacher Gradient entweder mit einer hohen Durchlässigkeit oder mit einer geringen Strömung in Verbindung begrachtet werden.. Es ist in diesem Fall klar, dass die Grundwasserneubildung klein ist (keine direkte Aufschlussfläche). Es ist auch klar, dass die Durchlässigkeit nicht sehr klein ist, sogar eher hoch. Die ganze Schüttung der Bad Cannstatt Quellen liegt bei etwa 500 L/s (Ufrecht & Einsele 1993). Wenn etwa 50 L/s aus dem Bodenseegebiet stammen und in Karströhren zirkulieren, genügt eine Röhre mit einem mittleren Querschnitt von etwa 1.0 m² oder eine Serie von kleineren Röhren mit einem gesamten Querschnitt von 10 m², um die beobachteten Gradienten (etwa 1/1000) zu erklären. Eine hypogene Verkarstung spricht eher für viele Röhren. Es kann entsprechend behauptet werden, dass das „Tal“ der Potentiale ein Drainage-System des Muschelkalkes darstellt. Dieses Tal liegt ziemlich nah oberhalb des vermuteten Permo-Karbon Trogs, der sich ausgehend vom Norschweizer Permokarbondrog (Abb. 5) nach NE erstreckt und durch die Zone mit geothermaler Aktivität von Bad Urach verläuft. Diese Elemente passen mit einer hypogenen Verkarstung des Muschelkalkes sehr gut zusammen.

Ohne Drainage und mit einer sehr kleinen Neubildung im Muschelkalk sollte die Schwelle zwischen dem Nordsystem (Bad-Cannstatt) und dem Süd-West-System (Rhein) deutlich weiter

im Norden liegen. In der Abbildung 4 erhält man wirklich das Gefühl, dass das Nordsystem Wasser aus dem Süd-West-System zieht.

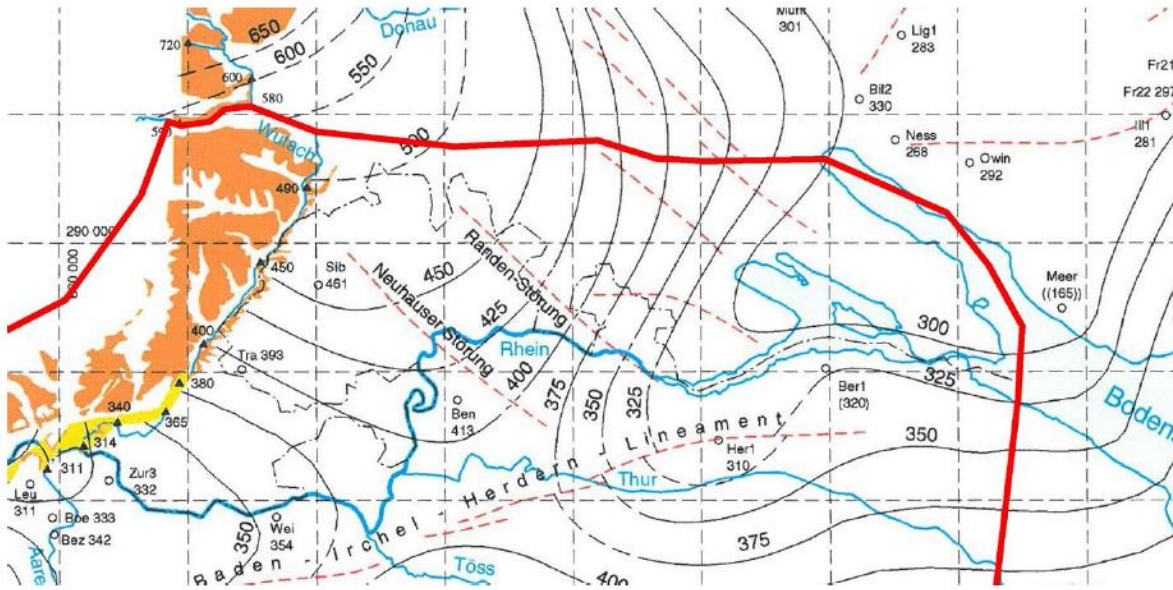
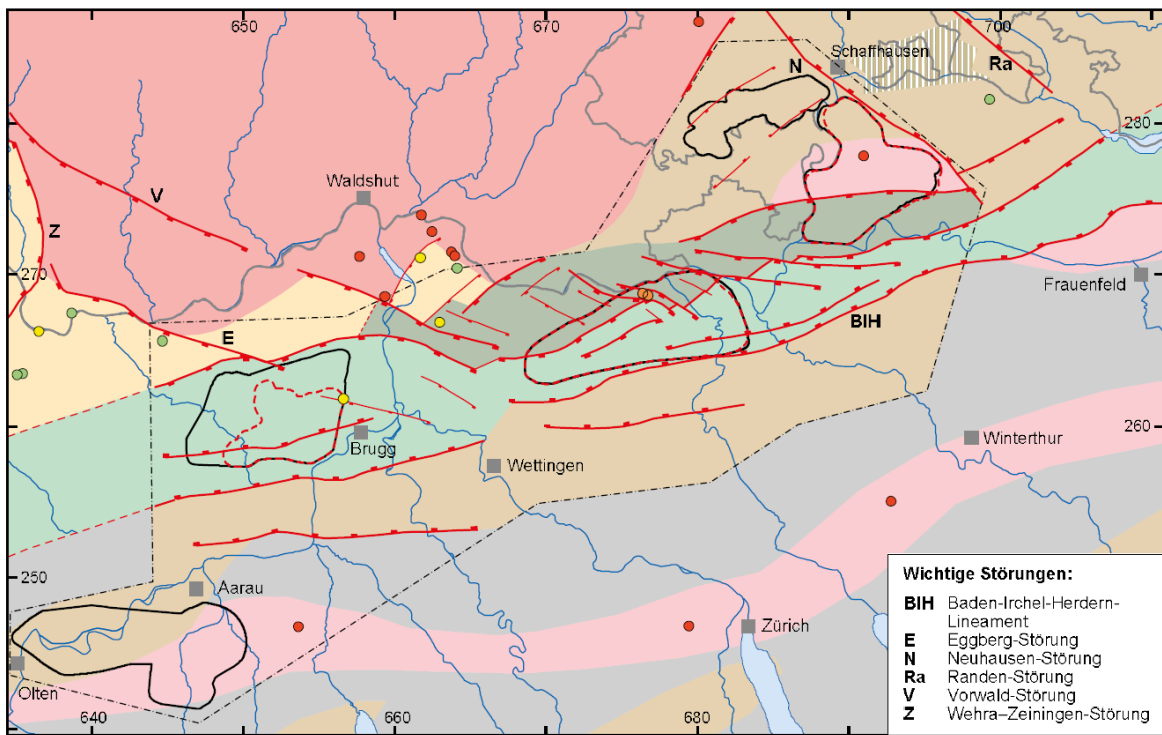


