

PALÄOTEMPERATURBESTIMMUNGEN NACH $\delta^{18}\text{O}$ -WERTEN VON EQUIDEN-RESTEN AUS DEM UNTERPLEISTOZÄN VON UNTERMASFELD

1. Einleitung

Die Bestimmung von Isotopenverhältnissen in Knochenfunden bietet für die Paläontologie und Archäozoologie eine neue Möglichkeit, direktere Auskünfte über die Umwelteinflüsse zu erhalten, denen die betreffenden Tiere ausgesetzt waren. Dabei hat sich das Verhältnis der stabilen Sauerstoffisotopen $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ als besonders aussagekräftig erwiesen, da es durch temperaturabhängige Fraktionierungen bestimmt wird und sich der Sauerstoff im Phosphat des Knochenapatits gegenüber diagenetischen Einflüssen als recht stabil gezeigt hat. Die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse im Knochenphosphat werden im folgenden wie üblich als δ -Wert in Bezug auf den Standard Mean Ocean Water (SMOW) angegeben. Dabei stellt R das jeweilige Isotopenverhältnis dar.

$$\delta^{18}\text{O}_p (\text{‰}) = [(R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}})/R_{\text{Standard}}] \cdot 1000.$$

Im Knochengewebe terrestrischer Säugetiere wird das Isotopenverhältnis über das Trinkwasser einerseits durch Fraktionierungen im globalen Sauerstoffzyklus und andererseits durch Vorgänge innerhalb des Tierkörpers bestimmt.

Fraktionierungen von Sauerstoffisotopen im Wasser treten während des meteorologischen Zyklus bei Verdunstung, Kondensation und Niederschlag auf. Wasser, das diesen Zyklus durchlaufen hat, wird als meteorisches Wasser bezeichnet und umfaßt alle Oberflächenwässer wie Flüsse, Seen und Gletscher. Die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse im meteorischen Wasser und somit im Trinkwasser der Tiere variieren in Abhängigkeit von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Breitengrad, Höhe über NN und Entfernung von der Küste. Die Variationen werden überwiegend durch Temperaturunterschiede verursacht, während die anderen Parameter diese Korrelation – global betrachtet – nicht signifikant beeinflussen. Bei niedrigeren Temperaturen ist die Fraktionierung sowohl beim Verdampfen des Wassers aus den Ozeanen als auch bei jedem Abregnen hoch, d.h. Wasserdampf und somit auch die Niederschläge besitzen relativ niedrige $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse. Bei höheren Temperaturen ist die Fraktionierung gering und die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den Niederschlägen sind entsprechend höher. D. h. in kalten Jahren sind die mittleren $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den Niederschlägen niedriger, in wärmeren Jahren sind sie höher. Diese Beziehung zwischen Temperatur und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten ist so deutlich, daß Dansgaard sie 1964 anhand empirischer Daten mit folgender Regressionsgleichung beschrieben hat:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}} = (0,521 \pm 0,014) T_{\text{Jahresmittel}} - 14,96$$

(T: Temperatur in $^{\circ}\text{C}$, mw: meteorisches Wasser; Rozanski et al. 1993).

Bekanntermaßen haben die aus den Niederschlägen vieler Jahrtausende aufgebauten Eismassen über Grönland und der Antarktis diese Schwankungen der Isotopenverhältnisse gespeichert, und ihre Auswertung hat zu den – uns heute vorliegenden – detaillierten Kenntnissen der quartären Klimaveränderungen geführt.

Ein weiterer wichtiger Parameter der Fraktionierungen ist der Kontinental-Effekt (Rozanski et al. 1993). Im Verlauf des Wasserkreislaufs erniedrigt sich das $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnis in den Niederschlägen mit zu-

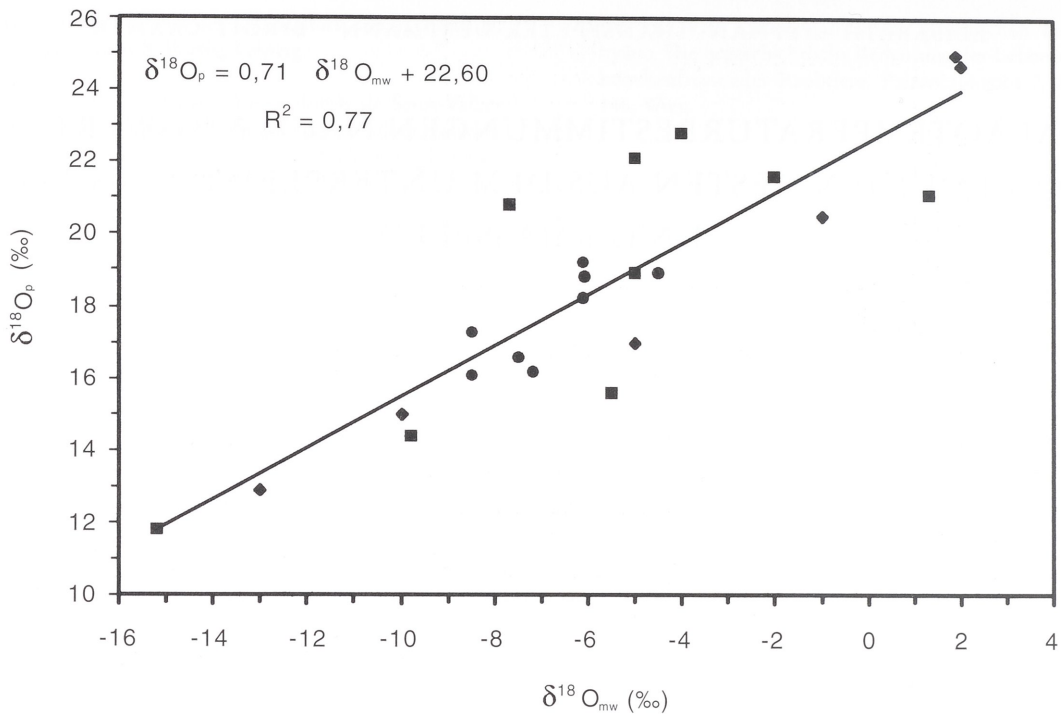


Abb. 1 Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten im Knochenphosphat rezenter Equiden ($\delta^{18}\text{O}_p$) und im lokalen meteorischen Wasser ($\delta^{18}\text{O}_{mw}$) (Daten von Bryant et al. 1994: Quadrate; Sánchez Chillón et al. 1994: Rauten; Delgado Hertas et al. 1995: Kreise).

nehmender Entfernung von der Küste. Bei jedem Abregnen wird der Regen, der das System verläßt, mit ^{18}O angereichert und der zurückbleibende Wasserdampf verarmt somit an ^{18}O . Je weiter im Inland die Niederschläge fallen, desto stärker nimmt der ^{16}O -Anteil zu und der ^{18}O -Anteil ab. Das Ausmaß der Fraktionierungen ist auch hier wieder temperaturabhängig. Besonders hohe Fraktionierungen und starke ^{18}O -Abreicherungen der Niederschläge sind beim Abregnen an Gebirgen zu beobachten, da dort durch den Aufstieg des Wasserdampfes eine starke Abkühlung und ein vermehrtes Abregnen erfolgt. Durch diesen sogenannten »Höheneffekt« kann das $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnis in den Niederschlägen zwischen 0,15 und 0,5 ‰ je 100 Höhenmeter leichter werden (Gat 1980).

Die Fraktionierungen von Sauerstoffisotopen innerhalb von Säugetieren beruhen auf kinetischen Effekten. Sie finden während der Aufnahme und der Verstoffwechslung bis hin zum Einbau des Sauerstoffs in den Hydroxylapatit der Knochen statt (Longinelli 1984; Luz et al. 1984). Durch verschiedenartige Lebensweise nehmen unterschiedliche Tierarten Nahrung und Wasser mit unterschiedlichen Isotopenzusammensetzungen auf. In rezenten Säugetieren bestehen zwischen den Sauerstoffisotopenverhältnissen im meteorischen Wasser, im Blut der Tiere und im Knochenapatit positive Korrelationen, d.h. alle bei Aufnahme, Verstoffwechslung und Ausscheidung stattfindenden Fraktionierungen bewirken eine lineare Verschiebung zwischen den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten des aufgenommenen Wassers und des Hydroxylapatits. Diese Zusammenhänge sind aber nur dann gegeben, wenn der überwiegende Anteil des im Körper benötigten Wassers aus dem aufgenommenen Trinkwasser stammt. Wird hingegen eine größere Wassermenge aus der Pflanzennahrung verstoffwechselt, führt dies bei Herbivoren aufgrund von Anreicherungen des schweren ^{18}O im Blattwasser der Pflanzen relativ zum aufgenommenen meteorischen Wasser zu höheren Sauerstoffisotopenverhältnissen im Knochengewebe (Epstein et al. 1977; Ayliffe u. Chivas 1990; Luz et al. 1990; Kohn et al. 1996). Die $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte in den Knochen repräsentieren dann nicht mehr direkt die Isotopenverhältnisse des aufgenommenen Trinkwassers. Dieser Effekt spielt bei Pferden

