1984, 1992). G. E. Coote was a pioneer working on this topic and systematically measured fluorine profiles in bone samples for dating purposes.

"Bone" is not a homogenous system: the mineral inorganic matrix is formed by a blend of ions called "dahllite", [$(Ca, Na, Mg)_5(HPO_4, PO_4, CO_3)_3(OH,CO_3)$] (Berna 2004). The associated organic component consists mainly of collagen and other proteins and lipids. Many environmental factors like the hydrological conditions or the composition of the soil at the burial place influence this dual system of a bone matrix ("diagenesis"), and thus the physical condition of the archaeological remains. Figure 2 shows that two samples which have nearly the same age and were found at the same excavation site show profiles developed to different extents. Uptake and diffusion of fluorine therefore must have taken place under different environmental conditions, resulting in a different "diffusion length" *Dt* in the samples.

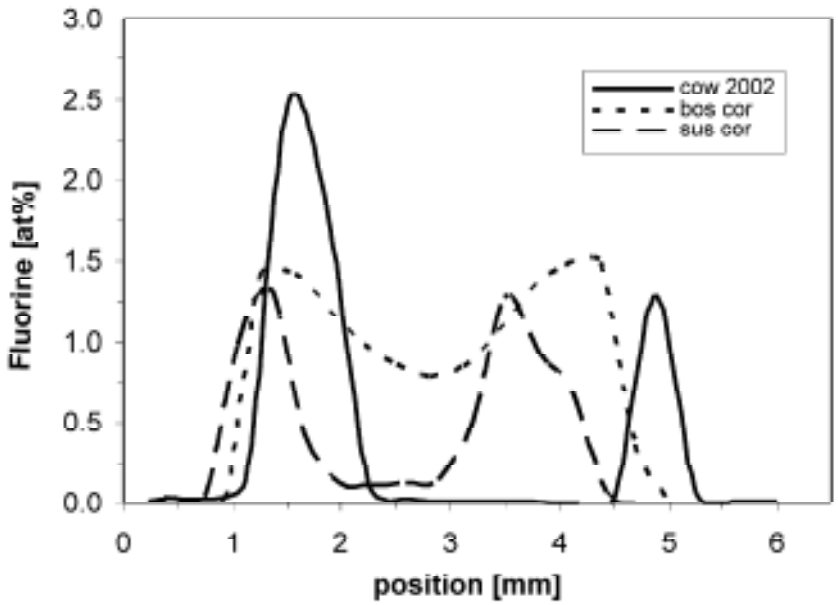

Figure 2. Archaeological bones can show either advanced (bos cor) or undeveloped (sus cor) profile shapes [bovine metacarpus and pig metatarsus, ≈ 3750 BC, settlement on lakeshore, Seeberg BE, Switzerland]. For comparison, an artificially doped modern sample [cow 2002] is shown. Bone surface (left), marrow cavity (right).

As with the total fluorine content, there is no simple relation between the fluorine profile shape and the geological age of an archaeological bone sample and dating is not possible without the knowledge of environmental influence on the diffusion process.

The aim of the ongoing work is to examine the diffusion process by artificial fluorine doping of fresh and archaeological bone samples in order to learn to what extent bone diagenesis influences the behaviour of fluorine in bone and under which conditions dating with fluorine diffusion can be taken into consideration.

Several studies exist on dating methods by Uranium-uptake (Millard et al. 1995, 1996), a process which is also strongly influenced by soil chemistry. Therefore their scientific work deals with very similar problems.

Analytical Technique

The fluorine distribution was determined by PIGE (Proton Induced Gamma Emission), with a focused scanning microprobe proton beam either at the Institute for Particle Physics at the ETH Zürich, CH (6 MV tandem accelerator) or at the Rafter Laboratory in Lower Hutt, NZ (3 MV van de Graaff accelerator). The nuclear reaction observed was $^{19}F(p,\alpha\gamma)^{16}O$, and the resulting radiation was detected with an NaI-detector (at the ETHZ) or with BGO- and HPGe-detectors (at Rafter). Apatite crystals and the geological reference material "G2" were used as standards.

Ca was measured by PIXE (proton induced x-ray emission) to detect irregularities like holes and cracks. A microscope installed at the vacuum chamber allowed visualization of the beam position and analyzed surface (at Rafter). No standard for Ca was determined, as the signal was used to measure the exact position of the bone sample and not for quantitative concentration measurements.

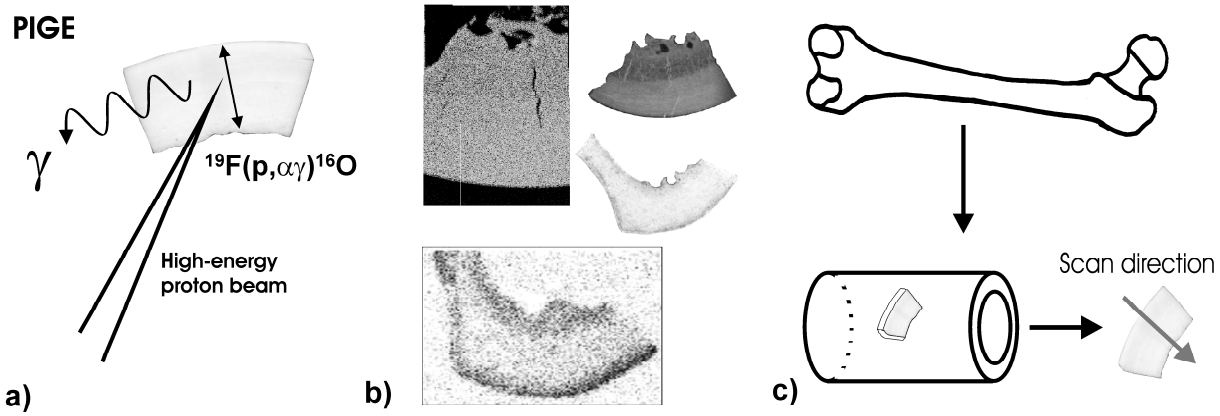

Figure 3. a) analytical technique b) Ca-PIXE (above, with visible crack), and F-PIGE (below) [bos metacarpus ≈ 3750 BC, settlement on lakeshore, Seeberg BE, Switzerland, and human tibia, 1125, Oberbüren BE, Switzerland]. c) sample location.

Only mid sections of long bones were analysed, because the thickness of their bone walls is suitable for profile development (4 - 9 mm). After sawing, surface-smoothing with sandpaper, cleaning in an ultra-sonic bath and careful drying, the samples were fixed on aluminium-plates with carbon tape and analysed. All samples were about 1 cm in length and about 0.5 - 1 g in weight.

An archaeological burial site

First experiments were carried out on human remains from the burial site "Chilchmatt", which is located near the bernese village Büren a. A. This site has had an eventful history. Remains from the Roman period up to late medieval age were found during excavations. In the late middle ages, a huge chapel served as place of pilgrimage, but unfortunately was pulled down after the Reformation in 1528 (Heigold-Stadelmann 2002, Ulrich-Bochsler 1993).

Several hundred skeletons were excavated, and 7 samples were chosen for our studies from three different places within the burial site. The idea was to examine the diffusion profiles of these well preserved samples and correlate them with their reliable radiocarbon-ages. The influence of the environment was expected to be more or less uniform as a single burial site was concerned.

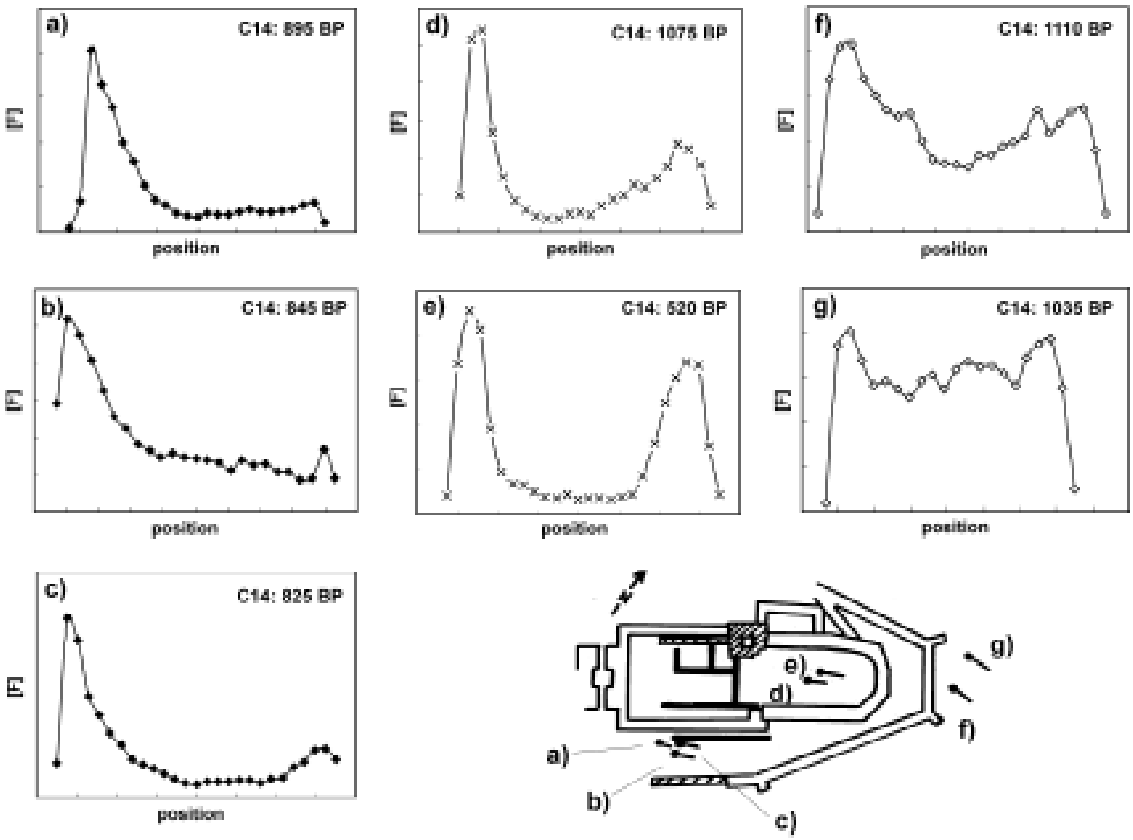

Figure 4. Fluorine profiles and ^{14}C-dating of samples from three different locations within the same burial place [Oberbüren BE, Switzerland: roman wall (a, b, c), chapel (d, e), cemetery (f, g)]. Conventional radiocarbon ages are given as years BP (reference year: 1950) with standard uncertainty ± 50 yrs for all samples.

Our investigations have shown that the profile shape can vary even within a single burial site but stays qualitatively the same for skeletons buried at the same place due to the unique determining environment. No simple relation can be found between the shape of the profile and the age of the sample, indicating that samples of the same age must have undergone various site histories. Soil conditions can vary significantly within a few metres.

The fact that varieties in material characteristics, resulting from environmental conditions, may be the reason for these observations, is verified by studies on teeth.

The physical feature of samples

Teeth show (similar to bones) a very low natural fluorine content during the lifetime of the individual. The concentration increases with the age and ranges from 0.024 to 0.076 wt% of fluorine for dentine (and bone) and from 0.01 to 0.34 wt% for enamel. As the amounts taken up from the soil are much higher, the natural fluorine concentration can be neglected in our studies.

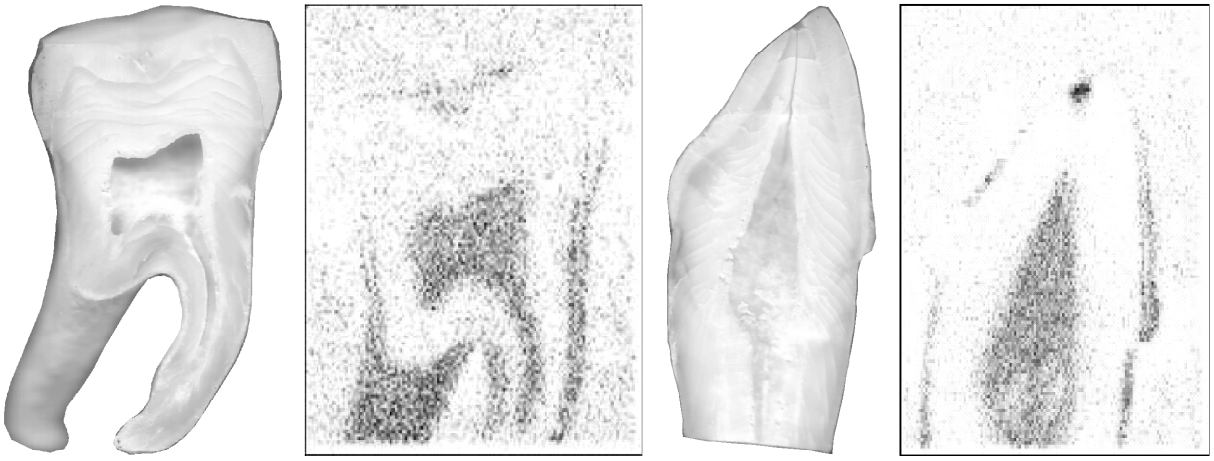

Figure 5. Examples of varying F-uptake due to physical damage (abrasion of enamel) and different material characteristics: crystal sizes are different in enamel, dentine and cementum [Photographs and F-mapping by PIGE, human molar and eyetooth, ≈ 3750 BC, settlement on lakeshore, Seeberg BE, Switzerland].