Abb. 4: Potenzial-Karte der Muschelkalk-Aquifere in der Nordschweiz und Süd-Deutschland (aus Klemenz et al. 2000).



Geologische Standortgebiete für Tiefenlager

HAA-Gebiet SMA-Gebiet
 Bearbeitungsperimeter Naef & Madritsch 2014

Borungen
 ● Kristallin
 ● Perm
 ● Perm + Kristallin
 ● Perm + Karbon

Strukturen
 — Hauptstruktur / Masterfault
 - - - Nebenstrukturen
 - - - Bruch vermutet

Geologie der Sockeloberfläche

Nordschweizer Permokarbontrug
 Zentraler Permokarbontrug
 Trograndzone Nord
 Trogschulter Nord

Weiteres Gebiet Nordschweiz

Schaffhausen-Trog (Marchant et al. 2005)
 Weitere Permokarbon-Vorkommen vermutet
 Sockel undifferenziert, Permokarbon möglich
 Kristallin-Hoch erboht / vermutet
 Kristallin im Aufschluss

Abb. 5: Geologie der Sockeloberfläche (aus NTB 14-02, Dossier II, Abb. 4.3-7).

Hydrochemie

Im Kapitel 8.1.1. von NAB 13-063 sind „Oberflächennahe Wässer beschrieben, die in vielen Fällen eher hohe SO₄ Gehalte aufweisen, sowie hohe Tritium-Gehalte“. Viele haben eine hohe Temperatur. Dies spricht für eine relativ tiefe und schnelle Grundwasserströmung. Dazu ist Sulfat ein typisches Ion von hypogenen Karst-Wässern, wegen der potentiellen Reaktion mit H₂S aus der Tiefe.

Der Cl- Gehalt steigt vor allem unterhalb einer Tiefe von 1500 m (Abb. 8.5 von NAB 13-063).

In Weiach und Benken wurden Spuren von Methan und reduzierende Redox-Verhältnisse beobachtet. Dies ist auch in anderen Bohrungen belegt.

Diese Charakteristiken passen mit einer potenziellen hypogenen Verkarstung gut zusammen.

Die abgeschätzten Verweilzeiten von 5 bis 15 Jahrtausenden sind mit einer hypogenen Verkarstung eventuell denkbar. Diese Werte passen aber schlecht mit den abgeschätzten Durchlässigkeitswerten und mit den angegebenen Gradienten zusammen. Die Gradienten, Durchlässigkeitswerte, Verweilzeiten, Fliessgeschwindigkeiten und Porositätswerte, die in den NAGRA Berichten angegeben sind, sind nicht unbedingt miteinander konsistent. Eine Diskussion dieser Punkte fehlt; dieser Aspekt sollte weiter untersucht werden.

3. Potenzielle Probleme für ein Lager

Wasserzirkulationen

Der flache Gradient von Stuttgart bis zum Bodensee und die (zu belegende) Schwelle in den Umgebungen von Irchel lässt eine Anzapfung des Rheines durch den Neckar vermuten. Dies sollte überprüft werden und die Geschwindigkeit dieses Prozess sollte besser abgeschätzt werden. Dies könnte die Grundwasserzirkulationen unterhalb des Lagers im Lauf der Sicherheitsdauer verändern.

Hypogene Hohlräume weisen oft sehr unterschiedliche Grössen auf. Sie können, im Gegenteil zu epigenen Karströhren, über eine kurze Strecke von klein bis gross werden. Entsprechend kann eine ziemlich hohe Durchlässigkeit einer relativ niedrigen Fliessgeschwindigkeit entsprechen. Hohlräume von mehreren Millionen von m³ wurden auch bei grosser Tiefe gefunden (Dublyansky 2000).

Hydrochemische und isotopische Daten belegen eigentlich die Tatsache, dass Wasser durch den Muschelkalk strömt. Entsprechend muss davon ausgegangen werden, dass die Verweilzeiten im Muschelkalk relativ kurz sind im Vergleich mit der „Sicherheitsdauer“ der Standorte. Dazu ist eine Verstärkung der Verkarstung während der „Sicherheitsdauer“ zu vermuten. Wie schnell? und wie stark? Dies sollte in Zusammenhang mit Szenarien der Langzeitgeschichte noch abgeschätzt werden.

Da der Keuper zwischen dem Muschelkalk und dem Arietenkalk mechanisch schwach ist, kann gar nicht ausgeschlossen werden, dass diese Kalk-Bank auch eine hypogene Verkarstung aufweist und Wasser mit dem Muschelkalk austauscht. Die Wahrscheinlichkeit dieser Situation sollte noch näher abgeschätzt werden.

Die Beziehungen zwischen den bekannten thermalen Quellen und dieser tiefen hypogenen Verkarstung des Muschelkalkes sollten noch weiter geklärt werden. Dazu sollten mögliche Hinweise auf eine hypogene Verkarstung des Malms oder des Hauptrogensteins untersucht und geklärt werden. Diese würden Indikationen über „Cross-Formation Flow“ bringen.