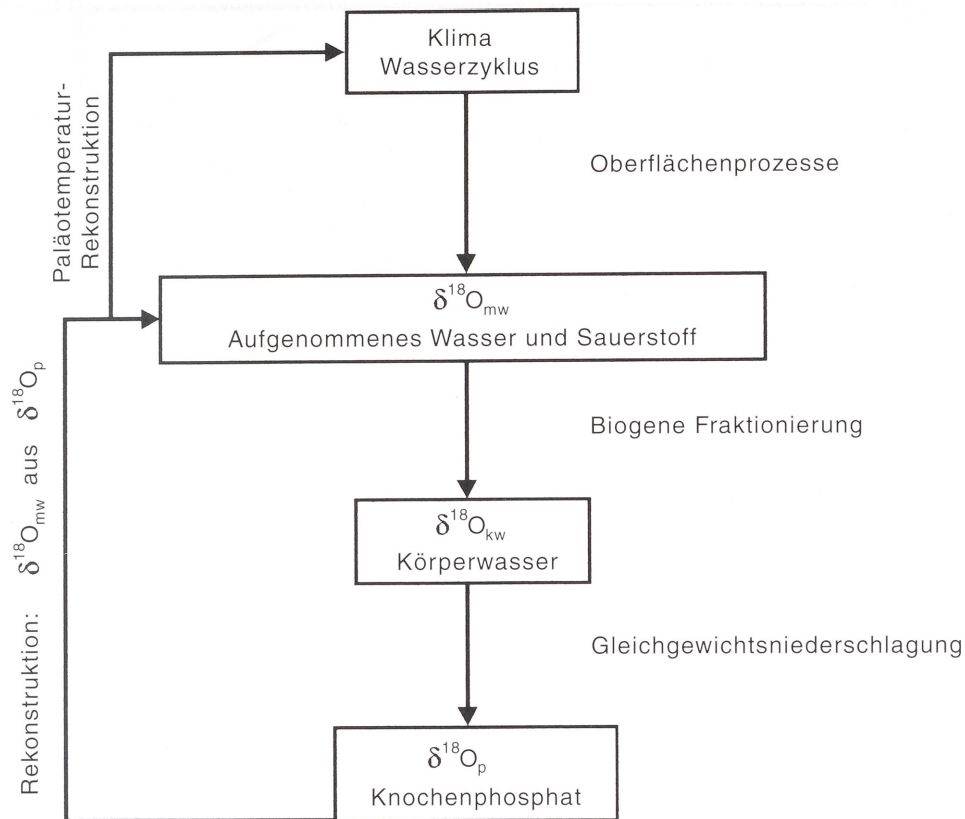


Abb. 2 Schema der Paläotemperaturrekonstruktion anhand der $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte im Knochenphosphat terrestrischer Säugetiere.

jedoch keine wesentliche Rolle, da sie den überwiegenden Teil des von ihnen benötigten Wassers als Trinkwasser aufnehmen (Hintz 1994; Volf 1996).

Die Fraktionierungen innerhalb des Körpers variieren abhängig von Lebensweise und Stoffwechsel verschiedener Tierarten. Sie sind also artspezifisch, weichen jedoch bei nahe verwandten Tierarten mit gleichartiger Lebensweise nur geringfügig voneinander ab. Deshalb wird angenommen, daß die untersuchten Equiden-Formen keine unterschiedlichen Fraktionierungen aufgewiesen haben. Abb. 1 zeigt die Korrelation für verschiedene rezente Equidenarten (Bryant et al. 1994: Hauspferd, *E. zebra*, *E. burchelli*; Sánchez Chillón et al. 1994: *E. przewalski*, *E. asinus*; Delgado Huertas et al. 1995: Hauspferd), wie sie für Temperaturberechnungen im folgenden verwendet wird.

Die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse in den Knochen terrestrischer Säugetiere spiegeln so die Isotopenzusammensetzung des aufgenommenen Wassers und die Temperatur zur Zeit des Einbaus der Sauerstoffisotopen wider und werden für Paläotemperatur-Rekonstruktionen genutzt (Abb. 2; z.B. Longinelli 1973; Bryant et al. 1994; Sánchez Chillón et al. 1994; Iacumin et al. 1996; Reinhard et al. 1996). Vor diesem Hintergrund können die Isotopenanalysen an Equidenknochen aus dem Unterpleistozän von Untermaßfeld einen Beitrag zur Klimarekonstruktion leisten.

2. Material

Neben Untermaßfeld als zentraler Fundstelle für die vorliegenden Untersuchungen wurden Messungen an Knochenfunden aus den Fundstellen Voigtstedt, Süßenborn, Bilzingsleben und Taubach in Thüringen (Tab. 1) sowie $\delta^{18}\text{O}$ -Werte pleistozäner Knochenfunde aus dem süd- und westdeutschen Raum (Stephan 1999) zum Vergleich herangezogen.

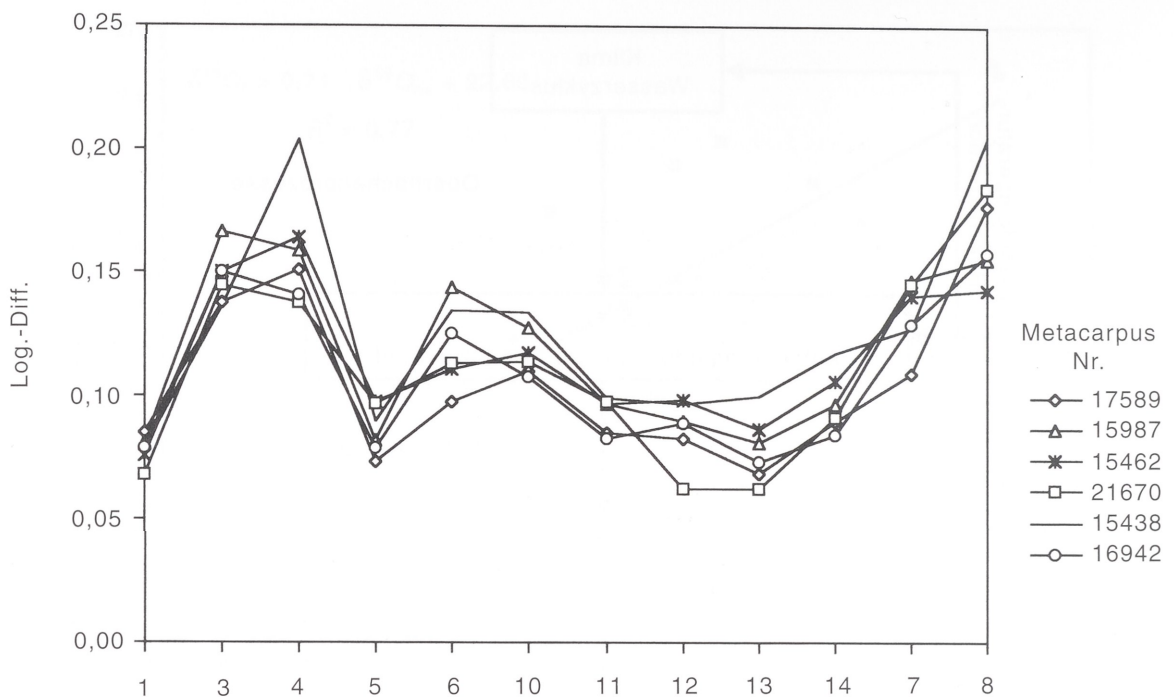


Abb. 3 Log.-Differenz-Diagramm der Metacarpus III-Maße von Equiden aus Untermaßfeld. – x-Achse: 1 größte Länge; 3 Schaftbreite; 4 Schafttiefe; 5 Breite der proximalen Gelenkfläche; 6 Tiefe der proximalen Gelenkfläche; 10 Distale Schaftbreite; 11 Breite der distalen Gelenkfläche; 12 Tiefe der distalen Gelenkfläche; 13 Kleinste Tiefe des medialen Condylus; 14 Größte Tiefe des medialen Condylus; 7 Breite des Os carpale III; 8 Breite des Os carpale IV.

