

Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 29 (2024)

Heft: 1-2

Artikel: Photogrammetrische Kartierung von Karsthohlräumen in Steinbrüchen zur Beschreibung des verkarsteten Untergrundes

Autor: Filipponi, Marco / Perritaz, Paloma Lena

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1062151>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 05.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Photogrammetrische Kartierung von Karsthohlräumen in Steinbrüchen zur Beschreibung des verkarsteten Untergrundes

Marco Filipponi¹, Paloma Lena Perritaz^{1,2}

Schlüsselwörter

Verkarsteter Baugrund, Karsthohlraumgrössen, Karströhrendichte, Steinbruch, photogrammetrische Kartierung, Beurteilung Karstgefährdung, quantitative Daten

Zusammenfassung

Die Beurteilung des verkarsteten Baugrunds stellt für verschiedene ingenieurgeologische Fragestellungen eine besondere Herausforderung dar. Die Qualität einer solchen Beurteilung hängt im Wesentlichen von der Güte der Datengrundlage ab. Dabei stehen in der Praxis in den meisten Fällen nur beschränkte Angaben über das im Projektgebiet vorkommende Karströhrensystem zur Verfügung.

In diesem Artikel wird dargelegt, wie mittels photogrammetrischer Kartierung Karsthohlräume an Felswänden von Steinbrüchen kartiert werden können. Die Kartierung und die abgeleiteten Erkenntnisse stellen eine wichtige Grundlage für eine datenbasierte Beurteilung des verkarsteten Baugrunds dar. Anhand der Kartierung von in Steinbruchaufschlüssen angeschnittenen Karsthohlräumen lassen sich unter anderem folgende Grundlagendaten ableiten:

- Heterogenität des verkarsteten Baugrundes,
- Bandbreite und Verteilung der zu erwartenden Hohlraumgrössen,
- Häufigkeit und Häufigkeitsverteilung von Karsthohlräumen.

1 Einleitung

Für ingenieurgeologische Fragestellungen stellt die Beurteilung des verkarsteten Baugrundes eine besondere Herausforderung dar (Milanović 2004, Waltham 2010, Stevanović 2015). Die Ursache ist darin zu suchen, dass Karsthohlräume zum einen in einem verkarsteten Gebirge heterogen verteilt vorkommen und sich deren Eigenschaften über kurze Distanzen ändern können. Zum zweiten, und das stellt vielleicht die grössere Herausforderung dar, liegt eine Schwierigkeit darin, dass oft nicht alle an einem Projekt beteiligten Parteien das gleiche Verständnis haben, was unter «verkarstem Gebirge» zu verstehen ist, respektive wie die von den Geologen beschriebenen Gebirgsverhältnisse bautechnisch zu verstehen sind (Day 2004).

Deshalb kommt einer objektiven und reproduzierbaren quantitativen Beschreibung der Gebirgsverhältnisse sowie einer empfangergerechten Visualisierung der Resultate eine besondere Rolle zu. Bei den darauf aufbauenden interdisziplinären Fachdiskussionen können alle Beteiligten dasselbe Verständnis über die zu erwarteten Gebirgsverhältnisse entwickeln, um darauf beruhend gemeinsam angepasste, wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen zu erarbeiten.

Bei der Beurteilung des verkarsten Gebirges wird von den bearbeitenden Geologen meist gefordert, «lediglich» zu beurteilen, wo Karsthohlräume vorkommen und welche Eigenschaften sie haben. Hierfür stehen verschiedene Beurteilungs-Methoden zur Verfügung (Filipponi et al. 2012, Pinillos Lorenzana 2015, Li & Wu 2019). Diese Methoden stellen

¹ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra)

² Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Departement Erdwissenschaften

strukturierte und methodische Herangehensweisen dar, um die zu erwartende karstspezifische Gefährdungen zu prognostizieren. Die Qualität dieser Prognose hängt im Wesentlichen von der Qualität der Datengrundlage ab (Filipponi et al. 2012, Butscher et al. 2018). In der Praxis fehlen jedoch oft lokale Daten zum real vorkommenden Karströhrensystem.

Die Gefährdungen in einem verkarsteten Gebirgsbereich, während Bau und Betrieb eines Bauwerks, hängen im Wesentlichen von den Eigenschaften der Karsthohlräume ab. Als Karsthohlräume werden Lösungshohlräume verstanden, die im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Karstaquifers erweitert wurden und gross genug sind, um turbulentes Fließen zuzulassen (Filipponi et al. 2022). Sie stellen eine Untergruppierung der Lösungshohlräume dar, wobei nicht jeder Lösungshohlraum ein Karsthohlraum ist. Jedoch ist jeder Karsthohlraum ein Lösungshohlraum (Fig. 1).

Karsthohlräume weisen in der Regel einen Querschnitts-Durchmesser grösser ein Zentimeter auf (Grösse, in der turbulentes Fließen möglich wäre) und kann bis zu mehrere

Dekameter betragen (Gilli 2021). Demzufolge ist nicht jeder Karsthohlraum auch bautechnisch relevant, respektive ruft er ein bautechnisches Gefährdungsbild hervor (Fig. 1). Die Eigenschaften, die dazu führen, dass ein Karsthohlraum bautechnisch relevant ist, sind projektspezifisch festzulegen. Sie hängen unter anderem von den Karsthohlraum-Eigenschaften (z.B. Hohlraumgrösse, Wasserführung, Sedimentfüllung), vom hohlraumumgebenden Gebirge (z.B. Gesteinsfestigkeit, Vorkommen von Trennflächen, hydrogeologische Rahmenbedingungen) als auch von den Projektparametern (z.B. Bauwerksgeometrie, -anforderungen, Baumethode) ab.

Für die Beurteilung eines verkarsteten Gebirges stehen in einigen Fällen Daten von Karsthohlräumen zur Verfügung, die speläologisch erkundet und vermessen wurden (Karsthöhlen, sind Karsthohlräume, die gross genug sind, dass sie von einem Menschen begangen werden können, Fig. 1). Meistens stehen aus dem Projektgebiet jedoch nur Beobachtungen aus Bohrungen zur Beurteilung zur Verfügung (Filipponi & Jeannin 2008).

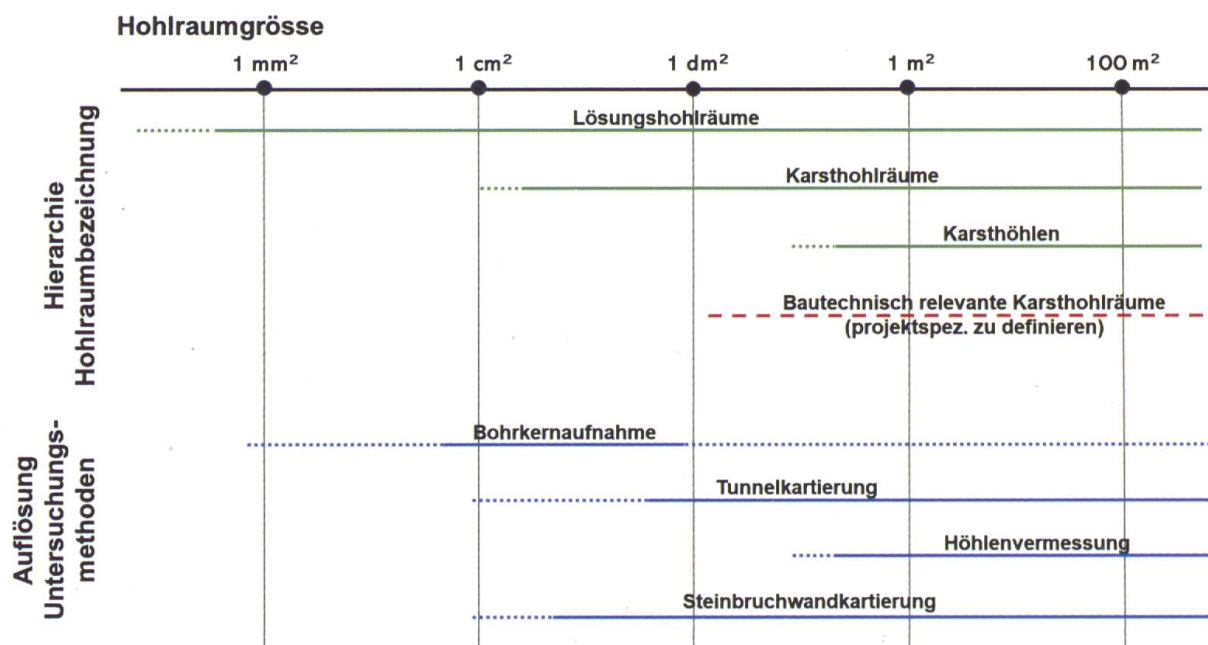


Fig. 1: Begriffshierarchie von Hohlraumbezeichnungen und Auflösungsvermögen verschiedener Untersuchungsmethoden hinsichtlich der Hohlraumgrösse.

