

# Fortsetzungen und neue Höhleneingänge suchen... die Anwendung des KarstALEA-Ansatzes in der Höhlenforschung

Silvia Schmassmann<sup>1,2,3</sup>, Marco Filipponi<sup>1</sup>, Pierre-Yves Jeannin<sup>1</sup>, Florian Hof<sup>3</sup>, Alex Hof<sup>3</sup>

**Zusammenfassung:** Der KarstALEA-Ansatz – eigentlich entwickelt für die Prognose von karstbedingten Gefahren in Untertagbau – kann auch bei einer gezielten Suche nach Eingängen und Gangfortsetzungen angewandt werden. Die KarstALEA-Methode basiert auf Erkenntnissen zur Karst-Hydrogeologie und zur Speläogenese (Höhlenentstehung), welche u. a. auf die Vermessung und Dokumentation der Höhlen basieren. So hat die 3D-Analyse von Höhlensystemen gezeigt, dass sich etwa 70 % der Höhlengänge auf wenigen Trennflächen (Schichtfugen, Schichten, Klüfte, Verwerfungen) entwickelt haben, die besonders verkarstungsanfällig sind. Diese Trennflächen werden Initialfugen genannt. Weiter konzentrieren sich die Höhlengänge in der Nähe der (Erd-) Oberfläche sowie auf bestimmten Niveaus, die früheren Vorfluterniveaus entsprechen.

Diese Informationen können die Höhlenforscher nutzen, um einen neuen Eingang in ein System oder eine Fortsetzungen eines Höhlenganges zu suchen. Besonders sinnvoll ist der Einsatz des KarstALEA-Ansatzes, um zu entscheiden, ob und wo sinnvollerweise gegraben wird. Dieser Artikel zeigt auf, wie die Erkenntnisse aus dem KarstALEA-Ansatz für die Höhlenforschung genutzt werden können – was verschiedene Höhlenforscher schon seit Jahren mit Erfolg umsetzen.

**Stichwörter:** KarstALEA, speläogenetische Bereiche, Initialfugen, Gangfortsetzung suchen, neue Eingänge suchen

## Einleitung

Höhlenforscher wollen Höhlen finden, erkunden, vermessen und erforschen. Tunnelbauingenieure wollen Höhlen, wenn immer möglich, vermeiden oder sich wenigstens vorher darauf einstellen können, da Karströhren im Untertagbau kostspielige und langwierige Massnahmen nach sich ziehen können (aufgrund der Hohlräume selbst, des darin fließenden Wassers und/oder der Sedimenten). Was den Tunnelbauingenieur und den Höhlenforscher verbindet, ist der Wunsch zu wissen, wo die Höhlen sind und wie sie aussehen.

Um den Tunnelgeologen die Kenntnisse der Höhen- und Karstforschung zugänglich zu machen, wurde die KarstALEA-Methode zur Prognose von karstbedingten Gefahren im Untertagbau entwickelt. Sie übersetzt die Erkenntnisse der Karst-Hydrogeologie und der Speläogenese (Höhlenentstehung) in eine praktisch anwendbare Methode, welche eine bedeutende Verbesserung der Prognose der räumlichen Verteilung der Karströhren und deren Charakterisierung ermöglicht (für mehr Details zur KarstALEA-Methode siehe FILIPPONI et al., 2012 sowie FILIPPONI & DICKERT, 2012 und VOUILLAMOZ et al., 2012).

Der KarstALEA-Ansatz kann jedoch auch in der Höhlenforschung für die gezielte Suche nach Höhleneingängen und Gangfortsetzungen eingesetzt werden – was einige Höhlenforscher auch schon länger tun.

## Wissenschaftlicher Hintergrund

Mit der Dissertation von Marco Filipponi (2009) konnte statistisch belegt werden, was aufmerksame Höhlenforscher und Karstwissenschaftler schon lange vermuteten: Höhlen entwickeln sich bevorzugt auf wenigen, besonders verkarstungsanfälligen Schichtfugen, geringmächtigen Schichten, Klüften und Verwerfungen, den so genannten Initialfugen. Die Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass sich etwa 70 % der phreatischen Höhlengänge entlang von solchen Initialfugen entwickelt haben, die nur einen kleinen Teil des Gebirgsvolumens ausmachen (Abb. 1).

