

setzung für die Etablierung immer neuer Gründerpopulationen unter verschiedenartigen Selektionsdrücken geschaffen wurde. Dies mag zwar begünstigend auf die Artbildung gewirkt haben, trafe allerdings auch für andere Fischarten dieser Seen zu.

Letztlich sind vermutlich viele Gründe für die besondere Radiation der Buntbarsche verantwortlich. Der extrem enge zeitliche Rahmen, in dem sich die Veränderungen abgespielt haben, bleibt eine Herausforderung für die Erforschung der Evolutionsmechanismen, die zu dem enormen Erfolg der Gruppe beigetragen haben.

Literatur

- AVISE JC (1990) Flocks of African fishes. *Nature* 347, 512-513.
- FERNALD RD & HIRATA NR (1977) Field study of *Haplochromis burtoni*: Habits and co-habitant. *Environ. Biol. Fish.* 2, 299-308.

- JOHNSON TC, SCHOLZ CA, TALBOT MR, KELTS K, RICKETTS RD, NGOBI G, BEUNING K, SSEMMANDA I & MCGILL JW (1996) Late Pleistocene desiccation of Lake Victoria and rapid evolution of cichlid fishes. *Science* 273, 1091-1093.
- MEYER A, KOCHER TD, BASASIBWAKI P & WILSON AC (1990) Monophyletic origin of Lake Victoria cichlid fishes suggested by mitochondrial DNA sequences. *Nature* 347, 550-553.
- MEYER A, MONTERO CM & SPREINAT A (1996) Molecular phylogenetic inferences about the evolutionary history of East African cichlid fish radiations. In: JOHNSON TC & ODATA E (eds) *The limnology, climatology and paleoclimatology of the East African Lakes*. Gordon and Breach, Amsterdam, S. 303-324.
- OWEN RB, CROSSLEY R, JOHNSON TC, TWEDDLE D, KORNFIELD I, DAVISON S, ECCLES DH & ENGSTROM DE (1990) Major low levels of Lake Malawi and their implications for speciation rates in cichlid fishes. *Proc. R. Soc. Lond. B* 240, 519-553.
- STURMBAUER C, VERHEYEN E & MEYER A (1994) Mitochondrial phylogeny of the Lamprologini, the major substrate spawning lineage of cichlid fishes from Lake Tanganyika in Eastern Africa. *Mol. Biol. Evol.* 11, 691-703.

Kann die Reflexionsseismik eine Austrocknungsperiode belegen?

Wie sicher sind die zeitlichen Bestimmungen des Trockenfallens der ostafrikanischen Seen?

Franz Egli-Arm, Stockener Str. 76, CH-8405 Winterthur

Als wesentlicher Auslöser für die explosive adaptive Radiation der ostafrikanischen Buntbarsche (vgl. vorstehenden Beitrag von J. FEHRER) wird eine Austrocknungsperiode entweder des ganzen (Viktoria-See) oder eines wichtigen Teiles des Sees (Malawi-See) angesehen. Entscheidende Bedeutung erhält dabei die Erforschung der Sedimente, die sich auf dem Seegrund abgelagert haben. Ein trockengelegter Seegrund erhält eine charakteristische Verfestigung, auch wenn die Trockenphase nur von kurzer Dauer ist. Die Verfestigung erfolgt aufgrund der Kompaktion (Volumen-verminderung durch Wasserentzug) und der Ausfällung gelöster Stoffe bei fortschreitender Wasserverdunstung. Die verfestigte Schicht bleibt erhalten, auch wenn sie nach erneuter Überflutung wieder mit Sediment bedeckt wird. Sie kann heute mit der nachfolgend beschriebenen geophysikalischen Methode der Reflexionsseismik nachgewiesen werden.

Angeführt von den reichen Ölprospektionsfirmen wurde die Reflexionsseismik auf einen sehr

hohen wissenschaftlichen Stand vorangetrieben. Angefangen von der Signalerzeugung über die Echoregistrierung bis zur Signalauswertung haben unzählige Wissenschaftler und Techniker das Instrumentarium aufgebaut und laufend erneuert und verbessert. Die seismische Methode wird sowohl auf dem Land als auch auf dem Wasser eingesetzt. Für die Abklärung der Schichtverhältnisse in wenig gestörten See- und Meeresböden liefert sie erfahrungsgemäß verlässliche Ergebnisse.

