


A photograph of a cave interior. The ceiling and walls are composed of layered, brownish rock formations, possibly limestone, with some white mineral deposits. A person in a red suit and helmet stands on a rocky floor in the lower left corner, providing a sense of scale. The lighting is dramatic, highlighting the textures of the rock.

Höhlen

Schatzkammern der Wissenschaft

naturhistorisches
museum wien 

Impressum

Verlag des Naturhistorischen Museums Wien, 2022 | ISBN 978-3-903096-51-6
Naturhistorisches Museum Wien, w. A. ö. R., Burgring 7, 1010 Wien

Autoren:

S. 26–28 Mathias Harzhauser

S. 30–33 Nesrine Akkari

S. 34–37 Mathias Harzhauser

S. 38–41 Luise Kruckenhauser

S. 42–44 Walpurga Antl-Weiser

Restliche Texte: Lukas Plan & Pauline Oberender

Redaktion: Lukas Plan, Pauline Oberender & Andreas Kroh

Lektorat: Erhard Christian, Andrea Krapf, Andreas Kroh, Andrea Kroh, Rudolf Pavuza, Brigitta Schmid & Christoph Spötl

Layout: Andrea Krapf

Grafiken: Josef Muhsil-Schamall

Druck: Samson Druck, Samson Druck Strasse 171, 5581 St. Margarethen/Lungau

Zitiervorschlag: Plan, L., Oberender, P. & Kroh, A. (Hrsg.) (2022): Höhlen – Schatzkammern der Wissenschaft. – 52 S., Wien (Verlag des Naturhistorischen Museums Wien).

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten

Link zur Offenlegung gem. §25 MedienG: <https://www.nhm-wien.ac.at/impresum>



Gedruckt nach der Richtlinie „Druckerzeugnisse“
des Österreichischen Umweltzeichens,
Samson Druck GmbH, St. Margarethen/Lungau, UW-Nr. 837



Bitte sammeln Sie Altpapier für das Recycling.
EU Ecolabel awarded printed paper.

EU Ecolabel: SE/011/007





Vorwort

Was haben Rom, Damaskus und Wien gemeinsam? Alle drei Großstädte decken ihren Wasserbedarf aus dem Karst. Karst besteht meist aus Kalkstein, der dafür, dass es sich um Stein handelt, recht wasserlöslich ist. Das führt zu den typischen wildromantischen Erscheinungsformen des Karsts und zu ausgedehnten unterirdischen Höhlensystemen und entsprechenden Wasserspeichern. Global werden bis zu 20 % des Trinkwasserbedarfs aus Karsthöhlen gedeckt.

Höhlen faszinieren darüber hinaus aufgrund ihrer speziellen Bewohner und Gesteinsformationen, wie zum Beispiel Tropfsteine: Stalaktiten (wachsen von oben) und Stalagmiten (wachsen von unten). Andere spannende Gebilde sind die Excentriques (die heißen wirklich so!), die im NHM Wien zu bewundern sind. Mindestens ebenso spannend sind die blassen Höhlen-Lebewesen, aber auch die vielen Knochen der Höhlenbären. Für die Wissenschaft besonders interessant sind pigmentlose Höhlenfische, da ihre morphologischen Veränderungen in Verbindung mit genetischen Studien Einsicht in Evolutionsprozesse geben.

Darüber hinaus lassen sich in Höhlen frühe Zeugnisse menschlicher Kunstfertig-

keit und noch ältere Hinweise auf die Entstehung geologischer Formationen finden. Last, but not least faszinieren Höhlen Menschen aus aller Welt – und haben sogar Astronaut*innen als Trainingsort gedient.

Das NHM Wien befasst sich wissenschaftlich mit Höhlen, ihrer Kartierung sowie der Erforschung ihrer langen Geschichte. Seit 2012 ist die Karst- und Höhlen-Arbeitsgruppe Teil der Geologisch-paläontologischen Abteilung des NHM Wien. Hervorgegangen ist sie 1928 aus dem Referat für Höhlenschutz am Bundesdenkmalamt. Aufgrund der Bedeutung von Höhlen als Lebensraum, als Archiv der Vorzeit und als Wasserspeicher ist die Schutzwürdigkeit schon früh erkannt worden.

Diese Arbeitsgruppe hat große Unterstützung durch ehrenamtliche Höhlenforscher*innen – Citizen Scientists – und profitiert stark von deren Fachkenntnis, Engagement und Erfahrung.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Entdecken der vielen Höhlen-Anknüpfungspunkte auf unserem Höhlenpfad durch das Naturhistorische Museum Wien!

*Ihre Katrin Vohland
Generaldirektorin*



Eingang zur Hirlatzhöhle im Dachstein, der mit 113 km drittlängsten Höhle Österreichs. Im Hintergrund sieht man Hallstatt (Oberösterreich).

Einleitung

Überspitzt gesagt gibt es gar keine Höhlen. Die sind nämlich natürlich entstandene Löcher und faktisch existiert nur das umgebende Gestein. Eben diese Hohlräume sind für etliche Lebewesen der Vergangenheit und Gegenwart und auch für die Menschheitsgeschichte von großer Bedeutung. Nach wie vor ziehen Höhlen viele Menschen in ihren Bann. Sei es aus kultischen Gründen oder wegen ihrer Schönheit – besonders bei Tropfstein- und Eishöhlen – oder wegen der naturwissenschaftlichen und kulturhistorischen Inhalte.

Wissenschaftler*innen unterschiedlichster Disziplinen forschen in diesen, in vielerlei Hinsicht speziellen, unterirdischen Räumen. Das Wissen über Höhlen findet aber auch praktische Anwendung, wenn es etwa um die Versorgung von Menschen mit sauberem Trinkwasser geht. Und auch bei der Erforschung des Klimas der Vergangenheit im Vergleich zum heutigen Klimawandel bis hin

zur Speläotherapie, bei der Menschen mit Atemwegserkrankungen durch die Besonderheiten der Höhlenluft Linderung ihrer Beschwerden erfahren.

Das Naturhistorische Museum Wien hat sowohl historisch als auch aktuell einen starken Bezug zu Höhlen. Die Karst- und Höhlenarbeitsgruppe am NHM Wien ist auch die einzige staatlich geförderte Einrichtung Österreichs, deren Mitarbeiter*innen sich direkt mit Höhlen beschäftigen – etwa mit der Entstehung dieser besonderen Hohlräume.

Diese Broschüre soll einen Einblick in die faszinierenden unterirdischen Welten und deren Erforschung geben und einige Streiflichter auf ihre Bedeutung für die Wissenschaft werfen. Vielleicht macht sie ja auch Lust, sich selbst mit Höhlen zu beschäftigen. Sowohl in Sammlungen und Archiven als auch draußen in der Natur gibt es noch viel zu erforschen!

Höhlen – Wissenswertes

Was ist eine Höhle?

Höhlen sind natürlich entstandene unterirdische Hohlräume. Stollen und andere vom Menschen geschaffene Bauwerke gehören somit nicht dazu. Soweit der relativ simple Teil der Definition. Es muss aber zusätzlich noch eine Mindestgröße angegeben werden, da sonst jeder Hohlraum zwischen den Steinen eines Schotterhügels eine Höhle wäre. Wie so oft wird hier der Mensch als Maßstab genommen und definiert, dass ein Mensch in eine Höhle passen muss. Dies ist zwar für Hydrogeolog*innen, die das Fließen des Wassers durch eine Höhle untersuchen, nicht gänzlich zielführend, aber es gibt selbst im 21. Jahrhundert noch keine Möglichkeit, ausgedehnte und mehr als einige Meter unter der Oberfläche liegende Höhlen zu erforschen, außer durch Höhlenforscher*innen, die sich selbst in den Untergrund begeben. Auch aus hydrologischer Sicht ist der Querschnitt des Hohlraums relevant und der menschliche Körper als Maßstab nicht unangebracht. In schmalen Spalten hat das Wasser andere Eigenschaften als in breiteren Durchgängen, durch die ein Mensch hindurchschlüpfen

kann. Es ändern sich die Fließeigenschaften und auch die Lösungsgeschwindigkeit, was wiederum Einfluss auf die Höhlenbildung hat.

Neben dem Gang-Querschnitt wird oft auch eine Mindestlänge definiert (in Österreich 5 m). Erst dann wird eine Höhle ins Österreichische Höhlenverzeichnis aufgenommen; auch die Höhlenschutzbestimmungen beziehen sich auf diese Referenz.

Der Begriff „Grotte“ war früher gleichbedeutend mit Höhle, wird aber heute im naturwissenschaftlichen Sprachgebrauch nicht mehr verwendet. Große, komplexe Höhlen werden als Höhlensysteme bezeichnet. Wenn eine Verbindung zwischen zwei Höhlen entdeckt wird, kann dies zur Benennung eines neuen Höhlensystems führen.

Ein Eingang zur Höhle kommt in der Höhlendefinition nicht vor, denn aufgrund statistischer Überlegungen kann man davon ausgehen, dass die überwiegende Mehrheit der unterirdischen Hohlräume gar keinen Eingang hat. Etliche Höhlen kennt man nur, weil sie bei Steinbrucharbeiten oder in Bergwerken angeschnitten wurden.

98 m tiefe Schachtstufe im 1.082 m tiefen Steinbockschacht am Hochschwab (Steiermark)



Wie entstehen Höhlen?

Ein Loch in einem Material kann während der Herstellung entstehen, als Produktionsfehler, oder später, zum Beispiel durch Verschleiß. Genauso verhält es sich mit Höhlen: Ein Hohlraum kann sich schon während der Bildung des Gesteins formen oder erst nachträglich.

Lavahöhlen zum Beispiel bilden sich gleichzeitig mit dem Gestein. Dabei fließt am Hang eines Vulkans das flüssige Gestein abwärts, kühlt an der Oberfläche ab und erstarrt. In einem Kanal darunter fließt es aber weiter, bis der Zustrom endet und sich der Kanal entleert. Verzweigte Systeme solcher Lavahöhlen können eine Länge von einigen Dutzend Kilometern erreichen und über 1.000 m Höhenunterschied aufweisen. Beispiele dafür gibt es weltweit in vielen Vulkanregionen wie Hawaii, den Kanarischen Inseln und im Süden Kenias. In den wenigen Vulkanresten Österreichs, im Südburgenland und der Oststeiermark, sind keine Lavahöhlen bekannt.

Die meisten Höhlen bilden sich in einem schon bestehenden Gestein – durch unterschiedliche Prozesse. Die meisten und die ausgedehntesten Höhlen entstehen durch Lösung des Gesteins. Dieser Prozess wird „Verkarstung“ genannt. Wie sie funktioniert, wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Besonders in den Alpen entstehen viele Höhlen durch **Verwitterung**. Frostsprengung ist dabei die treibende Kraft. Jeder, der schon einmal schnell ein Getränk kühlen wollte und die Glasflasche im Tiefkühlfach vergessen hat, weiß um die Kraft, die beim Gefrieren von Wasser auf die Umgebung ausgeübt wird. Wenn Wasser in Fugen einer Felswand gefriert, kommt es unweigerlich zur Sprengung des Gesteins. Oft entstehen dadurch sogenannte **Halbhöhlen**, bei denen der Eingang breiter ist als die Tiefe. Es können auf diese Weise aber auch komplexe und bis zu etliche Zehnermeter tiefe unterirdische Hohlräume entstehen.

Lavatunnel des Ätna





© L. Plan

Nur durch Frostverwitterung entstanden: das Wetzsteinloch im Hochschwab (Steiermark)

Ein anderer Prozess, der Halbhöhlen formt, ist Erosion, also Gesteinsabtragung – meist durch bewegtes Wasser. Solche Höhlen bilden sich zum Beispiel, wenn Flüsse an steilen Ufern entlangströmen und sowohl das schnell fließende Wasser als auch die darin mitgeführten Sedimente die Felswände unterspülen. **Brandungshöhlen** wiederum bilden sich, wenn die Wellenbewegungen an einer Meeresküste Schwächezonen im Gestein aushöhlen.

Diese Halbhöhlen sind unter dem Gesichtspunkt der naturkundlichen Erforschung nicht besonders spannend und weisen oft nicht einmal einen lichtlosen Teil auf. Für unsere Vorfahren waren sie aber willkommene Unterstände. Das macht einige Halbhöhlen zu bedeutenden archäologischen Fundplätzen. Der Cro-Magnon-Mensch zum Beispiel wurde 1868 in einer flachen Halbhöhle, dem Abri de Cro-Magnon in Frankreich, entdeckt.

In den Alpen, wo die Gletscher der letzten Eiszeit oft steile Talflanken hinterließen, sind **Spalthöhlen** häufig. Besonders, wenn massive Gesteine wie Kalkgesteine relativ weiche Gesteine wie Tonschiefer überlagern, kommt es zum langsamen Abgleiten von Kalkblöcken, was zum Aufreißen von Spalten führt. Werden diese von nachstürzenden Blöcken überdeckt

oder sind die Spalten unregelmäßig geformt, bilden sich Höhlen. Manche Spalthöhlen erreichen einige 100 m Länge und etliche Zehnermeter Tiefe.

Die Liste der Prozesse, die Hohlräume im Gestein hervorrufen, ließe sich lange fortsetzen. Sie beinhaltet auch einige Kuriositäten. So untersuchten brasilianische Forscher*innen rund 50 m tiefe, verzweigte Gangsysteme, für deren Entstehung keine geologische Ursache in Frage kommt. Des Rätsels Lösung sind ausgestorbene Riesenfaultiere, welche die Höhlen in der jüngeren Erdneuzeit (Neogen) gegraben haben.

Nach wie vor gibt es auch einige Höhlen, deren Entstehung unklar ist. Besonders schwierig wird die Rekonstruktion, wenn Menschen eine Höhle nutzten und veränderten.

Eine typische Spalthöhle: das Markierte Windloch bei Otterthal (Niederösterreich)



© L. Plan

Die größten Höhlen entstehen durch Wasser

Weltweit und auch in Österreich sind die meisten und fast alle großen und bekannten Höhlen sogenannte **Karsthöhlen**. Sie bilden sich in Gesteinen, die eine erhöhte Löslichkeit haben. Auch wir lösen Minerale, also die Bestandteile von Gesteinen, wenn wir zum Beispiel Salz in die Suppe geben. Und **Steinsalz** ist tatsächlich eines der Gesteine, in denen es Karsthöhlen gibt. Allerdings kommt Steinsalz nur in extrem trockenen Regionen an der Erdoberfläche vor. Beispiele sind die Umgebung des Toten Meeres in Israel oder die Atacama-Wüste in Chile. Mit jedem der seltenen Regenfälle können sich im Steinsalz Höhlen bilden oder vergrößern.

Die wichtigsten und am weitesten verbreiteten Karstgesteine sind **Kalk** sowie andere Gesteine, die ebenfalls aus Calciumcarbonat bzw. dem Mineral Calcit bestehen. Dieses Mineral wird nicht wie Steinsalz durch reines Wasser gelöst, sondern durch kohlenstoffhaltiges Regenwasser nimmt in der Atmosphäre und vor allem im Boden

Kohlendioxid auf; dadurch entsteht Kohlensäure – wie wir sie aus dem Mineralwasser kennen, nur schwächer. Diese kann das Calciumcarbonat lösen und abtransportieren, ähnlich wie die Essigreiniger, die wir zum Lösen von Kalkrändern in Sanitär-Einrichtungen verwenden. Auch Dolomit, der aus dem gleichnamigen Mineral besteht und häufig als Gestein auftritt, ist löslich, allerdings schwerer. Deshalb sind Höhlen im Dolomitgestein seltener.

Das **kohlensäurehaltige Wasser** versickert oben am Berg entlang winziger **Fugen** im Gestein und bahnt sich einen unterirdischen Weg zu einer Quelle im Tal; dabei werden die Fugen im Gestein durch Lösung erweitert. Auf diese Weise können mit der Zeit weitläufige Höhlen im Untergrund entstehen, deren Dimensionen sogar menschliche Bauwerke in den Schatten stellen. Die größten bekannten Höhlengänge weltweit finden sich in Höhlen Südostasiens; sie sind einige Kilometer lang und haben Durchmesser von rund 100 m. Erstaunlich, wenn man bedenkt, dass sie aus einer nur millimeterbreiten Fuge im Kalkgestein entstanden sind.

Die fortschreitende Aushöhlung durch Lösungsprozesse bewirkt, dass der Wasserspiegel in einem Kalksteinmassiv auf das Niveau der Quellen im Tal absinkt. Oberhalb dieses sogenannten Karstwasserspiegels fließt das Wasser gemäß der Schwerkraft durch meist schmale, aber hohe Canyons oder durch senkrechte Schächte nach unten. Die meisten großen Gänge entwickeln sich aber unter dem Wasserspiegel, wo das Wasser aufgrund des Druckunterschiedes zur



Fugen im Gestein werden durch Lösung erweitert – ein Hohlraum entsteht (Marmorsteinbruch in Arzwiesen, Niederösterreich).