Weiter variiert die Karströhrendichte, d.h. die Länge der Karströhren pro Gesteinsvolumen [ $m/m^3$ ], in Funktion der lokal dominanten speläogenetischen Prozesse (Abb. 2). Die Karströhrendichte ist in der Nähe der Oberfläche am grössten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich das infiltrierende Wasser mit zunehmender Tiefe laufend in weniger Höhlengängen konzentriert. Weiter ist die Karströhrendichte um den Karstwasserspiegel stark erhöht, da in diesem Bereich das Wasser subhorizontal zur Quelle abgeleitet wird.

<sup>1</sup> Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung SISKA, Postfach 818, 2301 La Chaux-de-Fonds

<sup>2</sup> [silvia.schmassmann@jsska.ch](mailto:silvia.schmassmann@jsska.ch)

<sup>3</sup> Höhlenforschergemeinschaft Region Hohgant HRH

Aufgrund der Karströhrendichte und der Eigenschaften der Karströhren (v. a. Grösse, Ausrichtung und Form) können sogenannte (aktuelle) speläogenetische Bereiche ausgedehnt werden (Abb. 2).

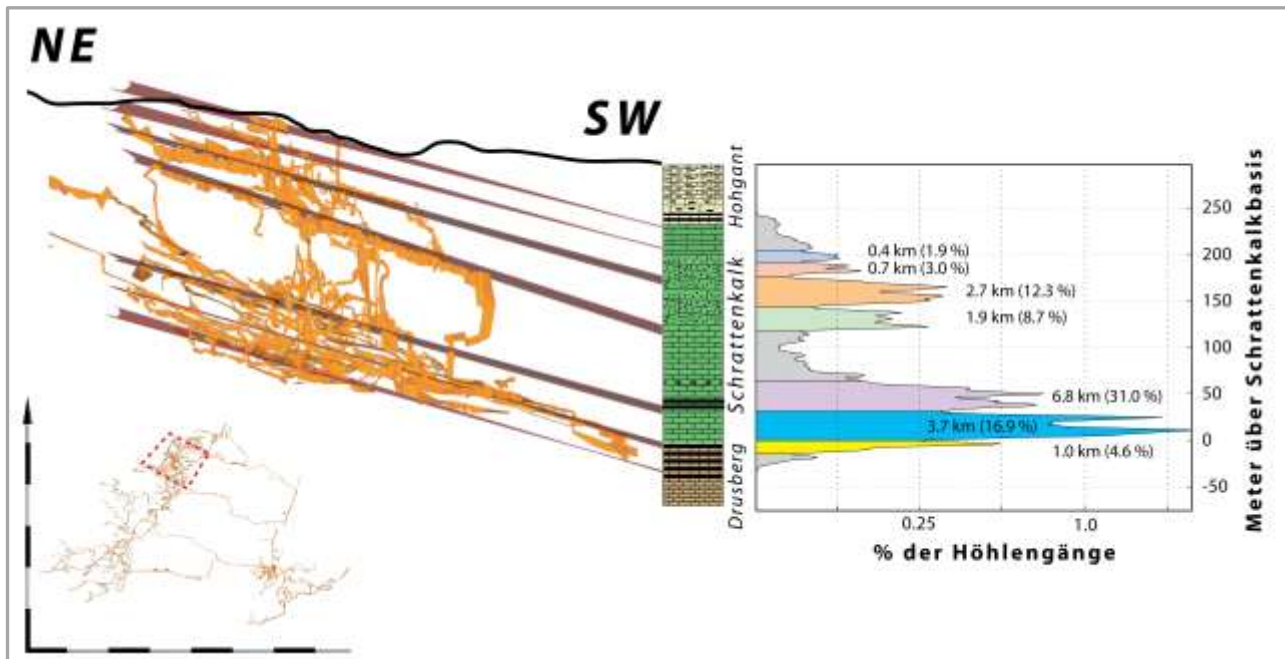


Abb. 1: Die optische Analyse des 3D-Modells (links) sowie die statistische Auswertung des Abstandes der entsprechenden Gänge zur Basis des Schrottenkalkes (rechts) belegt, dass sich die Höhlengänge in diesem Bereich des Réseau Siebenhengste-Hohgant auf wenigen Initialfugen konzentrieren (Vermessungsdaten HRH, Abb. aus FILIPPONI, 2009).

