

Erstellung eines 3D-Höhlenmodells einer Tropfsteinhöhle

ISABELLA DEGEN¹, LINDA WEBER² & ANSGAR BRUNN¹

Zusammenfassung: Seit dem 17. Jhd. bis in die Gegenwart hinein beschäftigten sich Wissenschaftler mit der Zoolithenhöhle (nahe Bamberg). Unerschlossene Höhlen, vor allem Tropfsteinhöhlen, weisen eine hohe Feuchtigkeit und große Verdeckungen auf. Zudem herrscht vollkommene Finsternis. Befestigte Wege sind nicht vorhanden. Für fachspezifische Untersuchungen wird ein genaues 3D-Modell der Höhle benötigt. Dieses soll Aufschluss über die genaue Höhlengeometrie geben. Nach einer detaillierten Planungsphase im Innen- sowie im Außendienst wurde ein Teil der Zoolithenhöhle mit einem 3D-Laserscanner erfasst. Um die geforderten Genauigkeiten des 3D-Modells einzuhalten, wurden die Zielmarken für die Verknüpfung der Scans mittels eines tachymetrischen Messnetzes koordiniert. Aus diesen gewonnenen 3D-Daten entsteht ein dreidimensionales Höhlen-Modell.

1 Motivation

Das terrestrische Laserscanning findet mittlerweile eine breite Verwendung in vielen Einsatzbereichen, auch untertage. Laserscanning wird tagtäglich z. B. in der Tunnel- und Bergwerksvermessung (u. a. bei WEIß 2012) und auch der Bauarchäologie (WEINERT 2013) eingesetzt.

Eine Tropfsteinhöhle zu vermessen, bleibt ein Ausnahmefall in der Arbeitswelt eines Vermessungsingenieurs. Die meisten Höhlenvereine, welche die Hauptarbeit der deutschen Höhlenforschung ehrenamtlich tragen, können sich eine professionelle Höhlenvermessung nicht leisten. Eine Plandarstellung auf mehrere Dezimeter genau reicht meist aus. Das wirtschaftliche Interesse ist gering.

Jedoch gibt es auch Höhlen, in welchen eine genaue 3D-Vermessung der Räume für weitere Forschungszwecke unabdingbar ist. Hierzu gehört die Zoolithenhöhle in der Fränkischen Schweiz (nahe Bamberg). Die Höhle ist vor allem für ihre großen Knochenfunde und die Vielzahl an Tropfsteinen bekannt. Wissenschaftler aus verschiedenen Fachbereichen erhoffen sich hier durch eine exakte Dokumentation der Höhlengeometrie neue Forschungserkenntnisse bzw. eine Bestätigung ihrer bisherigen Theorien. Interessant ist in erster Linie die Lage der einzelnen Räume zueinander. Aus einem 3D-Modell der Höhle könnten, aufgrund von besonders dünnen Wandstrukturen alte, mittlerweile versinterte Durchgänge wiederentdeckt werden.

Die früheren Vermessungen fanden mittels des Kassler Hängezeugs statt und sind nur auf ca. einen halben Meter genau. Der daraus entstandene 2D-Höhlenplan ist für die heutige Forschung in der Zoolithenhöhle nicht mehr ausreichend. Früher wie heute sind Höhlenkartierungen mit einem erheblichen Aufwand und hohem körperlichen Einsatz verbunden. Vor diesem

¹ Isabella Degen und Ansgar Brunn, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Fakultät für Kunststofftechnik und Vermessung, Studiengang Vermessung und Geoinformatik, Röntgenring 8, 97070 Würzburg, {isabella.degen,ansgar.brunn}@fhws.de

² Linda Weber, Schreiberstr. 10a, 97616 Bad Neustadt, wue.lind@gmail.com

Hintergrund wurde ein Konzept zur detaillierten Höhlenvermessung erstellt und anhand der Zoolithenhöhle umgesetzt.

