

Eine Bestimmung des Mineralgehaltes von menschlichen Schädelknochen aus dem Röntgenbild in Beziehung zu perforierenden Schußverletzungen

Diether Weithoener und Ulrich Klages

Institut für gerichtliche Medizin und Kriminalistik der Universität Hamburg (BRD)

Eingegangen am 18. Juli 1974

Determination of the Mineral Contents of Human Skulls by X-ray Analysis
with Regard to Projectile Perforation

Summary. Report of a combined method of X-ray film and photometry for measurement of the quantity of apatite in the flat bones of the human skull. After performance of experimental series with cal. 22 shots we carried out punctiform measurement of extinction on X-ray films of 81 pieces of cranium from 47 autopsy cases of various age. In some cases we found very strong differences of the quantity of mineral (20 to 500 mg/ml) not only between diverse skulls but also between diverse regions of the same cranium. This method is helpful in research of the local structure of the flat bones, and can be aid in some forensic problems of trauma of the skull.

Zusammenfassung. Bericht über ein kombiniertes röntgenologisch-photometrisches Verfahren zur Bestimmung des Apatitgehaltes der menschlichen platten Schädelknochen. Im Rahmen von Schußversuchen wurden kleinflächige Extinktionsmessungen an standardisierten Röntgenbildern von 81 ausgesägten Knochenpräparaten aus 47 Sektionsfällen verschiedener Altersgruppen durchgeführt. Es ergaben sich teilweise sehr starke Unterschiede des Mineralgehaltes — zwischen 20 und 500 mg/ml — nicht nur zwischen verschiedenen menschlichen Schädeln, sondern häufig auch zwischen verschiedenen Abschnitten derselben Kalotte. Die Methode bewährte sich zur quantitativen Erfassung des örtlichen Aufbaues der Schädelknochen und kann bei forensisch-traumatologischen Fragestellungen Anwendung finden.

Key words: Schuß, Röntgenuntersuchung der Perforation an platten Schädelknochen — Traumatologie, Schuß.

Im Rahmen von Untersuchungen über die Größenschwankungen der Knochenlücke bei Schußverletzungen des menschlichen Hirnschädels (Klages u. Weithoener, 1973) führten wir Messungen zur Erfassung von Materialeigenschaften des Knochens durch, welche Einfluß auf die Perforationsgröße haben. Dabei ergab sich in ca. 50% unserer Schußversuche an Kalotten eine Beziehung zwischen der Größe der Schußlücke und dem Mineralgehalt pro Oberflächeneinheit der platten Schädelknochen.

Die Erfassung der physikalischen Eigenschaften des Knochens stößt dadurch auf Schwierigkeiten, daß diese einerseits durch die mikroskopische bzw. molekulare Struktur, andererseits durch den anatomischen Aufbau — Compacta, Spongiosa — bestimmt werden. Kallieris (1971) und Kallieris u. Genser (1973) gaben eine Über-

sicht über Methoden der Bestimmung der Knochenhärte; sie selbst wandten die Vickers-Methode an, welche eine Härtemessung an natürlichen oder künstlichen Oberflächen darstellt. Für klinische Belange wurden in erster Linie röntgenologische Untersuchungen des Knochenmineralgehaltes durchgeführt. Krokowski (1965, 1968) erhielt auf diese Weise charakteristische Werte für Röhrenknochen, konnte hinsichtlich der Schädelknochen jedoch nur die Vermutung äußern, daß diese — wegen der geringeren statischen Belastung — einen niedrigeren Mineralgehalt und somit eine geringere Festigkeit aufweisen müßten. Nach Heuck u. Schmidt (1960) ist in Einzelfällen — bei eburnisierter Knochen — mit einem sehr hohen Mineralgehalt des Schädeldaches zu rechnen.

