

Die eozänen Froschlurche der Geiseltal-Sammlung: Interdisziplinäre Zugänge zum Rätsel der Fossilerhaltung

DANIEL FALK UND MICHAEL STACHE

Abstract

Die Geiseltal-Sammlung des Zentralmagazins Naturwissenschaftlicher Sammlungen (ZNS) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg stellt eine wertvolle geowissenschaftliche Forschungsressource dar und ist seit 2011 als national wertvolles Kulturgut eingetragen. Die Fossilien bieten einen detaillierten Einblick in die eozäne Tier- und Pflanzenwelt vor 42,5 bis 47,5 Millionen Jahren, aber auch auf den geologischen Ablagerungsraum einer küstennahen Sumpflandschaft. In den kohledominierten Sedimenten des Geiseltals (Sachsen-Anhalt) wurde von Mitte der 1920er Jahre bis zum Ende des 20. Jahrhunderts kommerzieller Braunkohlebergbau mit wissenschaftlichen Ausgrabungen kombiniert. Die seit fast 100 Jahren in Halle (Saale) gelagerte Geiseltal-Sammlung verbindet wissenschaftliches Potential aus geowissenschaftlicher, biologischer, chemischer, museologischer und historischer Sicht. Im Rahmen des deutsch-irischen Dissertationsprojektes „Taphonomy of the Eocene Geiseltal Konservat-Lagerstätte, Germany“ werden die fossilen Wirbeltiere untersucht. In dem vorliegenden Beitrag präsentieren wir Forschungsansätze, um die außergewöhnliche Erhaltung der Fossilien besser zu verstehen. Es wurden hierfür exemplarisch 180 Anuren (Froschlurche) auf ihre Ausrichtung im Sediment sowie auf Skelettvollständigkeit und -artikulation untersucht. In weiteren Untersuchungen ist die chemische Analyse der beprobten, potentiellen Weichteilüberreste und der die Froschlurche einbettenden Sedimentschichten vorgesehen. Dieser Artikel gibt einen historischen Überblick zur Geiseltal-Sammlung und stellt die genannten Untersuchungsmethoden, vorläufige Resultate und die damit einhergehenden Vorzüge der Objektbearbeitung vor.

„Unter den Faunen fossiler Anura nehmen die [...] des Geiseltales mit Abstand [weltweit] die erste Stelle ein was Reichhaltigkeit an Formen und Erhaltungszustand anbelangt.“
(KUHNS 1941, 24)

Einleitung

Die Erhaltung der Fossilien der Geiseltal-Lagerstätte (47,5–42,5 Millionen Jahre), insbesondere die der Froschlurche (Anuren), wurde in der Vergangenheit mehrfach als bemerkenswert beschrieben (KUHNS 1941; VOIGT 1935; VOIGT 1988). Die Objekte weisen sowohl umfassende Hartteile (etwa Knochen) als auch Anzeiger für Weichteilerhaltung auf. Die Steuerungsmechanismen, die diese Erhaltung möglich machen, wurden für die Geiseltal-Anuren nie vollständig erforscht. Da sich der generelle Bauplan und die Lebensweise von Anuren seit dem Unteren Jura (rund 200 Millionen Jahre) nicht verändert haben (ROČEK 2013), lassen sich Ergebnisse aus Untersuchungen an fossilen Objekten mit den Ergebnissen von Untersuchungen an heutigen Froschlurchen vergleichen. Moderne Untersuchungsmethoden wie die detaillierte Analyse der Skelett-Taphonomie und geochemische Materialanalysen werden dazu beitragen, das Rätsel der äußerst detailreichen Fossilerhaltung zu lösen.

Die außergewöhnlichen Fossilien der Geiseltal-Sammlung

Mehr als 50.000 fossile Sammlungsobjekte befinden sich in der Geiseltal-Sammlung des Zentralmagazins Naturwissenschaftlicher Sammlungen (ZNS) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Halle (Saale); mehr als die Hälfte davon sind Überreste von Säugetieren, Vögeln, Reptilien, Fischen und Amphibien (HAUBOLD & KRUMBIEGEL 1984; HELLMUND & HASTINGS 2014). Weiterhin treten Wirbellose (insbesondere Insekten), Pflanzen und Spurenfossilien (wie versteinertes Kot) in hoher Vielfalt auf (KRUMBIEGEL, RÜFFLE & HAUBOLD 1983). Besonderheiten stellen neben der Erhaltung von Hartteilen auch die teils mikroskopisch erhaltenen und/oder chemisch nachweisbaren Überreste einstiger Weichgewebe (etwa Hautzellen, Muskeln) und Farberhaltungen dar, von denen Voigt (1988) berichtet. Seit 2011 ist die Geiseltal-Sammlung als national wertvolles Kulturgut eingetragen.



Abb. 1: Die Objekte und ihre Historie – sechs verschiedene Etiketten für diesen Froschlurch lassen auf mehrere Bearbeiter schließen, GMH Ce III-6744-1932, unbestimmt. A: Objektfotografie; das Skelett ist unvollständig und teilarthikuliert, Lackfilm. B: Objekt als Röntgenaufnahme; die Knochen sind deutlich sichtbar; verändert aus KUHN 1941. C: Etikett, Verfasser unbekannt. D: Etikett, Verfasser: Günter Krumbiegel. E: Etikett mit Hinweis zum Erstfund der Froschlurch-Art (Holotypus = rotes Kreuz), Verfasser: vermutlich Oskar Kuhn. F: Etikett, Verfasser unbekannt. G: Etikett mit französischem Hinweis „À REVOIR“ (zur Überprüfung), Verfasser unbekannt. H: Inventarkarte mit Zusammenfassung aller Rohdaten zum Objekt, Verfasser: vermutlich u.a. Ehrhard Voigt und Oskar Kuhn. Fotos: A, C–G: Daniel Falk, H: Michael Stache; B: Röntgenaufnahme aus KUHN 1941

Geologie und Stratigraphie

Beim Ablagerungsraum der fossilführenden Sedimente handelte es sich um ein subtropisches Sumpfgebiet. Die Sedimente wurden küstennah zur Paläo-Nordsee in einem ca. 75 km² erstreckenden Becken abgelagert (BLUMENSTENGL 2004; KRUMBIEGEL, RÜFFLE & HAUBOLD 1983).