In archaeological teeth the varying fluorine uptake and concentration in different parts of the samples is due to the different physical character of the tissues. This fact can be seen in archaeological teeth samples, which have been cut into two halves with a diamond saw. In both samples water, which contains fluorine ions, has reached the pulp cavity through the nerve canal by capillary effects, where the fluorine is adsorbed on the surface of the dentine. While fluorine uptake can also be observed on the outer surface of the roots, where either dentine or cementum is the main component, the enamel, which forms the crown of a tooth, shows no uptake at all. A possible explanation is the reduced grain-boundary-diffusion due to the higher crystal size in enamel compared to that in dentine. If the enamel shows damages like natural abrasions due to chewing movements of the individual, a clear increase in fluorine uptake can be observed. Tartar (eyetooth) seems to take up fluorine as well.

Studies in the laboratory: Artificial Doping

In order to evaluate the influence of different parameters on the diffusion process and profile shape, it is necessary to be able to describe the development of the profiles by objective, mathematical methods: This fact leads to the idea of developing test series based on artificial fluorine doping of bone samples and the deriving of the value of *Dt* from the resulting artificially generated profiles by a mathematical fitting procedure.

Profiles were generated by immersing samples of about 0.5 g into aqueous solutions of NaF. The fluorine content, temperature and exposure duration were systematically varied ($[F]_{solution}$ = 10 - 1000 ppm, T = 5°C - 65°C, t = 7 - 21 d). This experiment was carried out with modern as well as with archaeological samples.

An archaeological bone sample shows a significantly different behaviour under the same environmental conditions compared to a fresh bone. As can be clearly seen in figure 6, the diagenetically altered bone matrix of an archaeological sample has also significantly changed the diffusion properties of fluorine, resulting in a higher value of Dt, which would influence dating. The increased F-uptake may be due to a fine network of fissures in the matrix of diagenetically altered bone and the varying porosity.

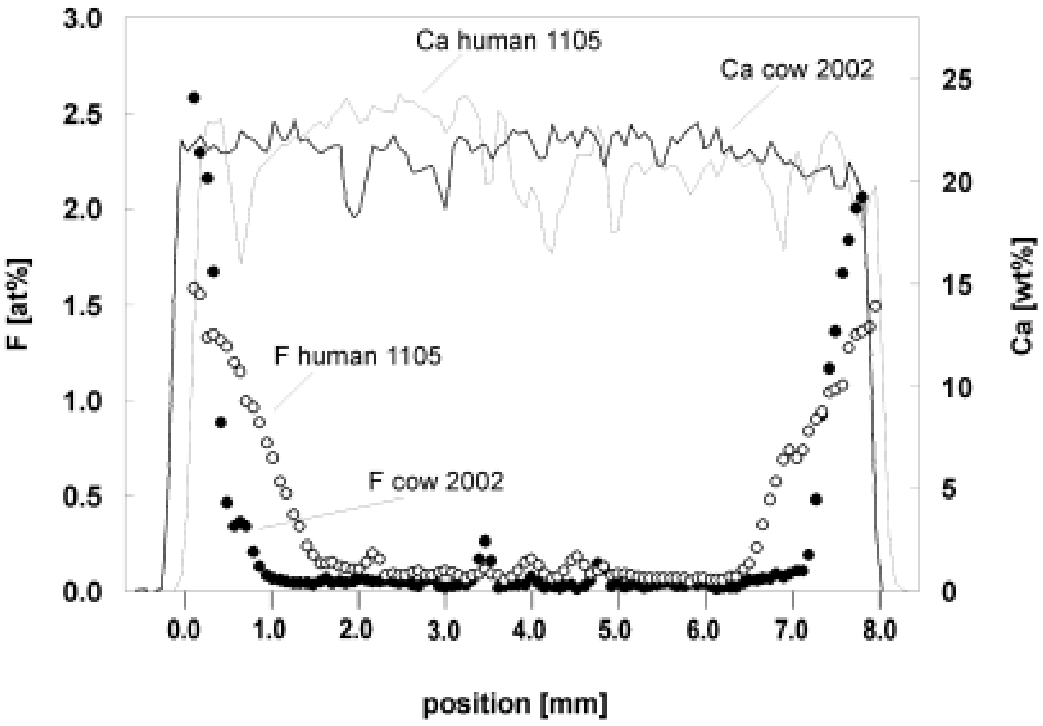

Figure 6. Artificially doped samples of modern (○) and archaeological (●) bovine femur ($[F-]_{solution}$ = 400 ppm, T = 55°C, t = 10 d). Their fluorine profile shapes vary significantly, resulting in a different diffusion constant for the same environmental conditions. Ca was detected by PIXE (lines) to determine the exact position of the samples. The Ca signal of diagenetically altered bones shows more irregularities compared to modern bones.

It has to be assumed that grain-boundary diffusion is not the only possible transport mechanism of ions in a bone, but that a significant amount of aqueous fluorine is transported through microfissures into a sample by capillary effects. In comparison, modern bone that has not yet undergone diagenesis yet, shows under a microscope the typical lamellar structure of the collagen fibrilles and no fissures at all (Enlow/Brown 1956).

Furthermore, bone diagenesis does not only induce fissures in bone, but also a re-crystallisation can be observed (Berna 2004). The different crystal size (as had been shown in teeth) and different porosities in bones either from different animals or different parts of the body may cause increased F uptake. Burnt skeletons that have been buried in soil after a fire disaster show a decreased concentration of fluorine at the edges of the bones compared to the inner parts (Reiche 2004). While burning, bones also undergo a recrystallization process mainly on their surface, and the observation of inverse profiles is explained by the increased size of the crystals in the material.

Mathematical evaluation of the data: Results

The "diffusion length" *Dt* was determined by fitting the data with an error function (erf, figure 7). The resulting curve simulates the result of an undisturbed diffusion process (Kottler 2001).

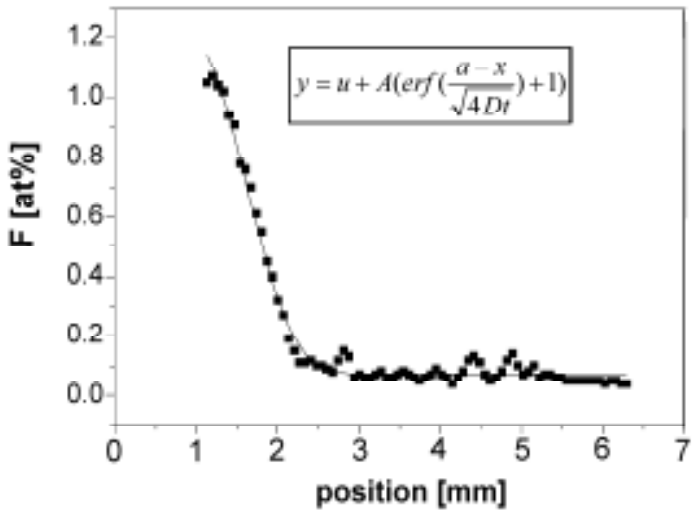

Figure 7. Fitting of measured fluorine data with a mathematical error function allows determination of the value of the "diffusion length" *Dt* for each sample. *A* = fluorine concentration on the bone surface, *a* = position of the edge of the sample, *u* = offset concentration of fluorine.

While in fresh bone samples only undeveloped profiles could be generated under the conditions used (see figure 2), fossil bones showed more developed profiles and some were even completely filled up with fluorine after the treatment with NaF. Highly developed profiles, where the concentration of fluorine in the middle parts of the sample is similar to the one near the surface, can not be fitted with an error function and must be excluded from further analysis. In contrast to the fossil samples all profiles of fresh bones could be evaluated.

Fluorine-profiles generated under laboratory conditions show the expected evolution with time. The diffusion length increases with higher concentration of fluorine in the solution and with increased temperature in the environment. Thus the generation of profiles under laboratory conditions, i.e. the simulation of the natural fluorine uptake, is possible. Furthermore the

fluorine profile reacts to different parameters of a very simple artificial system provided in the laboratory. This is a foundation for further studies on fluorine diffusion in bones.

Table 1. Resulting values of the "diffusion length" *Dt* (in mm^2) for artificially doped modern bone samples [cow 2002]. $[F]_{solution}$ = concentration of fluorine ions in the doping solution. Note the dependence of *Dt* on environmental parameters.

Time [d]	$[F]_{sol}$ = 1000 ppm 35°C	$[F]_{sol}$ = 500 ppm 35°C	$[F]_{sol}$ = 100 ppm 35°C	$[F]_{sol}$ = 500 ppm 65°C	$[F]_{sol}$ = 100 ppm 65°C
7	0.020	0.003	0.001	0.022	0.006
14	0.031	0.018	0.007	0.040	0.009
21	0.037	0.022	0.017	0.059	0.015

Further work

The diffusion constant as a material parameter can be easily derived from the data now available, and further evaluation of measured data and mathematical analysis will reveal the impact of more physical material parameters on fluorine uptake and distribution in bone. First results show that the diffusion constant D as a material constant is different in fresh and fossil bone.

Because the uptake of trace elements into bone is assumed to be an adsorption process, the total amount of fluorine detected in a sample is expected to be dependent on the surface exposed to soil water or the doping solution, respectively, and the pore size and pore distribution in the bone. Experiments will verify these facts under laboratory conditions.

The observed distribution of fluorine in an archaeological bone sample is always the result of site-specific and sample-specific parameters which strongly influence the evolution of the fluorine profile with time during the diffusion process. Thus attempts to develop a fluorine dating method are not straightforward and need further careful investigation.

Acknowledgements

The authors would like to thank Dr. S. Ulrich-Bochsler, Historical Anthropology, University of Bern, and Dr. M. Nussbaumer, Natural History Museum, Bern, for providing of archaeological samples and for the mediation of contacts. Both the research teams at ETH Zürich, Switzerland, and Rafter Laboratory, Lower Hutt, New Zealand, are warmly appreciated for the kind assistance in PIGE and PIXE measurements.
The preparation of the samples for radiocarbon-dating was made in the radiocarbon laboratory of the Geographic Institute, University of Zürich (GIUZ). The analysis was made by AMS (accelerator mass spectrometry) on the tandem-accelerator at the Institute for Particle Physics (IPP), ETH-Hönggerberg, Zürich.

Literature

Berna F., Matthews A., Weiner S. 2004
Solubilities and re-crystallization of bone mineral from archaeological sites: Archaeometric implications. Abstract, 34th International Symposium on Archaeometry, Zaragoza, Spain.

Coote G. E., Sparks R. J. 1981
Fluorine Concentration Profiles in Archaeological Bone: An Application of a Nuclear Microprobe. New Zealand Journal of Archaeology, 3, pp. 21-32.

Coote G. E., Sparks R. J. 1982
Nuclear microprobe measurement of fluorine concentration profiles, with application in archaeology and geology. Nucl. Instr. and Meth. 197 pp. 213-221.

Coote G. E., Nelson P. 1984
Diffusion profiles of fluorine in archaeological bones and teeth : their measurement and application. Archaeology at ANZAAS pp. 22-27.

Coote G. E. 1992
Ion beam analysis of fluorine: Its principles and applications. Nucl. Instr. and Meth. B66 pp. 191-204.

Enlow D. H., Brown S. O. 1956
A Comparative Histological Study of Fossil and Recent Bone Tissues. Part I. Texas J. Sci. (8) pp. 405-443.

Gaschen A., Krähenbühl U., Döbeli M. 2003
Fluorine diffusion in bones and teeth: examination of relevant environmental and material parameters. Ann. Rep. Univ. Bern & PSI p. 48.

Herrmann B., Gruppe G., Hummel S., Piepenbrink H., Schutkowski H. 1990
Prähistorische Anthropologie. Leitfaden der Labormethoden. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Heigold-Stadelmann A. 2002
Das früh- bis hochmittelalterliche Gräberfeld Oberbüren „Chilchmatt“. Eine anthropologische Untersuchung. Diplomarbeit, Seminar für Ur- und Frühgeschichte der Universität Bern.

Kottler C. 2001
Untersuchung der Fluordiffusion in antiken Knochen. Diplomarbeit, Institut für Teilchenphysik, ETH Zürich.
Kottler C., Döbeli M., Krähenbühl U., Nussbaumer M. 2002
Exposure age dating by fluorine diffusion. Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 188 pp. 61-66.

Millard A. R., Hedges R. E. M. 1995
The role of the Environment in Uranium Uptake by Buried Bone. J. Arch. Sci. 22, pp. 239-250.

A diffusion-adsorption model of uranium uptake by archaeological bone. Geochim. Cosmochim. Acta, 60, (12) pp. 2139-2152.

Noll K. 1998
Instrumentelle Bestimmung der Fluoranreicherung auf antarktischen Meteoriten durch NRA (Nuclear Reaction Analysis). Unpublished PhD Thesis, Universität Bern.

Oakley K. P. 1951
The fluorine dating method. Yearbook of physical anthropology 5 pp. 44-52.

Pike A. W. G., Hedges R. E. M., Van Calsteren P. 2002
U-series dating of bone using the diffusion-adsorption model. Geochim. Cosmochim. Acta, 60, (12) pp. 2139-2152.

Pike A. W. G., Hedges R. E. M. 2001
Sample geometry and U uptake in archaeological teeth: implications for U-series and ESR dating. Quatern. Sci. Rev. 20 pp. 1021-1025.

Pike A. W. G., Nielsen-Marsh C., Hedges R. E. M. 2001
Modelling bone dissolution under different hydrological regimes. Archaeological Sciences 1997, Proceedings of the conference held at the University of Durham.

Reiche I. 2004
Pers.comm.