© H. Meyrl

tiefstmöglichen Austrittsstelle beziehungsweise zu einer Quelle strömt. Dabei kann es wie im Siphon eines Waschbeckens bergauf und bergab fließen.

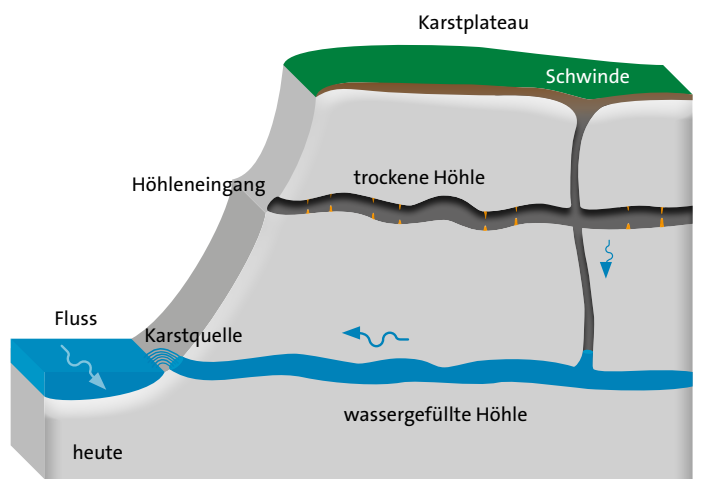
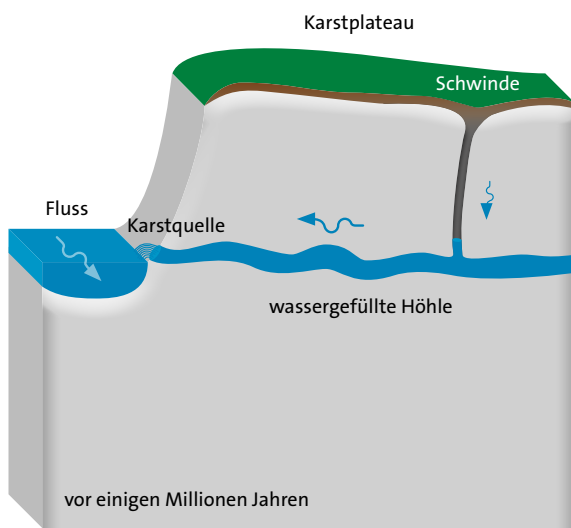
Sobald eine Fuge ungefähr auf Dezimetergröße erweitert ist, erfolgt die Erweiterung zu einem Gang mit ein paar Metern Durchmesser in einem Zeitraum von einigen 10.000 Jahren, also in geologisch kurzer Zeit. Gleichzeitig werden die Täler an der Erdoberfläche durch Erosion tiefer eingeschnitten; dadurch verlagern sich der Karstwasserspiegel und die Quellaustritte nach unten; die höhergelegenen Gänge fallen trocken. Erst dann kann man auch ohne Tauchausrüstung in diese Höhlen.

*Während ihrer Entstehung sind viele Höhlen wassergefüllt und können nur von Höhlentaucher*innen befahren werden.*

Für viele Höhlenräume bedeutet das aber, dass geologische Prozesse zum Erliegen kommen und kaum mehr Veränderungen stattfinden.

Dass Höhlen in vielen Filmen einstürzen, ist übrigens der Phantasie der Drehbuchautor*innen geschuldet und dient dazu, die Dramatik zu steigern. In der Natur passiert dies nämlich ausgesprochen selten. Höhlenräume im Kalkstein können über mehrere Millionen Jahre bestehen, bis sich die Erdoberfläche durch Erosion dem Hohlraum nähert und seine Decke von oben abgetragen wird.

Das Einschneiden des Tals lässt in einem Karstmassiv neue unterirdische Abflusswege entstehen und alte Höhlen trocken fallen.





Was ist Karst?

Durch die Löslichkeit des Gesteins und die unterirdische Entwässerung entsteht auch an der Erdoberfläche eine Landschaft mit speziellen Formen. An den Stellen, an denen Wasser versickert und dabei Gestein löst, bilden sich trichterförmige Vertiefungen, sogenannte **Dolinen**. Es können aber auch ganze Bäche oder sogar Flüsse im Untergrund verschwinden. Diese Schlucklöcher werden als Ponore bezeichnet und sind oft auch befahrbare Höhleneingänge.

Besonders ausgeprägt sind diese Landschaftsformen in einem kleinen wasserlosen Areal im Hinterland von Triest an der slowenisch-italienischen Grenze. Die Region wird als **Karst** beziehungsweise Kraš

oder Il Carso bezeichnet und wurde schon früh eingehend untersucht. Jovan Cvijić (1865–1927), ein Schüler führender Geographen und Geologen wie Albrecht Penck und Eduard Suess, promovierte 1893 an der Universität Wien mit seiner Arbeit über „Das Karstphänomen“. Aufgrund der Veröffentlichung seiner Arbeit in den renommierten „Geographischen Abhandlungen“ von Albrecht Penck hat sich die ursprüngliche Lokalbezeichnung „Karst“ weltweit als Fachbegriff für diesen Landschaftstyp etabliert. Der Prozess der Entstehung wird als „Verkarstung“ bezeichnet.

Der Landschaftstyp „Karst“ beschränkt sich allerdings nicht – wie vielfach angenom-



Schwinde nahe der Sonnschianalm am Hochschwab (Steiermark) ▲

◀ Karstlandschaft am Hochschwab (Steiermark)



© L. Plan

Karstlandschaft mit Dolinen am Hochschwab (Steiermark)

men – auf kahle, vegetationsarme Gebiete; tatsächlich ist die Verkarstung in den Tropen am intensivsten. Einerseits begünstigen dort die großen Niederschlagsmengen die **Kalklösung**, andererseits führen die hohen Temperaturen zu einer verstärkten Aktivität der Bodenorganismen und zu hohen Kohlendioxid-Konzentrationen. Dadurch entstehen entsprechend saure Wässer, die viel Kalkstein lösen können. Durch den rascheren Lösungsprozess und weil es keine Frostverwitterung gibt, bilden sich unter tropischen Bedingungen an der Oberfläche andere Karstformen als in den nördlichen und südlichen Breiten: Es entstehen hohe Türme und teilweise abgerundete Kegel. Dieser sogenannte Turm- oder Kegelkarst ist unter anderem aus China, Vietnam und Thailand bekannt. Nur in sehr trockenen Gebieten und in Permafrost-Gebieten, etwa in polaren Regionen, kann der Verkarstungsprozess nicht ablaufen.

Ein weiteres bedeutendes Karstgestein ist **Gips**. Gips ist deutlich besser lös-

lich als Kalk, wenn auch nicht so gut wie **Salz**, sodass er in Regionen mit humidem Klima, wo mehr Wasser versickert als verdunstet, auch an der Erdoberfläche auftritt. Die Lösungsprozesse erfolgen so schnell, dass sie rascher wahrgenommen werden als bei Kalkstein. Auch ist Gips viel weicher als Kalk. In Gipskarst-Gebieten kommt es immer wieder vor, dass oberflächennahe Höhlen einbrechen, was zu Einsturzdolinen an der Oberfläche führt. Mitunter sind dadurch auch Bauwerke betroffen. Zudem kann diese Dynamik durch menschliche Eingriffe in den Wasserhaushalt ausgelöst oder verstärkt werden. Beispiele dafür gibt es in Hinterbrühl südlich von Wien. Dort haben alte Bergwerksstollen die natürlichen unterirdischen Wasserläufe verändert. Selbst das jährliche Auslassen von Swimmingpools kann zur Entstehung oberflächennaher Lösungshohlräume im Gips und dadurch zu Problemen in dicht bebauten Gebieten führen.

Höhlenforschung ist Citizen Science

Es gibt noch keine Möglichkeit, Höhlen zu erforschen, außer dass sich ein Mensch hineinbegibt. Da man in Höhlen nur selten normal gehen kann, sondern Fortbewegungsarten wie Klettern, Kriechen, Abseilen und Schwimmen vorherrschen, spricht man von **Höhlenbefahrung**. Beim Erkunden von Höhlen stößt man aber bald an Grenzen, da man vor allem in ausgedehnteren Höhlensystemen leicht die Orientierung verliert. Für alle, die sich mit Höhlen beschäftigen, ist daher ein Höhlenplan wichtig.

Deshalb werden neu entdeckte Höhlen oder Höhlenteile von erfahrenen Höhlenforscher*innen immer gleich vermessen.

Höhlenforscher*innen sind in den meisten Fällen Enthusiasten, die das Vermessen und Dokumentieren von Höhlen in ihrer Freizeit betreiben. Trotzdem sind diese Citizen Scientists – oder Laienwissenschaftler*innen – meist gut ausgebildet und betreiben ihre Forschung auf hohem Niveau. Der Fachbegriff für die Höhlenforschung lautet übrigens **Speläologie** und leitet sich vom



Höhlenforscher*innen beim EuroSpeleo Forum 2018 in Ebensee (Oberösterreich)

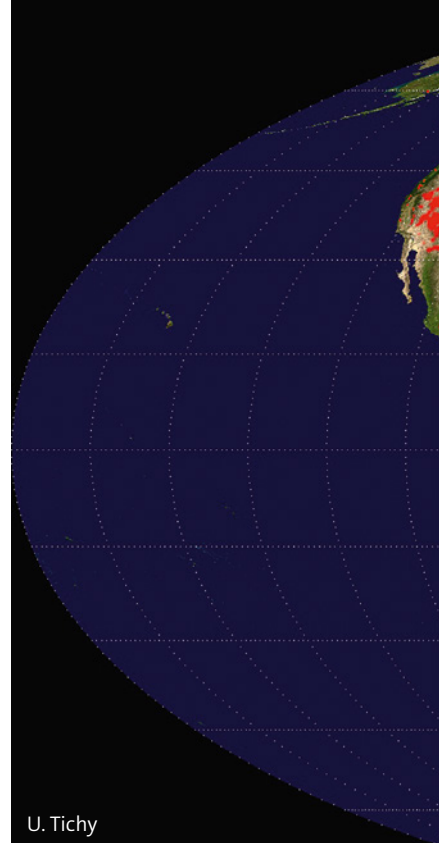
Lateinischen *spelunca* ab – wie auch der umgangssprachliche Ausdruck für schummrige (Keller)Lokale.

Höhlenforscher*innen sind in Vereinen organisiert (Adressen finden sich auf der letzten Seite). In den meisten Ländern ist auch die Führung des **Höhlenkatasters**, der systematischen Sammlung von Daten zu Höhlen, eine Aufgabe solcher Vereine. Der älteste Höhlenverein weltweit wurde übrigens 1879 in Wien gegründet. Eines der Gründungsmitglieder war der damalige Direktor des k.k. Naturhistorischen Hofmuseums, Ferdinand von Hochstetter (1829–1884), von dessen höhlenkundlichen Aktivitäten in weiterer Folge noch die Rede sein wird.

Die Vermessung von Höhlen erfolgt normalerweise mittels aneinandergereihter Messzüge, die von Punkt zu Punkt führen und durch ihre Länge, Neigung und Himmelsrichtung bestimmt sind. Ein kleines

elektronisches Messgerät erledigt diese Messung heute auf Knopfdruck und die Daten werden an ein Tablet übertragen. Zu diesem gemessenen Grundgerüst werden vor Ort auch die Raumformen und der Inhalt der Höhle skizziert.

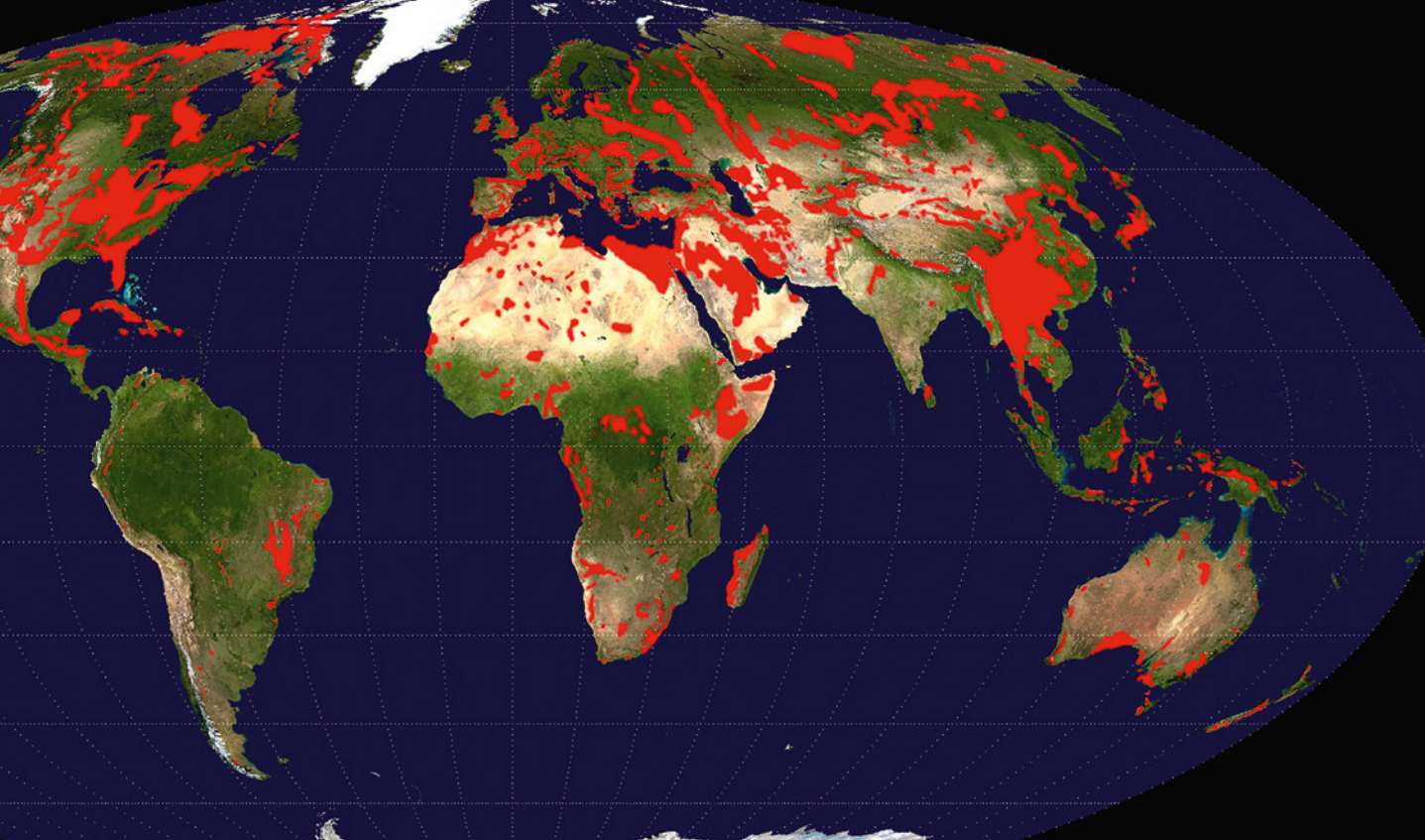
Der **Höhlenplan**, der so entsteht, stellt die Grundlage für die weitere Erforschung und wissenschaftliche Untersuchung dar, denn jeder Fund und jede Beobachtung verlieren ohne genaue Ortsangabe an Bedeutung.



U. Tichy

*Höhlenforscher in einer Engstelle –
einem sogenannten Schluf*





Karstgebiete (rot) sind weltweit verbreitet – in Südost-Asien und Südchina finden sich besonders viele.

Wo gibt es Höhlen?

Karstgebiete machen weltweit rund 15–20 % der eisfreien Landoberfläche aus, wobei Kalkgesteine die häufigsten Träger des Karstphänomens sind. Gipskarst ist weit weniger verbreitet, jedoch regional durchaus bedeutend. Vor allem die miozänen Gipsvorkommen der Westukraine beherbergen einige extrem labyrinthische Höhlensysteme: In der **Optimisticheskaja-Höhle** sind 257 km an Gangstrecken dokumentiert, was sie zur längsten Höhle Europas macht.

Übrigens: Die Länge ist die am häufigsten verwendete Kenngröße einer Höhle und wird aus der Summe der Messzüge berechnet. Dabei spielt die Neigung keine Rolle: Ein 10 m tiefer Schacht wird demnach als 10 m Länge gewertet. Ein anderer Wert ist der Höhenunterschied zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt. Er wird auch als Tiefe

bezeichnet, was aber streng genommen nur für Höhlen korrekt ist, deren höchster Punkt der Eingang ist.

