

Datierung fluviatiler Höhlensedimente mittels kosmogener Nuklide am Beispiel des Grazer Berglandes

ZUSAMMENFASSUNG

Der Mittelsteirische Karst nördlich von Graz weist eine Vielzahl an Höhlen auf, von denen ein Großteil phreatischen Ursprungs ist. Aufgrund der Häufung in bestimmten Höhenlagen über dem derzeitigen Vorfluter, der Mur, können diese mehreren Niveaus zugeordnet werden. Höhlen können nicht älter sein als das Gestein, in dem sie gebildet wurden; im Falle des hier untersuchten Gebietes nicht älter als rund 400 Ma (Millionen Jahre vor heute). Höhleninhalte wiederum erlauben es, ein Minimalalter der Höhlenentstehung abzuleiten, da diese schon während der Entstehung oder (meist) später darin abgelagert worden sind. Neben zahlreichen autochthonen (an Ort und Stelle entstandenen) Sedimenten und Speläothemen sind in den Höhlen des Mittelsteirischen Karsts oftmals allochthone (von der Oberfläche in die Höhle transportierte) Sedimente anzutreffen. Einschwenmalter einiger quarzhaltiger allochthoner Höhlensedimente wurden mithilfe der radioaktiven kosmogener Nuklide ^{10}Be und ^{26}Al ermittelt. Der vorliegende Artikel gibt einen Einblick in diese relativ neue Datierungsmethode („burial age dating“) zur Altersbestimmung von Höhlensedimenten. Es wird der derzeitige Wissensstand der Entstehungsalter von Höhlen im Grazer Bergland diskutiert, wobei die Ergebnisse zweier aktueller fachwissenschaftlicher Arbeiten (Wagner et al., 2010, 2011) zusammengefasst werden. Anhand dieser Ergebnisse werden Rückschlüsse auf Alter der Höhlenniveaus, relative Einschneideraten der Mur und die Landschaftsentwicklung des Alpenostrandes im Allgemeinen gezogen. Einschwenmalter von 0 bis ca. 5 Ma vor heute zeigen eine gute Übereinstimmung mit immer höher über dem Vorfluter befindlichen Höhlenniveaus. Dies wiederum spiegelt das stufenweise Einschneiden der

Mur wider. Aufgrund der ältesten datierten Proben wird der Beginn der Verkarstung und somit die Exhumierung des Mittelsteirischen Karsts vor mindestens 4-5 Ma belegt. Das älteste Niveau, dem ein Alter von mehr als 4 Ma zugewiesen werden konnte, befindet sich gut 500 m über dem heutigen Talboden. Somit kann eine relative Einschneiderate der Mur in der Größenordnung von gerade einmal 100 Meter pro Million Jahre (m/Myr) für den Zeitraum zwischen 4-5 Ma und heute abgeleitet werden. Eine genauere Betrachtung der Niveaus lässt eine durchschnittliche Abnahme der Geschwindigkeit des Einschneidens erkennen, da Einschwenmalter von ~2,5 Ma nur etwa 100 m über dem heutigen Vorfluter festzustellen sind. Ferner kann die Entstehung von Verebnungen und Terrassen auf der Landoberfläche durch die Korrelation mit Höhlenniveaus zeitlich eingegrenzt und somit ein wichtiger Beitrag zum Verständnis der Landschaftsentwicklung dieser Region geleistet werden.

ABSTRACT

Dating of fluvial cave sediments using cosmogenic nuclides: a case study from the Grazer Bergland

The Central Styrian Karst north of Graz comprises a great number of caves of which many are of phreatic origin. Due to a clustering of caves at certain elevations above the current base level, the Mur River, these caves can be assigned to distinct levels. Caves cannot be older than the rock in which they formed, i.e. in the case of the region studied here not older than about 400 Ma (million years ago). Cave deposits on the other hand allow to infer a minimum age of cave formation, because they are deposited in the cave during or (mostly) after its development. Besides numerous autoch-

Thomas Wagner

Institut für Erdwissenschaften,
Karl-Franzens-Universität Graz,
Heinrichstraße 26, A-8010 Graz
thomas.wagner@uni-graz.at

Eingelangt: 1.5.2011
Angenommen: 19.5.2011

Wagner / Datierung fluviatiler Höhlensedimente mittels kosmogener Nuklide am Beispiel des Grazer Berglandes

thonous (i.e. in situ) sediments and speleothems, also a number of allochthonous (transported into the cave from the surface) sediments are encountered. Burial ages of several quartz-rich allochthonous cave sediments were determined using the radioactive cosmogenic nuclides ^{26}Al and ^{10}Be . The present article provides an insight into this relatively new dating method (burial age dating) to constrain the age of cave deposits. The current state of knowledge about the timing of cave formation in the Grazer Bergland (Highland of Graz) will be discussed by summarizing the results of two recent papers (Wagner et al., 2010, 2011). Based on these results, conclusions are drawn about the age of the cave levels, relative incision rates of the River Mur and the landscape evolution of the eastern rim of the Alps in general. Sedimentation ages of 0 to about 5 Ma ago are in good agreement with increasingly higher cave levels above the

present base level. This in turn reflects the stepwise relative incision of the River Mur. Based on the oldest samples, the onset of karstification and thus the exhumation of the Central Styrian Karst occurred at least 4-5 Ma ago. The oldest level, assigned to an age of at least 4 Ma, is situated some 500 m above the current valley bottom. Therefore, a relative incision rate of the River Mur in the order of only about 100 meters per million year (m/Myr) for the last 4-5 Ma is inferred. A more detailed examination of the levels reveals on average a decrease in the incision rate. Burial ages of ~2.5 Ma are determined only 100 m above the current base level. Moreover, the formation of planation surfaces and terraces in the Grazer Bergland is constrained by the correlation with cave levels and as such an important contribution to the understanding of landscape evolution of this region is made.

EINLEITUNG

Wie alt ist eine Höhle und wie kann man dies bestimmen? Intuitiv beurteilt, sind inaktive Höhlen, die sich hoch über dem heutigen Talboden und bereits teilweise in Verfall befinden, vermutlich älter als (wasser-)

aktive Höhlen, deren Quellaustritte nahe dem heutigen Talboden anzutreffen sind. Dazwischenliegende Höhlen (-Niveaus), die teilweise mitten in einer Felswand enden oder beginnen, sind vermutlich