Ulrich-Bochsler S., Gutscher D., Eggenberger P. 1993
Oberbüren, Chilchmatt: Rettungsgrabungen. Medienkonferenz.

Adresses

Annina A.-M. Gaschen, Urs Krähenbühl
Laboratory for Radio- and Environmental Chemistry,
University of Bern
Freiestrasse 3
3012 Bern
Switzerland
Tel: +41 31 631 42 91 (A. Gaschen)
Tel: +41 31 631 42 65 (U. Krähenbühl)
e-mail: annina.gaschen@iac.unibe.ch
e-mail: urs.kraehenbuehl@iac.unibe.ch

Max Döbeli
Institut für Teilchenphysik (IPP)
Schafmattstrasse 20
ETH Hönggerberg, HPK H 32
CH-8093 Zürich
Switzerland
Tel: +41 1 633 20 45
e-mail: doebeli@phys.ethz.ch

Andreas Markwitz, Bernard Barry
Institute of Geological & Nuclear Sciences Ltd.
Rafter Laboratory
30 Gracefield Road
PO Box 31-312
Lower Hutt
New Zealand
Tel: +64-4-570-4657 (A. Markwitz)
Tel: +64-4-570-4661 (B. Barry)
e-mail: a.markwitz@gns.cri.nz
e-mail: b.barry@gns.cri.nz

Eingang: 27. Mai 2004

Eine Untersuchung über die Auswirkungen von Tuberkulose auf Anlagerungsfrequenz und Beschaffenheit der Zementringe des menschlichen Zahnes[1]

Gabriela Caplazi

Zusammenfassung

Die Arbeit beinhaltet die Überprüfung der Frage, ob sich Tuberkulose in der Anlagerungsfrequenz oder in der Qualität der Zementringe bemerkbar macht, wobei eine Überprüfung des ersteren von sehr grossem Interesse für die historische Anthropologie ist. Wie allgemein bekannt, war Tuberkulose in der Bevölkerung früherer Zeiten eine häufige Krankheit. Daher wäre die Zementanalyse zur Altersbestimmung bei einer durch Tuberkulose verursachten Änderung der Anlagerungsfrequenz der Zementringe mit einem sehr grossen Fehlerrisiko behaftet. Ein Einfluss auf die Zementring-Anlagerungsfrequenz konnte im Vergleich mit der Kontrollgruppe ausgeschlossen werden. Die Dünnschnittpräparate zeigten auffällige Ringe einerseits innerhalb und andererseits im äussersten Bereich des Zahnzementes. Jene Art von Veränderungen wurde in der Literatur mit einer Verschiebung des Kalziumstoffwechsels begründet. Bei den helleren Ringen, die in der äusseren Zementschicht beobachtet wurden, könnte ein Zusammenhang mit der Tuberkulose bestehen, denn dieses Phänomen wurde bei der Tbc-Gruppe etwas häufiger und in stärkerer Ausprägung als in der Kontrollgruppe beobachtet. Am ausgeprägtesten wurden diese helleren Ringe im äusseren Bereich des Zementes bei einem Zahn eines Individuums mit Knochentuberkulose festgestellt. Bei den helleren Ringen innerhalb des Zahnzementes gab ein in dieser Arbeit untersuchter rezenter Zahn einen ziemlich eindeutigen Hinweis. Bei diesem Zahn konnte ein hellerer Zementring mit ziemlicher Sicherheit einer Schwangerschaft zugeordnet werden; Derartig gestaltete Ringe wurden auch bei den bodengelagerten Zähnen beobachtet, wobei eine Zuordnung nicht möglich war, weil die Lebensdaten nicht bekannt waren.

In Bezug auf das Geschlecht konnte ein Unterschied festgestellt werden. Frauen zeigten in Bezug auf die Korrelation und die lineare Regression gegenüber den Männern bessere
Werte. Nach Überprüfung mit dem Wilcoxon-Test stellte sich heraus, dass der Unterschied nicht signifikant war.

Aus der Literatur ist bekannt, dass mit zunehmendem Alter das mit der Zementanalyse gewonnene Alter zunehmend vom effektiven Alter abweicht. In der hier vorliegenden Studie konnte dies anhand der grösseren Streuung der Punkte in Bezug auf die lineare Regression beobachtet werden. Werden die Daten in prozentualen Abweichungen angegeben, konnte eine solche Tendenz nicht bestätigt werden.

Die Auswertung der Zahnschnitte wurde manuell und mit Hilfe eines Computerprogramms durchgeführt. Das zweitgenannte übersetzt die Hell-Dunkel-Kontrastierung in eine graphische Funktion, an welcher die Zählung der Peaks (Zuwachsringe) durchgeführt wurde. Das Ziel einer solchen Auswertung wäre, dass auch die Zählung der in eine graphische Funktion übersetzten Zuwachsringe durch den Computer durchgeführt würde. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert werden.

Das Spezielle des in dieser Studie verwendeten Materials besteht darin, dass sowohl die Todesursache wie auch das Todesalter der Individuen bekannt sind. Letzteres begünstigte die Überprüfung der Me-

[1] Diplomarbeit am Anthropologischen Institut der Universität Zürich unter der Leitung von Prof. Dr. Robert. D. Martin, März 2001.

thode in Bezug auf bodengelagerte Zähne, weil sich durch das bekannte Alter der Individuen ein relevanter Vergleich mit Daten von rezenten Zähnen durchführen liess. Dieser ergab eine ähnliche Fehlerabweichung in der Altersschätzung. Somit eignen sich auch bodengelagerte Zähne für diese Art der Altersbestimmung, was die Resultate von Grosskopf (1990) und Wright (1990) bestätigt. Die auf der obengenannten Besonderheit der Skelettsammlung basierende Arbeit bestätigte, dass die Methode allgemein sehr zuverlässig ist, und sie ermöglichte zudem die Überprüfung der Auswirkungen von Tuberkulose auf die Zementringbildung. Die Untersuchungen zeigten, dass sich keine Änderungen in der Anlagerungsfrequenz nachweisen liessen. Dadurch ergibt sich als grundlegende Aussage dieser Arbeit, dass die Altersbestimmung mittels Zahnzement auch bei Zähnen von Tuberkulosekranken anwendbar ist.

Einleitung

Seit den fünfziger Jahren wird die Zahnzementanalyse zur Altersbestimmung angewendet. Anfangs bei Tieren (Land- und Meeressäugetieren) und seit den achtziger Jahren auch beim Menschen, erstmals von Stott et al. (1982). Die Methode beruht darauf, dass jährlich angelagerte Zementringe (Zuwachsringe) im Zahnzement ausgezählt werden und zum Durchbruch des Zahnes, welcher den Beginn der Zementanlagerung darstellt, dazugerechnet werden. Dadurch ergibt sich das Sterbealter des betreffenden Individuums mit einer ungefähren Fehlerabweichung von 10 %. Die historische Anthropologie bedient sich ebenfalls dieser Art der Altersbestimmung, die für sie eine relativ neue Methode darstellt. Sie erlaubt, verglichen mit der herkömmlichen Methode, nämlich der Altersbestimmung anhand des Skelettes, eine genauere Altersschätzung. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei schlechtem Erhaltungsgrad des Skelettes häufig noch Zähne vorhanden sind, welche für eine Altersbestimmung brauchbar sind. Die Zementanalyse wird an Dünnschnitten der Zahnwurzel durchgeführt. Vorgängig muss der Zahn eingebettet und geschnitten werden. Diese Arbeitsgänge sind recht zeitintensiv (zwei bis drei Stunden pro Zahn), was gegenüber der herkömmlichen Altersbestimmungsmethode anhand des Skelettes einen gewissen Nachteil darstellt. Das Ziel dieser Arbeit beinhaltet in erster Linie die Erfassung der Auswirkungen von Tuberkulose auf die Zementringe des menschlichen Zahnes. Dies wird im folgenden genauer beschrieben.

Mögliche Ursachen der Zementringbildung im Zahn

Mit der Auswertung der Zementringe stellt sich natürlich auch die Frage nach deren Ursache, denn diese ist eine wichtige Bedingung für das Verständnis des gesamten Phänomens. Bevor ungeklärte Punkte aufgegriffen werden, sollen nun einige als gesichert geltende Faktoren erläutert werden. Die Zementringe beruhen auf unterschiedlich mineralisierten Strukturen, einer stärker mineralisierten dunklen Bande sowie einer weniger stark mineralisierten hellen Bande. Diese zwei unterschiedlich gestalteten Ringe werden alternierend abgelagert, vergleichbar mit den Jahresringen der Bäume. Anhand von Untersuchungen an Säugetieren konnte gezeigt werden, dass der dunkle, dünnere Ring im Winter und der helle, breitere Ring im Sommer gebildet wird (Geusa et al. 1999), wobei erwähnt werden muss, dass Autoren wie Grue und Jensen (1973) und Wada et al. (1978) die gegenteilige Erfahrung gemacht haben. Je eine dunkle und eine helle Bande entsprechen somit einem Jahr. Die Ursache der Ringbildung wird in den veränderten Lebensumständen gesehen, welche im Zusammenhang mit dem Wechsel der Jahreszeiten stehen (Grue 1976; Grue und Jensen 1979). Spezielle Ausprägungen der Ringe wurden mit der Nahrung, dem Reproduktionszyklus und mit Klimaveränderungen in Verbindung gebracht (Lieberman 1993). Der heutige Mensch steht unter viel geringerem

Einfluss von saisonalen Schwankungen als wildlebende Tiere. Trotzdem weist der Zahnzement Ringe auf, deren Anzahl mit dem Alter korreliert. Die Frage, warum diese unterschiedlich mineralisierten Strukturen entstehen, ist nach wie vor nicht beantwortet. Beim Menschen scheinen metabolische Faktoren bei der Anlagerung der Zementringe von Bedeutung zu sein (Geusa et al. 1999), unter anderem wird die Aktivität eines „Cementum-derived growth factor" diskutiert (Yonemura et al. 1993). Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Altersbestimmung mittels Zahnzement beim Menschen sind durchgeführt worden, die wichtigsten Arbeiten und ihre Resultate werden im nächsten Abschnitt erläutert.

Untersuchungen zur Altersbestimmung mittels Zuwachsringen beim Menschen

Wie vorher erwähnt, hatte Stott et al. (1982) als erster beim Menschen die Altersbestimmung mittels Zuwachsringen angewendet. Er stellte eine relativ geringe Fehlerabweichung von 0.5 bis 2 Jahren fest. Eine erste Überprüfung der Methode wurde im grösseren Rahmen von Condon und Charles (1983) durchgeführt. Sie stellten eine höhere Fehlerabweichung fest. Condon et al. (1985) versuchten einige methodische Probleme, die sie in ihrer ersten Arbeit angetroffen hatten, zu lösen. In einem weiteren Artikel erwähnten Condon et al. (1986) die Ermittlung des Sterbealters mit Hilfe einer Regressionslinie. Naylor et al. (1985) beschäftigten sich mit Techniken zur Vorbereitung und Präparation der Zähne. Die Frage, ob die Zahnzementanalyse zur Altersbestimmung angewendet werden kann, und in welchen Fällen diese Methode zu Fehlergebnissen führt, wurde von Stein und Corcoran (1994) behandelt. Weiter untersuchten Kvaal und Solheim (1995) ob die Zuwachsringe jährlich angelagert werden. Alle oben genannten Autoren befürworten die Altersbestimmung mittels Zementringen.

Lipsinic et al. (1986) und Miller et al. (1988) hingegen konnten nur eine zu geringe Ringzahl feststellen. Miller verwendete im Gegensatz zu anderen Untersuchungen aber relativ dicke Zahnschnitte (350 μm), was einen Grund für das bedeutend schlechtere Resultat darstellen könnte. Das Material der oben beschriebenen Untersuchungen stammt einerseits von Leichen, andererseits wurden frisch extrahierte Zähne verwendet. Grosskopf (1989, 1990) arbeitete jedoch mit bodengelagerten und verbrannten Zähnen, auch Wright (1990) und Cipriano-Bechtle et al. (1996) untersuchten archäologisches Material. Kagerer (2000) beschäftigte sich mit der Auswirkung von Krankheiten auf die Zementringbildung und zeigte, dass sich während dem Zahndurchbruch ein speziell strukturierter Ring bildet. Generell kann gesagt werden, dass bis anhin keine Standardisierung in der Altersbestimmungsmethode mittels Zahnzement erreicht worden ist. So herrscht Uneinigkeit hinsichtlich der Vorbereitung der Zähne, der Dekalzifizierung und der Anfärbung. Charles et al. (1986) hatten die besten Resultate von demineralisierten und angefärbten Zahnpräparaten erhalten. Andere Autoren hingegen lehnen solche aufwendigen Verfahren ab, so z.B. Grosskopf (1990) und Kagerer (2000). Auch bezüglich der Frage, ob sich die Zementringe in horizontalen oder vertikalen Schnitten besser darstellen und auszählen lassen, herrschen geteilte Meinungen. In der mikroskopischen Auswertung der Präparate wurden bei gefärbten Zahnschnitten die Hellfeldmikroskopie (Charles et al. 1986; Condon et al. 1986; Lipsinic et al. 1986; Naylor et al. 1985) oder Fluoreszenzmikroskopie (Kvaal and Solheim 1995) angewendet. Naylor et al. (1985) verwendeten zudem die Interferenzmikroskopie und konnten im Vergleich mit der Hellfeldmikroskopie sogar etwas bessere Resultate verzeichnen. Bei ungefärbten Präparaten wurde die Phasenkontrastmikroskopie angewendet (Grosskopf 1990; Cipriano-Bechtle et al. 1996; Kagerer 2000). In einigen Punkten sind sich aber die meisten Autoren einig, nämlich, dass Prämolaren oder Canini für diese Art der Altersbestimmung am geeignetsten sind, dass zur ermittelten Ringzahl das

Durchbruchsalter des Zahnes dazugerechnet werden soll, dass die Auszählung der Zementringe im mittleren bis oberen Drittel der Wurzel am einfachsten ist, dass gesunde Zähne die besten Resultate liefern, und dass Zähne von Individuen, die jünger als 50 Jahre sind, eine genauere Altersschätzung erlauben. Condon et al. (1986) fanden einen Geschlechtsunterschied in der Altersschätzung. Zähne von Frauen lieferten ihren Ausführungen zufolge bessere Resultate. Andere Autoren wie Kvaal and Solheim (1995) und Kagerer (2000) konnten diesen Unterschied nicht bestätigen. Kagerer (2000) erhielt in seiner Arbeit sogar bessere Resultate von Männern. Ein weiterer Punkt wurde von Charles et al (1986) wie auch von Kvaal and Solheim (1995) erwähnt, nämlich, dass die Auszählung der Ringe durch verschiedene Personen zu unterschiedlichen Resultaten führte. Generell scheint das Auszählen der Ringe einen heiklen Punkt darzustellen.