2 Messkampagne

Aufgrund der Anforderungen und Vorstellungen der Forscher wurde als Ziel der Höhlenvermessung die Erstellung eines 3D-Modells mit einer absoluten Genauigkeit von unter einem Dezimeter definiert. Um eine wirtschaftliche, effiziente und den Genauigkeitsanforderungen genügende Aufnahme der Höhle zu gewährleisten, wurde als Hauptvermessungsgerät ein terrestrischer Laserscanner gewählt. Die Umsetzung gliederte sich in eine umfangreiche Messplanung, die anschließende Durchführung und die Weiterverarbeitung der Messdaten zu einem 3D-Modell im Ausblick.

2.1 Zoolithenhöhle - Fakten

Die Zoolithenhöhle, registriert im Fränkischen Höhlenkataster unter der Nummer D 109, ist eine der ältesten bekannten Höhlen in der Fränkischen Schweiz. Die Ganglänge beträgt ca. 950 m, welche sich über mehrere Stockwerke erstreckt. Aufgrund ihrer außergewöhnlichen Knochenfunde zog diese Höhle schon im 18. Jahrhundert Wissenschaftler aus aller Welt, u. a. Humboldt, Goldfuß, Rosenmüller und Cuvier, an. So wurde in der Zoolithenhöhle z. B. der Höhlenbär *Ursus spelaeus* durch Rosenmüller erstmals als eigene, ausgestorbene Art bestimmt. Begangen werden darf die Höhle nur mit spezieller Genehmigung der Forschungsgruppe Höhle und Karst Franken e.V. (FHKF 2013), da diese ausschließlich für die Wissenschaft reserviert ist. Seit 2001 existiert eine Arbeitsgemeinschaft Zoolithenhöhle, in welcher Wissenschaftler der Universitäten Erlangen-Nürnberg, Hamburg, Bochum, Karlsruhe sowie das Landesamt für Denkmalpflege zusammenarbeiten (FHKF 2013).

2.2 Messplanung

Tropfsteinhöhlen zeichnen sich im Gegensatz zu anderen Höhlen durch die besonders schwierigen Sichtverbindungen und den hohen Feuchtigkeitsgrad aus. Aus diesem Grund musste die gesamte Messdurchführung sehr detailliert geplant werden. Zu Beginn wurde der Ist-Bestand gesichtet und anhand vorhandener alter Höhlenkartierungen sich ein Überblick über die Situation verschafft. Auf Grund dessen konnten eine Vorgehensstrategie entwickelt und geeignete Vermessungsinstrumente gewählt werden.

2.2.1 Besichtigung der Örtlichkeit

Die Zoolithenhöhle wurde in Begleitung von Höhlenforschern begangen. Vor Ort wurde der vordere Teil der Höhle als für die Forscher interessant definiert. Sehr enge Gänge und kleine Nebenräume mussten weggelassen werden, da die minimale Messentfernung eines Laserscanners ca. 60 cm beträgt.

Die typischen Randbedingungen in einer unerschlossenen Höhle prägten alle Arbeiten. Finsternis (nur Helmlampen), sehr begrenzte Platzverhältnisse, hohe Luftfeuchtigkeit (90%), eine Umgebungstemperatur von ca. 8°C und mehrere ausgesetzte Kletterstellen beeinflussten die Vorgehensweise erheblich. Zudem gab es keine befestigten Wege und eine aufrechte

Fortbewegung war nur selten möglich. Der Pfad durch die Höhle führte durch enge Felsspalten, über Abseilpisten und über drei bis zu acht Meter hohe Leitern. Der feine Lehm an Boden, Wänden und Decke, welcher sich bei der Befahrung der Höhle sofort an Kleidung, Gerätekoffern und Händen anhaftet, durfte nicht an die Vermessungsinstrumente gelangen. Diese Faktoren erschwerten die Standpunktwahl, den Materialtransport und die Messung erheblich.