Wie weit von den Bruchzonen in den ungestörten „Blöcken“ sich die hypogene Verkarstung erweitern kann, bleibt aktuell noch völlig unklar.

Geotechnische Gefährdungen

Die potenzielle Existenz von grossen Hohlräumen im Muschelkalk bringt eine gewisse Wahrscheinlichkeit mit sich, dass „Fontis“ durch den Keuper bis zum Opalinuston hinaufsteigen können. „Collapse features“ sind in vielen hydrothermalen Karstgebieten bekannt (Dublyansky 2000b). Diese Gefährdung ist vermutlich nicht sehr gross, sollte aber trotzdem abgeschätzt werden. Theoretische geomechanische Modelle sollten eine Plausibilität zu evaluieren erlauben.

Falls nötig, sollten während der Bauphase geophysikalische Untersuchungen im Nahbereich des Lagers geplant werden.

4. Vorschläge

Um die Wahrscheinlichkeit von grossen Hohlräumen im Muschelkalk abschätzen zu können, sollte unser Verständnis der Verkarstung verfeinert werden.

Die hydrogeologischen Kenntnisse des Muschelkalkaquifers sollten in grossem Massstab mit genügenden Details zusammengefasst werden. Beim heutigen Untersuchungsstand fehlt eine klare Vorstellung der Verteilung aller bestehenden Daten im Raum, deren Variabilität im Raum und deren verbundenen Unsicherheiten. Dazu fehlt ein synthetisches Konzeptbild, das die jeweiligen Daten konsistent integriert.

Das konzeptuelle Modell soll das ganze Gebiet zwischen den Alpen und Stuttgart, eventuell sogar weiter im Norden, abdecken. Sehr wichtig ist es, alle potenziellen oder belegten Ausflussgebiete zu identifizieren, sowie alle potenziellen Neubildungszonen. Eine wichtige Frage ist, ob die Neubildung im Gebiet von Interesse hauptsächlich aus „leakage“ von den gut verkarsteten Systemen des Muschelkalkes selber stammt, oder ob sie eventuell durch Drainage von tiefer oder höher liegenden Gesteinen herkommt. Diese Studie sollte mindestens folgende Untersuchungen enthalten:

- 1) eine komplette 3D-Darstellung des Muschelkalk-Aquifers
- 2) eine komplette Beschreibung der gut verkarsteten Systeme des Muschelkalkes in der Nähe von Aufschlüssen
- 3) einige gezielte Strömungsmodelle
- 4) eine echte und kritische Diskussion der Druckhöhen-Werte, sowie der Durchlässigkeits-Werte

Aus 1) bis 4) soll eine explizite 3D-Darstellung der vermuteten Neubildungs-, Abfluss-Zonen resultieren, sowie eine konkrete Skizze der vermuteten Hauptfliesswege („hydraulisches konzeptuelles Modell“).

- 5) eine echte und kritische Diskussion aller hydrochemischen und Isotopen-Werte. Die Interpretation dieser Werte soll mit dem hydraulischen konzeptuellen Modell verglichen werden. Möglicherweise muss dieses angepasst werden, damit alle Daten völlig konsistent interpretiert werden können.

Dies wäre eine schöne Dissertationsarbeit, die z.B. in engem Zusammenhang mit der Gruppe Stober und der Gruppe der SSKA durchgeführt werden könnte.

Karst ist ein Hauptthema in dieser Studie, weil der Muschelkalk in der Nähe von Aufschlusszonen gut verkarstet ist, andererseits, weil vermutet wird, dass er in der Tiefe hypogen verkarstet ist. Um diese hypogene Verkarstung richtig interpretieren zu können, sollten ein paar Spezialisten involviert werden.

5. Referenzen

- Bögli A. (1964): Mischungskorrosion; Ein Beitrag zum Verkarstungsproblem. – *Erdkunde*, vol. 18, 83-92.
- Dreybrodt W. & Eisenlohr L. (2000): Limestone dissolution rates in karst environments. – In: *Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (editors): Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, NSS publisher, 136-148.*
- Dreybrodt W. (1990): The role of dissolution kinetics in the development of karst aquifers in limestone: A model of simulation of karst evolution. – *J. of Geology*, vol. 98, 639-655.
- Dreybrodt W. (2000): Equilibrium chemistry of karst water in limestone terranes. – In: *Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (editors): Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, NSS publisher, 126-135.*
- Dublyansky V. N. (2000a): A Giant hydrothermal cavity in the Rhodope Mountains, Bulgaria. – In: *Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (editors): Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, NSS publisher, 313-318.*
- Dublyansky Y. V. (2000b): Hydrothermal Speleogenesis – its setting and peculiar features. – In: *Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N. & Dreybrodt W. (editors): Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers, NSS publisher, 292-297.*
- Klemenz, W., Blaser, P. & Küpfer, T. (2000): Hydrogeologie des Gebietes Lägern – Zürcher Weinland. – *Unpubl. Nagra Interner Bericht. Nagra, Wettingen.*
- NAGRA (2015): 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.*
- Stober I. (2013): Die thermalen Karbonat-Aquifere Oberjura und Oberer Muschelkalk im Südwestdeutschen Alpenvorland. – *Grundwasser, Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 18, 259–269.
- Ufrecht W., Einsele G. (1993): Das Mineral- und Heilwasser von Stuttgart, Beiträge zur Geologie, Geohydraulik, Isotopenhydrologie und Hydrochemie des Systems. – *Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 2/1994, 1-182.*
- Waber H. D., Heidinger M., Lorenz G., Traber D. (2014): Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland. – *NAGRA Arbeitsbericht NAB 13-063.*

**Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick
auf Karstphänomene**

Anhang 3

**Eozäne Situation der Nordwestschweiz aus
palaeogeographischer Sicht mit Hinblick auf
den „Eozänen Karst“**

*Autoren
Pierre-Yves Jeannin
Urs Eichenberger
Arnauld Malard
Beat Rick*

Eozäne Situation der Nordwestschweiz aus paleogeographischer Sicht mit Hinblick auf den „Eozänen Karst“

1. Einführung

Als „Eozäner Karst“ bezeichnet man Karst-Erscheinungen, die sich zwischen dem Malm und dem Oligozän (USM) bis eventuell das Miozän (OSM) entwickelt haben.