In Untermaßfeld, Voigtstedt und Süßenborn wurden stenoride Pferde nachgewiesen, die nach Musil als *E. suessenbornensis*, *E. altidens*, *E. marxi* und – für Untermaßfeld – als *E. wuesti* n. sp. bezeichnet werden (Musil 1965, 1969, 2001; Nobis 1971; Forstén 1986). Caballine Pferde treten in Mitteleuropa erst ab dem frühen Mittelpleistozän auf, wobei ihr unvermitteltes Erscheinen wohl mit einem Radiationsereignis in Verbindung zu bringen ist, das im nordamerikanischen Evolutionszentrum der Equiden seinen Ausgang genommen hat (Forstén 1988). Eine Voraussetzung dafür ist die Passierbarkeit der Beringlandbrücke durch eine Absenkung des Meeresspiegels im Rahmen einer Kaltzeit. Die caballinen Formen sind durch die Pferde aus Bilzingsleben und Taubach repräsentiert (Musil 1977, 1991).

Die beprobten Equidenfunde von Untermaßfeld bilden eine geschlossene Population mit nur geringer individueller Variation. Das läßt sich anhand der »Log.-Differenz-Diagramme« nach Eisenmann u. Bekouche (1986) gut darstellen (Abb. 3). Diese Methode setzt jeweils Maße von Metapodien in Bezug zu den entsprechenden Maßen von Referenzindividuen (hier: Onager). Am Kurvenverlauf der Differenzen lassen sich sowohl Größen- als auch Proportionsunterschiede der Equiden leicht erkennen. Metapodien stenorider Pferde sind generell länger und tiefer, caballine Pferde weisen dagegen kürzere, breitere Metapodien auf.

In Süßenborn sind im wesentlichen zwei Arten vertreten. Dabei stützen sich unsere Beobachtungen nicht auf die Zahnfunde, sondern auf das postcraniale Fundmaterial. Dieses ist zum überwiegenden Teil einer sehr großen, aber nicht caballinen Form (*E. suessenbornensis*) zuzuordnen, während auf der anderen Seite Reste einer deutlich kleineren und grazileren Form vorkommen, die wohl zu den von Forstén (1986) mit *E. altidens* bezeichneten Zahnfunden gehören (Abb. 4). Die stenoriden Equiden aus Untermaßfeld liegen größenmäßig zwischen diesen beiden Formen.

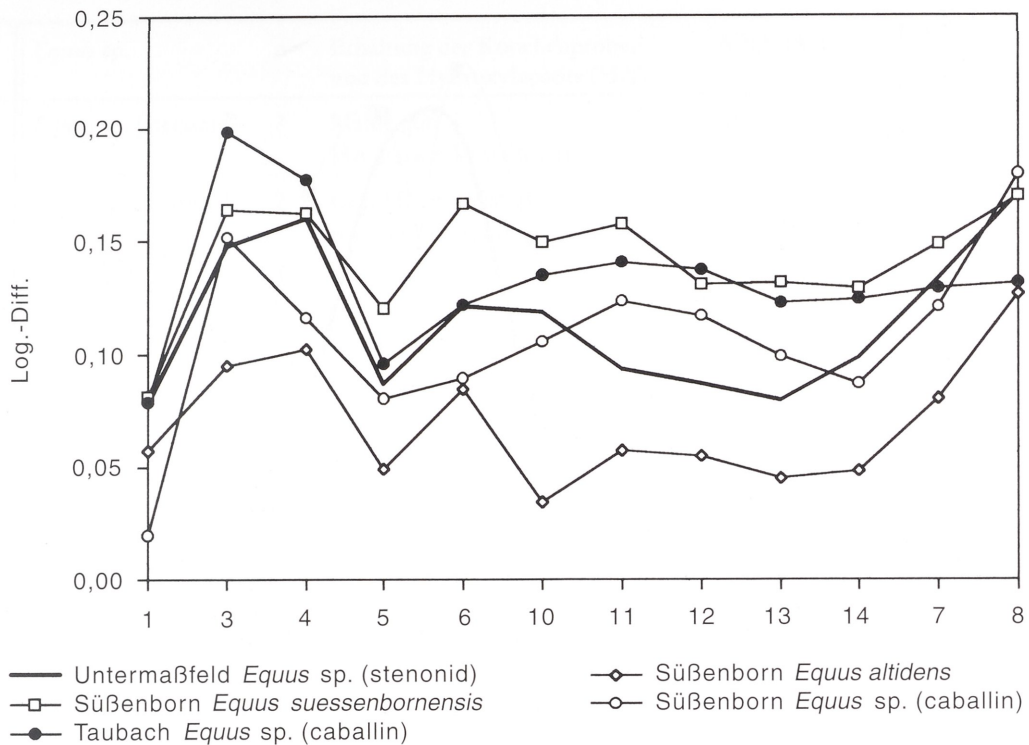


Abb. 4 Log.-Differenz-Diagramm der Metacarpus III-Maße von Equiden aus Untermaßfeld, Süßenborn und Taubach (x-Achse: siehe Abb. 1).

Neben den zwei stenoniden Arten haben sich in Süßenborn einzelne Reste caballiner Pferde gefunden. In der Form des Kurvenverlaufs für den caballinen Metacarpus aus Süßenborn in Abb. 4 zeigen sich die gleichen Merkmale wie bei den Pferderesten aus Taubach, während die Metacarpen der stenoniden Pferde aus Untermaßfeld und Süßenborn durch einen abweichenden Kurvenverlauf gekennzeichnet sind. Wie dies Forstén (1986) auch für die caballinen Zahnfunde beschreibt, ist der äußere Erhaltungszustand dieser Funde mit den übrigen Equiden-Resten aus Süßenborn vergleichbar. Die Färbung im Inneren der Knochen weicht jedoch vom Zustand der *E. suessenbornensis*-Funde ab. Die Vermutung liegt deshalb nahe, daß die caballinen Pferdereste aus einem anderen sedimentären Zusammenhang stammen und nicht den gleichen Zeithorizont repräsentieren wie die übrigen Funde.

Berechnungen des »Variability-Size-Index« (VSI), die sich für Größenvergleiche von Pferden gut eignen (Uerpman 1979, 1982), belegen deutliche Größenunterschiede zwischen den untersuchten Populationen caballiner Pferde (Abb. 5). Die Pferdereste aus Taubach stammen im Durchschnitt von kleineren Tieren als diejenigen aus Mosbach, die als Standardpopulation gewählt wurden. Die Knochen aus Bilzingsleben belegen dagegen deutlich größerer Pferde. Aus allen Fundstellen wurden jeweils Langknochen der verschiedenen Equiden-Formen analysiert.

3. Methoden: Isotopenanalysen und Erhaltungszustand

Wie bei der Anwendung aller naturwissenschaftlichen Verfahren ist es auch bei isotopenchemischen Untersuchungen an archäologischem und paläontologischem Knochenmaterial sehr wichtig, diagenetische Veränderungen des Knochengewebes während bzw. durch die Bodenlagerung zu berücksichtigen. D.h. es muss ausgeschlossen werden, daß die gemessenen Verbindungen des Knochengewebes so stark verändert wurden, daß sie nicht mehr den Zustand zu Lebzeiten des Individuums repräsentieren. Auch

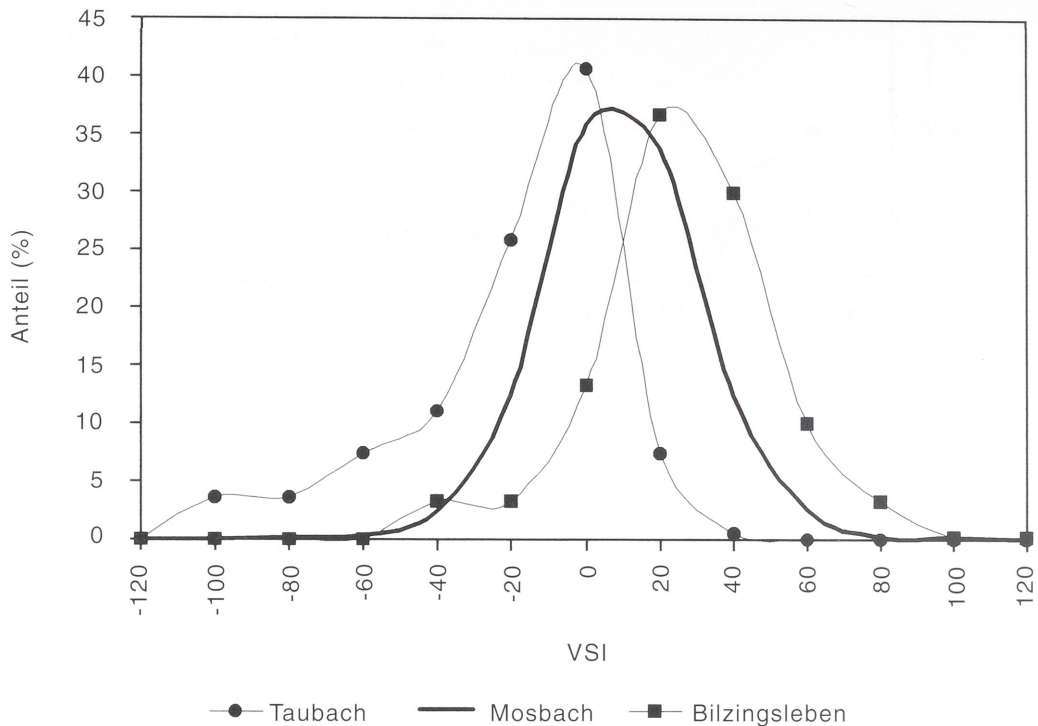


Abb. 5 Häufigkeitsverteilung des »Variability-Size-Index« (VSI) der caballinen Pferdefunde aus Taubach und Bilzingsleben im Vergleich mit Mosbach.