2.2.2 Planung des Laserscannings

Aufgrund der Vielzahl an Tropfsteinen (s. Abb. 1, links) und verwinkelten Gängen wurde die optimale Positionierung der Laserscannerstandpunkte über eine Sichtbarkeitsanalyse im Innendienst mit dem Programm ArcGIS von ESRI ermittelt. Durch Simulationsrechnungen sollte sichergestellt werden, dass keine unerwarteten Verdeckungen bzw. keine sichttoten Bereiche im späteren 3D-Modell existieren (s. KERN ET AL. 2012). Realisiert werden konnte die Planung der Laserscannerstandpunkte mit der Anwendung ArcScene (ESRI). Hierfür war jedoch eine 3D-Planungsgrundlage notwendig, welche aus dem 2D-Höhlenplan von 1985 und ergänzten 3D-Informationen abgeleitet wurde. Von jedem Tropfstein wurden dazu in der Höhle der Durchmesser und die ungefähre Höhe erfasst und im vorhandenen 2D-Höhlenplan vermerkt. An Bruchkanten und Schächten wurden geschätzte Höhenangaben notiert.

Das Ergebnis der Simulation für die Säulenhalle zeigt Abbildung 1 (mittig und rechts). Alle Bereiche der Säulenhalle sind durch die ermittelten Standpunkte vom Laserscanner abgedeckt. Im Anschluss daran wurden alle Standpunkte in AutoCAD mit Spannmaßen versehen. Dies war nötig, um die Standpunkte vor Ort in der Höhle leichter absetzen zu können. Danach konnten die Punkte in die Örtlichkeit übertragen, mit der „Taschenlampenmethode“ kontrolliert. Durch die Lichtkegel der Stirnlampen von den verschiedenen Standpunkten aus konnten einzelne sichttote Bereiche noch vor Ort ausfindig gemacht und die Lage, wenn nötig, vor der Vermarkung korrigiert werden.

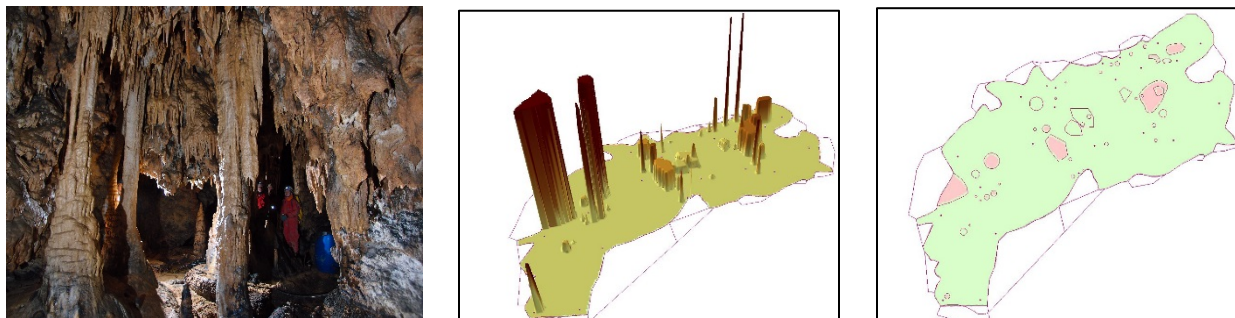


Abb. 1: Vielzahl an Tropfsteinen (links); Sichtbarkeitsanalyse in ArcScene (ESRI) (mittig und rechts).

Für die Erstellung eines Gesamtmodells der Höhle wurden koordinierte Zielmarken verwendet. Eine Verknüpfung der Scans nur mittels identischer Zielmarken war hier wegen der großen Verdeckungen durch Tropfsteine, tiefen Schachtstufen, engen Gangverbindungen und unregelmäßigen Deckenstrukturen nicht zu realisieren. In der Höhle galt es zudem, die außergewöhnlichen Sintervorkommen und verbackenen Knochen in den Wänden zu schützen. Auf Grund dessen konnten nur wenige Zielmarken an streng ausgewählten Orten befestigt

werden. So mussten pro Standpunkt mindestens drei Zieltafeln sicher zu sehen sein. Die Zielmarken bestanden aus auf Aluminiumplatten geklebten gedruckten Schachbrettmustern, welche in der Mitte ein Loch für die Montage hatten. Befestigt werden konnten die Zielmarken mit Dübeln in der Wand und mit Schnüren an Tropfsteinen.