Den größten Anteil an Karstgebieten haben Südost-Asien und Südchina. Die pittoresken Kegelkarst-Landschaften sind als Tourismus-Aushängeschild bekannt. Neben ausgedehnten Kalkstein-Arealen trägt auch das tropische Klima zur intensiven Verkarstung bei, und nicht zufällig finden sich auch die weltweit größten unterirdischen Hallen in diesem Erdteil. Im Süden Chinas konnte mittels Laserscan im **Miao-Room** des Gebirgs-Höhlensystems ein Hohlraumvolumen von 10,6 Mio. m³ ermittelt werden. Zum Vergleich: Das Wasser der Alten Donau in Wien (durchschnittlich 2,3 m tief) hat nur 35 % dieses Volumens. Im malaysischen Teil der Insel Borneo, im Mulu Nationalpark, befindet sich

die flächenmäßig größte unterirdische Halle, die **Sarawak Chamber**, mit 168.870 m². Zum Vergleich: Das Areal von Natur- und Kunsthistorischem Museum samt den Parkanlagen erstreckt sich nur über 38 % dieser Fläche.

Die längste Höhle der Welt befindet sich in den USA. Das **Mammoth-Cave-System** in Kentucky hat eine Länge von 676 km – um 100 km mehr als die Ost-West-Erstreckung Österreichs. Der Höhenunterschied von 124 m hingegen erscheint im Vergleich zu alpinen Höhlen unbedeu-

Oberfläche nur knapp über dem Meeresspiegel liegt. Die Höhlen dort sind größtenteils wassergefüllt und können nur von Höhlentaucher*innen erforscht werden. Die längste dieser Unterwasserhöhlen ist das **Sistema Sac Actun** mit 372 km Länge.

Die vier tiefsten Höhlen der Welt liegen allesamt auf relativ engem Raum im Westkavkasus in der georgischen Provinz Abchasien. Seit 2017 führt die **Veryovkina-Höhle** mit 2.202 m Höhenunterschied die Liste der tiefsten Höhlen der Welt an. Davor war es



© L. Plan

Bis zu 6 m große Gipskristalle in der Lechuguilla-Höhle in New Mexico (USA)

tend. Die **Lechuguilla-Höhle** in New Mexico ist mit 242 km die längste Karsthöhle der Welt, die nicht durch Kohlensäure, sondern aufgrund spezieller geologischer Gegebenheiten durch Schwefelsäure gebildet wurde. Sie zeichnet sich durch große Gipskristalle und sehr spezielle Höhlenminerale aus.

Auf der Halbinsel Yucatán in Mexiko gibt es ausgedehnte Kalkstein-Areale, deren

die benachbarte **Krubera-Höhle** mit 2.197 m. Pauline Oberender vom NHM Wien war mehrmals an Expeditionen in die viertiefste Höhle, die **Snezhnaya-Höhle**, beteiligt, bei denen die Forscherin bis zu 21 Tage im Untergrund verbrachte.

Weitere bedeutende Karstgebiete und Höhlensysteme mit über 100 km Länge gibt es außerhalb Europas in Brasilien, im Süden Australiens und in Madagaskar. Die nördlichste Höhle der Welt wurde erst in den



© M. Widmer

Typisches Gangprofil im Hölloch, der längsten Höhle der Alpen (Muotatal, Schweiz)

letzten Jahren unter österreichischer Beteiligung dokumentiert. Sie liegt in Nordost-Grönland auf 80° nördlicher Breite und ist ein Relikt aus wärmeren Zeiten, als dort noch ungefrorenes Wasser für die Kalklösung zur Verfügung stand.

In Europa befinden sich bedeutende Karstgebiete in den Alpen, im Jura samt Schwäbischer und Fränkischer Alb, in den Pyrenäen, am Balkan und auf den Britischen Inseln. Herausragend sind die Picos de Europa im Kantabrischen Gebirge im Norden Spaniens. Sie sind nicht größer als das

Tote Gebirge, aber weltweit gibt es in keinem anderen Gebiet so viele tiefe Höhlen: 16 davon erreichen mehr als 1 km Höhenunterschied und vier Höhlen haben über 100 km Länge.

Auch die Wiege der Karstforschung, der Dinarische Karst, der von Triest bis Montenegro reicht, zeichnet sich durch eine Vielzahl von Höhlen aus. In der längsten, dem **Crnopac-System**, sind 55 km an Passagen dokumentiert. Das Crnopac-System liegt im Velebitgebirge in Kroatien, das vor allem wegen seiner tiefen Höhlen bekannt ist. Vier davon haben über 1 km Höhenunterschied. Die längste Höhle der Alpen ist das **Hölloch** im Muotatal in der Zentralschweiz: eine

Überwindung eines Sees im Lamprechtsofen, der tiefsten Höhle Europas (Weißbach/Lofer, Salzburg)



© T. Exel

aktive Wasserhöhle, in der bisher 208 km an Gängen vermessen wurden.

Österreich ist besonders höhlenreich und das Erforschen und Dokumentieren von Höhlen hat hier eine lange Tradition. Die ersten systematischen Aufzeichnungen über Höhlen gehen bis in die 1920er Jahre zurück. Seit damals konnten **18.100 Höhlen** dokumentiert werden. Jährlich werden rund 350 Höhlen neu ins Österreichische Höhlenverzeichnis aufgenommen. Zum Vergleich: In den flächenmäßig 117-mal größeren USA sind nicht einmal viermal so viele Höhlen wie in Österreich dokumentiert. Neben der geringeren Verbreitung an Karstgesteinen in den USA liegt dies auch an der weniger ausgeprägten Tradition zur Höhlendokumentation. Generell spiegeln Karten der Höhlenverbreitung meist eher den Forschungsstand als die tatsächlichen Vorkommen wider.

Alle bis dato vermessenen Höhlenstrecken Österreichs zusammen – also alle Gänge, Schächte und Hallen – machen etwas über 2.450 km aus, was der Strecke von Wien nach Jerusalem entspricht. Die bedeutendsten Höhlen- und Karstgebiete Österreichs liegen in den Nördlichen Kalkalpen, wo Kalk-

gesteine aus der Triaszeit dominieren. Aber auch in den Zentralalpen – hier besonders in der Umgebung von Graz, im Helvetikum in Vorarlberg und in den Südlichen Kalkalpen gibt es lokal viele Höhlen.

Österreich ist aufgrund der Topographie der Alpen besonders reich an tiefen Höhlen. Immerhin gibt es 18 Höhlen mit mehr als 1 km Höhenunterschied. Auch die fünftiefste Höhle weltweit liegt in Österreich: Der **Lamprechtsofen** in den Leoganger Steinbergen in Salzburg weist 1.727 m Höhenunterschied auf. Seine Erforschung begann vom Eingang im Tal, der einen zeitweise aktiven Quellaustritt darstellt und an den sich ein für Besucher erschlossener Teil anschließt. Von dieser Stelle wurde über 1 km Höhenunterschied von unten erklettert; in weiterer Folge wurden von immer höher liegenden Einstiegen Verbindungen zu diesem System entdeckt. Ein Durchstieg vom höchstgelegenen Schachteingang zum Eingang im Tal würde mehrere Tage in Anspruch nehmen und wurde noch nie durchgeführt.

Aber auch bezüglich der langen Höhlen muss sich Österreich nicht verstecken. Immerhin drei Höhlen sind länger als 100 km. Die längste ist das **Schönberg-Höhle** östlich von Bad Ischl im Toten Gebirge, dem ausgedehntesten Karstmassiv Österreichs. Der Zusammenschluss mehrerer ehemals getrennter Systeme führte hier zur Entstehung einer Höhle mit 153 km Länge und 1.061 m Höhenunterschied.



◀ *Gurams-Lake – der tiefste Punkt der Snezhnaya-Höhle 1753 m unter dem höchsten Eingang (Abchasien, Georgien)*

Tropfsteinhöhle „Aven des Pèbres“ in Frankreich ▶



Was ist in Höhlen drinnen?

Kommen wir zurück auf die Löcher. Da in diesen unterirdischen Hohlräumen kein Vakuum herrscht, sind sie teilweise oder vollständig mit Gasen (meist Luft), mit Flüssigkeiten (meist Wasser) oder mit Feststoffen gefüllt. Bei letzteren handelt es sich um Ablagerungen verschiedenster Art und Herkunft. Auf diese soll im Folgenden eingegangen werden.


Im einfachsten Fall sind es Steine, die von der Decke gefallen sind, oft wurden aber auch **Sedimente** wie Ton, Sand oder Kies vom Wasser in die Höhle gespült. Stößt man heute auf einen Anschnitt der Sedimentschichten, so kann man daraus viel über die ehemaligen Bedingungen erfahren: Die Zusammensetzung der Gesteinskörner zeigt, woher sie stammen. Je abgerundeter die Körner sind, desto weiter wurden sie vom Wasser transportiert. Die Größe zeigt, wie schnell das Wasser geflossen ist, denn nur ein Fluss mit viel Energie kann große Steine bewegen. Tonpartikel hingegen, die so fein sind wie Puder, setzen sich nur in stehendem Wasser ab. Vor allem bei Funden, die in Sedimenten eingebettet sind, zum Beispiel Höhlenbärenkno-

chen oder Spuren unserer Vorfahren, ist es immer wichtig, auch die Schichten zu untersuchen, die den Fund umgeben. Erst dieser Zusammenhang liefert wichtige Informationen über den damaligen Lebensraum – nicht nur in der Höhle, sondern auch außerhalb.

In Höhlen kann auch eine Vielzahl unterschiedlicher **Minerale** entstehen. Weltweit sind etwas über 350 Mineralarten aus Höhlen – nicht nur aus Karsthöhlen – bekannt. In Österreich sind es nur rund 40, vor allem aus Karsthöhlen. Das häufigste Mineral ist **Calcit**. Da gelöstes Calciumcarbonat im Wasser transportiert wird, kann es, sobald sich die chemisch-physikalischen Bedingungen ändern, ausfallen und so Calcit entstehen lassen.

Sickert das Wasser zum Beispiel durch eine Fuge in einen Höhlenraum, in dem der Kohlendioxid-Gehalt geringer ist als im Boden darüber oder in den engen Klüften des Gesteins, lagert sich mit jedem Tropfen eine dünne Schicht aus Calcit ab; so können **Tropfsteine** und andere Sinterbildungen wachsen. Für viele Menschen haben





diese glitzernden, formen- und farbenreichen Kristallgebilde eine besondere Schönheit.

Hingegen sind Minerale, die auf ähnliche Weise neu gebildet werden, im Haushalt unangenehm, wenn zum Beispiel im Wasserkocher durch die Temperaturerhöhung der Heizstab verkalkt oder sich durch Verdunstung Kalkränder am Waschbecken bilden. Wenn die Versorgung mit Wasser aus Karstgebieten erfolgt, kann man sich vorstellen, dass diese Minerale von der Bildung der Höhlen im Einzugsgebiet des Karstwassers herrühren. Nutzen wir Grundwasser, so ist der Mineralgehalt noch höher. Würden wir hingegen reines Regenwasser trinken, würden uns wichtige Mineralstoffe fehlen, zum Beispiel das Calcium für den Knochenaufbau.

In Höhlen erfolgen die Calcit-Ausfällungen unter unterschiedlichsten Bedingungen, was zu einem großen Formenreichtum führt. Von der Decke tropfendes Wasser bildet an der Höhlendecke die bekannten **Stalaktiten** und am Boden die **Stalagmiten**; beide können zu **Tropfsteinsäulen** zusammenwachsen. **Wand-** oder **Bodensinter** entstehen, wenn ein Wasserfilm flächig abrinnt. Haftwasser, das entlang einer schrägen Decke fadenförmig abfließt, erzeugt einen kleinen länglichen Wulst, der laufend nach unten verlängert wird. Dadurch entstehen dünne, geschwungene Sinter, die als **Sinterfahnen** bezeichnet werden. **Sinterperlen** bilden sich in Wasser, das von Tropfen oder einer leichten Strömung

bewegt wird. In diesen kleinen Kugeln sind die Schichten schalig angeordnet. Die eigenartigsten Formen heißen **Excentriques**, das sind filigrane würmchenartige Gebilde, die der Schwerkraft trotzen und scheinbar chaotisch aus der Wand, aus Sinterflächen oder von Tropfsteinen wachsen. Ihre Entstehung ist nicht restlos geklärt.

Salopp ausgedrückt hat der Calcit einen Zwilling Bruder, den **Aragonit**. Beide bestehen aus Calciumcarbonat, sind also chemisch ident, unterscheiden sich aber in der geometrischen Anordnung der Atome im Kristallgitter. Aragonit ist ebenfalls häufig in Höhlen anzutreffen und kann auch Tropfsteine ausbilden. Speziell sind aber reinweiße, filigrane, den Excentriques ähnliche Gebilde, die sogenannten **Eisenblüten**, oder nadelige Kristalle.

Das dritthäufigste Mineral in Kalkstein-Höhlen ist der **Gips**. Er besteht aus Calciumsulfat; dieses bildet sich zum Beispiel, wenn das aus Eisen und Schwefel bestehende Mineral Pyrit, das in manchen Kalksteinarten eingeschlossen ist, mit Sauerstoff in Kontakt kommt. So entsteht Schwefelsäure, die den Calcit in Gips umwandelt. Dabei wird das Volumen ver-

Kleine Stalaktiten und Sinterröhrchen in den Rauchspalten (Kirchberg/Wechsel, Niederösterreich) ▲

◀ *Bäumchen aus nadeligen Aragonit-Kristallen (Lechuguilla-Höhle, New Mexico, USA)*



größert und der Gips wird aus der Wand herausgepresst, was zu **lockenartigen Kristallen** führen kann.

Anfang der 2000er Jahre erschienen in den Medien Fotos von bis zu 11 m langen **Gipskristallen**, auf denen vergleichsweise kleine Höhlenforscher stehen. In einem Bergwerk in Mexiko wurden bis dahin geflutete Hohlräume im Kalkstein geöffnet; dort befinden sich die größten bisher bekannten Gipskristalle. Sie sind über einen Zeitraum von vielen 100.000 Jahren gewachsen.

Es gibt aber auch viele Minerale, bei denen man im ersten Augenblick nicht an Höhlenminerale denkt, vor allem, wenn es

sich nicht um Karsthöhlen handelt. Einige der großen **Bergkristalle** aus den Alpen stammen aus befahrbaren Klüften. Diese sind kilometertief unter der Erdoberfläche im Zuge der Gebirgsbildung aufgerissen und waren ebenfalls mit wässrigen Lösungen gefüllt. Diese waren allerdings nicht an Calciumcarbonat, sondern an Siliziumdioxid übersättigt. Durch sehr langsame Ausfällung konnten große Quarzkristalle entstehen.

Auch besonders große **Amethyst-Drusen** können an die Dimensionen von Höhlen heranreichen. Es handelt sich um Gasblasen in vulkanischen Gesteinen, in denen Quarzkristalle von den Wänden in den Hohlraum wachsen. Die violette Färbung rührt von fein verteilten Eisenatomen und von radioaktiver Strahlung her.

Ablagerungen in Höhlen können auch biologischen Ursprungs sein. Die Palette reicht von eingeschwemmtem Holz über Reste toter Tiere bis zu Tierkot. Große Kotanhäufungen stammen meist von Fledermäusen oder Vögeln. Da dieser sogenannte **Guano** reich an Phosphat und Nitrat ist, wurden in etlichen Höhlen Nord- und Südamerikas Ablagerungen von vielen Metern Mächtigkeit abgebaut und als Dünger verwendet. Eine Zeit lang – vom Ersten Weltkrieg bis 1923 und kurz nach dem Zweiten Weltkrieg – wurde auch in Österreich Phosphatdünger in Höhlen abgebaut.

Schatzkammern der Wissenschaft

Dass Höhlen wahre Schatzkammern für die Wissenschaft sind, hat mehrere Gründe. Höhlen sind Orte, die im Gegensatz zur Erdoberfläche meist nur wenigen Änderungen unterworfen sind; dadurch können Informationen über lange Zeit erhalten bleiben. Das macht Höhlen zu Archiven für die Landschafts- und Klimaentwicklung und mitunter auch für die Erdbebenforschung.

Höhlen waren schon immer auch **Rückzugsort** für Tiere und Menschen. Der Mensch nutzte sie außerdem für kultische Handlungen, wovon Höhlenmalereien und Opferstätten zeugen. Senkrechte, schachtartige Einstiege können zur Falle werden – vor allem, wenn sie mit Vegetation oder Schnee überdeckt sind. Höhlensedimente sind basisch bis neutral, denn die im Boden vorkommenden Säuren haben ihre Lösungskraft schon am Kalk aufgebraucht. Das ist gut für die Erhaltung von Knochen.

Höhlen sind aber auch außergewöhnliche **Ökosysteme** und beherbergen speziell angepasste Tierarten. Viele davon sind endemisch, das heißt, sie kom-

men nur in einem sehr eingeschränkten Areal, mitunter gar nur in einer einzigen Höhle vor. Manche dieser Höhlenbewohner mit ihrer Anpassung an die Dunkelheit und an die kargen Lebensbedingungen sind ideal, um die Mechanismen der Evolution zu untersuchen.

