

Zur Quantifizierung von Knochenverbrennungstemperaturen durch Röntgenbeugungs-Intensitätsmessungen

Eckhard Swillens, Peter Pollandt und Joachim Wahl

Vorbemerkungen

Die Verbrennung von Leichen ist neben der Körpergrabsitte die weltweit zweithäufigste Bestattungsform. In Mitteleuropa wurde sie über mehrere Jahrhunderte hinweg, u. a. während der Urnenfelder- und Römerzeit, fast ausschließlich angewendet. Demzufolge stellt die anthropologische Untersuchung von Leichenbränden die einzige Möglichkeit dar, etwas über die Menschen dieser Epochen unmittelbar aus ihren Überresten zu erfahren (z. B. WAHL 1988; 2001).

Mit Anfängen in den 30er und verstärkten Bemühungen ab den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts wurden die methodischen Grundlagen zur Bearbeitung verbrannter Knochenreste erarbeitet, die heute zur Anwendung kommen (s. u. a. HERRMANN 1980; LANGE et al. 1987; HERRMANN et al. 1990). Dazu gehören insbesondere Erkenntnisse über temperaturabhängige Veränderungen der mikromorphologischen Knochenstrukturen, die speziell von HERRMANN (1972; 1977) detailliert beschrieben wurden.

Als wesentliche Faktoren, die die Aussagemöglichkeiten kremierter Skelettreste einschränken, gelten die Schrumpfung, Deformation und Fragmentierung des Knochenmaterials, die ihrerseits von der Dauer und Intensität der Hitze einwirkung abhängen. Dabei lässt sich die Expositionstemperatur nach experimentellen Verbrennungen sowie Untersuchungen im Krematorium anhand der Färbung, Konsistenz, Oberflächenstruktur und dem Auftreten typischer Hitzerrisse oder Veränderungen der mikromorphologischen Strukturen abschätzen (WAHL 1981; SHIPMAN et al. 1984; BUIKSTRA & SWEGLE 1989).

Im Experiment konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Temperatur die Festigkeit des Knochens zunächst abnimmt (HERRMANN et al. 1990, 259). In einer Übergangsphase bei ca. 700–800 °C ist das Material extrem brüchig. Man bezeichnet Knochen in diesem Zustand als »kalziniert« oder »kreidig« (Verbrennungsstufe IV nach WAHL 1981). Ab etwa 800 °C steigt die Festigkeit des Knochens wieder deutlich an, was von HERRMANN (1988) auf eine Festkörperreaktion zu Tricalciumphosphat (Whitlockit), einem keramischen Sinterungsprozess vergleichbar, zurückgeführt wird. SHIPMAN et al. (1984) beschreiben für diesen Temperaturbereich eine Fusion der Hydroxylapatitkristalle, wobei allerdings – wie ebenso in der vorliegenden Untersuchung – Whitlockit nicht nachgewiesen werden konnte. Die geringere Löslichkeit des über 800 °C erhitzten Knochens gegenüber nativem Knochen dürfte in der erhöhten Kristallgittergüte des Apatits begründet sein.

Demzufolge haben Leichenbrände auch in aggressivem Liegemilieu prinzipiell bessere Erhaltungschancen als unverbrannte Knochen.

Der vollständig gebrannte Knochen weist unter dem Mikroskop keine histologischen Feinstrukturen mehr auf, verhält sich unter polarisiertem Licht optisch isotrop und zeigt ein deutlich schärfer strukturiertes Röntgendiffraktogramm (HERRMANN 1988, Abb. 276b; HERRMANN et al. 1990, Abb. 3.4.6.). Graduelle Unterschiede hinsichtlich der Färbung lassen erkennen, dass pulverisierter Knochen bestimmte Farbgradienten bei etwas niedrigeren Temperaturen erreicht als kompakter Knochen (vgl. PERSON et al. 1996).

Röntgendiffraktionsmessungen und Diagenese

Die Messung der Röntgenbeugungsreflexe und ihrer Intensität gibt Aufschluss über die vorliegenden chemischen Verbindungen (Minerale), die Exaktheit der Kristallgitter (beeinflusst durch Verzerrungen, Fehlstellen und Ersatzatome) sowie die Kristallitgröße. Der Ordnungsgrad bzw. die Güte von Kristallgittern wird als Kristallinität bezeichnet. Eine stärkere Aufsteilung der apatittypischen Beugungsmuster weist auf eine bessere Kristallinität und damit fortgeschrittene Rekristallisation hin (z. B. STEPHAN & NEUMANN 2001). Dabei besteht allerdings keine einfache Korrelation zwischen höherer Rekristallisationsrate und längerer Liegezeit, da die Kristallinität des Knochenminerals u. a. mit steigendem Individualalter zunimmt und die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Liegemilieus auch innerhalb einer Lokalität stark variieren können (vgl. STINER & KUHN 1995; PERSON et al. 1996).