Die Ablagerungen der Geiseltal-Lagerstätte sind nicht für eine radiometrische Alterseinstufung geeignet. Dennoch lässt sich mithilfe des Vergleichs von Faunen aus der Messel-Fossilagerstätte (MERTZ & RENNE 2005) und der Eckfeld-Fossilagerstätte (MERTZ, SWISHER & FRANZEN u. a. 2000) sowie berechneter Sedimentationsraten (FRANZEN 2005) ein Alter von etwa 47,5 bis 42,5 Millionen Jahre (Lutetian, Mittleres Eozän) ableiten.

Grabungs- und Sammlungshistorie

Die Geiseltal-Fossilagerstätte ist eng mit einer Rohstofflagerstätte verbunden und befindet sich 20 Kilometer südwestlich von Halle (Saale) in Sachsen-Anhalt. In den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts begann der industrielle Abbau der Braunkohle in Tagebauen. Der erste nachweisliche Fund eines fossilen Wirbeltieres – des „Lophiodons“ (ein Vertreter aus der Tapirverwandtschaft) – wurde im Jahr 1908 gemacht und dem Geologischen Institut in Halle (Saale) übergeben. Ab Mitte der 1920er Jahre wurden detaillierte und quantitative Ausgrabungen unter Leitung des Institutsdirektors Johannes Walther (1860–1937) durchgeführt und in einer ersten Publikation von Benjamin E. Barnes (1903–1969) bekannt gemacht (BARNES 1926).

Im Jahr 1929 erhielt Johannes Weigelt (1890–1948) einen Ruf nach Halle (Saale) als Nachfolger seines Mentors Johannes Walther und wurde Direktor des Geologisch-Paläontologischen Instituts. Die Fossilausgrabungen wurden in der 1930er Jahren durch die von Ehrhard Voigt (1905–2004) beschriebenen Bergungsmethoden weiter ausgedehnt (siehe folgendes Kapitel). Dies führte zu zahlreichen Erstbeschreibungen (Holotypen, Abb. 1A–H) der fossilen Fauna im Geiseltal.

In den Jahren 1938 bis 1949 mussten die Fossilgrabungen im Geiseltal erst aufgrund der Priorisierung einer anderen Grabungsstelle durch das Hallenser Institut und dann durch den Ausbruch des zweiten Weltkriegs eingestellt werden.

Ab dem Jahr 1949 wurden unter der Institutsleitung von E. W. Hans-Friedrich Gallwitz (1896–1958) und später durch seinen Nachfolger Horst W. Matthes (1912–1986) die Grabungsaktivitäten wieder aufgenommen und die Forschung wiederbelebt (HAUBOLD & HELLMUND 1998), mit einem Höhepunkt an Fossilbergungen um die 1960er Jahre. Dennoch wurden vermutlich viele tausend Objekte während des jahrzehntelangen Bergbaubetriebes unabsichtlich zerstört (HASTINGS & HELLMUND 2015).

Die Ausgrabungsaktivitäten nahmen in den 1980er Jahren, bedingt durch die Verlagerung des Kohleabbaus in den westlichen Teil der Lagerstätte mit deutlich geringerem Fossilienaufkommen, verstärkt ab.

Die letzten Ausgrabungsaktivitäten endeten im Sommer des Jahres 1993 (HELLMUND 1997), gleichzeitig kam es auch zur endgültigen Einstellung der bergbaulichen Aktivitäten im Geiseltal. Insgesamt wurden während der 68-jährigen Grabungsperiode im Geiseltal, mit Unterbrechungen, ca. 86 Fundstellen unterschieden (HAUBOLD & KRUMBIEGEL 1984).

Im Jahr 2000 wurden letzte größere Geländearbeiten für eine Forschungsstudie zu stratigraphischen Fragen und zur Geochemie der Braunkohlen durchgeführt (HELLMUND & WILDE 2001). Im Sommer 1993 begann die Rekultivierung des bergbaulichen Geländes. Mit der Flutung des Reviers (2003–2011) entstand das größte Gewässer in Mitteleuropa – der Geiseltalsee.

Die Geiseltal-Sammlung war bereits von Johannes Weigelt und Ehrhard Voigt in der von Kardinal Albrecht II. von Brandenburg (1514–1545) erbauten Allerheiligenkapelle im Nordflügel der Neuen Residenz untergebracht worden und ist in Teilen seit 1934 im dortigen „Geiseltalmuseum“ ausgestellt. Einzelne Pflanzenfossilien befinden sich zudem im Museum für Naturkunde Berlin.

Bergungs- und Konservierungsmethoden

Die Geiseltalfossilien zeichnen sich durch eine ungewöhnlich gute Erhaltung aus. Durch den hohen Wassergehalt der Braunkohle gestaltete sich deren Ausgrabung ausgesprochen schwierig. Ohne Vorbehandlung zerfielen die fragilen

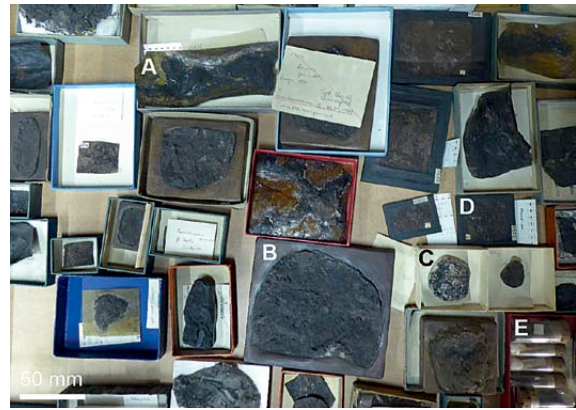


Abb. 2: Blick in eine Schublade mit den fossilen Froschlurchen der Geiseltal-Sammlung. Es sind verschiedene Aufbewahrungsmedien der Fossilien erkennbar. A – Lackfilm; B – Paraffin mit Gipsrahmen; C – Gips mit Lackfilmüberzug; D – Lackfilm, in Glaskästchen; E – Lackfilm in Glasviole mit Korkverschluss. Foto: Daniel Falk