Unsere eigenen Messungen des Hartsubstanzengehaltes der platten Schädelknochen führten wir in Anlehnung an die röntgenologischen Untersuchungen der erwähnten Autoren durch. Es handelt sich im wesentlichen um eine photometrische Auswertung des Schwärzungsgrades von Röntgenbildern, welche unter standardisierten Bedingungen angefertigt wurden. Da die Untersuchungen nicht am Patienten, sondern an isolierten Knochen (Sektionsfälle) durchgeführt wurden, konnte die Methodik in günstiger Weise modifiziert werden.

Material und Methode

Zur Untersuchung kamen 47 Sektionsfälle im Altersbereich von 19 bis 81 Jahren, von denen 32 männlichen und 15 weiblichen Geschlechts waren. Unter den Todesursachen dominierten Fälle des akuten Herz-Kreislauf-Versagens, in zweiter Linie „gerichtsmedizinische Todesarten“ wie Verkehrsunfälle, Ertrinken, Vergiftungen. Von der Untersuchung wurden Fälle mit Kopfverletzungen und Hinweisen auf Knochenerkrankungen ausgeschlossen. Die Untersuchungen erfolgten im Anschluß an Schußversuche mit einer Kleinkaliberpistole (Beretta) auf Leichenschädel. Der Ort der Messung war durch die Lokalisation der Schußperforation bestimmt. Es handelte sich ganz überwiegend um Schüsse im Bereich der Scheitelbeine und der Hinterhauptsschuppe, teilweise hier auch im Bereich des Ansatzes der Nackenmuskulatur. Die herausgesägten Knochenstücke wurden nach Entfernung der anhaftenden Weichteile in Formalin fixiert.

Eine Messung der Knochendicke erfolgte mit einem Tasterzirkel (Schnelltaster System Kröplin) an vier durch ein rechtwinkliges Koordinatensystem festgelegten Punkten unmittelbar am Rande des kraterförmigen Ausbruchs der Schußlücke. Die Meßpunkte lagen somit an den Ecken eines Vierecks mit einer je nach der Größe der Schußlücke etwas schwankenden Seitenlänge von ca. 1,5 cm (Abb. 1).

Von den Knochenpräparaten wurden Röntgenbilder unter konstanten Bedingungen (50 KV, 80 mAs, Belichtungszeit 0,25 sec, Abstand 120 cm, Film Agfa Gevaert Osray M 13 × 18, maschinelle Entwicklung) angefertigt: größengetreue Abbildung, gute Feindarstellung der Knochenstruktur. Als Maß für den Gehalt an Knochenmineral (Hydroxyapatit) führten wir eine Extinktionsmessung am Röntgenfilm mittels eines Cytophotometers (Leitz) mit monochromatischem Licht der Wellenlänge 570 nm im durchfallenden Licht bei konstanter Blendenöffnung und einer 2½fachen Vergrößerung durch. Auf jedem Röntgenfilm war gleichzeitig ein Aluminiumstufenkeil als Standard abgebildet. Die Hochspannung des Photometers — ca. 900 bis 1000 Volt — wurde jeweils so gewählt, daß der Extinktionswert des Aluminiumstandards von 5 mm Schichtdicke dem Vollausschlag des Galvanometers entsprach; letzterer wurde mit 100% gleichgesetzt. Der durch leichte Schwankungen des Photometerausschlages sowie durch Streulicht bedingte Meßfehler betrug weniger als 5%.

Die Meßfläche auf dem größengetreuen Röntgenfilm stellte ein regelmäßiges Achteck von 3 mm² dar. Krokowski (1968) wies darauf hin, daß bei punktuellen oder kleinfächigen Messungen die Gefahr bestünde, daß durch die Erfassung von Spongiosabalkchen die Meßwerte verfälscht werden könnten und daß auf diese Weise bei unmittelbar nebeneinanderliegenden Meßpunkten sehr große Schwankungen der Werte auftreten müßten. Wie das abgebildete

