



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2018

**Durchleuchtet und analysiert. Ein Update zur Genetik, Isotopie und
Radiografie des «letzten Zuger Mammuts»**

Drucker, Dorothée ; Furtwängler, Anja ; Schuenemann, Verena J ; Reinhard, Jochen

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-165759>

Journal Article

Published Version

Originally published at:

Drucker, Dorothée; Furtwängler, Anja; Schuenemann, Verena J; Reinhard, Jochen (2018). Durchleuchtet und analysiert. Ein Update zur Genetik, Isotopie und Radiografie des «letzten Zuger Mammuts». *Tugium*, 34:123-131.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/327981543>

Durchleuchtet und analysiert. Ein Update zur Genetik, Isotopie und Radiografie des «letzten Zuger Mammuts»

Article · September 2018

CITATIONS

0

READS

79

5 authors, including:



Dorothee G. Drucker

Senckenberg Research Institute, HEP Tübingen

175 PUBLICATIONS 3,239 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Anja Furtwängler

University of Tuebingen

54 PUBLICATIONS 467 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Verena Schuenemann

University of Zurich

141 PUBLICATIONS 1,854 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Renata Huber

Kanton Zug

30 PUBLICATIONS 21 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Chronology, seasonality, and inter-zonal connections in a Terminal Pleistocene-Early Holocene settlement system, southern Peru [View project](#)



Isotopic tracking of cave bear palaeobiology [View project](#)



Durchleuchtet und analysiert

Ein Update zur Genetik, Isotopie und Radiografie des
«letzten Zuger Mammuts»

Die im Juli 2015 in einer Baugrube in Risch-Rotkreuz entdeckten Skelettelemente eines Mammutbullen aus der Zeit kurz vor 15 000 v. Chr. – darunter ein linker Stosszahn – waren bereits vor zwei Jahren Thema eines Forschungsbeitrags im Tugium.¹ Dieser soll mit dem vorliegenden Beitrag² um die zwischenzeitlich an der Universität Tübingen gewonnenen Erkenntnisse zur Genetik und Isotopie des Rotkreuzer Mammutfunds erweitert und ergänzt werden. Zudem ist die Konservierung der Mammutreste mittlerweile abgeschlossen,³ die Funde befinden sich wieder in der Obhut des Kantonalen Museums für Urgeschichte(n) in Zug (KMUZ) (Abb. 1). Die Knochen und der Stosszahn sind damit zum ersten Mal im trockenen Zustand handhabbar, was eine computertomografische Untersuchung und damit auch eine dreidimensionale Dokumentation des Fundmaterials ermöglichte.

¹ Huber/Reinhard 2016.

² Der Beitrag entstand unter Mitarbeit von Joscha Gretzinger und Ella Reiter, beide Universität Tübingen – herzlichen Dank!

³ Zur Stabilisierung und Konservierung der Knochen und des Stosszahns, die eine museale Präsentation der Skeletteile erst möglich machen, wurden diese in der Henssen PalaeoWerkstatt Goch (Deutschland) einem fast zweijährigen Tauchbad mit Polyethylenglycol (PEG 3000) getränkt (vgl. Klein 2017).

Die Rotkreuzer Mammutfunde gaben auch den Anlass, im KMUZ eine Sonderausstellung zum Thema «Späteiszeit» zu planen, die unter dem Titel «Mammuts – Zuger Riesen zeigen Zähne» von Januar bis April 2019 gezeigt werden wird. Der eigentlichen Ausstellung vorangehen soll eine Präsentation der Funde im Foyer des Roche-Hochhauses in Rotkreuz. Die erste museale Präsentation des Rotkreuzer Mammuts wird also in unmittelbarer Nähe seines Fundorts stattfinden!

Untersuchung und Dokumentation mittels Computertomografie

Auch wenn die Computertomografie (CT) zumeist nur mit ihrer medizinischen Anwendung assoziiert wird, ist diese zerstörungsfreie radiologische Untersuchungsmethode durchaus sehr gut geeignet, neben materialwissenschaftlichen auch archäologische, anthropologische oder paläontologische Fragestellungen zu beantworten.⁴ Das Verfahren basiert darauf, dass mit der Unterstützung eines Computers eine Vielzahl einzelner Röntgenaufnahmen des Untersuchungsobjekts aus verschiedenen Richtungen zu Schichtbildern (Tomogrammen) zusammengerechnet werden können. Anders als beim her-



Abb. 1 Die Mammutskeletteile von Risch-Rotkreuz nach ihrer Rückkehr ins Kantonale Museum für Urgeschichte(n) Zug. Giacomo Pegurri, Bernhard Bigler und Renata Huber begutachten das Beckenknochenfragment und den (hier noch zusätzlich in Plastik verpackten) Stosszahn erstmals in konserviertem, trockenem Zustand.

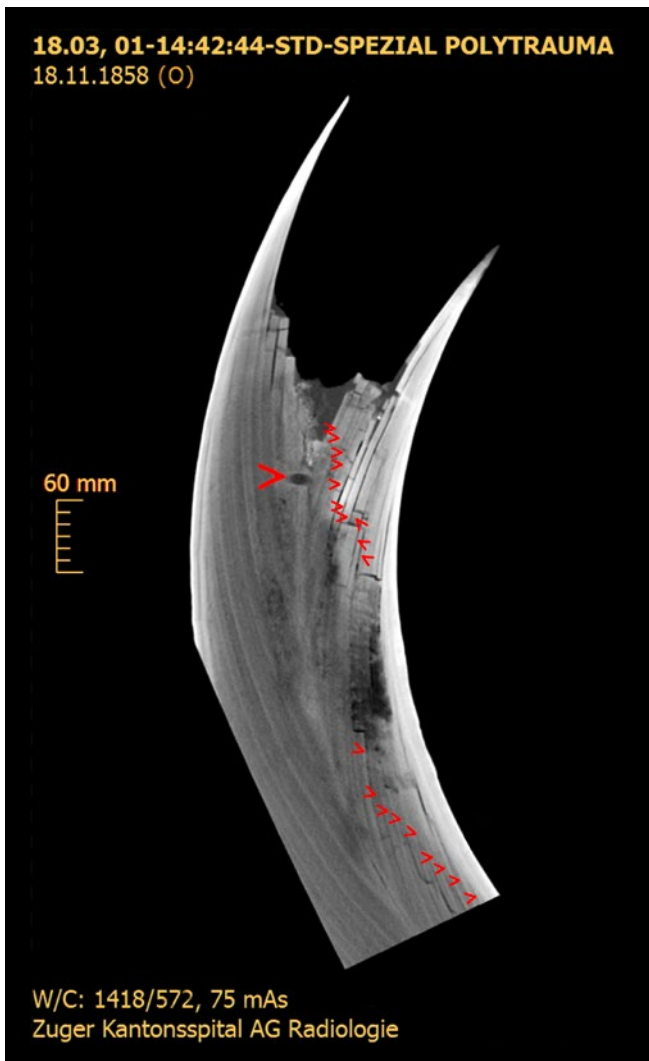


Abb. 2 Schichtbild mit einem Längsschnitt durch den proximalen, körpernahen bzw. in der Alveole, dem Zahnfach im Kiefer des Tiers, steckenden Teil des Mammutschlosszahn von Risch-Rotkreuz. Gut sichtbar sind die kegelförmigen Zuwachszonen im Elfenbein (kleine rote Pfeile) sowie das Bohrloch (grosser roter Pfeil) der Entnahme einer der beiden Isotopenproben. Im oberen Bildteil ist die Pulpahöhle des hier weitgehend unbeschädigten Zahns erkennbar.

