

Morphometrische Ableitung von Fließfacetten anhand von hochauflösenden Structure from Motion (SfM) Geländemodellen

ZUSAMMENFASSUNG

Fließfacetten sind mikroskalige Lösungsformen, die in Karsthöhlen vorkommen. Deren morphometrische Eigenschaften wie Größe und Länge können Rückschlüsse auf (Paläo-) Fließgeschwindigkeiten in dem jeweiligen Gangabschnitt liefern. Um eine gültige Aussage treffen zu können, wird jedoch eine gewisse Menge an statistisch aussagekräftigen Stichproben benötigt. In der Regel werden Fließfacetten und deren morphometrische Eigenschaften in zeitaufwändiger manueller oder fotografischer Arbeit erhoben. Auch moderne Methoden wie das terrestrische Laserscanning sind nicht unbedingt praktikabel. In diesem Beitrag wird eine Methode präsentiert, die diese Schwierigkeiten beseitigt, indem mithilfe der photogrammetrischen Aufnahmemethode *Structure from Motion* (SfM) hochaufgelöste Geländemodelle von Höhlenwänden erstellt werden. Da in Höhlen kein GPS-Signal empfangen werden kann, wurde eine Methodik entwickelt, um diese Geländemodelle in einem lokalen Koordinatensystem einzubinden. Um aus den Geländemodellen Fließfacetten automatisch abzuleiten, wurden drei unterschiedliche Klassifikationsmethoden angewandt. Diese wurden mit manuell vektorisierten Fließfacetten validiert. Hierbei hat sich der Geomorphons-Klassifikationsalgorithmus als die beste Methode erwiesen. Die automatische Ableitung der mikroskaligen Formen erzielt eine hohe Übereinstimmung mit den manuell abgeleiteten Formen, und somit ist ein erheblicher Gewinn bezüglich Zeit und Anzahl der untersuchten Fließfacetten möglich.

ABSTRACT

Morphometric delineation of scallops using high-resolution digital terrain models based on Structure from Motion (SfM)

Scallops are microscale dissolution features that occur in karst caves. Their morphometric properties, such as size or length, provide information on (palaeo-)flow velocities in the respective corridor. In order to be able to make a valid statement, however, a certain amount of statistically meaningful samples is required. The recording of scallops and their morphometric properties is generally a time-consuming procedure, achieved either by manual or photographic means. Even modern methods, such as terrestrial laser scanning, are not necessarily practical. This paper presents a method that overcomes these difficulties by using the *Structure from Motion* (SfM) photogrammetric method to derive high-resolution terrain models of cave walls. Since no GPS signal can be received in caves, a methodology was developed to reference the digital terrain models within a locally generated coordinate system. To automatically derive scallops from these terrain models, three different classification algorithms were applied. The accuracy of the different algorithms was assessed and evaluated using manually digitised scallops as validation. The Geomorphons classification algorithm has proven to be the best classification method. The automatic derivation of the microscale features achieves a high level of agreement with manually derived scallops, and thus, a considerable gain in terms of time and number of scallops examined is possible.

Ariane Droin

Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Münchener Straße 20
82234 Weßling, Deutschland
ariane.droin@dlr.de

Christian Bauer

Institut für Geographie und Raumforschung
Karl-Franzens-Universität Graz
Heinrichstraße 36, 8010 Graz
christian.bauer@uni-graz.at

Eingelangt: 24.4.2022

Angenommen: 22.6.2022

EINLEITUNG

Höhlen sind wichtige Archive und Fenster zur Vergangenheit, die uns mit ihrer Vielzahl an geomorphologischen Formen helfen, landschafts-genetische Prozesse und auch frühere geomorphologische und klimatische Bedingungen zu verstehen (z.B. Wagner et al., 2011; Spötl & Cheng, 2014; Spötl et al., 2020; Plan et al., 2021). Beispielsweise sei die aus den Nördlichen Kalkalpen bekannte, dominante horizontale Ausprägung von Gangsystemen in spezifischen Höhenbereichen (Niveaus) – ein Resultat des stagnierenden Vorfluterniveaus – als Evidenz tektonischer Ruhephasen genannt (Kuffner, 1998; Plan et al., 2009).

Eine spezifische Kleinform an Höhlenwänden, welche verwendet werden kann, um (Paläo-)Fließrichtungen und -geschwindigkeiten in phreatisch entstandenen Höhlenräumen zum Zeitpunkt ihrer Entstehung abzuleiten, sind Fließfacetten (Lauritzen, 1981; Ford & Williams, 2007). Dabei handelt es sich um mikroskalige, konkave Lösungsformen (Goodchild & Ford, 1971). Die Kombination aus turbulenter Strömung und kleinen Unregelmäßigkeiten auf der löslichen Oberfläche führt zu einer Abtrennung des laminaren Wasserstrahls von der Oberfläche. Je nach Fließgeschwindigkeit destabilisiert sich der laminare Strahl früher oder später, und ein turbulenter Strom wird erzeugt. Durch die Turbulenz wird ein Teil in eine rezirkulierende Strömung unterhalb der laminaren Scherschicht geführt (wo er die Oberfläche korrodiert) und ein anderer Teil setzt sich wieder an der Oberfläche fest (Punkt der höchsten Lösung; Curl, 1966). Die Fließfacetten „bewegen“ sich so im Laufe der Zeit stromabwärts (Curl, 1974), und ihre kennzeichnende Asymmetrie (der stromaufwärts befindliche Teil ist steiler als der stromabwärts gelegene Teil) ergibt sich aus dieser Tatsache (Bretz, 1942). Diese Information kann als Indikator für die Fließrichtung des Wassers zum Zeitpunkt der Entstehung der Fließfacetten verwendet werden (Coleman, 1949; Lauritzen, 1981). Da die Fließgeschwindigkeit ausschlaggebend ist für die Entfernung des Punktes, an dem sich der Wasserstrahl

wieder an der Oberfläche festsetzt, kann die Größe der Fließfacetten weiters als Indikator für die Fließgeschwindigkeit verwendet werden (wobei kleinere Fließfacetten auf schnellere und große Fließfacetten auf langsamere Fließgeschwindigkeiten hinweisen; Curl, 1966; Blumberg & Curl, 1974).

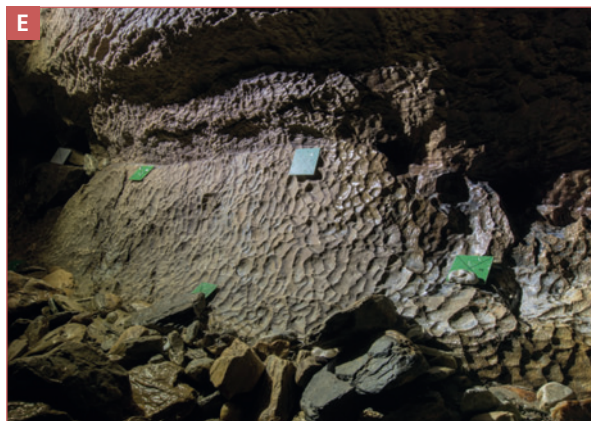
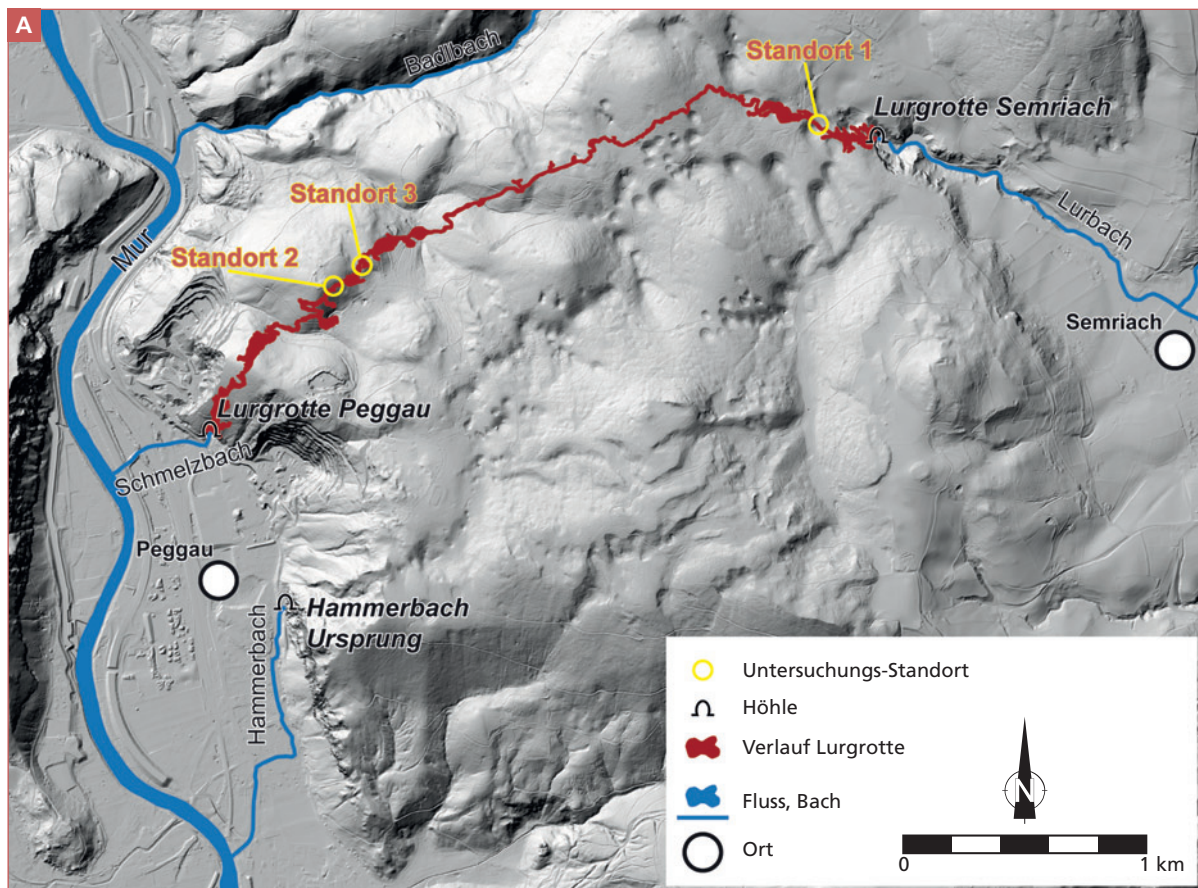
Die von Blumberg & Curl (1974) und Curl (1974) aufgestellten Gleichungen zur Ableitung von (Paläo-) Fließgeschwindigkeiten auf Grundlage der Morphometrie der Fließfacetten (Länge), sowie des Gangabschnittes (z.B. Durchmesser), benötigen eine große Stichprobenanzahl an vermessenen Fließfacetten. Springer & Hall (2020) stellten fest, dass bei Studien zur Erforschung der Fließrichtung und -geschwindigkeit anhand von Fließfacetten große Unterschiede in Bezug auf die Stichprobengröße, die Wahl der Messmethode und die verwendete Metrik für die mittlere Länge existieren. Nach Kicińska et al. (2017) sollte die Stichprobengröße mindestens 100 Fließfacetten umfassen. Springer & Hall (2020) verwendeten eine Monte-Carlo-Simulation, um die minimal benötigte Stichprobengröße für ein statistisch aussagekräftiges Ergebnis zu ermitteln. Sie kamen zu dem Schluss, dass 20 bis 30 Formen benötigt werden, um Unsicherheiten möglichst gering zu halten. Die Stichprobengröße ist in der Praxis jedoch von der Raumsituation der Höhle abhängig. So können Platzmangel, erschwerte Erreichbarkeit sowie Lichteinschränkungen die Messung beeinträchtigen und die Stichprobengröße reduzieren. Bisher wurde die Vermessung von Fließfacetten entweder von Hand mit einem Lineal (z.B. Springer & Wohl, 2002) oder anhand von Fotos (z.B. Checkley & Faulkner, 2014) durchgeführt. Bei letzterer Methode ist zu beachten, dass aufgrund der gewölbten Wandgeometrie Verzerrungen auftreten und die Messungen fehlerhaft sein können.