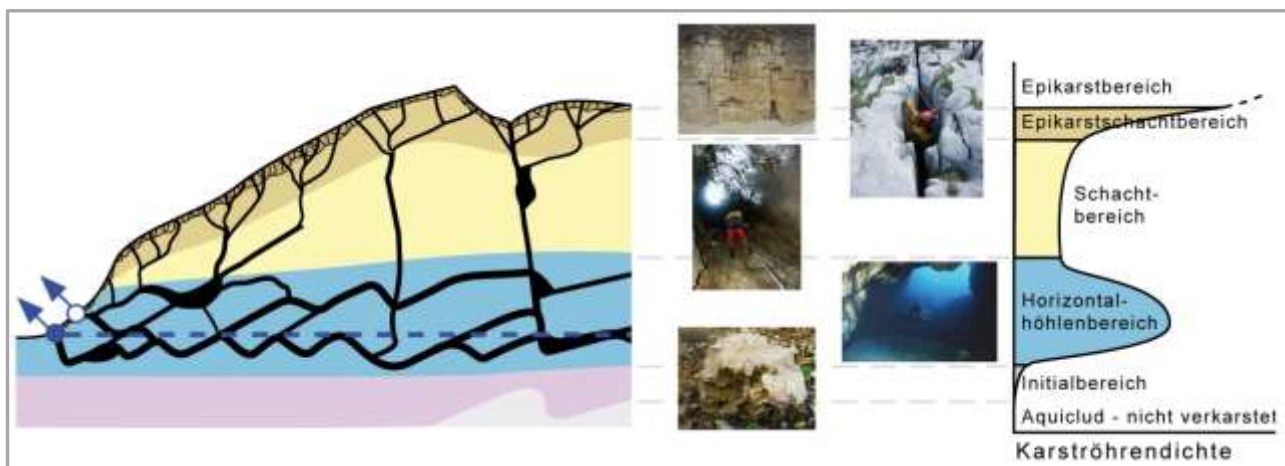


Abb. 2: Die Karströhrendichte (rechts) und die Morphologie der Karströhren (Form, Richtung, Grösse) hängen von den dominanten speläogenetischen Prozessen ab. Darauf basierend können die speläogenetischen Bereiche ausgedehnt werden:

- **Epikarstbereich** zerrüttet, nimmt Regenwasser auf, speichert es teilweise und leitet es in die Tiefe;
- **Epikarstschachtbereich** Konzentration der Entwässerung, Schächte und Mäander vereinen sich;
- **Schachtbereich** Entwässerung subvertikal zum Karstwasserspiegel;
- **Horizontalhöhlenbereich** Entwässerung subhorizontal zur Quelle (durchlässiger Teil der phreatischen Zone + epiphreatische Zone);
- **Initialbereich** keine Höhlen, Verkarstung erst im Anfangsstadium.