Funde, die wie die Fossilien von Untermaßfeld in ihrer äußeren Form hervorragend erhalten sind, weisen in der Regel nicht mehr die gleiche Zusammensetzung auf wie frische Knochen.

Für die Untersuchungen wurde deshalb nur Material aus der Diaphyse von Langknochen oder von vollständig erhaltenen Kurzknochen subadulter bzw. adulter Individuen verwendet. Das kompakte Gewebe ist von den chemischen, physikalischen und biologischen Einflüssen während der Bodenlagerung deutlich weniger beeinflusst als dünne Corticalis und spongiöse Knochenbereiche insbesondere von porösem Knochengewebe infantiler und juveniler Individuen. Darüberhinaus wurden die äußeren Kompaktaschichten vor der chemischen Präparation mechanisch entfernt, so daß nur die inneren, wenig oder gar nicht vom umgebenden Sediment beeinflussten Gewebebereiche in die Analyse gingen. Die Isotopen-Messung wurde ausschließlich an den Sauerstoffisotopen der Phosphatgruppe im Hydroxylapatit $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$, dem Hauptbestandteil des anorganischen Knochenanteils, vorgenommen. Die Isolierung des Phosphats erfolgte mittels einer modifizierten Version der Methode von O'Neil et al. (1994); (Stephan 1999). Die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse werden in der üblichen δ -Notation angegeben (vgl. Abschn. 1.).

Die Phosphatgruppe wurde und wird allgemein diagenetischen Einflüssen gegenüber als sehr stabil angesehen. In jüngster Zeit haben sich aber Zweifel daran ergeben (Shemesh 1990; Bryant et al. 1994). Deshalb wurde vor der Isotopenanalyse der Erhaltungszustand der Knochenoberflächen und des Gewebinneren detailliert aufgenommen und die diagenetische Beeinflussung des Hydroxylapatits mittels röntgendiffraktometrischer Untersuchungen an Pulverpräparaten geprüft (Stephan 1999).

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, daß die Erneuerungszeit des Knochengewebes abhängig von der durchschnittlichen Lebensdauer einer Art mehrere Jahre beträgt. Die in Knochen gemessenen Isotopenverhältnisse repräsentieren demnach einen Mittelwert über mehrere Jahre und spiegeln so auch längerfristige $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte des meteorischen Wassers und Mitteltemperaturen wider.

Fundort	<i>Equus</i> sp.	n	Erhaltung der Knochenproben und des Hydroxylapatits (HA)	$\delta^{18}\text{O}_p$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}}$ (‰) berechnet	ΔT (°C)
Untermaßfeld	<i>Equus</i> sp. (stenonid)	7	Mäßig gut; HA stark rekristallisiert	$16,6 \pm 0,2$	-8,5	+0,9 ¹
Voigtstedt	<i>Equus</i> sp. (stenonid)	2	Gut; HA mittelstark rekristallisiert, hoher Eisengehalt	$16,6 \pm 0,6$	-8,4	+0,6 ²
Süßenborn	<i>E. altidens</i>	3	Mäßig gut;	$16,7 \pm 0,4$	-8,3	+0,8 ²
	<i>E. suessenbornensis</i>	4	HA wenig-mittelstark	$15,9 \pm 0,1$	-9,4	-1,0 ²
	<i>Equus</i> sp. (caballin)	1	rekristallisiert + SiO ₂	15,4	-10,1	-2,2 ²
Bilzingsleben	<i>Equus</i> sp. (caballin)	2	Gut; HA mittelstark rekristallisiert + CaCO ₃	$16,2 \pm 0,4$	-9,1	+0,4 ²
Taubach	<i>Equus</i> sp. (caballin)	3	Schlecht; HA mittelstark- stark rekristallisiert	$16,6 \pm 0,1$	-8,4	+0,7 ²

Tab. 1 $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte in Equidenknochen aus Untermaßfeld und pleistozänen Fundorten in Thüringen, berechnete $\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}}$ -Werte und mittlere Temperaturdifferenzen im Vergleich mit heutigen Daten (IAEA 1998: ¹ Hof 1984-1994: $\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}} = -9,0$ ‰; ² Leipzig 1986-1994: $\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}} = -8,8$ ‰; ΔT (°C) = Temperaturdifferenz).

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Sauerstoffisotopenverhältnisse der Knochenproben aus Untermaßfeld sind gemessen an ihrem hohen Alter von ca. 1 Million Jahren und ihrer nur mäßig guten inneren Erhaltung sehr einheitlich (Tab. 1, Abb. 6). Dies ist erstaunlich, da es bei der röntgendiffraktometrisch beobachteten starken Rekristallisation des Knochenapatits während der Bodenlagerung zu Verfälschungen der Isotopensignaturen kommen kann. Derartige Beeinflussungen können durch den Einbau knochenfremden Phosphats hervorgerufen werden, das andere Isotopenverhältnisse als das ursprüngliche Knochengewebe aufweist (Ayliffe et al. 1994; Bryant et al. 1994).

Die in Untermaßfeld in großer Menge gefundenen Reste von Mollusken, Süßwasserfischen, Amphibien, Reptilien, Vögeln, Klein- und Großsäugern belegen warmzeitliche Klimaverhältnisse im ausgehenden Waalium bzw. während des Baveliums. Darunter befinden sich sowohl Vertreter eines humiden Galeriewaldbiotops der unterpleistozänen Werraau als auch Formen der angrenzenden offeneren Muschelkalkebene (R.-D. Kahlke 1994b, 1997a; Wiegank 1997). Der hohe $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwert von 16,6 ‰, der eine relativ hohe Jahresmitteltemperatur repräsentiert, fügt sich in dieses Bild ein.

Die Knochenfunde aus der Hauptfundschrift von Voigtstedt weisen im Mittel Isotopenverhältnisse auf, die denen von Untermaßfeld gleichen (Tab. 1, Abb. 6). Allgemein in den Cromer-Komplex datiert (H.-D. Kahlke 1965, 1986) grenzt Wiegank (1975) die Datierung der Hauptfundschrift anhand von paläomagnetischen Messungen auf das Cromer II ein, was den Tiefseeisotopenstadien 19 oder 17 entsprechen könnte. Ähnlich wie Untermaßfeld zeigen Fauna und Pollen für die Hauptfundschrift von Voigtstedt ein gemäßigtes Klima mit Eichenmischwald an (Erd 1965; Stuart 1981). Die höhere Streuung der Daten aus Voigtstedt ist wahrscheinlich auf einen sehr hohen Eisengehalt der Proben zurückzuführen, der zu Beeinträchtigungen der Phosphatpräparation führte.

Die $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte im Knochenmaterial aus Süßenborn gliedern sich entsprechend der artlichen Zuordnung der Equidenknochen in drei Gruppen (Tab. 1, Abb. 6). In den Knochen von *E. altidens* wurden $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte nachgewiesen, die denen von Untermaßfeld entsprechen. Deutlich niedriger erwiesen sich die Werte in den Funden von *E. suessenbornensis*. Der niedrigste Wert wurde im caballinen Metacarpus gemessen. Erhaltungsunterschiede zwischen den Knochenfunden der unterschiedlichen Arten wurden nicht festgestellt. Alle beprobten Knochen waren mäßig gut erhalten und der Apatit nicht auffällig re-

