

I.

Untersuchungen über das Schädelwachstum und seine Störungen.

2. Das fötale Wachstum.

Von

Prof. Dr. R. T h o m a in Heidelberg.

(Hierzu 51 Textfiguren.)

Gehirn und Schädel erscheinen in den frühesten Embryonalperioden als zwei in einander geschachtelte Blasen, welche in ihrem Wachstum gegenseitig abhängig sind. Wie dieses Abhängigkeitsverhältnis sich gestaltet, ist häufig besprochen und in verschiedener Weise beantwortet worden. Indessen darf man im allgemeinen der Betrachtung zunächst die verschiedenen, in der fötalen und post-fötalen Zeit auf einander folgenden Form- und Größenverhältnisse des Gehirns und den mit der Zeit sich ändernden Druck der intrakraniellen Flüssigkeit zugrunde legen, indem man diese als unabhängige, selbständig sich verändernde Größen betrachtet, von denen das Wachstum des Schädels abhängt. Diesen Standpunkt habe ich bei dem bisherigen Gange der Untersuchung, in der ersten Mitteilung¹⁾, eingenommen und er wird auch weiterhin noch aufrecht zu erhalten sein. Später allerdings dürfte sich bei einer Untersuchung der Entwicklung und des Wachstums des Gehirns die Notwendigkeit ergeben, die mit der Zeit sich ändernden Formen und Dimensionen des Schädels als unabhängige Variable zu betrachten und ihren Einfluß auf das Wachstum des Gehirns zu prüfen. Dann erst wird es möglich sein, das gegenseitige Abhängigkeitsverhältnis, welches zwischen Schädel und Gehirn besteht, genauer zu definieren. Einige aus dieser zweiten Betrachtungsform hervorgehende Beziehungen werden indessen bereits hier zu berücksichtigen sein.

Kennzeichnend für die frühen Entwicklungsstadien des zentralen Nervensystems ist das rasche Wachstum desselben im Verhältnis zu dem Wachstum der übrigen Teile der Embryonalanlage. Wie das raschere Wachstum des oberen Keimblattes imstande ist, die Ausbildung des Medullarrohres, die Faltungen der Hirnblase und die dorsalwärts gerichtete Verkrümmung der ganzen Embryonalanlage nach sich zu ziehen, ist namentlich von W. H i s erörtert worden. Für die

¹⁾ R. T h o m a, Untersuchungen über das Schädelwachstum und seine Störungen. I. Die Spannung der Schädelwand. Virch. Arch. Bd. 206, 1911.

etwas spätere Zeit, in welcher das zentrale Nervensystem bereits von einer primordialen Schädelkapsel umhüllt wird, besitzt indessen die Knickung der Schädelbasis eine besondere Bedeutung. Histomechanisch dürfte sie Folge des Umstandes sein, daß die Hirnkapsel an ihrer viszeralen Seite mit dem Antlitzteile des Kopfes in fester Verbindung steht und demgemäß hier eine ungleich größere Mächtigkeit besitzt als an der dorsalen Seite. Der Druck des wachsenden Gehirns erzeugt daher in den dicken, basalen Teilen der Schädelwand sehr geringe Erhöhungen der Materialspannung, während er in dem dünnen Schädeldache die Materialspannung beträchtlich erhöht und damit ein lebhaftes Flächen- und Dickenwachstum auslöst. Indem aber das Schädeldach rasch an Größe zunimmt, wird in der langsam wachsenden Schädelbasis eine Krümmung und schließlich eine Knickung zur unausbleiblichen Notwendigkeit. Schädigungen der histologischen und physikalischen Struktur der Gewebe treten bei der langsamen Entstehung dieser Knickung nicht ein, weil die bei der Knickung sich einstellenden, lokal beschränkten, jedoch relativ hohen Spannungen durch das Wachstum der Gewebe fortlaufend wieder aufgehoben werden. Die Knickung der Schädelbasis muß indessen, weil sie Änderungen der Spannung und Krümmung des Schädeldaches zur Folge hat, zugleich auch das Gehirn in seiner Formentwicklung in merklicher Weise beeinflussen.

In späterer Zeit dürfte auch der Muskelzug und die Gravitation auf die Knickung der Schädelbasis einwirken. Die Größe dieser verschiedenen Einwirkungen muß aber infolge der zahlreichen, während des fötalen und postfötalen Wachstums eintretenden Änderungen der Gestalt und der Größe der Teile manchem Wechsel unterworfen sein. Es kann daher in keiner Weise auffallen, daß die Größe des Sattelwinkels, welcher als ein Maß für die Knickung der Schädelkapsel angesehen werden kann, im Laufe des fötalen und postfötalen Wachstums wiederholte Änderungen in verschiedener Richtung erfährt und bei verschiedenen Individuen und Rassen und unter gewissen pathologischen Bedingungen mancherlei Unterschiede aufweist. Es geht dies namentlich aus den Untersuchungen von R. Virchow¹⁾ und Schäffer²⁾ hervor.

Einen weiteren Ausdruck findet diese Knickung der Schädelkapsel in der scharfen Kante, welche die Dura mater und die Schädelwand am Rande des Felsenbeinkörpers bildet. Sie gibt offenbar zugleich die Veranlassung zu der Bildung des Tentorium. Außerdem führt die Knickung des Schädelgrundes zu einer zweiten Faltung der Dura und der Schädelwand, welche später dem Rande des kleinen Keilbeinflügels entspricht und die vordere von der mittleren Schädelgrube abgrenzt.

Die Knickung der Schädelkapsel ist die Folge des rascheren Flächenwachstums der dorsalen Teile der Schädelwand. Zugleich aber ist sie die Ursache für die eigentümliche, in der ersten Mitteilung nachgewiesene Verteilung der Druckwirkungen, welche das Gehirn auf die Innenfläche der Schädelkapsel ausübt. Diese Verteilung ist dadurch ausgezeichnet, daß der Druck des Hirns auf die Schädelinnenfläche an fünf Stellen, an den Tubera frontalia und parietalia und auf der Schuppe des Hinterhauptbeines seine höchsten Werte erreicht. Daß diese Druck-

¹⁾ R. Virchow, Untersuchungen über die Entwicklung des Schädelgrundes im gesunden und krankhaften Zustande. Berlin 1857.

²⁾ O. Schäffer, Untersuchung über die normale Entwicklung des fötalen Menschen-schädels. München und Leipzig 1893.

verteilung bereits in sehr frühen Entwicklungsperioden besteht, konnte ich ¹⁾ mit einiger Wahrscheinlichkeit aus den Beobachtungen von Mall ²⁾ erschließen, und dieser Schluß wird durch die folgenden Untersuchungen der frühesten Ossifikationsvorgänge in allen Einzelheiten bestätigt. Doch darf man nicht übersehen, daß nach dem Inhalte meiner ersten Mitteilung auch der Druck der intrakraniellen Flüssigkeit bei der Ausgestaltung der Schädelkapsel in wesentlicher Weise mitwirkt.

Über die Mechanik des Schädelwachstums wurden bereits in der ersten Mitteilung die grundlegenden Gesichtspunkte erörtert. Es erscheint indessen wünschenswert, noch etwas genauer auf die Einzelheiten einzugehen. Dabei kann man der Einfachheit halber von einer kugelförmig gestalteten Schädelkapsel von überall gleicher Dicke ausgehen. Das Wachstum einer solchen Schädelkapsel wird stillstehen, wenn der Druck ihres Inhalts überall gleichgroß ist und zugleich eine solche Höhe erreicht, daß die Materialspannung der Schädelwand überall ihrem kritischen Werte gleichkommt. Steigt sodann der Druck des Schädelinhalts überall in gleicher Weise, so wird auch die Spannung der Schädelwand überall in gleichem Maße zunehmen und überall ein gleichstarkes Wachstum auslösen. Die wachsende Schädelkapsel wird daher unter den gegebenen Voraussetzungen ungeachtet ihrer Größenzunahme dauernd ihre Kugelgestalt beibehalten.

Damit die Kugelgestalt der Schädelkapsel verloren geht, muß der auf der Schädelinnenfläche lastende Druck an verschiedenen Stellen verschiedene Werte erreichen. Dies ist nur möglich, wenn wenigstens ein Teil des Schädelinhaltes nicht die Eigenschaften einer Flüssigkeit, des Liquor cerebrospinalis, besitzt. Denn in letzterem ist immer der Druck in allen Richtungen gleichgroß, wenigstens in der Fötalperiode, während welcher die Wirkung der Gravitation durch den Liquor amnii im wesentlichen aufgehoben ist ³⁾. Der einfachste Fall dieser Art ist gegeben, wenn an zwei gegenüberliegenden Stellen der kugelförmigen Schädelkapsel das wachsende Gehirn an die Schädelwand in der Weise andrängt, daß sein Druck hier größer ist als der Druck des Liquor cerebrospinalis, welcher in der kugelförmigen Schädelwand die kritische Materialspannung erzeugt. Dabei müssen die beiden Druckwirkungen des Gehirns unter sich gleichgroß sein, da andernfalls der Schädel als Ganzes in Bewegung gesetzt würde. Zu den bereits zuvor bestehenden, von dem intrakraniellen Flüssigkeitsdruck erzeugten, überall gleichgroßen, auf ihren kritischen Wert eingestellten Materialspannungen der Schädelwand tritt unter diesen Voraussetzungen ein durch das bipolare Wachstum des Hirns erzeugter Spannungszuwachs, welcher der Materialspannung der Schädelwand an verschiedenen Stellen ungleiche Werte verleiht.

Dieser Spannungszuwachs kann in einfacher Weise durch Textfig. 1 dargestellt werden, so lange wenigstens, als die weiche Beschaffenheit und die geringe Dicke der Schädelwand das

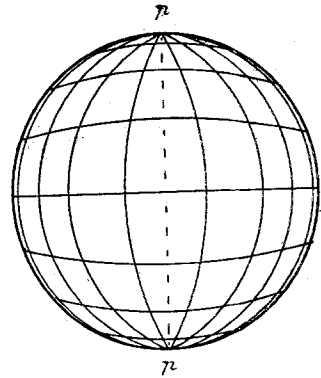


Fig. 1. Diagramm. Meridional- und Breitenparallellinien, welche ein bipolarer, den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck übersteigender Wachstumsdruck des Gehirns in einer kugelförmigen Schädelkapsel erzeugt. Die unterbrochene, die Pole p, p vereinigende Linie entspricht der Druckachse des Gehirns.

¹⁾ R. Thoma, Synostosis suturae sagittalis cranii. Virch. Arch. Bd. 188, 1907.

²⁾ F. P. Mall, The American Journal of Anatomy Bd. 5, 1903.

³⁾ Dabei stellt man selbstverständlicherweise nur die Differenz des an der Innenfläche und des an der Außenfläche der Schädelwand wirkenden Druckes als intrakraniellen Flüssigkeitsdruck in Rechnung.

Auftreten von nennenswerten Biegungsspannungen ausschließt. Das bipolar wachsende Gehirn muß in dem kugelförmig gestalteten Schädel zwei Druckpole p, p hervorrufen, auf welche man sich die Druckwirkungen des wachsenden Gehirns vereinigt denken kann. Diese erzeugen in der Schädelwand Zugspannungen, welche ähnlich wie die Meridiane des Erdglobus von Pol zu Pol verlaufen, Meridianspannungen. Gleichzeitig entwickeln sich auch Spannungen, welche senkrecht auf den Meridianen stehen und einen den Breitenparallelen des Erdglobus vergleichbaren Verlauf besitzen, Breitenparallelspannungen oder Parallelspannungen. Diese als Parallelspannungen sich darstellenden Teile des Spannungszuwachses sind indessen von so geringer Größe, daß sie vorläufig vernachlässigt werden dürfen. Dagegen erreichen die meridionalen Anteile des Spannungszuwachses wenigstens in der Umgebung der Druckpole nicht unerhebliche Werte.

Vor dem Auftreten des von dem Gehirn erzeugten Spannungszuwachses hatte der überall gleiche intrakranielle Druck eine solche Höhe, daß er die Materialspannung der Schädelwand auf ihren kritischen Wert brachte, bei welchem das Wachstum der Schädelwand stillsteht. Der von dem Drucke des bipolar wachsenden Gehirns erzeugte Spannungszuwachs, welcher in Textfigur 1 dargestellt ist, hat daher zur Folge, daß die Materialspannungen in meridionaler Richtung ihren kritischen Wert überschreiten, und zwar am stärksten in der Umgebung der Druckpole.

Wenn man sodann bei der histomechanischen Prüfung des Problems annimmt, daß das Wachstum des Bindegewebes des häutigen Primordialschädels in einer ähnlichen Abhängigkeit von seiner Spannung steht wie nach meinen früheren Erörterungen ¹⁾ das Wachstum des Knochengewebes, so muß unter den gegebenen Umständen infolge des meridionalen Spannungszuwachses der ursprünglich kugelförmig gedachte häutige Primordialschädel in der Richtung der Meridiane wachsen und ungefähr die Gestalt eines verlängerten Rotationsellipsoides annehmen. In diesem würde die Richtung der Rotationsachse übereinstimmen mit der Richtung der Druckachse $p - p$ des wachsenden Gehirns.

Man kann sodann, um alle Konsequenzen zu verfolgen, annehmen, daß nun ein vorübergehender Stillstand des bipolaren Gehirnwachstums eintritt. In diesem Falle würde durch das meridionale Flächenwachstum der Schädelkapsel allmählich ein Gleichgewichtszustand herbeigeführt werden, bei welchem die Spannung in der jetzt ellipsoidisch gestalteten Schädelwand wieder nach allen Richtungen gleichgroß wäre — ähnlich wie die Wandspannung der in der ersten Mitteilung erwähnten, mit einem Flüssigkeitstropfen beschwerten Seifenblase. Ein stationärer Zustand aber würde erreicht werden, wenn gleichzeitig durch ein entsprechendes, von der Spannungserhöhung ausgelöstes Dickenwachstum die Materialspannung der Schädelwand wieder auf ihren kritischen Wert eingestellt wird. Die ellipsoidisch gestaltete Schädelwand aber würde in diesem stationären Zustande nicht nur unter dem überall gleichen Drucke der intrakraniellen Flüssigkeit, sondern zugleich auch unter dem durch das meridionale Wachstum der Schädelwand ermäßigten bipolaren Drucke des Gehirns stehen.