Diese Faktoren erschweren die Entwicklung einer konsistenten und zuverlässigen Methode zur Vermessung von Fließfacetten. Der technische Fortschritt bringt vielversprechende neue Messmethoden hervor. Hier

Abb. 1 (rechte Seite): Untersuchungsgebiet. A: Schattiertes Höhenmodell des digitalen Geländemodells mit 1 x 1 m Rasterauflösung. Datengrundlage: CC-BY-4.0: Land Steiermark – data.steiermark.gv.at.; B: Gangabschnitt des Schauhöhlenteils der Lurgrotte Semriach im Hochwasser-Überlauf. Bei geringer und normaler Wasserführung des Lurbaches (Situation auf dem Bild) ist dieser Gangabschnitt trocken. C: Fließfacetten im Bereich des Hochwasser-Überlaufs (Standort 1). Die graublaue Färbung und die Bänderung des Schöckelkalkes sind deutlich ersichtlich. 10 x 10 cm Target (grünes Quadrat) als Größenvergleich. D: Schmelzbach-Ursprung (roter Pfeil) in der Lurgrotte Peggau kurz vor dem Aufstieg zum Blocksberg. E: Fließfacetten unmittelbar oberhalb des rezenten Bachbettes des perennierenden Höhlengerinnes unweit des Schmelzbach-Ursprungs (Standort 3).

Fig. 1 (right side): Study area. A: hillshade of the digital terrain model with 1 x 1 m grid resolution. Data basis: CC-BY-4.0: Land Steiermark – data.steiermark.gv.at.; B: section of the show cave part of the Lurgrotte Semriach. During low and normal water flow of the Lurbach (as shown on this picture) this cave section is dry. C: scallops in the area of flood overflow (site 1). The grey-blue colouration and the banding of the Schöckel limestone are clearly visible. 10 x 10 cm target (green square) for size comparison. D: source of the Schmelzbach (red arrow) in the Lurgrotte Peggau shortly before the ascent to the Blocksberg. E: scallops immediately above the modern stream bed of the perennial channel not far from the Schmelzbach origin (Site 3).

Fotos: Christian Bauer



ist vor allem das hochauflösende terrestrische Laser-scanning (TLS) zu nennen, das zunehmend nicht nur an der Erdoberfläche, sondern auch in der speläologischen Forschung Verwendung findet (z.B. Idrees & Pradhan, 2016; Buchroithner & Gaisecker, 2020). TLS-Systeme werden verwendet, um genaue 3D-Oberflächeninformationen zu erhalten. Dabei werden von einem stationären Punkt aus viele Laserimpulse vom Gerät in Richtung der aufgenommenen Oberfläche gesendet. Die ausgesandten Impulse werden von der Oberfläche reflektiert und finden ihren Weg zurück zum Aufnahmegerät. Dieser kann nun über die Zeitdifferenz zwischen Aussendung und Ankunft des Laserimpulses die genaue Distanz bestimmen. Durch die Gesamtheit an gemessenen Distanzwerten entsteht ein hochaufgelöstes Geländemodell. TLS-Systeme sind jedoch sehr teuer, schwerfällig und empfindlich gegenüber Erschütterungen und für bestimmte Umweltbedingungen (z.B. Feuchtigkeit) nur bedingt geeignet. Neben der Handhabung des Gerätes ist aber auch die Messung in Höhlen problematisch. Abhängig vom verwendeten TLS-System kann eine Mindestdistanz zum bemessenden Objekt nötig oder eine Messung an nassen Oberflächen unmöglich sein. Diese Rahmenbedingungen schränken den Einsatz in Höhlen häufig auf gut erreichbare Gangabschnitte ein. Allerdings werden durch den raschen technischen Fortschritt TLS-Systeme zunehmend kostengünstiger, aber auch kleiner, leichter und damit mobiler. Der Einsatz dieser neuen Generationen von TLS-Systemen in der Speläologie rückt zunehmend ins Forschungsinteresse (Gölles et al., 2022). Noch sind diese mobilen

TLS-Systeme in ihrer räumlichen Auflösung nicht präzise genug, um Kleinformen wie Fließfacetten zu erfassen, und zudem besteht weiterhin das Problem der Nässe, was Messungen in gewissen Wellenlängenbereichen unmöglich macht.

Eine weitere neue 3D-Erfassungsmethode auf dem Gebiet der Fernerkundung und der Geomorphologie ist die photogrammetrische Methode *Structure from Motion* (SfM; Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013). Dabei werden überlappende Bilder eines Objekts aufgenommen, aus denen mit Hilfe von Algorithmen ein 3D-Modell der Oberfläche erstellt wird. SfM wurde bereits zur Kartierung von Höhlen eingesetzt (z.B. Brandner, 2019; Triantafyllou et al., 2019; Pukanská et al., 2020). Die Vorteile von SfM (günstiges und leicht handhabbares Equipment) für die Höhlenkartierung sind vielfältig (Pukanská et al., 2020), jedoch wurde bisher keine großräumige Erfassung kleinskaliger morphometrischer Merkmale durchgeführt. Auch die Verwendbarkeit des erstellten Geländemodells zur zusätzlichen Ableitung einer morphometrischen Form, in diesem Fall Fließfacetten, wurde unseres Wissens bisher nicht durchgeführt (bzw. publiziert).

Daher wird in diesem Beitrag eine neue Methodik präsentiert, um mikroskalige Formen in Höhlen mit möglichst platzsparendem und wenig zusätzlichem Equipment zur Höhlenbefahrung zu messen. So können auch tagferne, schwer zu erreichende Abschnitte in Höhlen mithilfe von SfM großflächig aufgenommen werden. Zusätzlich wird eine Methode präsentiert, um Fließfacetten automatisch mittels SfM-basierten Höhenmodellen abzuleiten.

UNTERSUCHUNGSGEBIET

Als Untersuchungsgebiet für die Analyse wurde die Lurgrotte (2836/1) der Kataster-Teilgruppe Tanneben (2836) im Grazer Bergland gewählt (Abb. 1). Die Höhle kann als ein zentraler Kulminationspunkt der in diesem Gebiet bis zum ausgehenden 19. Jahrhundert zurückreichenden speläologischen und karsthydrologischen Forschungsgeschichte bezeichnet werden (Wallner, 2020). Mit einer vermessenen Ganglänge von knapp 6 km ist die Lurgrotte die längste Höhle im Tannebenstock (sowie auch in der Untergruppe Grazer Bergland). Die Speläogenese des Gebietes ist durch den Kontakt von verkarstungsfähigen und nicht-verkarstungsfähigen Gesteinen (Kontaktkarst), vor allem aber durch die Erosion des Vorfluters Mur geprägt. So hat der Einschnitt des Vorfluters ein komplexes karsthydrologisches System und mit der Lurgrotte auch ein vertikal-mehrstufiges Höhlensystem gebildet. Für karstmorphologische und hydrogeologische Details

sei auf Benischke et al. (2016) verwiesen. Teilbereiche der Höhle sind als Schauhöhlen ausgebaut und werden von zwei unterschiedlichen Betreibern, einerseits von Peggau (Lurgrotte Peggau) und andererseits von Semriach (Lurgrotte Semriach) geführt. Die damit einhergehende leichte Erreichbarkeit der untersuchten Lokalitäten in der Höhle erwies sich für die Methoden-etablierung als ein logistischer Vorteil. So zeigten die ersten SfM-Ableitungen noch wenig zufriedenstellende Ergebnisse, wobei die Ursache dieser Probleme bereits im Messaufbau der Fotoaufnahme gelegen war. Dieser musste mehrmals adaptiert und dementsprechend in der Höhle wiederholt werden. Insgesamt wurden drei Standorte in der Lurgrotte als Untersuchungsgebiete definiert (Abb. 1). Ein Standort befindet sich im Hochwasserüberlauf der Lurgrotte Semriach, zwei Standorte im Bereich des perennierenden Schmelzbaches in der Lurgrotte Peggau.

