Anwendung geophysikalischer Methoden zur Detektion zweier Höhlen nahe Lunz am See (NÖ)

ZUSAMMENFASSUNG

Die bildgebenden geophysikalischen Methoden Geoelektrik (Electrical Resistivity Tomography, ERT) und Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR) wurden verwendet, um oberflächennahe Hohlräume zu detektieren. Das Untersuchungsgebiet liegt südwestlich von Lunz am See in den Nördlichen Kalkvoralpen und umfasst zwei Höhlen, den Forststraßeneinbruch und die Stiegengraben-Wasserhöhle. Der Forststraßeneinbruch (1823/64) wurde im Dezember 2016 aufgrund eines in einer Forststraße eingebrochenen Lochs gemeldet. Ziel dieser geophysikalischen Untersuchung war es, die Lage weiterer oberflächennaher Hohlräume zu bestimmen, um einsturzgefährdete Stellen zu erkennen. Die auf eine Länge von 1 km vermessene Stiegengraben-Wasserhöhle (1823/25) wurde in den 1970er Jahren beim Bau einer Forststraße mit großen Blöcken und später mit großen Mengen an feinkörnigem Material zugeschüttet. Hier besteht die Befürchtung, dass der Wasserdruck durch das Verstopfen der episodisch aktiven Quellhöhle das unverfestigte Material mobilisiert, was zu einer Mure führen und die Häuser im Tal darunter gefährden könnte. Ziel der geophysikalischen Untersuchung war hier, die exakte Lage des ehemaligen Höhleneingangs zu identifizieren, um eine Öffnung mittels Bagger zu ermöglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich sowohl ERT als auch GPR Messungen gut eignen, um oberflächennahe Hohlräume bis in eine Tiefe von etwa 10 m in Kalkstein zu detektieren. Bei Hohlräumen in etwas größeren Tiefen (10 bis 30 m), wie dies beim Forststraßeneinbruch der Fall ist, zeigen vor allem die ERT-Bilder deutliche Kontraste in den physikalischen Eigenschaften des Untergrunds, welche mit der Lage der bekannten Höhle sehr gut übereinstimmen. Weitere oberflächennahe Hohlräume konnten im Bereich des Forststraßeneinbruchs nicht gefunden werden. Mit Hilfe der geophysikalischen Messungen konnte der verschüttete Eingang oberhalb der Stiegengraben-Wasserhöhle lokalisiert werden. Unsere Studie zeigt, dass eine Kombination von ERT und GPR im Vergleich zu den Einzelauswertungen eine verbesserte Interpretation der geophysikalischen Modelle zur Abgrenzung von Karsthohlräumen erlaubt.

ABSTRACT

Detection of two caves near Lunz am See (Lower Austria) using geophysical methods

Geophysical imaging using electrical resistivity tomography (ERT) and ground penetrating radar (GPR) was conducted in order to detect near-surface cavities. The study area is located southwest of Lunz am See in the Northern Calcareous pre-Alps and comprises two caves, Forststraßeneinbruch and Stiegengraben-Wasserhöhle. The former was reported because a hole had opened in a forest road in December 2016. The aim of the geophysical investigation was to delineate the possible location of further near-surface caves that could potentially collapse. Stiegengraben-Wasserhöhle is a 1 km-long cave which was filled with gravel during the construction of a forest road in the 1970s and more recently with lots of fine-grained sediment. It is possible that the water pressure inside the cave could rise due to the plugging of the episodic spring mobilising the unconsolidated material, which could result in a debris flow, endangering houses in the valley below. The aim of the geophysical investigation was to exactly locate the cave entrance in order to reopen it using an excavator.

Barbara Funk

barbara.funk@tuwien.ac.at

Adrian Flores-Orozco flores@tuwien.ac.at

Theresa Maierhofer

theresa.maierhofer@tuwien.ac.at

Forschungsgruppe Geophysik, Department für Geodäsie und Geoinformation, TU-Wien, Karlsplatz 13, 1040 Wien

Lukas Plan

Karst- und Höhlen-Arbeitsgruppe, Naturhistorisches Museum, Museumsplatz 1/10, 1070 Wien, Iukas.plan@nhm-wien.ac.at

Eingelangt: 27.3.2018 Angenommen: 15.6.2018 The results show that both ERT and GPR measurements are well suited for detecting near-surface cavities (depth < 10 m) in limestone. For cavities at a slightly greater depth (10 to 30 m), such as Forststraßeneinbruch, the ERT images show clear contrasts in the physical properties of the subsurface, which agree very well with the location of the known cave. Further near-surface cavities could not be found in

the area of Forststraßeneinbruch. The buried entrance above Stiegengraben-Wasserhöhle could be successfully located using the geophysical measurements.