kömmlichen Röntgenverfahren wird mit einer Computertomografie kein Summenbild erstellt, sondern das Objekt wird sozusagen «scheibchenweise durchleuchtet». Im Unterschied zu einer Fotografie, einer fotogrammetrischen Aufnahme oder einem Laserscan wird dabei nicht nur die Oberfläche des Untersuchungsobjekts dokumentiert bzw. ein

⁴ Vgl. z. B. Tissier/Brechbühl Trijasse 2014, Fisher et al. 2014, Stelzner 2016, Uldin 2017 oder Chapelle/Choiniere 2018, jeweils mit älterer Literatur. Das Amt für Denkmalpflege und Archäologie Zug setzt diese Röntgentechnik ergänzend oder alternativ zu herkömmlichen Röntgenbildern hin und wieder zur Untersuchung besonderer Funde ein, etwa der neolithischen Doppelaxt von Cham-Eslen (Gross/Hochuli 2002, 80, Abb. 18) oder des spätmittelalterlichen Degens von Oberwil-Räbmatt (Frey 2014, 106, Abb. 6, und Schmidt-Ott et al. 2014, 137f., Abb. 15, hier kam zusätzlich eine Neutronentomografie zur Anwendung).

⁵ In der neueren Literatur werden diese Wachstumskegel durchgehend als im Jahresrhythmus gebildete Zuwächse gedeutet, unter dem Mikro-



Abb. 3 Incinur Koyun-Aras und Emre Koyun von der Abteilung Radiologie des Zuger Kantonsspitals prüfen die Lage des Mammutschlosszahn auf dem Untersuchungstisch.

Volumenmodell erstellt, sondern auch seine Binnenstruktur dreidimensional sichtbar gemacht. Bei Elefanten wie dem Wollhaarmammut sind in einem Stosszahn-CT beispielsweise die Zuwachszonen des Elfenbeins zu sehen: Die Stosszähne wachsen kegelförmig von innen nach aussen (vergleichbar mit verkehrt herum gestapelten Cornets an einem Glacéstand). Im CT-Scan zeichnen sich diese wohl jährlichen⁵ Zuwachskegel aus jeweils einer helleren (dichteren) und dunkleren (weniger dichten) Zone ab. Sie sind auch im CT-Bild des Rotkreuzer Stosszahn gut erkennbar (Abb. 2 und 3).⁶ Deutlich sichtbar sind zudem die Entnahmestellen für die Proben der Isotopenuntersuchungen; diese wurden vor der Konservierung durch zwei Hohlbohrungen an der Spitze und an der Basis des Stosszahn entnommen (Abb. 4).⁷ Mit den CT-Bildern liegt nun zudem eine 3D-Dokumentation der Mammutskelettteile vor (Abb. 5).

Untersuchung stabiler Isotope

Die Analyse stabiler Isotope⁸ aus Knochen und Zähnen erlaubt Einblicke in die Ökologie verschiedener Lebensgemeinschaften. Stabile Isotope verschiedener Elemente kommen in der Natur und in jedem Lebewesen vor, allerdings ungleichmässig verteilt. Lebewesen nehmen die verschiedenen Isotope mit Atemluft und Nahrung auf und bauen sie in ihr Körpergewebe ein; dieses reflektiert daher die Isotopenzusammensetzung der natürlichen Umgebung, was auch als

skop sind auch feinere Unterteilungen sichtbar, die noch kleinere Zeitspannen repräsentieren. Im Winter werde dichteres Elfenbein gebildet als im Sommer, eine unterschiedliche Nahrungsversorgung wirke sich auf ihre Breite aus; die Strukturen entsprächen also den Jahrringen von Bäumen. Grundsätzlich dazu Fisher et al. 2003. Grigoriev et al. 2017, 95–98 und 100–102, besonders 96, Fig. 8, 97, Fig. 9 und 101, beschreiben das Beispiel einer Mammutkuh. Hier zeichneten sich nicht nur «Jahrringe» im Zuwachsmuster des Stosszahn ab, sondern die «Ringbreiten» liessen auch Rückschlüsse darauf zu, wann und wie oft diese ein Kalb zur Welt gebracht hat (98, Fig. 10).



Abb. 4 Probenentnahme für die Isotopenuntersuchung im proximalen, körpernahen Bereich des Stosszahn; durchgeführt von Felix Walder mithilfe eines Dendro-Hohlbohrers (vgl. Abb. 2).

«Isotopensignatur» bezeichnet wird. Bereits Pflanzen, an der Basis der Nahrungskette gelegen, weisen unterschiedliche Isotopensignaturen auf; pflanzenfressende Tiere unterscheiden sich demzufolge – ihrer Lieblingsnahrung entsprechend – ebenfalls in ihrer Isotopensignatur. Dieses Phänomen setzt sich auf höheren Trophiestufen gegen oben in der Nahrungskette, etwa bei Alles- und Fleischfressern, fort. Letztlich kann also die Untersuchung der Isotopensignaturen Hinweise auf die Ernährungsweise und damit mittelbar auch auf den Lebensraum und die Umwelt eines Tieres geben. Die Werte werden als jeweils das Verhältnis eines schwereren zum leichteren Isotop bestimmt (im Falle von Stickstoff beispielsweise ^{15}N und ^{14}N) und in der Form eines Deltawertes (hier $\delta^{15}\text{N}$) angegeben.⁹

Für die Isotopenuntersuchung des Mammuts von Risch-Rotkreuz wurden zwei Bohrkern aus dem Stosszahn (vgl. Abb. 2 und 4)¹⁰ sowie je eine Probe am Ulna- und am unbestimmten Langknochenfragment¹¹ genommen. Gemessen wur-

⁶ Der CT-Scan der Rotkreuzer Mammutskeletteile wurde durch das freundliche Entgegenkommen von Incinur Koyun-Aras, Emre Koyun und dem Team des Instituts für Radiologie des Zuger Kantonsspitals ermöglicht. Verwendet wurde ein Siemens Somatom Definition AS mit folgenden Einstellungen: 120 kV Spannung und 75 mAs Rotationsdauer*Röhrenstrom für den Stosszahn bzw. 120 kV Spannung und zwischen 66 und 118 mAs Rotationsdauer*Röhrenstrom für die übrigen Knochen. Wir danken Maria Ellend Wittwer und Giacomo Pegurri für die Vermittlung des Kontakts und die logistische Hilfe beim Transport der Mammutfunde. Da der Stosszahn für das Messfeld des CT-Scanners deutlich zu gross war, konnte er mit einem Scan nicht vollständig erfasst werden und wurde daher in zwei Teilen gescannt. Zudem ergaben sich aber in einem ersten Scan-Versuch deutliche Artefakte, daher kann vorläufig nur ein Teil des Stosszahns abgebildet werden.