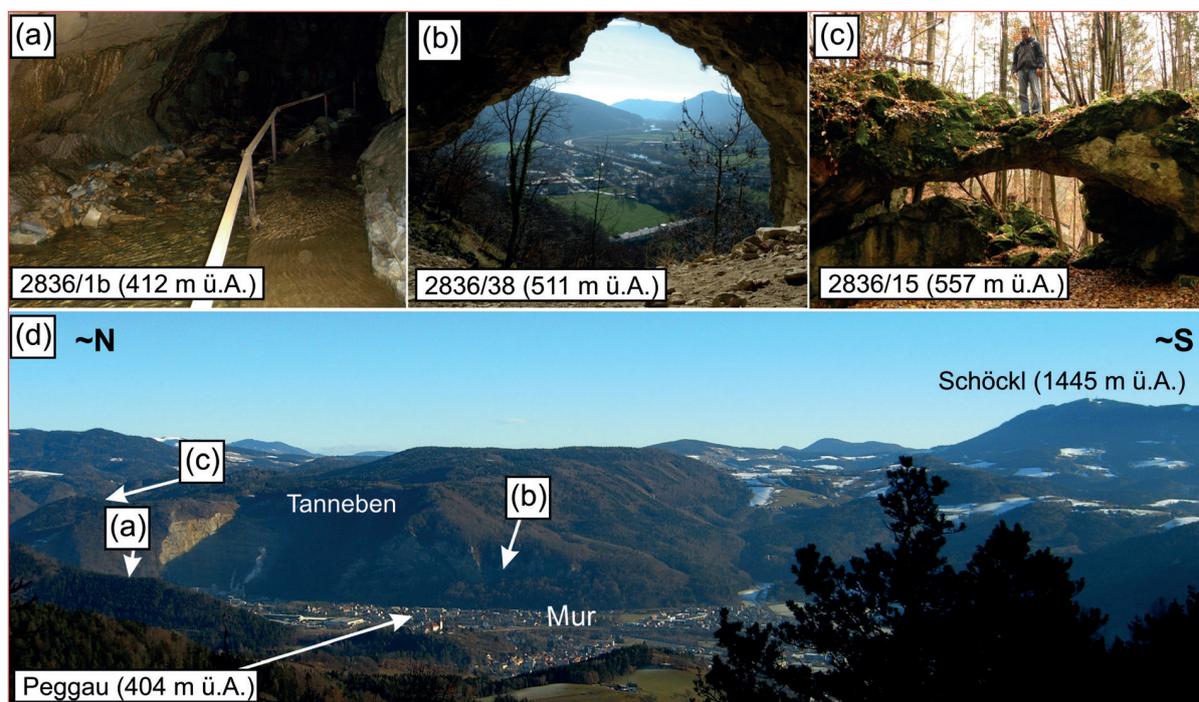


Abb. 1: Beispielhafte Höhlen des Grazer Berglandes von „aktiv – am oder nahe des Vorfluters – jung“ bis zu „inaktiv – weit über dem Vorfluter – alt“. (a) Lurgrotte bei Peggau (2836/1b), aktiver Teil; (b) Blick aus der Peggauer-Wand-Höhle III (2836/38); (c) Naturbrücke (2836/15); (d) Blick auf den Tannebenstock vom Gamskogel (859 m Seehöhe). Die Lagen der in (a) bis (c) gezeigten Höhlen sind mit Pfeilen gekennzeichnet.
Exemplary caves of the Highland of Graz ranging from "active - at or near the base level - young" up to "inactive - far above the base level - old". (a) Lurgrotte at Peggau (2836/1b), active part; (b) View out of the Peggauer-Wand-Höhle III (2836/38); (c) Naturbrücke (natural bridge) (2836/15); (d) The Tanneben massif seen from the Gamskogel (859 m above sealevel). The locations of the caves shown in (a) to (c) are indicated by arrows.

älter als aktive und jünger als die bereits im Verfall befindlichen (Abb.1).

Höhlenniveaus

Phreatische subhorizontale Höhlengänge bzw. -abschnitte (oft erkennbar an elliptischen Gangquerschnitten) entwickeln sich oftmals knapp unterhalb der Oberfläche eines lokalen Grundwasserkörpers (Palmer, 1987). Aufgrund des dort herrschenden meist größten Grundwasserflusses ist in diesem Bereich die Lösung von verkarstungsfähigem Gestein und damit die Lösungsfracht am größten (Dreybrodt, 1996). Wenn wasserstauende Gesteine dies nicht verhindern, ist der dazugehörige Quellaustritt und somit die Oberfläche des damit verbundenen Grundwasserkörpers eng an die Höhenlage des Talbodens geknüpft, in dem sich die Quelle befindet (Audra et al., 2006). Im Bereich eines Talbodens bzw. entlang eines Vorfluters können sich zu einem gewissen Zeitpunkt mehrere Höhlensysteme nahe der Oberfläche des maßgebenden Grundwasserkörpers ausbilden. Somit lässt sich eine Häufung von Höhlen in einem gewissen Höhenintervall über dem Vorfluter auch später noch erkennen und erlaubt die Rekonstruktion von „Paläowasserspiegelpositionen“ (Palmer, 1987; Plan et al., 2009), vorausgesetzt, die Region wurde tektonisch nicht nachträglich deformiert, d.h. einzelne Abschnitte nicht in unterschiedliche Höhenlagen gebracht.

Die Taleinschneidung durch einen Fluss und die dadurch bedingte Senkung des Grundwasserspiegels kann mithilfe erhaltener Höhlenniveaus bestimmt werden. Sind mehrere Höhlenniveaus und deren Höhenlage über dem jetzigen Vorfluter bekannt und schafft man es, diese zeitlich einzustufen, so kann man die Geschwindigkeit der Taleintiefung rekonstruieren (Anthony & Granger, 2007; Wagner et al., 2010), allerdings nur relative Einschneideraten. Relativ deshalb, weil die eigentliche Ursache anhand dieser Informationen alleine noch nicht auszumachen ist. Die erosive Tieferlegung des Talbodens ist die Konsequenz relativer Hebung im Hinterland bzw. Senkung im Vorland. Es braucht weitere Indizien und Überlegungen, um zu erkennen, ob sich ein Fluss in ein Plateau einschneidet oder sich die Region hebt und der Fluss in der Lage ist, seine Höhenlage beizubehalten (Wagner et al., 2010). Zusätzlich zu beachten sind Ereignisse, in denen der Vorfluter durch erhöhte Sedimentzufuhr wieder angehoben wird. Daher können sich höher gelegene Niveaus bilden, die dann jünger sind als bereits zuvor tiefer entstandene, oder es werden ältere Niveaus reaktiviert.

Die Entwicklung von Höhlenniveaus, Flussterrassen und Verebnungen ist primär von der Entwicklungsgeschichte des Flusstales (hier des Murtales) abhängig. Die Korrelation all dieser geomorphologischen Erscheinungen erlaubt es, Rückschlüsse auf die Landschaftsentwicklung zu ziehen (z.B. Wagner et al., 2011). Zeiten relativer Ruhe in der Tal- bzw. Flussentwicklung – also weder Einschneidung noch Aufschüttung des Flussbetts – ermöglichen die Entstehung von weiten Tälern, Verebnungen im anstehenden Gestein und unter Tage die Bildung großer phreatischer Höhlenabschnitte (mit idealerweise erkennbaren Übergängen zu vadosen Bereichen darüber) in denselben Höhenlagen. Eine rasche Eintiefung des Flussbettes und folglich eine rasche Absenkung ehemals phreatischer Bereiche hat wiederum sowohl enge Schluchten und Canyons an der Oberfläche als auch in den Höhlen zur Folge. Die Aufschüttung eines Flussbetts spiegelt sich in der Ablagerung von alluvialen Flussterrassen und einer Füllung bzw. teilweisen Verlegung von Höhlengängen wider.

Höhlensedimente

Da eine Höhle nicht älter sein kann als das Gestein, in dem sie gebildet worden ist, kann zunächst nur ein Maximalalter der Höhlenentstehung bestimmt werden. Höhleninhalte wiederum erlauben es, ein Minimalalter der Höhlenentstehung abzuleiten, da im Normalfall diese während der Entstehung oder später darin abgelagert worden sind (Häuselmann, 2007a, 2007b). Funde z.B. des Höhlenbären (*Ursus spelaeus*; Mottl, 1946) liefern einen Hinweis auf die Besiedelung der Höhlen und somit ein Minimalalter für die Höhlenentstehung. Auch Speläotheme liefern ein Minimalalter der Höhle; allerdings ist deren Bildung vorrangig von klimatischen Voraussetzungen abhängig und setzt unter Umständen erst viel später als die Höhlenentstehung selbst ein (siehe Kapitel Resultate, S. 10, Stock et al., 2005).

Welche Höhlensedimente liefern nun aber für die Höhlengenese relevante Hinweise und sind nicht das Produkt einer viel späteren Ablagerung? Für die Fragestellung am besten geeignet haben sich allochthone, gut gerundete und somit länger transportierte Grobkiese bzw. Schotter (> 2 cm) erwiesen, da diese meist zur Zeit der aktiven Höhlenentstehung bzw. kurz vor Trockenfallen dieser Gangabschnitte durch Tieferlegung des Vorfluters in Form von Bachgeröllen bzw. Flussschottern eingeschwemmt werden und nachträglich nicht mehr allzu leicht wieder umgelagert werden können (Granger et al., 2001; Stock et al., 2005). Je grobkörniger das eingetragene Sediment ist, umso

unwahrscheinlicher ist eine spätere Umlagerung in der Höhle selbst. Kann man nun ein Minimalalter der Höhlenentstehung mittels der ältesten erhaltenen (relevanten) Sedimente abschätzen, so erlaubt dies die Rekonstruktion von „Paläowasserspiegelständen“ und folglich die Bestimmung der maximal möglichen relativen Einschneiderate (Granger et al., 1997; Granger et al., 2001). Eine direkte Aussage zur morphologischen Entwicklung der Landoberfläche selbst (Altflächen, Verebnungen, Terrassen) ist oft schwieriger, da einerseits viel von diesen Formen bereits wieder erodiert worden ist und andererseits kaum geeignete Datierungsmethoden zur Verfügung stehen.