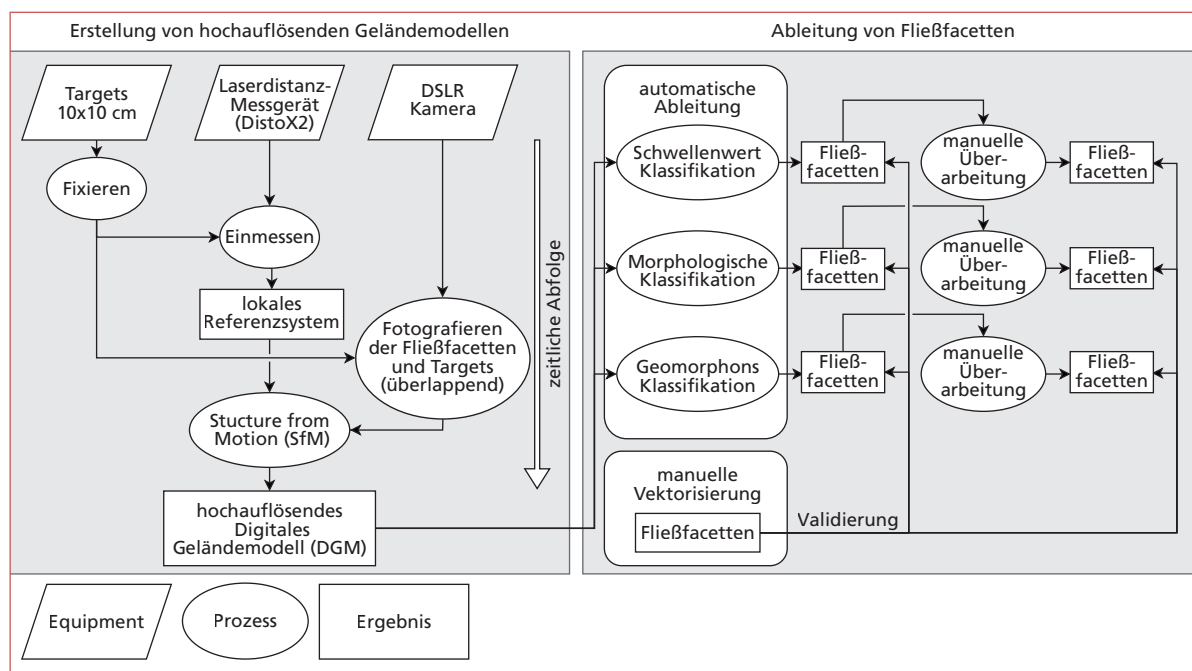


Abb. 2: Workflow der vorliegenden Arbeit. Der erste (linke) Teil befasst sich mit dem Aufbau eines Verfahrens zur Erstellung eines lokalen Referenzsystems, um hochaufgelöste digitale Geländemodelle mittels SfM zu erhalten. Der zweite (rechte) Teil befasst sich mit der automatischen Ableitung von Fließfacetten anhand von drei unterschiedlichen Klassifikationsverfahren aus ebendiesen Höhenmodellen. Die Güte der Klassifikationsverfahren wird durch eine Validierung mit manuell vektorisierten Fließfacetten ermittelt.

Fig. 2: Workflow of the present work. The first (left) part deals with the structure of a method to create a local reference system to obtain high-resolution digital terrain models using SfM. The second (right) part deals with the automatic delineation of scallops, using three different classification methods, from elevation models. The quality of the different classification methods is determined by validation using manually vectorised scallops.

METHODIK

Die vorliegende Methodik teilt sich in zwei Teile: Die Entwicklung eines SfM-Verfahrens zur Erstellung hochauflösender Geländemodelle in Höhlen und die automatische Ableitung von Fließfacetten aus den er-

stellten Geländemodellen sowie die Evaluierung der Güte derselben. Der Workflow der vorgestellten Methodik lässt sich aus Abbildung 2 entnehmen und wird im weiteren Verlauf näher erläutert.

STRUCTURE FROM MOTION

SfM ist eine Methodik, welche aus überlappenden Bildern handelsüblicher Kamerasysteme (Spiegelreflex, aber auch Smartphone) ein hochauflösendes 3D-Modell erstellen kann. Dabei wird auf photogrammetrische Messprinzipien zurückgegriffen. Photogrammetrie ist ein Überbegriff für berührungslose Methoden, die aus Fotografien eines bestimmten Objektes oder Areals durch Messungen im Bild indirekt auf die Lage und Größe des untersuchten Objektes oder Areals zurückschließen lassen. Solch eine Messung ist beispielsweise das Auffinden von übereinstimmenden Bildpunkten (=Pixel) aus verschiedenen Blickwinkeln zwischen den Fotografien (Abb. 3), um eine 3D-Oberfläche eines bestimmten Objektes mittels bestimmter

Algorithmen zu rekonstruieren. Anhand von Referenzpunkten mit bekannten Koordinaten (hierbei werden meist Koordinaten von bestimmten markanten Punkten, welche mittels hochgenauem GPS eingemessen werden, verwendet) kann das erzeugte Modell so in ein Koordinatensystem überführt werden. Damit können innerhalb der erzeugten digitalen Geländemodelle (DGM) Messungen durchgeführt werden. Einen allgemeinen Überblick über die einzelnen Schritte (Feature Detection, Feature Matching, Rekonstruktion von Kameraparametern, Georeferenzierung und Generierung einer sogenannten „DenseCloud“) sowie darüber, was bei der Datenerfassung zu beachten ist, und einige beispielhafte Anwendungen in der physischen Geo-

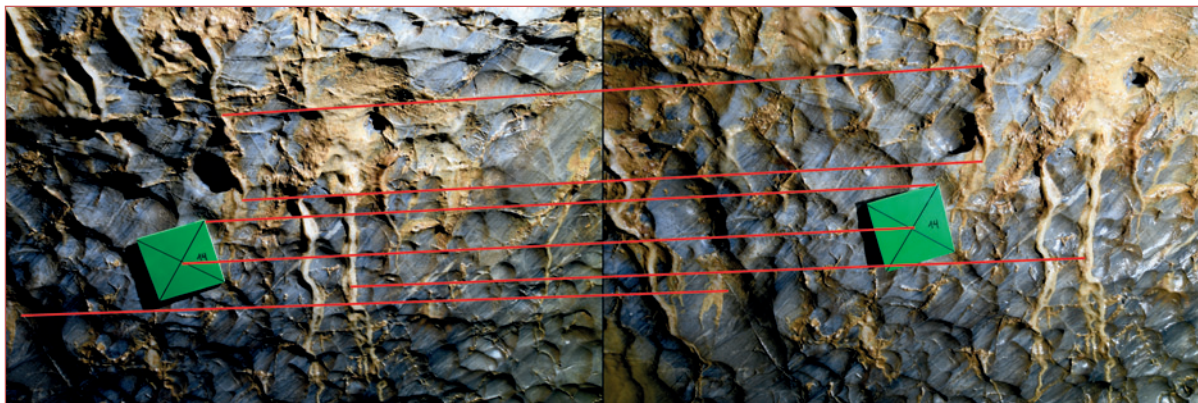


Abb. 3: Zwei Beispielbilder, die sich überlappen (Standort 1, Abb. 1). Die roten Linien zeigen beispielhafte Punkte die durch den „Feature Matching“-Algorithmus entdeckt werden können, um die Verbindung zwischen den beiden Bildern herzustellen.
Fig. 3: Example of two overlapping images (location 1, Fig. 1). The red lines show exemplary points that can be detected by the feature matching algorithm to establish the connection between the two images.

Fotos: Ariane Droin

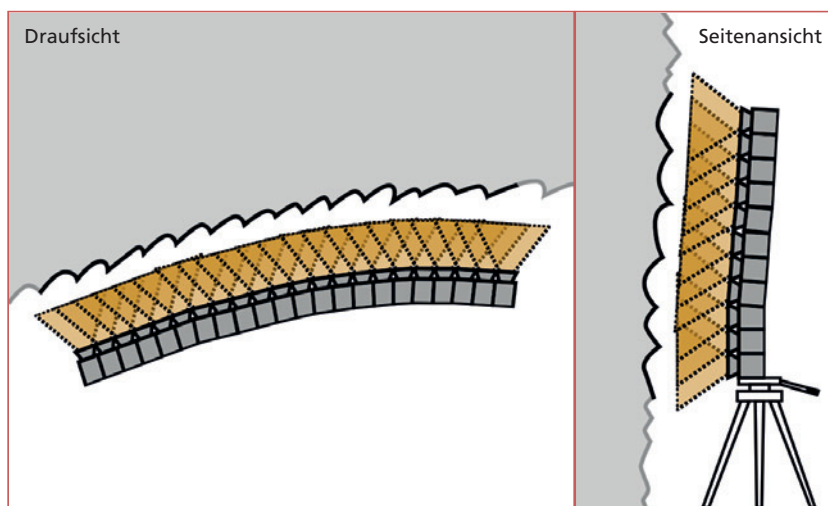


Abb. 4: Das Aufnahmeverfahren. Links eine Draufsicht auf die Wand mit der sich bewegenden Kamera, mit möglichst großen Bildüberlappungen (etwa 60 %) zwischen den einzelnen Aufnahmen. Rechts die Seitenansicht mit der Kamera auf dem Stativ, welches sukzessive stufenweise nach oben (oder unten) gestellt wird, um eine möglichst hohe Überlappungsrate zu erzielen.
Fig. 4: The image acquisition setting. On the left, a top view of the wall with the moving camera, with the largest possible overlap (about 60 %) between the individual shots. On the right, the side view with the camera on the tripod, which is successively raised (or lowered) in order to achieve the highest possible overlap rate.

graphie und Geomorphologie, finden sich in Westoby et al. (2012) und Smith et al. (2016). In Bezug auf die Anwendung von SfM in Höhlen gibt es zwei wesentliche Einschränkungen: fehlendes Licht und ein Fehlen von GPS-Signalen unter der Erdoberfläche, was das Überführen in ein bekanntes Koordinatensystem erschwert.