In diesem Artikel wird exemplarisch dargestellt, wie mittels photogrammetrischer Kartierung Karsthohlräume an Felswänden von Steinbrüchen kartiert werden können. Die Kartierung und die abgeleiteten Erkenntnisse dienen als Grundlage für eine datenbasierte Beurteilung des verkarsteten Baugrunds.

Die photogrammetrische Kartierung ist heute eine wichtige Untersuchungsmethode in vielen Bereichen der geologischen Feldarbeiten (Cawood et al. 2017, Gaich & Pischinger 2016, Jaillet et al. 2019, Westoby et al. 2012, Silva et al. 2017, Haas 2021). Anhand der Kartierung von in Steinbrüchaufschlüssen angeschnittenen Karsthohlräumen lassen sich unter anderem folgende Grundlegendaten ableiten:

- Heterogenität des verkarsteten Baugrundes,
- Bandbreite und Verteilung der zu erwartenden Hohlraumgrößen,
- Häufigkeit und Häufigkeitsverteilung der Karsthohlräume.

2 Methodik

Die digitale Photogrammetrie ermöglicht die Rekonstruktion von georeferenzierten 3D-Modellen. Sie erlaubt das Einmessen und Vermessen von Strukturen und deren Auswertung ohne perspektivische Verzerrung (Marques et al. 2020). Zur Kartierung der Karsthohlräume werden hierfür in ausgewählten Steinbrüchen mit einer Drohne hochauflösende Fotoaufnahmen hergestellt. Die Modelle erlauben die Kartierung von Karsthohlräumen bis in den Zentimeter-Bereich. Dies ermöglicht die Erfassung detailgetreuer, quantitativer Informationen der aufgeschlossenen Karsthohlräume entlang der Felswände.

2.1 Auswahl repräsentativer Steinbrüche als Analogiebeispiel

Im Idealfall existiert im zu beurteilenden Projektgebiet ein geeigneter Steinbruch, in dem für den Baugrund repräsentative Verhältnisse beobachtet werden können. In den meisten Fällen müssen jedoch Steinbrüche aus der näheren Umgebung im Sinne eines Analogieschlusses zur Beurteilung herangezogen werden.

Die Übertragbarkeit der Resultate einer Karsthohlraumkartierung in einem Steinbruch auf die Verhältnisse in einem Projektgebiet hängt unter anderem von folgenden Kriterien ab:

- ähnliche geologische Verhältnisse, vor allem gleiche Gesteinsart (im Idealfall gleiche Gesteinsformation) und ähnliche tektonische Verhältnisse,
- ähnliche hydrologische Verhältnisse, wie z.B. nicht überdecktes vs. überdecktes Einzugsgebiet und ähnliches Klima,
- ähnliche Landschaftsgeschichte und Speleogenese (z.B. epigene vs. hypogene Speleogenese, rezente vs. Paläo-Verkarstung, hohes vs. geringes hydraulisches Potential zwischen Einzugs- und Quellgebiet, speleogenetische vs. lithologische Verkarstungsbasis),
- gleicher speleogenetischer Bereich wie der des Gebirges, in dem das Bauwerk eingebettet sein wird (speleogenetische Bereiche sind Bereiche mit ähnlichen dominanten speleogenetischen Prozessen und damit verbunden ähnlichen typischen Karströhrencharakteristika; z.B. Veni 1999, Filipponi et al. 2022, André & Doucet 1991),
- Orientierung der Felswände des Steinbruchs bezüglich der Hauptklufrichtungen und das Vorkommen von regionalen Initialfugen; im Idealfall können Steinbruchwände auch mit verschiedener Orientierung zu den Hauptklufrichtungen kartiert werden (Eraso 1985),
- gute Qualität der Aufschlussverhältnisse,

insbesondere «Frische» des Aufschlusses (unverwittert, nicht überwachsen etc.), Art des Abbaus (sprengend vs. sägend/spaltend).

Naturgemäss repräsentieren die Verhältnisse in den untersuchten Steinbrüchen in den meisten Fällen nur teilweise die reale Situation im Projektgebiet. Ob und wie die Resultate der Analogiestudie auf die Projektverhältnisse übertragen werden können, sollte im Rahmen einer sogenannten «Expertenbeurteilung» abgeglichen werden. Deshalb ist es von besonderer Bedeutung, die geologischen, hydrogeologischen und speläogenetischen Verhältnisse der Analogien möglichst vollständig zu erfassen, zu verstehen und zu beschreiben.

2.2 Drohnenaufnahmen

Zur Erfassung der Drohnenbilder werden handelsübliche Multicopter-Drohnen mit einer hochauflösenden Kamera und GPS-Empfänger verwendet.

Die Drohnenaufnahmen für die in diesem Artikel dokumentierte Untersuchung wurden mit einer Kameraauflösung von 20 MP und einem GPS-Empfänger ohne Korrektursignal (Genauigkeit von etwa 5 m) geflogen. Die relativ geringe GPS-Genauigkeit ist für die Aufgabenstellung insofern von untergeordneter Bedeutung, da die anschliessend berechneten 3D-Modelle mit im Feld platzierten Referenzmassstäben korrekt skaliert wurden. Dies vor dem Hintergrund, dass die absolute geografische Lage der Modelle nicht entscheidend ist. Dafür aber die korrekte Skalierung und Orientierung für die anschliessende Analyse. Mit dieser Methode können Probleme mit Multi-Path und Abschattungen des GPS-Signals in den teilweise engen Teilgebieten der Steinbrüche kompensiert werden.

Die Flüge wurden mit einem Abstand zwischen 4 und 10 m von den Wänden durchgeführt. Die Einzelfotos wurden orthogonal zu

den Felswänden aufgenommen. Der Abstand zu den Felswänden stellt ein Kompromiss dar zwischen Auflösung und Bildmenge. Die Fotos wurden automatisch bei einer Ortsveränderung des Multicopters von 1 m aufgenommen. Dies garantierte eine genügend grosse Überlappung der einzelnen Bilder für die Berechnung der 3D-Modelle.

2.3 Berechnung der photogrammetrischen 3D-Modelle

Zur Berechnung der photogrammetrischen Modelle wird eine Software verwendet, die eine Konstruktion von 3D-Modellen anhand einer Fotoserie der Felswand aus verschiedenen Blickwinkeln erlaubt. Diese Softwares verwenden üblicherweise die sogenannte «Structure-from-Motion-Technik» (SfM) (z.B. Westoby et al. 2012). Die Koordinaten und die Skalierung des 3D-Modells werden aus den GPS-Positionen der einzelnen Fotos errechnet. Dabei wird der Fehler durch den Vergleich der GPS-Daten mit den berechneten Relativkoordinaten aus der SfM-Berechnung minimiert.

Die auf diese Weise errechneten 3D-Modelle für die vorliegende Arbeit haben eine Bildauflösung von rund 0.25 cm² pro Pixel. Sie ergibt sich aus der Kombination der maximalen Auflösung der Drohnenfotos (übermässige Unschärfe mit einem Bayer-Filter reduziert) und der Interpolationsunschärfe des rekonstruierten 3D-Modells.

2.4 Kartieren der Karsthohlräume

Die digitale Kartierung der Karsthohlräume erfolgt einerseits direkt in den 3D-Modellen als auch aus «Orthofotos», die senkrecht zu den Felswänden aus den 3D-Modellen berechnet wurden. Zur Erkennung und Kartierung der einzelnen Karsthohlräume können unterstützend verschiedene Bildbearbeitungsfilter zum Einsatz kommen.

Da die Kartierung der Karsthohlräume zum Teil subjektiv ist, wurde die Kartierung von einem zweiten Bearbeiter reviewed. Diese Qualitätskontrolle erwies sich vor allem bei schlechten Aufschlussverhältnissen (stark verwitterte oder überwachsene Felspartien) als wertvoll.