Ziel dieser Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Auswirkungen einer chronischen Krankheit, nämlich der Tuberkulose, auf die Ringbildung zu prüfen. In einer vorgängigen Studie von Kagerer (2000) sind die Auswirkungen von verschiedenen Krankheiten untersucht worden. Dabei zeigte sich, dass Ereignisse, die in den Kalziumstoffwechsel eingreifen (Schwangerschaften und Vorfälle, die das knöcherne Skelett betreffen), gut erkennbare Spuren im Zahnzement hinterlassen. Der eigentliche Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Erfassung der Anlagerungsfrequenz der Zementringe in den Zähnen von Tuberkuloseopfern. Dabei wird die Anlagerungsfrequenz der Zähne von Individuen, die an Tuberkulose gestorben sind, mit derjenigen von Individuen, die einem akuten Vorfall erlagen, verglichen. Kann kein Unterschied in der Anlagerungsfrequenz festgestellt werden, dann würde dies bedeuten, dass die Altersbestimmungsmethode mittels Zahnzement in Bezug auf Tuberkulosefälle anwendbar ist. Dies ist in Anbetracht dessen, dass in der früheren Bevölkerung ein Grossteil der Menschen an Tuberkulose erkrankte, für die Art der Altersbestimmung sehr wichtig, weil sonst die Methode vor allem in der historischen Anthropologie nur begrenzt einsetzbar wäre.

Wie im oberen Abschnitt erwähnt wurde, hatte Grosskopf (1990) als erste eine grössere Anzahl von bodengelagerten Zähnen ausgewertet. Sie konnte zeigen, dass Zähne unabhängig von der Liegedauer und dem Liegemilieu für eine Altersdiagnose verwendet werden können. Eine eigentliche Überprüfung der Methode in Bezug auf archäologisches Material konnte aber nicht durchgeführt werden, weil lediglich das morphologisch bestimmte Alter der Individuen bekannt war. Das Material dieser Arbeit beinhaltet bodengelagerte Zähne bekannten Alters. Daher kann eine genaue Überprüfung der Methode in Bezug auf bodengelagerte Zähne vorgenommen werden.

Weitere Ziele der Arbeit

Es wird der Versuch unternommen, die Zementringe nicht direkt, sondern erst nach Umsetzung in eine graphische Funktion auszuzählen. Diese Art des Auszählens wird mit der herkömmlichen Art verglichen und die Anwendungsmöglichkeit zur Erfassung der Beschaffenheit der Zementringe diskutiert.

Von Condon et al. (1986) und Kagerer (2000) wurde ein Unterschied in der Effizienz der Methode in Hinsicht auf das Geschlecht festgestellt; daher wird überprüft, wie weit sich ein Geschlechterunterschied in dieser Studie manifestiert.

Wie oben erwähnt, zeigen Zähne von älteren Individuen eine schlechtere Altersschätzung. Es wird untersucht, wie weit sich dies auch in dieser Studie zeigt.

Anatomie der menschlichen Zähne

Aufbau der Zähne

Sie besitzen Wurzeln, die im Kiefer verankert sind (thekodont).
Die einzelnen Zähne eines Gebisses sind unterschiedlich geformt (heterodont).
Es findet ein Zahnwechsel statt (diphydont).

Der Zahn besitzt eine Zahnkrone (Corona dentis) und eine Wurzel (Radix). Der Zahnhals (Cervix dentis) verbindet die Zahnkrone und die Wurzel. Im Zahninnern befindet sich die Pulpakammer (Cavitas dentis). Sie besteht aus Bindegewebe mit eingelagerten Nerven und Gefässen. An ihrer Oberfläche findet man Zahnbeinbildner (Odontoblasten). Die Zahnkrone wird vom Zahnschmelz (Enamelum), die Wurzel vom Zement (Cementum) überdeckt. Unter dem Schmelz-Zementmantel findet sich das Zahnbein (Dentinum).

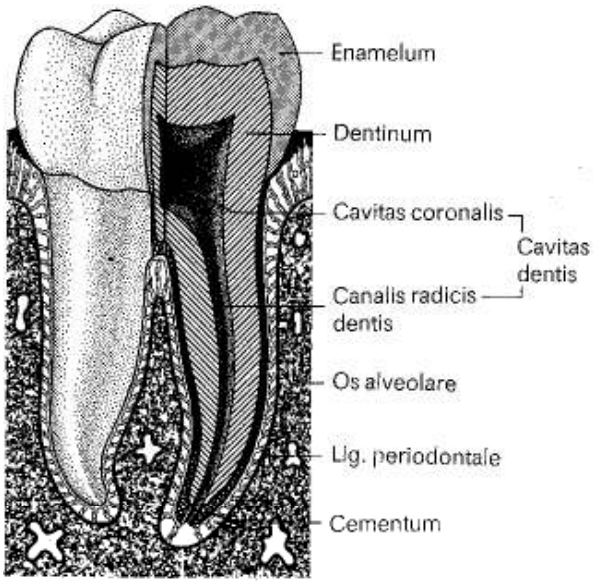

Abb. 1: Aufbau des Zahnes (Schumacher et al. 1990).

Zahnhalteapparat

Die an der Verankerung des Zahnes beteiligten Strukturen bilden das Periodontium.
Dieses besteht aus:

- dem Zahnzement (Cementum)
- dem Periodontalligament (Ligamentum periodontale)
- dem Alveolarknochen (Os alveolare)
- dem Zahnfleisch (Gingiva)

Aufbau des Gebisses

Das Gebiss eines Erwachsenen besitzt in der Regel 32 Zähne, das Milchgebiss 20 Zähne. Diese reihen sich im Ober- und Unterkiefer dicht aneinander und bilden die zwei Zahnbögen (Arcus dentales). Das Dauergebiss besteht aus verschiedenen Zahntypen: zwei Schneidezähnen (Dentes incisivi), einem Eckzahn (Dentes canini), aus zwei Vormahlzähnen (dentes premolares) und aus drei Mahlzähnen (Dentes molares) (Schumacher et al. 1990).

Wurzelzement

„Wurzelzement ist ein mineralisiertes, aber uneinheitliches Bindegewebe, das die äussere Oberfläche der Zahnwurzel bedeckt“ (Schroeder 2000). Es ist für die Befestigung des Zahnes in der Alveole verantwortlich und ist an adaptiven und reparativen Prozessen beteiligt. Eine strukturbiologische Ähnlichkeit zwischen gewissen Zementformen und dem Knochen ist erkennbar (Cate 1994). Das Zement lagert sich einer weiteren Hartsubstanz, dem Dentin, auf und ist im Gegensatz zum Knochen nicht vaskularisiert. Drei Zelltypen, aus dem Ektomesenchym entstanden, sind für die Entwicklung des Zementes verantwortlich:

- Die Zementoblasten: Es sind Zellen, die den Osteoblasten ähnlich sind. Sie gehören zu den Protein- und Polysaccharid synthetisierenden Zellen.

- Die Zementozyten: Aus Zementoblasten, welche im Laufe der Zementogenese eingeschlossen werden, entstehen Zementozyten. Die Aktivität der Zementozyten ist niedriger als die der Zementoblasten. Sie besitzen lange Fortsätze, die mit anderen Zementozyten in Kontakt stehen. Sie synthetisieren kollagene Fibrillen und Grundsubstanz und übernehmen resorptive Funktionen. Man findet sie ausschliesslich in bereits gebildeten Schichten des zellulären Eigenfaserzementes. In der Struktur und der Funktion sind sie den Osteozyten sehr ähnlich.

- Fibroblasten: Sie bilden den azellulären Fremdfaserzement, und man findet sie in unmittelbarer Nachbarschaft zur Wurzeloberfläche, assoziiert mit den senkrecht einstrahlenden Kollagenfasern (Schroeder 2000).

Es werden 4 Typen von Zement beschrieben, die sich in der Morphologie und der Funktion voneinander unterscheiden:

- Azellulär-afibrilläres Zement: Es enthält weder Zementozyten noch kollagene Fibrillen.

- Azelluläres Fremdfaserzement: Es wird von den Fibroblasten gebildet und besteht ausschliesslich aus dicht gepackten, von aussen einstrahlenden kollagenen Fibrillen (Sharpeyschen Fasern). Es besitzt ein gleichmässiges Strukturbild, das nur durch zur Zementoberfläche parallel verlaufenden Linien, den Wachstumslinien, unterbrochen wird.

- Zelluläres Eigenfaserzement: Es besteht aus gebündelten, parallel zur Wurzeloberfläche verlaufenden zementeigenen Fasern. Zellen, wie die Zementozyten, können in variablen Dichten darin enthalten sein. Es wird von Zementoblasten gebildet und ist auch an reparativen Prozessen beteiligt.

- Zelluläres Gemischtfaserzement: Es wird aus alternierend aufeinandergelagerten Schichten aufgebaut, die aus azellulärem Fremdfaser- und zellulärem Eigenfaserzement bestehen. Es sind von aussen einstrahlende wie auch zementeigene Fasern enthalten (Schroeder 2000).

Azelluläres Fremdfaserzement

- Entstehung: Azelluläres Fremdfaserzement bildet sich prä- und posteruptiv. Im Verlaufe der Wurzelbildung wird an der Oberfläche eine unverkalkte Dentinmatrix aufgebaut. Darauf entsteht zunächst ein kurzer Rasen aus kollagenen Fibrillen, welcher in koronaler Richtung an Dichte zunimmt. Dieser Rasen entspricht der Matrix des Fremdfaserzementes, die später verkalkt. Die Fibrillenbündel werden verlängert und am Ende des Zahndurchbruches mit gingivalen und desmodontalen Fasern verknüpft. Dieser ersten Schicht werden posteruptiv noch weitere Schichten aufgelagert, welche im späteren Verlauf verkalken und nachher aus dichtgepackten Bündeln kollagener Fibrillen und wenig Grundsubstanz bestehen. Bei der Mineralisation des azellulären Fremdfaserzementes werden Kristalle gebildet, die aus Hydroxylapatit

bestehen. Die Dickenzunahme ist das Produkt der Mineralisation der Wurzeloberfläche benachbarter desmodontaler Fasern. Der azelluläre Fremdfaserzement nimmt mit einer Geschwindigkeit von 0.01 bis 0.1 µm/ Tag an Dicke zu. Es wächst also sehr langsam.

- Lokalisation: Im zervikalen Drittel der Wurzeloberfläche kommt ausschliesslich azelluläres Fremdfaserzement vor. In der apikalen Region wird azelluläres Fremdfaserzement erst sekundär gebildet und dem zellulären Gemischtfaserzement aufgelagert.

- Funktion: Es verankert den Zahn in der Alveole.

- Struktur: Das azelluläre Fremdfaserzement zeigt eine faserige und geschichtete Struktur. Die Abgrenzung zum Dentin ist nicht genau bestimmbar, es zeigt sich jedoch in der Nähe der Dentin-Zement-Grenze eine auffällig helle Linie; diese wird mit dem Zahndurchbruch in Beziehung gebracht (Kagerer 2000). Die regelmässig verlaufenden Fibrillen und streng angeordneten Kristalle geben dieser Zementart ein monotones Aussehen. Einzig die parallel zur Oberfläche verlaufenden Linien (Anlagerungs- oder Wachstumslinien) unterbrechen diese gleichmässige Struktur. Dadurch, dass das Zement schubweise wächst, entstehen diese Wachstumslinien, die den Ruhephasen (Kay et al. 1984) zwischen zwei Zementbildungsperioden entsprechen und eine sehr dichte Struktur zeigen (Schroeder 2000). Sie erscheinen in der Phasenkontrastmikroskopie als schwarze, von breiteren helleren Banden umgebene Linien (Provenza and Seidel 1986). Einer äusseren, meist deutlich helleren Linie folgt gegen die Oberfläche hin noch eine organische Matrix, welche mehr oder weniger mineralisiert ist (Kagerer 2000).