Das erste Problem kann durch die Verwendung einer starken Höhlenlampe (im vorliegenden Fall eine Scurion 1500 mit 1300 ANSI-Lumen) gelöst werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Höhlenwand mit der Weitwinkelfunktion gleichmäßig hell ausgeleuchtet wird. Eine Spot-Beleuchtung ist für die vorliegende Anwendung zu punktuell und damit zu ungleichmäßig. Da die Bildqualität bei der Erstellung von SfM-Modellen von großer Bedeutung ist, sollte die Einstellung von zu hohen ISO-Werten und zu langen Verschlusszeiten, und dementsprechend die Entstehung von zu starkem Bildrauschen vermieden werden. Die Beleuchtung mittels

Höhlenlampe hat für die SfM-Bildaufnahme sogar den Vorteil, dass im Vergleich zu Umweltbedingungen an der Erdoberfläche, wo sich die Lichtverhältnisse im Zeitverlauf des Bildaufnahme-Prozesses ändern können, die Lichtverhältnisse konstant bleiben. Der Helm mit der Lampe wurde bei den Aufnahmen in der Hand gehalten. Eine Montage der Lampe auf einem Stativ erwies sich für ein gleichmäßiges Ausleuchten als nicht nötig. Des Weiteren sollte der Überlappungsgrad zwischen den Bildern mindestens 60 % betragen, mit leicht unterschiedlichen Blickwinkeln, welche jedoch 10-20° nicht überschreiten sollten (Bemis et al., 2014; Abb. 4 für das Aufnahmeverfahren). Sehr glatte Flächen, aber auch stark reflektierende Flächen eignen sich nicht gut zur Erstellung eines SfM-Modells, da durch unterschiedliche Aufnahmewinkel die für den Algorithmus nötigen gleichen Bildpunkte nicht erkannt werden. Deshalb sollte die Höhlenwand, falls feuchte Stellen auftreten, vorher möglichst abgetrocknet werden.

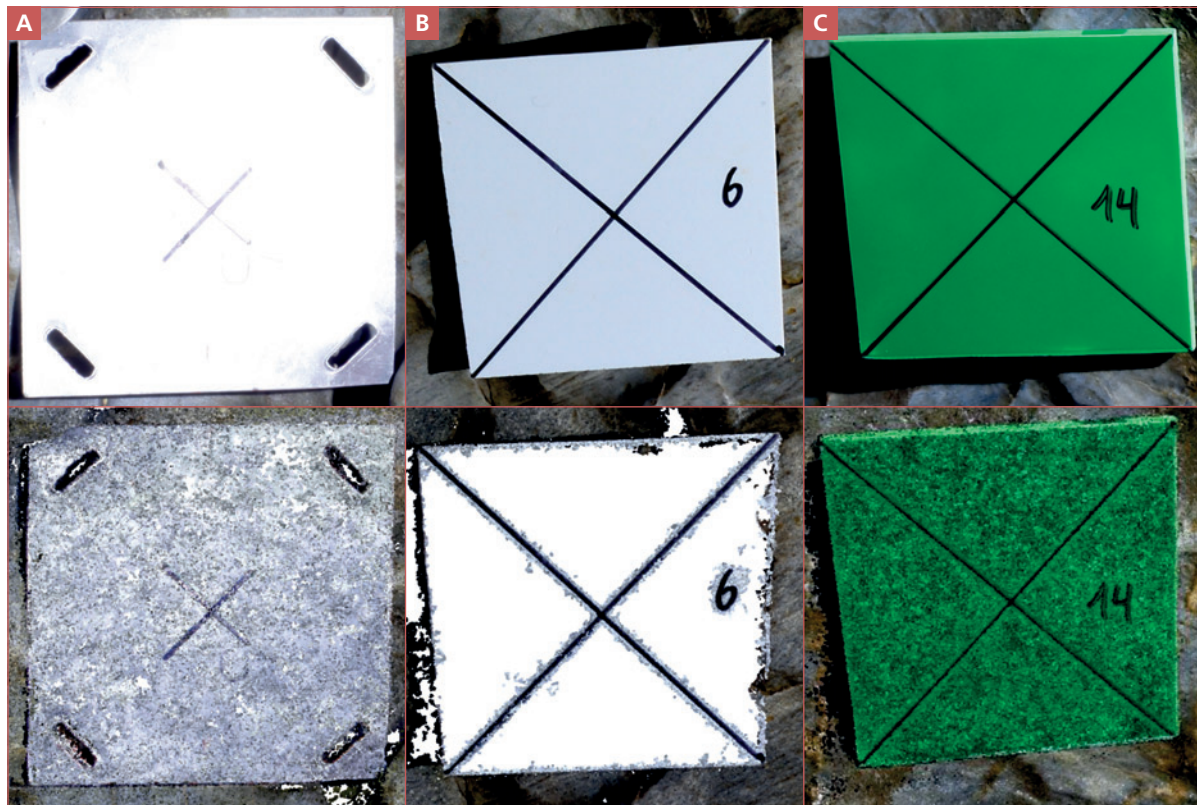


Abb. 5: Die unterschiedlichen Targets, die beim Versuchsaufbau verwendet wurden (obere Zeile), und deren Repräsentation in der mittels SfM erstellten 3D Punktwolke. A: Aluminiumtarget; B: Target aus einer Schaumstoffplatte in Originalfarbe; C: grün eingefärbtes Target aus Schaumstoff.

Fig. 5: The different targets used in the experimental setup (top row) and their representation in the 3D point cloud created using SfM. A: aluminum target; B: target from a foam board in the original colour; C: green coloured target made of foam board.

Die zweite Einschränkung, das Fehlen von GPS-Signalen unter der Erdoberfläche, stellt sich als ein größeres Problem dar. Hierfür könnten beispielsweise über Polygonzüge GPS-Koordinaten, die mittels GPS aus dem Eingangsbereich der Höhle gemessen wurden, in die Höhle hinein übertragen werden. Für die vorliegende Anwendung, das Erstellen von hochauflösenden Geländemodellen, würde diese Methodik, je nach Distanz und Verwinkelung der Höhle, zu viele Unsicherheiten mit sich bringen. Aus diesem Grund wurde hierfür ein lokales Koordinatensystem erstellt. Mittels trigonometrischer Funktionen und minimalen Equipments wird ein genaues lokales Koordinatensystem generiert (Abweichungen finden sich im unteren mm-Bereich), was nachfolgende genaue Messung in den erstellten Geländemodellen ermöglicht.

Für eine erfolgreiche Georeferenzierung werden mindestens drei Punkte (sog. Targets) in den Aufnahmen benötigt, deren Koordinaten bekannt sein müssen. Meist dienen als Targets quadratische oder runde Flächen, die mit einem Kreuz versehen sind (Abb. 3). Am Kreuzungsmittelpunkt wird die Koordinate des jeweiligen Targets gemessen. Die Einmessung der Targets

erfolgte in der Höhle mittels des Laserdistanzmessgeräts DistoX2 (Heeb, 2014), welches speziell für Höhlenvermessungen konzipiert wurde. Das Laserdistanzmessgerät wurde dabei auf einem Carbon-Stativ montiert, um die Abweichungen durch Metallteile zu minimieren. Die Hauptschwierigkeiten, die bei der Entwicklung der Methode auftraten, waren das Material der Targets sowie eine nicht invasive Befestigung der Targets an der Wand. Nach verschiedenen Versuchen mit Aluminiumtargets (die das Stirnlampenlicht zu stark reflektierten) erwiesen sich farbige Targets (grün) aus Schaumstoffplatten als am effektivsten (Abb. 5). Auch unter dem Gesichtspunkt der Platzersparnis und des geringen Gewichts erwiesen sich diese Targets mit einer Größe von 10 x 10 cm als ideal. Die Aufgabe, die Targets auf nicht invasive Weise an der Höhlenwand zu befestigen, erwies sich aufgrund der feuchten und sehr glatten Kalksteinoberfläche als schwierig. Erste Versuche wurden mit UHU® Patafix sowie mit starkem doppelseitigem Klebeband und Kabelbindern durchgeführt, für den Fall, dass Lösungslöcher vorhanden waren. Schließlich erwies sich der Pattex®-Montagekleber, der auf feuchten Oberflächen sehr gut haftet