Die Reflexionsseismik funktioniert nach dem Echo-Prinzip. Seismische Wellen, die von einer Signalquelle ausgehen, werden an Grenzflächen zwischen zwei Materialien mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften als „Echo“ reflektiert. Im Wasser und in wenig verfestigten Sedimenten versteht man unter seismischen Wellen immer Schallwellen, also Veränderungen des Druckes, die sich wellenförmig mit einer vom Material abhängigen Schallgeschwindigkeit fortpflanzen (im Wasser ca. 1500 m/s). Geeignete Meßgeräte wandeln die

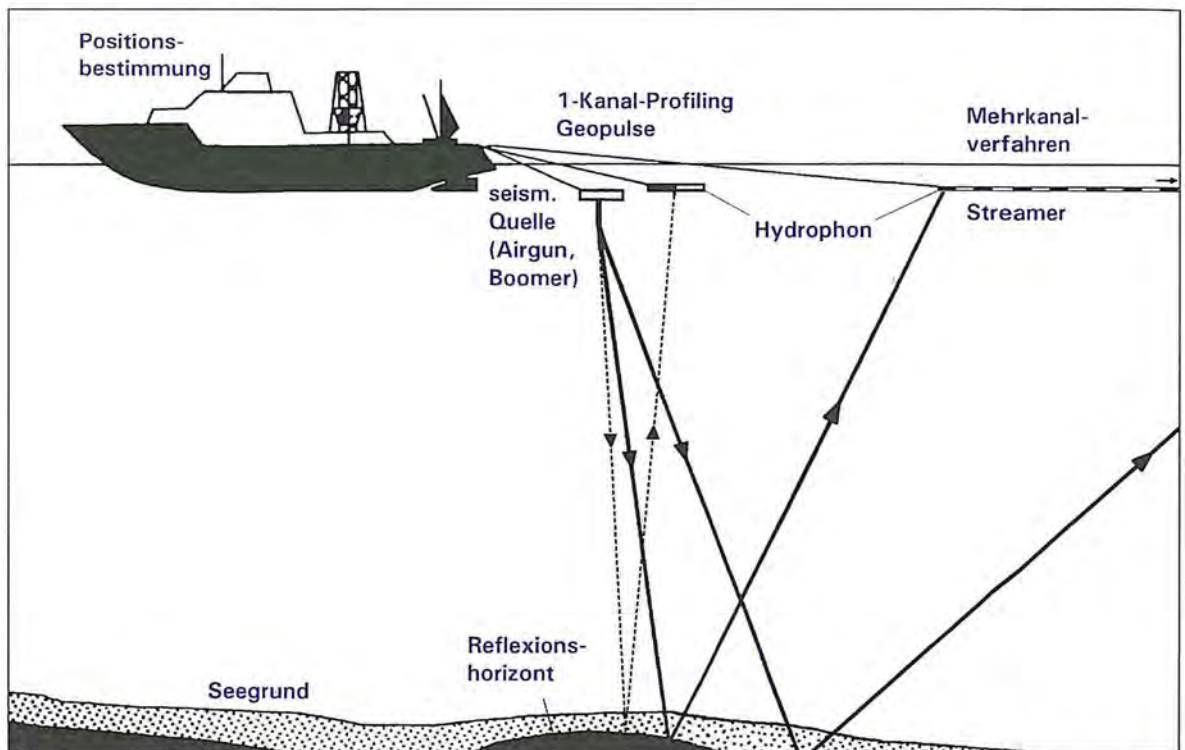


Abb. 1: Schematische Darstellung der Signalerzeugung und -erfassung. Das Schiff schleppt Signalquelle und Empfänger (Hydrophone) in konstanter Wassertiefe. Victoria-See: 1-Kanal-Profiling mit Airgun als Quelle, Malawi-See: Geopulse-Verfahren mit Boomer als Quelle. Bei umfangreicheren Untersuchungen werden Mehrkanalverfahren mit Arrays von mehreren gleichzeitig ausgelösten Airguns als Quelle und sogenannten „Streamer“-Empfängern (z.T. mehrere km langer Schlauch mit über 1000 Hydrophonkanälen) eingesetzt. Die mit Pfeilen versehenen Linien bedeuten Wellenstrahlen von der Quelle zum Empfänger. Zum Einkanalverfahren gehört der gestrichelte Strahl. Von der Vielzahl der Strahlen zum „Streamer“ sind nur zwei gezeichnet.