Die Bezeichnung «Karsthohlraum» beinhaltet neben einer geometrischen (grösser rund 1 cm^2) auch eine genetische (Lösungshohlraum) und funktionale Eigenschaft (turbulenter Fliesspfad). Die Kategorisierung eines Hohlraumes als Karsthohlraum ist bereits im Feld nicht immer eindeutig möglich, entsprechend schwierig ist dies bei einer digitalen Kartierung. Akzentuiert wird diese Herausforderung bei Felswänden, die durch Sprengungen abgebaut wurden und/oder bereits angewittert sind.

Die Auflösung der verwendeten 3D-Modelle würde es theoretisch erlauben, Elemente mit einer minimalen Objektgrösse von rund 1 cm^2 zu erkennen (Nyquist-Shannon-Sampling-Theorem, z. B. Ficker & Martišek 2015). Jedoch erlauben die realen Aufschlussver-

hältnisse im Steinbruch, beeinflusst durch Sprengabbau, leichte Verwitterungsspuren, Bewuchs, es nur, zuverlässig Hohlräume grösser rund 25 cm^2 zu kartieren.

Im Rahmen dieser Arbeit ging es darum, das komplette kartierbare Spektrum an Hohlraumgrössen zu erfassen. In der ingenieur-geologischen Praxis ist dies jedoch selten nötig. Das Erkenntnisinteresse liegt bei den bautechnisch relevanten Karsthohlräumen (Fig. 1). Als Faustregel für die kleinste zu kartierenden Hohlraumgrössen erwies sich die halbe Grösse der kleinsten bautechnisch relevanten Karsthohlraumgrösse (Beispiel: sind Karsthohlraumgrössen grösser 1 m^2 bautechnisch relevante empfiehlt es sich Karsthohlraumgrössen grösser 0.5 m^2 zu kartieren).

Im Rahmen der in diesem Artikel vorgestellten Untersuchung wurden nur die Konturen der Karsthohlräume kartiert. Weitere Hohlraumeigenschaften, wie Sedimentfüllung oder Wasserführung, wurden nicht dokumentiert.

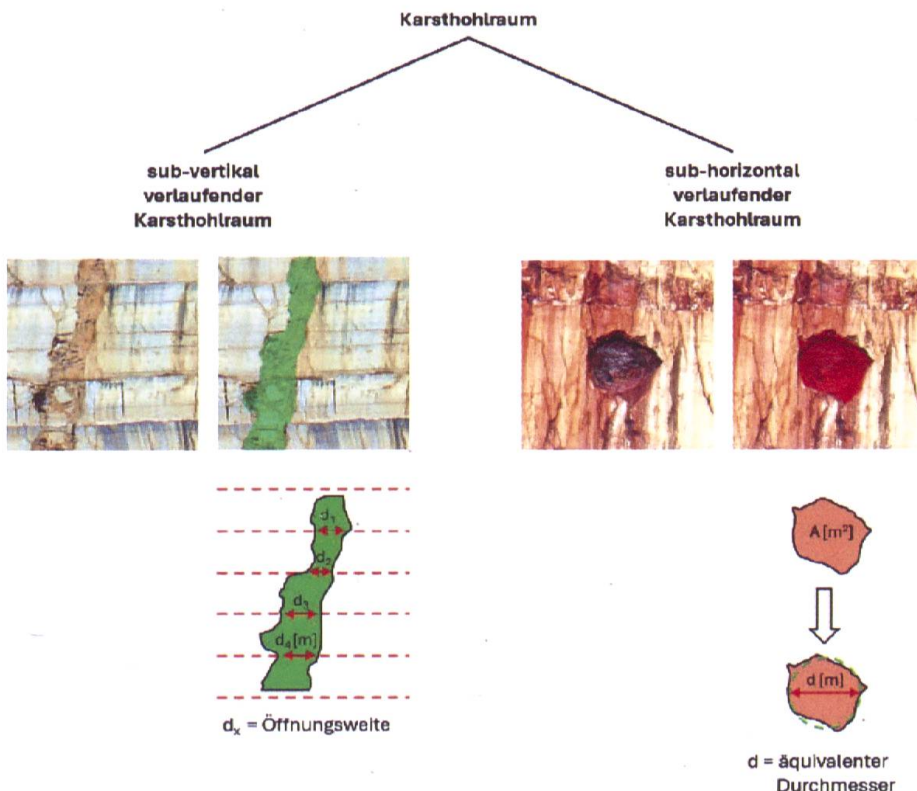


Fig. 2: Klassifikation der kartierten Karsthohlräume in sub-vertikale und sub-horizontale Karsthohlräume. Zur quantitativen Beschreibung wird bei den sub-vertikalen Karsthohlräumen in regelmässigen Intervallen die Öffnungsweite d_x gemessen, bei den sub-horizontalen Karsthohlräumen wird aus der Aufschlussfläche der äquivalente Durchmesser d berechnet.

2.5 Klassifikation und Beschreibung der Karsthohlräume

Die kartierten Karsthohlräume werden anhand ihrer Erstreckung in zwei Kategorien unterteilt (Fig. 2):

- Sub-vertikal verlaufende Karsthohlräume, die weitgehend sub-vertikal und sub-parallel zur Aufnahmeebene verlaufende. Die Felswände schneiden die Hohlräume längs zu dessen Verlauf.
- Sub-horizontale verlaufende Karsthohlräume, die sich in die oder aus der Aufnahmeebene erstrecken. Die Felswände schneiden die Hohlräume quer zu dessen Verlauf (Hohlraumprofil).

Es ist zu beachten, dass die Aufschlussflächen für die sub-vertikale Karsthohlräume als auch die Öffnungsweiten der sub-horizontalen Karsthohlräume auf einer 2D-Ebene gemessen werden. Im Rahmen dieses Artikels wurde keine Terzaghi-Korrektur angewendet.

Es ist auch darauf hinzuweisen, dass die kartierten, also an der Felswand aufgeschlossenen Öffnungsweiten, nicht zwangsläufig den grössten Öffnungsweiten der Hohlräume entsprechen müssen (abhängig von der Lage und Orientierung der Aufschlussebene zum Hohlraum). Dieser Aspekt wurde jedoch bei der Auswertung und Interpretation der Kartierung in diesem Artikel vereinfachend nicht berücksichtigt.

2.6 Auswertung der kartierten Karsthohlräume

Die Lage und Eigenschaften der digital kartierten Karsthohlräume stehen in strukturierter Form zur Auswertung zur Verfügung und erlauben eine Vielzahl von Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten.

Die zwei Hohlraumkategorien wurden hinsichtlich der Hohlraumgrößenverteilung unterschiedlich ausgewertet (Fig. 2):

- Bei den sub-vertikal verlaufenden Karsthohlräumen wurden die Öffnungsweiten betrachtet. Die Öffnungsweiten der sub-vertikal verlaufenden Karsthohlräume wurden entlang virtueller «Scanlinien» mit einem Abstand von 0.2 m gemessen.
- Bei den sub-horizontalen Karsthohlräumen wurden die Aufschlussflächen betrachtet und der hydraulische Durchmesser berechnet.

3 Beschreibung des Steinbruchs

Zur exemplarischen Illustration der Resultate einer Karsthohlraumkartierung wird in diesem Bericht die Felswandkartierung im Steinbruch der Schotterwerk Bihler GmbH in Eigeltingen (Baden-Württemberg, Deutschland) vorgestellt.

3.1 Lithologie

Der Steinbruch befindet sich in der Oberjura-Massenkalk-Formation (joMK) der Schwäbischen Alb. Bei den Kalksteinen handelt es sich um massige, dichte, feinkörnige, fossilreiche Kalksteine mit zum Teil angedeuteter Bankung. Sie bestehen vorwiegend aus mikrobiell (Cyanobakterien) abgeschiedenen Kalkkrusten, partikelreichen Schwammkalken und Partikelkalken. Entstanden sind sie in flachen, kalksandigen Riffen (Schwamm-Mikroben-Bioherme, «Riff-Fazies»), (Geyer et al. 2023). Es handelt sich um «hochreine» Kalksteine mit einem Karbonat-Gehalt >95 %. Durch die hohe Reinheit sind die Kalksteine entsprechend anfällig für Verkarstungsprozesse.

Der Massenkalk ist im Bereich des Steinbruchs durch spätpleistozäne, glaziale Sedimente des Rhein-Gletschers überlagert (Illmensee-Formation, Diamiktite, Kiese, Sande und Feinsedimente) (LGRB 2021).