Für die **Hydrologie** stellt ein unterirdisches Fließsystem eine Black Box dar – besonders, wenn es um die Trinkwasserversorgung geht. Man kann in einem Karstgebiet relativ leicht messen, wie viel Niederschlag oben hineinrinnt und wie viel bei einer Quelle herauskommt; aber was dazwischen passiert, ist unbekannt. Die meisten hydrologischen Modellvorstellungen basieren nur auf dem Input und dem Output. Höhlen bieten aber die Möglichkeit, das Wasser im Untergrund zu beobachten und auch dort Messungen durchzuführen. So können effizientere hydrogeologische Modelle entwickelt und wichtige Erkenntnisse zum Schutz des Trinkwassers gewonnen werden.

◀ *Gipslocke in der Flower Cave (Neuseeland)*

Messung des Durchflusses im Bach der Snezhnaya-Höhle (Abchasien, Georgien) ▶



Höhlen als Archive der Klimageschichte

Viele Höhlen sind sehr alt. Bei den hoch gelegenen Höhlensystemen der Ostalpen geht man davon aus, dass sie vor etlichen Millionen Jahren gebildet wurden. Dass Höhlen oftmals nach ihrer Entstehung **kaum Veränderungen** unterworfen sind, steht im krassen Gegensatz zur Erdoberfläche, besonders in Gebirgsregionen. Die Erosion von Gestein durch Flüsse, deren Ablagerungen, Massenbewegungen wie Murenabgänge, aber auch langsames Hangkriechen und ganz besonders durch die Gletscher der Kaltzeiten

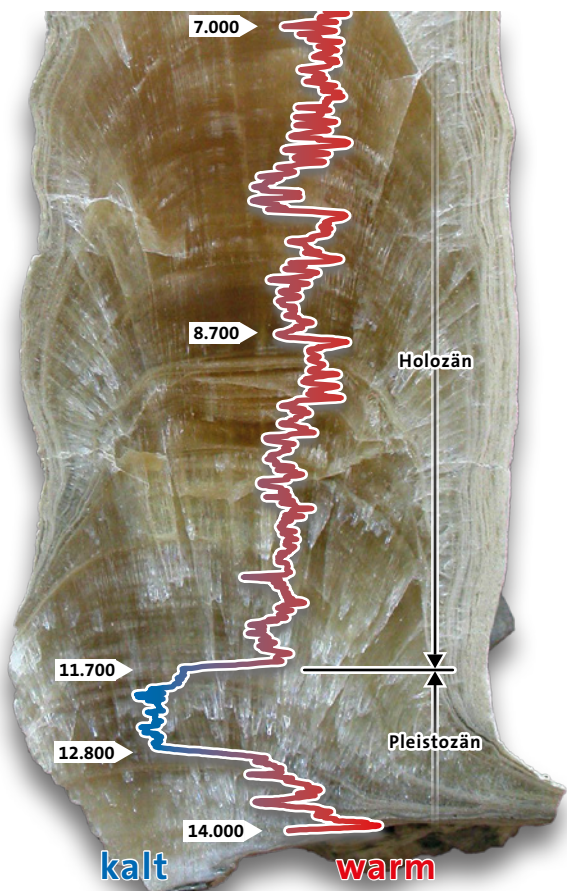
fürten zur laufenden Veränderung der Erdoberfläche. Dadurch wurde Information über die Vergangenheit vernichtet: Nicht nur, dass wir nicht mehr wissen, wie die Landschaft ausgesehen hat, sondern es wurden auch Spuren von Lebewesen (inklusive unserer Vorfahren) meist rasch wieder beseitigt.

Höhlen hingegen sind wie **Zeitkapseln** und können die Informationen der Vergangenheit über lange Zeiträume konservieren. Allerdings braucht es meist sehr spezielle Techniken, um diese Informationen entschlüsseln zu können.

Besonders bei der Frage, bis zu welchem Grad der derzeitige, weltweite Temperaturanstieg vom Menschen verursacht wurde, ist man auf Klimadaten aus der Vergangenheit angewiesen. Denn die systematischen Klimaaufzeichnungen mit physikalischen Instrumenten reichen maximal einige hundert Jahre zurück. Auch die Paläoklimaforscher*innen können nicht etwa auf versteinerte Thermometer zurückgreifen, sondern begeben sich wie Detektive auf Spurensuche und versuchen Hinweise auf bestimmte Klimaparameter zu finden. Wichtige Langzeitarchive sind Tiefsee-Sedimente und das Eis von Grönland und der Antarktis. Gerade aber im Alpenraum haben die ausgedehnten Gletscher der Kaltzeiten, die mächtigsten Zeugen des wechselhaften, meist kühleren Klimas der vergangenen Jahrhunderttausende, die meisten Spuren zerstört.

Tropfsteine hingegen blieben im Schutz der Höhlen vielerorts bestehen. Sie haben überdies den Vorteil, dass sie sehr langsam über lange Zeiträume hinweg wachsen und dabei Signale aus der Atmosphäre und

Aufgeschnittener Stalagmit mit Klimakurve zwischen 14.000 und 7.000 Jahren vor heute



© C. Spötl



Entnahme eines 8 mm dicken Bohrkerns aus einem Stalagmiten zur Altersdatierung

der Umwelt oberhalb der Höhle speichern. Überträger der Klima-Signale ist vorwiegend das Wasser, das als Niederschlag durch das Gestein in die Höhle sickert.

Neben anderen im Tropfstein gespeicherten Informationen wird meist das Verhältnis der beiden Sauerstoffisotope ^{16}O und ^{18}O herangezogen. Diese stabilen, also nicht radioaktiven, Isotope sind unterschiedlich schwer, was zu einer temperaturabhängigen Veränderung des Verhältnisses im Wasserkreislauf führt. ^{16}O und ^{18}O werden mit jeder dünnen Schicht in den Tropfstein eingebaut, da das Mineral Calcit aus Calcium, Kohlenstoff und Sauerstoff besteht. Zur Untersuchung werden meist Bohrkern oder polierte Schnitte von Stalagmiten verwendet, aus denen in kleinen Abständen winzige Proben entnommen und analysiert werden. Aus dem $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnis kann dann ähnlich einer **Fieberkurve** die zeitliche Veränderung des lokalen Klimas rekonstruiert werden.

Wichtig ist dabei, zu wissen, wann die betreffenden Tropfsteinschichten abgelagert wurden. Diese Datierung erfolgt mit der

Uran-Thorium-Methode. Sie beruht auf dem radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium; Uran wird als Spurenstoff in die Höhlensinter eingebaut, Thorium in den Höhlensintern aus Uran gebildet. Damit können Tropfsteine und andere Höhlensinter bis zu einem Alter von einer halben Million Jahre zuverlässig datiert werden.

In Österreich wird **Paläoklimaforschung** anhand von Tropfsteinen vor allem von Geolog*innen der Universität Innsbruck betrieben. Dabei hat sich zum Beispiel gezeigt, dass die aus grönländischen Eisbohrkernen ermittelte Klimakurve der vergangenen rund 125.000 Jahre fast vollkommen mit den Klimakurven alpiner Tropfsteine übereinstimmt. Der Vorteil der Höhlensinter ist jedoch, dass sich diese deutlich genauer datieren lassen als das polare Eis. Zudem existiert auf der gesamten Nordhalbkugel der Erde kein Eis, das älter als 125.000 Jahre ist, während es eine Reihe von Höhlen gibt, aus denen deutlich ältere Tropfsteine bekannt sind.



© L. Plan

Durch eine junge tektonische Bewegung zerscherter Höhlengang (Obir-Tropfsteinhöhlen, Kärnten)

Erdbebenforschung in Höhlen

Wie entsteht eigentlich ein Erdbeben? Die Drift der Kontinentalplatten führt im obersten Teil der Erdkruste zu Verschiebungen, die entlang sogenannter „**spröder Störungen**“ stattfinden. Die Bewegung an den Störungen kann entweder langsam und eher gleichmäßig ablaufen, oder es baut sich über einen langen Zeitraum Spannung auf, die dann zu einer abrupten Verschiebung führt. Letztere wird an der Erdoberfläche als Erdbeben wahrgenommen. Erdbeben lassen sich zwar nach wie vor nicht vorhersagen, aber anhand vergangener Ereignisse kann man zumindest abschätzen, mit welcher Bebenstärke in einem Gebiet zu rechnen ist. Aufgrund dieser geschätzten Erdbebengefährdung werden zum Beispiel Vorschriften für erdbebensicheres Bauen erteilt.

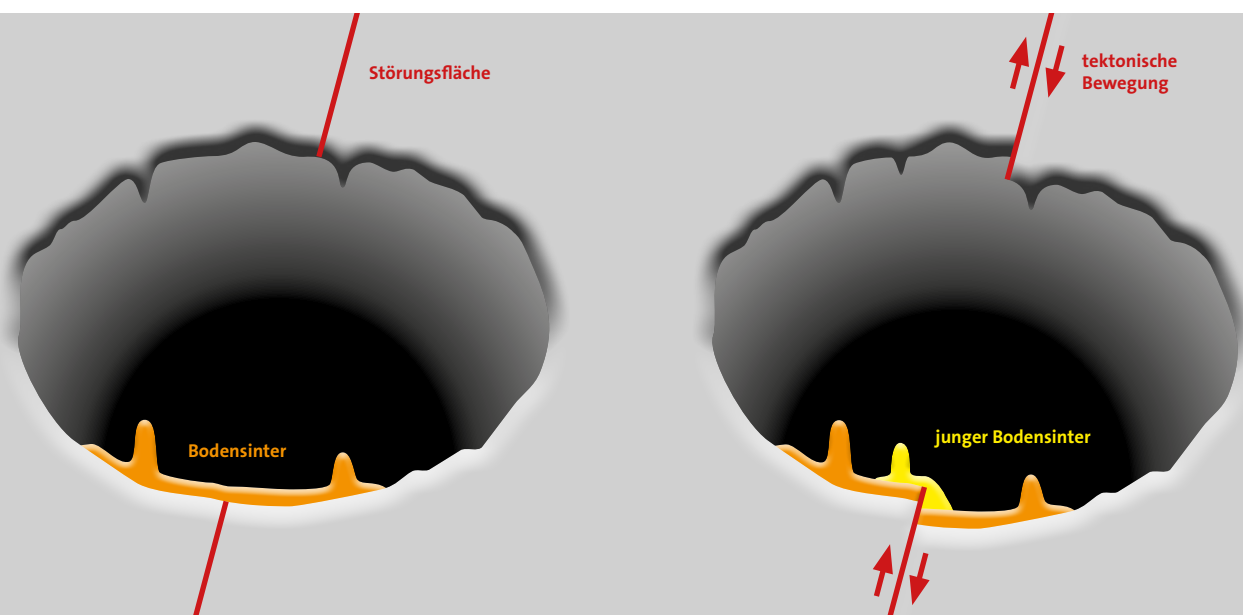
Das Problem dabei ist ähnlich wie beim Paläoklima: Die Aufzeichnungen mit Messinstrumenten wie Seismometern reichen nur etwas über 100 Jahre zurück. Manche und vor allem starke Erdbeben wiederholen sich aber nur in Abständen von vielen 100 Jahren. Somit ist es möglich, dass sie bei der Ermittlung der Erdbebengefährdung nicht berücksichtigt wurden. Auch hier werden die **Spuren vergangener Erdbeben** ausgewertet, die an der Erdoberfläche schon längst von anderen geologischen Prozessen verwischt, aber in Höhlen konserviert wurden.

Forscher und Forscherinnen des NHM Wien haben zu diesem Thema in Österreich und Griechenland geforscht. In etlichen Höhlen wurden Raumformen entdeckt, die ursprünglich durch Lösung

entstanden sind, aber durch Störungen nachträglich versetzt wurden. In diesem Fall spricht man von "aktiven Störungen", die sich auch heute noch jederzeit bewegen könnten. Störungen können nämlich über etliche Millionen Jahre immer wieder aktiv sein, bevor sie zur Ruhe kommen. Wenn sie also jünger als Höhlen sind, ist dies ein Beleg für ihr geringes Alter.

In einigen Höhlen fanden sich zudem auch deformierte Tropfsteine oder Sinterbildungen. Wenn sich über die Bruchstellen wieder neue Sinterschichten abgelagert hatten, dann war es möglich, die Schicht vor und nach dem Ereignis mittels der Uran-Thorium-Methode zu datieren und somit den Zeitpunkt einzugrenzen. Eine Schwierigkeit bestand aber darin, zwischen langsam-kriechenden und abrupten Störungsbewegungen, die Erdbeben verursachen, zu unterscheiden. In einigen Fällen gab es jedoch Indizien, die ehemalige, zum Teil starke Erdbeben sehr wahrscheinlich machen.

Höhlen bieten aber noch eine andere Möglichkeit zur Forschung an Störungsbewegungen und Erdbeben: An aktiven Störungen können kleinste Bewegungen gemessen werden, die von Spannungen in der obersten Erdkruste ausgehen. An der Erdoberfläche sind solche Messungen nicht möglich, da die Materialausdehnung und -schrumpfung durch Temperaturänderung größer ist als die Bewegung an der Störung selbst. Nur Höhlen mit ihren **konstanten Bedingungen** bieten diese Möglichkeit, denn im Inneren ausgedehnter Höhlen schwankt die Temperatur über das ganze Jahr meist deutlich weniger als 1 °C. Erst diese geringe Temperaturschwankung ermöglicht es, Störungsbewegungen in der Größenordnung von hundertstel Millimetern mit speziellen Instrumenten aufzuzeichnen. Derartige Messungen sollen zu mehr Wissen über die Verteilung der Spannungszustände führen und in weiterer Folge auch dazu, Erdbeben besser zu verstehen und vielleicht eines Tages vorhersagen zu können.



Der durch Lösung gebildete Gangquerschnitt wird bei einem tektonischen Ereignis zerschert.

Frühe Höhlenfunde am anderen Ende der Welt

Eine ungewöhnliche Episode der österreichischen Höhlenforschung ergab sich durch die Weltumsegelung der **Fregatte Novara** (1857–1859). Vordergründig war die von der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften

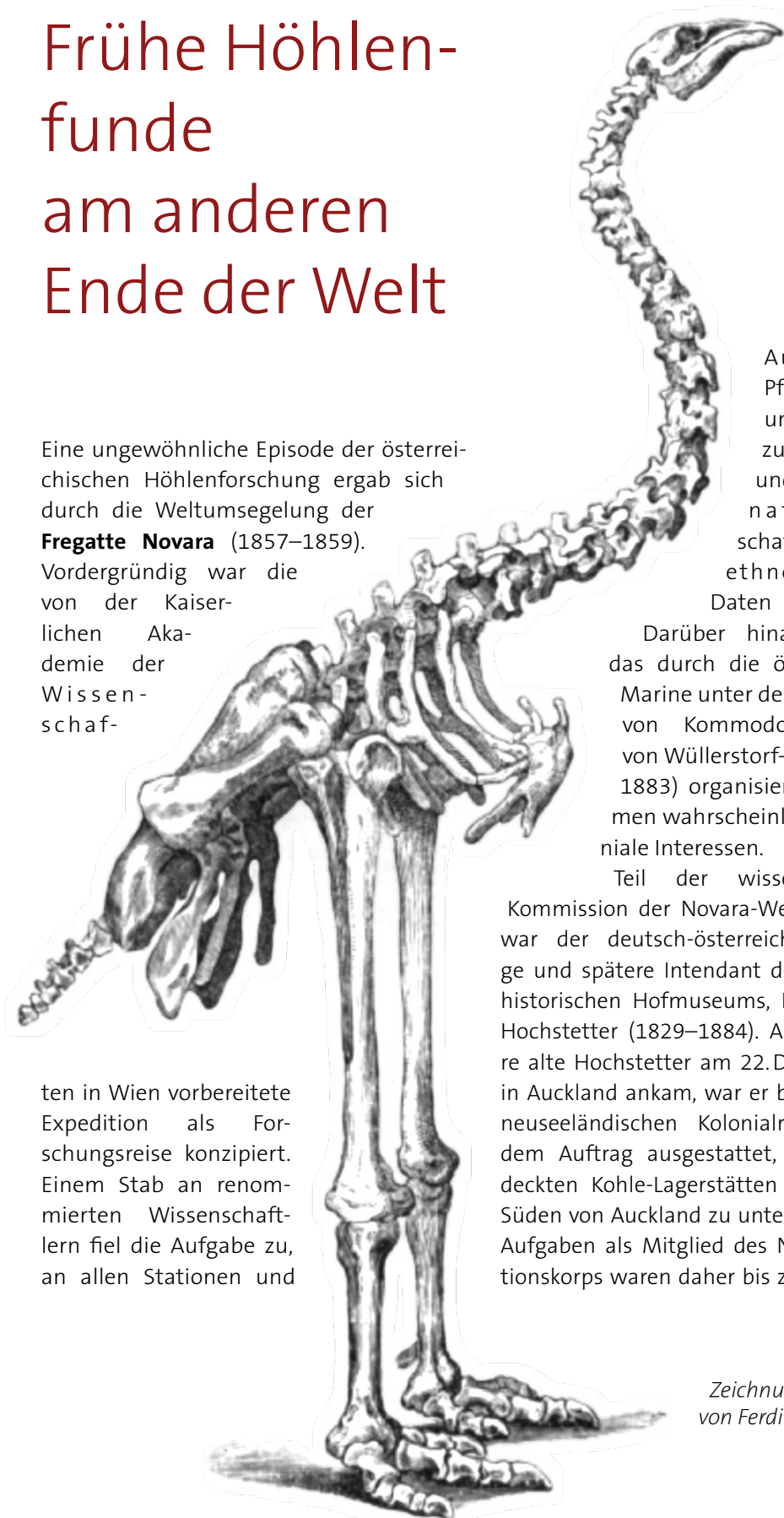
in Wien vorbereitete Expedition als Forschungsreise konzipiert. Einem Stab an renommierten Wissenschaftlern fiel die Aufgabe zu, an allen Stationen und

Aufenthalten Pflanzen, Tiere und Gesteine zu sammeln und detaillierte naturwissenschaftliche und ethnographische Daten zu erheben.