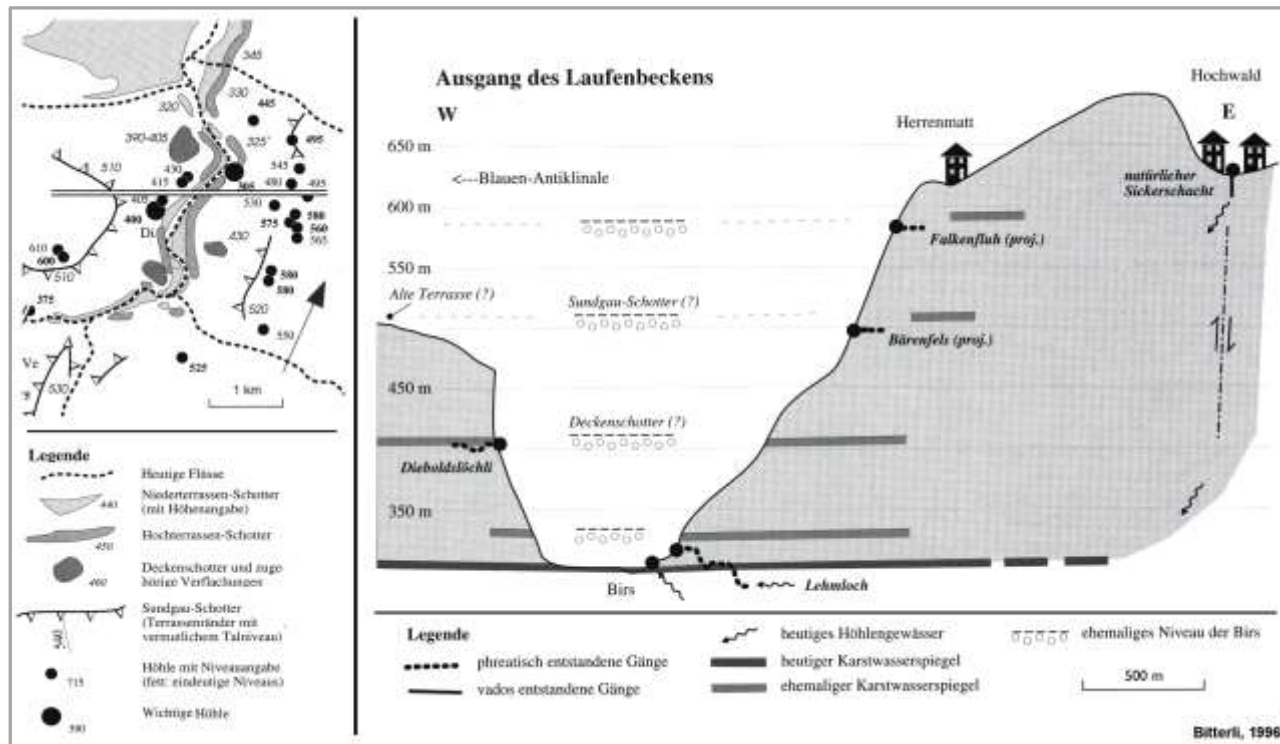


Abb. 3: Phreatisch geprägte Höhlengänge – d.h. die Paläo-Horizontalhöhlenbereiche – können mit den Paläo-Vorfluterniveaus der Birs und für die tieferen Höhlenniveaus mit den dazugehörigen Schotterterrassen korreliert werden. Die Suche von Höhleneingängen oder Gangfortsetzungen ist in diesen Höhenlagen besonders erfolgversprechend (Bitterli, 1996, verändert).

Die räumliche Verteilung der dominanten speläogenetischen Prozesse verändert sich mit der Zeit – z. B. weil das Tal durch Erosion tiefer eingeschnitten wurde und dadurch der Karstwasserspiegel gesunken ist. Daher können zusätzlich paläo-speläogenetische Bereiche ausgedehnt werden. Dies ist besonders relevant für die paläo-Horizontalhöhlenbereiche, welche den paläo-Vorfluterniveaus entsprechen. Sie sind als Höhlenniveau erkennbar (Abb. 3). Weitergehende Ausführungen zu den speläogenetischen Bereichen befinden sich auch in FILIPPONI & DICKERT (2012) in diesen Akten.

Die Wahrscheinlichkeit eine Karströhre – und entsprechend auch einen Höhleneingang respektive eine Gangfortsetzung – zu finden, ist im Schnittbereich der (Paläo-)Horizontalhöhlenbereiche und der Initialfugen am grössten.

## Methode

### Grundsatz

Die KarstALEA-Methode wurde zur Vorhersage von karstspezifischen Gefahren im Untertagebau entwickelt. Der Name lehnt sich an das französische „aléa“ an, mit welchem ein (lokalisierter) Gefahrenprozess mit einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit und Intensität bezeichnet wird. Im Rahmen einer KarstALEA-Untersuchung für ein Untertagebauprojekt werden geologische, hydrogeologische, geomorphologische (z. B. Dolinen, Quellen) und speläologische (z. B. Vermessungsdaten,

Pläne) Daten kombiniert. Das genaue Vorgehen ist in FILIPPONI et al. (2012) beschrieben. Verschiedene Aspekte der KarstALEA-Methode sind auch in VOILLAMOZ et al., (2012, insbesondere Abb. 1) und MALARD et al. (2012) wiedergegeben (beide in diesen Akten). Die Methode basiert auf der Kombination von verschiedenen 3D-Modelle (Geologie, Hydrogeologie, speläogenetische Bereiche, Initialfugen), welche es erlauben, die karstspezifischen Gefahren zu lokalisieren und zu charakterisieren.

Für die Anwendung in der Höhlenforschung ist es kaum je sinnvoll, komplexe 3D-Modelle zu erstellen. Meist kommt hier nur das Konzept der Initialfugen und/oder der speläogenetischen Bereiche zur Anwendung, welche hier genauer beschrieben werden.