Our study demonstrates that the combined application of ERT and GPR permits an improved interpretation of geophysical models for the delineation of caves in karstic environments.

EINLEITUNG UND UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Untersuchungsgebiet, der Schöfftaler Wald 5 km südwestlich von Lunz am See, zeichnet sich durch eine große Höhlendichte aus, wobei die 1 km lange Stiegengraben-Wasserhöhle die ausgedehnteste ist (Abb. 1). Die meisten Höhlen und Karsterscheinungen wie Dolinen und Schwinden sind im Opponitzer Kalk entwickelt. Weiters dominiert Hauptdolomit, der aber deutlich weniger Höhlen aufweist (Abrahamczik, 1935; Bauer et al., 1988). Die Abgrenzung der Geometrie oberflächennaher Hohlräume ist sowohl für den Straßenbau als auch für sonstige Baumaßnahmen von Bedeutung. Die beiden hier vorgestellten Fallbeispiele wurden ausgesucht, um das Potenzial geophysikalischer Methoden zur Abgrenzung von Gefahren, welche von Höhlensystemen im Karst ausgehen können, zu zeigen.

Im Dezember 2016 brach nahe einer Forststraßenkreuzung zwischen Stiegengraben und Großschöpftal ein rund 1 m messendes Loch ein.

Die darunterliegende Höhle (Forststraßeneinbruch, 1823/64) wurde bis Juli 2018 auf 147 m Länge und 24 m Tiefe vermessen (unpublizierter Bericht im Kataster



Abb. 1: Lage des Forststraßeneinbruchs und der Stiegengraben-Wasserhöhle zwischen Lunz am See und Göstling an der Ybbs. Das Foto zeigt den behelfsmäßig abgedeckten Eingang des Forststraßeneinbruchs sowie die geoelektrische Ausrüstung. Fig. 1: Location of Forststraßeneinbruch and Stiegengraben-Wasserhöhle between Lunz am See and Göstling an der Ybbs. The photo shows the provisionally covered entrance of Forststraßeneinbruch as well as the ERT instrument.

des Landesvereins für Höhlenkunde in Wien und NÖ). Der eingebrochene Einstiegsschacht bildete sich im unverfestigten Schutt und Bodenmaterial. In knapp



Abb. 2: Unbefahrbar enger Canyon oberhalb vom tiefstenPunkt des Forststraßeneinbruchs.Fig. 2: Impassable canyon near the deepest point ofForststraßeneinbruch.Foto: Lukas Plan

2 m Tiefe trifft man auf einen engräumigen Canyon im anstehenden Opponitzer Kalk. Die Höhle ist meist engräumig und besteht aus phreatisch entstandenen Röhren sowie vadosen Canyons und Schächten. Weitverbreitete klebrige Feinsedimentlagen gestalten die Befahrung und Vermessung anspruchsvoll. Die Höhle verläuft weitgehend parallel zum Stiegengraben und damit an der Grenze zwischen Opponitzer Kalk und Hauptdolomit, wobei die Höhle selbst im Kalk ausgebildet ist. Ein unbefahrbar enger, aber stark bewetterter Canyon im Endbereich steht mit großer Wahrscheinlichkeit mit der Stiegengraben-Wasserhöhle (1823/25) in Verbindung (Abb. 2).

Die episodisch wasseraktive Stiegengraben-Wasserhöhle wurde 1935 von Walter Abrahamczik entdeckt und von 1967 bis 1972 auf 1002 m Länge bei +30 m Höhenunterschied dokumentiert (Süssenbeck, 1974; Hartmann & Hartmann, 1985). Anschließend wurde beim Forststraßenbau ihr Eingang mit großen Blöcken verschüttet. Trotz Außenvermessung im Jahr 1972 ist die exakte Position des Eingangs nicht mehr rekonstruierbar. Im Jahr 2016 wurden zusätzlich große Mengen feinkörnigen Aushubmaterials aus einem Retentionsbecken oberhalb des Stiegengrabens über den zugeschütteten Eingangsbereich deponiert. Da bei Starkregen nun die Gefahr besteht, dass das Wasser in der Höhle rückgestaut und das lose Material weggespült wird und die unterhalb des Stiegengrabens liegenden Häuser gefährdet, sollte der Eingang wieder aufgegraben und durch ein Betonrohr der Wasserabfluss ermöglicht werden.