3.2 Schichtlagerung und tektonische Überprägung

Der massige Kalkstein ist im Bereich des Steinbruchs flach gelagert (Einfallen $<5^\circ$ Richtung Süden). Das Gebirge ist durch drei steilstehende, weitständige tektonische Trennflächensysteme durchtrennt (NW–SE, N–S, W–E), (Schreiner 1997).

3.3 Hydrogeologische Situation

Der Steinbruch liegt in der vadosen Zone (ungesättigter Bereich) des Einzugsgebiets der Aachquelle (Hötzl 1996). Der Steinbruch liegt auf rund 485 m ü.M. und rund 4 km vom der Aachquelle (475 m ü.M.) entfernt.

3.4 Verkarstung

Der Massenkalk ist im Untersuchungsperimeter verkarstet.

Das Gebirge weist zwei Verkarstungsphasen auf:

- Paläo-Verkarstung im Eozän (Schreiner 1997). Die Paläo-Karsthohlräume sind weitgehend durch Sedimentverfüllungen gekennzeichnet. Karsthohlräume mit siderolithischer Sedimentverfüllung werden

als Hohlräume verstanden, die im Eozän bereits vorhanden waren. Dies auch wenn es grundsätzlich möglich wäre, dass die Hohlräume erst im Quartär entstanden und mit Sedimenten verfüllt worden sind.

- Rezente Verkarstung (Hötzl 1996.). Die heutige Verkarstung findet weitgehend unter einem mit jüngeren Sedimenten bedeckten Einzugsgebiet statt. Lokal, wo die glaziale Überdeckung bereits abgetragen wurde, ist auch eine direkte Infiltration in den Untergrund möglich. Die gute hydraulische Durchlässigkeit der glazialen Bedeckung erlaubt weitgehend die Entwicklung aller speläogenetischen Bereiche (inklusive des Epikarst-Bereich, Filipponi et al. 2022). Es ist anzunehmen, dass die rezente Verkarstung Paläo-Karsthohlräume zum Teil reaktiviert hat (Osborne 2002).

Die Gebirgsüberprägung durch die verschiedenen Verkarstungsphasen führt dazu, dass nebeneinander Karsthohlräume verschiedenen Alters liegen können (Fig. 3, Fig. 4).

Bei der Kartierung und der Auswertung der Karsthohlräume wurde keine Unterscheidung gemacht, zu welchem Zeitpunkt die Hohlräume entstanden sind, respektive welcher Verkarstungsphase sie zuzuordnen sind.

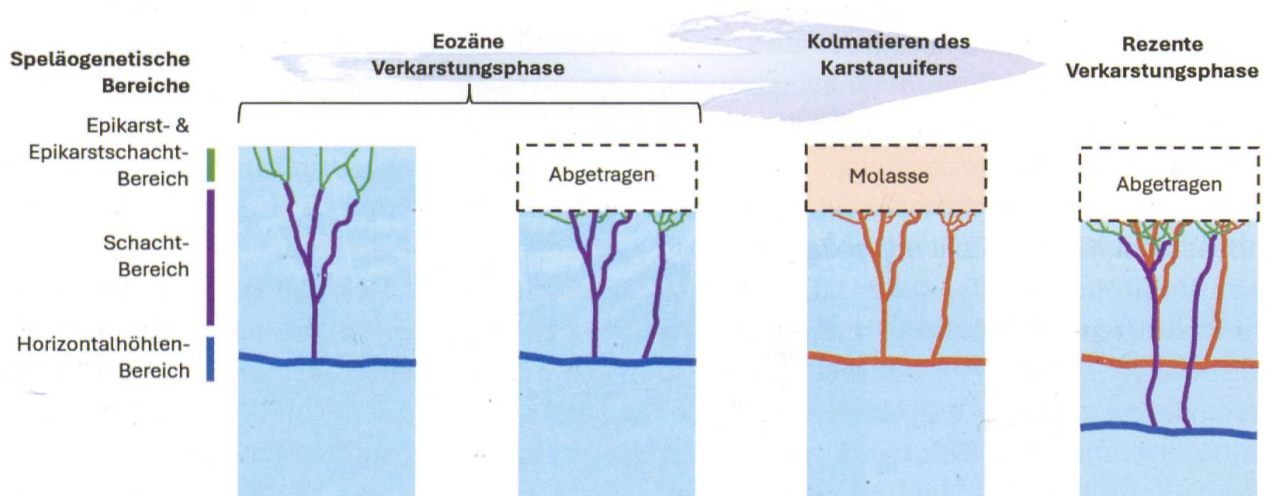


Fig. 3: Schematische Darstellung des Vorkommens von Karsthohlräumen verschiedener speläogenetischer Bereiche und Verkarstungsphasen.

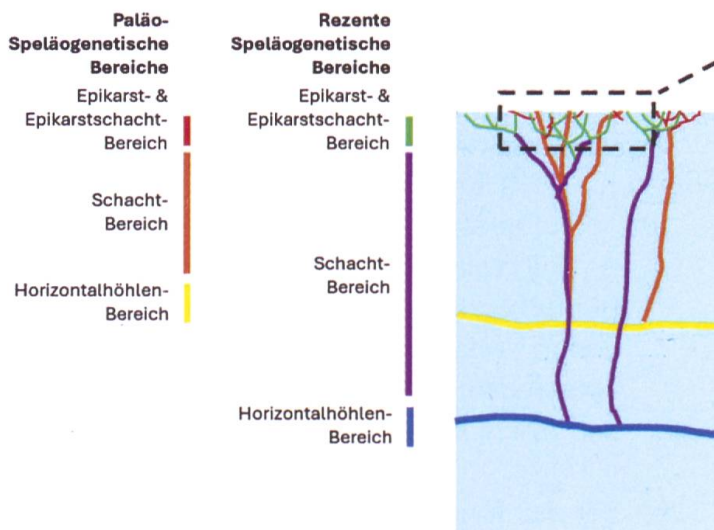


Fig. 4: Der Steinbruch des Schotterwerks Bihler GmbH liegt in den speläogenetischen Epikarst- und Epikarstschacht-Bereichen. (oben: Foto der SW-NE-streichenden Steinbruchwand, unten: schematische Darstellung eines Karstaquifers mit zugewiesenen speläogenetischen Bereichen).

3.5 Kartierte Felswände

Der Abbau im Steinbruch erfolgte durch Sprengen, wobei Abbauwände mit Höhen bis zu rund 30 m entstanden. Heute sind die Felswände leicht angewittert und allfällige Karsthohlraumverfüllungen sind zum Teil noch vorhanden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass durch Verwitterung, Erosion oder gravitative Prozesse einige einst sedimentverfüllte Karsthohlräume «ausgelaufen» sind und heute sedimentfrei vorliegen.

Die kartierten Felswände streichen in SW-NE sowie NW-SE Richtung. In diesem Beitrag werden exemplarisch nur die Resultate der SW-NE-streichenden Felswand präsentiert (Fig. 4).

4 Resultate

Die Kartierung deckte eine Felswandoberfläche von rund 2'000 m² ab (Fig. 5). Die gute Qualität der 3D-Modelle erlaubte eine reproduzierbare und weitgehend eindeutige Kartierung der Karsthohlräume. Es wurden 156 Karsthohlräume grösser 25 cm² mit einer Öffnungsweite grösser 5 cm kartiert (vgl. auch Abschnitt «Kartieren der Karsthohlräume»):

- 94 sub-vertical verlaufende Karsthohlräume mit einer Gesamtfläche von 286.6 m²;
- 62 sub-horizontal verlaufende Karsthohlräume mit einer Gesamtfläche von 5 m².