Knochen zusammen mit den sie umgebenden kohligem Sedimenten beim Trocknen. Für die Bergung der Geiseltalfossilien kamen verschiedene Transfertechniken zum Einsatz (Abb. 2A–C): (1) Die Paraffin-Methode (Abb. 2B) wurde bei größeren, zusammenhängenden Skeletten angewendet. Das Fossil ist dabei mit einem Wall aus Ton umgeben worden, um anschließend geschmolzenes Paraffin auf das freigelegte Objekt zu gießen. Nach Abkühlen des Paraffinblockes wurde der Tonwall entfernt und eine Stützkappe aus Gips angefertigt. (2) Die Lackfilm-Methode (Abb. 1A, 2A, 4A) wurde von Ehrhard Voigt erstmalig als Weiterentwicklung von (1) beschrieben (VOIGT 1933), unter Benutzung des Klebstoffs Nitrozellulose – ein gut verfügbarer Kunststoff der damaligen Zeit: Der Nitrozelluloselack wurde auf das freigelegte Fossil und auf das umgebende Sediment aufgetragen. Der verfestigte Film konnte wie ein Abziehbild vom Substrat gelöst werden. Zur Stabilisierung wurde bei den ersten Versuchen noch eine Gipskappe auf dem Lackfilm aufgetragen (Abb. 2C), später kam zumeist eine Holzplatte als Trägermaterial zum Einsatz. Bei beiden Methoden wurde nach der Bergung der Objekte die ehemals untenliegende Seite im Labor freipräpariert. Die Lackfilm-Methode ermöglichte, äußerst fragile Fossilien, so von Fischen, Fröschen und anderen kleinen Tieren, in großer Zahl zu bergen (Abb. 2A). (3) Die Gipsmantel-Methode (1950er Jahre) kam bei größeren Fossilienfunden zum Einsatz. Im Unterschied zur Lackfilm-Methode wurden hier nur die fossilen Knochen mit Nitrozelluloselack getränkt und anschließend für die Bergung in eine Gipskalotte verpackt, um sie im Labor frei zu präparieren.

Nitrozelluloselack ist nach heutigem Wissensstand nicht alterungsbeständig und zersetzt sich selbst. Daher müssen die entsprechenden Objekte der Geiseltal-Sammlung restauriert werden. Bei der heutigen Restaurierung wird oberflächlich der Nitrozelluloselack entfernt und durch das alterungsbeständige Polyvinylbutyral ersetzt.

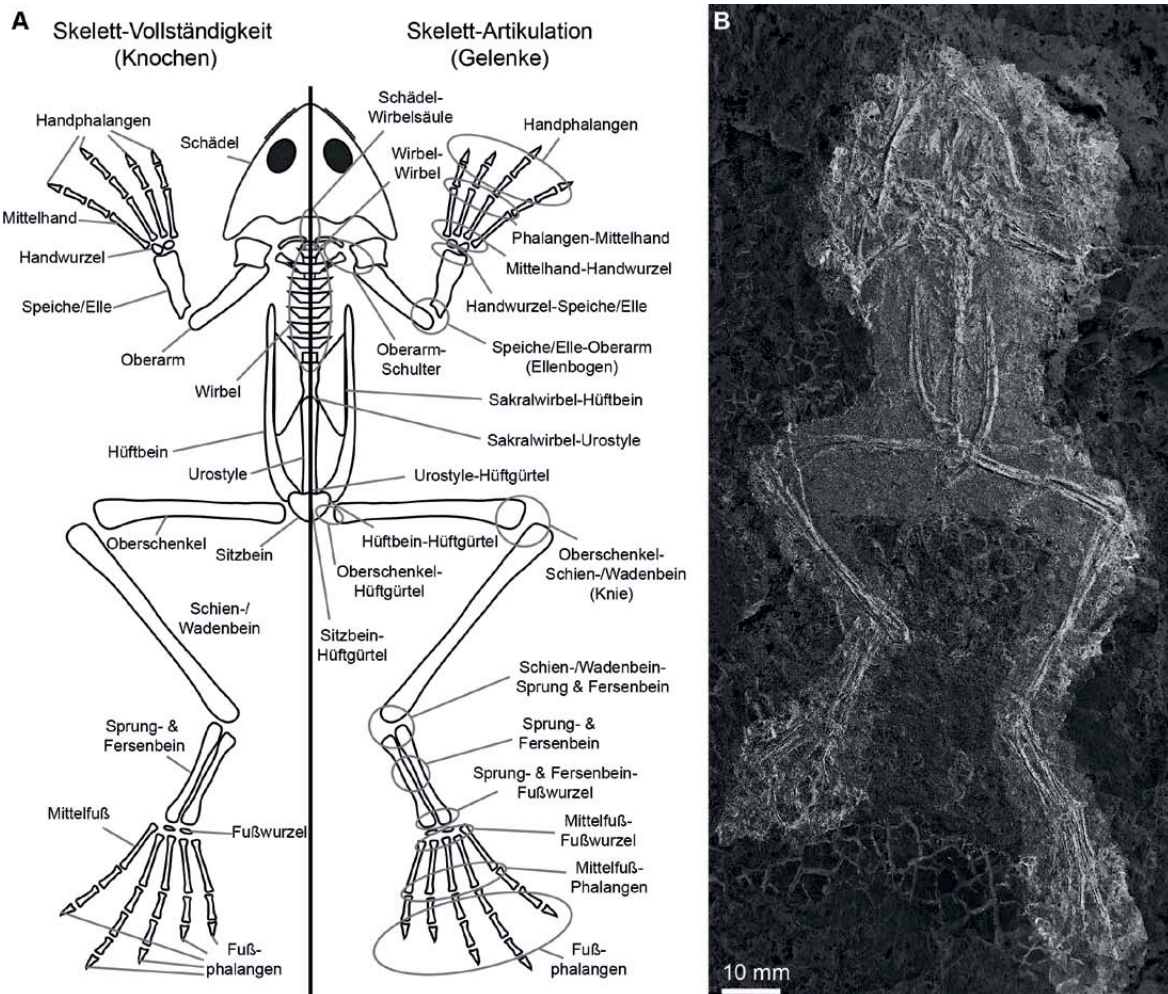


Abb. 3: Erläuterung der Skelett-Taphonomie. A: Schematisches Froschskelett. Untersuchung der beschrifteten Knochen und Gelenke zur Bestimmung der Vollständigkeit bzw. Artikulation des Skelettes; die Auswertung der Daten kann für einzelne Knochen, Gelenke oder das Objekt erfolgen. B: Froschlurch (Pelobatide) in Falschfarben, in Paraffin; dieses Exemplar zeigt eine außerordentlich hohe Vollständigkeit und Artikulation. Es ist der größte Froschlurch in der Sammlung, GMH Ce II-4949-1930. Skizze und Foto: Daniel Falk

Die eozänen Froschlurche des Geiseltals

Die eozänen Froschlurche (Anuren) der Geiseltal-Sammlung wurden parallel zum Abbau von Braunkohle entdeckt und aus den kohligen Sedimenten ausgegraben. Sie stammen von zwölf Grabungsstellen.