Abb. 3: Verlauf von Stiegengraben-Wasserhöhle und Forststraßeneinbruch (Polygonzugspunkte in Rot). In Gelb sind die geophysikalischen Profile (P1-P7) oberhalb des Forststraßeneinbruchs und in Grün die Profile oberhalb der Stiegengraben-Wasserhöhle (P8 und P9) gezeigt. Das Insert zeigt eine Vergrößerung des Forststraßeneinbruchs mit den sieben gemessenen Profilen (Geoelektrik-Profile in schwarz, Georadar-Profile blau). Fig. 3: Position of Stiegengraben-Wasserhöhle and Forststraßeneinbruch (red dots indicate survey points). The geophysical profiles above Forststraßeneinbruch (P1-P7) and above Stiegengraben-Wasserhöhle (P8 and P9) are shown in yellow and green, respectively. The insert provides a zoom of Forststraßeneinbruch showing the seven measured profiles (ERT profiles black, GPR profiles blue).

Die Geometrie beider Höhlen ist durch existierende Pläne und Vermessungsdaten (Polygonzug durch die Höhle) bekannt. Während beim gut verorteten und mit DistoX und PDA vermessenen Forststrasseneinbruch die Lagegenauigkeit unter 1 m liegt, besteht bei der Stiegengraben-Wasserhöhle das Problem, dass der Eingang nur auf rund 8 m genau bekannt ist. Hier ist weiters aufgrund der über 40 Jahre alten Vermessung mit Suunto und Maßband mit einer Ungenauigkeit des Polygonzugs im Endabschnitt von weiteren rund 10 m zu rechnen. Beide Höhlen verlaufen an der Grenze des Opponitzer Kalks zum Hauptdolomit (Abb. 3).

Geophysikalische Methoden bieten die Möglichkeit, zerstörungsfrei Informationen über den Untergrund zu gewinnen. Gute Erfahrungen bezüglich des Aufspürens von unterirdischen Hohlräumen gibt es speziell mit Geoelektrik und Georadar, welche besonders Änderungen der elektrischen Eigenschaften (Dielektrizität & und elektrische Leitfähigkeit $\sigma = 1/\rho$) im Untergrund anzeigen. Da Luft ein elektrischer Isolator ist (hoher spezifischer elektrischer Widerstand $\rho > 10 \text{ k}\Omega\text{m}$), können lufterfüllte Hohlräume durch ihren Widerstandskontrast zum umliegenden Gestein erkannt werden. Hohlräume, die mit Wasser oder Sediment gefüllt sind (beides zeichnet sich durch gute elektrische Leitfähigkeit aus), zeigen wiederum einen sehr niedrigen Wert des spezifischen elektrischen Widerstands (< 0,1 k Ω m). Der erreichbare Kontrast ergibt sich dabei im Vergleich zum spezifischen elektrischen Widerstand des umgebenden Gesteins, welcher im Fall von Kalkstein einen großen Bereich von etwa 0,5 bis $5 k\Omega m$ umfasst.

Beide Methoden wurden bereits erfolgreich zur Untersuchung von Hohlräumen im Karst verwendet. So berichten Chamberlain et al. (2000) über eine erfolgreiche Detektion unbekannter Hohlräume in einer Tiefe zwischen 13 und 19 m nahe der Kitley Caves in Devon (England) mit Hilfe des Georadars und einer 100-MHz-Antenne. Von Behm et al. (2005) wurden die Güntherhöhle sowie weitere unbekannte Hohlräume mit Hilfe des Georadars und einer 40-MHz-Radar Antenne aufgefunden und visualisiert. Die Güntherhöhle weist dabei unterhalb des Profils eine Ausdehnung von etwa 2 x 10 m (B x H) auf und liegt in einer Tiefe zwischen ca. 15 und 25 m. Frid et al. (2015) nutzten Geoelektrikmessungen, um in Amazia (60 km südöstlich von Tel Aviv, Israel) großflächig eine große Anzahl künstlich gegrabener Hohlräume zu lokalisieren, da es hier immer wieder Probleme beim Siedlungsbau gab. Dreißig solcher Hohlräume wurden verortet und durch Bohrungen bestätigt. Redhaounia et al. (2016) führten ebenfalls großflächige Geoelektrikmessungen durch, um eine Karstfläche im Nordwesten von Tunesien zu charakterisieren. Auch hier konnten in den Ergebnissen mehrere Hohlräume erkannt werden. Kaufmann et al. (2015, 2017) nutzten gravimetrische, geoelektrische und Georadarmessungen oberhalb von zwei Höhlen im Südharz in Deutschland. Während die Gravimetrie und die Geoelektrik bei beiden Höhlen (Jettenhöhle im Gips/Anhydrit, Einhornhöhle im Dolomit) die bekannten Hohlräume identifizierten, erwies sich das Georadar im Dolomit als zielführend, im stark zerklüfteten Gips aber durch Querreflexionen nur eingeschränkt nutzbar. Alle drei Methoden deuteten an der Einhornhöhle auf weitere, unbekannte Fortsetzungen hin, die inzwischen auch erbohrt wurden.