Darüber hinaus verfolgte das durch die österreichische Marine unter dem Kommando von Kommodore Bernhard von Wüllerstorff-Urbair (1816–1883) organisierte Unternehmen wahrscheinlich auch koloniale Interessen.

Teil der wissenschaftlichen Kommission der Novara-Weltumsegelung war der deutsch-österreichische Geologe und spätere Intendant des k. k. Naturhistorischen Hofmuseums, Ferdinand von Hochstetter (1829–1884). Als der 29 Jahre alte Hochstetter am 22. Dezember 1858 in Auckland ankam, war er bereits von der neuseeländischen Kolonialregierung mit dem Auftrag ausgestattet, die neu entdeckten Kohle-Lagerstätten bei Drury im Süden von Auckland zu untersuchen. Seine Aufgaben als Mitglied des Novara-Expeditionskorps waren daher bis zur Abreise am

Zeichnung eines Moa-Skeletts von Ferdinand von Hochstetter



2. Oktober 1859 ruhend gestellt. Österreichische Geologen gehörten zu dieser Zeit zu den besten weltweit; so gesehen war es nicht weiters ungewöhnlich, dass das expandierende Britische Empire Hochstetters geowissenschaftliche Expertise zukaufte.

Neben seinen Arbeiten für die Kolonialregierung fand Hochstetter Zeit für detaillierte geologische Untersuchungen in der Region von Auckland und Nelson. Begleitet wurde er dabei meist von seinem Freund, dem deutschen Geologen Julius Ritter von Haast (1822–1887). Gemeinsam reisten die beiden im Sommer 1859 in die Provinz Nelson, wo sie in den Karsthöhlen des Aorere-Tals auf fossile **Moa-Knochen** stießen und die Reste zu bergen begannen. Während Hochstetter sich schon bald wieder seinen geologischen Untersuchungen widmete, startete Haast umfangreiche Grabungsarbeiten und förderte mehrere vollständige Moa-Skelette zutage. Die Entdeckung war gewiss nicht zufällig, da die ausgestorbenen Riesenlaufvögel Neuseelands damals zu den heißesten Themen der Paläontologie zählten. Nur wenige Jahre zuvor hatte der britische Paläontologe Sir Richard Owen (1804–1892) die

Vogelgattung erstmals wissenschaftlich beschrieben und mit dem Namen *Dinornis* benannt. Seitdem folgte Publikation um Publikation, die sich mit der Systematik der geheimnisvollen Tiere befassten. Für Haast war es daher wichtig, einige wertvolle Skelette für Neuseeland zu beschaffen und die Funde später in dem von ihm gegründeten Canterbury Museum in Christchurch auszustellen. Auch Wien sollte nicht leer ausgehen. Hochstetter reiste noch 1859, natürlich ohne fossile Knochen, weiter nach Sydney. Die Skelette gelangten daher erst

deutlich später nach Wien, wo sie 1876 als Geschenke von Hochstetter und als Tauschobjekte von Haast in den Inventarbüchern der Geologisch-Paläontologischen



Auf Basis eines 3D-Scanns erstellte Ansicht des Moa-Skeletts.

Abteilung vermerkt wurden. Ebenfalls aus den Grabungen von Haast stammen die Skelettteile, die 1878 aus Sydney ans Naturhistorische Museum geschickt wurden.

Doch wie kam es zu der ungewöhnlichen Ansammlung an Moa-Knochen in Höhlen? Die beiden Geologen waren überrascht, die Skelette weitgehend im Verband und nicht als lose verstreute Knochen aufzufinden. Damit war klar, dass es sich nicht um Essensreste der Maori handeln konnte. Da die Kadaver auch nicht zerteilt und verschleppt waren, konnte man annehmen, dass die toten Vögel auch allen Zugriffen durch Aasfresser entzogen gewesen waren. Die Höhlen, die Haast später Hochstetter-Höhle, Stafford-Höhle und Moa-Höhle nannte, entstanden als Karsthöhlen in oligozänem Kalkstein, der von dichten Wäldern bedeckt war. Diese durchstreiften die tagaktiven Moas über zwei Millionen Jahre lang, um Blätter und Früchte zu fressen. Da es damals in Neuseeland keine Raub-

tiere gab, hatten die flugunfähigen Moas kaum natürliche Feinde. Höhlen hatten für die Moas daher als Rückzugs- und Schutzraum vermutlich keine Bedeutung. Auch die Jungtiere wurden nicht in den Höhlen aufgezogen. Vielmehr dürften die Tiere Opfer geologischer **Fallen** geworden sein. Immer wieder stürzten Moas in die Hohlräume des Karstsystems, die durch üppige Vegetation gut getarnt waren, und verhungerten dort.

Der gute Erhaltungszustand der Skelette liegt auch am geringen Alter der Funde. Die meisten Knochen stammen aus geologisch jungen Höhlensedimenten, die sich erst in den letzten 30.000 Jahren gebildet haben. Mit der Landung der Polynesier auf Neuseeland vor mehr als 700 Jahren begann der Untergang der Riesenlaufvögel, die vermutlich bereits im 15. Jahrhundert ausgerottet waren. Die jüngsten Moas stammen also aus historischer Zeit.



◀ Zeichnung eines Moa-Skeletts von Ferdinand von Hochstetter

Eingang der Tummit-Tomo-Höhle auf Neuseeland ▶



Neue Tierarten aus tiefen Höhlen

Höhlen sind einzigartige Ökosysteme, in denen Dunkelheit, konstante Luftfeuchtigkeit und Temperatur für ein gleichmäßiges Milieu sorgen. Gleichzeitig machen Nährstoffarmut und teilweise niedriger Sauerstoffgehalt sie zu äußerst rauen, selektiven Lebensräumen. Vielen Organismen ist es jedoch gelungen, unter diesen extremen Bedingungen zu überleben. Tiere, die dauerhaft in Höhlen leben, werden in der Wissenschaft als **Troglobionten** bezeichnet, nach dem griechischen Wort „*Troglodyt*“ für Höhlenbewohner. Um sich anzupassen, haben diese Spezialisten eine Reihe von typischen morphologischen Merkmalen, aber auch spezifischen Verhaltensweisen entwickelt. Die genetischen Veränderungen sind ein langsamer Prozess, der jedoch durch zusätzlichen Selektionsdruck

durch die nährstoffarme Umwelt beschleunigt werden kann.

Die äußerlichen Veränderungen der Höhlentiere sind am einfachsten zu untersuchen. Dazu zählen der Verlust der Pigmente in der Haut, die teilweise oder vollständige Einschränkung des Sehvermögens sowie die Verlängerung der Gliedmaßen.

Um neue Arten identifizieren und beschreiben zu können, braucht es umfangreiches Vergleichsmaterial – zweifellos eine Stärke des NHM Wien – und hochspezialisierte Wissenschaftler*innen. Im Folgenden soll auf Myriapoden eingegangen werden. Myriapoden sind flügellose, an Land lebende Gliederfüßer, die vor allem in Wäldern vorkommen; **Hundertfüßer** (Chilopoda) und **Tausendfüßer** (Diplopoda) sind die häufigsten Myriapoden-Gruppen. Rund 20.000 Serien verschiedener Myriapoden-Arten umfasst

Ein höhlenbewohnender Hundertfüßer in der Piskovica-Höhle in Kroatien





© J. Bedek

Geophilus hadesi, ein Hundertfüßer, der in der Lukina-Jama-Trojama in 980 m Tiefe gefunden und dokumentiert wurde.

die Sammlung des NHM Wien. Davon sind rund 70 Arten Höhlenbewohner; alleine in den letzten fünf Jahren wurden unter Beteiligung des NHM Wien fünf neue troglobionte Myriapoden-Arten beschrieben.

Hundertfüßer zählen zu einer vielfältigen Gruppe mit ca. 3.300 beschriebenen Arten, deren Vertreter Giftklauen besitzen, um ihre Beute zu erlegen. Zu den Tausendfüßern gehören etwa 12.000 Arten; die meisten davon ernähren sich von totem organischem Material. Bisher wurden 60 Arten von troglobionten Hundertfüßern und einige hundert Arten von troglobionten Tausendfüßern beschrieben, vor allem aus Höhlen im Dinarischen Karst sowie in den Pyrenäen in Frankreich und Spanien, aber auch aus Nordamerika, China und Mexiko. Viele dieser Arten weisen spektakuläre Veränderungen auf. Drei bemerkenswerte Beispiele neuer Hundertfüßer-Arten werden hier vorgestellt.

Der höhlenbewohnende Hundertfüßer *Geophilus hadesi*, benannt nach dem griechischen Gott der Unterwelt, wurde in den tiefen Schachthöhlen im kroatischen Velebit-Gebirge entdeckt. Diese Höhlen sind ein Hotspot der troglobionten Artenvielfalt und beherbergen rund 60 Arten von wirbellosen Tieren wie Muscheln, Schnecken, Weichtie-

ren, Vielborstern, Milben, Asseln, Flohkrebse, Springschwänze, Doppelschwänze, Tausendfüßer, Käfer, etc. *Geophilus hadesi* wurde erstmals aus dem Crnopac-Höhlensystem im südöstlichen Velebit-Gebirge beschrieben, wo er in einer Tiefe von 250 m gefunden wurde. Weitere Individuen wurden im nördlichen Velebit in der Lukina-Jama-Trojama, der 16. tiefsten Höhle der Welt (-1.431 m), beobachtet. In dieser Höhle wurde ein Exemplar in einer großen Halle in 980 m Tiefe gesammelt und ein weiteres an einer unzugänglichen Stelle auf -1.100 m beobachtet. Letzteres ist der weltweit tiefste bisher bekannte Nachweis eines Hundertfüßers. Diese Art wurde unter Beteiligung von Nesrine Akkari, einer Forscherin des NHM Wien, beschrieben; der Paratypus, also ein Exemplar des originalen Vergleichsmaterials des Tieres, ist in der Sammlung des NHM Wien vertreten.

Im Gegensatz zu den meisten Hundertfüßern der Ordnung *Geophilomorpha* (rund 1.100 Arten), die nur gelegentlich in Höhlen Schutz suchen, gilt *Geophilus hadesi* als echter Troglobiont. Die Art zeichnet sich durch ungewöhnlich lange Fühler, Rumpfssegmente und Beinklauen aus. Neben *Geophilus hadesi* gibt



Der Fundort von *Leucogeorgia profunda* befindet sich in 2.204 m Tiefe in der Veryovkina-Höhle (Abchasien, Georgien).

es nur eine weitere troglobionte *Geophilomorpha*-Art: *Geophilus persephones* ist nach der Göttin der Unterwelt benannt und wurde erstmals in den 1990er Jahren in der Höhle Pierre Saint-Martin in Frankreich entdeckt. Die Beschreibung und Untersuchung dieser Art basieren auf einem von nur drei Exemplaren, das in der Myriapoda-Sammlung des Naturhistorischen Museums Wien aufbewahrt wird.

Die Movile-Höhle in Rumänien ist ein weltweit einzigartiges Ökosystem, das seit 5,5 Millionen Jahren vollständig von der Außenwelt isoliert ist. Die Lebensgrundlage in dieser Höhle ist die Chemosynthese, also die Energiegewinnung methan- und schwefeloxidierender Bakterien durch chemische Prozesse. Sie setzen Nährstoffe für Pilze und Höhlentiere entlang der Nahrungskette frei. Die Höhle wurde erst 1986 entdeckt und seitdem nur von einer Handvoll Menschen besucht. Erstaunlicherweise beherbergt die Movile-Höhle trotz ihrer harten Lebensbedingungen eine vielfältige und einzigartige Fauna von 51 wirbellosen Tierarten. Davon sind 34 endemisch und hochgradig angepasst. Beispiele sind ein Wasserskorpion, Spinnen, ein Höhlenegel und eine Assel.

Dort wurde auch ein Hundertfüßer entdeckt, doch lange Zeit ging man davon aus, dass es sich um den in Europa weit verbreiteten, an der Erdoberfläche lebenden *Cryptops anomalans* handelt, einen Verwandten des Skolopenders. Um dies zu überprüfen, wurden

einige Exemplare von Höhlenforscher*innen gesammelt und morphologisch und genetisch untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass es sich um eine neue Art handelt. Der neu beschriebene Hundertfüßer aus Movile ist mit bis zu 5,2 cm Länge das größte bekannte Lebewesen dieser Höhle. Außerdem ist er ein giftiger Räuber. In Anbetracht seiner herausragenden Stellung in diesem unterirdischen System erhielt die Art den Namen *Cryptops speleorex* oder „König der Höhle“; auch sie ist durch einen Paratypus in der Sammlung des NHM Wien vertreten.

Das Arabika-Massiv im Westkaukasus birgt die tiefsten Höhlen der Welt. Sie beherbergen auch eine besondere und einzigartige Fauna, die tiefsten unterirdischen Lebensgemeinschaften der Welt. Die Veryovkina- und die Krubera-Höhle – beide rund 2.200 m tief – beheimaten unter anderem den Tausendfüßer *Leucogeorgia profunda*. Diese Art weist klassische Merkmale eines dauerhaften Höhlenbewohners auf: sie ist augen- und pigmentlos. Besonders sticht sie aber durch ihre stark veränderten Mundwerkzeuge hervor, bei denen die Backenbereiche der Unterkiefer (Mandibeln) reduziert und die kammartigen Lamellen stark vergrößert sind. Die Tiere ernähren sich also nicht mehr von festen Stoffen, sondern filtern feine Sedimentpartikel. Sie wurden sogar unter Wasser gefangen, wo sie sich trotz starker Strömung nicht oder kaum bewegten. Die verlängerten Fußklauen sorgen für eine besonders gute Haftung auf Unterwassersedimenten, während die

Die Umgebung des Einstiegs des Lukina-Schachts ist stark verkarstet. ►

kompakte Körperform, der flache Kopf und die stark modifizierten Mundwerkzeuge eine allgemeine Anpassung an eine amphibische Lebensweise darstellen.

Nachdem *Leucogeorgia profunda* bereits in der Krubera-Höhle und in der Sarma-Höhle nachgewiesen wurde, konnten im August 2019 Exemplare dieser Art auch in der Vryovkina-Höhle auf -2.204 m gesammelt werden, am letzten trockenen Punkt der Höhle, in der Nähe des Siphonsees „Nemo's last stand“. Damit ist *Leucogeorgia profunda* das tiefste jemals gefundene terrestrische Tier.

Diese bedeutende wissenschaftliche Entdeckung wurde vom Mastermind der Vryovkina-Forschung, dem verstorbenen Russen Pavel Demidov (1971–2020), gemacht. Ein Exemplar wurde von Dragan Antić der NHM-Sammlung gestiftet.

In österreichischen Höhlen wurden Myriapoden bisher kaum untersucht, und es sind nur wenige Arten aus Höhlen bekannt. Diesbezügliche Forschungen und Wissenschaftskooperationen sind geplant und führen vielleicht zur Entdeckung neuer troglobionter Arten in Österreich.





SW 22.09.06
GRABUNGSST. 2
QUADRANT E7
120 / 130 CM

N

Zwerg und Riesen – Zeugnis ausgestorbener Säugetiere

Höhlen sind fantastische Archive eiszeitlichen Lebens. In einigen alpinen Höhlen sammelten sich über Jahrtausende hinweg unzählige Knochen von Höhlenlöwen, Höhlenhyänen, Fledermäusen und zahlreichen anderen Wirbeltieren an. Für die meisten Arten boten die Höhlen zeitweise Schutz, etwa für die Höhlenbären, die ihren Winterschlaf in Höhlen verbrachten. Etliche Funde stammen jedoch von Kadavern, die durch Raubtiere wie Hyänen und Löwen als Beute in die Höhlen verschleppt wurden.