Datierung der Sedimente

Wie bestimmt man aber ein Alter eines Höhlensedimentes? Konkret: Wie bestimmt man den Zeitpunkt der Ablagerung des Sedimentes und wann wurde es in eine Höhle eingebracht?

Man macht sich dazu den radioaktiven Zerfall von Nukliden zu Nutze, die durch kosmische Strahlung im Gestein entstehen. Ein Nuklid ist ein chemisches Element mit einer bestimmten Massen- und Ordnungszahl. Verschiedene Nuklide (mit verschiedenen Massenzahlen) ein und desselben chemischen Elements (gleiche Ordnungszahl) werden Isotope genannt. Im Gestein oder Sediment können sich je nach Mineralbestand verschiedene kosmogene Nuklide an bzw. nahe der Erdoberfläche bilden, die radioaktiv sind und somit entsprechend dem Zerfallsgesetz weniger werden. Werden diese als Sediment tief genug in eine Höhle eingeschwemmt und folglich vor weiterer kosmischer Strahlung abgeschirmt, kann keine weitere Produktion dieser Nuklide stattfinden. Nachdem unterschiedliche radioaktive Nuklide unterschiedliche Zerfallskonstanten haben, verändert sich das Verhältnis zweier Nuklide in der Folge. Weiß man die Produktionsraten dieser Nuklide, in diesem Fall ^{26}Al und ^{10}Be , die im Quarz gebildet werden, und kennt man das Verhältnis der Nuklide zueinander vor dem Eintrag in eine

Höhle (hier $\sim 6,8 : 1$), und misst man das jetzige (kleinere) Verhältnis der Nuklide (^{26}Al zerfällt schneller als ^{10}Be), so kann man die Zeit der Einschwemmung dieses Sedimentes in die Höhle rückrechnen.

Die hier vorgestellte Methode ist eine noch recht junge: Granger et al. (1997) und Granger et al. (2001) waren die ersten, die das Potenzial dieser Methode erkannten. Sie untersuchten Höhlensedimente und bestimmten deren Einschwemmalter, um die pliozäne und pleistozäne Einschneidegeschichte des Green River in Kentucky und des New River in Virginia (USA) zu rekonstruieren. Diese Methode ist momentan die geeignetste und oft die einzige, um den Zeitraum der letzten ~ 5 Ma abzudecken. Erste, leider erfolglose Versuche, diese Methode in den Nördlichen Kalkalpen anzuwenden, wurden von Frisch et al. (2001) beschrieben.

Der hier vorliegende Artikel beschäftigt sich mit derselben Problematik, allerdings bezogen auf die Einschneidegeschichte der Mur anhand von Höhlensedimenten des Grazer Berglandes. Zuerst werden die Methode der Datierung von allochthonen Höhlensedimenten mittels kosmogener Nuklide sowie getroffene Annahmen, deren Vorteile gegenüber anderen Datierungsmethoden, aber auch deren Einschränkungen besprochen. Danach werden die Anwendung dieser Datierungsmethode und deren Resultate hinsichtlich der Höhlengenease am Beispiel des Mittelsteirischen Karsts präsentiert und deren Interpretationsmöglichkeiten zur Landformung dieser Region aufgezeigt.

Wichtig für die Interpretation der ermittelten Einschwemmalter ist die Beziehung des Sediments zur Höhlengenease. Es bedarf der Auswahl des vermuteten ältesten Sediments eines Höhlenabschnittes bzw. -niveaus, um ein bestmögliches Minimalalter der Höhlengenease abzuleiten (Häuselmann, 2007a). Dieser Artikel befasst sich vorwiegend mit der Erstellung einer zeitlichen Abfolge von Höhlenniveaus, was wiederum ein Verständnis der Sedimentabfolgen in den einzelnen Niveaus voraussetzt, worauf hier aber nicht näher eingegangen wird.

BESTIMMUNG VON EINSCHWEMMALTER MITTELS KOSMOGENER NUKLIDE

Die Beschreibung der Methode zur Datierung der Sedimente in Lagerung („sediment burial age“) in Höhlen ist eng angelehnt an die Arbeit von Granger & Muzikar (2001). Für eine umfangreiche Information über kosmogene Nuklide und deren breiteres Anwendungsfeld sei auf Gosse & Phillips (2001) verwiesen.

Grundlagen

Trifft kosmische Strahlung auf Atome der Atmosphäre und in weiterer Folge auf solche in Gesteinen, so werden kosmogene Nuklide gebildet, die entweder stabil sind oder radioaktiv zerfallen (Radionuklide). Ein

bekanntes Radionuklid ist Radiokarbon, ^{14}C , welches auch in Organismen eingebaut wird und dessen Gehalt z.B. in organischen Resten in Höhlensedimenten gemessen werden kann. Das betreffende Alter zeigt an, wann der Organismus abgestorben ist, nicht aber wann er in der Höhle abgelagert worden ist bzw. wann er in die Höhle eingebracht wurde. Mit der Radiokarbon-Methode können aber nur Proben datiert werden, die jünger als etwa 50 ka sind (1 ka = 1000 Jahre). Zwei radioaktive Nuklide, die durch kosmische Strahlung in quarzhaltigen Sedimenten bzw. Gesteinen entstehen können, sind ^{26}Al und ^{10}Be , deren Anwendung hier näher besprochen wird.

Diese beiden Nuklide werden in situ, also direkt im Quarzkristall produziert, allerdings in sehr geringen Mengen von nur einigen Atomen pro Jahr und Gramm Quarz. Die Bestimmung der Einschwemmalter von Höhlensedimenten beruht auf dem Prinzip des radioaktiven Zerfalls von Nukliden, die sich zuvor an bzw. nahe der Erdoberfläche gebildet haben. Nach dem Zeitpunkt des Einschwemmens der Sedimente, tief genug in die Höhle, ist auch die kosmische Strahlung nicht mehr wirksam und daher auch keine weitere Produktion kosmogener Nuklide möglich. ^{26}Al und ^{10}Be haben an bzw. nahe der Oberfläche ein konstantes Produktionsverhältnis von etwa 6,8 : 1, d.h. es wird 6,8-mal so viel ^{26}Al wie ^{10}Be im Quarz gebildet. Nun ist die Zerfallskonstante von ^{26}Al aber etwa doppelt so groß wie die von ^{10}Be (bzw. dessen Halbwertszeit etwa nur die Hälfte von ^{26}Al). Dies bewirkt, dass sich das Verhältnis der beiden Nuklide von 6,8 : 1 mit fortschreitender Zeit nach der Ablagerung in der Höhle reduziert. Misst man nun im Quarz von Höhlensedimenten das aktuelle $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ Verhältnis, so kann daraus die Zeit berechnet werden, die dieses Sediment untertage verbracht hat, und infolgedessen das Einschwemmalter des Sediments bestimmt werden. Zusätzlich kann man anhand der gemessenen Konzentration der Nuklide auf ihre Konzentration vor dem Eintrag in die Höhle rückrechnen. Kombiniert man dies mit einer Schätzung der Produktionsraten der Nuklide aus dem Herkunftsbereich der (Höhlen-) Sedimente (da diese von der geographischen Lage und der Höhe abhängig sind), so ist es möglich, neben dem Einschwemmalter auch auf Erosionsraten der Sedimente vor deren Eintrag in die Höhle zu schließen (Granger & Muzikar, 2001; Wagner et al., 2010).