METHODEN

Bei den Geoelektrikmessungen wurde die sogenannte Electrical Resistivity Tomography (ERT) angewandt; dabei handelt es sich um ein Gleichstromverfahren, welches auf Messungen zwischen jeweils vier Elektroden basiert. Dabei werden Metallstäbe (Elektroden) in den Boden eingeschlagen und bei jeweils zwei davon Strom (I) eingeleitet und bei zwei anderen die resultierende Spannung (U) gemessen. Multielektrodeninstrumente erlauben die Aufzeichnung aufeinanderfolgender Messungen, wobei auch hier bei jeweils zwei Elektroden Strom eingespeist wird, die Spannung aber gleichzeitig bei mehreren Elektrodenpaaren gemessen wird. Dadurch können effektiv und zeitsparend tausende Messungen durchgeführt werden, die es in Kombination mit Inversionsalgorithmen ermöglichen, die quasi-kontinuierliche Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands im Untergrund darzustellen. Für die hier vorgestellten Messungen wurde ein Syscal-Gerät (Syscal Pro Switch 72, IRIS-Instrumente) mit zehn Kanälen verwendet, welches bis zu zehn Spannungswerte gleichzeitig für jede Stromeinspeisung erfassen kann. Die räumliche Auflösung hängt dabei vom Abstand zwischen den einzelnen Elektroden und die erreichbare Tiefe von der Gesamtlänge des Profils ab. Für die hier vorgestellten Messungen stand ein System mit 72 Elektroden zur Verfügung. Da hier vor allem oberflächennahe Hohlräume mit einer hohen räumlichen Auflösung untersucht werden sollten, wurden alle Daten mit einem Elektrodenabstand von 1 m aufgenommen, was zu einer Auflösung von etwa 0,25 m (vertikal und horizontal) und zu einer Untersuchungstiefe von ca. 15 m führt. Die Ansteuerung der Strom- und Spannungselektroden wurde dabei nach der Dipol-Dipol Methode durchgeführt, wobei hier acht der verfügbaren zehn Kanäle für die Spannungsmessung verwendet wurden. Um ein Modell des spezifischen elektrischen Widerstands des Untergrunds zu erhalten, werden entlang eines Profils (hier mit 72 Elektroden) für insgesamt 2068 Quadrupole mit unterschiedlichen Dipollängen (a = 1, 2, 3, ..., 12 m) und Abständen zwischen Strom- und Spannungsdipolen (n = 1, 2, 3, ..., 50 m) Messungen durchgeführt, um räumliche Variationen im Untergrund auflösen zu können. Die Abbildungsergebnisse von ERT-Messungen können dabei in Bezug auf den spezifischen elektrischen Widerstand (p, wie in der vorliegenden Studie) oder in Bezug auf die elektrische Leitfähigkeit (σ , mit $\sigma = 1/\rho$) angegeben werden.