Zu den bekanntesten und am besten durch Höhlenfunde dokumentierten Tiergruppen zählen die vor rund 25.000 Jahren ausgestorbenen **Höhlenbären** (*Ursus spelaeus*). Diese Pflanzenfresser wurden um etwa die Hälfte größer als die heutigen Braunbären; man nimmt an, dass männliche Höhlenbären bis zu 1,5 Tonnen schwer wurden. Das NHM Wien beherbergt die größte Sammlung fossiler Höhlenbärenknochen aus unterschiedlichen Phasen des Pleistozäns. Die exzellente Erhaltung ermöglicht noch Jahrtausende nach dem Tod der Tiere genetische Untersuchungen des Erbmaterials, das in den Zähnen und Knochen vor Zerfall und schädlichen Umwelteinflüssen geschützt war. Die Sammlungen sind daher Basis für aktuelle Forschungen zur Evolution der Tiere und helfen bei der Rekonstruktion der Verbreitung der verschiedenen Höhlenbär-Arten.

Eines der bedeutendsten Exponate des NHM Wien ist das ca. 35.000 Jahre alte, vollständige Skelett eines jungen Höhlenbären aus der Bärenhöhle im Hartelsgraben bei Hieflau in der Steiermark. Der fragile Schädel zeigt, dass sich der junge Bär noch im Zahnwechsel befand. Das Tier war erst rund sieben Monate alt, als es starb. Die Sterblichkeit bei jungen Höhlenbären, die stets im Winter geboren wurden, war in den ersten Lebenstagen und -wochen am höchsten. Jungtiere, die im anschließenden Frühjahr oder Sommer verendeten, blieben kaum erhalten, da sich die Tiere in der warmen Jahreszeit nur selten in Höhlen aufhielten. Skelette von neugeborenen Höhlenbären und von ausgewachsenen Tieren, die während des Winterschlafs verendeten, sind zahlreich. Das Skelett des Bärenkindes dagegen ist eine Sensation.

Ein weiterer bedeutender Höhlenfund war bereits bei der Eröffnung des Naturhistorischen Museums am 10. August 1889 fixer Bestandteil der Schausammlung. Das vollständige Skelett eines mächtigen **Höhlenlöwen** aus der Sloupsko-šošůvské-Höhle in Tschechien war ein Geschenk des Prager Arztes, Geologen und Speläologen Heinrich Wankel (1821–1897), der die Höhlen im Mährischen Karst systematisch erforschte. In den Jahren 1881 und 1885 schenkte er dem NHM Wien Knochen mehrerer etwa 35.000 Jahre alter Höhlenlöwen-Individuen von einzigartiger Qualität. Durch Kombination der verschiedenen Funde konnte ein komplettes Skelett rekonstruiert werden. Die

◀ *Sedimentschicht mit zahlreichen Knochen des Höhlenbären (Niederösterreich)*



Schädel eines Höhlenbären aus der Sammlung des NHM Wien

Tiere waren etwas größer als moderne Löwen, die mit dem Höhlenlöwen nahe verwandt sind. Ihr Aussehen lässt sich anhand der Skelette aber nicht hundertprozentig rekonstruieren.

Hinweise ganz anderer Art sind allerdings ebenfalls in Höhlen überliefert – direkt aus der Hand von Augenzeugen, in Form von **Höhlenmalereien**. So wurden mehrere Höhlenlöwen detailliert in den 30.000 oder sogar 37.000 Jahre alten Höhlenmalereien von Chauvet in Südfrankreich porträtiert. Anders als ihre modernen Verwandten hatten die Tiere offensichtlich keine Mähne. Ebenso aus Chauvet stammt das Bild eines bulligen Höhlenbären mit einem hohen Buckel und kleinen Ohren, das ein prähistorischer Künstler oder eine Künstle-

rin mit wenigen Strichen schwungvoll-präzise skizziert hat.

Eine ganz andere Tierwelt ist aus den Höhlen der Mittelmeerinseln überliefert. Wie in den Alpen war auch hier der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten der treibende Mechanismus für die Entwicklung der Fauna. Während im alpinen Bereich vor allem Vegetation und Nahrungsangebot die Vergesellschaftung der Arten steuerten, kam bei den Faunen des Mittelmeeres noch der schwankende Meeresspiegel als Faktor hinzu. Während der Kaltzeiten war viel Meerwasser in Form von Eis gebunden; der Meeresspiegel lag daher deutlich tiefer als heute. Waldelefanten und Flusspferde gelangten damals über breite Landverbindungen oder kurze Schwimmstrecken auf

Inseln wie Malta, Sizilien, Kreta und Tilos. Als der Meeresspiegel während der Warmphasen wieder anstieg, waren einzelne Populationen vom Festland abgeschnitten. Als Anpassung an die geringeren Nahrungsressourcen und wahrscheinlich auch als Reaktion auf den geringen Druck durch Fressfeinde begannen die Tiere zu verzwergeren; kleinwüchsige Inselarten entstanden. Knochen einer **Zwergelofanten**-Art wurden 1971 in der Charkadio-Höhle auf Tilos entdeckt und in den Jahren 1971 bis 1976 bei gemeinsamen Ausgrabungen der Universität Athen und des NHM Wien geborgen. Die Tiere repräsentieren eine eigene Art, die *Palaeoloxodon tiliensis* benannt wurde. Obwohl nur 1,4 m hoch und nur 650 kg schwer, stammt der Tilos-Elefant – wie die anderen Zwergelofanten – vom europäischen Waldelefanten *Palaeoloxodon antiquus* ab, der immerhin 4,5 m Schulterhöhe erreichte. Mit einem Alter von 3.500 Jahren sind die Funde aus der Charkadio-Höhle die jüngsten Elefanten Europas. Wahrscheinlich dienten die Höhlen den Zwergelofanten zeitweise als Unterschlupf.

Die Phase der großen Höhlengrabungen des 19. und 20. Jahrhunderts ist heute vorbei, da die meisten Höhlen samt ihren fossilen Schätzen unter strengem Schutz stehen. Viele Rätsel der Eiszeit werden sich aber auch weiterhin anhand der umfangreichen Sammlungen des NHM Wien lösen lassen.



Sedimentprofil mit Höhlenbärenknochen
in einer Höhle in Niederösterreich ►

© C. Spötl





Evolutionforschung an Höhlenfischen

Schon seit Darwin sind Biologen und Biologinnen fasziniert von den eigenartigen Formen höhlenbewohnender Tiere. Besonders eindrucksvoll sind die rosa schimmernden Wirbeltiere, wie der bekannte **Grottenolm** aus dem Dinarischen Karst. Dieser Schwanzlurch zeigt ähnliche Merkmale wie die bereits beschriebenen wirbellosen Tiere: er ist blind, hat reduzierte Hautpigmente und erscheint wegen des durchschimmernden Blutes rosafarben.

Die häufigsten permanent höhlenbewohnenden Wirbeltiere sind aber **Fische**. Rund 280 Arten aus unterschiedlichsten Familien und Gattungen sind weltweit aus Höhlen warmer Gebiete beschrieben. Nicht bei allen sind die höhlenspezifischen Merkmale gleich stark ausgeprägt. Manche Höhlenfische gleichen ihren oberflächen-

bewohnenden Artgenossen, andere sind wie der Grottenolm blind und rosa. Manche zeigen sogar Merkmalsveränderungen wie zum Beispiel lange Barteln und stark ausgeprägte Seitenlinienorgane, die für die Orientierung in der Finsternis der Höhle von Vorteil sind.

Im Zuge eines Projekts zur Schauhöhlen-Erschließung der Al-Hoota-Höhle im Norden des Oman wurden Forscherinnen und Forscher des NHM Wien auf blinde Fische in den unterirdischen Seen aufmerksam. In den angrenzenden Flussläufen an der Oberfläche kommen ähnlich aussehende Fische häufig vor, die aber mit großen Augen ausgestattet sind. Es handelt sich um *Garra longipinnis*, einen Karpfenfisch. Diese Beobachtung war der Startschuss für ein langjähriges Forschungsprojekt

Höhlenfisch der Art Garra longipinnis aus der Al-Hoota-Höhle im Oman ▲

◀ *Durch Austrocknen entstandene Risse im Sediment der Gruta da Torrinha (Bahia, Brasilien)*

inklusive einer Doktorarbeit. Die ersten Fragen, die sich aufdrängen: Handelt es sich bei den unterirdisch lebenden Fischen um die gleiche Art wie bei den oberirdisch lebenden? Kommt es noch zu einem genetischen Austausch zwischen den Oberflächen- und Höhlenbewohnern? Um diese Fragen zu beantworten, wurde im **DNA-Labor** des NHM Wien ein spezielles genetisches Marker-System entwickelt. Die Methode ähnelt dem aus der Forensik oder von Vaterschaftstests bekannten DNA-Fingerprinting. Dazu werden einige besonders variable Regionen im Erbgut verglichen. Mit diesen Informationen kann man die Verwandtschaftsbeziehungen von einzelnen Individuen, aber auch von ganzen Populationen aufklären.

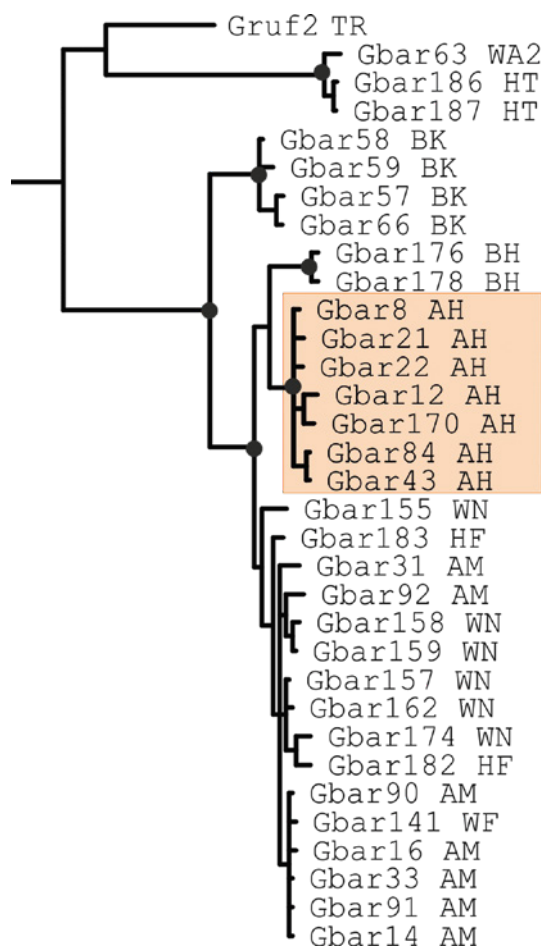
Es konnte gezeigt werden, dass die genetischen Unterschiede innerhalb der an der Oberfläche lebenden Fische zum Teil sogar größer sind als zwischen diesen und den höhlenbewohnenden Fischen. Außerdem stellte sich heraus, dass die blinde Höhlenform verhältnismäßig jung ist – zumindest nach den Maßstäben der Evolution. Einige 10.000 Jahre haben ausgereicht, um die höhlenspezifischen Merkmale

bei den unterirdisch lebenden Vertretern dieser Art entstehen zu lassen.

Im Vergleich zu sehr alten Höhlenfisch-Arten, die schon seit Jahrmillionen Höhlen als Lebensraum nutzen, besitzen die Jungfische von *Garra longipinnis* Augen, die aber im Laufe der Entwicklung vollständig mit Gewebe überwachsen. Ein weiterer Befund der Untersuchung ist, dass die Fische in der Höhle gegenwärtig genetisch völlig isoliert sind und kein Austausch mit den Oberflächenfischen stattfindet. Allerdings kommt es vereinzelt vor, dass man Fische an der Oberfläche findet, die sehr kleine Augen und eine schwache Pigmentierung zeigen, also eine Zwischenform darstellen.

Genetisch konnte gezeigt werden, dass einige dieser Tiere Hybride zwischen Höhlenfischen, die vermutlich bei Hochwässern aus der Höhle geschwemmt wurden, und Oberflächenfischen sind.

In der Evolutionsforschung stellt sich nun die Frage, warum die meisten Höhlenfische weltweit blind und pigmentlos sind, obwohl die Arten nicht näher miteinander verwandt sind – eine sogenannte **Konvergenz**. Man möchte annehmen, dass Höhlenfische blind sind, weil es für



Aus den genetischen Verwandtschaftsanalysen lässt sich schließen, dass die blinde Höhlenform von *Garra* (orange Box) verhältnismäßig jung ist.



© L. Plan

Luise Kruckenhauser beim Fangen von Höhlenfischen nahe der Al-Hoota-Höhle im Oman

ihre Augen keine Funktion mehr gibt und sie diese einfach verlieren. Aber so einfach funktioniert Evolution nicht, denn die Veränderungen in unseren genetischen Anlagen sind nicht zielgerichtet: Es müssen zufällige Veränderungen auftreten, sogenannte Mutationen, die dazu führen, dass die Höhlenfische keine Augen mehr entwickeln. Dagegen spricht, dass sich die Augen bei so vielen Arten unabhängig voneinander und zum Teil in sehr kurzen Zeiträumen zurückgebildet haben.

Gegenwärtig gewinnen aber andere Erklärungsmodelle immer mehr an Bedeutung: Der Verlust der Sehfähigkeit kann auch als Anpassung an die speziellen Lebensbedingungen entstehen, wenn es einen **Selektionsvorteil** gegenüber den sehenden Verwandten gibt. Als Selektionsvorteil bezeichnet man Eigenschaften eines Organismus, die das Überleben und die Fortpflanzung gegenüber anderen begünstigen. Dieser Vorteil kann zum Beispiel darin bestehen, dass

es Energie spart, keine Augen auszubilden, oder dass die empfindlichen Augen nicht mehr von Parasiten befallen werden können. Es kann aber auch indirekte Vorteile geben, nämlich dann, wenn die Gene, die eigentlich für die Entwicklung der Augen zuständig sind, auch andere Merkmale beeinflussen, die das Überleben in der Höhle erleichtern. Ein Beispiel wäre das Gen „*sonic hedgehog*“, das bei einer veränderten Regulierung die Ausbildung der Augen hemmt, gleichzeitig aber einen positiven Effekt auf die Ausbildung der Geschmacksknospen hat.

Welches dieser Modelle die Evolution der Höhlenform von *Garra longipinnis* am besten erklärt, soll in Folgeprojekten untersucht werden. Mittlerweile ist es technisch möglich, nicht nur einzelne Marker-Systeme zu untersuchen, sondern die gesamten **Erbanlagen** (Genome) zu vergleichen. Dabei sollen die genetischen Grundlagen für die unterschiedlichen Merkmale entschlüsselt werden.

Höhlen und Menschen – eine lange Beziehung

Höhleneingänge und Felsüberhänge dienten den Menschen in der Altsteinzeit (ca. 2,5 Mio. bis 12.000 Jahren vor heute) häufig als Lagerplätze. Aus Höhlen stammt ein Großteil der Steingeräte vom Beginn der prähistorischen Forschung. Viele altsteinzeitliche Kulturen wurden daher europaweit nach Höhlenfundstellen benannt. Menschen nutzten die ganze Urgeschichte hindurch neben Freilandsiedlungen auch Höhlen als Siedlungs- oder Kultplätze.

einem Kultplatz der Hallstattkultur in der **Býčí-Skála-Höhle**. In der Vypouštěk-Höhle wurden Gefäße und Werkzeuge jungsteinzeitlicher Bauern ausgegraben.

Auch in der Anthropologischen Sammlung des NHM Wien befinden sich Höhlenfunde aus Mähren. Skelettreste des frühen *Homo sapiens* aus der Höhle von Mladeč geborgen von Josef Szombathy (1853–1943), dem damaligen Leiter der Anthropologisch-Prähistorischen Sammlung des



Werkzeuge der Neandertaler aus der mittleren Steinzeit (Gudenushöhle Niederösterreich)

© A. Schumacher

Auch bedeutende Sammlungsgegenstände in der Prähistorischen Abteilung des NHM Wien stammen aus Höhlen. Dazu zählen die Funde aus dem Mährischen Karst. Zahlreiche Funde aus der Býčí-Skála-, Kulna- und Slouper-Höhle wurden mit der Sammlung des mährischen Arztes und Speläologen Heinrich Wankel (1821–1897) angekauft. Zu den herausragenden Funden zählen Wagenreste, eine Stierfigur sowie Schmuck aus Glas, Bernstein, Bronze und Gold von

k.k. Naturhistorischen Hofmuseums, zählen zu den ältesten Funden von *Homo sapiens* in Europa.