Diese Notiz fasst einige Kenntnisse über die Verkarstung während dieser Zeitperiode zusammen.

In der lokalen Literatur wurden hauptsächlich Erläuterungen zum geologischen Atlas der Schweiz (Tabelle 1) angeschaut. Ausserdem haben die Experten eine Reihe von allgemeinen Referenzen, vor allem Trümpy 1990, Ziegler 1990, Kuhlemann und Kempf 2002, Berger *et al.* 2005, Kominz 2001, Miller *et al.* 1998, Nicod 1990 ausgewertet.

2. Überblick

Die unterstehende Figur 1 fasst diese Daten grob zusammen. Sie dient als Ergänzung zur Figur 1.3-2 von Bericht NTB 14-02, Dossier II der NAGRA.

Die Sedimentlücke fängt je nach Gebiet in den Dogger Sedimenten (>150 Ma) oder in der oberen Kreide (<90 Ma) an, und hört mit den Molasse-Ablagerungen (Oligozän, ca. 35 Ma) auf. Während dem Alpenaufbau lagern sich die Sedimente der Molasse ab. USM und OSM sind oberhalb des Meeresspiegels abgelagert worden. Sedimente der UMM und OSM sind nicht tief unter Meeresniveau abgelagert worden. Eine Verkarstung bis im späten Miozän ist entsprechend möglich.

Die Verkarstung führte zu einer Erosion der abgelagerten Kalke. Vermutlich fing die Verkarstung ungefähr bei 100 Ma (mitten in der Kreide) an, anscheinend etwas früher im Osten, wo Kreide-Sedimente komplett fehlen, und später im Westen.

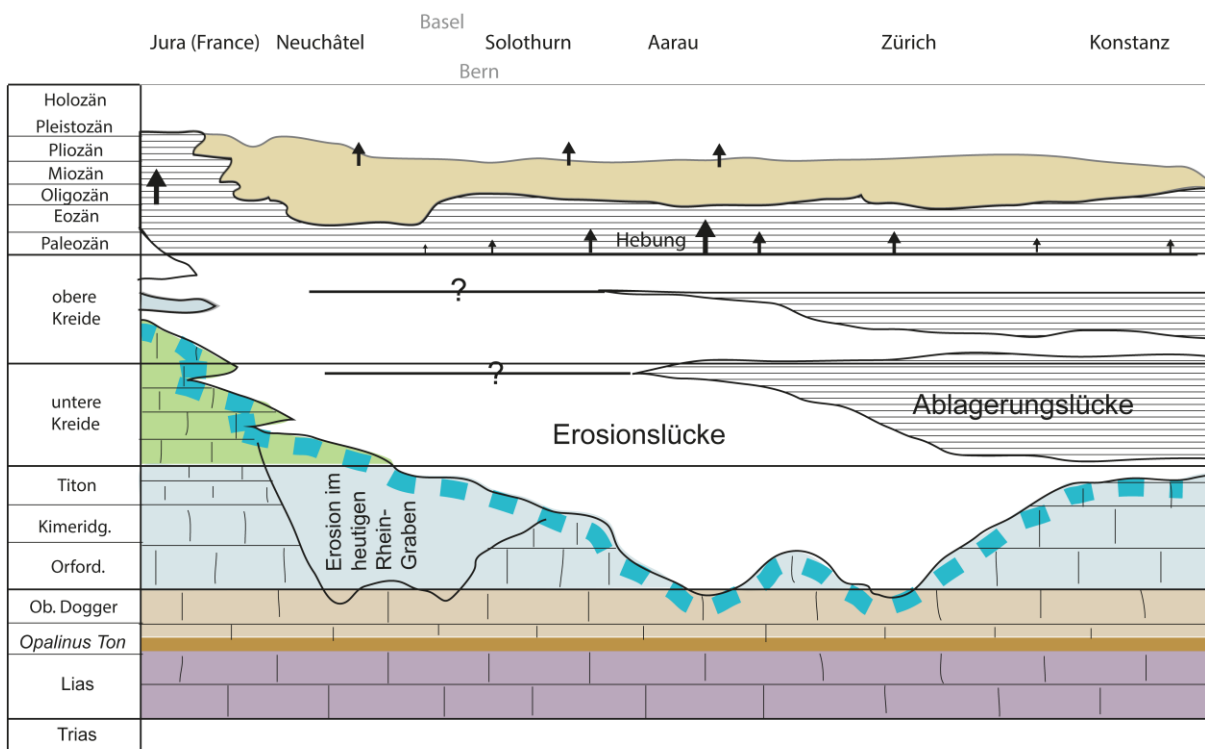
Zwischen ca. 100 Ma und 35 Ma entwickelte sich die Verkarstung unter meeresnahen und tropischen Flachland-Bedingungen (typischer „Coastal karst“). Im Laufe der Zeit (ca. 65 Ma) haben sich diese Bedingungen wahrscheinlich verändert. Es handelt sich um eine Paläolandfläche mit Mulden, alten Sedimenten (Lösungsrückstände = Boluston, Bohnerz), aufgefüllten Klüften und aufgefüllten Höhlen. Die Verkarstung hörte mit der Ablagerung der Molasse nicht auf, sondern wurde möglicherweise nach Norden verlegt. Die Molasse hat frühere Klüfte und Hohlräume zum grossen Teil aufgefüllt. Die Schwankungen des Meeresspiegels können zu einer gewissen Reaktivierung der Verkarstung geführt haben.