Beim Georadar handelt es sich um ein elektromagnetisches Impulsreflexionsverfahren, bei dem Impulse von einer Dipol-Antenne ausgestrahlt und nach der Reflexion im Untergrund von einer Antenne empfangen werden. Die Reflexion der Impulse tritt dabei an Grenzschichten zwischen Materialien mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten auf, wobei die Amplitude der reflektierten Signale zusätzlich von der elektrischen Leitfähigkeit abhängt. Aus der Laufzeit des Impulses kann man bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen die korrekte Tiefe verschiedener Grenzschichten bestimmen (Migration). Erreichbare Tiefe und räumliches Auflösungsvermögen hängen dabei ebenfalls von den elektrischen Eigenschaften des Untergrunds, sowie von der verwendeten Impuls-Frequenz ab. In der vorliegenden Studie wurden eine 80-MHz-Antenne (Wellenlänge 1,5 m, Medium Kalk) und eine 400-MHz-Antenne (Wellenlänge 0,3 m, Medium Kalk) verwendet. Daraus resultiert eine vertikale Auflösung (≈¼ der Wellenlänge) von etwa 0,375 m bzw. 0,075 m. Die horizontale Auflösung nimmt mit zunehmender Entfernung zur Antenne ab und ist durch die erste Fresnel Zone definiert. Mit der 80-MHz-Antenne erreicht man damit eine horizontale Auflösung von etwa 1,9 m in einer Tiefe von 5 m, aber nur noch von 4.7 m in einer Tiefe von 30 m. Mit der 400-MHz-Antenne erreicht man in einer Tiefe von 5 m eine horizontale Auflösung von ca. 0,9 m. Für die Untersuchung des Forststraßeneinbruchs wurde eine 80-MHz-Antenne und für die Stiegengraben-Wasserhöhle eine 400-MHz-Antenne verwendet, beide in Kombination mit einem SIR 3000 GPR Controller. Mit der 80-MHz-Antenne wurden punktuelle Messungen mit einem fixen Abstand von 1 m (jeweils oberhalb der Elektroden-Position der Geoelektrik) durchgeführt. Mit der 400-MHz-Antenne wurde kontinuierlich gemessen, wobei in einem vorgegebenen Zeitintervall eine bestimmte Anzahl von Einzelmessungen durchgeführt wird. Das Aneinanderreihen mehrerer Einzelmessungen entlang eines Profils bezeichnet man als Radargramm. In Tabelle 1 sind die Parameter der beiden Radar-Antennen zusammengefasst.

Beide Methoden (ERT und GPR) reagieren auf Veränderungen der elektrischen Eigenschaften (Dielektrizität und elektrische Leitfähigkeit) im Untergrund. Tabelle 2 zeigt Literatur-Werte (Martinez & Byrnes, 2001; Knödel et al., 2005) für die zu erwartenden Materialien im Untersuchungsgebiet.

Auf Grund des sehr großen, teilweise überlappenden Wertebereichs ist es oft nicht möglich, aus nur einer geophysikalischen Messung den Aufbau des Untergrunds eindeutig abzuleiten. Daher werden häufig mehrere geophysikalische Methoden (hier Geoelektrik und Georadar) verwendet, um Mehrdeutigkeiten im geophysikalischen Modell zu reduzieren.

Tabelle 1: Parameter der GPR-Messungen. Table 1: Parameters of the GPR measurements.

Frequenz	Wellenlänge im Vakuum	Aufnahmedauer	Messung	Spurabstand
80 MHz	3,75 m	720 ns	punktuell	1 m
400 MHz	0,75 m	110 ns	kontinuierlich	2 cm

Tabelle 2: Dielektrizitätskonstante (ε) und spezifischer elektrischer Widerstand (ρ) der im Untersuchungsgebiet erwarteten Materialien.

Tabl	e 2:	Diel	ectric	constant	(ε)	and	resistivity	(ρ)	fc	or the	e expected	materia	l in	the stuc	ly region.
------	------	------	--------	----------	-----	-----	-------------	-----	----	--------	------------	---------	------	----------	------------

Material	3	ρ [kΩm]	
Kalk	4–8	0,1–7	
Luft	1	1,3 · 10 ¹³ -3,3 · 10 ¹³	
Sediment	4–30	0,02–9	
Wasser	81	0,01–0,3	

MESSUNGEN

Die Messungen wurden im Juli 2017 durchgeführt, und die Profile sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Messkampagne oberhalb des Forststraßeneinbruchs fand am 4. und 5.7.2017 bei trockenem warmem Wetter statt. Dabei wurden insgesamt sieben Profile mit Geoelektrik gemessen. Von diesen Profilen wurden zusätzlich vier mit Georadar gemessen (Abb.3). Die fehlenden drei Profile konnten aufgrund des dichten Walds mit der Georadar-Antenne nicht begangen werden. Für die Detektion des Eingangs der Stiegengraben-Wasserhöhle wurden am 26.7.2017 bei kühlem regnerischem Wetter zwei Profile oberhalb des infrage kommenden Bereichs aufgenommen (Abb.3).