Ein erneutes Wachstum des Gehirns könnte sodann zu einer neuen Wachstumsperiode Veranlassung geben. Bleibt dabei die Richtung des Hirnwachstums dieselbe, so treten in der Wand der ellipsoidischen Schädelkapsel wieder ähnliche Spannungszuwächse auf wie früher (Textfig. 2). Diese aber werden wiederum Wachstumserscheinungen auslösen, welche die ellipsoidische Gestalt der Schädelkapsel noch stärker ausprägen und das Dickenwachstum beschleunigen, bis die Materialspannungen wieder auf den kritischen Wert ermäßigt sind.

Diese Betrachtung eines rein bipolaren Wachstums des Gehirns führt zu einfachen Vorstellungen über die Vorgänge, welche sich an einer beliebigen, einem stärkeren Wachstumsdrucke des Gehirns ausgesetzten Stelle des Schädels einstellen müssen, auch wenn letzterer nicht die Gestalt einer Hohlkugel oder eines Ellipsoides besitzt. Solange die Schädelkapsel sich als die Wand eines geschlossenen Hohlraumes darstellt, in welcher Wand die tangentialen Materialspannungen überall ihrer Größe nach dem kritischen Werte gleich sind, erzeugt jede Verstärkung des vom

¹⁾ R. Thom a, Synostosis suturae sagittalis. Virch. Arch. Bd. 188, 1907.

Gehirn auf irgendeine Stelle der Schädelinnenfläche wirkenden Druckes einen Spannungszuwachs, welcher durch mehr oder weniger regelmäßige Meridional- und Parallelspannungen zum Ausdrucke gebracht werden kann. Dieser Spannungszuwachs wird im allgemeinen, soweit die Schädelwand keine erheblichen Dickenunterschiede aufweist, an der Druckstelle seinen höchsten Wert erreichen und Erscheinungen des Flächen- und Dickenwachstums auslösen, welche an der Druckstelle gleichfalls ihren höchsten Wert besitzen. An der Druckstelle und in ihrer Umgebung kommt es daher zu einer unscharf umschriebenen Erweiterung des Schädels, welche unter Mitwirkung eines entsprechenden Dickenwachstums die Spannungen wieder auf ihren kritischen Wert ermäßigt. Man erkennt somit, daß auch bei sehr unregelmäßiger Gestaltung der Schädelwand die tangentialen Materialspannungen am Schlusse des Wachstums überall die gleiche, durch ihren kritischen Wert gegebene Größe besitzen müssen, wie dies im einzelnen aus den in der ersten Mitteilung enthaltenen Messungen hervorgeht.

In der Wirklichkeit verläuft indessen das Schädelwachstum, wenn es auch schwerlich ein vollkommen gleichmäßiges und ununterbrochenes ist, nicht mit den hier vorausgesetzten periodischen Unterbrechungen. Diese müssen vielmehr als unendlich klein betrachtet werden. In diesem Falle wird während der Wachstumsperiode der Spannungszuwachs im allgemeinen ein dauernder sein, jedoch nach Größe und Richtung mit der Zeit mannigfache Abweichungen und selbst vorübergehende Unterbrechungen darbieten. Das Wachstum aber wird im allgemeinen der Größe des Spannungszuwachses entsprechen.

Das Wachstum der Schädelwand ist jedoch noch von andern Bedingungen abhängig. Oben wurde bereits die Bedeutung der großen Dicke der basalen Abschnitte der Schädelkapsel, des Muskelzuges und der Gravitation besprochen. Alle diese Bedingungen werden wirksam durch Änderungen der Materialspannung, welche von ihnen hervorgerufen werden, und bedürfen nach vorstehenden Erörterungen keiner besonderen Besprechung. Nach Beginn der Ossifikation allerdings gestalten sich die Wachstumsvorgänge in den bereits verknöcherten Teilen des Schädels etwas weniger einfach, hauptsächlich weil der von den Druckpolen des Gehirns ausgeübte Druck zugleich Biegungsspannungen in der Schädelwand erzeugt. Auf diese wird indessen erst später einzugehen sein.

Das Wachstum des häutigen Primordialschädels bietet noch andere bemerkenswerte Besonderheiten.

Im Laufe der Entwicklungs- und Wachstumsperiode ist, wie man annehmen muß, die Materialspannung der Schädelwand jederzeit etwas höher als der kritische Wert derselben. Mit der Ausbildung der basalen Knickung der Schädelkapsel aber erreicht die Materialspannung der primordialen Schädelwand an einzelnen Stellen eine solche Höhe, daß das Bindegewebe derselben in Knochengewebe übergeht. Es entstehen Ossifikationszentra an den Druckpolen, an welchen die von dem Wachstumsdruck des Gehirns erzeugten Meridionalspannungen auf einen Punkt zusammenlaufen und daher relativ hohe Materialspannungen erzeugen.

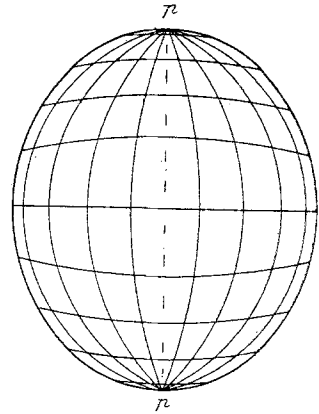


Fig. 2. Diagramm. Meridional- und Breitenparallelspannungen, welche ein bipolarer, den intrakraniellen Flüssigkeitsdruck übersteigender Wachstumsdruck des Gehirns erzeugt in der Wand einer ellipsoidisch gestalteten Schädelkapsel. Die unterbrochene, die Druckpole p, p vereinigende Linie bezeichnet die Umdrehungsachse des Ellipsoids und zugleich die Richtung des Hirndruckes.

Dabei macht sich die Tatsache bemerkbar, daß das Längen- und Dickenwachstum der primordialen Schädelwand an diesen Stellen stärkster Materialspannung dem raschen Wachstum der Hirnblasen nicht zu folgen vermag. Andernfalls würde an den Druckpolen ein genügendes Längen- und Dickenwachstum der häutigen Schädelwand imstande sein, einer erheblichen Steigerung der Materialspannung und damit der Ossifikation vorzubeugen. In der Wirklichkeit aber ist die Wanddicke des häutigen, primordialen Schädeldaches an den durch die Ossifikationszentra gekennzeichneten Druckpolen am geringsten.

Man wird daher zu der Annahme genötigt, daß die Geschwindigkeit sowohl des Längenwachstums als des Dickenwachstums des Bindegewebes, welche bei geringeren, jedoch den für die Neubildung des Bindegewebes kritischen Wert übersteigenden Spannungen eine beträchtliche war, bei höheren Spannungen eine Verzögerung erfährt. Wenn diese Annahme zutrifft, wird nach erfolgter Knickung der Schädelkapsel die Materialspannung in der Nähe der Druckpole des häutigen Primordialschädels rasch zunehmen, bis sie den Schwellenwert erreicht, welcher die Knochenneubildung auslöst. Der Knickung der Schädelkapsel jedoch dürfte bei diesen Vorgängen insofern eine größere Bedeutung zukommen, als durch die Knickung offenbar die Spannungen an der dorsalen Seite der Schädelkapsel eine verhältnismäßig rasch eintretende Steigerung erfahren müssen. Im Gefolge der Knickung erreichen die Spannungen der primordialen Schädelkapsel an den Druckpolen alsbald eine solche Höhe, daß das Flächen- und Dickenwachstum dieser bindegewebigen Membran bei jeder weiteren Größenzunahme des Gehirns verzögert wird. Unter diesen Bedingungen müssen sodann die Spannungen an den Druckpolen der Schädelkapsel stetig ansteigen, bis sie den für die Neubildung des Bindegewebes kritischen Wert erreichen. Demgemäß scheint die Knickung der Schädelkapsel eine wichtige, wenn auch vielleicht nicht unbedingt notwendige Voraussetzung für die Entwicklung der ersten Ossifikationskerne des Schädeldaches zu sein. Jedenfalls ist sie von Bedeutung für das rechtzeitige Auftreten dieser Ossifikationskerne, wie sich vielleicht durch eine genauere Prüfung mancher Mißbildungen genauer nachweisen ließe.

In der Intima diffus und aneurysmatisch rasch erweiterter Arterien, deren Wandspannung wegen der Zunahme des Gefäßdurchmessers sehr hoch ist, erfährt die Neubildung des Bindegewebes gleichfalls eine auffallende Verzögerung. Man kann daher die Abhängigkeit der Wachstumsgeschwindigkeiten des Bindegewebes und des Knochengewebes von der Materialspannung durch Textfig. 3 zum Ausdrucke bringen. In dieser liegt bei a der Nullpunkt des Koordinatensystems, in welchem die Länge der Abszisse ae die Materialspannung anzeigt. Die Ordinaten des Halbkreises B ergeben sodann die zugehörigen Geschwindigkeiten des Längenwachstums des Bindegewebes und die Ordinaten des Kreissegmentes $\beta\beta$ die zugehörigen Geschwindigkeiten des Dickenwachstums desselben. Die Materialspannung ab entspricht daher dem Schwellenwerte des Bindegewebes. Bei höheren Materialspannungen, welche den Wert ad überschreiten, entsteht dagegen Knochengewebe. Die Geschwindigkeiten des Längenwachstums desselben werden sodann durch die Länge der Ordinaten des Halbkreises K angezeigt und die Geschwindigkeiten seines Dickenwachstums durch die Länge der Ordinaten des Kreissegmentes kk . Die Materialspann-

ung *ad* aber würde dem Schwellenwerte des Knochengewebes entsprechen. Bezüglich der Definition der einzelnen Begriffe darf ich auf meine Mitteilung über die sagittale Synostose verweisen.

Die bis jetzt berücksichtigten Materialspannungen waren reine Zugspannungen. Handelt es sich um Zugspannungen, welche mit Druckspannungen verbunden sind oder um reine Druckspannungen, so kann das Diagramm der Textfig. 3 gleichfalls gelten, mit dem Unterschiede jedoch,

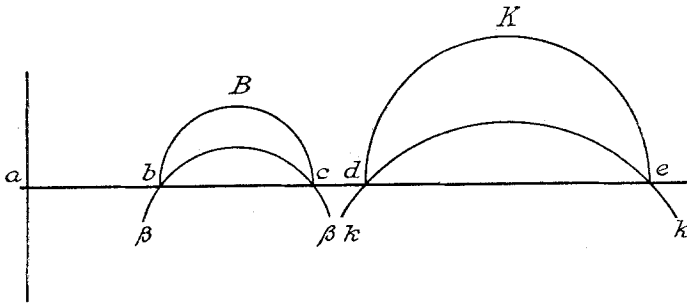


Fig. 3. Diagramm. Die Geschwindigkeiten des appositionellen Längen- und Dickenwachstums des Bindegewebes und des Knochengewebes.

daß der Halbkreis *B* und das Kreissegment $\beta\beta$ das Längen- und Dickenwachstum des Knorpelgewebes anzeigen. Damit erklärt es sich zugleich, weshalb in der an Zug- und Druckspannungen reichen Schädelbasis Knorpelgewebe und nicht, wie im Schädeldache, Bindegewebe zur Entwicklung gelangt. Außerdem wird man zu beachten haben, daß der Schwellenwert *ab* des Bindegewebes und Knorpelgewebes für weichere Formen dieser Gewebe niedriger und für härtere Formen derselben etwas höher ist.

Die an den fünf Druckpolen von dem Gehirn auf die Schädelwand ausgeübten Druckwirkungen müssen unter sich im Gleichgewichte stehen, weil der Schädel als eine allseits geschlossene Kapsel betrachtet werden darf. In Anbetracht der gegenseitigen Lage der fünf Druckpole (Textfig. 4) wird indessen dieses Gleichgewicht nur erreicht, wenn der Druck des Gehirns an den fünf Polen von ungleicher Größe ist. Demgemäß kann es nicht auffallen, wenn die Höhe der sich ergebenden Spannungszuwachse Unterschiede aufweist, welche sich dadurch bemerklich machen, daß die Ossifikation an den fünf Druckpolen nicht ganz gleichzeitig einsetzt. Nach den Beobachtungen von Mall¹⁾ beginnt die Verknöcherung des Schädels am 55. Tage der Fötalperiode mit dem Auftreten zweier symmetrisch gelegener Knochenkerne in dem knorpelig vorgebildeten Teile der Hinterhauptschuppe, nahe dem hinteren Umfange des Foramen occipitale magnum. Während dann im Hinterhauptbeine in kurzer Frist noch weitere Knochenkerne auftreten, die allmählich miteinander verschmelzen, entwickeln sich am 56. Tage

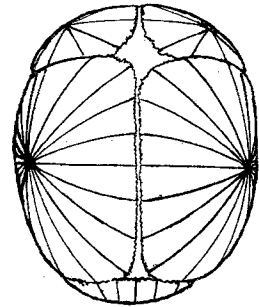


Fig. 4. Druckpole und Trajektorien der von dem Wachstum des Gehirns erzeugten meridionalen Spannungszuwachse am Schädel des menschlichen Fötus. Der auf der Schuppe des Hinterhauptbeines gelegene Druckpol ist verdeckt. Dagegen ist ein Teil der von ihm ausgehenden meridionalen Spannungstrajektorien sichtbar. Der Spannungszuwachs in der Richtung der Breitenparallelen ist weggelassen.

¹⁾ F. P. Mall, a. a. O.

der Fötalperiode zunächst die Knochenkerne, welche den Tubera frontalia entsprechen und kurz darauf auch die Knochenkerne der Tubera parietalia. Gleichzeitig oder wenige Tage später finden sich sodann Knochenkerne in der knorpelig angelegten Schädelbasis, und zwar vorwiegend in denjenigen Teilen, welche einem stärkeren Muskelzug ausgesetzt sind.

Untersucht man nunmehr die Knochenkerne des fötalen Schädeldaches etwas genauer, so findet man eine Reihe von Besonderheiten ihrer Architektur, welche die vorgetragenen Anschauungen zu beweisen geeignet erscheinen. In der Umgebung der Druckpole der Schädelkapsel erzeugt der Druck des wachsenden Gehirns einen Spannungszuwachs in der Richtung der Meridiane, und in diesen meridionalen Richtungen vorwiegend übersteigt die Materialspannung des wachsenden Schädels den kritischen, die Knochenbildung auslösenden Wert. Demgemäß muß sich auch die Knochenapposition in diesen meridionalen Richtungen am raschesten vollziehen. Dies läßt sich bereits, wie ich¹⁾ gezeigt habe, an den von Mall photographierten, in Kalilauge durchsichtig gemachten Embryonen erkennen.