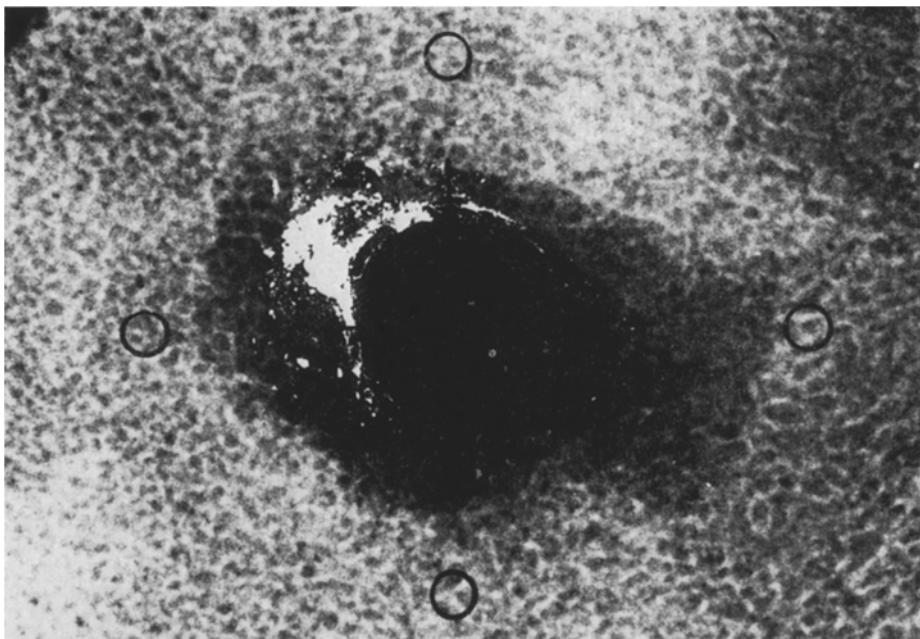


Abb. 1. Kleinkaliber-Schußlücke der Kalotte. Ausschnittsvergrößerung des Röntgenbildes. Lage der annähernd runden photometrischen Meßflächen außerhalb der Bleianhaftungen und der Knochenausbrüche

Beispiel zeigt, werden jedoch durch die von uns gewählten Meßflächen jeweils mehrere derartige in der Vergrößerung deutlich erkennbare trabekuläre Strukturen überdeckt. Sprunghafte Schwankungen der Meßwerte bei geringer Verschiebung der Meßflächen traten niemals auf.

Die Berechnung des Hydroxylapatitgehaltes der Schädelknochen aus den Extinktionswerten am Röntgenbild wurde folgendermaßen durchgeführt: 5 mm Schichtdicke des Aluminiumstandards (100% Extinktion) entsprechen 650 mg/cm^2 Knochenmineral; auf diese Weise wird der Gehalt an Hartsubstanz pro Oberflächeneinheit ermittelt. Für weitere Berechnungen (Dichte der Hartsubstanz) wurden jeweils die Mittelwerte aus 4 Einzelmessungen — die Eckpunkte des um das Einschußloch gedachten Vierecks — gebildet. Aus dem Quotienten des mittleren Mineralgehaltes pro Oberflächeneinheit und dem arithmetischen Mittel aus den 4 Einzelmessungen der Knochendicke ergibt sich die Knochenmineraldichte, ausgedrückt in Milligramm pro Kubikzentimeter Knochensubstanz.

Ergebnisse

Die Häufigkeitsverteilung des Mineralgehaltes pro Oberflächeneinheit des Knochens, ausgedrückt in Prozenten der Extinktion des Aluminiumstandards am Röntgenbild (1% entsprechend $6,5 \text{ mg/cm}^2$), ist in Abb. 2 dargestellt. Es handelt sich jeweils um die Mittelwerte aus 4 Einzelmessungen an einem eng umschriebenen Abschnitt der Kalotte. Ganz überwiegend fanden wir Werte, welche einem Knochenmineralgehalt zwischen 15 und 30 mg/cm^2 entsprechen. Einzelne Messungen lagen jedoch weit höher, bis zu ca. 500 mg/cm^2 , bei einer Knochendicke