Auf eine weitere Klassifizierung der kartierten Karsthohlräume in Karsthohlräume verschiedener Verkarstungsphasen oder Zuordnung in speläogenetische Bereiche (vgl. Fig. 3)

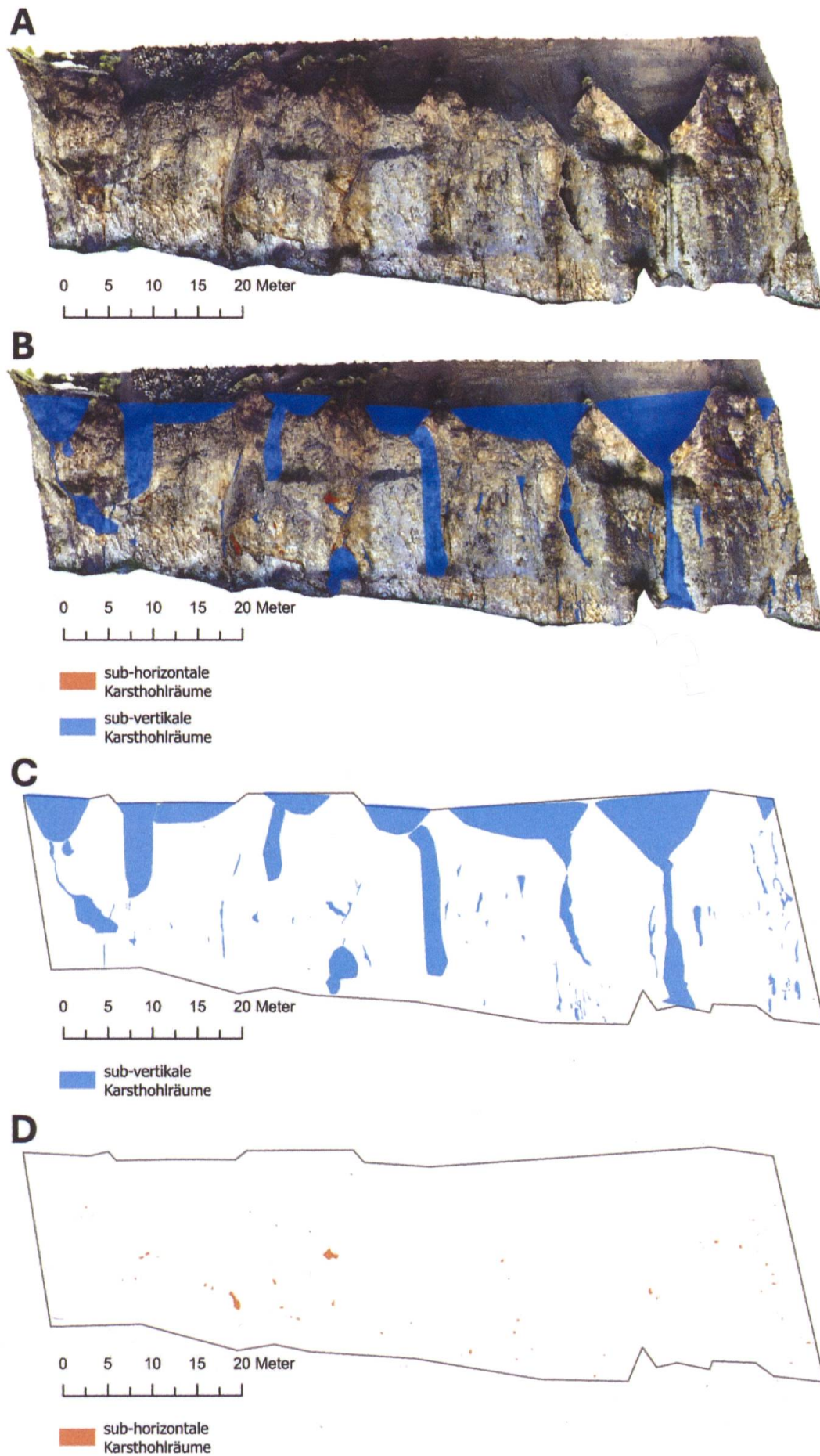


Fig. 5: Resultate der Felswandkartierung [A] «Orthofoto» der Felswand, B) «Orthofoto» mit kartierten Karsthohlräumen, C) nur kartierte sub-vertikale Karsthohlräume, D) nur kartierte sub-horizontale Karsthohlräume.

Quantile	Äquivalenter Durchmesser [m] sub-horizontaler Karsthohlräume	Öffnungsweite [m] sub-vertikaler Karsthohlräume	Öffnungsweite [m] sub-vertikaler Karsthohlräume unterhalb 4 m Top joMK
0.05	0.08	0.07	0.07
0.25	0.1	0.2	0.14
0.5	0.2	0.4	0.31
0.75	0.3	1.9	1.26
0.95	0.5	5.1	2.75
1	1.2	15.3	4.71

Tab. 1: Verteilung der kartierten Karsthohlraumgrößen >25 cm².

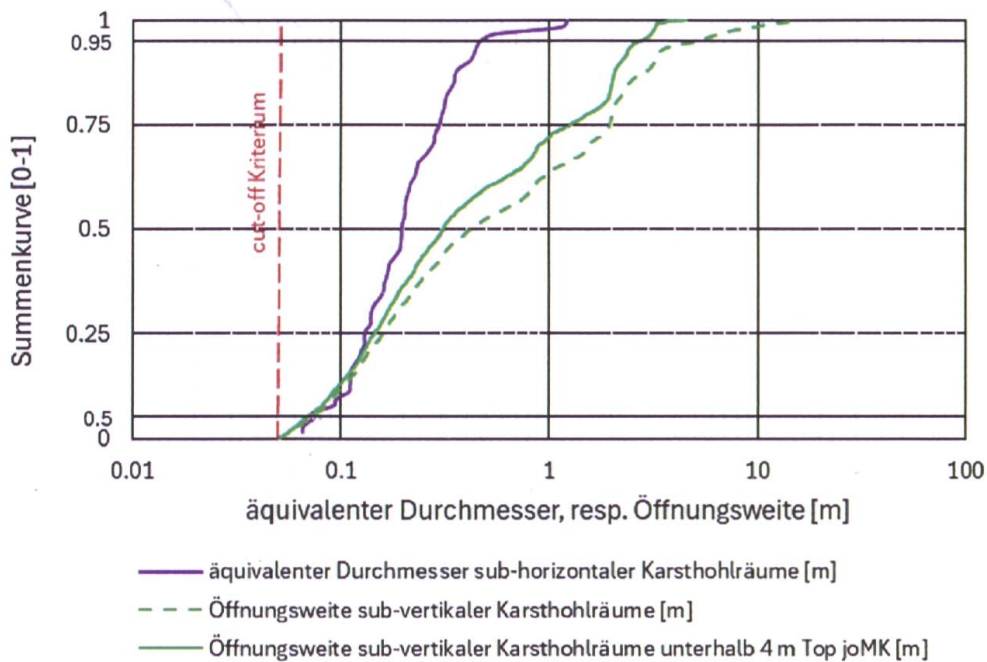


Fig. 6: Summenkurve der kartierten Karsthohlraumgrößen >25 cm².

wurde im Rahmen dieses Artikels verzichtet. Der Fokus der Auswertung lag bei der Beschreibung des verkarsteten Untergrunds als ein ingenieurgeologischer Homogenbereich. Die Kartierung wurde im Anschluss hinsichtlich folgender Fragestellungen ausgewertet:

- Wie sind die Karsthohlraumgrößen verteilt?
- Wie verändert sich die Häufigkeit von Karsthohlräumen mit der Tiefe?

4.1 Wie sind die Karsthohlraumgrößen verteilt?

Die Verteilung der Karsthohlraumgrößen der sub-vertikalen und sub-horizontalen Karsthohlräume wurden einzeln ausgewer-

tet, da sie jeweils unterschiedlich gemessen wurden (vgl. Abschnitt «Klassifikation und Beschreibung der Karsthohlräume»). Entsprechend wurden bei den sub-vertikalen Karsthohlräumen die Öffnungsweiten auf verschiedenen Höhen und bei den sub-horizontalen Karsthohlräumen der äquivalente Durchmesser der aufgeschlossenen Karströhren-Querschnittsfläche verwendet.

Die Verteilung der Hohlraumgrößen zeigt in beiden Fällen eine logarithmische Verteilung (Fig. 6), wobei die sub-vertikalen Hohlräume in einer größeren Bandbreite vorkommen (Tab. 5). Die Verteilung der sub-horizontalen Hohlräume ist unimodal, während die der sub-vertikalen Hohlräume eine Bimodalität aufweist (Fig. 7).