Neben dem Wassergehalt, der Calcium- und Strontiumkonzentration ist vor allem der pH-Wert des umgebenden Sediments entscheidend für den Erhaltungszustand des Knochens. Ein saures Milieu beschleunigt den Abbauprozess des Kollagens und erhöht die Löslichkeit von Hydroxylapatit als Hauptbestandteil der mineralischen Phase. Mit zunehmender Abnahme von Dichte und Härte des Knochens werden z. B. Elemente wie Aluminium, Eisen und Mangan angereichert (STEPHAN 1997). Alleine deren erhöhter Anteil kann bei Funden unklarer Herkunft auf eine längere Liegezeit hinweisen. Markante Veränderungen der mineralischen Phase und damit ein signifikanter Anstieg der Kristallinität gehen mit deutlichen Alterationen im Bereich der organischen Knochenbestandteile bzw. deren Abbau einher (PERSON et al. 1996). Die Kristallinität ist damit auch ein An-

zeiger des Diagenesegrades bzw. des Levels der Erhaltung biogener Anteile.

Röntgendiffraktionsanalysen wurden an Skelettmaterial bislang vor allem im Rahmen von Untersuchungen zur Aufklärung von Diageneseprozessen am und im Knochen durchgeführt (u. a. PFRETZSCHNER 2000; STEPHAN 1999, beide mit zahlreichen weiterführenden Literaturhinweisen). Dabei stellte sich heraus, dass die Diagenese nicht einfach stetig voranschreitet, sondern einen äußerst komplexen Vorgang darstellt. In einem späteren Stadium eröffnen so genannte microcracks zusätzliche Diffusionswege zwischen den Osteonen und ermöglichen so die Einwanderung des für die Apatitkristallisation notwendigen Calciums und Phosphats (PFRETZSCHNER 2000; STEPHAN & NEUMANN 2001).

Einen weiteren Anwendungsbereich stellt die Beurteilung von Knochen dar, die höheren Temperaturen ausgesetzt waren (u. a. SHIPMAN et al. 1984; PERSON et al. 1996). So lassen sich z. B. hitzeexponierte Knochen von solchen unterscheiden, die eine entsprechende Färbung lediglich aufgrund spezifischer Bodenverhältnisse aufweisen (z. B. durch einen hohen Eisen- oder Manganengehalt oder Huminsäuren) oder wenn höhere Temperaturen mit einer höheren Rekristallisationsrate bzw. Röntgenbeugungsintensität korrelieren. Dabei sind diagenetisch bedingte Veränderungen der Kristallstruktur denjenigen sehr ähnlich, die nach experimentellen Verbrennungen von Knochen gefunden werden. Das heißt, einzelne Aspekte fortschreitender Diagenese lassen sich durch Erhitzen von frischem Knochenmaterial simulieren (ebd.). Doch sollten die Differenzen und Gemeinsamkeiten zwischen beiden Vorgängen noch detaillierter verfolgt werden.

Nach Verbrennungsversuchen und anschließenden Röntgendiffraktionsmessungen an Knochen von Schaf

und Ziege fanden SHIPMAN et al. (1984) den deutlichsten Anstieg der Kristallitgröße von Hydroxylapatit bei Temperaturen zwischen 525 °C und 645 °C. Die Schrumpfung des Knochens lag zwischen 20 °C und 600 °C unter 5%, stieg um 700 °C rasch an erreichte über 900 °C einen Wert von über 20%. Die mehr oder weniger vollständige Dekomposition der organischen Bestandteile (Kollagen) erfolgte zwischen 360 °C und 525 °C. PERSON et al. (1996) geben als Grenzwert zum Abbau der organischen Phase über 400 °C an. Danach soll der Kristallinitätsindex, wie auch der Verlust an Karbonat, bis 625 °C nur noch geringfügig ansteigen. Bei 625–700 °C würden im Diffraktionsspektrum Peaks erscheinen, die weitestgehend rekristallisiertem Apatit entsprechen.

Zu vergleichbaren Ergebnissen hinsichtlich der ablaufenden Mineralisationsprozesse kommen STINER & KUHN (1995) mit Hilfe der Infrarot-Spektrometrie. Danach findet erst über 650 °C eine verstärkte Rekristallisation statt.