Ziegler 1990 im “Geologic Atlas of Western and Central Europe“ skizziert die paleogeographische Entwicklung: In Encl. 31 bis 36 beschreibt er die Entwicklung der späten Kreide und des frühen Tertiärs. Zitierte Quellen für diese Karten sind: Aren 1964, Méguin 1980b, Vinken 1988, Gwinner 1971, Tröger 1964, Czaszar *et al.* 1986, Conort 1986, Hinsch and Ortlan 1974, Krutsch and Lotsch 1958, Ksiaskieicz 1960, Pozaryska 1978.

Die Entwicklung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Anhang 3 : Eozäne Situation der Nordwestschweiz aus palaeogeographischer Sicht mit Hinblick auf den „Eozänen Karst“

- Während in der obersten Kreide nochmals der ganze Shelf mit Flachwasserkalken bedeckt wird, hebt sich im Paleozän die Hochzone der Burgunderschwelle und ein besonders markanter Rücken erstreckt sich zwischen dem Schwarzwald und dem Aarmassiv (Encl. 31, 32 und 33:). Vulkanite im zukünftigen Rheingraben.
- Eozäne Hebung und Erosion mit evaporitisch-klastischen Sedimentansammlungen nur im Bresse- und Rheingraben und ihrer Verbindung (Encl.34). Die südliche Extension des Rheingrabens zeichnet sich ab (Raurachische Senke). Sedimente in der alpinen Vortiefe sind auf den Bereich der heutigen Alpen beschränkt.
- Die oligozäne Verbreitung der Sedimente wird durch die Extensionstektonik bestimmt, welche die Grabensysteme (Bresse, Laufen, Rhein) weiter öffnet und die Massive der Vogesen und des Schwarzwaldes definiert (Encl. 35). Die Eozän-Oligozäne Grabenanlage beschränkt sich auf den Bereich westlich des Meridians 620'000 (+- durch Bern verlaufend). Ihr Ostrand wird durch Extensionsbrüche in NNW-SSE Richtung gebildet.
- Miozäne Heraushebung der Vogesen und des Schwarzwaldes (Encl. 36). Klastisch, marine (in raurachischer Senke und im Rheingraben) und kontinentale Sedimente von den Alpen bis an den Rhein.



Figur 1: Skizze der Ablagerungen im Lauf der geologischen Zeiten dem Jura entlang. Die Lücke zwischen den blau und grün dargestellten Ablagerungen (Malm und Kreide Kalken) und den gelben dargestellten Sedimente (Molasse) resultiert aus einer Kombination zwischen Erosionslücken und Ablagerungslücken.

Seit 1990 sind nur einige Publikationen erschienen. Kuhlemann und Kempf 2002 stellen paleogeographische Rekonstruktionen der Schweiz vor, die Transgressionen zwischen Oligozän und Miozän abdecken. Diese Autoren beschreiben aber gar nicht die Verkarstungsbedingungen dieser Phasen, sondern halten den Fokus auf die Paleogeographie. Berger *et al.* 2005 schlagen eine weitere paleogeographische Rekonstruktion der Schweiz während dem ganzen Känozoikum vor, mit Hinweis auf die Drainage-Richtungen. Schlussendlich stellen Kominz 2001 und Miller *et al.* 1998 Schwankungen des Meeresniveau im Känozoikum vor.

Diese wenigen Publikationen leiden unter einem klaren Mangel an geologischen Felddaten, um die Verkarstungsbedingungen dieser Zeitspanne zu dokumentieren. Selbst die genauen Grenzen der Molasseablagerungen auf dem Jura sind noch unklar.

Nicod 1990 stellt in einer synthetischen Abbildung eine Rekonstruktion der Verkarstungsphasen im Jura vor (Figur 2). Obwohl diese Figur den ganzen Jura und sogar weiter im Süd-Westen und Nord-Osten abdeckt, ist die vorgestellte Studie vor allem auf die Bedingungen im westlichen Jura (Literatur auf Französisch) fokussiert. Der Autor unterscheidet mehrere Verkarstungsphasen, bei welchen vier in die Zeitspanne des „Eozäner Karst“ fallen:

- Eozän / Lutétien (-48 Ma) → Siderolithikum genannt, mit einem Meeresniveau ca. 50 m unterhalb dem heutigen. Die Verkarstung konnte sich möglicherweise bis relativ tief in die Kalke entwickeln.
- Oligozän (-33 bis -23 Ma) → Erste Molassenablagerungen mit Umgestaltung von siderolithischen Ablagerungen. Bedeutende tektonische Bewegungen mit verbundenen deutlichen Erosionsphasen.
- Miozän /Aquitaniien-Burdigalien (-23 bis -20 Ma) → Der Autor spricht von deutlichen Karstentwicklungen an der Grenze zwischen den Kalken und der Molasse. Meeresniveau mit heutigem vergleichbar. Die Verkarstung erweitert sich bis im mittleren Miozän (Serravalien, -13 Ma).
- Messinien (-7 Ma) → Die deutliche Absenkung des Mittelmeeres führt zu einer Absenkung von ungefähr 200 m im Bereich des westlichen Jura. Es handelt sich um eine Phase aktiver Verkarstung. Die genaue Ausbreitung dieser Absenkung des Vorfluters nach Ost ist für den Autor noch nicht sehr klar. Diese Situation hat zu bedeutenden Gradienten zwischen Einzugsgebieten des Mittelmeers und der Nordsee (in geringerer Weise auch dem Schwarzen Meer) geführt, was zu einer tiefen Verkarstung geführt habe könnte.

Im Artikel von Nicod werden einige weiteren Referenzen zitiert, die genauer untersucht werden sollten.