Die entscheidenden Kriterien für die Auswahl des Scanners waren die Größe und das Gewicht des Instruments. Deswegen fiel die Wahl auf den kompakten Laserscanner FARO Focus 3D (s. Tabelle 1). Je kleiner der Scanner ist, desto leichter erfolgt der Transport in der Höhle durch Engstellen und der Aufbau bei begrenzten Platzverhältnissen. Der Scannerkoffer samt Scanner wurde in einem Schleifsack auf dem Rücken transportiert. Somit war das Passieren niedriger Gänge, Räume und das Besteigen hoher Leitern kein Problem. Da die Sichtweiten in der Höhle bei maximal 25 m liegen, war die Reichweite und Genauigkeit des Scanners FARO Focus 3D ausreichend.

	Größe	Gewicht	Reichweite	Scanmethode	Durchmesser Laserstrahl
FARO Focus 3D	24 x 20 x 10 cm ³	5,0 kg	Ca. 150 m	Phasenvergleichs-Verfahren	3,8 mm bei Austritt

Tab. 1: Technische Daten FARO Focus 3D (FARO 2010).

Aufgrund einer fehlenden stabilen Ausleuchtung der Scanbereiche wurde auf eine Einfärbung mit Farbinformation verzichtet. Anstelle dessen sollten die Punktwolken mit den Intensitätsdaten eingefärbt werden, die den visuellen Eindruck bereits deutlich verbessern.

Eine minimale Scan-Auflösung von 1 cm am Objekt wurde festgelegt. Um alle aufzunehmenden Bereiche der Höhle scannen zu können wurde verschiedene Hilfsmittel entwickelt. Für die Schächte wurde zum Beispiel ein Leiterarm gebaut, welcher es ermöglichte den Scanner direkt in den Schächten an Leitern zu befestigen. Nur so konnten auch hier gute Schnittgeometrien erzielt werden. Eine weitere Schwierigkeit war die Verpackung des Scanners in dem üblichen Faro-Koffer, da es nicht möglich war, auf einer 6 m hohen Leiter diesen zu öffnen. Somit wurde eine Tasche konzipiert, welche den Scanner vor Feuchtigkeit schützt, einen sicheren Transport gewährleistet und gleichzeitig den Aufbau des Scanners an ausgesetzten (Kletter-)Standpunkten ermöglicht (s. Abb. 2).



Abb. 2: Funktionsweise der Scannertasche und Aufbau auf dem Leiterarm.

2.2.3 Koordinierung der Zielmarken

Die Zielmarken wurden mit Hilfe eines Messnetzes innerhalb und außerhalb der Höhle koordiniert (s. Abb. 3). Zur späteren Darstellung der Höhle im Landeskoordinatensystem wurden mittels GNSS (Global Navigation Satellite System) zwei Punkte auf der nächstgelegenen Wiese bestimmt. Über einen Außenpolygonzug (Länge ca. 1,2 km) konnten zwei Nägel vor der Höhle mit übergeordneten Koordinaten versehen werden. Von dieser Basis ausgehend wurden mittels zweier Polygonzüge die Landeskoordinaten in die Höhle gebracht.

Um die Stabilität der Messungen zu stärken, und zu Kontrollzwecken wurden Verknüpfungen zwischen den beiden Polygonzügen gemessen. So entstand in der Eingangshalle ein komplexes Polygonnetz anstatt eines einfachen Polygonzugs. Aufgrund der Örtlichkeit bestand anschließend, innerhalb der Höhle nur die Möglichkeit eines offenen Polygonzugs. Die Zieltafeln wurden wenn möglich, mehrfach von verschiedenen Standpunkten beobachtet. In den hinteren drei Räumen Zaunikhalle, Löwengrube und Säulenhalle war es möglich, einen Ringpolygonzug anzulegen.