Eigene Untersuchungen

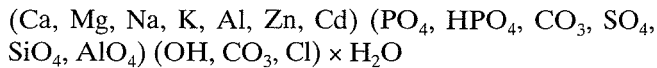
Mit der vorliegenden Pilotstudie sollte überprüft werden, ob die durch qualitative Parameter beschriebenen Verbrennungsstufen am Knochen auch quantitativ durch einen Apatitparameter differenzier- bzw. eingrenzbar sind, d. h. ob bestimmte Temperaturgradienten bestimmten Nettointensitäten der Hauptröntgenreflexe (minus Untergrund) zugeordnet werden können. Auf diese Weise könnte die ehemalige Expositionstemperatur u. U. aus einem definierten Rekristallisationsgrad (Höhe und Differenzierung bestimmter Peaks) erschlossen werden.

Biogener Apatit ist kein stöchiometrisch reiner Hydroxylapatit. Es tritt durch den Teilersatz seiner Calcium-,

Tab. 1: Zusammenhänge zwischen Färbung, Temperatur und Zustand der Knochenreste (nach WAHL 1981, 273).

Verbrennungsgrad	Färbung	Temperaturwert	Bemerkungen
I	glasig elfenbeinfarben gelblichweiß	bis 200 °C	wie unverbrannter, frischer Knochen
		um 250–300 °C	erste Schrumpfung (ca. 2%)
II	braun dunkelbraun schwarz	um 300 °C	Verkohlung der organischen Knochensubstanz
		um 400 °C	
III	grau blaugrau milchig hellgrau	um 550 °C	Kompakta innen manchmal noch schwarz
IV	milchig weiß mattweiß kreideartig	ab 650–700 °C	kreidig samtige, abreibbare Oberfläche Kompakta innen manchmal noch grau ab ca. 750 °C kontinuierlich stärkere Schrumpfung
V	altweiß schmutzigweiß (grau bis beigefarben)	ab ca. 800 °C	Knochen spröde, hart und fest Schrumpfung (durchschnittl. 12%, max. 25–30%) Auftreten typischer Hitzerrisse

Phosphat- und Hydroxylatome durch andere und durch Gitterfehlstellen in sehr vielfältiger Form auf. Man findet einen relativ hohen CO₃-Gehalt (4–6%) sowie im mikrokristallinen Bereich zahlreiche Kristallgitterdefekte, d.h. Substitutionen mit so genannten Ersatzatomen (z.B. Strontium oder Magnesium). Seit 1806 durch J. BERZELIUS bekannt geworden ist, dass das Calciumphosphat der Knochen dem Mineral Apatit entspricht, wurden zahlreiche solcher Ersatzatome beschrieben. So konnten z.B. für Harnsteinapatite folgende Bestandteile mit Ersatzatomkonzentrationen von über 1% nachgewiesen werden (Summenformel):



Die meisten davon lassen sich auch im Knochen belegen. Über die Verteilung derartiger Ersatzatome innerhalb des menschlichen Skeletts ist allerdings noch wenig bekannt, ebenso darüber, welche Einflüsse möglicherweise Geschlecht, Alter und/oder bestimmte Stoffwechselkrankheiten darauf haben. Es fehlt ein Skelettatlas der Apatite. Bei der Betrachtung bodengelagerter Knochen kommt noch die Frage hinzu, ob Veränderungen während der Liegezeit erfolgt sind bzw. wie spezielle Bodenverhältnisse verändernd auf einzelne Skelettregionen gewirkt haben könnten. Gleiches gilt natürlich für tierische Skelette.

Trotz dieser Vielfalt haben wir untersucht, ob die Zunahme der Kristallinität der Apatite, d.h. die »Ausheilung« von Gitterfehlern durch steigende Temperaturen, zu einer messbaren Korrelation zwischen Kristallinität einerseits und Temperatur andererseits führt.

Die zugrunde liegende Charakterisierung der Brandknochen nach fünf Verbrennungsstufen ist aus Tabelle 1 zu ersehen. Ähnliche Angaben finden sich bei HERRMANN et al. (1990). Bis zu einer Temperatur von ca. 550 °C ist der Kollagenabbau abgeschlossen. Der organisch gebundene Kohlenstoff wird in Form von CO₂ ausgetrieben (EASTOE 1971; ENGSTRÖM 1972).

Material und Methode

Zur Darstellung der Veränderung der Kristallinität der Apatite wurden an 16 Knochenproben verschiedener Provenienz Röntgenbeugungsanalysen durchgeführt (vgl. Tab. 2). Sie wurden Befunden unterschiedlicher Zeitstufen von der späten Bronzezeit bis in die frühe Neuzeit entnommen und dokumentieren verschiedene Skelettelemente. Die Proben wurden darüber hinaus polarisationsmikroskopisch und zum Teil auch mit dem Elektronenmikroskop untersucht.