Folgende Voraussetzungen sind für eine erfolgreiche Bestimmung von Einschwemmaltern mittels der Radionuklide ^{26}Al und ^{10}Be nötig:

- Quarzhaltige Höhlensedimente (Sande oder besser Kiese), aus denen sich etwa 100 g reiner Quarz separieren lässt;

- Ausreichend lange Einwirkung der kosmischen Strahlung auf quarzhaltige Gesteinsbruchstücke vor deren Eintrag in die Höhle, damit sich eine messbare Nuklid-Konzentration bilden kann (typischerweise mindestens 10 kyr). Dies kann leider im Gelände nicht vorab bestimmt werden. Haben sich in dem allochthonen Sediment vor der Einschwemmung in die Höhle nur wenige kosmogene Nuklide bilden können – z.B. aufgrund rascher Erosion bzw. schnellen oder kurzen Transportes – so kann bereits nach kurzer Zeit in der Höhle der Zerfall der radioaktiven Nuklide soweit fortgeschritten sein, dass die Konzentrationen bereits unter der Nachweisgrenze des Bestimmungsverfahrens liegen und keine Altersaussage mehr zu treffen ist;
 - Ein Stopp der Produktion der kosmogener Nuklide im Höhlensediment aufgrund einer ausreichenden Abschirmung (Überdeckung) durch den Eintrag tief in eine Höhle (> 20 m unter Geländeoberkante), da die Höhenstrahlung je nach Gestein mehrere Meter in den Untergrund eindringt;
 - Keine vorangegangene Überdeckung der Sedimente, die die Berechnung des Alters deutlich erschwert.
- Die aufwändige und zeitintensive Probenaufbereitung und die kostspielige Messung mittels Beschleuniger-Massenspektrometer sollen hier nicht näher besprochen werden (Informationen dazu finden sich z.B. in Gosse & Phillips, 2001, und Wagner et al., 2010).

Annahmen

Ein wichtiger Aspekt dieser Methode ist, dass man ein Einschwemmalter berechnet und nicht das Alter der Ablagerung an Ort und Stelle der Beprobung, d.h. die Mobilität eines Sediments kann problematisch sein. Wird ein Sediment nach dem Eintrag in ein Höhlensystem später in tiefere Stockwerke umgelagert, beeinflusst dies das gemessene Alter nicht, sehr wohl aber die – folglich falsche – Interpretation des Alters als zu hoch für diesen Höhlengang bzw. dieses Niveau. Wird dagegen ein Sediment erst viel später von außen in eine höhere – bereits ältere – Passage eingebracht, liefert dies ein zu junges Alter, aber immer noch ein gültiges Minimalalter.

Außerdem beruht die Berechnung des Einschwemmalters auf der Annahme, dass das Sediment keine vorangegangene Überdeckung aufwies, d.h. die Konzentration der Nuklide nicht die Folge von mehrfachen aufeinanderfolgenden Überdeckungen ist. Wäre dies der Fall, so ist das errechnete Einschwemmalter als ein Maximalalter anzusehen. Um dies zu überprüfen, werden Oberflächenproben und auch Proben aus offensichtlich jungen Ablagerungen einer Höhle entnom-

men und deren Alter bestimmt. Soweit möglich werden auch andere unabhängige Altersbestimmungen (U-Th-Tropfsteindatierungen; z.B. Boch et al., 2010) herangezogen, um Einschwemmalter zu überprüfen (siehe Kapitel Resultate, S. 10).

Vorteile und Einschränkungen

Diese Datierungsmethode deckt einen weiten Altersbereich von ca. 100 ka bis ca. 5 Ma ab. Das obere Ende ist hauptsächlich das Resultat der Nachweisgrenze des momentan eingesetzten Analyseverfahrens mittels sogenannter Beschleuniger-Massenspektrometer, mit denen das Verhältnis von $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ und $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ bis auf $\sim 10^{-15}$ gemessen werden kann (zusätzlich wird noch der Gesamtgehalt an Al und Be gemessen

und so kann schlussendlich das $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ Verhältnis berechnet werden). Die untere Grenze ergibt sich im Wesentlichen aufgrund von Messunsicherheiten, Unsicherheiten in den Produktionsraten und den Zerfallskonstanten der Nuklide. Die Methode erlaubt somit, ein zwar größeres Zeitfenster als die Uran-Thorium-Methode zur Tropfsteindatierung (bis $\sim 0,5$ Ma vor heute) abzudecken, ist aber im Vergleich dazu mit einer größeren Unsicherheit behaftet und speziell für junge Sedimente (< 300 ka) nur bedingt geeignet. Im Vergleich zur Paläomagnetik von Höhlensedimenten ist anzumerken, dass Einschwemmalter keine durchgehende stratigraphische Schichtabfolge benötigen und somit auch unvollständige Sedimentablagerungen datierbar sind (Stock et al., 2005).

ANWENDUNGSBEISPIEL GRAZER BERGLAND

Am Beispiel des Grazer Berglands wird die oben beschriebene Methode der Bestimmung von Einschwemmaltern veranschaulicht. Zuerst wird ein kurzer Überblick über die vorhandenen Höhlenniveaus und die damit in Zusammenhang stehenden Oberflächenerscheinungen gegeben, dann werden die Resultate dieser Datierung von Höhlensedimenten – die ersten in den Ostalpen – vorgestellt und schlussendlich deren Bedeutung und Interpretationsmöglichkeiten hinsichtlich Taleintiefung und Landformung angesprochen.

Das Grazer Bergland und speziell der Mittelsteirische Karst – die verkarstungsfähigen Teile der paläozoischen Gesteine – sind von besonderem Interesse, da sie an der Übergangzone der Ostalpen zum Pannonischen Becken außerhalb der von den Vergletscherungen des Quartärs betroffenen Gebieten der Alpen liegen (Abb. 2a). Somit kann eine direkte Einwirkung der Gletschererosion auf die Landformung dieser Region ausgeschlossen werden, was es auch erlaubt, in die Zeit vor dem Quartär ($> 2,6$ Ma) zu blicken. Das Grazer Paläozoikum mit dem Mittelsteirischen Karst wird von der Mur, dem größten Fluss, der in das Steirische Becken entwässert, etwa von Nord nach Süd zerschnitten (Abb. 2). Dieses Einschneiden ist anhand einer Vielzahl an Höhlen (-Niveaus) bis weit über dem heutigen Vorfluter dokumentiert und insofern interessant, da der Flussverlauf nicht entlang einer größeren Störung ausgebildet ist. Somit bietet es sich hier besonders an, die Speläogenese stellvertretend für die Landschaftsentwicklung heranzuziehen.

Aufgrund der Tatsache, dass der Mittelsteirische Karst inmitten anderer paläozoischer Gesteine anzutreffen

ist und von kristallinem Grundgebirge umgeben ist, findet man eine beträchtliche Menge an Fremdgesteinen in den Höhlen, was wiederum auf deren gemeinsame Ausformung und Abtragung (bzw. Heraushebung) hinweist. Eine Vielzahl der bekannten Höhlen im Untersuchungsgebiet ist durch Sedimente verlegt und daher nur teilweise befahrbar und erforscht. Die Höhlen des Mittelsteirischen Karsts befinden sich fast ausschließlich in sehr reinen Schöckel- und Hochlantschkalken des Devons (~ 400 Ma). Dazu sind korrelierbare Verebnungen und Terrassen in vielen verschiedenen Lithologien in vergleichbaren Höhenlagen anzutreffen. Diese Landschaftsformen sind bereits länger ein viel diskutiertes Thema in den Erdwissenschaften und besonders von geomorphologischem Interesse (Winkler-Hermaden, 1955, 1957; Maurin & Benischke, 1992). Neben der Frage der Alter der Höhlenentstehungen ist auch die Ursache für das Einschneiden der Mur ein Thema und wirft die Frage auf, ob Klima und/oder Tektonik die treibenden Kräfte sind; dazu mehr im Interpretationsteil.

