



# **KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau**

**KarstALEA: Instructions pratiques pour la prévision  
des dangers liés au karst lors de travaux souterrains**

**KarstALEA: Practical guide for the prediction of karst-  
related hazards in underground works**

EPFL ENAC ICARE GEOLEP

Marco Filipponi

Aurèle Parriaux

Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung  
SISKA / Institut Suisse de Spéléologie et Karstologie  
ISSKA, La Chaux-de-Fonds

Silvia Schmassmann <sup>†</sup>

Pierre-Yves Jeannin

Forschungsauftrag FGU2009/003 auf Antrag der  
Fachgruppe Untertagbau (FGU)

Silvia Schmassmann hat eine zentrale Rolle bei der Realisation dieses Dokuments gespielt. Einige Tage vor der Erscheinung dieser Broschüre hatte sie anlässlich einer Höhlenexpedition in der Region Habkern (BE) an einen tödlichen Unfall. Silvia war Mitarbeiterin des SSKA seit 2008 und eine leidenschaftliche Höhlenforscherin. Sie hat sich kompetent, energisch und mit Enthusiasmus sowohl unter der Erde wie bei den Büroarbeiten engagiert.

Wir werden Sie lebhaft in Erinnerung behalten.

Silvia war verheiratet und Mutter von zwei Kindern.

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 «Projektabschluss», welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 «Clôture du projet», qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau**

**KarstALEA: Instructions pratiques pour la prévision  
des dangers liés au karst lors de travaux souterrains**

**KarstALEA: Practical guide for the prediction of karst-  
related hazards in underground works**

EPFL ENAC ICARE GEOLEP

Marco Filipponi

Aurèle Parriaux

Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung  
SISKA / Institut Suisse de Spéléologie et Karstologie  
ISSKA, La Chaux-de-Fonds

Silvia Schmassmann <sup>†</sup>

Pierre-Yves Jeannin

Forschungsauftrag FGU2009/003 auf Antrag der  
Fachgruppe Untertagbau (FGU)

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Pierre-Yves Jeannin

Aurèle Parriaux

### Mitglieder

Marco Filipponi

Silvia Schmassmann

### Experten

Roberto Daneluzzi

François Flury

François Vuilleumier

Andres Wildberger

## Begleitkommission

### Präsident

Georg Anagnostou

### Mitglieder

Felix Amberg

Martin Bossard

Simon Loew

Hans-Jakob Ziegler

## Antragsteller

Fachgruppe Untertagbau (FGU)

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>8</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
	<b>Abstract</b> .....	<b>10</b>
	<b>Riassunto</b> .....	<b>11</b>
	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>12</b>
	<b>Synthèse</b> .....	<b>18</b>
	<b>Synthesis</b> .....	<b>24</b>
	<b>Sintesi</b> .....	<b>30</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>36</b>
<b>2</b>	<b>Karst und karstbezogene Gefahren im Untertagebau</b> .....	<b>38</b>
2.1	Was ist Karst? .....	38
2.2	Gefährdungsbilder im Karst .....	40
2.2.1	Gefährdung durch luftgefüllte Karsthohlräume .....	41
2.2.2	Gefährdung durch wasserführende Karsthohlräume .....	42
2.2.3	Gefährdung durch sedimentverfüllte Karsthohlräume .....	43
<b>3</b>	<b>Wissenschaftlicher Hintergrund der KarstALEA-Methode</b> .....	<b>44</b>
3.1	Karsthydrogeologie .....	44
3.1.1	Zirkulationsverhältnisse im verkarsteten Gebirge .....	44
3.1.2	Karstsysteme und Rahmenbedingungen der Entwässerung .....	46
3.1.3	Verhalten eines Karstsystems .....	48
3.1.4	Konsequenz für die Untersuchungsmethoden in der Karsthydrogeologie .....	51
3.2	Die Grundlagen der Speläogenese .....	51
3.2.1	Die Verkarstungsfähigkeit der Gesteine .....	52
3.2.2	Die chemische Lösung des Gesteins .....	52
3.2.3	Das Konzept der Initialfugen .....	55
3.2.4	Konsequenz des Konzepts der Initialfugen für die Beurteilung der karstspezifischen Gefahren .....	59
3.2.5	Das Konzept der speläogenetischen Bereiche .....	60
3.2.6	Konsequenz des Konzepts der speläogenetischen Bereiche für die Beurteilung der karstspezifischen Gefahren .....	66
<b>4</b>	<b>Die KarstALEA-Methode – Überblick</b> .....	<b>68</b>
4.1	Ziele und Kontext der KarstALEA-Untersuchungen .....	70
4.2	Struktur der KarstALEA-Untersuchungen .....	70
4.3	Datengrundlagen .....	71
4.3.1	Geologische Daten .....	72
4.3.2	Hydrogeologische Daten .....	73
4.3.3	Geomorphologische Daten .....	73
4.3.4	Speläologische Daten .....	73
4.4	Die sieben Bearbeitungsschritte der KarstALEA-Methode .....	74
4.5	Iteratives Vorgehen und Teilphasen nach SIA 197 .....	76
4.6	Verfassen des KarstALEA-Berichtes inklusiv Vorschlag für weiterführende Untersuchungen .....	78

4.7	Anwendungsgrenzen der KarstALEA-Methoden .....	80
4.7.1	Lithologien .....	80
4.7.2	Art der Verkarstung .....	81
4.7.3	Andere Einschränkungen .....	82
<b>5</b>	<b>KarstALEA-Erstbeurteilung .....</b>	<b>84</b>
5.1	Ziel und Vorgehen .....	84
5.2	Verkarstungsfähigkeit der Formationen .....	84
5.3	Hydrogeologische Indikatoren einer Verkarstung .....	85
5.4	Ist die Anwendung von KarstALEA sinnvoll? .....	86
5.5	Summarische Charakterisierung der Verkarstung und Identifikation von Gebirgsbereichen mit hohem karstspezifischem Gefahrenpotenzial .....	86
5.6	Verfassen des Berichtes inklusiv Vorschlag für weiterführende Untersuchungen .....	88
<b>6</b>	<b>KarstALEA-Erkundung .....</b>	<b>93</b>
6.1	Ziel .....	93
6.2	Vorgehen .....	95
6.3	Geologische Untersuchungen .....	96
6.3.1	G1 – geologisches 3D-Modell .....	97
6.4	Hydrogeologische Untersuchungen .....	98
6.4.1	H1 – Hydrogeologisches 3D-Modell – Karstsysteme und potenziell beeinflusste Grundwasservorkommen und Quellen .....	100
6.4.2	H2 – Verifizierung der Einzugsgebiete mit Hilfe der mittleren Abflusshöhe .....	105
6.4.3	H3 – Einzugsgebiete und Fließcharakteristika basierend auf hydrologischen Daten .....	106
6.4.4	H4 – Einzugsgebiete und Fließcharakteristika basierend auf Tracerdaten .....	108
6.4.5	H5 – Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels (zu erwartende hydraulische Drücke) .....	108
6.4.6	H6 – Abschätzung möglicher Schüttungen .....	113
6.5	Ausscheidung und Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche .....	116
6.5.1	S1 – Ausscheidung der aktuellen speläogenetischen Bereiche .....	117
6.5.2	Ausscheidung der paläo-speläogenetischen Bereiche .....	119
6.5.3	S6 - Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche .....	123
6.5.4	S8 - Bestimmung der Karströhrendichten der speläogenetischen Bereiche .....	125
6.6	Ausscheidung von regionalen Initialfugen .....	126
6.6.1	I1: Initialfugen aus Literaturangaben .....	129
6.6.2	I2: Initialfugen aus geologischen Aufschlussdaten .....	129
6.6.3	I3: Initialfugen aus Bohrlochdaten .....	131
6.6.4	I-4: Initialfugen aus karstmorphologischen Daten .....	132
6.6.5	I-5: Initialfugen aus speläomorphologischen Daten .....	133
6.6.6	I-6: Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten .....	135
6.6.7	I7 – Detektion von Karsthohlräumen mittels geophysikalischen Verfahren .....	137
6.7	Beurteilung der karstspezifischen Gefährdung .....	137
6.7.1	Verteilung der Karströhrendichte .....	138
6.7.2	Ausscheidung der KarstALEA-Zonen und Beschreibung der karstspezifischen Gefährdungen .....	141
6.8	Risikoanalyse und risikomindernde Massnahmen .....	144
<b>7</b>	<b>KarstALEA Bauausführung .....</b>	<b>145</b>
7.1	Karstrelevante Vorauserkundungsmassnahmen .....	146
7.1.1	Kartierung von Initialfugen während des Vortrieb .....	149
7.1.2	Vorauserkundungsbohrung .....	149
7.1.3	Bohrlochgeophysikalische Methoden .....	150
7.1.4	Tunnelgeophysikalische Methoden .....	150
7.1.5	Sondierstollen .....	151
7.2	Dokumentationen der Karsterscheinungen während des Vortriebs .....	151
7.2.1	Kartierung der Initialfugen während des Vortriebs .....	151
7.2.2	Dokumentation der Karsthohlräume während des Vortriebs .....	151

7.2.3	Dokumentation von karsthydrogeologische Verhältnisse während des Vortriebs .....	152
7.3	Erkundung des Nahbereichs für den Endausbau .....	152
7.4	Verfassen des Schlussberichtes .....	153
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>154</b>
	<b>Anhänge .....</b>	<b>156</b>
	<b>Abkürzungen .....</b>	<b>190</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>192</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>195</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....</b>	<b>198</b>

## Zusammenfassung

### **KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau**

Der Tunnelbau im verkarsteten Gebirge führt häufig zu Problemen, welche schwere und kostenintensive Folgen haben können.

Das Hauptziel der KarstALEA-Wegleitung ist dem im Untertagbau tätigen Geologen eine praxisnahe Methode zur Beurteilung des verkarsteten Gebirges zur Verfügung zu stellen, welche die SIA-Norm 199 ergänzt. Die Resultate werden in einem prognostischen Längsprofil zusammengefasst. Darin wird die Wahrscheinlichkeit auf eine Karströhre zu stossen für die verschiedenen Tunnelabschnitte sowie die Eigenschaften der zu erwartenden Karsthohlräume detailliert beschrieben.

Die KarstALEA-Methode fasst die aktuellen akademischen Kenntnisse über den Karst zusammen und kombiniert, damit sie Antworten auf die praktischen Fragen des Untertagbaus liefert. Die Methode basiert auf der Tatsache, dass rund 70 % der Karströhren entlang wenigen geologischen Trennflächen entstanden sind. Weiter variiert die Karströhrendichte innerhalb des Gebirges in Funktion der aktuellen und vergangenen hydrogeologischen Bedingungen. So treten sie zum Beispiel in gewissen Höhenlagen gehäuft auf, welche früheren Vorfluterniveaus entsprechen (Paläo-Talböden). Die Ausscheidung dieser Trennflächen und der Paläovorfluterniveaus ermöglicht, Zonen mit erhöhter Karströhrendicht auszuscheiden. Kenntnisse zur Hydrogeologie und zur Verkarstungsgeschichte des Gebirges ermöglichen weiter gewisse Eigenschaften dieser Hohlräume zu prognostizieren (Grösse und Form der Hohlräume, Menge und Art der Sedimente, permanenter oder temporärer druckhafter Wasseranfall, zu erwartende Schüttung etc.).

Die KarstALEA-Methode wird in drei Hauptetappen angewendet:

- 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 (→ 2. Etappe).
- 2) Die 2. Etappe „KarstALEA Erkundung“ beginnt während der „Vorstudie“ und geht mit der ganzen „Projektierungsphase“ einher. Im Rahmen der KarstALEA Erkundung werden die nützlichen karstspezifischen Informationen für die Submission des Vorhabens erarbeitet. Die Daten um die vier 3D-Modelle (Geologie, Hydrogeologie, Speläogenese und Initialfugen), welche die Grundlage der KarstALEA-Methode bilden, zu erstellen werden im Laufe der Projektierung des Projektes erhoben. Die Modelle werden entsprechend in einem iterativen Vorgehen erstellt und präzisiert, bis der gewünschte Detaillierungsgrad erreicht ist.
- 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 / Fragestellungen 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.

## Résumé

### **KarstALEA: Instructions pratiques pour la prévision des dangers liés au karst lors de travaux souterrains**

Le percement de tunnels en milieu karstique pose souvent des problèmes qui peuvent avoir des conséquences graves et coûteuses.

Les instructions pratiques « KarstALEA » ont pour objectif principal de fournir aux géologues actifs dans le domaine des travaux souterrains une méthode pratique pour évaluer les massifs karstiques, en complément de la norme SIA 199. Elle aboutit à un profil en long prévisionnel de l'ouvrage décrivant de manière assez détaillée la probabilité d'occurrence de conduits karstiques des différents segments du tunnel ainsi que les caractéristiques de ces vides.

La méthode KarstALEA synthétise les connaissances académiques existantes sur le karst et les combine de manière à répondre aux questions pratiques liées aux ouvrages souterrains. Elle se base d'abord sur le constat que les conduits karstiques se développent prioritairement (environ 70% des vides) le long de certains horizons géologiques appelés horizons d'inception. Elle considère également le fait que la densité des conduits varie au sein du massif karstique en fonction des conditions hydrogéologiques actuelles et passées. Les conduits sont par exemple « concentrés » à certaines altitudes correspondant à d'anciens niveaux de base régionaux (paléo niveaux de vallées). L'identification des horizons d'inception et des niveaux de base permet ainsi de prédire les zones les plus probables d'occurrences de conduits karstiques. La connaissance de l'histoire de la karstification d'un massif permet aussi de prévoir certaines caractéristiques de ces vides (taille et forme des vides, présence et type de sédiments, saturation en eau permanente ou temporaire, débits potentiels, etc.).

La méthode s'applique en trois grandes étapes.

- 1) Etape 1 « KarstALEA évaluation initiale », au début des « études préliminaires » ou pendant la « définition des objectifs ». Elle vise à définir si l'ouvrage envisagé, dans ses différentes variantes de tracés, présente un risque lié au karst ou non. Si la réponse est « oui », la méthode KarstALEA s'applique et on passe à l'étape 2.
- 2) Etape 2 « KarstALEA reconnaissance » commence pendant les « études préliminaires » et se poursuit tout au long de la « phase d'étude du projet ». Cette étape fournit les éléments utiles aux documents de soumission du projet. Les données nécessaires à la création de quatre modèles (géologie, hydrogéologie, spéléogénèse et inception), constituant la base de la méthode KarstALEA, sont acquises au fil de l'avancement du projet. Les modèles correspondants sont ainsi élaborés de manière itérative jusqu'à atteindre le degré de détail nécessaire au projet.
- 3) La troisième étape « KarstALEA exécution des travaux » concerne la « phase d'exécution de l'ouvrage ». L'application de KarstALEA reste très similaire à celle de la phase 2, mais la nature des données et questions change (données/questions issues de la construction de l'ouvrage). Cette phase nécessite une éventuelle adaptation des mesures constructives initialement prévues pour résoudre les problèmes concrets liés à l'exécution de l'ouvrage. Les modèles KarstALEA constituent alors une précieuse aide à la décision. Le rapport final de cette étape décrit le contenu des mesures « karst » pour la « phase d'exploitation de l'ouvrage ».

## Abstract

### **KarstALEA : a practical guide for the prediction of karst-related hazards in underground works**

Excavation of tunnels in karst environments commonly meets problems with severe and costly consequences.

The practical guide "KarstALEA" (meaning KarstHazard) aims to provide a practical method for the assessment of ground conditions in karst massifs. This method is an add-on to the SIA 199 code and guidelines for tunnels in karst, and is designed for use by geologists involved in underground works. The results are then presented in a longitudinal profile of the tunnel to give clear indications of the probabilities of occurrences of karst voids and conduits within respective sections of the tunnel; they also indicate probable characteristics of the anticipated karst features.

The KarstALEA method synthesizes academic knowledge on karst and combines this in a way to address practical questions related to the underground works. It is based first on the observed fact that karst conduits preferentially develop along a restricted number of geological horizons, known as "inception horizons". Typically, 70% of the conduits may develop along 3 to 5 discrete horizons within the scale of a tunnel project. A second input factor is that conduit density varies within the karst massif depending on the present and past hydrogeological conditions; there are commonly some concentrations of conduits at elevations corresponding to past base-levels (palaeo-valley floors). Consequently, the identification of inception horizons and base-levels makes it possible to predict zones of highest probability of occurrences of karst conduit. Any knowledge of the karstification history of a massif helps these predictions and may also indicate some characteristics of the anticipated karst conduits (notably, the sizes and shapes of voids, the quantities and types of sediments, the presence of water and its likely pressure and discharge, etc.).

The KarstALEA method is applied in three main stages:

- 1) Stage 1 "KarstALEA initial assessment" takes place at the beginning of the preliminary study or even during the initial stage of objectives definition (from SIA 197). The aim is to define if the tunnel is to be constructed within the range of its various potential alignments, and whether it presents a karst-related hazard or not. If the hazard is recognized, the KarstALEA method is applied as in stage 2.
2. Stage 2 "KarstALEA investigations" starts in the preliminary study and extends all through the project study phase. This stage provides the necessary inputs for the tender documents for the project. Data required for building four 3D-models (geology, hydrogeology, speleogenesis and inception) are acquired as part of the project study. These are iteratively improved until they reach the required level of detail. This stage is the core of the KarstALEA method.
3. Stage 3 "KarstALEA construction" continues during the construction phase of the project. The application of KarstALEA remains very similar to that in stage 2, but the nature of the data and of new problems evolves continuously as real facts on the ground conditions are revealed by the construction in progress. During this stage some previously defined construction guidelines may have to be adjusted in order to solve newly recognized problems. The KarstALEA models develop and improve throughout stages 2 and 3, and are very valuable for making decisions. The final report of this stage outlines guidelines relevant to karst hazards that may be encountered during operation of the tunnel.

## Riassunto

### **KarstALEA: Istruzioni pratiche per la previsione dei pericoli legati al carso nelle opere sotterranee**

La perforazione di tunnel in ambiente carsico pone spesso dei problemi che possono avere conseguenze gravi e costose.

L'obiettivo principale delle istruzioni pratiche « KarstALEA » è di fornire, in complemento alla norma SIA 199, un metodo pratico di valutazione dei massicci carsici ai geologi che lavorano in ambiente sotterraneo. Il risultato è un profilo trasversale dell'opera. Si tratta di un profilo di previsione, che descrive in modo abbastanza dettagliato la probabilità di incontrare dei condotti carsici nei vari segmenti del tunnel. Permette inoltre di caratterizzare queste cavità.

Il metodo KarstALEA sintetizza le conoscenze accademiche attuali sul carso e le combina per rispondere alle domande pratiche legate alle opere sotterranee. Innanzitutto si basa sull'osservazione che i condotti carsici si formano principalmente (circa 70% delle cavità) lungo certi orizzonti geologici, chiamati « orizzonti di inizializzazione ». Per di più, considera il fatto che la densità dei condotti varia secondo le condizioni idrogeologiche attuali e passate. As esempio, i condotti possono essere « concentrati » a certe altitudini che corrispondono a degli antichi livelli di base idrologici regionali (paleolivelli delle valli). L'identificazione degli orizzonti di inizializzazione e dei livelli di base permette quindi di prevedere le zone in cui l'apparizione di condotti carsici è più probabile. La conoscenza della storia della carsificazione di un massiccio permette inoltre di prevedere alcune caratteristiche delle cavità (taglia e forma dei volumi, presenza e tipo di sedimenti, saturazione in acqua permanente o temporanea, portate potenziali, ecc.).

Il metodo si applica in tre tappe principali :

- 1) Prima tappa : « KarstALEA valutazione iniziale », all'inizio degli « studi preliminari » durante la « Pianificazione strategica ». Questa tappa mira a definire se l'opera in questione, con le sue diverse varianti riguardo al tracciato, presenta dei rischi legati al carso oppure no. Se la risposta è « si », si passa alla seconda tappa.
- 5) Seconda tappa « KarstALEA ricognizione », inizia durante la fase di studi preliminari e prosegue durante la « fase di progettazione ». Questa tappa fornisce gli elementi utili per i documenti che riguardano la sottomissione del progetto. Con l'avanzamento del progetto si raccolgono i dati necessari alla creazione di quattro modelli (geologico, idrogeologico, della speleogenesi e di inizializzazione) . Questi modelli costituiscono la base del metodo KarstALEA. Questi ultimi verranno quindi aggiornati in modo iterativo.
- 6) La terza tappa « KarstALEA esecuzione dei lavori » concerne « la fase di realizzazione ». Il metodo KarstALEA si applica in questa fase in modo molto simile alla fase 2. La principale differenza sta nella natura dei dati e nelle domande alle quali rispondere (dati e domande derivati dalla costruzione dell'opera). Questa fase necessita eventualmente di adattarsi delle misure di costruzione scelte inizialmente per risolvere i problemi concreti legati all'esecuzione dell'opera. I modelli KarstALEA costituiscono un prezioso aiuto di decisione. Il rapporto finale di questa tappa descrive il contenuto delle misure "karst" per la "fase di gestione ».



## Anwendungsbereich

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

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

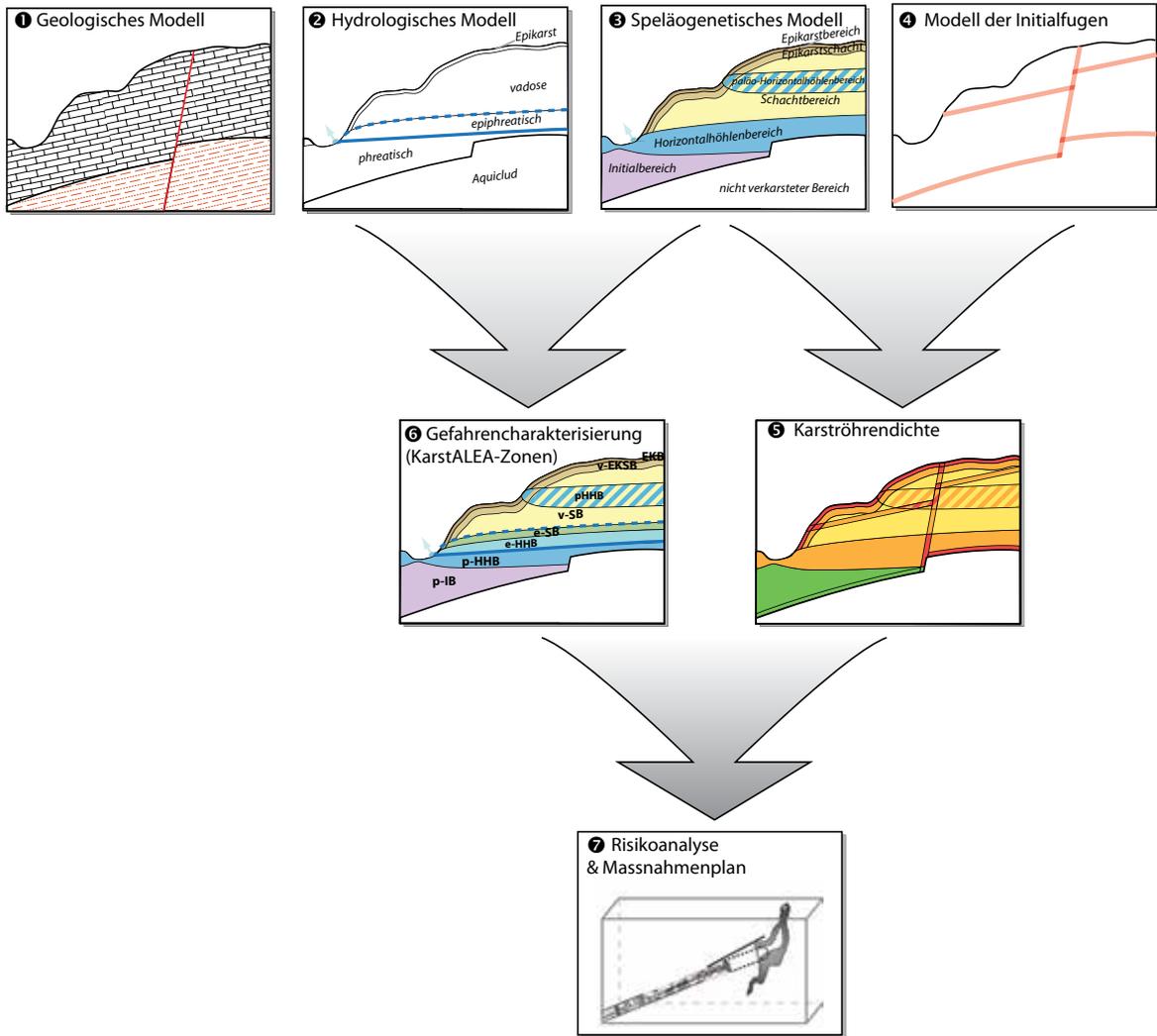
Zusätzlich zur Einschätzung der Wahrscheinlichkeit auf Karströhren zu stossen (Karströhrendichtezone), ermöglicht die KarstALEA-Methode die Hohlräume (Grösse, Form), die potenziell darin enthaltenen Sedimente (Art, Menge) und die Wasserführung des verkarsteten Gebirges zu charakterisieren. Dadurch können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

## 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 wird im Kapitel 4 erklärt und ist in der Abbildung 2-d zusammengefasst. Die Methode wird auf eine iterative Weise angewendet, wobei während jeder Iteration sieben Arbeitsschritte ausgeführt werden, welche in sieben Unterkapiteln des Kapitels 6 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, wobei jedoch üblicherweise die Darstellung und Analyse in 3D-Modellen erfolgt. Die Verwendung eines speläogenetischen Modells (3) und des Konzeptes der Initialfugen (4. Modell) sind die beiden innovativen Elemente der Methode. Die Untersuchung der Geometrie der Höhlensysteme durch Höhlenforscher hat gezeigt, dass sich Höhlen mehrheitlich entlang einer beschränkten Anzahl von 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 ca. 3-5 Trennflächen entwickelt haben, die weniger als 10 % des Gebirgsvolumen darstellen. Diese besonders verkarstungsanfälligen Trennflächen werden Initialfugen genannt. Weiter variiert die Karströhrendichte in Funktion der speläogenetischen Bereiche. So treten zum Beispiel subhorizontale Höhlengänge 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).

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



© SISKa

Abb. 2-d : Ablauf der KarstALEA-Untersuchungen in sieben Arbeitsschritten

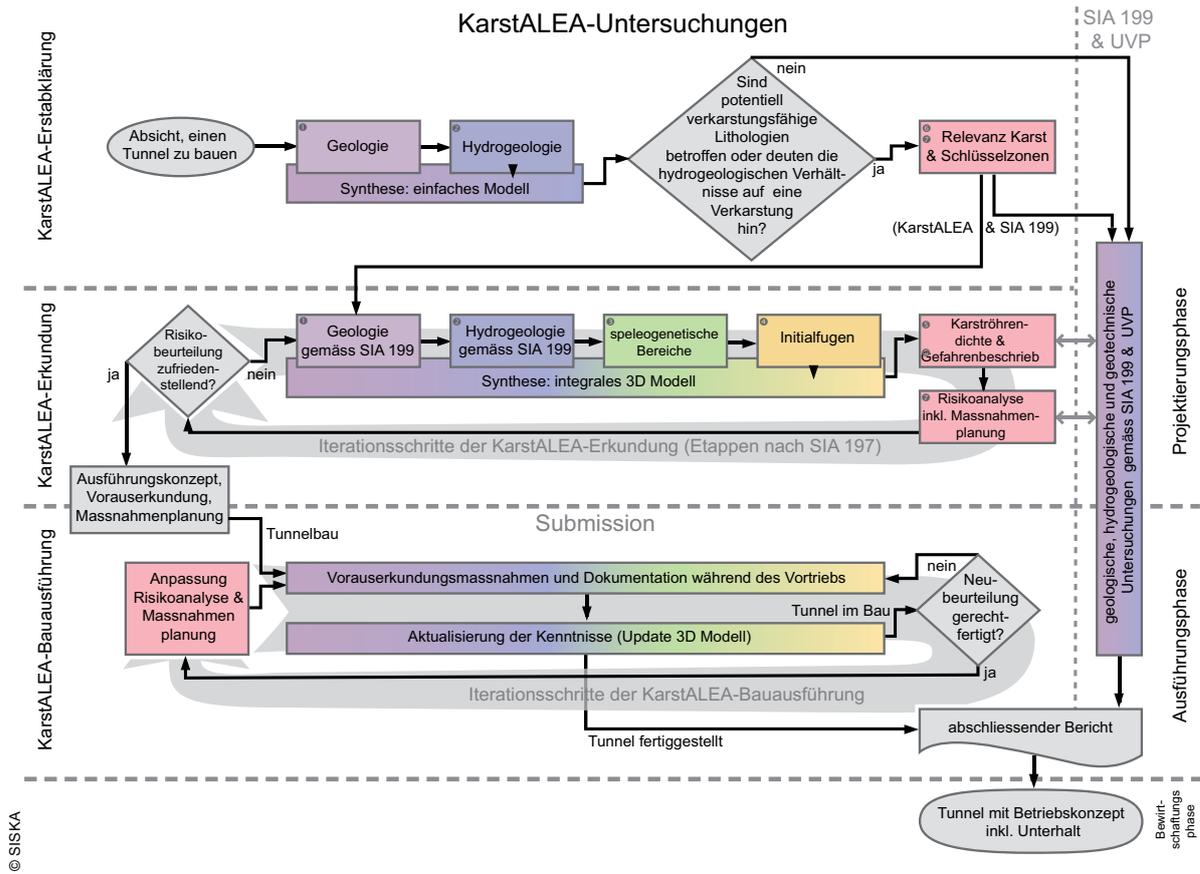
Vier 3D-Darstellungen des Gebirges (Modelle) werden erstellt (Arbeitsschritte 1 bis 4). Im Rahmen der Arbeitsschritte 5 und 6 werden die Karströhrendichtezonen ausgeschieden und die Karströhren charakterisiert (KarstALEA-Zonen). Im Rahmen des Arbeitsschrittes 7 werden – in Zusammenarbeit mit den planenden 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.

Ein Teil der im Rahmen der KarstALEA-Methode verwendeten Konzepte ist unter Karstspezialisten schon länger bekannt. Die KarstALEA-Methode 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 (1, 2, 4 und 8) ermöglichen jedoch auch der Bauherrschaft, den Planern 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 I bis VI so konzipiert, dass der Geologe sich weitgehend darauf basieren kann, sofern er die Methode und deren Grundlagen ausreichend verstanden hat.

## Die KarstALEA-Methode und die Phasen eines Projektes

Die KarstALEA-Methode wird in drei Hauptetappen angewendet (Abb. 3-d):

- 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 (→ 2. Etappe). Falls karstbedingte Risiken ausgeschlossen werden können, werden die KarstALEA-Untersuchungen mit der „Erstbeurteilung“ abgeschlossen. Die Details betreffend dieser Untersuchungsetappe sind im Kapitel 5 beschrieben.
- 2) Die 2. Etappe „KarstALEA Erkundung“ beginnt während der „Vorstudie“ und geht mit der ganzen „Projektierungsphase“ gemäss SIA 197 einher. Im Rahmen der KarstALEA Erkundung werden die nützlichen karstspezifischen Informationen für die Submission des Vorhabens erarbeitet. Sie beinhaltet sieben Bearbeitungsschritte, welche in der Abbildung 2 illustriert werden und im Kapitel 6 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, Auflageprojekt, Bauprojekt).
- 3) Die 3. Etappe „KarstALEA Bauausführung“ betrifft die Ausführungsphase (Kapitel 7). Die Anwendung der KarstALEA-Methode entspricht weitgehend jener der KarstALEA Erkundung. Die verwendeten Daten und die Fragenstellungen ändern jedoch (Daten / Fragestellungen die aus der Ausführung des Bauvorhabens hervorgehen). Während dieser Etappe werden gegebenenfalls die geplanten Massnahmen an die angetroffenen Verhältnisse und Schwierigkeiten 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.

Abb. 3-d : 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).

**Vorteile der KarstALEA-Methode**

Die KarstALEA-Methode führt insbesondere zu einer besseren Beurteilung der karstspezifischen Gefahren und Berücksichtigung der karstspezifischen Schwierigkeiten im Untertagbau. 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.

Tab. 1-d: Die wichtigsten Vorteile und Nutzen der KarstALEA-Methode

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



## Domaine d'application

La méthode KarstALEA est dédiée aux massifs karstiques carbonatés de Suisse. Son application est possible dans d'autres contextes avec certaines limitations ; le chapitre 4.7 les décrit de manière plus détaillée. Dans tous les cas, la prévision est conditionnée par la précision des modèles géologique et hydrogéologique du massif. Lorsque c'est possible, des données spéléologiques sur le massif concerné par un ouvrage sont souhaitables. Cependant, la méthode reste applicable en l'absence de telles données, car il est possible d'utiliser les informations de massifs voisins ou similaires pour la prévision.

Au-delà de la seule estimation des densités de conduits karstiques, la méthode KarstALEA permet aussi d'appréhender les caractéristiques des vides (taille, forme), des sédiments qu'ils peuvent contenir (nature, quantité), et des écoulements dans le massif karstique. Ceci permet d'évaluer les dangers liés au karst (zones KarstALEA).

C'est ensuite sur la base des données de densité de conduits et de l'évaluation de dangers que l'analyse des risques peut être menée et qu'une stratégie de mesures à prendre peut être établie.

## Principe de la méthode

La méthode est basée sur une série de lois générales régissant la formation des réseaux de conduits karstiques (spéléogénèse) et l'écoulement des eaux (hydrogéologie) dans les massifs karstiques. L'articulation de la méthode est explicitée au chapitre 4 et résumée sur la figure 2-f ci-après. La méthode s'applique de manière itérative où chaque itération est subdivisée en 7 pas correspondant aux 7 sous-chapitres du chapitre 6. Les deux premiers pas consistent à construire un modèle géologique (1) et hydrogéologique (2) du massif, très similaires à ceux préconisés par la norme SIA 199 mais de préférence en 3D. Les éléments novateurs principaux de la méthode KarstALEA sont l'utilisation d'un modèle spéléogénétique (modèle 3) et le concept d'horizon d'inception (modèle 4). En effet, l'étude de la géométrie des réseaux de cavernes explorés par les spéléologues a montré que les conduits karstiques se développent principalement le long d'un nombre restreint de surfaces géologiques. Ces surfaces sont généralement des horizons stratigraphiques particulièrement favorables au développement de la karstification, mais aussi parfois des plans de fractures. L'analyse montre que environ 70 % des conduits se développent le long de 3 à 5 plans représentant moins de 10 % du volume des massifs karstiques. Ces plans particulièrement successibles à la karstification sont appelés « horizons d'inception ». A ce constat s'ajoute le fait que les réseaux karstiques présentent des densités de conduits spécifiques dans différents domaines spéléogénétiques. Par exemple, des réseaux subhorizontaux se développent principalement à proximité du niveau de base hydrologique, c'est-à-dire du fond des vallées. L'enfoncement des vallées au fil du temps a induit une succession d'étages subhorizontaux de réseaux karstiques. La probabilité de trouver un conduit karstique est maximale à l'intersection entre les étages de réseaux karstiques (modèle 3) et les horizons d'inception (modèle 4). Elle augmente aussi en se rapprochant de la surface du terrain.

La combinaison des modèles spéléogénétiques et des horizons d'inception permet ainsi d'évaluer la distribution spatiale des densités de conduits karstiques en termes probabilistes (pas 5). Au pas 6 on combine les modèles 2 (hydrogéologique) et 3 (spéléogénétique) pour caractériser les vides karstiques (zones KarstALEA). Ces informations (densité et zones KarstALEA) permettent alors d'évaluer les dangers, les risques pour l'ouvrage et les mesures à envisager (pas 7).

Les données nécessaires à chaque pas de chaque itération sont acquises au fil des phases partielles selon la SIA 197 de manière à répondre aux questions pratiques relatives à chaque phase partielle du projet.

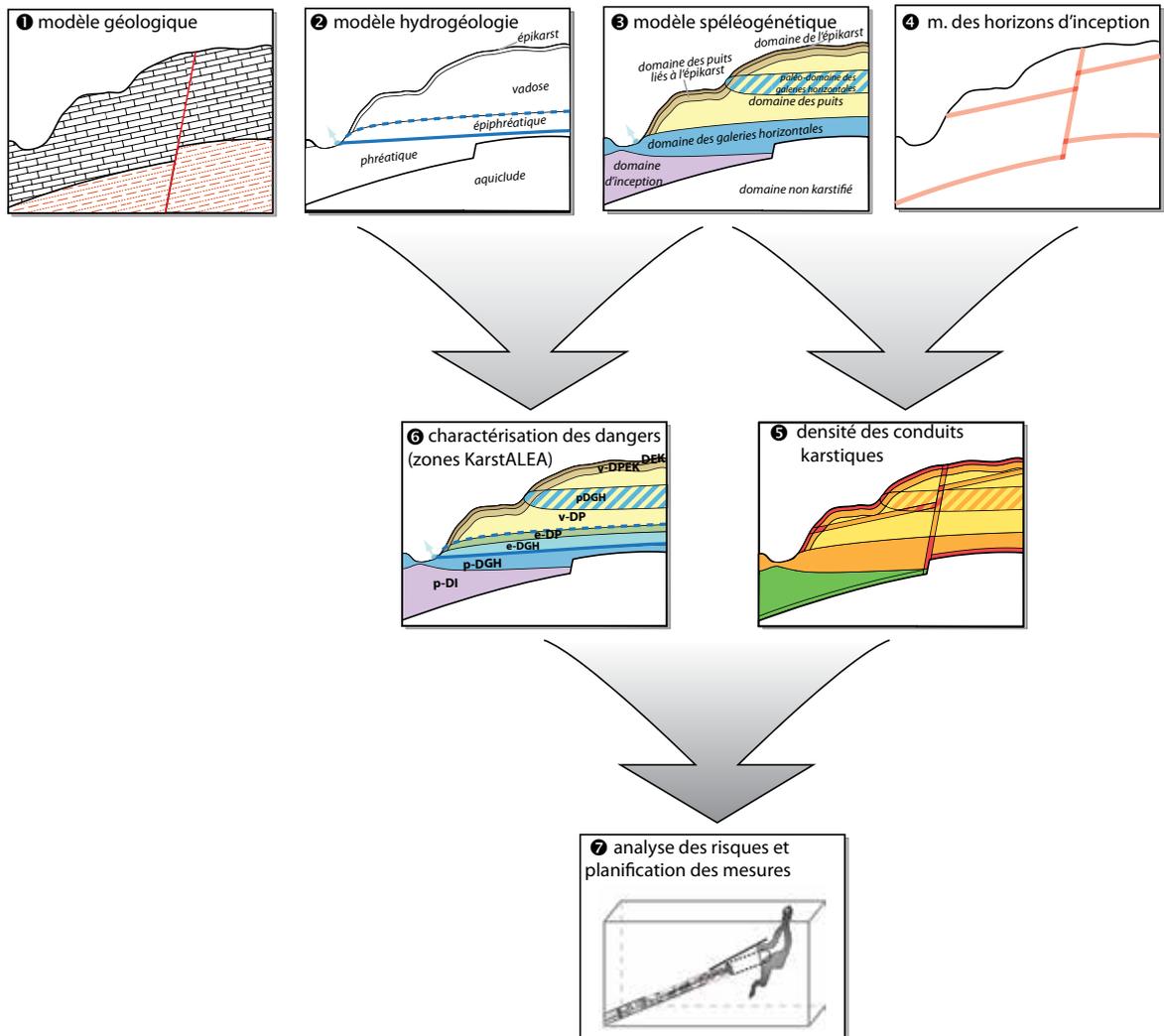


Fig. 2-f : Principe de la méthode KarstALEA en 7 pas successifs.

Quatre représentations 3D du massif (modèles) sont construites (pas 1 à 4). Aux pas 5 et 6, les zones avec les plus fortes probabilités d'occurrences de conduits karstiques et leurs caractéristiques (zones KarstALEA) sont interprétées. Au pas 7, les dangers, risques et mesures sont discutées entre le géologue et l'ingénieur responsable. Ce cycle de 7 pas est répété avec une précision croissante des modèles au fil de l'avancement du projet.

Une partie des principes utilisés par la méthode KarstALEA est connue de longue date par les spécialistes du karst. La méthode KarstALEA propose cependant pour la première fois une synthèse des connaissances existantes dédiée à l'évaluation du problème « karst » pour la construction d'ouvrages souterrains. Dans le détail de son application, elle s'adresse aux géologues de tunnels, mais certains chapitres (1, 2, 4 et 8) doivent aussi permettre aux maîtres d'ouvrages et aux ingénieurs constructeurs d'évaluer le champ d'application, les principes et l'intérêt de la méthode pour la construction d'un ouvrage. D'un point de vue pratique, les tableaux des annexes I à VI ont été conçus à l'attention des géologues, et devraient suffire à appliquer la méthode, moyennant d'en avoir acquis une compréhension suffisante.

## La méthode KarstALEA et les phases d'un projet

La méthode s'applique en trois grandes étapes (Fig. 3-f).

- 1) La première étape (KarstALEA-évaluation initiale) intervient immédiatement au début des études préliminaires ou pendant la « définition des objectifs ». Elle vise à définir si l'ouvrage envisagé, y compris ses variantes de tracés, présente un risque lié au karst ou non. Si la réponse est « oui » alors la méthode KarstALEA sera un complément utile aux investigations selon la SIA 199 et il convient de passer à l'étape 2. Si la réponse est « non », il est inutile de poursuivre avec KarstALEA. Les détails concernant cette étape sont décrits au chapitre 5.
- 2) La deuxième étape (KarstALEA-reconnaissance) commence pendant les « études préliminaires » et se poursuit tout au long la « phase d'étude de projet » selon la norme SIA 197. Cette étape doit fournir toutes les réponses utiles aux documents de soumission du projet. Elle contient les 7 pas décrits dans la figure 2-f et est décrite en détail dans le chapitre 6. La méthode est itérative et la précision de la prévision s'améliore en fonction des besoins de chaque phase partielle du projet (études préliminaires, avant-projet, dossier de mise à l'enquête, projet de l'ouvrage).
- 3) La troisième étape concerne la phase d'exécution du projet (KarstALEA-exécution ; chapitre 7). L'application de KarstALEA reste très similaire à celle de la phase 2, mais la nature des données et questions change (données/questions issues de la construction de l'ouvrage). Cette phase nécessite une éventuelle adaptation des mesures constructives initialement prévues pour résoudre les problèmes concrets liés à l'exécution de l'ouvrage. Les modèles KarstALEA constituent alors une précieuse aide à la décision. Le rapport final de cette étape décrit le contenu des mesures « karst » pour la phase exploitation de l'ouvrage.

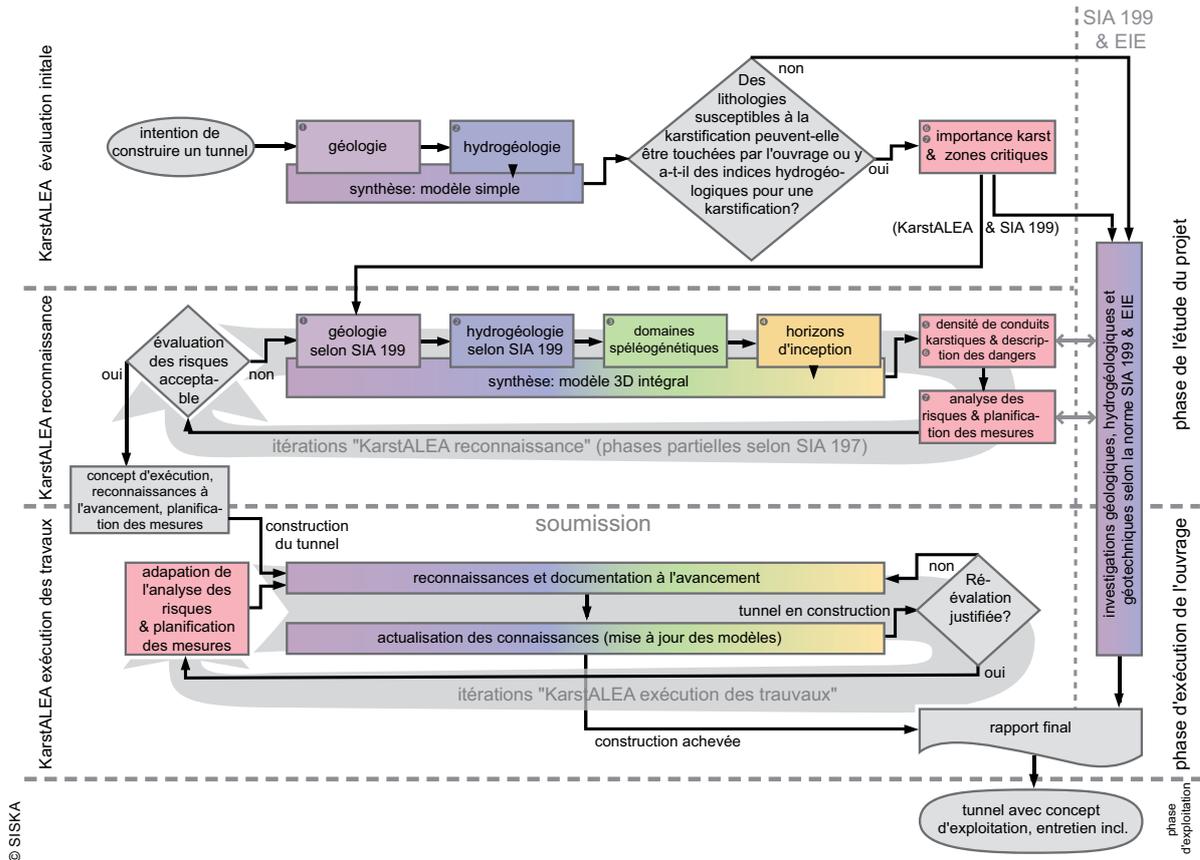


Fig. 3-f : Le déroulement des études KarstALEA

Les trois grandes étapes de la méthode KarstALEA sont 1) la « KarstALEA évaluation initiale » (début des études préliminaires), 2) la « KarstALEA reconnaissance » (phase d'étude de projet) et 3) la « KarstALEA exécution des travaux » (phase d'exécution de l'ouvrage).

### Avantages de la méthode

La méthode KarstALEA améliore notablement l'évaluation et la prise en compte des problèmes karstiques pour la construction d'ouvrages souterrains. Elle apporte également des informations fondamentales pour l'évaluation et la gestion de l'impact du projet sur l'environnement. Le tableau suivant esquisse les avantages principaux de la méthode en fonction des étapes d'un projet et pour les différents partenaires de projets.

Tab. 1-f: Les avantages et bénéfices principaux de la méthode KarstALEA

<b>Principes</b>	Méthode scientifiquement fondée et applicable dans la pratique Effort d'investigation supplémentaire faible par rapport aux études usuelles selon la SIA 199
<b>Phase d'étude du projet</b>	Evaluation des dangers différenciée et adaptée à l'avancement du projet. Rend possible l'anticipation des dangers liés au karst et leur gestion pour un coût supportable. Aide à choisir le tracé optimal. Permet d'établir un concept adapté de reconnaissance à l'avancement et une planification des mesures appropriée. Peut être appliqué dans le cadre des investigations prévues selon la SIA 199.
<b>Phase d'exécution de l'ouvrage</b>	Les techniques de reconnaissances à l'avancement et les techniques d'excavation et de stabilisation peuvent être adaptées aux conditions.
<b>Phase d'exploitation</b>	Les dangers karstiques pouvant affecter le tunnel lors de son exploitation sont mieux connus et localisés. Support pour l'élaboration de plan d'exploitation
<b>Maître d'ouvrage</b>	Meilleure planification en respectant les délais et les coûts
<b>Mandataires &amp; entrepreneurs</b>	Peut se baser sur une description différenciée des conditions à rencontrer
<b>Géologue</b>	Dispose d'une méthode d'investigation ciblée pour prévoir les dangers karstiques
<b>Autorité de contrôle (environnement)</b>	Réduction d'impacts sur l'environnement attendus Support utile pour l'élaboration de l'étude d'impact sur l'environnement dans le domaine des eaux (mais ne la remplace pas !) Peut surveiller d'une manière plus ciblée les impacts d'un projet de travaux souterrain sur l'environnement

# Synthesis

## KarstALEA : a practical guide for the prediction of karst-related hazards in underground works

### Context, aim and result

The excavation of tunnels in karst environments commonly meets problems with severe consequences in terms of delay, technical difficulties and safety, all of which may have high cost implications. Some rocks (mainly limestone and gypsum) are soluble in groundwater, in processes that create underground voids (including large caves) over time; these pose various specific problems for the construction of tunnels or artificial caverns within any karst massif.

Three major types of problems are associated with karstification:

- 1) Underground voids, with respect to anchoring and securing structures;
- 2) Sediments within karstic voids, with respect to swelling or settlement, debris flows, clogging of tunneling machinery, etc.;
- 3) Water, which may be present under high pressure and/or in large quantities.

The crossing of karstic voids is a problem for the underground works themselves, but is also an issue concerning the impact of the project on the environment, especially on groundwater and springs.

The practical guide KarstALEA is designed for use by geologists who are working on underground projects. Its aim is to provide a practical method for the assessment of ground conditions and geohazards within karst massifs, as an add-on to the SIA 199 codes and guidelines. The approach used by KarstALEA is compatible with that of SIA 199, and requires largely the same input data. Specific interpretations of the data and complementary indications are required for the application of KarstALEA. As results, it gives clear indications on the probability of occurrence of karst conduits in respective sections of the tunnel, and also indicates some characteristics of the voids likely to be encountered (size, shape, water pressure, water discharges, presence and types of sediments, etc.). These results are presented in a longitudinal profile of the tunnel in a similar way to other SIA 199 data. An example is given on figure 1-e.

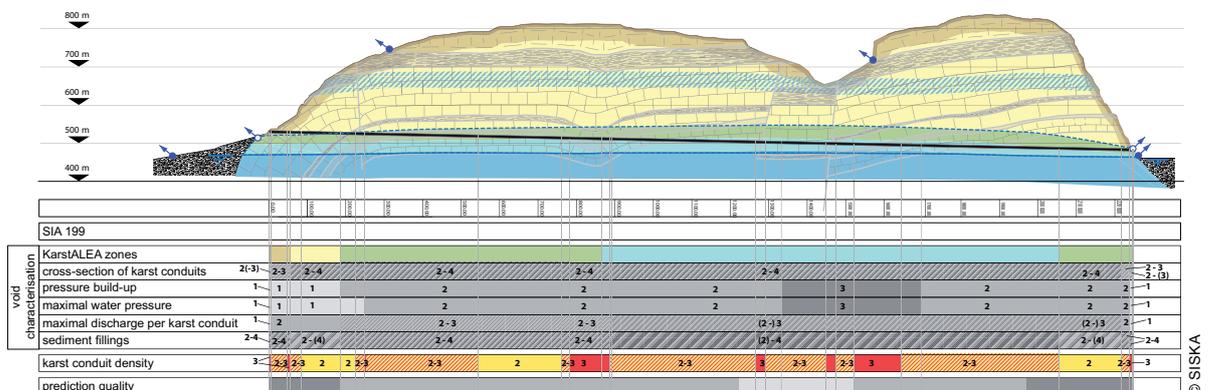


Fig. 1-e: Provisional KarstALEA profile.

The KarstALEA method provides a series of karst-specific indications (characteristics of the conduits and expected karst conduit density) in the respective tunnel sections, which are added to those provided by studies related to the SIA 199 codes.

## Application domain

The KarstALEA method has been developed first and mainly for carbonate massifs in Switzerland. Its application in other contexts is possible, with some limitations; Chapter 4.7 describes these in more detail. In all cases, predictions are limited by the precision of the geological and hydrogeological models of the massif. When possible, speleological data (notably cave maps) for the massif containing the project site are very welcome. However, the method can still be applied without such data, using indications from neighboring or similar massifs.

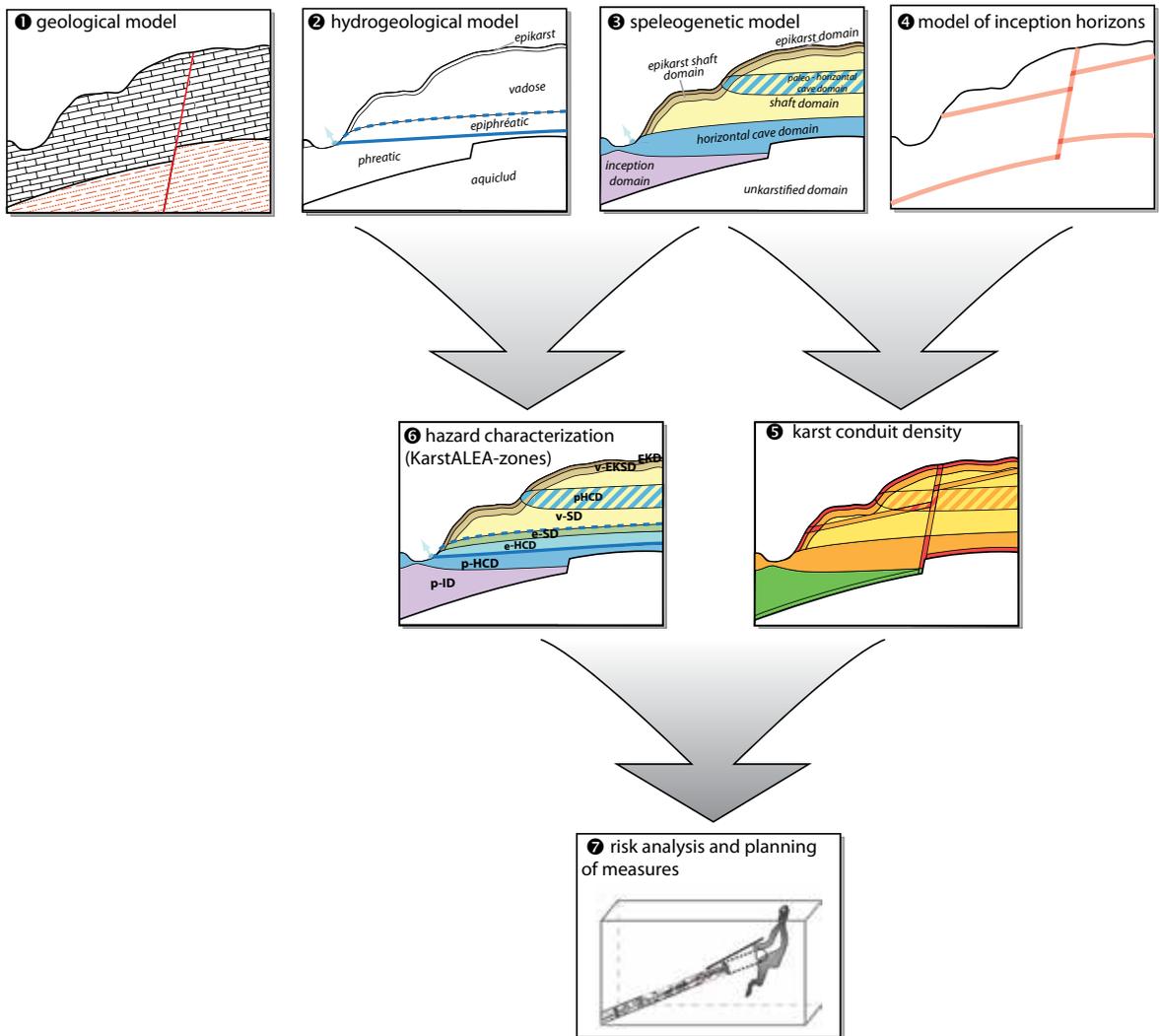
Besides the assessment of expected conduit density along the tunnel, KarstALEA also provides some characteristics of the voids (size and shape), of the sediments they may enclose (type and quantity), and of water flow (head and discharge). This information is then used to assess the karst-related hazards (expressed in KarstALEA zones). A strategy concerning construction methods can then be established based on this knowledge.

## KarstALEA background and principle

The method is based on a series of general laws known to control the development of karst conduit networks (speleogenesis) and groundwater flow in karst massifs (karst hydrogeology). Details on the method's principles are presented in chapter 4 and are summarized on figure 2-e below. KarstALEA is applied in an iterative process where each iteration-loop is made of 7 steps corresponding to the 7 sub-sections of chapter 6. The two first steps consist of the construction of geological and hydrogeological models (1 and 2) of the massif, similar to the recommendation of the SIA 199 code, but preferably in 3D. Novel elements of KarstALEA are the introduction of a speleogenetic model (3) and of an inception-horizon model (4). The main reason for including these is that the study of cave networks explored and surveyed by cavers shows that karst conduits preferentially develop along a restricted number of geological planes and features. These planes are most commonly stratigraphic horizons, but may also be joints or faults, all of which are very susceptible to karst development. Experience indicates that 70% of the conduits may develop along typically 3 to 5 discrete horizons representing less than 10% of the limestone volume. These planes are known as inception horizons. Superimposed on the inception of caves along these horizons, it is well known that karst conduit networks develop with specific density and characteristics within so-called speleogenetic domains. Notably, horizontal networks of caves mainly develop close to the regional base-level, i.e. close to the floors of the main valleys. Progressive valley entrenchment over time may therefore induce a series of successive levels of sub-horizontal cave passages. Consequently, the probability of occurrence of cave passage is highest at the intersections between these cave levels (model 3) and the inception horizons (model 4). In addition there is commonly an increase in void density at shallow depths below the ground surface.

The combination of speleogenetic models and inception horizons thus provides a probabilistic assessment of the "karst conduit density" (step 5). In step 6, models 2 (hydrogeology) and 3 (speleogenesis) are combined in order to characterize the voids in order to obtain the KarstALEA zones. Both indications (karst conduit density and KarstALEA zones) are combined in step 7 in order to assess karst hazards, risks for the construction and environmental risks. This step is also indicative of appropriate mitigation measures.

Necessary data for each step of each iteration-loop are acquired along sub-phases defined by the SIA 197 code, in order to address practical questions related to the respective sub-phases.



*Fig. 2-e: Principle of the KarstALEA method in 7 successive steps. Four 3D representations of the massif (models) are constructed in steps 1 to 4. In steps 5 and 6 zones with the highest expected densities of karst conduits and their characteristics are interpreted. In step 7 hazards, risks and mitigation measures are identified and discussed between the tunnel geologist and the tunnel engineer. Throughout progress on the project, this cycle of 7 steps is repeated with increasing precision.*

Many of the principles used in KarstALEA have been well known by karst specialists for many decades. However, for the first time, the present practical guide synthesizes this knowledge for a practical assessment of karst-related problems in underground construction projects. This method and the details of its application are explicitly designed for use by the tunnel geologists. However, chapters 1, 2, 4 and 8 should help contracting authorities, as well as civil engineers to assess the principles, applications and advantages of the method for successful tunnel construction in karst massifs. From a practical point of view, tables in annexes I to VI have been prepared in a way that should support the tunnel geologist. They should be sufficient to apply the method once an appropriate degree of knowledge and understanding has been acquired.

## The KarstALEA method and the project phases

The method is applied in three main stages (Fig. 3-e):

- 1) Stage 1 “KarstALEA initial assessment” takes place at the beginning of the “preliminary study” or even during the stage of objectives definition. The aim is to define if the tunnel can be constructed, within the range of its various potential alignments, and whether or not it presents karst-related hazards. If the presence of karst is recognized, then the KarstALEA method should be applied as a useful addition to the usual SIA 199 investigations, and should proceed to stage 2. If karst is not identified, it is not useful to continue with KarstALEA. Details concerning this stage (KarstALEA initial assessment) are described in chapter 5.
- 2) Stage 2 “KarstALEA investigations” starts in the preliminary study and extends all through the project study phase. This stage provides the necessary inputs to prepare the tender documents for the construction. It includes the seven steps presented in figure 2-e, and is described in detail in chapter 6. The method is applied iteratively and the precision of any predictions should improve in line with the requirements of successive sub-phases of the project (preliminary studies, pre-project, call for tender, detailed project planning).
- 3) Stage 3 “KarstALEA construction” takes place throughout the construction phase of the project. The application of KarstALEA remains very similar to stage 2, but the nature of both the confirmed data and the unresolved problems changes as the project evolves and new information comes from the construction face. During this stage, some previously defined construction guidelines may have to be adjusted in order to solve new problems that occur as construction progresses. KarstALEA models that are developed and improved during stages 2 and 3 are very valuable for making engineering decisions. The final report of this stage describes the karst and suggests guidelines appropriate for the operation and maintenance of the completed tunnel.

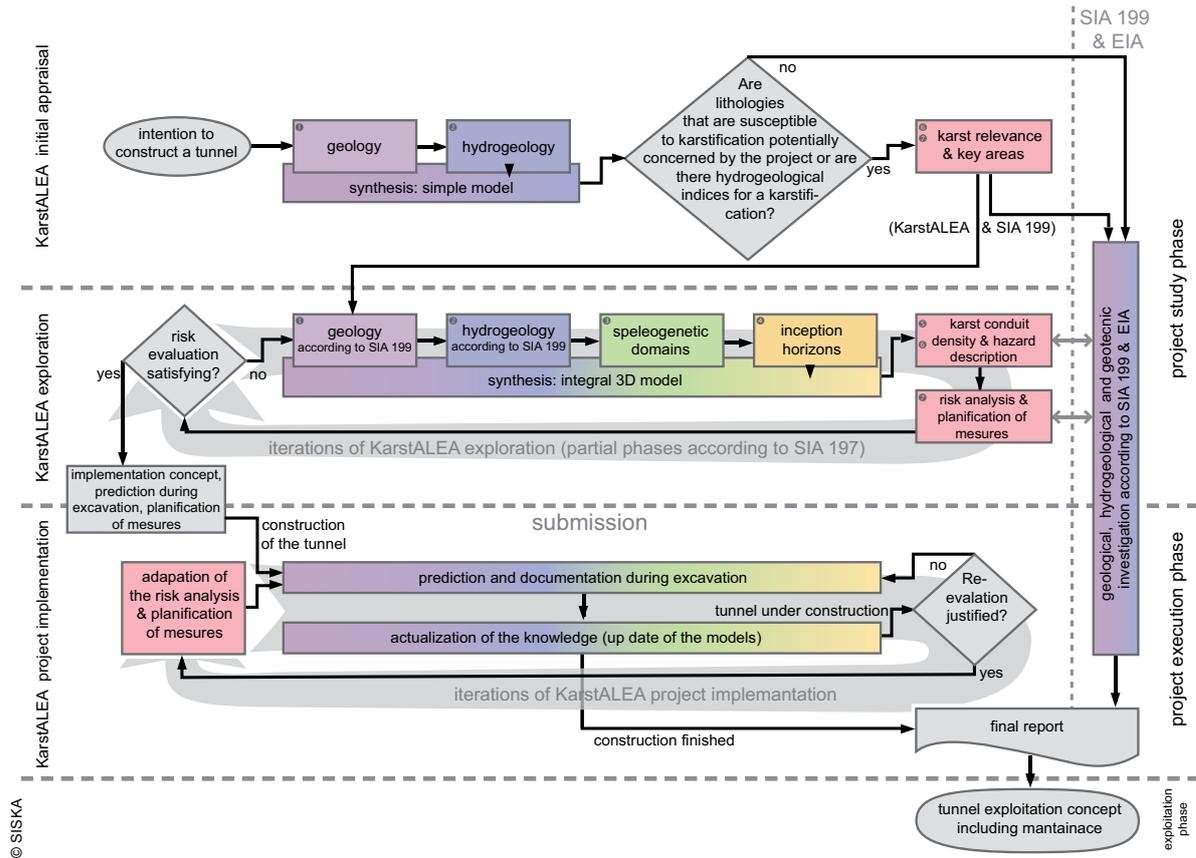


Fig. 3-e: Progress of the KarstALEA method. The three main application stages of KarstALEA are: 1) “KarstALEA initial assessment” (at the very beginning of the preliminary studies), 2) “KarstALEA investigations” (during the “project” phase), and 3) “KarstALEA construction” (throughout the “construction” phase).

### KarstALEA strengths

This method considerably improves the assessment and consideration of karst-related problems that may be encountered during underground construction works in karst ground. It also introduces fundamental insights concerning the impact assessment of the construction on the environment. Table 1 outlines the main strengths of the method to the benefit of the project phases and of the engineers and partners within the project.

Table 1-e: Main strengths and benefits provided by the KarstALEA method

<b>Principle</b>	<p>Scientifically founded method, applicable in practical situations</p> <p>Low additional effort compared to usual SIA 199 recommended investigations</p>
<b>Project phase</b>	<p>Differentiated assessment of karst-related hazards according to needs of the project progress</p> <p>Possible anticipation of karst-related hazards and their management within a reasonable cost</p> <p>Help for decision to select the best tunnel alignment (by considering the probability of karst occurrences within respective parts of a massif)</p> <p>Help for the establishment of an adequate programme of borehole exploration and design of appropriate mitigation measures</p> <p>Can be applied directly within the framework of the investigations recommended by the SIA 199 codes and guidelines</p>
<b>Construction phase</b>	<p>Investigations during tunnel excavation and measures related to civil engineering can be adjusted to field conditions</p>
<b>Operation phase</b>	<p>Karst hazards that could potentially affect the tunnel during its operation are better known and their potential locations are better defined</p> <p>Help for the establishment of a plan for the tunnel operation</p>
<b>Contracting authority</b>	<p>Improved planning, including better opportunity of respecting deadlines and costs</p>
<b>Planners and companies</b>	<p>A differentiated and adequate description of the expected conditions is available</p>
<b>Tunnel geologist</b>	<p>An adequate and dedicated method for better predicting karst-related hazards</p>
<b>Inspection authority (environment)</b>	<p>Expected impacts of the project on the environment can be monitored in a targeted manner</p> <p>Impacts on the environment are reduced thanks to a better understanding of the karst conditions</p> <p>Provides a clear support for elaboration of environmental impact studies (but does not replace them!)</p>



## Campo di applicazione

Il metodo KarstALEA è dedicato ai massicci carsici e carbonatici svizzeri. È possibile applicarlo in altri contesti, ma entro certi limiti; il capitolo 4.7 li descrive in modo più dettagliato. In ogni caso la previsione è condizionata dalla precisione dei modelli geologici e idrogeologici del massiccio. Se possibile, è meglio cercare di ottenere anche dei dati speleologici del massiccio in questione. Tuttavia il metodo rimane comunque applicabile anche senza questo tipo di dati. Si possono usare dei dati di massicci vicini o analoghi per la previsione.

In più della stima della densità dei condotti carsici, il metodo KarstALEA permette anche di caratterizzare questi vuoti (taglia, forma), i sedimenti che possono eventualmente contenere, e i flussi di acqua nel massiccio. Questo permette di valutare i pericoli legati al carso (zone KarstALEA).

Si può quindi procedere all'analisi dei rischi e alla definizione di una strategia di misure, sulla base di questi dati di densità di condotti e le loro caratteristiche.

## Principio del metodo

Il metodo è basato su una serie di leggi generali che riguardano la formazione dei reticoli di condotti carsici (speleogenesi) e dello scorrimento dell'acqua (idrogeologia) nei massicci carsificati. Il metodo è spiegato dettagliatamente al capitolo 4 e nella figura 2-i. Lo si applica in modo iterativo, e ogni iterazione è divisa in 7 stadi, che corrispondono ai 7 sottocapitoli del capitolo 6. I due primi stadi consistono nel costruire un modello geologico (1) e idrogeologico (2) del massiccio, molto simili a quelli raccomandati dalla norma SIA 199, ma preferibilmente in 3D. Gli elementi innovativi principali del metodo KarstALEA sono l'utilizzo di un modello speleogenetico (modello 3) e il concetto di orizzonti di inizializzazione (modello 4). In effetti, lo studio della geometria dei reticoli carsici esplorati dagli speleologi ha mostrato che i condotti carsici si sviluppano principalmente lungo un numero ristretto di superfici geologiche. Queste superfici sono in generale degli orizzonti stratigrafici particolarmente favorevoli allo sviluppo della carsificazione, ma a volte anche dei piani di fratture. L'analisi dimostra che circa 70% dei condotti carsici si sviluppano lungo pochi piani (da 3 a 5 solitamente) che nel complesso rappresentano meno del 10% del volume dei massicci carsici. Questi orizzonti particolarmente predisposti alla carsificazione sono chiamati « orizzonti di inizializzazione ». Inoltre, a questa constatazione si aggiunge anche il fatto che i reticoli carsici presentano delle densità diverse secondo i diversi ambienti speleogenetici. Per esempio, delle reti sub-orizzontali si sviluppano principalmente in prossimità del livello di base idrologico, cioè il fondo delle valli. L'abbassamento del fondo delle valli nel tempo induce una successione di piani sub-orizzontali di reticoli carsici. La probabilità di trovare un condotto è massima all'intersezione tra i piani dei reticoli carsici (modello 3) e gli orizzonti di inizializzazione (modello 4). Aumenta quindi con l'avvicinarsi della superficie del terreno.

La combinazione dei modelli speleogenetici e degli orizzonti di inizializzazione permette quindi di valutare la distribuzione spaziale delle densità dei condotti carsici in termini probabilistici (stadio 5). Allo stadio 6 i modelli 2 (idrogeologia) e 3 (speleogenetico) vengono combinati per caratterizzare i vuoti carsici (zone KarstALEA). Queste informazioni (densità e zone KarstALEA) permettono quindi di valutare i pericoli, i rischi per l'opera e le misure da considerare (stadio 7).

I dati necessari ad ogni iterazione vengono acquisiti durante le fasi parziali secondo SIA 199, in modo da rispondere alle domande pratiche relative ad ogni fase parziale del progetto.

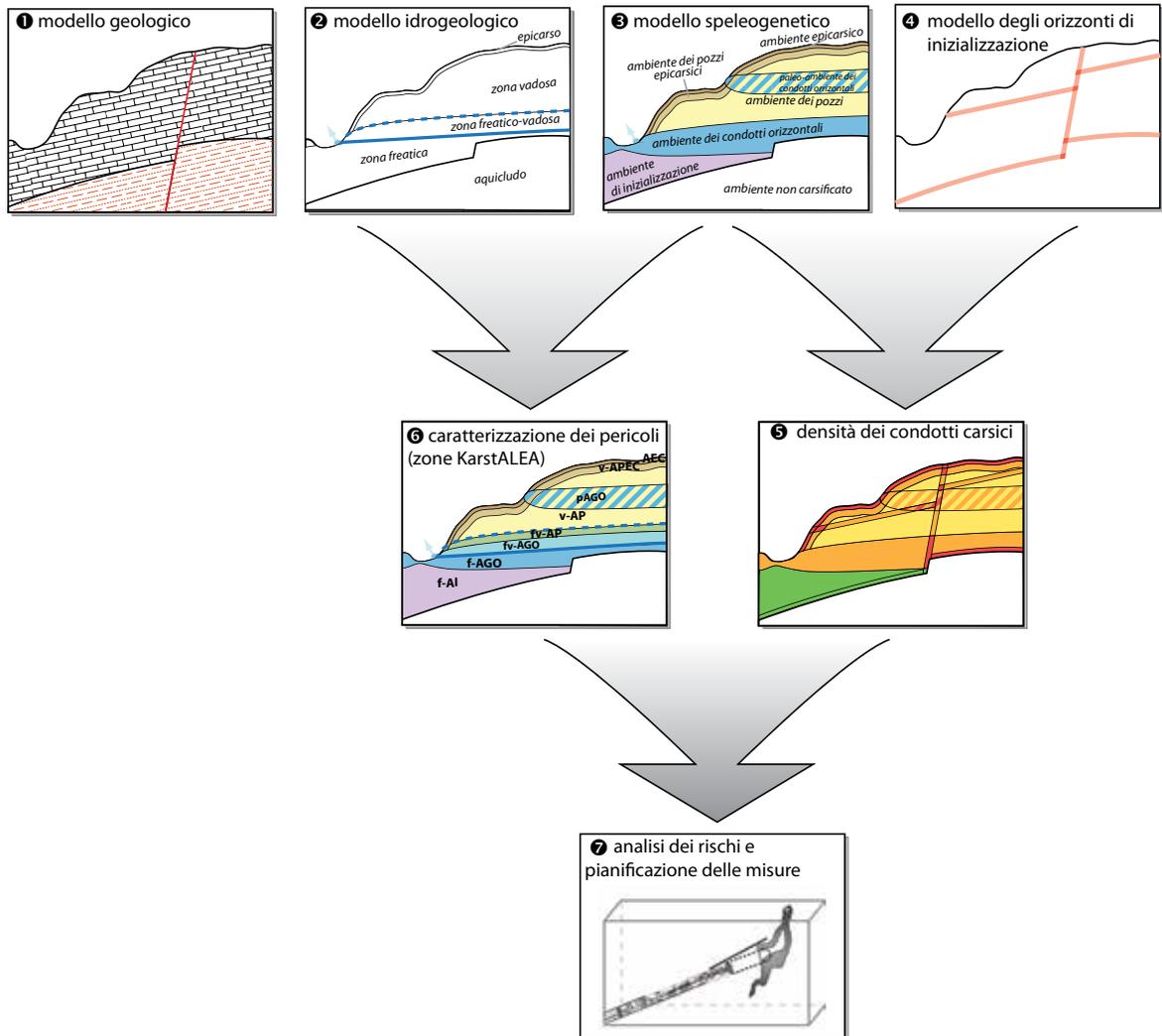


Fig. 2-i : Principio del metodo KarstALEA in 7 stadi successivi

Quattro rappresentazioni 3D del massiccio (modelli) sono costruite (stadi 1 a 4). Agli stadi 5 e 6, si definiscono le zone con le maggiori probabilità di incontrare dei condotti carsici e le loro caratteristiche (zone KarstALEA). Al quinto stadio i geologi e gli ingegneri responsabili discutono i pericoli, i rischi e le misure. Questo ciclo di 7 stadi viene ripetuto con precisione crescente durante l'avanzamento del progetto

Una parte dei principi utilizzati nel metodo KarstALEA è conosciuta da parecchio tempo dagli specialisti del carso. Queste istruzioni pratiche propongono tuttavia per la prima volta una sintesi delle conoscenze esistenti dedicata alla valutazione del problema « carso » per la costruzione di opere sotterranee. I suoi dettagli di applicazione sono indirizzati ai geologi di terreno, ma alcuni capitoli (1, 2, 4 e 8) permettono anche ai padroni di lavoro e agli ingegneri di cantiere di valutarne il campo di applicazione, i principi e l'interesse per la costruzione di un'opera. Da un punto di vista pratico, per il geologo, le tabelle degli annessi I a VI sono state concepite per essere sufficienti per applicare il metodo, a condizione di averne preso conoscenza in modo adeguato.

## Il metodo KarstALEA e le fasi di un progetto

Il metodo viene applicato in tre tappe principali (Fig. 3-i):

- 1) Una parte dei principi utilizzati nel metodo KarstALEA è conosciuta da parecchio tempo dagli specialisti del carso. Il metodo KarstALEA propone tuttavia per la prima volta una sintesi delle conoscenze esistenti dedicata alla valutazione del problema « carso » per la costruzione di opere sotterranee. I suoi dettagli di applicazione sono indirizzati ai geologi di terreno, ma alcuni capitoli (1, 2, 4 e 8) permettono anche ai padroni di lavoro e agli ingegneri di cantiere di valutarne il campo di applicazione, i principi e l'interesse per la costruzione di un'opera. Da preliminari. Il suo scopo è definire se l'opera in questione può (comprese le sue varianti di tracciato) essere soggetta ad un rischio legato al carso. Se la risposta è « sì » il metodo KarstALEA sarà un complemento utile alle investigazioni secondo SIA 199 e conviene passare alla fase 2. Se la risposta è « no » è inutile proseguire con KarstALEA. I dettagli che riguardano questa fase sono descritti al capitolo 5.
- 2) La seconda fase (KarstALEA ricognizione) inizia durante gli studi preliminari e prosegue durante tutta la fase di progettazione (ISA 197). Questa tappa deve fornire le risposte utili per i documenti di sottomissione del progetto. Contiene i 7 stadi descritti nella figura 2-i ed è descritta dettagliatamente al capitolo 6. Il metodo è iterativo e la precisione della previsione migliora in funzione dei bisogni di ogni fase parziale del progetto (studi preliminare, fase di progettazione, progetto di pubblicazione, progetto definitivo).
- 3) La terza fase riguarda la fase di realizzazione (KarstALEA esecuzione dei lavori). L'applicazione di KarstALEA rimane molto simile a quella della fase 2, ma cambiano la natura dei dati e delle domande (dati e domande relative alla realizzazione dell'opera). Questa fase può eventualmente necessitare un adattamento delle misure di costruzione previste inizialmente per risolvere i problemi concreti legati alla realizzazione dell'opera. I modelli KarstALEA costituiscono quindi un prezioso aiuto di decisione. Il rapporto finale descrive il contenuto delle misure « carso » per la fase di gestione dell'opera

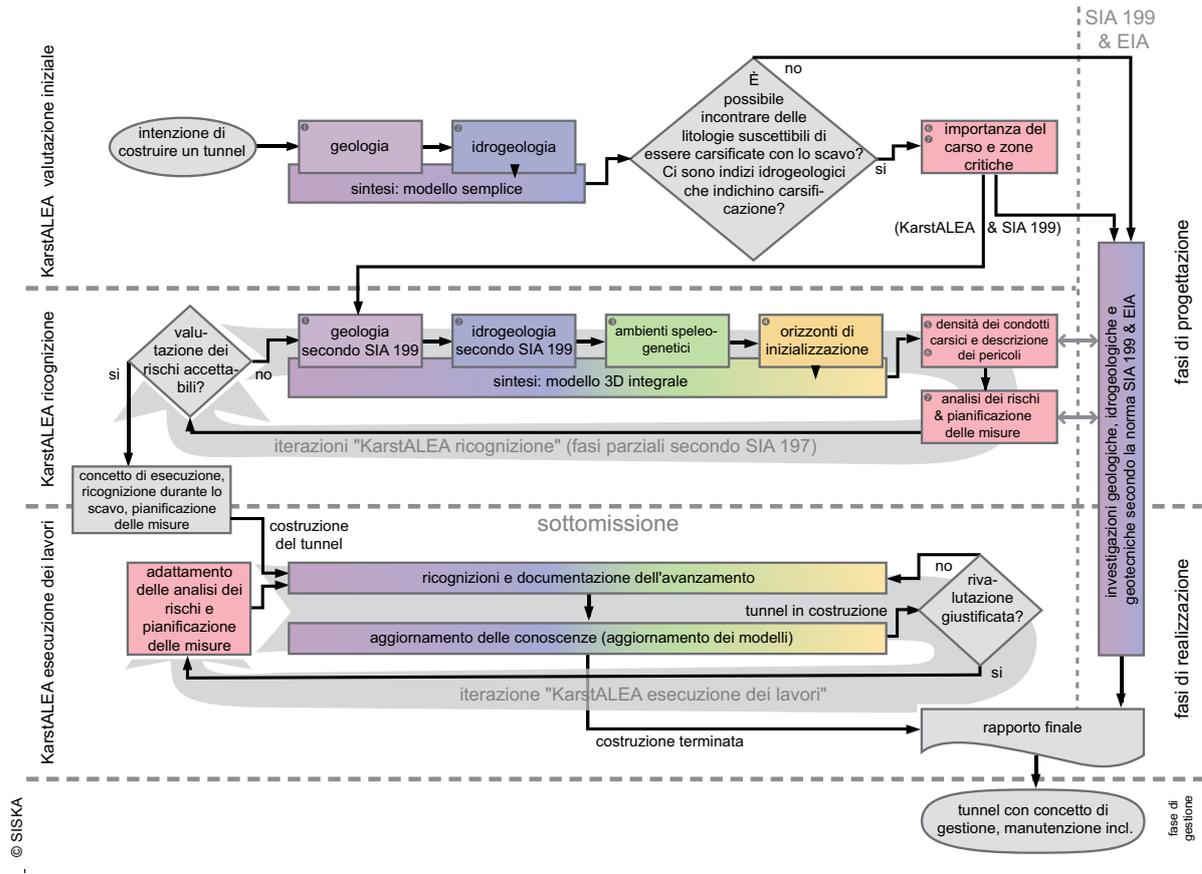


Fig. 3-i : sviluppo degli studi KarstALEA

Le 3 fasi principale del metodo KarstALEA sono 1) KarstALEA valutazione iniziale (inizio degli studi preliminari), 2) KarstALEA ricognizione (fase di progettazione) e 3) KarstALEA esecuzione dei lavori (fase di realizzazione dell'opera)

### Vantaggi del metodo

Il metodo KarstALEA migliora notevolmente la valutazione e la considerazione dei problemi carsici per la costruzione di opere sotterranee. Inoltre porta della informazioni fondamentali per la valutazione e la gestione dell'impatto ambientale del progetto. La tabella qui sotto mostra i vantaggi principali del metodo in funzione delle fasi del progetto e per i diversi interlocutori del progetto.

Tab. 1-i: Vantaggi e benefici principali del metodo KarstALEA

<b>Principi</b>	Metodo basato su considerazioni scientifiche e applicabile Sforzo d'investigazione supplementare ridotto rispetto agli studi convenzionale secondo SIA 199
<b>Fase di progettazione</b>	Valutazione dei pericoli differenziata e adatta al progresso del progetto Rende possibile l'anticipazione dei pericoli legati al carso e la loro gestione con un costo sopportabile Aiuta a scegliere il tracciato ottimale. Permette di concepire correttamente la ricognizione e la pianificazione delle misure. Può essere applicata nell'ambito delle investigazioni previste dalla SIA 199.
<b>Fase di realizzazione</b>	Le tecniche di ricognizione durante l'avanzamento e le tecniche di scavo e stabilizzazione possono essere adattate alle condizioni.
<b>Fase di gestione</b>	I pericoli carsici che possono condizionare il tunnel durante il suo utilizzo sono conosciuti meglio e localizzati Supporto per l'elaborazione del piano di gestione
<b>Padrone di lavoro</b>	Migliore pianificazione che rispetta meglio i costi e i tempi
<b>Mandatari ed impresari</b>	Ci si può basare su una descrizione differenziata delle condizioni da incontrare
<b>Geologo</b>	Dispone di un metodo di investigazione mirato per prevenire i pericoli carsici
<b>Autorità di controllo (ambiente)</b>	Riduzione dell'impatto ambientale Supporto utile per elaborare degli studi d'impatto ambientale per quanto riguarda le acque (ma non li sostituisce !) Può sorvegliare in modo più mirato gli impatti ambientali di un'opera sotterranea

# 1 Einleitung

Der Karst ist ein besonderes geologisches Milieu. Die Lösungsfähigkeit des Gesteins führt zu spezifischen Landschaftsformen und einer charakteristischen Hydrologie. Bei Bauvorhaben zeigt sich dies in Form von Hohlräumen im Untergrund, z.T. bedeutende Sedimentverfüllungen und massive permanente oder temporäre Wasserzutritte.

Häufig werden im Rahmen der Ausbildung der Geologen und Ingenieure nur wenige Teilaspekte des Karstes behandelt. Der Karst wird daher häufig als ein sehr komplexer und schwer zu prognostizierender Baugrund beschrieben. Baunormen, Praxishilfen und andere Empfehlungen erwähnen den Karst meist als ein Milieu, indem die üblichen Methoden nicht anwendbar sind oder angepasst werden müssen. Dies trifft auch auf SIA-Norm 199 zur „Erfassen des Gebirges im Untertagbau“ zu. In der Regel wird allerdings keine Alternativmethode für die Behandlung des Karstes vorgeschlagen, so dass dieser weiterhin als zufällig betrachtet wird.

Karst ist auf etwa 20 % der Fläche der Schweiz aufgeschlossen und führt wahrscheinlich aufgrund seiner Eigenheiten zu mehr als 20 % der geologiebedingten Kostenüberschreitungen im Untertagbau. Der Karst war vor 50 Jahren tatsächlich noch relativ schlecht bekannt. Inzwischen hat die Wissenschaft jedoch bedeutende Fortschritte beim Verständnis dieses Milieus gemacht. Die Erforschung, Vermessung und 3D-Darstellung von weitläufigen Höhlensystemen ist ein Element dieser Fortschritte, die Weiterentwicklung der speläogenetischen und hydrogeologischen Grundlagen sowie die Simulation des Abflusses und der Entstehung der Karströhrensysteme ein anderer.

Das Hauptziel der vorliegenden Wegleitung ist diese Kenntnisse in die Praxis des Tunnelbaus zu übertragen. Die vorgeschlagenen KarstALEA-Methoden haben weder den Anspruch, alle karstbedingten Probleme zu vermeiden oder zu lösen, noch alle diesbezüglichen Fragen zu beantworten. Sie soll dem Anwender erlauben, die Auftretenswahrscheinlichkeit, die Lage und die Eigenschaften der Karsthohlräume im Kalksteingebirge besser einzuschätzen. Die Methode basiert auf der Tatsache, dass rund 70 % der Karströhren auf wenigen geologischen Trennflächen entstanden. Weiter variiert die Karströhrendichte je nach Position innerhalb des Gebirges bezüglich der aktuellen und vergangenen hydrogeologischen Bedingungen. So treten sie zum Beispiel in gewissen Höhenlagen gehäuft auf, welche früheren Vorfluterniveaus entsprechen (Paläo-Talböden). Die Ausscheidung dieser Trennflächen und der Paläovorfluterniveaus ermöglicht, Zonen mit erhöhter Karströhrendichte auszuscheiden. Kenntnisse zur Hydrogeologie und zur Verkarstungsgeschichte des Gebirges ermöglichen weiter gewisse Eigenschaften dieser Hohlräume zu prognostizieren (Grösse und Form der Hohlräume, Menge und Art der Sedimente, zu erwartende Schüttung etc.).