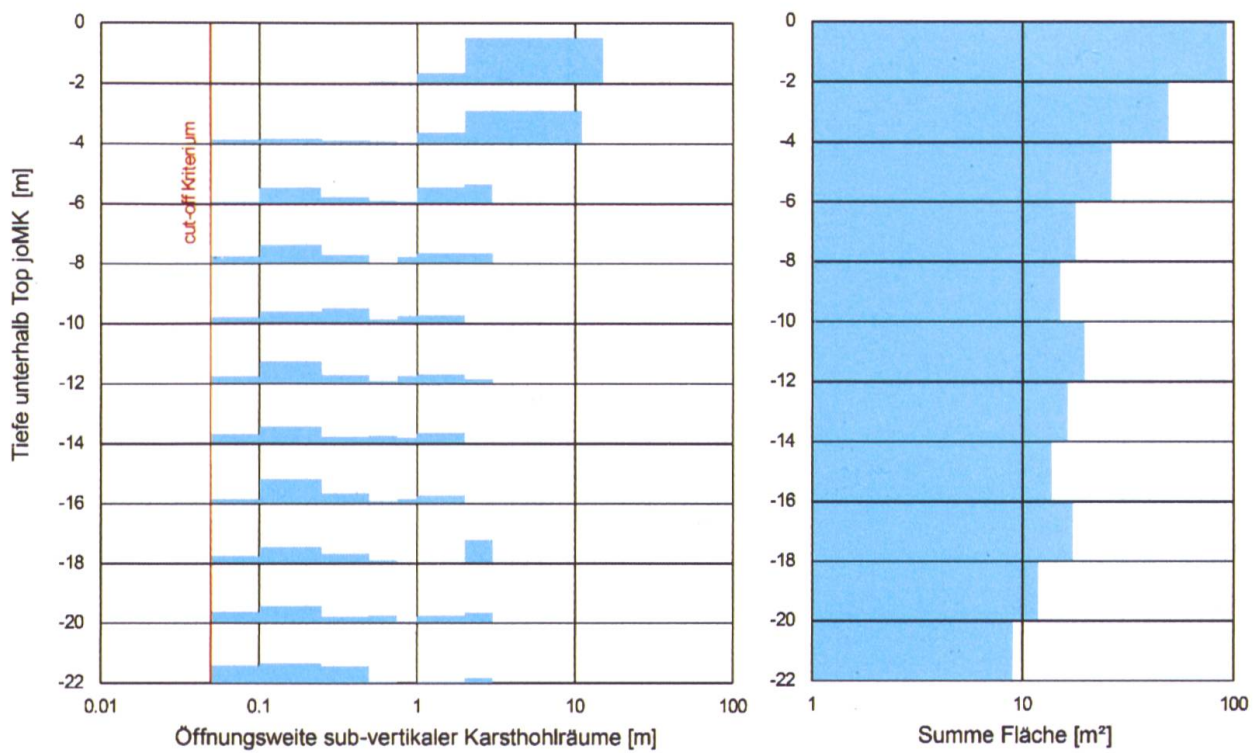


Fig. 7: Verteilung der Öffnungsweite von sub-vertikalen Karsthohlräume mit der Tiefe (links Verteilung der Öffnungsweiten, rechts Summe Fläche der kartierten Karsthohlräume im Intervall).

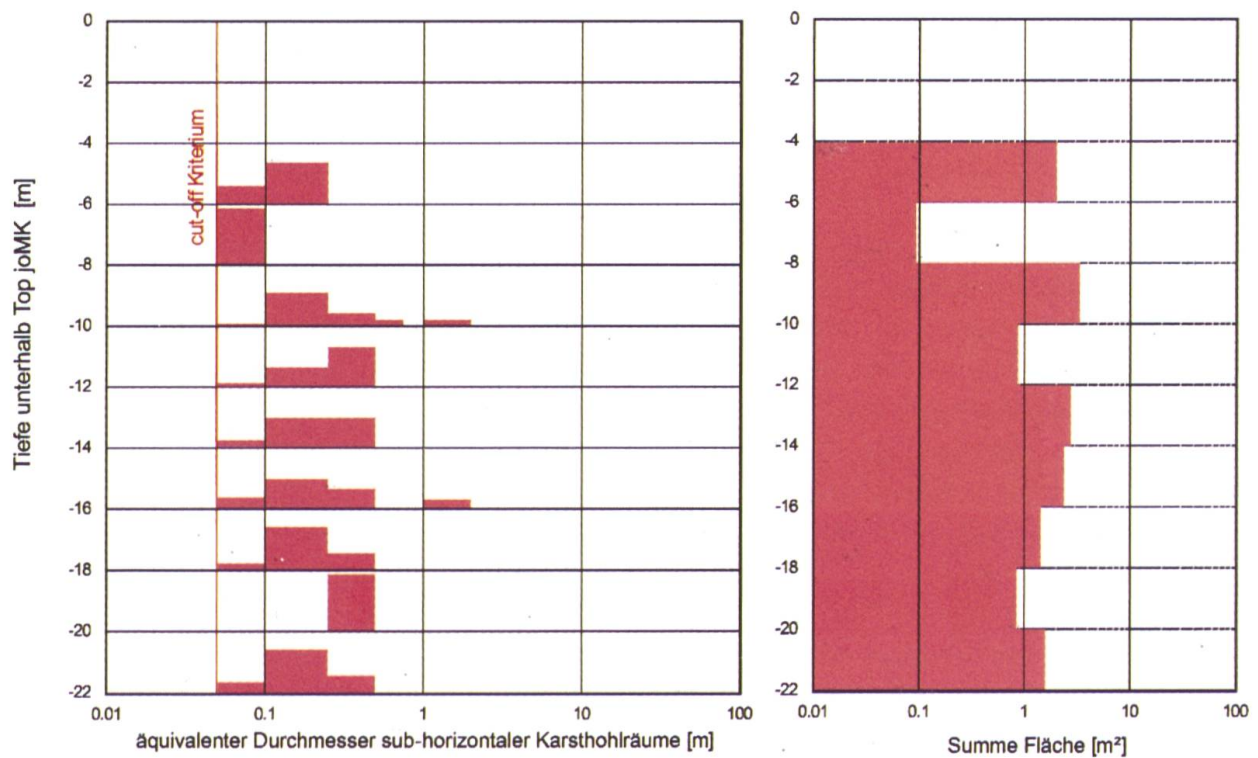


Fig. 8: Verteilung der Öffnungsweite von sub-vertikalen Karsthohlräume mit der Tiefe (links Verteilung der Öffnungsweiten, rechts Summe Fläche der kartierten Karsthohlräume im Intervall).