Für die Auswertung und Inversion der Geoelektrikund Georadardaten wird die Topographie des Geländes benötigt. Oberhalb der Stiegengraben-Wasserhöhle wurden die zwei Profile an die Ränder der Forststra-

AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Georadar- und Geoelektrikmessungen, welche entlang des Profils 1 durchgeführt wurden. Gezeigt sind dabei nur die ersten 35 m des Profils 1, da hier der Forststraßeneinbruch darunterliegt. Das Radargramm (Abb. 4A) zeigt das Ergebnis der Messungen mit der 80 MHz-Antenne, mit der eine Erkundungstiefe von etwa 30 m erreicht werden konnte. Deutlich sichtbar ist eine Schicht, die über die gesamte Profillänge bis in eine Tiefe von ca. 1-1,5 m reicht (1), welche der obersten Schutt- und Bodenschicht entspricht und eine hohe Reflektivität zeigt. Unterhalb dieser zeigt das Radargramm eine sehr geringe Reflektivität, was für kompaktes Festgestein (hier Kalkstein) spricht. Nur im mittleren und rechten Bildbereich fallen in einer Höhe von etwa 675 m einige Regionen starker Reflektivität im sonst wenig reflektiven Opponitzer Kalk auf (2). Trotz einer vertikalen Auflösung von etwa 1,5 m und einer horizontalen Auflösung von nur ca. 3 m (80-MHz-Antenne) konnte auch im Bereich der bekannten Höhlenteile (schwarzer Umriss) eine erhöhte Reflektivität festgestellt werden. Abbildung 4B zeigt das Ergebnis der Geoelektrik, wobei hier Eindringtiefen von etwa 25 m erreicht wurden. Die oberste Sedimentschicht weist hier niedrige spezifische Widerstandswerte $(\rho < 0.3 \text{ k}\Omega\text{m})$ auf, was auf das Vorhandensein von gesättigten Materialien (Boden, Lehm, usw.) hinweist (bis zu 3 m basierend auf den in Abbildung 4 beobachteten Ergebnissen). Darunter bleibt der spezifische elektrische Widerstand in einem Bereich, der typisch für Kalkgestein ist (siehe Tab. 2, 0,1–7 kΩm). Weiters ße gelegt. Die Koordinaten und die Topographie konnten daher direkt aus dem Laserscan-basierten Höhenmodell des Landes NÖ entnommen werden. Oberhalb des Forststraßeneinbruchs war es aufgrund der dichten Vegetation nicht möglich, ausreichend genaue Koordinaten aus dem digitalen Geländemodel zu erhalten, daher wurden hier die Koordinaten der Elektrodenpositionen mit Hilfe eines Tachymeters (Leica TPS 1100) aufgenommen und anschließend über einige Passpunkte in das übergeordnete System transformiert.

Die Auswertung der geophysikalischen Messungen wurde für Georadar und Geoelektrik getrennt voneinander durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Profils 1 (oberhalb des Forststraßeneinbruchs) und des Profils 8 (oberhalb der Stiegengraben-Wasserhöhle) gezeigt.

bildet sich in einer Höhe von etwa 675 m eine Anomalie mit stark erhöhtem spezifischem elektrischem Widerstand ab, was auf einen luftgefüllten Hohlraum schließen lässt. Auch hier passt die Anomalie gut mit der Position der bekannten Höhle zusammen.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zeigt Abbildung 4C eine Überlagerung des farbkodierten Geoelektrikergebnisses mit den Georadardaten, wobei hier generell eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen ist. Nur im Radargramm fällt noch eine weitere Stelle erhöhter Reflektivität auf (zwischen Meter 30 und 35), die jedoch von der Geoelektrik nicht bestätigt werden kann. Daraus kann man schließen, dass sich hier kein größerer luftgefüllter Hohlraum, sondern eher verfüllte Hohlräume oder kleinräumige Störungen im Gestein befinden.

Als zweites Beispiel zeigt Abbildung 5 die Ergebnisse der Geoelektrik- und Georadarmessungen oberhalb des Eingangsbereichs der Stiegengraben-Wasserhöhle. Da der Eingang dieser Höhle nur in einer Tiefe von etwa 3–4 m erwartet wird, wurde für die Georadarmessungen eine 400-MHz-Antenne verwendet, mit welcher man eine deutlich höhere Auflösung erreichen kann. Die Eindringtiefe beträgt allerdings nur etwa 5 m. Im Radargramm ist auch hier deutlich die Grenze zwischen Schutt bzw. Boden und dem darunterliegenden Festgestein zu erkennen (1). Darunter kann man zwischen Meter 25 und 35 in einer Tiefe von 3–4 m deutlich einen Bereich stark erhöhter Reflektivität abgrenzen (gestrichelte Linie in Abb. 5), bei dem es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um die Eingangs-



Abb. 4 (li.): Ergebnisse der Georadar und Geoelektrik Messungen des Profils 1 oberhalb des Forststraßeneinbruchs. Gezeigt sind nur die ersten 35 m, da hier die bekannte Höhle darunterliegt.