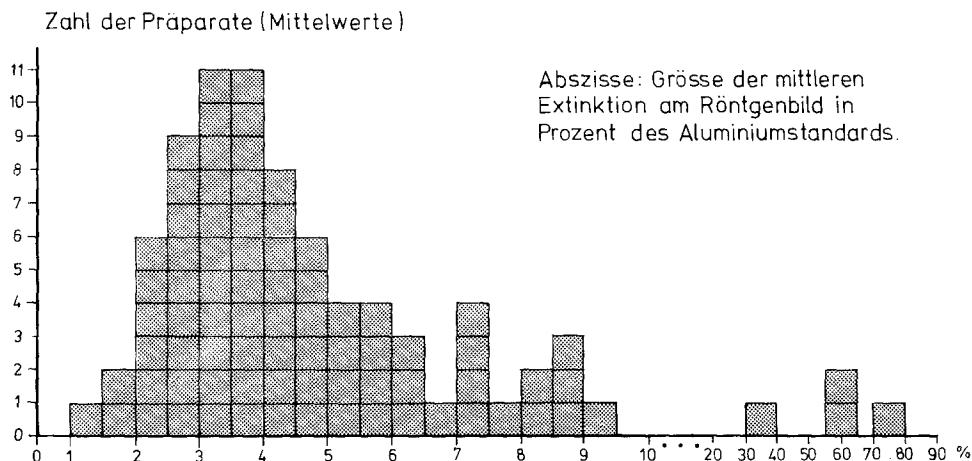


Abb. 2. Häufigkeitsverteilung der Extinktionsmessungen an Röntgenbildern menschlicher Schädelknochen. 81 Mittelwerte aus je 4 Einzelmessungen in 47 Sektionsfällen

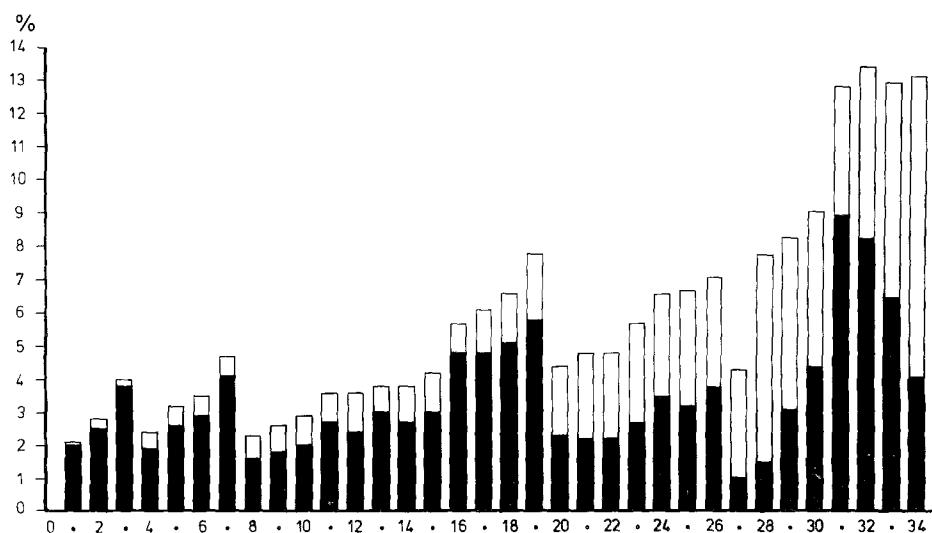


Abb. 3. Differenzen der Extinktion am Röntgenbild (Mittelwerte aus 4 Einzelmessungen) an jeweils zwei verschiedenen Abschnitten desselben Schädels

von ca. 10 mm. Die Schichtdicke der Schädelknochen weist derartig große Schwankungen nicht auf. Unterschiede der Knochendicke können somit nicht die alleinige Ursache für die starken Schwankungen des Mineralgehaltes pro Oberflächeneinheit sein.