⁷ Probenentnahme durch Felix Walder vom Labor für Dendrochronologie des Amts für Städtebau der Stadt Zürich. Verwendet wurde ein «Berliner Dendroböhrer» mit 7 mm Aussen- und 10 mm Gesamtdurchmesser, wie er für dendrochronologische Zwecke standardmässig zur Anwendung kommt. Die entsprechenden Bohrlöcher sind auch bei Huber/Reinhard 2016, 104, Abb. 3.1, sichtbar.

⁸ Unter Isotopen versteht man verschiedenartige Atome des gleichen Elements, deren Kerne zwar die gleiche Anzahl von Protonen, aber



Abb. 5 Aus dem CT-Scan abgeleitetes 3D-Modell der Ulna (Unterarmknochen).

den die Isotopenzusammensetzungen der Elemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S).¹²

unterschiedliche Anzahlen von Neutronen enthalten, womit sich die Isotope eines Elements in ihrer Masse unterscheiden. Anders als instabile oder radiogene Isotope (wie etwa das bekannte, zur Altersbestimmung bzw. zur Radiokarbondatierung benutzte Kohlenstoffisotop ^{14}C) zerfallen stabile Isotope im Laufe der Zeit nicht.

⁹ Bocherens/Drucker/Wissing 2014; weitere Informationen zur Analyse stabiler Isotope auch bei Bocherens 2003, Grupe et al. 2012, 139–147, und Stephan 2008.

¹⁰ S. auch Fussnote 7. Zunächst bestand die Hoffnung, dass aufgrund der Bohrkern eine Isotopenanalyse einzelner Zuwachsabschnitte (vgl. z. B. Rountrey et al. 2007) durchgeführt werden könnte. Aufgrund des sehr weichen Dentins waren diese jedoch im Bohrkern nicht mehr klar abgrenzbar. Stattdessen wurde von beiden Bohrproben der jeweils äusserste Zentimeter für die Analyse verwendet.

¹¹ Vgl. Huber/Reinhard 2016, 104, Abb. 3.6 und 3.7, sowie 106, Abb. 7.

¹² Die Probenaufbereitung erfolgte nach dem bei Bocherens et al. 1997 beschriebenen Vorgehen. Gemessen wurde auf einem Elementaranalysator NC 2500, verbunden mit einem ThermoQuest Delta^{plus} XL-Massenspektrometer mit den internationalen Standards für ^{13}C - (V-PDB) und ^{15}N -Messungen (atmosphärischer Stickstoff, AIR), im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Tübingen (vgl. Bocherens et al. 2011), vgl. Drucker 2017.

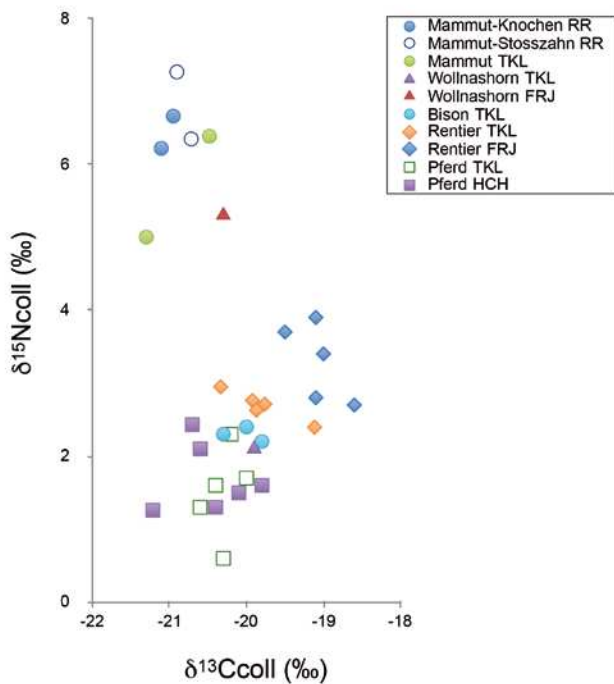


Abb. 6 Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Mammute (*Mammuthus primigenius*) von Risch-Rotkreuz (RR) und Thayngen-Kesslerloch (TKL) sowie weiterer späteiszeitlicher Tiere (*Wollnashorn*, *Coelodonta antiquitatis*; *Bison*, *Bison bonasus*; *Rentier*, *Rangifer tarandus*; *Pferd*, *Equus sp.*) der Fundstelle Thayngen-Kesslerloch, aus dem Französischen Jura (FRJ) und von Hauterive-Champrévevres (HCH) (nach Bocherens et al. 2011 und Drucker et al. 2012). Mammut und Wollnashorn vom Kesslerloch sowie die Tiere aus dem Französischen Jura weisen ein ähnliches Alter wie das Mammut von Risch-Rotkreuz auf, die anderen Tiere sind etwas jünger.

Kohlenstoff weist zwei stabile Isotope, ^{12}C und ^{13}C , auf, zwischen denen bei der Fotosynthese eine natürliche Fraktionierung (An- bzw. Abreicherung) stattfindet; unterschiedliche Pflanzentypen (C_3 -Pflanzen wie Laubbäume und krautige Pflanzen und C_4 -Pflanzen wie viele Gräser) bauen dabei ^{12}C und ^{13}C in unterschiedlichen Verhältnissen ein.¹³ Der $\delta^{13}\text{C}$ -

¹³ Für weitere Einflüsse auf die Variationen von Kohlenstoffisotopen in Pflanzen und sie konsumierende Lebewesen vgl. Bocherens 2003, 58, Fig. 1.

¹⁴ Vgl. auch Bocherens 2003, 60, Fig. 2.

¹⁵ Grupe et al. 2012, 139–147. – Stephan 2008.

¹⁶ Huber/Reinhard 2016, 108.

¹⁷ Die Mammutsteppe (auch Steppentundra) war ein durch Trockenheit

Wert, der im Kollagen eines Knochens gemessen wird, sagt also etwas über den Pflanzentypus aus, den das untersuchte Lebewesen direkt oder indirekt (über die Nahrungskette) aufgenommen hat. Bei Stickstoff kommen die beiden stabilen Isotope ^{14}N und ^{15}N vor. Im Stickstoffkreislauf findet die Isotopenfraktionierung bereits durch Mikroorganismen im Boden statt und gelangt dann in die Pflanzen. Damit gibt der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Knochenkollagen Hinweise auf die Art des Bodens und das Klima an dem Ort, an dem die Pflanzen gewachsen sind,¹⁴ die das betreffende Lebewesen direkt oder indirekt aufgenommen hat. Von Schwefel schliesslich gibt es insgesamt vier stabile Isotope, wobei zur Bestimmung des Isotopenverhältnisses nur mit den beiden häufigsten, ^{32}S und ^{34}S , gearbeitet wird. Die $\delta^{34}\text{S}$ -Werte im Knochen geben dabei einen Hinweis auf das erodierende Muttergestein und die Niederschlagsmenge am Wachstumsstandort der Pflanzen, die ein Lebewesen direkt oder indirekt aufgenommen hat.¹⁵