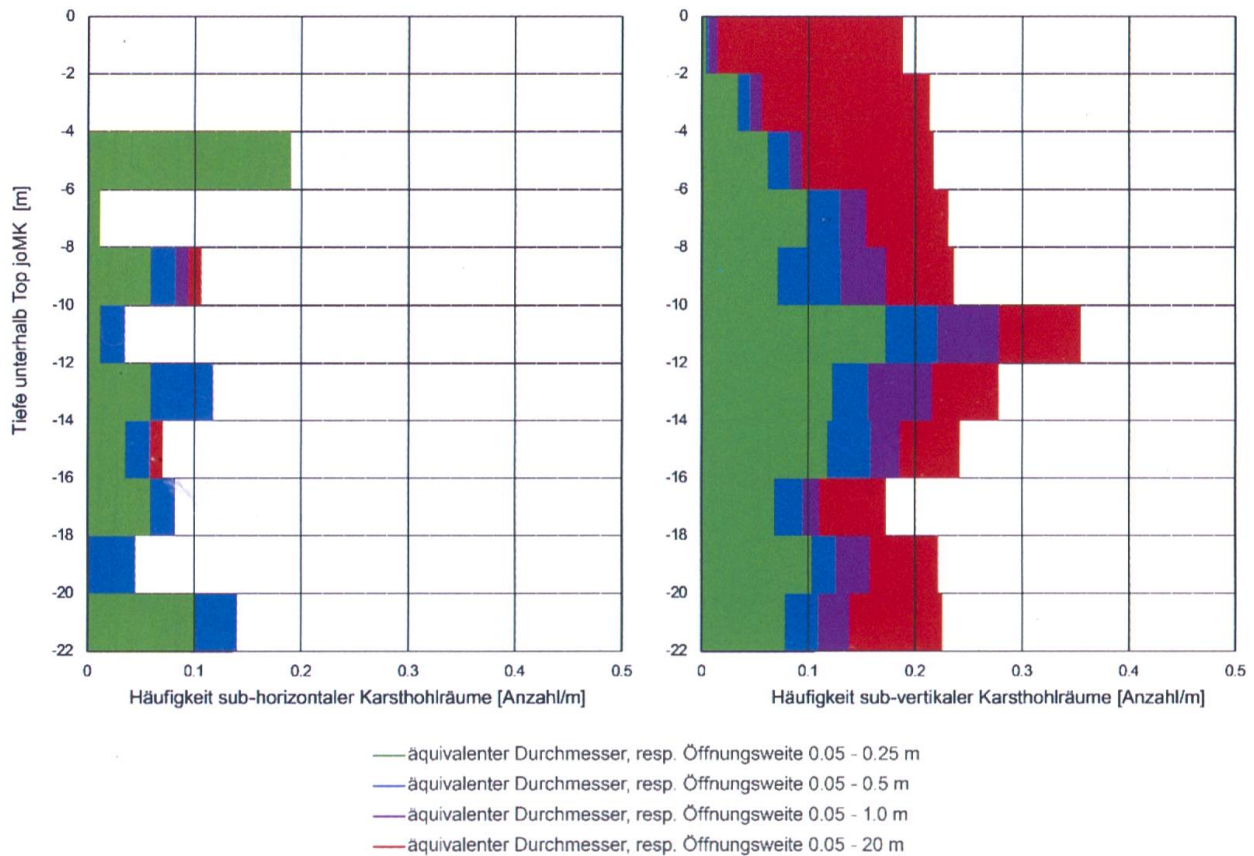


Fig. 9: Häufigkeit von Karsthöhlräumen in verschiedenen Tiefen abhängig von der Hohlraumgröße (links sub-horizontale Karsthöhlräume, rechts sub-vertikale Karsthöhlräume).

Um die Veränderung der Karsthöhlraumgrößen mit der Tiefe aufzuzeigen, wurden die Verteilungen der Hohlraumgrößen in Tiefenintervallen von zwei Metern dargestellt (Fig. 7, Fig. 8).

Die Verteilungskurven der Öffnungsweiten der sub-vertikalen Karsthöhlräume (Fig. 7) zeigt vor allem im oberen Bereich eine schnelle Abnahme der grossräumigen Hohlräume. Dies lässt sich durch das Mitkartieren der trichterförmigen Strukturen am Top (joMK) erklären. Abgesehen von diesem oberen Bereich, sind die Verteilungskurven mit der Tiefe ähnlich.

Die Verteilung der äquivalenten Durchmesser der sub-horizontalen Karsthöhlräume (Fig. 8) lässt keinen wesentlichen Tiefentrend erkennen.

4.2 Wie verändert sich die Häufigkeit von Karsthöhlräumen mit der Tiefe?

Die Häufigkeit der Karsthöhlräume wurde als Karsthöhlraum pro Meter ausgedrückt. Hierfür wurden die Anzahl der kartierten Karsthöhlräume in Tiefenintervallen ($\Delta Z = 2$ m) ausgezählt (Fig. 9). Um zu erkennen, ob eine Hohlraumgrößen-Abhängigkeit vorhanden ist, erfolgte die Auszählung in Grössenklassen.

Allgemein kann ausgesagt werden, dass im kartierten Felswandabschnitt die sub-horizontalen Karsthöhlräume weniger häufig vorkommen als die sub-vertikalen.

Die Häufigkeitsverteilung der sub-horizontalen Karsthöhlräume lässt keinen vertikalen Trend erkennen. Es lässt sich auch keine explizite Ansammlung von Hohlräumen an definierten lithologischen Trennflächen im Sinne

von Initialfugen erkennen (vgl. Lowe 1992).

Die Häufigkeitsverteilung der sub-vertikalen Karsthohlräume lässt sich in einen oberen (>6 m) und einen unteren Bereich (<6 m) unterteilen, wobei die Häufigkeit von Karsthohlräumen >0.05 m in beiden Bereichen ähnlich ist. Im oberen Bereich nehmen die grossen Karsthohlräume mit zunehmender Tiefe zugunsten der kleineren Karsthohlräume ab. Im unteren Bereich bleibt die Verteilung der Karsthohlraumgrössen mit der Tiefe ähnlich.

5 Diskussion

Im folgenden Kapitel möchten wir die Resultate der Karsthohlraum-Kartierung als auch die photogrammetrische Felswandkartierung als Methode kurz diskutieren.

Die Kartierung der Karsthohlräume illustriert die heterogene Verteilung der Karsthohlräume in einem verkarsteten Gebirge.

Wie in den speläogenetischen Epikarst- und Epikarstschacht-Bereichen zu erwarten, ist die bimodale Verteilung der Karsthohlraumgrössen nicht stark ausgeprägt (im Gegensatz zu den tieferliegenden speläogenetischen Bereichen). Diese Beobachtung bestätigt unter anderem die konzeptualisierten Resultate der numerischen, speläogenetischen Modellierungen von Maqueda et al. (2023).

Es wurden mehr sub-vertikale als sub-horizontale Karsthohlräume kartiert, was in den speläogenetischen Epikarst- und Epikarstschacht-Bereichen zu erwarten ist. Die Hohlräume entwickelten sich weitgehend entlang von tektonischen Trennflächen. Dabei ist eine Hierarchisierung der Trennflächen auf einige wenige «dominante» Initialfugen nicht stark ausgeprägt. Diese Beobachtung steht im Einklang mit den konzeptionellen Erwartungen der angetroffenen speläoge-

netischen Bereiche (André & Doulcet 1991, Filipponi et al. 2012).

Die kartierten Karsthohlräume würden es erlauben weitere Erkenntnisse abzuleiten, wie beispielsweise die Verteilung von Karsthohlraumgrössen oder die Hohlraum-Häufigkeiten entlang von einzelnen Trennflächen oder Trennflächenscharen. Auf diese Erkenntnisse wird Rahmen dieses exemplarischen Artikels nicht eingegangen.

Die Kartierung der Karsthohlräume erlaubt es, quantitative Angaben der Hohlraumgrössen- und Häufigkeits-Verteilungen abzuleiten. Die Resultate entsprechen konzeptionell den erwarteten Bedingungen. Entsprechend stellen sie im Sinne eines Analogons eine potenzielle Datengrundlage dar, um einen verkarsteten Baugrund zu beschreiben, der vergleichbare, ähnliche lithologische, speläogenetische und hydrogeologische Randbedingungen aufweist.

Das Heranziehen von Analogien zur bautechnischen Beurteilung von Karsthohlraum-Eigenschaften hat im Idealfall folgende Vorteile:

- realitätsnahe Abschätzung der Grössenordnungen der zu erwartenden Hohlraumeigenschaften,
- Illustration der möglichen Verhältnisse und damit verbundener Gefährdungsbilder. (oft hilft eine beispielhafte Analogie, damit alle Beteiligten einer Fachdiskussion die erwarteten Baugrundsituationen erkennen und verstehen können.)

Insbesondere der zweite Punkt erwies sich in der Praxis im Kontext konkreter Karstbeurteilungen als besonders wichtig. Bereits Day (2004) beschrieb als eine der grössten Herausforderung beim Umgang mit Karstgefahren, dass nicht alle an einem Projekt beteiligten Parteien dasselbe Verständnis über den verkarsten Baugrund haben. Hier erweisen sich Analogien kommunikativ als besonders wirksam, da sie einen Sachver-

halt konkretisieren, visualisieren und verständlich machen können.

Die Verwendung von Analogien hat jedoch auch Grenzen:

- Die Analogien sind nicht mit den wahren Verhältnissen im Projektgebiet gleichzusetzen.
- Räumliche Anordnungen der Karsthohlräume lassen sich nur selten direkt übertragen.

Methodisch lässt sich über die photogrammetrische Kartierung der Felswände von Steinbrüchen sagen, dass sie sich als eine effiziente, robuste und reproduzierbare Methode erwies. Insbesondere durch den Einsatz von Drohnenaufnahmen bringt die Methode folgende Vorteile gegenüber einer «klassischen» Feldkartierung:

- Erhöhung der Arbeitssicherheit, da weniger Zeit an exponierten, gefährlichen Arbeitsorten verbracht wird,
- Aufnahme von unzugänglichen Teilen der Aufschlüsse, wobei auch visuelle Verdeckungen und vertikale Orientierungsverzerrungen reduziert werden,
- Erhöhung der Kartierqualität, da sie witterungsunabhängig erfolgt und eine Qualitätskontrolle durch eine unabhängige Prüfung jederzeit und mit relativ wenig Aufwand möglich ist,
- Reproduzierbarkeiten der Kartierung auch später möglich (z.B. auch wenn der Abbau im Steinbruch weiter voranschreitet),
- Datenerhebung kann auch zu einem späteren Zeitpunkt hinsichtlich weiterer Fragestellungen ausgewertet werden,
- Qualitäts-Kostenvorteil, da die digitale Kartierung in der Regel mehr Informationen mit weniger Aufwand hervorbringt (z. B. Einmessen jeder kartierten Struktur).