Druckunterschiede in elektrische Spannungen um, die in einem festgelegten zeitlichen Rhythmus digitalisiert und im Computer gespeichert werden. Auf Papier lassen sich die Signale gemäß Abb. 2b als sogenannte Seismogramme darstellen. In dieser Abbildung verläuft die Zeitachse jedoch nicht wie üblich von links nach rechts, sondern von oben nach unten. Entsprechend zeigen die Ausschläge

(bezeichnet mit: „seismische Reflexion“) nach rechts und nach links und nicht wie üblich nach oben und nach unten.

Beim Victoria-See wurde das sogenannte seismische Profiling-Verfahren angewandt (Abb. 1), das bis zu einer Sedimentdicke von einigen hundert Metern zum Einsatz kommt. Als Signalquelle dient bei dieser Methode eine kleine Luftkanone (Air-

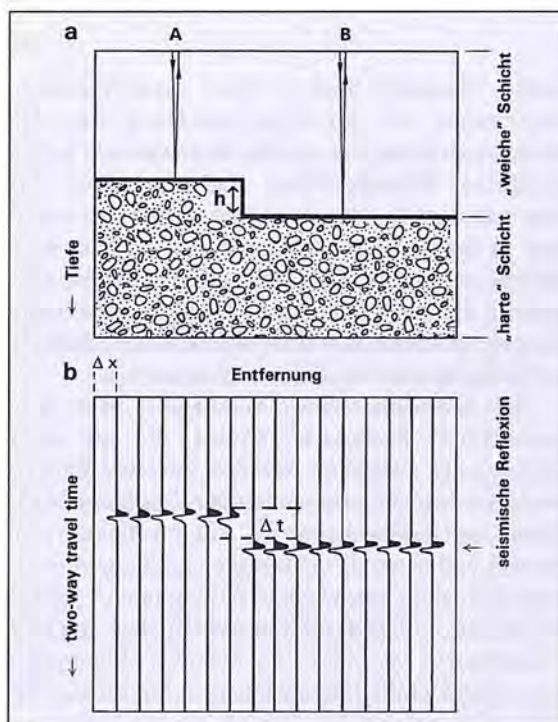


Abb. 2: Signaldarstellung („Record Section“). In regelmäßigen Abständen wird die Quelle gezündet. Aus einer Schichtenfolge wie in a erhält man Seismogramme gemäß b. Jede der 15 Linien im Kasten b bedeutet ein Seismogramm. Die horizontalen Ausschläge – bezeichnet mit „seismische Reflexion“ – sind proportional zu den Druckamplituden. Die senkrechte Achse ist die Zeitachse, wobei der obere Kastenrand dem Zeitpunkt „Null“ entspricht. Δx ist der konstante horizontale Abstand zwischen den einzelnen Schußpunkten. In a sind einfallende und reflektierte Strahlen an den Stellen A und B dargestellt. Bei B ist der Strahlweg länger, so daß im Profil b das Echo um $\Delta t = 2 \cdot h/V$ (V = Wellengeschwindigkeit im oberen Medium) später erscheint als bei A. Schiebt man die Seismogramme in horizontaler Richtung immer mehr zusammen, so beginnen sich die einzelnen Ausschläge zu überlappen. Bei genügend kleinem Maßstab werden die Linien weggelassen, und es bleiben nur noch die eingeschwärzten positiven Ausschläge übrig, so wie es die Profile in Abb. 3 zeigen. Die Seismogramme sind in b idealisiert dargestellt. In der Praxis sind sie aus verschiedenen Gründen gestört und mit Rauschen behaftet. Die Ausdrücke „harte“ und „weiche“ Schicht in der Abbildung beziehen sich auf die Wellenimpedanz (Impedanz = Dichte $\times$ Geschwindigkeit). „Hart“ meint dementsprechend hohe, „weich“ niedrige Impedanz.

Abb. 3: Typische Ausschnitte von Reflexionsprofilen des Victoria-Sees. Schwarze, gewellte und z.T. unterbrochene Streifen markieren positive Ausschläge auf den aneinander gereihten Seismogrammen. Zunahme der TWT (two-way travel time) nach unten.