Abb. 3 verdeutlicht die Differenzen der Messungen des mittleren Mineralgehaltes pro Oberflächeneinheit (jeweils Mittelwerte aus 4 Einzelmeßpunkten) an zwei verschiedenen Bereichen desselben Schädels (34 Fälle). Abb. 4 zeigt die relative Schwankung (in Prozent des Mittelwertes) der 4 um jeweils eine Schußperforation

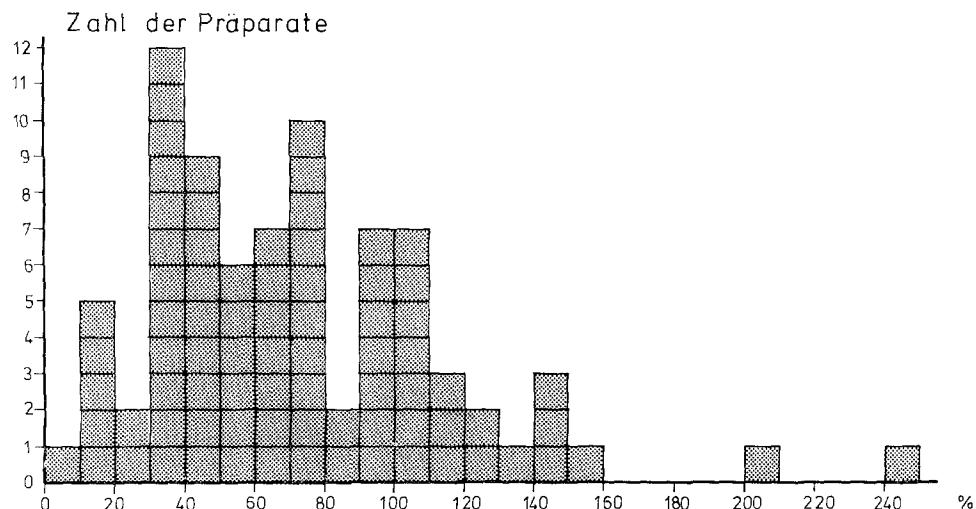


Abb. 4. Relative Schwankung (Prozent des Mittelwertes) von je 4 Einzelmessungen des Mineralgehaltes pro Oberflächeneinheit an 81 Präparaten platter Schädelknochen (Extinktionsmessungen am Röntgenbild)

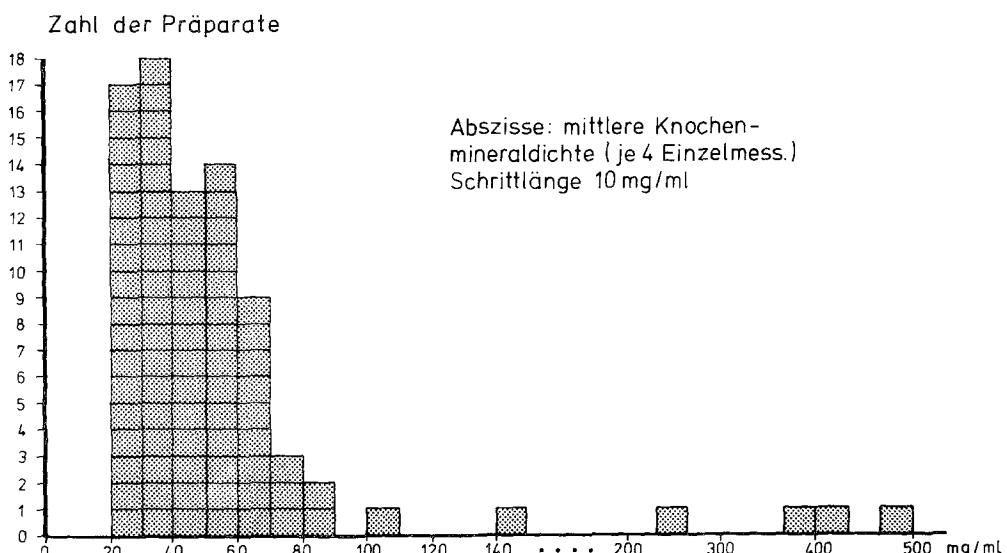


Abb. 5. Häufigkeitsverteilung der mittleren Dichte des Hydroxylapatits bei 81 Präparaten der Schädelkalotte; je 4 Einzelmessungen