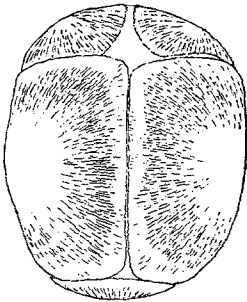


Fig. 5. Schädeldach eines Fötus der 38. Woche im durchfallenden Lichte. Formalin. Die radiären Streifen werden von dem blutreichen Knochenmarke hervorgehoben. Verkleinert 11 : 4.

In späterer Zeit ist die meridionale, zu den Druckpolen radiäre Struktur des fötalen Schädeldaches bei durchfallendem Lichte leicht mit unbewaffnetem Auge wahrzunehmen (Textfig. 5). Es schien jedoch wünschenswert, die Einzelheiten dieser Strukturen genauer zu verfolgen, wozu mir durch die Güte der Herren Kollegen Chiari, Ernst und v. Gierke eine Reihe jüngerer und älterer, in Alkohol gehärteter Schädel zur Verfügung stand.

Der jüngste menschliche Fötus A, dessen Schädel ich zu untersuchen Gelegenheit hatte, besaß nach der Alkoholhärtung eine Scheitel-Steißlänge von 78 mm, dürfte somit nach den Zusammenstellungen von Mall²⁾ ungefähr 89 Tage alt gewesen sein. Die Knochen seines Schädeldaches bestehen aus netzförmig angeordneten Knochenbälkchen, welche an den immer noch breiten Nahtlinien und Fontanellen endigen. Ein auffälliger Fortschritt gegenüber den frühesten von Toldt³⁾ und Mall⁴⁾ beschriebenen Stadien der Ossifikation ist gegeben in der beträchtlicheren Flächenausdehnung dieser Knochenetze, welche der Zunahme des Schädelumfanges entspricht. Außerdem hat die zu Anfang sanduhrförmige Gestalt des Parietale, welche darauf hinweist, daß an Stelle jedes Tuber parietale ursprünglich je zwei, nahe beieinander liegende Druckpole des Gehirns vorlagen, einer unregelmäßig rundlichen Form Platz gemacht.

Eine Anschauung der netzförmigen Architektur der platten Schädeldachknochen sehr junger, in Alkohol gehärteter Föten gewinnt man am einfachsten,

¹⁾ R. Thoma, Virch. Arch. Bd. 188, 1907.

²⁾ F. P. Mall, American Journ. of Anatomy (Anat. Record. Nr. 6), 1907. — Mall und Keibel, Handb. d. Entwicklungsgeschichte des Menschen. S. 185, 1911.

³⁾ Toldt, Prager med. Wschr. 1879. Stand mir nicht zur Verfügung.

⁴⁾ Mall, On ossification centers. American Journ. of Anatomy Bd. 5, 1906.

wenn man nach Entfernung der Haut einen dieser Knochen oder Teile desselben im Zusammenhange mit dem äußeren Periost und der Dura mater herausnimmt und in Kanadabalsam überführt. In besonderem Maße geeignet für dieses Verfahren ist das Os parietale, welches wenigstens nach der Zerschneidung in zwei Hälften in seiner ganzen Ausdehnung überblickt werden kann (Textfig. 6). Die Änderung der gegenseitigen Stellung der beiden Teile des Knochens, welche infolge der Zerschneidung eintrat, hat allerdings zur Folge, daß jetzt nach der Projektion in die Ebene der Zeichnung die Ränder des Knochens an beiden Enden der Schnittlinie scharfe Einziehungen aufweisen, welche an die Sanduhrform erinnern. Am unverletzten Knochen fand sich nur eine schwach konkave Einziehung des Margo frontalis und eine wenig stärkere des Margo occipitalis. Zugleich sind die oberen

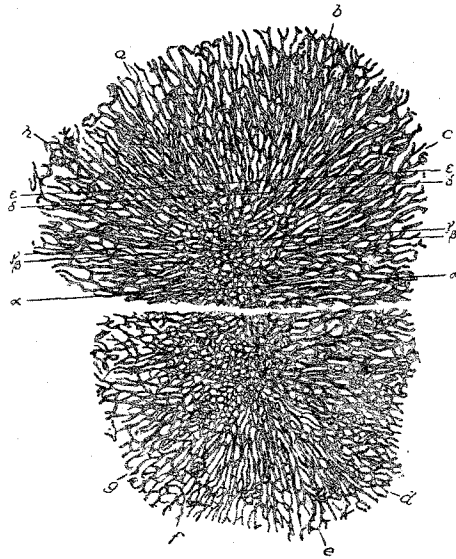


Fig. 6. Menschlicher Fötus A. Scheitelsteiße 78 mm. Os parietale dext. von der Außenfläche her gezeichnet. *ab* Margo sagittalis. *cd* Margo frontalis. *ef* Margo squamosus. *gh* Margo occipitalis. Die äußersten Spitzen des Netzwerkes sind unvollständig, weshalb die Abgrenzung der Ränder unsicher ist. Kanadabalsampräparat. Vergr. 3 fach.

Teile des Scheitelbeines, in sagittaler Richtung gemessen, etwas breiter als die unteren Teile desselben, so daß man von ohrmuschelähnlichen Umrissen dieses schalenförmigen Skelettstückes sprechen könnte. Nicht minder auffällig ist die netzförmige Anordnung der jungen Knochenbalken in den ursprünglich häutig angelegten Teilen der Stirnbeine (Textfig. 7) und der Hinterhauptsschuppe¹⁾.

Nahezu in der ganzen Ausdehnung dieser Skelettstücke erscheinen die Maschenräume der Knochennetze stark in die Länge gezogen, und zwar in Richtungen, welche meridional zu den Druckpolen gerichtet sind. Der anatomische Befund spricht somit dafür, daß der von dem Wachstumsdruck des Gehirns erzeugte

¹⁾ Die Vergrößerungszahlen dieser und der folgenden mikroskopischen Bilder dürften in keinem Falle Fehler von mehr als 3% enthalten.

meridionale Spannungszuwachs die Entwicklung einer größeren Zahl von meridional gerichteten Knochenbalken veranlaßt. Nur an den Druckpolen selbst führt der meridionale Spannungszuwachs dazu, daß die Spannungen nach allen Richtungen der Tangente gleich groß sind (Textfig. 1, 2, 4). Demgemäß sind an den Druckpolen die Maschen des Knochennetzes von annähernd runder, isodiametrischer Gestaltung (Textfig. 6, 7). Diese isodiametrische Gestaltung erstreckt sich auch auf die nächste Umgebung der Druckpole, und zwar einerseits, weil der Druck des Hirns sich nicht auf einen Punkt beschränkt, sondern sich vielmehr auf einen kleinen Flächenraum verteilt, und anderseits, weil die Spannungen sich an nahe benachbarten Stellen nur wenig ändern. In etwas größeren Entfernungen von den

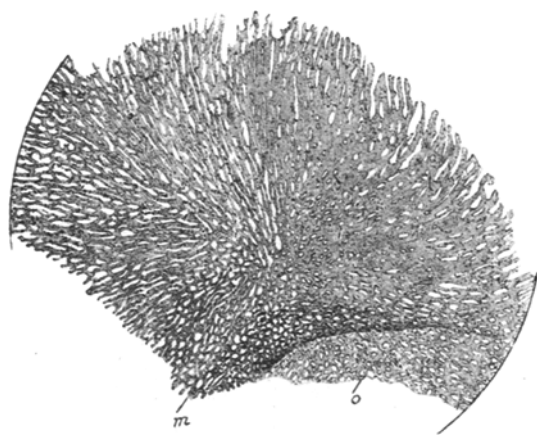


Fig. 7. Menschlicher Fötus A. Knochenkern des r. Stirnbeines nach Entfernung des äußeren Periostes und der Dura mater. *m* Oberaugenhöhlenrand. *o* Orbitalplatte des Stirnbeines. Die äußersten Spitzen des Netzwerkes und kleine Teile der Orbitalplatte fehlen. Kanadabalsam. Vergr. 3 fach.

Druckpolen geht sodann die isodiametrische Gestalt der Maschenräume allmählich in die verlängerte Form über, bis in den mehr peripherischen Zonen die Maschenwerke eine ausgesprochen gestreckte Gestalt aufweisen.

Diese in den peripherischen Gebieten des Knochennetzes mehr und mehr zum Ausdruck kommende gestreckte Gestalt der Maschenräume entspricht dem allmählich stärkeren Vorwiegen der meridionalen Spannungen gegenüber den Breitenparallelspannungen. Sie ermöglicht es, daß ungeachtet des Vorwiegens der tangentialen Gesamtspannung die Materialspannungen des Knochengewebes bei annähernd gleicher Dicke der einzelnen Netzbalken überall annähernd gleich groß sind. Die Materialspannungen des Knochengewebes sind offenbar in allen Netzbalken annähernd um den gleichen Betrag über ihren kritischen Wert erhöht, womit ein annähernd gleichmäßiges Wachstum aller Teile des Knochennetzes gewährleistet wird.

Untersucht man den Druckpol des *Os parietale* der Textfig. 6 etwas genauer, so bemerkt man, daß das Feld, welches isodiametrische Knochenetze aufweist, nicht kreisrund ist

sondern in dem von der Mitte des Sagittalrandes zu der Mitte des Schuppenrandes ziehenden Durchmesser deutlich verlängert erscheint. Offenbar ist diese Unregelmäßigkeit veranlaßt durch den Umstand, daß in diesem Entwicklungsstadium die kleine Fläche, in deren Bereich das Gehirn an die Innenfläche des Scheitelbeines drückt, nicht rund, sondern nach einer Richtung hin verlängert ist. Man kann sich auch vorstellen, daß jetzt noch zwei nahe bei einander liegende Druckpole vorhanden sind, die sich jedoch nicht mehr scharf von einander abgrenzen lassen. Man kann jedoch auch die beiden Pole in einen Pol vereinigt denken, in dessen Umgebung die Meridionalspannungen nach den verschiedenen Richtungen hin etwas ungleich sind.

Am Stirnbeine liegen bei dem gleichen Fötus die Druckpole beiderseits in der Nähe des Orbitalrandes. Hier weist die Schädelkapsel eine Faltung auf, durch welche der vertikale in den horizontalen Teil des Stirnbeines übergeht (Textfig. 7). Begreiflicherweise ist es schwierig, die Spannungen in einer so wenig einfach gestalteten Membran theoretisch abzuleiten. Doch lassen sie sich zum großen Teile aus der Gestaltung der Knochennetze erschließen. Dabei gewinnt man den Eindruck, daß hier außer dem Drucke des Schädelinhaltes noch ein zweiter Faktor von erheblichem Einflusse auf die Gestaltung der Schädelwand ist. Es scheint, daß an dem lateralen Ende des Oberaugenhöhlenrandes des Stirnbeines Zugwirkungen von dem Antlitzteile des Schädels auf die knöcherne Hirnkapsel übergeleitet werden. Diese Zugwirkungen waren vermutlich mitbeteiligt bei der früher besprochenen Knickung der Schädelkapsel. Offenbar bestehen sie auch noch in der gegebenen Entwicklungsperiode des Schädels. Dies kann bei der im ganzen weichen Beschaffenheit des letzteren nicht auffallen. Sie sind jedoch immer zu erwarten, so lange die Knickung der Schädelkapsel nachweisbar ist, also während des ganzen Lebens. Eine Änderung der Größe dieser Zugwirkungen aber dürfte mitwirken bei den physiologischen Änderungen der Größe des Sattelwinkels, welche im Laufe des Lebens eintreten.

Um das Stirnbein in der auf Textfig. 7 gegebenen Weise freizulegen, war es erforderlich, das Periosteum externum und die Dura mater abzupräparieren. Dabei waren leichte Verletzungen und Verstümmelungen der Maschenwerke nicht zu vermeiden.

Das gleiche Verfahren gestattet auch, den Knochenkern der Hinterhauptschuppe in seiner ganzen Ausdehnung zur Untersuchung zu bringen. Seine feste Verbindung mit den basalen Knorpelmassen ist jedoch dabei etwas hinderlich, so daß ich von einer bildlichen Wiedergabe dieses Knochenkernes abgesehen habe. Die mikroskopische Untersuchung desselben ergab außer den bereits oben erwähnten Befunden eine kurze, glattrandig begrenzte, mediane Spalte in der Hinterhauptschuppe. Ob die Erklärung, welche Welcker¹⁾ von derselben gegeben hat, zutrifft, möchte ich vorläufig unentschieden lassen, werde jedoch unten auf dieselbe zurückkommen. Außerdem fiel es auf, daß das Gebiet der isodiametrischen Knochenetze in der Umgebung des fünften, hinteren Druckpoles eine relativ sehr große Ausdehnung besaß. Der Druck der Hirnmasse dürfte somit an dem okzipitalen Druckpol auf eine verhältnismäßig große Fläche gewirkt haben. Erst an den Rändern der Hinterhauptschuppe nehmen die Knochenetze eine zum Druckpol meridional gerichtete, langgestreckte Gestalt an.

Für die Untersuchung der weiteren Umgestaltungen und namentlich des Dickenwachstums der Knochen des Schädeldaches eignet sich das Os parietale in hervorragender Weise, da es infolge seiner einfachen Formen leicht in allen seinen Teilen übersehen werden kann. Die Betrachtung wendet sich daher vor allem diesem Skelettstück zu, indem die übrigen Knochen des Schädeldaches nur so weit herangezogen werden, als dies zur Kontrolle der gewonnenen Resultate wünschenswert erscheint.

¹⁾ Welcker, H., Untersuchungen über Wachstum und Bau des menschlichen Schädels. Leipzig 1862.

Zunächst bemerkt man auf obigen Flächernbildern (Textfig. 6, 7) der Schädeldachknochen eines Fötus von 78 mm, daß die Knochenetze nicht in ihrer ganzen Ausdehnung einfach in einer Fläche liegen. Vielmehr gewinnt man den Eindruck, daß wenigstens in ihren mittleren Abschnitten die Knochenbalken sich in zwei übereinander liegende Netze zu ordnen beginnen. Diese Gestaltung wird anschaulicher, wenn man die Knochen entkalkt und auf gefärbten Dünnschnitten¹⁾ untersucht. Die Textfig. 8, I zeigt bei 12 facher Vergrößerung einen Normalmeridionalschnitt²⁾ des linken Scheitelbeines des Fötus von 78 mm Scheitelsteißlänge. Der Schnitt reicht von dem Druckpol *t* bis zu der Sutura lambdoidea *l*.