Eine erste detaillierte Beschreibung erfolgte durch Kuhn (1941) (Abb. 1B, E, H), der die Geiseltal-Anuren in eine Vielzahl von Arten unterteilte. Nach neueren Untersuchungen handelt es sich bei den Geiseltal-Froschlurchen um zwei bis drei Familien – die Pelobatidae (Schaufelfußkröten), die Palaeobatrachidae (ausgestorben, vermutlich mit den Kralenfröschen verwandt) (Roček 2013; Roček & Rage 2000) und möglicherweise auch die Discoglossidae (Scheibenzüngler) (Roček 2013; Roček & Rage 2003). Exemplare der letzteren Familie wurden für das Geiseltal noch nicht detailliert beschrieben. Die überwiegende Mehrheit der Objekte kann den Pelobatiden zugeordnet werden (Abb. 1A–B, 3B, 4A–C). Adulte Pelobatiden folgen mehrheitlich einem

terrestrischen Lebensstil, mit Ausnahme der Fortpflanzungszeit, in der sie zu Wasserflächen migrieren (Lizana, Márquez & Martín-Sánchez 1994). Weniger Exemplare gehören zu den Palaeobatrachiden, die fast vollständig aquatisch lebten und nur eingeschränkt migrieren konnten (Wuttke, Přikryl & Ratnikov u. a. 2012).

In der Geiseltal-Sammlung sind 180 Objekte den Anuren (Stand Februar 2020) zugeordnet. Historische Quellen berichten von über 200 Anuren, die ausgegraben wurden, und von Hunderten von Objekten, die bei der Ausgrabung oder der Entnahme unbeabsichtigt zerstört worden sind (Krumbiegel, Rufflé & Haubold 1983).

Die fossilen Froschlurche sind entweder auf Nitrozelluloselack, in Paraffin oder einer Kombination aus Lack und Gips konserviert und unterschiedlich aufbewahrt worden (Abb. 2A–E). Objekte in Paraffin weisen häufig deutliche Mengen des kohligen, feinkörnigen Einbettungssediments auf. Bei Lackpräparaten ist oft nur wenig Sediment vorhanden.

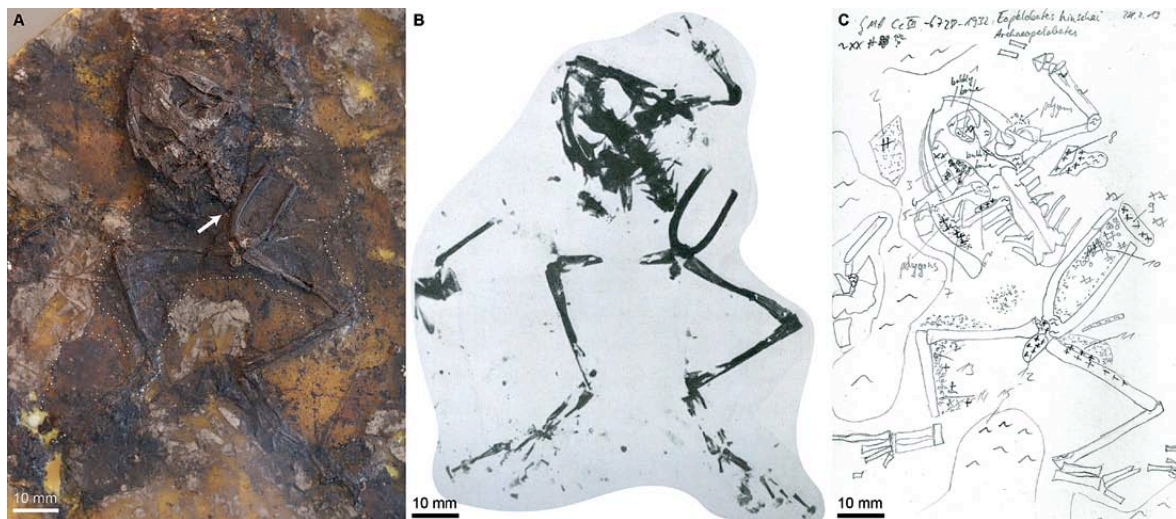


Abb. 4: Gut erhaltener Geiseltal-Froschlurch (Pelobatide), GMH Ce III-6728-1932. A: Objektfotografie, ein dunkler Schatten (Punktlinie) umgibt Knochen und deutet vermutlich auf Weichteilerhaltung hin; Unterkörper durch Versatz des Sakralwirbels und der Urostyle verschoben (Pfeil). B: Objekt als Röntgenaufnahme, aus KUHN 1941. C: Objekt als schematische Handskizze zur Identifizierung und Nachbereitung von Vollständigkeit, Artikulation und unterschiedlichen Strukturen. Foto/Scan: Daniel Falk; Röntgenaufnahme aus KUHN 1941

Nach der Ausgrabung und Präparation wurden die Froschlurche in Hinsicht auf die Artenvielfalt (KUHN 1941), die Funktionsmorphologie (etwa Proportionen von Knochen und Rückschlüsse auf Lebensweise) (HINSCHKE 1941) und die Weichteilerhaltung (VOIGT 1935) bearbeitet. Im institutseigenen Röntgengerät wurden zudem von einer Auswahl von Objekten Röntgenaufnahmen erzeugt (Abb. 1B, Abb. 4B). Zur Weichteilanalyse schnitt Voigt (1935) bis zu einem Zentimeter große Proben aus den fossilen Anuren, die er als „Mikropräparate“ auf einen Objektträger klebte und mikroskopisch fotografierte (bis zu 840-fache Vergrößerung) (VOIGT 1935; VOIGT 1988). Weiterhin führte er Brennxperimente mit fossilem Material durch und untersuchte die mineralogische Zusammensetzung der Brennrückstände, die sich nach seiner Aussage als silikatisch erweisen. Er schlussfolgerte, dass die Erhaltung der Zellen durch einen Austausch der organischen Masse mit Kieselsäure erklärt werden kann. Nach heutigem Wissensstand wäre diese Art der Erhaltung bei fossilen Froschlurchen weltweit einmalig. Um die Hypothese der Silikaterhaltung zu prüfen und zu verstehen, bedarf es daher einer Untersuchung mit interdisziplinären Methoden der Gegenwart.