Das Grazer Bergland und seine Niveaus

Im Grazer Bergland, genauer gesagt im Mittelsteirischen Karst, gibt es kaum mehrstufige Riesenhöhlensysteme („multi-level caves“), wie diese z.B. von den Nördlichen Kalkalpen (Frisch et al., 2001; Plan et al., 2009), den Mammoth Caves (Kentucky, USA; Granger et al., 2001) oder dem Siebenhengste-Hohgant-System (Schweiz, Häuselmann et al., 2007) bekannt sind, sondern überwiegend Klein- und Mittelhöhlen, deren Zusammenhang nicht eindeutig geklärt ist. Immer

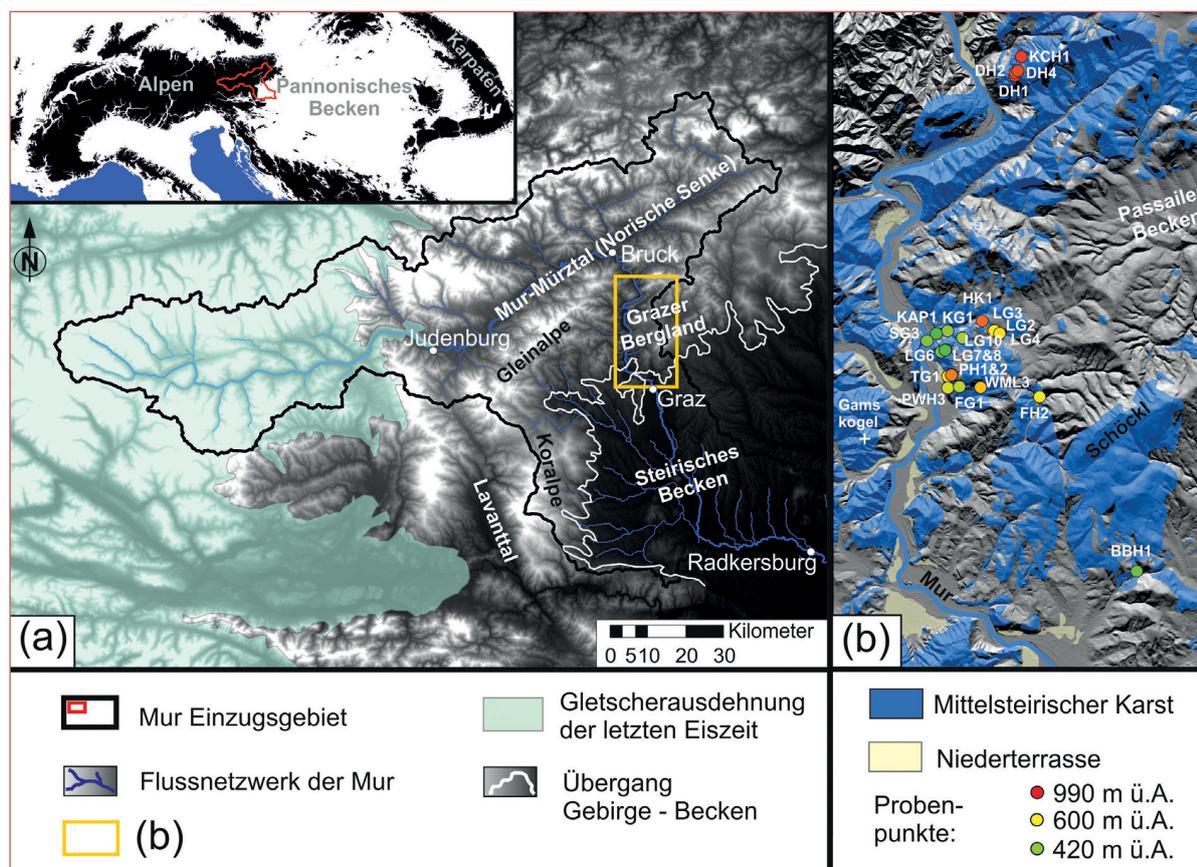


Abb. 2: Überblick über das Untersuchungsgebiet. (a) Das heutige Einzugsgebiet der Mur bis nach Radkersburg, die Mur und ihre Nebenflüsse, und die maximale Ausdehnung der Gletscher der letzten Eiszeit (nach van Husen, 2000). Der Bereich in (b) ist durch das orange Rechteck angedeutet. Das Inset zeigt die Lage des Einzugsgebietes der Mur im Großraum Alpen – Karpaten – Pannonisches Becken. Höhen über 600 m ü.A. in schwarz, darunter in weiß. (b) Detailausschnitt des Untersuchungsgebietes. In Blau die verkarstungsfähigen Gesteine des Mittelsteirischen Karsts, Beprobungsstellen sind durch farbige Punkte gekennzeichnet. Die Farbe entspricht der Höhe der Probenpunkte. Die gleichen Probennamen werden auch in Abb. 3, 4 und den Tabellen 1 und 2 verwendet.

Overview of the study area. (a) Today's drainage area of the Mur down to Radkersburg, the River Mur and its tributaries, and the extent of the last glacial maximum (after van Husen, 2000). The area of (b) is indicated by the orange box. The inset shows the location of the Mur catchment within the Alpine - Carpathian - Pannonian Basin region. Elevations above 600 m above sealevel in black, below in white. (b) Detailed view of the study area. In blue color the karstifiable rocks of the Central Styrian Karst, sample locations indicated by colored points. The color corresponds to the elevation of the sample locations. The same sample names are also used in Fig. 3 and 4 and Tables 1 and 2.

wieder verhindern Engstellen und Sedimente einen möglichen Zusammenschluss einzelner Höhlen. Es gibt aber doch einige wenige kilometerlange, mehrstufige Groß- bis Riesenhöhlen (z.B. Drachenhöhle und Lurgrotte), und generell ist eine Häufung phreatisch geprägter Höhlen in bestimmten Höhenlagen auffällig. Diese korrelieren gut mit Oberflächenformen (z.B. Maurin und Benischke, 1992) und machen eine Einstufung in verschiedene Niveaus plausibel und möglich. Auffallend ist eine Zweiteilung dieser Niveaus anhand der Oberflächenmorphologie. Die höheren Niveaus sind durchwegs als Verebnungen und Altflächen zu deuten; die tiefer gelegenen Niveaus sind durch Schotterterrassen mit teilweise mächtigen

Lehmdecken gekennzeichnet, die aber erst nach dem Austritt der Mur aus dem Grazer Bergland in das Steirische Becken bei Graz deutlich erkennbar sind. Dort sind aber wiederum höhere Niveaus nur mehr als Erosionsflächen an Vulkankegeln erhalten oder bereits ganz erodiert (Wagner et al., 2011).