Für diese Messung bot sich ein Präzisionstachymeter aufgrund der ungünstigen Fehlerfortpflanzung für das langgestreckte Netz in der Höhle an. Nur so konnten in den hinteren Bereichen der Höhle die Genauigkeitsvorgaben erreicht werden. Eine weitere wichtige Funktion war die Motorisierung des Tachymeters, mit welcher die Möglichkeit bestand, das Gerät mit einer Fernbedienung zu steuern. So konnte eine Person konzentriert (z. B. auf einer 6 m hohen Leiter) am Gerät arbeiten und die Zieltafeln anzielen, während eine zweite Person mit der Stirnlampe die Zielmarken anleuchtete und die Bedienung an der externen TCU übernahm. Zudem kann der Instrumentenkoffer des Trimble S6 dank ausklappbarer Gurte wie ein Rucksack auf dem Rücken getragen werden.

Bei den Tachymeterstandpunkten musste einerseits darauf geachtet werden, dass der sichere Stand gewährleistet ist, andererseits sollten möglichst viele Zielmarken von einem Punkt aus erfasst werden können. An manchen Standpunkten war es nicht möglich, ein Stativ aufzubauen. Dort wurden Sonderkonstruktionen, wie der Leiterarm, verwendet. Die Leitern waren jedoch nicht absolut starr mit der Wand verbunden, sondern ließen sich in geringem Umfang bewegen. Insbesondere im Zuge der Polygonierung musste beim Wechsel zwischen Reflektor und Tachymeter darauf geachtet werden, dass sich die Lage des Dreifußes auf dem Leiterarm nicht veränderte. Um letztendlich alle Zielmarken ausreichend koordinieren zu können, mussten diese Schwierigkeiten jedoch in Kauf genommen werden.

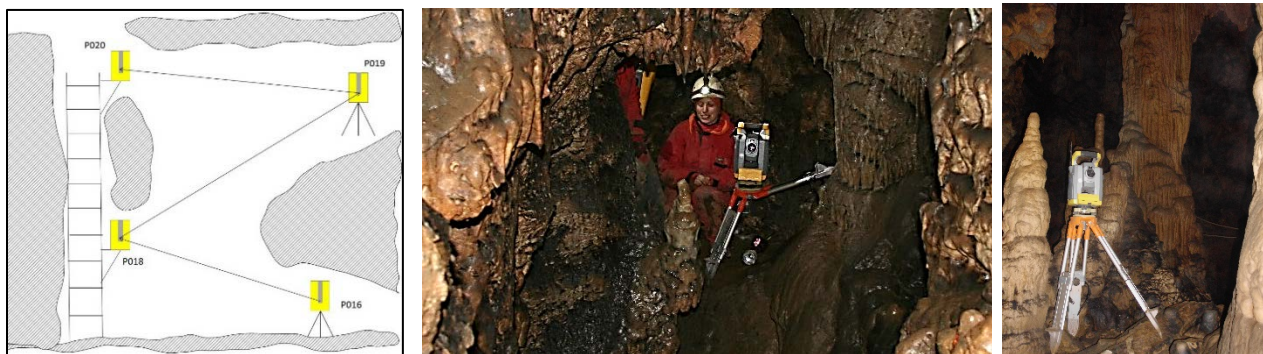


Abb. 3: Ausschnitt aus dem Messkonzept und Durchführung des Polygonzugs.