Die $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte des Mammuts von Risch-Rotkreuz (Abb. 6 und 7) sind denjenigen des vergleichbar datierten¹⁶ Mammuts von Thayngen-Kesslerloch (Kanton Schaffhausen) sehr ähnlich. Im Vergleich mit den Daten von Pferd, Rentier und Bison aus verschiedenen Fundstellen der Schweiz und des Französischen Juras sind die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte beim Mammut signifikant angereichert – dieses Phänomen wird in Bezug auf die herbivoren Bewohner der «Mammutsteppe»¹⁷ systematisch festgestellt. Es ist auf die art-spezifische Ernährung zurückzuführen, offenbar nutzen die verschiedenen Pflanzenfresser das Nahrungsangebot der Mammutsteppe auf ganz unterschiedliche Weise: So ernähren sich beispielsweise Rentiere überwiegend von Flechten und Moosen, während Mammute ausgewiesene Grasfresser waren.¹⁸ Das Mammut von Risch-Rotkreuz spiegelt somit die typische isotopische Nische seiner Spezies wider. Ob die Differenz der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von 1 Promille zwischen der proximalen und der distalen Stossezahnprobe eine Wanderungsbewe-

und Permafrostböden geprägter Lebensraumtyp des Eiszeitalters, der heute in dieser Form nicht mehr existiert. Anders als in den heutigen Tundren der nördlichen Breiten konnte sich aufgrund der höheren Sonneneinstrahlung eine krautreiche, nährstoffreiche Vegetation entwickeln, die ausreichend Nahrung auch für Grosssäuger wie das Mammut oder das Wollnashorn bot.

¹⁸ Bocherens et al. 2011. – Bocherens et al. 2014. – Bocherens 2015.

| Labor-nummer | Tierart | Skelettteil | N (Skelettteil) | C (Skelettteil) | S (Skelettteil) | Extraktions-ertrag | C (Kollagen) |
|---------------|------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------|
| ZUG-1 (FK 46) | <i>Mammuthus primigenius</i> | Ulna rechts | 3,7 % | 12,1 % | 0,2 % | 130,7 mg/g | 41,3 % |
| ZUG-2 (FK 53) | <i>Mammuthus primigenius</i> | Langknochen-fragment | 3,4 % | 11,3 % | 0,2 % | 107,6 mg/g | 42,9 % |
| ZUG-3 (FK 42) | <i>Mammuthus primigenius</i> | Stossezahn proximal | 5,1 % | 15,3 % | 0,1 % | 199,9 mg/g | 42,5 % |
| ZUG-4 (FK 43) | <i>Mammuthus primigenius</i> | Stossezahn distal | 4,3 % | 12,9 % | 0,1 % | 194,0 mg/g | 43,8 % |

Abb. 7 Ergebnisse der Isotopen-Messungen an den Proben des Mammuts von Risch-Rotkreuz.

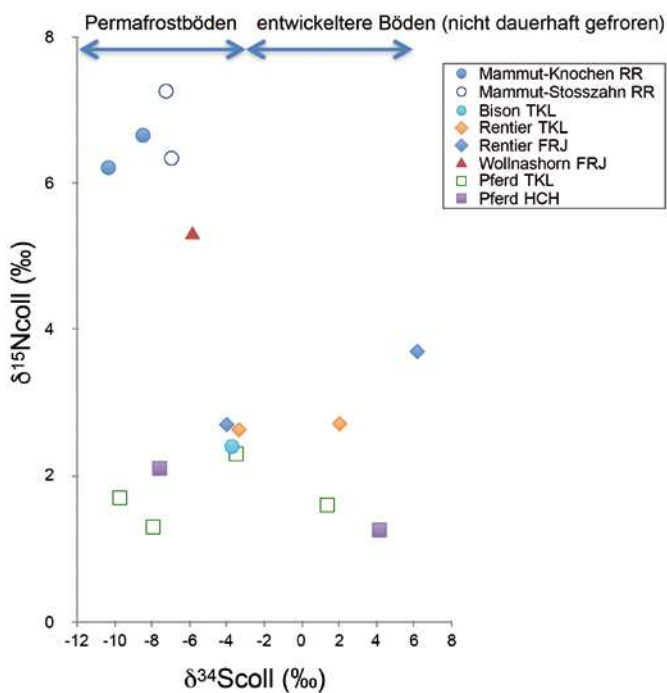


Abb. 8 Vergleich der $\delta^{34}\text{S}$ - und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte des Mammuts (*Mammuthus primigenius*) von Risch-Rotkreuz (RR) und weiterer späteiszeitlicher Tiere (*Wollnashorn*, *Coelodonta antiquitatis*; *Bison*, *Bison bonasus*; *Rentier*, *Rangifer tarandus*; *Pferd*, *Equus sp.*) der Fundstelle Thayngen-Kesslerloch (TKL), aus dem Französischen Jura (FRJ) und von Haute-rive-Champréveyres (HCH) (Drucker et al. 2012 und unveröffentlichte Daten von D. Drucker). Die Tiere aus dem Französischen Jura weisen ein ähnliches Alter wie das Mammut von Risch-Rotkreuz auf, die übrigen Tiere sind etwas jünger.

gung des Rotkreuzer Mammuts oder eine Veränderung seiner natürlichen Umgebung im Laufe seines Lebens darstellt – der distale, körperferne Teil des Zahnes wird früher gebildet als der proximale¹⁹ –, lässt sich aufgrund fehlender Vergleichsdaten zur Varianz innerhalb einzelner Stoßzähne nicht sagen.²⁰

¹⁹ Fisher et al. 2003, 117.

²⁰ Zwischen einzelnen Individuen kann der Unterschied durchaus auch deutlich höher sein (Drucker et al. 2015). Eine Variabilität von $\delta^{15}\text{N}$ -Werten innerhalb einzelner Individuen wurde etwa bei Mammutkälbern gemessen, die hier zunächst erhöhten Werte nehmen mit dem Entwöhnen und der Umstellung auf feste Nahrung graduell ab (Rountrey et al. 2007).

²¹ Drucker et al. 2011. – Drucker et al. 2012.

Die $\delta^{34}\text{S}$ -Werte des Mammuts von Risch-Rotkreuz (Abb. 8, vgl. Abb. 7) sind mit $-10,3$ bis $-7,0$ Promille recht tief. Lediglich einige Pferde der Fundstellen Thayngen-Kesslerloch (Schaffhausen) und Haute-rive-Champréveyres (Neuenburg) sowie das Wollnashorn aus dem Französischen Jura haben vergleichbare Werte ergeben. Wir interpretieren diese tiefen Werte als das Resultat der Ernährung mit Pflanzen, die auf kalten, noch nicht lange vom Gletscher freigegebenen (Permafrost-)Böden mit geringer Bodenbildung gewachsen sind.²¹ Die bei den übrigen Tieren in Abb. 8 festgestellten Werte würden dementsprechend auf eine Ernährung mit Pflanzen von bereits entwickelteren, länger eisfreien Böden hinweisen.