Im Einzelnen stammen sie aus einer subrezentem Grablage (Probe 6), einem mittelalterlichen Grab aus Kirchdorf (Probe 16), zwei Friedhöfen der römischen Kaiserzeit (Stettfeld: Proben 3, 4, 5 und 11; Heidelberg-Neuenheim: Proben 14 und 15), einer spätbronzezeitlichen Nekropole aus Syrien (Tell Chuera: Proben 1, 2, 8, 10, 12 und 13), einem jungneolithischen Erdwerk (Heilbronn-Oberesheim: Probe 7) sowie einem rezenten, als einzigem nicht bodengelagerten Skelettfund (Probe 9). Aus Tabelle 2 geht weiterhin hervor, welche Skeletteile jeweils beprobt wurden. Ihre Zuordnung zu einzelnen Verbrennungsstufen erfolgte nach ihrer Färbung, Konsistenz, Oberflächenstruktur sowie dem Vorhandensein oder Fehlen typischer Hitzerrisse (vgl. WAHL

Tab. 2: Für die Röntgenbeugungsanalyse entnommene Knochenproben (Fundort, Skeletteil, Datierung), deren Zuordnung zu unterschiedlichen Verbrennungsstufen (nach WAHL 1981) sowie die gemessenen Intensitäten.

Verbrennungsstufe	Probe Nr.	Fundort	Skeletteil	Datierung	Intensität
unverbrannt	6	Tübingen	Costa	subrezent	155
unverbrannt	16	Kirchdorf	Femur	MA	236
unverbrannt	1	Tell Chuera	Costa	SBZ	214
unverbrannt	7	HN Oberesheim	Costa	neolithisch	160
II	9	Tübingen	Metatarsus	rezent	166
II	2	Tell Chuera	Femur	SBZ	103
II	8	Tell Chuera	Costa	SBZ	179
III	3	Stettfeld	Radius	RKZ	368
III	11	Stettfeld	Femur	RKZ	190
III	10	Tell Chuera	Cranium	SBZ	312
IV	4	Stettfeld	Humerus	RKZ	312
IV	12	Tell Chuera	Cranium	SBZ	443
IV	13	Tell Chuera	Cranium	SBZ	585
V	5	Stettfeld	Femur	RKZ	852
V	14	HD Neuenheim	Costa	RKZ	704
V	15	HD Neuenheim	Cranium	RKZ	771

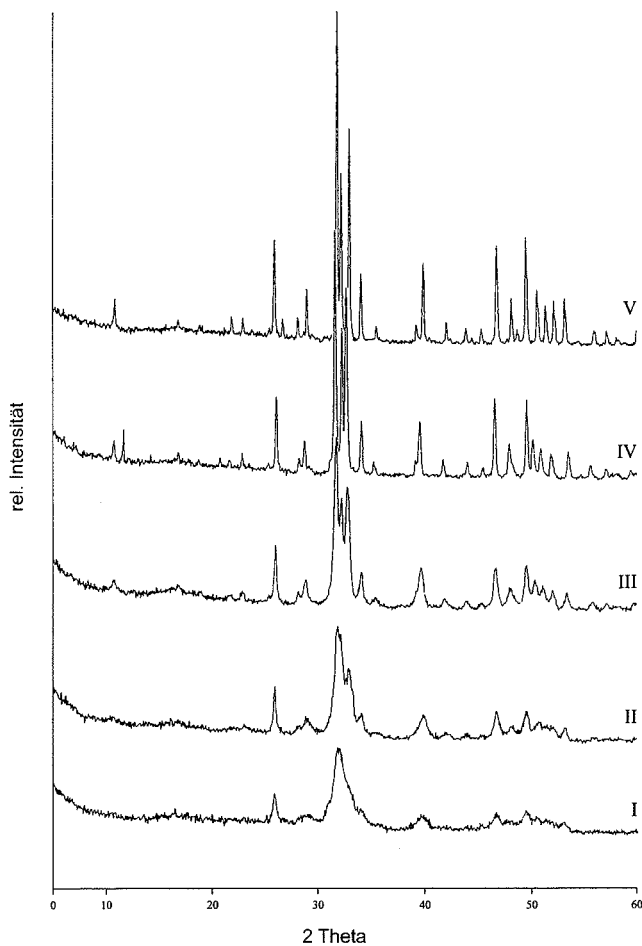


Abb. 1: Röntgendiffraktogramme der Apatite von fünf ausgewählten Proben (römische Ziffern II-V = Verbrennungsstufen nach WAHL 1981). I = Probe 6, II = Probe 8, III = Probe 3, IV = Probe 13, V = Probe 15. Nähere Angaben zu den Proben siehe Tabelle 2.

1981, Tab. 1). Die gesamte Stichprobe war somit in mehrfacher Hinsicht heterogen.