angeordneten Einzelmessungen selbst (81 Fälle). Nicht nur an verschiedenen Schädeln, sondern auch an verschiedenen, teilweise dicht benachbarten Stellen derselben Kalotte fanden sich somit erhebliche Unterschiede im Hartsubstanzgehalt.

Die Verteilung der mittleren Knochenmineraldichte (mg/ml) bei 81 Schädelpräparaten zeigt Abb. 5. Die Meßwerte liegen zwischen 20 und 500 mg/ml, das

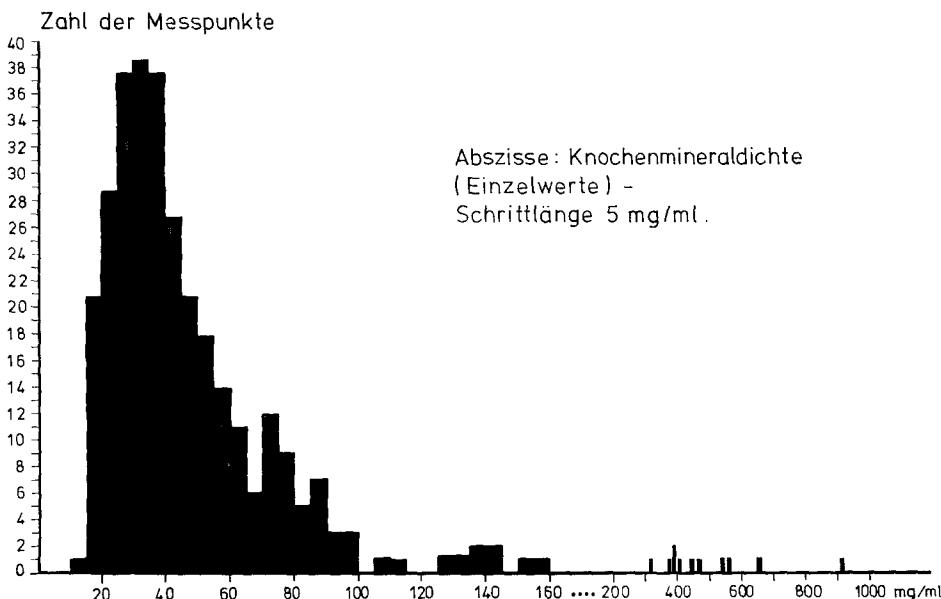


Abb. 6. Häufigkeitsverteilung von 324 Einzelmessungen der Dichte des Hydroxylapatits bei 81 Präparaten der Schädelkalotte

Maximum der Häufigkeitsverteilung befindet sich bei 30 mg/ml. Beachtenswert sind in einzelnen Fällen die sehr erheblichen Abweichungen vom Durchschnittswert. Werden alle 324 einzelnen Meßpunkte aufgetragen (Abb. 6), so ergibt sich eine entsprechende, statistisch besser gesicherte charakteristische Verteilung.

Diskussion

Durch photometrische Ausmessung von Röntgenbildern konnten wir am isolierten Knochen (Sektionsmaterial) ohne größere methodische Schwierigkeiten den Mineralgehalt der Schädelkalotte feststellen. Die Hartsubstanzdichte lag dabei ganz überwiegend zwischen 20 und 80 mg/ml. Dagegen ergaben entsprechende Messungen im Rahmen klinischer Untersuchungen (Krokowski, 1965, 1968) für Röhrenknochen eine Hydroxylapatiddichte zwischen 100 und 400 mg/ml. Heuck u. Schmidt (1960) fanden für den kompakten Röhrenknochen, d. h. bei völligem Fehlen einer Spongiosa, Werte zwischen 600 und 800 mg/ml; einen außergewöhnlich hohen Mineralgehalt von 980 mg/ml stellten diese Autoren an einem eburnisierten Schädelknochen fest.