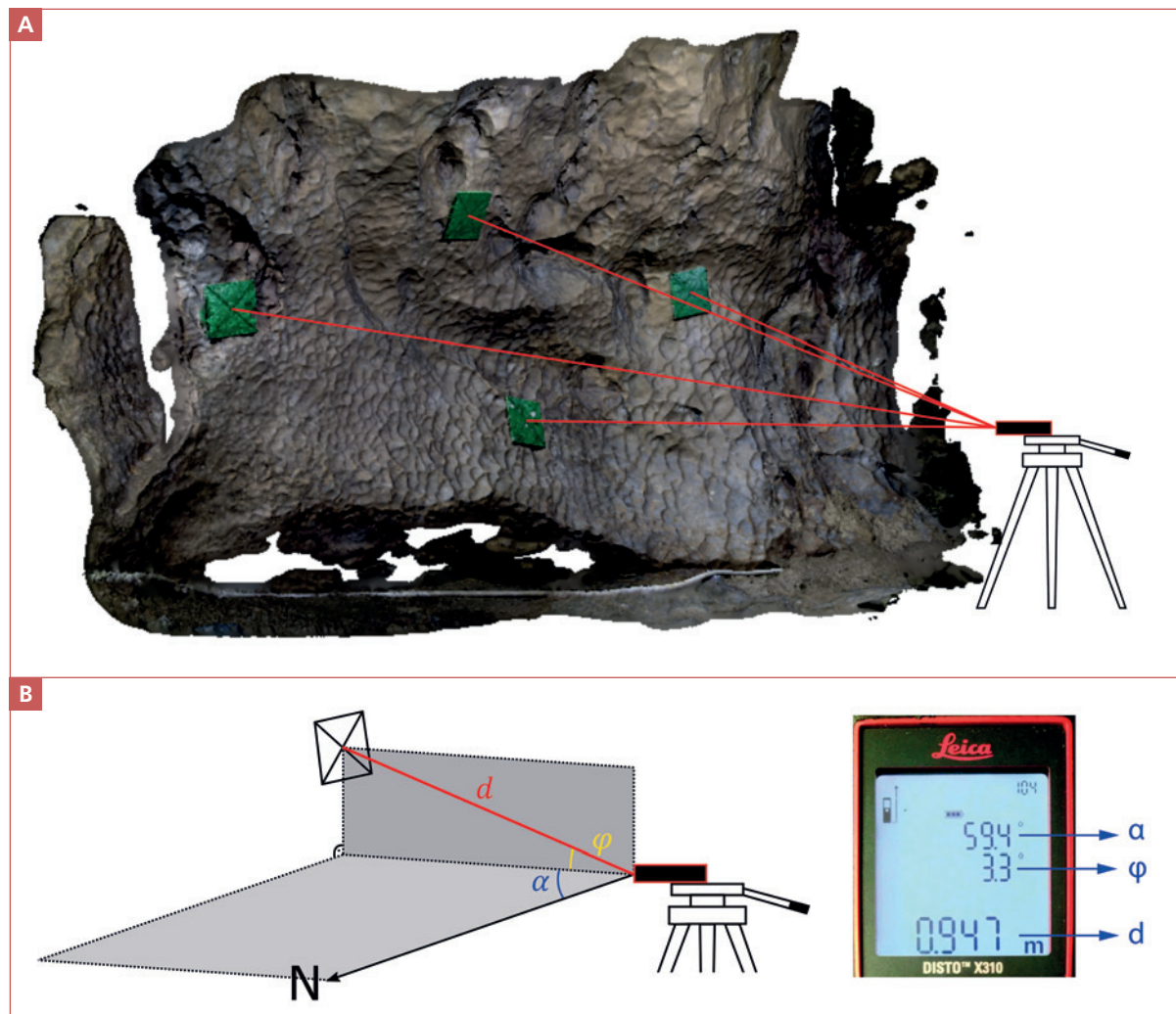


Abb. 6: Messaufbau für die Georeferenzierung. SfM-3D-Modell mit Fototextur. Die an der Höhlenwand befestigten grünen Targets, die durch das Laserdistanzmessgerät (rechts) eingemessen werden.

Fig. 6: Measurement setup for georeferencing. SfM-3D model with photo texture. The green targets attached to the cave wall are measured by the laser rangefinder (right).

und nach einiger Zeit leicht entfernt werden kann, da er erst nach 24 Stunden aushärtet, als beste Befestigungsmethode.

Nachdem die Targets fixiert und über den gesamten aufzunehmenden Bereich der Höhlenwand verteilt wurden, konnte die eigentliche Messung zur Georeferenzierung durchgeführt werden. Das DistoX2 misst sowohl die Entfernung als auch die Neigung und den Azimut. Wie bereits erwähnt, ist das Laserdistanzmessgerät auf einem Stativ befestigt, das jeweils einige Meter von der Wand entfernt positioniert wird, wobei sich alle Targets im Sichtfeld befinden sollten. Die Position der Rückseite des Laserdistanzmessgeräts wird als Ursprung des neuen lokalen 3D-Koordinatensystems fixiert. Von diesem Fixpunkt aus werden Messungen der Entfernung (d in m), des Azimuts (α in $^\circ$) und der

Neigung (φ in $^\circ$) durchgeführt. Aus diesen Messungen werden mittels einer mathematischen Gleichung die lokalen Koordinaten in X, Y und Z abgeleitet. Um sicherzustellen, dass während der Messung keine Fehler auftreten, wird eine zweite Messung von einem anderen festen Punkt aus durchgeführt. Eine grafische Darstellung des Messaufbaus zur Georeferenzierung ist in Abb. 6 zu sehen.

Für die Aufnahme wurde eine digitale Spiegelreflexkamera und aufgrund der Enge der Höhlengänge ein Objektiv mit einer Brennweite von 20 mm verwendet. Da die verwendete Nikon Kamera einen APS-C Sensor nutzt, muss die Brennweite mit dem Faktor 1,5 multipliziert werden, womit die effektive Brennweite 30 mm beträgt. Bei optimalen Rahmenbedingungen sind Festbrennweiten mit 35 mm oder 50 mm zu bevorzu-

gen. Diese längeren Brennweiten führen aber zu kleineren Bildausschnitten, und somit muss eine Vielzahl an Bildern aufgenommen werden. Bei der Aufnahme von Höhlenwänden besteht bei längeren Brennweiten auch das Problem, dass die für die SfM-Modelle nötige Überlappung beim Fotografieren auf homogenen Wänden visuell nur schwer (teilweise auch nicht) erkannt wird. Ohne die nötige Überlappung lassen sich aber keine SfM-Modelle ableiten. Die endgültige Ausrüstung für die Datenerfassung setzt sich wie folgt zusammen:

- Spiegelreflexkamera (Nikon D7500), ein Objektiv mit einer kurzen Brennweite (z.B. 20 mm) für die Bildaufnahme im RAW-Format
- starke LED-Lampe (z.B. Scurion 1500)
- Carbon-Stativ
- Laserdistanzmessgerät (z.B. DistoX2)
- mindestens drei Targets aus Schaumstoffplatten (mit einer Größe von z.B. 10 x 10 cm), die so eingefärbt sind, dass sie starke Reflektionen der Stirnlampe verhindern
- Montagekleber

- Handtücher und Küchenrolle zum Abtrocknen der nassen Oberflächen und zum Entfernen des Montageklebers.

Die endgültige Erstellung der DGMs erfolgt mit einer kommerziellen SfM-Software, in der das oben beschriebene SfM-Verfahren zur Erstellung eines 3D-Modells aus den sich überlappenden Bildern leicht implementiert werden kann. Hierfür wurde Agisoft Metashape (Version 1.6) verwendet, da es neben einer intuitiven grafischen Benutzeroberfläche auch verschiedene Möglichkeiten wie z.B. die (direkte) Georeferenzierung bietet, um die Modelle auf das lokal erzeugte Koordinatensystem zu beziehen.

Diese Methodik wurde im Zuge mehrerer Feldkampagnen an drei unterschiedlichen Standorten in der Lurgrotte Peggau bzw. Lurgrotte Semriach (Abb. 1) angepasst und verfeinert und somit ein Workflow etabliert. Für die drei Standorte wurden DGMs mit einer Auflösung von 1 x 1 mm generiert, welche im weiteren Verlauf, um ihre Verwendbarkeit für eine automatische Ableitung von Fließfacetten, untersucht wurden.

AUTOMATISCHE ABLEITUNG DER FLIESSFACETTEN

Für die Ableitung der Fließfacetten wurden drei unterschiedliche Algorithmen hinsichtlich ihrer Genauigkeit untersucht. Bevor die eigentliche Ableitung erfolgen kann, müssen die erzeugten DGMs in einem ersten Schritt vorprozessiert werden. Eine Schwierigkeit der automatischen morphometrischen Ableitung der Formen ist die Lage der Fließfacetten an gewölbten Höhlenwänden. Damit die Morphologie der (meist konkaven) Höhlenwände aus den morphometrischen Analysen der einzelnen Formen ausgeschlossen werden kann, muss die Krümmung der DGMs berechnet werden. Dies erfolgt dadurch, dass für jedes Pixel sein Lageverhältnis zu seinen acht benachbarten Pixeln berechnet wird. Ist die Zelle höher als ihre umgebenden Zellen, dann wird die Zelle als „konkav“ ausgewiesen, ist sie gleich hoch als „eben“, und ist sie tiefer als „konvex“. Um das Ergebnis des so entstandenen Krümmungsrasters (Abb. 7A) zu verstärken, wird dieses anschließend mittels eines Filters geglättet (Abb. 7B). Die Schwierigkeit einer automatischen Ableitung der Fließfacetten besteht in der Definition von morphometrischen Kriterien, die die einzelnen Formen voneinander abgrenzt. Drei unterschiedliche automatische Verfahren wurden angewendet und evaluiert:

(1) Schwellenwert-Klassifikation: Hierbei werden mittels eines Schwellenwertes die konkaven Pixel des gefilterten Krümmungsrasters als Umrahmung

der Fließfacetten definiert und als einzelne Formen extrahiert (Abb. 7B die hellen Bereiche).

- (2) Morphologische Klassifikation: Die morphologische Klassifikation basiert, ähnlich der Schwellenwert-Klassifikation, ebenso auf der Definition der Fließfacetten über deren Krümmung (konvex, konkav, flach). Allerdings steht dieser Algorithmus als fertige Open-Source-Software zur Verfügung (Orfeo-Toolbox; Pesaresi & Benediktsson (2001)).
- (3) Geomorphons-Klassifikation: Der Geomorphons-Algorithmus wurde von Jasiewicz & Stepinski (2013) für die automatische Ausweisung von zehn Landformenklassen (Ebene, Gipfel, Kamm, Schulter, Sporn, Hang, Senke, Tal, Fußhang und Furche) auf Basis eines DGMs entwickelt. Dabei wird die topografische Lage eines Pixels (oberhalb, unterhalb, höher) zu den umgebenden Pixeln in einer ausgewählten Distanz bewertet. Je nach Lage des Pixels zu seinen Nachbarn werden diese anschließend in die jeweiligen Landformen klassifiziert. Bei der Anwendung des Algorithmus für die DGMs der Fließfacetten werden Pixel, welche als Spitzen, Grate, Schultern und Ausläufer klassifiziert wurden, als Umrahmung der Fließfacetten zusammengefasst.
- Zur weiteren Verfeinerung der unterschiedlichen Klassifizierungen werden einige Nachbearbeitungsschritte durchgeführt. Häufig ergeben sich kleine Lücken