Methoden

Es werden zwei verschiedene methodische Ansätze zur Untersuchung der Objekte beschrieben, die die Grundlage zur Interpretation der Fossilierung bilden werden.

Skelett-Taphonomie

Die Analyse der Skelett-Taphonomie von Objekten wird verwendet, um festzustellen, welche Prozesse auf einen Kadaver vor und während der Einbettung einwirkten und ob ein

Zusammenhang zwischen der Skeletterhaltung und den Weichgewebeüberresten besteht.

Bei der Skelett-Taphonomie werden Vollständigkeit und Artikulation der Hartteile der Wirbeltiere (Knochen) untersucht (Abb. 3A). Zudem wird die dorsale oder ventrale Orientierung der einzelnen Skelette bestimmt. Damit kann die Orientierung des Kadavers bei der Einbettung nachvollzogen werden.

Von den 180 Anuren wurden insgesamt 40 Kaulquappen und unbestimmbare Objekte von der Analyse ausgeschlossen. Jeder Knochen der 140 Skelette wurde im Auflichtmikroskop betrachtet und gezeichnet; ggf. vorhandene Sedimente und/oder Strukturen wurden auf diesen Zeichnungen schematisch dokumentiert (Abb. 4C). Die Dokumentation wurde durch Fotografien unterstützt (Abb. 4A). Zeichnungen und Fotos bildeten die Grundlage für eine tabellarische Erfassung der bei einem vollständigen Objekt insgesamt 91 Einzelknochen. Ein Skelettelement gilt als vorhanden, wenn es auf dem Objekt sichtbar ist. Weil einige Skelettelemente sich häufig überlagern, fragmentarisch vorlagen oder sehr klein sind und daher einzeln nicht zuverlässig zu bestimmen waren, wurden sie in Gruppen von Knochen zusammengefasst (etwa für die Handphalangen: 0, 1–3, 4–6, 7–9 oder 10 vorhandene Phalangen), gemeinsam als ein Skelettelement betrachtet (wie Schädel, Hand-/Fußwurzelknochen) oder aus der Analyse ausgeschlossen (z. B. Schulterblätter, Rabenbeine, Brustbein).

Weiterhin wurde die Artikulation (Abb. 3B) bzw. Disartikulation (Abb. 4A) von bis zu 98 Gelenken (vollständiges Skelett) bestimmt (Abb. 3A). Die Artikulation konnte nur für Gelenke ausgeführt werden, deren dazugehörige Knochen vorhanden waren. Da einige Skelettelemente sich häufig überlagern, fragmentarisch vorlagen oder sehr klein sind

und daher einzeln nicht zuverlässig bestimmbar waren, wurden die dazugehörigen Gelenke in Gruppen zusammengefasst (z. B. für die Handphalangen: 0, 1–2, 2–3, oder 4–6 artikulierte Gelenke).

76 Prozent der bearbeiteten Skelette sind trunziert, d. h. mindestens ein Knochen ist am Rande des Transfermediums oder an der Kante des Objektes abgeschnitten (z. B. durch die Bergungsmethode). Die Knochen jenseits des trunzierten Knochens wurden aus der Analyse ausgeschlossen, da es sich nicht bestimmen lässt, ob jene Knochen am (untrunzierten) Objekt vor der Ausgrabung vorhanden waren oder nicht (FALK, WINGS & McNAMARA, im Erscheinen). Die Tabellenwerte der Skelett-Taphonomie können pro Skelettelement und Objekt mathematisch ausgewertet werden.

Weichteilanalyse

An zahlreichen Objekten berichtete Voigt (1935) über mikroskopische Nachweise von Weichteilüberresten, insbesondere über verschiedene Hautschichten. Zudem wurden auch fossile Bakterien beschrieben (MRUGOWSKY 1936). Mit modernen geochemischen Analysemethoden lassen sich diese Nachweise detaillierter bestimmen und ggf. verschiedenen Hautschichten, Pigmentzellen und/oder inneren Organen zuzuordnen (ROGERS, ASTROP & WEBB u. a. 2019; ROSSI, McNAMARA & WEBB u. a. 2019).

Unterschiede in Farbgebung, Geometrie, Textur und Oberflächenmorphologien von potentiellen Weichteilüberresten lassen sich bereits mit dem Auflichtmikroskop erkennen und mittels vorhandener Literatur bestimmen (McNAMARA, ORR & KEARNS u. a. 2009).

Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) können Oberflächen und Geometrien im Mikrometerbereich abgebildet und charakterisiert werden. Der am REM angeschlossene Detektor zur Energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDS) misst fast gleichzeitig die elementare Zusammensetzung der analysierten Oberflächen.

Weitere Untersuchungsmethoden, die u. a. Rückschlüsse auf die Bindungskräfte zwischen Elementen, die Bestimmung von Mineralphasen oder die Verbreitung von Spurenmetallen am Objekt möglich machen, sind die Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR), die RAMAN-Spektroskopie und die Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS). Für letztere wird die Untersuchung in einem Teilchenbeschleuniger wie dem der „Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (SSRL)“-Einrichtung in Stanford (Kalifornien, USA) durchgeführt (WOGELIUS, MANNING & BARDEN u. a. 2011).

Als Probenmenge wird normalerweise nicht mehr als 1 mm³ Untersuchungsmaterial benötigt. Weil die meisten Analysen die Probe nicht beschädigen (z. B. REM, EDS, FTIR), kann diese auch für weitere Analysen dienen und/oder als Objekt in die Sammlung mit aufgenommen werden.

Erste Resultate

Die Skelette der Anuren weisen eine sehr unterschiedliche Vollständigkeit auf. Eine erste Auswertung von Vollständigkeit ergab, dass die am häufigsten vorhandenen Skelettelemente Schädel, Femur und Wirbel sind. Sitzbein, Handwurzelknochen und Handphalangen sind jeweils bei nur knapp der Hälfte der Anuren vorhanden. Die Fußwurzelknochen sind nur selten überliefert.