Fig. 8. I. Normalmeridionalschnitt des Os parietale sin. des menschlichen Fötus A von 78 mm Scheitelsteißlänge. *t* Druckpol. *l* Sutura lambdoidea. II. Normalmeridionalschnitt des Os parietale sin. des Fötus B von 85 mm Scheitelsteißlänge. *t* Druckpol. *s* Sutura sagittalis. Schnittdicke 10 μ . Vergr. 12 fach.

¹⁾ Nach den Erfahrungen, welche Schaffer in der Enzyklopädie der mikroskopischen Technik 1903 zusammengestellt hat, habe ich versucht, die früher (Virch. Arch. Bd. 104, 1886. Ztschr. f. wiss. Mikr. Bd. 8, 1891) von mir in Vorschlag gebrachten Methoden der Entkalkung und Entsäuerung zu verbessern. Die Knochenstücke gelangen aus Alkohol unmittelbar in 5 proz bis 7 proz. wässrige Salpetersäure (1 vol. officinelle reine Salpetersäure, spez. Gew. = 1,153, verdünnt mit 3 bis 4 vol. Wasser) für 24 bis 48 Stunden. Umschütteln. Dann sofort in 5 proz. Kalialaunlösung für 24 Stunden, mehrfach wechseln. Auswaschen in fließendem Wasser 2 Stunden. Sodann 24 Stunden in Wasser mit Zusatz von Calcaria carbon. praecipitata und weitere 24 Stunden in 80 % Alkohol gleichfalls mit Zusatz von Calc. carbon. praec. — Abpinseln in reinem Wasser. Härtung in steigendem Alkohol. Das Schädeldach des Erwachsenen wird leichter schneidbar, wenn statt der 5 proz. Kalialaunlösung eine 3 proz. Kochsalzlösung zur Anwendung gelangt.

²⁾ Die hier abgebildeten Schnitte sind in der Regel tunlichst genau nach den Hauptspannungsrichtungen orientiert. Normalschnitte stehen senkrecht auf der Schädelaußenfläche. Sie stellen sich als Normalmeridionalschnitte dar, wenn sie zugleich in der Richtung der Meridionalspannungen liegen. Normalparallelschnitte stehen senkrecht auf der Schädelaußenfläche und verlaufen zugleich in der Richtung der Breitenparallelspannungen. Tangential-schnitte liegen in Ebenen, welche einer die Schädeloberfläche tangierenden Ebene parallel sind. Bei dem Gebrauche dieser Begriffe aber wolle man berücksichtigen, daß diese Orientierungen im Raume trotz aller geübten Sorgfalt nur annähernde sein können und im wesentlichen auf Augenmaß beruhen.

Er läßt erkennen, daß die dunkel gezeichneten Querschnitte der Knochenspangen stellenweise in zwei Reihen übereinander liegen, und bestätigt somit zunächst die an dem unzerlegten Skelettstück gewonnenen Ergebnisse. Außerdem machen sich jedoch einige weitere Eigentümlichkeiten der Architektur der Knochenetze bemerkbar. Man unterscheidet ohne Schwierigkeit meridional gerichtete Knochenbalken, welche entweder der Innenfläche des Periosteum externum oder der Außenfläche der Dura mater entlang laufen, von mehr oder weniger gekrümmten Knochenspangen, welche schräg zu der Schädeloberfläche gestellt sind. Diese schrägen Knochenspangen lassen zugleich, wie die Untersuchung einer größeren Anzahl von Normalmeridionalschnitten zeigt, im Verhältnis zum Druckpol eine gewisse Symmetrie ihrer Anordnung nicht übersehen, wenn diese auch nicht immer so deutlich hervortritt wie in Textfig. 9. Die schräg verlaufenden Knochenbalken stehen



Fig. 9. Fötus A. 78 mm. Normalmeridionalschnitt des Os parietale sin. *t* Gegend des Druckpols. *l* Sutura lambdoidea. Die drei Teile der Figur sind nach den Linien *a* und *b* zusammzusetzen. Schnittstärke 30 μ . Vergr. 20 fach.

symmetrisch zu einer Linie, welche in der Gegend des Druckpols senkrecht auf der Schädelaußenfläche errichtet werden kann, und durchkreuzen sich gelegentlich (Textfig. 8, 9) unter Winkeln, welche in der Projektion auf eine Normalmeridionalebene am Druckpol ungefähr 65 bis 85° messen, in den peripherischen Zonen des Scheitelbeines jedoch beträchtlich kleiner werden.

Endlich ist es sehr auffällig, daß das Periost der Schädelaußenfläche, welches den Knochenkern bedeckt, überall annähernd die gleiche Dicke aufweist. Der unverknöcherte Teil der Schädelwand, welcher den Knochenkern von dem Cavum cranii scheidet und welcher der Kürze halber als Dura mater bezeichnet werden kann, nimmt dagegen in der Peripherie des Knochenkernes um so mehr an Dicke zu, als hier die Gesamtdicke der Schädelwand erheblich größer ist als in der Gegend des Druckpols. Genauere Anhaltspunkte über die Gestaltung des Netzes der Knochenspangen gewann ich indessen erst durch Rekonstruktionen, zu welchen ich eine lückenlose Schnittserie durch den oberen Teil des in Textfig. 6 gezeichneten rechten Scheitelbeines verwendete.

Die Schnittreihe begann, indem sie sich etwas genauer dem Längsverlaufe der peripherischen Knochenspangen anpaßte, nahezu unmittelbar oberhalb des Schnittes, welcher in Textfig. 6 das Scheitelbein in zwei nahezu gleiche Teile zerlegt. Demgemäß mußte die Schnittreihe, wenn man in der gegebenen Entwicklungsperiode dem Scheitelbeine zwei nahe beieinander gelegene Druckpole zuschreibt, etwas unterhalb des oberen Druckpoles ihren Anfang nehmen. Sodann reichte sie über diesen Druckpol hinweg bis zu dem oberen Rande des Knochenkernes, während die einzelnen Schnitte die ganze Breite des Knochens trafen und einem von der Mitte des Margo frontalis zu der Mitte des Margo occipitalis gelegten Durchmesser parallel waren. Bei der Rekonstruktion bediente ich mich in ausgiebiger Weise der Übereinanderlagerung von Pauspapierzeichnungen, welche mit der Camera lucida hergestellt waren. Für die folgenden Textabbildungen dagegen habe ich nach dem Vorgange von Kaschtschenko die einzelnen Schnittflächen mit Hilfe der

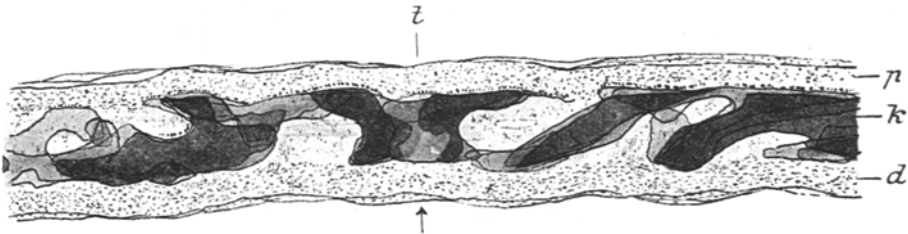


Fig. 10. Fötus A, 78 mm. Rechtes Scheitelbein. Normalmeridionalschnitte Nr. 36, 37, 39, 40, 41. *t* Druckpol. *p* Periost der Außenfläche. *k* Knochenspangen. *d* Dura mater. Schnittdicke 20 µ. Vergr. 60 fach.

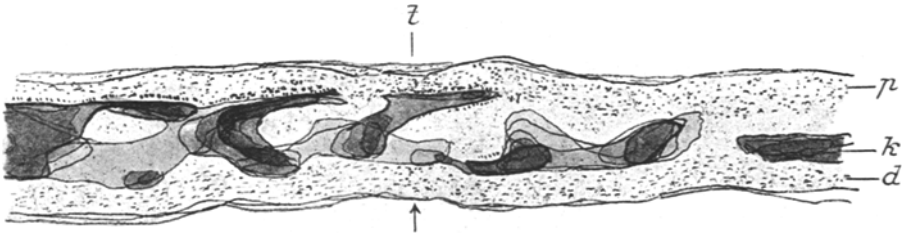


Fig. 11. Von demselben Scheitelbeine die Normalmeridionalschnitte Nr. 43, 44, 45, 46, 47. Buchstabenbezeichnungen, Schnittdicke und Vergrößerung wie in Fig. 10.

Kamera gruppenweise übereinander auf weißen Karton gezeichnet und die dem Beobachter näherliegenden Schnittflächen dunkler schattiert. Zumeist wurden auch die Zellkerne des Bindegewebes und des Knochenmarkes halbschematisch eingetragen, wobei, der leichteren Unterscheidung halber, das Periost und die Dura etwas zu zellreich und das Markgewebe etwas zellärmer gehalten wurde. Auch die Osteoblastenreihen fanden Berücksichtigung, soweit dies bei den gegebenen Vergrößerungen möglich war. In einigen Abbildungen sind die Außenbegrenzungen von Periost und Dura mater durch mehrere Linien gegeben, entsprechend kleinen Unterschieden der verschiedenen Durchschnitte. Bei der Orientierung aber waren, außer den bei schwachen Vergrößerungen gewonnenen Anhaltspunkten, die äußeren Begrenzungen von Periost und Dura und der Abstand von einer scharfen, hakenförmigen Umbiegung der Weichteile am Margo frontalis maßgebend. Zu diesen Auskunftsmitteln war ich gezwungen, nachdem ein Versuch, durch feine Baumwollfäden Orientierungsmarken zu gewinnen, fehlgeschlagen war. Bei diesen Methoden tritt namentlich die Projektion der Knochenspangen auf die Normalmeridianebene hervor. Eine andere Art der Behandlung, bei welcher vorwiegend die Gestaltung der Markräume erkennbar wird, findet später Erwähnung.

Die Textfig. 10 zeigt in einer bei 60 facher Vergrößerung wiedergegebenen Rekonstruktion die Anordnung der Knochenspangen des rechten Scheitelbeines

in der Nähe des Druckpols *t*. Man erkennt die annähernd symmetrisch zum Druckpol geordneten Knochenspangen, namentlich dann, wenn man die Textfig. 10 auf die Textfig. 11 gelegt denkt. Beide Figuren superponiert repräsentieren eine Schichte von 0,24 mm Dicke. In dieser unterscheidet man ohne Schwierigkeit zwei schräge, sich durchkreuzende Balkensysteme und zwei meridional gerichtete Balkensysteme, von denen das eine der Dura, das andere der Innenfläche des äußeren Periostes anliegt. In Textfig. 11 aber tritt noch deutlicher als in Text-

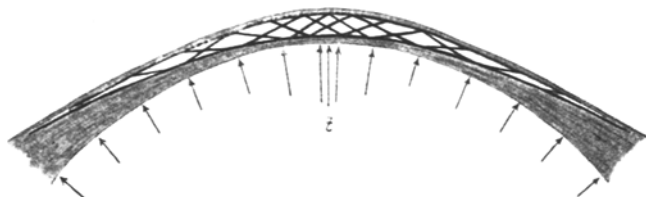


Fig. 12. Fötus A, 78 mm. Verlauf der Knochenspannen des Scheitelbeines, projiziert auf eine Normalmeridianebene. Die Pfeile sollen die Ungleichheiten des auf der Schädelinnenfläche lastenden Druckes zum Ausdruck bringen. Schema.

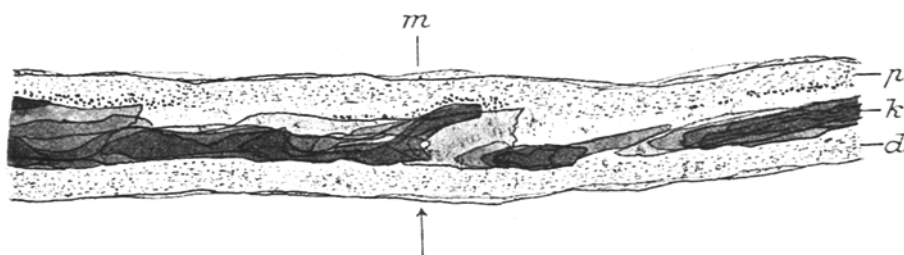


Fig. 13. Fortsetzung der Fig. 10, an den rechten Rand der letzteren anzusetzen. Punkt *m* ist im Objekt 1,8 mm vom Druckpol entfernt. Serienschritte Nr. 36, 37, 38, 39, 41. *p* Periost der Außenfläche. *k* Knochenspannen. *d* Dura. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 60 fach.

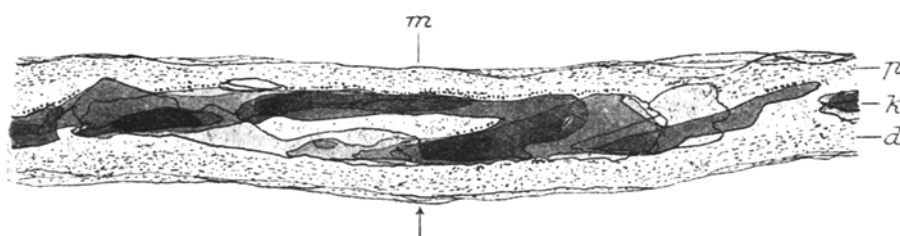


Fig. 14. Fortsetzung der Fig. 11, an den rechten Rand der letzteren anzusetzen. Serienschritte Nr. 43, 45, 46, 47, 49. Buchstabenbezeichnung wie oben. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 60 fach.

figur 10 die Tatsache hervor, daß die schrägen Balkensysteme sich auch durch den Druckpol hindurch ungestört fortsetzen. Schematisch ist diese Anordnung der Balkensysteme durch schwarze Linien dargestellt in Textfig. 12 bei ungefähr 7 facher Vergrößerung. In dieser schematischen Darstellung erscheinen allerdings die Durchkreuzungswinkel der schrägen Knochenspannen spitzer als in der Wirklichkeit, weil die einzelnen schrägen Knochenspannen durch gerade Linien wiedergegeben sind. In der Wirklichkeit sind diese schräg verlaufenden Knochenspannen S-förmig

gekrümmt, wobei ihre Durchkreuzungswinkel sämtlich etwas größer werden. Unberücksichtigt blieb auch die Tatsache, daß die verschiedenen Balkensysteme auf dem einzelnen Dünnschnitt beträchtliche Lücken aufweisen. Behält man jedoch diese Tatsache im Auge, so gelingt es ohne Schwierigkeit, alle Knochenbalken, welche auf Textfig. 6, 8, 9, 10, 11 zu sehen sind, als Teile der in Textfig. 12 gezeichneten Liniensysteme zu erkennen.