Es gibt insgesamt mindestens sechs Höhlenniveaus, die voneinander unterschieden werden können (Tabelle 1 und Abb. 3). Höhlenniveaus entlang des Murtales zwischen Bruck und Graz um ~700 m, ~550 m, ~350 m, ~230 m, ~100 m und ~40 m über dem heutigen Talboden (~400 m Seehöhe) korrelieren mit Oberflächenformen und werden anhand der regional gebräuchlichen Benennung angesprochen (Winkler-

Wagner / Datierung fluviatiler Höhlensedimente mittels kosmogener Nuklide am Beispiel des Grazer Berglandes

Höhlenniveaus nach Wagner et al. (2010)	Proben	Höhe über Mur (m)	korrelierte Oberflächenniveaus nach Wagner et al. (2011)	Anmerkungen
–	?	~700	Hubenhalt-Niveau	z.B. Teichalm, Hubenhalt
A	DH4	500+	Trahüttner-Niveau	das „1000m-Niveau“; z.B. Buchebensattel
B	DH1, DH2	325–375	Hochstradner-Niveau	z.B. Tanneben Plateau, Kalkleiten, Stradnerkogel
C	LG2, LG3	210–250	Stadelberg / Zahrerberg-Niveau	letzte vorglaziale Verebnungsflächen
D	PWH3, FG1, KG1	~100	Obere Terrassengruppe	Beginn der Terrassenablagerungen
E	SG3 bis heute	0–75	Mittlere und Untere Terrassengruppe -Holozän	mehrere Subniveaus, wiederholte Aufschwemmungen und Ausräumung

Tabelle 1: Höhlenniveaus des Mittelsteirischen Karsts und deren Korrelation mit Oberflächenniveaus entlang der Mur zwischen Bruck und Radkersburg. Verändert nach Wagner et al. (2011).
Cave levels of the Central Styrian Karst and their correlation to surface levels along the River Mur between Bruck and Radkersburg. Modified after Wagner et al. (2011).

tigen einen Eintrag vor erst kurzer Zeit, so wie es die Geländebeobachtung erwarten ließ. Diese Werte geben Vertrauen in die Ergebnisse aus den anderen gemessenen Proben. Des Weiteren wurden auch noch U-Th-Datierungen von stratigraphisch überlagernden Speläothemen durchgeführt, um die Einschwemmalter abzusichern. Alle U-Th-Alter waren jünger als die Einschwemmalter der Schotter, teils sogar beträchtlich jünger (siehe Wagner et al., 2010). Dies unterstützt einerseits die Plausibilität der Einschwemmalter, andererseits zeigt es, dass man das Entstehungsalter einer Höhle, wenn es aus Tropfsteinen abgeleitet wurde, stark unterschätzen kann (siehe auch Stock et al., 2005).

Von den verbleibenden 20 Proben werden hier nur die relevanten Proben besprochen, da die Beschreibung aller den Rahmen dieses Artikels sprengen würde. Es sei aber auf Wagner et al. (2010) verwiesen, worin alle Proben diskutiert werden.

Das höchstgelegene (Hubenhalt-) Niveau konnte bis jetzt noch nicht datiert werden, da keine geeigneten Höhleninhalte angetroffen wurden. Aufgrund des aber bereits deutlichen Zerfalls und der Abtragung dieses Niveaus ist dieses vermutlich älter als die tieferen Niveaus.

Das nächst tiefere Niveau – das Trahüttner-Niveau – konnte aufgrund von fluviatilen Sedimenten des oberen Niveaus der Drachenhöhle (2839/1) auf ein Alter von mindestens 4 Ma bestimmt werden (DH4: $4,07 \pm 0,28$ Ma). Die umfangreichen Informationen über dieses obere Niveau aufgrund von intensiven Grabungen (Abbau von Phosphaterde als Düngemittel) in der Drachenhöhle (Schadler, 1931) erleichterten die Wahl der zu datierenden Sedimente. Dieses Niveau ist anhand von Verebnungen im Grazer Bergland und darüber hinaus (Koralpe) von Winkler-Hermaden (1957) in das späte Pannon (8-5,3 Ma) eingestuft worden. Dies ist in guter Übereinstimmung zueinander.

Probe	Höhe ¹ (m)	Alter ² (Ma)
LG7	25 ± 5	0,02 ± 0,12
KAP1	25 ± 5	2,91 ± 0,09
LG8	26,5 ± 5	0,53 ± 0,08
BBH1	34 ± 5	1,51 ± 0,10
LG6 ³	45 ± 5	0,43 ± 0,09
SG3	47 ± 5	2,35 ± 0,09
LG10 ³	91 ± 5	0,91 ± 0,09
KG1	100 ± 5	2,57 ± 0,10
FG1	107 ± 5	2,92 ± 0,15
PWH3	117 ± 5	2,53 ± 0,22
FH2	205 ± 5	0,75 ± 0,09
WML3	225 ± 5	5,08 ± 0,43
LG2	243 ± 5	2,25 ± 0,19
LG4	245 ± 5	0,24 ± 0,08
TG1	245 ± 5	1,54 ± 2,74
LG3	260 ± 5	3,74 ± 0,27
PH1	325 ± 5	1,20 ± 0,24
PH2	331 ± 5	0,29 ± 0,44
DH1	350 ± 5	3,34 ± 0,22
DH2	370 ± 5	3,57 ± 0,14
HK1	385 ± 5	0,26 ± 0,08
DH4 ³	528 ± 5	4,07 ± 0,28
KCH1	550 ± 5	3,15 ± 0,28

Tabelle 2: Resultate der ²⁶Al/¹⁰Be Datierung von 23 quarzhaltigen Geröllen des Mittelsteirischen Karsts. Die Zugehörigkeit der untersuchten Proben zu einzelnen Höhlen ist in Abb. 3 zu sehen. Verändert nach Wagner et al. (2010).

¹ Höhe der Fundstelle über dem heutigen Murniveau.

² Einschwemmalter und deren Messunsicherheiten.

³ Proben, die anhand von Speläothem-U-Th Altern überprüft wurden.

Results of the ²⁶Al/¹⁰Be dating of 23 quartz-bearing gravels of the Central Styrian Karst. The samples and their caves are shown in Fig. 3. Modified after Wagner et al. (2010).

¹ Elevation of the sample location above the current Mur level.

² Burial ages and their measurement uncertainties.

³ Samples whose ages were verified by U-Th ages of speleothems.

Das Hochstradner-Niveau kann anhand der Proben DH1 und DH2 aus den tieferen Teilen der Drachenhöhle auf mindestens 3,4 Ma eingestuft werden. Das Stadelberg/Zahrerberg-Niveau kann nur grob auf etwa 3 Ma geschätzt werden, da brauchbare Proben nur aus der Lurgrotte (2836/1) zur Verfügung stehen und diese einerseits später als die Höhlenbildung (LG2: $2,25 \pm 0,19$ Ma), andererseits wahrscheinlich auch schon früher (LG3: $3,74 \pm 0,27$ Ma) in das Höhlensystem eingebracht wurden. Die Probe LG3 wird als Umlagerung aus einem höheren Niveau gedeutet und ist somit älter als das Niveau selbst.

Das mit der Oberen Terrassengruppe in Verbindung zu bringende Höhlenniveau (Niveau D) tritt besonders eindrucksvoll in der Peggauer Wand zu Tage (Abb. 1d). Eine Probe aus der Peggauer-Wand-Höhle III (2836/38; PWH3) lieferte ein Einschweimalter von $2,53 \pm 0,22$ Ma und wird durch zwei weitere Alter (KG1 und FG1; siehe Abb. 4) aus dem gleichen Niveau unterstützt.

Das tiefste Niveau E ist etwas problematisch und erlaubt keine Alterseinschränkung der Mittleren und Unteren Terrassengruppe (alternative Ansätze siehe Wagner et al., 2011). Es handelt sich hier offensichtlich um mehrere Subniveaus, die aber nur schwer auseinander zu halten sind und die aufgrund der oftmaligen Verfüllungen auf wiederholte Aufschwemmungen und Ausräumungen des Murtales hindeuten. Zwei Proben aus den tieferen Teilen der Lurgrotte nahe dem Ausgang bei Peggau (LG6 und LG8) wurden aus zwei verschiedenen Subniveaus entnommen, die fast 20 m Höhendifferenz aufweisen, trotzdem aber ein nicht zu unterscheidendes Einschweimalter aufweisen ($0,43 \pm 0,09$ bzw. $0,53 \pm 0,08$ Ma). Dies kann als Hinweis gesehen werden, dass zu diesem Zeitpunkt bereits beide Höhlenabschnitte existierten und gleichzeitig verlegt wurden.

Interpretation – Taleintiefung und Landschaftsentwicklung

Abb. 4 zeigt die Einschweimalter einiger Proben aufgetragen gegen die Höhe der Probenmestellen über dem jetzigen Murniveau. Anhand dieser Information kann die Taleintiefung bzw. die Einschneiderate der Mur abgelesen werden.