3. Fazit

Die Literatur über die „eozänen Verkarstung“ ist sehr beschränkt. Es handelt sich einerseits um alte Beschreibungen von Gesteinsaufschlüssen mit besonderen Sedimenten wie Boluston, Bohnerzablagerungen oder Siderolithikum-Sand. Andererseits haben Geologen versucht, die Paleogeographie aus den selten abgelagerten Sedimenten zu rekonstruieren. Ein grundsätzliches Problem ist, dass die Verkarstung ein Erosionsprozess ist, der wenig bis gar keine Sedimente hinterlässt. Die Charakterisierung der genauen Bedingungen dieser Periode ist entsprechend nicht leicht und kann durch drei Untersuchungsansätze geführt werden:

- 1) Zusammenstellung von „allen“ bestehenden Beobachtungen in der Nordschweiz (30-50 km von den Standortgebieten);
- 2) Zusammenstellung von Beobachtungen in einem erweiterten Gebiet (vor allem Frankreich, Schweiz und Deutschland);
- 3) Die Charakterisierung eines Gebietes, wo die heutigen Verkarstungs-Bedingungen als ähnlich wie denen des eozänen Karst betrachtet werden können.

Es wird empfohlen, diese drei Untersuchungsrichtungen in den zukünftigen Untersuchungen der NAGRA zu verfolgen, damit der „eozäne Karst“ im Zusammenhang mit potenziellen Bauproblemen der Zugangsbauwerke genauer charakterisiert werden kann.

Pierre-Yves Jeannin,

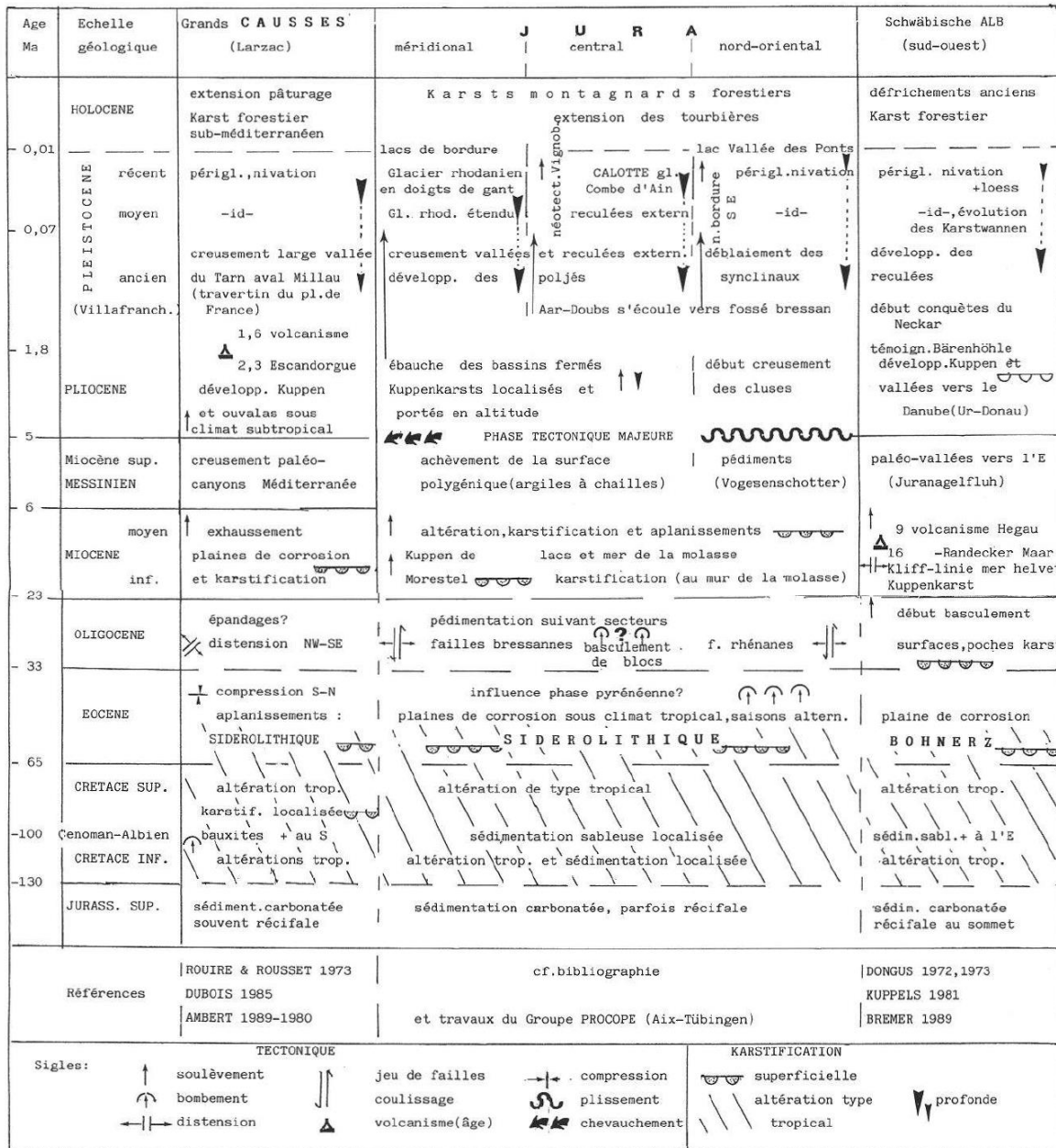
mit Beiträgen von Urs Eichenberger, Arnaud Malard und Beat Rick

Anhang 3 : Eozäne Situation der Nordwestschweiz aus palaeogeographischer Sicht mit Hinblick auf den „Eozänen Karst“