Diese Wegleitung richtet sich in erster Line an den beratenden Geologen und zeigt auf, wie die Schlüsselemente bestimmt und welche Methoden angewendet werden können, um das Gebirge bezüglich der Verkarstung zu charakterisieren. Die Kapitel 2 und 4 ermöglichen einen allgemeinen Überblick über die KarstALEA-Methode und den Prinzipien, auf welche die Methode basiert. Diese beiden Kapitel richten sich auch an die involvierten Planer und den Bauherrn. Das Kapitel 3 fasst die wissenschaftlichen Grundlagen zusammen, auf denen die Methode aufbaut. Die Kapitel 5 und Folgende beschreiben detailliert, wie die Methode angewendet werden kann. Sie richten sich weitgehend an den beratenden Geologen. Die Anhänge I bis III ermöglichen einen Überblick über den Ablauf einer KarstALEA-Untersuchung, die vorgeschlagenen Methoden und die erwarteten Resultate.

Auf folgende drei Punkte möchten wir noch hinweisen:

- 1) Im vorliegenden Dokument werden einige Begriffe und Konzepte eingeführt, die den meisten Geologen und Ingenieuren nicht vertraut sind. Diese Konzepte werden weitgehend im Kapitel 3 eingeführt. Weiter befindet sich im Anhang VII ein ausführliches Glossar.
- 2) Die KarstALEA-Methode ersetzt weder die übliche Erfassung des Gebirges (SIA 199) noch den Bereich Wasser der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Sie ergänzt und erweitert die Resultate dieser Untersuchungen, indem sie gezielt auf die Eigenheiten des Karstes eingeht.
- 3) Je früher die Karstproblematik bei der Projektierung berücksichtigt wird, umso besser kann diesem Aspekt Rechnung getragen werden. Die erste Iteration der KarstALEA-Methode („Erstbeurteilung“ – Kapitel 5) sollte daher am Anfang der „Vorstudie“ erfolgen, wenn das Projekt in groben Linien definiert wird.

## 2 Karst und karstbezogene Gefahren im Untertagbau

### 2.1 Was ist Karst?

Der Begriff Karst bezeichnet einerseits eine Landschaftsform mit charakteristischen unterirdischen und oberirdischen Geländeformen (Abb. 2.1), die durch Lösung von Gestein – v.a. von karbonat- und evaporithaltigen Gesteinen wie Kalkstein, Dolomit oder Gips – entstanden sind. Andererseits bezeichnet er auch das damit verbundene hydrogeologische System, dessen Entwässerung mit einem durch Lösungsprozesse entstandenen Netz von Karströhren (Höhlen) laufend angepasst wird.

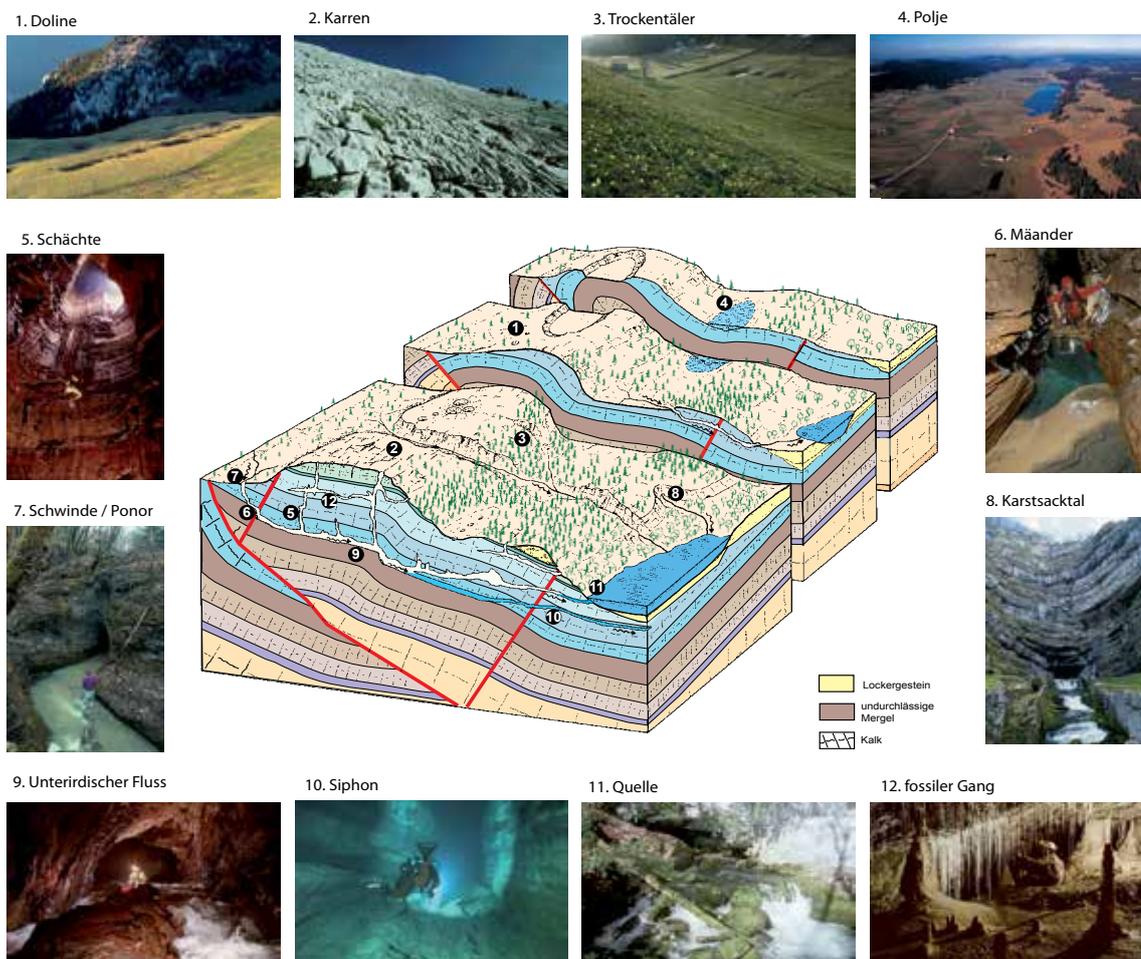
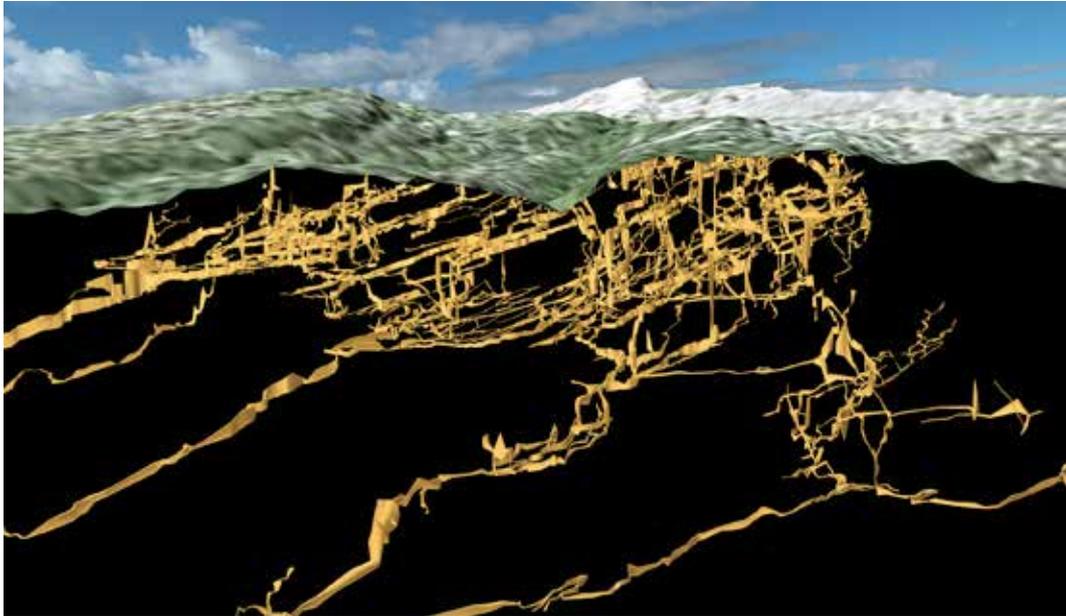


Abb. 2.1: Typische Karsterscheinungen

Der Begriff Karst bezeichnet einerseits eine Landschaftsform und andererseits ein hydrogeologisches System, welche durch die durch Lösung von Gestein – meist Kalkstein – entstanden sind. Die Entwässerung erfolgt weitgehend unterirdisch durch ein Karströhrensystem. Oberflächengewässer fehlen weitgehend. Zu den charakteristischen Karsterscheinungen gehören Dolinen (1), meist trichterförmig Vertiefungen. Karrenfelder (2) sind mit Rinnen zerfurchte Kalkfelsen. Neben Dolinen und Karstspalten (in Karrenfeldern) stellen Bachschwinden oder Ponore (7) bevorzugte Versickerungsstellen dar. An der Oberfläche bilden sich Trockentäler (3) und geschlossene Becken, auch Poljen genannt (4). Schächte (5) und Mäander (6) leiten das Regenwasser durch den Untergrund. Unterirdische Flüsse (9) und mit Wasser gefüllte Höhlengänge (10, auch Siphons genannt) leiten das Wasser zur Karstquelle (11). Fossile Höhlengänge (12) zeugen von früheren Verkarstungsphasen unter anderen hydrogeologischen Bedingungen.

Das Karströhrensystem schliesst neben den vom Mensch befahrbaren Höhlen auch Hohlräume mit einem Durchmesser ab ungefähr einem Zentimeter ein. Die Karströhren bilden ein zusammenhängendes, dreidimensionales und hierarchisch aufgebautes Netz mit oft Dutzenden Kilometer Gängen (Abb. 2.2).



© SISKKA

Abb. 2.2: Karströhrensystem des Réseau Siebenhengste-Hohgant, Habkern/Eriz BE

Im Réseau der Siebenhengste-Hohgant haben Höhlenforscher bisher 157 km Höhlengänge erforscht (Gesamthöhendifferenz 1340 m) und mehr als 35 Eingänge des Höhlensystems entdeckt. Die Höhlenbäche des Réseaus speisen die Quelle des Bätterich im Thunersee, der eine Einzugsgebiet von ca. 32 km<sup>2</sup> entwässert (Höhlenvermessungsdaten HRH).

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

Die Entstehung des Formenreichtums der Karstlandschaften ist eng mit der Entwicklung des karsttypischen, unterirdischen Abflussregimes verbunden. Es handelt sich dabei um ein selbstregulierendes unterirdisches Entwässerungssystem, das die Abflusskapazität durch Lösung des Umgebungsgesteins anpasst. Niederschläge versickern meist gleich in den stark durchtrennten Epikarst; ein oberirdischer Abfluss fehlt weitgehend. Das Wasser durchquert frei fließend (gravitär und damit subvertikal) die ungesättigte – sogenannt vadose – Zone, bis es den Karstwasserspiegel und damit die gesättigte – phreatische – Zone erreicht. Aufgrund der direkten Versickerung kann der Karstwasserspiegel in den Karströhren jedoch innerhalb weniger Stunden massiv (bis zu > 100 m) steigen, wobei Überlaufquellen aktiviert werden. Die Fliessrichtung des Wassers folgt in der phreatischen Zone grundsätzlich dem hydraulischen Gradienten in Richtung der Quelle(n) des Karstsystems.

Karst entwickelt sich mehrheitlich in karbonathaltigen Gesteinen (v.a. Kalkstein und Dolomit), aber auch in Evaporiten (z.B. Gips und Halit) oder seltener in Sandsteinen und Quarziten. Weltweit bestehen etwa 20 % der eisfreien Landoberfläche aus verkarsteten Gesteinsformationen und bedecken v.a. grosse Gebiete in Europa, den USA und China. In der Schweiz bedecken Karstgebiete etwa 20 % der Oberfläche, v.a. im Jura und den Voralpen (Abb. 2.3). 80 % der Schweizer Grundwasservorräte (120 km<sup>3</sup>) befinden sich in

Karstaquiferen (ISSKA, 2008). 18 % des Trinkwassers stammt heute aus Karstquellen, wobei zum Beispiel die Trinkwasserversorgung grösserer Städte wie Vevey (VD), Montreux (VD) und La Chaux-de-Fonds (NE) ausschliesslich von Karstwasser gespeisen wird.

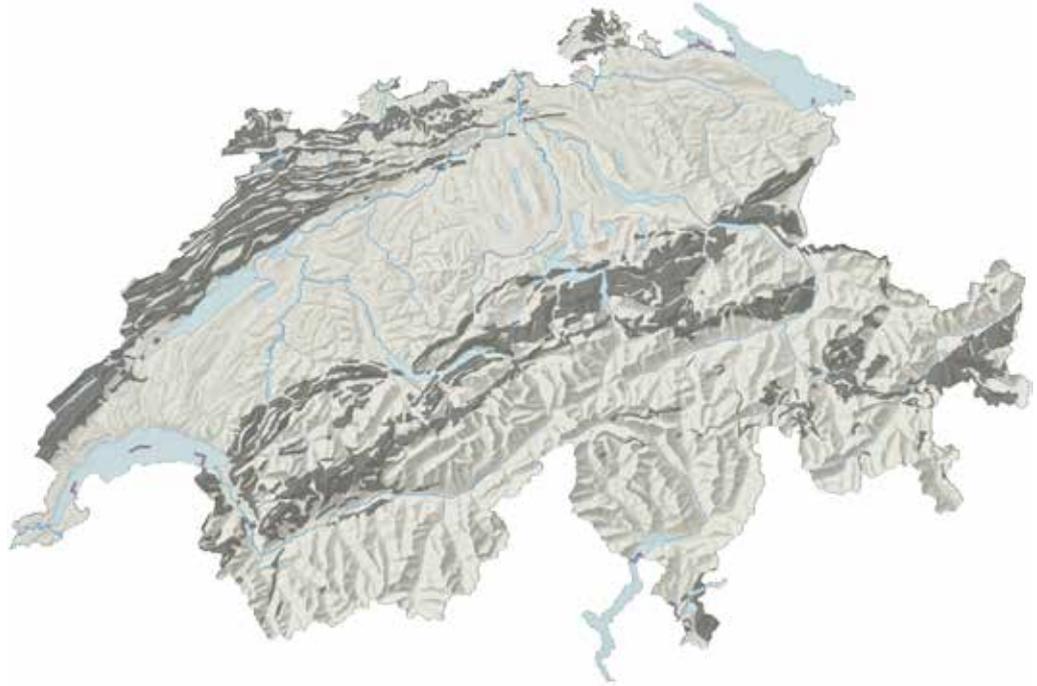


Abb. 2.3: Karstgebiete der Schweiz

Karstgebiete bedecken etwa 20 % der Schweiz (dunkelgrau), v.a. im Jura und in den Voralpen (Atlas der Schweiz 2.0, 2004)

## 2.2 Gefährdungsbilder im Karst

Aus geotechnischer Sicht weisen Karstgebirge in der Regel gute bis ausgezeichnete Verhältnisse auf. Jedoch stellt das Anfahren eines Karsthohlraumes eine nicht zu unterschätzende Gefährdung dar und die damit verbundenen Gefährdungsbilder verlangen meist ausserordentliche Baumassnahmen. Dies kann zu massiven Kostenüberschreitungen, Verzögerungen oder gar zur Aufgabe des Bauvorhabens führen (Tab. 2.1). Weiter können Sicherheitsprobleme während der Bau- und Betriebsphase und negative Auswirkungen auf die Umwelt (v.a. Quellen) auftreten. Karstgebirge bergen somit eine Vielzahl von Gefährdungsbildern, die in anderen Gebirgstypen nicht oder nur in geringerem Ausmass vorkommen.

Die Gefährdungsbilder im verkarsteten Baugrund können das Bauprojekt direkt während des Baus oder während der Nutzung und/oder die Umwelt betreffen (Tab. 2.2). Die Aussagen über mögliche Gefährdungen sollen sich örtlich auf das Bauwerk selbst und seine Umgebung sowie zeitlich auf die Bauetappen und die geplante Nutzungsdauer beziehen. Sie stehen im Zusammenhang mit der Verteilung der verkarstungsfähigen Formationen, den hydrogeologischen Verhältnissen und dem Verkarstungsgrad des Gebirges. Grundsätzlich können zwischen drei Gruppen von Karst-Gefährdungsbildern (3 Gefahrenquellen) unterschieden werden: Jene, die durch **luftegefüllte Hohlräume**, jene die durch **wasserführende Hohlräume** und jene die durch **sedimentverfüllte Hohlräume** verursacht werden, wobei häufig eine Kombination der Gefährdungen angetroffen wird (Abb. 2.4).

Bei der Beurteilung des Gebirges steht das Erkennen und Bewerten von Gefährdungsbildern, welche sich während der Ausführungs- und Bewirtschaftungsphase des Untertagebauwerks ergeben können, im Vordergrund. Der Begriff Gefährdungsbild umfasst kritische Situationen oder unerwünschte Ereignisse für das Bauwerk, die Belegschaft, die Geräte, die Benutzer und die Umwelt. Die Gefährdungsbilder dienen als Grundlage für die Erarbeitung des Vortriebskonzeptes und des Massnahmenplans, welche die Sicherheit gewährleisten und unerwünschte Ereignisse verhindern sollten. Sie ermöglichen die Übersetzung von geologischen Erkenntnissen in für den Ingenieur verwertbare Kenngrössen.

Tab. 2.1: Auswahl von spektakulären karstspezifischen Schwierigkeiten, die bei ausgewählten Tunnelbauprojekten in der Schweiz angetroffen wurden

Tunnel	Problem	Konsequenzen / Massnahmen
Mont d'Or (VD), 1912-13	Massive Wassereinträge (bis 10 m <sup>3</sup> /s) und Austrocknung der Quelle des Bief rouge	Massive Beschädigung der Installationen im und vor dem Tunnel, Bau einer Staumauer (im Tunnel), eines Entwässerungssystems und eines Umgehungstollens; Produktionsunterbruch in Fabriken entlang des Bief rouge
Grenchen (SO), 1913	Verschiedene wasserführende Karströhren wurden angefahren (mehrere hundert l/s Schüttung)	Verzögerungen, bedeutende Beeinträchtigung einer gefassten Quelle (kommunale Trinkwasserversorgung von Grenchen); Erdbeben; Bau einer Ersatzfassung
Twann (BE), 1988-89	Massiver Wassereintrich (bis 4 m <sup>3</sup> /s), Auswirkung auf Quellen	Bauvorhaben aufgegeben / aufgeschoben seit 1990
Vue-des-Alpes (NE), 1991	Ein grosser Karsthohlraum (30 m Durchmesser) wurde angeschnitten	Bau einer Brücke über den teilweise sedimentverfüllten Hohlraum
Kerenzerberg (GL), 1986/1999	Eine Höhle mit insgesamt einer Gesamtlänge von 1110 m und einer Höhendifferenz von 312 m Ganglänge wurde angeschnitten, in der sich mehrere wasserführende Gänge befinden	Nachdem die angeschnittene Karströhre während mehr als 10 Jahren trocken war, stieg der Karstwasserspiegel während eines Hochwassers bis auf Tunnelniveau. Die Tür staut das Wasser zurück bis sie brach, worauf der Tunnel mit Wasser und Geröll überflutet wurde
Flimserstein (GR), 2002	Eine Karströhre mit bis zu 800 l/s angeschnitten; Beeinträchtigung verschiedener Quellen und des Lag la Cauma	Entschädigung von mehreren Millionen an Elektrizitätskraftwerk wegen geringerer Schüttung und Bau einer Anlage zur künstlichen Anreicherung des Aquifers des Caumasees

## 2.2.1 Gefährdung durch luftgefüllte Karsthohlräume

Die spektakulärste Karsterscheinung sind Höhlen. Diese können Gangdurchmesser von bis zu mehreren Dutzend Meter aufweisen und bis zu mehreren Kilometer lang sein. Sie können als horizontale Höhlengänge, Schächte, Hallen (bis zu mehreren 10'000 m<sup>3</sup>) aber auch als nur Dezimeter grosse Röhre oder korrosiv erweiterte Trennfläche auftreten.

Das Anfahren eines Hohlraumes führt abhängig von der Geometrie des Hohlraumes sowie Lage im Ausbruchprofil zu unterschiedlichen bautechnischen Folgen (Tab. 2.1).

## 2.2.2 Gefährdung durch wasserführende Karsthohlräume

Die Entwässerung des verkarsteten Gebirges erfolgt durch ein unterirdisches Karströhrensystem, das das infiltrierende Wasser konzentriert zu den Quellen leitet. Die Schüttung einer einzelnen Karströhre kann mehrere  $\text{m}^3/\text{s}$  erreichen und variiert meist je nach Witterungsbedingungen massiv. Der Karstwasserspiegel kann innert Stunden um mehr als hundert Meter steigen, so dass vorher trockene Karströhren überflutet werden.

Das Anfahren eines wasserführenden Karsthohlraums kann zu massiven Wassereinbrüchen führen. Wird eine temporär wasserführende Karströhre angeschnitten, kann der Wassereinbruch auch erst Monate oder Jahre später im rückwärtigen Bereich erfolgen.



Abb. 2.4: Karstspezifische Gefährdungsbilder im Tunnelbau

Karstspezifische Probleme im Tunnelbau treten im Zusammenhang mit luftgefüllten Hohlräumen (1), wasserführenden Hohlräumen (2) und sedimentverfüllten Hohlräumen (3) auf. Dabei können zwischen Gefährdungen des Bauwerks während der Ausführungs- und der Bewirtschaftungsphase (1-3), Gefährdungen anderer Nutzungen wie z.B. Trinkwasser oder andere Infrastrukturanlagen (4) und Gefährdungen der Umwelt wie z.B. Gewässer, Feuchtgebiete (5) unterschieden werden.

- 1) Grosser Saal, der durch den Tunnel der Vue-des-Alpes angeschnitten wurde
- 2) Wassereinbruch im Flimsersteintunnel. Eine Karströhre mit einem Durchfluss von etwa  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  wurde angeschnitten
- 3) Sedimenteintrich im Tunnel (Bild: Marti Tunnelbau AG)
- 4) Tagbruch in einem Troittoi in la Chaux-de-Fonds
- 5) Der Seespiegel des Caumasees liegt mehrere Meter tiefer als üblich zur selben Jahreszeit. Dies ist auf einen verringerten Wasserzufluss zurückzuführen, bedingt durch das Anschneiden und Drainieren einer Karströhre, die den Caumasee indirekt gespiesen hat

### 2.2.3 Gefährdung durch sedimentverfüllte Karsthohlräume

Das Anfahren eines sedimentverfüllten Karsthohlraumes ist oft mit einer schwer zu handhabenden Gefährdung während des Vortriebs verbunden. Die Hohlräume können vollständig oder nur teilweise mit Sedimenten verfüllt sein. Die Verfüllungen können Volumen von bis zu mehreren Dutzend m<sup>3</sup> haben und können aus allen Korngrößenfraktionen bestehen (von der Tonfraktion bis zu m<sup>3</sup> grossen Felsblöcken). Aus geotechnischer Sicht ist die Verfüllung meist von schlechter bis sehr schlechter Qualität. In Verbindung mit Gebirgswasser, kann sich die Sedimentfüllung murgangartig entleeren. Die typischen Gefährdungsbilder sind in der Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tab. 2.2: Karstspezifische Gefährdungsbilder im Untertagbau

Die Gefährdungsbilder können auf luffterfüllte, wasserführende und sedimentverfüllte Karsthohlräume zurückgeführt werden. Diese können das Bauwerk oder die Umwelt während der Ausführungs- oder während der Bewirtschaftungsphase treffen. Die Aufzählung ist nicht abschliessend.

Gefährdungsbildern	bei luffterfüllten Hohlräumen	bei wasserführenden Hohlräumen	bei sedimentverfüllten Hohlräumen	Gefährdung des Bauvorhabens	Gefährdung der Umwelt	Gefährdung während der Ausführung	Gefährdung während der Bewirtschaftung
Geologisches Überprofil von mehreren m <sup>2</sup>	X	X	X	X		X	
Instabilität des angefahrenen Hohlraums bis hin zu Erdfällen oder Tagbrüchen	X	X	X	X	X	X	X
Nachbrechen in einen naheliegenden, nicht angefahrenen Karsthohlraum	X	X	X	X		X	X
Schwierigkeiten Anker zu setzen	X	X	X	X		X	
Absenkung des Bohrkopfes (maschineller Vortrieb)	X	X	X	X		X	
Verkleben des Bohrkopfes (maschineller Vortrieb)			X	X		X	
Verkleben des Schildes (maschineller Vortrieb)	X	X	X	X		X	
Erhöhter Meisselverschleiss (maschineller Vortrieb)	X	X	X	X		X	
Probleme beim Verspannen der Gripper (maschineller Vortrieb)	X	X	X	X		X	
Stehenbleibender Abschlag (Sprengvortrieb)	X	X	X	X		X	
Lockermaterialeinbruch			X	X		X	
Instabilität von angefahrenen Sedimentverfüllungen			X	X		X	
Aufbrechen von Sedimentverfüllungen im rückwertigen Bereich			X	X		X	X
Setzen oder Erosion der Sedimentfüllung			X	X		X	X
Quellen der Sedimentfüllung			X	X		X	X
Schlammstromartige Überflutung des Tunnels		X	X	X		X	X
Wassereinbruch mit einer Schüttung bis zu mehreren m <sup>3</sup> /s		X		X	(X)	X	
Temporäre Wassereinbrüche nach ausserordentlichen Niederschlägen und/oder Schneeschmelze mit einer Schüttung bis zu mehreren m <sup>3</sup> /s, auch im rückwärtigen Bereich		X		X	(X)	X	X
Permanenter Wasseranfall von mehreren m <sup>3</sup> /s		X		X	(X)	X	X
Veränderung der Gebirgspemeabilität		X		X	X	X	X
Instabilität und Setzung an der Oberfläche durch die Senkung/Veränderung des Grundwasserspiegels (reaktivieren von Dolinen, initiieren von Dolinenbildung)		X	X		X	X	X
Trockenfallen von Quellen, Veränderung des Quellregimes		X			X	X	X
Veränderung der Wasserqualität		X			X	X	X
Bildung eines neuen Karsthohlraumes entlang der Aussenschale		X		X			X
Beschleunigte Korrosion durch Tunneldrainage		X		X	X		X
Versinterung der Drainage		X		X			X
andere...	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)

## 3 Wissenschaftlicher Hintergrund der KarstALEA-Methode

Die Verkarstung eines Gebirges äussert sich sowohl durch spezifische Landschaftsformen wie Höhlen, Dolinen und Karren (Abb. 2.1) wie auch durch ein spezifisches hydrogeologisches System. Letzteres wird durch ein aktives, semiaktives oder fossiles Entwässerungssystem charakterisiert, das seine Durchflusskapazität durch die Lösung des Gesteins so anpasst, dass die Niederschläge fast vollständig unterirdisch abgeleitet werden. Diese beiden Aspekte des Karstes – Landschaftsformen und Hydrogeologie – gilt es bei der Beurteilung eines Gebirges zu berücksichtigen.

In diesem Kapitel werden die hydrogeologischen und speläogenetischen Konzepte, auf welche die KarstALEA-Methode basiert, in groben Zügen vorgestellt werden. Dabei gilt es zu beachten, dass sich die folgenden Ausführungen auf die Verhältnisse in Kalksteingebirgen in einem schweizerischen Kontext (Klima, Geologie, etc.) beziehen. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei den Initialfugen – besonders verkarstungsanfällige Trennflächen – und den speläogenetischen Bereichen des Gebirges, welche sich durch spezifische speläogenetische Prozesse auszeichnen. Sie stellen zwei zentrale Eckpfeiler der KarstALEA-Methode dar und werden verwendet, um die Karströhrendichteverteilung eines Gebirges zu bestimmen (Kapitel 6.7), sowie – kombiniert mit den mit dem hydrogeologischen Modell – die karstspezifischen Gefährdungsbilder zu beschreiben (Kapitel 6.8).

Für eine vertiefte Auseinandersetzung mit den Grundlagen der Karsthydrogeologie und Speläogenese sei auf die Fachliteratur verwiesen (z.B. Klimchouk et al, 2000, Ford und Williams, 2007; Palmer, 2007; Goldscheider & Drew, 2007).

### 3.1 Karsthydrogeologie

Das im Kapitel 2.1 vorgestellte komplexe Netz von zusammenhängenden und hierarchisch strukturierten Karströhren verleiht dem Karst eine hohe Heterogenität und Durchlässigkeit. Der Karst kann die Niederschläge daher meist nahezu vollständig aufnehmen, so dass Oberflächengewässer im Karst weitgehend fehlen.

Das äusserst durchlässige Karströhrensystem ist von einem wenig durchlässigen Gesteinsvolumen umgeben, dessen Durchlässigkeit von der Matrix des Gesteins und feinsten, nicht oder kaum verkarsteten Trennflächen bestimmt wird (Jeannin, 1996). Dies führt zu einer ausgeprägten Heterogenität in der Struktur und im Verhalten des Karstes, welche die Fliessverhältnisse im Karst prägt. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Charakteristika dieses hydrogeologischen Systems vorgestellt, wobei wir uns auf die Hydrogeologie von Karstgebieten im Kalkgestein konzentrieren.

#### 3.1.1 Zirkulationsverhältnisse im verkarsteten Gebirge

Trifft Niederschlag direkt auf den nackten Kalkfelsen (meist Karrenfelder), wird es von den unzähligen Karstspalten rasch aufgenommen. Ist der Kalkfelsen von einem Boden oder von Lockergesteinen bedeckt, können diese das Sickerwasser eine gewisse Zeit zurückhalten. Die Oberfläche des Kalkgesteins ist jedoch meist mehr oder weniger zerrüttet und bildet einen wenige Meter mächtigen Bereich, welcher einen grossen Teil der Niederschläge aufnehmen kann. Dieser zerrüttete Bereich wird **Epikarst** genannt (Abb. 3.1). An der Basis des Epikarstes kann ein beachtlicher Teil des infiltrierenden Wassers zurückgehalten werden, so dass sich ein hängender Grundwasserkörper bilden kann, der die darunterliegenden Trennflächen im Gebirge über Wochen oder Monate mit Wasser speist. Bei starken Niederschlägen entwässert der Epikarst einen Teil des infiltrierenden Wassers direkt in die Schächte (vertikale Karströhren), die das Wasser durch die vadose (nicht gesättigte) Zone leiten. Der Epikarst stellt also gleichzeitig eine direkte

Verbindung zwischen Oberfläche und Karströhrensystem dar und dient als langfristiger Speicher. Stösst ein Bach oder ein Fluss, der einem nicht verkarsteten Gebiet entspringt, auf verkarstungsfähiges Gestein, versickert er meist in den Untergrund; oft direkt in die Karströhren der vadosen Zone (der Epikarst fehlt im Bereich des Ponors/Schwinde punktuell).

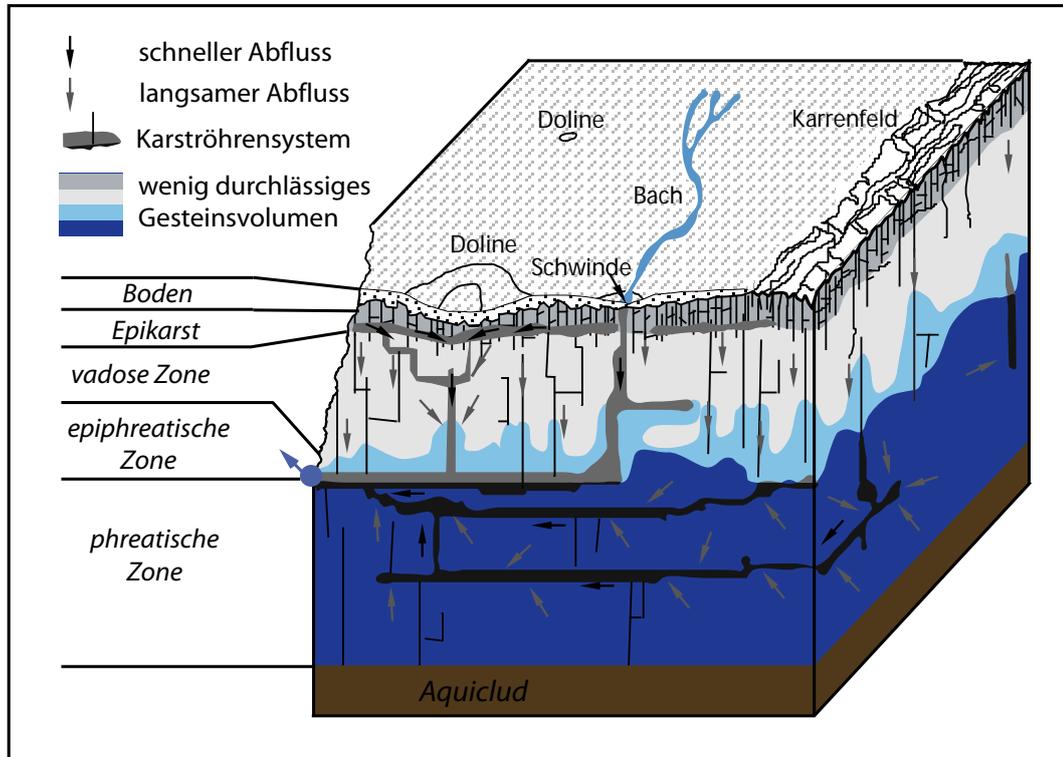


Abb. 3.1: Wasserzirkulation im verkarsteten Gebirge

Die Zirkulation des Wassers zwischen der Oberfläche und der Quelle erfolgt einerseits durch das Karströhrensystem (schneller Abfluss) und das wenig durchlässige Gesteinsvolumen (langsamer Abfluss). Die Interaktion zwischen diesen Systemen wird u. a. durch die hydrodynamischen Bedingungen (Niedrigwasser – Hochwasser) bestimmt. Das verkarstete Gebirge kann aufgrund der verschiedenen hydrodynamischen Funktion in vier Zonen unterteilt werden (aus BUWAL, 1998, verändert):

Der Epikarst ist die oberflächennahe Grenzzone zum Boden oder zur Luft und ist ein wichtiger Wasserspeicher;

Die vadose Zone dient als Transitzone des Wassers Richtung Karstwasserspiegel und ist praktisch nie vollständig mit Wasser gesättigt;

Die epiphreatische Zone liegt zwischen dem Höchst- und dem Tiefststand des Karstwasserspiegels und ist daher periodisch mit Wasser gesättigt;

Die phreatische Zone liegt unter dem Tiefststand des Karstwasserspiegels und ist permanent mit Wasser gesättigt. Zusammen mit der epiphreatischen Zone dient sie der Entwässerung des Karstsystems Richtung Quelle.

Die Schächte und Mäander (schluchtförmige Gänge) der **vadosen Zone** entwässern den Epikarst und leiten das Wasser allfälliger Ponore möglichst direkt Richtung Karstwasserspiegel. Dabei erfolgt eine Hierarchisierung der Karströhren und damit eine Konzentration des Wassers, ähnlich wie dies bei Oberflächengewässer der Fall ist. Die

entsprechenden Karströhren weisen meist einen Durchmesser von wenigen Metern und eine Länge von hunderten Metern bis zu Kilometern auf. Das Wasser fließt in den Karströhren der vadosen Zone – ähnlich wie in Oberflächengewässer – frei, konzentriert und schnell, wobei bei Hochwasser eine einzelne Karströhre mehrere  $\text{m}^3/\text{s}$  Wasser führen kann. Die Mächtigkeit der vadosen Zone überschreitet häufig 100 m, kann jedoch auch 1000 m oder gar 2000 m betragen (Réseau Siebenhengste-Hohgant, Habkern (BE): ca. 1300 m, Muttsee, Glarus Süd (GL): ca. 1800 m). Erreicht das Wasser eine undurchlässige Schicht (Basis des Aquifers) bevor es den Karstwasserspiegel erreicht, folgt es in einem unterirdischen Bach annähernd dem Fallen dieser Schicht, bis es den Karstwasserspiegel oder die Quelle erreicht. In der Beatushöhle (Beatenberg BE) kann man z.B. dem frei fließenden Höhlenbach etwa 2 km folgen.

Bei Niedrigwasser ist der Karstwasserspiegel häufig nahezu horizontal auf der Höhe der perennierenden Quellen des Karstsystems. Da bei Hochwasser meist grosse Mengen Wasser durch die vadosen Zone infiltrieren, steigen die Fließgeschwindigkeit und der Druckhöhenverlust in den Röhren stark – entsprechend steigt der Karstwasserspiegel. Dabei werden normalerweise höhergelegene Karströhren aktiviert und das Wasser in Richtung der Quelle oder allfälliger Überlaufquellen abgeleitet. Schwankungen des Karstwasserspiegels von 10 bis 100 m sind üblich, können aber auch bis zu 500 m erreichen (500 m in der Grotte de la Luire, Vercors (F); 300 m im Hölloch, Muotathal (SZ); 70 m im Bärenschacht, Beatenberg (BE); ~15 m in der Grotte de Milandre, Boncourt (JU)). Dieser Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels wird **epiphreatische Zone** genannt. Wird beim Bau eines Untertagbauwerks in dieser Zone eine Karströhre angeschnitten, kann diese während Monaten oder gar Jahren trocken sein, um während eines (Extrem-) Hochwassers Hunderte  $\text{l/s}$  oder gar  $\text{m}^3/\text{s}$  Wasser zu führen. Dabei kann das Bauwerk überflutet oder gar mit Geschiebe oder schlammstromartig mit Sedimenten verfüllt werden (vgl. Kerenzertunnel in Tabelle 2.1). In der epiphreatischen Zone muss neben einer temporären Schüttung ebenfalls mit temporären Drücken von bis zu  $> 10$  Bar gerechnet werden.

Die Karströhren der permanent gesättigten, sogenannten **phreatischen Zone** bilden meist den unteren Teil des aktiven Systems und leiten das Wasser zum Quellaustritt des Systems, der Karstquelle. Diese Karströhren entwickeln sich üblicherweise in den obersten Dekameter unterhalb des Niedrigwasser-Karstwasserspiegels. In Anbetracht der zunehmenden Hierarchisierung des Karströhrensystems sind die Gangdurchmesser und die Schüttungen z.T. sehr bedeutend (mehrere  $\text{m}^3/\text{s}$  in einer Karströhre). Wird eine solche Karströhre durch einen Tunnel angeschnitten, kann dies zudem zur (Teil)Entleerung des Karstaquifers bis auf das Tunnelniveau führen, was mit anfänglichen Schüttungen von Dutzenden  $\text{m}^3/\text{s}$  verbunden sein kann. Unterhalb dieses stark verkarsteten und somit durchlässigen Bereichs der phreatischen Zone befindet sich der weniger durchlässige Initialbereich, in dem die Verkarstung erst im Anfangsstadium steckt (vgl. Kapitel 3.2.3). Dieser Bereich zeichnet sich zwar durch hohe Drücke, jedoch aufgrund des fehlenden Karströhrennetzes durch eine geringe Durchlässigkeit aus. Es ist daher im Rahmen von Untertagbauvorhaben – abgesehen von stark zerklüfteten Bereichen ( $\rightarrow$  Kluftaquifer) – nur mit diffusen Wasserzutritten und geringen Schüttungsmengen zu rechnen.

### 3.1.2 Karstsysteme und Rahmenbedingungen der Entwässerung

Bei der Beurteilung des verkarsteten Gebirges im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen für ein Untertagprojekt müssen meist die betroffenen Karstsysteme ganzheitlich betrachtet werden, um die für das Bauwerk relevanten Faktoren wie die potenziell beeinträchtigten Quellen, die Drücke oder mögliche Schüttungen beim Anfahren einer Karströhre beurteilen zu können. Zu einem Karstsystem gehört eine oder mehrere miteinander verbundene Karstquellen oder Quellgruppen, deren Einzugsgebiet und das Volumen des (verkarsteten) Gebirges, das zu dieser(n) Karstquelle(n) entwässern kann (Karströhrensystem und wenig durchlässiges Gesteinsvolumen; Abb. 3.2). Ein Karstsystem kann somit mehrere miteinander verbundene Aquifere oder auch nur Teile eines Aquifers beinhalten. Es handelt sich entsprechend um ein Karst-Grundwasserfließsystem als Ganzes.

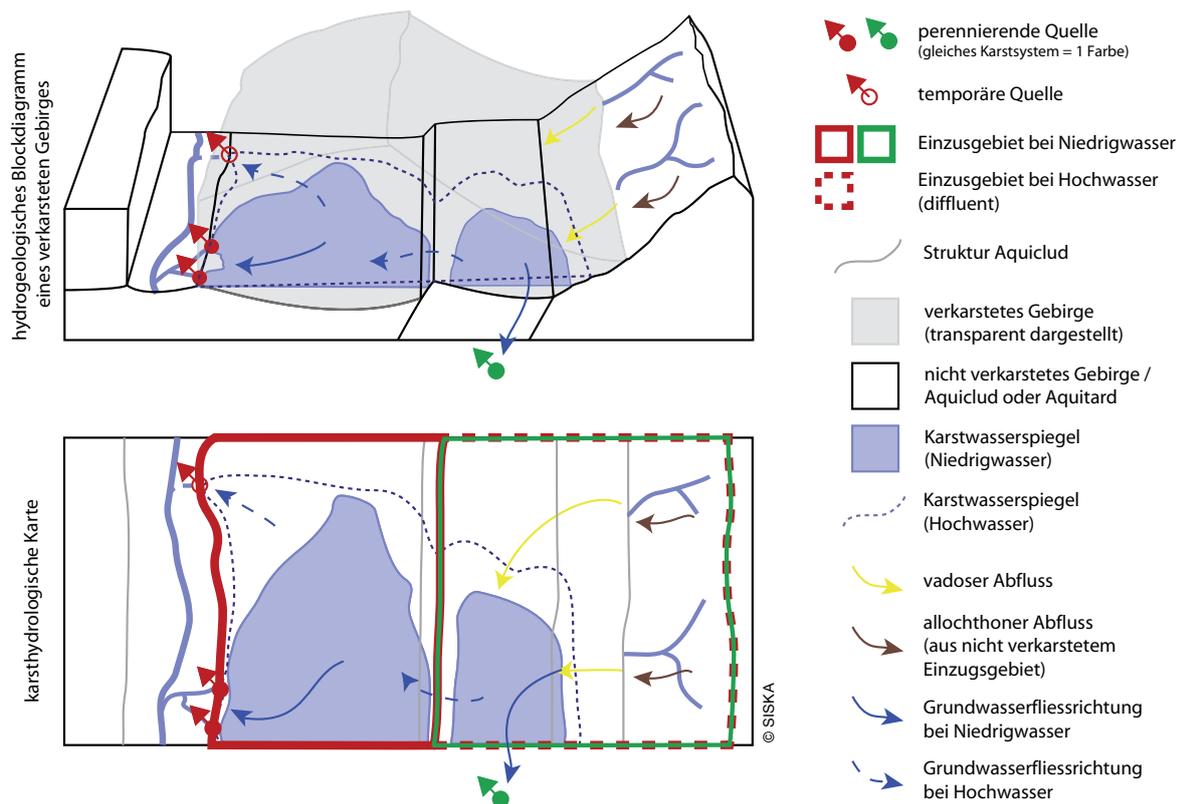


Abb. 3.2: Das Karstsystem und seine Elemente

Zu einem Karstsystem gehören eine oder mehrere perennierende oder temporäre Quellen, deren Einzugsgebiet auf verkarsteten und nicht verkarstetem Untergrund (autochthoner respektive allochthoner Abfluss), sowie das ganze Gebirgsvolumen, das zu dieser(n) Karstquelle(n) entwässern kann. Die Quellen eines Karstsystems befinden sich meist in der Talsohle eines Vorfluters oder dort, wo die undurchlässige Basis des Karstaquifers an die Oberfläche tritt.

Der Grundwasserspiegel kann in Abhängigkeit der Witterung bedeutend schwanken – im Extremfall um mehrere 100 m. Bei Hochwasser können daher Überlaufquellen aktiviert werden oder Wasser unterirdisch von einem Grundwasserkörper in den anderen fließen. Difffluente Bereiche – d.h. Teile des Einzugsgebietes und des dazugehörigen Gebirgsvolumens, die je nach Verhältnisse durch die eine oder andere Quelle oder Quellgruppe entwässert werden und somit zu zwei verschiedenen Karstsystemen gehören – sind häufig (rot gestrichelter Bereich auf der Karte).

Die Entwässerung eines verkarsteten Gebirges hängt vor allem von der Strukturierung seiner Karströhrensysteme ab. Diese wird von den hydrologischen Rahmenbedingungen und der Geologie (Lithologie, Struktur etc. siehe Kapitel 3.2) bestimmt.

Entscheidend ist neben den Infiltrationsverhältnissen (z.B. Grösse, Lage und Bedeckung des Einzugsgebietes, diffuse vs. konzentrierte Infiltration, Niederschlagsmengen) und dem hydraulischen Gradienten (d.h. Höhenunterschiede), vor allem die Lage potenzieller Vorfluter. Letztere bestimmen weitgehend die Position der Hauptquellen der Karstsysteme. Sie befindet sich meistens in der Sohle eines regional bedeutenden Tals, dessen Fluss als Vorfluter dient (z.B. Bätterich, Unterseen BE (im Thunersee), die Quelle des Réseau Siebenhengste-Hohgant (Berner Oberland); Source de la Beuchire, Porrentruy JU; Source de l'Arvoux, Les Brenets NE), oder an einer tief liegenden Stelle, an der die undurchlässige

Basis eines Karstaquifers auf die Oberfläche trifft (z.B. Source de Covatannaz auf Effingerschichten in Sainte-Croix VD; Beatushöhlenquelle auf Drusbergsschichten, Beatenberg BE).

Eine Änderung der (hydrologischen) Rahmenbedingungen führt üblicherweise zu entsprechenden Anpassungen des Karströhrensystems (siehe Kapitel 3.2.3). Zu den häufigsten Änderungen der hydrologischen Rahmenbedingungen gehört sicher das Absenken des Vorfluterniveaus durch Tiefenerosion sowie die Erhöhung des Karstwasserspiegels während der Eiszeiten in Folge des Rückstaus durch das Gletschereis. Die entsprechende Anpassung des Karströhrensystems – sei es die Entstehung eines tieferliegenden Höhlenniveaus oder das Verfüllen von nicht mehr benutzten Karströhren mit Sedimenten – führt häufig zu mehrphasigen Systemen, wobei einzelne Karströhren je nach Phase unterschiedliche Funktionen erfüllen können (z.B. Basisentwässerung vs. Hochwasserentwässerung). Gut entwickelte Beispiele solcher mehrphasigen Systeme sind die beiden weltbekanntesten grossen alpinen Systeme Réseau Siebenhengste-Hohgant (Berner Oberland) und Hölloch-Silberer (Muotathal, SZ). Sie sind aber auch im Jura verbreitet (z.B. Grotte de Milandre, Boncourt JU; Grottes de Vallorbe VD; Nidlenloch, Oberdorf & Gänsbrunnen SO).

### 3.1.3 Verhalten eines Karstsystems

Die Schüttung eines Karstsystems – d.h. die Gesamtschüttung aller Quellen des Systems – beträgt für kleine Systeme einige l/s bei Niedrigwasser, kann bei grossen Systemen bei Hochwasser aber bis zu mehrere Dutzend m<sup>3</sup>/s erreichen (z.B. 80 m<sup>3</sup>/s bei der Quelle der Orbe, Vallorbe VD). Die Gesamtschüttung eines Karstsystems zeichnet sich durch grosse Schwankungen aus: Bei Hochwasser kann die Schüttung problemlos das 20 bis 200-fache der Schüttung bei Niedrigwasser betragen. Die Schüttung einer einzelnen Karstquelle kann hingegen bedeutend geringer als jene des Gesamtsystems sein, wenn Überlaufquellen aktiviert werden können (z.B. perennierende Quelle Beuchire: Mittlerer Abfluss 800 l/s; Schwankungsbereich 100 - 1600 l/s, Überlaufquellen desselben Systems (Creugenat) 0 - 15'000 l/s; Porrentruy JU). Die Interaktion zwischen den verschiedenen Karströhren und Quellen führt häufig zu nichtlinearen Reaktionen (Regen – Quellschüttung, Druckaufbau – Quellschüttung), welche für Karstsysteme typisch sind (Abb. 3.3). Währenddessen Überlaufquellen nur Wochen, Tagen oder wenige Stunden pro Jahr(zehnt) aktiv sein können, trocknet(n) die perennierende(n) Quelle(n) des Karstsystems gar nicht aus. Dies ist auf die beachtliche Speicherfunktion des Epikarstes und des wenig durchlässigen Gesteinsvolumen zurückzuführen, welche v.a. bei länger anhaltendem Hochwasser (längere Niederschlagsperioden, Schneeschmelze) gefüllt werden und dann bei Niedrigwasser das gespeicherte Wasser langsam und kontinuierlich wieder ans Karströhrennetz abgeben und so auch bei Trockenheit den Basisabfluss sicherstellen. Ist keine perennierende Quelle bekannt, ist daher davon auszugehen, dass nicht alle Abflüsse des Systems bekannt sind – sei dies, weil die Quelle direkt in einen Fluss, in eine tiefe Schlucht, einen See oder einen anderen Aquifer (z.B. Schotteraquifer im Talgrund) entwässert oder weil die Datenlage ungenügend ist.

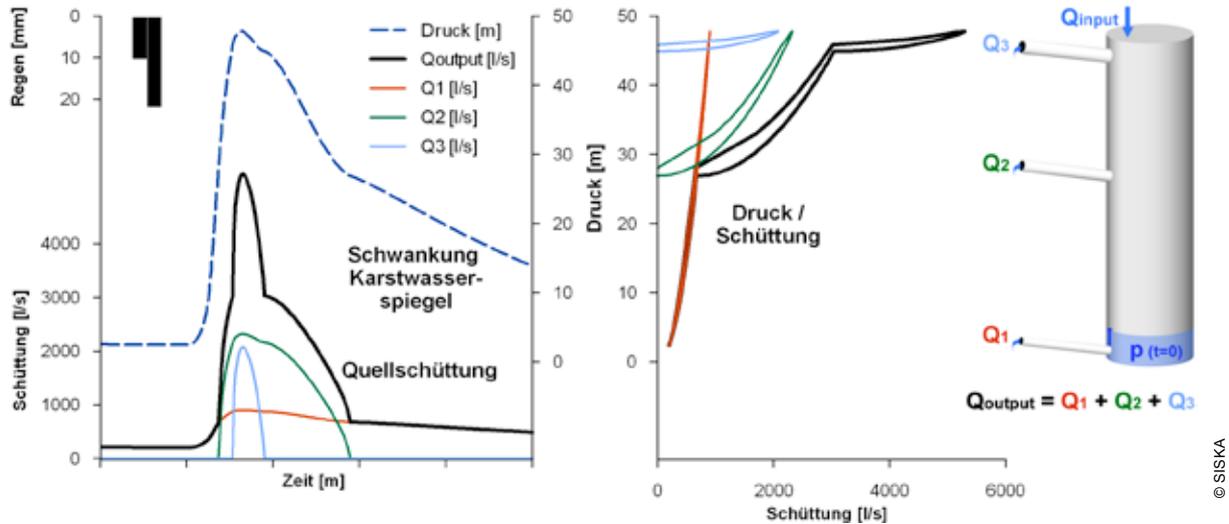


Abb. 3.3: Nicht-lineare Reaktion der Schüttung von Karstquellen (und Karströhren) auf Druckschwankungen

Die Grafik ganz rechts zeigt ein stark vereinfachtes Karstmodell mit einem Reservoir, einer perennierenden und zwei Überlaufquellen.

(links) Schwankung des Karstwasserspiegels nach einem Starkniederschlag und die damit verbundenen Schüttungen der Quellen des Karstsystems. Die Zunahme der Schüttung der perennierenden Karstquelle ist vergleichsweise gering verglichen mit der Zunahme der Schüttung der Überlaufquelle.

(rechts) Druckaufbau in Abhängigkeit von der Schüttung der Quellen. Sobald das Niveau der Überlaufquelle erreicht ist, zeigt die Kurve der Gesamtschüttung einen markanten Knick. Die Kurve ist bei steigendem und sinkendem Hochwasser leicht versetzt.

Ein solches Verhalten kann nicht nur bei mehreren miteinander verbundene Quellen eines Systems beobachtet werden, sondern auch innerhalb eines Systems, wenn mehrere parallele Karströhren in unterschiedlicher Höhenlage aktiviert werden. Die Schüttung einer Quelle, der Wasser aus mehreren parallelen Karströhren zufließt, kann entsprechend ein ebenso nicht-lineares Verhalten aufweisen wie die Gesamtschüttung eines Systems.

Im Gegensatz zu Quellen in Porenaquiferen, die v.a. jahreszeitliche Schwankungen aufweisen, reagieren Karstquellen meist inert Stunden auf Niederschlagsereignisse (Abb. 3.4). Solche kurzfristige Veränderungen der Abflüsse und der entsprechenden Druckverhältnisse betreffen vor allem das Karströhrennetz. Sie wirken sich hingegen nur abgeschwächt und verzögert im wenig durchlässigen Gesteinsvolumen aus. Zur räumlichen Heterogenität kommt also noch eine bedeutende zeitliche Variabilität der Verhältnisse im Karströhrensystem.

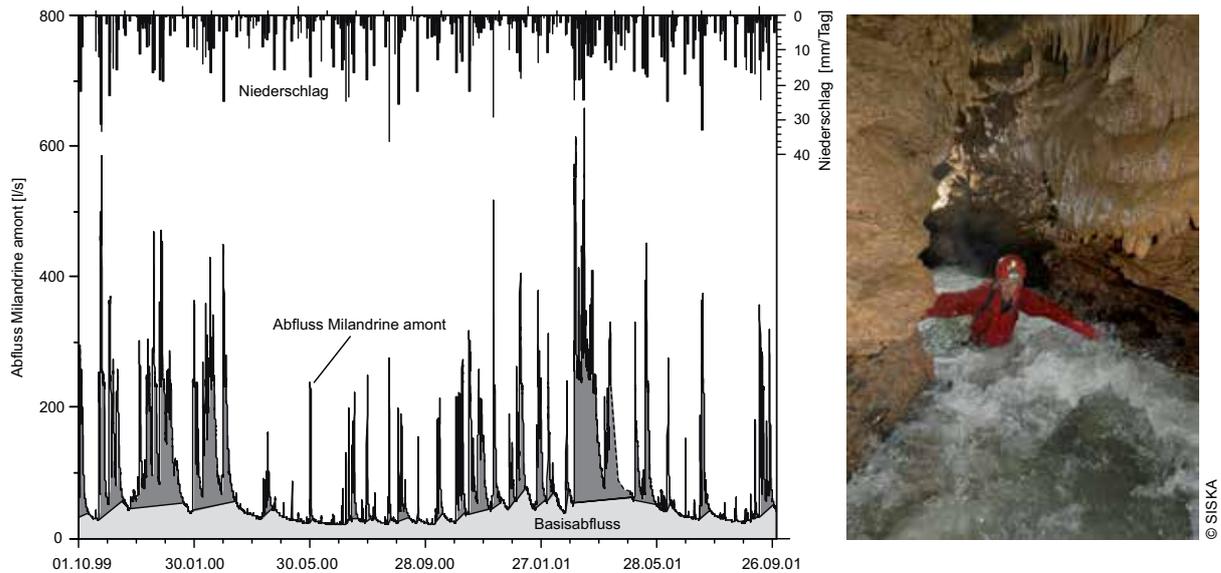


Abb. 3.4: Abflussganglinie des Höhlenflusses Milandrine amont

Die Abflussganglinie der Milandrine amont (grotte de Milandre, Boncourt JU) von Oktober 1999 bis Oktober 2001 zeigt, dass der Grundwasserkörper der Milandrine unmittelbar auf stärkere Niederschlagsereignisse (tägliche Regenmengen in mm, oben) reagiert. Der Grundwasserkörper wird im Winter (Oktober – März) angereichert, im Summer (April – September) baut er sich ab. Der Basisabfluss schwankt zwischen 13 l/s im Sommer und 60 l/s im Winter. Die Hochwasserspitzen erreichen mit 1500 l/s etwa das Hundertfache des Sommer-Basisabflusses (Jeannin, 1996, verändert).

Die Fliessgeschwindigkeiten im Karstaquifer sind sowohl zeitlich wie räumlich sehr variabel. Im Karströhrennetz können die Abstandsgeschwindigkeiten mehrere Hundert Meter pro Stunde erreichen (z.B. 20 km in 38 h von der Schratzenfluh in den Thunersee > 500 m/h). Im wenig durchlässigen Gesteinsvolumen sind sie hingegen äusserst gering. Weiter kann in derselben Karströhre das Wasser unter Hochwasserbedingungen die erwähnten hohen Geschwindigkeiten erreichen während bei Niedrigwasser die Fliessgeschwindigkeit sehr gering oder gar Null ist (z.B. wenn die Entwässerung bei Niedrigwasser vorwiegend durch eine andere Karströhre erfolgt).

Die in den Karströhren herrschenden Fliessbedingungen (Strömungsverhältnisse) sind vergleichbar mit jenen in Rohrleitungen – sowohl unter Druck wie auch unter frei fliessenden Bedingungen. Die entsprechenden Regeln der Strömungslehre und Hydraulik (Druckverlust, Schüttungsberechnungen, etc.) sind grundsätzlich anwendbar, auch wenn karstspezifische Eigenheiten wie die verhältnismässig grosse Rauigkeit der Karströhren berücksichtigt werden müssen.

### 3.1.4 Konsequenz für die Untersuchungsmethoden in der Karsthydrogeologie

Das in der Hydrogeologie häufige Vorgehen, von mehr oder weniger zufällig oder regelmässig verteilten punktuellen Messungen (Piezometer, Pump- und Injektionsversuche, Quelldaten) auf das Verhalten des ganzen Systems zu schliessen, ist im Karst meist zum Scheitern verurteilt. Beobachtungen in einem Bohrloch im wenig durchlässigen Gesteinsvolumen sagen wenig bis nichts über die Karstwasserspiegelschwankungen im Karströhrensystem aus und die Abflusslinie einer einzigen Quelle muss nicht repräsentativ für das ganze System sein, wenn weitere perennierende und/oder Überlaufquellen das System zusätzlich entwässern. Bimodale Durchgangslinien bei Tracerversuchen können alleine auf die Variabilität der Schüttung zurückzuführen sein (z.B. durch Remobilisieren des Tracers während eines (kleinen) Hochwassers – aus dem Epikarst, aus Sedimenten etc.), ohne dass irgendwelche strukturellen Ursachen wie mehrere Fliesswege vorliegen. Weiter muss die (meist kurze) Dauer der zu untersuchenden Ereignisse berücksichtigt werden. So sind z.B. regelmässige (z.B. monatliche) Piezometermessungen wenig aussagekräftig, da mit grosser Wahrscheinlichkeit die wichtigen Hochwasserinformationen nicht erfasst werden.

Um die hydrogeologischen Verhältnisse gemäss den Anforderungen der SIA 199 beschreiben zu können, müssen also die spezifischen Strukturen (Heterogenität) und Verhältnisse (Variabilität) des Karstes angemessen berücksichtigt werden. Dies ist meist nur durch eine ganzheitliche Betrachtung der Karstsysteme und der Kombination eines strukturellen (Untersuchungen zur Position der wichtigen Elemente) mit einem funktionellen Untersuchungsansatz (Untersuchung des Verhaltens des Systems und der Teilsysteme) möglich, wobei die wechselnden Verhältnisse zu berücksichtigen sind. Im Kapitel 6.4 wird ein solcher Untersuchungsansatz vorgestellt.

## 3.2 Die Grundlagen der Speläogenese

Die spezifische Geomorphologie und Hydrogeologie des Karstes sind durch ihre Entstehungsgeschichte eng miteinander verbunden. Die sogenannte Speläogenese beschreibt die Gesamtheit aller Prozesse, welche die Entstehung und Entwicklung natürlicher unterirdischer Hohlräume bewirken.

Die Entstehung und Entwicklung von Karströhren (Verkarstung) folgt einer positiven Rückkopplung: Gebirgswasser fliesst entlang einer Trennfläche, welche durch Lösung des Gesteins erweitert wird – worauf mehr Gebirgswasser durch die erweiterte Trennfläche fliesst, was wiederum die Lösung beschleunigt (Kiraly, 1975) und noch mehr Gebirgswasser "anzieht". Die Verkarstung ist ein selbstregulierender Prozess, durch den ein reifes System von Karströhren entwickelt wird, das die Gesamtheit der Sickerwässer drainiert, ohne dass sich bei einem durchschnittlichen Abfluss eine signifikante Erhöhung der hydraulischen Gradienten einstellt. Die Speläogenese wird durch folgende Faktoren kontrolliert (Abb. 3.5):

- die Verkarstungsfähigkeit der Gesteine (Kapitel 3.2.1)
- die chemische Lösung des Gesteins (Kapitel 3.2.2)
- die primären Fliesswege – Initialfugen (Kapitel 3.2.3),
- der hydrologischen Rahmenbedingungen (Kapitel 3.1.2).



Die **Lösungskinetik** erklärt weiter, weshalb das Sickerwasser auch nach längeren Fließstrecken noch nicht im chemischen Gleichgewicht ist und somit noch Lösungskapazität besitzt (Abb. 3.6). Die Lösungsgeschwindigkeit nimmt stark ab, bis etwa 90% der Sättigung erreicht wird und nähert sich danach asymptotisch dem Gleichgewicht (z.B. Plummer & Wigley 1976). Dies bedeutet, dass "aggressives" Sickerwasser auch noch nach Fließstrecken von mehreren Kilometern aggressiv ist, und das Gebirge verkarsten kann (z.B. Groves & Howard, 1994). Daher ist die Lösungskinetik ein Schlüsselfaktor für die Entwicklung eines Karströhrensystems. Dies konnte in verschiedenen numerischen Modellrechnungen gezeigt werden (z.B. Dreybrodt et al., 2005).

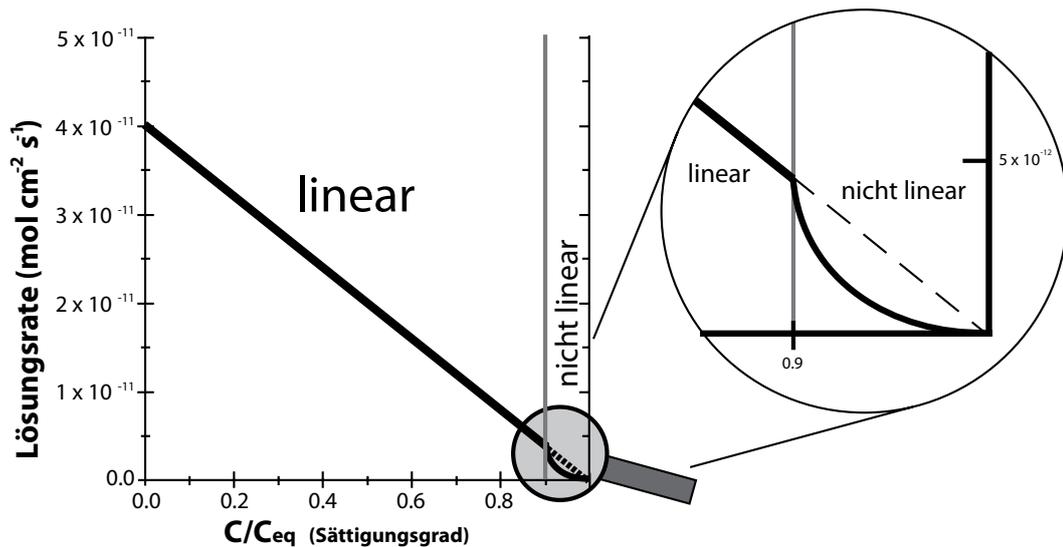


Abb. 3.6: Lösungskinetik von Calcit

Die Lösungsgeschwindigkeit von Calcit in einer wässrigen Lösung nimmt stark ab, bis etwa 90% der Sättigung erreicht ist. Danach nähert sie sich asymptotisch dem Gleichgewicht. Dies erklärt, weshalb Sickerwasser über längere Fließwege Calcit lösen und Karströhren entwickeln kann (Dreybrodt et al., 2005, verändert)



### 3.2.3 Das Konzept der Initialfugen

Das Konzept der Initialfugen ist der erste Eckpfeiler der KarstALEA-Methode. Initialfugen sind Trennflächen oder millimeter- bis zentimetermächtige Zwischenlagen innerhalb der lithostratigraphischen Abfolge, die bevorzugt verkarstet werden.

Gebirge sind mit einem Netz von tektonischen (Klüfte, Verwerfungen) und stratigraphischen Trennflächen (Schichtfugen, Schichtgrenzen) durchtrennt. Diese stellen die ersten Fließwege für das Grundwasser dar und initiieren die Verkarstung des Gebirges. Es ist zu beachten, dass in einem verkarsteten Gebirge nicht alle Trennflächen verkarstet sind (Abb. 3.8). Die verkarsteten Trennflächen werden Initialfugen genannt (auf Englisch Initialfuge = inception feature; stratigraphische Initialfuge = inception horizon; tektonische Initialfuge = inception fracture (Lowe, 1992, Faulkner, 2006)). Das Erkennen und Ausscheiden von Initialfugen ist ein zentraler Bestandteil der KarstALEA-Methode.

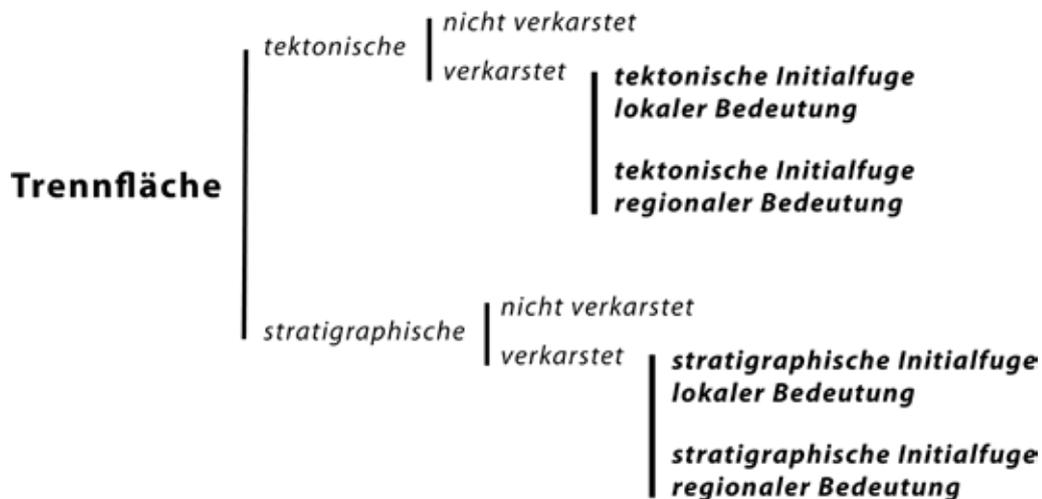


Abb. 3.8: Klassifizierung der Trennflächen im verkarsteten Gebirge

Nur ein kleiner Teil der Trennflächen in einem Gebirge sind verkarstet. Das Konzept der Initialfugen erlaubt es, diese Trennflächen zu unterscheiden.

Initialfugen können anhand ihres Einflusses auf die Entwicklung der Karströhrennetze **in Initialfugen lokaler und regionaler Bedeutung** unterteilt werden. Wobei lokalen Initialfugen den Gangverlauf einer Karströhre über eine Strecke von mehreren Meter bis Dekameter bestimmt, prägen regionale Initialfugen den Gangverlauf über Strecken von mehreren hundert Meter bis Kilometer. Oft treten lokale und regionale Initialfugen zusammen auf. Dabei bestimmen die regionalen Strukturen den globalen Verlauf der Gänge und die lokalen den kleinräumigen Gangverlauf (z.B. Lowe, 1992; Filipponi, 2009). Lokale und regionale Initialfugen können dieselben Merkmale aufweisen und sind ähnlich verkarstungsanfällig. Der wesentliche Unterschied ist die Grösse der Trennfläche. Während lokale Initialfugen selten grösser als 0.01 km<sup>2</sup> sind, können regionale Initialfugen mehrere km<sup>2</sup> gross sein. In der Regel sind in einem Gebirge nur eine geringe Anzahl von regionalen Initialfugen vorhanden (z.B. Filipponi et al., 2009).

Der Einfluss der lokalen und regionalen Initialfugen auf die Anlage der Karströhren ist in den verschiedenen speläogenetischen Bereichen (Kapitel 3.2) unterschiedlich (Tab. 3.1). So entwickelten sich zum Beispiel im horizontalen Höhlenbereich rund 70 % der Karströhren entlang regionalen Initialfugen und rund 30 % entlang lokalen Initialfugen (Filipponi et al., 2009).

Tab. 3.1: Verteilung der Karströhren entlang lokaler und regionaler Initialfugen für die verschiedenen speläogenetischen Bereiche

Mit Ausnahme vom Epikarst- und Epikarstschachtbereich konzentrieren sich die Karströhren mehrheitlich auf wenigen regionalen Initialfugen in einem Gebirge.

Prozent der Karströhren, die sich auf Initialfugen entwickelt haben	Karströhren entlang regionaler Initialfugen	Karströhren entlang lokaler Initialfugen
Epikarstbereich	-	-
Epikarstschachtbereich	30%	70%
Schachtbereich	80%	20%
Horizontalhöhlenbereich	70%	30%
Initialbereich	95%	5%

In der Erkundungsphase der KarstALEA-Methode (Kapitel 6) werden nur die regionalen Initialfugen ausgeschieden. In der Bauphase (Kapitel 7) werden lokale und regionale Initialfugen erfasst.

### 3.2.3.1 Tektonische Initialfugen

Unter tektonischen Initialfugen (Abb. 3.9) werden Klüfte und Verwerfungen verstanden, die bevorzugt verkarstungsanfällig sind. Ihre Verkarstungsanfälligkeit wird unter anderem von ihrer anfänglichen Öffnungsweite, ihrer Ausdehnung, ihres Durchtrennungsgrades und ihrer Ausrichtung zum hydraulischen Gradienten bestimmt. So werden zum Beispiel bevorzugt Klüfte verkarstet werden, welche parallel zum hydraulischen Gradienten liegen und/oder sich parallel zum Hauptspannungsfeld des Gebirges entwickelt haben (parallel zu  $\sigma_1$  streichende Klüfte) (Eraso, 1985), da sie tendenziell grössere Öffnungsweiten aufwiesen.

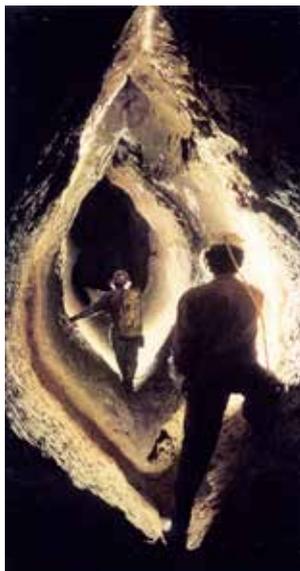


Abb. 3.9: Gang auf tektonischer Initialfuge im Hölloch SZ (Foto: Urs Widmer, Speleoprojects)

In der Regel dienen Klüfte und kleinere Verwerfungen (<0.01 km<sup>2</sup>) als lokale tektonische Initialfugen. Grössere Verwerfungen haben meist die Funktion von regionalen Initialfugen (Abb. 3.9), wobei Kakirit verkarstungshemmend wirken kann.

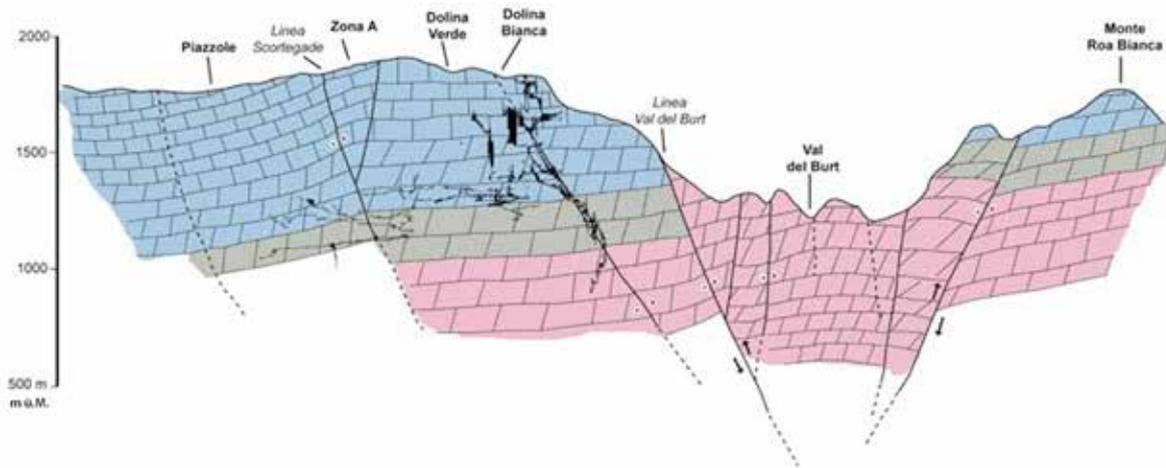


Abb. 3.10: Höhlen entlang einer tektonischen Initialfuge

Schnitt durch ein Höhlensystem dessen Schachtzone sich entlang einer tektonischen Initialfuge regionaler Bedeutung (in diesem Falle eine Verwerfung) entwickelt hat (Piani Eterni - Italien. Sauro et al., 2011).

### 3.2.3.2 Stratigraphische Initialfugen

Stratigraphische Initialfugen sind stratigraphische Trennflächen (Schichtfugen, Schichtgrenzen) oder Zwischenlagen, die bevorzugt verkarstet werden. Der Begriff Initialfuge kann irreführend sein, da es sich nicht nur um (Schicht-)Fugen im engeren Sinne handelt, sondern auch für millimeter- bis dezimeter-mächtigen Zwischenlagen innerhalb der stratigraphischen Abfolge verwendet wird.

Die stratigraphischen Initialfugen unterscheiden sich meist nur geringfügig in lithologischer und geomechanischer Hinsicht vom umliegenden Gestein (Filipponi, 2009). In einer stratigraphischen Abfolge hat es meistens eine Vielzahl von Schichtfugen oder Zwischenlagen, die die lithologischen Voraussetzungen einer stratigraphischen Initialfuge erfüllen. Benachbarte Höhlensysteme weisen zum Teil unterschiedlich stark ausgeprägte Initialfugen in identischer stratigraphischer Position auf (Filipponi et al. 2009; Plan et al. 2009). Dies liegt einerseits daran, dass sich die Eigenschaften der Schichtfugen lateral verändern (z.B. kleine Veränderungen im Tonanteil), andererseits hängt es nicht nur von den lithologischen Eigenschaften ab, ob eine Schichtfuge verkarstet wird oder nicht. Neben der Lithologie beeinflussen auch die hydrologischen Rahmenbedingungen die Intensität der Verkarstung entlang einer Trennfläche. So können entlang einer Initialfuge unter weniger günstigen Verhältnissen nur mikroskopisch kleine Lösungshohlräume entstehen, während unweit davon die Verhältnisse günstiger sind und sich ein ausgeprägtes Höhlengangsystem entwickeln kann.

Anhand ihrer Eigenschaften lassen sich drei Arten von stratigraphischen Initialfugen unterscheiden (Abb. 3.11; Filipponi, 2009). Bei der Ausscheidung der Initialfugen im Rahmen der KarstALEA-Methode wird nicht explizit zwischen den verschiedenen Arten von stratigraphischen Initialfugen unterschieden. Jedoch ist die Unterscheidung hilfreich für das Verständnis und die Erkennung im Feld.

- Stratigraphische Initialfuge bei der **die Initialisierung innerhalb der Schichtfuge** stattfand.  
Diese Initialfugen zeichnen sich gegenüber dem Umgebungsgestein aus durch:
  - eine erhöhte primäre Permeabilität (→ höherer Durchfluss)
  - einen erhöhten Karbonatanteil (→ reinerer Kalkstein → höhere Lösungsfähigkeit)
  - einen geringeren Matrixanteil (→ mikroskopisch erhöhte Verkarstungsanfälligkeit)

- einen erhöhten Anteil an Pyrit (→ Oxydation → Schwefelsäure → Aggressivität des Wassers)
  - Klüfte, die den Horizont durchqueren oder nur in ihm vorkommen (→ höhere Durchlässigkeit → höherer Durchfluss).
- Stratigraphische Initialfuge bei der **die Initialisierung am Kontakt zwischen der Schichtfuge und dem angrenzenden Felsen** stattfand.  
Diese Initialfugen zeichnen sich gegenüber dem Umgebungsgestein aus durch:
    - eine geringere primäre Permeabilität
    - einen erhöhten Anteil an Tonmineralien
    - einen erhöhten Anteil an Pyrit in Mergellage (→ Oxydation → Schwefelsäure → Aggressivität des Wassers am Kontakt)
  - Klüfte, die entlang der Initialfuge auslaufen (→ höherer Durchfluss am Kontakt).
- **Die Initialisierung fand entlang einer schichtparallelen tektonischen Trennfläche** statt.  
Diese Initialfugen zeichnen sich aus durch:
    - eine hohe primäre Permeabilität entlang einer schichtparallelen tektonischen Trennfläche (→ höherer Durchfluss)

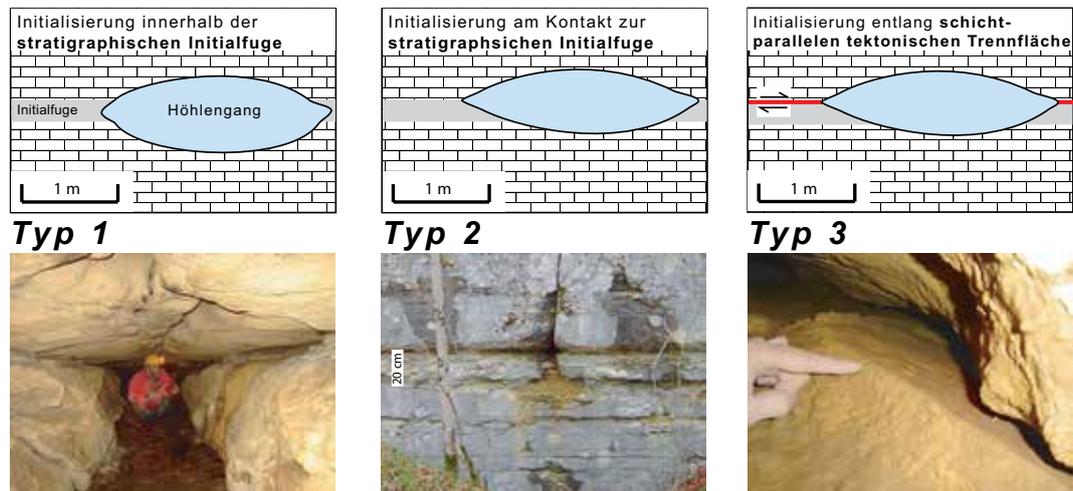


Abb. 3.11: Drei Arten von stratigraphischen Initialfugen

Die stratigraphischen Initialfugen unterscheiden sich in lithologischer und geomechanischer Hinsicht meist nur geringfügig vom umliegenden Gestein. Anhand ihrer speläogenetischen Bedeutung lassen sich drei Arten von stratigraphischen Initialfugen unterscheiden (siehe Text). (Filipponi, 2009, verändert)

### 3.2.4 Konsequenz des Konzepts der Initialfugen für die Beurteilung der karstspezifischen Gefahren

Als Initialfugen werden jene Trennflächen eines Gebirge bezeichnet, die aufgrund von physikalischen oder lithologischen Eigenschaften besonders verkarstungsanfällig sind. Die wenigen Initialfugen bestimmen weitgehend die Lage und Struktur der Karströhren.

Mit geeigneten Untersuchungen ist es möglich, die Initialfugen im Feld und/oder mit Hilfe gezielter Datenanalyse zu erkennen und zu kartieren (Abb. 3.12, Kapitel 6.5). Auch wenn aufgrund der Ausscheidung der Initialfugen regionaler Bedeutung die genaue Lage und die detaillierten Eigenschaften der Karströhren nicht bestimmt werden können, bildet sie die Grundlage für eine differenzierte Betrachtung des Gebirges bezüglich der Karströhrendichte und damit auch der Wahrscheinlichkeit, auf Karströhren zu stossen.

Das Erkennen, Ausscheiden und Kartieren von Initialfugen ist deshalb ein zentraler Bestandteil der KarstALEA-Methode.

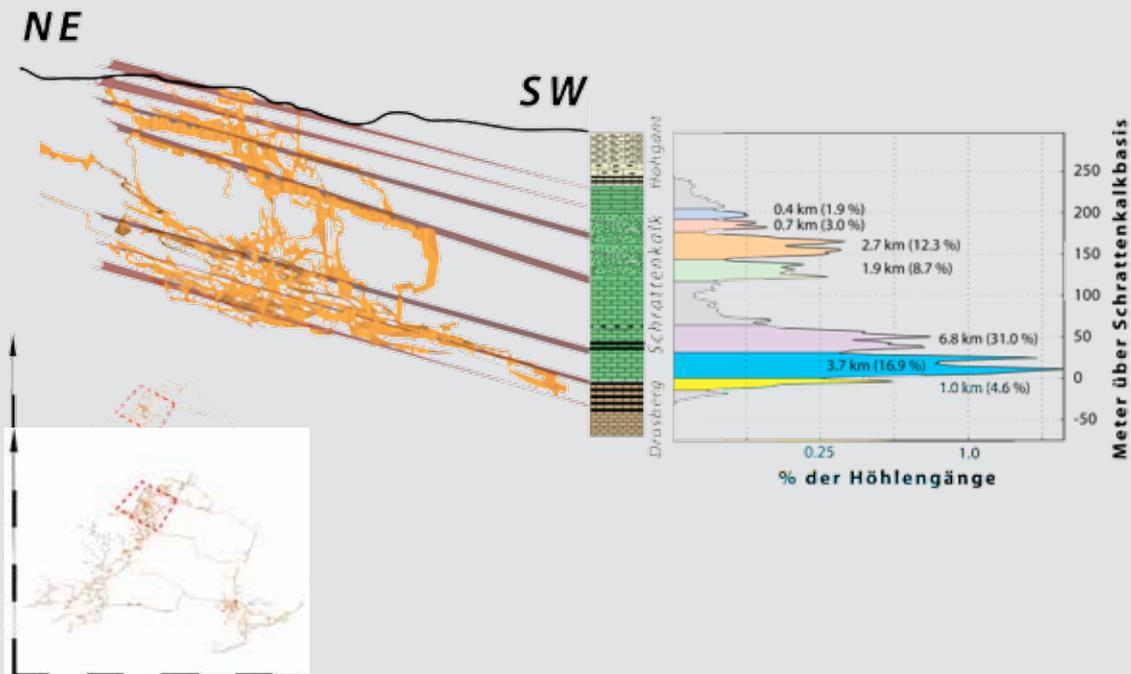


Abb. 3.12: Erkennen von stratigraphischen Initialfugen in einem 3D-Höhlenmodell

Aufgrund der optischen Analyse des 3D-Modells (links) oder der statistischen Analyse des Abstandes der Höhlengänge zu einer stratigraphischen Referenzfläche (Histogramm rechts), können sieben stratigraphische Initialfugen innerhalb der Schrattenkalk-Formation bestimmt werden. (Beispiel: Teil des Réseau Siebenhengste). (Filipponi, 2009, verändert)

### 3.2.5 Das Konzept der speläogenetischen Bereiche

Die Verkarstung ist für geologische Verhältnisse ein schneller Prozess; ein Höhlensystem kann sich in einigen Zehntausend bis Millionen Jahren entwickeln (z.B. Bosák, 2002). Die Intensität der Verkarstung variiert zeitlich stark, da sie von klimatischen und landschaftsgeschichtlichen Faktoren abhängt, die in geologischen Zeiteinheiten grossen Schwankungen unterworfen sind. So gibt es Zeiten, in denen die Verkarstung eines Gebietes intensiv ist, und andere, in denen sie zum Stillstand kommt.

#### 3.2.5.1 Die speläogenetischen Stadien

Um die Verteilung der Karströhren entlang der Initialfugen zu verstehen, ist eine kleine Exkursion in die Entwicklung einer Karströhre nötig, den speläogenetischen Stadien. Eine Karströhre kann in ihrer Entwicklung bis zu drei Stadien durchlaufen (Abb. 3.13 z.B. Lowe, 1992). Vielfach bricht die Entwicklung einer Röhre ab, bevor eine Karströhre das Stadium der Höhlenentwicklung oder gar der Gestation erreicht wird. Die wenigen Karströhren, die das Stadium der Höhlenentstehung erreicht haben, kennen wir als Höhlengänge.

- **Initialisierung:**

Die Initialisierung stellt den Beginn der Verkarstung einer Trennfläche dar. In diesem Stadium werden aus "einfachen" Trennflächen Initialfugen. Der Zeitpunkt, ab welchem die Permeabilität entlang der Trennfläche kontinuierlich zunimmt, markiert den Übergang von der Lithifizierung zur Initialisierung.