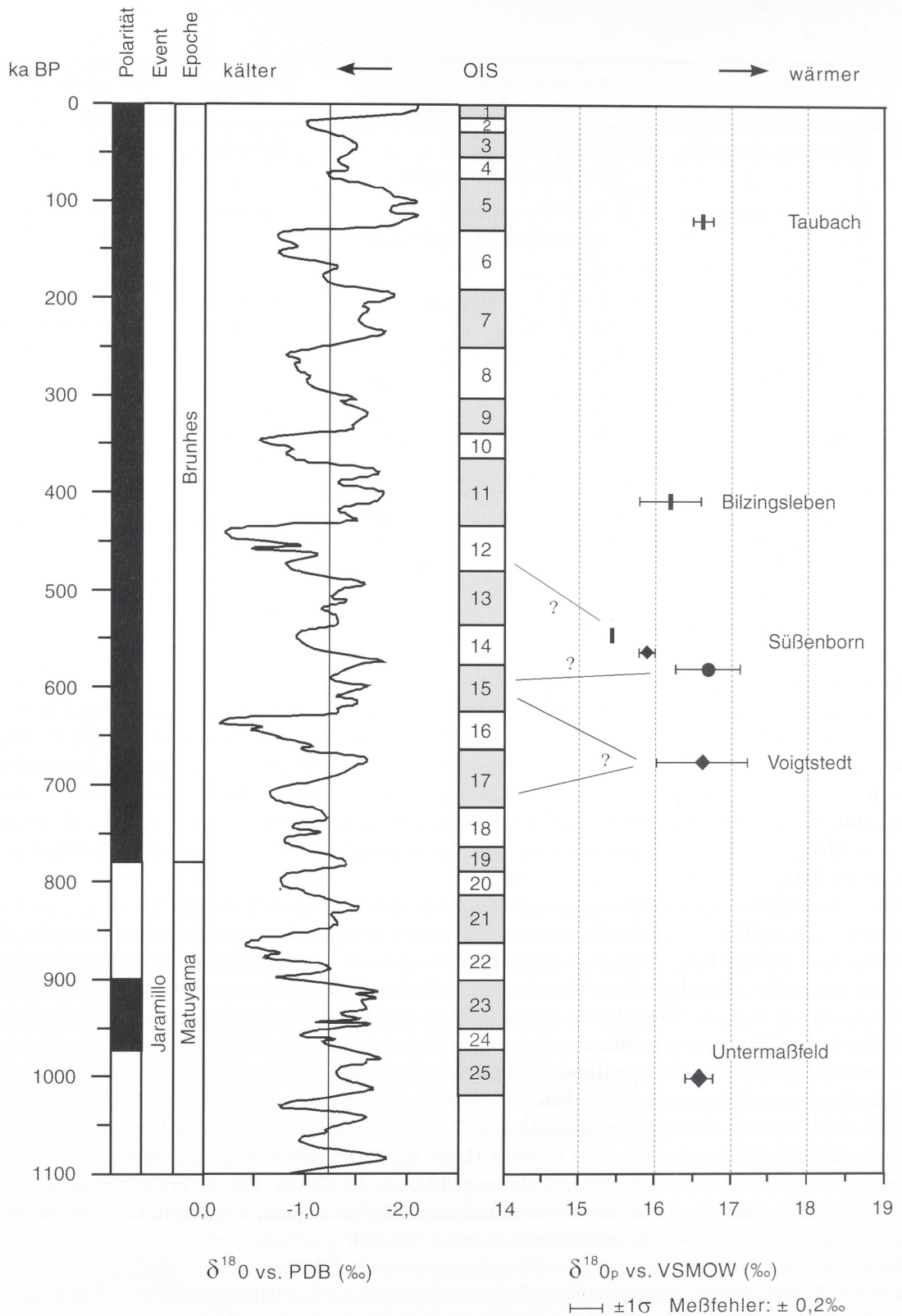


Abb. 6 $\delta^{18}O$ -Werte in Equidenknochen aus pleistozänen Fundorten in Thüringen (Rauten: *Equus* sp. (stononid); Kreis: *E. altidens*; Balken: *Equus* sp. (caballin) und $\delta^{18}O$ -Kurve und -Stufen des Tiefseebohrkerns V 28-239 modifiziert nach Shackleton u. Opdike (1976) (ka BP: Alter in Tausend Jahre vor heute; Polarität: normal: schwarz, revers: weiß; OIS = Oxygen Isotope Stage: Wärmere Phasen: grau).

kristallisiert. Diagenetische Ursachen können somit nicht für die Differenzen der Isotopenverhältnisse verantwortlich gemacht werden. Ebenso sind keine Unterschiede im Stoffwechsel der nachgewiesenen Arten bekannt, die zu derart unterschiedlichen Fraktionierungen der Sauerstoffisotopen bei Verstoffwechslung und Einbau in den Hydroxylapatit führen könnten. Wird angenommen, daß der Einbau des Sauerstoffs bei der Bildung des Apatits unter Gleichgewichtsbedingungen stattfindet (s. Abb. 2), können sich Differenzen der $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte im Apatit durch unterschiedliche Körpertemperaturen ausbilden. Für die Bildung von Hydroxylapatit in wässriger Umgebung innerhalb von Säugetierkörpern gilt die Gleichung: $T(^{\circ}\text{C}) = 111,4 - 4,3 (\delta^{18}\text{O}_p - \delta^{18}\text{O}_{\text{bw}})$, wobei $\delta^{18}\text{O}_p$ die Isotopenzusammensetzung des Knochenphosphats und $\delta^{18}\text{O}_{\text{bw}}$ diejenige der Körperflüssigkeit bzw. des Blutes ist (Luz u. Kolodny 1985). Um die Differenzen der $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte von ca. 0,8 ‰, wie sie zwischen *E. suessenbornensis* und *E. altidens* vorliegen, zu erklären, müßten nach dieser Gleichung die Körpertemperaturen beider Arten um ca. 4°C differieren. Wird z.B. für *E. suessenbornensis* eine Körpertemperatur von 37°C angenommen, hätte *E. altidens* seine Körpertemperatur auf 33-34°C absenken müssen, um $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte von 16,7‰ zu erzeugen. Dies ist physiologisch jedoch sehr unwahrscheinlich und wurde bisher bei nah verwandten Tierarten nicht beobachtet.

Ähnliches gilt für die deutlich leichteren $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte im Knochen eines caballinen Pferdes. Auch hier können Körpertemperaturunterschiede als Erklärung für Differenzen der Isotopenverhältnisse nicht herangezogen werden. Gestützt wird diese Annahme durch Untersuchungen an Resten von caballinen Pferden und von *E. hydruntinus* aus der frühwürmzeitlichen Fundstelle Villa Seckendorff nahe Stuttgart. Für die aus einer Fundschicht stammenden Knochenproben wurden hier im Durchschnitt für beide Equiden-Formen übereinstimmende $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nachgewiesen (Stephan 1999).

Daraus kann geschlossen werden, daß die Süßenborner Equidenreste aus unterschiedlichen Klimaphasen stammen (vgl. H.-D. Kahlke 1969; Steinmüller 1972). Die Hauptfundschicht repräsentiert eine Steppefauna mit neu auftretenden arktischen Faunenelementen wie z.B. *Ovibos moschatus* und *Rangifer tarandus*, aber auch noch Schwein und Reh. Formen der offenen Steppe mit betont kontinentalem Charakter dominieren und belegen ein eher kaltes Klima (H.-D. Kahlke 1961, 1969; R.-D. Kahlke 1994a). Der Komplex wird in eine frühe Phase des Elsterglazials datiert. In diese klimatische Zuordnung fügen sich am ehesten die $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte der *E. suessenbornensis*-Knochenproben ein. Die Funde von *E. altidens* könnten eine wärmere Phase im Cromer-Komplex repräsentieren, während das caballine Pferd einer kälteren und wohl späteren Phase zuzuordnen wäre.

Die Pferdeknöchel aus der Travertinfundstelle Bilzingsleben am Nordrand des Thüringer Beckens stammen aus der mittleren Folge (II), die den paläolithischen Fundhorizont enthält. Diese wird anhand von $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - sowie ESR-Mesungen zwischen 350.000 und 440.000 datiert (OIS 11; Schwarcz et al. 1988; Wagner 1995). Fauna und Flora verkörpern eine temperiert-humide Klimazone mit ausgeprägter, nicht sehr langer kalter Jahreszeit (Mai 1983; Mania 1983, 1991). Die Molluskenfauna in der Folge I-III ist durch exotische süd-südosteuropäische Vertreter gekennzeichnet. Verglichen mit dieser klimatischen Einordnung liegen die Sauerstoffisotopenverhältnisse des Knochenphosphats recht niedrig (Tab. 1, Abb. 6).

Der Fundort Taubach ist durch eine weit gefächerte Travertinfauna mit einem großen Säugetierspektrum, Mollusken, Ostrakoden, Amphibien, Reptilien und Vögeln charakterisiert, die ein ausgeprägtes interglaziales Waldbiotop anzeigt (OIS 5e; Heinrich 1981; R.-D. Kahlke 1994c). Entsprechend gleichen die Sauerstoffisotopenverhältnisse denen der Knochen aus Untermaßfeld, Voigtstedt, Bilzingsleben und der *E. altidens*-Funde aus Süßenborn (Tab. 1, Abb. 6).