### Speläogenetische Bereiche

Das Konzept der speläogenetischen Bereiche und eine (statistische) Methode, diese zu bestimmen werden, werden in FILIPPONI & DICKERT (2012, in diesen Akten) vorgestellt. Für die Suche von (phreatischen) Höhleneingängen und Gangfortsetzungen sind jedoch vorwiegend die aktuellen und paläo-Horizontalhöhlenbereiche (HHB) relevant. Die weiteren Ausführungen werden sich daher auf diese beschränken. Als aktueller HHB wird der Bereich der mehrheitlich subhorizontalen Höhlengänge bezeichnet, welche ständig oder temporär mit Wasser gesättigt sind (phreatische und epiphreatische Zone).

Der Höhlenforscher erkennt ihn an den Gangformen, der Ganganlage und den Hochwasserbeobachtungen. Die wichtigsten Erkennungsmerkmale sind rundlich-ovale Profile mit meist relativ konstantem Gangquerschnitt sowie Loops (Gegensteigungen in der Ganganlage). Sind (noch) keine Höhlen bekannt, kann davon ausgegangen werden, dass der aktuelle HHB sich auf der Höhe der Karstquelle  $\pm$  ca. 30-50 m befindet (im Jura weniger). Auch paläo-HHB können durch die Beobachtung der Gangformen und Ganganlagen bestimmt werden (Abb. 4). Sind (noch) keine Höhlen mit phreatisch entstandenen Gängen bekannt, kann es sich lohnen die Literatur zu konsultieren (bezüglich Landschaftsentwicklung, Taleintiefung, Terrassenbildung) oder die Lage von Quellen oder die Talterrassen zu betrachten. Dazu sind digitale Höhenmodelle, welche inzwischen z.T. im Internet frei zugänglich sind, sehr nützlich.

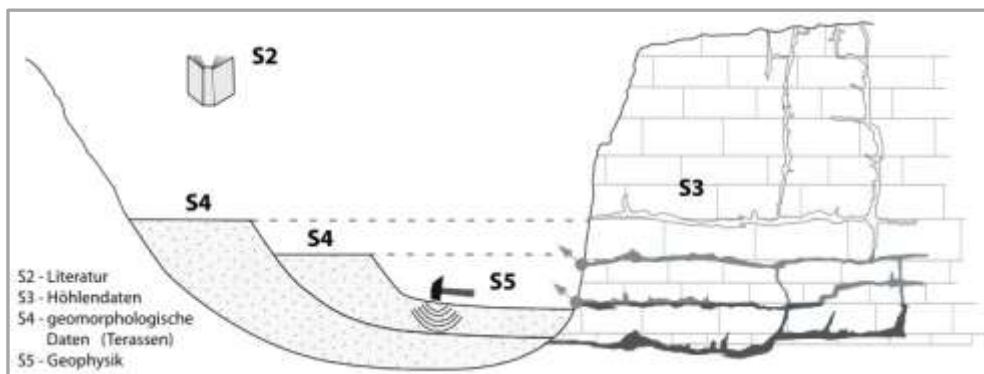


Abb. 4: Paläo-Horizontalhöhlenbereiche können mit Hilfe von verschiedenen Methoden bestimmt werden.

### Initialfugen

Initialfugen bestimmen – je nach speläogenetischem Bereich – die Lage von bis über 80 % der Höhlengänge. Initialfugen können daher häufig relativ einfach durch die Betrachtung einer 3D-Darstellung der Höhlenvermessungsdaten (Toporobot, Visualtopo, etc.; Abb. 1) bestimmt werden. Weiter deuten auch folgende Beobachtungen auf eine Initialfuge hin:

- an Aufschlüssen: Quellen, feuchte Stellen in Felswänden, Tuffausfällungen, Eisfällen, Anastomosen, pyritreichen Schichten, Mergelbändern;
- Dolinenreihen;
- in der Höhle: Schicht- und Kluffugengänge (Abb. 5), Anastomosen, Wandsinter oder Wandkarren aus einer Schichtfuge, Höhlengips, Spuren von neotektonischen Bewegungen.

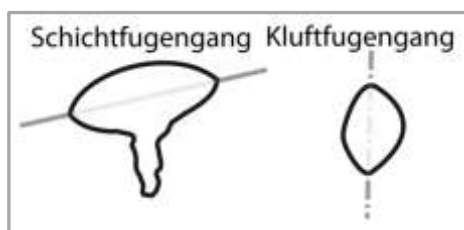


Abb. 5: Profil von Schicht- und Kluffugengängen, welche auf stratigrafische respektive tektonische Initialfugen hinweisen.