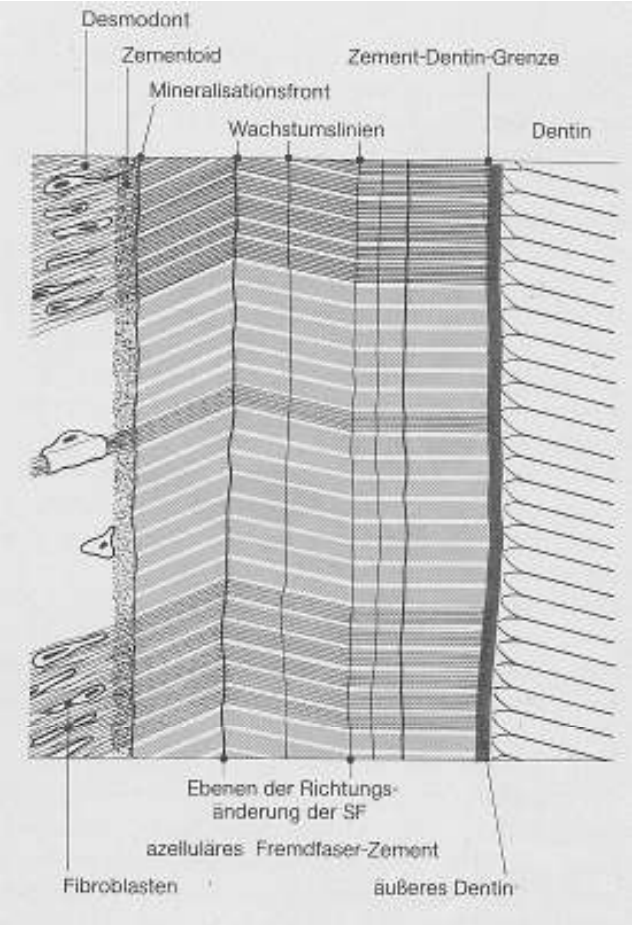

Abb. 2. Strukturschema des azellulären Fremdfaserzementes, mit den Zuwachsringen (Wachstumslinien) (Schroeder 2000).

Wie schon erwähnt, besteht eine strukturbiologische Ähnlichkeit zwischen Knochen und Zahnzement (Schroeder 2000). Daher sind Hormone, die den Knochenaufbau und –abbau regulieren, sicherlich auch an Prozessen im Zahnzement beteiligt.

Physiologie des Knochens

Die extrazelluläre Matrix des Knochens besteht aus Kollagenen und daran gebundenen Kalzium- und Phosphationen, die als Hydroxylapatit vorliegen. Die Physiologie dieser Matrix wird von Hormonen und Vitaminen, die den Kalziumstoffwechsel regulieren, beeinflusst. Der Organismus versucht eine Homöostase des Kalziumspiegels im Blut zu erhalten, weil Kalzium für Prozesse wie Blutgerinnung, Zellteilung, Regulation der Muskelkontraktion und Erhaltung des Membranpotential von grosser Bedeutung ist. Die Erhaltung dieses Gleichgewichts erfolgt mit Hilfe von Parathormon, Calcitonin und Vitamin D.

Parathormon (PTH)

Dieses Hormon wird in der Nebenschilddrüse gebildet und beim Absinken des Kalziumspiegels ausgeschüttet. Es bewirkt eine Demineralisation des Knochens und erhöht die Osteoklastentätigkeit. In der Niere erhöht das PTH die Rückresorption des Kalziums, zudem stimuliert es die Biosynthese von Vitamin D.

Calcitonin (CT)

Dieses Hormon wird in den C-Zellen der Schilddrüse gebildet und senkt den Kalziumspiegel im Blut. Es bewirkt eine Mineralisation des Knochens und fördert die Osteoblastenaktivität (Hadley 1992).

Vitamin D

Vitamin D3 (Cholecalciferol) bildet sich in der Haut von Tieren. Vitamin D2 (Ergocalciferol) unterscheidet sich nur wenig vom Vitamin D3, es entsteht durch UV- Strahlung aus dem pflanzlichen Ergosterin. D2 und D3 werden erst nach dem Umbau in der Leber und der Niere aktiv. Sie bewirken einen Anstieg der Kalziumkonzentration im Blut, indem sie die Aufnahme von Kalzium im Darm und die Freisetzung von Kalzium aus den Knochen fördern (Voet und Voet 1992).

Es gibt noch weitere Hormone, die auf die Mineralisation des Knochens wirken.

Cortisol

Dies ist ein Nebennierenrindenhormon, das unter anderem bei Stress ausgeschüttet wird. Es bewirkt zudem einen Verlust von Knochenmatrix und fördert die Demineralisation des Knochens (Norman and Litwack, 1997).

Auch Katecholamine (Adrenalin und Noradrenalin) nehmen Einfluss auf den Mineralisationsstoffwechsel. So wird z.B. in Stressituationen das vegetative Nervensystem in Richtung sympathischer Stoffwechsellage verschoben, was zu einer verminderten Mineralisation des Knochens und zu einer Mobilisation der Mineralien aus dem Knochen führt (Kagerer 2000).

Tuberkulose (Tbc)

Die Tuberkulose ist eine weltweit verbreitete Infektionskrankheit, deren Häufigkeit im Wesentlichen mit sozialen Faktoren im Zusammenhang steht.

- Erreger:
Der Erreger ist das *Mycobacterium tuberculosis*, in selteneren Fällen das *Mycobacterium bovis*.

- Infektion:
Die Übertragung der Tuberkulose erfolgt meistens durch Tröpfcheninfektion. Infektionsquelle ist vor allem der erkrankte Mensch, ein infiziertes Rind oder ein Haustier.

Pathogenese: Es können zwei Tbc-Formen unterschieden werden:

1. Primäre Tbc: Diese Form wird vorwiegend im Kindesalter beobachtet. Sie verläuft eher symptomarm.

2. Postprimäre Tbc: Es ist eine Streuung der Tuberkelbakterien im Organismus entweder aus einem Primärherd oder aus einem alten Herd zu beobachten. Frühform: Es sind Herde im ganzen Organismus zu finden. Ein schweres Krankheitsgefühl mit hohem Fieber ist vorhanden. Spätform: Sie zeigt eine Knochen- oder Gelenkstuberkulose, und weitere Organe wie die Niere können betroffen sein (Hildebrandt 1994).

Geschichte

Erste Veränderungen am Skelett, die eindeutig mit der Tuberkulose in Zusammenhang gebracht werden können, stammen aus dem Neolithikum. Tuberkulosefälle wurden danach immer wieder beobachtet und auch beschrieben, wie zum Beispiel von Autoren, welche Hippokrates zitierten. Im Mittelalter herrschten in England und auf dem europäischen Kontinent feudale Herrschaftsformen vor. Die Menschen der niederen Schichten betätigten sich hauptsächlich als Bauern und lebten in Familienverbänden, die wenig soziale Kontakte mit anderen Gruppen pflegten. Daher konnte sich die Tuberkulose nur begrenzt ausbreiten. Im 17. Jahrhundert konnte ein deutlicher Anstieg der Tuberkulosefälle beobachtet werden, der mit dem Übergang vom bäuerlichen zum städtischen Leben erklärt wird. Ein weiterer Grund wird in der vermehrten Milchproduktion für die oberen Schichten gesehen. In den Städten entstanden Kuhställe, in denen Tiere auf engstem Raum untergebracht wurden. Dadurch erhöhte sich die Ansteckungsgefahr für Infektionskrankheiten wie die Tuberkulose. Diese betraf sowohl die Rinder untereinander wie auch Mensch und Rind. Im frühen 19. Jahrhundert wurde die Tuberkulose zur häufigsten Todesursache (Aufderheide and Rodrigues-Martin 1998). In Basel registrierte man jährlich 432 Todesfälle pro 100'000 Einwohner aufgrund von Tuberkulose (Burckhard 1908).

Die Forschung versuchte der Krankheit auf den Grund zu gehen. 1882 identifizierte Koch das *Mycobacterium tuberculosis*. Dadurch wurde der infektiöse Charakter der Tuberkulose erkannt, und die Behandlung und Prävention dementsprechend gestaltet. Um die Jahrhundertwende entstanden die ersten Sanatorien. Durch die Anwendung des Antibiotikums Streptomycin konnten die Tuberkulosefälle ab 1946 weiter reduziert werden (Aufderheide and Rodrigues-Martin 1998). Heute liegen die Tuberkuloseneuerkrankungen in den Entwicklungsländern bei 200 und in den westlichen Ländern bei 30 neuen Fällen pro Jahr und pro 100'000

Einwohner (Hildebrandt 1994). Die Krankheit konnte sich vor allem im Zusammenhang mit Aids wieder vermehrt ausbreiten.

Material und Methoden

Material

Die Zähne dieser Studie stammen aus der Skelettsammlung des Naturhistorischen Museums Basel, welche freundlicherweise von der Universität Basel für wissenschaftliche Zwecke auch anderen Universitäten zur Verfügung gestellt wird. Die Individuen dieser Sammlung stammen aus dem Spitalfriedhof St. Johann. Sie alle waren im Bürgerspital von Basel gepflegt worden und starben auch dort; meist waren es sehr arme Leute. Deren Leichen hatten vorerst der Wissenschaft und der universitären Lehre zu dienen (Etter et al. 1993). Unter Professor Jung wurde jeder Todesfall in einem Sterberegister des Spitals eingetragen. Auf dem Gebiet des ehemaligen Spitalfriedhofs entstand später eine Gärtnerei, diese gestaltete man in den Jahren 1988/89 zu einem Park um. Daher wurden die menschlichen Gebeine gehoben und konnten dank dem Sterberegister in den meisten Fällen identifiziert werden (Etter et al. 1993). Aus den zudem vorhandenen Krankengeschichten können weitere Informationen bezogen werden. Für diese Arbeit war das Todesalter wie die Krankheit, an der die betreffenden Menschen gestorben sind, von Interesse.

Der hier präsentierten Untersuchung liegen insgesamt 49 Zähne von 14 Frauen und 35 Männern zugrunde. Die Geschlechterverteilung ist nicht ausgewogen, weil schon in der Ursprungssammlung der Anteil der Männer zweimal höher ist (Etter et al. 1993). Es wurden Prämolaren verwendet, weil diese weniger variable Durchbruchszeiten haben (Grosskopf 1990), vorwiegend Prämolaren des Unterkiefers, denn die des Oberkiefers sind zum Teil zweiwurzelig, was die Zählung in gewissen Bereichen komplizierter macht (Kagerer 2000). In dieser Serie wurden vier Individuen zwei Zähne, einem weiteren drei Zähne entnommen. Das Sterbealter der Individuen liegt zwischen 16 und 60 Jahren. 29 Zähne stammen von Individuen, die an Tuberkulose verstorben sind, 20 Zähne von solchen, die nicht an einer chronischen, auszehrenden Krankheit gestorben sind; diese bilden die Kontrollgruppe. In der Tabelle 1 sind die Todesursachen der einzelnen Individuen aufgeführt.

Zu erwähnen ist, dass zusätzlich noch ein rezenter Zahn untersucht und auf qualitative Veränderungen geprüft wurde. Diese konnten einem Ereignis (Schwangerschaft) zugeordnet werden, weil die Lebensdaten der Person bekannt waren.

Methode

In Bezug auf die Methodik hielt man sich zum grössten Teil an die Angaben der Gruppe von G. Grupe von der Universität München, weil Grupe und ihre Mitarbeiter über eine langjährige Erfahrung im Umgang mit dieser Altersbestimmungsmethode verfügen. Sie untersuchten sowohl rezente wie auch bodengelagerte Zähne.

Tab. 1. Angaben zu den untersuchten Zähnen.

Grab-Nummer	Zahntyp (Prämolar)	Todesursache	Sterbealter (effektives Alter in Jahren)	Geschlecht
8	P2 UK re	Tbc	25	männlich
9	P1 UK li	Tbc	30	männlich
11	P2 UK li	Tbc	21	männlich
14	P1 UK re	Tbc	38	männlich
17 1. Zahn	P2 UK li	Tbc	29	männlich
17 2. Zahn	P OK	Tbc	29	männlich
56	P1 UK li	Niederkunft	32	weiblich
83	P2 UK re	Tbc	42	männlich
90	P1 UK li	Tbc	57	männlich
91	P1 UK li	Tbc	19	männlich
94	P2 UK re	Tbc	38	männlich
97	P2 UK li	Tbc	21	weiblich
106	P2 UK li	Nervenfieber (Typhus abdominalis)	28	männlich
181	P2 UK li	Tbc	22	männlich
211	P2 UK re	Tbc	21	männlich
239 1. Zahn	P	Tbc	43	weiblich
239 2. Zahn	P	Tbc	43	weiblich
251	P2 UK re	Nervenfieber (Typhus abdominalis)	24	männlich
266	P2 UK li	Tbc	38	weiblich
269	P2 UK re	Tbc	22	männlich
285	P2 OK li	Beinfrass	39	männlich
311 1. Zahn	P1 UK li	Nervenfieber (Typhus abdominalis)	28	männlich
311 2. Zahn	P2 OK li	Nervenfieber (Typhus abdominalis)	28	männlich
317	P2 UK re	Herzentzündung	41	weiblich
349	P1 UK li	Tbc	45	männlich
421	P1 UK li	Brandwunde (Unfall)	50	männlich
426	P2 UK re	Tbc	57	männlich
432 1. Zahn	P2 UK li	Verletzung der Eingeweide	33	männlich
432 2. Zahn	P2 UK re	Verletzung der Eingeweide	33	männlich
432 3. Zahn	P1 OK li	Verletzung der Eingeweide	33	männlich
557 1. Zahn	P1 UK re	Herzleiden	48	weiblich
557 2. Zahn	P2 UK li	Herzleiden	48	weiblich
578	P2 UK re	Tbc	40	weiblich
767	P2 OK re	Rotlauf	53	männlich
841	P2 UK li	Tbc	37	männlich
1100	P1 OK re	Tbc	60	männlich
1203	P2 UK li	Tbc	48	männlich
1224	P2 UK li	Tbc	21	männlich
1300	P2 UK re	Tbc	45	männlich
1301	P1 OK li	Tbc	16	weiblich
1404	P OK	Tbc	44	weiblich
1412	P2 OK re	Skrophulose (Tbc)	22	weiblich
1639	P2 UK li	Herzvergrösserung	34	männlich
1650	P2 UK re	Tbc	37	männlich
1704	P2 UK re	Hirnerweichung	50	männlich
1720	P2 UK li	Herzfehler	27	weiblich
1739	P2 UK li	Luftröhrenerweiterung	31	männlich
1813	P1 UK re	Entzündung des Felsenbeins	28	männlich
1830	P	Gebärmutterentzündung	26	weiblich

Herstellung der Dünnschnittpräparate

Einbettung: Die nicht vorbehandelten Zähne wurden in Kunststoff (Biodur) eingebettet Dieses Material besteht aus der Grundsubstanz E12 und dem Härter E1. Die beiden Stoffe wurden im Verhältnis 100:28 gemischt. Die Zähne wurden einzeln in beschriftete Plastikbehälter von 5 cm Durchmesser und 2 cm Höhe gelegt und mit dem Biodurgemisch übergossen, bis sie vollständig bedeckt waren. Die Präparate wurden anschliessend zwei Tage bei -0.8 bar vakuiert. Dadurch konnten Luftblasen entfernt werden, und die Zähne wurden optimal vom Kunststoff umgeben. Die Proben wurden für 24 Stunden bei 50°C (Kagerer 2000) oder während fünf Tagen bei Zimmertemperatur ausgehärtet (Martelli 1999).