Die Oberflächenprobe HK1 und die zwei jüngst abgelagerten Proben in der Lurgrotte (LG4 und LG7) werden nicht dargestellt, da sie nicht repräsentativ sind für die Höhe, der sie entnommen wurden. Die Proben WML3 und KAP1 stellen Umlagerungen aus höheren und somit älteren Niveaus dar. PH1, PH2 und TG1 sind Proben aus benachbarten Höhlen, die sich alle in

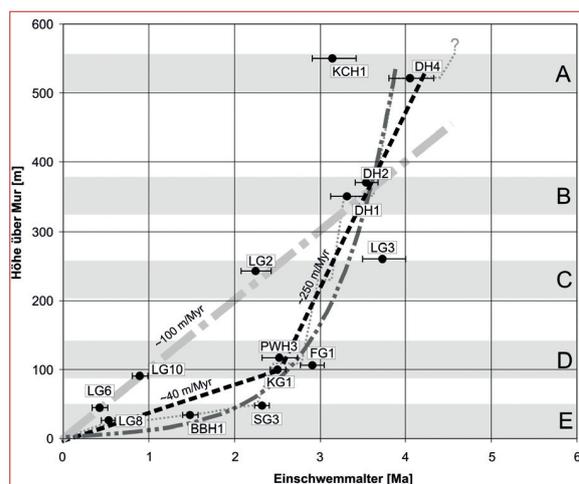


Abb. 4: Einschweimalter der relevanten Proben im Verhältnis zur Höhe über dem heutigen Talboden bzw. Vorfluter und daraus ableitbare relative Einschneideraten der River Mur. Die dicke strichpunktiertere Linie zeigt den generellen Trend (~ 100 m/Myr); die zwei gestrichelten Linien (~ 40 m/Myr und ~ 250 m/Myr) Trends unter Berücksichtigung des Wendepunkts bei $\sim 2,5$ Ma; die gestrichelt-punktierte Linie einen exponentiellen Fit durch DH4, DH2, DH1, LG3, PWH3, FG1, KG1, SG3, BBH1, LG8, LG6 und den Nullpunkt; und die dünne gepunktete Linie deutet das komplexe Einschneiden der River Mur an, ist aber nur schematisch zu verstehen. Verändert nach Wagner et al. (2010).

Burial ages of relevant samples in relation to their elevation above the today's valley floor and base level, respectively, and resulting relative incision rates of the River Mur. The thick dash-dotted line shows the general trend (~ 100 m/Myr); the two dashed lines (~ 40 m/Myr and ~ 250 m/Myr) show the trends taking into consideration the turning point at $\sim 2,5$ Ma; the dashed/dotted line shows an exponential fit through DH4, DH2, DH1, LG3, PWH3, FG1, KG1, SG3, BBH1, LG8, LG6 and the zero point; the thin dotted line suggests the complex incision of the River Mur, although this should be regarded in a schematic sense only. Modified after Wagner et al. (2010).

einer Rinne befinden, in die ein viel späterer Eintrag von Sedimenten vom Plateau des Tannebenstocks her stattfand. Die Probe FH2 stammt aus einem separaten Kalkstock, der auf einen Taleinschnitt eines Nebenflusses verspätet reagierte. Somit sind auch diese Proben(alter) nicht in Abb. 4 abgebildet (siehe Wagner et al., 2010, für eine ausführliche Erklärung), da sie keinen direkten Hinweis auf die Taleintiefung liefern. Anhand der verbleibenden Proben kann aus Abb. 4 erkannt werden, dass die Taleintiefung recht langsam abgelaufen ist: Relative Einschneideraten von gerade einmal durchschnittlich 100 m/Myr (d.h. $0,1$ mm/yr) in den letzten 4–5 Ma lassen sich daraus ableiten. Auffällig ist ein Wendepunkt der Einschneiderate vor ca. $2,5$ Ma und ca. 100 m über dem heutigen Talboden von etwa 250 m/Myr auf etwa 40 m/Myr. Die Situation ist freilich komplexer, als dies hier anhand der durchschnittlichen Raten (40 und 250 m/Myr) angedeutet ist. Speziell die Zeit nach dem Wendepunkt ist durch wiederholte Aufschwemmungen und Ausräumungen

geprägt (siehe Kapitel Resultate, S. 10) und die Raten sind nur durchschnittliche Trends. Weiters muss es während der Niveaumentwicklung Phasen des Stillstands (d.h. keine Taleintiefung) gegeben haben. Dies ist anhand einer treppenartigen Linie in Abb 4. schematisch angedeutet, kann allerdings mit dem bestehenden Datensatz nicht eindeutig festgelegt werden, und somit soll nur der generelle Trend, der aus diesen Daten abzulesen ist, interpretiert werden.

Der Rückgang der durchschnittlichen Einschneideraten kann wie folgt durch unterschiedliche Prozesse erklärt werden. Es fällt auf, dass gerade das Niveau, in dem dieser Knickpunkt in der Einschneiderate festzustellen ist, an der Landoberfläche durch den Übergang von überwiegend Verebnungen zu überwiegend Terrassenablagerungen gekennzeichnet ist (siehe Kapitel Das Grazer Bergland, Seite 8 und Wagner et al., 2011). Eine plausible Erklärung dieser Änderung in der Einschneiderate der Mur ist das komplexe Zusammenspiel von Hebung, sich ändernden Einzugsgebietsgrößen und sich änderndem Sedimentangebot. Die Entwässerung des Mur-Mürz-Tales war früher anders (Dunkl et al., 2005). Das Murtal zwischen Bruck und Graz wird nicht zu Unrecht Murdurchbruchstal genannt, denn vor etwa 5–6 Ma hat sich höchstwahrscheinlich die Mur durch rückschreitende Erosion bis in das Mur-Mürz-Tal (auch Norische Senke genannt) gegraben und so ihr heutiges Einzugsgebiet zur Verfügung gehabt. Die Hebung dieser Region beschleunigte die rückschreitende Erosion der Mur. Durch die Vergrößerung des Einzugsgebietes stand dem Fluss

eine größere Wassermenge (mehr Energie) zur Verfügung und er konnte schneller einschneiden, was sich in den höheren Werten zwischen ~2,5 und 4 Ma widerspiegelt.

Der nachträgliche deutliche Rückgang der Einschneideraten könnte mit erhöhter Sedimentfracht, die aus dem teils vergletscherten Oberlauf der Mur kam, zu erklären sein. Zu berücksichtigen sind allerdings auch die miozänen Sedimente (~20-5 Ma) der Norischen Senke, die heute entlang des Mur-Mürz-Tales großteils fehlen und möglicherweise erst in den letzten ~2,5 Ma erodiert wurden. Dieses beträchtliche Sedimentangebot musste durch das Murdurchbruchstal abtransportiert werden und könnte sowohl Aufschwemmungen als auch einen durchschnittlichen Rückgang der Einschneideraten erklären. Für eine ausführliche Auseinandersetzung mit dieser Problematik sei auf Wagner et al. (2010, 2011) verwiesen.