5. $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte pleistozäner Pferdeknöchel als Klimaproxies

Über die Betrachtung der absoluten $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte in den Equidenknöchel und die daraus folgende klimatische Interpretation hinaus können mit den Isotopenverhältnissen Jahresmitteltemperaturen errechnet werden. Als erster Schritt erfolgt die Umrechnung der $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte der Equidenknöchel in $\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}}$ -Werte der Niederschläge bzw. des Trinkwassers anhand der Gleichung für rezente Equiden (s. Abb. 1). Anschließend wird die Differenz zwischen den so berechneten und den in der Region gemessenen $\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}}$ -

Werten in den Niederschlägen (IAEA 1998^{1,2}) ermittelt und anhand dieser Differenz über die Steigung der Dansgaard-Gleichung von 0,59 ‰/°C die Temperaturdifferenz zwischen der pleistozänen Zeitphase und heute berechnet (Rozanski et al. 1993).

Bei diesen Umrechnungen muß jedoch beachtet werden, daß es sich bei den so ermittelten Temperaturdifferenzen um Näherungswerte handelt. Dies ist darin begründet, daß in der Regel nur $\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}}$ -Werte in Niederschlägen aus IAEA-Stationen zur Verfügung standen, die keinen adäquaten Vergleich für die Sauerstoffisotopenverhältnisse im Trinkwasser von Säugetieren darstellen. Ideal wäre ein $\delta^{18}\text{O}_{\text{mw}}$ -Wert für eine »catchment area«, d.h. ein Mischwert der Isotopenverhältnisse von verschiedenen Flüssen, Bächen und Seen unter Berücksichtigung der Einzugsgebiete. Die Erstellung dieser Werte ist jedoch sehr aufwendig, da die Beprobung von Flüssen, Bächen und Seen einer Region rund um das Jahr und über mehrere Jahre hinweg erforderlich ist.

In Tab. 1 sind die Ergebnisse der Berechnungen zusammengestellt. Für Untermaßfeld zeigt die Temperaturdifferenz von +0,9°C gegenüber der heutigen Jahresmitteltemperatur etwas wärmere Bedingungen als heute an. Dies stimmt mit der klimatischen Aussage aufgrund der Untersuchungen an Mollusken-, Amphibien-, Schildkröten- und *Hippopotamus*-Resten aus Untermaßfeld überein (Böhme 1997; R.-D. Kahlke 1997b; Krolopp 1997; Maul 1997). Besonders aufgrund von *Hippopotamus* sind für das Unterpleistozän von Untermaßfeld sehr milde Winter zu fordern, wodurch die Jahresdurchschnittstemperatur sicherlich etwas angehoben war. Über Sommertemperaturen kann anhand dieser Funde keine Aussage getroffen werden (Koenigswald 1988).

Auch für Voigtstedt, Bilzingsleben, Taubach und die *E. altidens*-Proben aus Süßenborn wurden übereinstimmend mit der klimatischen Ansprache gegenüber heute erhöhte Jahresmitteltemperaturen errechnet. Die Funde der großen stenoniden Equiden und des caballinen Pferdes aus Süßenborn repräsentieren dagegen Temperaturen, die ~1-2°C unterhalb der heutigen Jahresmitteltemperaturen liegen. Vergleichsdaten zu den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten der Interglazial-Fundstellen in Thüringen liegen aus Mauer und Mosbach vor. In Mauer belegen eine artenreiche Säugetierfauna und Pollenfunde eine warme Klimaphase, die Mauerer Waldzeit, die in die zwei jüngeren Interglaziale III und IV des Cromer-Komplexes datiert wird (Wagner u. Beinbauer 1997). Die Knochenproben aus der Mosbacher Hauptfundschrift (Graues Mosbach) stammen aus einer Übergangszone zwischen warmem und kühlem Klima und werden in einen kühlklimatischen Teil des oberen Cromer-Komplexes gestellt (Brüning 1978). Die relativ hohen $\delta^{18}\text{O}_{\text{p}}$ -Werte der Equiden-Reste aus beiden Fundstellen spiegeln warmes Klima wider (Mauer n=3: $\bar{\delta}$ 17,0 ‰; Mosbach n=14: $\bar{\delta}$ 17,1 ‰; Stephan 1999). Die errechneten Jahresmitteltemperaturen liegen für die Mauerer Warmzeit 1,9°C und für Mosbach 0,8°C höher als heute. Sie entsprechen der klimatischen Ansprache der Fundorte – wärmer in Mauer und kühler in Mosbach – besser als die $\delta^{18}\text{O}_{\text{p}}$ -Werte (Stephan 1999) und repräsentieren für die Mauerer Warmzeit wärmere Verhältnisse als für Untermaßfeld, Voigtstedt, Bilzingsleben und Taubach.

Berücksichtigt werden muß bei dieser Aussage jedoch, daß in den beprobten Equiden-Resten aus den thüringischen Fundorten mittelstark-stark rekristallisierter Hydroxylapatit nachgewiesen wurde. Unter der Annahme, daß die Niederschlagung des Apatits während der Bodenlagerung unter Gleichgewichtsbedingungen (s. Abb. 2) und unter Einbeziehung des Bodenwassers stattfindet, würde das neu gebildete Phosphat niedrigere $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisse als der Originalapatit aufweisen, da das Bodenwasser niedrigere Isotopensignaturen besitzt als die Körperflüssigkeit (McArthur u. Herczeg 1990). Knochen-

1 Die Daten stammen aus dem Programm »Isotopes in Precipitation« (WMO), das die »International Atomic Energy Agency« (IAEA) zusammen mit dem »World Meteorological Organization Global Network« seit 1961 weltweit durchführt (s. z.B. Rozanski et al. 1993).

2 Die zu Untermaßfeld nächstgelegene IAEA-Meßstation

ist die Wasserkuppe Rhön. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte dieser Station wurden jedoch nicht als Vergleich herangezogen, da sie über 900 m NN gelegen ist und die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Niederschläge aufgrund des Höhenunterschiedes niedriger sind als in Meiningen und im Thüringer Becken.

funde, die eine Mischung aus Original- und diagenetisch verändertem Apatit enthalten, würden demnach im Mittel etwas niedrigere $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte aufweisen, als der Originalapatit zu Lebzeiten der Individuen.

Zusammenfassung

An Langknochen der stenoniden Equiden aus dem Unterpleistozän von Untermaßfeld wurden isotochemische Untersuchungen mit dem Ziel der Paläotemperaturbestimmung durchgeführt. Die Untersuchungen basieren auf Arbeiten, die die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen den Sauerstoffisotopenverhältnissen im Knochengewebe terrestrischer Säugetiere und im meteorischen Wasser sowie den Jahresmitteltemperaturen erforschen.

Die Bestimmung des $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnisses erfolgte ausschließlich im Phosphat des Knochenapatits. Die Beprobung der Knochenfunde wurde so optimiert, daß die Einbeziehung diagenetisch veränderter Gewebereiche in die Messungen weitgehend vermieden wurde. Der Erhaltungszustand der Knochenproben wurde deskriptiv und röntgendiffraktometrisch charakterisiert.

Gemessen an ihrem hohen Alter von ca. 1 Million Jahren, ihrer insgesamt nur mäßig guten Erhaltung und der starken Rekristallisation des Apatits sind die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Knochenproben aus Untermaßfeld sehr einheitlich. Unter Verwendung der Regressionsgleichung für die Beziehung von $\delta^{18}\text{O}$ -Werten in den Knochen rezenter Equiden und in ihrem Trinkwasser sowie der Dansgaard-Gleichung repräsentieren diese $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für das Unterpleistozän in Untermaßfeld eine Jahresmitteltemperatur, die ca. 1°C über der heutigen Mitteltemperatur der Region liegt.

Isotopenmessungen an stenoniden wie caballinen Equiden-Resten aus den Interglazial-Fundstellen Voigtstedt, Bilzingsleben und Taubach belegen ebenfalls höhere Jahresmitteltemperaturen als heute. Dies trifft auch für $\delta^{18}\text{O}_p$ -Werte von *E. altidens* aus Süßenborn zu. Funde stenonider und caballiner Pferde aus Süßenborn belegen dagegen übereinstimmend mit der klimatischen Ansprache anhand der Fauna Mitteltemperaturen, die zwischen ca. 1°C und 2°C unterhalb der heutigen Temperaturen lagen.

Summary

Oxygen isotope analyses were undertaken on long bones of stenonide equids from the Lower Pleistocene of Untermaßfeld with the intention of obtaining information about palaeotemperatures during this period. The investigation was based on research relating oxygen isotope ratios measured from bone samples of terrestrial mammals to oxygen isotope ratios of meteoric water and mean annual temperature.

The $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios were measured exclusively on phosphate from bone apatite. The sampling strategy minimized any diagenetic effects on the oxygen isotope analysis. The state of preservation of the samples was determined by optical and X-ray diffraction investigations.