Die Initialisierung erfolgt in einem Gebirgsbereich mit einer allgemein sehr geringen Durchlässigkeit. Die Grundwasserflüsse sind entsprechend auch entlang der Initialfugen noch sehr bescheiden (vgl. Kapitel 3.1). Daher sind die Verkarstungsprozesse während dieses Stadiums sehr langsam. Die Lösungsformen der Initialisierung erreichen Durchmesser von Mikrometern bis Millimetern.

Während die Initialisierung von stratigraphischen Initialfugen mehrere Millionen Jahre dauern kann (z.B. Filipponi, 2009), erfolgt die Initialisierung von tektonischen Initialfugen meist relativ spät in der Geschichte eines Gebirges. Die Initialisierung erfolgt mehr oder weniger ausgeprägt im ganzen Gebirge.

- **Gestation:**

Wenn sich die hydrologischen Rahmenbedingungen ändern (z.B. durch Absenkung des Vorfluterniveaus), kann der hydraulische Gradient im entsprechenden Bereich zunehmen (Kapitel 3.1). Dadurch nimmt der Grundwasserfluss durch die Initialfugen zu, bleibt aber weitgehend laminar und diffus. Nur allmählich wird aus dem diffusen Fluss ein Netz von Karströhren, welches heute noch in manchen Höhlen als Anastomosen erkennbar ist. Sobald der Grundwasserfluss in einer Karströhre von laminar zu turbulent wechselt, nimmt die Lösungsrate in dieser Röhre schlagartig zu, womit das Stadium der Höhlenentstehung beginnt.

Das Stadium der Gestation dauert üblicherweise 10- bis 100-tausend Jahre. Dabei verschiebt sich der Gebirgsbereich, welcher sich in diesem Stadium befindet, allmählich vom Quellbereich Richtung Einzugsgebiet.

- **Höhlenentstehung:**

Das Stadium der Höhlenentstehung beginnt mit dem Wechsel des laminaren zum turbulenten Fließens. In diesem Stadium werden aus Karströhren mit einem Durchmesser von wenigen Zenti- oder Dezimeter Höhlengänge mit einem Durchmesser von bis zu mehreren Metern. Der Prozess der Höhlenentstehung kann sowohl im durchlässigen

Bereich der phreatischen Zone, in der epiphreatischen Zone wie auch in der vadosen Zone erfolgen. Die Entwicklung von einer Karströhre zu einem Höhlengang ist ein relativ schneller Prozess und kann innert weniger 10-tausend Jahre erfolgen.

Die oben beschriebenen drei Entwicklungsstadien einer Karströhre gelten vorwiegend für stratigraphische Initialfugen. Bei den tektonischen Initialfugen entfällt in der Regel das Stadium der Initialisierung, respektive das tektonische Ereignis selbst, währenddessen sich die Trennfläche bildet, kann als Initialisierung betrachtet werden.

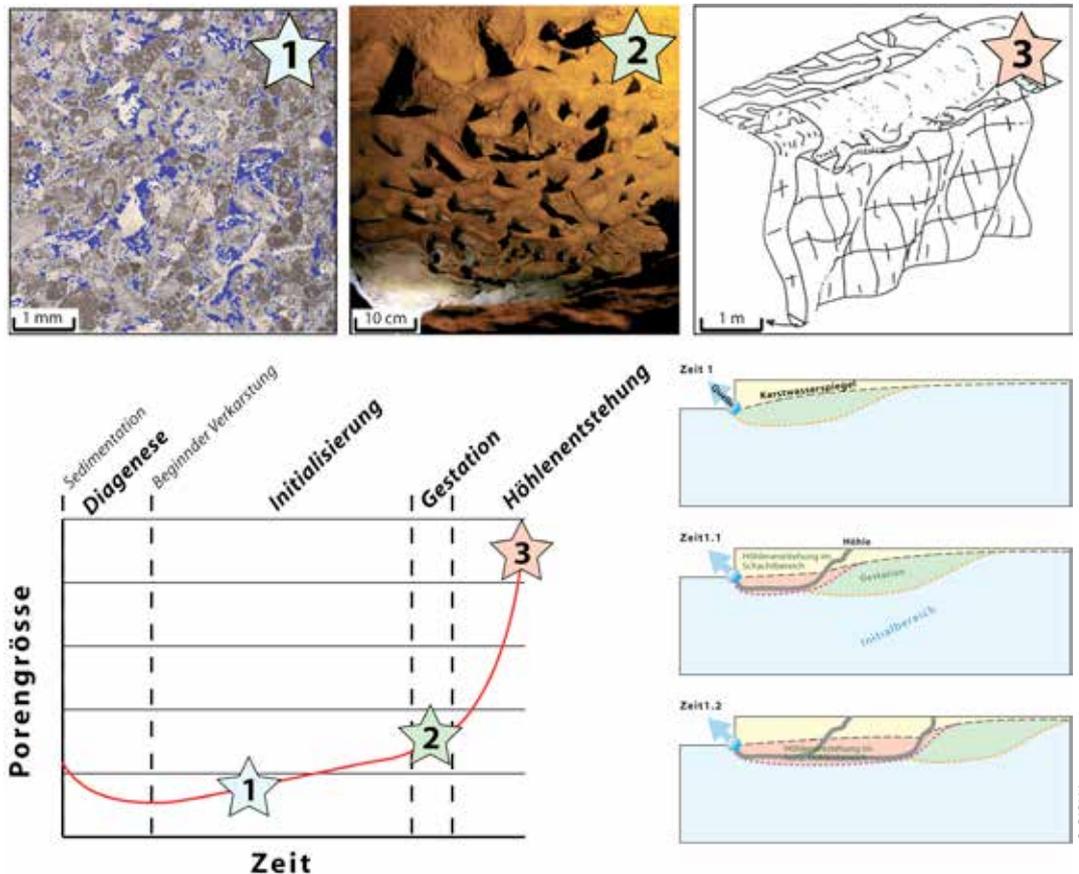


Abb. 3.13: Stadien der Entwicklung einer Karströhre

Die Entwicklung einer Karströhre kann in drei Stadien unterteilt werden: 1) Initialisierung, in der mikroskopische, lokale Lösungshohlräume entstehen; 2) Gestation in der ein Netz von Karströhren mit Durchmessern von wenigen Zenti- bis Dezimeter entsteht (Anastomosen); 3) Höhlenentstehung währenddessen sich eine kleine Karströhre zum Höhlengang erweitert. Die drei Stadien kommen einerseits innerhalb eines Gebirges gleichzeitig vor, andererseits folgen sie bei der Entwicklung einer Karströhre (respektive eines Karströhrennetzes einer Zone) aufeinander (teilweise Ford & Williams, 2007).

### 3.2.5.2 Die speläogenetischen Bereiche

Das Konzept der speläogenetischen Bereiche stellt den zweiten Eckpfeiler der KarstALEA-Methode dar (Kapitel 6.5). Es ermöglicht die Unterteilung eines verkarsteten Gebirges in fünf Bereiche, mit unterschiedlichen Karströhrencharakteristika, Karströhrendichten und dominanten speläogenetischen Prozessen (Abb. 3.14; Filipponi, 2009; Filipponi & Jeannin, 2009). Die Entstehung der speläogenetischen Bereiche und damit die Struktur und Morphologie des Karströhrensystems ist eng mit den speläogenetischen Stadien

und den hydraulischen Verhältnissen im Gebirge verbunden (hydrogeologische Zonen, Kapitel 3.2). Der vertikale hydraulische Gradient in der vadosen Zone führt zu (sub)vertikal ausgerichteten Karströhren, der subhorizontale Gradient in der phreatischen Zone zu (sub)horizontal zur Quelle gerichteten Karströhren. Die Unterteilung eines Gebirges in die speläogenetischen Bereiche erfolgt aufgrund von speläomorphologischen Aspekten sowie der Karströhrendichte-Verteilung. Die hydrogeologischen Zonen liefern auch wichtige Anhaltspunkte.

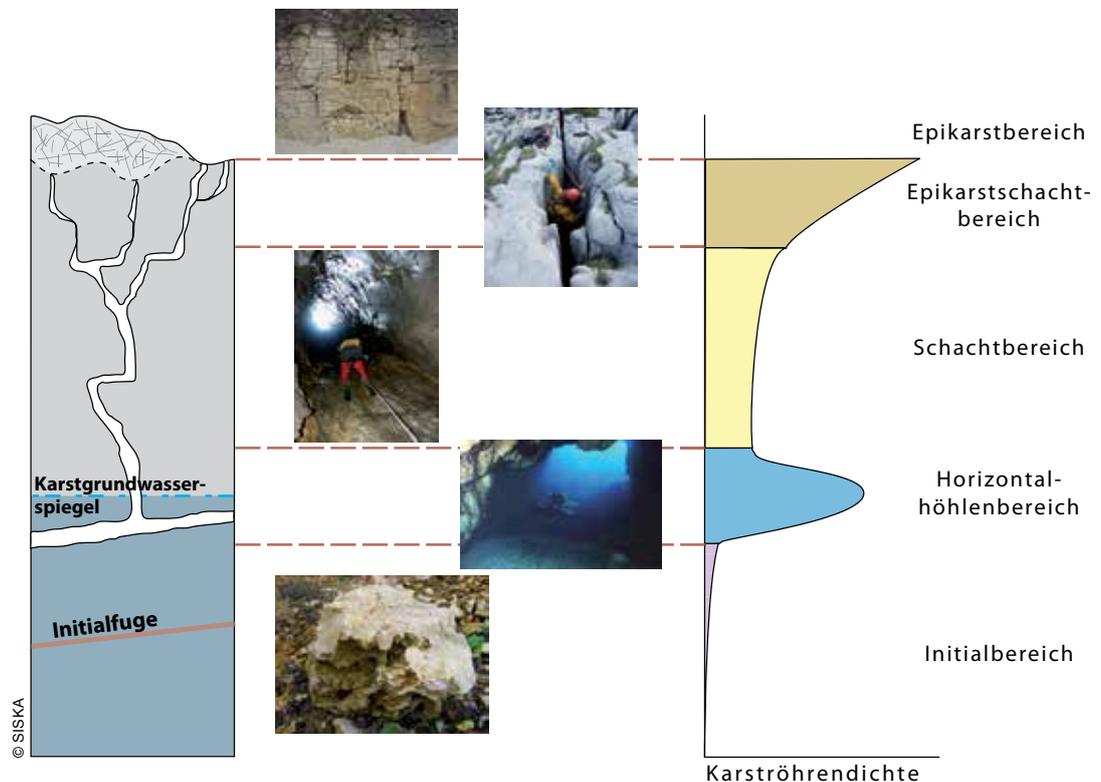


Abb. 3.14: Die speläogenetischen Bereiche eines verkarsteten Gebirges

Die Karströhrendichte wie auch die Morphologie der Karströhren hängen von den speläogenetischen Bereichen ab – Epikarstbereich, Epikarstschachtbereich, Schachtbereich, Horizontalhöhlenbereich und Initialbereich.

- Der **Epikarstbereich (EKB)** ist der oberflächennahe Bereich des Karstgebirges. Er umfasst die oberflächennahen 0 - 20 m. Die Mächtigkeit kann – bedingt durch die Oberflächenerosion sowie die Intensität der Verkarstung – räumlich stark variieren. Der Bereich zeichnet sich durch eine wesentlich erhöhte Durchlässigkeit aus. Diese ist auf die meist noch intensive Lösungsfähigkeit der Sickerwässer zurückzuführen, die entlang von Trennflächen in den Untergrund versickern und diese erweitern. Die verbreitetsten Karstformen sind erweiterte Trennflächen oder kleine Karströhren. Eigentliche Höhlen fehlen weitgehend. In der Regel kann ein stark geklüfteter bis zerrütteter, zum Teil mit Sedimenten verfüllter, oberflächennaher Bereich erkannt werden. Bei den Sedimenten handelt es sich weitgehend um Sedimente bis Steinfraction, welche von der Oberfläche hineingeschwemmt wurden oder hinein gerutscht sind. Teilweise ist im Epikarstbereich ein geringmächtiger schwebender Grundwasserkörper anzutreffen, der an manchen Aufschlüssen kleine Quellen bildet. Dieser Grundwasserkörper füllt sich bei Niederschlagsereignissen relativ schnell und entleert sich allmählich in den Epikarstschacht-Bereich.

- Unterhalb des Epikarstbereichs schliesst sich der **Epikarstschacht-Bereich (EKSB)** an. Der Bereich ist für die Entwässerung des Epikarstes zuständig. Die verbreitetste Karstform sind Schächte mit einem Durchmesser von einigen Dezimetern bis Metern.

Der Bereich hat eine räumlich stark variierende Mächtigkeit von 20 – 50 m und geht mit der Tiefe in den Schachtbereich über. Die Häufigkeit der Epikarstschächte nimmt mit der Tiefe ab (von ca. einen Schacht alle 30 m auf einen Schacht alle ca. 100 m, d.h. von ca. 10 auf 1 Schacht pro 100 m<sup>2</sup>). Charakteristischerweise zeigt die Häufigkeitsverteilung einen markanten Knick bei einer Tiefe rund 20 bis 50 m unterhalb des Epikarstbereichs. Dieser Knick ist als Untergrenze des Epikarstschacht-Bereichs definiert (z.B. Baroň, 2002).

Die Hohlräume können zum Teil mit Sedimenten verfüllt sein. Dabei handelt es sich vorwiegend um Steine und Blöcke, die von der Oberfläche hineingefallen, sind hineingestossen wurden oder von Frostsprengung stammen.

Die Karströhren des Epikarstschacht-Bereichs haben üblicherweise eine geringe Wasserführung (Sickerwasser aus dem Epikarst), welche jedoch bei Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelze schnell und stark zunehmen kann.

- Der **Schachtbereich (SB)** befindet sich im Liegenden des Epikarstschacht-Bereichs. Morphologisch wechseln sich grossräumige, tiefe Schächte (bis zu >20 m breit und bis zu mehr als 100 m tief) und subhorizontale Mäanderpassagen ab. Die Mächtigkeit des Schachtbereichs hängt von der Mächtigkeit der vadosen Zone ab und kann mehrere hundert Meter betragen. Der Schachtbereich endet mit dem Eintauchen der Höhlengänge in den horizontalen Höhlenbereich.

Die Karströhrendichte des Schachtbereichs ist signifikant kleiner als im Epikarstschacht-Bereich, (eine Karströhre alle 100-200 m, d.h. 25-100 Schächte pro km<sup>2</sup>; z.B. Tscherringer, 2010). Die Verteilung ist – abgesehen von den subhorizontalen Mäanderpassagen – über den ganzen vertikalen Bereich mehr oder weniger gleichmässig.

Verglichen mit dem Epikarstschacht-Bereich kommen im Schachtbereich bedeutend weniger Sedimente vor. Alle Kornklassen können angetroffen werden, wobei Blöcke (von instabilen Hohlräumen) sowie siltig-sandigen Sedimenten (durch die Höhlenbäche transportiert und sedimentiert) am häufigsten sind. Vor allem in den fossilen Karströhren, sind Sinterablagerungen (z.B. Tropfsteine) nicht selten.

Die Höhlen können fossil (keine Wasserführung), semiaktiv (zeitweise wasserführend nach Niederschlägen oder Schneeschmelze) oder aktiv (ganzjährig wasserführend) sein, wobei eine Schüttung in der Grössenordnung von mehreren Kubikmeter pro Sekunde erreicht werden kann.

- Der **Horizontalhöhlenbereich (HHB)** liegt im Liegenden des Schachtbereichs. Die Karströhren sind im Gegensatz zu jenen in den darüberliegenden Bereichen unter phreatischen oder epiphreatischen Bedingungen entstanden. Die Karströhren haben in der Regel einen subhorizontalen Gangverlauf mit charakteristischen Loops (Gegensteigungen und Gefälle) und entwickeln sich in der epiphreatischen Zone und in den obersten 30 bis 60 m der phreatischen Zone. Die Gänge weisen oft einen runden bis elliptischen Querschnitt auf, wobei Durchmesser von bis zu mehreren Metern häufig sind.

Die Karströhrendichte des Horizontalhöhlenbereichs ist rund 4 bis 10-mal grösser als im Schachtbereich.

Die Karströhren sind häufig mit siltig-sandigen zum Teil kiesigen Sedimenten teilweise oder ganz gefüllt. Die Sedimente werden durch die Karstgewässer transportiert und abgelagert.

Die Karströhren sind immer (phreatische Zone) oder zeitweise (epiphreatische Zone) vollständig mit Wasser gefüllt. Eine Schüttung von mehreren Kubikmeter pro Sekunde ist nicht unüblich. Bei Niedrigwasser sind in den Karströhren der phreatischen Zone Wasserdrücke von wenigen Bar zu erwarten, in der epiphreatischen Zone fliesst allfälliges Wasser frei (keinen Druck). Bei Hochwasser sind Wasserdrücke von bis zu mehreren Zehner Bar möglich.

- Als **Initialbereich (IB)** wird der Gebirgsbereich des Karstaquifers bezeichnet, der sich unterhalb des Horizontalhöhlenbereichs erstreckt. Die kleinen Hohlräume sind permanent mit Wasser gesättigt, die Durchlässigkeit und damit der Grundwasserfluss ist noch sehr gering. In diesem Bereich befindet sich die Verkarstung noch im Anfangsstadium.

Im Initialbereich werden Trennflächen zu Initialfugen (Initialisierung – Kapitel 3.2.4), welche später zu Karströhren erweitert werden können. Viele der Eigenschaften von Initialfugen, die im Kapitel "stratigraphische Initialfugen" (Kapitel 3.1.3.2) beschrieben wurden, haben ihre speläogenetische Funktion im Initialbereich (Filipponi, 2009).

Eigentliche Karströhren sind im Initialbereich nicht zu erwarten. Hingegen treten bereits bis auf wenige cm erweiterte Trennflächen auf. Je nach Verhältnissen können sich in stark geklüfteten Bereichen Klufftaquifere befinden.

### 3.2.5.3 Aktuelle und paläo-speläogenetischen Bereiche

In einem alpinen Kontext, in welchem die Landschaft durch Gletschervorstösse und Tiefenerosion regelmässig verändert wurde, mussten sich die Karstsysteme regelmässig an neue hydrologische Rahmenbedingungen anpassen. Dabei werden die speläogenetischen Bereiche einer bestimmten Zeit durch die späteren speläogenetischen Prozesse teilweise überprägt (e.g. Audra et al., 2007). Der Zeitraum zwischen zwei Änderungen des Vorfluterniveaus wird als speläogenetische Phase bezeichnet (in der Regel mit Angabe der Höhenlage des Vorfluterniveaus – z.B. speläogenetische Phase 850 m). In jeder Phase entwickelt sich auf dem Niveau des Vorfluters ein Horizontalhöhlenbereich, darüber ein Schachtbereich und so fort (Abb. 3.15). Dabei werden die Höhlengänge der vorherigen Phase zum Teil weiterverwendet. Die speläogenetischen Bereiche der vorhergehenden Phasen werden als paläo-Bereiche bezeichnet (z.B. Horizontalhöhlenbereich 850m). Diese Überlagerung von verschiedenen speläogenetischen Bereichen kann in Regionen mit einer komplexen Landschaftsgeschichte (z.B. mehrfaches Tieferlegen und Anhebung des Vorfluterniveaus durch Talausräumungen und -auffüllungen) zu komplizierten speläogenetischen Modellen führen. Im Hölloch z.B. überschneiden sich die Horizontalhöhlenbereiche in einem solchen Ausmass, dass die speläogenetischen Phasen nicht zufriedenstellend unterschieden werden können.

Im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen werden sowohl die aktuellen als auch die paläo-speläogenetischen Bereiche ausgeschieden, da die verschiedenen Bereiche eigene Hohlraumcharakteristika sowie Karströhrendichten aufweisen (Abb. 5.16; Kapitel 6.5).

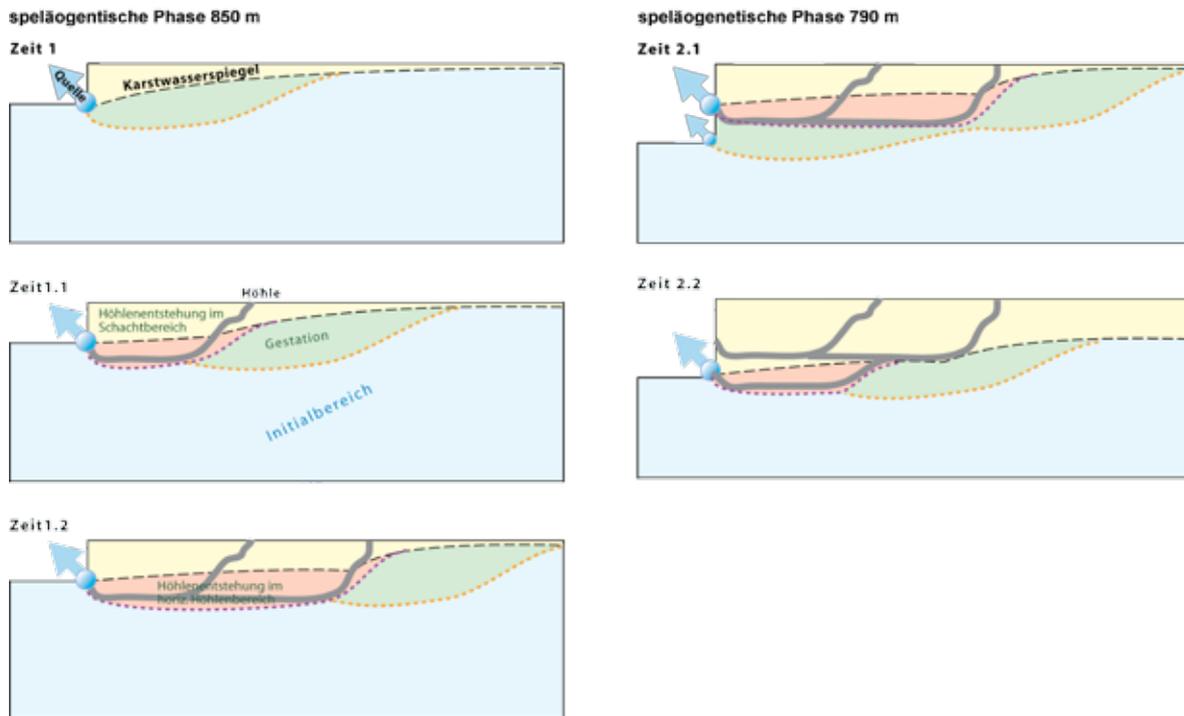


Abb. 3.15: Die Entwicklung eines Karstsystems erfolgt in der Regel in mehreren Phasen

In jeder Phase entwickelt sich auf dem Niveau des Vorfluters ein horizontaler Höhlenbereich, darüber ein Schachtbereich etc. Die Verkarstung erfolgt rückschreitend von der Quelle zum Einzugsgebiet (vgl. speläogenetische Stadien). Die speläogenetischen Bereiche der vorhergehenden Phase werden als paläo-Bereiche bezeichnet.

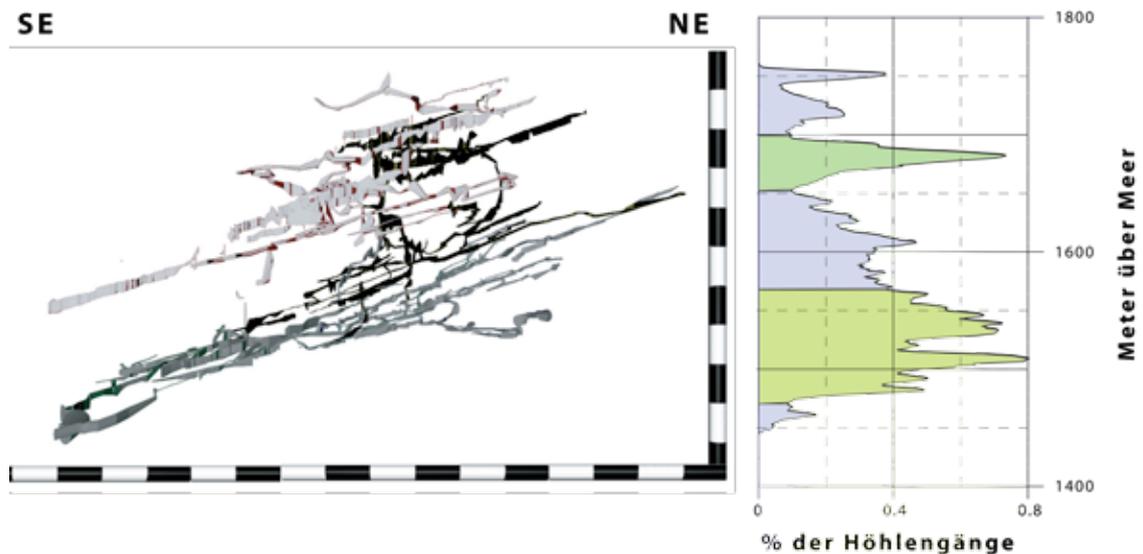


Abb. 3.16: Ausscheidung der horizontalen Höhlenbereiche früherer Verkarstungsphasen (paläo-HHB) basierend auf die phreatischen Höhlengänge eines Teils des eines Teils des Réseau Siebenhengste-Hohgant.

Die optische Analyse des 3D-Modells und die statistische Analyse der Höhenlage der Höhlengänge (Histogramm) zeigen eine starke Abhängigkeit der Karströhrendichte von der Höhenlage und der damit verbundenen Lagen der Vorfluter. (Filipponi, 2009, verändert)

### **3.2.6 Konsequenz des Konzepts der speläogenetischen Bereiche für die Beurteilung der karstspezifischen Gefahren**

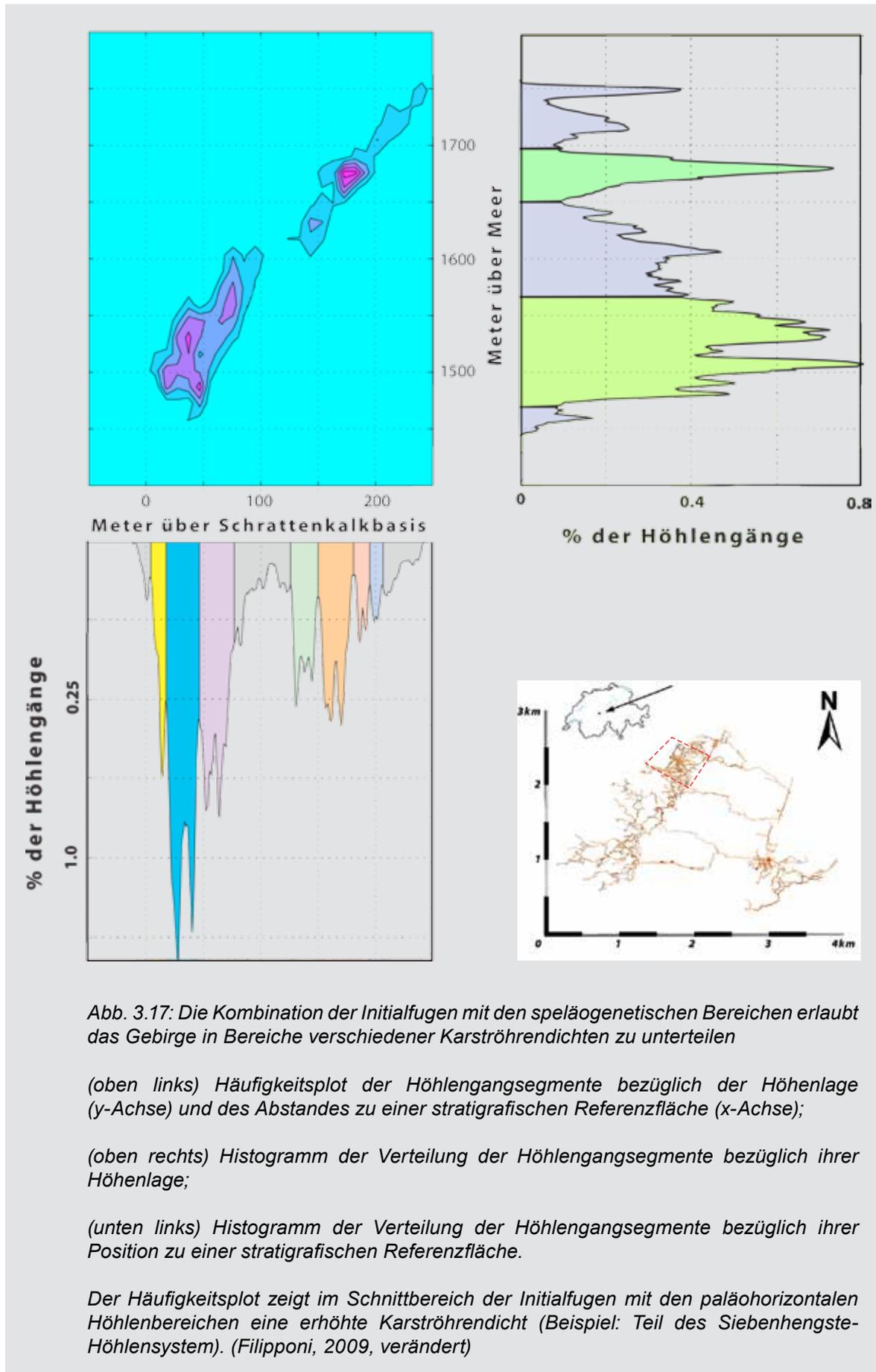
Das Konzept der speläogenetischen Bereiche ermöglicht die Unterteilung eines verkarsteten Gebirges in Bereiche mit spezifischen speläogenetischen Prozessen, sowie bestimmten Karströhrencharakteristika und Karströhrendichten.

Zusammen mit der hydrogeologischen Charakterisierung des Gebirges (Kapitel 6.4) bilden die speläogenetischen Bereiche (Kapitel 6.5) die Grundlage um die karstspezifischen Gefahren zu charakterisieren (Beschreibung von Gefährdungsbildern) und räumlich zuzuordnen (Kapitel 6.7).

Während das Konzept der Initialfugen (Kapitel 3.2.2) die Verteilung der Karströhren innerhalb eines speläogenetischen Bereiches bestimmt, ermöglichen die speläogenetischen Bereiche eine grossräumige Differenzierung der Karströhrendichten innerhalb des Gebirges.

Die Kombination der Konzepte der Initialfugen und der speläogenetischen Bereiche ermöglicht die Unterteilung des Gebirges in Zonen mit charakteristischen Karströhrendichten (Abb. 3.17). Die exakte Lage und spezifischen Eigenschaften der Karströhren können hingegen nicht vorhergesagt werden.

Das Erkennen und Ausscheiden der speläogenetischen Bereiche ist daher ein zentraler Bestandteil der KarstALEA-Methode (Kapitel 6.5).



## 4 KarstALEA-Methode – Überblick

### ZUSAMMENFASSUNG

Die KarstALEA-Methode stellt eine Ergänzung zu den üblichen geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen gemäss SIA 199 dar. Sie ermöglicht eine stufen- und projektgerechte Charakterisierung des verkarsteten Gebirges und der karstspezifischen Gefahren. Verglichen mit anderen üblichen Methoden ermöglicht die KarstALEA-Methode eine präzisere Beschreibung der vom Bauwerk tangierten Karstsysteme – sowohl was deren räumliche Struktur, wie auch deren Verhalten und weitere gefährdungsrelevante Eigenschaften betrifft (Abb. 4.1).

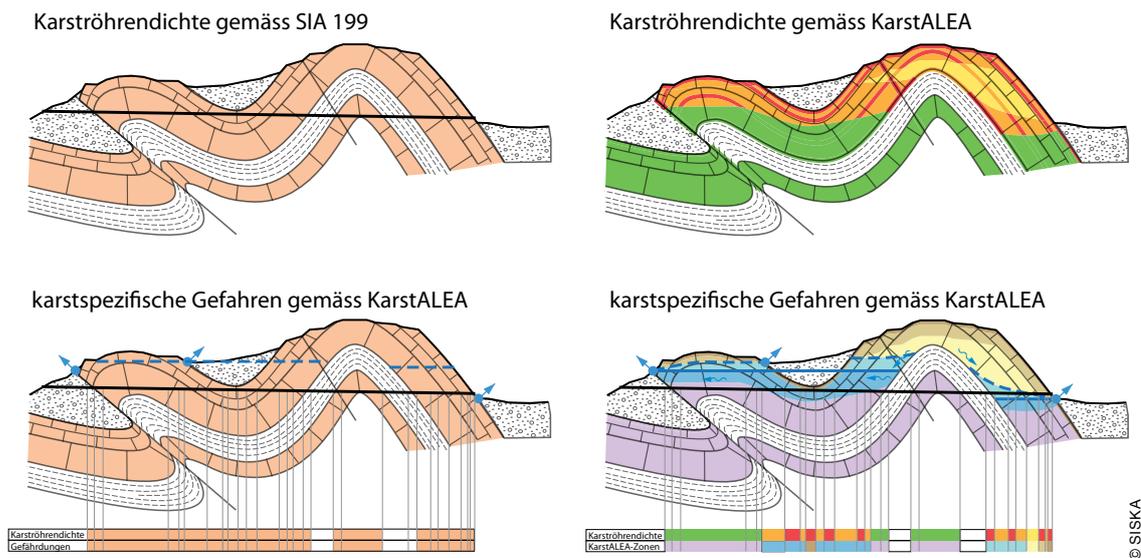


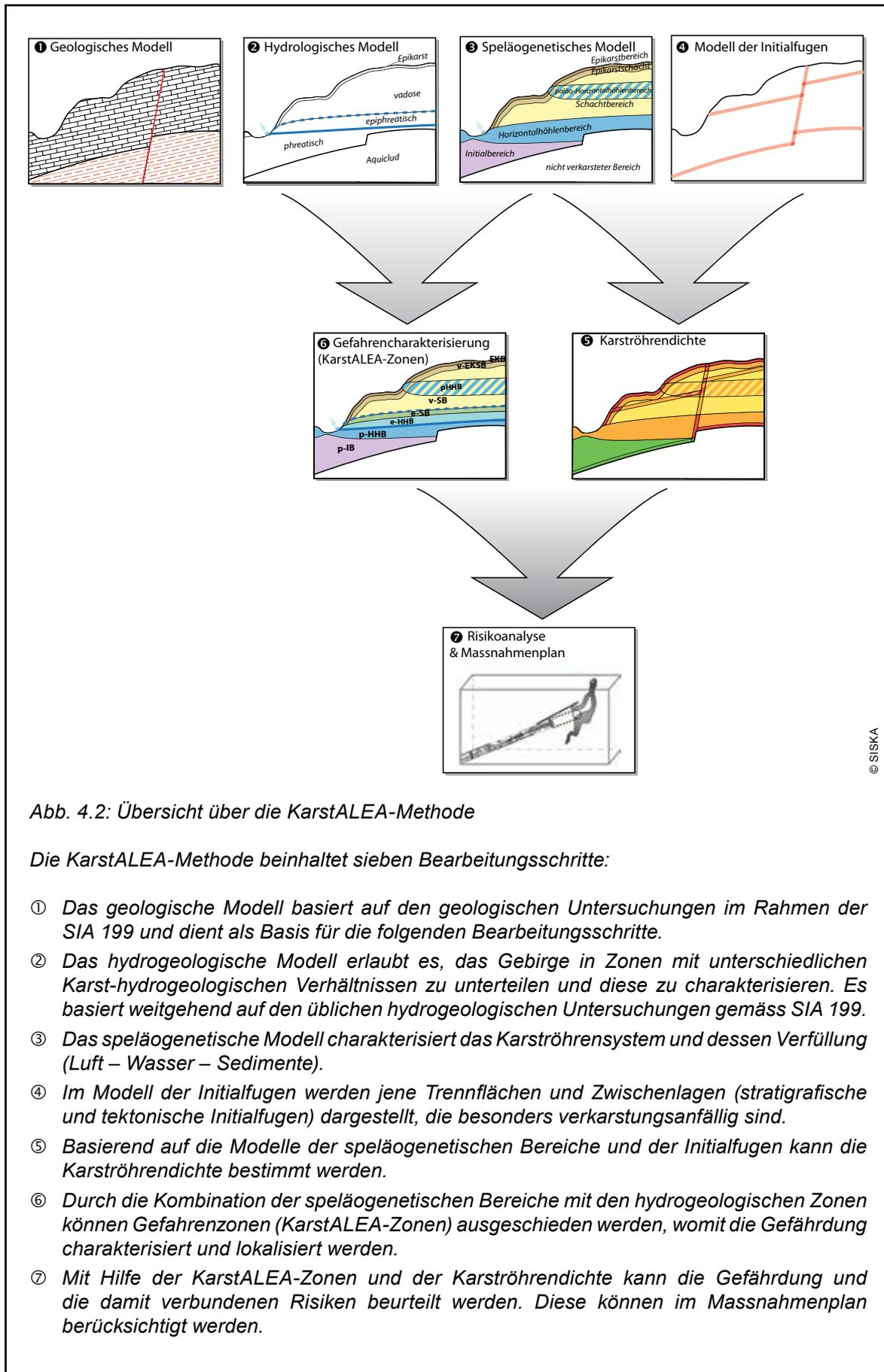
Abb. 4.1: Erkenntnisgewinn der KarstALEA-Methode gegenüber einer klassischen Anwendung der SIA 199

(links) Bezüglich Karst wird im Rahmen einer klassischen Anwendung der SIA 199 in erster Linie festgestellt, ob ein Gebirge verkarstet ist („Zirkulationsart Karst“). Gewisse Ergänzungen erfolgen im Rahmen der hydrogeologischen Beschreibung des Gebirges (Wasserdruck, Durchlässigkeit, Wasseranfall), wobei innerhalb verkarsteter Formationen – mit Ausnahme des Wasserdrucks – nur beschränkt differenziert wird.

(rechts) Resultate des KarstALEA-Auflageprojekt: Räumliche Verteilung der Karströhrendichte, Lokalisierung und Differenzierung der Gefährdungsbilder.

Ein iteratives Vorgehen erleichtert die Integration der KarstALEA-Untersuchungen in die Planungsstadien gemäss SIA 197. Jede Iteration beinhaltet sieben Bearbeitungsschritte, die in der Abb. 4.2 dargestellt sind. Sie basieren auf geologischen, hydrogeologischen, geomorphologischen und speläologischen Daten, die mehrheitlich im Rahmen der üblichen Untersuchungen gemäss SIA 199, der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) oder bauprojektunabhängigen Studien erhoben werden. Die im Rahmen der ersten vier Bearbeitungsschritte erhobenen Daten werden im Rahmen der Bearbeitungsschritte 5 und 6 kombiniert, um die für das Bauvorhaben entscheidende Erkenntnisse zu gewinnen:

- 1) die Karströhrendichte-Zonen (und damit die Wahrscheinlichkeit, in der entsprechenden Zone mit karstspezifischen Gefahren konfrontiert zu werden) und
- 2) die KarstALEA-Zonen (Charakterisierung der Gefahren).



© SISKa

Abb. 4.2: Übersicht über die KarstALEA-Methode

Die KarstALEA-Methode beinhaltet sieben Bearbeitungsschritte:

- ① Das geologische Modell basiert auf den geologischen Untersuchungen im Rahmen der SIA 199 und dient als Basis für die folgenden Bearbeitungsschritte.
- ② Das hydrogeologische Modell erlaubt es, das Gebirge in Zonen mit unterschiedlichen Karst-hydrogeologischen Verhältnissen zu unterteilen und diese zu charakterisieren. Es basiert weitgehend auf den üblichen hydrogeologischen Untersuchungen gemäss SIA 199.
- ③ Das speläogenetische Modell charakterisiert das Karströhrensystem und dessen Verfüllung (Luft – Wasser – Sedimente).
- ④ Im Modell der Initialfugen werden jene Trennflächen und Zwischenlagen (stratigraphische und tektonische Initialfugen) dargestellt, die besonders verkarstungsanfällig sind.
- ⑤ Basierend auf die Modelle der speläogenetischen Bereiche und der Initialfugen kann die Karströhrendichte bestimmt werden.
- ⑥ Durch die Kombination der speläogenetischen Bereiche mit den hydrogeologischen Zonen können Gefahrenzonen (KarstALEA-Zonen) ausgeschieden werden, womit die Gefährdung charakterisiert und lokalisiert werden.
- ⑦ Mit Hilfe der KarstALEA-Zonen und der Karströhrendichte kann die Gefährdung und die damit verbundenen Risiken beurteilt werden. Diese können im Massnahmenplan berücksichtigt werden.

## 4.1 Ziele und Kontext der KarstALEA-Untersuchungen

Ziel der KarstALEA-Untersuchungen ist eine stufen- und projektgerechte Charakterisierung des verkarsteten Gebirges und der karstspezifischen Gefahren. Letzteres beinhaltet eine Aufteilung des Gebirges in Zonen mit unterschiedlicher Karströhrendichte – und damit auch die Lokalisierung von Zonen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auf Karströhren zu stossen – sowie eine Beschreibung und Lokalisierung der karstspezifischen Gefahren (KarstALEA-Zonen). Sowohl die Zonen der Karströhrendichten wie die KarstALEA-Zonen basieren jedoch auf Wahrscheinlichkeitsüberlegungen und können die realen Verhältnisse nicht vorhersagen. Die Resultate der KarstALEA-Untersuchungen gehören – kombiniert mit anderen Argumenten – zu den wichtigen Grundlagen für die Wahl der Linienführung, der Vortriebsart, und des Massnahmenplans für den Bau und den Betrieb. Die KarstALEA-Methode ermöglicht die karstspezifischen Gefahren besser zu bestimmen und die Sicherheits-, Kosten- und Terminfolgen besser zu beurteilen. Damit können Vortriebsrisiken reduziert und die Dauerhaftigkeit der Anlagen verbessert werden.

Die KarstALEA-Methode ist als Ergänzung zur SIA 199 („Erfassen des Gebirges im Untertagbau“) oder als Konkretisierung und Vertiefung des Aspektes „Karst“ derselben (2 22 33, 2 22 34 & 2 32 3) zu verstehen. Sie baut auf den Untersuchungen gemäss SIA 199 auf.

Im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen werden auch Grundlagendaten erarbeitet, die einen wichtigen Beitrag für die Beurteilung möglicher (karstbedingter) Auswirkungen auf andere Nutzungen und Interessen (v.a. jene des Grundwassers) und auf die Umwelt leisten können. Diese werden sinnvollerweise im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) berücksichtigt. Umgekehrt sind die im Rahmen der UVP erhobenen Daten häufig auch für die KarstALEA-Untersuchungen sehr nützlich. Der Zeitpunkt der Untersuchungsschritte ist gegebenenfalls aufeinander abzustimmen und der Informationsaustausch sollte sichergestellt werden.

Durch die besseren Kenntnisse der lokalen Karstbedingungen steigt das Bewusstsein aller Beteiligten betreffend möglicher karstspezifischer Gefahren. Dies erleichtert, zielgerichtete Massnahmen zu ergreifen, um negative Auswirkungen auf das Bauwerk und auf die Umwelt zu vermeiden.

## 4.2 Struktur der KarstALEA-Untersuchungen

Die KarstALEA-Untersuchungen können in vier Teile gegliedert werden (ein ausführliches Flowchart befindet sich im Anhang I):

- Im ersten Teil, der **KarstALEA-Erstbeurteilung**, wird aufgrund bestehender geologischer und hydrogeologischer Daten abgeklärt, ob mit verkarsteten Formationen gerechnet werden muss. Dies sollte sehr früh in der Planung geschehen, also ganz am Anfang der Vorstudie oder noch während der strategischen Planung. Im Rahmen der KarstALEA-Erstbeurteilung wird untersucht, ob einerseits potenziell verkarstungsfähige Lithologien im Untersuchungsgebiet vorkommen und andererseits ob hydrogeologische Indikatoren auf eine Verkarstung hinweisen. Trifft mindestens eines zu, erfolgt eine erste summarische Beurteilung der Verkarstung des Gebirges. Dabei werden ebenfalls bereits bekannte und für die Planung besonders relevante Gebirgsbereiche mit hohem karstspezifischem Gefahrenpotenzial ausgeschieden (z.B. bekannte Höhlen, Bereich um bedeutende Karstquellen). Basierend auf die Erkenntnisse der KarstALEA-Erstbeurteilung wird das Untersuchungskonzept für die nächste Untersuchungsstufe vorgeschlagen (erste Etappe der KarstALEA-Erkundungsphase).

- Die **KarstALEA-Erkundung** hat zum Ziel, die Karstsysteme zu charakterisieren, die Karströhrendichte zu bestimmen (u.a. Lokalisierung von Hochrisikozonen) sowie die karstspezifischen Gefahren zu beschreiben und räumlich zuzuordnen (KarstALEA-Zonen). Dadurch verfügt die Bauherrschaft über die nötigen (probabilistischen) Daten, um die karstspezifischen Gefahren angemessen bei der Wahl der Linienführung und der Ausarbeitung des Vortriebskonzeptes (u.a. der Vortriebsmethoden) und des Massnahmenplans (u.a. Vorauserkundungskonzept, Massnahmen für den Umweltschutz) zu berücksichtigen. Verglichen mit den bisher gängigen Methoden kann die Prognosegenauigkeit zum Zeitpunkt der Submission signifikant erhöht werden. Die KarstALEA-Zonen (Gefahrencharakterisierung) und die Zonen mit spezifischer Karströhrendichte werden aufgrund von Modelle der **Geologie**, der **Hydrogeologie**, der **speläogenetischen Bereiche** und der **Initialfugen** ausgeschieden (Kapitel 4.4). Die Kenntnisse zu den genannten vier Aspekten werden in einem iterativen Verfahren (meist Teilphasen nach SIA 197) laufend erweitert bis die karstspezifischen Gefahren auf dem geforderten Detaillierungsgrad beschrieben werden können (Kapitel 4.3). Der Informationsaustausch mit den Bearbeitern der Geologie, Hydrogeologie und Geotechnik (SIA 199) und der Umweltverträglichkeitsprüfung ist sicherzustellen.
- Während der **KarstALEA-Bauausführung** werden die KarstALEA-Zonen laufend den realen Gegebenheiten angepasst und die bautechnisch relevanten Karsterscheinungen durch angemessene Vorauserkundungsmassnahmen geortet und charakterisiert. Dadurch kann die Beschreibung und die Lokalisierung der karstspezifischen Gefahren verfeinert und diese beim Vortrieb und Innenausbau angemessen berücksichtigt werden. Mit Hilfe einer sorgfältigen Dokumentation der angetroffenen Karstphänomene werden die karstspezifischen Gefahren für die Bewirtschaftungsphase beschrieben und können im Betriebskonzept angemessen berücksichtigt werden.

Alle KarstALEA-Untersuchungen müssen von Fachpersonen durchgeführt werden. Während die Untersuchungen der KarstALEA-Erstbeurteilung normalerweise von Geologen oder Hydrogeologen mit minimalen Karstkenntnissen durchgeführt werden können, bedürfen die KarstALEA-Erkundung und die KarstALEA-Bauausführung Fachpersonen, die mit den Verhältnissen im Karst vertraut sind, sowie Erfahrungen im Untertagbau aufweisen. Während der Betriebsphase sollten bei karstspezifischen Problemen (z.B. unerwartet hohe Schüttungen) mit dem Karst vertraute Fachpersonen beigezogen werden.

### 4.3 Datengrundlagen

Für eine angemessene Beschreibung der karstbezogenen Gefahren im Projektgebiet bedarf es geologische, hydrogeologische, geomorphologische und speläologische Daten (Abb. 4.3). Dabei sind – neben den im Rahmen der „Erfassung des Gebirges“ gemäss der SIA 199 erhobenen Daten – auch ergänzend Daten aus Literatur (regionale & lokale Literatur, themenverwandte Untersuchungen im Projektgebiet), Feld und/oder durch die Analyse von Luftaufnahmen, digitalen Höhenmodellen, etc. zu erheben. Der Erkenntnisstand kann sehr unterschiedlich sein. Daher sollte auch die Datenqualität ebenfalls erfasst werden.

Die Datendichte und -qualität richtet sich nach den planungsbedingten Anforderungen an den Detaillierungsgrad der Gefahrencharakterisierung und -lokalisierung und wird üblicherweise mit fortschreitender Planung(-phasen) vertieft.

Die benötigten Daten in den Bereichen Geologie und Hydrogeologie entsprechen weitgehend den Daten, die im Rahmen der Erfassung des Gebirges nach SIA 199 erhoben werden (sollten), und müssen meist nur geringfügig ergänzt werden. Bei den geomorphologischen und speläologischen Daten kann einerseits auf die bestehenden Daten (z.B. Literatur, Höhlenvermessungsdaten der Höhlenforscher) zurückgegriffen werden, andererseits sind meist gewisse spezifische Daten zusätzlich zu erheben. Grundsätzlich werden die Daten nicht nur für das engere Projektgebiet sondern für die ganzen Karstsysteme erfasst.

**Es gilt zu beachten, dass viele Daten redundant sind und somit nicht alle aufgeführten Daten benötigt werden, um die KarstALEA-Methode zufriedenstellend anzuwenden.** Die nachfolgende Aufstellung zu den Daten hat zum Ziel, aufzuzeigen, welche Daten nützlich sind, und sollte nicht als Liste der unentbehrlichen Daten missverstanden werden.

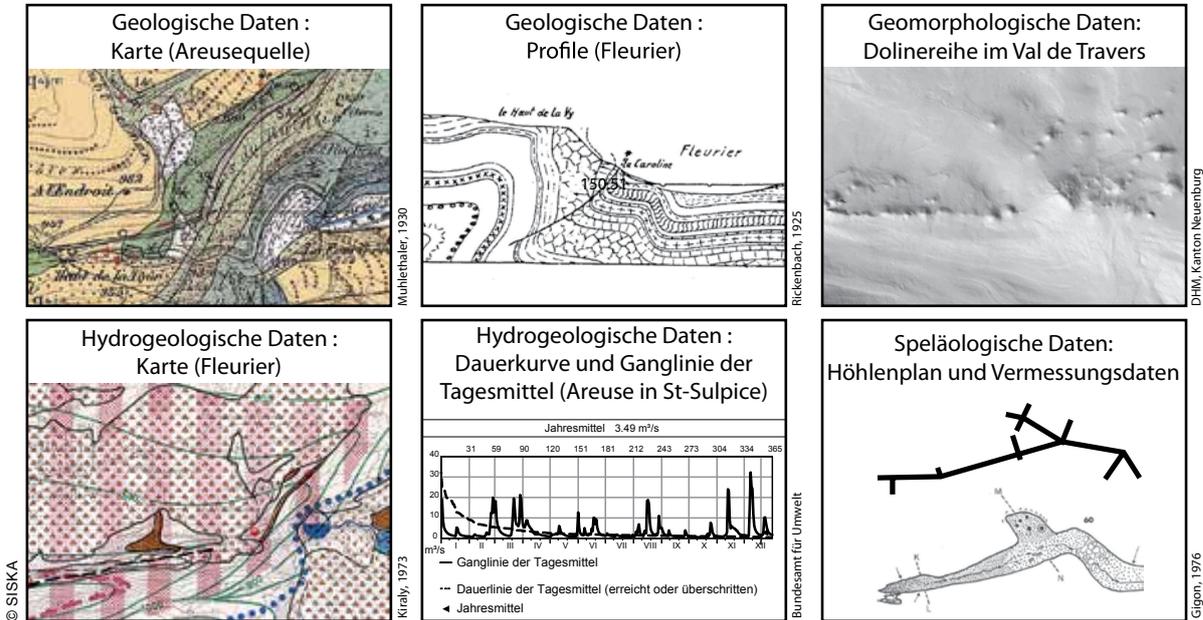


Abb. 4.3: Datengrundlagen der KarstALEA-Untersuchungen

Im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen werden (1) geologische Daten wie z.B. Karten, Profile und Angaben zur Lithostratigraphie, (2) hydrogeologische Daten wie z.B. Quell- und Tracerdaten, (3) geomorphologische Daten wie z.B. Karten von Dolinen und Talterrassen und (4) speläologische Daten wie z.B. Höhlenvermessungsdaten und Höhlenbeschreibungen verwendet.

### 4.3.1 Geologische Daten

Das 3D-Modell der geologischen Strukturen im Projektgebiet bildet die Grundlage für alle weiteren Untersuchungsschritte und bestimmt die Genauigkeit des ganzen Modells. Alle Daten, die zur Qualität eines strukturalgeologischen Modells beitragen, werden zusammengetragen, wie z.B. geologische Karten, Profile, tektonische Karten, Isohypsenkarten, geologische Beschreibungen, Daten aus Bohrungen, bestehenden Tunnels oder Stollen, geophysikalischen Untersuchungen, digitale Höhenmodelle und Luftbilder.

Weiter werden Informationen zu Aspekten gesammelt, die die Verkarstung beeinflussen (z.B. Lithostratigraphie, Durchtrennung des Gebirges).

In der Regel sind die Daten, die im Rahmen der Untersuchungen zur Erfassung des Gebirges nach SIA 199 erhoben werden, ausreichend.

### 4.3.2 Hydrogeologische Daten

Die Hydrogeologie der Karstsysteme wird im Rahmen der KarstALEA-Methode möglichst ganzheitlich beschrieben, um die Gefahren durch das Wasser angemessen charakterisieren zu können. Daher werden alle Daten zusammengetragen, die Hinweise über die Struktur oder das Verhalten der Karstsysteme geben: z.B. hydrogeologische Karten, Gewässerschutzkarten, Quelldaten (Lokalisierung, Schüttungsverhalten, Quellnutzung, Wasserqualität), Beschreibung der Infiltration (u.a. Lage und Funktion von Ponoren/Schluckstellen), Tracerdaten, Piezometerstände, Wasserstände in Höhlen, Berichte zur Trinkwasserversorgung, hydrologische Bohrlochversuche, meteorologische Daten (v.a. Niederschlagsdaten), Hochwasserbeschreibungen in Höhlen.

Im Idealfall müssen die Daten, die im Rahmen der Untersuchungen zur Erfassung des Gebirges nach SIA 199 erhoben werden, nur geringfügig ergänzt werden.

### 4.3.3 Geomorphologische Daten

Geomorphologische Daten werden im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen mit zwei Zielen ausgewertet: Sie liefern einerseits Hinweise auf verkarstungsrelevante Strukturen im Untergrund (v.a. stratigrafische und tektonische Initialfugen) und andererseits auf die Landschaftsentwicklung, die die (paläo)hydrogeologischen Randbedingung der Karstsysteme bestimmen (v.a. Veränderung des Vorfluterniveaus durch Tiefenerosion oder Aufschotterung). Daher werden sowohl geomorphologische Daten zur Landschaftsentwicklung (Terrassen, Moränen) und Daten zu den karstspezifischen Oberflächenformen wie Dolinen, Höhlen, Karstquellen, Ponore, etc. gesammelt. Diese können entweder mit Hilfe von Feldaufnahmen, Luftaufnahmen, digitalen Höhenmodellen, geomorphologischen Karten, Literatur- und Archivdaten (z.B. Höhleninventare, Geotoplisten) bestimmt werden.

Für viele Untersuchungsgebiete kann ein grosser Teil der erforderlichen Daten aus der Literatur oder Archive zusammengetragen oder aufgrund von bestehenden Daten (v.a. Luftbilder und digitale Geländemodelle) erhoben werden.

### 4.3.4 Speläologische Daten

Speläologische Daten liefern zentrale Informationen für die Ausscheidung der speläogenetischen Bereiche und der Initialfugen sowie für die Charakterisierung der Karststrukturen und die Beschreibung der möglichen karstspezifischen Gefahren für das Untertagbauprojekt (z.B. Dimensionen der Karsthohlräume, Sedimentfüllungen).

Unter speläologischen Daten werden höhlenspezifische Daten verstanden, wie Lage von Höhleneingängen, Höhlenpläne, Höhlenbeschreibungen (Gangverlauf, Gangmorphologie/Höhlentyp, Wasserführung, Sedimentfüllung), Höhlenvermessungsdaten (Abb. 4.4) sowie der Stand der Erforschung.

Häufig ist ein grosser Teil der erforderlichen Daten in den Publikationen und Archiven der Schweizerischen Gesellschaft für Höhlenforschung (SSS/SGH) und ihren Sektionen vorhanden oder kann aufgrund von den dort vorhandenen Daten (z.B. Höhlenpläne und Beschreibungen) erhoben werden. In gewissen Fällen können diese Daten durch Höhlenbegehungen ergänzt werden. Das Schweizerische Institut für Speläologie und Karstforschung SSKA kann den Kontakt zu den lokal aktiven Sektionen der SSS/SGH herstellen.



- 4) Ausscheidung der Initialfugen (KarstALEA-spezifisch).  
Aufgrund einer Synthese der Resultate der Schritte 1) – 4) wird die Gefahren- und Risikoanalyse durchgeführt (ergänzt):
- 5) Ausscheidung der Zonen mit spezifischer Karströhrendichte.
- 6) Beschreibung und Lokalisierung der Gefahren (KarstALEA-Zonen).
- 7) Risikoanalyse und Massnahmenplanung.

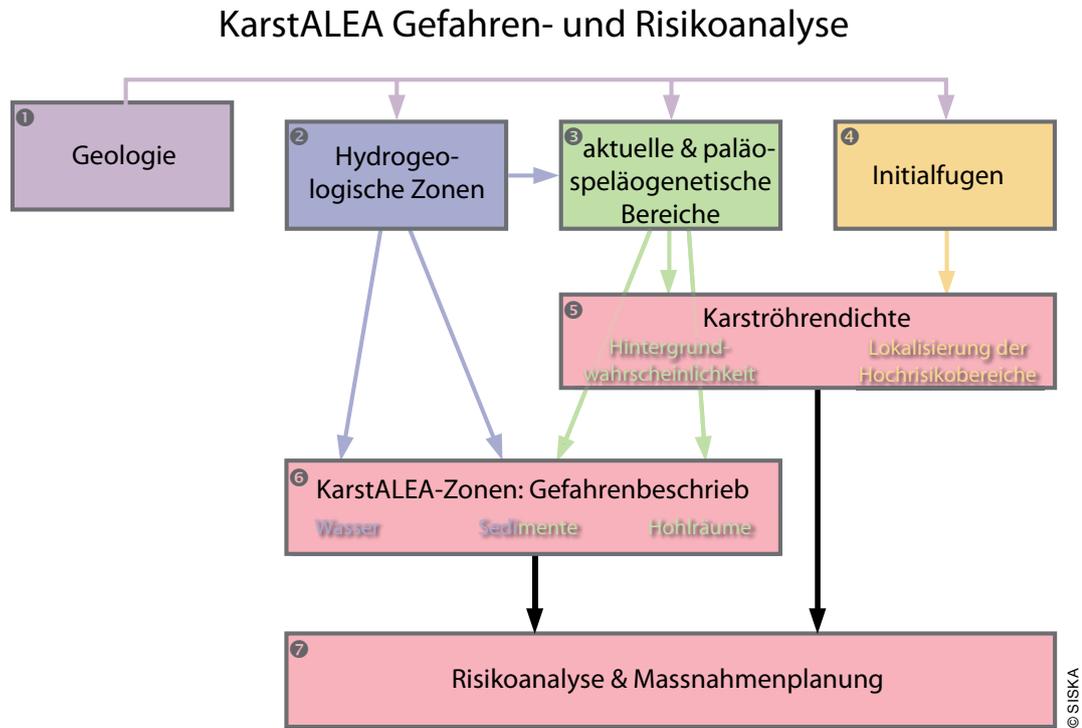


Abb. 4.5: KarstALEA Gefahren- und Risikoanalyse

Die KarstALEA-Methode liefert zwei Arten von Informationen, die als Basis für die Risikoanalyse und Massnahmenplanung dienen: Die Karströhrendichte und die KarstALEA-Zonen (Gefahrenzonen). Die Karströhrendichte wird mit Hilfe der spläogenetischen Bereiche („Grunddichte“) und den Initialfugen (Bereiche mit erhöhter Dichte) bestimmt. Die KarstALEA-Zonen beinhalten Informationen zur Lokalisierung und Charakterisierung der karstspezifischen Gefahren. Die Beschreibung der (ausschliesslich) hohlraumbedingten Gefahren basieren auf den spläogenetischen Bereichen, jene der wasserbezogenen Gefahren basieren auf dem hydrogeologischen Modell und jene der sedimentbezogenen Gefahren auf einer Kombination des hydrogeologischen Modells mit den spläogenetischen Bereichen. Das geologische Modell dient einzig als Basis für die anderen Modelle und wird bei der KarstALEA-Gefahrenanalyse nicht direkt verwendet.

Das räumliche geologische Modell (1) dient als Referenz für alle weiteren Untersuchungen. Das (qualitative) hydrogeologische Modell (2) wird aufgrund von hydrogeologischen Daten und der Geometrie der Aquifere und Aquiclude konstruiert und charakterisiert. Darauf basierend und ergänzt mit spläologischen Daten werden die heutigen spläogenetischen Zonen (3a) ausgeschieden. Die paläo-spläogenetischen Bereiche (3b) werden aufgrund von geomorphologischen (v.a. Talterrassen), spläologischen (Höhlenvermessungsdaten) oder geophysikalischen Daten (Talübertiefungen) ausgeschieden. Zur Ausscheidung der Initialfugen (4) können geologische Daten (Aufschlüsse), spläologische Daten (v.a.

Höhlenvermessungsdaten), geomorphologische Daten (z.B. Dolinen) oder Bohrlochdaten verwendet werden. Kombiniert man die Modelle der speläogenetischen Bereiche (3) mit jenem der Initialfugen (4) können Zonen mit spezifischer Karströhrendichte (5) bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse (2) und der Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche (3) können nun die Gefahren beschrieben respektive die dazugehörenden KarstALEA-Zonen (6) ausgeschieden werden. Mit den Eckdaten des Untertagbauprojektes, kann aufgrund der Zonen mit spezifischer Karströhrendichte und der KarstALEA-Zonen die Gefährdung und das Risiko (7) bestimmt werden. Aufgrund dieser Risikoanalyse kann das Untertagbauprojekt optimiert und Massnahmen geplant werden (Massnahmenplanung).

Bei den meisten Untersuchungsschritten gibt es verschiedene Methoden, mit denen die relevanten Aspekte erhoben werden können. Die im Kapitel 6 vorgestellten Untersuchungsschritte sind zum Teil komplementär und führen bei einer kombinierten Anwendung zu robusteren Resultaten. Das Untersuchungsprogramm muss auf das konkrete Projektvorhaben angepasst werden. Bei der Methodenwahl ist einzeln zu prüfen, ob die Methoden im konkreten Fall anwendbar sind und einen gerechtfertigten Mehrwert bringen.

Die KarstALEA-Methode bedarf grundsätzlich einer Beschreibung und Analyse im dreidimensionalen Raum. Im Regelfall erfolgt dies mit einem 3D-Modell, indem alle sechs Aspekte (Geologie, Hydrogeologie, speläogenetische Bereiche, Initialfugen, Karströhrendichte, und KarstALEA-Zonen) getrennt dargestellt werden. In Ausnahmefällen kann die Methode auch mit 2D-Darstellungen durchgeführt werden. Eine 3D-Analyse der Situation ist aber unumgänglich, auch wenn die Darstellung ausschliesslich zweidimensional erfolgt.

## 4.5 Iteratives Vorgehen und Teilphasen nach SIA 197

Die Planung von Untertagbauten erfolgt in der Regel in mehreren Planungsphasen (z.B. nach SIA 197). Die KarstALEA-Methode berücksichtigt dies mit ihrem iterativen Verfahren und stellt die geologischen, hydrogeologischen und karstspezifischen Erkenntnisse sowie die Gefahren- und Risikobeurteilung projekt- und stufengerecht zur Verfügung.

Die erste Iteration entspricht der KarstALEA-Erstbeurteilung, deckt jedoch üblicherweise nicht alle Aspekte ab (meist nur Geologie und Hydrogeologie). Sie sollte ganz am Anfang der Vorstudie oder noch während der strategischen Planung erfolgen.

*Tab. 4.1 (Seite 77): Etappierung der KarstALEA-Untersuchungen*

*Die Tabelle 4.1 oben zeigt den empfohlenen zeitlichen Ablauf und die Untersuchungstiefen (X, XX, XXX, e, -) der KarstALEA-Untersuchungen der einzelnen Bereiche – Geologie, Hydrogeologie, Speläogenese und Initialfugen – in Iterationsschleifen gemäss der SIA 197. Diese Aufteilung muss für jedes Projekt an die lokalen Gegebenheiten und an die Anforderungen des Bauherrn angepasst werden. Dies wird anhand eines konkreten Beispiels aufgezeigt (O, OO, OOO, E, -).*

*Der Inhalt der Untersuchungen des Beispiels wird für jede Planungsphase in der Tabelle 4.1 unten konkretisiert.*

Ziel / Methode	Hydrogeologisches Modell						speläogenetisches Modell								Modell der Initialfugen							Risikoanalyse		
	G1	H1	H2	H3	H4	H5	H6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	R1	R2
geologisches 3D-Modell	XX	XX	-	-	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
hydrogeologisches 3D-Modell	XX	XX	-	-	X	X	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	XXX	XXX	XXX	-	XXX	XXX	XXX
Einzugsgebiet (EZG) / mittlere Abflusshöhe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EZG / hydrologische Daten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EZG / Tracer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schwankungsbereich Karstwasserspiegel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schüttungen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
aktuelle speläogenetische Bereiche (SB)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
paläo-SB / Literatur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
paläo-SB / Höhlendaten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
paläo-SB / geomorphologischen Daten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
paläo-SB / Geophysik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SB / Charakterisierung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gangdurchmesser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SB-Karströhrendichte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Initialfuge (IF) / Literaturangaben	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IF / Aufschlussdaten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IF / Bohrlochdaten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IF / karstmorphologische Daten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IF / speläomorphologische Daten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IF / Höhlenvermessungsdaten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hohlräume / Geophysik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Karströhrendichte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KarstALEA-Zonen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Risikoanalyse & Massnahmenplanung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Meth.	Untersuchungen	
Vorabklärungen (E0)	G1	sehr rudimentäres 3D-Modell basierend auf wenigen Profile aus der Regionalliteratur und einer Dissertation im Gebiet Lithostratigrafie des Untersuchungsgebietes (vorkommende Lithologien)
	H1	Lokalisierung der bekannten Karstquellen (Quellkataster, Kenntnisse von Ortskundigen) einfaches hydrogeologisches 3D-Modell mit Quellen, Karstwasserspiegel
	H5	Identifizierung und Lokalisierung von Überlaufquellen Hinweise auf Hochwasserverhalten in Höhlen des Untersuchungsgebietes; Installation einer Drucksonde
	S1	Kompliation und Lokalisierung der bekannten speläologischen Daten; grobe Charakterisierung
	S2	Hinweise auf paläo-Horizontalhöhlenbereiche in der Literatur suchen
	R2	Aufgrund der bekannten Quell- und Höhlendaten wird ein allgemeines Bild von der Verkarstung gezeichnet werden und besonders heikle Gebiete (Bereich grosser Quellen, bekannte Höhlen) identifiziert
Vorstudie (E1)	G1	geologisches 3D-Modell basierend auf bestehende Daten und Resultate der geologischen Untersuchungen
	H1	Hydrogeologische 3D-Modell basierend auf dem geologischen 3D-Modell und den Resultaten der hydrogeologischen Untersuchungen, Bestimmung der möglicherweise beeinträchtigten Karstsysteme und Quellen
	H4	Überprüfung der Verbindung zwischen zwei Aquiferen durch einen Tracerversuch
	H5	Bestimmung des Schwankungsbereichs des Karstwasserspiegels aufgrund der Messungen der Drucksonde in der Höhle
	H6	Grobe Abschätzung möglicher Schüttungen aufgrund von Quellschüttungsmessungen und Beobachtungen in Höhlen
	S1	Ausscheidung der aktuellen speläogenetischen Bereiche (3D) mit speläomorphologischen und Vermessungsdaten
	S2-4	Bestimmung möglicher paläo-Horizontalhöhlenbereiche durch die Bestimmung von Talteressen (mit DHM), Validierung mit (spärlich vorhandenen) Höhlendaten
	S6	Charakterisierung der aktuellen und paläospeläogenetischen Bereiche aufgrund von Höhlendaten im Gebiet und Referenzdaten
	I1	Literaturstudium - Ausscheidung von beschriebenen Quellhorizonten als Initialfuge mögliche Initialfugen
	I4-6	optische Identifizierung der Initialfugen aufgrund einer 3D-Darstellung der Höhlenvermessungsdaten Validierung und Ergänzung durch Dolinenreihen (im DHM ersichtlich) und speläomorphologische Beobachtungen in den Höhlen
Vorprojekt (E2)	R1	Ausscheidung von Karströhrendichtezonen (3D)
	R2	Ausscheidung KarstALEA-Zonen (3D) und Charakterisierung der karstbedingten Gefahren
	R3	Wahl der Linienführung unter Berücksichtigung der Kombination der Karströhrendichtezonen mit den KarstALEA-Zonen
Auflageprojekt (E3)	G1	signifikante Verbesserung des geologischen 3D-Modells dank umfangreichen geologischen Untersuchungen (SIA 199)
	H1	das verbesserte geologische 3D-Modell sowie neue hydrogeologische Erkenntnisse werden ins hydrogeologische 3D-Modell integriert
	H2-H4	Beschreibung des Verhaltens und der Interaktion der Karstsysteme sowie Abgrenzung der Einzugsgebiete basierend auf das Quellmonitoring (Ganglinien), wenige gezielte Tracerversuche und die Messungen der Drucksonde
	I	das Modell der Initialfugen wird aufgrund des verbesserten geologischen Modell verfeinert
Bauprojekt (E4)	I3	die identifizierten Initialfugen werden anhand der Bohrkerne validiert und ihre Lage im Bereich der Tunnelachse präzisiert
	R1-R3	Die Karströhrendichtezonen, die KarstALEA-Zonen und die Risikobeurteilung werden aufgrund der neuen Erkenntnisse aktualisiert und präzisiert
	G1&H1-H5	Integration der Resultate der üblichen geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen (SIA 199), der Umweltverträglichkeitsprüfung sowie laufender Untersuchungen ins geologische und hydrogeologische 3D-Modell Präzisierung der Einzugsgebiete und Karstwasserspiegelschwankungen
	H6	Abschätzung möglicher Schüttungen aufgrund von hydrogeologischen Bilanzüberlegungen und Modellierungen
Bauprojekt (E4)	S1-S6	Aktualisierung der aktuellen speläogenetischen Bereichen basierend auf neuste Funde der Höhlenforscher Überprüfung und Ergänzung der in der Vorstudie bestimmten paläo-Horizontalhöhlenbereiche (neue Daten)
	I3&I5-6	Überprüfung und Ergänzung der bestimmten Initialfugen anhand der neusten Vermessungsdaten der Höhlenforscher und neuer Bohrlochdaten; Überprüfung in der neu entdeckten Höhle (speläogenetische Daten)
	R1-R3	Die Karströhrendichtezonen, die KarstALEA-Zonen und die Risikobeurteilung werden aufgrund der neuen Erkenntnisse aktualisiert und präzisiert
Bauprojekt (E4)	Berücksichtigung allfälliger neuer Daten (z.B. Messung eines bedeutenden Hochwassers durch die Drucksonde), Integration in die 3D-Modelle und der Gefahrenbeschreibung	

Die KarstALEA-Erkundung wird üblicherweise in mehrere Iterationen unterteilt, die in die Planungssetappen nach SIA 197 (Vorstudie, Vorprojekt, Auflagenprojekt, Bauprojekt, Ausführungsprojekt) integriert werden können. Die Untersuchungstiefe nimmt im Laufe der Iterationen kontinuierlich zu und richtet sich nach den Projektgegebenheiten, den Vorkenntnissen, dem Informationsbedarf und Restrisikotoleranz des Bauherrn. Parallel dazu verändert sich bei jeder Iteration der Untersuchungsstab vom Stab des ganzen Gebirgsmassivs zu ausgewählten Abschnitten der Linienführung. Der Fokus richtet sich vermehrt auf offengebliebene relevante Fragen. Die Tabelle im Anhang II gibt Anhaltspunkte, welche Untersuchungsschwerpunkte in welcher Planungsphase gesetzt werden sollten. Der Informationsaustausch mit den Sachbearbeitern der geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen sowie der Umweltverträglichkeitsberichte muss regelmässig sichergestellt sein.

Auch die KarstALEA-Bauausführung beinhaltet üblicherweise mehrere Iterationen. Diese richten sich nach dem Erkenntnisgewinn während des Vortriebs (Vorauserkundung) und nach den Vorkommnissen (v.a. angetroffene Karsterscheinungen). Die Iterationen erleichtern eine angemessene Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse im Massnahmenplan.

#### **KarstALEA und Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)**

Obschon eine ganzheitliche Beurteilung der Auswirkungen auf die Umwelt im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung UVP vorzunehmen ist, liefern die KarstALEA-Untersuchungen wertvolle Hinweise, die es im Rahmen der UVP zu berücksichtigen gilt. Welche karstspezifischen umweltrelevanten Fragen, wann und wie im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen abgeklärt werden sollen, ist mit dem Bauherrn und den Sachbearbeiter des UVBs abzusprechen. Für die Beurteilung der Auswirkungen des Bauprojektes auf die Höhlen und den Karst kann auf die „Wegleitung zur Beurteilung von Projekten in Karstgebieten“ der Schweizerischen Gesellschaft für Höhlenforschung SSS/SGH und der Kommission für wissenschaftliche Speläologie der ScNat (Schmassmann & Hitz, 2010) zurückgegriffen werden.

## **4.6 Verfassen des KarstALEA-Berichtes inklusiv Vorschlag für weiterführende Untersuchungen**

Die Resultate der einzelnen Untersuchungsetappen werden in einem Bericht zusammengetragen – entweder als Bestandteil des geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Berichts (SIA 199) oder als eigenständiges Dokument. Beim Verfassen ist auf eine klare Trennung zwischen Datenerhebung, Beschreibung und Interpretation zu achten. Die Herkunft sämtlicher Daten ist nachvollziehbar zu dokumentieren. Es ist klar zu unterscheiden, ob es sich bei den Daten um Feld- oder Laboruntersuchungen, um Literaturangaben, um Angaben aus vorhandenen geologischen Unterlagen, um Erfahrungswerte von vergleichbaren Untersuchungen oder um Schätzungen oder Annahmen handelt. Die angewandten Untersuchungs- oder Messmethoden sind zu beschreiben oder mit einer Referenz auf die verwendete Norm oder Publikation zu versehen. Die Genauigkeit der Daten respektive die entsprechenden Unsicherheiten sind anzugeben oder zu umschreiben. In den Berichten ist auf erkannte Lücken in den zur Verfügung stehenden Daten und auf eine allfällige Unvollständigkeit der Daten hinzuweisen. Der Umfang der Untersuchungen richtet sich nach der Grösse und Bedeutung des Projektes wie auch der Komplexität der Karstproblematik.

Die Berichte beinhalten eine Zusammenstellung der offenen, für das Projekt relevanten Fragen. Diese richten sich nach dem Informationsbedarf für die nächste Planungs(tell)-phase, welche in Zusammenarbeit mit den Planern und dem Bauherrn bestimmt werden. Dies führt zu einem projektangepassten und phasengerechten Untersuchungsprogramm und einer sukzessiven Verfeinerung der Kenntnisse. Ein spezielles Augenmerk gilt den Daten- und Erkenntnislücken.

Bei der Formulierung der Fragestellungen ist von folgender Grundfragenstellung auszugehen: „**Sind die karstspezifischen Gefahren für die anstehende Planungsphase genügend charakterisiert und lokalisiert?**“ Dabei sind zusätzlich zu den Gefahren für den Bau und Betrieb des Untertagbauprojekts auch Gefahren für andere Nutzungen (z.B. Wasserversorgung) und die Umwelt zu berücksichtigen. Der folgende Fragenkatalog kann als Leitfaden dienen, um die Erkenntnislücken zu identifizieren. Der Nutzen der Mehrerkennnisse ist darzulegen.

- Sind die strukturgeologischen/lithologischen Verhältnisse genügend bekannt, um bei den anderen Untersuchungsschritten die gewünschte Genauigkeit zu erreichen (z.B. Lage der Initialfugen, Verhalten der Karstsysteme an Systemgrenzen etc.)? Sind die Daten kohärent? Welche zusätzlichen (geologischen, Bohrloch-)Daten müssen erhoben werden?
  - Sind die hydrogeologischen Verhältnisse genügend bekannt, um die KarstALEA-Zonen mit der gewünschten Genauigkeit auszuscheiden und (bezüglich Wasser) zu charakterisieren? Welche zusätzlichen hydrogeologischen Daten (z.B. Monitoring von Quellen, Piezometer, Tracerversuche) müssen wo erhoben werden?
  - Können die aktuellen und paläo-speläogenetischen Bereiche mit der gewünschten Genauigkeit ausgeschieden und charakterisiert werden? Welche zusätzlichen (hydrologischen, speläologischen und geomorphologischen) Daten müssen erhoben und ausgewertet werden?
  - Können die Initialfugen mit der gewünschten Genauigkeit und Robustheit ausgeschieden werden? Welche zusätzlichen (speläologischen, geomorphologischen, Bohrloch-) Daten sind zu erheben?
  - Ist der Einsatz von geophysikalischen Methoden zur Beschreibung der strukturellen Verhältnisse und/oder der Erkennung von Karsthohlräumen gerechtfertigt? Erlauben die lithologischen, strukturellen, topographischen und logistischen Gegebenheiten den Einsatz der gewünschten Methoden?
  - Können die Zonen mit spezifischer Karströhrendichte mit der gewünschten Qualität ausgeschieden werden? Welche zusätzlichen Daten müssen erhoben werden?
  - Können die KarstALEA-Zonen (Gefahrenzonen) mit der gewünschten Qualität ausgeschieden und charakterisiert werden? Welche zusätzlichen Daten müssen erhoben werden?
  - Sind die Verhältnisse genügend bekannt, um die anstehenden Entscheidungen zu treffen und allfällige Massnahmen zu planen.
  - Ist das Restrisiko vertretbar oder müssen die Verhältnisse genauer charakterisiert werden und/oder weitere Massnahmen geplant werden?
  - Sind die erwarteten Auswirkungen des Untertagbauprojektes auf andere Nutzungen (v.a. Trinkwasser) und die Umwelt mit der gewünschten Präzision bekannt? Sind diese tragbar?
- ⇒ ***Sind die karstspezifischen Gefahren genügend genau charakterisiert und lokalisiert, um für die anstehenden Entscheidungen zu treffen (Linienführung, Vortriebsmethode, Massnahmenplanung etc.)?***

Basierend auf dem Fragenkatalog wird ein Vorschlag für weitergehende Untersuchungen erstellt. Darin werden mindestens folgende Punkte ausgeführt:

- Die im Rahmen der nächsten Untersuchungsetappe zu beantwortenden Fragen und deren Gewichtung;
- Die Systemgrenzen, wie die Ausdehnung der Untersuchungsperimeter (kann je nach Fragenstellung variieren), eine Einschränkung auf gewisse Formationen oder Lithologien etc.;
- Die zu verwendenden Grundlagen und/oder die zu erhebenden Daten sowie deren Umfang und Qualität;
- Die anzuwendenden Methoden oder Normen sowie der Umfang und die Tiefe der Untersuchungen (z.B. welche Schichtgrenzen detailliert modelliert werden müssen; welche Karstsysteme/Quellen genauer untersucht werden sollten).

## 4.7 Anwendungsgrenzen der KarstALEA-Methoden

Karst kann sich unter unterschiedlichen speläogenetischen Verhältnissen (epigener vs. hypogener Verkarstung, Kapitel 4.7.2) und in verschiedenen Lithologien (karbonathaltige Gesteine, Evaporite, seltener Sandsteine und Quarzite) entwickeln. Die grundlegenden Konzepte der KarstALEA-Methoden – die Existenz von Initialfugen und die Aufteilung des Gebirges in speläogenetische Bereiche mit charakteristischen Eigenschaften wie die Karströhrendichte und -morphologie – wurden vorwiegend an epigenen Höhlensystemen in Kalkgesteinen untersucht. Dort ist die Methode meist uneingeschränkt anwendbar. In anderen Lithologien und speläogenetischen Verhältnissen ist die KarstALEA-Methode anwendbar, sofern diese Hypothesen zutreffen.

Zusätzlich zu den durch die Lithologie und speläogenetischen Verhältnisse bedingten Einschränkungen und Eigenheiten bei der Anwendung der KarstALEA-Methode wird in diesem Kapitel auf weitere Anwendungsgrenzen eingegangen. So können z.B. die Initialfugen in einem stark verfallenen oder verschuppten Gebirge nicht mehr korrekt positioniert werden (Abb. 4.6).

### 4.7.1 Lithologien

Die Anwendbarkeit der KarstALEA-Methode unter anderen lithologischen Verhältnissen als Kalkstein wurde bisher nicht getestet. Aufgrund der bekannten Verkarstungscharakteristika vieler Lithologien kann davon ausgegangen werden, dass die KarstALEA-Methode mit gezielten Anpassungen und unter gewissen Einschränkungen trotzdem anwendbar ist. Die Tabelle im Anhang IV fasst die Verkarstungscharakteristika der Lithologien zusammen und enthält erste Hypothesen zur Anwendbarkeit der KarstALEA-Methode in der entsprechenden Lithologien (v.a. bezüglich der beiden zentralen Konzepte – Initialfugen und speläogenetische Bereiche) sowie zu möglichen Einschränkungen der Anwendbarkeit. Diese werden im Anhang VIII vertieft. Die in den Anhängen erwähnten Charakteristika beziehen sich auf Schweizer Verhältnisse (Mächtigkeit der angetroffenen Formationen, klimatische und speläogenetische Bedingungen etc.). Sollte die KarstALEA-Methode in einem signifikant anderen geologischen oder klimatologischen Kontext angewendet werden (z.B. mächtige Kreide- oder Salzformationen, Höhlen in Quarzit), muss die Anwendbarkeit der Methode geprüft werden.

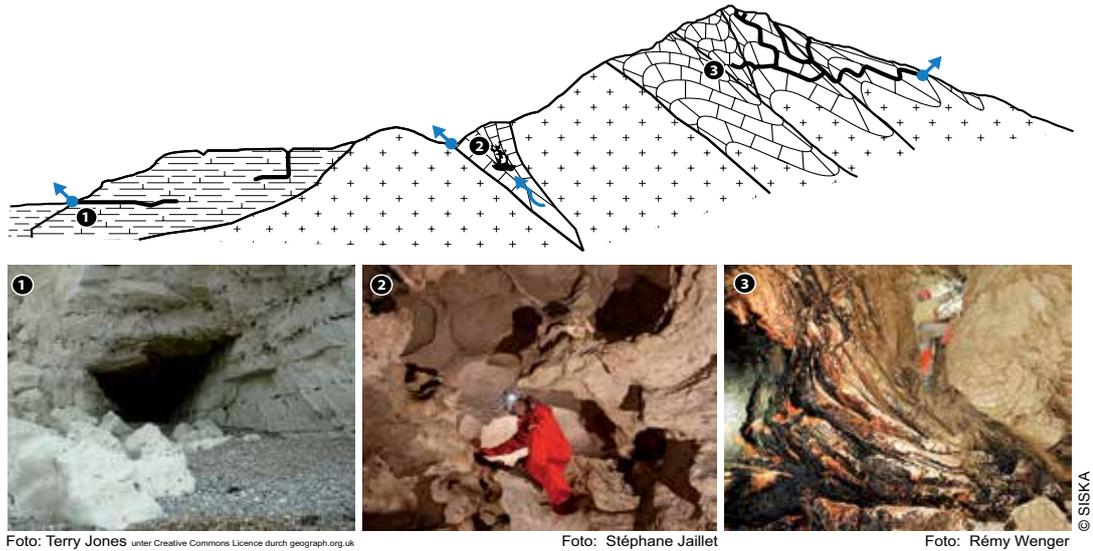


Foto: Terry Jones unter Creative Commons Licence durch geograph.org.uk

Foto: Stéphane Jaillet

Foto: Rémy Wenger

© SISKKA

Abb. 4.6: Anwendungsgrenzen von KarstALEA

Die Grundlagen der KarstALEA-Methode basieren auf Erkenntnissen zu den speläogenetischen Prozessen unter meteorischen Bedingungen und in erster Linie für Kalksteinformationen. Findet die Verkarstung unter anderen Bedingungen (z.B. hypogene Verkarstung, Bild 2) statt oder werden Formationen mit ganz anderen lithologischen Eigenschaften (z.B. Kreide, Bild 1) verkarstet, muss die KarstALEA-Methoden den entsprechenden Verhältnissen angepasst werden.

Weiter können sehr komplexe geologische Verhältnisse (z.B. kleinräumige Schuppen, starke Verfaltung) die Anwendung einzelner Aspekte stark beeinträchtigen. So können z.B. lithologische Initialfugen unter Umständen nicht mehr verfolgt werden (Bild 3).