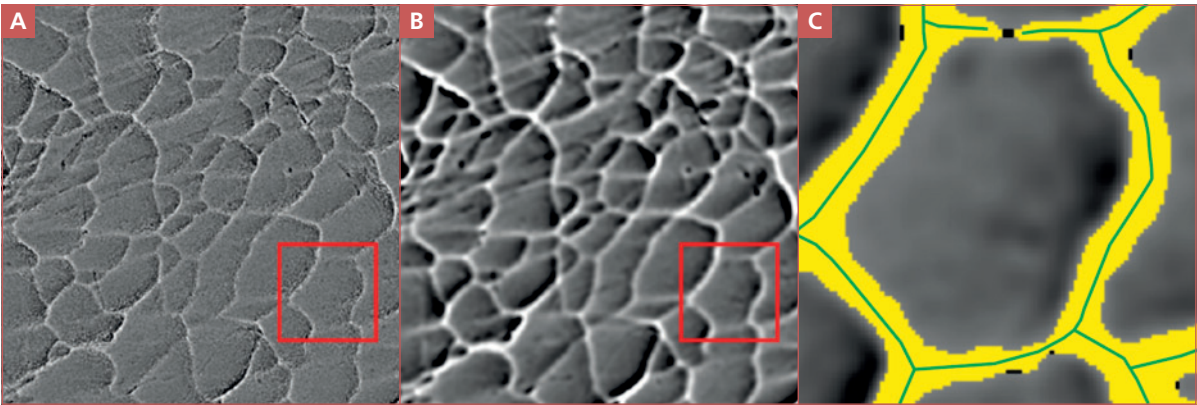


Abb. 7: **A:** Krümmung des digitalen Geländemodells; **B:** Krümmung mit angewandter Filterung zur Glättung; **C:** hervorgehobener Bereich, in dem beispielsweise der Geomorphon-Algorithmus die Umrahmungen der Fließfacetten nicht komplett schließt (gelber Bereich) sowie eine Darstellung der extrahierten Mittellinie aus der klassifizierten Pixelgruppe (grüne Linie).
 Fig. 7: **A:** Curvature of the digital terrain model; **B:** Curvature with filtering applied for smoothing; **C:** Highlighted area where, for example, the Geomorphon algorithm did not completely close the outlines of the scallops (yellow parts), as well as a representation of the extracted centre line from the classified pixel clump (green line).

(Abb. 7C), die ein automatisches Schließen zu einer Form verhindern. Diese kleinen Lücken werden mit Hilfe eines Algorithmus geschlossen. In einem letzten Schritt werden die Mittellinien der als Umrahmungen der Fließfacetten ausgewiesenen Pixelgruppen extrahiert und anschließend in Polygone umgewandelt. Einige dieser Lücken sind größer und konnten durch den angewandten Algorithmus nicht geschlossen werden. Eine visuelle Inspektion zeigt jedoch deutlich, dass es sich hierbei um einzelne Formen handelt, bei denen aufgrund der Ebenheit der Übergangszone zwischen den einzelnen Graten der Fließfacetten keine Zuordnung zur Umrahmung der Fließfacetten erfolgt und/oder die aufgrund von nachträglichen korrosiven Prozessen und/oder struktureologischen Merkmalen durchbrochen sind. Da sich die Mittellinien in diesen Bereichen also nicht berühren, um ein vollständig geschlossenes Polygon zu erzeugen, wird eine Überarbeitung des Datensatzes durchgeführt, bei der diese Lücken zwischen den Mittellinien durch eine manuelle Verlängerung geschlossen werden. Diese manuelle Bearbeitung wird für alle drei Klassifikationsalgorithmen

für alle drei Standorte angewandt. Der zeitliche Aufwand der Nachbearbeitung ist als gering einzustufen, da die Lücken der nicht geschlossenen Fließfacetten klein sind und mittels kurzer Linie geschlossen werden können.
 Um die Ergebnisse der drei verschiedenen Methoden zu evaluieren, wurden die Fließfacetten auf Basis der hochauflösenden DGMs in bestimmten ausgewählten Bereichen (Abb. 8 blaue Kästen) manuell vektorisiert und mit den automatisch abgeleiteten Fließfacetten verglichen. Um sicherzustellen, dass nur gültige Fließfacetten für die Validierung verwendet werden, wurden die manuell vektorisierten Fließfacetten je nach ihrer Form als (1) *eindeutig als Fließfacette zuordenbar*, (2) *morphologisch überprägte Fließfacette* und (3) *keine Fließfacette* klassifiziert. Nur die eindeutig zuordenbaren Fließfacetten werden für den Vergleich mit den automatisch abgeleiteten herangezogen. Die automatische Ableitung ist erfolgreich, wenn das Zentroid einer abgeleiteten Fließfacette innerhalb einer vektorisierten Fließfacette liegt und ihre Flächen nicht weniger als 10 % voneinander abweichen.

ERGEBNISSE

Structure from Motion

Für die finale Erstellung der Geländemodelle der drei Standorte wurden die in Tabelle 1 angeführten Aufnahmeeinstellungen getroffen.
 Abb. 8 stellt die generierten hochauflösenden Geländemodelle der drei Standorte (Abb. 1) mit einer Rasterauflösung von 1 x 1 mm als Geländeschummerungen dar.

Tabelle 1: Kameraeinstellungen und Aufnahmedatum für die drei Standorte. Als Kamera wurde eine Nikon D7500 mit einer Brennweite von 20 mm verwendet.
 Table 1: Camera settings and recording date for the three locations. The camera used was a Nikon D7500 with a focal length of 20 mm.

	Datum	ISO	Anzahl an Bildern
Standort 1	07.02.2019	320	129
Standort 2	28.06.2019	400	44
Standort 3	01.08.2019	250	325

Automatische Ableitung der Fließfacetten

Die manuelle Vektorisierung (blau gestrichelte Kästen in Abb. 8) ergab, dass der Anteil der eindeutig als Fließfacetten identifizierbaren Formen in allen drei Gebieten bei etwa 60 % liegt (Tab. 2). Standort 1 hat den höchsten Anteil an sicher zugewiesenen Fließfacetten, während Standort 2 den geringsten Anteil aufweist.

Abbildung 9 zeigt die manuell vektorisierten Umrahmungen der Fließfacetten im Vergleich zu den automatisch abgeleiteten. Die zweite Spalte stellt das Klassifizierungsergebnis des Geomorphons-Algorithmus dar, während die dritte und vierte Spalte die in Polygone umgewandelten Umrahmungen der Fließfacetten (basierend auf dem Geomorphons-Algorithmus) zeigen. Bei Letzteren zeigen die grün gefärbten Polygone die

Tabelle 2: Manuell vektorisierte Fließfacetten und deren morphometrische Einteilung für die drei Standorte.
 Table 2: Manually digitised scallops and their morphometric classification for the three sites.

	Total	Eindeutig als Fließfacette zuordenbar	Morphologisch überprägte Fließfacette	Keine Fließfacette
Standort 1	525	348 (66,3 %)	99 (18,8 %)	78 (14,9 %)
Standort 2	358	213 (59,5 %)	87 (24,3 %)	58 (16,2 %)
Standort 3	449	271 (60,4 %)	97 (21,6 %)	81 (18,0 %)

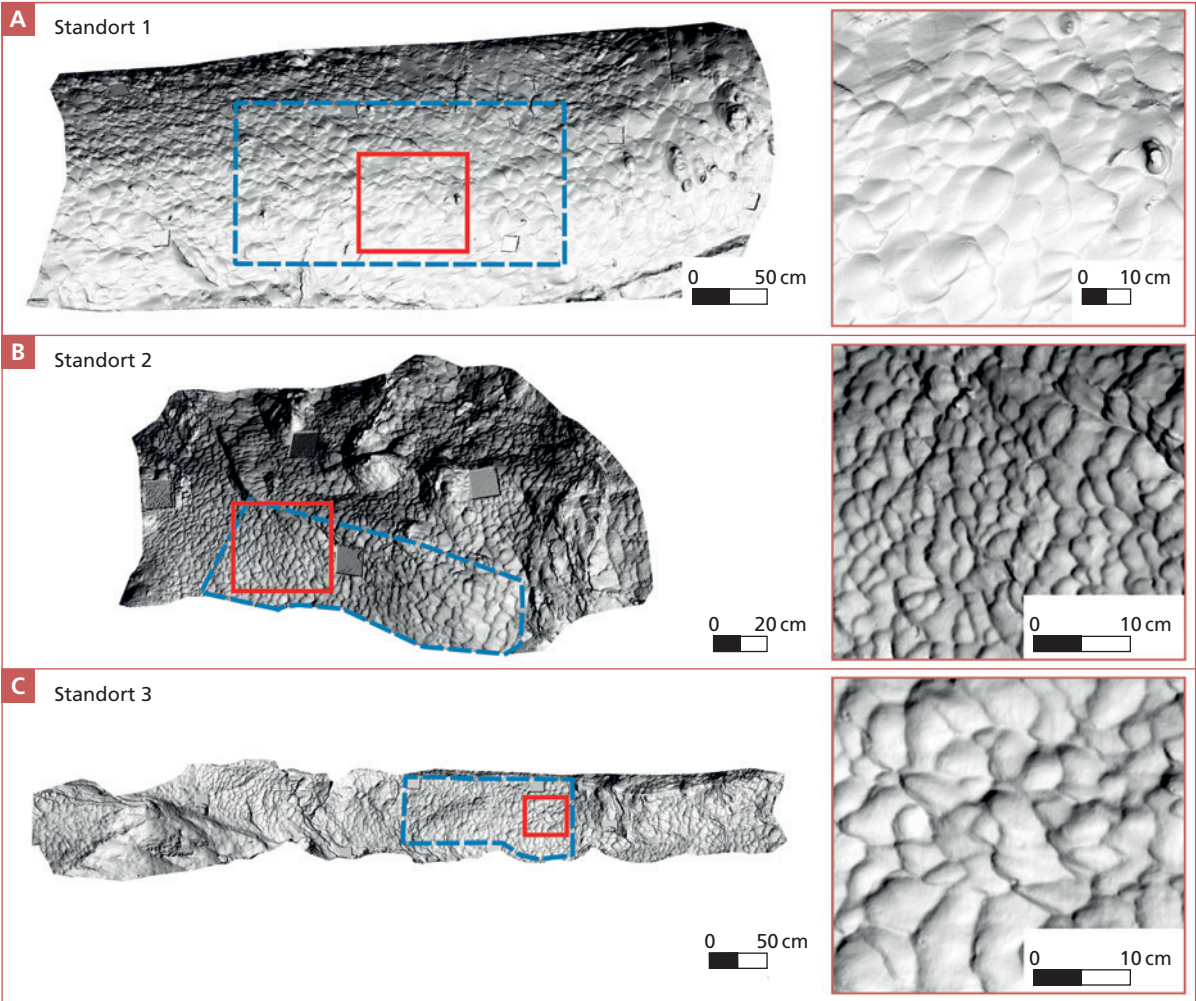


Abb. 8: Geländeschummerung der digitalen Geländemodelle für die drei Standorte. Die roten Kästen zeigen die hervorgehobenen Bereiche auf der rechten Seite. Die blau gestrichelten Kästen stellen die ausgewählten Bereiche dar, in denen eine statistische Auswertung der automatischen Ableitungen durchgeführt wurde.
 Fig. 8: Hillshade of the digital terrain model for the three sites. The red boxes show the highlighted areas on the right. The blue dashed boxes represent the selected areas where a statistical evaluation of the automatic delineations was conducted.