In den mehr peripherisch gelegenen Teilen des Knochenkernes kehren, wie durch Textfig. 13 und 14 veranschaulicht werden soll, genau die gleichen architektonischen Formen wieder. Doch erscheinen hier die Maschen des Knochennetzes in meridionaler Richtung mehr in die Länge gezogen. In noch größerer Entfernung vom Druckpol nähern sich sodann die Knochenbalken, welche der Dura und dem äußeren Periost anliegen, mehr und mehr und gehen schließlich in ein einschichtiges Netzwerk von Knochenspannen über, welches den Rand des Knochenkernes bildet (Textfig. 15). Für die weitere Verständigung erscheint es jedoch wünschenswert, die schrägen Knochenbalken oder Knochenspannen in zwei Sy-



Fig. 15. Fötus A, 78 mm. Peripherische Zonen des r. Scheitelbeines. Normalmeridianschnitte Nr. 12, 13, 14. Der linke Rand der Zeichnung ist im Objekt 2,15 mm vom Druckpol entfernt. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 30 fach.

steme zu zerlegen, in die kataklinen und in die anaklinen Balken oder Spannen. Die kataklinen Spannen sind dadurch ausgezeichnet, daß ihre an die Dura grenzenden Fußpunkte dem Druckpol näher liegen als ihre an das äußere Periost stoßenden Enden. Die anaklinen Knochenspannen dagegen zeigen die entgegengesetzte Neigung. Ihre an der Dura gelegenen Fußpunkte stehen weiter vom Pol ab als ihre an das Periost grenzenden Enden. Die Spannen beider Systeme ändern indessen in den verschiedenen Zonen des Scheitelbeines ihre Richtungen, welche sich in größeren Entfernungen vom Druckpol mehr der tangentialen nähern. Die Durchkreuzungswinkel der schrägen Knochenspannen werden daher in den peripherischen Zonen des Scheitelbeines ungleich kleiner als in der Druckpolregion. Am Druckpol aber setzt sich das System der anaklinen Knochenbalken jeder Seite ohne Störung in das System der kataklinen Knochenbalken der andern Seite fort. Dieses Verhalten ist in übersichtlicher Weise in der schematischen Textfigur 12 dargestellt.

Der normalmeridionale Durchschnitt des embryonalen Scheitelbeines stimmt mit der auf Textfig. 6 gegebenen Flächenansicht desselben darin überein, daß in den peripherischen Zonen die Maschenräume mehr und mehr in meridionaler Richtung verlängert erscheinen. Wie bereits oben bemerkt wurde, erklärt sich diese

Besonderheit durch den von dem wachsenden Gehirn erzeugten Spannungszuwachs, welcher in einigem Abstände vom Druckpol die meridianen Gesamtspannungen stärker hervortreten läßt. Die Zerlegung des ein Netzwerk im Raume bildenden Knochenkernes in einzelne Knochenspangen enthält indessen eine Abstraktion, welche es wünschenswert erscheinen läßt, eine mehr körperliche Vorstellung zu gewinnen. Auf Textfig. 6 erscheint der Knochenkern des Scheitelbeines als eine Platte, welche von zahlreichen Markräumen perforiert ist. Die Gestalt dieser Markräume tritt mit ihren Besonderheiten plastisch hervor, wenn man aus einzelnen Gruppen von Serienschritten Schichtenbilder erzeugt. Indem man die einzelnen Serienschritte mit der Camera lucida auf Karton zeichnet, läßt man diejenigen Teile der Umrisse der einzelnen Knochenspangen weg, welche von den überliegenden

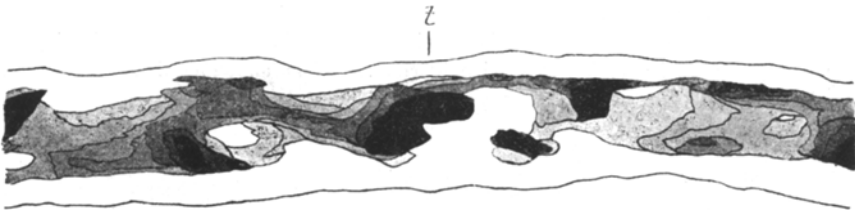


Fig. 16. Fötus A, 78 mm. Os parietale dext. Knochenspangen und Markräume in der Umgebung des Druckpoles *t* als Schichtenbild. Normalmeridianschnitte Nr. 70–77. Die Knochen-
teile des zu oberst gelegenen Schnittes Nr. 70 schwarz. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 60 fach

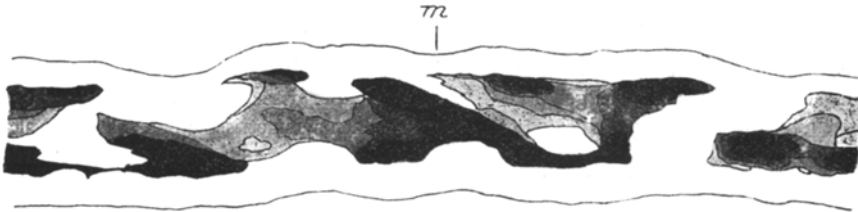


Fig. 17. Fötus A, 78 mm. Os parietale dext. Schichtenbild der Normalmeridianschnitte Nr. 38 (oben, dunkel) bis 44. Der Punkt *m* ist im Bilde 102 mm und im Objekt 1,7 mm von dem rechts gelegenen Druckpole entfernt. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 60 fach.

Schichten der Knochenspangen verdeckt werden. Die einzelnen Schichten aber kann man durch ungleiche Tönung unterscheiden, welche für die tiefer gelegenen Schnittebenen an Intensität abnimmt. Man erhält dabei plastisch hervortretende Bilder, welche an Landkarten erinnern, die nach dem Höhenschichtensystem gezeichnet sind, Schichtenbilder. Die Textfig. 16 stellt ein solches Schichtenbild aus der Gegend des Druckpoles dar, während Textfig. 17 in gleicher Weise die Gestaltung der Markräume in einigem Abstände vom Druckpol gibt. Man kann aus diesen Rekonstruktionen entnehmen, daß die Knochenplatte in regelmäßiger Weise von zwei Kanalsystemen durchbohrt ist, von einem kataklinen und von einem anaklinen Kanalsystem. In der Nähe des Druckpoles durchkreuzen sich diese beiden Kanalsysteme unter nahezu rechten Winkeln und verlaufen ziemlich steil zu den vom Periost und von der Dura mater gebildeten

Flächen. Doch beruht es nur auf Zufälligkeiten, wenn man auf Textfig. 6 in der Nähe des Druckpoles den Eindruck gewinnt, daß einige Kanäle den Knochen annähernd senkrecht durchbohren. In den peripherischen Zonen des Knochenkernes nähert sich jedoch die Richtung der beiden Kanalsysteme mehr der tangentialen, wobei die kataklinen Kanäle in dem Grade zur Herrschaft gelangen, daß sie den Gesamteindruck beherrschen. Die Anordnung der Zwischenräume zwischen den schrägen schwarzen Linien auf Textfig. 12 gibt annäherungsweise eine Vorstellung auch über diese Tatsachen.

An einzelnen, scheinbar unregelmäßig zerstreuten Stellen erscheinen auf Normalmeridianschnitten die beiden Systeme der schrägen Knochenbalken stellenweise ersetzt durch Knochenplatten (Textfig. 18). Die Platten sind indessen nur Durchschnitte etwas massigerer Knochenanteile, deren Auftreten eine Zufälligkeit darstellt, die auf lokalen Störungen der mechanischen Beanspruchung beruhen dürfte.

Das Gebiet des Druckpoles des Scheitelbeines, welches in Textfig. 6 durch isodiametrische Knochenetze ausgezeichnet ist, stellt eine Fläche von nicht unbeträchtlicher Größe dar. Es



Fig. 18. Fötus A, 78 mm. Normalmeridianschnitt Nr. 7 des r. Scheitelbeines. Knochenplatte an Stelle der schrägen Knochenbalken. *t* Druckpol. *p* Periost der Außenfläche. *k* Knochen- spangen. *d* Dura mater. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 30 fach.

kann daher in keiner Weise auffallen, daß in einer Schnittserie, welche normal zur Schädeloberfläche durch dieses Druckgebiet gelegt ist, sehr zahlreiche Schnitte einen ähnlichen Befund liefern. In jedem Schnitte aber liegen die schrägen Knochenbalken symmetrisch zu einer Linie, welche in der Mitte des Druckgebietes senkrecht zu der Schädeloberfläche steht. Diese Linien wurden in vorstehenden Abbildungen jeweils mit dem Buchstaben *t* bezeichnet und mit dem Druckpol identifiziert. Letzteres Verfahren ist allerdings nur annähernd zutreffend. Die Linie *t* darf, genau genommen, nur als Symmetrielinie bezeichnet werden, wobei anzunehmen ist, daß die Symmetrielinie von irgendeinem dieser Schnitte durch den Druckpol hindurchgeht. Es gelingt jedoch nicht, die durch den Druckpol ziehende Symmetrielinie von benachbarten Symmetrielinien zu unterscheiden. Die Bezeichnung Druckpol hat also hier immer nur einen annähernden Wert. Indessen besitzen alle bisher besprochenen Normalmeridianschnitte eine Gesamtdicke von $80 \times 20 \mu = 1,6 \text{ mm}$, welche in Textfig. 6 einem Streifen von 4,8 mm Breite entspricht, der zwischen den Linien $\alpha-\alpha$ und $\beta-\beta$ enthalten ist. Ich darf also behaupten, daß einer der von mir untersuchten Schnitte genau durch den oberen Druckpol des Os parietale hindurchging und eine Architektur zeigte, wie sie in den bisher gegebenen Beschreibungen und Abbildungen enthalten ist. Sodann ließe sich in ähnlicher Weise die geringe Ungenauigkeit rechtfertigen, welche in dem hier geübten Gebrauche des Begriffes „Normalmeridionalschnitt“ liegt. Doch will ich dabei nicht verweilen.

Ein Vergleich der verschiedenen, zwischen den Linien $\alpha-\alpha$ und $\beta-\beta$ der Textfig. 6 enthaltenen Normalmeridianschnitte ergibt, daß die Symmetrielinien in der Nähe des Druckpoles annähernd in einer Ebene enthalten sind, welche auf den Schnittebenen senkrecht steht und zugleich senkrecht auf die Schädeloberfläche trifft. Hierbei sehe ich ab von den kleinen Ungenauigkeiten, welche sich aus der netzförmigen Architektur des Knochenkernes ergeben, und ebenso von den Ungenauigkeiten, welche aus dem nicht vollkommen symmetrischen Verlaufe der Ränder des Scheitelbeines und aus der auf zwei Druckpole hinweisenden Anordnung der Knochenetze hervor-

gehen. Dieselbe symmetrische Anordnung der Knochenspangen ist jedoch auch zu erkennen, wenn man die gegebene Schnittserie von der Linie $\beta=\beta$ der Textfig. 6 bis zum oberen Rande des Knochens hin verfolgt. Auch hier in den exzentrischen Teilen des Scheitelbeines liegen die Symmetrielinien genau in einer zu der Schnittebene und zu der Schädeloberfläche senkrechten Ebene, soweit nicht die dichte Gruppierung der Knochenkanäle von Schnitt zu Schnitt kleine, abwechselnd nach der einen und nach der andern Seite hin erfolgende Verschiebungen der Symmetrielinien bewirkt. Nur in den äußersten Randzonen des Knochenkernes, in welchen dieser annähernd ein einschichtiges Netzwerk bildet, ist die Symmetrie auf solchen Schnitten nicht mehr erkennbar, weil die schrägen Knochenbalken hier nicht mehr deutlich hervortreten. Die Textfig. 6 aber zeigt, daß man im wesentlichen die gleichen Befunde zu erwarten hat, wie man auch die Schnittebene um eine durch den Druckpol gehende, zur Schädeloberfläche senkrechte Linie dreht. Selbstverständlich ist dieses Folge des Umstandes, daß die mechanische Beanspruchung in allen Meridianen des Knochenkernes im wesentlichen die gleiche ist.

Auf den Normalschnitten γ , δ und ε , welche mehr oder weniger weit vom Pol verlaufen, ist indessen die Neigung der Knochenspangen eine etwas andere als auf den Normalmeridional-

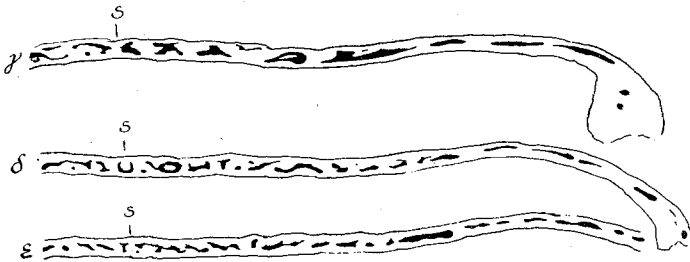


Fig. 19. Fötus A, 78 mm. Os parietale dext. Normalschnitte, welche den Normalmeridianschnitten der Textfig. 10–18 parallel verlaufen. *s* Symmetrielinie. Schnitt γ entspricht in Textfig. 6 der Linie $\gamma-\gamma$, Schnitt δ der Linie $\delta-\delta$ und Schnitt ε der Linie $\varepsilon-\varepsilon$. Schnittdicke von $\gamma = 20 \mu$, von δ und $\varepsilon = 10 \mu$. Vergr. 10 fach.

Der Abstand von der durch den Druckpol gehenden Linie $\alpha-\alpha$ in Textfig. 6 ist für den Schnitt $\gamma = 2$ mm, für den Schnitt $\delta = 4$ mm und für den Schnitt $\varepsilon = 4,5$ mm, gemessen im Objekt.

schnitten, wenn sie auch keine prinzipiellen Unterschiede darbietet. Wenn die Symmetrielinie nicht mit dem Druckpol zusammenfällt, erscheinen in der Umgebung der ersteren die schrägen Knochenbalken steil aufgerichtet und zuweilen senkrecht zur Oberfläche gestellt (Textfig. 19). Im Bereiche der nächsten Umgebung der Symmetrielinie sind die in Rede stehenden Schnitte als Breitenparallelschnitte zu betrachten. Man erkennt somit, daß auf dem Breitenparallelschnitt die Wandungen der Markräume — soweit diese Wandungen einer Normalmeridionalebene parallel verlaufen — häufig senkrecht zur Schädeloberfläche stehen. In einiger Entfernung von den Symmetrielinien dagegen ist, wenn diese Symmetrielinien nicht mit dem Druckpol zusammenfallen, die Schnitttrichtung weder den Breitenparallelen noch den Meridianen parallel; sie nähert sich jedoch etwas der Meridianrichtung. Die Neigungen der anaklinen und kataklinen Knochenspangen ändern sich daher verhältnismäßig rasch, indem zugleich eine Ähnlichkeit ihrer Verlaufsrichtung mit den Befunden auf Normalmeridianschnitten um so mehr hervortritt, je mehr die Betrachtung sich den peripherischen, von der Symmetrielinie weiter entfernten Teilen des Schnittes zuwendet¹⁾.