#### 4.7.2 Art der Verkarstung

Rund 80 % der bekannten Höhlensysteme sind durch Niederschläge gebildet worden, die direkt in den Karst infiltrieren (**freiliegender<sup>1</sup> epigener Karst**, Ford & Williams 2007). Die Konzepte der KarstALEA-Methode wurden unter diesen Bedingungen getestet (Abb. 4.7). Beim **überdeckten<sup>2</sup> epigenen Karst** erfolgt die Infiltration des Niederschlagswassers durch eine darüberliegende, nicht verkarstungsfähige Formation. Der **hypogene Karst** entwickelt sich – meist unter gespannten Bedingungen – durch aufsteigendes Gebirgswasser, das seine Lösungskraft in der Tiefe gewinnt (z.B. durch Anreicherung mit H<sub>2</sub>S oder CO<sub>2</sub>, zum Teil verbunden mit Hydrothermalismus) (z.B. Klimchouk, 2007).

<sup>1</sup> Unter freiliegender Karst (engl. exposed karst) wird ein nackter oder ein subkutaner Karst verstanden, d.h. das verkarstete Gebirge ist entweder nicht oder nur von einem Boden und Vegetation bedeckt.

<sup>2</sup> Unter überbedecktem Karst wird ein verkarstetes Gebirge verstanden, das von einer mehreren Meter mächtigen, nicht verkarstungsfähigen geologischen Formation bedeckt ist.

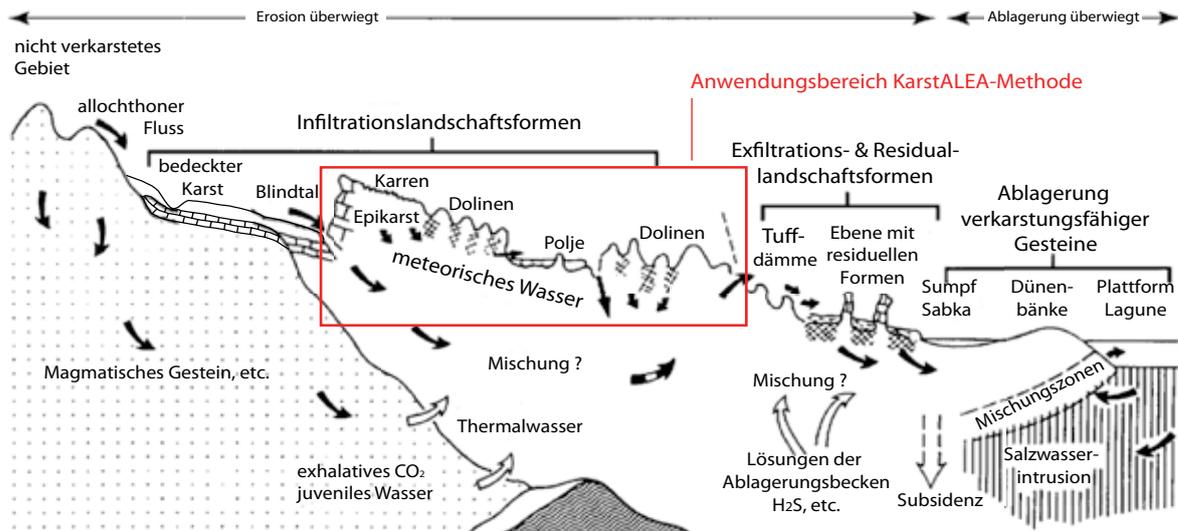


Abb. 4.7: Schema des Systems „Karst“

Die wichtigsten Phänomene, die in aktiven Karstgebieten verschiedenster Art angetroffen werden, wurden schematisch in einer Grafik zusammengetragen. Die rote Rahmen zeigt den Anwendungsbereich der KarstALEA-Methode (modifiziert von Ford & Williams, 2007)

Das Konzept der Initialfugen ist in der Regel im überdeckten epigenen Karst und im hypogenen Karst anwendbar. Dies wurde jedoch bisher nur qualitativ überprüft.

Das Konzept der speläogenetischen Bereiche ist hingegen nur eingeschränkt übertragbar und muss auf die Art der Verkarstung angepasst werden. Im überdeckten epigenen Karst kann häufig zwischen einem Initialbereich, einem Horizontalhöhlenbereich und einem Schachtbereich unterschieden werden. Der Epikarst und Epikarstschachtbereich fehlen weitgehend. Im hypogenen Karst sind die speläogenetischen Bereiche nicht anwendbar.

Für **weitere Spezialformen der Verkarstung** wird auf die Fachliteratur verwiesen (z.B. Klimchouk et al., 2000). Einige sind auch in der Abb. 4.7 illustriert.

### 4.7.3 Andere Einschränkungen

Neben den Anwendungsgrenzen bedingt durch die Verkarstungscharakteristika selbst, kann die Aussagekraft und Anwendbarkeit der KarstALEA-Methode auch aufgrund praktischer Gegebenheiten eingeschränkt sein. Neben einer ungenügenden Datengrundlage, muss v.a. eine zu komplexe Geologie genannt werden (Abb. 4.7; Bild 3).

Ist die Datenlage zur Geologie ungenügend oder sind die geologischen Strukturen so komplex (Schuppen, Faltung, etc.), dass auch nach einer ausführlichen Erkundung eine lagegetreue Darstellung karstspezifischer Daten nicht möglich ist, können die Initialfugen nicht korrekt lokalisiert und/oder im Bereich des Tunneltrassees positioniert werden. Dabei kumulieren sich die Unsicherheiten bezüglich

- der geologischen Strukturen im Tunnelbereich (wo befindet sich ein Referenzhorizont im Tunnel?):
- der geologischen Struktur im Bereich, in dem die Initialfugen bestimmt werden (wo befinden sich die Initialfugen bezüglich des Referenzhorizontes?)
- der Projektionen/Zuordnungen von Referenzhorizonten und Initialfugen

Dies kann die Aussagekraft der KarstALEA-Methode v.a. bezüglich der Karströhrendichte beeinträchtigen. Die Unterteilung des Gebirges in die Karströhrendichtezonen erfolgt unter solchen Umständen ausschliesslich aufgrund der speläogenetischen Bereiche – eine Feindifferenzierung aufgrund der Initialfugen ist dann nur eingeschränkt möglich.

Ebenfalls problematisch ist die Anwendung der KarstALEA-Methode in Gebieten mit sehr mächtigen Formationen mit einer sehr homogenen Lithologie, falls keine guten speläologischen oder geomorphologischen Daten aus dem unmittelbaren Umfeld des Tunnels vorhanden sind und weder die Position der Basis noch des Dach der Formation bekannt ist. Dann können die Informationen über Initialfugen aus benachbarten Gebieten ebenfalls nicht positioniert werden.

Als Spezialfall mit ungenügender Datenlage können sehr weit zurückreichende Paläoverkarstungen betrachtet werden: Die verbleibenden Spuren der eozänen Verkarstung im Jura reichen zum Beispiel nicht aus, um die Verkarstungsgeschichte ausreichend zu rekonstruieren. Die KarstALEA-Untersuchen reichen dann bezüglich dieser Verkarstungsphasen nicht über die übliche Beschreibung der bekannten Ablagerungen respektive Karstverfüllungen jener Zeit (Bohnerz oder „Sidérolithique“) hinaus.

## 5 KarstALEA-Erstbeurteilung

### 5.1 Ziel und Vorgehen

Das Ziel der KarstALEA-Erstbeurteilung ist abzuklären, ob mit karstspezifischen Gefahren zu rechnen ist, und welche weiterführenden Untersuchungen zum Karst gegebenenfalls nötig sind. Dazu wird einerseits abgeklärt, ob potenziell verkarstungsfähige Formationen zu erwarten sind (Kapitel 5.2), und andererseits, ob weitere, im Speziellen hydrogeologische Indikatoren auf eine Verkarstung hinweisen (Kapitel 5.3). Werden dabei Hinweise auf eine mögliche Verkarstung gefunden, folgt eine erste summarische Beurteilung. Darin werden auch bestehende Kenntnisse zu potenziell besonders kritischen Zonen (z.B. bekannte Höhlen oder wichtige Quellgruppen) der Planung zugänglich gemacht und ein Untersuchungsprogramm für die erste Iteration der KarstALEA-Erkundung vorgeschlagen. Die KarstALEA-Erstbeurteilung sollte so früh wie möglich in der Planung eines Untertagbauwerkes erfolgen – d.h. ganz am Anfang der Vorstudie oder sogar im Rahmen der strategischen Planung.

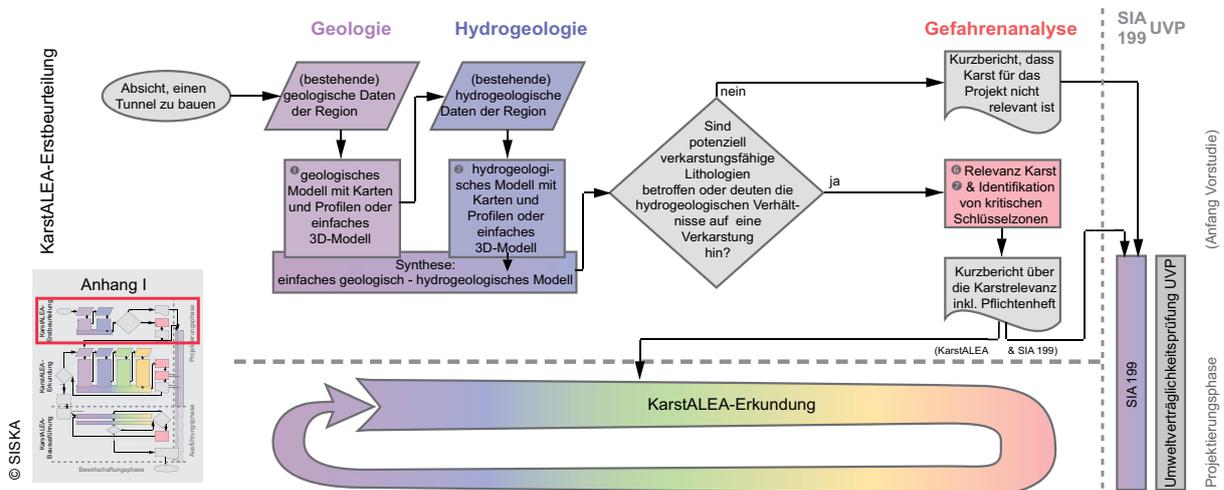


Abb. 5.1: Ablauf einer typischen KarstALEA-Erstbeurteilung

Basierend auf bestehende geologische und hydrogeologische Informationen wird ein einfaches geologisch-hydrogeologisches Modell erstellt. Bestehen lithologische oder hydrogeologische Hinweise auf eine Verkarstung, wird das verkarstete Gebirge grob beurteilt. Dabei werden u.a. schon bekannte, besonders kritische Zonen beschrieben. Sind keinerlei Hinweise auf eine Verkarstung vorhanden, kann die KarstALEA-Untersuchung mit der Erstbeurteilung abgeschlossen werden.

### 5.2 Verkarstungsfähigkeit der Formationen

Anhand der bestehenden geologischen Unterlagen und gegebenenfalls ergänzenden Untersuchungen wird abgeklärt, ob potenziell verkarstungsfähige Formationen vom Untertagbauprojekt betroffen sind. Als potenziell verkarstungsfähig gelten grundsätzlich alle Formationen, die im Anhang IV aufgeführt sind (Karbonat- oder Evaporitgesteine). Deren Verkarstungscharakteristika sind im Anhang VIII ausführlich beschrieben.

### 5.3 Hydrogeologische Indikatoren einer Verkarstung

Aufgrund bestehender hydrogeologischer Unterlagen, Nachfragen bei den wichtigsten Amtsstellen (v.a. betreffend Berichten zur Trinkwasserversorgung und Gewässerschutzzonen) und gegebenenfalls ergänzender Untersuchung wird nach hydrogeologischen Hinweisen auf eine Verkarstung gesucht. Dazu zählen:

- Das weitgehende Fehlen oberirdischer Fliessgewässer, Unterbrüche im Fliessgewässernetz oder (viel) zu kleine Schüttungen oberirdischer Fliessgewässer verglichen mit der Grösse des Einzugsgebietes
- Karstquellen, im Speziellen Quellen mit grosser Schüttung und grossen Einzugsgebieten. Die Kriterien zum Erkennen von Karstquellen befinden sich in der Tabelle 5.1
- Punkte mit konzentrierter Infiltration (Ponore/Bachschwinde)
- Tracerversuche ergeben schnelle Abstandsgeschwindigkeiten über grosse Distanzen (> 1 km) oder deuten auf ein komplexes Zirkulationssystem hin (z.B. Diffusionen, Wiederaustritt in mehreren Quellen)
- Kleine Temperaturgradienten in Bohrlöchern (→ Wärme wird durch Karstwasser abgeleitet, grosse Temperaturgradienten → meist nicht verkarstet)

Tab. 5.1: Erkennen von Karstquellen

Die aufgelisteten Kriterien sind Hinweise für eine Quelle, die durch ein Karstsystem gespeisen wird. Hingegen erfüllt nur ein kleiner Teil der Karstquellen all diese Kriterien. Ist ein Kriterium nicht erfüllt, darf deshalb keinesfalls daraus geschlossen werden, dass es sich nicht um eine Karstquelle handelt. Die Reihenfolge der Kriterien entspricht dem üblichen Vorgehen bei einer Abklärung, ob eine Quelle mit Karstwasser gespeisen wird.

<b>Kriterium</b>	<b>Bemerkung &amp; Ausnahmen</b>
Schüttung > 30-50 l/s	Sehr grosse Einzugsgebiete sind in einem nicht-Karstkontext eher selten
Umgebungsgestein und hydrogeologischer Kontext	Entspringt die Quelle einem verkarstungsfähigen Gestein? Weist der hydrogeologische Kontext auf eine Speisung durch den Karst hin (z.B. durch Quartärablagerungen überdecktes verkarstungsfähiges Gestein)?
Schwankung der Schüttung: max > 10 x min	Ein grosser Schüttungsbereich deutet häufig auf eine Verkarstung hin. Hat das Karstsystem mehrere Quellen oder einen Überlauf, kann der Schwankungsbereich einer Karstquelle hingegen auch sehr klein sein
Schnelle Reaktionszeit auf Niederschlagsereignisse	Karstquelle reagieren tendenziell schneller auf Niederschlagsereignisse als Poren- & Kluftaquiferquellen. Wird eine Lockergesteinsquelle hingegen direkt von einem stark anschwellenden Oberflächengewässer gespeisen, kann sie auch sehr schnell reagieren. Grundsätzlich gilt (auch) bei Karstsystemen, dass Quellen mit einem grossen Einzugsgebiet langsamer reagieren als Quellen mit einem kleinen Einzugsgebiet
Trübung bei Hochwasser	Karstquellen können (aber müssen nicht!) im Verlaufe von Hochwasserereignissen bedeutende Trübungen aufweisen
Variabilität der Mineralisation (Leitfähigkeit) und anderer chemischen und physikalischen (z.B. Temperatur) Eigenschaften und Isotopenverhältnissen	Häufig variiert die Mineralisation (und andere Eigenschaften) des Quellwassers beträchtlich in Abhängigkeit der hydrologischen Bedingungen. Die Mineralisation kann im Verlaufe eines Hochwassers bedeutend variieren

## 5.4 Ist die Anwendung von KarstALEA sinnvoll?

Werden alle Formationen als nicht potenziell verkarstungsfähig beurteilt **und** konnten keine hydrogeologischen Indikatoren für eine Verkarstung gefunden werden, kann als unwahrscheinlich angenommen werden, dass karstspezifische Gefährdungen angetroffen werden. Weitere karstspezifische Abklärungen erübrigen sich, die KarstALEA-Untersuchungen werden mit der Erstbeurteilung abgeschlossen. Alle weiteren geologischen und hydrogeologischen Fragestellungen werden im Rahmen der üblichen Untersuchungen nach SIA 199 untersucht.

In allen anderen Fällen, d.h. wenn potenziell verkarstungsfähige Formationen oder hydrogeologische Indikatoren einer Verkarstung vorhanden sind, ist eine summarische Charakterisierung der Verkarstung vorzunehmen und das weitere Untersuchungsprogramm zu formulieren. Dabei werden die Eigenheiten der im Untersuchungsgebiet anzutreffenden verkarstungsfähigen Formationen berücksichtigt (vgl. Anhänge IV und VIII).

## 5.5 Summarische Charakterisierung der Verkarstung und Identifikation von Gebirgsbereichen mit hohem karstspezifischem Gefahrenpotenzial

Besteht die Möglichkeit eines verkarstungsbedingten Gefahrenpotenzials (Kapitel 5.4), so ist ein allgemeines Bild der Verkarstung des Gebirges zu erstellen.

Die summarische Charakterisierung der Verkarstung erfolgt anhand der existierenden lithostratigrafischen, hydrogeologischen, karstmorphologischen und speläologischen Daten (Tabelle 5.2). Sie gibt einen Überblick über die Verkarstungsfähigkeit der Formationen, ihre hydrogeologischen Funktion (Aquifer, Aquitard, Aquiclude) und der in den Formationen anzutreffenden Karsterscheinungen und deren Eigenschaften (Verteilung, Hohlraumtypen, Grössen, Art der Sedimentverfüllungen, hydrologische Verhältnisse).

Tab. 5.2: Charakterisierung der Formationen

*Für jede angetroffene Formation werden Hinweise auf die hydrogeologische Funktion der entsprechenden Formation und auf eine Verkarstung gesammelt. Dies beinhaltet neben einer lithostratigrafischen Beschreibung auch hydrogeologische Daten und Daten zu oberirdischen (z.B. Dolinen) und unterirdischen Karsterscheinungen (z.B. Höhlen).*

Bezeichnung der Formation	Lithostratigrafische Beschreibung	Hydrogeologische Daten (Infiltration, Quellen, Tracerverbindungen, Piezometer, etc.)	Oberflächliche Karsterscheinungen (Geomorphologie)	Speläologische Daten (Daten zu Höhlen, Eingänge)	Hydrogeologische Funktion (Aquifer, Aquitard, Aquiclude)

Sind zu einer Formation keine karstrelevanten Daten vorhanden, können gegebenenfalls Daten zu jener Formation in benachbarten Gebieten herangezogen werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Geometrie und die Charakteristika der Karstsysteme stark von den lokalen struktureologischen Verhältnissen und der lokalen Landschaftsentwicklung (Lage der Einzugsgebiete und der Vorfluter) abhängen.

Aufgrund der in Tabelle 5.1 aufgeführten Kriterien werden die Karstquellen identifiziert. Sie werden den Aquifere zugeordnet, indem ihre lithostratigrafische Position bestimmt wird. Die Geometrie der Aquifere respektive der Aquiclude, die den Aquifer begrenzen, kann mit Hilfe von geologischen Profilen und Karten bestimmt werden. Die so identifizierten Aquifere werden anhand der Charakterisierung der Formation (vgl. unten) verifiziert und mit Erfahrungswerten der Region verglichen, um sicherzustellen, dass keine Aquifere aufgrund mangelnder Daten nicht ausgeschlossen werden. Unter Einbezug weiterer bestehender hydrogeologischer Daten (z.B. Tracerversuchen) können die bedeutenden Karstsysteme identifiziert werden und die Einzugsgebiete grob abgegrenzt werden. Sind Höhlen bekannt, sind diese in die Auswertung einzubeziehen. Dieser Untersuchungsschritt entspricht weitgehend der ersten Etappe der Charakterisierung der Karstsysteme mit der Methode KARSYS (Vuillamoz et al., 2011, Jeannin et al., 2012).

Aufgrund dieser Informationen können die Karstsysteme summarisch charakterisiert werden: Betroffene Formationen, Reifegrad der Verkarstung, Grösse des Einzugsgebiets und zu erwartende Abflussmengen, Lage des Grundwasserspiegels.

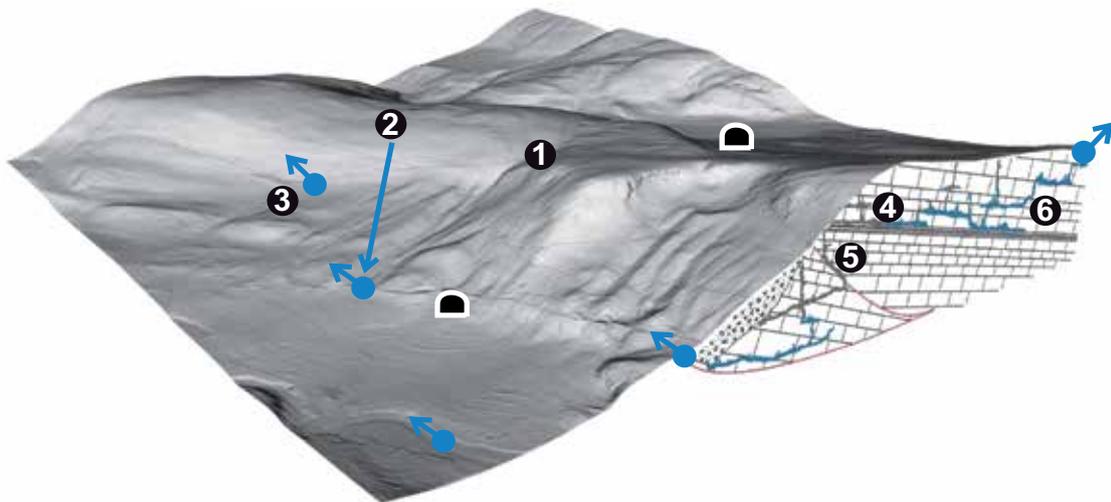
1. Karrenfeld



2. Tracerversuche



3. Überlaufquelle



4. wasserführender Schlacht



5. Halle auf Verfugung



6. Siphon in phreatischer Zone



Abb. 5.2: Summarische Charakterisierung der Verkarstung eines Projektgebiets

Ein 2D- oder 3D-Modell ermöglicht eine summarische Darstellung des verkarsteten Gebirges. Darin können einerseits typische Karsterscheinungen dargestellt werden, die zu erwarten sind (z.B. Schächte, wassergefüllte Horizontalgänge, etc.). Andererseits können zu diesem Zeitpunkt bekannte Bereiche mit besonderen Gefahren (z.B. eine bekannte Quellzone, dominante Brüche oder bekannte Höhlen) illustriert werden.

Dies ermöglicht für die Planung besonders relevante Gebirgsbereiche mit hohem karstspezifischem Gefahrenpotential auszuscheiden: Quellbereiche, Zonen bei denen aufgrund der Aquicludgeometrie mit einer Konzentration des Abflusses zu rechnen ist, bekannte Höhlen und Schutzgebiete (Grundwasserschutzzonen, Geotope, Biotope), etc. Diese Informationen können zur Illustration schematisch dargestellt werden (Abb. 5.2). Sie müssen in der weiteren Planung des Bauvorhabens (Projektierung) angemessen berücksichtigt werden – im Speziellen bei der Festlegung der Lage des Bauvorhabens oder Linienführung. Dies erlaubt es unter Umständen, die besonders riskanten Gebirgsbereiche zu umfahren.

Die Datenlage in der Phase der KarstALEA-Erstbeurteilung ist in der Regel ungenügend, um alle besonders riskanten Gebirgsbereiche zu bestimmen. Die weiterführenden Untersuchungen dürfen daher unter keinen Umständen sich auf diese Gebirgsbereiche beschränken.

## 5.6 Verfassen des Berichtes inklusiv Vorschlag für weiterführende Untersuchungen

Die Resultate der KarstALEA-Erstbeurteilung werden im Rahmen eines Berichtes zusammengetragen. Dabei ist darzulegen, welche Daten verwendet und wie sie ausgewertet wurden (vgl. Kapitel 4.6).

Weiter werden im Bericht karstspezifische Fragen formuliert, die im Rahmen der ersten Iteration der KarstALEA-Erkundungsphase (Vorstudie) beantwortet werden sollten. Der Fragenkatalog berücksichtigt die im Kapitel 4.6 erläuterten Aspekte und ist projekt- und stufengerecht zu formulieren. Er kann z.B. Vorschläge enthalten, welche Karstsysteme und welche Schichtgrenze modelliert werden sollten.

Der Untersuchungsperimeter für die KarstALEA-Erkundungsphase ist so zu wählen, dass alle relevanten Karstsysteme integral enthalten sind – auch jene die nicht direkt vom Projekt tangiert werden, jedoch mit den direkt betroffenen Karstsystemen interagieren (z.B. unterirdischer Zu- oder Abfluss vom einen ins andere System).

Eine KarstALEA-Erstabklärung für den Umfahrungstunnel Flims (Zusammenfassung eines Berichtes, ohne Datendiskussion und Vorschläge und Hinweise für weiterführende Untersuchungen) befindet sich im Kasten.

*Tab. 5.3 (Seite 89): Beispiel eines Untersuchungsprogramms für die erste Iteration der KarstALEA-Erkundungsphase (Vorstudie)*

*Das Untersuchungsprogramm muss jeweils an die lokalen Umstände, das Projekt und die Anforderungen des Bauherrn angepasst werden.*

Meth.	Ziel / Kurzbeschreibung Methode	Daten
G1	Erstellen eines geologischen 3D-Modells im Untersuchungsgebiet. Ungenauigkeit im Bereich der Linienführung und im Bereich des Karstgebietes <= 30 m	DHM, geologische Karten, Profile, Sondierbohrungen, Regionalliteratur, etc.
H1	Erstellen eines konzeptuellen hydrogeologischen 3D-Modells, Ausscheiden der Einzugsgebiete der Karstsysteme, bestimmen potenziell betroffener Quellen und Karstsysteme	G1, oberirdisches Gewässernetz, Quelldaten (mindestens Lokalisierung & Eckdaten zu deren Schüttung) + alle weiteren verfügbaren hydrogeologischen Daten wie Quellkataster, Piezometerdaten, Tracerversuche etc. (H2-5)
H2	Validierung der Einzugsgebiete aufgrund des mittleren Abflusses: summarische Überprüfung, ob die berechneten mittleren Abflüsse (Abfluss der Quelle(n) / Fläche Einzugsgebiet) der verschiedenen Karstsysteme im Gebiet vergleichbar sind oder allfällige Unterschiede erklärt werden können (z.B. unterschiedliche Höhenlage des Einzugsgebietes)	H1, Schüttungsdaten der grössten Quellen, Vergleichswerte aus benachbarten Karstsystemen
H3	Präzisierung der Einzugsgebiete und Abschätzung der Fliesscharakteristika aus hydrologischen Daten: Verhalten des Karstsystems (Schüttung, Hochwasser), Interaktion zwischen verschiedenen Quellen und benachbarten Karstsystemen, etc.	Hydrogramme der grösseren Quellen, Quellkataster, meteorologische Daten
H4	Überprüfen der Verbindung zwischen zweier Aquifere mit einem Tracerversuch (Präzisierung Einzugsgebiete), Bestimmung Abstandsgeschwindigkeit	Tracerdaten
H5	Bestimmung des Schwankungsbereichs des Karstwasserspiegels aufgrund von Piezometerdaten, Druckmessungen in Höhlen, Quelldaten	Quellkataster, Piezometerdaten, Drucksondenmessungen in Höhle
H6	Grobe Abschätzung möglicher Schüttungen	Quellschüttungsdaten, Beobachtungen in Höhlen
S1	Ausscheidung der aktuellen speläogenetischen Bereiche (3D) mit speläomorphologischen und Vermessungsdaten	Höhlenvermessungsdaten, Höhlenpläne, Beobachtungen in Höhlen
S2	Rekonstruktion von Paläovorfluterniveaus aufgrund von Literaturrecherchen	Literatur
S3	Ausscheidung der paläohorizontalen Höhlenbereiche aus Höhlendaten	Höhlenvermessungsdaten, Höhlenpläne, Beobachtungen in Höhlen
S4	Validierung der paläohorizontalen Höhlenbereiche aufgrund von Talterrassen (DHM)	DHM, Regionalliteratur
S6	Charakterisierung der aktuellen und paläospeläogenetischen Bereiche	Höhlenpläne, Beobachtungen in Höhlen, Referenzdaten
I1	Hinweise auf Initialfugen in der Literatur suchen	Regionalliteratur, Höhleninventare
I2	Gut gelegene Aufschlüsse auf Hinweise auf Initialfugen absuchen	geologische Karte, Feldbeobachtungen
I3	Bestehende Bohrlochprofile auf Hinweise auf Initialfugen absuchen	G1, bestehende Bohrlochprofile
I4	Bestimmung von Initialfugen aufgrund von Dolinenreihen und der Position von Höhleneingängen	DHM, geologische Karte, Höhleneingangsinventar
I5	Überprüfen der indentifizierten Initialfugen aufgrund von speläomorphologischen Daten	G1, Höhlenpläne, Beobachtungen in Höhlen
I6	optische Bestimmung der Initialfugen aufgrund des geologischen 3D-Modells und einer 3D-Darstellung der Höhlen	G1, Höhlenvermessungsdaten
R1	Ausscheidung von Karströhrendichtezonen (3D)	speläogenetisches Modell + Initialfugen
R2	Ausscheidung KarstALEA-Zonen (3D) und Charakterisierung der karstbedingten Gefahren	hydrogeologisches + speläogenetisches Modell
R3	Wahl der Linienführung unter Berücksichtigung der Kombination der Karströhrendichtezonen mit den KarstALEA-Zonen (Beratung Bauherr)	R1, R2, Projektunterlagen

## KarstALEA-Erstabklärung: Beispiel der Umfahrung Flims

(Es handelt sich um ein Beispiel, wie eine KarstALEA-Erstabklärung - unter Berücksichtigung der heutigen methodischen Kenntnisse - aussehen könnte. Das Beispiel beruht vorwiegend auf den Feldkenntnissen vor dem Tunnelbau. Vereinzelt werden auch kürzlich erhobene Felddaten berücksichtigt, wenn diese mit einem relativ geringen Aufwand erhoben werden konnten.)

### 1 Verkarstungsfähigkeit der Formationen

In der Region kommen Malmkalke (lokal mit mergeligeren Zwischenlagen), Kalke und Mergel des Portlandien und der Kreide, tertiäre Flysche (alle Parautochthon), die karbonatischen Bergsturz-Breccien sowie der Verrucano der Glarnerdecke vor (Abb. 5.3). Aufgrund ihrer Lage kommen nur die Malmkalke und die Bergsturz-Breccien für die Trassewahl in Frage.

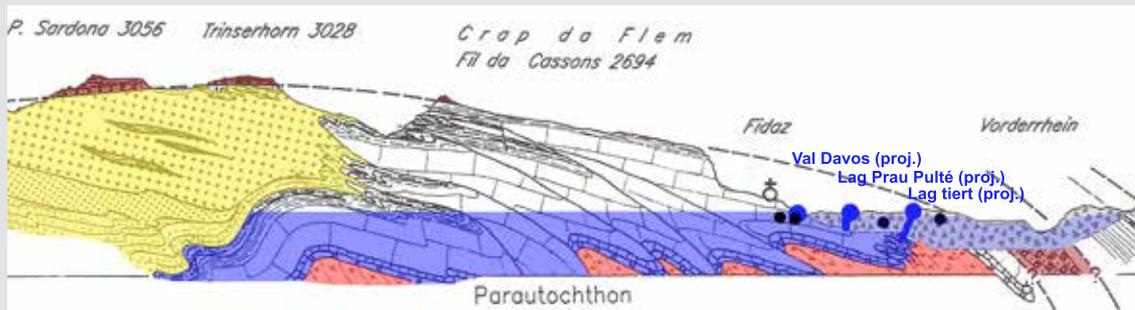


Abb. 5.3: Geologische und hydrogeologische Situation der Umfahrung Flims.

Profil durch den Crap da Flem und den Bergsturz von Flims mit den wichtigsten Aquicluden (Flysch gelb, Kristallin rot, Verrucano, dunkelrot) und den beiden wichtigsten Aquiferen im Projektgebiet – den Bergsturzaquifer (schwarze Dreiecke) und den Malmaquifer (phreatischer Teil blau). Die drei wichtigsten Quellen des Projektgebietes (blaue Punkte) sowie diskutierte Trassevarianten (schwarze Kreise) sind eingezeichnet (Jäckli, 1985, verändert).

### 2 Hydrogeologische Hinweise auf eine Verkarstung

Auch wenn klassische Karst-Oberflächenformen im Projektgebiet selten sind und ein bedeutender Anteil der Niederschläge oberirdisch abfließt, befinden sich in den (vor dem Tunnelbau) vorhandenen Unterlagen hydrogeologische Hinweise auf eine Verkarstung (v.a. Köhl, 1953 und Rohrer, 1979):

- Reduzierter oberflächlicher Abfluss in gewissen Gebieten (z.B. Vorab)
- Quellen mit sehr grosser Schüttung (mehrere 100 l/s), mit z.T. trübem Wasser, bedeutenden Schüttungsschwankungen → Karstquellen
- Zwei Typen Quellen, die dem Bergsturz-Aquifer entspringen:
  - 1) trübes Wasser, kalt, mit stark wechselnder Schüttung → aus Karstaquifer gespeisen
  - 2) klares Wasser, wärmer, mit höherer Mineralisierung → aus Bergsturzaquifer gespeisen
- z. T. bedeutende Ponore (z.B. Ruosna el Plaun Cumin)
- (bestehende) Tracerversuche, die weiträumige Verbindungen mit grossen Abstandsgeschwindigkeiten in verkarstungsfähigen Lithologien belegen (z.B. Tracerversuch Vorab → Lag Tiert und Quellen von Val Davos)
- (bestehende) Bilanzrechnungen, die darauf hinweisen, dass der unterirdische Abfluss aus dem Einzugsgebiet des Laaxerbachs in das benachbarte topografische Einzugsgebiet signifikant sein muss

### 3 Ist die Anwendung der KarstALEA-Untersuchungen sinnvoll?

Da grundsätzlich verkarstungsfähige Lithologien durchörtert werden und die hydrogeologischen Verhältnisse auf eine Verkarstung hinweisen, müssen die karstspezifischen Aspekte angemessen berücksichtigt werden – eine KarstALEA-Untersuchung ist daher angezeigt (eines der beiden Kriterien wäre ausreichend, um eine KarstALEA-Untersuchung zu begründen).

### 4 Summarische Charakterisierung der Verkarstung

Die Zuordnung (vorhandener) geologischen, hydrogeologische, geomorphologischen und speläologischen Daten zu den entsprechenden Formationen (Tab. 5.4), zeigt, dass die Jura- & Kreideformationen verkarstet sind. Der Flysch und der Verrucano dienen als Aquiclude oder Aquitarde. Die karbonatischen Breccien der Bergsturzmasse bilden einen äusserst heterogenen Porenaquifer, wobei sich lokal auch äusserst durchlässige Zonen ausgebildet haben („Röhren“?), welche einen weitgehen ungehinderten Austritt des Karstwassers ermöglichen.

Tab. 5.4: Hydrogeologische Funktion der Formationen und Hinweise auf eine Verkarstung der entsprechenden Formationen

Bezeichnung der Formation	Lithostratigraphische Beschreibung	Hydrogeologische Daten	Oberflächliche Karsterscheinungen	Speläologische Daten	Hydrogeologische Funktion
Bergsturz-Breccien (Quartär)	Breccie mit hohem Matrixanteil, unterschiedlich konsolidiert; Mehrheit der Komponenten bestehen aus Kalk	Ponore Bedeutende Quellen, die z.T. aus Karstaquiferen gespiesen werden	vereinzelte Einbruchstrukturen (Dolinen) vorhanden, sonst keine klassischen Karstformen	keine Karsthöhlen bekannt	äusserst heterogener Porenaquifer, lokal mit sehr hoher Durchlässigkeit
Flysch (Eozän, Oligozän)	tonige, mergelige und sandige Schiefer	Datenlage ungenügend, keine Karstquellen bekannt	Datenlage ungenügend, keine Karstformen bekannt	keine Höhlen bekannt	Aquiclude / Aquitarde
Seewerkalk, Schrattekalk, Drusbergschichten, Kieselkalk, Öhrlikalk, Zementsteinschichten, Korallenkalk (Portaldien und Kreide des Parautochthons)	alternierende Kalk- und Mergelschichten	z.T. bedeutende Ponore, reduzierter (aber nicht kein!) oberflächlicher Abfluss, Tracerverbindungen (v.a. zu Malmquellen) mit grossen Abstandsgeschwindigkeiten	z.T. typische Karstformen, jedoch häufig wenig ausgeprägt, wahrscheinlich aufgrund sehr kurzer Expositionszeit seit der letzten Vergletscherung	vereinzelte Höhlen im Speziellen bedeutende Ponorhöhle „Ruosna el Plaun Cumin“	Karstaquifere & Aquitarde
Quintnerkalk (Malm des Parautochthons)	Kalke, lokal mit mergeligen Zwischenlagen	z.T. grosse Quellen, häufig mit grossen Schüttungsschwankungen, z.T. variable Trübung, vereinzelt Tracerversuche mit grossen Abstandsgeschwindigkeiten, Ponore	lokal sehr wenige klassische Karstmorphologien, in benachbarten Gebiete bedeutend stärker ausgeprägt	Ponorhöhle „Ruosna el Plaun Cumin“ reicht bis in den Malm	Karst-Aquifer
Verrucano (Permokarbon der Glarner-Decke)	heterogene kontinentale Sedimente (Konglomerate, Sandsteine, Tone)	nur kleine Quellen mit lokalem Einzugsgebiet	keine bekannt	keine Höhlen bekannt	Aquiclude / Aquitarde

Für die Umfahrung Flims sind aufgrund der Lage nur die Aquifere des Malms und des Bergsturzes von grösserer Bedeutung, auch wenn von einer gewissen Interaktion zwischen den Kreide- und Malmaquiferen auszugehen ist.

Aufgrund der bedeutenden Karstquellen, des Quellhorizontes im Dorf Flims an der Grenze Bergsturz-Malm und der Resultate der Tracerversuche ist davon auszugehen, dass die Malmkalke verkarstet sind und die verschiedenen (Haupt-)Quellen des Gebietes zu einem gemeinsamen Karstgebiet gehören und miteinander kommunizieren (Abb. 5.4). Das Einzugsgebiet diese Karstsystems kann jedoch aufgrund der unklaren Funktion der Kreide-Mergel und des partiellen Oberflächenabflusses (noch) nicht bestimmt werden. Er reicht aber sicherlich bis zum Vorab (Tracerversuch Vorab → Lag Tiert & Val Davos). Aufgrund der temporären Aktivität gewisser Quellen (Prau Pulté, Val Davos, Quellen im Dorf Flims) muss davon ausgegangen werden, dass der Karstwasserspiegel unter dem Dorf Flims bedeutende Schwankungen aufweist und temporär die Oberfläche erreicht. In diesem Bereich ist daher mit einem Netz von subhorizontalen Karströhren auszugehen, welche bedeutende Schüttungen

aufweisen können (mehrere 100 l/s). Aufgrund der geringen Überlagerung im Projektgebiet respektive zur Nähe zum Bergsturz (ehemalige Geländeoberfläche) ist mit einer besonders hohen Karströhrendichte zu rechnen.

Der Bergsturzaquifer ist sehr heterogen und weist mehrheitlich Eigenschaften eines Porenaquifers auf. Ob die Bergsturzbreccie teilweise verkarstet ist, kann in diesem Stadium nicht beurteilt werden. Die drei grossen Quellen der Region – Lag tiert, Lag Prau Pulté und Val Davos sowie der Quellhorizont im Dorf Flims – werden offensichtlich mehrheitlich aus dem Karst gespeisen – die z.T. bedeutende Bedeckung durch den Bergsturz mag das entsprechende Wasser weder zu reinigen (Trübung) noch signifikant zurückzuhalten. Es ist daher mindestens lokal mit sehr durchlässigen Zonen im Bergsturz zu rechnen.

### 5 Hinweise auf Gebirgsbereiche mit hohem karstspezifischem Gefahrenpotenzial

Bei einem Tunnelbau im Malmkalk, muss aus den oben erwähnten Gründen grundsätzlich mit einer hohen karstspezifischen Risiko gerechnet werden. Besonders hoch ist das Risiko im Bereich der bekannten Quellen (insbesondere der bedeutenden Quellen von Val Davos) und bekannten Brüchen (Abb. 5.4). Die Beurteilung der spezifischen Gefahren im Bergsturzaquifer ist nicht Inhalt der KarstALEA-Untersuchungen. Ein besonders Augenmerk sollte jedoch den sich darin befindenden Karstquellen (v.a. Lag Tiert und Lag Prau Pulté) und möglicher Zuleitungen gerichtet werden.

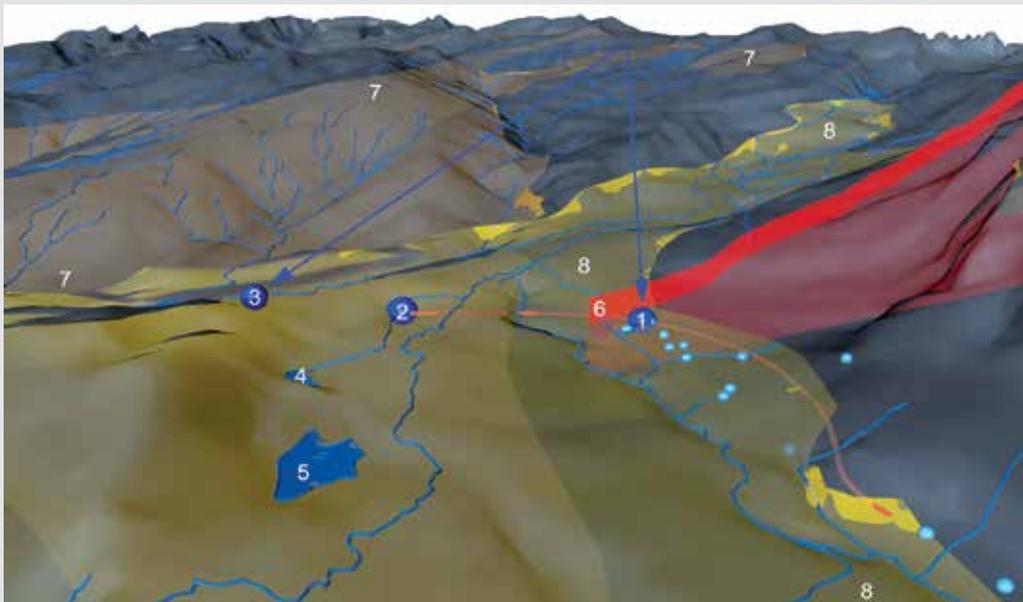


Abb. 5.4: Geologisches 3D-Modell der Region Flims mit den wichtigsten hydrologischen Elementen (DHM & Gewässer von Swisstopo)

Die Hauptquellen (1-3) des Karstsystems und kleinere Quellen (hellblaue Kugeln). Der Pegel des Lag la Cauma (5) wird stark von der Schüttung der Lag Prau Pulté - Quelle (2) beeinflusst, welche einen Bach speist, der im Lag Tuleritg (4) versickert. Das Wasser der Lag Tiert – Quelle (3) wird für die Wasserkraft genutzt und wird durch das selbe Karströhrensystem gespeisen wie die Quellen im Val Davos (1) und im Lag Prau Pulté (2) → Färbversuch (9). Der Verrucano (7, braun) bildet den regionale Aquiclud. Der Bergsturzaquifer (8, gelb) wird durch den Karst, direkten Niederschlag und möglicherweise versickerndes Wasser der Bäche Flem und Laaxerbach gespeisen. Eine grosse Abbruchfläche des Flimser Bergsturzes (6) könnte als Initialfuge dienen. Orange die nun realisierte Linienführung des Flimsersteintunnels.

## 6 KarstALEA-Erkundung

### 6.1 Ziel

Das Ziel des Untersuchungsprogramms der KarstALEA-Erkundung ist eine stufen- und projektgerechte Charakterisierung des verkarsteten Gebirges, der karstspezifischen Gefahren (Gefährdungsbilder und deren Lokalisierung: KarstALEA-Zonen) und der Karströhrendichte (Zonen mit charakteristischen Karströhrendichte inkl. solche mit hohem Risiko auf Karströhren zu stossen). Damit können die karstspezifischen Schwierigkeiten angemessen in der jeweils folgenden Projektierungsphase berücksichtigt werden (Vorstudie, Vorprojekt, Auflageprojek, Bauprojekt; Tab. 6.1). Dabei sind mindestens in den ersten Iterationen die ganzen Karstsysteme zu beachten und nicht nur der Projektperimeter.

Basierend auf die Resultate der KarstALEA-Erkundung und unter Einbezug weiterer relevanten Aspekte kann der Bauherr oder der planende Ingenieur folgende Fragen beantworten:

- Welches ist der ideale Standort oder die ideale Linienführung des Untertagbauprojektes?
- Welches ist die geeignetste Vortriebsmethode?
- Wie ist das Untertagbauwerk auszugestalten (z.B. Art der Schale, Art und Grösse der Drainage)?
- Welche Vorauserkundungsmassnahmen sind angemessen?
- Welche Massnahmen sind vorzusehen, um einen sicheren und effizienten Vortrieb sicherzustellen?
- Welche Massnahmen sind vorzusehen, um andere Nutzungen nicht zu beeinträchtigen?
- Welche Massnahmen sind vorzusehen, um die Umwelt nicht zu gefährden?
- Was gilt es bei der Bewirtschaftung (Betrieb und Unterhalt) des Untertagbauwerks zu beachten?

Die aufgrund angemessener Kenntnisse der karstspezifischen Gefahren ergriffenen Vorkehrungen ermöglichen, das verbleibende Risiko auf ein tragbares Niveau zu reduzieren. Die Resultate der KarstALEA-Erkundung werden bei der Submission berücksichtigt. Damit ist diese Untersuchungsetappe abgeschlossen.

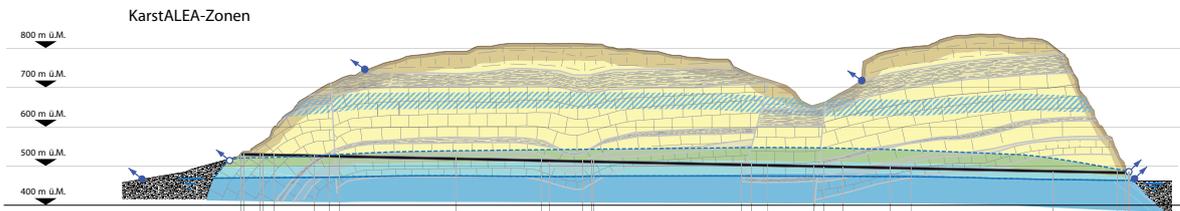
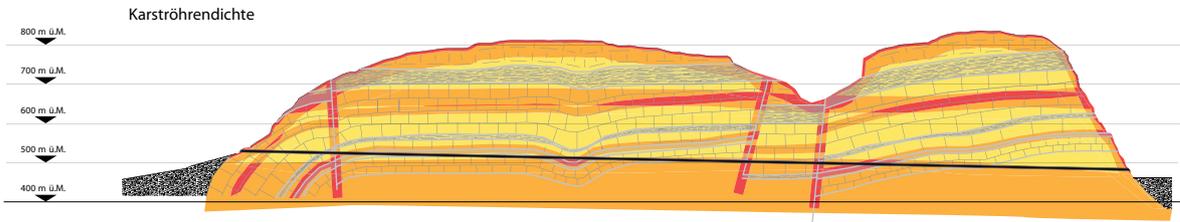
*Tab. 6.1 (Seite 94): Die Ziele der KarstALEA-Erkundung für die Teilphasen gemäss SIA 197*

*Teilphasen und deren Ziele für die Planung, die geologischen Untersuchungen, die Umweltverträglichkeitsprüfung und KarstALEA*

*Abb. 6.1 (Seite 94): Ziel der KarstALEA-Erkundung*

*Die Untersuchungen der KarstALEA-Erkundung ermöglichen, das Gebirge in Zonen mit unterschiedlichen Karströhrendichten einzuteilen. Weiter werden karstspezifische Gefahren beschrieben und lokalisiert (KarstALEA-Zonen). Die Karströhrendichte und die KarstALEA-Zonen sowie gefährdungsrelevante Einzelaspekte werden als zusätzliche Linien im geologischen Profil gemäss SIA 199 dargestellt. Basierend auf diese Informationen kann das Risiko beurteilt werden.*

Phasen	Teilphasen gemäss SIA / ASTRA-Terminologie	Allgemeines Ziel der Teilplanphasen	Allgemeines Ziel der geologischen Untersuchungen (SIA 199)	Allgemeines Ziel der Umweltverträglichkeitsprüfung	Karst-ALEA- Etappen	Ziele der KarstALEA- Untersuchungen
Projektierung	Strategische Planung / idem	Bedürfnisse, Ziel und Lösungsstrategie festlegen	-	-	-	-
	Vorstudie / Machbarkeitsstudie	Nachweis der Machbarkeit	Geologische, hydrologische und geotechnische Berichte auf Grund vorhandener Dokumente erstellen Erkundung vorschlagen	Genereller UVB erstellen: Relevante Einwirkungen auf Umwelt bestimmen	Vorab- klärung	Erstbeurteilung der Karstrelevanz; Entscheid ob die KarstALEA-Methode angewendet werden soll
	Vorprojekt / Generelles Projekt	Optimale bauliche Lösung (u.a. Linienführung)	Geologische, hydrologische und geotechnische Berichte auf Grund aktueller Ergebnisse revidieren Ergänzende Erkundung vorschlagen	UVB erstellen: Einwirkungen auf die Umwelt überprüfen	Erkundung	Iterationen gemäss Teilphasen der SIA 199-Untersuchungen: Unterteilung des Gebirges in Bereiche mit unterschiedlichen Karstcharakteristika, Karströhrendichten und Gefährdungsbildern
	Auflageprojekt / Ausführungsprojekt	Bewilligtes Projekt (Art, Umfang und Lage des Bauwerks mit den Einzelheiten seiner bautechnischen Gestaltung und Baulinien)	Geologische, hydrologische und geotechnische Berichte auf Grund aktueller Ergebnisse revidieren Evtl. spezielle Erkundung vorschlagen	UVB bereinigen: Auswirkungen und Massnahmen bestimmen		
	Bauprojekt / Detailprojekt	Baureifes Projekt (alle wesentlichen Aufgaben und Probleme des Bauvorhabens erkannt und so weit gelöst, dass die Ausführbarkeit und die Zweckmässigkeit nachgewiesen und der Aufwand für den Bau ermittelt werden kann)	Geologische, hydrologische und geotechnische Berichte erstellen Evtl. spezielle Erkundung vorschlagen	Umweltrelevante Anlagen in Projekt einbeziehen		
	Ausschreibung / idem	Vergabereife Ausschreibungsunterlagen	-	-	-	-
Ausführung oder Realisierung	Ausführungsprojekt / Unterlagen für die Ausführung	Ausführungsreifes Projekt	Erstellung des Vorauserkundungskonzept	-	Bauausführung	Erstellung des Vorauserkundungskonzept
	Ausführung / idem	Erstellen des Bauwerks	Tatsächliche Verhältnisse erfassen und beurteilen Geologische, hydrologische und geotechnische Berichte ggf. aktualisieren	Massnahmen gemäss UVB umsetzen		Tatsächliche Verhältnisse erfassen und beurteilen, ggf. KarstALEA-Prognose aktualisieren
	Inbetriebnahme / Abnahme	Abnahme des Bauwerks	-	-		-
	Abschluss - Pläne des ausgeführten Werkes / Dossier zum erstellten Bauwerk	Erstellen des Schlussberichtes	Erstellen des Schlussberichtes	Erstellen des Schlussberichtes		Erstellen des Schlussberichtes mit Bemerkungen für eine nachhaltige Nutzung und Betrieb
Bewirt- schaftung	Nutzung und Betrieb / idem	Sicherer Gebrauch (Nutzer und Betreiber)	ggf. Monitoring	ggf. Monitoring	-	-
	Erhaltung / idem	Verfügbarkeit über vorgesehene Dauer	-	-	-	-



SIA 199	2-3	3-4	4-4	5-4	6-4	7-4	8-4	9-4	10-4	11-4	12-4	13-4	14-4	15-4	16-4	17-4	18-4	19-4	20-4	21-4	22-4	23-4	24-4
Durchmesser Karst Hohlräume	2-3	3-4	4-4	5-4	6-4	7-4	8-4	9-4	10-4	11-4	12-4	13-4	14-4	15-4	16-4	17-4	18-4	19-4	20-4	21-4	22-4	23-4	24-4
Druckhaftes Wasser	1	1	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
maximale Druckhöhe	1	1	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
max. Karstwasseranfall pro Karströhren	1	2	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
Sedimentverfüllungen	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4
Quellen (projiziert)																							
hydrogeologische Zonen																							
speläogenetische Bereiche																							
paläo-speläogenetische Bereiche																							
Initialfugen	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	
Karströhrendichte	3	2-3	2	2-3	2-3	2	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
KarstALEA-Zonen																							
Prognosegenauigkeit																							

© SSKA

## 6.2 Vorgehen

Wie im Kapitel 4.4. ausgeführt, ermöglicht ein iteratives Vorgehen projekt- und stufengerechte Untersuchungen der karstspezifischen Risiken. Damit kann man sich im Laufe der Iterationen vermehrt auf offene Fragen und kritische Gebirgsbereiche konzentrieren. Die Untersuchungsmethoden werden entsprechend angepasst.

In den folgenden Kapiteln werden zu den vier Aspekten – Geologie, Hydrogeologie, speläogenetische Bereiche und Initialfugen – verschiedene Untersuchungsmethoden vorgestellt. Eine Zusammenfassung befindet sich in der Tabelle im Anhang II. Für die Geologie und Hydrogeologie weichen diese nur geringfügig von den Untersuchungen im Rahmen der SIA 199 ab.

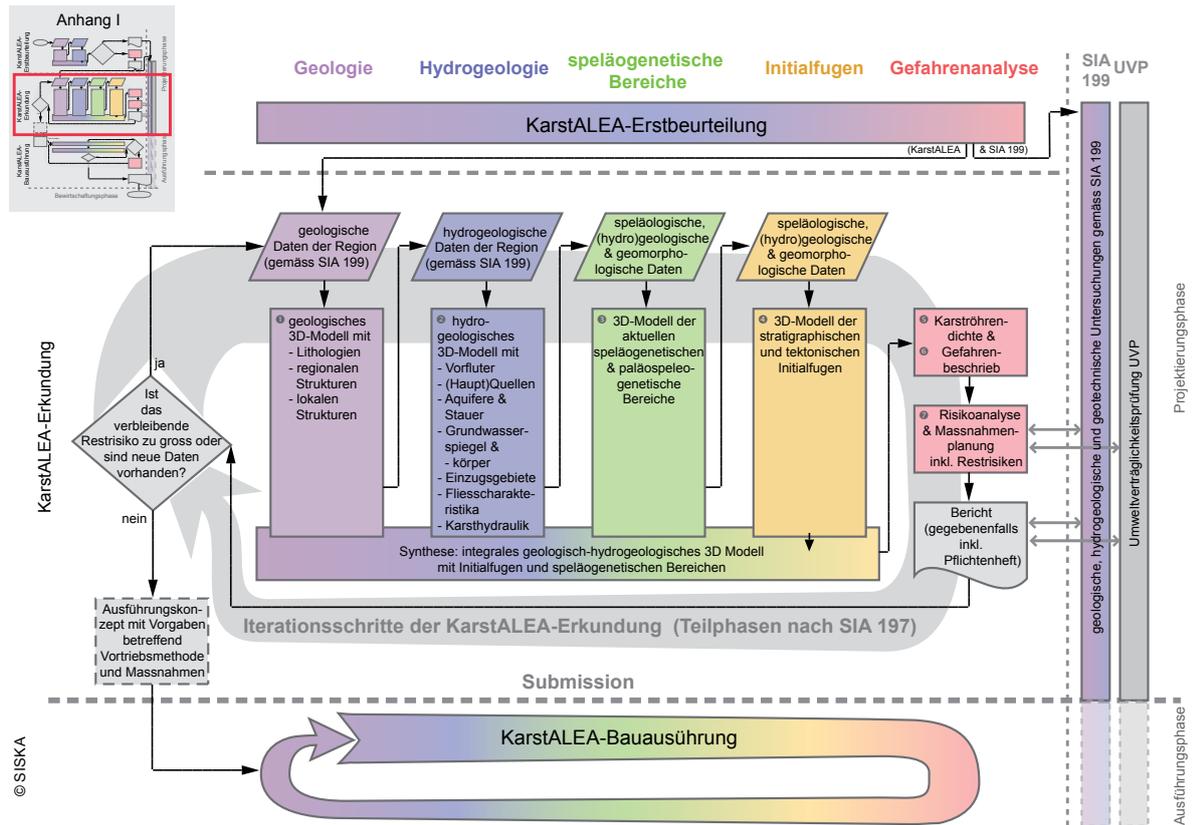


Abb. 6.2: Ablauf der Untersuchungen der KarstALEA-Erkundung

In einem iterativen Verfahren werden laufend neue Informationen und Erkenntnisse in die vier Modelle – Geologie, Hydrogeologie, speläogenetische Bereiche, Initialfugen – integriert. Darauf basierend erfolgt die Ausscheidung von Zonen mit unterschiedlicher Karströhrendichte (Karströhrendichte-Zonen) und die Beschreibung und Lokalisierung der Gefahren (KarstALEA-Zonen). Diese können dann in die Risikoanalyse und die Massnahmenplanung einfließen. Diese Bearbeitungsschritte werden so lange wiederholt, bis das gewünschte Informations- und Risikoniveau erreicht ist (meist Teilphasen nach SIA 197). Während der einzelnen Iterationen ist der Informationsaustausch mit den Bearbeitern der Geologie, Hydrogeologie und Geotechnik (SIA 199) und der Umweltverträglichkeitsprüfung sicherzustellen. Die Resultate der KarstALEA-Erkundung fließen in die Submission und anschliessend in die Massnahmenplanung etc. (Kapitel 7) während der Ausführungsphase ein.



### 6.3.1 G1 – geologisches 3D-Modell

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* gering

*Ziel:* 3D-Modell mit den regionalen geologischen Strukturen und der Lage der Schichten, als Grundlage für die weiteren Untersuchungen.

*Verwendete Daten:*

*Erforderlich:* Digitales Höhenmodell, geologische Karten, geologische Profile

*Erwünscht:* geologische Beschreibungen, tektonische Karten, Isohypsenkarten, geologische und lithologische Literatur, Felddaten (z.B. Streifenkartierung), Bohrlochdaten, Geophysik, Orthofotos.

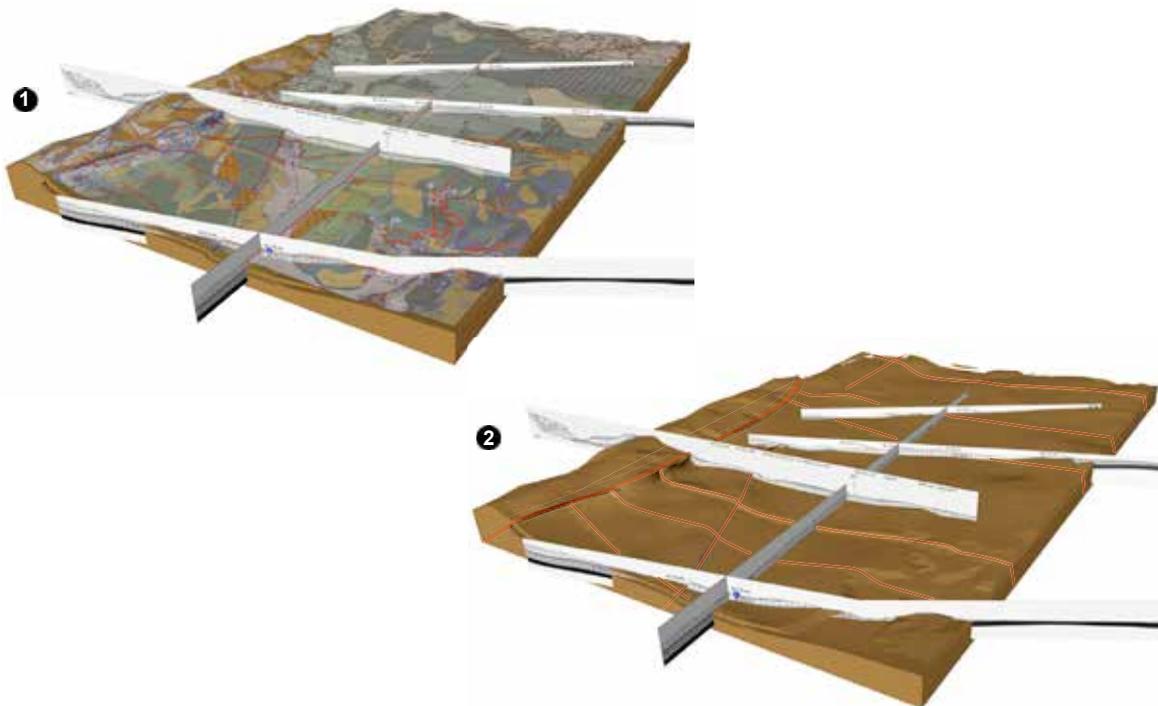


Abb. 6.4: G1 – Geologisches 3D-Modell

(1) Digitales Höhenmodell des Einzugsgebietes des Beuchire-Karstsystems bei Porrentruy JU mit projizierter geologischer Karte und Profilen; (2) geologisches 3D-Modell der beiden Aquiclude (Terrain à chailles des Oxfordien und Natica-Mergel des Séquanien), Verwerfungen und geologischen Profilen.

*Methoden:* Die bekannten geologischen Daten werden in einem geologischen 3D-Modell dargestellt, wobei ein digitales Höhenmodell als Referenz dient. Ausgewählte Schichtgrenze und tektonische Strukturen (v.a. Verwerfungen und bedeutende Brüche) werden üblicherweise für das ganze Untersuchungsgebiet modelliert. Isohypsenkarten sind dazu besonders hilfreich. Die prioritär zu modellierenden Schichtgrenzen werden aufgrund der im Rahmen der in vorangehenden Untersuchungsiteration gewonnenen Erkenntnisse bestimmt. Der Detaillierungsgrad des geologischen 3D-Modells richtet sich nach den Anforderungen der weiterführenden Untersuchungen (v.a. Hydrogeologie und Initialfugen). Dabei gilt folgenden Strukturen ein spezielles Augenmerk:

- der Geometrie der Aquifere, im Speziellen im Bereich des Untertagbauwerks
- den strukturbedingten Grenzen zu benachbarten hydrogeologischen Systemen, an denen mit einer bedeutenden Interaktion (unterirdischer Zu- und/oder Abfluss) zu rechnen ist: Höhe möglicher Schwellen, Lage und Mächtigkeit von Verwerfungen, die verkarstungsfähige Formationen trennen oder verbinden, etc.
- ausgewählten stratigrafischen Referenzflächen für die Initialfugen (z.B. Basis oder Dach des Aquifers), im Speziellen im Bereich des Untertagbauwerks und im Gebiet, in welchem die Initialfugen bestimmt werden (Kapitel 6.6)

Das geologische 3D-Modell wird laufend an die neusten Erkenntnisse – v.a. aus den Untersuchungen gemäss SIA 199 – angepasst, im Speziellen im Bereich der Tunnelachse (ergänzende Sondierbohrungen, Streifenkartierung, Geophysik etc.).

### 6.4 Hydrogeologische Untersuchungen

Ziel der hydrogeologischen Untersuchungen im Rahmen der KarstALEA-Erkundungsphase ist die karstspezifische Gefahrensituation bezüglich des Wassers – sowohl für das Bauwerk wie auch für andere Nutzungen und die Umwelt – angemessen zu beurteilen und zu lokalisieren. Dies bedarf eine ganzheitliche Beschreibung der (karst) hydrogeologischen Verhältnisse, wie sie in allgemeiner Form auch in der SIA 199 - 2.3 verlangt ist. Die hier vorgeschlagenen Untersuchungen können daher als **karstspezifische Konkretisierung der SIA 199 bezüglich Hydrogeologie** mit punktuellen Ergänzungen verstanden werden. In Kombination mit den anderen KarstALEA-Untersuchungen (v.a. Karströhrendichteverteilung) führt dies zu einer Verbesserung der Vorhersage der Gefährdungen in den Bereich Wasser und Sedimente verglichen mit den bisher üblichen Untersuchungen gemäss SIA 199.

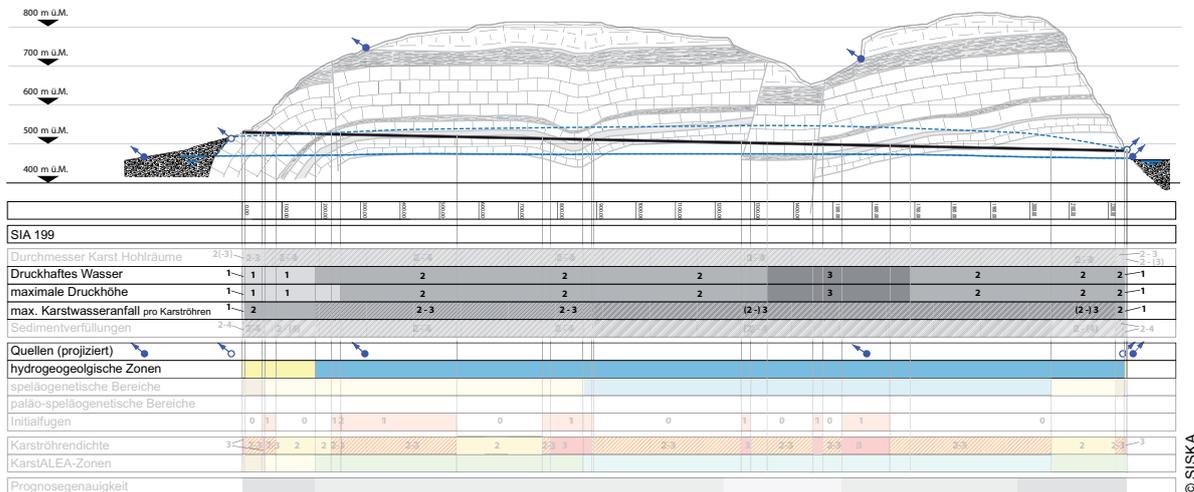


Abb. 6.5: Hydrogeologisches Profil mit ergänzenden Angaben zur SIA 199

Das hydrogeologische Profil zeigt den lokalen Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels bezüglich des Tunnels, die Position der bekannten Quellen, die allgemeine Fliessrichtung und – falls bekannt – bevorzugte Fliesswege und Angaben zu möglichen Schüttungen. Das hydrogeologische Modell dient als Basis für die Beurteilung der wasserbezogenen Gefahren im Karst und basiert auf den hydrogeologischen Daten, die im Rahmen der SIA 199 erhoben werden, gegebenenfalls durch karstspezifische Daten ergänzt.

Grundsätzlich werden im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen die Daten, die üblicherweise im Rahmen der hydrogeologischen Untersuchungen gemäss SIA 199 erhoben und interpretiert werden, mit einem Fokus Karst ausgewertet. Vereinzelt sind zusätzliche Daten zu erheben und/oder weitere im Rahmen anderer Untersuchungen erhobene Daten zu berücksichtigen. Gleichzeitig helfen die KarstALEA-Untersuchungen, die üblichen hydrogeologischen Untersuchungen der jeweils folgenden Etappe gezielter durchzuführen (z.B. Tracer- und Bohrlochversuche).

Die karsthydrogeologischen Untersuchungen sollten in erster Linie folgende Fragen beantworten:

- Welche Auswirkungen hat das Untertagbauwerk auf die bestehenden hydrogeologischen Verhältnisse? Welche Grundwasservorkommen, Quellen und weitere Gewässer können durch das Untertagbauwerk beeinflusst werden? Inwiefern ist mit anderen Einflüssen auf die Umwelt zu rechnen, z.B. Setzungen oder Hanginstabilitäten aufgrund der veränderten hydrogeologischen Verhältnisse?

Tab. 6.2: Übersicht über die vorgeschlagenen hydrogeologischen Untersuchungsmethode der KarstALEA-Methode.

Unter- suchungs- schritte	Ziel & Methode	Daten		Erkenntnis- gewinn (Karst)
		erforderlich	erwünscht	
Hydrogeologisches Modell	H1 3D Modell: Identifizierung der hydrogeologischen <b>Karstsysteme</b> , deren <b>Einzugsgebiete</b> und der potentiell <b>beeinflussten Grundwasservorkommen</b> und <b>Quellen</b> . Darstellung der Geometrie und Struktur der Karstsysteme in einem qualitativen <b>3D-Modell</b>	Strukturalgeologisches 3D-Modell (G1), oberirdisches Gewässernetz (z.B. aus Topo-Karten) und Quelldaten (mindestens Lokalisierung & Eckdaten zu deren Schüttung).	Alle weiteren verfügbaren hydrogeologischen Daten (georeferenziert) wie z.B. Quellschüttungen und -schwankungen, Quellmonitoring, Piezometerdaten, Gewässerschutzkarten, Berichte zur Trinkwasserversorgung, bestehende Tracerversuche, Orthophotos, speläologische Daten.	XXX
	H2 Verifizierung der <b>Einzugsgebiete</b> mit Hilfe der <b>mittleren Abflusshöhe</b> (Bilanzrechnungen)	Schüttungsdaten zu den grösseren Quellen, mittlere Abflusshöhe (aus meteorologischen Daten, vgl. Pfandler & Zappa, 2006 oder Vergleichswerte benachbarter - gut bekannter - Karstgebiete)	Quellkataster, Quellmonitoring	X
	H3 Präzisierung der <b>Einzugsgebiete</b> und Abschätzung der <b>Fliesscharakteristika</b> aus <b>hydrologischen Daten</b>	Hydrogramme der grösseren Quellen	Quellkataster, Quellmonitoring, Abfluss- und Hochwasserchroniken, meteorologischen Daten (v.a. Niederschlagsaufzeichnungen, Schneedecke, Zeitpunkt Schneeschmelze), Orthofotos, evtl. Daten von natürlichen Tracern wie hydrochemische und Isotopendaten.	XX
	H4 Validierung der <b>Einzugsgebiete</b> und Abschätzung der <b>Fliesscharakteristika</b> aus <b>Tracerdaten</b>	Daten von Tracerversuchen (Abstandsgeschwindigkeiten, Durchgangskurven, Rückgewinnungsrate)		XX-XXX
	H5 Bestimmung des <b>Schwankungsbereichs des Karstwasserspiegels</b> (zu erwartenden hydraulische Drücke)	Piezometer-/Drucksondendaten aus Höhlen, Bohrlöchern und/oder Quellen, DHM	Hydrogramme, langjährige Abfluss- und Hochwasserchroniken, meteorologische Daten, geomorphologische und/oder sedimentologische Daten aus Höhlen	XXX
	H6 Abschätzung möglicher <b>Schüttungen</b> (u.a. durch Bilanzrechnungen & Hydraulik)	Kenntnis Einzugsgebiete (H1-H4) und Schwankungsbereich Karstwasserspiegel (H5), Niederschlags-/Schneeschnmelzszenarien	Piezometer-/Drucksondendaten aus Höhlen, Bohrlöchern und/oder Quellen, Schüttungs- & Abflussdaten, Hydrogramme, meteorologische Daten, Resultate hydraulischer Bohrlochtests, Geometrie und hydraulische Charakterisierung des Karstsystems	XX

- Mit welchen Drücken ist wann und wo zu rechnen? Respektive wo liegt der Karstwasserspiegel unter verschiedenen hydrologischen Bedingungen (Niedrigwasser, Hochwasser)?
- Mit welchen Schüttungen muss wann und wo gerechnet werden? Wie entwickelt sich die Schüttung nach dem Anfahren der entsprechenden Karströhre?

Dazu müssen die karsthydrogeologischen Verhältnisse ganzheitlich betrachtet und charakterisiert werden. Da ein Gebirge häufig durch mehrere Karstsysteme entwässert wird, können mehrere Karstsysteme von einem Untertagebauwerk tangiert sein. Diese gilt es einerseits in ihrer Struktur und andererseits in ihrem Verhalten zu beschreiben (Tab. 6.2). Dazu wird ein qualitatives hydrogeologisches 3D-Modell erstellt (H1), das alle relevanten georeferenzierbaren Daten enthält (eine Art 3D-GIS). Weiter werden relevante Daten zum Verhalten der Systeme zusammengetragen und in Bezug auf das geplante Projekt ausgewertet (Einzugsgebiete und Fließcharakteristika aus hydrologischen Daten (H2) und Tracerdaten (H3), Hydraulik (H4)). Die hydrogeologischen Untersuchungen H1-H3 entsprechend weitgehend der KARSYS-Methode zur Beschreibung von Karstsystemen (Vouillamoz et al., 2011; Jeannin et al., 2012).

#### 6.4.1 H1 – Hydrogeologisches 3D-Modell – Karstsysteme und potenziell beeinflusste Grundwasservorkommen und Quellen

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* hoch

*Ziel:* Identifizierung der hydrogeologischen Karstsysteme, deren Einzugsgebiete und der potenziell beeinflussten Grundwasservorkommen und Quellen. Darstellung der Geometrie und Struktur der Karstsysteme in einem qualitativen 3D-Modell mit dem Gewässernetz, temporären und perennierenden Quellen, Aquiferen, den Grundwasserspiegeln, den Infiltrationsverhältnissen (z.B. Ponore), hydrogeologischen Zonen (phreatisch, epiphreatisch, gespannt, vados), den Hauptfließrichtungen und Systemgrenzen (Einzugsgebiete, mögliche Diffluenzen, Teilsysteme, etc.).

*Verwendete Daten:*

*Erforderlich:* Strukturgeologisches 3D-Modell (G1), oberirdisches Gewässernetz (z.B. aus Topo-Karten) und Quelldaten (mindestens Lokalisierung & Eckdaten zu deren Schüttung).

*Erwünscht:* Alle weiteren verfügbaren hydrogeologischen Daten (georeferenziert) wie z.B. Quellkataster, Quellschüttungen und -schwankungen, Quellmonitoring, Piezometerdaten, Gewässerschutzkarten, Berichte zur Trinkwasserversorgung, bestehende Tracerversuche, Orthophotos, speläologische Daten.

*Methoden:* Das strukturgeologische 3D-Modell wird mit den georeferenzierbaren hydrogeologischen Daten ergänzt (Abb. 6.6):

- a) oberirdisches Gewässernetz (im Speziellen Vorfluter)
- b) alle bekannten perennierenden und temporäre Quellen: Die Karstquellen werden anhand der in der Tabelle 5.1 beschriebenen Kriterien identifiziert.
- c) Aquifere, Aquitarde und Aquiclude: Anhand der stratigrafischen Position der Quellen und der Charakterisierung der Formationen (Kapitel 5.5) werden die wichtigsten Aquifere und Aquiclude bestimmt und modelliert.

- d) Karstwasserspiegel bei Niedrigwasser: Piezometerdaten, die Lage der Quellen des Systems und Beobachtungen in Höhlen geben Auskunft über die Lage des Karstwasserspiegels bei Niedrigwasser (siehe auch H4). Dieser ist meist nur sehr schwach geneigt. Bei fehlenden Daten kann er daher mit einer horizontalen Ebene durch die wichtigste perennierende Quelle des Systems annähernd bestimmt werden.
- e) Ausdehnung der gesättigten Zone eines Aquifers (phreatische – d .h. permanent gesättigt – Zone): Sie kann bestimmt werden, indem der Grundwasserspiegel mit der Basis und ggf. dem Dach des Aquifers verschnitten wird.
- f) Lage des Grundwasserspiegels bei Hochwasser: Zu dessen Bestimmung können die Lage der temporären Quellen, Hochwasserinformationen von der Oberfläche und/ oder aus Höhlen oder auch geeignete Piezometerdaten genutzt werden (siehe auch H4). Bei fehlenden Daten kann – in einer ersten Phase – der Grundwasserspiegel bei Hochwasser durch eine zur Quelle hin geneigte Ebene dargestellt werden. Die Neigung sollte einem realistischen hydraulischen Gradienten entsprechen. Dieser kann je nach Kontext beträchtlich variieren (von <1% - >10%) und muss mindestens aufgrund von Maximalangaben eingegrenzt werden (z.B. ein Tal oder eine Höhle, welche nie überflutet wurden).
- g) Ausdehnung der epiphreatischen Zone (d.h. zeitweise gesättigte Zone): Die Grundwasserspiegel bei Niedrigwasser und bei Hochwasser und die Aquiclud begrenzen die epiphreatische Zone.
- h) Schwebende oder hangende Grundwasserkörper: Sind solche aufgrund von lithostratigrafischen Kenntnissen, Beobachtungen in Höhlen, Quell- oder Bohrlochdaten bekannt, werden sie analog zur gesättigten Zone des Aquifers bestimmt.
- i) Wichtige Elemente der Grundwasserneubildung: Ponore, allochthone Einzugsgebiete, Zonen mit unterschiedlichen Infiltrationsverhältnissen: autochthon und/oder allochthon, konzentriert und/oder diffus; kein/teilweise/totaler Oberflächenabfluss. Dies kann summarisch mit Hilfe von geologischen Karten und Orthofotos bestimmt werden und ggf. durch Feldaufnahmen verfeinert werden. Die üblichen Methoden zur Ausscheidung von Grundwasserschutz zonen können dabei gute methodische Hinweise liefern (z.B. EPIK, BUWAL 1997).

*Abb. 6.6 (Seite 102): H1 – Hydrogeologisches 3D-Modell und KARSYS-Karte*

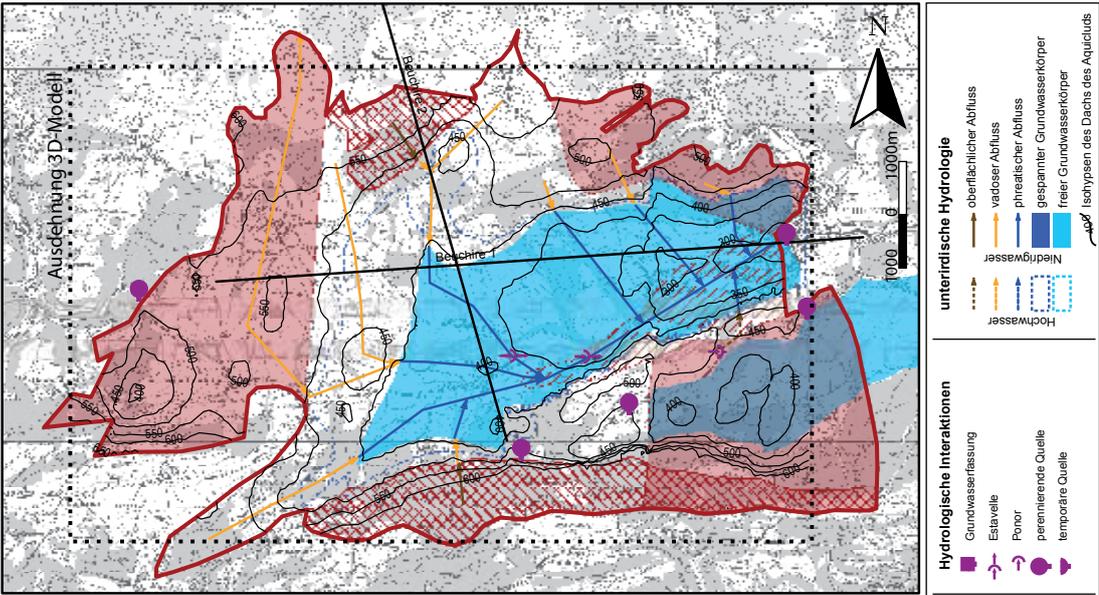
*Das hydrogeologische 3D-Modell des Beuchire-Karstsystems (Porrentruy JU) enthält sowohl die relevanten Informationen an der Oberfläche (Quellen, Ponore, Estavellen, die Einzugsgebiete der Quellen und die Infiltrationsverhältnisse – in rot) wie auch jene in der Tiefe (Dach Aquiclud, Karstwasserspiegel bei Hoch- und Niedrigwasser, erwartete Fliesswege - vados in gelb, phreatisch in blau). Das hydrogeologische 3D-Modell dient als Basis für die Beurteilung der wasserbedingten Gefahren.*

*Die Elemente des hydrogeologischen 3D-Modells können mit Hilfe einer KARSYS-Karte dargestellt werden, was im Rahmen einer KarstALEA-Untersuchung jedoch meist nicht nötig ist. Falls die KARSYS-Methode für das zu untersuchende Karstgebiet schon angewendet wurde, können daraus wertvolle Informationen gewonnen werden. Weitere nützliche Informationen werden in den ID-Karten der Karstsysteme veröffentlicht ([www.swisskarst.ch](http://www.swisskarst.ch)).*

3D - Modell

Oberflächenhydrologie

unterirdische Hydrologie



2D - Darstellung: KARSYS-Karte

- Legende**
- Oberflächenhydrologie**
- Einzugsgebiet der Quelle
  - verkarstet
  - teilweise bedeckter Karst
  - alltönchton
  - Profile

- Hydrologische Interaktionen**
- Grundwasserfassung
  - Estuarvälle
  - Ponor
  - perennierende Quelle
  - temporäre Quelle

- unterirdische Hydrologie**
- oberflächlicher Abfluss
  - vadoser Abfluss
  - phreatischer Abfluss
  - gespannter Grundwasserkörper
  - freier Grundwasserkörper
  - Isopyhnen des Dachs des Aquicluds
- Niedrigwasser  
Hochwasser

- j) Grenzen der Karstsysteme und Teilsysteme: Mit Hilfe der Position der Karstquellen, der Geometrie der Aquifere, der Lage der Grundwasserspiegel bei unterschiedlichen hydrologischen Verhältnissen und – falls vorhanden – der Tracerversuche können die bedeutenden Karstsysteme des Gebirge identifiziert und abgegrenzt werden. Dabei gilt es folgendes zu beachten:
- Gewisse wichtige Quellen sind möglicherweise nicht bekannt z.B. wenn diese in eine tiefe Schlucht, einen See oder ein Flussbett entwässern oder die Datenlage ungenügend ist.
  - Mehrere – auch weit entfernte – Quellen können dasselbe Karstsystem entwässern.
  - Das Einzugsgebiet einer Karstquelle wird in erster Linie von der Geometrie der Basis des Aquifers bestimmt und kann daher beträchtlich vom topografischen Einzugsgebiet abweichen.
  - Wasser kann unterirdisch von einem Karstsystem ins andere fließen (siehe H3).
  - Grenzen zwischen benachbarten Karstsystemen können sich – je nach den hydraulischen Verhältnissen (Hochwasser) – verschieben (H3).
  - Difffluente Systeme oder Systemteile sind im Karst häufig.
- k) Die Hauptfliessrichtungen: Zur Bestimmung der Fliesswege können grundsätzlich drei Zonen unterschieden werden: In der vadosen Zone oberhalb des Aquiclud erfolgt die Entwässerung subvertikal durch Schächte und Mäander bis die gesättigte Zone erreicht wird. Danach erfolgt die weitere Entwässerung subhorizontal dem hydraulischen Gradienten folgend zur Quelle. Stösst das Wasser auf einen Aquiclud bevor es die gesättigte Zone erreicht, folgen die Karströhren im Grossen und Ganzen der grössten Neigung des Aquicluds bis die gesättigte Zone erreicht wird. Die Hauptfliessrichtungen können je nach hydrologischen Verhältnissen (v.a. Niedrig- und Hochwasser) unterschiedlich sein.
- l) Höhlensysteme: Wenn grössere Höhlen bekannt sind, sollten diese auch ins Modell eingefügt werden. Sie können Hinweise geben, wo mit einem konzentrierten Abfluss gerechnet werden muss.

Integriert man nun die Lage oder Linienführung des Untertagbauprojektes (respektive die verschiedenen Varianten derselben), können die Karstsysteme und damit Grundwasservorkommen und Quellen identifiziert werden, die vom Untertagbauprojekt – direkt oder indirekt – beeinflusst werden können.

Grundsätzlich können alle Grundwasserkörper beeinflusst werden, die vom Untertagbauprojekt direkt tangiert werden (A1 auf Abb. 6.7), deren Zufluss durch das (potenziell drainierende) Untertagbauwerk verringert/beeinflusst werden kann (A2) und/oder denen Wasser aus dem Untertagbauprojekt zufließen kann (A2). Interagiert ein potenziell beeinflusster Grundwasserkörper (temporär) mit anderen (Diffluenz), sind – je nach Situation – auch diese Systeme und die damit verbundenen Grundwasservorkommen in die Betrachtungen einzubeziehen (A3). Alle Quellen, die von einem potenziell beeinflussten Grundwasserkörper (mindestens temporär) gespeist werden oder die möglicherweise vados mit dem Untertagbauprojekt verbunden sind (z.B. nahe- und tieferliegende Quellen), können vom Untertagbauprojekt beeinflusst werden (Q1-Q5).

Inwiefern eine potenzielle Beeinflussung signifikant ist, muss mit weiterführenden hydrogeologischen Abklärungen (H2-H4) und/oder im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung bestimmt werden.

Weiter ermöglicht das 3D-Modell eine erste grobe Abschätzung der zu erwartenden Drücke aufgrund der Position der (Hoch- und Niedrigwasser-)Karstwasserspiegel und des Untertagbauwerks.

Die wichtigsten Elemente des 3D-Modells können kartografisch dargestellt werden. Eine Möglichkeit ist die KARSYS-Karte, welche im Rahmen des Projektes SwissKarst (NFP 61 – Nachhaltige Wassernutzung) entwickelt wurde (Abb. 6.6). Dies ist im Rahmen einer KarstALEA-Studie meist nicht nötig. Steht jedoch eine KARSYS-Karte zur Verfügung, können daraus die wichtigsten Informationen für die erste Etappe einer KarstALEA-Studie entnommen werden. Die KARSYS-Karten werden zusammen mit einem 3D-PDF und einer Identitätskarte des betroffenen Karstsystems auf [www.swisskarst.ch](http://www.swisskarst.ch) veröffentlicht.