Schneiden: Schliesslich wurden die Präparate auf einen Sockel geklebt, damit sie sich in der Innenlochsäge (Leica SP 1600) einspannen liessen. Es wurden mindestens fünf 60-100µm dicke Horizontalschnitte im Bereich des oberen bis mittleren Drittels der Zahnwurzel angefertigt. Die Darstellung der Zuwachsringe im zervikalen Bereich der Wurzel ist zwar besser, jedoch ist die Fehlerquote, falls diese Bereiche nicht mehr desmodontal bedeckt sind, signifikant erhöht (Kagerer 2000). Nachdem die Schnitte getrocknet waren, wurden sie mittels Eukitt auf einem Objektträger fixiert und mit einem Deckglas abgedeckt. Die so entstandenen Dauerpräparate musste man noch einen Tag trocknen lassen.

Auswertung der Dünnschnittpräparate

Mikroskopieren

Zur Auswertung der Zahnschnitte wurde vor allem die Phasenkontrastmikroskopie angewendet (Zeiss Standardmikroskop). Diese Art der Mikroskopie ist für ungefärbte Präparate geeignet, denn durch die unterschiedlichen Brechungsindices der enthaltenen Strukturen werden Phasendifferenzen erzeugt, welche sich als Helligkeitsunterschiede erkennen lassen (Böck et al. 1989). Die Proben wurden anfangs bei einer 25fachen Vergrösserung (10er Objektiv) betrachtet, um die allgemeine Qualität der Zementschicht zu begutachten. Häufig waren schon bei dieser Vergrösserung Zementringe sichtbar, und es liess sich bereits erkennen, welche Stellen für die weitere Auswertung in Betracht gezogen werden konnten. Dabei wurden breitere Bereiche bevorzugt, weil die schmaleren Stellen häufig zuwenig Ringe aufweisen. Man sollte sich aber immer vergewissern, dass bei den breiteren Stelle keine Hyperzementosen vorliegen. Dabei handelt es sich um eine übermässige Produktion von Zahnzement, die einerseits lokal (hervorgerufen durch Entzündungen) oder anderseits generalisiert (hervorgerufen durch eine systemische Erkrankung) auftreten kann (Mjör and Fejerskov 1979). Nachdem eine geeignete Stelle gefunden worden war, wurde diese bei 100facher Vergrösserung (40er Objektiv) und normalem Durchlicht betrachtet. Häufig liessen sich die Zementringe aber bei leicht verschobenem Phasenkontrastring, also in einem Zwischenbereich, zwischen Phasenkontrast und Durchlicht, besser darstellen. Durch Fokussieren lassen sich bestimmte Ebenen des Präparates darstellen, in denen die Linienstruktur besonders klar definiert ist. Dabei kann es zu Beugungsfehlern kommen. Diese wirken sich jedoch für unsere Zwecke nicht negativ aus (Kagerer 2000). Von mindestens je einer Stelle der fünf Schnitte wurde bei möglichst optimalen Einstellungen des Mikroskops und der Kamera (Zeiss MC 63) sechs oder mehr Fotos gemacht, die dann entwickelt und ausgewertet wurden.

Zusätzlich wurde von jedem Zahn noch ein interferenzmikroskopisches Bild angefertigt (Olympus Bx 51). Wie in der Einleitung erwähnt, hatten auch schon Naylor et al. (1985) diese Art der Mikroskopie zur Auswertung ihrer Proben verwendet. Die Interferenzmikroskopie erzeugt durch unterschiedliche Dichten bzw. Dicken durchstrahlter Objekte seitliche Verschiebungen bildüberlagerter Interferenzstreifen, welche als Hell-Dunkel-Kontrast sichtbar ge-

macht werden können (Bogenrieder et al. 1985). Die Einstellungen wichen auch diesmal etwas von den Vorgaben ab, so wurde hauptsächlich ohne Kondensor gearbeitet. Die von einer Kamera (Olympus Camedia C-2000) aufgenommenen Bilder wurden im GJP-Format auf einen Chip geladen und in den Computer eingelesen. Sie wurden dekomprimiert und im TIF-Format abgespeichert. Die Auswertung der Bilder im TIF-Format erfolgte direkt am Macintosh.

Quantitative Auswertung der Zementringe

Auszählen

Die Zählung der dunkleren Ringe erfolgte einerseits an den Fotos, anderseits am Computer. Es wurden drei bis fünf gute Fotos pro Zahn ausgewählt, an denen zwei- bis dreimal pro Bild ausgezählt wurde. An den Interferenzbildern hatte man je drei Zählungen vorgenommen. Gesamthaft kam man auf 15 Zählungen; 12 Zählungen pro Zahn stammten von den normalen Fotos und drei Zählungen pro Zahn vom Interferenzbild. Die Zählung wird an der hellen Durchbruchslinie - und zwar am innersten Ring des markanten Linienbündels - angesetzt und erstreckt sich bis zum äussersten hellen Bereich (Abb. 3). Dem liegt noch eine Schicht aus organischer Matrix auf, diese Abschlussschicht wird je nach Mineralisationsgrad mitgezählt und je nachdem müssen diese biologischen Restmonate, analog den kalendarischen auf- bzw. abgerundet werden (Kagerer, 2000). In der vorliegenden Arbeit wurden diese Restmonate nicht mitgezählt, weil bei den Individuen meistens nur das Geburtsjahr vorhanden und somit das Todesalter nicht bis auf die Monate genau bekannt war.

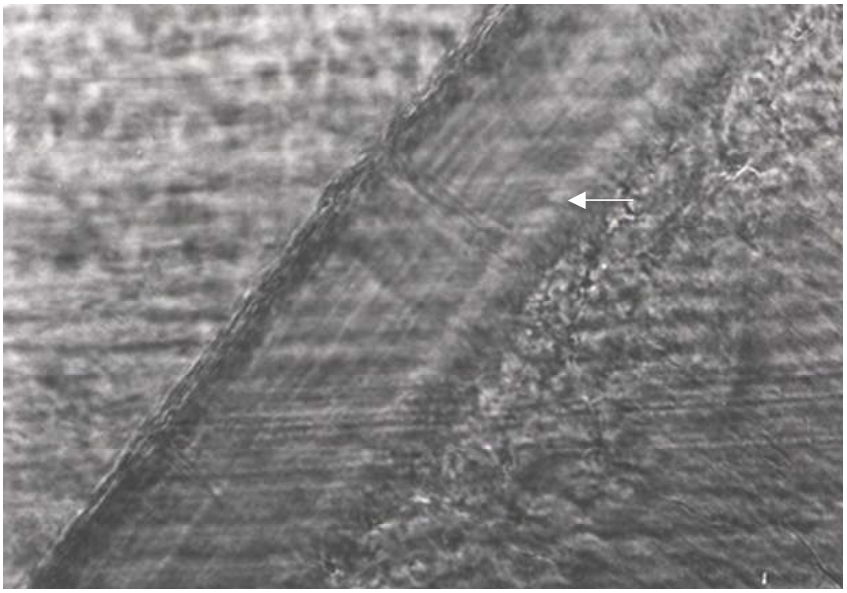

Abb. 3. Phasenkontrastmikroskopische Aufnahme. Der erste Zuwachsring der Durchbruchslinie ist mit einem Pfeil markiert.

Die Zementringe sind manchmal nicht durchgehend vom Ausgangspunkt bis zum Schluss auszählbar. Es ist in solchen Situationen hilfreich, versetzt auszuzählen (Abb. 4).

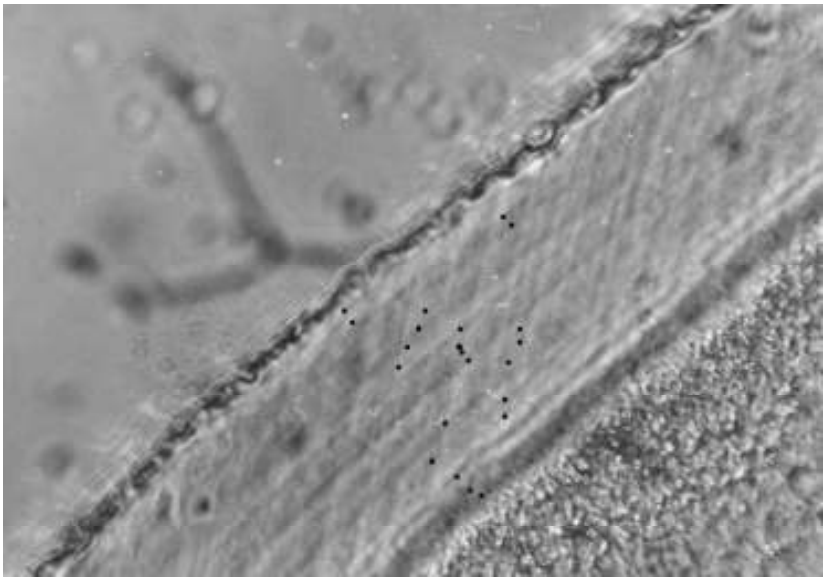

Abb. 4. Phasenkontrastmikroskopische Aufnahme. Die Punkte markieren die zu zählenden Zementringe.

An den Fotos wurden die Ringe beim Zählen mit einem Stift markiert, am Computer hatte man sich zur Orientierung den Mauszeiger zu Hilfe genommen. Zum Durchschnitt der 15 Zählungen wurde das geschlechtsspezifische Durchbruchsalter des jeweiligen Zahnes dazugerechnet (Tab. 2 und 3).

Geschlechtsspezifische Zahndurchbruchsalter

Abb. 6: Tabelle mit dem Ausschnitt aus der Chronologie des Zahndurchtrittes der bleibenden Zähne bei Mädchen (in Jahren) (Helm and Seidler 1974).

Maxilla	sehr früh	früh	Mittelwert	spät	sehr spät
1. Prämolar	7.54	8.82	10.1	11.38	12.66
2. Prämolar	8.16	8.58	11.0	14.42	13.84
Mandibula	sehr früh	früh	Mittelwert	spät	sehr spät
1. Prämolar	7.4	8.7	10.0	11.3	12.6
2. Prämolar	8.14	9.57	11.0	12.43	13.86

Abb. 7: Tabelle mit dem Ausschnitt aus der Chronologie des Zahndurchtrittes der bleibenden Zähne bei Knaben (in Jahren) (Helm and Seidler 1974).

Maxilla	sehr früh	früh	Mittelwert	spät	sehr spät
1. Prämolar	7.68	9.14	10.6	12.06	13.52
2. Prämolar	8.46	9.93	11.4	12.87	14.34
Mandibula	sehr früh	früh	Mittelwert	spät	sehr spät
1. Prämolar	7.74	9.22	10.7	12.18	13.66
2. Prämolar	8.62	10.06	11.5	12.94	14.38

Auswertung der Bilder anhand eines Plots

Es wurde versucht, die Auswertung der Bilder mit Hilfe des Computers vorzunehmen. Man hatte die Schwarz-Weiss-Kontrastierung der Zementringe mit Hilfe einer Funktion des Programms NIH in eine Graphik übersetzt und an dieser die Peaks, welche den schwarzen Linien (Zementringen) auf den Fotos entsprechen, ausgezählt.