¹⁾ An dieser Stelle möchte ich für Nachuntersuchungen bemerken, daß die bei der Härtung dieses Fötus in Alkohol eingetretenen, nicht ganz unerheblichen Difformitäten des Schädeldaches sich wohl sämtlich hätten vermeiden lassen, wenn der frische Fötus von der Nabelarterie oder vom Herzen her mit 96 proz. Spiritus oder einer andern härtenden Flüssigkeit injiziert worden wäre. Bei diesem keineswegs schwierigen Verfahren hätte man auch erwarten dürfen, die Mitosen und andere feine Gewebsstrukturen besser zu erhalten.

Die vorstehenden Befunde führen in ihrer Gesamtheit zu dem Schlusse, daß der Knochenkern des Scheitelbeines in dem gegebenen Entwicklungsstadium nach allen Seiten hin annähernd symmetrisch um den Druckpol gebildet ist. Man kann sich seine Architektur ziemlich genau vergegenwärtigen, wenn man annimmt, daß dieselbe auf allen Normalmeridionalschnitten, welche man in den verschiedensten Richtungen durch den Druckpol legen kann, im wesentlichen die gleiche sei, wie sie oben für eine bestimmte Normalmeridianebene beschrieben wurde. Dieses Ergebnis wird eine volle Bestätigung bei dem wenig älteren Fötus B finden, dessen Scheitelbeine ich nach verschiedenen Richtungen hin in Normalmeridionalschnitte zerlegte. Gegenwärtig erscheint es indessen wünschenswert, die Frage zu besprechen, wie man die Entstehung dieser eigenartigen Spongiosaarchitektur zu erklären habe.

v. G u d d e n ¹⁾ hat vor einer längeren Reihe von Jahren die Vermutung ausgesprochen, daß der mit unbewaffnetem Auge erkennbare (Textfig. 5) radiäre Bau der Knochen des Schädeldaches Folge sei einer radiären Anordnung der Blutgefäße. Da v. G u d d e n indessen die radiäre Anordnung der Blutgefäße völlig unerklärt ließ, konnte er notwendigerweise nicht zu dem Nachweis eines kausalen Zusammenhanges gelangen. Man hätte auf Grund seiner Untersuchungen ebensowohl behaupten können, daß die radiäre Anordnung der Blutgefäße Folge der radiären Anordnung der Knochenbalken sei. Indessen zeigen die oben beschriebenen Normalmeridional- und Parallelschnitte ebenso wie die Tangentialschnitte der platten Schädelknochen des Fötus von 78 mm (Textfig. 20), daß keine so enge Beziehung zwischen dem Verlaufe der Knochenspangen und der Blutgefäße besteht, wie sie v. G u d d e n angenommen hatte. Die Blutgefäße sind allerdings auf die Markräume beschränkt, in diesen sind jedoch neben den Blutgefäßen so reichliche Mengen von Markgewebe enthalten, daß der Verlauf der Blutgefäße vielfach von dem Verlaufe der Knochenspangen abweicht. Dies gilt zunächst für die in Textfig. 20 gezeichneten, weit klaffenden, größeren Venen, noch mehr aber für die Arterien, welche so klein sind, daß sie bei der schwachen Vergrößerung der Textfig. 20 nicht erkannt werden können. Die Blutgefäße können daher in keiner Weise für die Architektur der Spongiosa maßgebend sein. Vor allem aber erscheint es völlig ausgeschlossen, den oben beschriebenen anaklinen und kataklinen Verlauf der Knochenbalken und Spongiosakanäle aus dem Verlaufe der Blutgefäße zu erklären, wenn auch in den intermediären und peripherischen Zonen des Knochens die kataklinen Kanäle der Spongiosa sich infolge der Blutfüllung ihrer Gefäße als rote, radiäre Streifen dem unbewaffneten Auge bemerkbar machen.

Die Architektur der Spongiosa des fötalen Scheitelbeines und die in allen wesentlichen Punkten übereinstimmende Architektur der übrigen Knochenkerne des Schädeldaches ist offenbar abhängig von ihrer mechanischen Beanspruchung. Diese stellt sich, wie oben besprochen wurde, zunächst als eine tangential Zug-

¹⁾ B. v. G u d d e n, Experimentaluntersuchungen über das Schädelwachstum. München 1874.

spannung dar, welche erzeugt wird von dem Drucke des Gehirns und des Liquor cerebrospinalis. In einer zur Schädeloberfläche senkrechten Richtung würden diese tangentialen Zugspannungen durchkreuzt werden von Druckspannungen, welche den Druck des Schädelinhaltes gleichmäßig auf die verschiedenen Schichten der Schädelwand verteilen. Aus dem Inhalte der ersten Mitteilung geht jedoch hervor, daß die Druckwirkungen des Schädelinhaltes sehr viel kleiner sind als die tangentialen Zugspannungen. Erstere können daher nur geringere Mengen von Knochengewebe zur Entwicklung bringen. Das Wachstum der Knochenkerne des

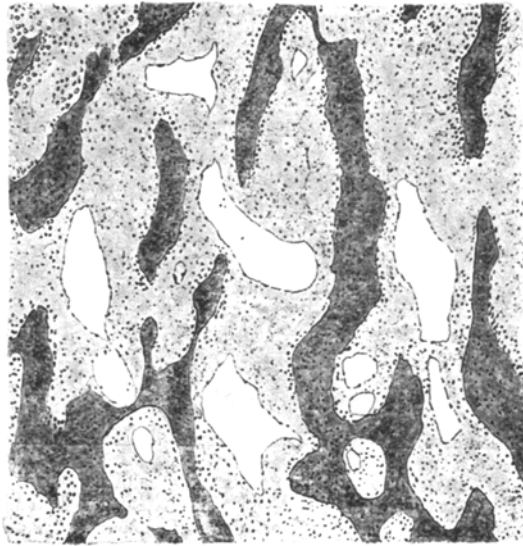


Fig. 20. Fötus A, 78 mm. Tangentialschnitt des linken Stirnbeines mit klaffenden Venenlichtungen. Letztere sind der Deutlichkeit halber leer gelassen. Knochenbalken dunkel. Schnittdicke 15 μ . Vergr. 60 fach.

fötalen Schädeldaches würde hauptsächlich von den tangentialen Zugspannungen abhängig sein.

Indessen ist man zu der Annahme genötigt, daß der an den Druckpolen angreifende Druck des Gehirns während des Wachstums fortdauernd geringe Biegungsspannungen in den verknöcherten Teilen des Schädeldaches hervorruft. Ich vermute, daß diese Biegungsspannungen in Verbindung mit den soeben genannten geringen Druckspannungen einigen Einfluß besitzen auf den Verlauf der kataklinen und anaklinen Knochenspannen und Knochenkanäle. Doch ist der Nachweis vorläufig wegen der Schwierigkeiten der mathematischen Analyse nicht in direkter Weise zu führen. Außerdem wird es sich zeigen, daß die gegebenen Formen der Knochenetze des Schädeldaches auch ohne die Annahme von Biegungsspannungen zu deuten sind. Letztere dürften daher nur sehr geringe Werte erreichen. Daß sie aber vorhanden sind und eine erhebliche Bedeutung besitzen, ergibt sich alsbald

bei einer genaueren Untersuchung der Struktur und der Histogenese der Schädeldachknochen.

Die lamelläre Struktur der Knochenspangen des Schädeldaches ist in den frühesten Entwicklungsperioden mit den gewöhnlichen Hilfsmitteln nur schwer und undeutlich zu erkennen. Unter dem Polarisationsmikroskope dagegen tritt sie bei gekreuzten Nikols ohne Schwierigkeit hervor. Der Verlauf der Knochenlamellen ist nahezu überall der äußeren Oberfläche des Schädels parallel (Textfigur 21). Besondere Berücksichtigung aber verdient die Tatsache, daß auch die Knochenlamellen der schrägen Knochenspangen der Schädeloberfläche parallel verlaufen und daher die Verlaufsrichtung dieser schrägen Spangen mit spitzen Winkeln durchkreuzen. Doch kommen an einzelnen schrägen Knochenspangen ge-

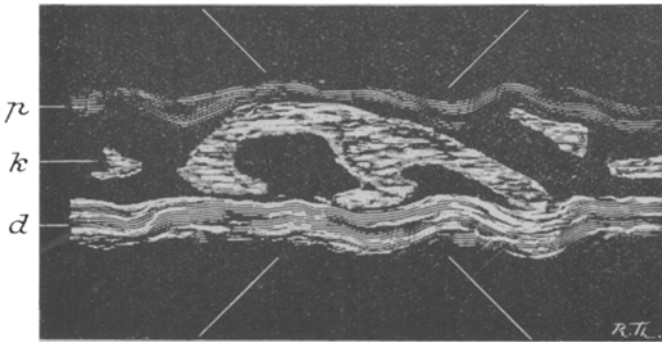


Fig. 21. Fötus A, 78 mm. Os parietale sin. entkalkt. Normalmeridianschnitt, 50 μ dick, ungefärbt in Glyzerin. Polarisiertes Licht. Die gekreuzten geraden Linien bezeichnen die Polarisations Ebenen der beiden Nikols. *p* Periost der Außenfläche. *k* Knochenspangen. *d* Dura mater. Der Druckpol liegt ungefähr am rechten Rande der Figur. Vergr. 60 fach.

tegentlich in geringer Ausdehnung dünne Knochenlamellen vor, welche nicht der Schädeloberfläche, sondern der schrägen Oberfläche dieser Spangen parallel verlaufen. Man kann sie als *Speziallamellen* unterscheiden von den *Grundlamellen*, welche der Schädeloberfläche parallel sind.

Die Grundlamellen bestehen aus einem Knochengewebe, dessen Besonderheiten bereits von Gegenbaur¹⁾ und v. Ebner²⁾ bemerkt und durch die Bezeichnungen Wurzelstock, geflechtartiger Knochen zum Ausdrucke gebracht wurden. Diese Besonderheiten scheinen darauf zu beruhen, daß die Fibrillen in jeder einzelnen Lamelle keineswegs so regelmäßig unter sich parallel verlaufen wie in den Knochenlamellen, welche in späteren Lebensperioden gebildet werden. Damit erklärt es sich, daß der lamelläre Bau im unpolarisierten Lichte nicht deutlich hervortritt. Demungeachtet kann man jedoch nach der Untersuchung im polarisierten Lichte behaupten, daß die doppelbrechenden Fibrillen je zweier aufeinanderfolgender Grundlamellen sich mit rechten oder nahezu rechten Winkeln überkreuzen und zugleich der Schädeloberfläche annähernd parallel verlaufen.

¹⁾ Gegenbaur, Jenaische Zeitschr. f. Med. u. Naturwiss. Bd. 1, 1864. Bd. 3, 1867.

²⁾ v. Ebner, Sitzungsber. d. K. k. Akad. Wien, math.-naturw. Kl., III. Abt. Bd. 70, 1874, Bd. 72, 1875.

Ob die der Schädeloberfläche parallelen Knochenfibrillen der Grundlamellen eine bestimmte Verlaufsrichtung bevorzugen, ist nur zu entscheiden, wenn man außer Normalmeridianschnitten auch Normalschnitte untersucht, welche nicht durch den Druckpol verlaufen. Gehen solche Normalschnitte durch die Randzonen, so stellen sie sich als Breitenparallelschnitte dar. Sind sie in einiger Entfernung vom Druckpol, etwa nach der Linie $\varepsilon\varepsilon$ der Textfig. 6 geführt, so stellen sie sich in der Nähe der Symmetrielinie als Breitenparallelschnitte dar, während sie an ihren beiden Enden mehr und mehr einen annähernd meridionalen Verlauf gewinnen. Die Untersuchung aber zeigt, daß nur in den peripherischen Zonen des Scheitelbeines ein deutliches Vorwiegen meridional verlaufender Knochenfibrillen nachweisbar ist.

Der zu der Schädeloberfläche parallele Verlauf der Lamellen, aus welchen in dem gegebenen Entwicklungsstadium die Knochenspangen des fötalen Schädeldaches bestehen, erklärt sich in einfachster Weise, wenn letzteres durch eine Ap-

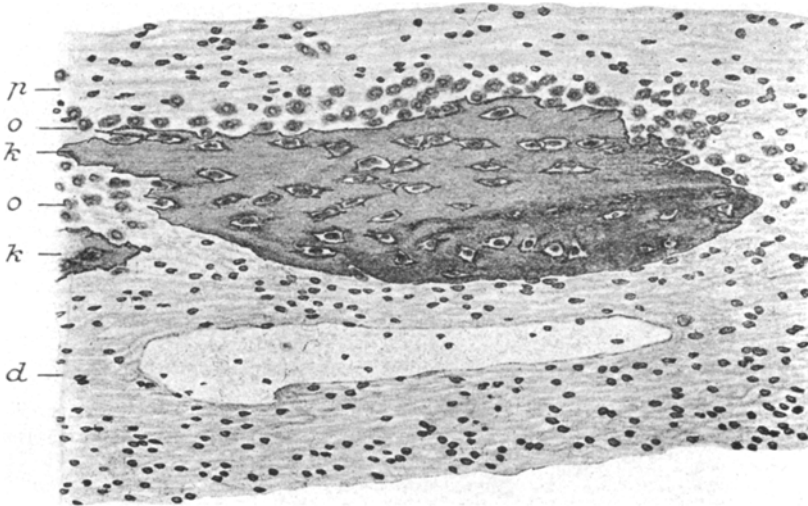


Fig. 22. Fötus A, 78 mm. Os parietale sin. *p* Periost der Außenfläche. *o, o* Osteoblasten. *k, k* Knochenspangen. *d* Dura Mater mit großer Vene. Die Mitte des Bildes ist 5,05 mm vom Margo frontalis und 3,85 mm vom Druckpol entfernt. Margo frontalis links und Druckpol rechts, außerhalb der Bildgrenzen. Schnittdicke 10 μ . Vergr. 210 fach.

position von Knochenlamellen an seiner äußeren oder inneren Fläche wächst. Untersucht man sodann gefärbte Dünnschnitte im gewöhnlichen Lichte mit stärkeren Vergrößerungen, so erhebt man weitere Befunde, aus denen hervorgeht, daß die Apposition von Knochengewebe in diesen früheren Perioden des Wachstums nahezu ausschließlich an der äußeren Fläche des Knochennetzes erfolgt. Die Osteoblasten¹⁾, welche die jungen Knochenlamellen liefern, finden sich nahezu ausschließlich an denjenigen Flächen des Knochenkernes, welche dem äußeren Perioste zugewendet sind, während sie auf den an die Dura mater grenzenden Knochenflächen sehr spärlich sind oder völlig fehlen (Textfig. 22). Dieses gilt für die ganze Flächenausdehnung des Scheitelbeines, mit Ausnahme einer Rand-

¹⁾ Das grobkörnige Protoplasma der Osteoblasten und der Knochenzellen färbt sich ziemlich lebhaft mit Eosin.

zone, deren Breite nach 32 Messungen am linken Scheitelbeine ungefähr einem Drittel der Meridianlänge des Knochenkernes (Textfigur 8, I) gleichkommt, im Mittel 2,48 mm beträgt und zwischen den Grenzen von 0,38 mm und 4,13 mm schwankt. Im Bereiche dieser Randzone finden sich sowohl an der Außenfläche als an der Innenfläche des Scheitelbeines dichte Reihen von Osteoblasten.