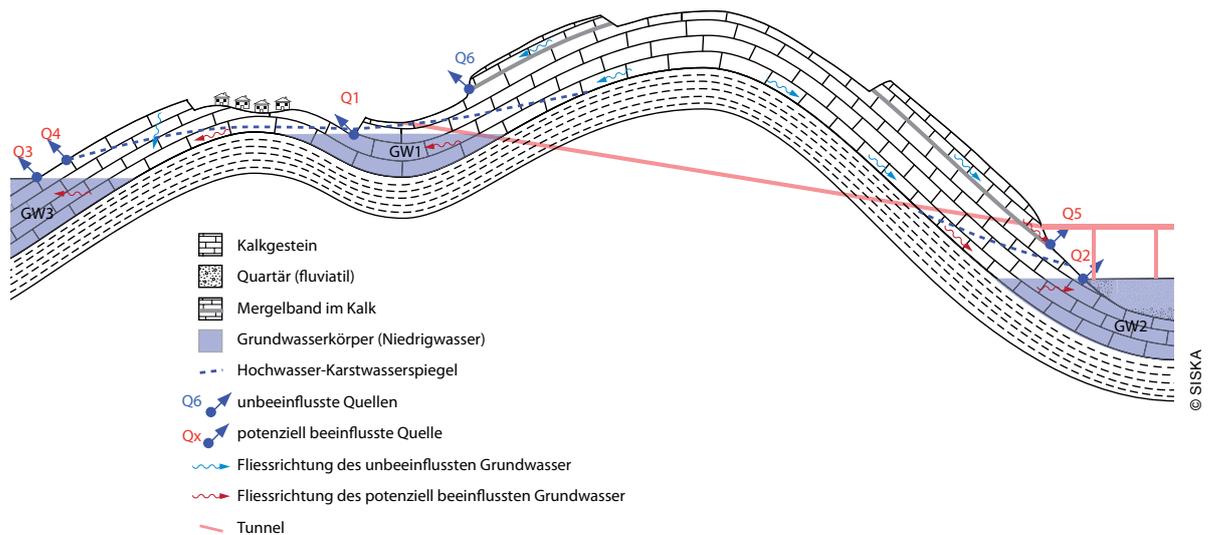


Abb. 6.7: H1 – Durch ein Untertagbauprojekt potenziell beeinflusste Grundwasservorkommen und Quellen

Ein Untertagbauwerk kann Grundwasservorkommen beeinflussen, wenn

- 1) das Untertagbauwerk den Grundwasserkörper direkt anschneidet (A1)
- 2) das Untertagbauwerk den Zufluss in den Grundwasserkörper beeinflussen kann (A2)
- 3) Wasser aus dem Untertagbauwerk in den Grundwasserkörper gelangen kann (A2) oder
- 4) der Grundwasserkörper mit einem potenziell beeinflussten Grundwasserkörper (Punkte 1-3) direkt interagiert (A3)

Quellen können beeinflusst werden, wenn sie mindestens temporär von einem potenziell beeinflussten Grundwasserkörper (Q1-Q4) gespeist werden oder wenn durch den vadosen Bereich fließendes Wasser die Quelle speist, das durch das Untertagbauwerk abgeleitet oder verunreinigt werden könnte (Q5). Quellen, die oberhalb des Unterbauwerks liegen und nie von einem potenziell beeinflussten Grundwasserkörper gespeist werden, können nicht vom Untertagbauwerk beeinflusst werden (Q6).

## 6.4.2 H2 – Verifizierung der Einzugsgebiete mit Hilfe der mittleren Abflusshöhe

Karstspezifischer Erkenntnisgewinn: mittel

Ziel: Verifizierung der hydrogeologischen Karstsysteme (Einzugsgebiete, potenziell betroffene Quellen etc.) und Hinweise auf das Verhalten an den Grenzen des Systems sowie die Interaktion zwischen benachbarten Systemen.

Verwendete Daten:

Erforderlich: Schüttungsdaten der grösseren Quellen, mittlere Abflusshöhe (aus meteorologischen Daten oder Vergleichswerte benachbarter (gut bekannter) Karstgebiete)

Erwünscht: Quellkataster, Quellmonitoring

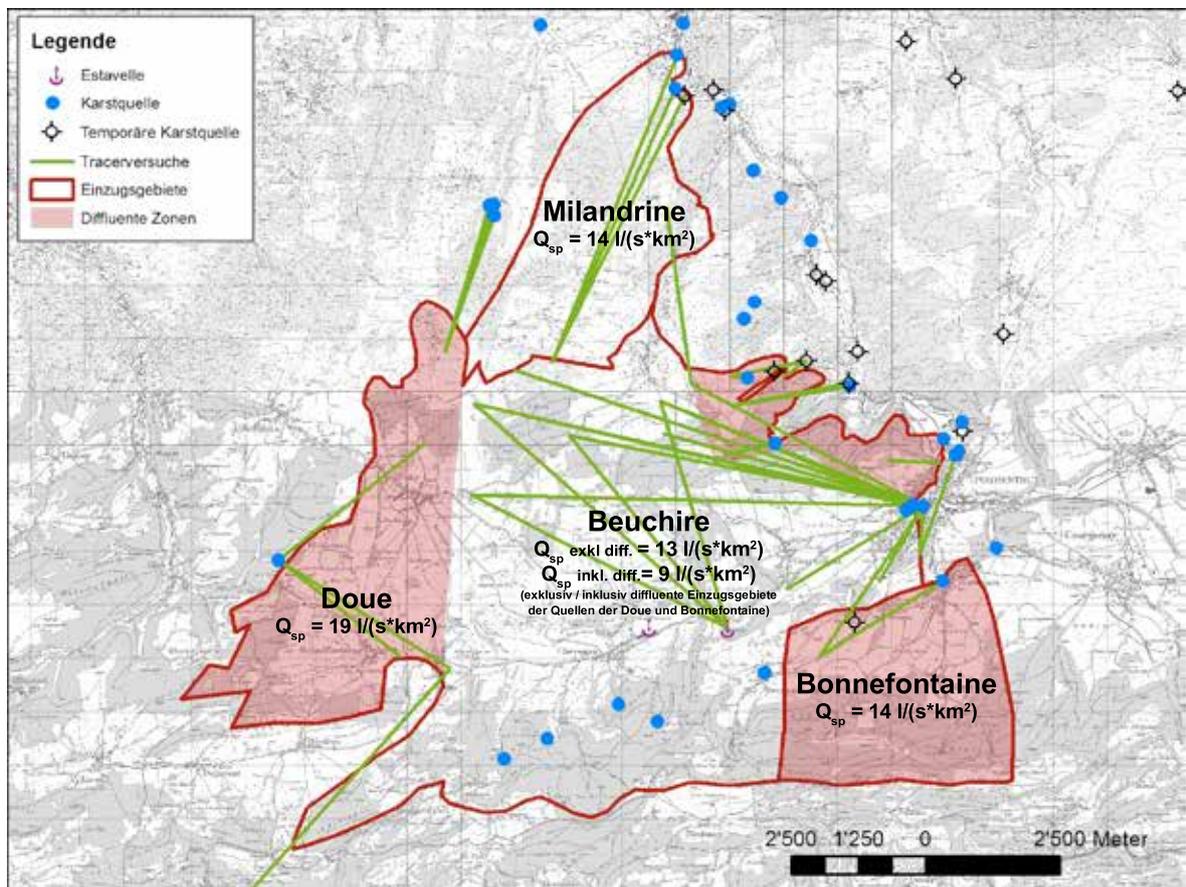


Abb. 6.8: H2 & H4 – Einzugsgebiete der Karstquellen

Die Karte zeigt die bekannten Quellen in der Umgebung von Porrentruy, die Resultate der durchgeführten Tracerversuche und mögliche Einzugsgebiete der Karstsysteme (H1). Die Berechnung der mittleren Abflusshöhe ( $Q_{sp}$  = Quellschüttung/Fläche Einzugsgebiet) bestätigt, dass die ausgeschiedenen Einzugsgebiete realistisch sind (H2): Die  $Q_{sp}$  der Milandrine, der Bonnefontaine und der Beuchire (ohne Bonnefontaine und Doue) sind weitgehend identisch, während der  $Q_{sp}$  der Doue zu gross ist. Berücksichtigt man das ganze Einzugsgebiet der Beuchire (inkl. diffuente Bereiche der Doue und der Bonnefontaine) Beuchire ist der  $Q_{sp}$  klar zu klein ist. Dies unterstützt die Annahme, dass (nur) ein gewisser Teil der Niederschläge des Einzugsgebietes der Doue in das System der Beuchire entwässert. Die bei Hochwasser bestätigte Zufluss vom Karstsystem der Bonnefontaine in jenes der Beuchire dürfte dagegen quantitativ wenig ins Gewicht fallen.

*Methoden:* Anhand der mittleren Abflusshöhe  $Q_{sp}$  [ $l/(s \cdot km^2)$ ] = Niederschlag – Evapotranspiration (z.B. beim BAFU frei erhältlicher 500 x 500 m Raster-Datensatz; Pfaundler & Zappa, 2006) und der Summe der jährlichen Schüttung der Quellen der Karstsysteme kann die Grösse deren Einzugsgebiete abgeschätzt werden. Diese können mit den Flächen der Einzugsgebiete des (hydro)geologischen 3D-Modell verglichen werden. Gegebenenfalls ist die räumliche Variabilität (v.a. höhenabhängig) zu berücksichtigen. Ergeben sich bedeutende Abweichungen, ist dies ein wichtiger Hinweis, dass bedeutende Elemente des Karstsystems noch nicht erfasst oder falsch beurteilt wurden (z.B. eine wichtige Quelle ist unbekannt, unterirdischer Zu- oder Abfluss von/in ein benachbartes Karstsystem oder andere Aquifere).

### 6.4.3 H3 – Einzugsgebiete und Fließcharakteristika basierend auf hydrologischen Daten

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* mittel

*Ziel:* Verifizierung und Präzisierung der hydrogeologischen Karstsysteme (Einzugsgebiete, potenziell betroffene Quellen, etc.) und Abschätzung der Fließcharakteristika unter verschiedenen Bedingungen (Hoch- und Niedrigwasser), Hinweise auf das Verhalten an den Grenzen des Systems sowie die Interaktion zwischen benachbarten Systemen. Erarbeitung von Grundlagen zur Beurteilung der Karsthydraulik.

*Verwendete Daten:*

*Erforderlich:* Hydrogramme der grösseren Quellen

*Erwünscht:* Quellkataster, Quellmonitoring, Abfluss- und Hochwasserchroniken, meteorologischen Daten (v.a. Niederschlagsaufzeichnungen, Schneedecke, Zeitpunkt Schneeschmelze), Orthofotos, evtl. Daten von natürlichen Tracern wie hydrochemische und Isotopendaten.

*Methoden:* Mit Hilfe von Hydrogrammen der Karstquellen – gegebenenfalls mit den dazugehörigen Niederschlagsdaten – kann das Verhalten der Karstsysteme beschrieben werden. Damit können z.B. jahreszeitliche Grundwasserspiegelschwankungen, der Verlauf einer Hochwasserwelle, die Rolle von Überlaufquellen (temporären Quellen), die Interaktion mit benachbarten Systemen oder die Höhenverteilung des Einzugsgebietes (Zeitpunkt der Schneeschmelze) untersucht werden (Weber et al., 2011, Vouillamoz et al., 2011, Jeannin et al., 2012). Eine Analyse der Hydrogramme ermöglicht auch die Bestätigung oder Widerlegen von Hypothesen zum Einzugsgebiet, der Interaktion zwischen verschiedenen (Überlauf)Quellen oder zu den Fließcharakteristika (Abb. 3.3 und 6.9). Diese Interaktionen erklären häufig nichtlineare Reaktionen im Karst (v.a. Druckaufbau – Quellschüttung (vgl. Kapitel 3.1 im Speziellen Abb. 3.3).

Auch mit der Untersuchung natürlicher Tracer (z.B. Ionen, Isotopen) und chemischer und physikalischer Eigenschaften (Leitfähigkeit, Temperatur, etc.) des Quellwassers wie auch deren Variabilität können Hypothesen zu den Infiltrationsbedingungen (z.B. mittlere Höhe des Einzugsgebietes) und den Fließcharakteristika geprüft werden.

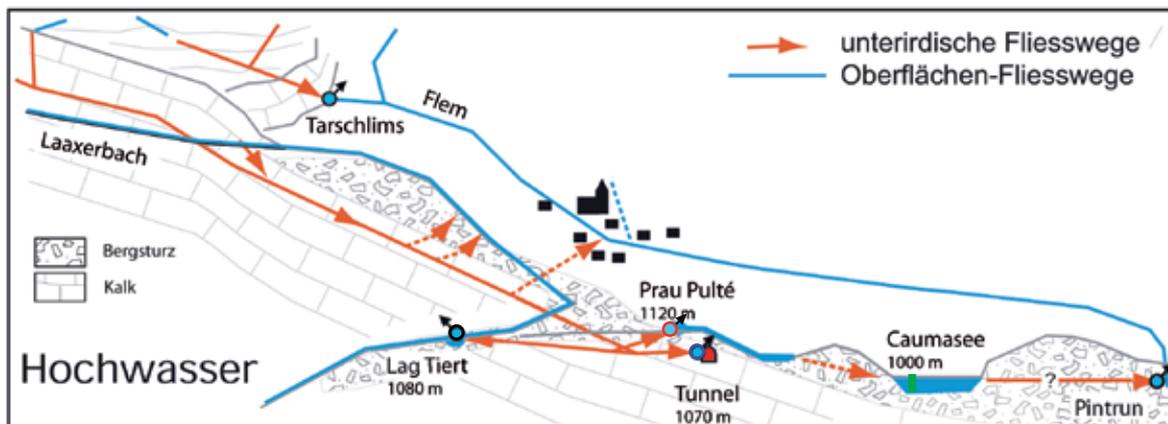
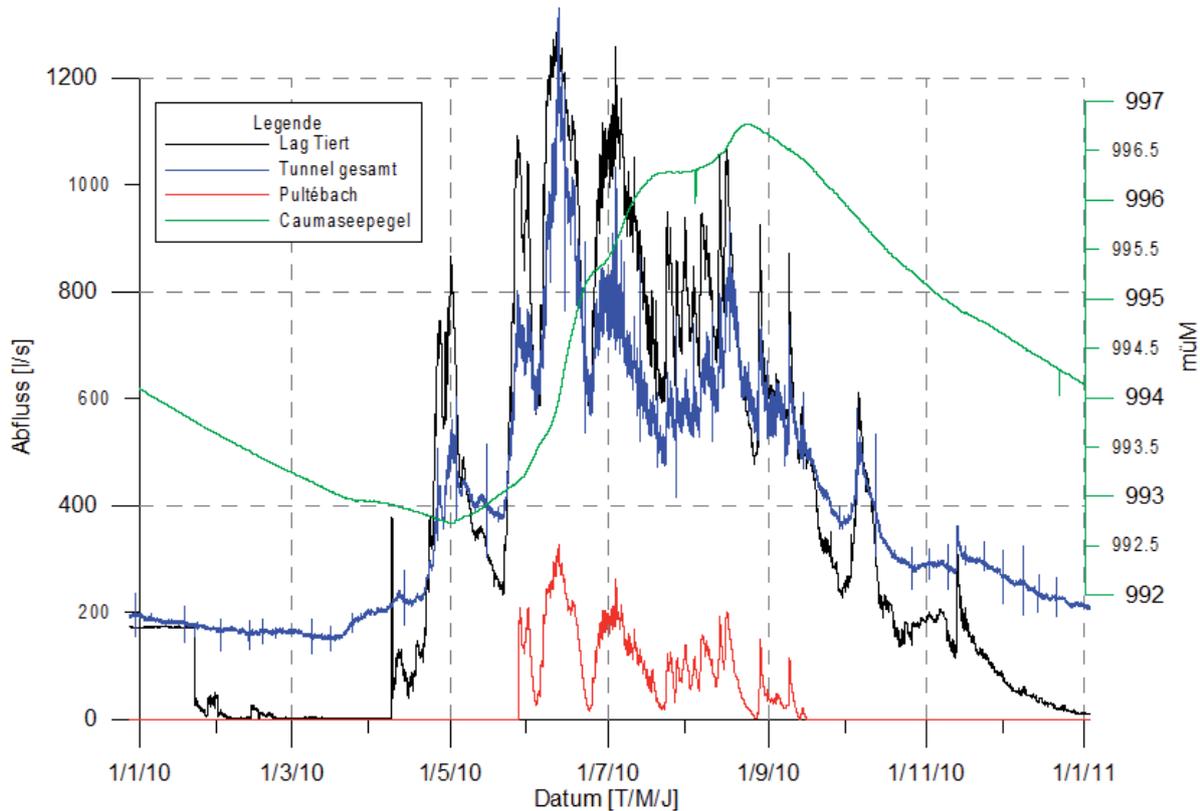


Abb. 6.9: H2 – Hydrogramm der wichtigsten Quellen in der Region Flims

Die Hydrogramme des Lag Tiert (Karstquelle), des Pultébachs (Ausfluss aus karstgespiesenem Lag Prau Pulté) und der Quelle im Tunnel sowie des Wasserstands im Lag la Cauma zeigen, wie das hydrogeologische System funktioniert:

Seitdem der Tunnel eine bedeutende Karströhre angeschnitten hat, wird das Karstsystem ganzjährig durch die Tunnelquellen entwässert (Schüttung 200-1250 l/s). Die Karstquelle im Lag Tiert fällt nun im Winter trocken und erreicht im Sommer eine Schüttung von bis zu 1250 l/s. Vor dem Tunnelbau erfolgte die Basisentwässerung des Systems durch den Lag Tiert (Schüttung im Winter etwa 200 l/s). Die Quelle im Lag Prau Pulté ist eine Überlaufquelle des Karstsystems mit einer Schüttung von bis zu gut 300 l/s in den Sommermonaten. Seit dem Tunnelbau ist ihre Schüttungsdauer kürzer. Weiter sind die Quellen im Dorf Flims trocken gefallen.

*Das Wasser des Lag Prau Pulté versickert im Pultébach und im Lag Tuleritg und speist den Bergsturzquifer und damit indirekt den Caumasee. Dies ist durch Tracerversuche und die Korrelation des Wasserspiegels mit der Quellschüttung belegt. Damit kann nachgewiesen werden, dass die Veränderung des Seespiegels des Lag la Cauma und der Schüttung der Quelle im Lag Tiert mit dem Anschneiden der Tunnelquelle zusammenhängen.*

*Hydrogramme vor dem Tunnelbau hätten ermöglicht, das Risiko einer Beeinträchtigung des hydroelektrisch genutzten Lag Tiert und des touristisch bedeutenden Caumasees zu erkennen.*

#### **6.4.4 H4 – Einzugsgebiete und Fliesscharakteristika basierend auf Tracerdaten**

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn: mittel bis hoch*

*Ziel:* Verifizierung und Präzisierung der Einzugsgebiete unter verschiedenen Bedingungen (Hoch- und Niedrigwasser), Hinweise auf das Verhalten an den Grenzen des Systems sowie die Interaktion zwischen benachbarten Systemen, Abschätzung der Fliesscharakteristika und der Reife der Karstsysteme (Konzentration des Abflusses, Durchlässigkeit, etc.). Erarbeitung von Grundlagen zur Beurteilung der Karsthydraulik.

*Verwendete Daten (erforderlich):* Daten von Tracerversuchen (bestätigte und nicht bestätigte Verbindungen, Abstandsgeschwindigkeiten, Durchgangskurven, Rückgewinnungsraten)

*Methoden:* Mit Tracerversuchen werden mögliche Hypothesen betreffend der Einzugsgebiete, der Interaktion der verschiedenen Karstsysteme und der Fliesscharakteristika getestet. Die Erkenntnisse der vorangehenden Untersuchungen (H1- H3) bilden die Planungsgrundlage der Tracerversuche. Dabei werden die hydrologischen Verhältnisse (Hoch- oder Niedrigwasser) berücksichtigt. Gegebenenfalls sind Tracerversuche unter verschiedenen hydrologischen Bedingungen durchzuführen. Sind die Rückgewinnungsraten gering (< 5 %), ist bei Interpretation (abgesehen von der Bestätigung einer Verbindung zwischen zwei Punkten) mit grosser Vorsicht vorzugehen. Grundsätzlich gilt es zu beachten, dass ein Nichtauftritt nicht immer die Abwesenheit einer Verbindung beweist. Die häufig angewendeten Modelle zur Interpretation der Durchgangskurven sind nur von sehr eingeschränkter Nützlichkeit im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen. Die maximale Abstandsgeschwindigkeit und die Durchgangszeit (Dispersion) geben jedoch Anhaltspunkte, ob die Verkarstung gut entwickelt ist.

#### **6.4.5 H5 – Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels (zu erwartende hydraulische Drücke)**

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn: hoch*

*Ziel:* Bestimmung der Position und der Schwankungen des Grundwasserspiegels (hydraulischer Druck und Gradient)

*Verwendete Daten:*

*Erforderlich:* Piezometer-/Drucksondendaten aus Höhlen, Bohrlöchern und/oder Quellen, DHM

*Erwünscht:* Quelldaten (v.a. Hydrogramme), langjährige Abfluss- und Hochwasserchroniken, meteorologische Daten, geomorphologische und/oder sedimentologische Daten aus Höhlen, Informationen zu Grundwasseraufstössen

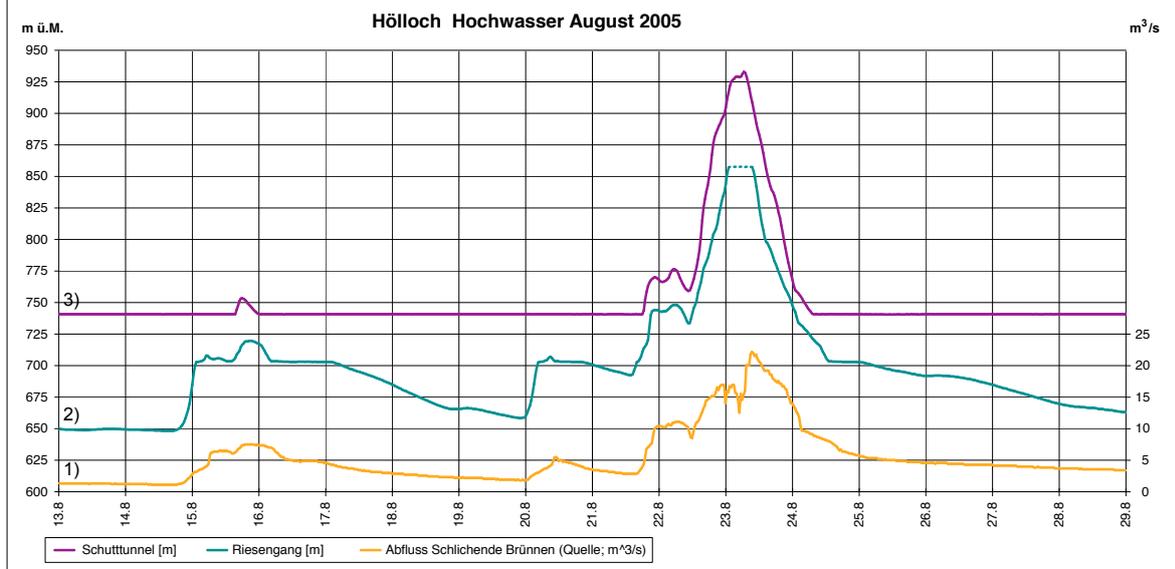
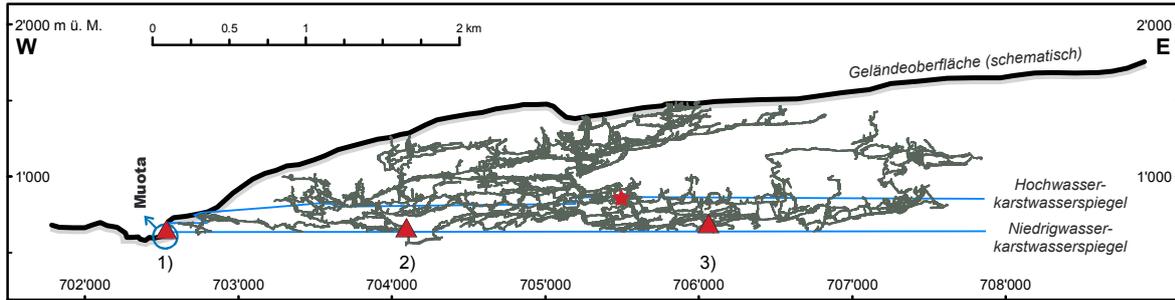


Abb. 6.10: H5 – Hochwasserinterpretation in Höhlen

Drucksonden in geeigneten Höhlen in der Nähe der Tunnelachse können wertvolle Hinweise auf das Verhalten des Karstsystems liefern. Die Drucksondendaten aus dem Hölloch zeigen z.B. dass an diesem Ort der Wasserdruck ca. 25 bar betragen kann. Die Messstellen sind im Profil des Höllochs eingezeichnet (Grafik aus Wildberger et al., 2010, modifiziert). Weiter liefern die Drucksondendaten wertvolle Hinweise zur Funktionsweise des Systems bei Hochwasser.

Der Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels kann auch mit gezielten Beobachtungen in Höhlen eingeschränkt werden: überschwemmte Einrichtungen oder Spuren von

*Höhlenforschern (z.B. Schlafstelle des Biwaks II im Hölloch -> Stern im Profil des Höllochs, 1), Lehmspuren an den Wänden (2), lehmige Tropfsteine (3), Schaum (4), offensichtlich temporär aktive phreatische Gänge (5) oder kürzlich umgelagerte Sedimente (6); Foto 1: Markus Pulver / AGH; Fotos 2-6: Pierre Beerli / SSC.*

*Methoden:* Anhand der Lage perennierender und temporärer Quellen, Beobachtungen zum Wasserstand in Höhlen (Hochwasserdaten, Drucksonden) und an der Oberfläche (z.B. nie überschwemmte Trockentäler) und Piezometermessungen wird die Lage des Grundwasserspiegels und dessen Schwankungsbereich bestimmt. Diese müssen für jedes direkt vom Bauwerk betroffene Karstsystem einzeln bestimmt werden.

Die Lage der jeweiligen Quellen ist ein erster Hinweis auf die Ausdehnung der epiphreatischen Zone und damit auf die zu erwartenden Drücke. Die Höhenlage der perennierenden (Haupt)Quelle entspricht der tiefstmöglichen Position des Karstgrundwasserspiegels bei Niedrigwasser. Anhand der Abflusszeiten von Überlaufquellen kann bestimmt werden, wann sich der Karstgrundwasserspiegel (an den entsprechenden Stellen) oberhalb oder unterhalb der entsprechenden Quelle befindet.

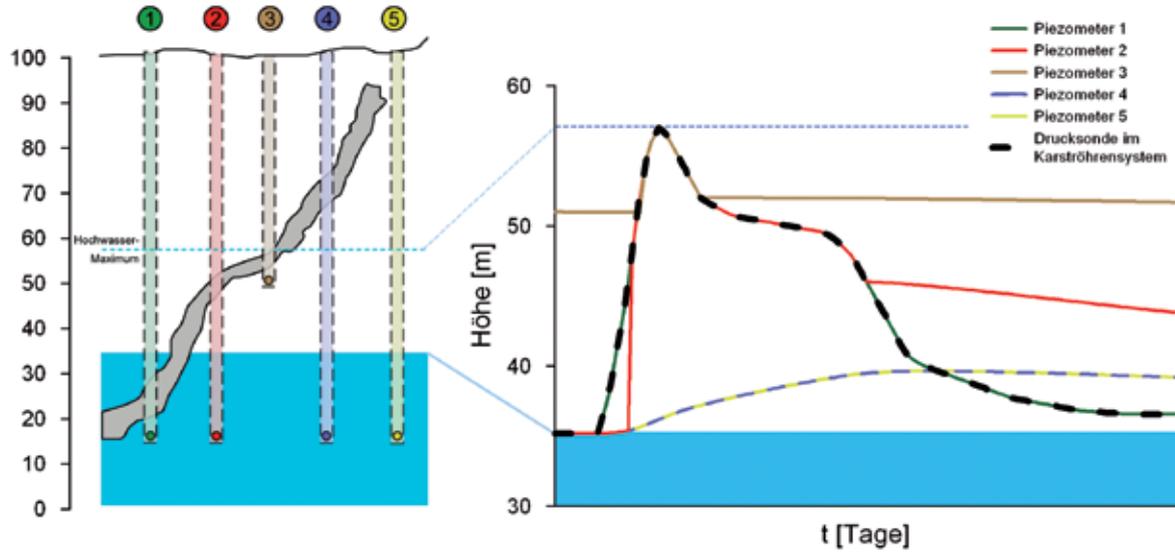
Idealerweise werden Beobachtungen bezüglich des Karstgrundwasserspiegels mit Drucksonden direkt in dazu geeigneten Höhlen durchgeführt (Höhlen, die in die phreatische Zone oder mindestens unter das Tunnelniveau reichen; Abb. 6.10). Erreichen die bekannten Höhlen das Tunnelniveau nicht, können Druckmessungen immer noch wertvolle Informationen zu Hochwasserspitzen liefern, sofern die Höhlen in der epiphreatischen Zone liegen. Weiter geben sedimentologische und geomorphologische Beobachtungen in Höhlen wertvolle Hinweise zum Hochwasserverhalten – unter Umständen auch über Jahrhundertereignisse (Häuselmann, 2002; Wildberger et al., 2001). So zeigen z.B. saubere Sinterröhrchen oder andere geeignete Tropfsteine, dass – je nach Alter/Länge der Sinterröhrchen – in den letzten Jahrzehnten bis Jahrhunderten kein Hochwasser diese Kote erreicht hat. Rezente Sedimentablagerungen – z.B. über Spuren von Höhlenforschern – belegen hingegen, dass dieser Gang kürzlich (z.B. seit der letzten Begehung) überflutet wurde. Die Korngrösse der entsprechenden Sedimente geben Hinweise auf die Fliessgeschwindigkeit und damit auf die Abflussmengen im entsprechenden Gang. Die Gangmorphologie und die Ganganlage geben wichtige Hinweise zu den Entstehungsbedingungen der entsprechenden Gänge und damit – sofern sie heute immer noch dieselbe Funktion erfüllen – zum Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels (siehe Kapitel 3.2).

*Abb. 6.11 (Seite 111): H5 – Piezometermessungen im Karst*

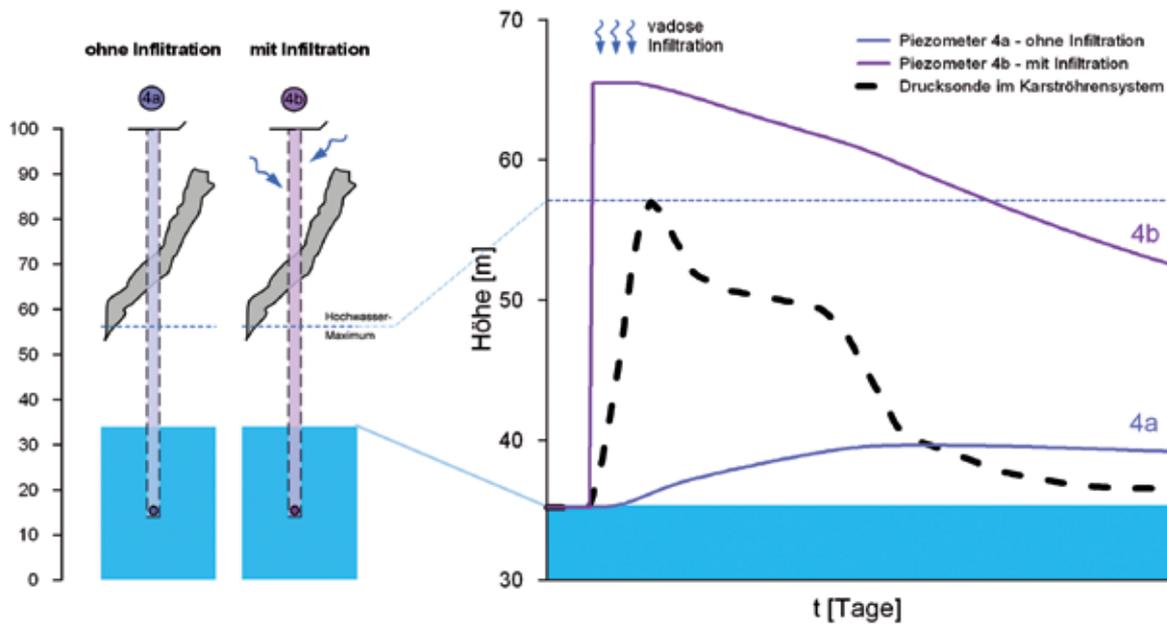
*Die Grafik A zeigt mögliche Verbindungskonfigurationen zwischen Sondierbohrungen und dem Karströhrensystem (rechts: Verbindung im vadosen, epiphreatischen oder phreatischen Bereich oder keine Verbindungen) und die unter diesen Bedingungen resultierenden Piezometerrespektive Druckmessungen. Die schwarz gestrichelte Linie stellt das Hochwasser dar, wie es mit einer Drucksonde im Karströhrensystem selbst gemessen werden kann. Die Grafik B zeigt, wie die Messungen durch einen vadosen Zufluss (aus dem Epikarst oder einer höhergelegenen Karströhre) in die Sondierbohrungen verfälscht werden kann. Die Grafik C zeigt wie die Verbindungshöhe einer Sondierbohrung mit dem Karstsystem anhand der Absenkkurven während eines Injektionsversuches bestimmt werden kann. Die Kurven entsprechen den Verbindungskonfigurationen der Grafik A.*

## Piezometermessungen im Karst

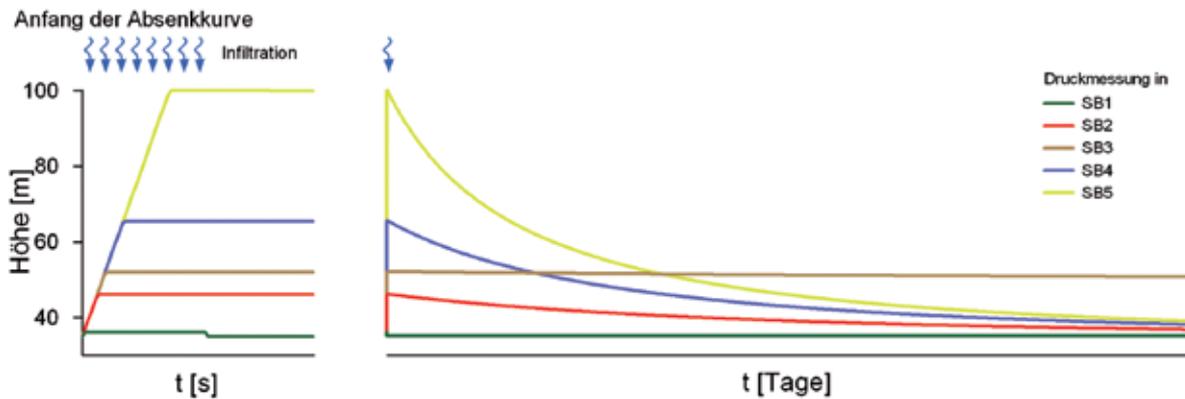
A - Piezometermessungen in Abhängigkeit der Verbindung zum Karströhrensystem



B - Beeinflussung der Piezometermessungen durch vadose Infiltration



C - Absenkkurven (Infiltrationsversuch) in Abhängigkeit der Verbindung zum Karströhrensystem



© SISKKA

Sind keine geeigneten Höhlen bekannt, kann das Schwankungsverhalten des Karstwasserspiegels auch in *geeigneten* Bohrlöchern bestimmt werden. Damit das Schwankungsverhalten des Karstwasserspiegels korrekt bestimmt werden kann, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein (Abb. 6.11):

- Das Bohrloch muss direkt mit dem Karströhrensystem (Röhren und Klüfte > 1 cm Durchmesser) verbunden sein, was im Einflussbereich einer Initialfuge wahrscheinlicher ist. Die Verbindung sollte idealerweise in der phreatischen Zone liegen. Dies ermöglicht kontinuierliche Messungen des Karstwasserspiegels. Liegt die Verbindung im epiphreatischen Bereich, sind die Messungen nur für Hochwasserereignissen repräsentativ, die die entsprechende Verbindungshöhe überschreiten. Um Piezometerdaten angemessen interpretieren zu können, sollte bekannt sein, wo das Bohrloch mit dem Karströhrensystem verbunden ist (Mehrfachverbindungen beachten) und wo gegebenenfalls vadoso Zuflüsse auftreten (können).
- Das Bohrloch darf nicht durch Zuflüsse aus der vadosen Zone (v.a. Epikarst) gefüllt werden („Badwanneneffekt“).

Dies ist leider bei weitem nicht in allen Sondierbohrungen der Fall. (Bestehende) Piezometerdaten sind daher häufig nicht repräsentativ für die hydraulischen Verhältnisse im Karströhrennetz. Die hydraulischen Verhältnisse können innert sehr kurzer Distanz (m) um mehrere Dekameter variieren, weil viele Bohrlöcher nur eingeschränkt mit dem Karströhrennetz kommunizieren (vgl. Jeannin, 1996). Mit einer gezielten Positionierung der Sondierbohrungen (u.a. in Funktion der Initialfugen) kann die Wahrscheinlichkeit bedeutend erhöht werden, dass das Bohrloch mit dem Karströhrensystem verbunden ist (ein Erfolg kann jedoch *nicht* garantiert werden). Dies gilt es dann mit geeigneten hydraulischen Tests zu überprüfen. Weiter sollte(n) die Verbindungshöhe(n) bestimmen werden. Dies kann mit folgendem Vorgehen erreicht werden:

- 1) Aufgrund der bisherigen Kenntnisse der Hydrogeologie (hydrogeologische Zonen und erwartete Fliesswege), der speläogenetischen Zonen und der Initialfugen (respektive der Karströhrendichte) wird ein geeigneter Ort für die hydrogeologischen Sondierbohrungen gesucht. Damit wird die Wahrscheinlichkeit einer Verbindung mit dem Karströhrensystem maximiert.
- 2) Die Sondierbohrung wird – unabhängig von der Lage des Untertagebauwerks – bis in die phreatische Zone abgetäuft (unter das Niveau der Hauptquelle).

Sind schon geeignete Sondierbohrungen vorhanden, können diese benutzt werden.

- 3) Die Bohrung wird mindestens im Bereich des Epikarstes (meist oberste 10-15 m) verrohrt, um das Risiko eines vadosen Zuflusses zu minimieren.
- 4) Die Konnektivität mit dem Karströhrensystem wird geprüft. Können pro 10 m Bohrungslänge 30 m<sup>3</sup> Wasser mit einem Durchfluss von 10 l/s injiziert werden, kann davon ausgegangen werden, dass eine Verbindung zum Karströhrensystem besteht. Bei grösseren Systemen kann bei Bedarf die Verbindung mit einem Tracerversuch nachgewiesen werden, bei kleinen Systemen auch mit einem angemessen dimensionierten Injektionsversuch. Dies ist jedoch meist nicht nötig.
- 5) Die Höhe der Verbindung(en) zwischen Sondierbohrung und Karströhrensystem wird bestimmt (sowohl im gesättigten wie auch im luffterfüllten Bereich der Sondierbohrung). Dazu können die üblichen Standardmethoden zur Bestimmung der Permeabilität angewandt werden: Flowmeter, Temperaturlogging, Lugeon-, Slug-, Puls-Test etc. Häufig reicht auch die Analyse von Absenkkurven aus (Infiltrationsversuch), da auf der maximalen Höhe der Verbindung zwischen Sondierbohrung und Karströhrennetz die Absenkgeschwindigkeit meist markant abnimmt (Achtung: die maximale Verbindungshöhe muss nicht mit der Höhenlage der direkten Verbindung zwischen Karströhre und

Sondierbohrung übereinstimmen, da die entsprechende Karströhre ansteigen kann, bevor sie mit dem tieferliegenden Karströhrennetz verbunden ist).

Die langfristigen Piezometermessungen erfolgt kontinuierlich mit einer Drucksonde, welche zwischen zwei Packern um die tiefstgelegene signifikante Verbindung mit dem Karströhrensystem installiert wird. Dadurch können Hochwasserereignisse angemessen beschrieben werden. Durch die Verwendung von Packern kann die Störung der Messungen durch ein „Badewanneneffekt“ weitgehend vermieden werden.

Sind die oben erwähnten Bedingungen erfüllt, kann nun das Schwankungsverhalten des Karstwasserspiegels während der entsprechenden Messdauer direkt bestimmt werden. Kombiniert mit langjährigen Abfluss- und Hochwasserchroniken (bei den Quellen und/ oder im Abstrombereich der Quellen) ermöglichen die Piezometermessungen eine Einschätzung des Verhaltens des Karstsystems und damit des Karstwasserspiegels bei Extremereignissen. Es gilt jedoch zu beachten, dass Karstsysteme aufgrund der Heterogenität und der Geometrie der Karströhren meist nicht linear reagieren, d.h. dass die Beziehungen zwischen Infiltration, Druckaufbau und Quellschüttung häufig einer komplexen Gesetzmässigkeit mit Schwellenwerten folgen (vgl. Abb. 6.9 und 3.3).

Die vorgeschlagenen hydraulischen Tests können überdies einen wertvollen Beitrag zur lokalen Charakterisierung des Karstaquifers leisten, wodurch z.B. als problematisch eingestufte Zonen bestätigt werden können. Weiter können die Sondierbohrungen selbstverständlich für andere Zwecke wie die Erkundung der Lithologie, der geologischen Strukturen, das Erkennen von Initialfugen, etc. Bei Bedarf, können parallele Messungen in verschiedenen hydraulisch abgetrennten Segmenten der Sondierbohrung durchgeführt werden, um das hydrogeologische System besser zu beschreiben (Druck, chemische Analysen, Isotopen → Homogenität des Aquifers...).

Bei der Interpretation von (bestehenden) Piezometerdaten ohne die oben erwähnten Abklärungen ist grösste Vorsicht geboten, da viele Bohrlöcher nur sehr eingeschränkt mit dem Karströhrennetz kommunizieren und daher häufig nicht repräsentativ für die hydraulischen Verhältnisse im Karströhrennetz sind.

#### 6.4.6 H6 – Abschätzung möglicher Schüttungen

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* mittel

*Ziel:* Abschätzung der zu erwartenden Schüttungen (unter verschiedenen hydrologischen Bedingungen) während der Ausführungs- und der Bewirtschaftungsphase

*Verwendete Daten:*

*Erforderlich:* Kenntnis Einzugsgebiete (H1-H4) und Schwankungsbereich Karstwasserspiegel (H5), Niederschlags-/Schneesmelzzenarien

*Erwünscht:* Piezometerdaten/Drucksonden aus Höhlen, Bohrlöchern und/oder Quellen, Hydrogramme, meteorologische Daten, Resultate hydraulischer Bohrlochtests, Geometrie und hydraulische Charakterisierung des Karstsystems

*Methoden:* Da es auch bei einer sorgfältigen Anwendung der KarstALEA-Methode im Voraus nicht möglich ist auszuschliessen, dass während des Vortriebs eine Karströhre angeschnitten wird, müssen bei einer Abschätzung möglicher Schüttungen folgende Szenarien unterschieden werden:

- 1) eine (bedeutende) Karströhre wird angeschnitten

- 2) es werden nur kleinste Karströhren oder Klüfte angeschnitten, die jedoch mit bedeutenderen Karströhren verbunden sind
- 3) es werden keine signifikanten Karströhren angeschnitten

Beim dritten Szenario ist die zu erwartende Schüttung gering (6.3). Beim ersten Szenario ist je nach Geometrie des Karströhrennetzes und des hydrogeologischen Kontextes mit Schüttungen bis zu mehreren oder gar Dutzenden m<sup>3</sup>/s zu rechnen (siehe unten). Beim zweiten Szenario ist die Schüttung pro Karströhre oder Kluft sehr viel kleiner als beim ersten Szenario, die Gesamtschüttung aus einer Vielzahl von wasserführenden Klüften kann jedoch ohne weiteres mehrere 100 l/s betragen. Die Abschätzung möglicher Schüttungen erfolgt in diesem Fall grundsätzlich analog zum ersten Szenario, wobei die Werte in Abhängigkeit der Grösse der Verbindungsöffnung angepasst werden.

Wird eine Karströhre angeschnitten, muss zusätzlich zwischen Karströhren unter vadosen und unter phreatischen Bedingungen unterschieden werden. Die Schüttung unter vadosen Bedingungen variiert meist beträchtlich und ist stark niederschlagsabhängig. Da das Wasser frei fliesst, hat das Anschneiden einer Karströhre keinen Einfluss auf die (zufließende) Schüttung. Daher ist nicht mit einem erhöhten Erstwasseranfall zu rechnen. Der Erstwasseranfall entspricht der Schüttung, die auch später unter den gegebenen (Wetter-) Bedingungen zu erwarten ist. Die Schüttung unter vadosen Bedingungen kann abgeschätzt werden, indem die Niederschläge pro Zeiteinheit (und ggf. der geschmolzene Schnee) mit der Fläche des möglichen Einzugsgebietes der entsprechenden Karströhre multipliziert wird. Bei einem oberflächennahen Schacht mit einem Einzugsgebiet in der Grössenordnung von 1-2 ha ist bei einem Gewitter mit 10-20 mm Niederschlag innert einer Stunde mit einer Schüttung von ca. 50 - 100 l/s zu rechnen. Die bedeutendsten Schächte der vadosen Zone können aber – während kurzer Zeit – auch mehrere Hundert bis wenige Tausend l/s Wasser führen.

Unter (epi)phreatischen Bedingungen sind für den Untertagbau grundsätzlich zwei verschiedene Schüttungsmengen von Interessen:

- 1) Die maximale Schüttung unmittelbar nachdem die Karströhre angeschnitten wurde.
- 2) Die Schüttung einer angeschnittenen Karströhre, nachdem sie ein dynamisches Gleichgewicht mit dem Tunnel erreicht hat

Im ersten Fall, sind die Geometrie des Karströhrensystems (Durchmesser der Karströhren, Struktur, Verbindungen, etc.) sowie die hydraulischen Eigenschaften (Gradient, Drücke, etc.) entscheidend. Ohne Kenntnis der entsprechenden geometrischen und hydraulischen Parameter, welche vor dem Bau eines Untertagbauwerks kaum je bekannt sind, kann der Schüttungsverlauf einer angeschnittenen Karströhre nicht berechnet werden.

Ein Reservoirmodell ermöglicht die Berechnung der maximal möglichen Schüttung kurz nach Anschneiden der Karströhre in Abhängigkeit der Druckhöhe (Differenz Höhe des Karstwasserspiegels und Höhe des Tunnels  $h_n - h_t$ ) und der Fläche der Verbindungsöffnung ( $S_e$ ) zwischen Karströhre und Tunnel:

$$Q = S_e \sqrt{2g(h_n - h_t)}$$

Dies ergibt jedoch sehr hohe Schüttungsmengen, die in der Praxis kaum je erreicht werden.

Vorauserkundungsbohrungen verbunden mit hydraulischen Bohrlochtests können wertvolle Informationen liefern, um die Druckverhältnisse und mögliche Schüttungen abzuschätzen, sofern die entsprechende Karströhre auch angeschnitten wird (Kapitel 7).

Die Vorauserkundungsbohrungen können auch gezielt nur in besonders heiklen Zonen

Tab. 6.3: Abschätzung der zu erwartenden Schüttungen in Abhängigkeit der hydrogeologischen Bedingungen und der Verbindung zum Karströhrensystem.

Diese Tabelle zeigt eine Grössenordnung der zu erwartenden Schüttungen beim Durchörtern eines verkarsteten Gebirges. In Ausnahmefällen können jedoch auch bedeutend grössere Mengen anfallen (siehe Formel oben).

		<b>vadose Bedingungen</b>	<b>phreatische Bedingungen</b>	
			<i>Erstwasseranfall</i>	<i>langfristig</i>
<b>Verbindung zum Karströhrensystem</b>	bedeutende Karströhre	stark variierend, bis mehrere 100 l/s, Ausnahmsweise > 1000 l/s	sehr gross, mehrere 1000 l/s üblich, mehrere 10000 l/s möglich	gross und stark variierend, mehrere 1000 l/s möglich, aber eher selten
	mit bedeutender Karströhre verbundene Kluff/Karströhre	z.T. stark variierend, meist gering	mässig, abhängig von der Grösse der Verbindungsöffnung	mässig, abhängig von der Grösse der Verbindungsöffnung; Anstieg in Folge Auswaschen von Sedimenten möglich
	keine signifikante Verbindung	sehr gering	gering	gering
<b>Methode</b>		Hydrogeologie / Bilanzrechnungen (Einzugsgebiet * Niederschlag/Zeit)	kann nicht genau bestimmt werden (Hydraulik)	Hydrogeologie / Bilanzrechnungen / Hydraulik (Modellierung)

ausgeführt werden.

Nach einer gewissen Zeit – meist Tage bis Wochen – erreicht das System ein dynamisches Gleichgewicht mit dem Tunnel (zweiter Fall). Die Schüttung wird dann einerseits von den Zuflüssen in das System und andererseits von der Karsthydraulik bestimmt. Die maximal zu erwartende Schüttung entspricht der Summe der natürlichen Schüttung aller Quellen des Karstsystems (diese kann ggf. mit Hilfe von Bilanzrechnungen bestimmt werden -> vgl. Schüttung in der vadosen Zone & Methoden H1-H4). Eine solche (mittlere) Schüttung wird jedoch nur erreicht, wenn das Anschneiden des Karströhrensystems zum vollständigen Versiegen aller natürlichen Quellen führt, was eher selten der Fall ist. Entwässert der Tunnel das Karstsystem nur partiell (d.h. ein Teil der natürlichen Quellen bleibt – meist mit verminderter Schüttung – mindestens zeitweise aktiv), können die Schüttung und die Druckverhältnisse nur mit Hilfe eines hydraulischen Modells abgeschätzt werden. Dabei müssen die wichtigsten Parameter bekannt sein (Schüttung und Lage der Quellen, Durchmesser der Karströhren, etc.), was in der Regel erst nach dem Anschneiden der Karströhre der Fall ist. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Röhrenmodellen, wobei die üblichen hydraulischen Gesetze betreffend Druckverlust etc. grundsätzlich anwendbar sind (z.B. Weber et al, 2011).

## 6.5 Ausscheidung und Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche

Die speläogenetischen Bereiche werden verwendet (Abb. 6.12), um einerseits zusammen mit den Initialfugen (Kapitel 6.6) die Karströhrendichte abzuschätzen und andererseits um, kombiniert mit der hydrogeologischen Gebirgscharakterisierung (Kapitel 6.4), die karstbedingten Gefahren zu beschreiben und zu lokalisieren (KarstALEA-Zonen).

Aus speläogenetischer Sicht kann ein Karstgebirge in fünf Bereiche unterteilt werden: Epikarstbereich, Epikarstschachtbereich, Schachtbereich, Horizontalhöhlenbereich und Initialbereich (Kapitel 3.2.4?). Des Weiteren wird zwischen aktuellen und paläo-speläogenetischen Bereichen unterschieden (Kapitel 6.5.1 und 6.5.2). Die speläogenetischen Bereiche zeichnen sich nicht nur durch spezifische speläogenetische Prozesse aus, sondern ebenfalls durch spezifische Hohlraumcharakteristika (Anhang V und VI) und eine spezifische Karströhrendichten (Tabelle 3.1).

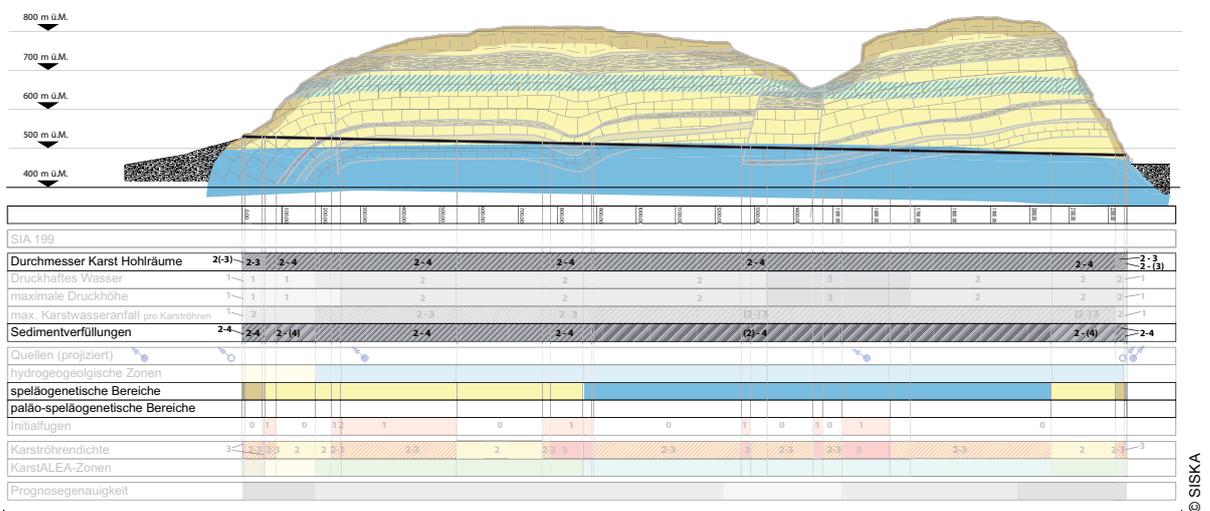


Abb 6.12: Profil der aktuellen und paläo-speläogenetischen Bereiche sowie Tunnelband mit ergänzende Angaben zur SIA 199 (für Details siehe Anhang III)

Die Ausscheidung und Charakterisierung der (paläo)speläogenetischen Bereiche kann mit verschiedenen Methoden erfolgen (Tab. 6.4)

Tab. 6.4: Übersicht über die vorgeschlagenen Untersuchungsmethode der KarstALEA-Methode zur Bestimmung und Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche

Unter- suchungs- schritte	Ziel & Methode	Daten		Erkenntnis- gewinn (Karst)
		erforderlich	erwünscht	
Speläogenetische Bereiche	S1 <b>Ausscheidung der aktuellen speläogenetischen Bereiche</b> aufgrund von 3D-Analysen der speläologischen, hydrogeologischen und geomorphologischen Daten	Daten des hydrogeologischen Modells (H1)	Höhrendaten, Aufschlüsse, geomorphologische Daten, digitales Höhenmodell, Piezometer-/Drucksondendaten, ...	XXX
	S2 Rekonstruktion der <b>paläo-HHB (=horizontale Höhlenbereiche einer früheren Verkarstungsphase) aus Literaturangaben</b>	Literaturdaten zur Landschaftsentwicklung (v.a. Terrassen) und Höhlenniveaus		XX
	S3 Ausscheidung der <b>paläo-HHB aus Höhlendaten</b> (Höhlenniveaus)	Höhrendaten (Eingangsdaten und/oder Höhlenvermessung); DGM		XXX
	S4 Ausscheidung der <b>paläo-HHB aus geomorphologischen Daten</b> (Kartierung von Talterrassen, Rekonstruktion Landschaftsentwicklung)	digitales Höhenmodell und/oder geomorphologische Literatur	Literatur	XXX
	S5 Rekonstruktion der <b>tieferliegenden paläo-HHB aufgrund geophysikalischer Untersuchungen</b> (übertiefte Täler)	geophysikalische Daten		XX
	S6 <b>Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche</b> (Feldbeobachtungen, Literatur, Analogien)	Höhlenvermessungsdaten und/oder speläomorphologische Daten	Aufschlüsse, geomorphologische Daten	XXX
	S7 Bestimmung der zu erwartenden <b>Gangdimensionen</b> (Statistik)	Höhlenvermessungsdaten		XX
	S8 Bestimmung der <b>Karströhrendichte</b> der speläogenetischen Bereiche (Statistik)	Referenzdaten (dieses Dokument)	Höhlenvermessungsdaten	X-XXX

### 6.5.1 S1 – Ausscheidung der aktuellen speläogenetischen Bereiche

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* sehr hoch

*Ziel:* Unterteilung des Gebirges in die speläogenetischen Bereiche mit unterschiedlichen Karströhrendichten.

*Verwendete Daten:*

*Erforderlich:* Hydrogeologisches 3D-Modell (H1)

*Erwünscht:* Höhlenvermessungsdaten, speläomorphologische Daten, Aufschlüsse, geomorphologische Daten

*Methode:* Die Ausscheidung der speläogenetischen Bereiche erfolgt wenn möglich anhand einer optischen oder statistischen 3D-Analyse aller bekannter Karströhren (Anhang IX). Dabei werden die Karströhrendichte und die geometrische Anordnung der Karströhren betrachtet, um die speläogenetischen Bereich aufgrund der im Kapitel 3.2.3 und Anhang V beschriebenen Eigenschaften auszuscheiden (Abb. 6.13):

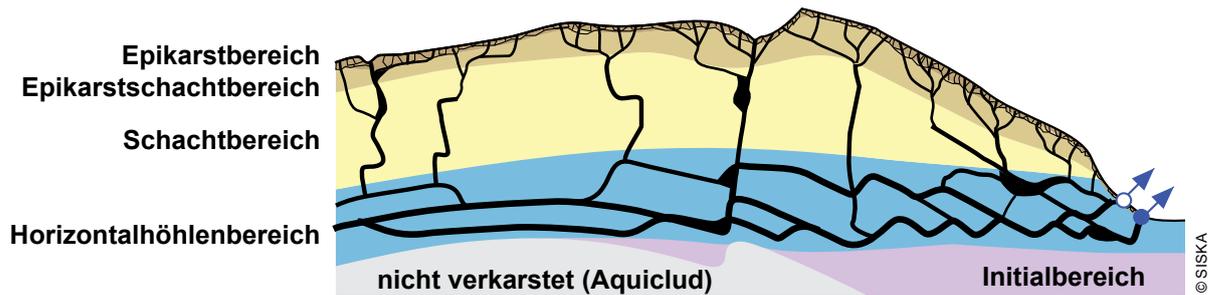


Abb. 6.13: S1 – Die aktuellen speläogenetischen Bereiche

Die Einteilung eines verkarsteten Gebirges in speläogenetische Bereiche dient als Basis für die Beurteilung der Gefahren im Karst und der Karströhrendichte.

- Der Epikarstbereich ist der oberflächennahe Bereich des verkarsteten Gebirges und zeichnet sich durch eine wesentlich erhöhte Permeabilität aus. Die Karströhren sind mehrheitlich von kleinem Durchmesser. Die durchschnittliche Mächtigkeit des Epikarstbereiches beträgt 10 m.
- Der Epikarstschachtbereich verbindet die unzähligen kleinen Röhren des Epikarstes mit den grösseren aber selteneren des Schachtbereichs. Er kann aufgrund eines oberflächennahen Maximums der Karströhrendichte und der darauf folgenden kontinuierlichen Abnahme der Karströhrendichte ausgeschieden werden. Sind keine Daten vorhanden, kann eine Mächtigkeit von 30 - 50 m für den Epikarstschachtbereich angenommen werden.
- Der Schachtbereich leitet das Wasser der Epikarstschächte durch grossräumige tiefe Schächte und Mäander Richtung Grundwasserspiegel. Die Karströhrendichte ist mehr oder weniger konstant, abgesehen von paläo-Horizontalhöhlenbereichen (Kapitel 6.5.2). Die Mächtigkeit des Schachtbereichs, kann mehrere hundert Meter betragen. Der Schachtbereich kann durch die Basis des Epikarstschachtbereiches und den Hochwasserspiegel abgegrenzt werden.
- Der Horizontalhöhlenbereich befindet sich etwa auf der Höhe der Karstquellen des Systems und zeichnet sich durch ein lokales Maximum der Karströhrendichte auf einer Höhenlage aus. Der Teil des Aquifers der rund 20 bis 30 m unterhalb der Quellen liegt kann als Teil des Horizontalhöhlenbereichs angenommen werden. Bei Hochwasser kann oft ein hydraulischer Gradient von 1 bis 5 % (in Ausnahmefällen von >10%) von den Quellen in Richtung Einzugsgebiet beobachtet werden. Der Hochwasserspiegel kann als obere Begrenzung des Horizontalhöhlenbereichs angenommen werden. Sind keine spezifischen Daten vorhanden kann ein Gradient von 3% angenommen und auf seine Plausibilität überprüft werden.
- Der Initialbereich liegt im Liegenden des aktuellen Horizontalhöhlenbereichs und erstreckt sich bis zur Basis des Karstaquifers. In diesem Bereich kommen keine Höhlen vor. Eine Ausnahme bilden übertiefte Täler. In diesem Fall erstreckt sich der Initialbereich unterhalb den tiefstgelegenen paläo-Horizontalhöhlenbereich (Kapitel 6.5.2).

Eine allfällige statistische 3D-Analyse erfolgt analog zur Bestimmung der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten (I6, siehe Kapitel 6.6.6), wobei die Verteilung der Höhlengangsegmente nicht bezüglich ihres Abstandes zu Referenzflächen sondern ihre absolute Höhenlage respektive ihres Abstandes zur Geländeoberfläche betrachtet wird.

Aufgrund von Beobachtungen in Höhlen bezüglich Gangmorphologie und Sedimenten – seien es direkte Beobachtungen im Feld oder die Analyse von Höhlenbeschreibungen und Höhlenplänen – können die Erkenntnisse der 3D-Analyse ergänzt und verfeinert werden.

Da sich die Mächtigkeit der speläogenetischen Bereiche in vergleichbaren Karstsystemen in der selben Grössenordnung bewegt, kann bei ungenügender Datenlagen in den meisten Fällen eine typische Verteilung der speläogenetischen Bereiche angenommen werden (siehe Werte oben und in Anhang V).

## 6.5.2 Ausscheidung der paläo-speläogenetischen Bereiche

Für die Betrachtungen im Rahmen der KarstALEA-Methode sind nicht nur die aktuellen speläogenetischen Bereiche sondern ebenfalls die paläo-speläogenetischen Bereiche von Bedeutung. Diese sind an die Landschaftsentwicklung im Projektgebiet gekoppelt.

In vielen Karstgebieten können Höhlenniveaus ausgeschieden werden, die über dem heutigen Karstwasserspiegel liegen, aber charakteristische Gangformen eines Horizontalhöhlenbereichs aufweisen. Dabei handelt es sich um den Horizontalhöhlenbereich einer früheren Verkarstungsphase, als das Vorfluterniveau sich auf dieser Höhe befand. Zum Teil sind auch an der Oberfläche noch Spuren dieser Paläovorfluterniveaus wie z.B. Terrassen zu finden. Die Kombination verschiedener Methoden ermöglichen belastbarere Resultate (Tab. 6.5 & Abb. 6.14).

Tab. 6.5: Kohärenztabelle für die Bestimmung von paläo-Horizontalhöhlenbereichen

Methode / Daten	Vorfluterniveau -1 (600 m)	Vorfluterniveau 1 (850 m)	Vorfluterniveau 2 (980 m)
<b>S2 - Literatur-recherchen</b>	Muster1 et al. (2001): Vorfluter 16 ky BP	Muster2 et al. (1985): Rekonstruktion Landschaftsgeschichte, Terrassen	Muster3 et al. (1996): bestimmt aufgrund von Höhlendaten
<b>S3 - Höhlendaten</b>	-	Einzelne phreatisch entstandene Höhlengänge (Beispielloch)	Réseau exemple, Höhlenniveau im Bereich Hauptgang
<b>S4 - Terrassen</b>	-	Talterrassen 850 m ü.M.	-
<b>S5 - Geophysik</b>	Bestätigt mit Seismik	-	-

Durch die Kombination der verschiedenen Methoden können die bestimmten paläo-Horizontalhöhlenbereich respektive die bestimmten Vorfluterniveaus validiert werden.

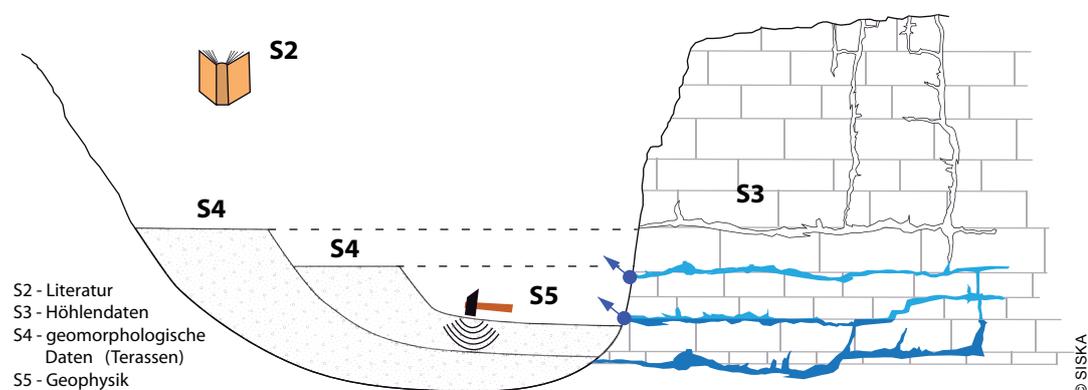


Abb. 6.14: Methoden zur Ausscheidung von paläo-speläogenetischen Bereiche

Die paläo-Horizontalhöhlenbereiche entsprechen früheren Vorfluterniveaus und können daher aufgrund von Terrassen und anderen Indikatoren für paläo-Vorfluterniveaus bestimmt werden.



Abb. 6.15: Lithifizierte Sedimente einer Paläokarstverfüllung im Karrenfeld der Siebenhengste

*Diese alte Verkarstungsstrukturen werden im Rahmen der KarstALEA-Methoden nicht angesprochen.*

In einigen Fällen ist es nötig ebenfalls weitere paläo-spläogenetischen Bereiche auszuscheiden. Zum Beispiel in Karstgebieten, deren Landschaftsentwicklung durch ein Anhebung des Vorfluterniveaus gekennzeichnet ist (z.B. Aufschotterung übertiefer Täler, Rückstau durch Gletschereis, Messinische Krise), können neben den Horizontalhöhlenbereichen ebenfalls die entsprechenden paläo-Schachtbereiche ausgeschieden werden (als Gebirgsbereich oberhalb des entsprechenden paläo-Horizontalhöhlenbereichs). Die unter dem heutigen Talboden liegenden Vorfluterniveaus können mittels geophysikalischer Methoden erkannt werden (Kapitel 6.5.2.4).

In einigen Gebieten wurde eine alte, z.B. tertiäre, Verkarstung durch eine Transgression und die Ablagerung von neuen Sedimenten beendet (Paläokarst im engeren Sinn). Diese alte Verkarstung ist in der Regel schwer zu erfassen, da sie zum Teil durch spätere Verkarstungsphasen reaktiviert wurden (z.B. Osborne, 2002). Gelegentlich sind in Aufschlüssen lithifizierte Karstverfüllungen zu erkennen (Abb. 6.15). Eine besondere Bedeutung kommt dem zum Teil mit Sedimenten verfülltem paläo-Epikarstbereich zu, der im Jura auch als Bohnerzschicht geologisch angesprochen wird. Da dieser in der Regel schlechte geotechnische Eigenschaften aufweist, wird dieser explizit ausgeschieden.

#### **6.5.2.1 S2- Ausscheidung von paläo-Horizontalhöhlenbereich aus Literaturdaten**

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn: mittel*

*Ziel:* Rekonstruktion der paläo-Horizontalhöhlenbereiche aus Literaturdaten

*Verwendete Daten:* Literaturdaten zur Landschaftsentwicklung (v.a. Terrassen) und Höhlenniveaus

*Methode:* In der geologischen, geomorphologischen und spläologischen Regionalliteratur finden sich häufig wertvolle Hinweise auf mögliche paläo-Horizontalhöhlenbereiche oder Vorfluterniveaus.

### 6.5.2.2 S3- Ausscheidung von paläo-Horizontalhöhlenbereichen aus Höhlendaten

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* hoch

*Ziel:* Rekonstruktion der paläo-Horizontalhöhlenbereiche aus Höhlenvermessungsdaten

*Verwendete Daten:* Höhlenvermessungsdaten oder Höhleneingangskordinaten

*Methode:* Höhlenvermessungsdaten werden verwendet um paläo-Horizontalhöhlenbereiche (Höhlenniveaus) und damit ehemalige Vorfluterniveaus auszuscheiden.

Zur Ausscheidung von Höhlenniveaus werden idealerweise Vermessungsdaten von längeren Höhlensystemen verwendet. Gegebenenfalls kann die Analyse auch mit mehreren kleineren Höhlen oder gar nur mit den Eingangskordinaten von paläo-Quellhöhlen (Höhleneingänge mit offensichtlich phreatisch entstandener Gangfortsetzungen) durchgeführt werden. Sind nur wenige Höhlen phreatischen Ursprungs bekannt, können diese zur Validierung der anderen Methoden verwendet werden.

Die Höhlenvermessungsdaten können visuell oder statistisch ausgewertet werden. Dabei ist zu beachten, dass diese Methoden nur in jenen Gebirgsbereichen Horizontalhöhlenbereiche ausscheidet, in denen auch Höhlen bekannt sind. Sie können keine Aussage über die restlichen Gebirgsbereiche machen.

Zur visuellen Auswertung werden die Höhlenvermessungsdaten in einem 3D-Modell dargestellt (ggf. werden Höhlengänge nicht dargestellt, die offensichtlich vadosen Ursprungs sind). Das Modell wird hinsichtlich Höhenlagen mit einer Ansammlung von Höhlengängen ausgewertet (Abb. 6.16 links). Karstaquifere weisen häufig mehrere paläo-Horizontalhöhlenbereiche auf, wobei die Bereiche in der Regel eine Mächtigkeit von einigen Dekametern aufweisen.

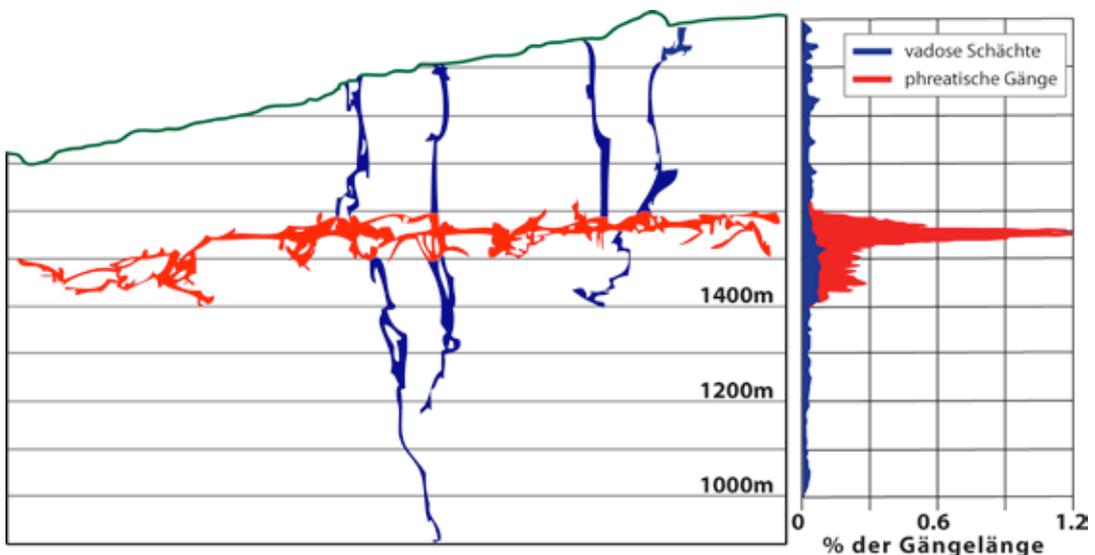


Abb. 6.16: S3 – Optische und statistische Bestimmung von paläo-Horizontalhöhlenbereichen aus Höhlenvermessungsdaten

Das Navigieren im 3D-Modell der Höhlenvermessungsdaten erlaubt es, Ansammlungen von Höhlengängen auf gewissen Höhlenlagen und damit paläo-Horizontalhöhlenbereiche zu erkennen (links). Diese können auch mit einer statistischen Analyse der Höhenlage der Gangsegmente nachgewiesen werden (rechts).

Die statistische Auswertung beruht auf folgenden Schritten:

1. *Bereinigen der Höhlenvermessungsdaten*: Höhlengänge, die offensichtlich vadosen Ursprungs sind, werden von der Analyse ausgeschlossen
2. *Diskretisierung des Höhlenmodells in Gangabschnitte von 1 m*
3. *Auswertung der Höhenlagen der Gangabschnitte und Ausscheidung der paläo-Horizontalhöhlenbereiche*: In einem Histogramm der Höhenlage der Gangabschnitte (m ü.M.) sind die paläo-Horizontalhöhlenbereiche als lokale Maxima zu erkennen (Ansammlung von *Gangabschnitten* auf einer gewissen Höhenlagen, Abb. 6.16 rechts). Diese Maxima haben in der Regel eine Mächtigkeit von einigen Dekametern. Karstaquifer weisen häufig mehrere paläo-Horizontalhöhlenbereiche auf.

Sind nur ganz wenige Höhlendaten vorhanden können Beobachtungen der Gangmorphologien – im Speziellen Übergänge von „vadosen“ zu „phreatischen“ Gängen gewisse Hinweise liefern, wo sich ein paläo-Horizontalhöhlenbereich befindet.

### 6.5.2.3 S4 - Ausscheidung von paläo-Vorfluterniveaus aus geomorphologischen Daten Karstspezifischer Erkenntnisgewinn: hoch

*Ziel*: Rekonstruktion der Paläovorfluterniveaus mit Hilfe von Talterrassen

*Verwendete Daten*: digitales Höhenmodell und/oder Felddaten

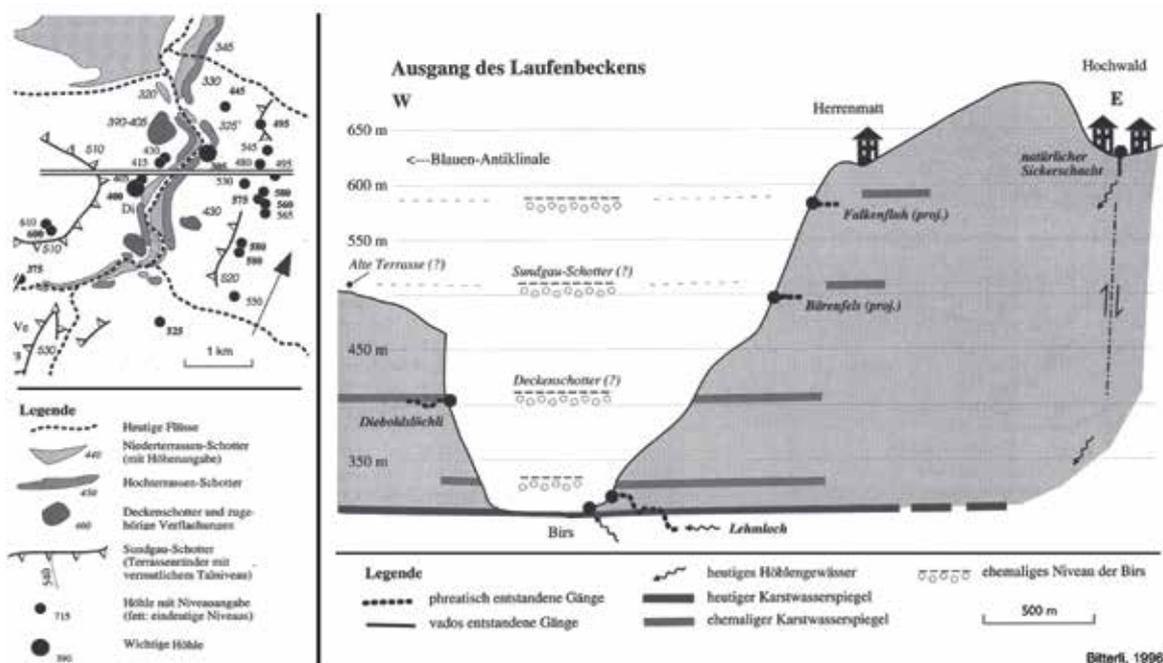


Abb. 6.17: S4 – Bestimmung von paläo-Vorfluterniveaus aus geomorphologischen Daten

Die Kartierung von Talterrassen oder gegebenenfalls die Auswertung eines digitalen Höhenmodells ermöglicht die Bestimmung von paläo-Vorfluterniveaus. Damit kann die Lage der paläo-Horizontalhöhlenbereiche bestimmt werden. Diese können gegebenenfalls mit der Lage von phreatisch entstandenen Höhlen(ein)gängen (paläo-Horizontalhöhlenbereich) überprüft werden, wie das Beispiel aus dem Laufental zeigt (Bitterli, 1996).

Da die Lage von paläo-Horizontalhöhlenbereichen von den entsprechenden Vorfluterniveaus abhängen, lassen sie sich mit Talterrassensystemen korrelieren (z.B. Palmer, 1987). Diese lassen sich im Feld durch eine geomorphologische (Talterrassen) oder quartärgeologische Kartierung (Terrassenschotter) bestimmen oder durch die Analyse von digitalen Höhenmodellen ausscheiden. Die paläo-Horizontalhöhlenbereiche werden aufgrund der Höhenlagen der Talterrassen ausgeschieden (Abb. 6.17).

#### 6.5.2.4 S5 - Ausscheidung von paläo-Vorfluterniveaus aufgrund geophysikalischer Untersuchungen

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* gering bis hoch

*Ziel:* Rekonstruktion der paläo-Vorfluterniveaus aufgrund geophysikalischer Untersuchungen

*Verwendete Daten:* geophysikalische Daten

*Methode:* Das aktuelle Vorfluterniveau mancher Karstaquifere liegt höher als gewisse Paläostadien (z.B. Aufschotterung übertiefer Täler, Rückstau durch Gletschereis, Messinische Krise). Die Ausscheidung allfälliger tieferliegender paläo-Horizontalhöhlenbereiche und paläo-Schachtbereiche kann für tiefliegende Untertagbauten von entscheidender Bedeutung sein.

Mit Hilfe geophysikalischer Untersuchungen (vorwiegend Seismik zum Teil auch Geoelektrik) lassen sich die Talübertiefungen und insbesondere die Höhenlage glazialer Riegel (Schwellen) erkunden. Damit wird das tiefstmögliche Vorfluterniveau bestimmt, gegebenenfalls können ebenfalls verschüttete Talterrassensysteme erkannt werden.

#### 6.5.3 S6 - Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* sehr hoch

*Ziel:* Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche betreffend zu erwartender Hohlraumgrößen und -formen, Sedimentfüllungen, Wasseranfall

*Verwendete Daten:* Höhlenvermessungsdaten, speläomorphologische Daten, Höhlenbeschreibungen, Aufschlüsse, geomorphologische Daten

*Methode:* Zur Beschreibung der Charakteristika der Karsthohlräume in den verschiedenen speläogenetischen Bereichen werden soweit möglich Analogbeispiele von Höhlen im Einzugsgebiet verwendet. Dabei ist für jeden speläogenetischen Bereich auf folgende Aspekte einzeln einzugehen:

- Ganggrößen, präferenzielle Gangrichtung und typische Gangformen
- Schüttungsverhalten in den Karströhren, Hochwasserverhalten (Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels), bekannte hangende Siphons
- Menge, Art, Verteilung und Eigenschaften von Höhlensedimenten
- Karströhrendichte

Sind keine entsprechenden Höhlendaten vorhanden, können die speläogenetischen Bereiche aufgrund von Erfahrungswerten charakterisiert werden, welche in den Anhängen V und VI zusammengefasst sind.

### 6.5.3.1 S7 - Quantitative Analyse der Gangdimensionen anhand von Höhlenvermessungsdaten

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn: hoch*

*Ziel: Verteilung der zu erwarteten Gangdimensionen*

*Verwendete Daten: Höhlenvermessungsdaten*

*Methode: Die Höhlenvermessungsdaten können verwendet werden um die Gangdimensionen in den speläogenetischen Bereichen quantitativ auszuwerten.*

Diese statistische Analyse beruht auf folgenden Schritten:

- 1) *Erstellen eines Höhlenmodells aus den Höhlenvermessungsdaten, welches alle bekannten Höhlen des Untersuchungsgebiets enthält*
- 2) *Zuteilung der einzelnen Höhlenabschnitte zu den speläogenetischen Bereichen*
- 3) *Die Gangdimensionen jedes Gangabschnitts werden aus den Vermessungsdaten berechnet*
- 4) *Auswertung der Gangdimensionen: Die Gangdimensionen (Punkt 3) der speläogenetischen Bereiche werden gewichtet nach der Länge der Gangabschnitte als Summenkurve dargestellt (Abb. 6.18)*

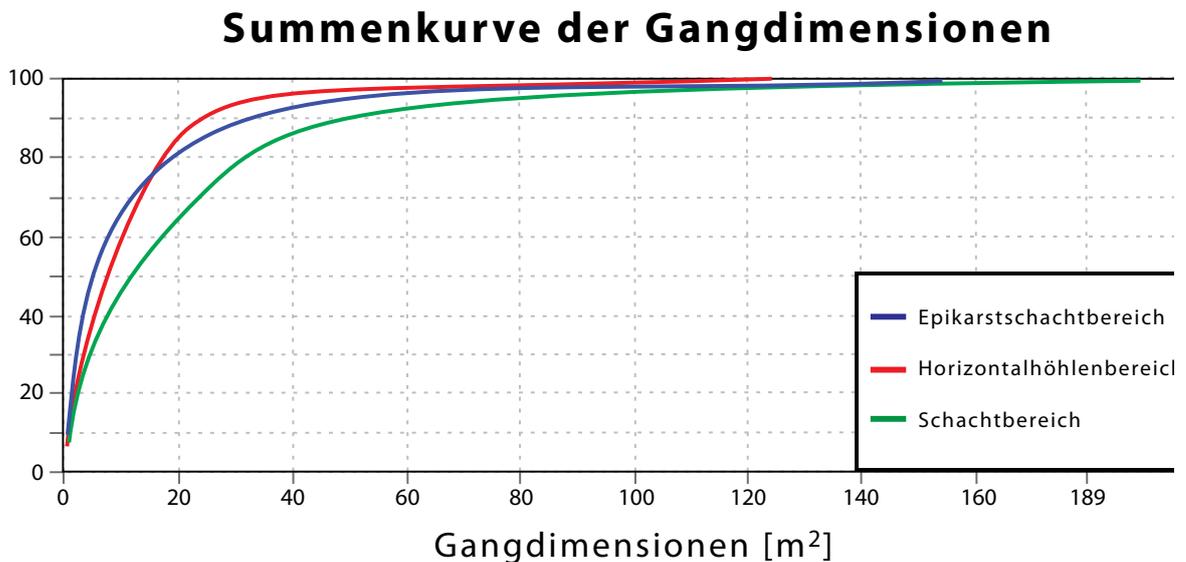


Abb. 6.18: S7 – Summenkurve der Gangdimensionen einer alpinen Höhle

*Die Summenkurve der Gangdimensionen der Höhlen eines Projektgebietes erlaubt eine quantitative Aussage über die Wahrscheinlichkeit einen Karsthohlraum mit einem gewissen Gangdurchschnitt anzufahren.*

## 6.5.4 S8 - Bestimmung der Karströhrendichten der speläogenetischen Bereiche

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* gering - hoch

*Ziel:* Bestimmung der Karströhrendichten der verschiedenen speläogenetischen Bereiche im durchörterten Massiv

*Verwendete Daten:* Höhlenvermessungsdaten

*Methode:* Die speläogenetischen Bereiche zeichnen sich nicht nur durch spezifische Hohlraumcharakteristika aus (Kapitel 6.5.2), sondern weisen ebenfalls unterschiedliche Karströhrendichten auf.

Die Karströhrendichte [ $\text{m}/\text{m}^3$ ] ist der Quotient aus der Gesamtlänge der Karströhren und dem Gebirgsvolumen in dem die Karströhren liegen. Die Länge der Karströhren in einem Gebirgsbereich wird aus den Höhlenvermessungsdaten berechnet. Das Gebirgsvolumen kann als das kleinste Gebirgsvolumen, das die Karströhren in ihrer Anordnung umschliessen vermag, bestimmt werden. Nach Klimchouk (2005) führt dieser einfache Ansatz zu einer zwei- bis fünffachen Unterschätzung der Karströhrendichte. Die Berücksichtigung des Volumens des ganzen Aquifers (aufgeteilt in die speläogenetischen Bereiche) führt grundsätzlich zu einer realistischeren Einschätzung – jedoch nur wenn das ganze Gebirge speläologisch gut erforscht ist.

Die Hauptschwierigkeit bei der Bestimmung der Karströhrendichte stellt meist die beschränkten Kenntnisse über die Erstreckung des Karströhrennetzes in einem Gebirgsvolumen dar. In der Regel sind nur die von Höhlenforschern erreich- und begehbaren und auch vermessenen Hohlräume bekannt. Deshalb soll die Karströhrendichte nur in gut erkundeten und repräsentativen Teilbereichen der speläogenetischen Bereiche bestimmt werden.