Die hier präsentierten Einschwemmalter und deren Interpretation bezüglich Höhlenentstehung und Entwicklung des Vorfluters sind ein hoffentlich wertvoller erster Anhaltspunkt für weitere Studien in den Ostalpen. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei diesen Daten um Einschwemmalter aus vielen verschiedenen (kleinen) Höhlensystemen handelt, deren Korrelation nur auf ihrer heutigen Höhe über dem Vorfluter beruht. Große, heute inaktive Höhlensysteme in den Nördlichen Kalkalpen und in Slowenien weisen ein großes Potenzial für weitere interessante Untersuchungen auf, es sind hoffentlich bald auch von dort Ergebnisse zu erwarten.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ermittlung der zeitlichen Abfolge der Höhlenentstehung und der Höhlenniveaus anhand der Bestimmung von Einschwemmaltern von Höhlensedimenten durch die kosmogenen Nuklide ^{26}Al und ^{10}Be erlaubt es, ein stufenweises Einschneiden des heutigen Murtales zu rekonstruieren. Die Ergebnisse sind die ersten ihrer Art in den Ostalpen (und außerhalb des Vereisungsgebietes). Die Verkarstung hat vor mindestens 4-5 Ma, also im frühen Pliozän, wahrscheinlich aber schon früher im Miozän begonnen. Diese „Paläowasserspiegelpositionen“ der letzten zumindest 4 Ma – festgehalten in Höhlensedimenten – konnten rekonstruiert werden. Daraus konnte eine

durchschnittliche Einschneiderate der Mur in der Größenordnung von 100 m/Myr abgeleitet werden. Eine genauere Betrachtung zeigt einen Rückgang der Einschneiderate von ca. 250 m/Myr auf ca. 40 m/Myr vor ~2,5 Ma. Dies ist wahrscheinlich dem komplexen Zusammenspiel von sich ändernden Einzugsgebietsgrößen, sich ändernden Erosions- und Transportkräften und sich änderndem Sedimentangebot der Mur aufgrund der Hebung in den letzten 5-6 Ma dieser Region zuzuschreiben, wobei das Mitwirken von Klimaverschlechterungen und daraus resultierenden Vergletscherungen im Hinterland nicht außer Acht gelassen werden sollte.

DANK

Allen Höhlenforschern des Landesvereins für Höhlenkunde in der Steiermark und dem Verein für Höhlenkunde „Höhlenbären“, speziell R. Benischke, H. Kusch,

H. Grillhofer und S. Oswald sei herzlich für die zahlreichen Informationen und Diskussionen sowie gemeinsamen Höhlenbegehungen gedankt. Ohne den

persönlichen Einsatz der Höhlenforscher wäre so eine Arbeit unmöglich gewesen. Auch bei L. Plan, M. Filliponi und C. Spötl möchte ich mich für die anregenden Diskussionen über den Mittelsteirischen Karst und darüber hinaus bedanken. Spezieller Dank gebührt all meinen Mitautoren der hier zusammengefassten zwei Artikel: K. Stüwe, H. Fritz, D. Fabel, P. Häuselmann,

nochmals R. Benischke, H. Rodnight, J. Hellstrom, M. Fiebig, D. Sahy, S. Xu und O. Nestry. Wolfgang Frisch begutachtete das Manuskript eingehend, wofür ich mich herzlich bedanken möchte. Finanziell unterstützt wurde diese Studie vom „Kooperationsprojekt Erdwissenschaften NAWI Graz (§ 141)“ und dem ESF Projekt I-152.

LITERATUR

- Anthony, D.M. & Granger, D.E. (2007): A new chronology for the age of Appalachian erosional surfaces determined by cosmogenic nuclides in cave sediments. – *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 874-887.
- Audra, P., Bini, A., Gabrovsek, F., Häuselmann, P., Hobléa, F., Jeannin, P.Y., Kunaver, J., Monbaron, M., Sustersic, F., Tognini, P., Trimmel, H., Wildberger, A. (2006): Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review. – *Z. Geomorph. N.F.* 50:152-176.
- Boch, R., Spötl, C. & Kramers, J. (2010): Wachstumsphasen von Stalagmiten im Katerloch (2833/59). – *Die Höhle* 61: 48-56.
- Dreybrodt, W. (1996): Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numerical models. – *Water Resources Research* 32: 2923-2935.
- Dunkl, I., Kuhlemann, J., Reinecker, J., Frisch, W. (2005): Cenozoic relief evolution of the Eastern Alps – constraints from apatite fission track age-provenance of Neogene intramontane sediments. – *Austrian Journal of Earth Sciences* 98: 92-105.
- Frisch, W., Kuhlemann, J., Dunkl, I., Szekely, B. (2001): The Dachstein paleosurface and the Augenstein Formation in the Northern Calcareous Alps – a mosaic stone in the geomorphological evolution of the Eastern Alps. *International Journal of Earth Sciences* 90: 500-518.
- Gosse, J.C. & Phillips, F.M. (2001): Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. – *Quaternary Science Reviews* 20: 1475-1560.
- Granger, D.E. & Muzikar, P.F. (2001): Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations. – *Earth and Planetary Science Letters* 188: 269-281.
- Granger, D.E., Kirchner, J.W. & Finkel, R. (1997): Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in cave-deposited alluvium. – *Geology* 25: 107-110.
- Granger, D.E., Fabel, D. & Palmer, A.N. (2001): Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in Mammoth Cave sediments. – *Geol. Soc. Am. Bulletin* 113: 825-836.
- Häuselmann, P. (2007a): How to date nothing with cosmogenic nuclides. – *Time in Karst, Postojna 2007*: 93-100.
- Häuselmann, P. (2007b): Höhleninhalt (C30) & Sedimente in Höhlen (C31). – In: Plan, L., Herrmann, E. & Sulzbacher, D. (Ed.): *Speläo-Merkblätter*, 2. Lieferung. – Speldok-13, Verband Österr. Höhlenforscher. – <http://www.hoehle.org/downloads.php>
- Häuselmann, P., Granger, D.E., Jeannin, P.-Y., Lauritzen, S.-E. (2007): Abrupt glacial valley incision at 0.8 Ma dated from cave deposits in Switzerland. – *Geology* 35: 143-146.
- Maurin, V. & Benischke, R. (1992): Morphogeny, Paleohydrography and Karst Development. – In: Behrens, H. et al.: *Investigations with natural and artificial tracers in the karst aquifer of the Lurbach system (Peggau-Tanneben-Semriach, Austria)*. – *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie* 43: 22-33.
- Mottl, M. (1946): Die Kugelsteinhöhlen bei Peggau und ihre diluvialstratigraphische Bedeutung. – *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt 1946*: 61-69.
- Palmer, A.N. (1987): Cave levels and their interpretation. – *NSS Bulletin* 49: 50-66.
- Plan, L., Filipponi, M., Behm, M., Seebacher, R., Jeutter, P. (2009): Constraints on alpine speleogenesis from cave morphology – A case study from the eastern Totes Gebirge (Northern Calcareous Alps, Austria). – *Geomorphology* 106: 118-129.
- Schadler, J. (1931): Die Ablagerungen. – In: Abel, O. & Kyrle, G. (Ed.): *Die Drachenhöhle bei Mixnitz*. – *Speläologische Monographien* 7-8: 169-224.
- Stock, G.M., Granger, D.E., Sasowsky, I.D., Anderson, R.S., Finkel, R.C. (2005): Comparison of U-Th, paleomagnetism, and cosmogenic burial methods for dating caves: implications for landscape evolution studies. – *Earth and Planetary Science Letters* 236: 388-403.
- van Husen, D. (2000): Geological Processes during the Quaternary. – *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft* 92: 135-156.
- Wagner, T., Fabel, D., Fiebig, M., Häuselmann, P., Sahy, D., Xu, S., Stüwe, K. (2010): Young uplift in the non-glaciated parts of the Eastern Alps. – *Earth and Planetary Science Letters* 295: 159-169.
- Wagner, T., Fritz, H., Stüwe, K., Nestry, O., Rodnight, H., Hellstrom, J., Benischke, R. (2011): Correlations of cave levels, stream terraces and planation surfaces along the River Mur – timing of landscape evolution along the eastern margin of the Alps. – *Geomorphology* (in Druck; 10.1016/j.geomorph.2011.04.024).
- Winkler-Hermaden, A. (1955): Ergebnisse und Probleme der Quartären Entwicklungsgeschichte am östlichen Alpensaum ausserhalb der Vereisungsgebiete. – *Österreichische Akademie der Wissenschaften* 110: 180 S.
- Winkler-Hermaden, A. (1957): *Geologisches Kräftespiel und Landformung*. – Springer Verlag, Wien, 822 S.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 2011

Band/Volume: [062](#)

Autor(en)/Author(s): Wagner Thomas

Artikel/Article: [Datierung fluviatiler Höhlensedimente mittels kosmogener Nuklide am Beispiel des Grazer Berglandes 3-14](#)