The variation of $\delta^{18}\text{O}_p$ values from the bone samples is low considering their age (about 1 Ma), their state of preservation, and the strong recrystallization of their apatite. Using the regression equation relating $\delta^{18}\text{O}$ values in recent equid bones to their drinking water, and hence the mean annual temperatures via the Dansgaard equation, it has been established that mean annual temperatures during the Lower Pleistocene were about 1°C higher than at present at Untermaßfeld.

$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of stenonide and caballine equid bones originating from Voigtstedt, Bilzingsleben and Taubach, dated from younger interglacial periods also indicate higher mean annual temperatures. The same is the case for $\delta^{18}\text{O}$ values of *E. altidens* samples from Süßenborn. However, the $\delta^{18}\text{O}$ values of *E. suessenbornensis* and of the caballine horse remains from Süßenborn are lower and reflect mean temperatures about 1 to 2°C lower than today.

Danksagung

Herrn Dr. habil. R.-D. Kahlke (Weimar) sei für den Zugang zum Material und vor allem für die Aufgeschlossenheit und die Bereitschaft zur Zusammenarbeit herzlich gedankt.

Für die Möglichkeit der Materialbearbeitung und Probenahme bedanken wir uns weiterhin bei Prof. Dr. D. Mania (Jena).

Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Rahmen des Teilprojekts C 4 »Morphologische und isotopechemische Reaktion von Großsäugetieren auf die Klimaveränderungen im Quartär« im Sonderforschungsbereich 275 »Klimagekop-

pelte Prozesse in meso- und känozoischen Geo-Ökosystemen« an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Universität Tübingen, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), durchgeführt.

Dank gebührt auch dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH in Leipzig und dem Institut für Hydrologie des GSF Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit in Neuherberg für die Isotopenanalysen in den Niederschlägen im Rahmen des IAEA/WMO-Meßprogramms.

Literatur

- Ayliffe, L. K. u. Chivas, A. R. 1990: Oxygen isotope composition of the bone phosphate of Australian kangaroos: potential as a palaeoenvironmental recorder. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 2603-2609, Oxford.
- Ayliffe, L. K., Chivas, A. R. u. Leakey, M. G. 1994: The retention of primary isotope compositions of fossil elephant skeletal phosphate. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 5291-5298, Oxford.
- Böhme, G. 1997: Die Amphibienreste aus dem Unterpleistozän von Untermaßfeld. In: R.-D. Kahlke (Hrsg.): *Das Pleistozän von Untermaßfeld bei Meiningen (Thüringen)*. Teil 1. Röm.-Germ. Zentralmus., Monogr. 40, 1, 81-87, Mainz.
- Brüning, H. 1978: Zur Untergliederung der Mosbacher Terrassenabfolge und zum klimatischen Stellenwert der Mosbacher Tierwelt im Rahmen des Cromer-Komplexes. *Mainzer Naturw. Arch.* 16, 143-190, Mainz.
- Bryant, J. D., Luz, B. u. Froelich, P. N. 1994: Oxygen isotopic composition of fossil horse tooth phosphate as a record of continental paleoclimate. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.* 107, 303-316, Amsterdam.
- Dansgaard, W. 1964: Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16, 436-468, Stockholm.
- Delgado Huertas, A., Iacumin, P., Stenni, B., Sánchez Chillón, B. u. Longinelli, A. 1995: Oxygen isotope variations of phosphate in mammalian bone and tooth enamel. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 4299-4305, Oxford.
- Eisenmann, V. u. Beckouche, S. 1986: Identification and discrimination of metapodials from Pleistocene and modern *Equus*, wild and domestic. In: Meadow, R. H. u. Uerpman, H.-P. (Hrsg.): *Equids in the Ancient World*, 117-163, Beih. Tübinger Atlas des Vorderen Orients A 19, 1, Reichert, Wiesbaden.
- Epstein, S., Thompson, P. u. Yapp, C. J. 1977: Oxygen and hydrogen isotopic ratios in plant cellulose. *Science* 198, 1209-1215, Washington.
- Erd, K. 1965: Pollenanalytische Untersuchungen im Altpleistozän von Voigtstedt in Thüringen. *Paläont. Abh. A* 2, 2/3, 259-272, Berlin.
- Forstén, A. 1986: A review of the Süssenborn horse and the origin of *Equus hydruntinus*. *Quartärpaläontologie* 6, 43-52, Berlin.
- 1988: Middle Pleistocene replacement of stenoid horses by caballoid horses – ecological implications. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.* 65, 23-33, Amsterdam.
- Gat, J. R. 1980: The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation. In: Fritz, P. u. Fontes, C. (Hrsg.): *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Vol. A, The terrestrial environment I, 21-47, Elsevier, Amsterdam.
- Heinrich, W.-D. 1981: Zur stratigraphischen Stellung der Wirbeltierfaunen aus den Travertinfundstätten von Weimar-Ehringsdorf und Taubach in Thüringen. *Z. geol. Wiss.* 9, 2, 1031-1055, Berlin.
- Hintz, H. F. 1994: Nutrition and feeding. In: Boyd, L. u. Houghton, K. A. (Hrsg.): *Przewalski's Horse. The history and biology of endangered species*. 115-129, State Univ. New York Press, New York.
- Iacumin, P., Cominotto, D. u. Longinelli, A. 1996: A stable isotope study of mammal skeletal remains of mid-Pleistocene age, Arago cave, eastern Pyrenees, France. Evidence of taphonomic and diagenetic effects. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.* 126, 151-160, Amsterdam.
- IAEA 1998: Global Network for Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Release 2 May 1998. <http://www.iaea.org/programs/ri/gnip/gnipmain.htm>.
- Kahlke, H.-D. 1961: Revision der Säugetierfaunen der klassischen deutschen Pleistozän-Fundstellen von Süssenborn, Mosbach und Taubach. *Geologie* 10, 4/5, 493-525, Berlin.
- 1965: Die stratigraphische Stellung der Faunen von Voigtstedt. Zur Grenze des kontinentalen Unterpleistozän/Mittelpleistozän im zentraleuropäischen Raume. *Paläont. Abh. A*, 2, 2/3, 691-692, Berlin.
- 1969: Die stratigraphische Stellung der Kiese von Süssenborn bei Weimar. *Paläont. Abh. A*, 3, 3/4, 787-788, Berlin.