### Anwendung für die Suche von Fortsetzungen von Höhlengängen

Der KarstALEA-Ansatz kann eine wirkungsvolle Entscheidungshilfe sein, um gezielt nach Fortsetzungen zu suchen und zu entscheiden, (ob und) wo es sich lohnt zu graben, zu schlossern oder zu sprengen. Eine sehr wichtige Hilfe sind dafür 3D-Darstellungen der Höhlenvermessungsdaten – eine sorgfältige Vermessung ist daher meist unentbehrlich. Weiter sind direkte Beobachtungen in den Höhlen, insbesondere zu den Gangformen entscheidend. Darauf basierend können die Initialfugen und allfällige (Paläo-)Horizontalhöhlenbereiche ausgeschieden werden. Ebenfalls nützlich ist die Faustregel, dass die Querschnittsfläche eines phreatischen Ganges relativ konstant ist. Falls sich dieser teilt, müssen die

Querschnittsflächen aller phreatischen Gänge zusammengerechnet werden. Dazu muss der mit Sedimenten verfüllte Teil des Ganges ebenfalls mitberücksichtigt werden. Wenn also ein grosser phreatischer Gang „spurlos“ verschwindet, ist dies ein gewichtiger Hinweis, dass sich irgendwo noch ein Gang verbirgt.

Der KarstALEA-Ansatz wurde für die Suche von Gangfortsetzungen schon angewendet, weit bevor die Methode formuliert wurde, wie das Beispiel des Shelter Pots in den Sieben Hengsten (Habkern & Eriz BE) zeigt. Eine Höhlenforscherequipe aus England hat diese Höhle erforscht und 250 m, mehrheitlich phreatische, z.T. grosse Gänge vermessen. Ein ganzes Lager einer anderen Equipe wurde der Suche einer Fortsetzung gewidmet. (Fast) alle Winkel der Höhlen wurden dabei erkundet, auf eine Vervollständigung des Höhlenplans wurde jedoch verzichtet. Der kurze Bericht dieses Lagers kommt zum Schluss, dass – falls es eine Fortsetzung gibt – diese gut versteckt ist.

Betrachtet man die Höhle in Ruhe, ist klar, dass es eine Fortsetzung geben muss – das Wasser, das durch die grossen phreatischen Gänge geflossen ist, musste irgendwo weiterfliessen. Zuerst wurde die Höhle systematisch erforscht und vermessen. Als ein zentrales Element, das die Ganganlagen (mit)bestimmt, wurde eine grössere Verwerfung identifiziert – eine tektonische Initialfuge (Hautverwerfung in Abb. 6). Ein Gang wird immer enger und verliert sich darauf. Es scheint wahrscheinlich, dass sich noch weitere Gänge auf dieser

Verwerfung befinden. Durch die Analyse von verschiedenen Gängen in verschiedenen Höhenlagen konnte eine weitere tektonische Initialfuge bestimmt werden („Kluft der Rampe“ in Abb. 6). Stratigrafische Initialfugen scheinen in diesem Gebiet eine untergeordnete Rolle zu spielen. Schlussendlich wurde die Suche auf eine Rampe entlang der zweiten tektonischen Initialfuge konzentriert, welche einen bedeutenden Luftzug aufweist und in einer mit Sand verfüllten Nische endet. Der Gangansatz zeigt direkt in Richtung der Hauptverwerfung (direkt unterhalb des kleinen Ganges, der sich auf der Verwerfung verliert). Aufgrund der Analysen bestand die (gut begründete) Hoffnung, dass sich auf der Verwerfung die Fortsetzung des phreatischen Ganges befindet. Nach 8 Meter Graben der Durchbruch: Ein grosser Gang folgt der Verwerfung über eine grössere Distanz. Zahlreiche Windungen später ist die Verbindung zum Réseau Siebenhengste-Hohgang geschafft.