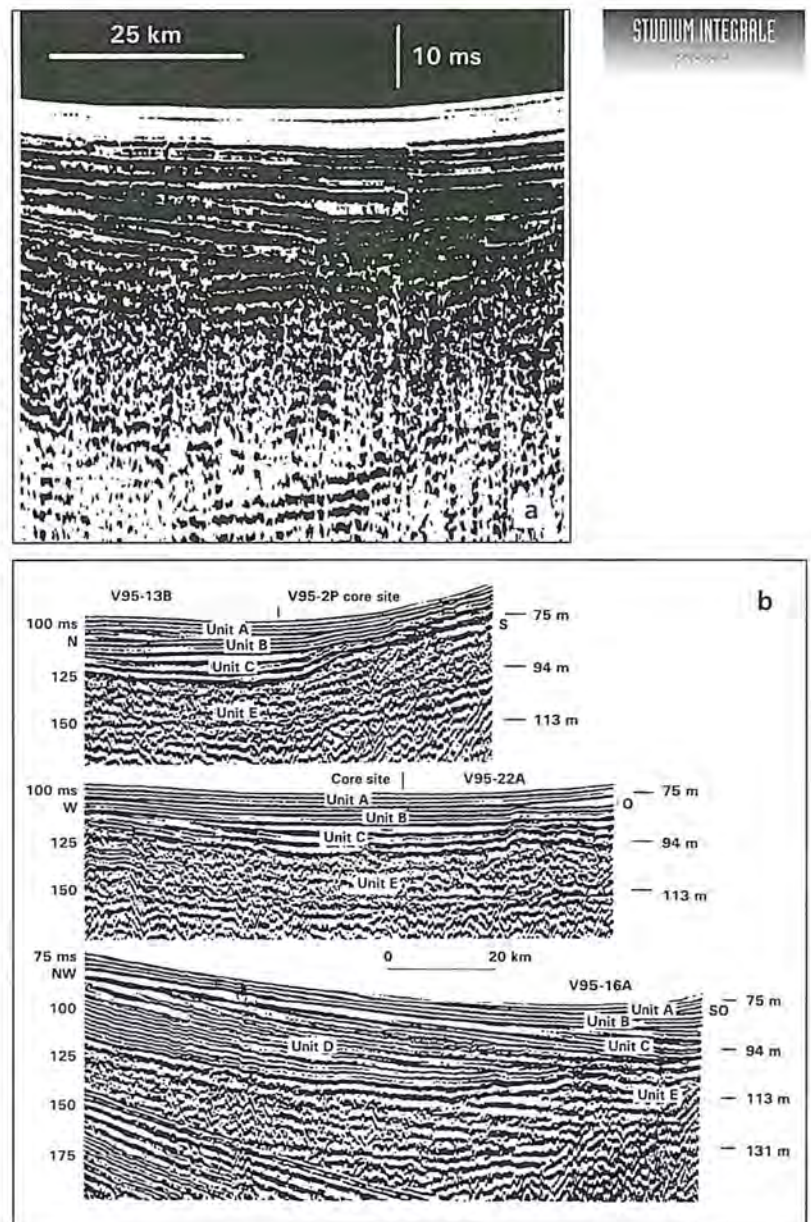
a Untere Grenze des schwarzen Bereichs am oberen Rand: Seegrund. Weißer Streifen direkt unterhalb des Seegrunds: Sedimentschicht (ca. 5 m dick), die seit der Austrocknung abgelagert wurde. Weil diese Schicht im Gegensatz zu den Schichten weiter unten offenbar sehr homogen ist, sind keine Reflexionen innerhalb der Schicht zu sehen. Das Profil umfaßt den Tiefenbereich von ca. 55 m.

b Drei Profilausschnitte mit gegenüber a geänderter Signalverarbeitung und erweitertem Tiefenbereich. Der Seegrund wird pro Profil durch den obersten schwarzen Streifen angedeutet. Der Austrocknungshorizont befindet sich unterhalb des mit „Unit A“ bezeichneten Streifens. Schichtgrenzen erkennt man an den Schnittstellen von „abgeschnittenen“ schwarzen Streifen. „Core Sites“: Entnahme von Gesteinskernen zur Bestimmung der Lage des Austrocknungshorizontes. (Aus JOHNSON et al. 1996)

gun), die beim „Zünden“ (Schuß) hochkomprimierte Luft schlagartig ins Wasser abläßt. Die durch eine solche Luftkanone erzeugte Druckwelle breitet sich im Wasser kugelförmig aus, dringt in die Sedimente ein und wird an Schichtflächen teilweise reflektiert. Die Aufzeichnung der Echosignale geschieht hier mit speziellen Hydrophonen (Unterwasser-Mikrophone). Quelle und Empfänger werden von einem Schiff mitgeschleppt. Das Schiff fährt mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Linie. In regelmäßigen Abständen „schießt“ die Quelle eine Druckwelle ab. Von größter Wichtigkeit für eine gute Datenqualität ist eine kontinuierliche und genaue Navigation.