Neben vier unterschiedlich alten unverbrannten Knochenproben wurden jeweils drei Proben der Verbrennungsstufen II-V in die Untersuchung mit einbezogen. Da Skelettreste in Verbrennungsstufe I hinsichtlich ihrer graduellen Braunfärbung optisch kaum von unverbranntem bodengelagertem Material zu unterscheiden sind, blieben sie in dieser Studie unberücksichtigt. Die in Abbildung 1 mit römisch I bezeichnete Kurve ist diejenige der unverbrannten Probe 6, die mit römisch II-V bezeichneten Kurven entsprechen den Proben 8, 3, 13 bzw. 15 und damit stellvertretend den Verbrennungsstufen II-V.

Die Röntgenbeugungsanalysen wurden mit dem so genannten Pulveraufnahmeverfahren durchgeführt. Dabei wurden jeweils 20–30 mg pulverisierten Knochenmaterials mit dem Gerät URD63 der Firma Freiburger Präzisionsmechanik mit Kupfer-K_{alpha}-Strahlung (Nickelfilter) mit 40 kV im Winkelbereich von 3–55° bei einer Schrittweite von 0,05°/3s bestrahlt.

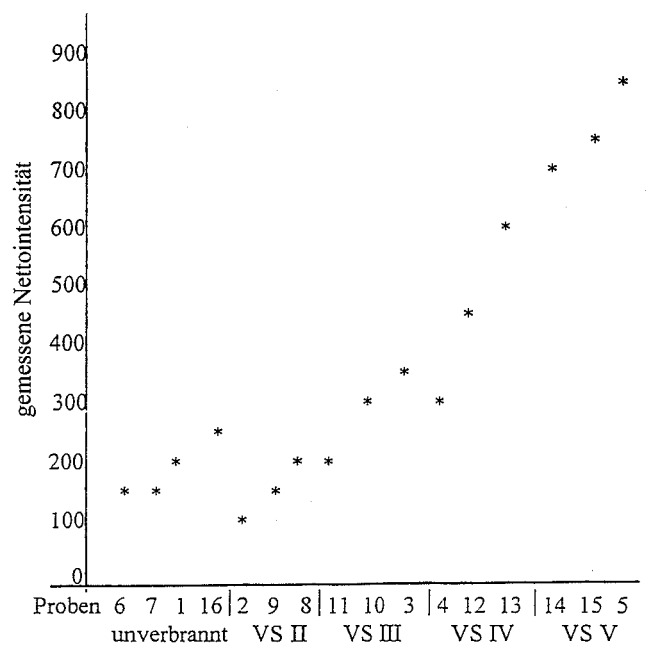
Ergebnisse und Diskussion

Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, steigen mit zunehmender Temperatur sowohl die Höhe der Peaks als auch deren Verschmälerung. Diese wachsende »Aufsteilung« ist ein Anzeichen für die zunehmende Kristallinität der Apatite bzw. für die »Reparatur« von Störungen des Kristallgitters. Dabei repräsentieren die einzelnen Röntgendiffraktionsspektren einen unverbrannten Knochen (Kurve I) sowie einen der jeweils drei Exemplare der Verbrennungsstufen II-V (vgl. Tab. 2).

Zur Charakterisierung der Einzelproben wurden die Nettointensitäten der jeweiligen Hauptreflexe des Apatits bei einem d-Wert von 0,280 bis 0,282 nm (bzw. 2,80 bis 2,82 Angström) für die einzelnen Verbrennungsstufen aufgetragen (Abb. 2). In dieser Kurve zeigt sich deutlich der kontinuierliche Anstieg der gemessenen Intensitäten dieser Reflexe über die einzelnen Verbrennungsstufen hinweg. Es ergibt sich offenbar ein linearer Anstieg der Kristallinität mit zunehmender Expositionstemperatur.

Die jeweiligen Intensitäten schwanken für unverbrannte Knochen zwischen 155 und 236, für Verbrennungsstufe II zwischen 103 und 179, für Verbrennungsstufe III zwischen 190 und 368, für Verbrennungsstufe IV zwischen 312 und 585 und für Verbrennungsstufe V zwischen 704 und 852. Dabei sind zunächst die Bereiche für die unverbrannten Knochen und diejenigen der Verbrennungsstufe II bemerkenswert. Beide überlappen einander in hohem Maße. Im weiteren Kurververlauf fällt der Wert für Probe 4 auf, der deutlich nach unten

Abb. 2: Korrelation zwischen den nach beschreibenden Kriterien zugeordneten Verbrennungsstufen (Abszisse; Proben 1 bis 16; VS = Verbrennungsstufen nach WAHL 1981) sowie den gemessenen Nettointensitäten des Hauptreflexes (Ordinate; nähere Angaben siehe Tab. 2).