Die Vollständigkeit nimmt in den Vorder- und Hintergliedmaßen in Richtung der Phalangen ab. Die Skelettelemente der hinteren Gliedmaßen sind tendenziell vollständiger als gleichartige Elemente der Vordergliedmaßen. Die Werte für die Vollständigkeit von Elementen der linken und rechten Skelettkörperseite sind vergleichbar.

Die meisten Skelette sind im Allgemeinen gut artikuliert. Auch für sehr unvollständige Skelette gilt, dass vorhandene Gelenke üblicherweise artikuliert sind. Die höchsten Artikulationswerte treten an den Gelenken der mittleren und äußeren Gliedmaßen und der Rückenwirbel auf. Die Verbindung von Halswirbel und Schädel, die körpernahen Gelenke der Gliedmaßen und die Gelenke in der Hüftregion weisen geringere Werte auf. Obwohl Handwurzelknochen und Fußwurzelknochen oft nicht vorhanden sind, sind die umliegenden Knochen – wenn vorhanden – üblicherweise artikuliert.

In der Gegenüberstellung von Vollständigkeit und Artikulation weisen die Objekte eine Bandbreite von Vollständigkeitswerten auf, aber nur sehr wenige Objekte davon sind stark disartikuliert. Fast alle Skelette weisen eine entweder dorsale oder ventrale Orientierung auf.

Körperferne Knochen wie die Phalangen sind relativ selten vorhanden (im Vergleich zu körpernahen Knochen), dann jedoch meist artikuliert. Dies könnte ein Resultat bodennaher Strömungen im Wasserkörper vor der endgültigen Einbettung des Froschlurchkadavers sein. Die kleinen, leichten, körperfernen Knochen sind exponiert und von wenig stützendem Weichgewebe umgeben. Ist letzteres zersetzt, folgt abhängig von der Stärke der Unterwasserströmungen eine Separierung dieser Knochen vom Skelett (d. h. Disartikulation) bis hin zum Abtransport und damit Verlust (DODDSON 1973; McNAMARA, ORR & KEARNS u. a. 2009). Die dorsale oder ventrale Orientierung eines Skelettes ist zudem die hydrodynamisch stabilste Position, weil die Extremitäten nahezu in horizontaler Ebene mit dem restlichen Körper liegen (McNAMARA, ORR & ALCALÁ u. a. 2012). In den nur wenige Meter tiefen Wasserkörpern des Geiseltals sind bodennahe Strömungen daher anzunehmen. Für einige Fundstellen ist zudem über verschiedene Vorzugsorientierungen für Froschlurchskelette berichtet worden (WEIGELT 1933), die während des Transports des Kadavers und/oder durch Bodenströmungen generiert wurden.

Bei der Untersuchung der Objekte mit dem Binokular werden vorläufig vier unterschiedliche Schichten, die zwi-

schen und um die Knochen herum auftreten, als Weichteilerhaltung vermutet; eine nähere Untersuchung mit den oben genannten geochemischen Untersuchungsmethoden steht noch aus. Die von Voigt (1935) als Hohlräume von Schleimdrüsen bezeichnete Schicht ähnelt in ihrer sieb- und gitterförmigen, orangefarbenen Struktur der in den fossilen Fröschen der Libros-Fossilagerstätte (Miozän, Spanien) nachgewiesenen Eberth-Kastschenko-Hautschicht (McNAMARA, ORR & KEARNS u. a. 2009). Die Geometrien in den dunkelbraunen, feinkörnigen Schichten in den Augenhöhlen könnten zudem auf fossile Melanosome (ROSSI, McNAMARA & WEBB u. a. 2019) anstelle von Bakterien (MRUGOWSKY 1936) hindeuten. Die geochemischen Analysen werden Lösungsansätze zur Erklärung dieser Auffälligkeiten bieten.

Verzerrung des Sammlungsbildes

Um Fehlinterpretationen zu verhindern, wurden die Skelettelemente distal der trunkierten Knochen von der Studie ausgeschlossen, was zu einer künstlichen Erhöhung der Vollständigkeitswerte für betroffene Skelettelemente und Skelette führen kann (siehe Methodik, FALK, WINGS & McNAMARA, im Erscheinen). Zudem ist eine Verzerrung des Sammlungsbildes etwa durch nachweislich nicht geborgene Anurenreste und dokumentarisch belegte, aber derzeit un auffindbare Objekte möglich.

Die Ausgräber standen durch den zügig voranschreitenden Braunkohleabbau unter starkem Zeitdruck. Dieser könnte zur Priorisierung bei der Fossilbergung, abhängig vom wissenschaftlichen Interesse, geführt haben. Zudem ist denkbar, dass bevorzugt artikulierte Objekte gesammelt und aufbewahrt wurden.

Objektforschung als treibende Kraft: Nebeneffekte und Ausblick

Bei der wissenschaftlichen Bearbeitung der Objekte aus der Geiseltal-Sammlung ergeben sich direkte und indirekte Vorteile für die Sammlung. Mit dem Wissen um die Ökologie einer Lebenswelt von vor mehr als 45 Millionen Jahren lassen sich Analogien zur heutigen Entwicklung von Lebensräumen herstellen. Die mitteleozäne Geiseltalflora und -fauna ist zudem Puzzlestück im schleichenden Klimawandel von der Warmzeit (eisfreie Polkappen) im Eozän zur Eiszeit (vereiste Polkappen) im Oligozän (MOSBRUGGER, UTESCHER & DILCHER 2005) und kann zur Erforschung der Auswirkungen von klimatischen Veränderungen beitragen.

Für Sammlungen sorgen auch die fortschreitende Inventarisierung und Digitalisierung parallel zur wissenschaftlichen Bearbeitung für Vorteile (FALK, LECHNER & FUHRMANN 2018). Im Falle der Geiseltal-Sammlung wurde durch Ehrhard Voigt schon frühzeitig ein Inventarsystem eingeführt. Die ca. 22.000 Inventarkarten wurden digitalisiert und in eine Datenbank eingefügt (Software „Clarif FileMaker“).

Die Karteikarten selbst sind inzwischen Sammlungsobjekte (Abb. 1H). Die vorhandenen Dokumentationen werden durch 3D-Scans von den Fossilien der Geiseltal-Sammlung ergänzt und mögliche Fehlstellen in der Datenbank im Laufe der wissenschaftlichen Objektbearbeitung korrigiert. Einige Objekte fehlen in der Sammlung. Diese mögen durch Kriegswirren, unprotokollierte Leihvorgänge oder Geschenke in anderen Institutionen liegen. Eine Anfrage an mehr als 54 Museen wird derzeit durchgeführt und brachte bereits erste Erfolge.