Trotz all dieser Vorteile ersetzt das digitale Modell eine Feldbegehung nicht vollständig. Eine Feldbegehung erwies sich als notwendig, um einerseits die Aufschlüsse besser in

den geologischen Gesamtkontext einordnen zu können, andererseits um am Aufschluss das «Auge zu schulen» und so auf die wesentlichen Merkmale der zu kartierende Elemente hinzuarbeiten. Insbesondere bei schwierigen Aufschlussverhältnissen war eine mindestens rudimentäre Feldkartierung für die digitale Auswertung hilfreich.

6 Schlussfolgerung

Obgleich die Verkarstung eines Gebirges von vielen Faktoren abhängt (u. a. Gesteinseigenschaften, Gebirgsdurchtrennung, hydrogeologische Bedingungen, Klima, Zeit), ist es möglich und oftmals hilfreich, den objektiven Mangel an Daten bezüglich der Karsthohlraum-Eigenschaften durch Analogieschlüsse auszugleichen. Das Arbeiten mit Analogien ist bei verschiedenen ingenieurgeologischen Fragestellungen und Projektphasen sinnvoll. Einerseits können sie helfen, die zu erwartenden Bandbreiten und Verteilung der Eigenschaften und daraus resultierende bautechnischen Gefährdungen und Massnahmen besser abzuleiten. Andererseits helfen Analogien den interdisziplinären Dialog zu führen und tragen zur Lösungsfindung bei, indem sie den Sachverhalt konkretisieren, visualisieren und verständlich machen.

Das in diesem Artikel vorgestellte methodische Vorgehen zur Kartierung von Karsthohlräumen in Steinbrüchen, mit der Daten aus einem für den Untersuchungsperimeter vergleichbaren Analogiebeispiel erhoben werden können, erwies sich als eine effiziente Methode, um eine robuste, reproduzierbare und repräsentative Datengrundlage für die Beurteilung eines verkarsteten Baugrunds zu erheben.

Danksagung

Wir möchten uns bei der Schotterwerk Bihler GmbH (Eigeltingen) für die Erlaubnis bedanken, dass wir auf Ihrem Betriebsgelände die Drohnenaufnahmen durchführen durften.

Ebenfalls möchten wir uns bei Armin Scherzinger bedanken, der uns den Steinbruch für diese Studie vorgeschlagen und gezeigt hat.

Bedanken möchten wir uns auch bei Sven Bauer für die konstruktiven Anmerkungen zum Bericht.

Literaturverzeichnis

- André, P. & Doucet, A. (1991): Rospo Mare Field, Italy, Apulian Platform, Adriatic Sea. AAPG Treatise of Petroleum Geology. Atlas of Oil and Gas Fields 6, 29-54.
- Butscher, C., Wunderle, M., Künemund, L. & Blum, P. (2018): Prognose und Bewertung von Karst Risiken am Tunnel Alabastieg. *Geotechnik* 41/2, 124-138. DOI: 10.1002/gete.201700018.
- Cawood, A.J., Bond, C.E., Howell, J.A., Butler, R.W. & Totake, Y. (2017): LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. *Journal of Structural Geology* 98, 67-82. DOI: 10.1016/j.jsg.2017.04.004.
- Day, M.J. (2004): Karstic problems in the construction of Milwaukee's Deep Tunnels. *Environmental Geology* 45/6, 859-863. DOI: 10.1007/S00254-003-0945-4.
- Eraso, A. (1985): Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje en el Karst. KO-BIE -Serie Ciencias Naturales 15, 15-164.
- Ficker, T. & Martišek, D. (2015): 3D Image Reconstructions and the Nyquist-Shannon Theorem. *3D Research* 6/3. DOI: 10.1007/s13319-015-0057-4.
- Filipponi, M., Bauer, S., Höfer-Öllinger, G. & Jörin, U. (2022): Karstnomenklatur für Ingenieurgeologen und Bauingenieure. 1. Auflage. Buchschmiede; Buchschmiede von Dataform Media GmbH, Wien.
- Filipponi, M. & Jeannin, P.-Y. (2008): Prediction of Karst Occurrences by Interpreting Borehole Data within the Inception Horizon Hypothesis. In: Yuhr, L.B., Alexander, J.C. & Beck, B.F. (Hrsg.): Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. 11th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. Tallahassee, Florida, United States, September 22-26, 2008. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 120-130.
- Filipponi, M., Parriaux, A., Schmassmann, S. & Jeannin, P.-Y. (2012): KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagebau. *Forschung im Strassenwesen Bericht* 1395. UVEK, ASTRA, Bern.
- Gaich, A. & Pischinger, G. (2016): 3D images for digital geological mapping. *Geomechanics and Tunneling* 9/1, 45-51. DOI: 10.1002/geot.201500048.
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (2023): *Geologie von Baden-Württemberg*. Schweizerbart'sche, E, Stuttgart.
- Gilli, E. (2021): *Big Karst Chambers. Examples, Genesis, Stability*. Springer International Publishing, Cham.

- Haas, R. (2021): Die Schritte zu einer erfolgreichen Sicherheitssprengung. Newsletter Sprengverband Schweiz, 52-55.
- Hötzl, H. (1996): Origin of the Danube-Aach system. *Environmental Geology* 27/2, 87-96. DOI: 10.1007/BF01061676.
- Jaillet, S., Delannoy, J.-J., Génuite, K., Hobléa, F. & Monney, J. (2019): Géodiversité représentée • 1. *geomorphologie* 25/3, 191-205. DOI: 10.4000/geomorphologie.13488.
- LGRB (2021): LGRB-Kartenviewer. Herausgegeben von Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB), online verfügbar unter <https://maps.lgrb-bw.de>, Stand am März, 2024.
- Li, S.C. & Wu, J. (2019): A multi-factor comprehensive risk assessment method of karst tunnels and its engineering application. *Bull Eng Geol Environ* 78/3, 1761-1776. DOI: 10.1007/s10064-017-1214-1.
- Lowe, D.J. (1992): The origin of limestone caverns: in inception horizon hypothesis. PhD Thesis. Manchester Polytechnic, UK.
- Maqueda, A., Renard, P. & Filipponi, M. (2023): Karst conduit size distribution evolution using speleogenesis modelling. *Environ Earth Sci* 82/14. DOI: 10.1007/s12665-023-11035-6.
- Marques, A.J., Maria De Castro, D., Guimarães, T.T., Inocencio, L.C., Veronez, M.R., Mauad, F.F. & Gonzaga Jr, L. (2020): Statistical assessment of cartographic product from photogrammetry and fixed-wing UAV acquisition. *European Journal of Remote Sensing* 53/1, 27-39. DOI: 10.1080/22797254.2020.1717998.
- Milanović, P.T. (2004): Water resources engineering in Karst. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Osborne, R.A.L. (2002): Paleokarst: cessation and rebirth? In: Gabrovsek, F. (Hrsg.): Evolution of karst. From prekarst to cessation. (Carsologica). Založba (ZRC), Ljubljana, Slovenia, 97-115.
- Pinillos Lorenzana, L.M. (2015): Túneles en macizos calcáreos karstificados: impacto en las obras subterráneas de los fenómenos kársticos, su evaluación y tratamiento. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM), available online at <https://oa.upm.es/36261/>, Stand am März 2024.
- Schreiner, A. (1997): Geologische Karte von Baden-Württemberg, Erläuterungen zu Blatt 8118 Engen. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau.
- Silva, O.L., Bezerra, F.H., Maia, R.P. & Cazarin, C.L. (2017): Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. *Geomorphology* 295, 611-630. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.07.025.
- Stevanović, Z. (2015): Karst Aquifers - Characterization and Engineering. Aufl. 2015. (Professional Practice in Earth Sciences). Springer International Publishing, Cham.
- Veni, G. (1999): A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in karst areas. *Geomorphology* 31/1-4, 151-180. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00077-X.
- Waltham, T. (2010): Sinkholes and subsidence. Karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. & Reynolds, J.M. (2012): 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300-314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.