Sind keine geeigneten Höhlenvermessungsdaten verfügbar, kann die Karsthöhrendichte für die entsprechenden speläogenetischen Bereiche wie folgt angenähert werden (Abb. 6.19):

- Im **Epikarstschachtbereich** kann die Karströhrendichte anhand der Dolinendichte bestimmt werden (1 Doline  $\approx$  1 Schacht); Grössenordnung von  $0.001 \text{ m}/\text{m}^3$
- Im **Schachtbereich** entspricht sie rund 5-20% der Karströhrendichte des Epikarstschachtbereichs; Grössenordnung  $0.00005 \text{ m}/\text{m}^3 - 0.0002 \text{ m}/\text{m}^3$
- Im **Horizontalhöhlenbereich** entspricht sie rund 4 bis 10 mal der Karströhrendichte des Schachtbereichs; Grössenordnung  $0.0002 \text{ m}/\text{m}^3 - 0.002 \text{ m}/\text{m}^3$
- Im **Initialbereich** entspricht sie rund 1-2 ‰ der Karströhrendichte des Horizontalhöhlenbereichs ( $0.00004 - 0.000002 \text{ m}/\text{m}^3$ ).



Die Ausscheidung der Initialfugen kann im Rahmen von Untersuchungen erfolgen, die üblicherweise im Rahmen der SIA 199 durchgeführt werden (z.B. geologische Kartierung oder Auswertung von Bohrlochdaten). Dabei werden ergänzende karstspezifische Beobachtungen durchgeführt (z.B. Kartierung von verkarstungsanfälligen Lagen) und mit dem Konzept der Initialfugen interpretiert. Die ausgeschiedenen Initialfugen werden lagegetreu als eigene Darstellungsebene ins 3D-Modell integriert.

Die Ausscheidung der stratigrafischen Initialfugen erfolgt meist bezüglich eines Referenzhorizontes, der sowohl im Projektgebiet wie auch im Gebiet, in dem die Initialfugen ausgeschieden werden, einfach zu erkennen und dessen Lage gut bekannt sein muss (häufig Basis des Aquifers). Dies ermöglicht eine angemessene lagegetreue Darstellung der Initialfugen, z.T. auch in strukturalgeologisch komplexeren Gebieten.

Die Ausscheidung von regionalen Initialfugen erfolgt in der Regel in den Projektphasen der Vorstudie/Vorprojekt (SIA 197). Lokale Initialfugen werden erst während der Realisierung erfasst (Kapitel 7) und entsprechend erst im Betriebskonzept berücksichtigt.

Tab. 6.6: Übersicht der vorgeschlagenen Untersuchungsmethode der KarstALEA-Methode zur Bestimmung und Charakterisierung der Initialfugen

Unter- suchungs- schritte	Ziel & Methode	Daten		Erkenntnis- gewinn (Karst)
		erforderlich	erwünscht	
Modell der Initialfugen	11 Identifikation Initialfugen aus Literaturangaben	geologische und/oder speläologische Literatur	Geologische Berichte, Karten	X-XXX
	12 Identifikation Initialfugen (3D-Modell) aus Aufschlussdaten (Kartierung)	geologische Kartierung (inkl. Aufschlussbilder) und/oder digitales Höhenmodell und/oder Luftbilder	geologische Literatur	X
	13 Identifikation Initialfugen (3D-Modell) aus Bohrlochdaten	Bohrlochdaten (z.B. optische Analyse am Kern oder mit Bohrlochscanner, hydraulische Tests, Bohrlochgeophysik)		XX
	14 Identifikation Initialfugen (3D-Modell) aus karstmorphologischen Daten	geomorphologische Daten (Kartierung und/oder Luftbilder und/oder digitales Höhenmodell)	Höhleninventar, Geotopinventare, Felddaten	XX
	15 Identifikation Initialfugen (3D-Modell) aus speläomorphologischen Daten (Feld, Höhlenplananalyse)	speläomorphologische Daten aus dem Feld und/oder Literatur	Höhleninventare, Höhlendokumentation, Geotopinventare	XX
	16 Identifikation Initialfugen (3D-Modell) aus Höhlenvermessungsdaten (Statistik)	Höhlenvermessungsdaten	Höhleninventare, Höhlendokumentation	XXX
	17 Detektion von Karsthohlräumen mittels geophysikalischer Verfahren	geophysikalische Daten (Versuchsdaten)		X

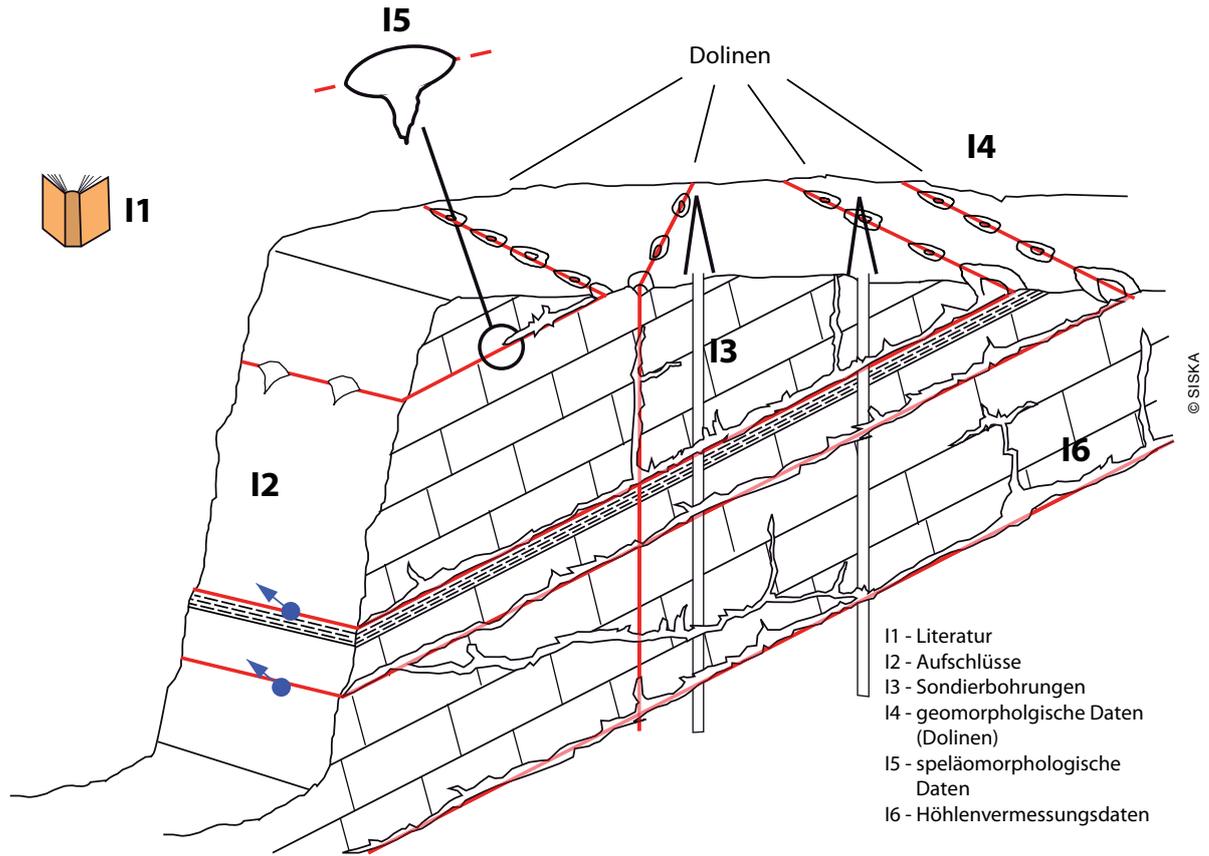


Abb. 6.21: Überblick der Methoden zur Ausscheidung von Initialfugen

Initialfugen können anhand von Literaturdaten (1), Aufschlussdaten (2), Bohrlochdaten (3), geomorphologischen Daten (4), speläomorphologischen Daten (5) und Höhlenvermessungsdaten (6) bestimmt werden.

Tab. 6.7: Das Beispiel einer Kohärenztabelle zeigt, dass Initialfugen auch anhand von wenigen Daten ausgeschieden werden können, wenn die verschiedenen Methoden kombiniert werden.

Methode	Stratigr. Initialfuge 1	Stratigr. Initialfuge 2	Tektonische Initialfuge 3
<b>I1 – Literatur (Lithostratigraphie, etc.)</b>	Oberhalb Mergelband; Muster et al. 3 (1998, Höhlenliteratur)	Hoher Pyritanteil	Muster1 et al (1960), drainierende Verwerfung
<b>I2 – Aufschlussdaten</b>	Wasseraustritte in Felswand	Oxidierter Pyrit in Aufschlüssen erkennbar	Verwerfung in DHM erkennbar
<b>I3 – Bohrlochdaten</b>	Mergelband in Bohrlöchern erkennbar		
<b>I4 – geomorph. Daten</b>	Dolinen A, B, C, D, E, Quelle X	Dolinen F, G, H, Ponor Y	Karstspalten im Karrenfeld Expl., Dolinen C, G, Ponor Y
<b>I5 – speläomorphologische Daten</b>	Gänge in der Höhle Muster	3 Kleinhöhlen (A, B & C)	2 Schächte (D, E)
<b>I6 – Höhlenvermessungsdaten</b>		Beispielhöhle	

### 6.6.1 I1: Initialfugen aus Literaturangaben

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* gering bis hoch

*Ziel:* Identifikation von Initialfugen im Projektgebiet aufgrund von Literaturrecherchen.

*Verwendete Daten:* Speläologische und geologische Literatur

In der geologischen und speläologischen Regionalliteratur befinden sich häufig wertvolle Hinweise, die auf mögliche Initialfugen regionaler Bedeutung hindeuten. Dazu gehören Hinweise auf:

- bekannte Initialfugen (aus speläologischer Literatur)
- Beschreibung der Lithostratigrafie (Mergelzwischenlagen, Stromatolithlagen, Lagen mit einem erhöhten Anteil an Pyrit, Evaporitminerale (z.B. Gips), organischem Material, Quarzlagen, Paläooberflächen)
- Gebirgsdurchtrennung (markante Störungen, schichtparallele Verwerfungen)
- hydrologisch wirksame Trennflächen (z.B. Quellhorizonte, Lagen oder Horizonte mit einer erhöhten Permeabilität)

Die ausschliesslich aufgrund von Literaturdaten identifizierten Initialfugen sollten durch mindestens eine weitere Methode bestätigt werden, da nicht alle Trennflächen, die verkarstungsanfällige Eigenschaften aufweisen, auch wirklich als Initialfugen gewirkt haben.

### 6.6.2 I2: Initialfugen aus geologischen Aufschlussdaten

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* gering

*Ziel:* Ausscheidung von Initialfugen aus geologischen Aufschlussdaten

*Verwendete Daten:* geologische Kartierung (evtl. geologische Literatur), digitales Höhenmodell, Luftbilder

*Methode:* Im Rahmen der üblichen geologischen Kartierungsarbeiten im Projektgebiet wird ein verstärktes Augenmerk auf mögliche Indikatoren von Initialfugen gelegt. Dazu gehören (Abb. 6.22):

- Markante Störungen wie Verwerfungen und Überschiebungen (tektonische Initialfuge)
- Markante Mergellagen (stratigraphische Initialfuge)
- Lagen mit einem erhöhtem Gehalt an Pyrit (stratigraphische Initialfuge)
- Lagen mit einem erhöhtem Gehalt an Evaporitmineralen wie z.B. Gips (stratigraphische Initialfuge)
- Lagen mit einem erhöhtem Gehalt an organischem Material (stratigraphische Initialfuge)
- Stromatolithlagen (stratigraphische Initialfuge)
- Schichtparallele Verwerfungen (stratigraphische-tektonische Initialfuge)
- Paläooberflächen (stratigraphische Initialfuge)

- Wasserführende Trennflächen (Quellen, feuchte Stellen an Felswänden, Tuffvorkommen, Eisfälle im Winter)

Sind diese Indikatoren über mehrere Aufschlüsse hinweg verfolgbar, können die entsprechenden Trennflächen als mögliche Initialfugen regionaler Bedeutung ausgeschieden werden. In der Regel geht die geologische Kartierung mit der geomorphologischen Kartierung einher (vgl. 14), so dass eine Aussage über die oberflächennahe Karstrelevanz der Trennfläche gemacht werden kann (z.B. Häufung von Dolinen, Höhleneingänge, Quellen oder Schluckstellen entlang der Trennflächen).

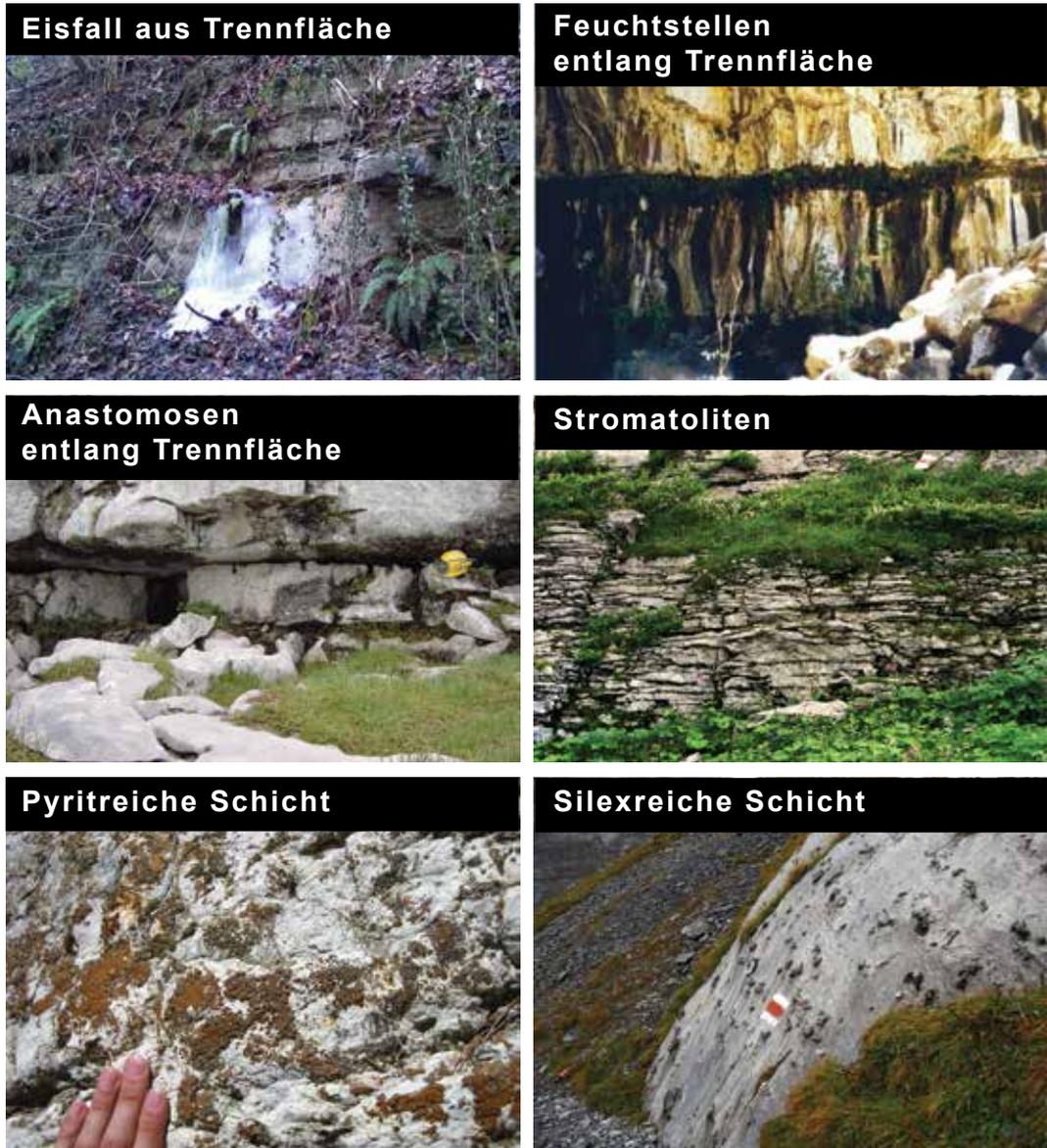


Abb. 6.22: Erkennen von Initialfugen an Aufschlüssen

*Initialfugen können an Aufschlüssen aufgrund ihrer lithologischen Eigenschaften (z.B. pyritreiche Lagen, Silexbänder, Mergellagen), von Anzeichen der Verkarstung (z.B. Höhleneingänge, Anastomosen) und ihrer hydrologischen Funktion (z.B. Karstquellen, feuchte Stellen, Eisfälle, Tuff) erkannt werden.*

### 6.6.3 I3: Initialfugen aus Bohrlochdaten

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* mittel

*Ziel:* Ausscheidung von Initialfugen aus Bohrlochdaten

*Verwendete Daten:* Bohrlochdaten

*Methode:* Bohrlochdaten können im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen verwendet werden, um Initialfugen zu erkennen und auszuschneiden. Die Lage, Tiefe und Art der Bohrungen richtet sich nach den geotechnischen, geologischen, hydrogeologischen, sowie den topographischen und logistischen Rahmenbedingungen. Die Bohrungen können als Destruktiv- oder Kernbohrung ausgeführt werden. Üblicherweise werden die Bohrdaten der geologischen Untersuchungen (SIA 199) verwendet und müssen keine zusätzlichen Bohrungen abgeteuft werden.

Vier Arten von Beobachtungen können zur Identifikation von Initialfugen in Bohrungen unterschieden werden:

- 1) optische Erkennung von Lösungserscheinungen, Hohlräumen und Karstverfüllungen; anhand von Bohrkernen, Pseudobohrkernen (Bohrlochscanner) oder Bohrloch-kamerabefahrungen
- 2) Identifizierung von lithologischen Eigenschaften, die auf eine Initialfuge hindeuten: Grenze zwischen unterschiedlich mechanisch kompetenten Lagen (z.B. Kalkstein-Mergel), Lagen mit einem erhöhten Gehalt an Pyrit, Evaporitmineralien (z.B. Gips) oder organischem Material, Stromatolithlage, Paläooberflächen
- 3) Detektion von Zonen mit erhöhter Permeabilität
- 4) Bohrlochgeophysik zur Erkennung von Hohlräumen im nahen Umfeld der Bohrung

Die Wahl der eingesetzten Bohrlochuntersuchung hängt von der Art der Bohrung, den geologischen und hydrologischen Verhältnissen sowie den logistischen Rahmenbedingungen ab. Für eine detaillierte Beschreibung und Diskussion der verschiedenen Methoden sei auf die Literatur verwiesen (z. B. Scott, 1997; Bechtel et al, 2007; Waltham et al, 2005; Filipponi & Jeannin, 2008).

Eine in einem Bohrloch ausgeschiedene Initialfuge wird vorerst als von lokaler Bedeutung betrachtet. Wird die Initialfuge in benachbarten Bohrlöchern oder durch eine andere Initialfugen-Untersuchung ebenfalls erkannt, kann sie als regional bedeutend betrachtet werden (Abb. 6.23).

Es gilt zu beachten, dass bei der Identifikation von Initialfugen aus Bohrlochdaten steil stehenden Initialfugen unterbewertet werden.

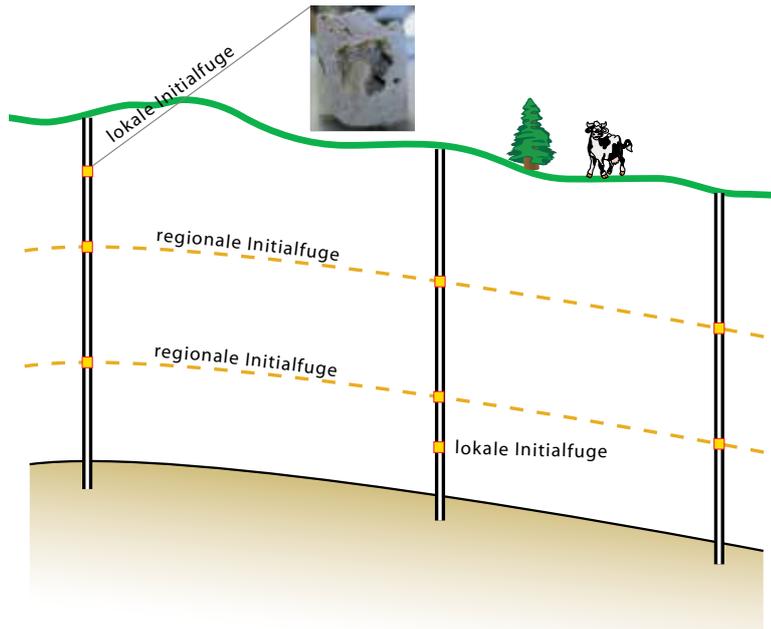


Abb. 6.23: I3 – Korrelation von in Bohrlöchern identifizierten Initialfugen

Kann eine Initialfuge in mehreren Bohrlöchern ausgeschieden werden, handelt es sich um eine Initialfuge regionaler Bedeutung. Wird sie hingegen nur in einem Bohrloch entdeckt, kann es sich auch um eine Initialfuge lokaler Bedeutung handeln.

#### 6.6.4 I4: Initialfugen aus karstmorphologischen Daten

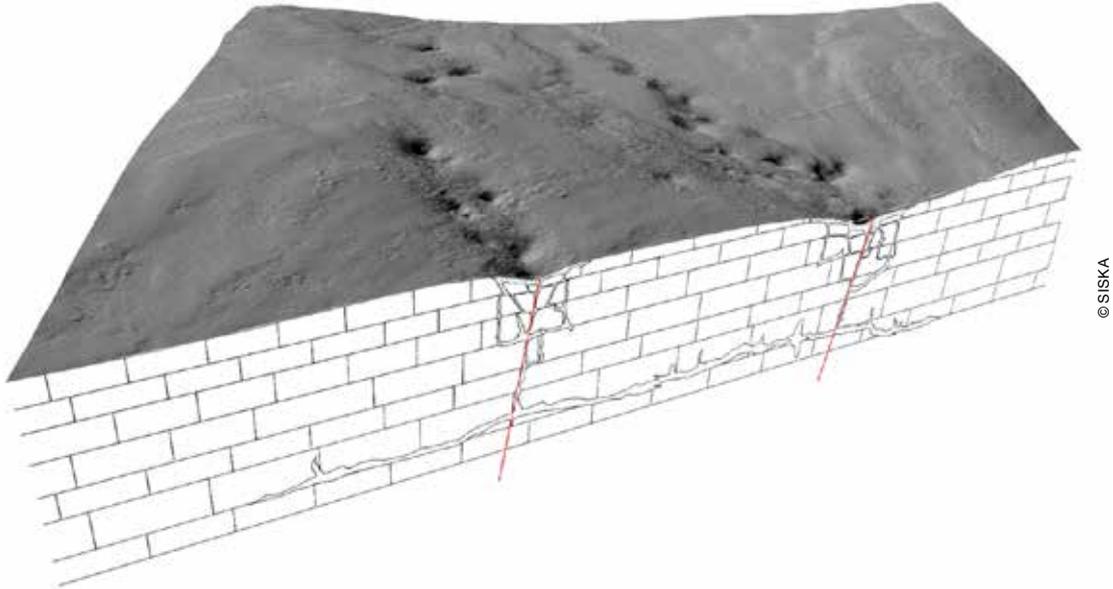
Karstspezifischer Erkenntnisgewinn: mittel

Ziel: Ausscheidung von Initialfugen aus karstmorphologischen Daten

Verwendete Daten: geomorphologische Kartierung, Luftbilder, digitale Höhenmodelle, geomorphologische Regionalliteratur

Methode: Im Rahmen der geologischen Kartierungsarbeiten (SIA 199) und/oder der Analyse von Luftbildern und digitalen Höhemodellen werden karstmorphologische Daten erfasst. Zu den erhobenen Daten gehören die Lage von Dolinen, Höhleneingängen, Ponoren, Quellen und andere Hinweise auf wasserführende Trennflächen (feuchte Stellen an Felswänden, Tuffvorkommen, Eisfälle im Winter).

Die Identifikation der Initialfugen aus karstmorphologischen Daten erfolgt analog zur Bestimmung der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten (Kapitel 6.6.6), indem die Karsterscheinungen in einem 3D Modell dargestellt und – optisch oder statistisch – in Bezug zu den geologischen Referenzhorizonten (Schichtgrenzen, Klufrichtungen) analysiert werden (Abb. 6.24).



© SISKKA

Abb. 6.24: 14 – Bestimmung der Initialfugen aus geomorphologischen Daten

Aufgrund von Dolinenreihen auf Brüchen oder parallel zur Stratigrafie können tektonische respektive stratigrafische Initialfugen ausgeschieden werden. Diese können anhand von Luftbildern, mit dem digitalen Höhenmodell oder im Feld bestimmt werden (im Bild: DHM des Kantons NE in der Nähe des Creux-du-Vans mit Dolinen entlang von tektonischen Initialfugen).

### 6.6.5 I5: Initialfugen aus speläomorphologischen Daten

Karstspezifischer Erkenntnisgewinn: mittel

Ziel: Ausscheidung von Initialfugen aus speläomorphologischen Daten

Verwendete Daten: speläomorphologische Höhlenbeobachtungen aus dem Feld und/oder Literatur

Methode: Folgt eine Karströhre einer Initialfuge, zeigt sich dies meist in der Gangmorphologie und anderen Hinweisen (z.B. Filipponi, 2007). Diese ermöglichen Initialfugen bei Höhlenbegehungen zu erkennen und zu kartieren. Diese Untersuchung erlaubt – im Gegensatz zur Auswertung von Höhlenvermessungsdaten (Kapitel 6.6.6) – auch bei einer kleinen Anzahl von Höhlen Initialfugen auszuscheiden.

Die spezifische Höhlenmorphologie wird aus den Höhlenbeschreibungen oder Feldbeobachtungen zusammengetragen (Abb. 6.25):

- Schichtfugengänge
- Anastomosen
- "Quellaustritte" in Höhlen
- Wandkarren unterhalb von Schichtfugen
- Sinterbildungen unterhalb von Schichtfugen
- Höhlengips
- Neotektonische Verschiebungen entlang von Schichtfugen (Gleithorizonte)

Zur Identifikation von Initialfugen werden die mit den Initialfugen assoziierten spezifischen Morphologien in einem 3D-Modell dargestellt und in Bezug zu den stratigraphischen und tektonischen Referenzflächen gesetzt. Die Auswertung kann visuell oder statistisch erfolgen (Kapitel 6.6.6). Befinden sich mehrere solche Hinweise entlang einer Fläche, kann diese als Initialfuge regionaler Bedeutung ausgeschieden werden.



Abb. 6.25: 15 – Identifizierung von Initialfugen anhand von speläomorphologischen Daten

Folgende Beobachtungen in Höhlen deuten auf eine Initialfuge hin: Schichtfugengänge, Kluftfugengänge Anastomosen, Quellhorizonte, Versinterungen aus Trennflächen, Wandkarren, Gips, Neotektonik.

## 6.6.6 I6: Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* hoch

*Ziel:* Ausscheidung von Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten

*Verwendete Daten:* Höhlenvermessungsdaten

Zur Ausscheidung der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten werden idealerweise Vermessungsdaten von Höhlensystemen verwendet, die mehrere Kilometer lang sind und sich über die ganze lithologische Einheit erstrecken. Gegebenenfalls kann die Analyse auch mit einer Vielzahl von kleineren, miteinander nicht verbundenen Höhlen durchgeführt werden, wobei lokale Initialfugen in der Regel überbewertet werden.

Die auskartierten Initialfugen regionaler Bedeutung werden lagertreu in das geologische 3D-Modell übertragen.

Die Identifikation der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten kann optisch oder statistisch erfolgen.

### 6.6.6.1 Optische Identifikation der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten

Die optische Identifikation der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten erfolgt in drei Schritten (Abb. 6.26):

#### 1. 3-D Modell des Höhlensystems erstellen

In der Regel stehen die Höhlenvermessungsdaten in digitaler Form zur Verfügung, andernfalls müssen die Daten den Messblättern oder den Höhlenplänen entnommen werden. Für die Untersuchungen im Rahmen der KarstALEA-Erkundungsphase reichen die Polygonzüge der Höhlenvermessung aus.

#### 2. Höhlenmodell in das geologische 3D-Modell einfügen

Gegebenenfalls muss lokal das geologische Modell verfeinert werden. Bei einfachen geologischen Verhältnissen reicht eine stratigrafische Referenzfläche (z.B. die Basis des Aquifers) sowie die tektonischen Referenzflächen.

#### 3. Auswertung und Ausscheidung der Initialfugen

Die Identifikation der Initialfugen erfolgt durch das Erkennen von Ansammlungen von Höhlengängen parallel zu den Elementen des geologischen Modells. Dies erfolgt üblicherweise mit einem interaktiven Navigieren durch das 3D-Modell.

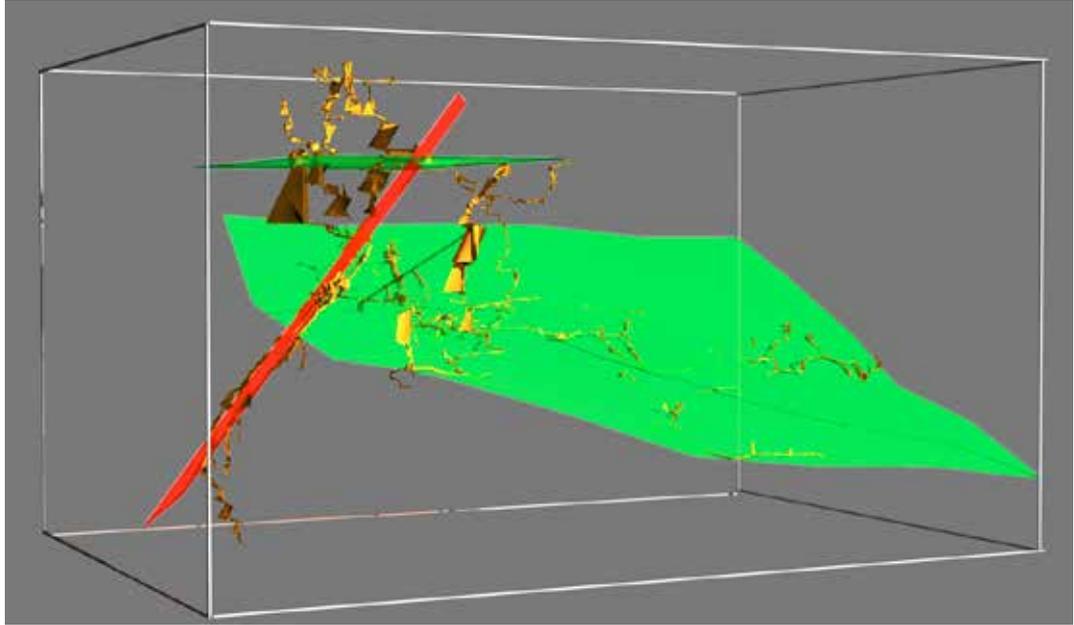


Abb. 6.26: 16 – Optische Bestimmung von Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten

Die Identifikation der Initialfugen erfolgt durch das Erkennen von Ansammlungen von Höhlengängen parallel zu den Elementen des geologischen Modells.

#### 6.6.6.2 Statistische Identifikation der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten

Die statistische Identifikation der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten erfolgt in fünf Schritten (Abb. 6.27; Filippini et al., 2009):

1. **3D-Modell des Höhlensystems erstellen**
2. **Höhlenmodell in Gangsegmente von 1 m Länge diskretisieren**
3. **Höhlenmodell in das geologische 3D-Modell einfügen**
4. **Abstand zwischen den Gangsegmenten und den geologischen Referenzflächen berechnen**
5. **Auswertung und Ausscheidung der Initialfugen**  
Zur Auswertung der Initialfugen werden Histogramme der Distanzen zwischen den Gangsegmenten und den Referenzflächen erstellt. Eine Initialfuge kann anhand einer deutlichen Ansammlung von Gangsegmenten in einer gewissen stratigraphischen Position, resp. Abstand von der tektonischen Referenzfläche bestimmt werden. Diese lokalen Maxima haben in der Regel eine Mächtigkeit von einigen Metern bis Dekametern, wobei diese Breite von den Ungenauigkeiten des geologischen Modells sowie der Höhlenvermessungsdaten herrühren.

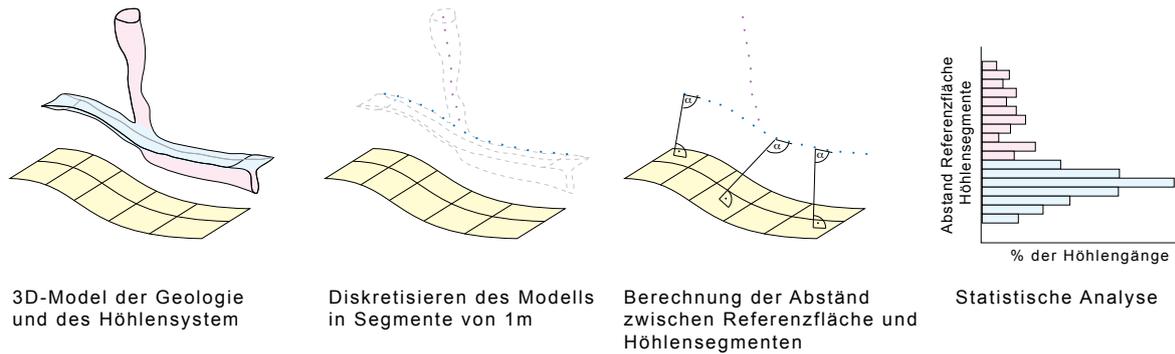


Abb. 6.27: 16 – Statistische Identifikation der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten

Für die statistische Identifikation der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten wird das 3D-Modell des Höhlensystems erstellt und in das geologische 3D-Modell eingefügt und dann in Gangsegmente von 1 m Länge diskreditiert. Aufgrund des berechneten Abstands zwischen Gangsegmenten und den geologischen Referenzflächen können die Initialfugen ausgeschieden werden.

### 6.6.7 17 – Detektion von Karsthohlräumen mittels geophysikalischen Verfahren

*Karstspezifischer Erkenntnisgewinn:* gering

*Ziel:* Detektion von Karsthohlräumen mittels geophysikalischen Verfahren

*Verwendete Daten:* geophysikalische Daten

Das Ziel der Untersuchungen ist in geologisch schwierig zu bewertendem Baugrund die Strukturverhältnisse und grössere Karsthohlräume (> 1 m) zu erfassen. Zur Anwendung kommen vorwiegend geoelektrische, reflexionsseismische und gravimetrische Verfahren. Da die Auflösung der geophysikalischen Methoden mit der Tiefe stark abnimmt, beträgt die Erkundungstiefe für Karsthohlräume mit einem Durchmesser von über 1 m rund 10 bis 50 m. Daher eignen sich diese geophysikalischen Verfahren vorwiegend in Projektabschnitten mit geringer Überdeckung.

Die Auswertung der geophysikalischen Messdaten beruht auf verschiedenen Modellannahmen. Um mit ausreichender Sicherheit das Erkundungsziel zu erreichen, werden mindestens zwei sich ergänzende geophysikalische Verfahren angewendet und/oder diese mit Aufschlussbohrungen ergänzt.

## 6.7 Beurteilung der karstspezifischen Gefährdung

Die Beurteilung der karstspezifischen Gefährdung beruht auf zwei Elementen:

- 1) die Wahrscheinlichkeit eine Karströhre anzuschneiden, welche von der Verteilung der **Karströhrendichte** abhängt, und
- 2) die Art der Gefährdung, die durch die drei Faktoren Hohlraum, Wasser und Sedimente bestimmt ist und durch die **KarstALEA-Zonen** charakterisiert wird.



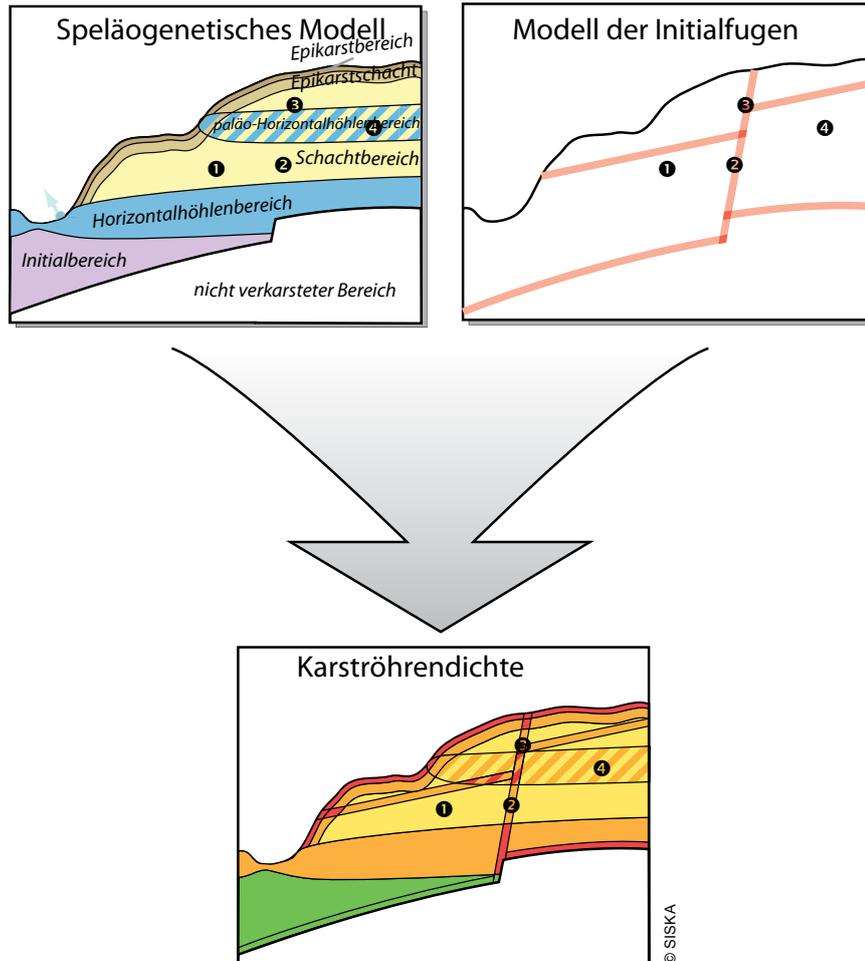


Abb. 6.29: Ausscheidung der Karströhrendichtezone

Die Ausscheidung der Karströhrendichtezone beruht auf der Kombination der speläogenetischen Bereiche und des Modells der Initialfugen regionaler Bedeutung. Beispiele (Nummern) siehe Text.

*Beispiel:* Wir betrachten einen Gebirgsbereich der sich im Schachtbereich befindet (Abb. 6.29-1). Dieser Gebirgsbereich weist eine mässige Karströhrendichte auf. Wir betrachten nun einen Gebirgsbereich der sich im Schachtbereich und im Einflussbereich einer Initialfuge regionaler Bedeutung befindet (Abb. 6.29-2). Dieser Gebirgsbereich wird mit einer mässig-hohen Karströhrendichte bewertet. Als nächstes betrachten wir einen Gebirgsbereich der sich weiterhin im Schachtbereich aber dieses Mal im Einflussbereich zweier Initialfugen regionaler Bedeutung befindet (Abb. 6.29-3). Dieser Gebirgsbereich weist eine hohen Karströhrendichte auf.

Die Verteilung der Karströhrendichte wird nicht nur für die aktuellen speläogenetischen Bereiche erstellt, sondern ebenfalls für die verschiedenen paläo-speläogenetischen Bereiche, wobei jede Karstentwicklungsphase einzeln betrachtet wird. Diese entwicklungsphasengetrennte Betrachtung der Verteilung der Karströhrendichte ist wichtig, da mit den verschiedenen speläogenetischen Bereichen andere Gefährdungen (KarstALEA-Zonen) verbunden sind.

*Beispiel:* Im obigen Schachtbereich befindet sich noch ein paläo-Horizontalhöhlenbereich (Abb. 6.29-3). Dadurch überlagern sich die beiden Bereiche. Somit weist das Gebirge eine mässige Dichte für Karströhren mit den Charakteristika des Schachtbereichs sowie eine mässig-hohe Dichte für Karströhren mit den Charakteristika des paläo-Horizontalhöhlenbereichs auf.

Tab. 6.8: Qualitative Beurteilung der Karströhrendichte

Das Gebirge wird aufgrund der speläogenetischen Bereiche und der Initialfugen in Bereiche mit charakteristischer Karströhrendichte unterteilt.

#### Qualitative Beurteilung der Karströhrendichte

speläogenetischer Bereich	Anzahl regionale Initialfugen		
	keine	1	2
Epikarstbereich	hoch	hoch	hoch
Epikarstschachtbereich	mässig - hoch	hoch	hoch
Schachtbereich	mässig	mässig - hoch	hoch
Horizontalhöhlenbereich	mässig - hoch	hoch	hoch
Initialbereich	gering	gering	gering

#### 6.7.1.2 Quantitative Beurteilung der Verteilung der Karströhrendichte

Bei sehr günstiger Datenlage ist es möglich die Verteilung der Karströhrendichte ebenfalls quantitativ zu beurteilen. Dafür werden die Karströhrendichten in den speläogenetischen Bereichen (Kap. 6.5.4), die Lage und Ausdehnung der Initialfugen regionaler Bedeutung (Kap. 6.6) sowie der Karströhrendichtekontrast zwischen Initialfugen lokaler und regionaler Bedeutung (Anhang IX) benötigt. Eine quantitative Beurteilung kann auch mit unvollständigen Daten durchgeführt werden, indem die fehlenden Daten durch Erfahrungs- und/oder Literaturwerte ergänzt werden. Dies muss bei der Bewertung der Resultate entsprechend berücksichtigt werden.

Die detaillierte Erklärung und das Vorgehen ist im Anhang IX ersichtlich.

#### 6.7.1.3 Übertragung der 3D-Beobachtungen ins Stollenband

Beim Übertragen der 3D-Beobachtungen ins Stollenband gilt es die unterschiedlichen Karströhrendichtekontraste zwischen den verschiedenen speläogenetischen Bereichen einerseits und dem (nicht-) Einflussbereich von Initialfugen andererseits zu berücksichtigen (Abb. 6.30). Da der Kontrast zwischen den verschiedenen speläogenetischen Bereichen geringer und deren Abgrenzung auch häufig weniger genau ist, kann der Schnittpunkt der Grenzfläche mit der Tunnelachse als alleiniges Kriterium zur Abgrenzung der entsprechenden Karströhrendichtezonen und speläogenetischen Bereiche dienen (Ausnahme Epikarst bei oberflächennahen Tunnelabschnitten). Zwischen den Bereichen, die im Einflussbereich respektive nicht im Einflussbereich einer Initialfuge sind, ist hingegen der Karströhrendichtekontrast bedeutend. Daher sollten die entsprechenden Zonen im Einflussbereich der Initialfugen im Sinne einer vorsichtigen Einschätzung durch die äussersten Punkte der entsprechenden Zonen im ganzen Tunnelprofil abgegrenzt werden. Das Übertragen der KarstALEA-Zonen (Kapitel 6.7.2), welche auf den speläogenetischen Bereichen und den hydrogeologischen Zonen beruht, erfolgt analog zu den speläogenetischen Bereichen.

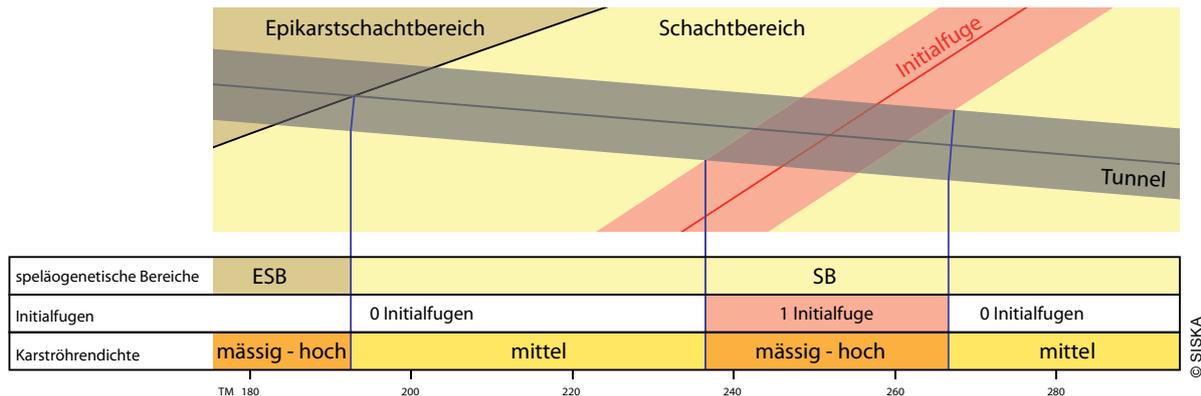


Abb. 6.30: Übertragung der Karströhrendichtezonen auf das Tunnelband

Die Unterteilung des Stollenbandes erfolgt für die speläogenetischen Bereiche aufgrund des Schnittpunktes der Tunnelachse mit der Fläche, die die beiden Zonen unterteilt. Der Einflussbereich einer Initialfuge wird hingegen durch die äussersten Punkte im Tunnelprofil bestimmt, die sich im Einflussbereich einer Initialfuge befinden.

## 6.7.2 Ausscheidung der KarstALEA-Zonen und Beschreibung der karstspezifischen Gefährdungen

Ein Überblick über karstbedingte Gefährdungsbilder befindet sich im Kapitel 2.2. Die meisten karstbezogenen Gefahren sind auf das Anfahren eines Karsthohlraumes zurückzuführen. Dies kann sich sowohl auf das Bauwerk selbst (z.B. Verzögerungen, Kostenüberschreitungen, Sicherheit), auf andere Nutzungen (z.B. Trinkwasser, darüberliegende Bauten) und/oder auf die Umwelt (z.B. Quellen) negativ auswirken. Die Gefahren hängen stark von der Charakteristika der Hohlräume – Form und Grösse, Wasserführung, Sedimentverfüllung – ab. Dieses Kapitel beschränkt sich daher auf eine genauere Charakterisierung und Lokalisierung der Gefährdungsbilder, für eine allgemeine Charakterisierung der karstspezifischen Gefährdungen sei auf das Kapitel 2.2 verwiesen.

KarstALEA-Zonen sind Gebirgsbereiche mit ähnlichen Karstcharakteristika (Hohlraumgrösse und -geometrie, hydrologische Verhältnisse und Sedimentverfüllung). Sie zeichnen sich daher durch charakteristische Gefährdungsbilder aus. Die KarstALEA-Zonen werden durch eine Kombination der hydrogeologischen Zonen (Kapitel 6.4) mit der speläogenetischen Bereichen (Kapitel 6.5) ausgeschieden (Abb. 6.31 & 6.32).

Es können sieben KarstALEA-Zonen unterschieden werden:

- Epikarstbereich (EKB)
- Epikarstschachtbereich (v-EKB)
- Vadoser Schachtbereich (v-SB)
- Epiphreatischer Schachtbereich (e-SB)
- Epiphreatischer Horizontalhöhlenbereich (e-HHB)
- Phreatischer Horizontalhöhlenbereich (p-HHB)
- Initialbereich (p-IB)

Eine detaillierte Charakterisierung dieser Bereiche und der damit verbundenen Gefahren befindet sich im Anhang V.

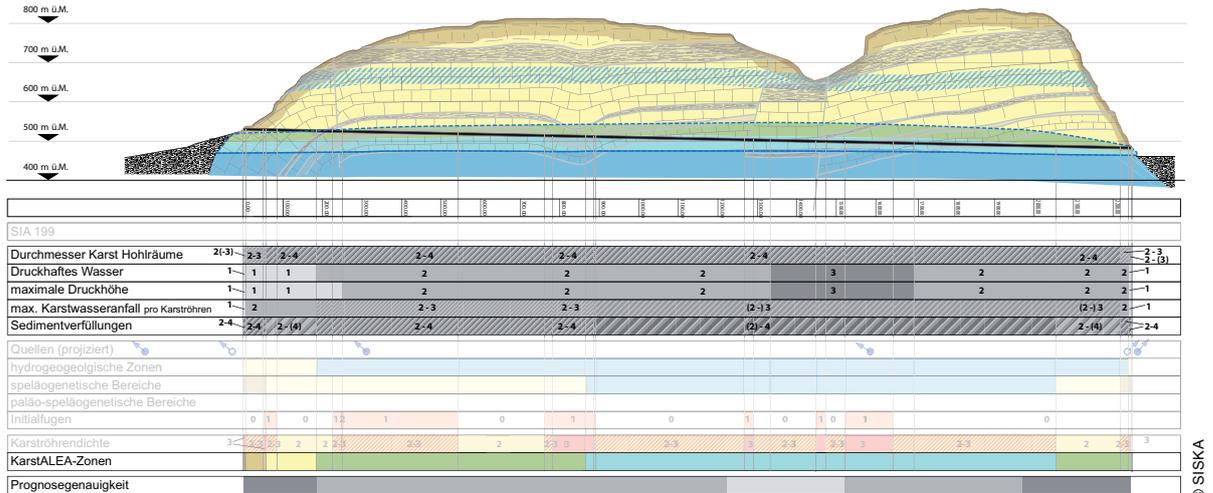


Abb. 6.31: Profil auf Tunneltrasse mit aktuellen und paläo-KarstALEA-Zonen sowie ergänzende Beschreibung der gefährdungsrelevanten Eigenschaften

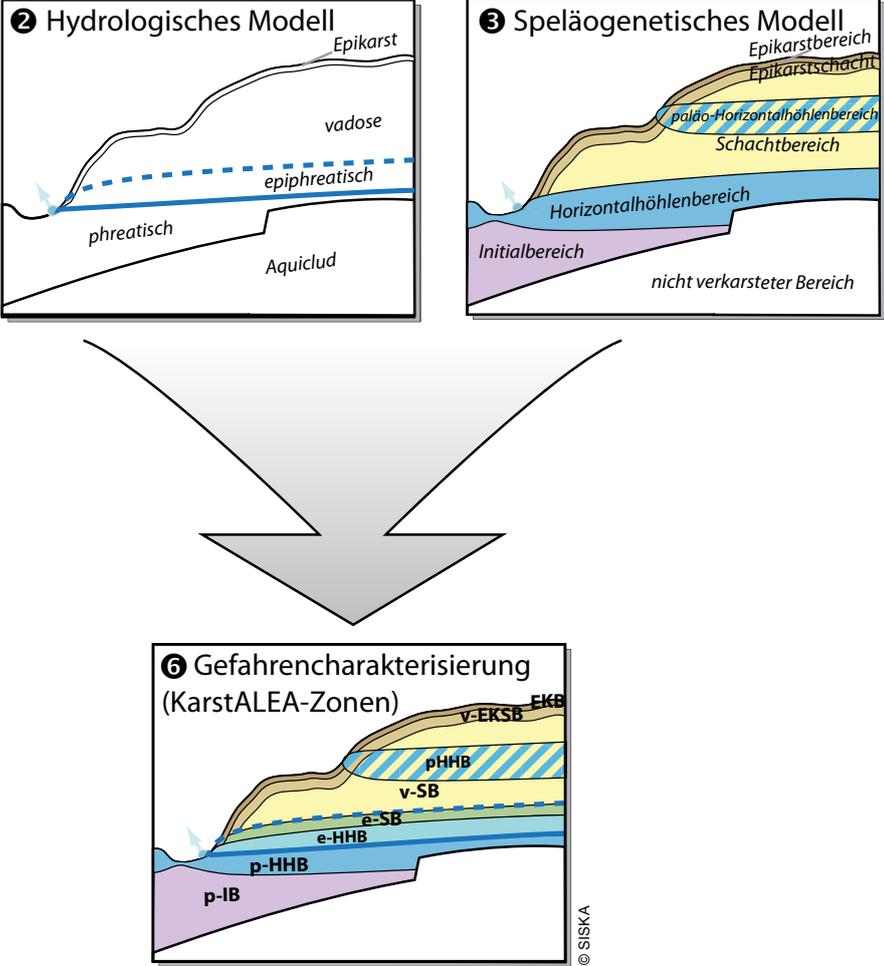


Abb. 6.32: Ausscheidung der KarstALEA-Zonen

Die Ausscheidung der aktuellen KarstALEA-Zonen basiert auf den hydrogeologischen Zonen und den speläogenetischen Bereichen. Allfällige paläo-KarstALEA-Zonen (Schraffur) werden ausschliesslich aufgrund der paläo-speläogenetischen Bereiche ausgeschieden.

Neben den aktuellen Zonen können ebenfalls paläo-KarstALEA-Zonen ausgeschieden werden. Die paläo-KarstALEA-Zonen ergeben sich ausschliesslich aus den paläo-speläogenetischen Bereichen (Kapitel 6.5.2). Die (aktuellen) hydrogeologischen Zonen werden dabei nicht berücksichtigt, da für die wasserbedingten Gefahren nur die aktuellen Bedingungen von Bedeutung sind. Eine Charakterisierung der paläo-speläogenetischen Bereiche befindet sich im Anhang VI.

*Die Beschreibung der karstbedingten Gefährdung* (Gefährdung = Umstand, der eine Gefahr für Personen, Umwelt oder Sachwerte darstellt) basiert auf den KarstALEA-Zonen, wobei zwischen drei Arten von Gefahrenquellen unterschieden werden kann: Hohlraum, Wasser, Sedimente (Abb. 6.33).



Abb. 6.33: Karstspezifischen Gefährdungen

*Gefährdungen können auf die Hohlräume selbst (links), auf aus Wasser (Mitte) und/oder auf Sedimentverfüllungen (rechts) zurückzuführen sein (mittleres Foto: A. Behrend)*

Eine generelle Beschreibung der karstspezifischen Gefährdung in den einzelnen KarstALEA-Zonen ist ebenfalls in den Anhängen V und VI in tabellarischer Form zu finden. Diese sind an die jeweiligen Projektgegebenheiten und Erkenntnisse aus den KarstALEA-Untersuchungen (z.B. anhand Beobachtungen und Beschreibungen aus Höhlen im Projektgebiet) anzupassen. Die Beschreibung der Gefährdung sollen im Wesentlichen folgende Fragen beantworten:

#### **Gefährdung: Hohlraum**

- Welche Grösse haben die erwarteten Hohlräume?
- Welche Morphologie weisen die Hohlräume auf (z.B. Mäander, Schächte, Hallen)?
- Welche Hauptorientierung weisen die Hohlräume auf?

#### **Gefährdung: Wasser**

- Ist mit Bergwasseranfall zu rechnen?
- Ist der Bergwasseranfall kontinuierlich oder temporär?
- Wie hoch ist der zu erwartende Bergwasseranfall (initial und kontinuierlich)?
- Steht das Bergwasser unter Druck? Wenn ja, wie hoch ist der zu erwartende Wasserdruck?
- Welche Aquifere sind betroffen und welche Folgen sind zu erwarten?

#### **Gefährdung: Sedimente**

- Ist mit sedimentverfüllten Hohlräumen zu rechnen?
- Welche Korngrössenverteilung weisen die Sedimente auf?

- Welches Volumen können die Sedimentverfüllungen aufweisen?
- Sind die Sedimente bindig oder rollig?
- Sind Tagbrüche zu erwarten?

Darauf basierend können die Gefährdungsbilder formuliert werden (siehe auch Tab. 2.2). Dabei gilt es zu beachten, dass die entsprechenden Gefährdungen kombiniert auftreten können und zusammen zu zusätzlichen oder veränderten Gefährdungsbildern führen (z.B. Zunahme des Wasseranfalls durch Auswaschung der Sedimente, Verflüssigung von Sedimenten → Schlammereinbrüche).

Die KarstALEA-Zonen werden als eigene Darstellungsebene im 3D-Modell dargestellt und/oder im Stollenband eingetragen.

## 6.8 Risikoanalyse und risikomindernde Massnahmen

Die Resultate der KarstALEA-Untersuchungen – im Speziellen die Karströhrendichtezone und die KarstALEA-Zonen mit der damit verbundenen Charakterisierung und räumlichen Zuordnung der karstspezifischen Gefährdungen – stellen ein wichtiges Element für die Risikobewertung und die damit verbundenen planerischen Entscheide dar (Linienführung, Vortriebsart, Ausbruchsgometrie, Vorauserkundungskonzept, Massnahmen- und Sicherheitsplan etc.). Die Resultate jeder KarstALEA-Untersuchungen müssen daher in geeigneter Form aufbereitet werden.

Am Ende jeder Untersuchungsiteration der KarstALEA-Erkundung werden die Resultate, Erkenntnisse und noch offenen Fragen in einem Bericht zusammengefasst. Ziel des Berichtes ist eine phasengerechte Beurteilung der karstbedingten Gefährdung für das Untertagbauwerk selbst, für allfällige weitere betroffene Nutzungen und für die Umwelt – jeweils während der Realisierung und der Bewirtschaftung. Weiter stellt er Wissenslücken dar. Der Bericht kann als eigenständiges Dokument oder als Kapitel des geologischen und hydrogeologischen Berichtes (SIA 199) verfasst werden. Der Umfang des Berichtes richtet sich nach der Grösse und Bedeutung des Bauprojektes. Beim Verfassen des Berichtes sind die im Kapitel 4.6 erwähnten Grundsätze zu berücksichtigen.

In die Risikobeurteilung fliessen die risikomindernden Massnahmen massgeblich ein (z.B. Vorauserkundungsmassnahmen, Grundwasserschutzmassnahmen, Bauauflagen etc.). Die diesbezüglichen Möglichkeiten sind daher im Rahmen des Berichtes zur KarstALEA-Erkundung auszuführen. In Sachen Vorauserkundungsmassnahmen werde z.B. die verschiedenen Methoden verglichen, ihre Erkundungseffizienz beschrieben und eine oder mehrere Varianten eines Vorauserkundungskonzeptes skizziert (die verschiedenen Vorauserkundungsmassnahmen zur Erkennung von karstrelevanten Gefahren sind im Kapitel 7.1 beschrieben). Je nach Arbeitsteilung und Absprache mit den Verfassern des Umweltverträglichkeitsberichtes UVB können auch Massnahmen für den Grundwasser-, Karst- oder Höhlenschutz skizziert werden. Dies bedarf aber häufig weitergehende Abklärungen, die die Anwendung der KarstALEA-Methode übersteigen. Der Informationsaustausch zwischen den Verfassern der KarstALEA- und Umweltverträglichkeits-Berichte sollte sichergestellt werden.

## 7 KarstALEA Bauausführung

Die KarstALEA-Bauausführung (SIA 197 Phasen Ausführung und Bewirtschaftung) hat zum Ziel, geeignete Massnahmen für die Erkennung und Bewältigung der in der KarstALEA-Erkundung erkannten Gefährdungen und der damit verbundenen Risiken festzulegen<sup>3</sup> und diese basierend auf einer Dokumentation der angetroffenen Karsterscheinungen (Kapitel 7.2) während des Vortriebs laufend an die realen Verhältnisse anzupassen (Massnahmen zur Risikominderung → Erkundungskonzept für den Vortrieb und Endausbau (Kapitel 7.1), Massnahmen zur Beherrschung der Gefahr → Massnahmenplan → Dokumentation während des Vortriebs → Überprüfung und ggf. Anpassung der Prognose und des Massnahmenplans; Abb. 7.1). Die Massnahmen<sup>4</sup> werden üblicherweise im Sicherheitsplan zusammengefasst, in dem ebenfalls die zu akzeptierenden Risiken definiert sind.

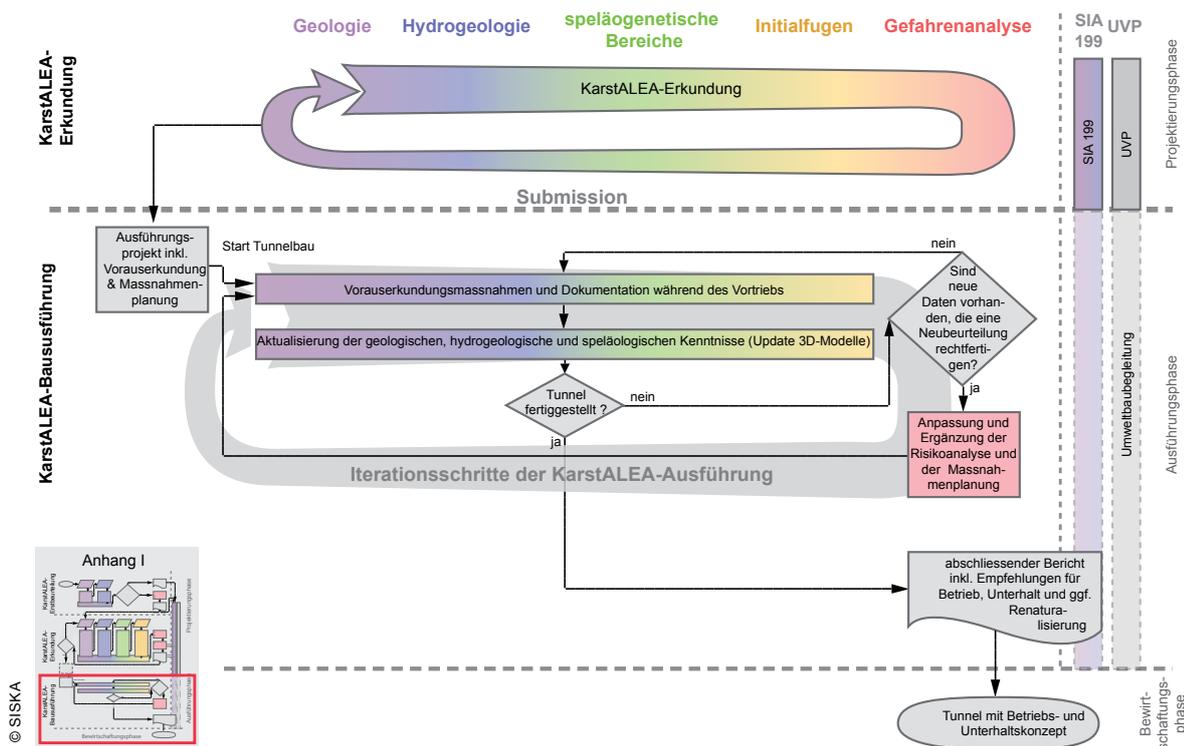


Abb. 7.1 Ablauf der Untersuchungen der KarstALEA-Ausführung

Während der KarstALEA-Ausführung werden anfangs die Vorauserkundungsmassnahmen und der Massnahmenplan erarbeitet und anschliessend während des Vortriebs die Modelle aufgrund der Resultate der Vorauserkundung und der Dokumentation aktualisiert und bei Bedarf die Risikoanalyse und die Massnahmenplanung. Die Dokumentation des Vortriebs ist auch eine wichtige Basis zur Ausarbeitung des definitiven Betriebskonzeptes inkl. Unterhalt (Bewirtschaftungsphase).

<sup>3</sup> Obschon die risikomindernden Massnahmen in diesem Kapitel vorgestellt werden, werden diese im Rahmen der KarstALEA-Erkundung vorgeschlagen.

<sup>4</sup> Die Beschreibung der bautechnischen und organisatorischen Massnahmen zur Beherrschung der karstrelevanten Gefahren ist nicht Bestandteil dieser KarstALEA-Wegleitung.

Des Weiteren wird der Kontrollplan für die Dokumentation der karstspezifischen Aspekte für den Vortrieb formuliert (Kapitel 7.2). Dieser bildet die Entscheidungsgrundlage für allfällige Anpassungen des Massnahmenplans, für Erkundungsmassnahmen für den Endausbau, für Anpassungen am Endausbau, sowie für Vorschläge für die Überwachung während dem Betrieb.

## 7.1 Karstrelevante Vorauserkundungsmassnahmen

Für den Vortrieb eines Untertagebauwerks stellt die nicht exakte Prognostizierbarkeit der karstspezifischen Gefährdung ein Risiko dar. Die KarstALEA-Methode erlaubt zwar, das Gebirge in Zonen verschiedener karstbedingten Gefährdung und Karströhrendichten einzuteilen. Sie ermöglicht jedoch nicht, die Hohlräume zu lokalisieren. Mit Hilfe einer geeigneten Vorauserkundung kann daher versucht werden, das Risiko, das unerwartet eine bestimmte Gefährdung (für das Bauwerk, anderen Nutzungen und die Umwelt) eintritt, auf das geforderte Niveau zu reduzieren. Aufgrund der Resultate der KarstALEA-Erkundung können die Vorauserkundungsmassnahmen und der -aufwand optimiert werden.

Die Beschreibung der karstrelevanten Vorauserkundungsmassnahmen ist Bestandteil (ggf. ein eigenes Kapitel) des Vorauserkundungskonzeptes. Zum Einsatz können verschiedene Vorauserkundungsmassnahmen mit unterschiedlicher Erkundungseffizienz sowie Anpassbarkeit des Erkundungsaufwandes an das karstbedingte Risiko kommen. Die Wahl der eingesetzten Vorauserkundungsmassnahmen hängt von der Vortriebsart, der Art und räumlichen Verteilung der Gefahren, den geometrischen, logistischen und bauterminlichen Rahmenbedingungen sowie dem Mass des zu akzeptierenden Restrisikos ab.

Die Daten der Vorauserkundung werden nach der Erhebung umgehend ausgewertet und interpretiert. Die Resultate der Vorauserkundungsmassnahmen werden in das KarstALEA-Modell integriert und die Karstprognose überprüft und gegebenenfalls angepasst. Je nach Ergebnis sind geeignete Massnahmen zu treffen (z.B. weitere Vorauserkundung, Anpassungen im Vortrieb), um die Arbeits- und die Bauwerksicherheit und den Schutz der Umwelt zu gewährleisten.

Tab. 7.1: Vorauserkundungsmassnahmen

Mögliche Vorauserkundungsmassnahmen, ihre Erkundungseffizienz und die Anpassbarkeit an die KarstALEA und die Karströhrendichtenzonen.

Vorauserkundungsmassnahme	Erkundungseffizienz		Anpassbar an KarstALEA-Zonen	Kapitel
	Erkennen von bautechnisch relevanten Hohlräumen	Erkennen von Initialfugen		
Kartierung von Initialfugen	-	***	***	7.1.1
Vorauserkundungsbohrung zerstörend	*	*	***	7.1.2
Vorauserkundungsbohrung zerstörend mit Bohrlochscan	*	**	***	
Vorauserkundungsbohrung als Kernbohrung	*	***	***	
Bohrlochgeophysik	* bis **	-	***	7.1.3
Tunnelgeophysik	*	-	**	7.1.4
Sondierstollen	**	***	*	7.1.5

### 7.1.1 Kartierung von Initialfugen während des Vortrieb

Neben den geologischen Aufnahmen im Rahmen der SIA 197 an der Ortsbrust oder im Vortriebsbereich und der Dokumentation von Karsterscheinungen (Kapitel 7.2) wird ein besonderes Augenmerk auf potenzielle Initialfugen gelegt. Das Erkennen von Initialfugen auf der Ausbruchfläche ist ein Hinweis, dass sich entlang der Trennfläche ein Hohlraum im noch auszubrechenden Bereich befinden könnte. Im Gegensatz zu den Feldbeobachtungen während den Erkundungsphasen wird nicht zwischen Initialfugen von lokaler und regionaler Bedeutung unterschieden, sondern alle Initialfugen gleich bewertet.

Anzeichen für Initialfugen auf der Ausbruchfläche sind (Abb. 7.2):

- angewitterte Trennflächen
- offene, verfüllte oder wasserführende Karströhren oder korrosiv aufgeweitete Trennflächen
- Lagen oder Trennflächen, die als mögliche Initialfuge wirken könnte wie z.B. Pyrit-, Stromatolithen-, Gips- oder markante Mergellagen

Der Aufwand der Kartierung der Initialfugen ist gering, da sie im Zusammenhang mit den geologischen und hydrologischen Aufnahmen im Rahmen der SIA 197 durchgeführt werden kann.

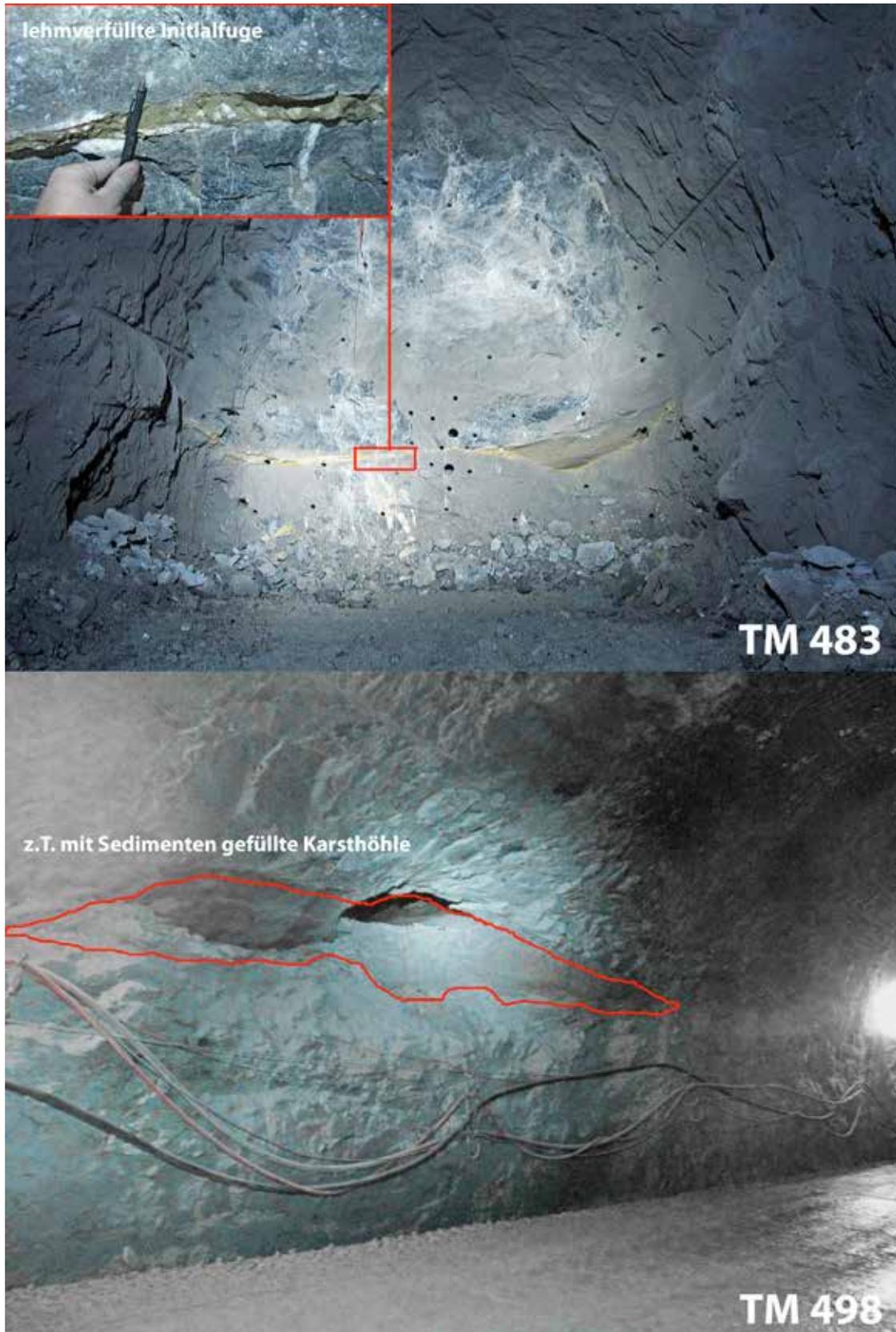


Abb. 7.2: Karsthohlräume und Initialfugen während des Vortriebs

## 7.1.2 Vorauserkundungsbohrung

Hinsichtlich der karstspezifischen Gefahren werden Vorauserkundungsbohrung mit dem Ziel durchgeführt, bautechnisch relevante Hohlräume, Wasserzutritte und Sedimentverfüllungen sowie Initialfugen zu erkennen und zu lokalisieren.

Anhand des Bohrverfahrens wird zwischen zerstörenden und gekernten Vorauserkundungsbohrung unterschieden (ggf. mit Preventer wenn hohe Wasserdrücke zu erwarten sind). Beide Verfahren sind grundsätzlich schlecht geeignet um einen bautechnisch relevanten Hohlraum im Ausbruchprofil zu erkunden, da sie weitgehend einen "Nadelstich" darstellen (Abb. 7.3). Dafür sind Bohrkern der gekernten Vorauserkundungsbohrungen gut geeignet, um Initialfugen zu erkennen, während dies bei zerstörenden Bohrungen nur schlecht möglich ist. Die Erkundungseffizienz von zerstörenden Bohrungen bezüglich der Initialfugen kann durch eine Bohrlochinspektion mittels Bohrlochkamera oder eines Bohrlochscans erhöht werden (Erstellen eines Pseudobohrkernes durch das Scannen der Bohrlochwand).

Erkennen von Hohlräumen in zerstörenden und gekernten Erkundungsbohrungen:

- Durchsacken der Bohrung
- Spülwasserverlust
- Bohrkleinverlust
- beige gefärbtes Spülwasser
- Bohrklein mit siltig-tonigen Sedimenten
- Bohrklein mit Sinterbruchstücken
- Wasserzutritt
- Luftströmung im Bohrloch

Die Wahrscheinlichkeit mit einer einzelnen Vorauserkundungsbohrung im Ausbruchprofil einen vorhandenen, bautechnisch relevanten Karsthohlraum zu erkunden ist gering; respektive die Wahrscheinlichkeit gross, dass eine Bohrung keinen Hohlraum anschneidet, obschon ein Hohlraum sich im Profil befindet (Fehler 2ter Art) (Abb. 7.2). Dies ist unabhängig von der Auftretenswahrscheinlichkeit eines solchen Hohlraumes. Die Erkundungswahrscheinlichkeit hängt von der Ausbruchfläche sowie die zu detektierende Hohlraumgrösse ab.

Das Erkennen von Initialfugen in einer Vorauserkundungsbohrung ist ein Hinweis, dass sich im Ausbruchprofil ein mit der Bohrung nicht erkundeter Hohlraum befinden könnte. Im Gegensatz zu den Bohrungen während den Erkundungsphasen (Kapitel 6.6.3) wird nicht zwischen Initialfugen von lokaler und regionaler Bedeutung unterschieden, sondern alle Initialfugen werden gleich bewertet.

Anzeichen für Initialfugen in zerstörenden Erkundungsbohrungen:

- Angewittertes/verwittertes Bohrklein
- Bohrklein mit siltig-toniger Sedimente
- Bohrklein mit Sinterbruchstücken
- Bohrklein mit Pyritkristallen
- Bohrklein von Mergel oder Tongestein

Anzeichen für Initialfugen an Bohrkernen und Pseudobohrkernen:

- Karströhren
- verkarstete Trennflächen
- pyritreiche Lagen
- Stromatolithlagen

Der Vorauserkundungsaufwand der Vorauserkundungsbohrungen ist gut der zu erwarteten Karstgefährdung anzupassen (Lage und Anzahl der Vorauserkundungsbohrungen).

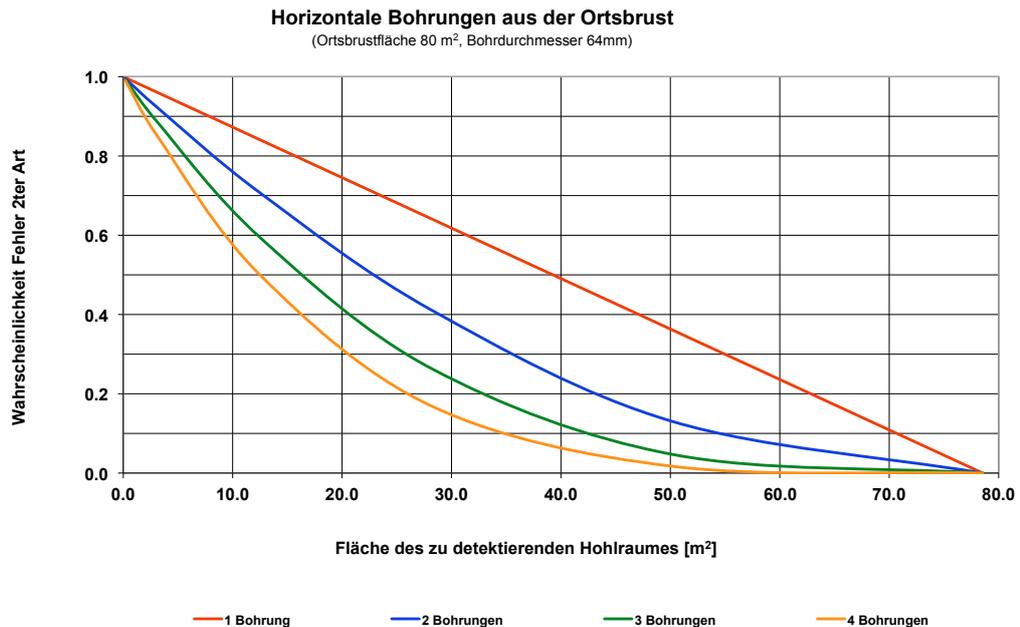


Abb. 7.3: Wahrscheinlichkeit mit einer Erkundungsbohrung eine Karströhre zu finden

In der Grafik ist die Fehlerwahrscheinlichkeit dargestellt, mit einer oder mehreren horizontalen Bohrungen einen Hohlraum gegebener Grösse nicht zu detektieren (Fehler 2. Art).

### 7.1.3 Bohrlochgeophysikalische Methoden

Geophysikalische Messungen aus einer Bohrung im Ausbruchprofil erlauben das Erkunden von bautechnisch relevanten Karsthohlräumen über das ganze Ausbruchprofil sowie des angrenzenden Gebirges (z.B. Bohrlochgeoradar, -seismik, -geoelektrik). Unter günstigsten Voraussetzungen lassen sich luft- oder wassergefüllte bautechnisch relevante Karsthohlräume bis zu einem Abstand von 30 m erfassen. Hingegen ist die Erkundungseffizienz von sedimentverfüllten Hohlräumen für die meisten Methoden gering.

Heute (April 2012) sind verschiedene Produkte auf dem Markt erhältlich mit stark variierenden Erkundungseffizienzen bezüglich des Vorkommens eines bautechnisch relevanten Karsthohlraumes im Ausbruchprofil. Die Wahl des geeigneten Verfahrens hängt unter anderem von der Vortriebsart, den logistischen und organisatorischen Projektgegebenheiten sowie den geologischen Verhältnisse ab.

Der Vorauserkundungsaufwand der bohrlochgeophysikalischen Methoden ist gut der zu erwarteten Karstgefährdung anzupassen (Einsatz nur in gewissen Abschnitten der Vortriebsstrecke).

### 7.1.4 Tunnelgeophysikalische Methoden

Für die Vorauserkundung des Gebirges mittels geophysikalischer Methoden können sowohl Verfahren vom Untertagebauwerk aus als auch Untertagebauwerk-Geländeoberfläche Verfahren eingesetzt werden (z.B. Seismik, Geoelektrik, Georadar, Gravimetrie). Die tunnelgeophysikalischen Methoden finden ihren Einsatz bei der Erkundung von bautechnisch relevanten Hohlräumen vor der Ortsbrust als auch im Nachbereich des Ausbruches (Erkundung für den Endausbau). Zur Erkennung von Initialfugen erweisen sich die Verfahren als ungeeignet. Betreffend Erkundungseffizienz und Wahl der Methoden gilt dasselbe wie für die bohrlochgeophysikalischen Methoden.

Der Vorauserkundungsaufwand der tunnelgeophysikalischen Methoden kann nur bedingt den zu erwarteten Karstgefährdung angepasst werden (Einsatz nur in gewissen Abschnitten der Vortriebsstrecke).

### 7.1.5 Sondierstollen

Ein Sondierstollen (Vorauserkundungsstollen) ist ein Stollen mit kleinem Querschnitt entlang der geplanten Tunnelachse oder entlang eines künftigen Sicherheitsstollens, der zur Erkundung des Gebirges vorgetrieben wird. Er kann auch als Pilot- oder Sicherungsstollen ausgeführt werden. Die Vorauserkundung mittels eines Sondierstollens weist die beste Erkundungseffizienz bezüglich Karsthohlräumen und Initialfugen auf, kann jedoch nur bedingt an die KarstALEA-Zonen angepasst werden. Deshalb ist der Einsatz eines Sondierstollens nur bei einer hohen Risikoüberprüfung über längere Streckenabschnitte wirtschaftlich. Zu beachten ist, dass der Vortrieb des Sondierstollens, trotz kleinem Querschnitt, dieselben Gefährdungsbilder wie der Vollausbau birgt.

Die Ortsbrust sowie die Paramente des Sondierstollens werden geologisch-hydrogeologisch kartiert, wobei ebenfalls die karstspezifischen Aspekte gemäss Kapitel 7.2 aufgenommen werden. Vor allem das Erkennen von potenziellen Initialfugen erlaubt eine karstrelevante Prognose des nicht direkt aufgeschlossenen Profilbereichs des Endausbaus.

Um das Erkundungsrisiko im nicht direkt erkundeten Profilbereich weiter zu reduzieren, können (radiale) Sondierbohrungen oder geophysikalischen Methoden zur Erkundung des umliegenden Gebirges (z.B. Georadar, Geoelektrik, Seismik, Gravimetrie) eingesetzt werden. Der Einsatz der geeigneten Methode hängt von der Erkundungstiefe der Methode, der Art des Sicherungsausbau, sowie den logistischen und organisatorischen Gegebenheiten ab.

## 7.2 Dokumentationen der Karsterscheinungen während des Vortriebs

Während des Vortriebs werden angefahrene Karsterscheinungen dokumentiert. Die Dokumentation bildet die Entscheidungsgrundlage für die Wahl der geeigneten Massnahmen für die Vortriebssicherheit, den Endausbau und zum Schutz der Umwelt. Des Weiteren werden die erhobenen Aufschlussdaten in das KarstALEA-Modell integriert und die karstbedingte Gefährdung neu beurteilt. Die Dokumentation dient ebenfalls als Grundlage für den Vergleich zwischen den prognostizierten und tatsächlich angetroffenen Karstverhältnissen.

### 7.2.1 Kartierung der Initialfugen während des Vortriebs

Während den regulären geologischen Ortsbrust- und Paramentaufnahmen (SIA 197) soll ebenfalls ein Augenmerk auf potenzielle Initialfugen (tektonische und stratigraphische) gerichtet sein. Dabei wird nicht zwischen lokalen und regionalen Initialfugen unterschieden. Siehe auch Kapitel 7.1.1.

### 7.2.2 Dokumentation der Karsthohlräume während des Vortriebs

Wird ein Hohlraum angefahren, wird der Zugang für eine Begehung gesichert. Die Begehung hat zum Ziel den Hohlraum zu dokumentieren und Massnahmen für die Beherrschung und/oder Erhaltung auszuarbeiten.

Die Dokumentation eines angefahrenen Karsthohlraumes beinhaltet mindestens folgende Punkte:

- speläologische Vermessung (Höhlenplan mit Grundriss, Längsschnitt und Gangprofile, Polygonzug mit Raumdaten)

- morphologische Hohlraumbeschreibung
- hydrologische Beschreibung (z.B. aktiv/fossil, Schüttungsmenge, Wasserzutritte)
- Beschreibung der Sedimentverfüllung (Art der Sedimente, Zustand, Volumen)
- geologische Beschreibung (Formation, Beschreibung der Initialfugen)
- Beurteilung der Standfestigkeit des Hohlraumes
- Beschreibung der Höhlenbewetterung
- bio- und archäospeläologische Beschreibung
- Beurteilung der Schutzwürdigkeit des Hohlraumes => Kriterien Geotopschutz (Bitterli, 1997)
- Erstellen einer Fotodokumentation

### **7.2.3 Dokumentation der karsthydrogeologischen Verhältnisse während des Vortriebs**

Die hydrogeologischen Verhältnisse im Vortriebsbereich werden regelmässig dokumentiert. Die "üblichen" hydrogeologischen Aufnahmen werden mit karstspezifischen Beobachtungen ergänzt.

#### **7.2.3.1 Dokumentation der Wassereintrittsstellen**

Die Dokumentation beinhaltet mindestens folgende Punkte:

- periodische Messung der Schüttung, gegebenenfalls kontinuierlich
- Beschreibung der Eintrittsstelle (Kluft, Schichtfuge, Karströhre, aus Bohrung)
- Beschreibung der Trübung des Wassers
- Chemische Beschreibung des Wassers (CaCO<sub>3</sub>-Sättigung, pH-Wert, Sulfatgehalt → u.U. umfassende Wasseranalyse bezüglich Hinweisen auf Beeinflussung des Betons (Na, Mg, etc.))

Die Wassereintritte im rückwärtigen Bereich werden ebenfalls regelmässig wie oben beschrieben, um den zeitlichen Verlauf zu dokumentieren.

#### **7.2.3.2 Monitoring der potenziell beeinträchtigten Karstquellen und Aquifere während des Vortriebs**

- Messung der Quellschüttungen (kontinuierlich)
- Messung der Trübung an den Quellen
- Messung des Wasserchemismus an den Quellen
- Messung der Piezometerstände im Karstsystem oder in geeigneten Bohrungen

## **7.3 Erkundung des Nahbereichs für den Endausbau**

Je nach Projektanforderungen ist der Nahbereich des Ausbruchs bezüglich Karsthohlräumen (Lage und Charakterisierung der Karsthohlräume) zu erkunden.

Die Grösse (Tiefe) des zu untersuchenden Gebirgsbereichs sowie die kritische Karsthohlraumgrösse wird in der Regel bauherrseitig bestimmt.