Der bedeutendste Höhlenfundplatz Niederösterreichs liegt im Tal der Kleinen Krems, einem der wenigen Karst- und Höhlengebiete im Marmor der Böhmisches Masse. Am 27. September 1883 begannen der Ingenieur Ferdinand Brun, der Oberlehrer Walter Werner und der Pater Leopold Hacker mit Erlaubnis des Reichsfreiherrn Heinrich von Gudenus mit der Erforschung einer Höhle unter der Burgruine von Har-



In der Gudenushöhle wurden auch diese Schmuckstücke der Neandertaler gefunden.

tenstein, zu Ehren des Grundeigentümers „**Gudenushöhle**“ benannt. Sie legten vom Rand des Abhangs bis zum Eingang der Höhle einen 4 m langen, 0,75 m breiten und über 1 m tiefen Graben an. Außerdem untersuchten sie auch das Höhleninnere.

Die 30 m lange Durchgangshöhle enthielt Steinwerkzeuge des Neandertalers – kleine Faustkeile, Schaber und Klingen. Nach den Gerätetypen zu schließen, sind die Werkzeuge zwischen 100.000 und 40.000 Jahre alt (mittlere Altsteinzeit od. Mittelpaläolithikum). Es wurden aber auch Geräte gefunden, die eindeutig dem frühen modernen Menschen zuzurechnen sind.

Ahlen und Nähadeln, Gudenushöhlen, 15.000 – 10.000 Jahren v. Chr.



Leider ist eine genaue Datierung nicht mehr möglich, da die zahlreichen Tierknochen – darunter 17 Vogel- und 40 Säugetierarten, am häufigsten Rentier, Pferd und Steinbock – nicht nach Fundhorizonten getrennt wurden. Außerdem sind die ursprünglichen Aufzeichnungen der Schichtenfolge von Leopold Hacker widersprüchlich. Der renommierte Prähistoriker Hugo Obermaier fand 1908 schließlich auf einer Reihe von stark abgerollten Knochen die Reste der von Hacker als fundleer beschriebenen Sande. Daher ordnete er diese Knochen und die mittelpaläolithischen Geräte, an denen er typische Kritzungen erkannte, dieser Sandschicht zu. Josef Szombathy führte im Jahr 1913 weitere Untersuchungen in der Gudenushöhle durch. Ab September 1922 untersuchte Josef Bayer (1882–1931), der Nachfolger Szombathys, die Reste der altsteinzeitlichen Ablagerungen aus der Höhle und ihrer Umgebung. Dabei erwähnte er auch altpaläolithische Funde aus einer Nische der Höhle. Die Aufzeichnungen Josef Bayers zur Gudenushöhle gingen leider nach 1945 verloren.

Obwohl die Fundhorizonte nicht genau dokumentiert wurden, können die mittelpaläolithischen Geräte klar von den jungpaläolithischen unterschieden werden. Die Knochengeräte und der verzierte Knochen eines Seeadlers wurden schon früh dem



© A. Schumacher

Adlerelle mit kunstvollen Ritzungen (siehe unten) eines Rentieres sowie zahlreichen Strichen

Magdalénien (im östlichen Mitteleuropa ca. 15.000 bis 10.000 v. Chr.) zugeordnet. Ein Braunbär-Knochen aus der Gudenushöhle wurde im Rahmen einer Untersuchung von Martina Pacher auf ein Alter von rund 12.500 Jahren datiert und ist ebenfalls ein Hinweis auf Ablagerungen der jüngeren Altsteinzeit.

Die Magdalénien-Schicht enthielt Geräte mit einer Spitze und einer abgestumpften Kante, Kratzer, Bohrer und schmale Klinsen. Das unbearbeitete Ausgangsmaterial unterscheidet sich deutlich von den mittelpaläolithischen Geräten. Außerdem gibt es eine Reihe von Knochenspitzen, Ahlen, einen Lochstab und Nähnadeln. An Schmuckstücken sind ein Fuchszahn, ein Wolfszahn und ein Hirschgrandl erhalten. Daneben gibt es auch ein Stück Bernstein und Farbreste.

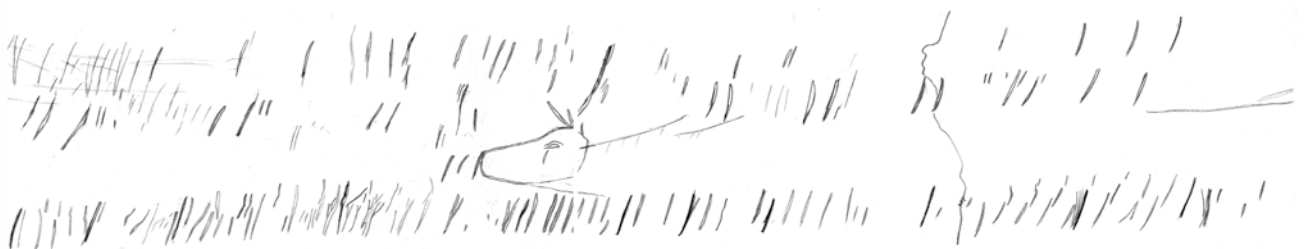
Das bekannteste Objekt aus der Gudenushöhle ist aber die schon erwähnte, mit einem Rentierkopf und mehreren Reihen von Einschnitten verzierte Elle eines weiblichen Seeadlers. Es ist das einzige Beispiel für die Kunst des Magdaléniens in Österreich. Aus der Analyse der Kerben scheint eine innere Chronologie der Rentierdar-

stellung und der Einschnitte erkennbar. Aufgrund der Überlagerung der Einschnitte ist ein längerer Verwendungszeitraum wahrscheinlich, was auch bei verzierten Artefakten anderer zeitgleicher Fundstellen festgestellt werden konnte. Hinsichtlich der Funktion des Adlerknochens ist von Obermaier die Bezeichnung „Nadelbüchse“ überliefert. Auch aus der mährischen Kulna-Höhle sind eine bearbeitete Elle eines Adlers und Nähnadeln aus dem Magdalénien erhalten. Dass sich die Nähnadeln ursprünglich in der Elle des Adlers befunden hätten, ist aber bei keinem der beiden Funde dokumentiert.

Was die kulturelle Zuordnung der Adler-Elle betrifft, gibt es eine Reihe vergleichbarer verzierter Objekte, die eine ähnliche Kombination von Rentierdarstellung und eingravierten Strichen aufweisen, und zwar aus dem Magdalénien von Frankreich bis in die Tschechische Republik. Die wiederholte Aneinanderreihung und Zusammensetzung von Strichen dürfte bewusst strukturiert sein. Eine weitergehende Deutung ist derzeit aber nicht möglich.

Reservoir der Wiener Wasserversorgung ►

▼ Zeichnung der Ritzungen auf der Adlerelle (siehe oben) aus der Gudenushöhle, Niederösterreich





Wenn Trinkwasser aus Höhlen kommt

Für viele heute lebende Menschen ist es selbstverständlich, dass sie den Wasserhahn aufdrehen und frisches Trinkwasser aus der Leitung sprudelt. Wasser aus Karstgebieten spielt dabei eine wichtige Rolle: rund ein Viertel der Weltbevölkerung wird damit versorgt. In Österreich bekommt sogar die Hälfte der Einwohner Karstwasser.

Wien hat diesbezüglich eine Sonderstellung. Mitte des 19. Jahrhunderts erkannte man, dass die schlechte Wasserqualität der Hausbrunnen die Verbreitung von Krankheiten und Seuchen fördert und begann mit der Suche nach hochwertigem Trinkwasser. Die verwegene Idee des Geologen Eduard Suess (1831–1914), Wasser aus Karstquellen der Schneebergregion in einer Leitung nach Wien zu bringen, setzte sich trotz einigen Widerstandes durch. Nach nur vier Jahren Bauzeit erfolgte 1873 die Eröffnung der fast 100 km langen **1. Wiener Hochquellenleitung**. Um den steigenden Bedarf zu decken, wurden weitere Quellen angezapft und eine 2. Hochquellenleitung erschloss fortan auch die steirische Hochschwabregion. Heute wird Wien mit seinen 1,9 Millionen Einwohnern fast zur Gänze mit Karstwasser versorgt.

Ein Vorteil von **Karstwässern** ist, dass sie oft in Quellen mit hoher Schüttung gebündelt austreten und daher leicht gefasst werden können. Sie haben aber auch einen Nachteil: zumindest zum Teil fließt das Wasser relativ rasch durch große Karströhren zu den Quellen, was wiederum kurze Verweilzeiten im Untergrund bewirkt. Kleinporige Gesteinsfilter wer-

den umgangen und Mikroorganismen bleibt nur wenig Zeit, Schadstoffe abzubauen. Dies macht Karstwässer anfällig für Verschmutzung und es bedarf besonderer **Schutzmaßnahmen** im Quelleinzugsgebiet.

Die alpinen Einzugsgebiete der Wiener Wasserversorgung, die Karstplateaus von Hochschwab, Schneealpe, Rax und Schneeberg, sind ohnehin unbesiedelte und nicht durch öffentliche Straßen erschlossene Wasserschutzgebiete. Obwohl der mögliche Eintrag von Schadstoffen stark eingeschränkt ist, ist es trotzdem wichtig, die Vorgänge im Karst-Einzugsgebiet genau zu kennen, um auf Katastrophen wie zum Beispiel einen Waldbrand reagieren zu können.

Um die **Qualität** des Trinkwassers zu sichern, unterstützt Wiener Wasser seit über 30 Jahren Karstforschungsprojekte. Neben genauen Quellbeobachtungen, Messungen zum Niederschlag und anderen meteorologischen Parametern wurden auch Vegetation und Boden untersucht. Eine zentrale Rolle bei der Versickerung der Niederschlagswässer kommt den Gesteinen sowie den Dolinen und

Aquaedukt der 2. Wiener Hochquellenleitung bei Wildalpen (Steiermark)





Ein Messwehr mit einem Datensammler (blau) ermöglicht die Aufzeichnung von Wasserparametern (Hochschwab).

anderen Karstformen zu. Aus diesen Daten lassen sich Karten erstellen, welche die Anfälligkeit gegenüber Schadstoffen zeigen. Zum Beispiel ist ein mit Waldboden bedecktes Dolomitgestein ohne Karstformen, die auf rasche Versickerung hindeuten, deutlich weniger anfällig als eine vegetationsfreie Zone mit vielen Dolinen im Kalkstein, wo das Wasser ungehindert in den Untergrund eintreten kann. Diese Daten und Karten werden im Unglücksfall herangezogen, um Entscheidungen zu treffen und Schutzmaßnahmen zu planen, um so die Qualität des Wassers sicherzustellen.

Auch Höhlen spielen bei diesen Untersuchungen eine Rolle, erlauben sie doch eine direkte Beobachtung des Wassers auf seinem Weg von der Oberfläche zu den Quellen. Gerade aber aus den entlegenen, bis über 2.200 m Seehöhe reichenden Gebieten im zentralen und östlichen Hochschwab, aus denen rund 60 % des Wiener Wassers stammen, waren vor den Karstforschungsprojekten nur wenige Höhlen bekannt. Im Rahmen von Forschungs Kooperationen zwischen dem NHM Wien und Wiener Wasser wurden bis dato rund **500 Höhlen** in der Hochschwab-Region dokumentiert. Die meisten sind vorwiegend senkrechte Schachthöhlen mit nur wenigen Zehnermetern Tiefe. Aber es konnten auch einige bedeutende Höhlen entdeckt werden. Die tiefste hat 1.082 m Höhenunterschied, die längste misst 5,6 km. In etlichen Höhlen trifft man auch auf kleine Bäche. Diese erlauben direkte Beobachtungen zum Fließverhalten des unterirdischen Wassers. In drei Höhlen wurden daher automatisierte Messstellen installiert.

Die gewonnenen Daten helfen, die Abfluss- und Speichersysteme im Karst besser zu verstehen. Sie werden auch dazu verwendet, die Auswirkungen des **Klimawandels** auf die Wiener Wasserversorgung in Rechenmodellen vorherzusagen, um rechtzeitig Maßnahmen setzen zu können.



Schützenswerte Schatzkammern

Höhlen sind von großer Bedeutung für die Trinkwasserversorgung; sie sind außerdem Zeitkapseln der Vergangenheit und Lebensraum für seltene, oft nur lokal vorkommende Tiere. Einst dienten sie dem Menschen als Zufluchtsort, doch heute müssen diese besonderen Orte vor Zerstörung durch Menschen geschützt werden.

Schon seit 1928 ist der **Höhenschutz** in Österreich in Höhlen- bzw. Naturschutzgesetzen verankert. Darin wird zum Beispiel das Zerstören einer Höhle untersagt. Oft wird nicht nur die Höhle selbst, sondern auch die Landschaft über und um die Höhle berücksichtigt, da sie in Verbindung zur Höhle steht. Neben diesem generellen Schutz vor Zerstörung können einzelne, aus verschiedenen Gründen herausragende Höhlen zu Naturdenkmälern oder zu „besonders geschützten Höhlen“ erklärt werden. Letztere dürfen ohne Ausnahmegenehmigung nicht betreten werden.

Obwohl Höhlen und ihr Inhalt gesetzlich geschützt sind, werden sie immer wieder von Menschen bedroht oder sogar zerstört.

Häufig wurden und werden Schächte und Dolinen als **Mülldeponie** verwendet, nach dem Motto: aus dem Auge, aus dem Sinn. Doch Schächte und Dolinen sind ein denkbar schlechter Ort, um Müll loszuwerden, da hier das Wasser konzentriert versickert und Schadstoffe rasch und direkt zu den Quellen gelangen und eventuell Trinkwasser gefährden. Natürlich wirkt sich der Eintrag von Abfall und Schadstoffen auch negativ auf die Höhlenorganismen aus.

Lagerfeuer im Eingangsbereich von Höhlen bedrohen deren Bewohner, da der Rauch oft in die Höhlen hineinzieht und zum Beispiel die an den Decken hängenden **Fledermäuse** und andere Tiere im wahrsten Sinn des Wortes austrüchert. Vor allem in der kalten Jahreszeit sollte man darauf achten, die Fledermäuse nicht zu stören. Im Winterschlaf senken sie ihre Körpertemperatur ab. Werden sie zum Beispiel durch eine Lichtquelle oder durch die Körperwärme eines Menschen geweckt, benötigen sie sehr viel Energie, um sich wieder auf „Betriebstemperatur“



links: Der Müll einer Hütte wurde jahrelang in eine Schachthöhle entsorgt.

Mitte: „Probefahrt“ auf einem in einer Schachthöhle entsorgten Motorrad

rechts: Reinigung der Zwettlerhöhle (Niederösterreich)



Höhle spinne (Hermannshöhle, Niederösterreich)



Braunes Langohr (Höhle im Leithagebirge, Niederösterreich)

zu zittern. Im Winter finden sie aber keine Nahrung, weil es draußen an Insekten fehlt, und sie verhungern. Deshalb sollten Höhlen zwischen Oktober und März nicht betreten werden.

Höhlensedimente werden häufig unabsichtlich von Menschen zerstört, weil sich viele ihrer Bedeutung für die Wissenschaft nicht bewusst sind. Um sie nicht unnötig zu zertrampeln, sollte man in einer Höhle nur auf bereits bestehenden Pfaden gehen. Tropfsteine und andere Sinterbildungen werden häufig absichtlich abgeschlagen und mitge-

nommen. Diese einzigartig geformten, manchmal glitzernden Gebilde üben leider große Anziehungskraft auf viele Menschen aus. Doch im trockenen Zustand sind sie meist unansehnlich und **wertlos**. Um die Schönheit der Höhlen zu bewahren und als wertvolle wissenschaftliche Archive zu erhalten, sollte man als Höhlenbesucher*in unbedingt die Hände von Tropfsteinen, Höhlenmineralen und Sedimenten lassen. Gleiches gilt natürlich auch für Fossilien und Artefakte.

Steinbrüche um die Lurgrotte Peggau (Steiermark)



Aber der Mensch bedroht nicht nur Höhlen, sondern sogar ganze Karstlandschaften, denn Kalk- und Dolomitgesteine sind begehrte Massenrohstoffe. Berghänge und Gipfel wie der Pfaffenberg in Bad Deutsch Altenburg in Niederösterreich wurden zur Gänze abgetragen, um Kalk zu gewinnen. Von manchen geschützten Höhlen blieb nur ein schmaler naturbelassener Streifen erhalten, wie von der Lurgrotte in Peggau in der Steiermark. Jährlich wird in Österreich Kalk und Dolomit abgebaut, der ein Würfel mit 200 m Kantenlänge entspricht. Damit beträgt die Abtragung von Kalk und Dolomit in Karst-

gebieten durch den Menschen etwa das Zehnfache des natürlichen Karstabtrags durch Niederschlagswässer.