Dieses Beispiel zeigt exemplarisch, wie der KarstALEA-Ansatz eingesetzt werden kann, um gezielt Gangfortsetzungen zu suchen. Die Fortsetzung war hier trotz intensiver Suche nicht ersichtlich. Die Kombination der gemäss KarstALEA für die Höhlenentstehung förderlichen Faktoren – im konkreten Fall zwei besonders verkarstungsanfällige tektonische Trennflächen (Verwerfung / Kluft) sowie die Nähe zum lokal markanten phreatischen Höhlenniveau des Réseau (Paläo-Horizontalhöhlenbereich) – hat eine zielgerichtete Suche nach der Fortsetzung ermöglicht.

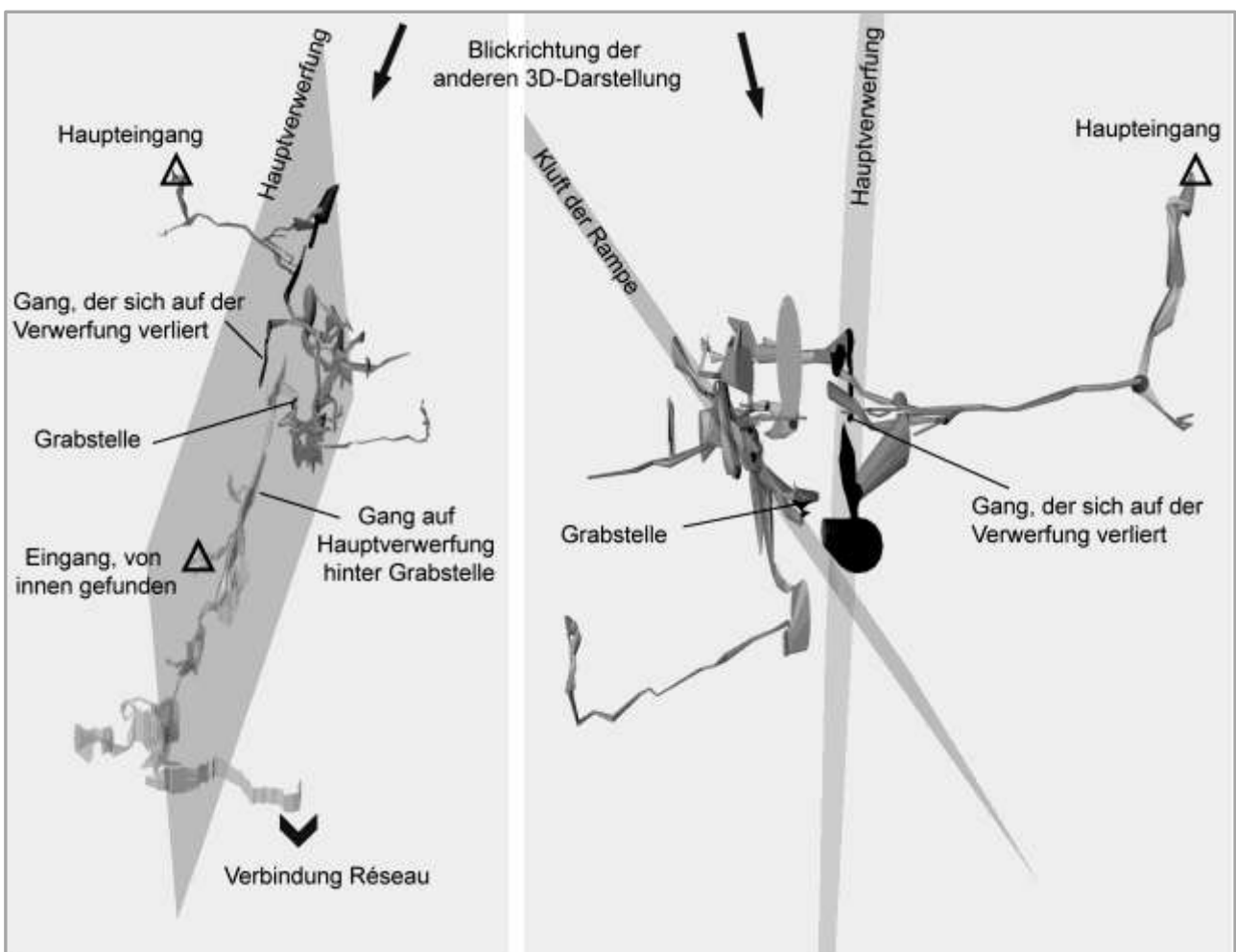


Abb. 6: 3D-Darstellungen des Shelter Pots mit den im Text erwähnten tektonischen Initialfugen. Links steil einfallende Ansicht mit neu entdecktem Teil (heller, im Vordergrund), rechts Kenntnisstand vor der Grabung, horizontale Blickrichtung. Die vor der Grabung bekannten Gänge auf der Hauptverwerfung sind schwarz eingefärbt.