Pro Foto werden an zwei Stellen, an denen die Wachstumslinien durchgehend vorhanden sind, Plots gelegt. Diese werden an der hellen Durchbruchslinie, und zwar am innersten Ring des markanten Linienbündels, angesetzt und bis zum äusseren hellen Bereich gezogen. Man erhält auf diese Weise zwei Plots, die miteinander verglichen werden können. Daher ist es sinnvoll, diese übereinander anzubringen, denn so kann der einzelne Peak eines Plots seinem Pendant auf dem anderen Plot zugeordnet werden. Man kennzeichnet diese Zuordnung, indem man einen Strich (Pfeil) vom einen zum anderen Peak zieht. Die so gewonnenen Verbindungsstriche (Pfeile) werden ausgezählt (1. Zählung). Die Wachstumslinien sind in der Zementschicht nicht immer gleich deutlich zu erkennen, dies ergibt dann auch die unterschiedlich geformten Peaks. Es kann vorkommen, dass eine Wachstumslinie kaum oder gar nicht mehr sichtbar und eine Zuordnung der Peaks nicht mehr eindeutig ist. Daher erfolgt auch noch eine Zählung der Peaks an den einzelnen Plots (2. und 3. Zählung). Diese Zählung besteht im Auszählen der Peaks, die zugeordnet werden konnten, sowie den verbliebenen Peaks, die sich nicht zuordnen liessen, jedoch nur aus denen, welche eine bestimmte Grösse nicht unterschreiten. In dem Falle werden nur die Peaks gezählt, deren Höhe grösser ist als 6 % der Distanz vom tiefsten bis zum höchsten Punkt des entsprechenden Plots. Diese Einschränkung ist wichtig, weil es sich bei solchen Peaks, die sich weder einem anderen zuordnen lassen noch eine bestimmte Grösse aufweisen, um Artefakte handeln kann. Aus den so erhaltenen drei Zählungen errechnet man den Mittelwert.

Legen eines Plots

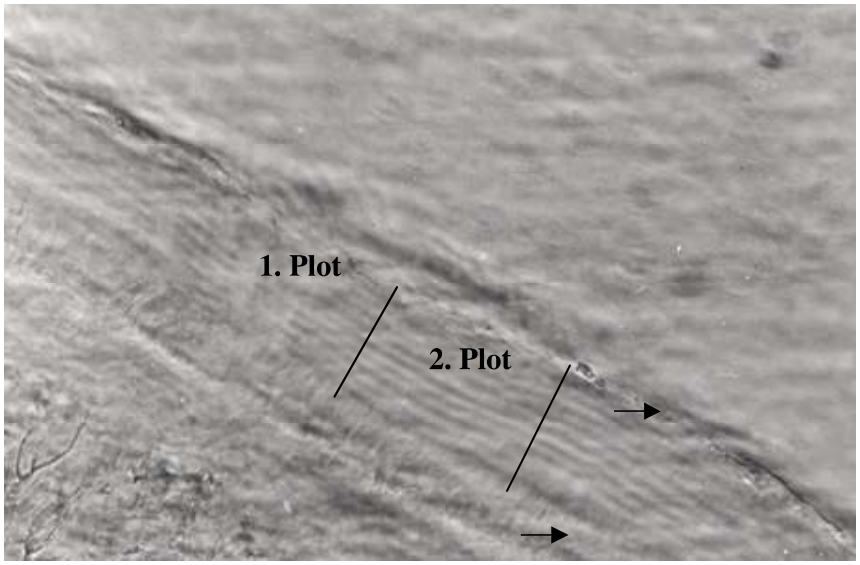

Abb. 4. Phasenkontrastmikroskopische Aufnahme: Pro Foto werden zwei Plots gelegt. Diese werden bei der Zahndurchbruchsstelle (unterer Pfeil) angesetzt und bis zum äusseren hellen Rand (oberer Pfeil) gezogen.

Auswerten eines Plots

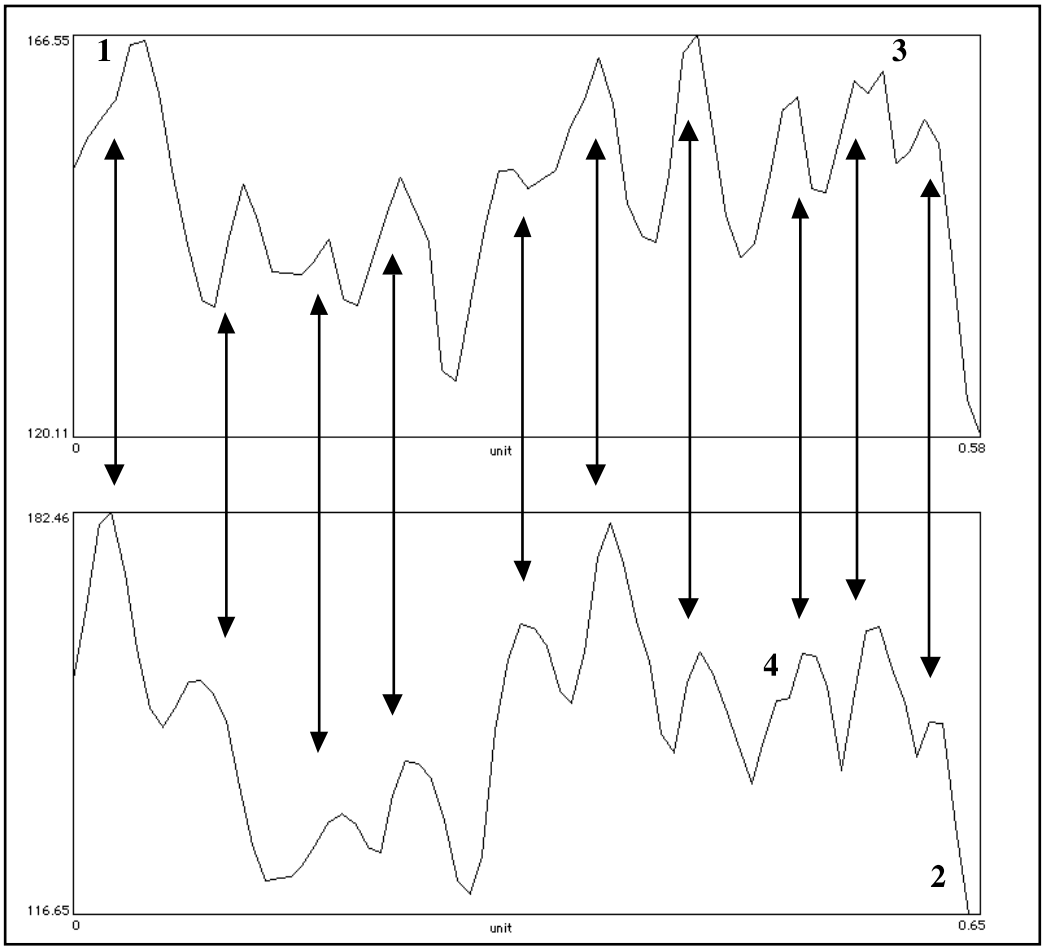

Abb. 5. Plot des Bildes von Abb. 4.
1 Höchster Punkt
2 Tiefster Punkt
3 Peak, dessen Höhe grösser ist als die 6 % der Distanz vom höchsten bis zum tiefsten Punkt.
4 Peak, dessen Höhe kleiner ist als die 6 % der Distanz vom höchsten bis zum tiefsten Punkt.

Zählung der Pfeile (zugeordnete Plots).	Resultat: 10
Zählung der Peaks am oberen Plot.	Resultat: 11
Zählung der Peaks am unteren Plot.	Resultat: 10

Abgerundeter Mittelwert: 10

Schleifen, Polieren und Einfärben der Schnittpräparate

Um die Zuwachslinien besser erfassen zu können, wurden die Schnittpräparate geschliffen und poliert. Dadurch sollten Schliffspuren eliminiert werden, und es konnte eine Toluidine- und Zementlinefärbung (Dickson 1984) vorgenommen werden. Diese Färbetechnik wurde

von Naylor et al (1985) als eine geeignete Methode für nicht dekalzifizierte Zähne beschrieben.

Qualitative Auswertung der Zementringe

Um mögliche Veränderungen im Zahnzement erfassen zu können, wurden die Bilder miteinander verglichen. Besonders genau wurde der äusseren Bereich, das heisst die zuletzt gebildeten Ringe, begutachtet. Die häufig in diesem Bereich beobachteten helleren Ringe wurden anhand einer Skala beurteilt (Null bis Drei). Die Wertung Null bezeichnet kein Auftreten, die Wertung Drei eine starke Ausprägung dieses Phänomens.

Die Auswertung der Daten

Im ersten Teil des Resultate-Kapitels werden die Daten der Kontroll- und der Tbc-Gruppe miteinander verglichen. Mehrere Autoren (Condon et al 1986; Lipsinic et al. 1986; Kvaal and Solheim 1995; Stein and Corcoran 1994) zeigten, dass die Auswertung der Zementringe bei Zähnen von Individuen mit zunehmendem Alter schlechtere Resultate liefern. Ein Unterschied in der Effizienz der Altersbestimmung mittels Zahnzement zwischen den Geschlechtern wurde von Condon et al (1986) erwähnt. Um eine zuverlässigere Aussage über einen Unterschied zu bekommen, werden hier Gruppen zusammengestellt, die in Hinsicht auf Alter und Geschlecht gleiche Voraussetzungen mit sich bringen. Die Unterschiede zwischen den Gruppen werden anhand des Wilcoxon-Tests (Siegel 1997) überprüft. Weiter wird besprochen, wie ein qualitativer Unterschied zwischen den zwei Gruppen überprüft wurde. Im zweiten Teil werden die Daten der beiden Geschlechter miteinander verglichen. Im dritten Teil wird aufgrund der schlechteren Altersbestimmung bei älteren Individuen die prozentuale Fehlerabweichung der Altersschätzung bei jüngeren Individuen mit dieser von älteren Individuen verglichen. Im vierten Teil wird die Effizienz der Ermittlung des Sterbealters mit Hilfe von Plots untersucht. Im letzten Teil der Auswertungen wird der gesamte Datensatz verwendet. Anhand der Korrelation, der linearen Regression und der prozentualen Abweichung wird die Effizienz der Methode in Bezug auf bodengelagerte Zähne überprüft.

Die Auswertung wird mit den statistischen Programmen SPSS und STATVIEW durchgeführt.

Resultate

Von den 49 geschnittenen Zähnen konnten 43 für die Auswertung verwendet werden. Die Resultate von zwei Zähnen, deren Schnitte versuchsweise poliert und eingefärbt wurden, hatte man konsequenterweise aus der statistischen Untersuchung ausgeschlossen. Von den verbliebenen 47 Zähnen zeigten unter dem Mikroskop Schnittpräparate von vier Zähnen starke Veränderungen, die ein Auszählen der Zementringe verunmöglichten. Somit konnten in dieser Untersuchung 9.3 % der Zähne aufgrund von zerstörter Zementschicht nicht für die Altersbestimmung verwendet werden. Das Durchschnittsalter der gesamten Gruppe liegt bei 34.5 Jahren.

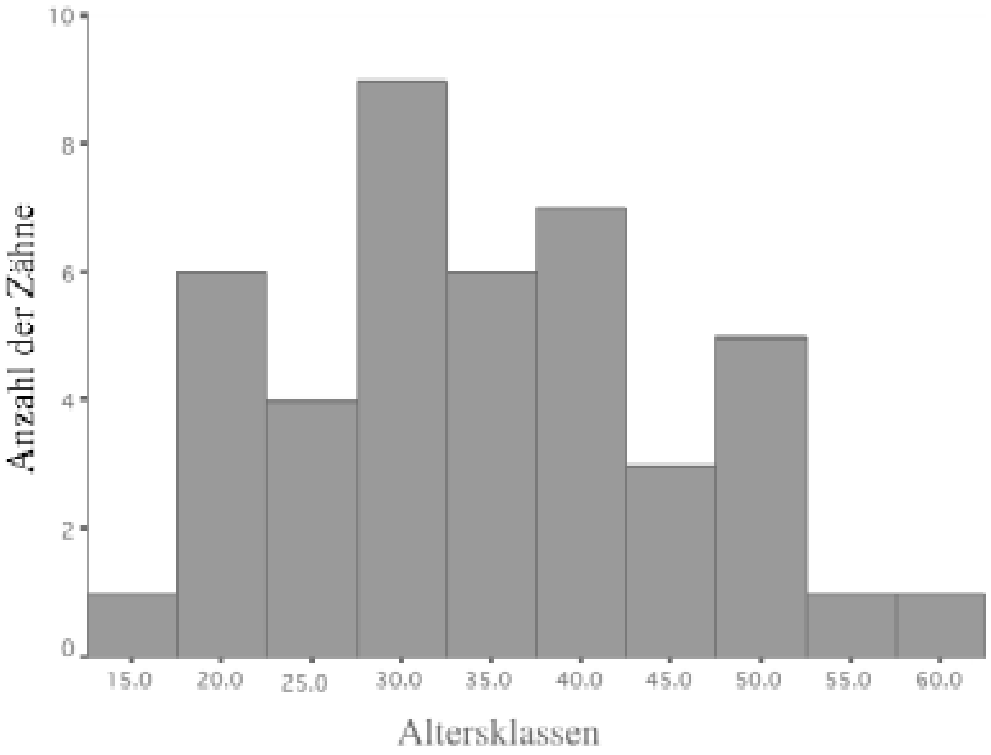

Abb. 6. Histogramm der effektiven Alter der 43 ausgewerteten Zähne.