Insgesamt lässt sich aufgrund der Isotopenuntersuchungen am Mammut von Risch-Rotkreuz der Schluss ziehen, dass es die für seine Spezies typische Nische in einem kalten klimatischen Kontext besetzt hat. Diese Ergebnisse passen sehr gut zu den bei der Bergung dokumentierten geologischen Gegebenheiten der Fundschicht.²² Diese besteht aus einem schotterdurchsetzten Kiessand, der durch abfließendes Schmelzwasser abgelagert wurde. Im Sediment der Fundschicht konnten auch unter dem Binokular keinerlei pflanzliche oder tierische Reste festgestellt werden,²³ und selbst aus den darüber liegenden spätglazialen Stillwassersedimenten konnte bei einer stichprobenartigen Durchsicht lediglich das Pollenkorn eines Gänsefußgewächses (*Chenopodiaceae*) gefunden werden.²⁴ Der Zeitabschnitt des Rotkreuzer Mammuts, das Spätglazial kurz nach der letzten Maximalvergletscherung, kommt in Pollenprofilen aus dem Kanton Zug²⁵ denn auch, wenn überhaupt, nur ganz am unteren Ende der Profile vor. Er ist im mittelländischen Bereich des Kantons Zug von noch sehr geringen Pollenkonzentrationen und dem Vorkommen von Süß- und Sauergräsern sowie einer Vielzahl von Krauttaxa geprägt – einer Pflanzengesellschaft, wie sie für die Mammutsteppe typisch ist.²⁶ Das Zuger Berggebiet war in dieser

²² Huber/Reinhard 2016, 105.

²³ Thew 2015.

²⁴ Schriftliche Mitteilung von Erika Gobet, Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Bern, vom 10. August 2016. Beprobte wurden vier Schichten im Bereich der Mammutfundschicht und direkt darüber.

²⁵ Cham-Bibersee: Beckmann 2004. – Menzingen-Egelsee: Wehrli 2005, Wehrli et al. 2007. – Zug-Sumpf: Lüdi/Studer 1959.

²⁶ Beckmann 2004, 46–49, 158, Fig. B3.

| N (Kollagen) | C:N (Kollagen) | $\delta^{13}\text{C}$ (Kollagen) | $\delta^{15}\text{N}$ (Kollagen) | S (Kollagen) | $\delta^{34}\text{S}$ (Kollagen) | C:S (Kollagen) | N:S (Kollagen) |
|-----------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 14,7 % | 3,3 | $-21,1\text{‰}$ | $6,2\text{‰}$ | 0,16 % | $-10,3\text{‰}$ | 686 | 209 |
| 15,0 % | 3,3 | $-21,0\text{‰}$ | $6,7\text{‰}$ | 0,17 % | $-8,5\text{‰}$ | 682 | 205 |
| 15,1 % | 3,3 | $-20,9\text{‰}$ | $7,3\text{‰}$ | 0,15 % | $-7,3\text{‰}$ | 759 | 231 |
| 15,7 % | 3,3 | $-20,7\text{‰}$ | $6,3\text{‰}$ | 0,16 % | $-7,0\text{‰}$ | 749 | 229 |

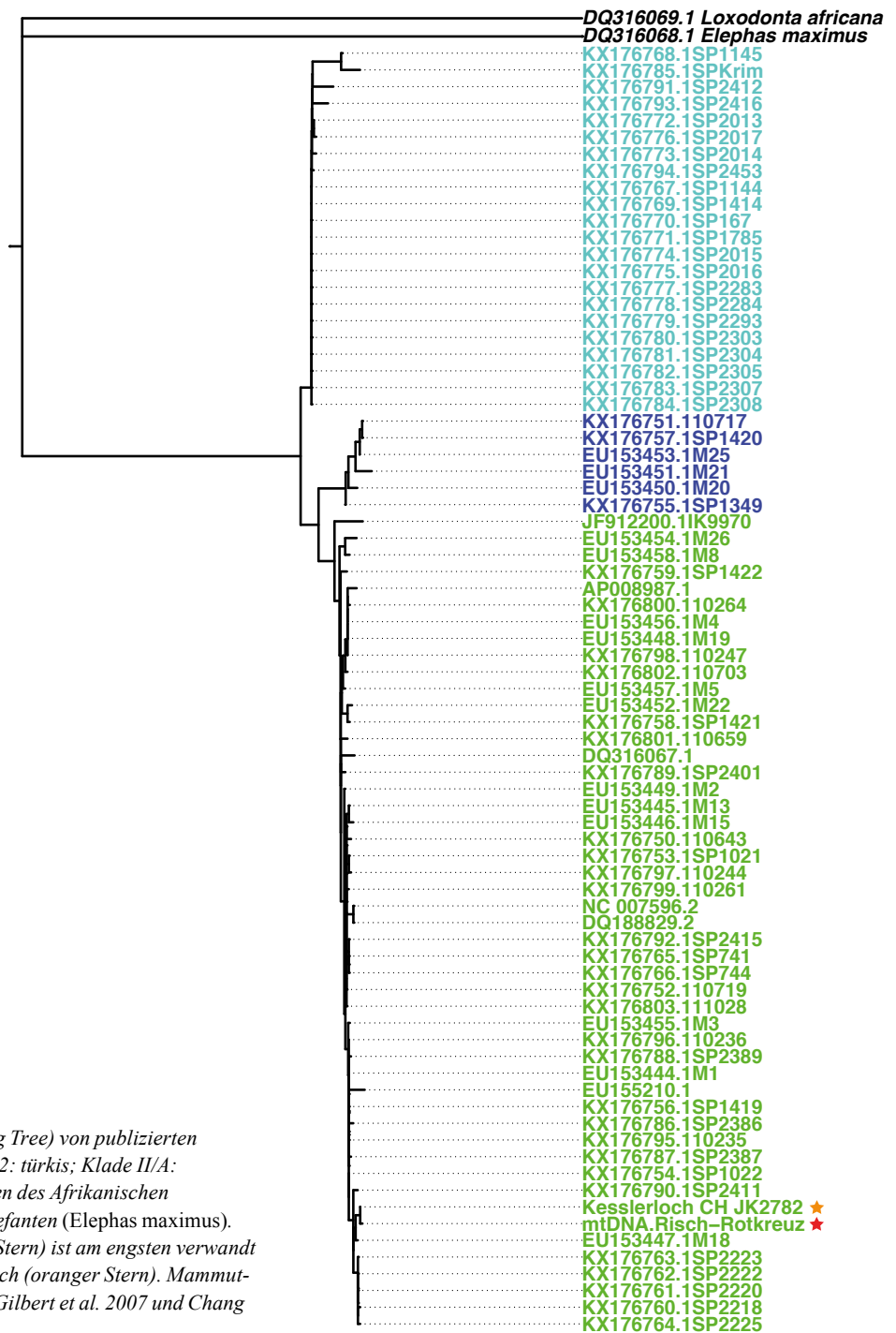


Abb. 9 Kladogramm (Neighbour Joining Tree) von publizierten Wollhaarmammut-Genomen (Klade III/b2: türkis; Klade II/A: blau; Klade I: grün), sowie den Positionen des Afrikanischen (*Loxodonta africana*) und Asiatischen Elefanten (*Elephas maximus*). Das Mammut von Risch-Rotkreuz (roter Stern) ist am engsten verwandt mit demjenigen vom Thayngen-Kesslerloch (oranjer Stern). Mammut-Genome nach Fellows Yates et al. 2017, Gilbert et al. 2007 und Chang et al. 2017.

Zeit dagegen möglicherweise noch nicht ganz eisfrei, der Beginn der Sedimentation im Egelsee bei Menzingen beginnt erst um 14300 v. Chr.,²⁷ also fast tausend Jahre nach dem Tod des Rotkreuzer Mammuts.