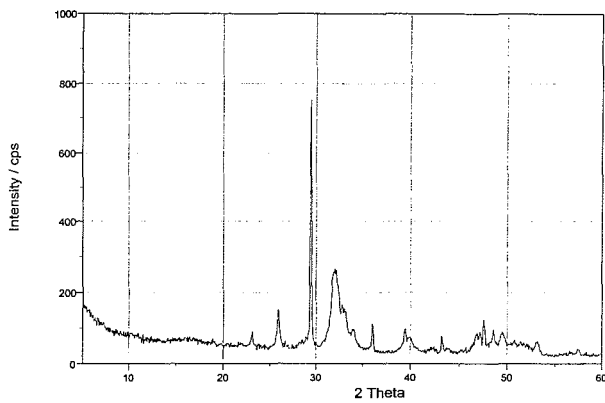


Abb. 3: Röntgendiffraktogramm von Probe 7. Der Hauptpeak belegt einen hohen Calcitgehalt.

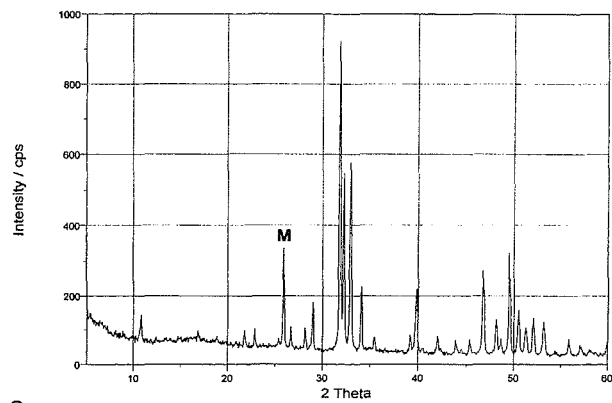
abweicht. Die Probe 2 fällt wegen Materialmangels mit einem zu niedrigen Wert aus dem Verteilungsbild heraus.

Daraus lässt sich ableiten, dass relative Röntgenbeugungsintensitäten zwischen ca. 100 und 300 sowohl für unverbrannte Knochen als auch für Apatite bis zu einer Verbrennungstemperatur von um 500 °C, d.h. bis zur Grenze zwischen den Verbrennungsstufen II und III nicht unterscheidbar sind. Das entspricht dem Bereich bis zum vollständigen Austrieb organisch gebundenen Kohlenstoffs bzw. der kompletten Diagenese der organischen Knochenbestandteile.

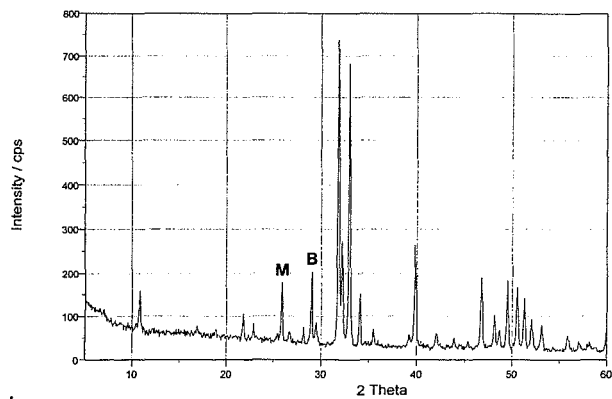
Zudem könnte das Diagramm zur Korrektur der zunächst nach der äußeren Begutachtung vorgenommenen Einordnung einzelner Proben zu bestimmten Verbrennungsstufen verwendet werden. Danach würde z.B. Probe 4 aufgrund des gemessenen Wertes eher in Stufe III als in Stufe IV passen. Ebenso wäre Probe 16 besser in Stufe II als in Stufe I untergebracht. In beiden Fällen könnte hinsichtlich der ursprünglichen Zuordnung der Verbrennungsstufen eine Fehleinschätzung vorliegen.

Einen interessanten Aspekt bot Probe 7. Ihr Hauptpeak ist nicht dem Apatit, sondern dem Calcit (CaCO_3) zuzuordnen (s. Abb. 3). In die Auswertung wurde allerdings der Hauptapatitpeak der Probe einbezogen. In den Proben 5, 14 und 15 sind Monetitanteile (CaHPO_4), in der Probe 14 ebenso Brushitanteile ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vorhanden (vgl. Abb. 4a-c). Brushit wurde bereits mehrfach im Rahmen anderer Untersuchungen an (prä)historischen Knochenresten nachgewiesen (z.B. HERRMANN 1972).