Die Einseitigkeit des Verlaufes der Knochenapposition im Bereiche der beiden inneren Drittel der Meridianlänge läßt sich häufig auch an dem Verhalten der Knochenlamellen erkennen. Die Knochenlamellen älterer Bildung, welche der Dura mater anliegen, werden in der Regel stärker mit Hämatoxylin gefärbt¹⁾

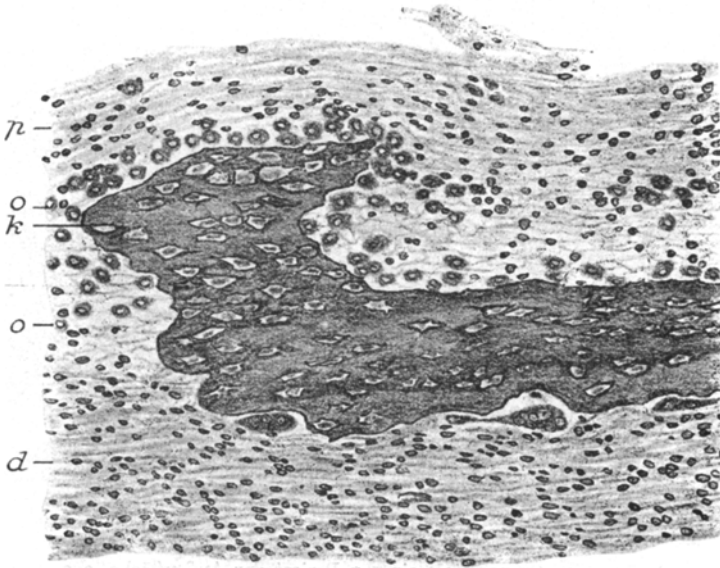


Fig. 23. Fötus A, 78 mm. Linkes Scheitelbein. Normalmeridianschnitt. *p* äußeres Periost. *o* Osteoblasten. *k* Knochenspange mit 3 Osteoklasten an der duralen Fläche. *d* Dura mater. Druckpol liegt links, außerhalb des Bildes. Die Mitte des letzteren ist 2,57 mm vom Druckpol und 6,35 mm vom Margo occipitalis entfernt. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 210 fach.

und erscheinen dann ungleich dunkler als die jungen, frisch apponierten Knochenlamellen, welche die Außenfläche der älteren Lamellen bedecken (Textfig. 22). Die Knochenlamellen jüngerer Bildung zeigen dabei im allgemeinen eine erheblich größere Flächenausdehnung als die älteren Lamellen. Zu diesen Befunden gesellt sich in der Nähe der Druckpole an der duralen Fläche des Knochenkernes des Scheitelbeines das Auftreten vielkerniger Riesenzellen, Osteoklasten, welche in scharf geschnittenen Resorptionslakunen liegen (Textfig. 23). Diese scheinen hier

¹⁾ Überfärbung mit Delafields Hämatoxylin. Differenzierung mit Weigerts Ferridzyankalium-Boraxlösung, verdünnt 1 : 6. Gegenfärbung mit Eosin. Überführung in Kanadabalsam. Ein ähnliches Verfahren haben Schaffer (Sitzungsber. d. K. k. Akad. in Wien, math.-naturw. Kl., III. Abt., Bd. 99, 1891) und vor ihm Kultschitzky für die Färbung nervöser Organe verwendet.

eine charakteristische Lokalisation zu besitzen, da sie an andern Teilen des Knochenkernes höchst selten zu beobachten sind.

In den peripherischen Zonen des netzförmigen Knochenkernes des Scheitelbeines sind die Befunde wesentlich andere. Die Osteoblasten liegen hier, wie bereits oben erwähnt wurde, nicht nur an der äußeren, sondern auch an der inneren Fläche der Knochenspangen. An der Innenfläche sind sie allerdings im allgemeinen etwas weniger zahlreich (Textfig. 24). Zugleich bemerkt man jüngere, heller gefärbte Knochenschichten sowohl an der äußeren als an der inneren Fläche der Knochenspangen und zwischen beiden ältere, dunkler gefärbte Knochenteile.

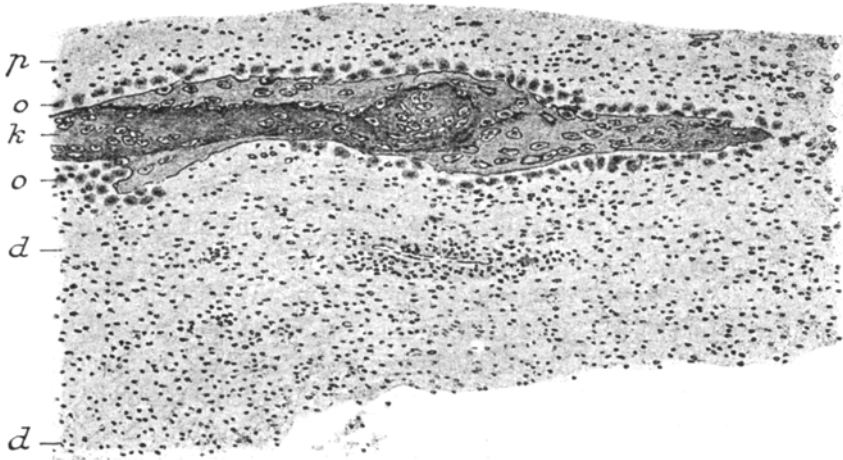


Fig. 24. Fötus A, 78 mm. Normalmeridianschnitt der peripherischen, an die Sutura coronalis grenzenden Zone des Os parietale sin. *p* äußeres Periost. *o, o* Osteoblasten. *k* Knochen. *d, d* Dura mater. Die Mitte des Bildes ist 1,82 mm von dem Margo frontalis und 7,4 mm von dem Druckpol entfernt. Druckpol rechts, außerhalb der Bildgrenzen. Schnittdicke 15 μ . Vergr. 140 fach.

Diese eigenartige Lokalisation der Osteoblasten und der jüngeren, frisch apponierten Knochenlamellen führt zu der Annahme, daß von dem Druckpole des Scheitelbeines Biegungsspannungen ausgehen, welche von dem Drucke des wachsenden Gehirns ausgelöst werden. Diese Biegungsspannungen stellen sich an der Außenfläche der Knochenspangen als Zugspannungen dar, während sie an der Innenfläche derselben Druckspannungen erzeugen. Man darf daher schließen, daß die von dem Drucke des gesamten Schädelinhaltes erzeugten tangentialen Materialspannungen durch die Biegungsspannungen an der Außenfläche der Knochenspangen verstärkt und an der Innenfläche der Knochenspangen ermäßigt werden. Die Erhöhung der Materialspannungen an der Außenfläche führt sodann zu einer Apposition von Knochenlamellen an die Außenfläche, während an der Innenfläche der Knochenspangen infolge der Erniedrigung der Materialspannung die Knochenneubildung ausbleibt und am Druckpol sogar durch eine Knochenresorption ersetzt wird. Letzteres kann nicht auffallen. Denn es ist vorauszu-

sehen, daß die Biegungsspannung und damit die Herabsetzung der tangentialen Zugspannungen an der Innenfläche der Druckpolregion ihren höchsten Wert erreicht. In der peripherischen Zone dagegen, in deren Bereich der Knochenkern des Scheitelbeines im wesentlichen ein einschichtiges Netzwerk darstellt, sind die Biegungsspannungen so unerheblich, daß sie nur ein geringes Vorwiegen der Knochenapposition an der Außenfläche der Knochenspangen zur Folge haben, ohne die Knochenapposition an der Innenfläche völlig aufzuheben.

Aus den soeben erhobenen Befunden geht hervor, daß das Wachstum des Scheitelbeines in den gegebenen frühen Stadien mit einer regelmäßigen Apposition von Knochenlamellen an die äußere Fläche des Knochenkernes einhergeht. Nach den Anschauungen, welche G. S c h w a l b e¹⁾ über die Wachstumsverschiebungen der Ernährungskanäle der Röhrenknochen bei solchen stetigen Appositionen periostaler Knochenlamellen gewonnen hat, liegt daher die Frage nahe, ob solche Wachstumsverschiebungen auch für die Gestaltung der kataklinen und anaklinen Knochenkanäle und Knochenspangen der fötalen Scheitelbeine in Betracht kommen. Diese Frage kann mit Bestimmtheit verneint werden, und zwar aus dem Grunde, weil die Richtungsänderungen der kataklinen und anaklinen Kanäle und Spangen der verschiedenen Zonen des Scheitelbeines in umgekehrter Richtung erfolgen. Dieses Verhalten ist mit der Annahme von Wachstumsverschiebungen unvereinbar. In einem Skelettstück, welches so zarte und demungeachtet so stark mechanisch beanspruchte Architekturen zeigt, muß jede Knochenlamelle in strenger Abhängigkeit von ihrer Spannung stehen. Wachstumsverschiebungen der Knochenlamellen im Sinne von G. S c h w a l b e sind nur da möglich, wo die mechanische Beanspruchung dem interstitiellen Wachstum freien Spielraum gewährt. Wo dies nicht der Fall ist, muß sich das Zusammenwirken des appositionellen und interstitiellen Wachstums des Knochengewebes in der Weise vollziehen, daß vor allem den mechanischen Anforderungen Genüge geleistet wird. Umsomehr ist es wünschenswert, die Histomechanik des embryonalen Scheitelbeines so weit als möglich klarzulegen.

Die Biegungsspannungen, welche die Lokalisation des appositionellen Wachstums des Knochengewebes an der äußeren Fläche der fötalen Schädeldachknochen erklären, machen es auch verständlich, daß die Knochenbildung zuerst in den äußeren Schichten des primordialen, häutigen Schädeldaches beginnt, wie sich aus der geringen, aber überall gleichen Dicke des äußeren Periostes schließen läßt. Denn auch in dem primordialen Schädeldache dürfte der an den Polen angreifende Druck des wachsenden Gehirns Biegungsspannungen erzeugen, wenn diese auch in dem relativ weichen Gewebe nur gering sein können. Nach den früheren Erörterungen, welche zeigen, weshalb die Knochenneubildung zuerst an den Druckpolen einsetzen muß, sind somit alle Einzelheiten der Lokalisation der Knochenneubildung histomechanisch erklärt, und man wird aus diesen Erklärungen den Schluß ziehen, daß das Knochenwachstum in der Druckpolregion immer einen

¹⁾ G. S c h w a l b e, Ztschr. f. Anat. u. Entwicklungsgeschichte Bd. 1, 1876.

Vorsprung haben wird, solange ein polares Wachstum des Gehirns stattfindet. Sodann erübrigt sich nur noch eine genauere histomechanische Prüfung der typischen Architekturen der fötalen Knochen des Schädeldaches.

Das Knochengewebe trägt, wie alle bisherigen Untersuchungen zeigen, jederzeit eine wesentlich höhere Materialspannung als das Bindegewebe und der Knorpel. An dem fötalen Schädeldache macht sich dieses Verhältnis dadurch bemerkbar, daß die Knochenapposition verbunden ist mit einer Umformung der Matrix. Zwischen den mit Osteoblasten bedeckten jüngeren und älteren Knochenspannen des embryonalen Schädeldaches findet man (Textfig. 8, 10, 11, 20, 23, 24) ein durchsichtigeres Gewebe, welches im allgemeinen die Eigenschaften eines weichen Schleimgewebes besitzt. Es darf als embryonales Knochenmark beansprucht werden, wenn es auch möglicherweise in diesen sehr frühen Perioden noch keine spezifischen Knochenmarkfunktionen ausübt. Jedenfalls aber scheint das embryonale Knochenmark durchaus ungeeignet, mechanische Beanspruchungen zu übernehmen. Die Zugspannungen der bindegewebigen Schädelwand des Embryo gehen daher ausschließlich auf das Knochengewebe über. Dabei aber werden sie auf einen engeren Querschnitt zusammengedrängt. Der Querschnitt des Knochengewebes ist hier, weil er von Schleimgewebe unterbrochen wird, notwendigerweise immer kleiner als der Querschnitt des zugehörigen Bindegewebes, welches seine Spannungen an den Knochen abgibt. Daraus folgt, daß die Materialspannung des neugebildeten Knochengewebes des Schädeldaches jederzeit erheblich höher ist als die Materialspannung des zugehörigen Bindegewebes, der Matrix, aus welcher der Schädeldachknochen hervorgeht.

Indessen ist es klar, daß ein Bindegewebsbündel, welches sich an eine in ihrer Längsrichtung gespannte Knochenspanne von 1 qmm Querschnitt ansetzt, höchstens einen Querschnitt von 1 qmm besitzen kann, wenn die Längsrichtung des Bindegewebsbündels mit der Längsrichtung der Knochenspanne zusammenfällt. Steht aber die Knochenspanne unter der ihr zukommenden kritischen Spannung, so kann unter den gegebenen Voraussetzungen die Spannung des Bindegewebsbündels keinesfalls geringer sein. Die Forderung, daß die Materialspannung des neugebildeten Knochengewebes jederzeit erheblich höher ist als die Materialspannung des zugehörigen Bindegewebes kann daher nur erfüllt werden, wenn wenigstens ein Teil der Bindegewebsfibrillenbündel sich unter größeren oder kleineren Winkeln an die Knochenspanne ansetzt. In dem fötalen Schädeldache wird dieser Erfolg durch die netzförmige Anordnung der Knochenbalken erreicht.