Nr.	Blatt	Autor, Jahr	Ort	Beschreibung	Referenz	weiterführende Literatur
74	Neunkirch	Hofmann, 1981	Karstspalte in Wohlgeschichteten Kalken am Siblingler Randen, Längenberg (689'020/287'360); Höhlen: Merishusertal, Längenberg, Birch, Schlösschen Wörth, Teufelsküche Beringen, Finsterwägli, Staarolli	Bolustone auf verkarsteter Jurakalk-Oberfläche; liegen von S nach N auf immer tieferen jurassischen Schichten auf, kräftige Auslaugungs-Verwitterung im Paleozän-Eozän. Bohnerz meist 5-6 m mächtig, selten 20-30 m tiefe Taschen. Verschiedene Höhlen im Kimmeridge-Kalk; Dolinen häufig in der Lettenkohle und bis in den Trigonodus-Dolomit	S. 21-22; Höhlen und Dolinen S. 37-38, Bohnerzabbau S. 39	Hofmann 1967, Vetterli 1965 (Höhlen)
38	Diessenhofen	Hofmann, Hantke, 1964	Rheinfallgebiet, Tongrube NE Stetten, Fulachtalstrasse, Steinbruch Wippel	Bolus-Bohnerz-Formation als Ausfüllung von Karren und Spalten der Malmoberfläche, teilweise jünger als Siderolithikum	S. 7 - 9	
52	Andelfingen	Hofmann, 1967		Nur Molasse und Quartär beschrieben		
140	Winterthur	Wildberger, Rey, Frank, Freimoser, 2011		Nur Molasse und Quartär beschrieben		
102	Zurzach	Bitterli, Graf, Matousek, Wanner, 2000		intensive Verkarstung (Kreide-Eozän) in warm-feuchtem Klima, Anreicherung in Senken und Karstlöchern (Huppererde, Boluston, Bohnerz), 0-10 m; im Keuper: Gipskarst unterhalb der Schotterfüllung von Tälern	S. 34; 76 (Gipskarst)	
120	Baden	Bitterli-Dreher, Graf, Naef, Diebold, Matousek, Burger, Pauli-Gabi, 2007	Gebiet von Baden	intensive lateritische Verwitterung in feucht-subtropischem Klima führt zu verkarsteter Einbnungsfläche, unterschiedlich stark im Malm eingetieft. Felsgrundwasser: Malmkalk ist gut verkarstungsfähig und kann als GW-Leiter betrachtet werden.	S. 54; S. 129 (Felsgrundwasser)	Senftleben 1923, Schindler 1977
110	Frick-Laufenburg	Diebold, Bitterli-Brunner, Naef, 2006	A3-Bözbergtunnel, Bözbergplateau: Oberbözberg, Homberg, Gallenkirch	Siderolithikum in Karsttaschen und -spalten der Malmoberfläche. Wasserführende Gesteine v.a. Hauptrogenstein und Ob. Muschelkalk, geprägt durch Karstsysteme, Malm wegen Tertiärüberdeckung nur mit geringer Wasserführung	S. 7, 42-44, 105, 106 (Hydrogeologie)	Gygi 2000 (Eclogae 93/1), Hofmann 1991, Hauber 1994 (Malm Bözbergplateau)
135	Aarau	Jordan, Graf, Eberhard, Jost, Kälin, Bitterli-Dreher, 2011	Bohrungen in Schafisheim, Oftringen, Kölliken, Eppenberg, Bohnerzvorkommen in Aarau, Küttigen, Erlinsbach	Siderolithikum in Linsen, taschen- und Kluffüllungen in und über der verkarsteten Malmkalkoberfläche, Mächtigkeit in Bohrung Kölliken 22 m. Quellen im Faltenjura meist aus Karstgrundwasser gespeisen (Oberer Muschelkalk, Hauptrogenstein, Malmkalk). Ausbildung von Karstsystemen hängt u.a. ab von tektonischer Beanspruchung ab.	S. 52, Quellen: S. 118, Bohnerz: S. 131	Wullschlegler 2005
150	Schöftland	Graf, Jost, Eberhard, Krusse, Kempf, 2012	Walterswil, Oftringen	Siderolithikum als lokal begrenzte Füllung von Karsttaschen oder Klüften, in EWS-Bohrung Oftringen 1 m mächtig	S. 11	Albert & Bläsi 2008 (EWS-Bohrung Oftringen)
80	Arlesheim	Bitterli-Brunner, Fischer, 1988	Gempen-Hochwald-Seewen-Plateau, Witterswiler Berg, Karstgrundwasser: Plateau von Hofstetten und Hochwald	Siderolithikum oft in Spalten, Taschen, Rinnen und Schloten des Malm-Kalkes, oft beachtliche vertikale Eindringtiefe, Malmkalk und Hauptrogenstein als wichtigste jurassische Festgesteinsaquifere, vor allem in Gebieten mit starker Verkarstung und Klüftung, Färbversuch 1979 Hochwald-Birs bei Duggingen/Angenstein	S. 19-20, S. 57 (Karstgrundwasser)	Bitterli 1987
3	Passwang		Erläuterungen fehlen			
49	Rodersdorf	Fischer, 1965	Redelsflue NW. Röschenz, Schloss Burg	Eozän auf alter, verkarsteter Malmoberfläche, Füllung von teils tiefreichenden Schloten (bis ins Rauracien)	S. 11,	
59	Basel	Fischer, Hauber, Wittmann, 1971		Keine Hinweise auf Karst oder Bolustone/Bohnerz		
96	Moutier	Pfirtner, 1997	nördl. von Moutier, Graiterytunnel	Eozäne Verwitterungssedimente auf verkarsteter Oberfläche der Reuchenette-Fm (Nordteil) und der Twannbach-Fm. (Südteil), Grundwasser ist grösstenteils Karstwasser, Beschreibung komplexer Karstsysteme; Wasserführung Tunnel N16 > 10'000 l/min erwartet	S. 22, S. 53-58 (Karstwasser)	Mornod et al. 1970
40	St. Ursanne	Laubscher, 1963	Hochflächen der Ajoie: Karstentwässerung	Eozän besteht aus den im Jura üblichen siderolithischen Bildungen auf fossiler Karstlandschaft	S. 5, 12	
55	Bonfol	Liniger, 1970	Karsterscheinungen in der Ajoie, Dolinen bei Miécourt, Höhle von Milandre	Boluston in Karrenspalten und -taschen des Malm, meist in Verwerfungszonen, Dolinen, Tropfsteinhöhlen mit ausgedehntem Karstsystem zwischen Boncourt und Bure	S. 12, 33-35	Erzinger 1934 (oder 1943?), Schweizer in press (Hydrogeologie der Ajoie, Beitr. Geol. CH, Hydrol. 17)

Tabelle 1: Zusammenfassung von Referenzen zu Karst, besonders zu eozänem Karst, in Erläuterungen von Blättern des geologischen Atlas der Schweiz in der Nordwestschweiz (nicht abschliessend).