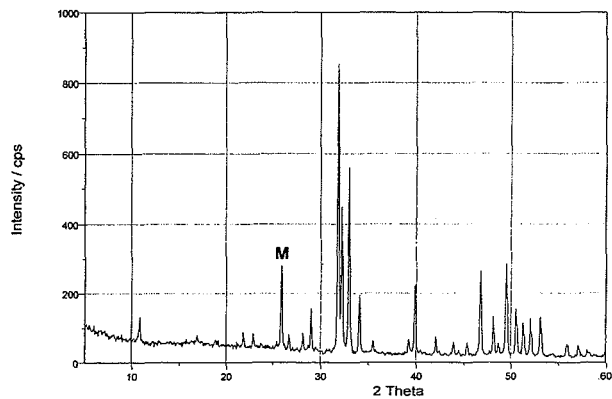
Am Rasterelektronenmikroskop durchgeführte Mikrosondenanalysen wurden zunächst nur an einer kleinen Auswahl von fünf Proben vorgenommen (Proben 1-5). Die Überprüfung der Ersatzatome ergab für die Proben 1 und 4 SiO_4 - und SO_4 -Anteile von über 1%, in Probe 5 SiO_4 - und AlO_4 -Gehalte und in Probe 3 Cl -Anteile von ebenfalls mehr als 1%. Während Al-Verbindungen in Knochen von Patienten mit Niereninsuffizienz nachgewiesen werden konnten (PARSONS et al. 1971), sind nen-



a



b



c

Abb. 4: Röntgendiffraktogramme der Proben 5 (a), 14 (b) und 15 (c). In allen drei Proben ist ein deutlicher Monetit-Peak (M), bei Probe 14 zudem ein stärker ausgeprägter Brushitanteil (B) nachweisbar.

nenswerte Si-Gehalte (bis 0,5%) bislang lediglich im osären Material von Nagern bekannt geworden (CARLISLE 1971). Erhöhte Mengen dieser Ersatzatome stammen am ehesten aus dem umgebenden Sediment und sind während der Liegezeit angereichert worden (s. dazu auch STEPHAN 1997; 1999).

Die Differenzen zwischen den Ca-, P- und O-Werten ließen in dieser kleinen Stichprobe keinen Trend erkennen. CO_3 -Gehalte wurden ausschließlich in den hitzeexponierten Proben 2-5 untersucht.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für Knochenproben eine eindeutige Korrelation zwischen Verbrennungsstufen bzw. Verbrennungstemperaturen und einem Apatitparameter, d.h. der Nettointensität des Hauptreflexes der Röntgenbeugungsaufnahmen, darstellbar ist. Die beschreibende Einstufung der Verbrennungsstufen lässt sich demnach durch die Kristallinitätsentwicklung der Apatite quantifizieren.

Die in Tabelle 2 und Abbildung 2 vorgelegten Daten dieser Pilotstudie sollten durch die Analyse weiterer Proben, unter Miteinbeziehung rezenter Knochen, weiter ausgebaut werden. Dazu müssten größer angelegte Serienuntersuchungen durchgeführt und die Temperaturen sowie die zugehörigen Nettointensitäten per Röntgendiffraktion gemessen werden. Damit könnten einzelne Verbrennungsgrade bestimmten Intensitätsspannen zugeordnet werden. Umgekehrt ließe sich, auch bei zweifelhafter Farbgebung und Oberflächenstruktur, ein bestimmter Kristallinitätsgrad letztlich einem bestimmten Temperaturbereich zuweisen. Zudem gilt es zu klären, ob und welche Einflüsse das Sterbealter auf den Kristallinitätsgrad hat. Hinsichtlich der Liegezeit ist dieses Phänomen über größere Zeiträume bekannt. Vielleicht lässt es sich auch in (prä)historisch interessanten Dimensionen detaillierter darstellen.

Einige Aspekte der im Rahmen einer Kremation ablaufenden hitzebedingten Rekristallisation decken sich mit solchen, die bei der »normalen« Diagenese durch Verwitterung und Fossilisation erst nach mehreren Jahr (hundert)en oder Jahr(zehn)tausenden zu beobachten sind.

Nachdem durch Röntgenbeugungsaufnahmen auch andere Minerale wie Calcit, Monetit und Brushit im Knochen nachweisbar sind, könnten auch diese zur Lösung weiterer Fragen beitragen. Dasselbe gilt für die erwähnten Ersatzatome.

Danksagung

Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes sowie ergänzende Literaturhinweise danken wir Frau Dr. Elisabeth Stephan vom Landesdenkmalamt Baden-Württemberg.

Anschriften der Verfasser:

Dr. Eckhard Swillens
Wilhelm-Busch-Straße 13
06118 Halle (Saale)

Dr. Peter Pollandt
Krokusweg 20
06118 Halle (Saale)

PD Dr. Joachim Wahl
Landesdenkmalamt Baden-Württemberg
Osteologie
Stromeyersdorfstraße 3
78467 Konstanz