In naher Zukunft wird die Forschung an den Objekten der Geiseltal-Sammlung weiter ausgebaut werden. Neben der detaillierten Bearbeitung der Weichteilrückstände an den fossilen Anuren sollen die Daten für andere fossile Tiergruppen der Sammlung (z. B. Fische, Fledermäuse) erfasst und untereinander verglichen werden.

Fazit

Von 180 eozänen Froschlurch-Objekten in der Geiseltal-Sammlung (Stand Februar 2020) wurden 140 Skelette auf ihre Orientierung, Vollständigkeit und Artikulation (Skelett-Taphonomie) untersucht. Die Mehrheit der Skelette ist trunkiert. Körperforme und kleinere Skelettelemente sind weniger häufig vorhanden, verglichen mit größeren und körpfernahen Elementen. Vorhandene Skelettelemente sind üblicherweise artikuliert. Mit weiteren Untersuchungsmethoden (z. B. REM, EDS, FTIR, Raman Spektroskopie, XAS) werden zukünftig potentielle Weichteilüberreste analysiert. Dies kann dazu beitragen, die Steuerungsmechanismen der Fossilierung zu ergründen.

Die Geiseltal-Anuren stellen nur einen Bruchteil der Objekte der Geiseltal-Sammlung dar und bilden den Anfang zur Erforschung des Rätsels der Fossilierung und vieler weiterer Fragestellungen.

Danksagungen

Daniel Falk bedankt sich bei Prof. Dr. Maria E. McNamara (University College Cork) und Dr. Oliver Wings (ZNS), dem derzeitigen Kurator der Geiseltal-Sammlung, für die Unterstützung und die gemeinsame Ausarbeitung des Projektes. Michael Stache bedankt sich bei Christoph Koehn, dem ehemaligen Präparator der Geiseltal-Sammlung, für das geteilte Wissen um die Sammlung und die damit verbundenen Präparationsmethoden.

Wir bedanken uns bei allen früheren Bearbeiter:innen des Geiseltal-Materials für die aufwendige Präparation, Inventarisierung und Dokumentation. Daniel Falk bedankt sich beim Irish Research Council (IRC) für die Finanzierung des Projektes durch ein Government of Ireland Postgraduate Scholarship (GOIPG/2018/3354). Zugleich sei den Organisatoren des Jungen Forums, insbesondere Prof. Dr. Cornelia Weber, für die Einladung gedankt, ebenso wie den Gastge-

bern der Tagung 2020 im Zentralmagazin Naturwissenschaftlicher Sammlungen (ZNS) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, namentlich Bianca Bernstein, Arila-Maria Perl und Dr. Frank D. Steinheimer.

Literatur

BARNES, B. 1926. Eine eozäne Wirbeltier-Fauna aus der Braunkohle des Geiseltales. *Jahrbuch des Halleschen Verbandes für die Erforschung der mitteldeutschen Bodenschätze* 6: 5–24

BLUMENSTENGEL, H. 2004. Kapitel 3.5 Tertiär. In: WANSA, S.; RADZINSKI, K. (Hg.). *Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25 000 von Sachsen-Anhalt (GK 25), Blatt Mücheln (Geiseltal)*, 4636. Halle (Saale): Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt: 48–61

DODSON, P. 1973. The significance of small bones in paleoecological interpretation. *Rocky Mountain Geology* 12: 15–19

FALK, D.; LECHNER, T.; FUHRMANN, A. 2018. Sammeln für die Ewigkeit – Ideen zur nachhaltigen Inventarisierung von geowissenschaftlichen Objekten. *Staatliches Museum für Naturkunde Karlsruhe, Carolinea* 76: 5–19

FALK, D.; WINGS, O.; MCNAMARA, M. E. The skeletal taphonomy of anurans from the Eocene Geiseltal Konservat-Lagerstätte, Germany. *Papers in Palaeontology* (im Erscheinen)

FRANZEN, J. L. 2005. The implications of the numerical dating of the Messel fossil deposit (Eocene, Germany) for mammalian biochronology. *Annales de Paléontologie* 91: 329–335

HASTINGS, A. K.; HELLMUND, M. 2015. Rare in situ preservation of adult crocodylian with eggs from the Middle Eocene of Geiseltal. *Palaios* 30: 446–461

HAUBOLD, H.; HELLMUND, M. 1998. Die Fossilagerstätte Geiseltal bei Halle (Saale) und ihre Bedeutung für das terrestrische Mitteleozän Europas. *Terra Nostra* 98: 122–123

HAUBOLD, H.; KRUMBIEGEL, G. 1984. *Typenkatalog der Wirbeltiere aus dem Eozän des Geiseltals, 1934–1984 – 50 Jahre Geiseltalmuseum*, Halle (Saale): Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

HELLMUND, M. 1997. Letzte Grabungsaktivitäten im südwestlichen Geiseltal bei Halle (Deutschland). *Hercynia N.F.* 30: 163–176

HELLMUND, M.; HASTINGS, A. K. 2014. Messel and Geiseltal: highlights from the Cenozoic; excursion guide, part II – the Eocene Geiseltal Fossilagerstätte (Central Germany) and its vertebrate fossil fauna with 13 figures and 1 table. In: SMITH, K. T., LEHMANN, T., HELLMUND, M.; HASTINGS, A. K. (Hg.). *SVP 2014 Berlin*. Berlin: Senckenberg Research Institute and Natural History Museum Frankfurt: 25–46

HELLMUND, M.; WILDE, V. 2001. Neue wissenschaftliche Aktivitäten im Bereich des ehemaligen Tagebaues Mücheln-Westfeld (Geiseltal, Sachsen-Anhalt, Deutschland). *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften B, Beiheft*, 13: 3–17

HINSCHKE, G. 1941. Untersuchungen zum funktionellen Aufbau der Anuren mit besonderer Berücksichtigung der eozänen Geiseltalfunde. *Nova Acta Leopoldina N.F.* 10: 313–343

KRUMBIEGEL, G.; RÜFFLE, L.; HAUBOLD, H. 1983. *Das eozäne Geiseltal: ein mitteleuropäisches Braunkohlenvorkommen und seine Pflanzen- und Tierwelt*. Wittenberg: A. Ziemsen Verlag