Analyse der mitochondrialen aDNA

Als «ancient DNA» (aDNA) wird fragmentierte und allenfalls auch chemisch veränderte DNA aus archäologischen oder paläontologischen Funden bezeichnet. Sie erhält sich unter günstigen Bedingungen – insbesondere bei konstanter Kälte und/oder Trockenheit – in subfossilem Gewebe von Tieren und Pflanzen, beispielsweise in Knochen. Dabei ist

die Chance für die Erhaltung von DNA der Mitochondrien («Zellkraftwerke») insofern besser als von DNA des Zellkerns, da pro Zelle viele Mitochondrien, jedoch nur ein Kern vorkommen. Die Menge an mitochondrialer DNA (mtDNA) und damit die Erhaltungswahrscheinlichkeit relevanter Abschnitte des mitochondrialen Genoms ist somit erheblich grösser. Daher wird bei archäologischen und paläontologischen Funden zumeist die mitochondriale aDNA untersucht. mtDNA wird nur über die mütterliche Linie vererbt und stellt nur einen kleinen Teil der Erbinformation dar, die Zellkern-DNA hingegen enthält die vollständige genetische Information eines Individuums. Eine Geschlechtsbestimmung etwa ist nur anhand von Kern-DNA möglich.

Die DNA gibt Auskunft über die phylogenetische Einordnung bzw. stammesgeschichtliche Verwandtschaft eines Individuums, die im Falle des Wollhaarmammuts letztlich auch einen Mosaikstein im Verständnis des Aussterbens der europäischen Megafauna am Ende der letzten Eiszeit bildet. Aus aDNA-Analysen können sich aber beispielsweise auch verhaltensbiologische Hinweise zu ausgestorbenen Tierarten ergeben.²⁸

Für die Untersuchung der aDNA des Mammuts von Risch-Rotkreuz wurden je eine Probe aus dem Ulna- und dem unbestimmten Langknochenfragment²⁹ genommen.³⁰ In der Probe aus dem Ulna-Fragment ist die DNA-Erhaltung gering, nur etwa 0,03 Prozent aller sequenzierten Fragmente lassen sich dem mitochondrialen Mammutgenom zuordnen. In der Probe aus dem Langknochen-Fragment dagegen beträgt der Prozentsatz der endogenen DNA 0,7 Prozent. Das Genom aus dieser Probe ist durchschnittlich 31-fach abgedeckt, und 98 Prozent aller Positionen sind mit mindestens drei Fragmenten belegt, zudem zeigt diese Probe die für aDNA typischen Beschädigungs- und Fragmentierungsmuster (*damage patterns*).³¹

Dies erlaubt eine phylogenetische Einordnung der Probe mit bereits publizierten *Mammuthus-primigenius*-mtGenomen³² (Abb. 9). Die Diversität der Mammut-mtDNA wird in drei Kladen aufgeteilt: Klade I entstand sehr wahrscheinlich in Nordamerika und erreichte Eurasien durch Migration von Tieren über die Beringstrasse, wo sie im Laufe der Zeit die Kladen II und III ersetzte. Ein Grossteil der jüngeren Mammutfunde gehört zu Klade I,³³ so auch das Rotkreuzer Mammut. Phylogenetisch ist es am nächsten verwandt mit dem etwa gleich alten Mammut von Thayngen-Kesslerloch,³⁴ was aufgrund der geografischen und zeitlichen Nähe nicht verwundert. Der nächste Verwandte dieser beiden Mammute wiederum ist ein etwa 3000 Jahre älteres Mammut aus Nordwestsibirien, das die internationale Proben-ID «M18» trägt.³⁵ Diese nahe Verwandtschaft in so weiter Entfernung kann

wohl vor allem durch eine Forschungslücke erklärt werden: Aus Europa und selbst aus Westsibirien sind aus der Zeit kurz nach dem Pleniglazial bisher nur ganz vereinzelt Mammutfunde überhaupt genetisch untersucht.³⁶ Hier wird bei einer grösseren Menge von Vergleichsdaten ein erheblich detaillierterer Stammbaum rekonstruierbar sein.

Zusammenfassung

Auch im Fall des Rotkreuzer Mammutfundes zeigt sich einmal mehr: Die archäologische Arbeit ist mit dem Abschluss der Ausgrabungsarbeiten nicht zu Ende, sondern fängt vielfach erst an – und erst die systematische Einbindung naturwissenschaftlicher Disziplinen ermöglicht es, das Aussagepotenzial der archäologischen Spuren voll auszuschöpfen. Die hier kursorisch vorgestellten Ergebnisse bilden so einen weiteren Mosaikstein in der Erforschung der späten Eiszeit – weit über den Kanton Zug hinaus. Die Resultate der Isotopen- und mtDNA-Analyse des Rotkreuzer Mammuts passen dabei sehr gut zu den bisherigen Erkenntnissen und Untersuchungsergebnissen. So ernährte das Tier sich offensichtlich von Pflanzen, die auf Permafrostböden wuchsen. Auch sedimentologische Beobachtungen sowie eine grobe Durchsicht auf Makroreste und Pollen sprechen für eine noch stark gletschergeprägte Umwelt. Man muss sich für das mittelländische Gebiet des Kantons Zug vor 17 000 Jahren als Vegetationsform also noch eine offene, weitgehend baumlose Mammutsteppe vorstellen. Genetisch ist das «letzte Zuger Mammut» nahe verwandt mit dem sehr ähnlich datierten Mammut von Thayngen-Kesslerloch, das überdies auch eine ähnliche isotopische Einnischung zeigt. Hier liegt es nahe, eine Zugehörigkeit der beiden Mammutfunde zur selben Population zu vermuten. Ob diese Ähnlichkeiten tatsächlich eine so weitgehende Interpretation erlauben, müssen weitere Forschungen zeigen.

²⁷ Wehrli 2005, 101. – Wehrli et al. 2007, 749.

²⁸ Vgl. Pečnerová et al. 2017. Eine genetische Geschlechtsbestimmung von 98 sibirischen Mammutfunden zeigt hier, dass Mammutbullen in der fossilen Überlieferung deutlich überrepräsentiert sind, also offenbar häufiger in einer Weise verunglücken, die einer Erhaltung ihrer Überreste förderlich ist. Dies wird als Hinweis auf eine solitäre Lebensweise der Mammutbullen gedeutet; innerhalb einer Herde käme es aufgrund der Erfahrung der Leitkuh und der Hilfe der Herdenmitglieder zu weniger tödlichen Unfällen. Bezeichnenderweise handelt es sich bei dem Mammut aus Rotkreuz ausweislich der morphologischen Ansprache ebenfalls um ein männliches Tier.

²⁹ Vgl. Huber/Reinhard 2016, 104, Abb. 3.6 und 3.7, sowie 106, Abb. 7.

³⁰ Aus den beiden Knochenfragmenten wurde mithilfe eines Zahnarztbohrers feines Knochenpulver gewonnen. Die aDNA-Extraktion erfolgte nach der bei Dabney et al. 2013 beschriebenen Methode. Anschliessend wurden nach Meyer/Kircher 2010 bzw. Kircher et al. 2012 künstliche Sequenzen angefügt. Nach einer anschliessenden Vielfältigung aller gewonnenen Fragmente wurde mittels eines haus-eigenen Anreicherungsprotokolls der Archäo- und Paläogenetik der Universität Tübingen die endogene Mammut-DNA angereichert. Hierzu werden Sonden aus moderner Elefanten-DNA verwendet. Nach der Sequenzierung werden die gewonnenen Rohdaten mit der

EAGER-Pipeline (Peltzer et al. 2016) bearbeitet. Die rekonstruierten mtGenome werden dann in einem phylogenetischen Baum (Neighbour Joining Tree, Tamura-Nei Model, Gamma distribution 0,14; vgl. Tamura et al. 2013) mit anderen bereits publizierten Mammut-mtDNA-Sequenzen verglichen; vgl. Furtwängler 2017.