Der Schutz von Höhlen und Karstlandschaften bedeutet nicht nur den sensiblen Umgang mit diesen speziellen Ökosystemen, sondern auch den nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen und intakter Landschaft in den höhlennahen Bereichen. Der Schutz von Höhlen und Karstlandschaften bedeutet nicht nur den sensiblen Umgang mit diesen speziellen Ökosystemen, sondern auch den schonenden Umgang mit Rohstoffen und intakter Landschaft in den höhlennahen Bereichen.



Kleine Hufeisennase

Weitere Infos

Internet

- Hier finden Sie wichtige Informationen für einen Besuch in den Schauhöhlen Österreichs: www.schauhoehlen.at
- Diese Homepage enthält Informationen für Höhleninteressierte im deutschsprachigen Raum: www.hoehlenforschung.org
- Informationen zu den Höhlenvereinen in Österreich und unseren Nachbarländern: www.hoehle.org (Österreich)
www.vdhk.de (Deutschland)
www.speleo.ch (Schweiz)
- Mehr über Fledermäuse erfahren sie auf der Homepage der Koordinationsstelle für Fledermausschutz und -forschung in Österreich: www.fledermausschutz.at
- Sie haben Interesse an Höhlentieren und möchten gerne mehr über das Höhlentier des Jahres erfahren? Dann schauen Sie auf diese Homepage: www.hoehlentier.de
- Eine Liste der weltweit längsten und tiefsten Höhlen sowie weitere Rankings finden Sie hier: www.caverbob.com

Kinderbücher

- *In Höhlen und Grotten: Licht an!* (1999), Meyers Kinderbibliothek ISBN 978-37-373-7520-7
- *Was ist was, Band 83: Höhlen* (2005), Tessloff Verlag, ISBN 978-37-886-0423-3

Printmedien

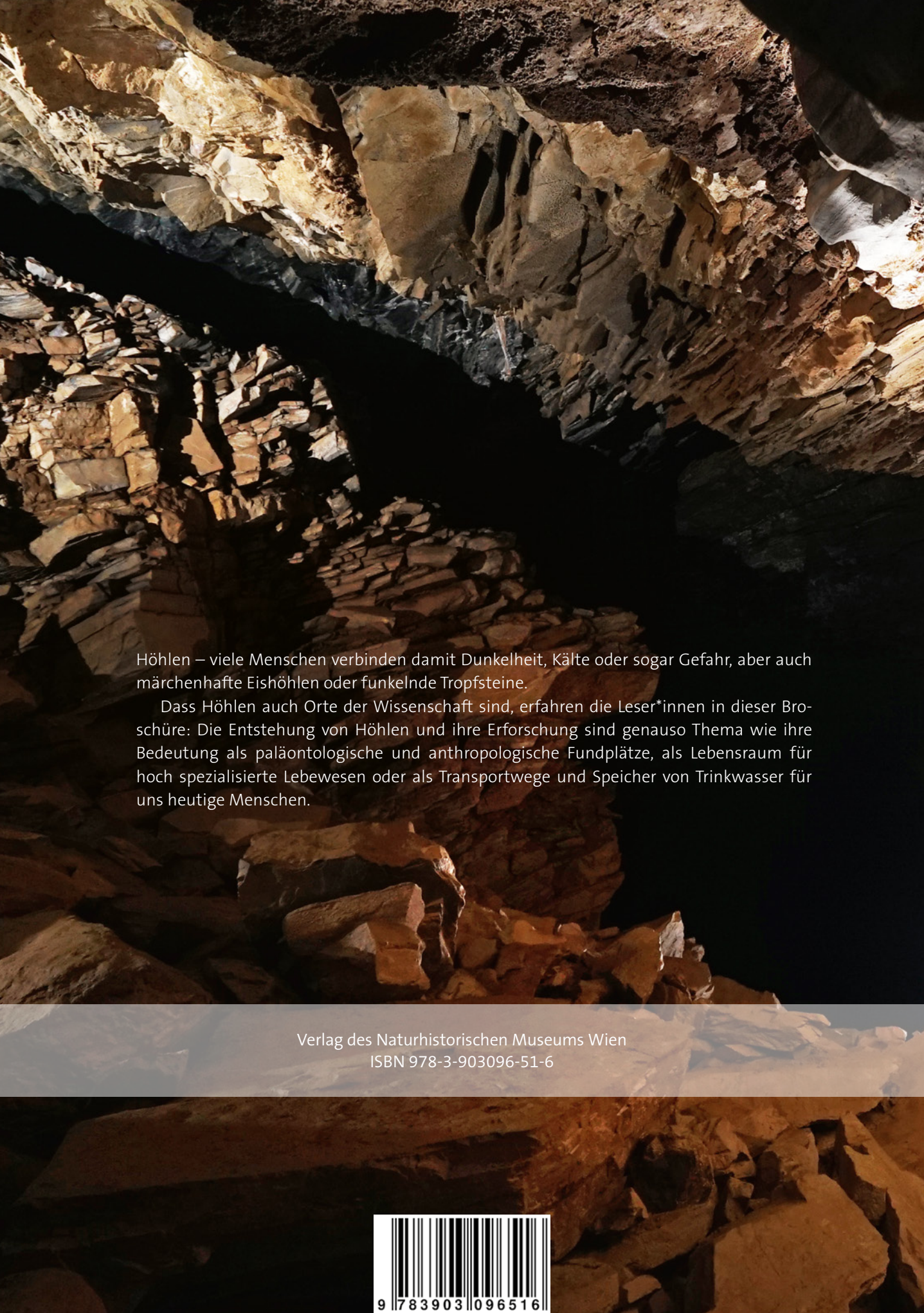
- *Höhlen. Verborgene Welten* von Stefan Kempe & Wilfried Rosendal (2008), Primusverlag, Darmstadt, 168 Seiten ISBN 978-3-89678-611-1
- *Inside Mother Earth – Magische Höhlenwelten* von Max Wisshak (2008), Edition Reuss, München, 152 Seiten ISBN 978-3-934020-67-2
- *Höhlen und Karst in Österreich* von Christoph Spötl, Lukas Plan & Erhard Christian (2016), OÖ Landesmuseum, Linz, 752 Seiten ISBN 978-3-85474-321-7
- *Into the heart of the world* von Antonio De Vivo & Francesco Sauro (2017), La Venta, Milano, 311 Seiten ISBN 978-88-572-3177-8
- *New Zealand Karst* von Max & Stefanie Wisshak (2020), Edition Speleo-Photo, 256 Seiten ISBN 978-398-2171-40-1
- *Karst, Caves and People* von Nadja Zupan Hajna (2021), Karst Research Institute, ZRC SAZU, Postojna/Ljubljana, 173 Seiten ISBN 978-961-05-0491-7
Deutsche Übersetzung ab Anfang 2022!
- Die Zeitschrift „Die Höhle“ (Verband Österreichischer Höhlenforscher) enthält Berichte zu neuerforschten Höhlen und wissenschaftliche Artikel.
Infos und Bestellung:
www.hoehle.org/die_hoehle

Bildnachweise

Seitenangaben zu den Quellen bzw. Bildrechtinhabern des verwendeten Bildmaterials. Falls nicht angegeben, sind die Abbildungen Teil des Bildarchivs des Naturhistorischen Museums Wien

- Umschlag: Caverna de Laje Branca – São Paulo
(Foto: Mirjam Widmer, www.mirjam-widmer.ch)
- Umschlag innen: Höhlenplan (Grafik: Eckart Herrmann)
- 1: Generaldirektorin Dr. Katrin Vohland
(Foto: Christina Rittmannsperger, NHM Wien)
- 2: Eingang zur Hirlatzhöhle im Dachstein, der mit 113 km drittlängsten Höhle Österreichs. Im Hintergrund sieht man Hallstatt (Oberösterreich).
(Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 3: 98 m tiefe Schachtstufe im 1.082 m tiefen Steinbockschacht am Hochschwab (Steiermark)
(Foto: Ágnes Berentés, www.caveandart.com)
- 4: Lavatunnel des Ätna (Foto: Ágnes Berentés, www.caveandart.com)
- 5 oben: Nur durch Frostverwitterung entstanden: das Wetzsteinloch im Hochschwab (Steiermark).
(Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 5 unten: Eine typische Spalthöhle: das Markierte Windloch bei Otterthal (Niederösterreich) (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 6: Fugen im Gestein werden durch Lösung erweitert – ein Hohlraum entsteht (Marmorsteinbruch in Arzwiesen, Niederösterreich). (Foto: Christian Bauer; Univ. Graz)
- 7 oben: Während ihrer Entstehung sind viele Höhlen mit Wasser gefüllt und können nur von Höhlentaucher*innen befahren werden. (Foto: Herbert Meyrl)
- 7 unten: Das Einschneiden des Tals läßt in einem Karstmassiv neue unterirdische Abfluswege entstehen und alte Höhlen trocken fallen. (Grafik: Josef Muhsil-Schamall, NHM Wien)
- 8: Karstlandschaft am Hochschwab (Steiermark)
(Foto: Thomas Exel, www.lichtbildarchiv.com)
- 9: Schwinde nahe der Sonnschianalm am Hochschwab (Steiermark) (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 10: Karstlandschaft mit Dolinen am Hochschwab (Steiermark) (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 11: Höhlenforscher*innen beim EuroSpeleo Forum 2018 in Ebensee (Oberösterreich) (Foto: Philippe Crochet, www.philippe-crochet.com)
- 12: Höhlenforscher in einer Engstelle – einem sogenannten Schluf (Foto: Thomas Exel, www.lichtbildarchiv.com)
- 13: Karstgebiete (rot) sind weltweit verbreitet – in Südostasien und Südchina finden sich besonders viele. (Karte: Ulrich Tichy, wikiwand.com; CC BY-SA 2.0 de)
- 14: Bis zu 6 m große Gipskristalle in der Lechuguilla-Höhle in New Mexico (USA) (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 15 oben: Typisches Gangprofil im Hölloch, der längsten Höhle der Alpen (Muotatal, Schweiz)
(Foto: Mirjam Widmer, www.mirjam-widmer.ch)
- 15 unten: Überwindung eines Sees im Lamprechtsofen, der tiefsten Höhle Europas (Weißenbach/Lofer, Salzburg)
(Foto: Thomas Exel, www.lichtbildarchiv.com)
- 16: Gurams-Lake – der tiefste Punkt der Snezhnaya-Höhle 1.753 m unter dem höchsten Eingang. (Abchasien, Georgien). (Foto: Andrey Shuvalov)
- 17: Tropfsteinhöhle „Aven des Pèbres“ in Frankreich (Foto: Max Wisshak, www.speleo-photo.de)
- 18: Bäumchen aus nadeligen Aragonit-Kristallen (Lechuguilla-Höhle, New Mexico, USA). (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 19: Kleine Stalaktiten und Sinterrohrchen in den Rauchspalten (Kirchberg/Wechsel, Niederösterreich).
(Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 20: Gipslocke in der Flower Cave (Neuseeland)
(Foto: Mirjam Widmer, www.mirjam-widmer.ch).
- 21: Messung des Durchflusses im Bach der Snezhnaya-Höhle (Abchasien, Georgien) (Foto: Andrey Shuvalov)
- 22: Aufgeschnittener Stalagmit mit Klimakurve zwischen 14.000 und 7.000 Jahren vor heute
(Foto: Christoph Spötl, Univ. Innsbruck, Grafik: Josef Muhsil-Schamall, NHM Wien)
- 23: Entnahme eines 8 mm dicken Bohrkerns aus einem Stalagmiten zur Altersdatierung (Foto: Serge Caillault)
- 24: Durch eine junge tektonische Bewegung zerscherter Höhlengang (Obir-Tropfsteinhöhlen, Kärnten) (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 25: Der durch Lösung gebildete Gangquerschnitt wird bei einem tektonischen Ereignis zerschert. (Grafik: Josef Muhsil-Schamall, NHM Wien)

- 
- 26: Zeichnung eines Moa-Skeletts von Ferdinand von Hochstätter (Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse in Wien, 1862, Band 1, S. 232)
- 27: Auf Basis eines 3D-Scans erstellte Ansicht des Moa-Skeletts (Grafik: Viola Winkler, NHM Wien, www.nhm-wien.ac.at/museum_online/3D)
- 28: Zeichnung eines Moa-Skeletts von Ferdinand von Hochstätter (Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse in Wien, 1862, Band 1, S. 233)
- 29: Eingang der Tummit-Tomo-Höhle auf Neuseeland (Foto: Max Wisshak, www.speleo-photo.de)
- 30: Ein höhlenbewohnender Hundertfüßer in der Piskovica-Höhle in Kroatien. (Foto: Mirjam Widmer, www.mirjam-widmer.ch)
- 31: *Geophilus hadesi*, ein Hundertfüßer, der in der Lukina-Jama-Trojama in 980 m Tiefe, gefunden und dokumentiert wurde. (Foto: Jana Bedek)
- 32: Der Fundort von *Leucogeorgia profunda* befindet sich in 2.204 m Tiefe Veryovkina-Höhle (Abchasien, Georgien). (Foto: Sergej Ivanov)
- 33: Die Umgebung des Einstiegs des Lukina-Schachts ist stark verkarstet. (Foto: Dalibor Paar)
- 34: Sedimentschicht mit zahlreichen Knochen des Höhlenbären (Niederösterreich) (Foto: Gernot Rabeder, Univ. Wien)
- 36: Schädel eines Höhlenbären aus der Sammlung des NHM Wien (Foto: Alice Schumacher, NHM Wien)
- 37: Sedimentprofil mit Höhlenbärenknochen in einer Höhle in Niederösterreich (Foto: Christoph Spötl, Univ. Innsbruck)
- 38: Durch Austrocknen entstandene Risse im Sediment der Gruta da Torrinha (Bahia, Brasilien) (Foto: Mirjam Widmer, www.mirjam-widmer.ch)
- 39: Höhlenfisch der Art *Garra longipinnis* in der Al-Hoota-Höhle im Oman. (Foto: Hisham Momen, NHM Wien)
- 40: Aus den genetischen Verwandtschaftsanalysen lässt sich schließen, dass die blinde Höhlenform von *Garra* (orange Box) verhältnismäßig jung ist. (Grafik: Luise Kruckenhauser, NHM Wien)
- 41: Luise Kruckenhauser beim Fangen von Höhlenfischen nahe der Al-Hoota-Höhle im Oman (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 42: Faustkeile der Neandertaler aus der mittleren Steinzeit (Gudenushöhle, Niederösterreich) (Foto: Alice Schumacher, NHM Wien)
- 43 oben: In der Gudenushöhle wurden auch diese Schmuckstücke der Neandertaler gefunden. (Foto: Alice Schumacher, NHM Wien)
- 43 unten: Ahlen und Nähnadeln, Gudenushöhlen, 15.000 – 10.000 Jahren v. Chr. (Foto: Alice Schumacher, NHM Wien)
- 44 oben: Adlerelle mit kunstvollen Ritzungen eines Rentieres sowie zahlreichen Strichen (Foto: Alice Schumacher, NHM Wien)
- 44 unten: Zeichnung der Ritzungen auf der Adlerelle aus der Gudenushöhle, Niederösterreich (Grafik: Walpurga Antl-Weiser, NHM Wien)
- 45: Reservoir der Wiener Wasserversorgung (Foto: Daniel Novotny, Wiener Wasser).
- 46/47: Aquaedukt der 2. Wiener Hochquellenleitung bei Wildalpen (Steiermark) (Foto: Christian Houdeke, Wiener Wasser).
- 47 oben: Ein Messwehr mit einem automatischen Datensammler (blau) ermöglicht die Aufzeichnung von Wasserparametern in einer Schachthöhle des Hochschwab. (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 48 links: Der Müll einer Hütte wurde jahrelang in eine Schachthöhle entsorgt. (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 48 Mitte: „Probefahrt“ auf einem in einer Schachthöhle entsorgten Motorrad (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 48 rechts: Reinigung der Zwettlerhöhle (Niederösterreich) (Foto: Katharina Bürger)
- 49 links: Höhlenspinne (Hermannshöhle, Niederösterreich) (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 49 rechts: Braunes Langohr (Höhle im Leithagebirge, Niederösterreich) (Foto: Lukas Plan, NHM Wien)
- 49 unten: Steinbrüche um die Lurgrotte Peggau (Steiermark) (Foto: Christian Bauer, Univ. Graz)
- 50: Kleine Hufeisennase (Foto: Thomas Exel, www.lichtbildarchiv.com)



Höhlen – viele Menschen verbinden damit Dunkelheit, Kälte oder sogar Gefahr, aber auch märchenhafte Eishöhlen oder funkelnde Tropfsteine.

Dass Höhlen auch Orte der Wissenschaft sind, erfahren die Leser*innen in dieser Broschüre: Die Entstehung von Höhlen und ihre Erforschung sind genauso Thema wie ihre Bedeutung als paläontologische und anthropologische Fundplätze, als Lebensraum für hoch spezialisierte Lebewesen oder als Transportwege und Speicher von Trinkwasser für uns heutige Menschen.

Verlag des Naturhistorischen Museums Wien
ISBN 978-3-903096-51-6