Auch in einigen unserer Fälle fanden sich abweichend von den durchschnittlichen Werten an einzelnen Schädelknochen sehr hohe Mineraldichten bis zu 500 mg/ml Hydroxylapatit; es handelte sich jeweils um Kalotten, welche anatomisch durch ein weitgehendes Fehlen der Diploe ausgezeichnet waren. — Mehrfach bestanden zwischen verschiedenen, teilweise dicht benachbarten Abschnitten desselben Schädels erhebliche Unterschiede des Mineralgehaltes. Auch dabei war in

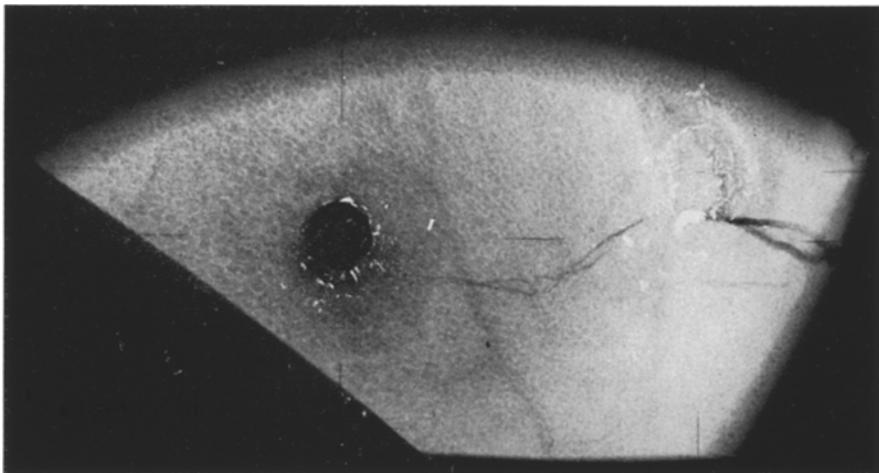


Abb. 7. Experimentelle standardisierte Kleinkaliberschüsse (Schußentfernung 20 cm) auf benachbarte Stellen eines Schädels; Röntgenbild. Links Perforation von 6,3 mm Durchmesser; mittlerer Knochenmineralgehalt 49,5 mg/ml. Rechts keine Perforation, mittlerer Knochenmineralgehalt 490 mg/ml. Knochensprünge, Bleianhaftungen

der Regel zu beobachten, daß die Knochenmineraldichte vorwiegend durch die Binnenstruktur des Knochens bestimmt wurde.

Die Feststellung bemerkenswert großer Schwankungen des Mineralgehaltes menschlicher Kalotten steht im Einklang mit der regelmäßig bei Obduktionen sich aufdrängenden Beobachtung, daß die platten Schädelknochen auch anatomisch sehr variabel ausgebildet und strukturiert sind. Demgegenüber erhielt Kallieris (1971) bei Härtemessungen an menschlichen Kalotten recht konstante Ergebnisse; auch fand er keine wesentlichen Unterschiede der Knochenhärte zwischen verschiedenen Röhrenknochen und den platten Schädelknochen. Offenbar besteht somit kein Zusammenhang zwischen der von uns festgestellten Mineraldichte des Knochens und der durch die Vickers-Methode bestimmten Knochenhärte. Für gewisse mechanische Einwirkungen ist jedoch der Gesamtaufbau der Schädelknochen und der Mineralgehalt von größerer Bedeutung als die Oberflächenhärte; das gilt besonders für Schußverletzungen (Klages u. Weithoener, 1973). In diesem Zusammenhang ist auch auf Untersuchungen von Sellier (1971) hinzuweisen, wonach Projektile durch Röhrenknochen stärker deformiert werden als nach Durchschlägen von Schädelkalotten.