## Anwendung bei der gezielten Suche nach neuen Eingängen

Der KarstALEA-Ansatz kann die gezielte Suche von weiteren Eingängen in ein bekanntes System erleichtern. Er kann auch unterstützend bei der Prospektion eingesetzt werden, ersetzt aber die systematische Prospektion keinesfalls. Dabei können zwei Strategien angewendet werden:

- 1) Man folgt stratigrafischen oder tektonischen Initialfugen an der Oberfläche respektive sucht sie dort, wo man sie aufgrund von Beobachtungen in bekannten Höhlengängen an der Oberfläche erwartet.
- 2) Man sucht gezielt in jenen Höhenlagen, die einem Paläo-Horizontalhöhlenbereich entsprechen.

Die beiden Strategien können auch kombiniert werden. Die Initialfugen und die Paläo-Horizontalhöhlenbereiche können aufgrund der oben erwähnten Kriterien bestimmt werden. So konnten z. B. drei Eingänge des Réseau Siebenhengste-Hohgant auf markanten Schichtfugen aufgegraben werden (u. a. die beiden bedeutenden Systemteile Pantoffelhöhle und Koloniehöhle). Minimale Kenntnisse der geologischen Struktur sind bei Weiterverfolgen der (stratigrafischen) Initialfugen sehr hilfreich. Dies beinhaltet insbesondere die Neigung der Schichtung und Kenntnisse zu den bedeutenden Verwerfungen und anderer Strukturen. Ein geologisches 3D-Modell kann dabei nützlich sein, ist aber in vielen Fällen nicht unentbehrlich.

## Literatur

- BITTERLI T. (1996): Höhlen der Region Basel – Laufen. Speläologische Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften, Basel, 328 S.
- 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., SCHMASSMANN S., JEANNIN P.-Y., PARRIAUX A. (2012): KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau. Forschungsprojekt FGU 2009/003 des Bundesamts für Strassen ASTRA, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich.
- FILIPPONI M., DICKERT A. (2012): Die speläogenetischen Bereiche am Beispiel des Wägitals. Akten des 13. Nationaler Kongress für Speläologie, Muotathal, 171.
- VOUILLAMOZ J., JEANNIN P.-Y., KOPP L., CHANTRY R. (2012): Le concept d'horizon d'inception comme base pour la cartographie du danger d'effondrement, Akten des 13. Nationaler Kongress für Speläologie, Muotathal, 277.
- MALARD A., VOUILLAMOZ J., WEBER E., JEANNIN P.-Y. (2012): Swisskarst Project – toward a sustainable management of karst water in Switzerland. Application to the Bernese Jura. Akten des 13. Nationaler Kongress für Speläologie, Muotathal, 215.

## Schlussfolgerungen

Auch wenn der KarstALEA-Ansatz für viele Höhlenforscher scheinbar wenig Neues bringt, kann es sich lohnen, ihn bei der Suche nach Gangfortsetzungen und neuen Eingängen bewusst anzuwenden. Dies gilt insbesondere, wenn die Suche mit einem grossen (zeitlichen oder materiellen) Einsatz verbunden ist (Graben, Sprengen, Schloßern, grossflächige Suche nach neuen Eingängen) oder mit bedeutenden Einwirkungen auf die Höhlen oder den Karst gerechnet werden muss. Mit Hilfe des KarstALEA-Ansatzes können die Erfolgchancen besser abgeschätzt respektive durch einen gezielteren Einsatz der Mittel vergrößert werden. Damit kann das Verhältnis Aufwand zu Ertrag verbessert und unnötige Beeinträchtigungen der Höhlenwelt vermieden werden.

*Die „KarstALEA-Wegleitung zur Prognose von karstbedingten Gefahren im Untertagbau“, in der die KarstALEA-Methode detailliert beschrieben ist (inkl. Kriterien, um Initialfugen und die speläogenetischen Bereiche auszuscheiden), kann unter [www.isska.ch](http://www.isska.ch) heruntergeladen werden (deutsch, mit Kurzfassungen auf Deutsch, Französisch, Englisch und Italienisch).*