KUHN, O. 1941. Die eozänen Anura aus dem Geiseltale nebst einer Übersicht über die fossilen Gattungen. *Nova Acta Leopoldina N.F.* 10: 345–376

LIZANA, M.; MÁRQUEZ, R.; MARTÍN-SÁNCHEZ, R. 1994. Reproductive Biology of *Pelobates cultripes* (Anura: Pelobatidae) in Central Spain. *Journal of Herpetology* 28: 19–27

MCNAMARA, M. E.; ORR, P. J.; ALACALÁ, L.; ANADÓN, P.; PENALVER, E. 2012. What controls the taphonomy of exceptionally preserved taxa – environment or biology? A case study using frogs from the Miocene Libros Konservat-Lagerstätte (Teruel, Spain). *Palaios* 27: 63–77

MCNAMARA, M. E.; ORR, P. J.; KEARNS, S. L.; ALACALÁ, L.; ANADÓN, P.; PENALVER MOLLÁ, E. 2009. Soft-tissue preservation in Miocene frogs from Libros, Spain: insights into the genesis of decay microenvironments. *Palaios* 24: 104–117

MERTZ, D. F.; RENNE, P. R. 2005. A numerical age for the Messel fossil deposit (UNESCO World Heritage Site) derived from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on a basaltic rock fragment. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg* 255: 67–75

MERTZ, D. F.; SWISHER, C. C.; FRANZEN, J. L.; NEUFFER, F. O.; LUTZ, H. 2000. Numerical dating of the Eckfeld maar fossil site, Eifel, Germany: a calibration mark for the Eocene time scale. *Naturwissenschaften* 87: 270–274

MOSBRUGGER, V.; UTESCHER, T.; DILCHER, D. L. 2005. Cenozoic continental climatic evolution of Central Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102: 14964–14969

MRUGOWSKY, J. 1936. Über fossile Bakterien aus dem Mitteleozän des Geiseltales. *Nova Acta Leopoldina N.F.* 3: 597–603

ROČEK, Z. 2013. Mesozoic and Tertiary Anura of Laurasia. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments* 93: 397–439

ROČEK, Z.; RAGE, J.-C. 2003. Evolution of anuran assemblages in the Tertiary and Quaternary of Europe, in the context of palaeoclimate and palaeogeography. *Amphibia-Reptilia* 24: 133

ROČEK, Z.; RAGE, J. 2000. Tertiary Anura of Europe, Africa, Asia, North America, and Australia. *Amphibian Biology* 4: 1332–1387

ROGERS, C. S.; ASTROP, T. I.; WEBB, S. M.; ITO, S.; WAKAMATSU, K.; MCNAMARA, M. E. 2019. Synchrotron X-ray absorption spectroscopy of melanosomes in vertebrates and cephalopods: implications for the affinity of *Tullimonstrum*. *Proceedings of the Royal Society B* 286: 20191649

ROSSI, V.; MCNAMARA, M. E.; WEBB, S. M.; ITO, S.; WAKAMATSU, K. 2019. Tissue-specific geometry and chemistry of modern and fossilized melanosomes reveal internal anatomy of extinct vertebrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116: 17880–17889.

VOIGT, E. 1933. Die Übertragung fossiler Wirbeltierleichen auf Zellulose-Filme, eine neue Bergungsmethode für Wirbeltiere aus der Braunkohle. *Palaeontologische Zeitschrift* 15: 72–78

VOIGT, E. 1935. Die Erhaltung von Epithelzellen mit Zellkernen, von Chromatophoren und Corium in fossiler Froschhaut aus der mitteleozänen Braunkohle des Geiseltales. *Nova Acta Leopoldina N.F.* 3: 339–360

VOIGT, E. 1988. Preservation of soft tissues in the Eocene lignite of the Geiseltal near Halle (Saale). *Courier Forschungsinstitut Senckenberg* 107: 325–343

WEIGELT, J. 1933. Die Biostratonomie der 1932 auf der Grube Cecilie im mittleren Geiseltal ausgegrabenen Leichenfelder. *Nova Acta Leopoldina, N.F.* 1: 157–174

WOGELIUS, R. A.; MANNING, P. L.; BARDEN, H. E.; EDWARDS, N. P.; WEBB, S. M.; SELLER, W. I.; TAYLOR, K. G.; LARSON, P. L.; DODSON, P.; YOU, H.; DA-QING, L.; BERGMANN, U. 2011. Trace metals as biomarkers for eumelanin pigment in the fossil record. *Science* 333: 1622–1626

WUTTKE, M.; PŘIKRYL; T., RATNIKOV, V. Y.; DVOŘÁK, Z.; ROČEK, Z. 2012. Generic diversity and distributional dynamics of the Palaeobatrachidae (Amphibia: Anura). *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments* 92: 367–395

Zu den Autoren

Daniel Falk studierte Geowissenschaften (Schwerpunkt Paläontologie) an der TU Bergakademie Freiberg (Sachsen). Bevor er ein zweijähriges wissenschaftliches Volontariat am Staatlichen Museum für Naturkunde Karlsruhe absolvierte (2016–2018), war er im Rahmen von ingenieurgeologischen Arbeiten, insbesondere zur Erzprospektion, im In- und Ausland tätig. Seit Ende 2018 promoviert er als Stipendiat am University College Cork in Irland zum Thema „Taphonomy of the Eocene Geiseltal Konservat-Lagerstätte, Germany“.

Michael Stache ist ausgebildeter geowissenschaftlicher Präparator. Seit 1994 ist er der Geiseltal-Sammlung verbunden. Nach einer langjährigen Anstellung am Senckenberg Forschungsinstitut für Quartärpaläontologie in Weimar ist er seit 2012 am Zentralmagazin Naturwissenschaftlicher Sammlungen (ZNS) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg fest angestellt und für die konservatorischen Belange der Geiseltal- und der Haustierkunde-Sammlung zuständig.

Kontakt

Daniel Falk M.Sc.

University College Cork

School of Biological, Earth, and Environmental Sciences

Butler Building, Distillery Fields, North Mall

Cork, T23 TK30

Irland

daniel.falk[at]ucc.ie

Michael Stache

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Zentralmagazin Naturwissenschaftlicher Sammlungen

(ZNS)

Domplatz 4, 06108 Halle (Saale)

Deutschland

michael.stache[at]zns.uni.halle.de