Vergleich der Tbc- mit der Kontrollgruppe

Quantitativer Vergleich

Erst wurden die gesamten Daten der Tbc- und der Kontrollgruppe bezüglich der Korrelation und der linearen Regression miteinander verglichen. Die Kontrollgruppe zeigt etwas bessere Werte als die Tbc-Gruppe. In der Tbc-Gruppe fällt ein Ausreisser auf (Abb. 12). Es handelt sich dabei um den Zahn eines 60jährigen Individuums (Gr. 1100). Nach der Eliminierung dieses Ausreissers steigt die Korrelation auf 0.87 und die Steigung auf 0.7. Diese Werte liegen nun näher beim Optimum als die Werte der Kontrollgruppe. Wenn man die Altersverteilung der zwei Gruppen miteinander vergleicht, sieht man, dass diese stark divergiert. Auch bezüglich der Geschlechterverteilung ist ein Unterschied vorhanden. Aufgrund dieser Tatsachen wurde versucht, möglichst identische Gruppen in Bezug auf Alter und Geschlecht zusammenzustellen. Die Untersuchung beinhaltete in dem Fall noch sieben Zähne pro Gruppe.

In dem Fall zeigt die Tbc-Gruppe eine höhere Korrelation. In Bezug auf die lineare Regression ist nur ein geringer Unterschied erkennbar (Abb. 7). Ob statistisch gesehen ein Unterschied zwischen den zwei Gruppen vorhanden ist, wird mit dem Wilcoxon-Test überprüft. Vorerst wird die Altersverteilung (effektiven Alter) der beiden zusammengestellten Gruppen verglichen, ein Unterschied konnte nicht festgestellt werden (Wilcoxon, $p = 0.3$). Ein Vergleich der histologisch ermittelten Alter innerhalb der Altersklassen zeigte, dass sich diese statistisch gesehen nicht unterscheiden ($p = 0.38$). Auch wenn die Über- und Unterschätzungen der realen Alter in den einzelnen Altersklassen getestet wurden, konnte kein relevanter Unterschied festgestellt werden ($p = 0.44$).

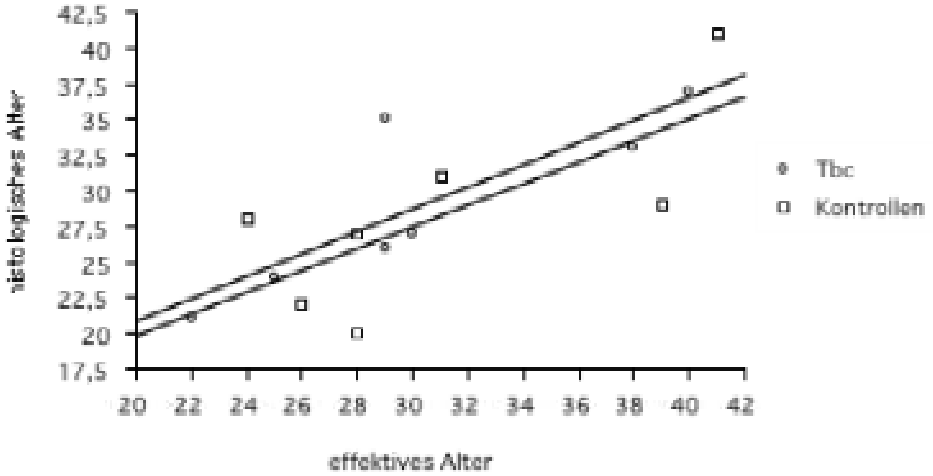

Abb. 7. Regressionslinie der Daten der Tbc- und der Kontrollgruppe. Die obere Regressionslinie steht für die Tbc-Gruppe, die untere für die Kontrollgruppe.

Qualitativer Vergleich

Es wurde versucht, einen qualitativen Unterschied zwischen den Zuwachsringen der beiden Gruppen festzustellen. Mehrere mikroskopische Aufnahmen der Tbc-Gruppe wurden mit denen der Kontrollgruppe verglichen. Dabei versuchte man, die Breite, die Farbintensität und die Regelmässigkeit der Zuwachsringe zu erfassen. Die Tatsache, dass die Zementringe eines Zahnes schon innerhalb eines Schnittpräparates und innerhalb verschiedener Schnittpräparate sehr variabel sind, erschwerte eine objektive Aussage.

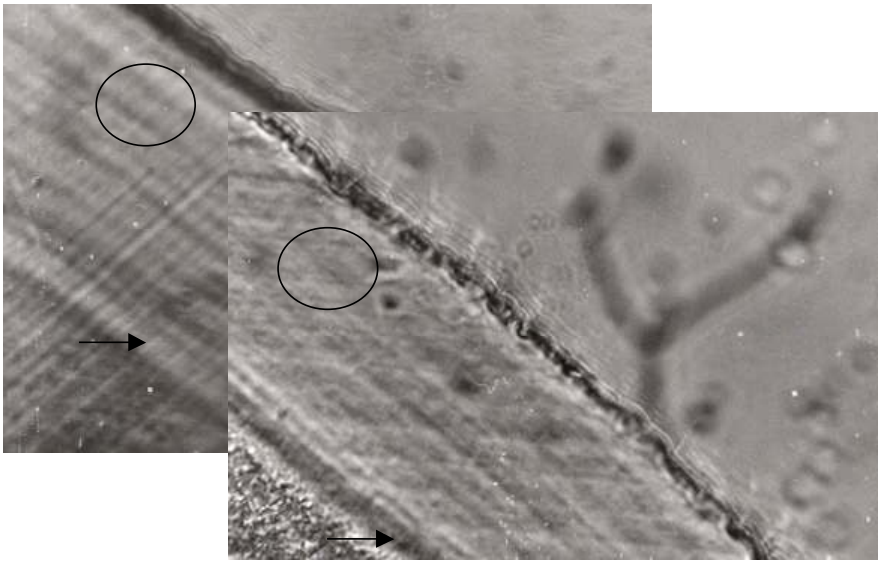

Abb. 8. Diese zeigt phasenkontrastmikroskopische Aufnahmen zweier Schnitte eines Zahnes. Die weissen Bereiche des einen Bildes erscheinen im anderen Bild schwarz, dies ist mit der nicht ganz identischen Phasenringverschiebung zu erklären. Die Pfeile unten markieren sehr ähnlich aussehende Strukturen. Die durch Ringe markierten Stellen zeigen deutlich unterschiedliche Zementringe.

Ein besonderes Augenmerk wurde auf die äusserste Schicht, das heisst auf die zuletzt angelagerten Ringe, geworfen. Veränderungen in Bezug auf Tuberkulose würde man am ehesten in diesem Bereich erwarten: Häufig wurden hellere Zementringe beobachtet. Das Ausmass dieses Phänomens wurde anhand einer Skala (Null bis Drei) beurteilt. Im Gesamten wurden derartige Veränderungen sowohl bei der Kontrollgruppe wie auch in der Tbc-Gruppe beobachtet, wobei dies in der letzteren doch häufiger und auch in ausgeprägterer Form zu verzeichnen war.

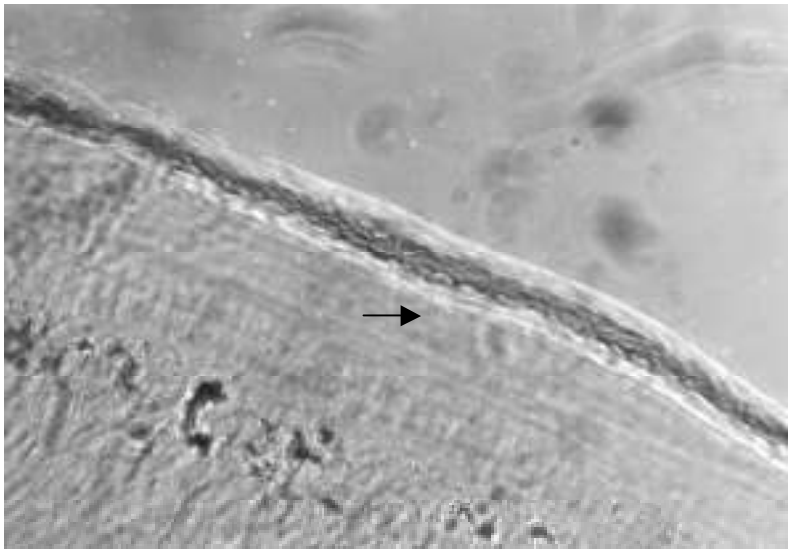

Abb. 9. Phasenkontrastmikroskopische Aufnahme, der Pfeil markiert die hellen Ringe.

Auswertung von geschliffenen, polierten und eingefärbten Schnittpräparaten

Wie erwähnt, wurden die Schnittpräparate geschliffen, poliert und angefärbt. Dieses Procedere war relativ zeitaufwendig, und die Darstellung und Auswertung der Zementringe war nicht besser durchführbar, als wenn man die Schnitte unbehandelt unter dem Lichtmikroskop betrachtete.

Vergleich von Männern und Frauen

Es wurde je die gesamten Daten der Frauen- und Männergruppe bezüglich der Korrelation und der linearen Regression miteinander verglichen. Die weiblichen Zähne zeigten bessere Werte, dies wurde auch schon Condon et al. (1986) festgestellt. Um mehr Klarheit zu schaffen, wurden in Bezug auf das Alter zwei möglichst identische Gruppen zusammengestellt. Die Zusammensetzung hinsichtlich der Tbc Fälle ist in den zwei zu vergleichenden Gruppen nicht ganz identisch; dies ist im Anbetracht der Ergebnisse des quantitativen Vergleichs zu vernachlässigen. Ein Unterschied zwischen den zwei Gruppen war wiederum erkennbar, er war zwar weniger deutlich, als wenn der gesamte Datensatz der beiden Gruppen verwendet wurde.

Der Unterschied wurde mit dem Wilcoxon-Test überprüft. Die Altersverteilung (effektiven Alter) der beiden zusammengestellten Gruppen wurde verglichen, ein Unterschied konnte diesbezüglich nicht festgestellt werden ($p = 0.41$). Ein Vergleich der histologisch ermittelten Alter innerhalb der Altersklassen zeigte, dass sich diese statistisch gesehen nicht unterschei-

den (p = 0.35). Auch wenn die Über- und Unterschätzungen der realen Alter in den einzelnen Altersklassen getestet wurden, konnte kein relevanter Unterschied festgestellt werden (p = 0.37).

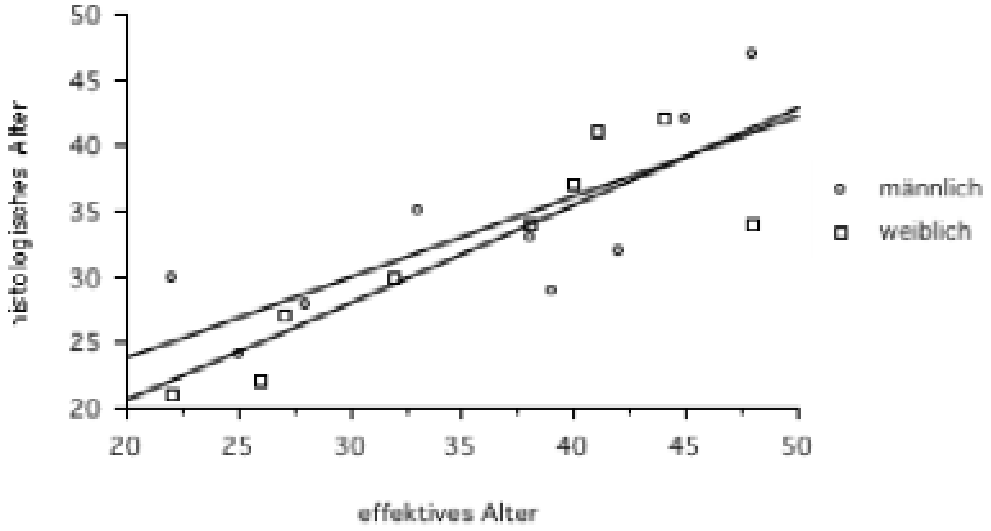

Abb. 10. Regressionslinien der Daten der männlichen und weiblichen Gruppen, die Regressionslinie mit der grösseren Steigung und dem kleineren y-Abschnitt steht für die weiblichen Individuen, die andere für die männlichen.

Altersbestimmung mittels Zementringen bei älteren Individuen

In der Literatur wird erwähnt, dass Zähne von älteren Individuen eine schlechtere Altersschätzung aufweisen. Die Fehlerabweichung des histologischen Alters wurde in dieser Arbeit unter anderem in Prozenten angegeben, dies soll auch im Vergleich der Effizienz der Methode bezüglich des Alters durchgeführt werden. Die prozentuale Fehlerabweichung einer Gruppe, bestehend aus Zähnen von jüngeren Individuen (16-25 Jahre) wird mit einer Gruppe, bestehend aus Zähnen von älteren Individuen (45-53 Jahre) verglichen. Die Gruppen enthalten je sieben Individuen (fünf Männer, zwei Frauen). Die ermittelte Fehlerabweichung der jüngeren Gruppe beträgt 10.9 %, die der älteren Gruppe 8.8 %.

Überprüfung der Auszählung anhand von Plots

Die mittels der Plots gewonnenen Auszählungen wurden mit den direkt am Bild erzielten Auszählungen der Zuwachsringe verglichen. Pro Bild wurden drei Zählungen anhand von zwei Plots sowie drei manuelle Zählungen der Zuwachsringe durchgeführt. Gesamthaft wurden 56 Bilder ausgewertet. Jede der drei Zählungen wurde gemittelt, und der Betrag der Abweichung vom realen Alter ausgerechnet. Die Gesamtabweichung der beiden Auszählungsarten wurde getrennt berechnet und als Prozentzahl der Summe der effektiven Alter angegeben.

Ein Vergleich der beiden Zählmethoden zeigt, dass die prozentuale Abweichung bei der Auszählung der Zuwachsringe direkt am Foto etwas tiefer liegt und dass beim Auszählen anhand der Plots tendenziell häufiger zu tiefe Zählwerte erhalten werden.