Zur Herstellung eines klassischen seismischen Profils reiht der Seismik-Experte die einzelnen Seismogramme, die er für jeden Schußpunkt erhalten hat, gemäß Abb. 2b aneinander. Dabei entsprechen die horizontalen Abstände zwischen den Seismogrammen maßstabsgetreu den Schußabständen. Wenn nicht Hindernisse oder spezielle wissenschaftliche Gründe etwas anderes erfordern, bleibt allerdings der Schußabstand über das ganze Profil gleich. Dies bedeutet, daß sich die Seismogramme auf dem Profil meist in schön regelmäßigem Abstand präsentieren. In Abb. 3 sind vier Beispielprofile des Victoria-Sees dargestellt. Hier befinden sich die einzelnen Seismogramme so dicht beieinander, daß sie nicht mehr einzeln aufgelöst werden können. Die horizontale Achse entspricht der Entfernung vom Profilanfang, die senkrechte Achse der sogenannten TWT (Two-way time), dem Intervall zwischen Schußzeitpunkt und Echoankunft. Bei dieser Art der Darstellung kann man die Reflektoren (Schichtgrenzen, Störungen) als zweidimensionales Schnittbild erkennen.

Allerdings stimmen die räumlichen Proportionen noch nicht: Einerseits ändert sich die Wellengeschwindigkeit von Schicht zu Schicht, was Schichten, in denen sich die Wellen schneller fortpflanzen, dünner erscheinen läßt als solche, in denen die Wellen sich langsamer ausbreiten, und andererseits



befinden sich schräggestellte Schichten nicht in der richtigen Lage, weil infolge der Schrägstellung auch die Echorichtung schräg ist. Die Umwandlung des TWT-Abbildes in ein geometrisch korrektes räumliches Abbild nennt man Migration, bei komplizierteren Verhältnissen ein sehr aufwendiges Verfahren. Wenn nur die oberste Schicht interessiert und diese überdies nahezu flach ist wie bei den vorliegenden Seeuntersuchungen, wird auf die Migration verzichtet und direkt das TWT-Abbild einer Interpretation unterzogen. Am rechten Rand aller drei Profile in Abb. 3b stehen die in Meter umgerechneten TWT-Millisekunden des linken Randes. Dabei wurde der Einfachheit halber für alle Schichten dieselbe Wellengeschwindigkeit von 1500 m/s verwendet. Aus Erfahrung weiß man, daß die Abweichung von diesem Wert bei unverfestigten Sedimenten, so wie sie hier vorliegen, klein ist.

Der Reflexionskoeffizient R, d.h. das Amplitudenverhältnis zwischen reflektierter und einfallender Welle beträgt bei senkrechtem Einfall auf eine Grenzschicht:

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1).$$

Z1 und Z2 bedeuten die Wellenimpedanzen (Dichte $\times$ Geschwindigkeit) oberhalb bzw. unterhalb der Schichtgrenze. Je größer der Impedanzunterschied, desto höher ist die Amplitude der reflektierten Welle. Fällt die Welle schräg zur Grenzfläche ein, ist die Formel komplizierter. Da jedoch die Amplitudenverhältnisse bei schrägem Einfall zusätzliche Hinweise auf Materialeigenschaften (z.B. Porosität) liefern, versucht man oft, ein gewisses Spektrum an Einfallswinkeln abzudecken.

Eine Schicht darf die Dicke von etwa einem Viertel der kleinsten Wellenlänge im Spektrum des Signals nicht unterschreiten, damit man sie klar erkennen kann (entspricht ca. 1 m beim Verfahren, das beim Victoria-See angewendet wurde). Jede Schichtgrenze ergibt dann im Profil eine Reflexionslinie. Auch horizontale Ausdehnungen dürfen ein Minimum nicht unterschreiten (Fresnel-Zone der geometrischen Optik).