Zur Erkundung können die verschiedenen bereits für die Vorauserkundung vorgestellten Methoden zum Einsatz kommen. In der Regel wird ein kombiniertes Verfahren aus geophysikalischen Methoden und Erkundungsbohrungen zur Überprüfung angewendet.

Die Tunnelkartierung der Initialfugen dient der Planung (Ort und Aufwand der Erkundungsmassnahmen).

## 7.4 Verfassen des Schlussberichtes

Die Dokumentation (Kapitel 7.2) und Auswertung der angefahrenen Karstverhältnisse sind Bestandteil des geologischen und hydrologischen Schlussberichtes und dienen unter anderem der Interpretation allfälliger in der Betriebsphase auftretender Anomalien.

Der Schlussbericht beinhaltet ebenfalls einen Massnahmen-/Kontrollplan für die Bewirtschaftungsphase, gegebenenfalls auch für den Rückbau des Bauwerks.

Die angefahrenen Karsthohlräume werden hinsichtlich der Gefahren für das Bauwerk, den Betrieb und die Umwelt beurteilt. Darunter fallen unter anderem:

- Instabilität der angefahrenen Hohlräume bis hin zu Tagbruch
- Instabilität des Ausbruches durch das Nachbrechen in einen naheliegenden, nicht angefahrenen Karsthohlraum
- temporäre Wassereinbrüche nach ausserordentlichen Niederschlägen und/oder Schneeschmelze mit einer Schüttung bis zu mehreren  $\text{m}^3/\text{s}$
- Versinterung der Drainage
- Gefahr des Quellens der Sedimentfüllung
- schlammstromartiges Entleeren sedimentverfüllter Hohlräume
- Gefahr der Setzungen oder Erosion der Sedimentfüllung
- Einfluss auf Aquifere und Karstquellen

## 8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der Dissertation von Marco Filipponi im Jahr 2009 und weiteren Untersuchungen konnte statistisch belegt werden, was viele Karstwissenschaftler und aufmerksame Höhlenforscher schon lange vermutet haben: Die Höhlen sind nicht „zufällig“ verteilt, sondern folgen bestimmten Schichtfugen und Verwerfungen – den so genannten Initialfugen. Weiter häufen sich Karströhren in der Nähe der Oberfläche und des Karstwasserspiegels sowie auf bestimmten Niveaus, die früheren Vorfluturniveaus entsprechen – also in Abhängigkeit der aktuellen und paläo-speläogenetischen Bereiche. Auch weitere Charakteristika der Karströhren – Form und Ausrichtung, Wasserführung, Sedimentverfüllungen – hängen u.a. von diesen Faktoren ab. Diese Erkenntnisse bilden die wissenschaftliche Basis für eine probabilistische Prognose der Karströhrenverteilung und deren Charakteristika.

Im Rahmen des KarstALEA-Projektes konnte nun eine Methode entwickelt werden, welche diese Kenntnisse in der Praxis – im Speziellen im Untertagbau – nutzbar macht. Die KarstALEA-Methode wurde einerseits durch die Anwendung auf bestehende Tunnels in unterschiedlichen geologischen Kontexten getestet (back analysis). Andererseits bot sich im Laufe des Projektes die Gelegenheit, die KarstALEA-Methode an zur Zeit geplanten und z.T. inzwischen realisierten Tunnels zu testen. Die Resultate entsprechen unseren Erwartungen und belegen, dass die Anwendung der KarstALEA-Methode zweckdienliche und differenzierte Karst-Prognosen ermöglicht.

Die „back analysis“ haben gezeigt, wie stark die Bearbeitungstiefe und Bearbeitungsqualität der Karstprognosen bisher von den Kenntnissen der entsprechenden Bearbeiter und den gesetzten Prioritäten abhängen. Einerseits wurden bereits bei verschiedenen Tunnelprojekten mindestens einzelne Konzepte der KarstALEA-Methode angewendet, ohne dass diese explizit bekannt und benannt wurden. So wurden z.T. besonders wasserführende Schichten oder besonders verkarstungsanfällige Schichten ausgeschieden, diese jedoch nicht als Initialfuge angesprochen. Bei anderen Tunnelprojekten wurde der Karst stiefmütterlich behandelt und kaum differenziert („nicht prognostizierbar“, karstspezifische Gefahr unterschätzt etc.). Die KarstALEA-Wegleitung kann hier einen wichtigen Beitrag zur begrifflichen und inhaltlichen Harmonisierung von Karstprognosen im Tunnelbau leisten.

Sowohl die „back analysis“ wie auch die aktuellen Fallbeispiele haben gezeigt, dass die KarstALEA-Untersuchungen eine sinnvolle Ergänzung der bisher üblichen Charakterisierung des Gebirges gemäss SIA 199 darstellt. Die Resultate bilden – zusammen mit anderen Aspekten – die Basis für Entscheidungen, um die Risiken im Tunnelbau durch verkarstete Gebirge genauer einzuschätzen und geeignete Massnahmen zu ergreifen. Sie helfen der Bauherrschaft das Risiko, auf unvorhergesehene Probleme zu stossen, zu reduzieren und ermöglichen den Planern und ausführenden Unternehmen sich auf die Verhältnisse einzustellen.

Die Hauptschwierigkeit bei der Anwendung der KarstALEA-Methode – sowohl bei den „back analysis“ wie auch bei den aktuellen Tunnelprojekten – war eine mangelnde Datenlage respektive eine Datenlage, die den (komplexen) geologischen Verhältnissen nicht immer entsprach. Die KarstALEA-Prognosen können nie genauer sein als jene der Geologie, da das geologische 3D-Modell die Grundlage aller KarstALEA-Untersuchungen ist. Wenn z.B. nicht bekannt ist, wo eine Schicht durchörtert wird, kann auch nicht bestimmt werden, wo die darin enthaltene Initialfuge den Tunnel schneidet und wo mit dem damit verbundenen erhöhten Risiko eines bedeutenden Wassereintruchs zu rechnen ist. Meist kann jedoch mit einer guten Koordination der verschiedenen Untersuchungen die Unsicherheiten gezielt dort reduziert werden, wo der daraus resultierende Erkenntnisgewinn am grössten ist.

Die vorgeschlagene KarstALEA-Methode integriert die – aus der Sicht des Autorenteam – für den Tunnelbau relevantesten Erkenntnisse zur Speläogenese und Karst-Hydrogeologie. Mit Hilfe der „back analysis“ und der „reale“ Tunnelprojekte konnte die

Methode verfeinert werden, wobei der praktischen Anwendbarkeit insbesondere mit redundanten Untersuchungen ein spezielles Gewicht beigemessen wurde. Nun ist es an den interessierten Geologiebüros und Planern, die Methode anzuwenden und weiter zu testen. Da die KarstALEA-Methode mehrere neuartige Konzepte enthält, die in der Ingenieurgeologie bisher kaum bekannt waren, kann bei Bedarf der Einstieg in die Anwendung der KarstALEA-Methode durch einen entsprechenden Kurs erleichtert werden. Bei Fragen und Schwierigkeiten stehen das Autorenteam und das Schweizerische Institut für Speläologie und Karstforschung gerne zur Verfügung.

Der KarstALEA-Ansatz kann – neben dem Untertagbau – auch für all jene Projekte hilfreich sein, die von besseren Kenntnissen der Lage und Charakteristika der Karströhren profitieren können – sei es um Karströhren möglichst zu meiden oder um diese zu finden. Dazu gehören insbesondere:

- grosse Bauvorhaben wie Windräder, Brücken, Dämme, Autobahnen etc. (Baugrundstabilität)
- Abdichtung von Stauseen in Karstgebieten → Auffinden von undichten Stellen
- Beurteilung von Naturgefahren → Gefahrenhinweiskarten und Gefahrenkarten insbesondere für Absenkungen und Einbrüche (Dolinen)
- Wasserfassungen → Trinkwasser, (unterirdische) Wasserkraft, Geothermie
- Fragestellungen zur (künstlichen) Infiltration im Karst → Infiltration von Grauwasser, Regenwasser etc., Grundwasserschutz
- Modellierung von Karstsystemen → Grundlagenforschung

Entsprechende Anpassungen und Ergänzungen der KarstALEA-Methode für andere Anwendungen sind z.T. schon am Laufen. Die KarstALEA-Methode wird sich in den nächsten Jahren daher sicher weiterentwickeln (neue Anwendungen, Erfahrungen aus der Praxis, neue wissenschaftliche Erkenntnisse), wobei die konkrete Nachfrage von der Privatwirtschaft, der öffentlichen Hand und der Forschung ein entscheidender Faktor sein werden.

Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstologie  
Case postale 818  
2301 La Chaux-de-Fonds

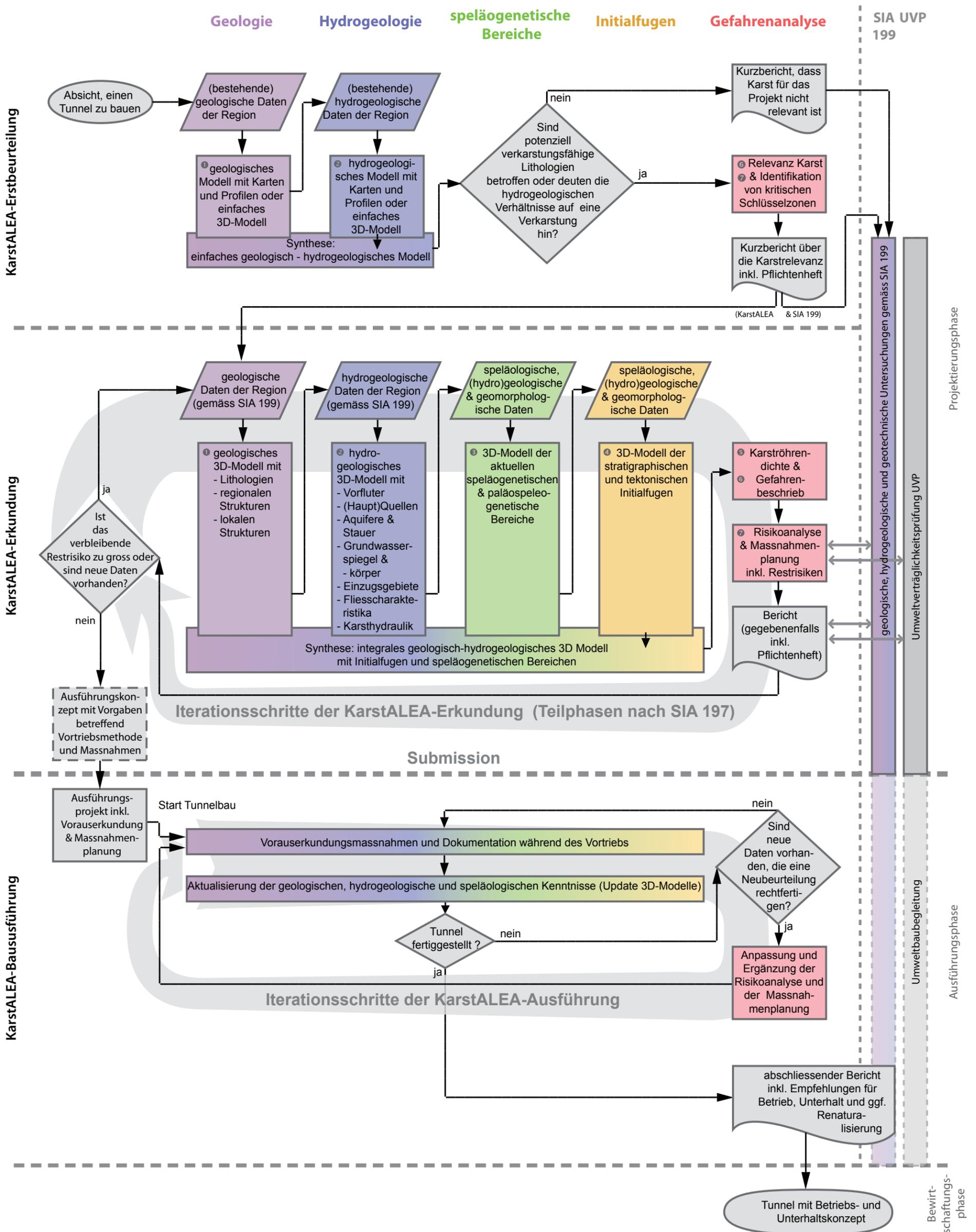
Tel. 032/ 913 35 33  
Fax 032/ 913 35 55  
info@isska.ch

[www.isska.ch](http://www.isska.ch)

## Anhänge

<b>I</b>	<b>Flowchart</b> .....	<b>157</b>
<b>II</b>	<b>Methodenübersicht</b> .....	<b>158</b>
<b>III</b>	<b>Prognoseprofil</b> .....	<b>159</b>
<b>IV</b>	<b>Lithologien</b> .....	<b>160</b>
<b>V</b>	<b>Aktuelle speläogenetische Bereiche</b> .....	<b>161</b>
<b>VI</b>	<b>Paläo-speläogenetische Bereiche</b> .....	<b>162</b>
<b>VII</b>	<b>KarstALEA-Glossar</b> .....	<b>163</b>
<b>VIII</b>	<b>Verkarstungscharakteristika verschiedener in der Schweiz vorkommender Lithologien</b> .....	<b>176</b>
<b>IX</b>	<b>Berechnung der Karströhrendichteverteilung</b> .....	<b>181</b>
<b>X</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>187</b>
<b>XI</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>189</b>

# Anhang I: Ablauf der KarstALEA-Untersuchungen



# Anhang II: Untersuchungskonzept der KarstALEA-Erkundung

**Ziel, verwendete Daten und angewandte Methoden der einzelnen Untersuchungsschritte inkl. Angaben zum karst-spezifischen Erkenntnisgewinn, zur Priorisierung und zum zeitlichen Ablauf (Aufteilung nach Teilphasen gemäss SIA 197). Gewisse Untersuchungen sind KarstALEA-spezifisch und ergänzen die üblichen geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen, andere werden schon standardmässig durchgeführt (SIA 199).**

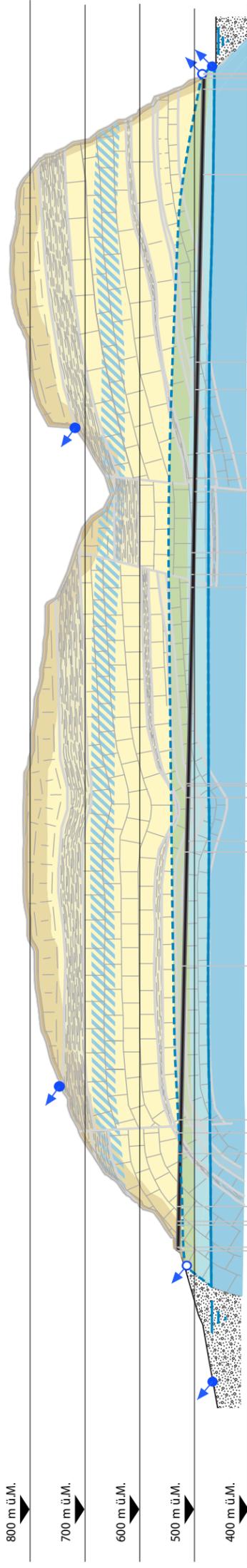
Untersuchungsschritte	Ziel	Daten (v = vorhanden, ü = wird im Rahmen der üblichen Untersuchungen erhoben; s = Kalea-spezifisch)		Methoden (ü = übliche Untersuchung; s = Kalea-spezifische Untersuchung)	Karst-spezifischer Erkenntnisgewinn <sup>(a)</sup>	Priorität <sup>(b)</sup>	Untersuchungsschwerpunkte während der Projektierung <sup>(c)</sup>							
		erforderlich	erwünscht				Erstbeurteilung	Vorstudie	Vorprojekt	Auflageprojekt	Bauprojekt			
												E0	E1	E2
Geol. Modell	G1	geologisches 3D-Modell: Lage der Schichten (Lithologien) & regionale Strukturen (Basis für weitere Untersuchungen)	digitales Höhenmodell, geologische Profile & Karten	Daten aus den üblichen geologischen Untersuchungen (SIA 199) + geologische Beschreibungen, Strukturkarten, Isohypsenkarten, geologische & lithologische Literatur, Sondierbohrungen etc.	v/ü	ü	X	1	XX	XXX	e	e	e	
	Hydrogeologisches Modell	H1	konzeptionelles hydrogeologisches 3D-Modell: Identifizierung der hydrogeologischen Karstsysteme, deren Einzugsgebiete und der potentiell beeinflussten Grundwasservorkommen und Quellen. Darstellung der Geometrie und Struktur der Karstsysteme in einem qualitativen 3D-Modell	Strukturalgeologisches 3D-Modell (G1), oberirdisches Gewässernetz (z.B. aus Topo-Karten) und Quelldaten (mindestens Lokalisierung & Eckdaten zu deren Schüttung).	Alle weiteren verfügbaren hydrogeologischen Daten (georeferenziert) wie z.B. Quellschüttungen und -schwankungen, Quellmonitoring, Piezometerdaten, Gewässerschutzkarten, Berichte zur Trinkwasserversorgung, bestehende Tracerversuche, Orthophotos, speläologische Daten	v/ü/s	ü/s	XXX	1	XX	XXX	e	e	e
		H2	Verifizierung der Einzugsgebiete auf der Grundlage der mittleren Abflusshöhe	Schüttungsdaten zu den grösseren Quellen, mittlere Abflusshöhe (aus meteorologischen Daten, vgl. Pfaundler & Zappa, 2006) oder Vergleichswerte benachbarter (gut bekannter) Karstgebiete	Quellkataster, Quellmonitoring	v/ü	ü	X	2		XX	XXX	e	e
		H3	Präzisierung der Einzugsgebiete und Abschätzung der Fließcharakteristika aus hydrologischen Daten	Hydrogramme zu den grösseren Quellen	Quellkataster, Quellmonitoring, Abfluss- und Hochwasserchroniken, Meteodaten meteorologischen Daten (v.a. Niederschlagsaufzeichnungen, Schneedecke, Zeitpunkt Schneeschmelze), Orthofotos, evtl. Daten von natürlichen Tracern wie hydrochemische- und Isotopendaten	v/ü/s	ü/s	XX	2		XX	XXX	e	e
		H4	Validierung der Einzugsgebiete und Abschätzung der Fließcharakteristika aus Tracerdaten	Daten von Tracerversuchen (Abstandsgeschwindigkeiten, Durchgangskurven, Rückgewinnungsrate)		v/ü/s	ü	XX-XXX	2	X	XX	XXX	e	e
		H5	Bestimmung des Schwankungsbereichs des Karstwasserspiegels (und zu erwartende hydraulische Drücke)	Piezometer-/Drucksondendaten aus Höhlen, Bohrlöchern und/oder Quellen, digitales Höhenmodell	Hydrogramme, langjährige Abfluss- und Hochwasserchroniken, Meteodaten, geomorphologische und/oder sedimentologische Daten aus Höhlen	v/ü/s	ü/s	XXX	1	X	XX	XXX	e	e
H6	Abschätzung möglicher Schüttungen	Kenntnis Einzugsgebiete (H1-H4) und Schwankungsbereich Karstwasserspiegel (H5), Niederschlags-/ Schneeschmelzenzenarien	Piezometer-/Drucksondendaten aus Höhlen, Bohrlöchern und/oder Quellen, Hydrogramme, Meteodaten, Resultate hydraulische Bohrlochtests, Geometrie und hydraulische Charakterisierung des Karstsystems	v/ü/s	ü/s	XX	3		XX	XXX	e	e		
Speläogenetische Bereiche	S1	Ausscheidung der aktuellen speläogenetischen Bereiche: Epikarstbereich, Epikarstschachtbereich, Schachtbereich, Horizontalhöhlenbereich, Initialbereich	Daten des hydrogeologischen Modells (H1)	Höhrendaten, Aufschlüsse, geomorphologische Daten, Piezometer-/ Drucksondendaten ...	v/ü/s	ü/s	XXX	1	X	XXX	XX	e	e	
	S2	Rekonstruktion der paläo-Horizontalhöhlenbereiche aus Literaturangaben	Literaturdaten zur Landschaftsentwicklung (v.a. Terrassen) und Höhlenniveaus		ü	ü	XX	1	X	XXX				
	S3	Ausscheidung der paläo-Horizontalhöhlenbereiche aus Höhlendaten	Höhrendaten (Eingangsdaten und/oder Höhenvermessung); DGM		v	s	XXX	2		XXX	X			
	S4	Ausscheidung der paläo-Horizontalhöhlenbereiche aus geomorphologischen Daten	digitales Höhenmodell und/oder geomorphologische Literatur	Literatur	v	s	XXX	2		XXX	X			
	S5	Rekonstruktion der tieferliegenden paläo-Horizontalhöhlenbereiche aufgrund geophysikalischer Untersuchungen	geophysikalische Daten		v	s	XX	2		XXX	X	e	e	
	S6	Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche	Höhlenvermessungsdaten und/oder speläomorphologische Daten	Aufschlüsse, geomorphologische Daten	v/s	s	XXX	1		XXX	X			
	S7	Bestimmung der zu erwartenden Gangdimensionen	Höhlenvermessungsdaten		s	s	XX	3		XXX				
	S8	Bestimmung der Karströhrendichte der speläogenetischen Bereiche	Referenzdaten (dieses Dokument)	Höhlenvermessungsdaten	v	s	X-XXX	3		XXX				
Modell der Initialfugen	I1	Identifikation der Initialfugen aus Literaturangaben	geologische und/oder speläologische Literatur	Geologische Berichte, Karten	v/ü	ü	X-XXX	1		XXX	e	e	e	
	I2	Identifikation der Initialfugen (3D-Modell) aus Aufschlussdaten	geologische Kartierung (inkl. Aufschlussbilder) und/oder digitales Höhenmodell und/oder Luftbilder	geologische Literatur	v/s	s	X	3		XX	XXX	e		
	I3	Identifikation der Initialfugen (3D-Modell) aus Bohrlochdaten	Bohrlochdaten (z.B. optische Analyse am Kern oder mit Bohrschneider, hydraulische Tests, Bohrlochgeophysik)		ü/s	s	XX	2		X	XXX	e	e	
	I4	Identifikation der Initialfugen (3D-Modell) aus karstmorphologischen Daten	geomorphologische Daten (Kartierung und/oder Luftbilder und/oder digitales Höhenmodell)	Höhleninventar, Geotopinventare, Felddaten	v/s	s	XX	1		XXX	e	e		
	I5	Identifikation der Initialfugen (3D-Modell) aus speläomorphologischen Daten	speläomorphologische Daten aus dem Feld und/oder Literatur	Höhleninventare, Höhlendokumentation, Geotopinventare	v	s	XX	2		XXX	e			
	I6	Identifikation der Initialfugen (3D-Modell) aus Höhlenvermessungsdaten	Höhlenvermessungsdaten	Höhleninventare, Höhlendokumentation	v	s	XXX	2		XXX	e			
	I7	Detektion von Karsthohlräumen mittels geophysikalischer Verfahren	geophysikalische Daten (Versuchsdaten)		ü/s	ü/s	X	3			X	XXX	e	
Risikobeurteilung	R1	Einteilung des Gebirges in Zonen mit verschiedener Karströhrendichte	Daten zu den speläogenetischen Bereichen und den Initialfugen		v/ü/s	s	XXX	1		XXX	XXX	XXX	e	
	R2	Ausscheidung der KarstALEA-Zonen mit vergleichbaren Gefahren, Charakterisierung der Gefahren für jede KarstALEA-Zone	Daten zu den speläogenetischen Bereichen und zur Hydrogeologie	Höhleninventare, Archive der Höhlenforscher, Geotopinventare, spezifische Beobachtungen	v/ü/s	s	XXX	1	X	XXX	XXX	XXX	e	
	R3	Gefährdungs- & Risikoanalyse sowie Massnahmenplanung	siehe oben + Projektdaten		ü/s	s	XXX	1		X	XXX	XXX	e	

(a) X = mässiger; XX = grosser; XXX = sehr grosser Erkenntnisgewinn bezüglich des Karstes

(b) 1 = unentbehrlich; 2 = je nach Datenlage und Situation sehr empfohlen; 3 = je nach Datenlage und Situation empfohlen

(c) X = allgemeine (grobe) oder ergänzende Untersuchung; XX = bedeutende Untersuchung; XXX = Untersuchungsschwerpunkt; e = mit neuen Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen ergänzen / verfeinern

## Anhang III: KarstALEA-Prognoseprofil



Profil entlang der Tunnelachse mit den KarstALEA-Zonen und Quellen und KarstALEA-Stollenband:  
 Angaben zur den erwarteten Karsthöhlencharakteristika, zur Karsthöhrendichte (Eintretenswahrscheinlichkeit -> Gefährdungsbeurteilung), zum hydrogeologischen und speleogenetischen Kontext sowie zur Prognosegenauigkeit

- verwendete Abkürzungen**  
 EKB Epikarstbereich  
 EKSB Epikarstschichtbereich  
 SB Schachtbereich  
 HHB Horizontalhohlenbereich  
 IB Initialbereich
- paläo-... (paläospeleogenetische Bereiche)**  
 paläo- Epikarstbereich  
 VEKSB vadoser Epikarstschichtbereich  
 VSB vadoser Schachtbereich  
 eSB epiphreatischer Schachtbereich  
 eHHB epiphreatischer Horizontalhohlenbereich  
 pHHB phreatischer Horizontalhohlenbereich  
 piB phreatischer Initialbereich

SIA 199		0.00	100.00	200.00	300.00	400.00	500.00	600.00	700.00	800.00	900.00	1000.00	1100.00	1200.00	1300.00	1400.00	1500.00	1600.00	1700.00	1800.00	1900.00	2000.00	2100.00	2200.00	
Durchmesser Karst-Hohlräume	2(-3)	2-3	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-3	2-3
druckhaftes Wasser	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
maximale Druckhöhe	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
max. Karstwasseranfall pro Karströhren	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Sedimentverfüllungen	2-4	2-4	2-(4)	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4
Quellen (projiziert)																									
hydrogeologische Zonen																									
speleogenetische Bereiche																									
paläo-speleogenetische Bereiche																									
Initialtufen	0	1	0	12	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
Karsthöhrendichte	3	2-3	2-3	2	2	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
KarstALEA-Zonen																									
Prognosegenauigkeit																									

KARST		1	2	3	4
Durchmesser Karst-Hohlräume (volumen)	[m]	< 0.2	0.2 - 2	2 - 10	> 10
druckhaftes Wasser (Vollständigkeit)	-	< 2%	2 - 20%	20 - 100%	> 100%
maximale Druckhöhe (über Bauwerkssohle)	[m]	kaum	temporär < 50 m	temporär > 50 m	permanent (über 1)
max. Karstwasseranfall pro Karströhren	[l/s]	< 5	5 - 50	50 - > 100	> 100
Sedimentverfüllungen	-	kaum Sed. Klies	Blocke & Kles	Lehm kohäsiv	Lehm nicht kohäsiv
Quellen	permanente Quelle				temporäre Quelle
hydrogeologische Zonen	vados		epiphreatisch		phreatisch
speleogenetische Bereiche	EKB	EKSB	SB	HHB	IB
paläo-speleogenetische Bereiche	pal-EKB	pal-EKSB	pal-SB	pal-HHB	pal-IB
Initialtufen	0	1	1	1	2
Gefahrenstufen	1	2	3	3	3
KarstALEA-Zonen	EKB	VEKSB	VSB	eSB	eHHB
KarstALEA-Zonen (Gefahrenstufenbeurteilung)					
Prognosegenauigkeit	gering	massig	gut	sehr gut	

## Anhang IV: Verkarstungsfähigkeit der Gesteinsformationen

Verkarstungscharakteristika der verschiedenen Gesteinsformationen und Anwendbarkeit der KarstAlea-Methode unter Berücksichtigung der Vorkommen dieser Gesteinsformationen in der Schweiz (z.B. Mächtigkeit der Formationen, etc.)

Lithologie (Formation)	Verkarstungsfähigkeit <sup>a)</sup>	Löslichkeit <sup>a)</sup>	stratigraph. Initialfugen <sup>b)</sup>	tektonische Initialfugen <sup>b)</sup>	späto-geneische Bereiche <sup>c)</sup>	Verkarstungscharakteristika	Anwendbarkeit der Methode <sup>d)</sup>														Bemerkung zur Anwendung von KarstALEA					
							G1	H1-7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	I1	I2	I3	I4		I5	I6	I7		
Kalk	3	2	3	2	3	klassische Formen, weiträumig entwickelte Karstsysteme, häufig mehrphasig (siehe Kapitel 3.2)	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	Hauptanwendungsbereich der Methode		
Dolomit	2	2	2	3	2	langsamere und kleinräumigere Verkarstung als im Kalk; bei geringmächtigen Vorkommen Verkarstung abhängig von der Verkarstungsfähigkeit des Umgebungsgesteins	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	in homogenen Dolomitabfolgen Methode weitgehend anwendbar, geringmächtige Bänke in wenig verkarstungsfähigem Gestein können als Initialfugen betrachtet werden	
Mergel	1	1	3	1	1	Verkarstung meist in kalkhaltigeren Bänken, selten durchgehend in mächtigen Mergel-Formationen	ja	ja	tw	ja	tw	tw	tw	Verkarstungsfähigkeit häufig unterschätzt (v.a. in den Alpen und im Jura, in der mittelländischen Molasse bisher keine Verkarstung bekannt)												
Kalkschiefer	2	1	2	3	2	Verkarstungsfähigkeit sehr variabel, u.a. abhängig vom Kalkgehalt; bei hohem Kalkgehalt kalkähnliche Verkarstung; wenig ausgeprägte Oberflächenformen	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	Anwendbarkeit stark von Kalkgehalt abhängig
Marmor	3	2	0	3	3	bei massiven Vorkommen, klassische Verkarstung; bei geringmächtigen Marmorbänder in kaum löslichen Formationen (z.B. Gneis) hingegen 2D-System	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	tw	tw	tw	tw	bei Marmorbänken mit beschränkter Mächtigkeit kann die ganze Bank als Initialfuge betrachtet werden
Kalkbrekzien & -konglomerate (inkl. Jura-Nagelfluh)	1	2	0	2	1	Stabilität und Verkarstung vom Matrixanteil und Grad der Zementierung (silikatisch oder kalzitisch) der Komponenten abhängig, z.T. Verkarstung weitgehend unterbunden. (Ausnahme: bedeutende Höhlen in der Jura-Nagelfluh / "Gompholithe" bekannt)	ja	ja	tw	ja	tw	ja	tw	tw	tw	tw	Schichtung selten ausgebildet, Initialfugen daher meist nicht bestimmbar									
Kreide	2	2	1	2	1	aufgrund hoher Porosität und Homogenität der Gesteinsmasse sind Hohlräume eher selten; Erosion spielt eine wichtige Rolle; in der Schweiz keine signifikanten Vorkommen	ja	ja	tw	ja	tw	ja	tw	tw	tw	tw	ja	nur eingeschränkt anwendbar, da kaum Hohlräume und eher diffuse Entwässerung								
Sandstein (mit Kalkmatrix)	2	1	3	3	1	je nach Kalkgehalt kalk-ähnliche Verkarstung	ja	ja	tw	ja	tw	ja	ja	ja	ja	ja	Verkarstungsfähigkeit häufig unterschätzt									
Rauhacke (Cornieule)	2	2	2	2	1	selektiv starke Verkarstung, Instabilitäten	ja	ja	tw	ja	tw	ja	tw	tw	tw	tw	tw	bei Rauhackebänken mit beschränkter Mächtigkeit kann die ganze Bank als Initialfuge betrachtet werden								
Gips & Anhydrit	3	3	1	3	2	Anhydrit kaum verkarstet (sonst Umwandlung in Gips); Gips schnell Entwicklung der Verkarstung im oberflächennahen Bereich; Verkarstungsstrukturen stark von Zwischenlagen abhängig	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	tw	tw	tw	tw	ja	häufig tektonisch stark beansprucht, Anwendbarkeit daher eingeschränkt (CH); spezielle Herausforderung aufgrund Chemismus (Beton); Instabilität
Salz	3	3	2	1	1	kaum Aufschlüsse, sehr schnelle Entwicklung der Verkarstung, entsprechend sensibel auf Veränderungen der hydrologischen Bedingungen; in der Schweiz keine signifikanten aufgeschlossenen Vorkommen	ja	tw	ja	ja	tw	ja	tw	tw	tw	n.	tw	meist weit unter Vorfluterniveau oder durch undurchlässige Deckschicht geschützt, daher kaum verkarstet, Anwendbarkeit daher eingeschränkt (CH)								

a) 0 = sehr schwach; 1 = schwach; 2 = mittel; 3 = hoch

b) 0 = sehr kleiner 1 = kleiner; 2 = mässiger; 3 = hoher Entwicklungsgrad des Karstrohrsystems auf stratigraphischen respektive tektonischen Initialfugen

c) 0 = sehr kleiner 1 = kleiner; 2 = mässiger; 3 = hoher Entwicklungsgrad der speleogentischen Bereiche (klassische Strukturen, Karsthöhlendichte, etc.)

d) ja = anwendbar, z.T. jedoch mit angepassten Interpretationsmodellen; tw = teilweise anwendbar; n. = nicht anwendbar

## Anhang V: aktuelle KarstALEA-Zonen

### Charakterisierung der KarstALEA-Zonen bezüglich dominanter speleogenetischer Prozesse, Hohlräumen, Wasser und Sedimenten sowie der damit verbundenen Gefahren

Hydrogeol. Zonen	Epikarstbereich	aktuelle KarstALEA-Zonen	typische Mächtigkeit / Morphologie der Grenze	dominante speleogenetische Prozesse	Hohlräume		Wasser / Hydrogeologie		Sedimente	
					Charakterisierung	Gefahren	Charakterisierung	Gefahr	Charakterisierung	Gefahr
Epikarst	Epikarstbereich	Epikarstbereich	0 - 15 m	oberflächennahe Verwitterung/Zerrüttung; diffuse und/oder konzentrierte Infiltration von Sickerwasser mit starker Lösungskraft, welches eine Vielzahl von Klüffeln erweitert	stark aufgelockelter Bereich mit einer Vielzahl korrosiv erweiterter Klüffeln und kleinen Karstströmen <small>(+ Hohlräume aus paläo-speleogenetischen Bereichen)</small>	sehr viele, jedoch eher kleine, mehrheitlich subvertikale Hohlräume; instabile übliche Masse: $\varnothing < 50$ cm	vados; der untere Teil des Epikarstes ist ein wichtiger Wasserspeicher des Karstes; hängendes Grundwasser	eher wenig Sedimente, v.a. Blöcke und Schutt (z.T. cryoklastisch) sowie eingeschwemmtes Material <small>(+ Sedimente aus paläo-sb)</small>	*** aufgrund geringer Mengen pro Hohlraum klein <small>(Achtung Sedimente aus paläo-SB &amp; paläo-EKSB)</small>	
		Grenze EKB- vEKSB	sehr unregelmässig		Wechsel von einer Dominanz von (kleinen) korrosiv erweiterten Klüffeln zu einer Dominanz von Schächten und Mäandern	z.T. Stauniveau, Basis hängendes Grundwasser				
		vadoser Epikarstschachtbereich	vEKSB	20 - 50 m	Lösung von subvertikalen Strukturen durch gravitativ eindringendes, korrosives Wasser; Hierarchisierung der Entwässerung	Karstströmen vertikal ausgerichtet; kleinere Schächte und Mäander; stark hierarchisierend (Frequenz mit der Tiefe abnehmend) <small>(+ Hohlräume aus paläo-speleogenetischen Bereichen)</small>	subvertikale Hohlräume; übliche Masse: $\varnothing$ 1-4 m; h: < 20 m	vados; Transizone; mit der Tiefe kontinuierliche Konzentration der Entwässerung	wenig bis mässig Sedimente, v.a. Blöcke & eingeschwemmtes Material <small>(+ Sedimente aus paläo-sb)</small>	*** eher klein v.a. Instabilitäten <small>(Achtung Sedimente aus paläo-SB)</small>
vados Zone	Schachtbereich	Grenze vEKSB-vSB			"Knick" in der Frequenzkurve					
		vadoser Schachtbereich	vSB	0 - > 1000 m	Lösung von subvertikalen Strukturen durch gravitativ eindringendes, korrosives Wasser	Karstströmen vertikal ausgerichtet (gravitativ); Schächte und Mäander, tendenziell grösser als in EKSB; kaum hierarchisierend (Frequenz weitgehend konstant in Funktion der Tiefe) <small>(+ Hohlräume aus paläo-speleogenetischen Bereichen)</small>	vados; Transizone; gravitative Entwässerung Richtung Karstwasserspiegel <b>Hochwasserspiegel</b>	wenig Sedimente, v.a. Blöcke <small>(+ Sedimente aus paläo-sb)</small>	*** eher klein, da selten; grössere Blockhalden möglich -> Instabilität	
		Grenze vSB-eSB	meist zur Quelle geneigt	Mehrheitlich Lösung von subvertikalen Strukturen durch gravitativ eindringendes Wasser; kurzzeitig (bei grossen Hochwasserereignissen) gesättigt; durch phtreatische Verhältnisse bedingte Prozesse sekundär	Karstströmen vertikal ausgerichtet (gravitativ); Schächte und Mäander wie in SB; vadosere Formen dominieren, vereinzelte phtreatische Formen möglich <small>(+ Hohlräume aus paläo-speleogenetischen Bereichen)</small>	meist vados, bei grösseren Hochwasserereignissen phtreatisch	v.a. Blöcke, z.T. feinkörniger klastischer Sedimente (Sand, Silt, Lehm) <small>(+ Sedimente aus paläo-sb)</small>	*** eher klein		
epiphreatische Zone	Horizontaltalbereich	Grenze eSB-eHHB	je nach Verhältnissen subhorizontal, treppentartig oder zur Quelle geneigt		Übergang von vertikalen zu subhorizontalen Ganganlagen, "Knick" in der Gangfrequenzkurve	grössere, subvertikale Hohlräume; übliche Masse: $\varnothing$ 1 - > 10 m; h: bis > 100m	permanente oder periodische (Schneeschmelze, Starkniederschlag, Gewitter) Wasserführung bis zu mehreren m <sup>3</sup> /s; je nach Wasserstand frei fließendes oder druckhaftes Karstwasser (Wassersäule bis zu mehreren Dekametern)			
		epiphreatischer Horizontaltalbereich	eHHB	Entwicklung des phtreatischen Karstströmennetzes zur Entwässerung grosserer Wassermengen (häufiges Hochwasser) Richtung Quelle	Karstströmen mehrheitlich subhorizontal ausgerichtet (dem hydraulischen Gradient folgend); kleinere und vereinzelte grosse Karstströme; phtreatische Formen: runde bis elliptische Gangformen, Loops, z.T. mit eingeschnittenen Canyons (oberer Bereich der Loops) und/oder Souffrages welche die Loops bei Niedrigwasser entwässern <small>(+ Hohlräume aus paläo-speleogenetischen Bereichen)</small>	je nach Verhältnissen phtreatisch oder vados, auch bei normalen Hochwasserereignissen phtreatisch	sehr grosse Mengen feinkörniger klastischer Sedimente (Sand, Silt, Lehm), z.T. viele Blöcke <small>(+ Sedimente aus paläo-sb)</small>	*** sehr gross, v.a. wenig kohäsive Sedimente mit mangelnder Tragfähigkeit; z.T. zeitlich verzögerte Sedimenteinbrüche (Hochwasser)		
		Grenze eHHB-pHHB	subhorizontal	Entwicklung des phtreatischen Karstströmennetzes zur Entwässerung des Basisabflusses und eines Teils des Hochwassers in Richtung Quelle; Entstehung eines Höhlenniveaus	Karstströmen mehrheitlich subhorizontal ausgerichtet (dem hydraulischen Gradient folgend); kleinere und vereinzelte grosse Karstströme; phtreatische Formen: runde bis elliptische Gangformen, Loops <small>(+ Hohlräume aus paläo-speleogenetischen Bereichen)</small>	<b>Niedrigwasserspiegel</b>	grössere Mengen feinkörniger klastischer Sedimente (Sand, Silt, Lehm) <small>(+ Sedimente aus paläo-sb)</small>	*** gross, v.a. wenig kohäsive Sedimente (Sedimenteinbruch)		
phtreatische Zone	Initialbereich	Grenze pHHB-pIB	subhorizontal		"Knick" in der Frequenzkurve	grösse, subhorizontale Hohlräume; übliche Masse: $\varnothing$ 1 - > 10 m	phtreatisch; konzentriert fließend			
		phtreatischer Initialbereich	pIB	Korrosive Erweiterung (mm) der verkarstungsfähigsten Strukturen (Initialfugen)	kaum Karstströme im eigentlichen Sinne (> 1 cm), Erweiterungen mehrheitlich entlang von Initialfugen; tendenziell mit der Tiefe abnehmende Frequenz <small>(+ Hohlräume aus paläo-speleogenetischen Bereichen)</small>	Hohlräume vernachlässigbar; übliche Masse: $\varnothing < 1$ cm	phtreatisch, diffus fließend (Wassersäule bis zu mehreren Hundert Metern)	keine nennenswerten Sedimente <small>(+ Sedimente aus paläo-sb)</small>	vernachlässigbar	

\*\*\* Die bedeutendsten sedimentbedingten Gefahren sind wenig kohäsive Sedimente (Sedimenteinbrüche), Instabilitäten (Ortsbrust, Kalotte, etc.) und die mangelnde Tragfähigkeit der Sedimente. Sie treten in den meisten speleogenetischen Bereichen auf, jedoch mit unterschiedlicher Häufigkeit und Intensität

## Anhang VI: paläo-KarstALEA-Zonen

### Charakterisierung der paläo-KarstALEA-Zonen bezüglich der Hohlräume und der Sedimente sowie der damit verbundenen Gefahren

paläo-spieloägenetische Bereiche	tyische Mächtigkeit / Morphologie der Grenze	heutige speiloägenetische Prozesse	Hohlräume		Sedimente		Wasser		Relevanz
			Charakterisierung	Gefahr	Charakterisierung	Gefahr	Gefahr		
paläo-Epikarstbereich pal-EKB	0 - 15 m	Einsturz, Sedimentation; fossil - z. T. mit Sedimenten verfüllt - oder in aktuelle Wasserzirkulation integriert	stark aufgelockerter Bereich mit einer Vielzahl korrosiv erweiterter Klüfflächen und kleinen Karströhren	sehr viele, jedoch eher kleine, mehrheitlich subvertikale Hohlräume; instabile übliche Masse: $\varnothing < 50 \text{ cm}$	meist total verfüllt, v.a. feinkörnige Sedimente; eingeschwemmt (marin oder fluvial), eingepresst (glazial) oder lufttransportiert (äolisch) sowie Block und Schutt (z. T. cryoklastisch)	mässig meist verfüllt, aber Volumen pro Hohlraum eher klein v.a. verfüllte Hohlräume; Instabilitäten; mangelnde Tragfähigkeit	Das zu den paläo-KarstALEA-Zonen gehörende Wasser gehört ebenfalls der Vergangenheit an. Daher bergen die paläospieloägenetische Bereiche per se keine spezifischen Gefahren bezüglich Wasser. Hingegen muss die Kombination der paläospieloägenetischen Bereiche mit dem heutigen hydrologischen Verhältnissen berücksichtigt werden (v.a. Verfüssigung von "alten" Sedimenten und subhorizontale Gänge weit über dem Grundwasserspiegel, die permanent mit Wasser gefüllt sind)	kommt sehr selten vor; bedeutende Sedimentverfüllungen aus sehr lange zurückliegenden Verkarstungsphasen möglich (z.B. Bohrerzschichten im Jura -> Sedimenteintrüche, Instabilität etc.)	
Grenze pal-EKB - pal-EKSB	sehr unregelmässig		Wechsel von einer Dominanz einer Vielzahl von (kleinen) korrosiv erweiterten Klüfflächen zu einer Dominanz von Schächten und Mäandern						
paläo-Epikarst-schachtbereich pal-EKSB	20 - 50 m		Karströhren vertikal ausgerichtet; kleinere Schächte und Mäander; stark hierarchisierend (Frequenz mit der Tiefe abnehmend)	subvertikale Hohlräume; übliche Masse: $\varnothing 1-4 \text{ m}$ ; h: $< 20 \text{ m}$	<b>z.T. vollständig mit feinkörnigen Sedimenten und Blöcke verfüllt</b>	<b>*** gross v.a. verfüllte Hohlräume; Instabilitäten; mangelnde Tragfähigkeit</b>			kann meist problemlos in die Beschreibung der aktuellen Bereiche integriert werden (vereinzelte Schächte & Mäander auch im EKB; Bedeutende Sedimentverfüllungen aus sehr lange zurückliegenden Verkarstungsphasen möglich (z.B. Bohrerz)
Grenze pal-EKSB - pal-SB		"Knick" in der Frequenzkurve							
paläo-Schachtbereich pal-SB	wenige Meter bis $> 1000 \text{ m}$	Karströhren vertikal ausgerichtet; Schächte und Mäander, tendenziell grösser als in pal-EKSB; kaum hierarchisierend (Frequenz weitgehend konstant in Funktion der Tiefe)	grössere, subvertikale Hohlräume; übliche Masse: $\varnothing 1- > 10 \text{ m}$ ; h: bis $> 100 \text{ m}$	z. T. vollständig mit feinkörnigen Sedimenten und Blöcke verfüllt	mässig weitgehend verfüllte Schächte eher selten, jedoch mit grossen Problemen (v.a. Instabilitäten, Tragfähigkeit) verbunden		kann meist problemlos in die Beschreibung der aktuellen Bereiche integriert werden (vereinzelte grosse Schächte auch im EKSB & EKB; Gesondert zu betrachten, wenn das Tal (glazial) übertieft wurde: pal-SB im heutigen IB & HHB		
Grenze pal-SB - pal-HHB	je nach Verhältnisse (paläo-)subhorizontal, treppenartig oder zur Paläo-Quelle geneigt	Übergang von grossmehrfach subvertikalen zu mehrheitlich subhorizontalen Ganganlagen; "Knick" in der Gangfrequenzkurve							
paläo-Horizontal-höhlenbereich pal-HHB	meist einige Dekameter (50 - 100 m, bis max. 500)	Karströhren mehrheitlich subhorizontal ausgerichtet; kleinere und vereinzelte grosse Karströhren z.T. auch vertikal; phreatische Formen: runde bis elliptische Gangformen, Loops	grosse, subhorizontale Hohlräume; durchschnittliche Masse: $\varnothing 1- > 10 \text{ m}$	sehr grosse Mengen feinkörniger klastischer Sedimente (Sand, Silt, Lehm), z.T. viele Blöcke	<b>*** sehr gross</b> sehr gross grosse Sedimentmengen mit geringer Kohäsion und Tragfähigkeit sehr häufig		<b>sehr relevant, muss immer berücksichtigt werden, wenn diese auf dem Niveau des Tunneltrassees liegen</b>		
Grenze pal-HHB - pal-IB	(paläo-)subhorizontal	Übergang zu (aktuellen) vadosen/subvertikalen Gängen; "Knick" in der Gangfrequenzkurve							
paläo-Initialbereich pal-IB	bis mehrere Hundert Meter (bis Basis verkarstungsfähiges Gestein)								

(da alle aktuellen speiloägenetischen Bereiche einmal dem paläo-Initialbereich angehört)  
grundsätzlich nicht relevant

\*\*\* Die bedeutendsten sedimentbedingten Gefahren sind wenig kohäsive Sedimente (Sedimenteintrüche), Instabilitäten (Ortsbrust, Kalotte, etc.) und die mangelnde Tragfähigkeit der Sedimente. Sie treten in den meisten speiloägenetischen Bereichen auf, jedoch mit unterschiedlicher Häufigkeit und Intensität



Karstströmrichte

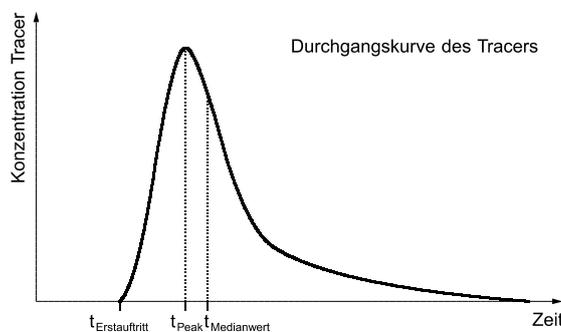
## Anhang VII: KarstALEA-Glossar

Im Glossar aufgeführte Begriffe sind mit einem \* gekennzeichnet. Verweise zu verwandten Begriffen (Synonyme, Antonyme, Überbegriffe, etc.) sind mit einem → gekennzeichnet.

**Abflussganglinie** (fr: hydrogramme; en: hydrograph)  
→ Hydrograph

**Abstandsgeschwindigkeit** (fr: vitesse de circulation apparente; en: ground-water travel time)

Geschwindigkeit der Wasserströmung zwischen zwei Beobachtungspunkten. Die Abstandsgeschwindigkeit wird in der Regel durch einen Tracerversuch\* ermittelt (Geschwindigkeit = Distanz / Zeit) und ist kleiner als die effektive Fließgeschwindigkeit des Wassers. Es wird zwischen der maximalen, der dominierenden und der mittleren Abstandsgeschwindigkeit unterschieden (berechnet aufgrund von  $t_{\text{Erstaufrtritt}}$ ,  $t_{\text{Peak}}$  respektive  $t_{\text{Medianwert}}$  → Grafik).



**aktiv** (fr: actif; en: active)  
→ Höhlengang, aktiv

**aktueller speläogenetischer Bereich** (fr: domaine spéléogénétique actuel; en: current speleogenetic domain)  
→ speläogenetischer Bereich

**Alea** (fr: aléa; en: hazard)

Natürliches Ereignis (Gefahr\*) mit einer bestimmten Intensität und Auftretenswahrscheinlichkeit (räumlich und/oder zeitlich) an einem bestimmten Ort.

**allochthon** (fr: allochtone; en: allogenic)

Von einem anderen Ort stammend. Ein allochthones Gewässer oder allochthone Sedimente stammen von benachbarten oder darüberliegenden nicht verkarsteten Gesteinsformationen, die ins Karstgebiet entwässert werden. → autochthon

**Aquiclude oder Grundwasserstauer** (fr: aquiclude; en: aquiclude)

Eine Formation (oder Teil einer Formation), die Grundwasser\* aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit nicht leitet. → Aquifer, Aquitard

**Aquifer oder Grundwasserleiter** (fr: aquifère; en: aquifer)

Eine durchlässige, permanent oder temporär wasserführende geologische Einheit. Der Aquifer kann eine gesättigte (phreatische\*) und eine nicht gesättigte (vadose\*) Zone aufweisen. → Aquitard, Aquiclude

**Aquitard** (fr: *aquitard*; en: *aquitard*)

Eine Formation (oder Teil einer Formation), die verglichen mit dem darüberliegenden Gestein bedeutend weniger wasserdurchlässig ist, jedoch eine kleine Menge Wasser durchströmen lässt. → Aquifer, Aquiclude

**artesisch** (fr: *artésien*; en: *artesian*)

Als artesisch gespannt bezeichnet man ein Grundwasser, dessen Grundwasserdruckfläche oder Potentialfläche (hydraulische Potential\*) über der Geländeoberfläche liegt.

**autochthon** (fr: *autochtone*; en: *autogenic*)

Vom selben Ort stammend. Ein autochthones Gewässer oder autochthone Sedimente stammen ausschliesslich aus dem Karstgebiet selbst (z.B. durch Infiltration von Regenwasser). → allochthon

**Basisabfluss** (fr: *débit de base*; en: *base flow*)

Kontinuierlicher Abfluss bei Niedrigwasser\*; Teil des Abflusses, der nicht auf unmittelbare Niederschläge oder die Schneeschmelze zurückzuführen ist.

**Bedeckter oder grüner Karst** (fr: *karst couvert*; en: *covered karst*)

In einem bedeckten Karst ist der anstehende verkarstete Fels mit einem Boden\* und Vegetation bedeckt. → freiliegender Karst, nackter Karst, überdeckter Karst

**Boden** (fr: *sol*; en: *soil*)

Oberste, unversiegelte Erdschicht, in der Pflanzen wachsen können. Ein Boden besteht aus Verwitterungsprodukten des unterliegenden Gesteins und organischen Stoffen (Humus). Das darin enthaltene CO<sub>2</sub> spielt bei der Verkarstung eine entscheidende Rolle.

**Bohnerz-Formation** (fr: *sidérolithique*; en: *iron-rich tertiary deposits*)

Kontinentale Formation des Eozäns. Sie wird aus Verwitterungsrückständen der Fazies des Typs «Terra rossa» gebildet und besteht meist aus roten Tonen, Sanden und erbsen- oder bohnenförmigen Konkretionen aus Limonit (Brauneisenstein). Bohnerze kommen heute vorwiegend in Spalten, Taschen, Rinnen, Becken und Höhlen im Kalkgestein vor.

**Diffuse Infiltration** (fr: *infiltration diffuse*; en: *diffuse infiltration*)

→ Infiltration, konzentrierte Infiltration

**Diffluenz** (fr: *diffluence*; en: *diffluence*)

Phänomen, dass Wasser von einem bestimmten Punkt in verschiedene Richtungen fliesst respektive verschiedenen (Teil)Karstsystemen\* (Diffluenz auf Systemebene) oder Karströhren\* (Diffluenz auf Röhrenebene) zufliesst. Häufig bestimmen wechselnde hydrologische Bedingungen, in welche Richtung das Wasser fliesst. Ein diffluenter Teilbereich eines Karstsystems wird durch die Extrempositionen der Grundwasserscheiden begrenzt.

**Doline** (fr: *doline*; en: *doline, sinkhole*)

Eine Doline ist eine geschlossene mulden- oder trichterförmige Vertiefung in einem Karstgebiet, die durch Lösungsprozesse entstanden ist. Die Dimensionen variieren zwischen wenigen bis Dutzenden Metern Durchmesser und Tiefe.

**Druckaufbau** (fr: *mise en charge*; en: *pressure build-up*)

Nach (starken) Niederschlägen oder der Schneeschmelze kann der Karstwasserspiegel innert Stunden ansteigen. Damit steigt auch der hydraulische Druck im Karströhrensystem. Der Druckaufbau charakterisiert also die steigende Phase eines Hochwassers\*.

**Durchgangskurve** (fr: *courbe de restitution*; en: *breakthrough curve*)

Grafik der Konzentration eines Tracers (an einer bestimmten Entnahmestelle) aufgetragen gegen die Zeit. Anhand der Durchgangskurve kann die Rückgewinnungsrate\* bestimmt werden → Abstandsgeschwindigkeit.

**Einflussbereich einer Initialfuge** (fr: *zone influencée par un horizon d'inception*; en: *zone influenced by an inception horizon*)

Gebirgsvolumen um eine Initialfuge\*, das aufgrund der unmittelbaren Nähe zur Initialfuge von der Verkarstung direkt erfasst wird. Diese beruht v.a. auf die bedeutend grösseren Durchmesser der Karströhre (Meter) als die Mächtigkeit der Initialfugen (Millimeter bis Dezimeter) und den Einfluss einer allfälligen Tiefenerosion (Mäanderbildung). Bei der Berechnung der Karströhrendichte (Anhang IX) wird auch der Ungenauigkeitsbereich betreffend der genauen Lage einer Initialfuge zum Einflussbereich einer Initialfuge gerechnet.

**epigen** (fr: *épigénique*; en: *epigenic*)

Als epigen werden die Verkarstung oder Karsterscheinungen bezeichnet, wenn sie durch direkt in den Karst infiltrierende Niederschläge gebildet wurden → hypogen.

**Epikarst oder Epikarstbereich** (fr: (*domaine de l'*) *épikarst*; en: *epikarst*)

Der Epikarst ist der oberflächennahe, zerrüttete Bereich des Karstgebirgskörpers. Er umfasst die obersten 0 – 15 m und zeichnet sich durch eine erhöhte Porosität aus. Diese rührt von der meist noch intensiven Lösungskraft der Sickerwässer, die entlang von Trennflächen in den Untergrund sickern und sie erweitern. An der Untergrenze des Epikarstbereiches können sich lokal gesättigte Bereiche (hängendes Grundwassers) bilden. Der Epikarst ist einer der fünf speläogenetischen Bereiche\*.

**Epikarstschachtbereich** (fr: *domaine des puits liés à l'épikarst*; en: *epikarst shaft domain*)

Der Epikarstschachtbereich ist der speläogenetische Bereich\*, der zwischen dem Epikarst\* und dem Schachtbereich\* liegt und zur vadosen Zone\* eines Karstmassives gehört. Mit zunehmender Tiefe verbinden sich die für diesen Bereich charakteristischen Schächte\* und Mäander\*, so dass die Karströhrendichte\* abnimmt. Die Karströhren können aktiv\*, semiaktiv\* oder fossil\* sein.

**epiphreatische Zone oder Hochwasserzone** (fr: *zone épiphréatique ou zone de battement de la nappe*; en: *epiphreatic zone*)

Die epiphreatische Zone ist jene hydrogeologische Zone\*, die direkt über der phreatischen Zone\* liegt, welche permanent gesättigt\* ist. Die epiphreatische Zone ist jener Teil des Aquifers\*, der je nach hydrologischen Bedingungen zeitweise gesättigt und zeitweise nicht gesättigt ist. Sie wird durch den Niedrigwasser-Karstwasserspiegel und den Hochwasser-Karstwasserspiegel begrenzt und umfasst den ganzen Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels\*. Die epiphreatische Zone ist zwischen wenigen Metern und mehreren hundert Metern mächtig (z.B. 450 m in der Grotte de la Luire, F).

**Färbversuch**

→ Tracerversuch

**fossil** (fr: *fossile*; en: *fossile*)

→ Höhlengang, fossil

**Freiliegender Karst** (fr: *karst exposé*; en: *exposed karst*)

Ein nackter\* oder ein subkutaner Karst, d.h. das verkarstete Gebirge ist entweder nicht oder nur von einem Boden\* und Vegetation bedeckt.

**Estavelle** (fr: *estavelle*; en: *estavelle*)

Öffnung im Karst, die je nach hydraulischen Verhältnissen als Quelle\* oder als Schwinde\* funktioniert.

**Geotop** (fr: *géotope*; en: *geotope*)

Geotope sind räumlich begrenzte Teile der Geosphäre von besonderer geologischer, geomorphologischer oder geoökologischer Bedeutung. Sie beinhalten wichtige Zeugen der Erdgeschichte und geben Einblick in die Entwicklung der Landschaft und des Klimas.

**Gefahr** (fr: *danger*; en: *hazard*)

Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden\* für Mensch, Umwelt und/oder Sachgüter entstehen kann.

**Gefährdung** (fr: *menace*; en: *threat*)

Umstand, der eine Gefahr\* für Personen, Umwelt oder Sachwerte darstellt.

**Gefährdungsbild** (fr: *situation de risque*; en: *hazard situation*)

Beschreibung einer kritischen Situation oder eines unerwünschten Ereignisses für ein Bauwerk und/oder seine Umgebung.

**gesättigt** (fr: *saturé*; en: *saturated*)

- 1) mit Wasser gesättigt → phreatisch
- 2) bezüglich einer gelöster Substanz (z.B. CO<sub>2</sub>) ist Wasser gesättigt, wenn das Wasser diese Substanz mit jener Konzentration enthält, welche Wasser unter den gegebenen Umständen (Druck, Temperatur, etc.) im Gleichgewicht mit der entsprechenden ungelösten Substanz aufweist.

**gespannt** (fr: *captif*; en: *confined*)

Als gespannt bezeichnet man einen Grundwasserkörper, dessen Grundwasserdruckfläche oder Potentialfläche (hydraulische Potential\*) über dem Dach des Aquifers liegt. → artesisch

**Gestation** (fr: *gestation*; en: *gestation*)

Als Gestation wird das speläogenetische Stadium zwischen der Initialisierung und der Höhlenentstehung bezeichnet. Die Gestation erfolgt im wenig durchlässigen Bereich der phreatischen Zone\* (d.h. unterhalb des Karströhrensystems). In diesem Stadium bestimmt ein klar definierter, signifikanter hydraulische Gradient die Fließverhältnisse. Die Verkarstung erfolgt präferenziell auf den Initialfugen, die dem hydraulischen Gradienten folgen. Der Grundwasserfluss ist laminar und diffus. Nur allmählich wird aus dem diffusen Fluss ein kleinstes Netz von Karströhren.

**Grundwasser** (fr: *eau souterraine*; en: *groundwater*)

Grundwasser ist Wasser, das die Hohlräume im Untergrund (Poren, Klüfte, Karströhren, etc.) zusammenhängend ausfüllt (Wasser in der epiphreatischen\* oder phreatischen Zone\*). Das Grundwasser wird durch versickernde Niederschläge und Infiltration von Oberflächenwasser gebildet und bewegt sich ausschliesslich unter dem Einfluss der Schwerkraft.

**Grundwassereinzugsgebiet oder Einzugsgebiet** (fr: *bassin d'alimentation d'une source ou d'un captage*; en: *groundwater catchment area*)

Das Gebiet, dessen infiltrierendes Wasser ganz oder teilweise eine Quelle oder eine Grundwasserentnahmestelle speist. In Karstgebieten stimmt das Grundwassereinzugsgebiet häufig nicht mit dem topografischen Einzugsgebiet\* überein.

**Grundwasserkörper** (fr: *nappe aquifère*, en: *groundwater body*)

Ein Grundwasserkörper ist der gesättigte\* Teil eines Aquifers. Er ist durch den (die) Aquiclud(e)\* und durch den Karstwasserspiegel\* begrenzt.

**Grundwasserneubildung** (fr: *recharge de la nappe*; en: *groundwater recharge*)

Als Grundwasserneubildung bezeichnet man verschiedene Vorgänge, die die Speisung des Grundwassers bewirken, z.B. das Versickern von Niederschlägen, den Zufluss von Hangwasser oder die Infiltration von Oberflächenwasser.

**Grundwasserscheide** (fr: *limite de partage des eaux souterraines*; en: *groundwater divide*)

Linie, von der das Grundwasser\* in verschiedene Richtungen wegfließt. Dies kann strukturell (z.B. Antiklinale) oder hydraulisch bedingt sein (Krete einer piezometrischen Oberfläche). Eine Grundwasserscheide grenzt verschiedene (Teil)Karstsysteme\* voneinander ab und kann sich in Folge variierender hydrologischer Verhältnisse verschieben.

### **Grundwasserspiegel**

→ Karstwasserspiegel

### **grüner Karst**

→ bedeckter Karst

### **Hochwasser** (fr: *crue*; en: *flood*)

Bedingungen nach intensiver Infiltration\* infolge intensiver Niederschläge oder Schneeschmelze mit hochliegendem Karstwasserspiegel\* (→ epiphreatische Zone) und grossem Abfluss.

### **Hochwasserzone**

→ epiphreatische Zone

### **Höhle** (fr: *grotte*; en: *cave*)

Eine Höhle ist ein natürlicher, von einem Menschen begehbarer Hohlraum. In der Schweiz sind über 9000 Höhlen von wenigen Metern bis zu fast 200 km Länge bekannt und dokumentiert.

### **Höhlengang, aktiver** (fr: *galerie active*; en: *active cave passage*)

Höhlengang, der kontinuierlich von Wasser durchflossen wird.

### **Höhlengang, fossiler** (fr: *galerie fossile*; en: *fossil cave passage*)

Inaktiver Teil einer Höhle, der nicht mehr von Wasser durchflossen wird.

### **Höhlengang, semiaktiver** (fr: *galerie semi-active*; en: *semiactive cave passage*)

Höhlengang, der zeitweise von Wasser durchflossen wird und zeitweise trocken liegt.

### **Höhlensystem** (fr: *réseau de grottes ou réseau spéléologique*; en: *cave system*)

Ein unterirdisches Netz von Gängen, Hallen und anderen Hohlräumen; begehbarer Teil des Karströhrensystems\*.

### **Höhlenvermessungsdaten** (fr: *données topographiques spéléologiques*; en: *cave survey data*)

Als Höhlenvermessungsdaten werden die gemessenen Daten bezeichnet, die zur Anfertigung eines Höhlenplans erhoben werden. Dabei handelt es sich um die Länge, Richtung (Azimut) und Neigung der Messstrecken sowie der Gangdimensionen (vgl. Kapitel 4.3.4).

### **Horizontalhöhlenbereich** (fr: *domaine des galeries horizontales*; en: *horizontal cave domaine*)

Der Horizontalhöhlenbereich ist jener speläogenetische Bereich\*, der zwischen dem Schachtbereich\* und dem Initialbereich\* liegt. Die Karströhren\* sind unter phreatischen\* oder epiphreatischen\* Bedingungen entstanden und entwässern das Gebirge subhorizontal dem hydraulischen Gradienten\* folgend Richtung Quelle\*. (vgl. Kapitel 3.2.5).

### **hydraulisches Potenzial – hydraulische Druckhöhe** (fr: *potentiel hydraulique – charge hydraulique*; en: *hydraulic potential – hydraulic head*)

Das hydraulische Potenzial beschreibt den Energiezustand von Wasser im Untergrund an einer durch die Messung definierten Stelle. Das hydraulische Potenzial kann durch die Summe des Lagepotenzials ( $mgz$ ), der Druckhöhe ( $mp/\rho$ ) sowie der üblicherweise vernachlässigbaren kinetischen Energie ( $mv^2/2$ ) bestimmt werden ( $mv^2/2 + mgz + mp/\rho = \phi$ ). Dividiert man das hydraulische Potenzial durch  $mg$  erhält man die hydraulische Druckhöhe, welche der Höhenlage des Karstwasserspiegels\* (Piezometerhöhe\*) über der entsprechenden Stelle entspricht.

**hydraulischer Gradient** (fr: gradient (de potentiel) hydraulique; en: hydraulic gradient)

Der hydraulische Gradient bestimmt die Fliessrichtung und die Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers, das sich entlang eines Fliessweges vom Punkt mit höherem hydraulischen Potential\* zum Punkt mit tieferem hydraulischen Potential bewegt. In der vadosen Zone\* ist der Gradient senkrecht, in der phreatischen Zone\* subhorizontal zur Quelle\* gerichtet.

**hypogen** (fr: hypogénique; en: hypogenic)

Der hypogene Karst entwickelt sich – meist unter gespannten\* Bedingungen – durch (aufsteigendes) Gebirgswasser, das seine Lösungskraft in der Tiefe gewinnt (z.B. durch Anreicherung mit H<sub>2</sub>S oder CO<sub>2</sub>, meist verbunden mit Hydrothermalismus). → epigen

**hydrogeologische Zone** (fr: zone hydrogéologique; en: hydrogeological zones)

Das verkarstete Gebirge kann aufgrund der hydrogeologischen Bedingungen – v.a. der Lage bezüglich des Karstwasserspiegels\* – die hydrogeologischen Zonen Epikarst\*, vadose\*, epiphreatische\* und phreatische Zone\* unterteilt werden.

**Hydrograph oder Abflussganglinie** (fr: hydrogramme; en: hydrograph)

Die Abflussganglinie (auch Hydrograph) ist die Darstellung von beobachteten oder berechneten Abflüssen für einen Messpunkt in der Abfolge ihres zeitlichen Auftretens.

**Infiltration** (fr: infiltration; en: infiltration)

Eindringen/Versickern des Wassers in den Boden\* und das Gestein. Es kann zwischen diffuser Infiltration (Versickern durch eine Vielzahl kleinerer und grösserer Risse, Spalten und Karströhren\*) und konzentrierter Infiltration (Eindringen von grösseren Mengen Wasser durch grössere Spalten, Dolinen, Ponore, etc. – im Speziellen die Infiltration von Oberflächengewässern\*) unterschieden werden.

**Initialbereich** (fr: domain d'inception; en: inception domain)

Als Initialbereich wird jener speläogenetische Bereich\* bezeichnet, der sich zwischen der dem Horizontalhöhlenbereich\* und der Basis des Aquifers\* erstreckt. Die Verkarstung ist noch im Anfangsstadium. Der Grundwasserfluss ist aufgrund der geringen Durchlässigkeit in diesem Bereich meist noch klein.

**Initialfuge** (fr: horizon d'inception; en: inception feature)

Ein Teil einer lithostratigrafischen Serie oder eine tektonische Trennfläche, die aufgrund von physikalischen, chemischen oder lithologischen Eigenschaften besonders verkarstungsanfällig ist.

**Initialisierung**

→ speläogenetische Stadien

**Isohypse** (fr: isohypse; en: isohypse or contour line)

Linie gleicher Höhe, z.B.:

- Linie gleicher Grundwasserspiegelhöhe. Im Karst nur sehr beschränkt aussagekräftig, da das piezometrischen Niveau im Karströhrensystem und im unmittelbar danebenliegenden wenig durchlässigen Gesteinsvolumen grosse Unterschiede aufweisen können.
- Linie gleicher Höhe einer geologischen Formationsgrenze (z.B. Isohypsen des Aquicluds).

**Karren oder Schratten / Karrenfeld** (fr: lapiaz ou lapiés; en: karrenfield / limestone pavement)

Furchen oder Rinnen in massivem Gestein, die durch Korrosion\* entstehen. Ihre Grössen liegen im Zentimeter- bis Meterbereich. Sie können in grosser Anzahl auftreten und bilden

dann so genannte Karrenfelder.

**Karst** (fr: karst; en: karst)

Karst bezeichnet eine charakteristische Hydrologie und spezifische oberirdische und unterirdische Geländeformen, die durch Lösung von Gesteinen – meist Kalkstein – entstanden sind. Die spezifischen Geländeformen beinhalten Karren\*, Karstspalten, Dolinen\*, Ponore\*, Poljen\* und Höhlen\*. Hydrologische Merkmale sind das weitgehende Fehlen von Oberflächengewässern\*, geschlossene Senken (bassin fermé), konzentrierte unterirdische Fließgewässer, grosse Karstquellen\*, zum Teil imposante Ponore\* etc.

**KarstALEA-Zone** (fr: zone KarstALEA; en: KarstALEA zone)

Ein klar begrenztes Volumen des verkarsteten Gebirges in dem die karstspezifischen Gefahren\* und deren Intensität ähnlich sind.

**Karstaquifer** (fr: aquifère karstique; en: karst aquifer)

Ein Karstaquifer ist ein Aquifer\* in verkarstetem Gestein. Das Wasser fliesst durch Trennflächen und/oder Hohlräume, wobei mindestens ein Teil davon durch Lösungsprozesse erweitert worden ist. Zu einem Karstaquifer gehört das Karströhrensystem\*, das wenig durchlässige Gesteinsvolumen\* und das sich darin befindende Wasser.

**Karstquelle** (fr: source karstique; en: karst spring)

Eine Quelle\*, deren Wasser direkt oder indirekt (mehrheitlich) aus einem verkarsteten Gestein entspringt (für eine Charakterisierung siehe Tab. 5.1). Eine Karstquelle kann von (meist quartären) Lockergesteinssedimenten bedeckt sein – das verkarstete Gestein muss also im Bereich der Quelle nicht unbedingt anstehen.

**Karströhre** (fr: conduit karstique; en: karst conduit)

Eine Karströhre ist ein durch Verkarstung\* entstandener Hohlraum, wie z.B. erweiterte Klüfte und Röhren. Der Durchmesser beträgt mindestens 1 cm.

**Karströhrendichte** (fr: densité de conduits karstiques; en: karst conduit density)

Gesamtlänge der Karströhren\* in einem Gesteinsvolumen. Im Rahmen der KarstALEA-Untersuchungen werden nur Karströhren mit einem Durchmesser  $\geq 50$  cm berücksichtigt. Die Karströhrendichte kann in Meter pro Kubikmeter angegeben werden. Die Durchmesser – und damit das Volumen der Karströhren – werden nicht berücksichtigt.

**Karströhrendichte-Zone** (fr: zone de densité de conduits karstiques; en: karst conduit density zones)

Ein klar begrenztes Volumen des verkarsteten Gebirges in dem die Karströhrendichte\* innerhalb festgelegter Grenzen liegt.

**Karströhrensystem** (fr: réseau karstique ou réseau des conduits karstiques ; en : karst conduits network)

Die Gesamtheit der zusammenhängenden Hohlräume mit mindestens 1 cm Durchmesser (Karströhren), die zur selben Karstquelle\* oder Quellgruppe entwässern (können). Dies entspricht allen Karströhren\* eines Karstsystems.

**Karstsystem, hydrogeologisches** (fr: système karstique; en: karst system)

Zu einem Karstsystem gehören eine oder mehrere perennierende und/oder temporäre Karstquellen\*, deren Einzugsgebiet\* auf verkarstetem und nicht verkarstetem Untergrund (sogenannter allochthoner\* Abfluss), sowie das ganze Gebirgsvolumen, das zu diese(r) Karstquelle(n) entwässern kann. Ein Karstsystem kann somit mehrere miteinander verbundene Aquifere\* oder auch nur Teile eines Aquifers beinhalten.

**Karstwasserspiegel – Grundwasserspiegel** (fr: niveau de la nappe karstique; en: karst water table)

Der Grundwasserspiegel ist die Fläche, die den gesättigten\* vom nicht gesättigten

Bereich eines Aquifers\* teilt. Der Grundwasserspiegel bildet die Oberfläche eines Grundwasserkörpers\*, der hydraulische Druck entspricht jenem der Atmosphäre.

Der Karstwasserspiegel bezieht sich ausschliesslich auf die Verhältnisse im Karströhrensystem\*. Aufgrund des starken Durchlässigkeitskontrastes zwischen Karströhrensystem und wenig durchlässigem Gesteinsvolumen (WDG)\* wirken sich die bedeutenden und raschen Schwankungen des Karstwasserspiegels nur geringfügig und verzögert auf die Verhältnisse im WDG aus. Die Druckverhältnisse im WDG und damit die Geometrie des „Grundwasserspiegels“ im WDG ist daher sehr komplex, wobei die Höhenlage des „Grundwasserspiegels“ im WDG mehrere Dutzend Meter von jener des Karstwasserspiegels abweichen können.

***konzentrierte Infiltration*** (fr: *infiltration concentrée*; en: *concentrated infiltration*)

→ Infiltration

***Korrosion*** (fr: *corrosion*; en: *corrosion*)

Abtragung des Gesteins durch Lösung oder chemische Reaktionen. Trifft (leicht) säurehaltiges Wasser auf Kalk oder andere lösliche Gesteine, wird dieser teilweise aufgelöst respektive korrodiert.

***Länge und Tiefe einer Höhle*** (fr: *longueur et profondeur d'une grotte*; en: *length and depth of a cave*)

Die Länge einer Höhle\* wird mit der Summe aller Ganglängen angegeben (oder genauer der Summe aller Polygonzüge, die bei der Vermessung gelegt wurden). Die Tiefe gibt die Höhendifferenz des höchsten und des tiefsten Punktes einer Höhle an.

***Loops*** (fr: *boucles phréatiques*; en: *phreatic loops*)

Loops (Schlingen, Schlaufen, Umlauf) sind auf- und absteigende Gänge, die unter phreatischen\* oder epiphreatischen\* Bedingungen entstanden sind. Sie weisen üblicherweise eine runde oder ovale Querschnittfläche auf und sind charakteristisch für den Horizontalhöhlenbereich\*.

***Mäander*** (fr: *méandre*; en: *meander or meandering canyon*)

Schluchtartige Karströhre\*, die von einem frei fliessenden Höhlenbach gebildet wurde. Der Gangverlauf kann durch einen permanenten Wechsel der Gangrichtung (mäandrierend, Bogen an Bogen gereiht) charakterisiert sein. Zusammen mit den Schächten\* stellen Mäander die häufigste Gangform des Epikarstschachtbereiches\* und des Schachtbereiches\* dar.

***Markerversuch***

→ Tracerversuch

***mehrphasig***

→ Verkarstungsphasen

***mittlere Abflusshöhe eines Karstsystems*** (fr: *débit spécifique d'un système karstique*; en: *specific discharge of a karst system*)

$$Q_{sp} = MQ_{\text{Karstquelle oder Quellgruppe}} / A_{\text{Grundwassereinzugsgebiet}}$$

Mittlerer Abfluss eines Karstsystems\* (Jahresmittel) pro Grundwassereinzugsgebietsfläche. Dieser kann in  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  oder  $\text{mm}/\text{a}$  (Abflusshöhe analog zur Niederschlagshöhe) angegeben werden. Im Gegensatz zum in der Hydrologie üblichen mittleren Abfluss als Mittel des hauptsächlich oberflächlichen (und nur sekundär unterirdischen) Abflusses über ein Jahr pro Fläche Einzugsgebiet, wird nur der unterirdische Abfluss berücksichtigt.

***Nackter Karst*** (fr: *karst dénudé ou nu*; en: *naked karst*)

In einem nackten Karst liegt der verkarstete Fels frei, er ist weder von Boden noch von

Oberflächenablagerungen oder anderen nicht verkarsteten Gesteinsschichten bedeckt. → freiliegender Karst, bedeckter Karst, überdeckter Karst.

**Niedrigwasser** (fr: *étiage*; en: *low water*)

Bedingungen nach ein paar Woche ohne signifikante Grundwasserneubildung mit tiefliegendem Karstwasserspiegel\* (→ epiphreatische Zone) und reduziertem Abfluss (→ Basisabfluss).

**Oberflächengewässer oder oberirdisches Gewässer** (fr: *eaux superficielles*; en: *surface waters*)

Gewässer an der Erdoberfläche mit freier Wasseroberfläche (See, Fluss, Bach).

**Paläokarst** (fr: *paléokarst*; en: *paleokarst*)

Ein verkarstetes Gebirge, das später durch Sedimente überdeckt und (weitgehend) verfüllt wurde.

Im Rahmen der KarstALEA-Methode werden ausschliesslich lithifizierte Sedimente und Strukturen ohne direkte hydrogeologische Funktion einer früheren Verkarstung als Paläokarst bezeichnet.

**Paläospeläogenetischer Bereich** (fr: *domaine paléospéléogénétique*; en: *paleospeleogenetic domain*)

Ein begrenzter Bereich eines verkarstungsfähigen Gesteinsvolumens, der unter den hydrogeologischen Verhältnissen eines früheren Zeitpunkts (Verkarstungsphase\*) spezifischen speläogenetischen Prozessen ausgesetzt war. Während späteren Verkarstungsphasen kann der Bereich ganz oder teilweise überprägt worden sein.

**perennierende Quelle** (fr: *source pérenne*; en: *perennial spring*)

Quelle\*, die ständig Wasser führt.

**Perkolation** (fr: *percolation*; en: *percolation*)

- 1) Gravitatives Eindringen von Sickerwasser\* durch ein Netz von Trennflächen in der ungesättigten Zone.
- 2) Laminares Durchfliessen von Sickerwasser\* durch ein Netz von Trennflächen in der gesättigten Zone unter hydrostatischem Druck.

**Phantom-Verwitterung** (fr: *fantomisation*; en: *phantomisation or rock-ghost weathering*)

Lösung der Kalkmatrix zwischen weniger löslichen Partikeln. Die Textur und Struktur des Muttergesteins kann erhalten bleiben, solange die Partikel nicht abtransportiert werden. Steigt der hydraulische Gradient\*, können die Partikel durch einen konzentrierten unterirdischen Abfluss weggeschwemmt werden (Piping), wobei sogenannte Phantomhöhlen entstehen können.

**Phreatisch oder gesättigt** (fr: *phréatique ou saturé*; en: *phreatic or saturated*)

Unter dem Karstwasserspiegel\*, alle Hohlräume des Gesteins (von den Karströhren bis zu den feinsten Trennflächen) sind vollständig mit Wasser gefüllt.

**Phreatische(r) Höhlengang / Karströhre** (fr: *galerie/conduit phréatique*; en: *phreatic conduit*)

Höhlen oder Karströhren, die unter phreatischen\* Bedingungen, d.h. unter dem Karstwasserspiegel\* gebildet wurden. Durch eine Absenkung des Vorfluters\* können sie trockenfallen (fossile phreatische Höhlengänge). Phreatische Höhlengänge weisen meist eine charakteristische Morphologie auf (rundes oder ovales Profil, Ganganlage mit Loops\*, Verzweigungen).

**Piezometerhöhe** (fr: *niveau piézométrique*; en: *piezometric head*)

Höhenlage des Karstwasserspiegels\* welche dem hydraulischen Potenzial\* entspricht. Aufgrund des starken Durchlässigkeitskontrastes zwischen Karströhrensystem und wenig

durchlässigem Gesteinsvolumen (WDG)\*entspricht die Wasserhöhe in einer Bohrung (oft Piezometer genannt) nur selten der Piezometerhöhe (im Karströhrensystem)!

**Piping** (fr: *piping*; en: *piping*)

Piping ist eine Form der internen Erosion, welche feinkörnige Sedimente mit geringer Kohäsion betrifft. Infolge eines bedeutenden hydraulischen Gradienten\* werden die Partikel durch einen konzentrierten unterirdischen Abfluss weggeschwemmt. Durch regressive Erosion der Partikel entgegen der Fliessrichtung können so durchgehende Röhren entstehen. U.a. in der Kreide und im Sandstein spielt Piping bei der Speläogenese häufig eine bedeutenden Rolle → Phantomverwitterung. Piping kann jedoch auch bei der Erosion von Sedimentverfüllungen in Karströhren eine gewisse Rolle spielen.

**Polje** (fr: *poljé*; en: *polje*)

Poljen (aus dem slovenischen) sind grosse, meist langgezogene, geschlossene Becken in Karstgebieten, die unterirdisch entwässert werden. Häufig umrahmen steile Hänge, den fast ebenen Boden einer Polje. Bei Niederschlägen werden viele Poljen innert kürzester Zeit überflutet, so dass ein temporärer See entsteht.

**Ponor oder (Bach)Schwinde** (fr: *perte ou ponor*; en: *ponor, swallow hole or stream sink*)  
Öffnung (Höhle\*, Dolinen\*, Karströhren\*, Karstspalten), in dem ein Oberflächengewässer\* (Bach, Fluss, See) ganz oder teilweise in den Untergrund versickert.

**Quelle** (fr: *source*; en: *spring*)

Eine Quelle ist ein Ort, an dem Grundwasser\* auf natürliche Weise an die Oberfläche oder in ein Oberflächengewässer austritt.

**Restrisiko / Restgefährdung** (fr: *risque résiduel / danger résiduel*; en: *residual risk / residual threat*)

Risiko\* / Gefährdung\*, das nach der Realisierung von (Schutz)Massnahmen verbleibt.

**Risiko** (fr: *risque*; en: *risk*)

Mit Eintretenswahrscheinlichkeit und Schadenausmass bewertete Gefährdung\*.

**Rückgewinnungsrate** (fr: *taux de restitution*; en: *recovery rate*)

Anteil eines eingegebenen Tracers\*, der im Rahmen der Messungen erfasst wurde. Sie kann aufgrund der Durchgangskurve(n)\* (→ Abflussgeschwindigkeit) ermittelt werden:

$$\text{Rückgewinnungsrate} = \frac{\int_0^{\infty} (\text{Abfluss} * \text{Konzentration}_{\text{tracer}}) dt}{\text{eingegebene\_Tracermenge}}$$

**Schacht** (fr: *puits*, en: *shaft*)

Als Schacht wird ein vertikaler oder stark geneigter (> ca. 45°) Höhlengang bezeichnet, der durch frei fliessendes Wasser entstanden ist. Schächte gehören zusammen mit den Mäandern\* zu den häufigsten Gangformen im Epikarstschachtbereich\* und im Schachtbereich\*.

**Schachtbereich** (fr: *domaine des puits*; en: *shaft domain*)

Der Schachtbereich ist ein speläogenetischer Bereich\* und liegt zwischen Epikarstschachtbereich\* und Horizontalhöhlenbereich. Er entwässert das hangende Gesteinsvolumen subvertikal Richtung Karstwasserspiegel\*. Grössräumige Schächte\* wechseln mit subhorizontalen Mäandern\* ab.

**Schaden** (fr: *dégât ou dommage*; en: *damage*)

Negative bewertete Konsequenz eines Ereignisses oder Vorgangs.

**Schadenspotenzial** (fr: *potentiel de dommages*; en: *damage potential*)

Grösse des möglichen Schadens\* im betrachteten Gefahrengbiet, bedingt durch die Anzahl, den Wert und die Empfindlichkeit der betroffenen Objekte und Lebewesen.

**Schwebender Grundwasserkörper** (fr: *nappe perchée*, en: *perched groundwater*)

Lokaler, freier Grundwasserkörper, der durch eine vadosen Zone\* vom regionalen Grundwasserkörper getrennt ist. Ein weniger wasserdurchlässigen Gebirgsbereich (z.B. Mergel, Basis des Epikarsts, etc.) bildet die Basis des schwebenden Grundwasserkörpers.

**Schwinde**

→ Ponor

**semiaktiv** (fr: *semiactif*; en: *semiactive*)

→ Höhlengang, aktiv

**Sickerwasser** (fr: *eau de percolation*; *percolation or seepage water*)

Wasser, das infolge diffuser Infiltration\* durch die vadosen Zone\* nach unten fliesst.

**Sidérolithique**

→ Bohnerz-Formation

**Siphon** (fr: *siphon*; en: *sump or siphon*)

Ein vollständig mit Wasser gefüllter Höhlengangabschnitt. Dieser kann als hängender Siphon in der vadosen Zone\* auftreten oder wenn ein Höhlengang unter den Grundwasserspiegel\* taucht.

**Soutirage** (fr: *soutirage*; en: *soutirage*)

Kleine Karströhre\* in der epiphreatischen Zone\*, die nach einem Hochwasserereignis die Loops\* (Gangsenken) Richtung Niedrigwasserspiegel entwässern. Sie verbinden die tiefsten Punkte der epiphreatischen Loops mit dem phreatischen Karströhrensystem.