Literatur

- BERZELIUS, J. J. (1806) In: *Ahandlingar i Fysik, Kemi och Mineral.* 8, 195–239.
- BUIKSTRA, J. E. & M. SWEGLE (1989): Bone Modification Due to Burning: Experimental Evidence. In: R. BONNICHSEN & M. H. SORG (Eds.), *Bone Modification. Center for the study of the first Americans, University of Maine, Maine*, 247–258.
- CARLISLE, E. M. (1971): Silicon: A possible factor in bone calcification. *Science* 167, 279–280.
- EASTOE, J. E. (1971): The chemical composition of bone. In: C. LONG (ed.), *Biochemist Handbook*, Spon, London, 715–720.
- ENGSTRÖM, A. (1972): Aspects of the molecular structure of bone. In: G. H. BOURNE (ed.), *The biochemistry and physiology of bone. Vol. I*, Academic Press, London/New York, 237–257.
- HERRMANN, B. (1972): Das Combe Capelle-Skelet. Eine Untersuchung der Brandreste unter Berücksichtigung thermoinduzierter Veränderungen am Knochen. *Ausgr. in Berlin* 3, 7–69.
- HERRMANN, B. (1977): On histological investigations of cremated human remains. *Journal of Human Evol.* 6, 101–103.
- HERRMANN, B. (1980): Kleine Geschichte der Leichenbranduntersuchung. *Fornvännen* 75, 20–29.
- HERRMANN, B. (1988): Behandlung von Leichenbrand. In: R. KNUSSMANN (Hrsg.), *Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen Bd. I/1*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-New York, 576–585.
- HERRMANN, B., G. GRUPE, S. HUMMEL, H. PIEPENBRINK & H. SCHUTKOWSKI (1990): *Prähistorische Anthropologie. Leitfaden der Feld- und Labormethoden*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- LANGE, M., H. SCHUTKOWSKI, S. HUMMEL & B. HERRMANN (1987): A bibliography on cremation. *PACT* 19, Council of Europe, Strasbourg.
- PARSONS, V. et al. (1971): Aluminium in bone from patients with renal failure. *Brit. Med. Journ.* 4, 273–275.
- PERSON, A., H. BOCHERENS, A. MARIOTTI & M. RENARD (1996): Diagenetic evolution and experimental heating of bone phosphate. *Palaeo* 126, 135–149.
- PERSON, A., H. BOCHERENS, J. F. SALIÈGE, F. PARIS, V. ZEITOUN & M. GÉRARD (1995): Early diagenetic evolution of bone phosphate: x-ray diffractometry analysis. *Journ. of Archaeol. Science* 22, 211–221.
- PFRETZSCHNER, H. U. (2000): Microcracks and fossilization of Haversian bone. *N. Jahrb. Geol. Paläontol. Abhandl.* 216, 413–432.
- SHIPMAN, P., G. FOSTER & M. SCHOENINGER (1984): Burnt Bones and Teeth: an Experimental Study of Color, Morphology, Crystal Structure and Shrinkage. *Journ. of Archaeol. Science* 11, 307–325.
- STEPHAN, E. (1997): Patterns of chemical changes in fossil bones and various states of bone preservation associated with soil features. *Anthropozoologica* 25/26, 173–180.

- STEPHAN, E. (1999): Sauerstoffisotopenverhältnisse im Knochengewebe großer terrestrischer Säugetiere. Klimaproxies für das Quartär in Mittel- und Westeuropa. *Tübinger Geowiss. Arbeiten R. E.* 6/99, Shaker Verlag, Aachen.
- STEPHAN, E. & U. NEUMANN (2001): Beispiele diagenetischer Veränderungen pleistozäner Säugerfunde. In: E. MAY & N. BENECKE (Hrsg.), *Beiträge zur Archäozoologie und Prähistorischen Anthropologie III*. Konstanz, 177–184.
- STINER, M. C. & S. L. KUHN (1995): Differential Burning, Recrystallization and Fragmentation of Archaeological Bone. *Journ. of Archaeol. Science* 22, 223–237.
- TUROSS, N., A. K. BEHRENSMEYER & E. D. EANES (1989): Strontium increases and crystallinity changes in taphonomic and archaeological bone. *Journ. Archaeol. Science* 16, 661–672.
- WAHL, J. (1981): Beobachtungen zur Verbrennung menschlicher Leichname. Über die Vergleichbarkeit moderner Kremationen mit prähistorischen Leichenbränden. *Arch. Korr.bl.* 11, 271–279.
- WAHL, J. (1988): Menschenknochen. In: J. WAHL & M. KOKABI, *Das römische Gräberfeld von Stettfeld I. Osteologische Untersuchung der Knochenreste aus dem Gräberfeld. Forsch. u. Berichte z. Vor- u. Frühgesch. in Baden-Württemberg* 29, Stuttgart, 46–223.
- WAHL, J. (2001): Bemerkungen zur kritischen Beurteilung von Brandknochen. In: E. MAY & N. BENECKE (Hrsg.), *Beiträge zur Archäozoologie und Prähistorischen Anthropologie III*. Konstanz, 157–167.