Um die Lithologie (Gesteinsbeschaffenheit) zu bestimmen und damit die seismischen Resultate zu eichen, muß man an wichtigen Stellen einen Bohrkern entnehmen und untersuchen. Ohne Korrelation mit solchen Kernen sind die seismischen Profile mehrdeutig. Sind die Verhältnisse, wie in den beiden Seen angetroffen, nicht allzu kompliziert, so kann man die Lithologie anhand der Schichtgrenzenreflexionen von einer Kernentnahme zur anderen durchgehend verfolgen.

Die Gesteinskerne vom Malawi- wie auch vom Victoria-See zeigten, daß die ausgehärtete Schicht der Austrocknungsperiode weniger als 1 m dick ist. Im Profil kann man deren Dicke somit nicht bestimm-

men, was aber nicht weiter tragisch ist; denn die Biologen interessiert nur, ob sich der Austrocknungshorizont über die ganze Seefläche hinzieht, insbesondere auch über die tiefsten Stellen im See. Der Horizont liefert auf jeden Fall eine Reflexion, da hier Z2 viel größer als Z1, der Reflexionskoeffizient R also hoch ist.

Die Methode der Reflexionsseismik erweist sich somit vom Aufwand wie vom Ergebnis her als angemessen, um das Trockenfallen von Seen in früheren Jahrhunderten nachzuweisen.

Dank: Der Autor dankt Herrn Prof. Francois MARILLIER von der Universität Lausanne (Schweiz) für die kritische Durchsicht des Manuskripts und wertvolle Anregungen.

Literatur

- HOLLER P (1995) Arbeitsmethoden der marinen Geowissenschaften. Stuttgart.
- JOHNSON CT, SCHOLZ CA, TALBOT MR, KELTS K, RICKETTS RD, NGOBI G, BEUNING K, SSEMAMANDA I & MCGILL JW (1996) Late pleistocene desiccation of Lake Victoria and rapid evolution of cichlid fishes. *Science* 273, 1091-1093.
- OWEN RB, CROSSLEY R, JOHNSON CT, TWEDDLE D, KORNFIELD I, DAVISON S, ECCLES DH & ENGSTROM DE (1990) Major low levels of Lake Malawi and their implications for speciation rates in cichlid fishes. *Proc. R. Soc. Lond. B* 240, 519-553.
- SHERIFF RE & GELDART LP (1995) *Exploration Seismology*. Cambridge Univ. Press, 2nd ed.

Mutter Eva in Bewegung

Laurence Loewe & Siegfried Scherer, Technische Universität München, Vöttingerstr. 45, D-85354 Freising-Weihenstephan

Zusammenfassung: Die hypothetische Abstammung der Menschheit von einer „mitochondrialen Mutter Eva“ vor nicht allzu langer Zeit scheint relativ gesichert. Ihre Datierung mittels molekularer Uhren ist aber sehr umstritten. Neue Bestimmungen von Mutationsraten machen die Situation nun noch komplizierter, indem sie auf ein unerhört junges Datum hinzuweisen scheinen. Neben weiteren ähnlichen Hinweisen werden Lösungsvorschläge für den sich daraus ergebenden Konflikt diskutiert.

Seit CANN et al. (1987) die „Mutter-Eva-Hypothese“ aufstellten, ist dieses Modell der Evolution des Menschen immer bekannter geworden. Es besagt, daß alle heute lebenden Menschen von einer kleinen

Population abstammen, die vor etwa 200.000 Jahren in Afrika gelebt haben soll. Deshalb wird dieses Modell oft auch „out of Africa“-Hypothese genannt, obwohl es sich dabei eigentlich um einen ganzen Komplex von Hypothesen handelt (PENNY et al. 1995). Es steht im Gegensatz zum multiregionalen Modell, also der Vorstellung, daß die Menschheit sich an vielen verschiedenen Orten mehr oder weniger gleichzeitig zum modernen Menschen hin entwickelt hat (WOLPOFF 1989) und nie durch einen einschneidenden „Flaschenhals“ in ihrer Populationsgeschichte ging (KLEIN et al. 1994). Wann die „mitochondriale Mutter Eva“ gelebt haben soll, ist immer noch Gegenstand anhaltender Debatten. Während die meisten Untersuchungen zu Altersan-