- (A) Radargramm der Punktmessungen mit der 80-MHz-Antenne.
- (B) Ergebnis der Geoelektrik Messungen. Der Farbcode des Geoelektrik Ergebnisses zeigt den spezifischen elektrischen Widerstand, wobei hohe Werte (rot)



auf einen hohen Widerstand und damit auf Hohlräume hinweisen.

(C) Hier sind beide Ergebnisse übereinandergelegt. Der schwarze Umriss markiert die Position der bekannten Höhle.

Fig. 4 (left): Results of the GPR and ERT measurements of profile 1 above Forststraßeneinbruch. Only the first 35 m are shown, since the known parts of the cave are located below.

- (A) Radargram of point measurements using the 80 MHz antenna.
- (B) ERT, colour-coded according to resistivity, whereby high values (red) correspond to high resistivities and therefore indicate cavities.
- (C) Overlay of both results. The black contour marks he position of the known cave.

Abb. 5 (re.): Ergebnisse der Georadar und Geoelektrik Messungen des Profil 8 oberhalb der Stiegengraben-Wasserhöhle.

- (A) Radargramm der kontinuierlichen Messungen mit der 400-MHz-Antenne.
- (B) Ergebnis der Geoelektrik Messungen. Der Farbcode des Geoelektrik Ergebnisses zeigt den spezifischen elektrischen Widerstand.
- (C) Beide Ergebnisse übereinandergelegt. Die strichlierte Linie markiert die vermutete Position der Eingangshalle der Stiegengraben-Wasserhöhle.

Fig. 5 (right): Results of the GPR and ERT measurements

- of profile 8 above Stiegengraben-Wasserhöhle.
- (A) Radargram of continous measurements with the 400 MHz antenna.
- (B) ERT, colour-coded according to resistivity.
- (C) Overlay of both results. The dotted line marks the supposed position of the entrance hall of Stiegengraben-Wasserhöhle.

halle der Stiegengraben-Wasserhöhle handelt. Die Geoelektrik zeigt im selben Bereich einerseits für Kalkstein typische und andererseits am unteren Rand der Region sehr niedrige spezifische elektrische Widerstandswerte. Es konnten hier daher nicht die für lufterfüllte Hohlräume erwarteten Werte festgestellt werden. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Eingangshalle unterhalb des Profils 8 wenige bis gar keine luftgefüllten Bereiche aufweist, d.h. bereits weitgehend mit Sediment verfüllt ist. Da durch die Stiegengraben-Wasserhöhle zeitweise ein kleiner Bach fließt, der bei Starkregen viel Wasser führen kann, und ihr Eingang bereits in den 1970er Jahren verschüttet wurde, scheint eine Ansammlung von Sediment in der Halle hinter dem verschütteten Eingang wahrscheinlich zu sein. Ebenfalls denkbar wäre, dass sich durch den verschütteten Eingang das Wasser staut und so ein permanenter See entstanden ist. Solch eine Wasseransammlung würde den Strom besonders gut leiten, und der darüber liegende luftgefüllte Raum wäre dadurch unsichtbar. Beide Erklärungen würden die niedrigen spezifischen elektrischen Widerstände im Geoelektrik-Ergebnis, sowie die sehr hohe Reflektivität, welche im Radargramm beobachtet wurde, erklären.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ergebnis der Messungen oberhalb des Forststraßeneinbruchs zeigt sowohl in der Geoelektrik als auch im Georadar deutlich die Position der bekannten Höhle. Während man im Radargramm auch die genaue Form und Größe der Höhle recht gut erkennen kann, erreicht die Geoelektrik hier nicht die dafür nötige Auflösung. Mit der 80-MHz-Antenne konnte zwar eine Tiefe von knapp 30 m erreicht werden, allerdings bei einer Auflösung von nur 1,9-4,7 m, was die oft kleinräumigen Passagen des Forststraßeneinbruchs unsichtbar erscheinen lässt. In den Radargrammen war daher die Position des Forststraßeneinbruchs nicht immer so gut zu erkennen wie in Abbildung 5. Die Geoelektrik konnte die Position, nicht aber die Form oder Größe der luftgefüllten Hohlräume im Festgestein für alle Profile gut wiedergeben. Die erreichte Tiefe lag dabei zwischen 15 und 25 m bei einer Auflösung von ca. 0,25 m und war damit ausreichend genau, um den Forststraßeneinbruch zu detektieren. Das zweite Messgebiet lag oberhalb der Stiegengraben-Wasserhöhle, deren Eingang in den 1970er Jahren verschüttet wurde und mit Hilfe der durchgeführten geophysikalischen Messungen wiedergefunden werden sollte. Die laut Plan bekannten Abmessungen der Eingangshalle der Stiegengraben-Wasserhöhle betragen 12 x 2 m in einer Tiefe von nur 3-4 m, was eine Detektion mit Hilfe geophysikalischer Methoden leicht möglich machen sollte. Tatsächlich konnte die Eingangshalle am Radargramm erkannt werden. Die Geoelektrik zeigt allerdings ein überraschendes Ergebnis, was schließlich zu der Vermutung führte, dass sich in der Eingangshalle inzwischen größere Mengen Wasser befinden oder diese zumindest teilweise mit Sediment verfüllt ist.