Anhang 3 : Eozäne Situation der Nordwestschweiz aus palaeogeographischer Sicht mit Hinblick auf den „Eozänen Karst“



Figur 2: Entwicklungsvergleich von Karst des Juras, Grands-Causse (F) und Schwäbischen Alb (D), aus Nicod 1990.

Referenzen

- Berger JP, Reichenbacher B, Becker D, Grimm M, Grimm K et al. (2005): Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 94(4): 697-710 p.
- Bitterli T, Graf HR, Matousek F, Wanner M (2000): 1050 Zurzach Erläuterungen. *Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000* 102: 90 p.
- Bitterli [-Brunner] P (1987): *Geologischer Führer der Region Basel*. Birkhäuser, Basel/Boston.
- Bitterli-Brunner P, Fischer H (1988): 1067 Arlesheim Erläuterungen. *Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000* 80: 68 p.
- Bitterli-Dreher P, Graf HR, Naef H, Diebold P, Matousek F et al. (2007): 1070 Baden. *Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000*. Erläuterungen 120: 154 p.
- Fischer H (1965): 1066 Rodersdorf mit Anhängsel von Blatt 1086 Delémont. *Geologischer Atlas der Schweiz 1/25 000*. Erläuterungen 49: 23 p.
- Fischer H, Hauber L, Wittmann O (1971): 1047 Basel. *Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000*. Erläuterungen 59: 57 p.
- Graf HR, Jost J, Eberhard M, Krusse H, Reber D et al. (2012): 1109 Schöftland Erläuterungen. *Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000* 150.
- Gygi RA (2000): Integrated stratigraphy of the Oxfordian and Kimmeridgian (Late Jurassic) in northern Switzerland and adjacent southern Germany. *Memoir of the Swiss Academy of Science*, 104: 152 p.
- Hauber L (1994): Die Geologie des Bözbergtunnels der Nationalstrasse N3. *Brugger Njbl*, 104: 85-104 p.
- Hofmann F (1967): 1052 Andelfingen. *Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000*. Erläuterungen 52: 29 p.
- Hofmann F (1967): Über die Tertiärbildungen im Kanton Schaffhausen. *Mitt. natf. Ges. Schaffhausen*, 28: 171-210 p.
- Hofmann F (1981): 1031 Neunkirch Erläuterungen. *Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000* 74: 51 p.
- Hofmann F (1991): Neuere Befunde zur Geologie, zur Lagerstättenkunde und zum historischen Abbau der Bohnerze und Bolustone der Region Schaffhausen (Schweiz). *Mitt. natf. Ges. Schaffhausen*, 36: 45-82 p.
- Hofmann F (1992): Neuere Befunde zur Geologie, zur Lagerstättenkunde und zum historischen Abbau der Bohnerze und Bolustone der Region Schaffhausen (Schweiz). *Beiträge zur Geologie der Schweiz - Kleinere Mitteilungen* 93: 39 p.

Hofmann F, Hantke R (1964): 1032 Diessenhofen Erläuterungen mit Anhängsel von Blatt 1031 Neunkirch, unpubl. rep. Commission Géologique Suisse.

Jordan P, Graf HR, Eberhard M, Jost J, Kälin DW et al. (2011): 1089 Aarau Erläuterungen. Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000 135.

Kominz MA (2001): Sea level variations over geologic time. Academic Press, Oxford.

Kuhlemann J, Kempf O (2002): Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. *Sediment. Geol.*, 152: 45-78 p.

Laubscher HP (1963): 1085 St-Ursanne. Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000. Erläuterungen 40: 27 p.

Liniger H (1970): 1065 Bonfol. Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000. Erläuterungen 55: 40 p.

Miller KG, Mountain GS, Browning JV, Kominz M, Sugarman PJ et al. (1998): Cenozoic global sea level, sequences, and the New-Jersey transect: results from coastal plain and continental slope drilling. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 569-601 p.

Mornod L, Bertrand J, Barraud JP (1970): Construction du premier puits profond à grand diamètre dans le karst jurassien suisse, à Moutier. *Revue suisse pour l'industrie du gaz, l'alimentation en eau et l'assainissement*, 50: 279-286 p.

Nicod J (1990): Le Karst jurassien modèle géomorphologique spécifique. *Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles*, 113: 13-25 p.

Pfirter U (1997): 1106 Moutier. Atlas géologique de la Suisse 1/25'000. Notice explicative 96: 72 p.

Scherzinger, Hofmann F, Stalder (1990): Erze und Erzabbau im Jura.

Schindler C (1977): Zur Geologie von Baden und seiner Umgebung. *Beiträge zur Geologie der Schweiz - Kleinere Mitteilungen* 67: 109-160 p.

Senftleben G (1923): Beiträge zur geologischen Erkenntnis der Westlagers und ihrer Umgebung. Univ. Zürich, PhD Dissertation.

Trümpy R (1990): *Geology of Switzerland, A guide-book, Part A with contributions by D. Bernoulli, M. Grünenfelder, V. Köppel, St. Müller and V. Trommsdorff.* Schw. Geol. Kommission, editor. Wepf und Co Basel, New York

Vetterli A (1965) Die Höhlen des Kantons Schaffhausen. *Ostschweiz. Ges. Höhlenforsch.* Winterthur.

Wildberger A, Rey R, Frank S, Freimoser M, Gubler T et al. (2011): 1072 Winterthur. Geologischer Atlas der Schweiz 1/25'000. Erläuterungen 140: 72 p.

Ziegler P (1990): *Geologic Atlas of Western and Central Europe.* Editor: Shell Int. Petrol. Maatschappij B.V.

ENSI 33/472

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 56 460 84 00, E-Mail Info@ensi.ch, www.ensi.ch