Die Methode einer kleinflächigen photometrischen Auswertung standardisierter Röntgenbilder mit einer Meßfläche von 3 mm^2 hat sich als geeignet erwiesen, den Mineralgehalt, den örtlichen Aufbau und anatomische Besonderheiten der Binnenstruktur der platten Schädelknochen quantitativ zu erfassen. Das Verfahren ist bei Vorhandensein der erforderlichen Einrichtungen mit relativ geringem Aufwand am einzelnen Sektionsfall anzuwenden.

Für klinische Belange, z. B. zur Erfassung einer Osteoporose, reicht nach Krokowski (1968) die großflächige Bestimmung des Mineralgehaltes des Skelettes aus. Die Bedeutung einer kleinflächigen Messung am Ort einer Schußverletzung

der Schädelkalotte wird durch einige unserer experimentellen Beobachtungen besonders sinnfällig gemacht. Gelegentlich erzielten wir bei Schußversuchen mit Kleinkaliber-Bleiprojektilen aus 20 cm Entfernung und senkrechter Schußrichtung keine Perforation der Schädeldecke. In diesen Fällen ergab die Bestimmung des Mineralgehaltes der Schädelknochen an der beschossenen Stelle Werte in einer Größenordnung (250—500 mg/ml), wie sie in der Regel nur an Röhrenknochen gemessen werden. Besonders hervorzuheben ist, daß in diesen Fällen ein weiterer Schußversuch an einer anderen Stelle der Schädeloberfläche jeweils zur typischen Perforation führte; hier lag der Hartsubstanzgehalt der Kalotte in der üblichen Größenordnung zwischen 20 und 80 mg/ml Hydroxylapatit (Abb. 7). Eine großflächige Messung oder eine Messung, welche sich nicht unmittelbar an dem Auf treffort des Schusses orientiert, hätte nicht zu einer zufriedenstellenden Erklärung des unterschiedlichen Ausfalles der Schußversuche geführt.

Literatur

- Heuck, F., Schmidt, E.: Die quantitative Bestimmung des Mineralgehaltes der Knochen aus dem Röntgenbild. Fortschr. Röntgenstr. **93**, 523 (1960a)
- Heuck, F., Schmidt, E.: Die praktische Anwendung einer Methode zur quantitativen Bestimmung des Kalksalzgehaltes gesunder und kranker Knochen. Fortschr. Röntgenstr. **93**, 761 (1960b)
- Kallieris, D.: Härtemessungen an frischen menschlichen Knochen. Z. Rechtsmedizin **68**, 164 (1971)
- Kallieris, D., Genser, J.: Härtemessungen an frischen menschlichen Femora. Z. Rechtsmedizin **71**, 293 (1973)
- Klages, U., Weithoener, D.: Untersuchungen zur Perforationsgröße bei Schußverletzungen der Schädelkalotte durch Kleinkaliberwaffen. Z. Rechtsmedizin **73**, 35 (1973)
- Krokowski, E.: Quantitative röntgenologische Bestimmung des Skelett-Calciumgehaltes, S. 607. Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Innere Medizin, 71. Kongreß 1965
- Krokowski, E.: Die röntgenologische Substanzanalyse des Knochens — Prinzip und praktische Durchführung. Fortschr. Röntgenstr. **108**, 394 (1968)
- Sellier, K.: Über Geschoßablenkung und Geschoßdeformation. Z. Rechtsmedizin **69**, 217 (1971)

Dr. Diether Weithoener
 Dr. Ulrich Klages
 Institut für gerichtliche Medizin und
 Kriministik der Universität
 D-2000 Hamburg 54, Butenfeld 34
 Bundesrepublik Deutschland