**Speläogenese** (fr: *spéléogénèse*; en: *speleogenesis*)

Die Speläogenese beschreibt die Gesamtheit aller Prozesse, welche die Entstehung und Entwicklung natürlicher unterirdischer Karsthohlräume bewirken.

**Speläogenetischer Bereich** (fr: *domaine spéléogénétique*; en: *speleogenetic domain*)

Ein begrenzter Bereich eines verkarstungsfähigen Gesteinsvolumens, der unter bestimmten hydrologischen Rahmenbedingungen spezifischen speläogenetischen Prozessen ausgesetzt ist und dessen Karströhrensystem\* spezifische Strukturen und eine spezifische Morphologie aufweist. Es können aktuelle (heutige) speläogenetische Bereiche und paläo-speläogenetische Bereiche\* unterschieden werden.

**Speläogenetische Phasen** (fr: *phases spéléogénétiques*; en: *speleogenetic phases*)

Phasen der Höhlenentstehung, welche auf sich ändernde hydrogeologische Rahmenbedingungen zurückzuführen sind (häufig Absenkung des Vorfluterniveaus\* aufgrund von Tiefenerosion). Jeder aktuell oder paläo-speläogenetische Bereich\* kann einer speläogenetischen Phase zugeordnet werden. In der Praxis werden v.a. die übereinander liegenden paläo-Horizontalhöhlenbereiche den jeweiligen paläo-Vorfluterniveaus zugeordnet. Die damit verbundenen speläogenetischen Phasen werden meist nach der Höhenlage des Vorfluterniveaus benannt und können u.a. mit Hilfe von Sedimentablagerungen in Höhlen, insbesondere Tropfsteinen, datiert werden.

**speläogenetische Stadien** (fr: *stades spéléogénétiques*; en: *speleogenetic stages*)

Es können drei Stadien der Entwicklung einer Karströhre unterschieden werden:

- 1) Initialisierung (fr & en: *inception*): Die Initialisierung stellt den Beginn der Verkarstung der Trennflächen dar. Während der Initialisierung kann der hydraulische Gradient

- nicht klar definiert werden. In diesem Stadium werden aus "einfachen" Trennflächen Initialfugen. Der Zeitpunkt, ab welchem die Permeabilität entlang der Trennfläche kontinuierlich zunimmt, markiert den Übergang von der Lithifizierung zur Initialisierung.
- 2) Gestation/Vorbereitung (fr & en: gestation): Die Gestation erfolgt im wenig durchlässigen Bereich der phreatischen Zone\* (d.h. unterhalb des Karströhrensystems). In diesem Stadium bestimmt ein klar definierter hydraulischer Gradient die Fliessverhältnisse. Die Verkarstung erfolgt präferenziell auf den Initialfugen, die dem hydraulischen Gradienten folgen. Der Grundwasserfluss ist laminar und diffus. Nur allmählich wird aus dem diffusen Fluss ein kleinstes Netz von Karströhren.
  - 3) Höhlenentstehung (fr: développement des conduits; en: cave development): Das Stadium der Höhlenentstehung beginnt mit dem Wechsel des laminaren zum turbulenten Fließen. In diesem Stadium werden aus Karströhren mit einem Durchmesser von wenigen Zentimeter Höhlengänge mit einem Durchmesser von bis zu mehreren Metern.

**Speläologie** (fr: *spéléologie*; en: *speleology*)

Höhlenforschung – Wissenschaft, die sich mit der Erforschung der (natürlichen) Höhlen\* befasst.

**Speläomorphologie** (fr: *spéléomorphologie*; en: *speleomorphology*)

Beschreibung der Gangformen und Ganganlagen.

**Stratigrafische Initialfuge** (fr: *horizon d'inception stratigraphique*; en: *inception horizon*)

Teil einer lithostratigrafischen Serie, der aufgrund von physikalischen, chemischen oder lithologischen Eigenschaften besonders verkarstungsanfällig ist. → Initialfuge, tektonische Initialfuge

**sublacustrine oder submarine Quelle** (fr: *source sous-marine ou sous-lacustre*; en: *submarine or sublacustrine spring*)

Quelle\*, die unterhalb des Wasserspiegels in ein stehendes Gewässer (See resp. Meer) entwässert. Oft entstanden, als das Vorfluterniveau tiefer lag.

**tektonische Initialfuge** (fr: *horizon d'inception tectonique*; en: *tectonical inception feature*)

Tektonische Trennfläche, die aufgrund von physikalischen, chemischen oder lithologischen Eigenschaften besonders verkarstungsanfällig ist. → Initialfuge, stratigrafische Initialfuge

**Temporäre Quelle**

→ Überlaufquelle

**Tiefe einer Höhle** (fr: *profondeur ou dénivellation d'une grotte*; en: *depth of a cave*)

→ Länge und Tiefe einer Höhle

**topografisches oder hydrologisches Einzugsgebiet** (fr: *bassin versant topographique*; en: *topographic catchment area or drainage area*)

Gebiet, in dem das oberflächlich abfließende Wasser aufgrund der Hangneigung zu einem bestimmten Punkt fließt. Die Grenzen des topografischen Einzugsgebietes werden durch Wasserscheiden gebildet. Im Karst aufgrund der direkten Infiltration der Niederschläge normalerweise nicht relevant.

**Tracerversuch, Markierversuch oder Färbversuch (veraltet)** (fr: *essai de traçage*; en: *dye tracing or tracing experiment*)

Mit Hilfe eines künstlichen Markierstoffes wird Wasser markiert, um seine Ausbreitung verfolgen zu können. Markierversuche werden bei spezifischen hydrogeologischen Fragestellungen, u.a. zum Nachweis von Verbindungen zwischen zwei Punkten oder zur Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit\*, eingesetzt.

**überdeckter Karst** (fr: *karst sous couverture*; en: *mantled or interstratal karst*)

Ein verkarstetes Gebirge, das von einer mehrere Meter mächtigen, nicht verkarstungsfähigen geologischen Formation bedeckt ist. → bedeckter oder grüner Karst

**Überlaufquelle oder temporäre Quelle** (fr: *source de trop-plein ou source temporaire*; en: *overflow spring or intermittent spring*)

Eine Überlaufquelle ist eine Mündung des Karströhrensystems\*, die höher als die perennierende Quelle\* liegt und nur zeitweise bei Hochwasser\* als sekundärer Austritt des Karstsystems funktioniert. Oft ist die Schüttung der Überlaufquelle grösser als die der perennierenden Quelle.

**vados oder nicht gesättigt** (fr: *vadose ou non saturé*; en: *vadose or unsaturated*)

Über dem Grundwasserspiegel\*, die Hohlräume sind höchstens teilweise mit Wasser gefüllt, Wasser kann frei (gravitativ) abfließen.

**Vadose Höhlengänge / Karströhren** (fr: *galeries/conduits vadoses*; en: *vadose conduits*)

Höhlen oder Karströhren, die unter vadosen\* Bedingungen (durch frei fließendes Wasser in luftgefülltem Raum), d.h. über dem Karstwasserspiegel\*, gebildet wurden. Vadose Höhlengänge weisen meist eine charakteristische Morphologie auf (kontinuierlich sinkende Ganganlage, Schächte\*, Mäander\* etc.).

**Verkarstung** (fr: *karstification*; en: *karstification*)

Die Verkarstung beschreibt die Gesamtheit aller Prozesse, die die Entstehung von oberirdischen und unterirdischen Karststrukturen (Karströhren\*, Dolinen\*, Karren\* etc.) bewirken. Lösungsprozesse spielen dabei eine zentrale Rolle.

**Verkarstungsfähigkeit** (fr: *susceptibilité à la karstification*; en: *susceptibility to karstify*)

Anfälligkeit eines Gesteins, verkarstet zu werden. Dies hängt u.a. von der Löslichkeit, der Porosität und der Reinheit des Gesteins ab.

**Verkarstungsphasen**

→ speläogenetische Phasen

**Vorfluterniveau** (fr: *niveau de base*; en: *base level*)

Tiefste Höhenlage der Wasserzirkulation an der Oberfläche respektive Höhenlage eines oberirdischen Gewässers\*, das das Wasser aus anderen Gewässern und aus Aquiferen aufnimmt und ableitet. Es entspricht der heutigen Erosionsbasis des entsprechenden Flusses. Das Vorfluterniveau bestimmt das hydraulische Potenzial\* und damit die Wasserzirkulation eines Gebirges.

**wenig durchlässige Gesteinsvolumen, WDG** (fr: *volumes peu perméables, VPP*; en: *low permeability volumes, LPV*)

Wenig durchlässiges Umgebungsgestein, das das Karströhrensystem\* umgibt. Beinhaltet sowohl die Matrix des Gesteins wie auch das nicht verkarstete Kluffnetz.

## Anhang VIII: Verkarstungscharakteristika verschiedener in der Schweiz vorkommender Lithologien

Die KarstALEA-Methode wurde bisher ausschliesslich in epigen verkarsteten Kalksteinmassiven getestet. Bei der Anwendung in anderen Lithologien, müssen die Verkarstungscharakteristika angemessen berücksichtigt und die Methode dementsprechend angepasst werden. Ein spezielles Augenmerk gilt dabei der Anwendbarkeit der Konzepte der Initialfugen und der speläogenetischen Bereiche. Die Tabelle im Anhang II gibt dazu einen ersten Überblick. Die Verkarstungscharakteristika der Lithologien und erste Hypothesen zur Anwendbarkeit der KarstALEA-Methode sowie zu möglichen Einschränkungen der Anwendbarkeit werden in der vorliegenden Beilage ausgeführt. Die Verkarstungscharakteristika beziehen sich auf Schweizer Verhältnisse (Mächtigkeit der angetroffenen Formationen, klimatische und speläogenetische Bedingungen etc.). Sollte die KarstALEA-Methode in einem signifikant anderen geologischen oder klimatologischen Kontext angewendet werden (z.B. mächtige Kreide- oder Salzformationen, Höhlen im Quarzit, tropisches Klima), muss die Anwendbarkeit der Methode geprüft werden.

### VIII.1 Kalkstein

Der Kalkstein ist die wichtigste verkarstungsfähige Lithologie in der Schweiz und weltweit. Er bedeckt etwa 20% der Oberfläche der Schweiz und kommt vorwiegend im Mesozoikum des Juras, des Helvetikums, des Penninikums (v.a. in den Préalpes) und seltener im Ostalpin und im Südalpin (Südtessin) vor. Die Verkarstungscharakteristika von Kalkstein wurden im Kapitel 3.2 detailliert beschrieben, können jedoch je nach Porosität, Struktur, Verunreinigungen, Zementierung etc. beträchtlich variieren. Die Heterogenitäten in Kalksteinformationen – im speziellen Mergellagen – können eine zentrale Rolle als Initialfugen oder (lokale) Aquiclude/Aquitarde spielen.

Kalkgebirge stellen das Standardanwendungsgebiet der KarstALEA-Methode dar. Sie ist dementsprechend generell uneingeschränkt anwendbar.

### VIII.2 Dolomit

Dolomite kommen in der Schweiz in grosser Mächtigkeit in der ost- und südalpinen Trias (Graubünden, Südtessin, Wallis) und in geringer Mächtigkeit im Jura (Jura, Trias) und dem Helvetikum (Kalkalpen) vor.

Die geringere Lösungsgeschwindigkeit von Dolomit (verglichen mit Kalk) führt dazu, dass sich die Verkarstung häufig langsamer und kleinräumiger entwickelt. Eine mögliche diagenetische Veränderung von lithostratigrafischen Strukturen (z.B. Reduktion der Porosität durch die Dolomitierung) können zu einer Reduktion der Verkarstungsanfälligkeit möglicher stratigrafischer Initialfugen führen, so dass häufig die (später entstandenen) tektonischen Initialfugen die Verkarstung stark prägen. Die Verkarstung hängt generell stark von der Verkarstungsfähigkeit des Umgebungsgesteins ab: Dolomitzüge in Gneisen sind häufig stark verkarstet, während Dolomitbänke in Kalkabfolgen vergleichsweise wenig verkarstet sind. Die speläogenetischen Bereiche sind in homogenen Dolomitabfolgen ähnlich ausgeprägt wie in Kalkgebirgen, bei heterogenen Gesteinsabfolgen (Abfolgen mit anderen Karbonaten und/oder nicht verkarstungsfähigem Gestein) dominieren jedoch die lithologischen Eigenschaften die Struktur des Karströhrensystems.

In homogenen, mächtigen Dolomitformationen ist die KarstALEA-Methode also weitgehend anwendbar, bei heterogenen Formationen muss die relative Verkarstungsfähigkeit von Dolomit verglichen mit dem Umgebungsgestein angemessen berücksichtigt werden.

### VIII.3 Mergel

Mergel kommen in der Schweiz im Jura, im Helvetikum, im Penninikum (v.a. Préalpes), in der Molasse, im Südalpin, sowie vereinzelt im Ostalpin vor (v.a. im Mesozoikum und Känozoikum). Sie treten häufig alternierend mit Kalkstein auf.

Mergel enthalten per Definition etwa 50% Kalk und sollten nicht mit Tonschichten verwechselt werden. Die Verkarstungsfähigkeit von Mergel wird aufgrund des hohen feindetrithischen Anteils meist als sehr gering eingeschätzt. Unzählige Dolinenreihen und vereinzelte bekannte Höhlen im Mergel zeigen jedoch, dass v.a. kalkhaltigere Bänder häufig verkarstet werden. Die Karstsysteme entwickeln sich häufig weitgehend zweidimensional entlang dieser Bänder („strip karst“), was zu vielen kleinen Quellen führen kann. Die Karströhren sind z.T. erosiv in die darunterliegenden kalkärmeren weicheren Bänder erweitert. Die Geometrie des Karströhrensystems ist also sehr stark von der Strukturgeologie (Lage der kalkhaltigeren Bänder) geprägt. Vereinzelt ist die ganze Mergelformation durchgehend verkarstet. Neben den charakteristischen Dolinenreihen sind an der Oberfläche auch kleinere Ponore und Quellen zu finden.

Die Verkarstungsfähigkeit von Mergeln ist je nach Kontext sehr variabel und wird allgemein unterschätzt. Während aus der Molasse-Mergel im Mittelland kaum Hinweise auf eine Verkarstung bekannt sind, sind Dolinen in der subalpinen Molasse recht häufig, was auf eine gewisse Verkarstungsfähigkeit hinweist. Die alpinen und jurassischen Mergel sind teilweise verkarstungsfähig, vereinzelt sind auch grossräumige Höhlengänge beschrieben worden.

Im Rahmen der KarstALEA-Methode können die kalkhaltigeren Bänder als Initialfugen ausgeschieden werden. Die Gliederung des Gebirges in speläogenetische Bereiche ist auf Grund der geringen Mächtigkeit dieser Bänke meist nur beschränkt möglich.

### VIII.4 Kalkschiefer

Kalkschiefer kommen in der Schweiz v.a. im Autochthon der Kristallin-Massive (z.B. Aarmassiv), im Helvetikum und im Penninikum (Jura und Kreide der Bündnerschiefer, Bernhard-Decke).

Die Verkarstung ist stark abhängig vom Kalkgehalt und von allfälligen Zwischenlagen. Bei hohem Kalkgehalt kann sie ähnlich ausgeprägt sein wie in Kalkgestein und zu signifikanten Karströhrensystemen führen. Die Oberflächenformen sind aufgrund der Heterogenität des Gesteins und der Schieferung weniger typisch ausgeprägt. Kalkhaltigere Bänke können als Initialfugen dienen. Tonhaltigere Zwischenlagen können die Verkarstung hingegen auch stark behindern.

Die KarstALEA-Methode kann je nach Homogenität und Kalkgehalt weitgehend uneingeschränkt angewendet werden. Bei stark variierendem Kalkgehalt ist mit ähnlichen Einschränkungen wie beim Mergel zu rechnen.

### VIII.5 Marmor

Marmor kommt meist in kleineren Volumen in den zentralen Alpen, in Deformationszonen und an Gneiss-Deckengrenzen vor (Penninikum, seltener Ost- und Südalpin). Selten sind sie mächtig angehäuft oder grossräumig.

Massive Marmorvorkommen zeigen ähnliche Verkarstungscharakteristika wie Kalkformationen (Oberflächenformen, Karströhrensystem, Hydrogeologie, speläogenetische Bereiche). Aufgrund der Rekristallisierung sind die stratigrafischen Initialfugen häufig überprägt. Das Karströhrensystem ist daher häufig an Verwerfungen gebunden (tektonische Initialfugen).

Bei geringmächtigen Marmorbändern in wenig löslichen Formationen entwickeln sich meist 2D-Systeme („strip karst“). Die Verkarstung kann durch oberflächlichen Zufluss zu den Marmorzügen begünstigt werden (z.B. Marmorzüge, die die penninischen Gneissdecken trennen).

Die Verkarstung wird in höher metamorphen Gebieten (z.B. Südalpen) durch rekristallisierte Schichtfugen (Kalksilikat-Fels) meist unterbunden.

Bei massiven Marmorvorkommen ist die KarstALEA-Methode weitgehend anwendbar. Bei Marmorbänken mit beschränkter Mächtigkeit kann die ganze Bank als Initialfuge betrachtet werden.

## VIII.6 Kalkkonglomerate und -breccien (inkl. Jura-Nagelfluh)

Kalkkonglomerate kommen als Deckenschotter (Alt-Quartär), in der proximalen oligozänen (Wallis, Mt. Pèlerin, Rigi-Speer) und miozänen Molasse (Napf, Hörnli, Juranagelfluh [franz. Gompholite] ) sowie in basalen Flyschserien vor.

Breccien sind im Jura und Helvetikum an tertiäre Extensionsbrüche und Faltenscharniere gebunden. Im Penninikum und Ostalpin kommen stratigrafische Breccien bis zu mehreren 10 m Mächtigkeit in der mittleren Trias vor. Weiter befinden sich Breccien in vielen tektonischen Deformationszonen.

Die Verkarstungsfähigkeit wie auch die Stabilität dieser Lithologien hängen stark von der Art der Matrix (Karbonat?), dem Matrixanteil und dem Grad der Zementierung ab. Bei einem grossen, wenig zementierten Matrixanteil ist die Verkarstung meist wenig ausgeprägt. In der Jura-Nagelfluh im Tertiär sind jedoch auch Schächte von mehreren Dutzend Meter in wenig konsolidiertem Material beschrieben worden. Karsttypische Oberflächenformen beschränken sich weitgehend auf Dolinen. Stratigrafische Initialfugen sind aufgrund der selten ausgebildeten Schichtung meist nicht relevant.

Die Anwendbarkeit der KarstALEA-Methode ist bei solch heterogenen Verhältnissen meist eingeschränkt, weil kaum Initialfugen ausgeschieden werden können. Welche Untersuchungen Sinn machen, hängt stark von den lokalen Verhältnissen ab (Zementierung, Mächtigkeit der Formation etc.). Das Verkarstungspotential sollte jedoch v.a. in den Jura-Nagelfluh nicht unterschätzt werden.

## VIII.7 Kreide (in der Schweiz vernachlässigbar)

In der Schweiz sind keine mächtigen Kreidevorkommen bekannt (wie sie z.B. im Pariser Becken verbreitet sind). In der Schweiz beschränken sich Kreidevorkommen weitgehend auf die Raurachische Fazies im Jura (Oxford). Seekreidevorkommen sind aus dem Tertiär und Quartär bekannt.

Bei mächtigen Kreidevorkommen führen die hohe Porosität und die homogene Gesteinsmasse zu einer speziellen Oberflächenmorphologie, die stark von der mechanischen Erosion geprägt ist. Der Epikarst ist kaum entwickelt, Hohlräume sind eher selten und zum Teil durch Piping entstanden (Erosion von Partikeln durch unterirdisch abfließendes Wasser, nachdem die Matrix zwischen den Partikeln gelöst wurde → Phantomverwitterung). Die Entwässerung ist eher diffus.

Die Seekreidevorkommen in der Schweiz sind aufgrund der mangelnden Konsolidierung und ihrer Position (u.a. geringer hydraulischer Gradient) kaum verkarstet.

Die KarstALEA-Methode ist aufgrund der spezifischen Verkarstungsmechanismen in der Kreide nur beschränkt anwendbar.

## VIII.8 Sandstein mit Kalkmatrix

Sandsteine mit einer Kalkmatrix kommen in der Schweiz vor allem in der Molasse vor (Jura, Mittelland, Voralpen) sowie im Tertiär des Helvetikum (z.B. Hohgantsandstein). Weitere Vorkommen befinden sich in der Trias (z.B. Fuorn-Formation im Ostalpin).

Die Verkarstungsfähigkeit dieser Formation hängt stark vom lokalen Kalkgehalt ab und kann entsprechend innert kürzester Distanz variieren. Die Verkarstung konzentriert sich meist auf kalkhaltigere Bänke, wobei sich kleine 2D-Systeme bilden. Diese kalkhaltigeren Bänke können als Initialfugen ausgeschieden werden. Die Entstehung von Höhlen durch Piping (infolge Phantomverwitterung) ist möglich. Typische Karstoberflächenformen sind selten. Vereinzelt sind Höhlen durch mehrere hundert Meter mächtige Sandsteinformationen bekannt.

Die KarstALEA-Methode kann je nach Homogenität, Mächtigkeit und Kalkgehalt mit kleinen oder grösseren Einschränkungen angewendet werden. Im Speziellen können häufig kalkhaltigere Bänke als Initialfugen ausgeschieden werden.

## VIII.9 Rauhwacke (Cornieule)

Rauhwacken kommen in der Schweiz in erster Linie in der Form von decken-trennenden Horizonten, Taschen und tektonische Grenze im Penninikum (v.a. Préalpes und Wallis), als Bänke von mehreren Metern in stratigrafischen Abfolgen in der Trias des Ostalpins und in etwas grösserer Mächtigkeit in ultrahelvetischen Decken (z.B. bei Bex) vor. Sie sind häufig mit Gipsformationen verknüpft.

Die Verkarstung erfolgt meist selektiv durch die Lösung der Gips- und Mg-Kalzit-haltigeren Komponenten. Bei geringen Mächtigkeiten der Rauhwacke-Vorkommen entstehen kleinere 2D-Systeme entlang von zerklüfteten und brekziös aufgelösten Bänken, die ein klassisches karst-hydrologisches Verhalten aufweisen (Schüttungs- und Druckschwankungen etc.). Die speläogenetischen Bereiche sind unter diesen Umständen kaum ausgeprägt. Dolinen – z.T. auch im angrenzenden weniger löslichen Umgebungsgestein – sowie herausgewitterte Bänke und Türmchen stellen die typischen Karst-Oberflächenformen dar.

Bei Rauhwackenbänken mit geringer Mächtigkeit kann die ganze Bank als Initialfuge betrachtet werden. Aufgrund der Heterogenität und der häufigen tektonischen Überprägung sind die genaue Positionierung der Initialfugen und die Unterteilung in speläogenetische Bereiche innerhalb von Rauhwackebänken hingegen nur teilweise möglich. Bei mächtigeren Rauhwackeformationen können – je nach Kontext – Initialfugen ausgeschieden werden.

## VIII.10 Gips und Anhydrit

Anhydrit- und gipshaltige Formationen kommen in der Schweiz im Helvetikum (v.a. Wallis/Waadt), im Penninikum (v.a. Préalpes), im Ostalpin, im nördlichen Jura und in geringerem Ausmass im restlichen Penninikum und im Südalpin vor – in erster Linie in der mittleren Trias. Anhydrit- und Gipsvorkommen sind häufig tektonisch angehäuft und stark überprägt, die Mächtigkeit ist daher häufig sehr variabel (meist zwischen 10 und 100 m), z.T. innerhalb von sehr kurzer Distanz. Die Strukturen des kompetenten umgebenden Gesteins definieren daher meist die groben Strukturen dieser Vorkommen.

Anhydrit verwandelt sich bei Kontakt mit Wasser in Gips, wobei sich massive Anhydritvorkommen viel langsamer in Gips verwandeln als unreine Anhydrite. In reinem, massivem Anhydrit können sich wasserführende Risse und Spalten durch die Volumenvergrösserung bei der Hydratation gar wieder schliessen und damit eine Verkarstung verhindern (sogenannte „Selbstheilung“ respektive self-healing). Wenn mit Sicherheit feststeht, dass die durchörterte Formation ausschliesslich aus Anhydrit besteht, kann daher eine Verkarstung weitgehend ausgeschlossen werden. Andernfalls muss mit einer (partiellen) Umwandlung in Gips und damit mit einer Verkarstung gerechnet werden.

Tonhaltige Zwischenlagen in Anhydritformationen können als „Feuchtigkeitspumpe“ funktionieren und die Hydratation des Anhydrits stark beschleunigen. V.a. in Anwesenheit von „Verunreinigungen“, können mächtige Gipsformationen entstehen. Weiter besteht das Risiko, dass der Tunnelbau selbst die Hydratation und die Verkarstung fördert.

Aufgrund der hohen Lösungsgeschwindigkeit wird der oberflächennahe Bereich von Gipsformationen meist schnell verkarstet, wobei sich klassische Karstformen wie Dolinen, Ponore und Karstquellen bilden. Der häufig hohe Anteil an unlöslichen Partikeln sowie eine eher geringe Tragfähigkeit führen dazu, dass Karströhren häufig verfüllt werden. Grosse Volumina sind hingegen möglich (Hallen)...

Zwischenlagen anderer Lithologien (Kalk, Dolomit, Mergel), bevorzugt hydratisierte Schichtfugen (Kontrast Anhydrit – Gips) sowie Verwerfungen sind entscheidend für die Verkarstung und können als Initialfugen ausgeschieden werden. Aufgrund der bedeutenden Heterogenität der Gipsformationen und weil diese in der Schweiz meist tektonisch stark beansprucht sind, ist es häufig schwierig, die genaue Lage möglicher stratigrafischer Initialfugen zu bestimmen. Die KarstALEA-Methode ist daher häufig nur beschränkt anwendbar.

### **VIII.11 Salz (in der Schweiz vernachlässigbar)**

Aufgrund der hohen Löslichkeit werden anstehende Salzvorkommen meistens innert kurzer Zeit abgetragen. Lokale, intraformationelle Vorkommen sind hingegen aus dem Tafeljura (Schweizerhalle) und in ultrahelvetischen Decken (Bex VD) v.a. in der Trias (Muschelkalk) bekannt. Vereinzelt können Salze in tektonischen Evaporithorizonten des Penninikum und des Ostalpins vorkommen. Die bekannten Salzvorkommen in der Schweiz befinden sich entweder unter einer undurchlässigen Deckschicht (tonhaltige Schichten, Anhydrit etc.) oder weit unter dem Vorfluterniveau.

Grundsätzlich bilden sich in Salzvorkommen klassische Oberflächenkarststrukturen wie Dolinen oder Karren (v.a. aus (semi-)ariden Gebieten bekannt). Aufgrund der hohen Löslichkeit werden allfällige Aufschlüsse jedoch sehr schnell zerstört. In Salzformation konzentriert sich die Wasserzirkulation und damit die Karströhren meist auf den oberflächennahen (vadosen) Bereich sowie auf Situationen mit bedeutenden hydraulischen Gradienten zwischen den umgebenden Gesteinsformationen (gespannte Aquifere). Typisch für verkarstete Salzformationen sind salzige Quellen. Aufgrund der geringen Gesteinsfestigkeit und der Tendenz zum Fließen, können sich Öffnungen jeglicher Art (Schichtfugen, Hohlräume) schnell schliessen. Dabei entstehen typische Breccien und Kollapsstrukturen.

Die Verkarstung von Salzformationen kann innert kürzester Zeit (Jahrzehnte) erfolgen und ist deshalb sehr sensibel auf Veränderungen der hydrologischen Rahmenbedingungen. Daher kann sie auch durch menschliche Eingriffe initiiert oder verstärkt werden, was z.T. auch katastrophale Folgen haben kann (z.B. Instabilitäten in Folge Salzabbau, Drainage etc.).

Aufgrund der Tendenz zum Fließen sind tektonische Initialfugen nur von untergeordneter Bedeutung. Hingegen sind lithologische Unterschiede (Mergel, Gips, Kalklagen) entscheidend und ermöglichen z.T. die Ausscheidung von stratigrafischen Initialfugen. Hingegen kann das Konzept der speläogenetischen Bereiche nur sehr beschränkt angewendet werden.

### **VIII.12 Andere potenziell verkarstungsfähige Gesteine: Quarzite, Arenite Karbonatite, etc.**

Unter anderen geologischen und klimatischen Bedingungen können auch weitere Lithologien verkarstet werden, die hier nicht beschrieben wurden. Wir beschränken uns in diesem Kapitel bewusst auf in der Schweiz vorkommende Lithologien, die auch hiesigen Verhältnissen verkarstungsfähig sind.

## Anhang IX: Berechnung der Karströhrendichte- verteilung

### IX.1 Einleitung

Die Unterteilung des Gebirges in Bereiche mit charakteristischen Karströhrendichten ist ein zentraler Aspekt der KarstALEA-Methode. Als Einheit wird ein Meter Karströhre pro Kubikmeter Gesteinsvolumen verwendet. Dabei werden nur Karströhren ab einem Durchmesser von 50 cm berücksichtigt, da für kleinere Karströhren keine Daten vorhanden sind. Die Gefahren, die von kleineren Karströhren ausgehen (v.a. bei druckhaftem Wasser) darf jedoch nicht vernachlässigt werden.

Die eingesetzten quantitativen Werte der Karströhrendichte beeinflussen eine quantitative Risikobeurteilung signifikant. Die verwendeten Werte sollten daher einerseits die Verhältnisse im Projektgebiet möglichst realistisch wiedergeben. Wenn möglich, basiert die Einschätzung der Karströhrendichte daher auf Daten aus der Analyse von Höhlensystemen im Projektgebiet. Andererseits ist die Datenlage für die Bestimmung der charakteristischen Karströhrendichten in den meisten Projektgebieten nicht ausreichend. In diesem Fall kann teilweise oder ganz auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Im hier vorgestellten Berechnungsbeispiel (Tabelle IX.2) können vorgeschlagenen Erfahrungswerte (einzeln) je nach Datenlage belassen oder an die lokale Gegebenheiten angepasst werden.

### IX.2 Grundprinzipien

Das Gebirge wird aufgrund der speläogenetischen Bereiche (**spB**) und der regionalen Initialfugen (**Az**) in Bereiche mit charakteristischer Karströhrendichte unterteilt (Kapitel 6.5 - 6.7, Tabelle IX.1). Dabei liegt ein entsprechender Gebirgsbereich jeweils in einem bestimmten aktuellen speläogenetischen Bereich sowie im Einflussbereich von keiner, einer oder zweier (oder mehrer) regionaler Initialfugen.

*Tabelle IX.1: Unterteilung des Gebirges in Bereiche mit spezifischer Karströhrendichte.*

*Die Unterteilung erfolgt aufgrund der speläogenetischen Bereiche (spB) und der Anzahl betroffener regionaler Initialfugen (Az)*

Speläogenetische Bereiche (SpB)	Anzahl betroffene regionale Initialfugen (Az)		
	0	1	>=2
Epikarstbereich (EKB)	(zu bestimmen)	(zu bestimmen)	(zu bestimmen)
Epikarstschachtbereich (EKSB)	(zu bestimmen)	(zu bestimmen)	(zu bestimmen)
Schachtbereich (SB)	(zu bestimmen)	(zu bestimmen)	(zu bestimmen)
Horizontalhöhlenbereich (HHB)	(zu bestimmen)	Beispiel (zu bestimmen)	(zu bestimmen)
Initialbereich (IB)	(zu bestimmen)	(zu bestimmen)	(zu bestimmen)

Die Karströhrendichte eines solchen Bereichs hängt von folgenden Faktoren ab (Tabelle IX.2):

- 1) der durchschnittlichen Karströhrendichte des betroffenen speläogenetischen Bereichs ( $\bar{K}_{tot}$ )
- 2) der Kontrast der Karströhrendichte zwischen den Initialfugen regionaler und lokaler Bedeutung (in den jeweiligen speläogenetischen Bereichen:  $S_0$ ,  $S_1$  und  $S_2$ )

- 3) dem Anteil des Gebirgsvolumen, der von einer oder mehrerer regionalen Initialfugen beeinflusst ist ( $P_{IF}$ )
- 4) der Mächtigkeit des Einflussbereiches jeder einzelnen betroffenen Initialfugen ( $M_2$ ; siehe Kapitel IX.5, IX.6 & 6.7)

In den folgenden Abschnitten werden die Annahmen erläutert, die den vorgeschlagenen Werten zu Grunde liegen, und Möglichkeiten aufgezeigt, wie sie den projektspezifischen Verhältnissen angepasst werden können.

Während die Angaben zu den Gebirgsvolumen, häufig an die lokalen Verhältnisse angepasst werden können ( $P_{IF}$ , Kapitel IX.5), wird die Datengrundlage für eine solide Einschätzung der durchschnittlichen Karströhrendichte ( $\square_{tot}$ ) und der Verteilung der Karströhren bezüglich der Initialfugen ( $S_0$ ,  $S_1$  und  $S_2$ ) häufig ungenügend sein. In der Praxis dürften daher meist der Anteil des Gebirgsvolumens, der von Initialfugen beeinflusst ist, ( $P_{IF}$ ) und gegebenenfalls die Mächtigkeit des Einflussbereiches der betroffenen Initialfugen ( $M_2$ ) angepasst werden oder gar ausschliesslich mit den Erfahrungswerten gearbeitet werden.

### IX.3 Durchschnittliche Karströhrendichte eines speläogenetischen Bereiches ( $\square_{tot}$ )

Für die Berechnung der Karströhrendichte eines speläogenetischen Bereiches wird von einer durchschnittlichen Karströhrendichte in diesem Bereich ausgegangen, ohne dass die Dichteunterschiede zwischen Bereichen mit und ohne Initialfugen berücksichtigt werden. Die Karströhrendichten der speläogenetischen Bereiche in einem Projektgebiet können, wie im Kapitel 6.5.4 beschrieben, bestimmt werden. Die vorgeschlagenen Werte basieren auf Erfahrungswerten.

- Im Epikarstschachtbereich kann die Karströhrendichte anhand der Dolinendichte bestimmt werden (1 Doline  $\approx$  1 Schacht); Grössenordnung von 0.001 m/m<sup>3</sup>
- Im **Schachtbereich** entspricht sie rund 5-20% der Karströhrendichte des Epikarstschachtbereichs; Grössenordnung 0.00005 m/m<sup>3</sup> – 0.0002 m/m<sup>3</sup>
- Im **Horizontalhöhlenbereich** entspricht sie rund 4 bis 10 mal der Karströhrendichte des Schachtbereichs; Grössenordnung 0.0002 m/m<sup>3</sup> – 0.002 m/m<sup>3</sup>
- Im **Initialbereich** entspricht sie rund 1-2 ‰ der Karströhrendichte des Horizontalhöhlenbereichs (0.00004 - 0.00002 m/m<sup>3</sup>).

*Beispiel:* Für den Horizontalhöhlenbereich beträgt der vorgeschlagene Wert für  $\square_{tot}$  0.0002 – 0.002 m/m<sup>3</sup>.

### IX.4 Kontrast der Karströhren zwischen Initialfugen lokaler und regionaler Bedeutung ( $S_0$ , $S_1$ und $S_2$ )

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verteilung der Karströhren auf Bereiche mit und ohne Initialfugen regionaler Bedeutung je nach speläogenetischem Bereich stark variiert (Filipponi, 2009). Die herangezogenen Werte ( $S_0$ ,  $S_1$ ) entsprechen den Beobachtungen aus verschiedenen Karstgebieten weltweit. Zum Beispiel liegen im Horizontalhöhlenbereich rund 70 % der Karströhren auf regionalen Initialfugen und rund 30 % auf lokalen Initialfugen.

Anhand eines Gewichtungsfaktors ( $S_2$ ) kann angegeben werden, wie stark die Karströhrendichte im Einflussbereich von zwei regionalen Initialfugen erhöht wird (d.h. im Schnittkörper von zwei regionalen Initialfugen). Zu diesem Gewichtungsfaktor gibt es zur Zeit nur wenige quantitative Daten, der Faktor wurde aufgrund grundsätzlicher Überlegungen und punktuellen Beobachtung festgelegt und beträgt etwa 1.5 für alle speläogenetischen Bereiche.

## IX.5 Anteil des Gebirgsvolumen, der von einer oder mehreren Initialfugen beeinflusst ist ( $P_{IF}$ )

Initialfugen haben normalerweise eine Mächtigkeit im Millimeter- bis Dezimeterbereich. Die sich auf den Initialfugen bildenden Karströhren weisen Durchmesser im Dezimeter-, Meter- und ausnahmsweise Dekameterbereich (Hallen) auf. Der **Einflussbereich einer Initialfuge** ( $M_{IF}$ ) ist jener Bereich um eine Initialfuge in dem assoziierte Karsthohlräume vorkommen. Dieser Einflussbereich ist in der Regel im Bereich von wenigen Metern bis Dekametern und kann grundsätzlich nicht genau bestimmt werden.

Zur Berechnung des Anteils des Gebirgsvolumen im Einflussbereich einer Initialfuge wurde im Rechenbeispiel eine Referenzmächtigkeit von  $M_{IF\_ref} = 1 \text{ m}$  angenommen, was einen Mittelwert zwischen realer Mächtigkeit der Initialfugen und dem Durchmesser der darauf liegenden Karströhren darstellt. Die berechnete Karströhrendichte einer Zone wird in einem späteren Schritt (IX.6) an die Unsicherheit der Lokalisierung der Initialfugen angepasst.

Der **Anteil des Gebirgsvolumens im Einflussbereich einer regionalen Initialfuge** ( $P_{IF}$ ) [%] wird aus dem 3D-Modell des Gebirges mit den Initialfugen (Kap. 6.6) berechnet. Hierfür wird der Anteil der stratigrafischen und der tektonischen Initialfugen einzeln bestimmt ( $P_{strat\_IF}$  und  $P_{tekt\_IF}$ ).

Wurde kein 3D-Modell des Gebirge mit den Initialfugen erstellt oder handelt es sich um eine erste Abschätzung, kann der Anteil des von stratigrafischen Initialfugen beeinflussten Bereichs ( $P_{strat\_IF}$ ) annähernd bestimmt werden, in dem die Anzahl stratigrafischer Initialfugen ( $n_{strat\_IF}$ ) und die Mächtigkeit (des untersuchten Teils) der verkarstungsfähigen Formationen bestimmt wird ( $H_{tot}$ ):

$$(1) \quad P_{strat\_IF} = \frac{n_{strat\_IF} \cdot M_{IF\_ref}}{H_{tot}}$$

*Beispiel:* Beträgt die Gesamtmächtigkeit der Formation 200 m und wurden darin 5 stratigraphische Initialfugen von regionaler Bedeutung identifiziert (und auch die ganze Formation untersucht), beträgt

$$(2) \quad P_{strat\_IF} = \frac{5 \cdot 1 \text{ m}}{200 \text{ m}} = 2.5\%$$

Der Anteil des von tektonischen Initialfugen beeinflussten Bereichs ( $P_{tekt\_IF}$ ) kann analog abgeschätzt werden, sofern die tektonischen Initialfugen einer oder mehreren (klar unterscheidbaren) Kluffamilien angehören. Der von tektonischen Initialfugen beeinflusste Gebirgsanteil wird für jede Kluffamilie einzeln bestimmt und anschliessend kombiniert. Anstatt die Anzahl der Initialfugen ( $n_{tekt\_IF-i}$ ) und die Mächtigkeit des Gebirgsbereichs ( $H_{tot\_tekt\_IF-i}$  – hier die Ausdehnung des betrachteten Gebietes rechtwinklig zur Kluffamilie) zu verwenden, ist es auch möglich direkt den durchschnittlichen Abstand zwischen zwei Initialfugen derselben Kluffamilie ( $d_{tekt\_IF-i}$ ) zu bestimmen:

$$(3) \quad P_{tekt\_IF-i} = \frac{M_{IF\_ref}}{d_{tekt\_IF-i}} \quad (\text{wobei} \quad d_{tekt\_IF-i} = \frac{H_{tekt\_IF-i}}{n_{tekt\_IF-i}}).$$

*Beispiel:* Der durchschnittliche Abstand zwischen zwei Initialfugen einer ersten Kluffamilie ( $d_{tekt\_IF-1}$ ) beträgt 100 m und einer zweiten Kluffamilie ( $d_{tekt\_IF-2}$ ) 200 m, so entsprechen sie dem Gebirgsanteile von  $P_{tekt\_IF-1} = 1\%$  und  $P_{tekt\_IF-2} = 0.5\%$ .

Können die tektonischen Initialfugen nicht in Kluffamilien eingeteilt werden, können die Anteile aufgrund von Schätzungen der Ausdehnung der Initialfugen (multipliziert mit  $M_{IF\_ref}$  =  $V_{tekt\_IF}$ ) und des gesamten Gebirgsvolumen ( $V_{tot}$ ) berechnet werden.

Der gesamte Anteil des Gebirgsvolumens im Einflussbereich der Initialfugen ( $P_{IF}$ ) ist die Vereinigung der Anteile der einzelnen Kluffamilien ( $P_{tekt\_IF-i}$ ) und jener der stratigrafischen Initialfugen ( $P_{strat\_IF}$ ):

$$(4) \quad P_{IF} = \sum_{i=1}^N P_i - \sum_{i>j} P_i \cdot P_j + \sum_{i>j>k} P_i \cdot P_j \cdot P_k - \sum_{i>j>k>l} P_i \cdot P_j \cdot P_k \cdot P_l + \dots$$

*Beispiel:* Bei zwei als Initialfugen dienende Kluffamilien (und einer Serie stratigrafischen Initialfugen) ergeben sich also:

$$(5) \quad \begin{aligned} P_{IF} &= P_{strat\_IF} + P_{tekt\_IF-1} + P_{tekt\_IF-2} - P_{strat\_IF} \cdot P_{tekt\_IF-1} - P_{strat\_IF} \cdot P_{tekt\_IF-2} - P_{tekt\_IF-1} \cdot P_{tekt\_IF-2} + P_{strat\_IF} \cdot P_{tekt\_IF-1} \cdot P_{tekt\_IF-2} \\ P_{IF} &= 2.5\% + 1\% + 0.5\% - 0.025\% - 0.0125\% - 0.0058\% + 0.0001 = 3.96\% \end{aligned}$$

Dabei zeigt sich, dass  $P_{IF}$  gut durch die einfache Summe der Anteile angenähert bestimmt werden kann:

$$(6) \quad P_{IF} \approx \sum_{i=1}^N P_i \approx \frac{n_{strat\_IF} \cdot M_{IF\_ref}}{H_{tot}} + \sum_{i=1}^N \frac{M_{IF\_ref}}{d_{tekt\_IF-i}}$$

*Beispiel:* Für unser Rechenbeispiel wäre dies  $P_{IF} = \frac{5 \cdot 1m}{200m} + \frac{1}{100} + \frac{1}{200} = 2.5\% + 1\% + 0.5\% = 4\%$

Beim konkreten Beispiel beträgt die damit verbundene (relative) Rechenungenauigkeit 1% (3.96% vs. 4%). Bei sehr grosser Initialfugendichte kann die Ungenauigkeit ein paar wenige Prozent erreichen.

Sind nun  $P_{IF}$  bestimmt, ist zu überprüfen, ob diese mit den anderen Annahmen kohärent sind und allgemein Sinn machen:

- Der Anteil des Volumens des von regionalen Initialfugen beeinflussten Bereichs ( $P_{IF}$ ) eines speläogenetischen Bereichs darf den Anteil der summierten Karströhrenlängen entlang regionaler Initialfugen ( $S_r$ ) nicht überschreiten. Sind die Werte gleich (%), wird von einer gleichmässigen Verteilung der Karströhren unabhängig der Initialfugen ausgegangen. Wird  $P_{IF}$  grösser als der Anteil der summierten Karströhrenlänge entlang regionaler Initialfugen angenommen, wäre die Karströhrendichte auf den Initialfugen kleiner als im Umgebungsgestein, was dem Konzept der Initialfugen widerspricht. Gegebenenfalls ist die Richtigkeit der ausgeschiedenen Initialfugen zu überprüfen oder der Verteilung der summierten Karströhrenlänge auf Bereiche mit und ohne regionale Initialfugen anzupassen ( $S_0$  und  $S_r$ ), was z.B. bei einer sehr hohen Initialfugendichte sinnvoll sein kann.
- Sind die Initialfugen sehr unregelmässig im Gebirgsmassiv verteilt, können die Annahmen überprüft werden, in dem die Volumina ( $V_{tot}$  und  $V_{IF}$ ) oder deren Anteile ( $P_{IF}$ ) für jeden speläogenetischen Bereich einzeln berechnet werden.
- Ergeben die Berechnungen unrealistisch hohe Karströhrendichten entlang regionaler Initialfugen, ist entweder die durchschnittliche Karströhrendichte zu hoch oder (wahrscheinlicher) sind nicht alle regionale Initialfugen bestimmt worden respektive diese sind nicht bekannt. Letzteres kann durch eine Korrektur der Verteilung der summierten Karströhrenlänge auf Bereiche mit und ohne regionale Initialfugen ( $S_0$  und  $S_r$ ) ausgeglichen werden (Verringerung des Anteils der Karströhren entlang regionaler Initialfugen).

## IX.6 Mächtigkeit der einzelnen Initialfugen ( $M_2$ )

Aufgrund der Annahmen  $\square_{tot}$ ,  $S_0$ ,  $S_1$  und  $S_2$  sowie  $P_{IF}$  kann die Karströhrendichte in den einzelnen speläogenetischen Bereichen in Funktion der Anzahl betroffener Initialfugen berechnet werden ( $\square_0$ ,  $\square_1$ ,  $\square_2$  für jeden **SpB**). Diese Karströhrendichten können nun den Bereichen mit spezifischer Karströhrendichte entlang der Tunnelachse  $Z$  zugeordnet

werden ( $\rho_{z\_unkorrigiert}$ ), welche aufgrund der speläogenetischen Bereiche  $SpB_z$  und der Anzahl der Initialfugen  $Az_z$  ausgeschieden worden sind (siehe Kapitel 6.7).

*Beispiel:* In unserem Rechenbeispiel ergibt sich für eine Zone Z im horizontalen Höhlenbereich mit einer Initialfuge eine Karströhrendichte  $\rho_{z\_unkorrigiert}$  von  $0.06 \text{ m/m}^3$ .

Die so berechneten Karströhrendichten entlang von regionalen Initialfugen gehen jedoch von einer Mächtigkeit des Einflussbereiches der Initialfugen von (nur) 1 m aus. Die Karströhren auf den Initialfugen können jedoch 1 m Durchmesser um ein mehrfaches überschreiten. Weiter hängt die Unsicherheit der Lokalisierung einer Initialfuge im Bereich der Tunnelachse von der Lage des Untertagbauprojektes, der Komplexität der Geologie und der Datenqualität ab und ist im Bereich von wenigen Metern bis zu mehreren Dekametern. Bei der Berechnung der Karströhrendichte sind diese Faktoren zu berücksichtigen. Entsprechend muss die angenommene Mächtigkeit des Einflussbereiches einer Initialfuge an die Verhältnisse angepasst werden. Da die Karströhrendichte entlang der entsprechenden Initialfuge jedoch unabhängig von der Genauigkeit der Lokalisierung ist, müssen die Karströhrendichte für jede einzelne Zone Z entlang der Tunnelachse an die (lokal) angenommene Mächtigkeit der (einzelnen) Initialfuge  $M_z$  angepasst werden.

$$(7) \quad \rho_z = \frac{\rho_{spB,Az} \cdot M_{IF\_ref} + \rho_{spB,0} \cdot (M_z - M_{IF\_ref})}{M_z}$$

*Beispiel:* In unserem Beispiel ergibt sich – unter Annahme einer Mächtigkeit des Einflussbereiches der Initialfuge von  $M_z = 10 \text{ m}$  – eine (korrigierte) Karströhrendichte  $\rho_z$  von  $0.007 \text{ m/m}^3$ .

Da die Länge eines Karströhrendichtebereichs im Einflussbereich einer Initialfuge nicht nur von deren angenommener Mächtigkeit  $M_z$ , sondern auch von deren Geometrie (Neigung zum Untertagbauwerk) abhängig ist, entspricht die angenommene Mächtigkeit  $M_z$  nicht direkt der Länge eines Karströhrendichtebereichs entlang der Tunnelachse  $L_z$ .

Mit Hilfe der Tunnelquerschnittsfläche  $A_{Tunnel}$  kann die Karströhrendichte der entsprechenden Zone  $\rho_z$  (in  $\text{m/m}^3$ ) in Meter Karströhren pro Tunnelmeter ( $KR-TM_z$ ) umgerechnet werden. Multipliziert mit der Länge des Karströhrendichtebereichs  $L_z$  ergeben sich die erwarteten Meter Karströhren pro Tunnelabschnitt ( $KR_z$ ) und aufsummiert jene des ganzen Tunnels.

Tab. 3.2 (Seite 186): Rechnungsbeispiel zur quantitativen Bestimmung der Karströhrendichten in den verschiedenen speläogenetischen Bereichen



## Anhang X: Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-d	prognostisches KarstALEA-Längsprofil .....	12
Abb. 2-d	Ablauf der KarstALEA-Untersuchungen in sieben Arbeitsschritten .....	14
Abb. 3-d	Der Ablauf der KarstALEA-Untersuchungen .....	16
Abb. 1-f	Profil prévisionnel KarstALEA .....	18
Abb. 2-f	Principe de la méthode KarstALEA en 7 pas successifs .....	20
Abb. 3-f	Le déroulement des études KarstALEA .....	22
Abb. 1-e	Provisional KarstALEA profile. ....	24
Abb. 2-e	Principle of the KarstALEA method in 7 successive steps .....	26
Abb. 3-e	Progress of the KarstALEA method .....	28
Abb. 1-i	Profilo di previsione KarstALEA .....	30
Abb. 2-i	Principio del metodo KarstALEA in 7 stadi successivi .....	32
Abb. 3-i	sviluppo degli studi KarstALEA .....	34
Abb. 2.1	Typische Karsterscheinungen .....	38
Abb. 2.2	Karströhrensystem des Réseau Siebenhengste-Hohgant, Habkern/Eriz BE .....	39
Abb. 2.3	Karstgebiete der Schweiz .....	40
Abb. 2.4	Karstspezifische Gefährdungsbilder im Tunnelbau .....	42
Abb. 3.1	Wasserzirkulation im verkarsteten Gebirge .....	45
Abb. 3.2	Das Karstsystem und seine Elemente .....	47
Abb. 3.3	Nicht-lineare Reaktion der Schüttung von Karstquellen (und Karströhren) auf Druckschwankungen .....	49
Abb. 3.4	Abflussganglinie des Höhlenflusses Milandrine amont .....	50
Abb. 3.5	Die Verkarstung ist selbstregulierender Prozess mit positiver Rückkoppelung .....	52
Abb. 3.6	Lösungskinetik von Calcit .....	53
Abb. 3.7	Gleichgewichtsreaktionen bei der Kalklösung .....	54
Abb. 3.8	Klassifizierung der Trennflächen im verkarsteten Gebirge .....	55
Abb. 3.9	Gang auf tektonischer Initialfuge im Hölloch SZ .....	56
Abb. 3.10	Höhlen entlang einer tektonischen Initialfuge .....	57
Abb. 3.11	Drei Arten von stratigraphischen Initialfugen .....	58
Abb. 3.12	Erkennen von stratigraphischen Initialfugen in einem 3D-Höhlenmodell .....	59
Abb. 3.13	Stadien der Entwicklung einer Karströhre .....	61
Abb. 3.14	Die speläogenetischen Bereiche eines verkarsteten Gebirges .....	62
Abb. 3.15	Die Entwicklung eines Karstsystems erfolgt in der Regel in mehreren Phasen .....	65
Abb. 3.16	Ausscheidung der horizontalen Höhlenbereiche früherer Verkarstungsphasen (paläo-HHB) basierend auf die phreatischen Höhlengänge eines Teils des eines Teils des Réseau Siebenhengste-Hohgant .....	65
Abb. 3.17	Die Kombination der Initialfugen mit den speläogenetischen Bereichen erlaubt das Gebirge in Bereiche verschiedener Karströhrendichten zu unterteilen .....	67
Abb. 4.1	Erkenntnisgewinn der KarstALEA-Methode gegenüber einer klassischen Anwendung der SIA 199 .....	68
Abb. 4.2	Übersicht über die KarstALEA-Methode .....	69
Abb. 4.3	Datengrundlagen der KarstALEA-Untersuchungen .....	72
Abb. 4.4	Von der Vermessung bis zum Höhlenplan und 3D-Modell der Höhle .....	74
Abb. 4.5	KarstALEA Gefahren- und Risikoanalyse .....	75
Abb. 4.6	Anwendungsgrenzen von KarstALEA .....	81
Abb. 4.7	Schema des Systems „Karst“ .....	82
Abb. 5.1	Ablauf einer typischen KarstALEA-Erstbeurteilung .....	84
Abb. 5.2	Summarische Charakterisierung der Verkarstung eines Projektgebiets .....	87
Abb. 5.3	Geologische und hydrogeologische Situation der Umfahrung Flims .....	90
Abb. 5.4	Geologisches 3D-Modell der Region Flims mit den wichtigsten hydrologischen Elementen .....	92
Abb. 6.1	Ziel der KarstALEA-Erkundung .....	94
Abb. 6.2	Ablauf der Untersuchungen der KarstALEA-Erkundung .....	95
Abb. 6.3	Das geologische Modell .....	96
Abb. 6.4	G1 – Geologisches 3D-Modell .....	97

Abb. 6.5	Hydrogeologisches Profil mit ergänzenden Angaben zur SIA 199 .....	98
Abb. 6.6	H1 – Hydrogeologisches 3D-Modell und KARSYS-Karte .....	102
Abb. 6.7	H1 – Durch ein Untertagbauprojekt potenziell beeinflusste Grundwasservorkommen und Quellen .....	104
Abb. 6.8	H2 & H4 – Einzugsgebiete der Karstquellen .....	105
Abb. 6.9	H2 – Hydrogramm der wichtigsten Quellen in der Region Flims .....	107
Abb. 6.10	H5 – Hochwasserinterpretation in Höhlen .....	109
Abb. 6.11	H5 – Piezometermessungen im Karst .....	111
Abb. 6.12	Profil der aktuellen und paläo-spläogenetischen Bereiche sowie Tunnelband mit ergänzende Angaben zur SIA 199 (für Details siehe Anhang III) .....	116
Abb. 6.13	S1 – Die aktuellen spläogenetischen Bereiche .....	118
Abb. 6.14	Methoden zur Ausscheidung von paläo-spläogenetischen Bereiche .....	119
Abb. 6.15	Lithifizierte Sedimente einer Paläokarstverfüllung im Karrenfeld der Siebenhengste .....	120
Abb. 6.16	S3 – Optische und statistische Bestimmung von paläo-Horizontalhöhlenbereiche aus Höhlenvermessungsdaten .....	121
Abb. 6.17	S4 – Bestimmung von paläo-Vorfluterniveaus aus geomorphologischen Daten .....	122
Abb. 6.18	S7 – Summenkurve der Gangdimensionen einer alpinen Höhle .....	124
Abb. 6.19	S8 – Karströhrendichte in den spläogenetischen Bereichen .....	126
Abb. 6.20	Profil des Modells der Initialfugen mit ergänzender Linie im Stollenband .....	126
Abb. 6.21	Überblick der Methoden zur Ausscheidung von Initialfugen .....	128
Abb. 6.22	Erkennen von Initialfugen an Aufschlüssen .....	130
Abb. 6.23	I3 – Korrelation von in Bohrlöchern identifizierten Initialfugen .....	132
Abb. 6.24	I4 – Bestimmung der Initialfugen aus geomorphologischen Daten .....	133
Abb. 6.25	I5 – Identifizierung von Initialfugen anhand von spläomorphologischen Daten .....	134
Abb. 6.26	I6 – Optische Bestimmung von Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten .....	136
Abb. 6.27	I6 – Statistische Identifikation der Initialfugen aus Höhlenvermessungsdaten .....	137
Abb. 6.28	Karströhrendichte entlang Tunnelprofil inkl. SIA Zeile .....	139
Abb. 6.29	Ausscheidung der Karströhrendichtezonen .....	139
Abb. 6.30	Übertragung der Karströhrendichtezonen auf das Tunnelband .....	141
Abb. 6.31	Profil auf Tunneltrasse mit aktuellen und paläo-KarstALEA-Zonen sowie ergänzende Beschreibung der gefährdungsrelevanten Eigenschaften .....	142
Abb. 6.32	Ausscheidung der KarstALEA-Zonen .....	142
Abb. 6.33	Karstspezifischen Gefährdungen .....	143
Abb. 7.1	Ablauf der Untersuchungen der KarstALEA-Ausführung .....	145
Abb. 7.2	Karsthohlräume und Initialfugen während des Vortriebs .....	148
Abb. 7.3	Wahrscheinlichkeit mit einer Erkundungsbohrung eine Karströhre zu finden .....	150

## Anhang XI: Tabellenverzeichnis

Tab. 1-d	Die wichtigsten Vorteile und Nutzen der KarstALEA-Methode .....	17
Tab. 1-f	Les avantages et bénéfices principaux de la méthode KarstALEA .....	23
Tab. 1-e	Main strengths and benefits provided by the KarstALEA method .....	29
Tab. 1-i	Vantaggi e benefici principali del metodo KarstALEA .....	35
Tab. 2.1	Auswahl von spektakulären karstspezifischen Schwierigkeiten, die bei ausgewählten Tunnelbauprojekten in der Schweiz angetroffen wurden .....	41
Tab. 2.2	Karstspezifische Gefährdungsbilder im Untertagbau .....	43
Tab. 3.1	Verteilung der Karströhren entlang lokaler und regionaler Initialfugen für die verschiedenen speläogenetischen Bereiche .....	56
Tab. 4.1	Etappeierung der KarstALEA-Untersuchungen .....	77
Tab. 5.1	Erkennen von Karstquellen .....	85
Tab. 5.2	Charakterisierung der Formationen .....	86
Tab. 5.3	Beispiel eines Untersuchungsprogramms für die erste Iteration der KarstALEA-Erkundungsphase (Vorstudie) .....	90
Tab. 5.4	Hydrogeologische Funktion der Formationen Hinweise auf eine Verkarstung der entsprechenden Formationen .....	91
Tab. 6.1	Die Ziele der KarstALEA-Erkundung für die Teilphasen gemäss SIA 197 .....	94
Tab. 6.2	Übersicht über die vorgeschlagenen hydrogeologischen Untersuchungsmethode der KarstALEA-Methode .....	99
Tab. 6.3	Abschätzung der zu erwartenden Schüttungen in Abhängigkeit der hydrogeologischen Bedingungen und der Verbindung zum Karströhrensystem .....	115
Tab. 6.4	Übersicht über die vorgeschlagenen Untersuchungsmethode der KarstALEA-Methode zur Bestimmung und Charakterisierung der speläogenetischen Bereiche .....	117
Tab. 6.5	Kohärenztabelle für die Bestimmung von paläo-Horizontalhöhlenbereichen .....	119
Tab. 6.6	Übersicht der vorgeschlagenen Untersuchungsmethode der KarstALEA-Methode zur Bestimmung und Charakterisierung der Initialfugen .....	127
Tab. 6.7	Das Beispiel einer Kohärenztabelle zeigt, dass Initialfugen auch anhand von wenigen Daten ausgeschieden werden können, wenn die verschiedenen Methoden kombiniert werden .....	128
Tab. 6.8	Qualitative Beurteilung der Karströhrendichte .....	140
Tab. 7.1	Vorauserkundungsmassnahmen .....	146

## Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
C	Konzentration
DHM	Digitales Höhenmodell
e-HHB	epiphreatischer Horizontalhöhlenbereich (KarstALEA-Zone)
e-SB	epiphreatischer Schachtbereich (KarstALEA-Zone)
EKB	Epikarstbereich (speläogenetischer Bereich & KarstALEA-Zone)
EKSB	Epikarstschachtbereich (speläogenetischer Bereich)
GM	Galeriemeter
GPS	Global Positioning System (globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung)
HHB	Horizontalhöhlenbereich (speläogenetischer Bereich)
IB	Initialbereich (speläogenetischer Bereich)
IF	Initialfuge
KARSYS	Methode zur Charakterisierung der KARst SYSteme
MQ	Mittlerer Abfluss
NFP	Nationales Forschungsprogramm des Schweizerischen Nationalfonds
p-HHB	phreatischer Horizontalhöhlenbereich (KarstALEA-Zone)
p-IB	phreatischer Initialbereich (KarstALEA-Zone)
pEKB / paläo-EKB	paläo-Epikarstbereich (paläospeläogenetischer Bereich)
pEKSB / paläo-EKSB	paläo-Epikarstschachtbereich (paläospeläogenetischer Bereich)
pHHB / paläo-HHB	paläo-Horizontalhöhlenbereich (paläospeläogenetischer Bereich)
pSB / paläo-SB	paläo-Schachtbereich (paläospeläogenetischer Bereich)
Q	Abfluss
Qsp	mittlere Abflusshöhe / spezifischer Abfluss
SB	Schachtbereich (speläogenetischer Bereich)
SIA ###	Norm ### des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins
SISKA	Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung
spB	speläogenetischer Bereich
SSS/SGH	Société Suisse de Spéléologie / Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung
TBM	Tunnelbohrmaschine
TM	Tunnelmeter
UVB	Umweltverträglichkeitsbericht
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
v-EKSB	vadoser Epikarstschachtbereich (KarstALEA-Zone)
v-SB	vadoser Schachtbereich (KarstALEA-Zone)
concept	signification
DEK	domaine de l'épikarst (domaine spéléogénétique & zone KarstALEA) → EKB
DGH	domaine des galeries horizontales (domaine spéléogénétique) → HHB
DI	domaine d'inception (domaine spéléogénétique) → IB
DP	domaine des puits (domaine spéléogénétique) → SB
DPEK	domaine des puits liés à l'épikarst (domaine spéléogénétique) → EKSB

e-DGH	domaine épiphréatique des galeries horizontales (zone KarstALEA) → e-HHB
e-DP	domaine épiphréatique des puits (zone KarstALEA) → e-SB
p-DGH	domaine phréatique des galeries horizontales (zone KarstALEA) → p-HHB
p-DI	domaine phréatique d'inception (zone KarstALEA) → p-IB
pDEK	paléo-domaine de l'épikarst (domaine paléospéléogénétique) → pEKB
pDGH	paléo-domaine des galeries horizontales ( (domaine paléospéléogénétique) → pHHB
pDP	paléo-domaine des puits ( (domaine paléospéléogénétique) → pSB
pDPEK	paléo-domaine des puits liés à l'épikarst (domaine paléospéléogénétique) → pEKSB
v-DEPK	domaine vadose des puits liés à l'épikarst (zone KarstALEA) → v-EKSB
v-DP	domaine vadose des puits (zone KarstALEA) → v-SB

concept	meaning
e-HCD	epiphreatic horizontal cave domain (KarstALEA zone ) → e-HHB
e-SD	epiphreatic shaft domain (KarstALEA zone ) → e-SB
EKD	epikarst domain (speleogenetic domain & KarstALEA zone) → EKB
EKSD	epikarst shaft domain (speleogenetic domain) → EKSB
HCD	horizontal cave domain (speleogenetic domain) → HHB
ID	inception domain (speleogenetic domain) → IB
p-HCD	phreatic horizontal cave domain (KarstALEA zone ) → p-HHB
p-ID	phreatic inception domain (KarstALEA zone ) → p-IB
pEKD	paleo-epikarst domain (paleospeleogenetic domain) → p-EKB
pEKSD	paleo-epikarst shaft domain (paleospeleogenetic domain) → p-EKSB
pHCD	paleo-horizontal cave domain (paleospeleogenetic domain) → p-HHB
pSD	paleo-shaft domain (paleospeleogenetic domain) → p-SB
SD	shaft domain (speleogenetic domain) → SB
v-EKSD	vadose epikarst shaft domain (KarstALEA zone ) → v-EKSB
v-SD	vadose shaft domain (KarstALEA zone ) → v-SB

concetto	significato
AEC	ambiente epicarsico (ambiente speleogenetico) → EKB
AGO	ambiente con gallerie orizzontali (ambiente speleogenetico) → HHB
AI	ambiente di inizializzazione (ambiente speleogenetico) → IB
AP	ambiente con pozzi (ambiente speleogenetico) → SB
APEC	ambiente con pozzi dovuti all'epicarso (ambiente speleogenetico) → EKSB
f-AGO	ambiente freatico con gallerie orizzontali (zona KarstALEA) → p-HHB
f-AI	ambiente freatico di inizializzazione (zona KarstALEA) → p-IB
fv-AGO	ambiente freatico-vadoso con gallerie orizzontali (zona KarstALEA) → e-HHB
fv-AP	ambiente freatico-vadoso con pozzi (zona KarstALEA) → e-SB
pAEC	paleo-ambiente epicarsico (ambiente paleospeleogenetico) → pEKB
pAGO	paleo-ambiente con gallerie orizzontali (ambiente paleospeleogenetico) → pHHB
pAP	paleo-ambiente con pozzi (ambiente paleospeleogenetico) → pSB
pAPEC	paleo-ambiente con pozzi dovuti all'epicarso (ambiente paleospeleogenetico) → pEKSB
v-AP	ambiente vadoso con pozzi (zona KarstALEA) → v-SB
v-APEC	ambiente vadoso con pozzi dovuti all'epicarso (zona KarstALEA) → v-EKSB

## Literaturverzeichnis

- 
- Atlas der Schweiz 2.0, 2004, Bundesamt für Landestopographie, Wabern
- 
- Audra P., Bini A., Gabrovšek F., Häuselmann P., Hobléa F., Jeannin P.-Y., Kunaver J., Monbaron M., Šušteršič F., Tognini P., Trimmel H., Wildberger A., 2007: Cave and karst evolution in the Alps and their relation to paleoclimate and paleotopography. *Acta Carsologica* 36/1, 53-68.
- 
- Baroň I., 2002: Speleogenesis along sub-vertical joints: A model of plateau karst shaft development: A case study: the Dolný Vrch Plateau (Slovak Republic). *Cave and Karst Science* 29/1, 5-12.
- 
- Bechtel T.D., Bosh F.P., Gurk M., 2007: Geophysical methods. In Goldscheider N. and Drew D. (eds): *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor and Francis, 171-200.
- 
- Bitterli, T., 1996: Höhlen der Region Basel – Laufen. *Speläologische Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften*, Basel, 328 S.
- 
- Bitterli, T., 1997: Konzept zur Ermittlung von Bedeutung, Empfindlichkeit, Bedrohung und Schutzbedarf der Höhlen in der Schweiz (Speläologische Geotope). *Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung SSS/SGH*, 6 S.
- 
- Bosák P., 2002: Karst process from the beginning to the end: How can they be dated? – In: Gabrovšek (eds.), *Evolution of Karst: from prekarst to cessation*. Postojna-Ljubljana, Založba ZRC, 155-190.
- 
- BUWAL (Hrsg.), 1998: Praxishilfe - Kartierung der Vulnerabilität in Karstgebieten (Methode EPIK), in *Vollzug Umwelt*, Bern, 58 S.
- 
- Dreybrodt W., Gabrovšek F., Romanov D., 2005: Processes of Speleogenesis: a modelling approach. *Carsologica*, ZRC Publishing, Ljubljana, 376 S.
- 
- Eraso A., 1985: Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje en el Karst. *KOBIE, Serie Ciencias Naturales* 15, 15-165.
- 
- Faulkner T., 2006: Tectonic inception in caledonide Marbles. *Acta Carsologica* 35/1, 7-21.
- 
- Filipponi M., 2007: Speläologische Erscheinungen im Zusammenhang mit stratigraphischen Initialfugen. *Laichinger Höhlenfreund* 42, 21-32.
- 
- Filipponi M., 2009: Spatial analysis of karst conduit networks and determination of parameters controlling the speleogenesis along preferential lithostratigraphic horizons. PhD-Thesis, *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, 305 S.
- 
- Filipponi M., Dickert A., 2012: Die speläogenetischen Bereiche am Beispiel des Wägitals. *Akten des 13. Nationaler Kongress für Speläologie*, Muotathal.
- 
- Filipponi M., Jeannin P.-Y., 2008: Prediction of karst occurrences by interpreting borehole data within the Inception Horizon Hypothesis. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst 2008, Proceedings of the 11th Multidisciplinary Conference, Geotechnical Special Publication 183*: 120-130.
- 
- Filipponi M., Jeannin P.-Y., 2009: Flow distribution at early stage of karstification and 3D geometry of cave systems. *15th International Congress of Speleology, Proceedings, Volume 2* : 871-876.
- 
- Filipponi M., Jeannin P.-Y., Tacher L., 2009: Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology*, 106, 86-99.
- 
- Ford D.C., Williams P., 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester, 652 S.
- 
- Gigon R., 1976: *Inventaire Spéléologique de la Suisse, Tome 1, Canton de Neuchâtel*. Commission de Spéléologie de la Société helvétique des Sciences naturelles, Neuchâtel, 224 S.
- 
- Goldscheider N., Drew D.P. (Eds.), 2007: *Methods in Karst Hydrogeology*, Taylor & Francis Group, London, 264 S.
-

- Groves C.G., Howard A.D., 1994: Early development of karst systems - 1. Preferential flow path enlargement under laminar flow. *Water Resources Research* 30, 2837-2846.
- Häuselmann, P., 2002: Cave genesis and its relationship to surface processes: investigations in the Siebenhengste Region (BE, Switzerland), PhD Thesis, Université de Fribourg, HRH, 168 S.
- ISSKA, 2008 : Abschätzung des Karstwasservolumens in der Schweiz – Kurzstudie, gestützt auf tektonische Profile, unveröffentlichter Bericht, Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, Auftraggeber : Bundesamt für Umwelt BAFU, 20 S.
- Jäckli H., Bögli A., Locher Th., Nabholz W., Schindler C., Weber E., Wyssling L., 1985: Eräuterungen zur Hydrogeologischen Karte der Schweiz, Blatt Panixerpass, Schweizerische geotechnische Kommission, 132 S.
- Jeannin P. Y., 1996: Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques, thèse, Université de Neuchâtel, Neuchâtel, 248 S.
- Jeannin P.-Y., Eichenberger U., Singreich M., Vouillamoz J, Malard A, Weber E, 2012 (eingereicht): KARSYS, a pragmatic approach to Karst hydrogeological system conceptualisation. Application tot he assessment of reserve and resource estimation of groudwater in Switzerland. *Environmental Geology*
- Kiraly L., 1973: Carte hydrogéologique du Canton de Neuchâtel et notice explicative. *Bulletin de la Société neuchâteloise des sciences naturelles*, 96, 1-15
- Kiraly L., 1975: Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. – In: Burger and Dubertret (eds): *International Union Geol. Sci., Series B*, 3, 53-67.
- Klimchouk A., 2005: Unconfined versus confined speleogenetic settings: variations of solution porosity. *International Journal of Speleology*, 35 (1), 19-24.
- Klimchouk A., 2007: Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. *National Cave and Karst Research Institute, Special Paper* 1, 106 S.
- Klimchouk A., Ford D.C., Palmer D.C., Dreybrodt W., 2000: Speleogenesis, evolution of karst aquifers. *National Speleological Society*, 527 S.
- Köhl A. 1953: Hydrologische Beobachtungen im Flimser Bergsturzgebiet.- *NGG, J.ber. Naturforschende Gesellschaft Graubünden*, N.F. 84, 16-28
- Lowe D.J., 1992: The origin of limestone caverns: in inception horizon hypothesis. PhD Thesis, Manchester Polytechnic, United Kingdom, 512 S.
- Muhlethaler C., 1931: Carte géologique La Chaux, Les Verrières, Feuilles 276, 277. *Commission Géologique Suisse*
- Osborne R.A.L., 2002: Paleokarst: cessation and rebirth? – In: Gabrovšek, (eds): *Evolution of karst: from prekarst to cessation*, 97-114.
- Palmer A.N., 1987: Cave levels and their interpretation. *Bulletin of the National Speleological Society of America* 49, 50-66.
- Palmer A.N., 2007: *Cave Geology*. Cave Books, 454 S.
- Pfaundler, M., and A. Zappa (2006), Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz - Ein optimierter Datensatz im 500×500 m Raster, *Wasser Energie Luft*, 98(2006/04), 291 S.
- Plan L., Filipponi M., Behm M., Seebacher R., Jeutter P., 2009: Constraints on alpine speleogenesis from cave morphology - a case study from the eastern Totes Gebirge (Northern Calcareous Alps, Austria). *Geomorphology* 106, 118-129.
- Plummer L.N., Wigley T.M.L., 1976: The dissolution of calcite in CO<sub>2</sub>-saturated solutions at 25°C and 1 atmosphere total pressure. *Geoch. Cosmochim. Acta* 40, 191-202.
- Rickenbach E., 1925: Description géologique du Val-de-Travers, du Cirque de Saint-Sulpice et de la Vallée de la Brévine. *Bulletin de la Société neuchâteloise de Sciences Naturels*, 1-82.
- Rohrer E., 1979: Untersuchungen im Gebiet des Vorabs, unveröffentlichter Bericht

---

Sauro F., Filipponi M., Zampieri D., 2011: Analisi morfologica di sistemi carsici tramite software di elaborazione 3D: il caso dei Piani Eterni nel Parco Nazionale Dolomiti Bellunesi, Veneto, Italia.. XXI Congresso Nazionale di Speleologia, Trieste.

---

Schmassmann S., Hitz O., 2010: Wegleitung zur Beurteilung von Projekten in Karstgebieten. Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung, 38 S. [www.speleo.ch](http://www.speleo.ch)

---

SIA 112-2001 Leistungsmodell, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

---

SIA 197-2004 Projektierung Tunnel – Grundlagen, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

---

SIA 199-1998 Erfassen des Gebirges im Untertagbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

---

Scott K.W., 1997: A practical guide to borehole geophysics in environmental investigations. Lewis Publishers. 192 S.

---

Vouillamoz, J., Jeannin, P.-Y., Demary, S., Weber E., Malard, A., Eichenberger, U., 2011: KARSYS, un concept de caractérisation des systèmes karstiques pour une gestion durable des ressources en eau, In Proceeding H2Karst, 9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon (France) 1-4 sep. 2011.

---

Waltham T., Bell F., Culshaw M., 2005: Sinkholes and subsidence – Karst and Cavernous Rocks in Engineering Constructions. Springer, 382 S.

---

Weber, E., Jordan, F., Jeannin, P.-Y., Démary, S., Vouillamoz, J., Eichenberger, U., 2011: Swisskarst project (NRP61): Towards a pragmatic simulation of karst spring discharge with conceptual semi-distributed model. The Flims case study (Eastern Swiss Alps), in H2Karst, 9th Conference on Limestone Hydrogeology, Université de Franche-Comté, Université de Neuchâtel, 1.-3. Sept. 2011, Besançon, France, S. 483-486.

---

Wildberger, A., Jeannin, P.-Y., Pulfer, T. 2001: Hochwasser 1999 und 2000 im Hölloch (Zentralschweiz): Beobachtungen und Folgerungen, in 11. Nationaler Kongress für Höhlenforschung, Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung SSS/SGH, Genf, S. 81-89.

---

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK Formular Nr. 3: Projektabschluss

## Strassen, Brücken, Tunnel

erstellt / geändert am: 7. August 2012

### Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU2009/003

Projekttitel: Prediction of karst occurrences in underground engineering

Enddatum: 31. März 2012

### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Der Tunnelbau im verkarsteten Gebirge führt häufig zu Problemen, welche schwere und kostspielige Folgen haben können. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Methode zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau entwickelt, an Fallbeispielen getestet und in der VSS-Publikation "KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau" zusammengefasst.

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. Die Resultate werden in einem prognostischen Längsprofil zusammengefasst. Darin wird die Wahrscheinlichkeit auf eine Karströhre zu stossen für die verschiedenen Tunnelabschnitte sowie die Eigenschaften der zu erwartenden Karsthohlräume detailliert beschrieben.

Die KarstALEA-Methode fasst die aktuellen akademischen Kenntnisse über den Karst zusammen und kombiniert sie in der Art, dass sie Antworten auf die praktischen Fragen des Untertagbaus liefert. Die Methode basiert auf der Tatsache, dass rund 70 % der Karströhren auf wenigen geologischen Trennflächen entstanden sind. Weiter variiert die Karströhrendichte je nach Position innerhalb des Gebirges bezüglich der aktuellen und vergangenen hydrogeologischen Bedingungen. So treten sie zum Beispiel in gewissen Höhenlagen gehäuft auf, welche früheren Vorfluterniveaus entsprechen (Paläo-Talböden). Die Ausscheidung dieser Trennflächen und der Paläovorfluterniveaus ermöglicht, Zonen mit erhöhter Karströhrendichte auszuscheiden. Kenntnisse zur Hydrogeologie und zur Verkarstungsgeschichte des Gebirges ermöglichen weiter gewisse Eigenschaften dieser Hohlräume zu prognostizieren (Grösse und Form der Hohlräume, Menge und Art der Sedimente, permanent oder temporär druckhaftes Wasser, zu erwartende Schüttung, etc.).



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Zielerreichung:

Das formulierte Ziel, dem Geologen eine Methode zur Beurteilung von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau zur Verfügung zu stellen, wurde erreicht. Die KarstALEA-Wegleitung fasst die aktuellen Kenntnisse der Speläogenese und der Karsthydrogeologie zusammen und übersetzt sie in eine praxisnahe Methode für den Tunnelgeologen.

Die Überprüfung der Methode erfolgte durch "back analysis" von bestehenden Tunnels und im Rahmen von Karstprognosen für geplante und zum Teil inzwischen ausgebrochen Tunnels. Unter anderem aufgrund der z. T. mangelnden Datenlage konnten nicht all "back analysis"-Fallbeispiele mit der gleichen Tiefe bearbeitet werden. Dies konnte jedoch durch den Erkenntnisgewinn der (im Projekt nicht vorgesehenen) aktuellen Bauvorhaben kompensiert werden.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Die KarstALEA-Wegleitung legt die Basis für eine bessere Berücksichtigung des Karstes im Untertagbau und kann einen wichtigen Beitrag zur begrifflichen und inhaltlichen Harmonisierung von Karstprognosen im Tunnelbau leisten.

Die KarstALEA-Methode ist eine neuartige Methode, die auf Konzepte basiert, mit denen viele Geologen nicht vertraut sind. Wir empfehlen daher, entsprechende Weiterbildungen zu organisieren. Ebenso wäre es sinnvoll, diese Wegleitung auf französisch und/oder englisch zu übersetzen, um sie einem weiteren Publikum zugänglich zu machen. In einer späteren Phase kann eine Integration der KarstALEA-Methode in die üblichen Normen erwogen werden.

Eine Anpassung der KarstALEA-Methode für andere Bauvorhaben (Strassen, Staudämme, Windkraftwerke etc.) und Fragestellungen (Naturgefahren, Trinkwasserversorgung und Wassermanagement) in Karstgebieten sind z.T. schon am Laufen - die ersten Resultate sind vielversprechend.

#### Publikationen:

- Filippini, M.; Schmassmann, S.; Jeannin, P.-Y.; Parriaux, A.; 2012. KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau. Forschungsprojekt FGU 2009/003 des Bundesamt für Strassen ASTRA, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich
- Filippini, M.; Schmassmann, S.; Jeannin, P.-Y.; Parriaux, A.; 2011. Karst - ALEA - Method a risk assessment method of karst for tunnel projects: Application to the Tunnel of Flims (GR, Switzerland). Preceedings of the 9th conference on limestone hydrogeology, Besançon, France
- Filippini, M.; 2010. JeanninKarst-ALEA: a Scientific Based Karst Risk Assessment for Underground Engineering. In: Andreo B., Carrasco F., Durán J.J., LaMoreaux J.W. (2010): Advances in Research in Karst Media, Springer, Environmental Earth Sciences, 435-439.
- Filippini, M.; 2009. Spatial Analysis of Karst Conduit Networks and Determination of Parameters Controlling the Speleogenesis along Preferential Lithostratigraphic Horizons. Thèse à l'école polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, Lausanne

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Jeannin

Vorname: Pierre-Yves

Amt, Firma, Institut: Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung SISKa, La Chaux-de-Fonds

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

[Empty box for signature]



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK Strassen, Brücken, Tunnel

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die Studie stellt wichtige karsthydrogeologische Aspekte und den aktuellen Forschungsstand für die im Untertagebau involvierten Personen (Geologen, aber auch Bauherren und Ingenieure) zusammen. Diese Aspekte werden zudem mit ergänzenden graphischen Darstellungen erläutert und auch für den Laien verständlich gemacht. Das vorhandene Wissen bezüglich Karstgefährdung und Charakteristik von Karstvorkommen wird nicht nur zusammengetragen, sondern auch in eine Vorgehenssystematik integriert. Neu dabei ist die selektive Übertragung der erdwissenschaftlichen Grundlagen auf den Tunnelbau in Karstgebieten anhand einer neuen Methode, welche KarstALEA genannt wird. Die grundlegenden Komponenten der Methoden sind überzeugend und die Methodik insgesamt nachvollziehbar. Wie auch im Forschungsbericht hervorgehoben wird, kann KarstALEA eine detaillierte baubegleitende Vorauserkundung nicht ersetzen, hilft aber, die vom Karst ausgehenden Gefährdungen für den Untertagebau genauer zu lokalisieren und somit die baubegleitenden Untersuchungen (Umfang und Schwerpunkt) besser zu planen. Gefestigte Aussagen über die Zuverlässigkeit der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit der karstbedingten Gefährdungen können erst nach dem Vorliegen weiterer, möglichst unabhängiger, Anwendungsfälle gemacht werden.

##### Umsetzung:

Die ersten, im Forschungsbericht dokumentierten Anwendungen der Methode sind erfolversprechend. Die Methode ergänzt und unterstützt das bewährte Vorgehen der Gebirgserschließung nach SIA 199. Bei der Umsetzung ist der notwendige Tiefgang der entsprechenden Untersuchungen in den verschiedenen Projektphasen fallweise zu klären und dem Wert (und den verbleibenden Unsicherheiten) der entsprechenden Resultate gegenüber zu stellen. Ferner sollte - wie im Forschungsbericht erwähnt und analog zur SIA 199 - klar zwischen Erfassung von Grundlegenden und ihrer Bewertung unterschieden werden.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Vor weitergehenden Schritten empfiehlt es sich, die vorgeschlagene KarstALEA-Methodik den interessierten (und betroffenen) Kreisen vorzustellen und eine möglichst breit angelegte Diskussion darüber zu führen. Dies könnte zum Beispiel anlässlich einer Tagung bzw. eines Workshops gemacht werden. Die Methode soll anhand ausgewählter zukünftiger Untertagebauwerke in Karstgebieten angewendet und getestet werden (möglichst durch Geologen, die nicht zur Autorenschaft gehören). Der entsprechende Aufwand in den verschiedenen Projektphasen soll dokumentiert werden. Die Methode basiert auf Erkenntnissen weniger Fallbeispiele. Deshalb ist es erforderlich, ihre Anwendung in verschiedenen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen zu validieren. Dies gilt insbesondere auch für sehr komplexe hydrogeologische Situationen, für welche Anwendungsbeispiele fehlen. Zudem wird kaum auf lithologisch-petrographische Kriterien eingegangen, die die Karstbildung vermutlich auch beeinflussen. Dies sollte deshalb noch nachgeholt werden.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Noch keiner

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Anagnostou Vorname: Georgios

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

### Forschungsberichte seit 2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ?</i> <i>Moteurs et carburants pour la mobilité de demain</i> <i>What drives us on ?</i> <i>Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de</i> <i>roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire</i> <i>Stripping of Low Noise Surface Courses during</i> <i>Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen</i> <i>Verkehrs auf Alpenkorridoren</i> <i>SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport</i> <i>intermodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers</i> <i>urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours</i> <i>Capacity restraint functions for urban road sections not</i> <i>affected by intersection delays</i>	2010
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt.</i> <i>Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8</i> <i>Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden</i> <i>Characteristic indices of a Bike City. Method of</i> <i>evaluation of cycling policies in 8 indices for small and</i> <i>medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain</i> <i>Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen</i> <i>Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour</i> <i>améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the</i> <i>enhancement of traffic safety</i>	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'agressivité au volant</i> <i>Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route"</i> <i>Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen <i>Application areas of various means of transportation in agglomerations</i> <i>Domaine d'application de different moyen de transport dans les agglomérations</i>	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren <i>Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing</i> <i>Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation</i>	2010
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges <i>Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken</i> <i>Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts</i>	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene <i>Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés</i> <i>Safety measures to manage risk of roads meeting or running close to railways</i>	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i> <i>Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes</i>	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i> <i>IT-Security for Transport and Telematics</i>	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i> <i>Pedestrian crossing (basics)</i>	2011
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung <i>Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems</i> <i>Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée</i>	2010
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels <i>Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</i> <i>Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers</i>	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis <i>Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique</i> <i>Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice</i>	2011
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs <i>Activity oriented analysis of induced travel demand</i> <i>Analyse orientée aux activités du trafic induit</i>	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung <i>Approches innovantes de la gestion du stationnement</i> <i>Innovative approaches to parking management</i>	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? <i>Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars?</i> <i>L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?</i>	2012