³¹ Die Ergebnisse der aDNA-Analytik sind auf «GenBank», einer von den US-amerikanischen National Institutes of Health betriebenen, online zugänglichen DNA-Sequenzdatenbank, hinterlegt: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/> (Accession number MH158736).

³² Vgl. Gilbert et al. 2007 und Chang et al. 2017.

³³ Chang et al. 2017. – Palkopoulou et al. 2013.

³⁴ Fellows Yates et al. 2017. Das Kesslerloch-Mammut (mit der internationalen Probennummer JK2782) ist AMS-¹⁴C-datiert auf 13 980 ± 110 BP (OxA-10237) bzw. zwischen 15 409 und 14 629 v. Chr. (2σ-Bereich, kalibriert mit OxCal v4.3.2; vgl. Stuart et al. 2002, 1562 [wo für die Probennummer OxA-10237 fälschlich eine Rippe angegeben wird, richtig ist jedoch ein Molar: Huber/Reinhard 2016, 108, Fussnote 14]).

³⁵ Gilbert et al. 2007. «M18» von der Gydan-Halbinsel, Rajon Taimyr, ist AMS-¹⁴C-datiert auf 17 125 ± 70 BP (OxA-17116) bzw. zwischen 18 942 und 18 504 v. Chr. (2σ-Bereich, kalibriert mit OxCal v4.3.2).

³⁶ Chang et al. 2017, 3, Fig. 1. – Palkopoulou et al. 2013, 4, Fig. 3.

Literatur

- Madlena Beckmann, Pollenanalytische Untersuchung der Zeit der Jäger und Sammler und der ersten Bauern an zwei Lokalitäten des Zentralen Schweizer Mittellandes. Berlin/Stuttgart 2004 (Dissertationes Botanicae 390).
- Hervé Bocherens, Isotopic biogeochemistry and the paleoecology of the mammoth steppe fauna. In: Jelle W. F. Reumer, John De Vos und Dick Mol (Hg.), *Advances in Mammoth Research. Proceedings of the Second International Mammoth Conference*, Rotterdam, May 16–20 1999. *DEINSEA* 9, 2003, 57–76.
- Hervé Bocherens, Isotopic tracking of large carnivore palaeoecology in the mammoth steppe. *Quaternary Science Reviews* 117, 2015, 42–71. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.018>
- Hervé Bocherens, Daniel Billiou, Marylène Patou-Mathis, Dominique Bonjean, Marcel Otte und André Mariotti, Paleobiological implications of the isotopic signatures (^{13}C , ^{15}N) of fossil mammal collagen in Scladina Cave (Sclayn, Belgium). *Quaternary Research* 48, 1997, 370–380. <https://doi.org/10.1006/qres.1997.1927>
- Hervé Bocherens, Dorothée G. Drucker, Dominique Bonjean, Anne Bridault, Nicolas J. Conard, Christophe Cupillard, Mietje Germonpré, Markus Höneisen, Susanne C. Münzel, Hannes Napierala, Marylène Patou-Mathis, Elisabeth Stephan, Hans-Peter Uerpmann und Reinhard Ziegler, Isotopic evidence for dietary ecology of cave lion (*Panthera spelaea*) in North-Western Europe: Prey choice, competition and implications for extinction. *Quaternary International* 245, 2011, 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.02.023>
- Hervé Bocherens, Dorothée Drucker und Christoph Wissing, Die Mammutsteppe. Isotopenuntersuchungen in einem vergangenen Ökosystem. Senckenberg: Natur, Forschung, Museum 144/7–8, 2014, 226–231.
- Dan Chang, Michael Knapp, Jacob Enk, Sebastian Lippold, Martin Kircher, Adrian Lister [...] und Beth Shapiro, The evolutionary and phylogeographic history of woolly mammoths: a comprehensive mitogenomic analysis. *Scientific Reports* 7, 2017, Article number 44585. <https://doi.org/10.1038/srep44585>.
- Kimberley E. J. Chappelle und Jonah N. Choiniere, A revised cranial description of *Massospondylus carinatus* Owen (Dinosauria: Sauropodomorpha) based on computed tomographic scans and a review of cranial characters for basal Sauropodomorpha. *PeerJ* 6:e4224, publiziert am 12. Januar 2018. <https://doi.org/10.7717/peerj.4224>.
- Jesse Dabney, Michael Knapp, Isabelle Glocke, Marie-Theres Gansauge, Anje Wehmann, Birgit Nickel [...] und Matthias Meyer, Complete mitochondrial genome sequence of a Middle Pleistocene cave bear reconstructed from ultrashort DNA fragments. *PNAS* 110/39, 2013, 15758–15763. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314445110>
- Dorothée Drucker, Isotopic Results Mammoth Zug, Bericht Universität Tübingen, Fachbereich Geowissenschaften, Biogeologie, 16. Oktober 2017. Amt für Denkmalpflege und Archäologie Zug, Archiv Archäologie, Ereignis 2166.
- Dorothée G. Drucker, Anne Bridault, Christophe Cupillard, Alisa Hujic und Hervé Bocherens, Evolution of habitat and environment of red deer (*Cervus elaphus*) during the Late-glacial and early Holocene in eastern France (French Jura and the western Alps) using multi-isotope analysis ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$) of archaeological remains. *Quaternary International* 245, 2011, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.07.019>
- Dorothée G. Drucker, Anne Bridault und Christophe Cupillard, Environmental context of the Magdalenian settlement in the Jura Mountains using stable isotope tracking (^{13}C , ^{15}N , ^{34}S) of bone collagen from reindeer (*Rangifer tarandus*). *Quaternary International* 272, 2012, 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.05.040>
- Dorothée G. Drucker, Florent Rivals, Susanne C. Münzel und Hervé Bocherens, Stable isotope and microwear investigation on the mammoth (*Mammuthus primigenius*) of Kraków Spadzista: insights into diet and environment. In: Piotr Wojtal, Jarosław Wilczyński und Gary Haynes (Hg.), *A Gravettian Site in Southern Poland: Kraków Spadzista*. Warschau 2015, 189–202.
- Daniel C. Fisher, Ethan A. Shirley, Christopher D. Whalen, Zachary T. Calamari, Adam N. Rountrey, Alexei N. Tikhonov [...] und Piotr A. Lazarev, X-Ray Computed Tomography of two Mammoth Calf Mummies. *Journal of Paleontology* 88/4, 2014, 664–675. <https://doi.org/10.1666/13-092>
- Daniel C. Fisher, David L. Fox und Larry D. Agenbroad, Tusk growth rate and season of death of *Mammuthus columbi* from Hot Springs, South Dakota, USA. In: Jelle W. F. Reumer, John De Vos und Dick Mol (Hrsg.), *Advances in Mammoth Research (Proceedings of the Second International Mammoth Conference, Rotterdam, May 16–20 1999)*. *DEINSEA* 9, 2003, 117–133.
- James A. Fellows Yates, Dorothée G. Drucker, Ella Reiter, Simon Heumos, Frido Welker, Susanne C. Münzel [...] und Johannes Krause, Central European Woolly Mammoth Population Dynamics: Insights from Late Pleistocene Mitochondrial Genomes. *Scientific Reports* 7/2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17723-1>.
- Jonathan Frey, Der «Oberwiler Degen». Herkunft, Gebrauch und sein Weg in den Zugersee. *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte* 71, 2014, 101–128.
- Anja Furtwängler, aDNA Analyse des Rotkreuzer Mammut, Bericht Universität Tübingen, Archäo- und Paläogenetik, 18. April 2017. Amt für Denkmalpflege und Archäologie Zug, Archiv Archäologie, Ereignis 2166.
- M. Thomas P. Gilbert, Lynn P. Tomsho, Snjezana Rendulic, Michael Packard, Daniela I. Drautz, Andrei Sher [...] und Stephan C. Schuster, Whole-genome shotgun sequencing of mitochondria from ancient hair shafts. *Science* 317/5846, 2007, 1927–1930. <https://doi.org/10.1126/science.1146971>
- Semyon E. Grigoriev, Daniel C. Fisher, Theodor Obadă, Adam N. Rountrey, Grigory N. Savvinov [...] und Alexei N. Tikhonov, A woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) carcass from Maly Lyakhovsky Island (New Siberian Islands, Russian Federation). *Quaternary International* 445, 2017, 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.01.007>.
- Eda Gross und Stefan Hochuli, Die jungsteinzeitliche Doppelaxt von Cham-Eslen. Gesamtbericht über einen einzigartigen Fund aus dem Zugersee. *Tugium* 18, 2002, 69–101. <http://dx.doi.org/10.5169/seals-526806>
- Gisela Grupe, Kerrin Christiansen, Inge Schröder und Ursula Wittwer-Backofen, Anthropologie. Einführendes Lehrbuch. Zweite Auflage, Berlin/Heidelberg 2012.
- Renata Huber und Jochen Reinhard, Das letzte Zuger Mammut? Eine Baugrube als Fenster in die späte Eiszeit. In: *Tugium* 32, 2016, 103–110. <http://dx.doi.org/10.5169/seals-632509>.
- Martin Kircher, Susanna Sawyer und Matthias Meyer, Double indexing overcomes inaccuracies in multiplex sequencing on the Illumina platform. *Nucleic Acids Research* 40/1, 2012, Paper e3. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr771>.