2.3 Messdurchführung

Zur besseren Übersicht wurde die Höhle schon während der Planung in einzelne Räume unterteilt. Zudem erhielt jeder Laserscannerstandpunkt und jede Zielmarke eine eindeutige Punktnummer. Bei der Anbringung der Zielmarken musste darauf geachtet werden, dass von jedem Standpunkt aus mindestens drei Marken sichtbar waren. In einem Messprotokoll wurde vermerkt, von welchem Standpunkt welche Zielmarken zu sehen sind. Innerhalb von zwei Tagen konnten alle Zieltafeln in der Höhle mittels Tachymeter koordiniert werden. Hierfür waren zwei zusätzliche Personen notwendig, da ansonsten der Materialtransport und das Aufstellen der Stative/Konstruktionen an geeigneten Polygonstandpunkten nicht umsetzbar gewesen wären.

Nach der Netzausgleichung im Innendienst erfolgte die Messung der 99 Laserscannerstandpunkte im Zeitraum von 10 aufeinanderfolgenden Tagen in der Höhle. Die Reihenfolge der zu scannenden Räume wurde so angelegt, dass das in der Höhle vorhandene Arbeitsmaterial der Höhlenforscher jeweils in angrenzende Räume geschafft werden konnte. Je nach Platzverhältnissen und Bodenstrukturen wurden unterschiedliche Stative benutzt. Mit entscheidend war, ob der Scanner hoch oder tief aufgebaut werden musste, um etwa bestimmte Zielmarken im Sichtfeld zu haben oder Verdeckungen zu vermeiden.

Das zeitaufwändigste beim Scannen war auch hier wieder der beschwerliche Transport des Scanners und Materials durch die Höhle zum jeweiligen Standpunkt und der anschließende Aufbau (Abb. 4). War der Standpunkt mit dem Dreifuß sicher aufgebaut, musste darauf geachtet werden, dass sich direkt darüber keine nassen Tropfstellen befanden. Anschließend konnte der Scanner auf den Standpunkt gesetzt werden. Nach dem Auslösen war ein sichttoter Bereich aufzusuchen. Wichtig dabei war, dass dieser Ort schnell und einfach erreichbar war, da zwischen dem Auslösen der Messung und dem Starten des Scans nur wenige Sekunden lagen. War dies nicht möglich, wurde der Scanner über eine WLAN-Verbindung via Laptop gestartet. Die Dauer eines Scanvorgangs lag je nach Deckenhöhe bei 5-10 min (Auflösung am Objekt 1 cm).



Abb. 4: Messausrüstung (links); Laserscanning über der Löwengrube (mittig) und in der Zaunikhalle (rechts).

2.4 Auswertung

Aus den erzeugten Messdateien des Polygonzugs wurden die dreidimensionalen Näherungskordinaten aller Punkte berechnet. Anschließend erfolgte der Aufbau eines Raumnetzes mit allen Beobachtungen, in dem eine Netzausgleichung gerechnet werden konnte. Für die Netzausgleichung wurden die beiden Ausgangspunkte des Höhlennetzes festgehalten.

Die Messgenauigkeit lag in der Lage bei 8,6 cm und in der Höhe bei 2,1 cm. Die Lagegenauigkeit ist aufgrund der schwankenden Leitern, des lehmigen Bodens und der glatten, rutschigen Steine schlechter als die Höhengenaugigkeit. Das von den Höhlenforschern gesetzte Ziel unterhalb von 10 cm Messgenauigkeit zu bleiben, konnte mit dem eingesetzten Instrumentarium erreicht werden.

Die koordinierten Zielmarken wurden für die Registrierung aller Scans genutzt, um eine hochaufgelöste Punktwolke pro Höhlenraum und eine Punktwolke für die gesamte Höhle in einer reduzierten Auflösung zu erzeugen. In den Folgearbeiten steht zunächst eine optimierte Visualisierung und dann die Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten im Vordergrund (s. Abb. 5).

3 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde über eine neue Methodik zur Erstellung von Höhenmodellen, insbesondere von Tropfsteinhöhlen berichtet. Ein wesentliches Element der Umsetzung war eine eingehende Planung im Vorfeld, die eine vollständige Erfassung der Höhle im Sinne der Vorgaben der Höhlenforscher sicherstellte.