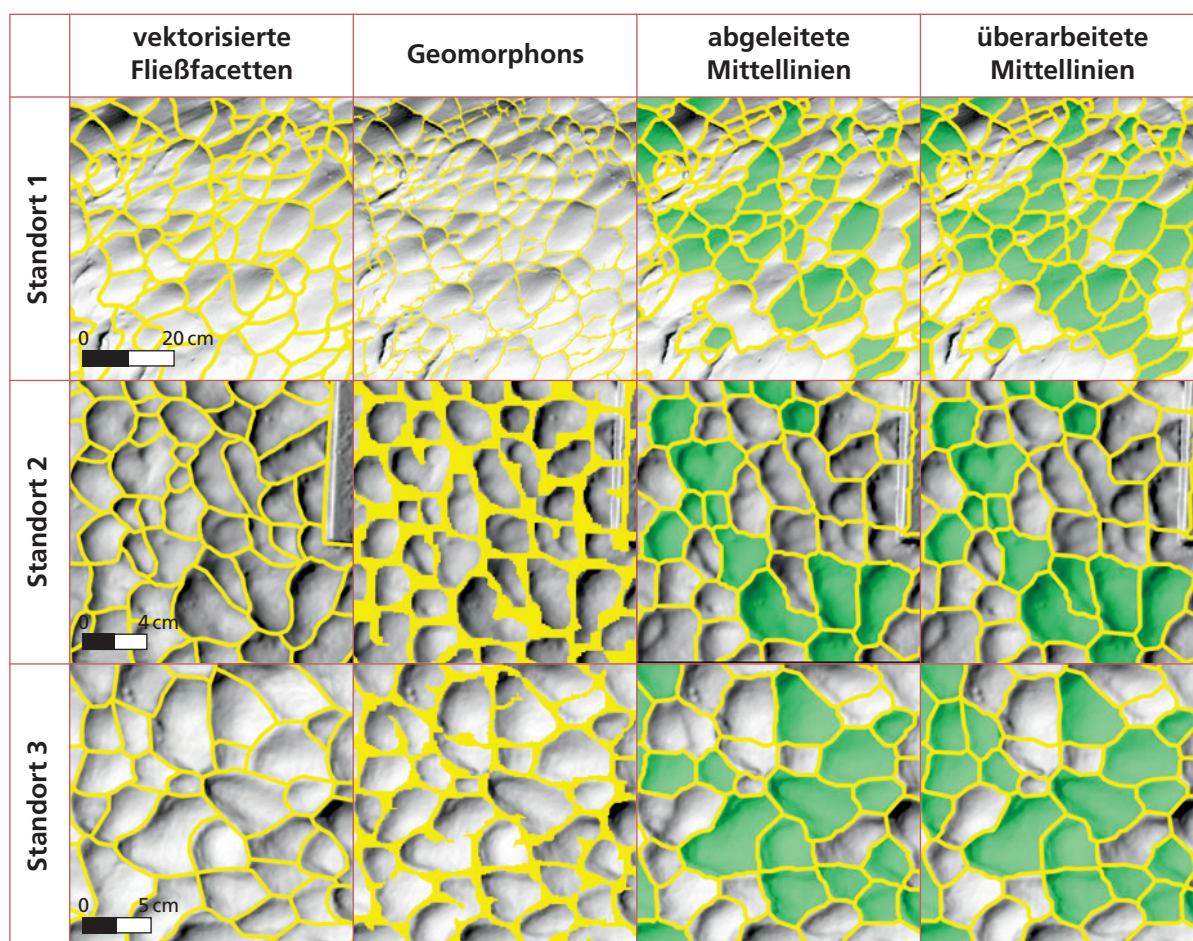


Abb. 9: Die erste Spalte stellt die manuell vektorisierten Fließfacetten dar; Geomorphons stellt die klassifizierte Pixel auf der Grundlage des Geomorphons-Ansatzes dar, die entweder zu den Klassen Gipfel, Grate, Schulter und Ausläufer gehören; abgeleitete Mittellinien stellen die umgewandelten Polygone auf der Grundlage der Mittellinien der Geomorphons-Klassifizierung dar, wobei die grünen Polygone diejenigen sind, die mit den manuell vektorisierten mit einer Flächenabweichung von 10 % und weniger übereinstimmen. Überarbeitete Mittellinien stellen die visuell überarbeiteten Mittellinien mit manueller Verlängerung dar, wenn klar war, dass der Algorithmus sie nicht vollständig schließen konnte, wobei die grünen Polygone wiederum die Übereinstimmungen darstellen.

Fig. 9: First column represents the manually digitised scallops; geomorphons represent the classified pixels based on the Geomorphons classification approach where the pixels either belonged to the peak, ridge, shoulder and spur classes. Delineated centrelines represent the converted polygons based on the centrelines of the geomorphons classification, with the green polygons being those that match the manually digitised ones with an area deviation of 10 % or less. Revised centrelines represent the visually revised centrelines with manual extension when it was clear that the algorithm could not close them completely, with the green polygons again representing the matches.

Fließfacetten, welche mit den manuell vektorisierten übereinstimmen (d.h. max. 10 % Abweichung der Flächen). Es ist zu erkennen, dass für die Standorte 1 und 3 nach der manuellen Überarbeitung der Mittellinien einige zusätzliche übereinstimmende Polygone auftreten.

Die numerische Auswertung der unterschiedlichen Ableitungsmethoden für die drei Standorte kann Tab. 3 entnommen werden. Für alle Standorte weist die Klas-

sifikation mittels Geomorphons die höchste Übereinstimmung mit den manuell vektorisierten Fließfacetten auf. Der höchste Prozentsatz an Übereinstimmungen (vor und nach der manuellen Überarbeitung) ist für Standort 3 zu finden, gefolgt von Standort 1. Standort 2 weist im Vergleich dazu sehr wenige Übereinstimmungen auf, obwohl die vektorisierte Menge an Fließfacetten nicht so stark von den anderen Teststandorten abweicht.

DISKUSSION UND SCHUSSFOLGERUNG

Studien haben gezeigt, dass die Anwendung von SfM in den Bereichen der physischen Geographie (Westoby

et al., 2012), aber auch speziell in Höhlen erfolgreich war (z.B. Brandner, 2019; Triantafyllou et al., 2019;

Tabelle 3: Vergleich der Anzahl an manuell vektorisierten Fließfacetten und der automatischen Ableitungen mittels drei unterschiedlichen Klassifikationsalgorithmen für die drei Standorte.

Table 3: Comparison of the number of manually digitised scallops and the automatic derivations using three different classification algorithms for the three sites.

	Methode der Ableitung (Klassifikation)	Vektorisiert	Abgeleitet	Übereinstimmung (10 % Flächen- abweichung)	Übereinstimmung nach manueller Nachbearbeitung (10 % Flächen- abweichung)
Standort 1	Schwellenwert		332	102 (29 %)	159 (46 %)
	Morphologisch	348	388	96 (28 %)	153 (44 %)
	Geomorphons		603	161 (46 %)	178 (51 %)
Standort 2	Schwellenwert		238	28 (12 %)	40 (19 %)
	Morphologisch	213	151	11 (5 %)	34 (16 %)
	Geomorphons		359	41 (19 %)	44 (21 %)
Standort 3	Schwellenwert		287	71 (26 %)	106 (39 %)
	Morphologisch		154	30 (11 %)	75 (28 %)
	Geomorphons	271	655	129 (48 %)	140 (52 %)

Pukanská et al., 2020). In diesen Studien wurden jedoch keine direkten Messungen in den generierten 3D-Modellen und DGMs durchgeführt. Direkte Messungen setzen eine exakte Georeferenzierung der DGMs voraus, die in Höhlen aber eine Herausforderung sein kann. Eine Referenzierung mittels GPS ist systemimmanent in Höhlen nicht möglich (da in Höhlen kein GPS-Signal empfangen werden kann). Auch die Verwendung von Polygonzügen aus der Höhlenvermessung für die Referenzierung kann – auch abhängig von der Vermessungsmethode – zu Lageungenauigkeiten führen. So ist in den beiden Schauhöhlenteilen der Lurgrotte aufgrund der vielen Eiseneinbauten entlang von Teilen des Führungsweges eine größere Abweichung des elektronischen Kompasses des DistoX zu erwarten. Aufgrund des Mangels an adäquaten Vermessungsdaten bei den untersuchten Standorten wurde ein Verfahren entwickelt, um ein lokales Koordinatenreferenzsystem zu erzeugen. Wesentliche Vorteile sind dabei die nicht invasive Fixierung der Targets an der Wand sowie eine möglichst platzsparende und leichte Ausrüstung, so dass auch beengte Bereiche in Höhlen ohne allzu belastendes Material zugänglich sind. Als größte Schwierigkeit erwies sich die Befestigung der Targets an der Wand, da der Kalkstein sehr glatt und feucht sein kann. Die Verwendung eines Klebers, der sich nach einiger Zeit problemlos wieder entfernen lässt, stellte sich schließlich als sehr effizient heraus. Das SfM-Verfahren selbst erwies sich bei DGMs mit einer Auflösung von 1 x 1 mm für alle drei Standorte als sehr gut. Herausforderungen waren die Nässe der Wand sowie die räumlichen Einschränkungen. Durch das starke Licht der Stirnlampe hatten nasse Oberflä-