- Susanne Klein, Präparationsbericht der Henssen PalaeoWerkstatt Goch, 6. Dezember 2017. Amt für Denkmalpflege und Archäologie, Archiv Archäologie, Ereignis 2166.
- Werner Lüdi und Paul Studer, Ein Pollendiagramm aus der bronzezeitlichen Station «Sumpf» am Zugersee (Schweiz). Bericht über das Geobotanische Forschungsinstitut Rübel in Zürich 1958, 126–140.
- Matthias Meyer und Martin Kircher, Illumina sequencing library preparation for highly multiplexed target capture and sequencing. *Cold Spring Harbor Protocols* 2010(6).
<https://doi.org/10.1101/pdb.prot5448>.
- Eleftheria Palkopoulou, Love Dalén, Adrian M. Lister, Sergey Vartanyan, Michail Sablin, Andrei Sher [...] und Jessica A. Thomas, Holarctic genetic structure and range dynamics in the woolly mammoth. *Proceedings of the Royal Society B* 280, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.1910>.
- Patricia Pečnerová, David Diez-del-Molino, Nicolas Dussex, Tatiana Feuerborn, Johanna von Seth, Johannes van der Plicht, Pavel Nikol'skiy, Alexei Tikhonov, Sergey Vartanyan und Love Dalén, Genome-Based Sexing Provide Clues about Behaviour and Social Structure in the Woolly Mammoth. *Current Biology* 27, 2017, 3505–3510.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.09.064>.
- Alexander Peltzer, Günter Jäger, Alexander Herbig, Alexander Seitz, Christian Knip, Johannes Krause und Kay Nieselt, EAGER: efficient ancient genome reconstruction. *Genome Biology* 17(60)/2016.
<https://doi.org/10.1186/s13059-016-0918-z>.
- Adam N. Rountrey, Daniel C. Fisher, Sergey Vartanyan und David L. Fox, Carbon and nitrogen isotope analyses of a juvenile woolly mammoth tusk: Evidence of weaning. *Quaternary International* 169–170, 2007, 11–173.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.08.002>
- Katharina Schmidt-Ott, Katja Hunger und David Mannes, Die Konservierung des Degens von Oberwil unter Einbeziehung aktueller Analyseverfahren. *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte* 71, 2014, 129–140.
- Jörg Stelzner, Die Computertomographie als Untersuchungs- und Dokumentationsmethode zur Bearbeitung frühmittelalterlicher Fundkomplexe. Unpublizierte Dissertation an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste, Stuttgart 2016.
<http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/artdok/volltexte/2016/4429>
(Zugriff 2. März 2018).
- Elisabeth Stephan, Stabile Isotope in fossilen Faunenfunden: Erforschung von Klima, Umwelt und Ernährung prähistorischer Tiere. In: Andreas Hauptmann und Volker Pingel (Hg.), *Archäometrie. Methoden und Anwendungsbeispiele*. Stuttgart 2008, 46–66.
- Anthony J. Stuart, Leopold D. Sulerzhitsky, Lyobov A. Orlova, Yaroslav V. Kuzmin und Adrian M. Lister, The latest woolly mammoths (*Mammuthus primigenius* Blumenbach) in Europe and Asia: a review of the current evidence. *Quaternary Science Reviews* 21, 2002, 1559–1569.
[https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00026-4)
- Koichi Tamura, Glen Stecher, Daniel Peterson, Alan Filipiński und Sudhir Kumar, MEGA6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis version 6.0. *Molecular Biology and Evolution* 30, 2013, 2725–2729.
<https://doi.org/10.1093/molbev/mst197>
- Nigel Thew, Rotkreuz, Zug: results of the sieving of two samples from the mammoth layer. Bericht vom 6. Dezember 2015. Amt für Denkmalpflege und Archäologie Zug, Archiv Archäologie, Ereignis 2166.
- Frédérique-Sophie Tissier und Sabine Brechbühl Trijasse, Röntgenaufnahmen, Computertomografie und Neutronenuntersuchung. Bildgebende Verfahren im Dienst der Archäologie und der Konservierung-Restauration. *Archäologie Bern/Archéologie bernoise* 2014. Jahrbuch des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern 2014, 236–246.
- Tanya Uldin, Virtual anthropology – a brief review of the literature and history of computed tomography. *Forensic Sciences Research* 2/4, 2017, 165–173.
<https://doi.org/10.1080/20961790.2017.1369621>.
- Michael Wehrli, Umwelt und Mensch im Zuger Berggebiet seit dem Abschmelzen des Gletschereises vor 17 000 Jahren. *Tugium* 21, 2005, 97–113.
- Michael Wehrli, Willy Tinner und Brigitta Ammann, 16 000 years of vegetation and settlement history from Egelsee (Menzingen, central Switzerland). *The Holocene* 17/6, 2007, 747–761.
<https://doi.org/10.1177%2F0959683607080515>