Ziel der weiteren Arbeiten ist es ein komplettes 3D-Modell mit zusätzlichen Schnitten durch verschiedene Etagen der Höhle zu liefern. Teile der Höhle können bereits in einem virtuellen Rundgang im Labor für Virtuelle Realität der FHWS begangen werden.

Die Begeisterung über die Visualisierungen der Höhle ist bei den Forschern groß. Für die räumlichen Analysen wird die Zusammenarbeit mit den Höhlenforschern weiter fortgesetzt. Weitere Tropfsteinhöhlen werden anvisiert.

Danksagung: Wir danken der Firma Faro Europe GmbH und Co. KG für die hardwaretechnische Unterstützung bei den Messungen in der Tropfsteinhöhle

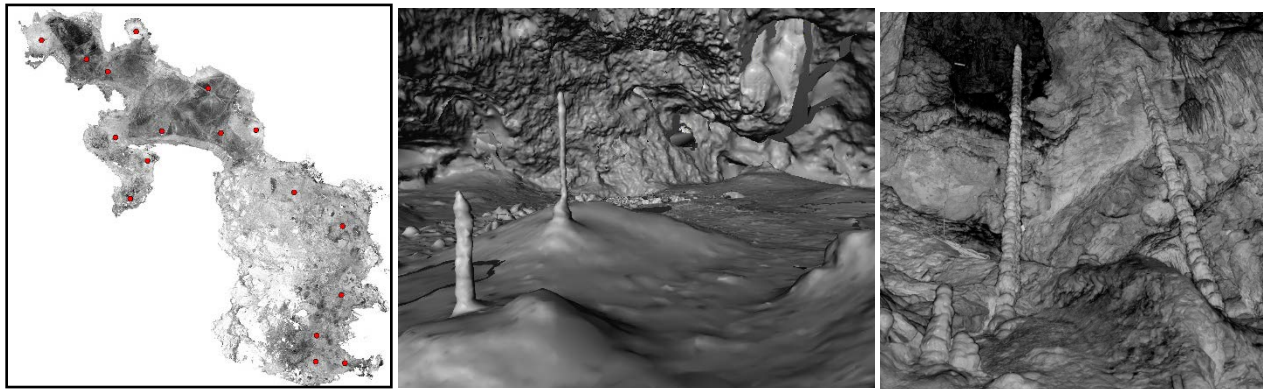


Abb. 5: Draufsicht der Punktwolke „Eingangshalle“ mit markierten Scannerstandpunkten (links); Blick in die Eingangshalle (mittig) und in die Löwengrube (rechts) (DEGEN ET AL. 2014).

4 Literaturverzeichnis

DEGEN, I.; WEBER, L.; FREIBOTT, M. & BRUNN, A.: 3D-Vermessung der Zoolithenhöhle in der Fränkischen Schweiz , Geodäsie und Geoinformatik-VDV-Magazin, 65. Jahrgang, Ausgabe 1/2014, 2014.

FARO; Datenblatt FARO Focus 3D: EU-DE-04REF201-421.pdf, Revised: 01 October 2010, © 2010 FARO, 2010.

FHKF: <http://www.fhkf.de/hoehlen/zoolithenhoehle/>; zuletzt abgerufen am 12.09.2013, 2013.

KERN, F.; BRUHN, K. C. & MEHLIG, ST.: Messtechnik und Inschriftenforschung – Anwendungsbezogene Arbeiten im Projekt Deutsche Inschriften Online 3D, Oldenburger 3D-Tage 2012, S. 22-33, 2012.

WEINERT, TH.: 3D-Scans in feuchten Gewölben; in: Inspect, 4/2013, S.44-46, 2013

WEIß, P.: Die dreidimensionale Rekonstruktion im Bergbau für die 3D-Simulation, Diplomarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften - Würzburg-Schweinfurt, Studiengang Vermessung und Geoinformatik, 2012.