chen teilweise eine sehr starke Reflexion. In diesen Bereichen gab es oft nur wenige übereinstimmende Punkte im 3D-Modell. Während diese kleinen Bereiche ohne gültige 3D-Informationen für großräumige Anwendungen kein Problem darstellen, sind sie für kleinräumige Anwendungen wie die automatische Ableitung von Fließfacetten hinderlich. Daher müssen diese Bereiche der Wand vor der Bildaufnahme so gut wie möglich abgetrocknet werden. Triantafyllou et al. (2019) bearbeiteten ihre Rohbilder vor dem Einlesen in den SfM-Algorithmus, um den Gelbstich des Scheinwerfers in den Bildern zu entfernen. Erste Untersuchungen einer Vorverarbeitung der Bilder wurden durchgeführt, und es konnte eine größere Anzahl von Übereinstimmungen zwischen den Bildern gefunden werden, was in einer dichteren finalen Punktwolke resultierte. Es sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich, da die Änderung der Pixelwerte auch zu spezifischen Fehlern in den Algorithmen führen kann. Die automatische Ableitung von Fließfacetten mit Hilfe von unterschiedlichen Ansätzen hat gezeigt, dass im Vergleich zu manuell vektorisierten Fließfacetten der Geomorphons-Ansatz (Jasiewicz & Stepinski, 2013) die höchsten Übereinstimmungen aufweist. Bei der manuellen Ableitung der Fließfacetten ist der Einfluss der subjektiven Wahrnehmung des Bearbeiters gegeben, welcher einen objektiven Vergleich erschwert. Auf Grundlage der generierten hochauflösten DGMs hat der Ansatz insbesondere für Standort 1 und 3 zu guten Ergebnissen geführt. Obwohl der Prozentsatz der erfolgreich abgeleiteten Fließfacetten für Standort 2 deutlich geringer ist, übersteigen dennoch alle drei Klassifikationsansätze die von Springer & Hall (2020)

für eine Ableitung von (Paläo-)Fließgeschwindigkeiten geforderte Anzahl an Fließfacetten. Die Fließfacetten an Standort 2 sind mit einer durchschnittlichen Größe von 8,5 cm² viel kleiner als an Standort 1 (durchschnittliche Größe von 34 cm²) und Standort 3 (durchschnittliche Größe von 11 cm²; Abb. 8), was darauf hindeutet, dass dort höhere Fließgeschwindigkeiten vorherrschten. Dieses Merkmal könnte der Grund für die deutlich geringeren Übereinstimmungen zwischen den manuell vektorisierten und den automatisch abgeleiteten Fließfacetten sein. Weitere Untersuchungen müssen durchgeführt werden, um festzustellen, ob ein

höher aufgelöstes DGM dieses Problem lösen würde oder ob andere Parameter im Zuge der Klassifikation eingestellt werden müssen.

In Zukunft könnte eine Kombination aus exakt vermessenen Höhlensystemen und gröber aufgelösten Geländemodellen (beispielsweise mittels mobilem Laser Scannings) mit den hochauflösten SfM-Geländemodellen einen beachtlichen Informationsgewinn liefern. Ausgewählte Bereiche des Höhlensystems können mit hochauflösten SfM-Modellen versehen werden, in dem diese durch die bekannten Koordinatensysteme in das gröber aufgelöste Modell integriert werden.

DANK

Dem Team der Lurgrotte Peggau und Andreas Schinnerl von der Lurgrotte Semriach sei an dieser Stelle herzlich für die aktive Unterstützung der zahlreichen

Messungen gedankt. Zusätzlich möchten wir uns bei Wolfgang Sulzer für seine Unterstützung der Arbeit bedanken.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T. & Bangash, H.A. (2014): Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and palaeoseismology. – *J. Struct. Geol.*, 69A: 163–178.
- Benischke, R., Kusch, H. & Wagner, T. (2016): Mittelsteirischer Karst. In: Spötl, C., Plan, L. & Christian, E. (Hrsg.): *Höhlen und Karst in Österreich*. – Linz (Oberösterreichisches Landesmuseum): 700–718.
- Blumberg, P.N. & Curl, R.L. (1974): Experimental and theoretical studies of dissolution roughness. – *J. Fluid Mech.*, 65(4): 735–751.
- Brandner, D. (2019): Mit Fotos zum 3D-Höhlenmodell – Leitfaden zur dreidimensionalen Höhlendokumentation mit Structure-from-Motion. – *Die Höhle*, 69: 71–83.
- Bretz, J.H. (1942): Vadose and phreatic features of limestone caverns. – *J. Geol.*, 50: 675–811.
- Buchroithner, M. & Gaisecker, T. (2020): Ice surface changes in Eisriesenwelt (Salzburg, Austria) based on LIDAR measurements between 2017 and 2020. – *Die Höhle*, 71: 62–70.
- Checkley, D. & Faulkner, T. (2014): Scallop measurement in a 10m-high vadose canyon in Pool Sink, Ease Gill Cave System, Yorkshire Dales, UK and a hypothetical post-deglacial canyon entrenchment timescale. – *Cave Karst Science*, 41(2): 76–83.
- Coleman, J.C. (1949): An indicator of water flow in caves. – *Proc. University of Bristol Speleol. Soc.*, 6(1): 57–67.
- Curl, R.L. (1966): Scallop and flutes. – *Cave Research Group Great Britain Trans.*, 7: 121–160.
- Curl, R.L. (1974): Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. – *NSS Bulletin*, 36(2): 1–5.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L. & Carbonneau, P.E. (2013): Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. – *Earth Surface Proc. Landforms*, 38: 421–430.
- Ford, D. & Williams, P.W. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. – Chichester (Wiley).
- Gölles, T., Hammer, T., Muckenhuber, S., Schlager, B., Abermann, J., Bauer, C., Jiménez, V.J.E., Schöner, W., Schratter, M., Schrei, B. & Senger, K. (2022): MOLISENS: a modular MOBILE LIDAR SENSOR system to exploit the potential of automotive lidar for geoscientific applications. – *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* (preprint).
- Goodchild, M.F. & Ford, D.C. (1971): Analysis of scallop patterns by simulation under controlled conditions. – *J. Geol.*, 79: 52–62.
- Heeb, B. (2014): The next generation of the DistoX cave surveying instrument. – <https://paperless.bheeb.ch/download/DistoX2.pdf>, abgerufen am 29.03.2022.
- Idrees, M.O. & Pradhan, B. (2016): A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. – *Intern. J. Speleol.*, 45(1): 71–88.
- Jasiewicz, J. & Stepinski, T.F. (2013): Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. – *Geomorphology*, 182: 147–156.
- Kicińska, D., Hercman, H. & Najdek, K. (2017): Evolution of the Bystrej Valley Caves (Tatra Mts, Poland) based on corrosive forms, clastic deposits and U-series speleothem dating. – *Annales Soc. Geologorum Poloniae*, 87: 101–119.
- Kuffner, D. (1998). Höhlenniveaus und Altflächen im westlichen Toten Gebirge. – *Die Höhle*, Beiheft 53: 1–229.
- Lauritzen, S.E. (1981): Statistical symmetry analysis of scallops. – *NSS Bulletin*, 43: 52–55.
- Pesaresi, M. & Benediktsson, J.A. (2001): A new approach for the morphological segmentation of high-resolution satellite imagery. – *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 39(2): 309–320.

- 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.
- Plan, L., Kaminsky, E., Racine, T. & Koltai, G. (2021): Genetische Interpretation der Eisriesenwelt (Tennengebirge). – *Die Höhle*, 72: 117–138.
- Pukanská, K., Bartoš, K., Bella, P., Gašinec, J., Blistan, P. & Kovani, L. (2020): Surveying and high-resolution topography of the Ochtiná Aragonite Cave based on TLS and digital photogrammetry. – *Applied Sciences*, 10(13): 1–19.
- Smith, M.W., Carrivick, J.L. & Quincey, D.J. (2016): Structure from motion photogrammetry in physical geography. – *Progress Phys. Geogr.*, 40(2): 247–275.
- Spötl, C. & Cheng, H. (2014): Holocene climate change, permafrost, and cryogenic carbonate formation: insights from a recently deglaciated, high-elevation cave in the Austrian Alps. – *Climate of the Past*, 10: 1349–1362.
- Spötl, C., Koltai, G. & Racine, T. (2020): Einblicke in Vereisungsgeschichte der Eisriesenwelt (Tennengebirge). – *Die Höhle*, 71: 45–61.
- Springer, G.S. & Hall, A. (2020): Uncertainties associated with the use of erosional cave scallop lengths to calculate stream discharges. – *Intern. J. Speleol.*, 49(1): 27–34.
- Springer, G.S. & Wohl, E.E. (2002): Empirical and theoretical investigations of sculpted forms in Buckeye Creek Cave, West Virginia. – *J. Geol.*, 110(4): 469–481.
- Triantafyllou, A., Watlet, A., Le Mouélic, S., Camelbeeck, T., Civet, E., Kaufmann, O., Quinif, Y. & Vandycke, S. (2019): 3-D digital outcrop model for analysis of brittle deformation and lithological mapping (Lorette cave, Belgium). – *J. Struct. Geol.*, 120: 55–66.
- Wagner, T., Fritz, H., Stüwe, K., Nestroy, O., Rodnight, H., Hellstrom, J. & Benischke, R. (2011): Correlations of cave levels, stream terraces and planation surfaces along the River Mur – Timing of landscape evolution along the eastern margin of the Alps. – *Geomorphology*, 134: 62–78.
- Wallner, J. (2020): Die Tanneben im Mittelsteirischen Karst – Eine Übersicht. – *Die Höhle*, 71: 21–30.
- 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.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 2022

Band/Volume: [73](#)

Autor(en)/Author(s): Droin Ariane, Bauer Christian

Artikel/Article: [Morphometrische Ableitung von Fließfacetten anhand von hochauflösenden Structure from Motion \(SfM\) Geländemodellen 39-53](#)