- 1986: Biostratigraphical Correlations (Mammals) of Quaternary Continental Deposits of Europe and the Far East. Quartärpaläontologie 6, 83-86, Berlin
- Kahlke, R.-D. 1994a: Die Entstehungs-, Entwicklungs- und Verbreitungsgeschichte des oberpleistozänen *Mammuthus-Coelodonta*-Faunenkomplexes in Eurasien (Großsäuger). Abh. Senckenberg. naturforsch. Ges. 546, 1-164, Frankfurt a. M.
- 1994b: Exkursionspunkt B2/1: Untermaßfeld-Sammlung. In: Kahlke, R.-D. u. Mania, D.: Komplexe Interglazialfundstellen Thüringens (Exkursion B2). Altenbg. Nat.-wiss. Forsch. 7, 358-362, Altenburg.
- 1994c: Exkursionspunkt B2/3: Taubach, Gebiet der ehemaligen Travertinbrüche. In: Kahlke, R.-D. u. Mania, D. (Hrsg.): Komplexe Interglazialfundstellen Thüringens (Exkursion B2). Altenbg. Nat.-wiss. Forsch. 7, 366-367, Altenburg.
- 1997a: Bisheriger Gesamtbefund zur Geologie, Paläozoologie, Taphonomie, Ökologie und Stratigraphie der unterpleistozänen Komplexfundstelle Untermaßfeld. In: Kahlke, R.-D. (Hrsg.): Das Pleistozän von Untermaßfeld bei Meiningen (Thüringen). Teil 1. Röm.-Germ. Zentralmus., Monogr. 40, 1, 385-418, Mainz.
- 1997b: Die *Hippopotamus*-Reste aus dem Unterpleistozän von Untermaßfeld. In: Kahlke, R.-D. (Hrsg.): Das Pleistozän von Untermaßfeld bei Meiningen (Thüringen). Teil 1. Röm.-Germ. Zentralmus., Monogr. 40, 1, 277-374 + Taf. 45-62, Mainz.
- Koenigswald, W. v. 1988: Paläoklimatische Aussage letztinterglazialer Säugetiere aus der Oberrheinebene. In: Koenigswald, W. v. (Hrsg.): Zur Paläoklimatologie des letzten Interglazials im Nordteil der Oberrheinebene. Paläoklimaforsch. 4, 205-314, Fischer; Stuttgart.
- Kohn, M. J., Schoeninger, M. J. u. Valley, J. W. 1996: Herbivore tooth oxygen isotope compositions: Effects of diet and physiology. Geochim. Cosmochim. Acta 60, 3889-3896, Oxford.
- Krolopp, E. 1997: Die Molluskenreste aus dem Unterpleistozän von Untermaßfeld. In: Kahlke, R.-D. (Hrsg.): Das Pleistozän von Untermaßfeld bei Meiningen (Thüringen). Teil 1. Röm.-Germ. Zentralmus., Monogr. 40, 1, 71-75 + Taf. 19, Mainz.
- Longinelli, A. 1973: Preliminary oxygen-isotope measurements of phosphate from mammal teeth and bones. Colloq. Int. CNRS 219, 267-271, Paris.
- 1984: Oxygen isotopes in mammal bone phosphate: a new tool for paleohydrological and paleoclimatological research? Geochim. Cosmochim. Acta 48, 385-390, Oxford.
- Luz, B., Cormie, A. B. u. Schwarcz, H. P. 1990: Oxygen isotope variations in phosphate of deer bones. Geochim. Cosmochim. Acta 54, 1723-1728, Oxford.
- Luz, B. u. Kolodny, Y. 1985: Oxygen isotope variations in phosphate of biogenic apatites, IV. Mammal teeth and bones. Earth. Plan. Sci. Lett. 75, 29-36, Amsterdam.
- Luz, B., Kolodny, Y. u. Horowitz, M. 1984: Fractionation of oxygen isotopes between mammalian bone-phosphate and environmental drinking water. Geochim. Cosmochim. Acta 48, 1689-1693, Oxford.
- Mai, D. H. 1983: Die fossile Pflanzenwelt des interglazialen Travertins von Bilzingsleben (Kreis Artern, Thüringen). In: Mai, D. H., Mania, D., Nötzold, T., Toepfer, V., Vlcek, E. u. Heinrich, W.-D. (Hrsg.): Bilzingsleben II. Homo erectus – seine Kultur und seine Umwelt, 45-129, Deutscher Verl. Wiss.; Berlin.
- Mania, D. 1983: Die natürliche Umwelt des *Homo erectus* von Bilzingsleben. In: Mai, D. H., Mania, D., Nötzold, T., Toepfer, V., Vlcek, E. u. Heinrich, W.-D. (Hrsg.): Bilzingsleben II. Homo erectus – seine Kultur und seine Umwelt, 175-188, Deutscher Verl. Wiss.; Berlin.
- 1991: Zur Paläontologie der mittelpleistozänen Travertine von Bilzingsleben. In: Fischer, K., Guenther, E. W., Heinrich, W.-D., Mania, D., Musil, R. u. Nötzold, T. (Hrsg.): Bilzingsleben IV. Homo erectus – seine Kultur und seine Umwelt, 9-28, Deutscher Verl. Wiss.; Berlin.
- Maul, L. 1997: Nachweis eines Zungenbeinfragmentes einer Schildkröte (Emydini, Emydidae, Testudinata) aus dem Unterpleistozän von Untermaßfeld. In: Kahlke, R.-D. (Hrsg.): Das Pleistozän von Untermaßfeld bei Meiningen (Thüringen). Teil 1. Röm.-Germ. Zentralmus., Monogr. 40, 1, 89-94, Mainz.
- McArthur, J. M. u. Herczeg, A. 1990: Diagenetic stability of the isotopic composition of phosphate-oxygen: palaeoenvironmental implications. In: Notholt, A. J. G. u. Jarvis, I. (Hrsg.): Phosphorite Research and Development, Geol. Soc. Spec. Publ. 52, 119-124, Boulder.
- Musil, R. 1965: Die Equidenreste aus dem Altpleistozän von Voigtstedt in Thüringen. Paläont. Abh. A, 2, 2/3, 434-448, Berlin.
- 1969: Die Equidenreste aus dem Pleistozän von Süßenborn bei Weimar. Paläont. Abh. A, 3, 3/4) 317-364, Berlin.
- 1977: Die Equidenreste aus den Travertinen von Taubach. Quartärpaläontologie 2, 237-264, Berlin.
- 1991: Pferde aus Bilzingsleben. In: Fischer, K., Guenther, E. W., Heinrich, W.-D., Mania, D., Musil, R. u. Nötzold, T. (Hrsg.): Bilzingsleben IV. Homo erectus – seine Kultur und seine Umwelt, 103-130, Deutscher Verl. Wiss.; Berlin.
- 2001: Die Equiden-Reste aus dem Unterpleistozän von Untermaßfeld. In: Kahlke, R.-D. (Hrsg.): Das Pleistozän von Untermaßfeld bei Meiningen (Thüringen). Teil 2. Röm.-Germ. Zentralmus., Monogr. 40, 2, 557-587 + Taf. 92-94, Mainz.
- Nobis, G. 1971: Vom Wildpferd zum Hauspferd. 96 S., Böhlau; Köln, Wien.

- O'Neil, J. R., Roe, L. J., Reinhard, E. u. Blake, R. E. 1994: A rapid and precise method of oxygen isotope analysis of biogenic phosphate. *Isr. J. Earth Sci.* 43, 203-212, Jerusalem.
- Reinhard, E., Torres, T. d. u. O'Neil, J. R. 1996: $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in cave bear tooth enamel: A record of climate variability during the Pleistocene. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.* 126, 45-59, Amsterdam.
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L. u. Gonfiantini, R. 1993: Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P. K., Lohmann, K. C., McKenzie, J. A. u. Savin, S. (Hrsg.): *Climate change in continental isotopic records*, 1-36, *Geophys. Monogr. Ser.* 78, Washington.
- Sánchez Chillón, B., Alberdi, M. T., Leone, G., Bonadonna, F. B., Stenni, B. u. Longinelli, A. 1994: Oxygen isotopic composition of fossil equid tooth and bone phosphate: an archive of difficult interpretation. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.* 107, 317-328, Amsterdam.
- Schwarcz, H. P., Grün, R., Latham, A. G., Mania, D. u. Brunacker, K. 1988: The Bilzingsleben archaeological site: new dating evidence. *Archaeometry* 30, 5-17, Oxford.
- Shackleton, N. J. u. Opdyke, N. D. 1976: Oxygen-isotope and paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V28-239 Late Pliocene to Latest Pleistocene. *Geol. Soc. Am. Mem.* 145, 449-464, Boulder.
- Shemesh, A. 1990: Crystallinity and diagenesis of sedimentary apatites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 2433-2438, Oxford.
- Steinmüller, A. 1972: Die Schichtenfolgen von Süßenborn und Voigtstedt und die Gliederung des Mittelpleistozäns. *Geologie* 21, 2, 149-165, Berlin.
- Stephan, E. 1999: Sauerstoffisotopenverhältnisse im Knochengewebe großer terrestrischer Säugetiere: Klimaproxies für das Quartär in Mittel- und Westeuropa. *Tüb. Geowiss. Arb. (TGA) E: Mineralogie, Petrologie und Geochemie* 6/99, 218 S., Shaker; Aachen.
- Stuart, A. J. 1981: A Comparison of the Middle Pleistocene Mammal Faunas of Voigtstedt (Thuringia, GDR) and West Runton (Norfolk, England). *Quartärpaläontologie* 4, 155-163, Berlin.
- Uerpmann, H.-P. 1979: Probleme der Neolithisierung des Mittelmeerraumes. *Beih. Tübinger Atlas des Vorderen Orients B*, 28, 190 S., Reichert; Wiesbaden.
- 1982: Faunal remains from Shams-ed-Din Tannira, a Halafian site in northern Syria. *Berytus* 30, 3-52, Kopenhagen.
- Volf, J. 1996: Das Urwildpferd. *Equus przewalskii*. 4. überarb. Aufl. 147 S., Westarp Wissenschaften; Magdeburg.
- Wagner, G. A. 1995: Altersbestimmung von jungen Gesteinen und Artefakten. *Physikalische und chemische Uhren in Quartärgeologie und Archäologie*. 277 S., Enke; Stuttgart.
- Wagner, G. A. u. Beinhauer, K. W. (Hrsg.) 1997: *Homo heidelbergensis* von Mauer. Das Auftreten des Menschen in Europa. 316 S., C. Winter; Heidelberg.
- Wiegank, F. 1975: Paläomagnetische Untersuchungen zur Quartärstratigraphie in der DDR (Mittelpleistozän von Voigtstedt). *Gerl. Beitr. Geophysik* 84, 3/4, 215-222, Leipzig.
- 1997: Paläomagnetische Charakteristik des Unterpleistozäns von Untermaßfeld. In: Kahlke, R.-D. (Hrsg.): *Das Pleistozän von Untermaßfeld bei Meiningen (Thüringen)*. Teil 1. *Röm.-Germ. Zentralmus., Monogr.* 40, 1, 63-69, Mainz.