Zusammenfassend kann man jedenfalls sagen, dass sowohl mit Georadar als auch mit Geoelektrik auch kleinräumige oberflächennahe Hohlräume, welche potentiell gefährlich wären, sehr gut zu erkennen sind, wobei die Kombination der Methoden von Vorteil ist. Da an der Grenzen zwischen Opponitzer Kalk und Hauptdolomit mit einem hohen Verkarstungsgrad zu rechnen ist, wäre es von Interesse, auch größere Gebiete nach möglichen darunterliegenden Hohlräumen abzusuchen, was mit Hilfe geophysikalischer Methoden möglich ist.

DANK

Dank geht an Michael Behm, Werner Chwatal, Anibal David Marquina Cisneros und Antonia Golab für die Hilfe bei der Aufnahme bzw. Auswertung der Daten, sowie an das Institut für Geodäsie und Geoinformation der TU Wien für die Bereitstellung der Instrumente.

Georg Kaufmann und ein anonymer Gutachter haben wertvolle Hinweise gegeben.

LITERATUR

Abrahamczik, W. (1936): Karsterscheinungen in der Umgebung von Lunz am See, mit besonderer Berücksichtigung der Höhlen. – Unveröff. Diss. Univ. Wien.

Bauer, F.K., Ruttner, A. & Schnabel, W. (1988): Geologische

Karte der Republik Österreich – Blatt 71, Ybbsitz. – Wien (Geologische Bundesanstalt).

Behm, M., Plan, L. & Roch, K.H. (2005): Erfolgreicher Versuch einer Höhlendetektion mit Georadar (GPR). – Die Höhle, 56: 20-23. Chamberlain, A.T., Sellers, W., Proctor, Ch. & Coard, R. (2000): Cave detection in limestone using Ground Penetrating Radar. – Journal of Archaeological Science, 27: 957-964.

Frid, V., Averbach, A., Frid, M., Dudkinski, D. & Liskevich, G. (2015): Statistical analysis of resistivity anomalies caused by underground caves. – Pure and Applied Geophysics, 174: 997-1012.

- Hartmann, H. & Hartmann, W. (1985): Die Höhlen Niederösterreichs, Band 3. – Die Höhle, Beiheft 30.
- Kaufmann, G., Nielbock, R. & Romanov, D. (2015): The Unicorn Cave, Southern Harz Mountains, Germany: From known passages to unknown extensions with the help of geophysical surveys. – Journal of Applied Geophysics, 123: 123-140.

Kaufmann, G. & Romanov, D. (2017): The Jettencave, Southern Harz Mountains, Germany: Geophysical observations and a structural model of a shallow cave in gypsum/anhydrite-bearing rocks. – Geomorphology, 298: 20-30.

- Knödel, K., Krummel, H. & Lange, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. – Band 3, Geophysik, Berlin (Springer).
- Martinez, A. & Byrnes, A.P. (2001): Modelling Dielectricconstant values of geological materials: An aid to Ground-Penetrating Radar data collection and interpretation. – Current Research in Earth Science, Bulletin 247: 1-16.
- Redhaounia, B., Ilondo, B.O., Gabtni, H. & Sami, K. (2016): Electrical Resistivity Tomography (ERT) applied to karst carbonate aquifers: Case study from Amdoun, northwestern Tunisia. – Pure and Applied Geophysics, 173: 1289-1303.
- Süssenbeck, H. (1974): Die Erforschung der Stiegengraben-Wasserhöhle (1823/25) im Schöpftaler Wald bei Lunz/See. – Höhlenkundl. Mitt. Wien, 30: 221-231.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Die Höhle

Jahr/Year: 2018

Band/Volume: <u>69</u>

Autor(en)/Author(s): Funk Barbara, Flores-Orozco Adrian, Maierhofer Theresa, Plan Lukas

Artikel/Article: <u>Anwendung geophysikalischer Methoden zur Detektion zweier Höhlen</u> <u>nahe Lunz am See (NÖ) 109-117</u>