Um dies zu zeigen, kann die Betrachtung zunächst beschränkt werden auf die ihrer Größe nach vorwiegenden, von dem Drucke des wachsenden Gehirnes hervorgerufenen tangentialen Zugspannungen. Wenn man sich sodann die Schädelwand parallel zu diesen Tangentialspannungen in eine Anzahl von Schichten zerlegt denkt, wie dies in Textfig. 25 durch schwarz ausgezogene Linien geschehen ist, so stellt sich der Rand jeder einzelnen Schichte, wenn man diese von der Fläche her betrachtet, ungefähr in der Weise dar, wie er in Textfig. 26 schematisch gezeich-

net ist. In jeder Schichte setzen sich die Bindegewebsbündel unter verschiedenen Winkeln an den äußeren Rand des Knochennetzes an und lassen ihre Spannungen auf letzteres übergehen. Diese Spannungen sind Zugspannungen, welche nach den Hauptspannungsrichtungen zerlegt werden können in meridionale und in breitenparallele Zugspannungen. Die meridionalen Zugspannungen werden von den zackigen Rändern des Knochennetzes, welche dabei vielfach Biegungsbeanspruchungen erfahren, aufgenommen und auf die meridionalen Knochenspangen übertragen. Der Querschnitt der meridionalen Knochenspangen ist aber viel kleiner als der Querschnitt der zugehörigen meridionalen Bindegewebsfibrillenbündel, so daß der Querschnitt der meridionalen Knochenspangen unter einer viel höheren Materialspannung stehen muß als der Querschnitt der zugehörigen Bindegewebsfibrillenbündel. Die gleiche Betrachtung läßt sich dann auch für die auf

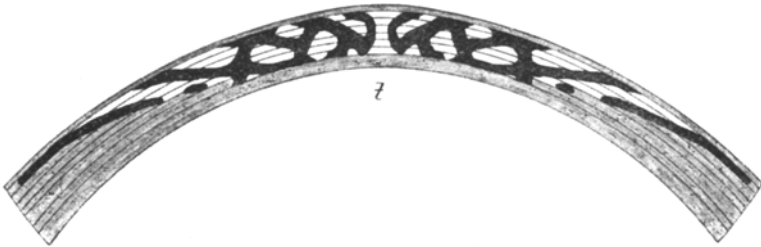


Fig. 25. Schema eines Normalmeridionalschnittes des Scheitelbeines eines Fötus von 78 mm, durch schwarze Hilfslinien in 8 Schichten zerlegt. Die Zahl der Knochenspangen der Einfachheit halber sehr klein angenommen. Vergrößerung in meridionaler Richtung ungefähr 6 fach, in den zur Dura senkrechten Richtungen ungefähr 12 fach.

das Knochennetz übergehenden Breitenparallelspannungen des Bindegewebes durchführen. Man gelangt daher zu dem Ergebnisse, daß die netzförmige Architektur des Knochengewebes jeder Schichte, in welche das Schädeldach zerlegt wurde, die oben gestellte Forderung erfüllt. Die Materialspannungen der verschiedenen Gewebelemente entsprechen nach eingetretener Ossifikation annähernd ihren normalen, kritischen Spannungen, obwohl diese für das Knochengewebe und das Bindegewebe von sehr ungleicher Größe sind.

In Textfig. 26 ist schematischerweise eine rechtwinklige Durchkreuzung der Bindegewebsfibrillenbündel vorausgesetzt. Diese wird jedoch nicht in solcher Regelmäßigkeit beobachtet. Im allgemeinen zeigt der Verlauf der Bindegewebsfibrillen des häutigen Schädeldaches dieselben Unregelmäßigkeiten, welche ich früher¹⁾ für die Fibrillen der Grundlamellen des erwachsenen Schädeldaches beschrieben und ausführlich erklärt habe. Die Hauptspannungsrichtungen der Schädelwand werden indessen durch den anscheinend unregelmäßigen Verlauf der Fibrillen nicht beeinflusst. Vielmehr wird die Entwicklung der letzteren nach Zahl und Richtung durch diese Hauptspannungsrichtungen bestimmt, wie aus meiner früheren Besprechung hervorgeht. Die Hauptspannungen der Schädelwand setzen sich sodann aus den Summen der rechtwinkligen Komponenten zusammen, in welche man die Spannungen der einzelnen Fibrillen zerlegen kann. Die durch Textfig. 26 veranschaulichten Beziehungen bleiben daher ungeachtet des anscheinend unregelmäßigen Verlaufes der Bindegewebsfibrillen bestehen.

¹⁾ R. T h o m a , Virch. Arch. Bd. 206, 1911, S. 212 ff.

Man kann indessen auch in einer mehr summarischen Weise verfahren. Wenn eine Schichte von Bindegewebe durch Knochengewebe ersetzt wird, so nimmt — wegen seiner höheren kritischen Spannung — eine geringere Menge von Knochengewebe die gesamten Spannungen des Bindegewebes auf. Im Bereiche der Verknöcherung müssen daher leere Räume auftreten, welche dem verknöcherten Teile der Schichte ein netzförmiges Ansehen verleihen. Es ist somit jeder derartige Vorgang als eine partielle Ossifikation zu bezeichnen. Bei der periostalen Knochenbildung an älteren Röhrenknochen liegen jedoch zuweilen etwas andere mechanische Beziehungen vor.

Die zwischen der Materialspannung des Bindegewebes und des Knochengewebes bestehenden Unterschiede habe ich oben auf Textfig. 3 zum Ausdruck zu bringen versucht. Dabei wurde zwischen den Materialspannungen, bei welchen das Bindegewebe ein positives Wachstum zeigt (Textfig. 3, Spannungen ab bis ac) und dem für die Knochenneubildung kritischen Werte der Materialspannung (Textfig. 3, Spannung ad) ein Intervall angenommen, welches auf dieser Figur zwischen c und d liegt. Wie groß dieses Intervall ist, scheint allerdings fraglich. Es wäre sogar möglich, daß der kritische Wert der Materialspannung des Knochengewebes (gegeben durch den Punkt d der Textfig. 3) noch in den Bereich der höchsten Spannungen fällt, bei denen das Bindegewebe ein positives Wachstum zeigt. Vorläufig jedoch scheint die auf Textfigur 3 gegebene Anordnung als die wahrscheinlichere. Wenn dann die Materialspannung des Bindegewebes größer als ac wird, jedoch den Schwellenwert ad des Knochengewebes noch nicht erreicht, so ist ein Zustand besonderer Art gegeben. Das Bindegewebe muß jetzt, wenn das Schema der Textfig. 3 zutrifft, durch negatives Dickenwachstum schwinden, wobei notwendigerweise seine Materialspannung weiter zunehmen wird, bis sie den Wert ad erreicht, bei welchem die Ossifikation einsetzt. Man würde sich dann vorstellen können, daß der Schwund des Bindegewebes nicht durch eine Abnahme der Zahl der Bindegewebsfasern, sondern durch eine Abnahme ihrer Querdurchmesser erfolgt. In diesem Falle werden Räume frei für die Osteoblasten und für das embryonale Knochenmark. Die Bindegewebsfasern aber würden, soweit sie allzugroße Spannungen erfahren, zu Bestandteilen des Knochengewebes werden, etwa in der Weise, wie dies von Mummery, Spuler, v. Korff und Dibel¹⁾ geschildert wurde. Diese Einzelheiten könnten vermutlich durch eine weitere Verfolgung der Untersuchungen noch genauer festgestellt werden. Bis dahin will ich bemerken, daß die im Haupttext gegebenen Erörterungen auch zutreffen, wenn das Intervall cd der Textfig. 3 gleich Null ist oder wenn der kritische Wert der Materialspannung des Knochengewebes noch in den Bereich der Materialspannungen fällt, bei welchen das Wachstum des Bindegewebes positiv ist. Auch scheint es nicht unwahrscheinlich, daß diese Einzelheiten in etwas abweichender Weise verlaufen, wenn weiche Bindegewebsmassen plötzlich unter hohe, Knochenneubildung auslösende Spannungen geraten oder wenn Störungen des Kreislaufes und der Gewebsernährung den kritischen Wert der Materialspannung des Knochengewebes erhöhen oder erniedrigen.

Vorstehende Erörterungen haben gezeigt, daß die tangentialen Zugspannungen, welche der Druck des wachsenden Gehirns erzeugt, in jeder der Schichten, in welche

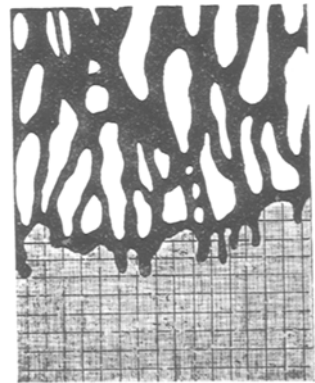


Fig. 26. Schema der Anheftung des Bindegewebes des primordialen Schädeldaches an den Knochenkern. Das dunkel gezeichnete Knochenetz ist 24 mal vergrößert. Das aus rechtwinklig sich durchkreuzenden Fibrillenbündeln bestehende Bindegewebe ist durchaus schematisch gehalten.

¹⁾ Mummery, Philos. Transact. of the Royal Society Bd. 182, B. London 1891. — Spuler, Anat. Hefte Bd. 7, S. 117, 1896. — v. Korff, Arch. f. mikr. Anat. Bd. 67, S. 1, 1905, B. 69, S. 515, 1907; Ergebnisse der Anat. u. Entwicklungsgesch. Bd. 17, 1907. Dibel, Ziegler Beitr. Bd. 50. 1911.

auf Textfig. 25 die Schädelwand zerlegt worden war, ein netzförmig gestaltetes Knochengebilde erzeugen müssen. Durch die netzförmige Architektur des neugebildeten Knochengewebes wird es erreicht, daß sowohl das Bindegewebe als das Knochengewebe der fötalen Schädelwand unter die ihnen zukommenden Materialspannungen geraten. Dies gilt für jede einzelne Schichte der Schädelwand, weil in jeder dieser Schichten die Spannungen des Bindegewebes in gleicher Weise auf das Knochengewebe übergeleitet werden. Wenn es jedoch für jede einzelne Schichte gilt, ist das Ergebnis auch für die ganze Dicke der Schädelwand zutreffend.

Infolge des durch den Spannungszuwachs bedingten Vorwiegens der meridionalen Gesamtspannungen in den mittleren und peripherischen Zonen des Knochenkernes wird indessen in jeder Schichte die Gleichheit der Materialspannung für jede einzelne Knochenspange nur erreicht, wenn in den mittleren und peripherischen Zonen die Maschenräume Formen gewinnen, welche in meridionaler Richtung mehr und mehr gestreckt erscheinen. Es wurde dieses bereits oben (Seite 9 ff.) genauer erörtert und gezeigt, daß die überall gleichgroße Materialspannung des Knochengewebes während der Wachstumsvorgänge den kritischen Wert etwas übersteigt.

Wenn aber infolge des Vorwiegens der meridionalen Gesamtspannungen die Maschen- oder Markräume der mittleren und peripherischen Zonen des Knochens eine meridionale Verlängerung aufweisen, wird diese meridionale Verlängerung auch auf dem Normalmeridianschnitt wahrnehmbar sein. Hier kommt sie zustande durch die vom Pol bis zum Rande zunehmende Neigung der kataklinen und anaklinen Knochenspangen, wie aus den oben vorgelegten Rekonstruktionen und aus der schematischen Textfig. 12 hervorgeht. Dabei ist die Dicke des Knochens in der Druckpolregion durch die Zahl der Schichten gegeben, in welche die Dicke der Schädelwand zerlegt wurde.

Die beobachtete Architektur des embryonalen Scheitelbeines erfüllt somit die Bedingung, daß während des Wachstums die von den tangentialen Zugspannungen erzeugten Materialspannungen in allen Knochenspangen den kritischen Wert um einen annähernd gleichen Betrag übersteigen. Daß diese Bedingung genau erfüllt sei, läßt sich allerdings vorläufig nicht nachweisen und ist auch kaum zu erwarten, weil die geometrischen Formen des Gehirns und des Schädels im Laufe des Wachstums geringe Änderungen erfahren. Doch ist damit offenbar die wichtigste histomechanische Bedingung erfüllt, die an ein Skelettstück gestellt werden kann, welches in annähernd geometrisch ähnlichen Formen wächst. Denn die tangentialen Zugspannungen überragen, ihrer Größe nach, alle andern Spannungen in bedeutendem Maße.

Daß die von dem Drucke des Schädelinhaltes erzeugten Druckspannungen ganz erheblich kleiner sind als die tangentialen Zugspannungen, geht aus der ersten Mitteilung mit Sicherheit hervor. Sie müssen aber durch das Knochengewebe auf die verschiedenen Schichten der Schädelwand verteilt werden. Die Architektur des Scheitelbeines begünstigt offenbar auch diese Übertragung. An den Druckpolen, an welchen der auf der Schädelinnenfläche lastende Druck höher ist, nähern

sich die Netzmaschen auf dem Normalmeridianschnitte der isodiametrischen Gestaltung, während in den peripherischen Zonen des Scheitelbeines die langgestreckten Knochenetze nur geringe Druckwirkungen zu übertragen geeignet erscheinen. Außerdem dürften wohl auch die Krümmungsradien der Schädelinnenfläche Besonderheiten aufweisen, welche die Ungleichheiten des auf die Schädelwand wirkenden Druckes mildern. Wahrscheinlich ist die Schädelinnenfläche an den Druckpolen etwas stärker gewölbt, wie dies in der schematischen Textfig. 12 angedeutet ist. Bestimmtes kann ich jedoch in dieser Beziehung nicht berichten, weil die mir zur Verfügung gestellten Embryonen nicht mit Alkohol injiziert, sondern nur einfach in Alkohol gehärtet waren, wobei die Gestalt der Schädel durch die Schrumpfung des Schädelinhaltes stark gelitten hatte.

Eine vollständige Aufklärung der Architektur des embryonalen Scheitelbeines wird jedoch nur durch eine Berücksichtigung der in demselben auftretenden Biegungsspannungen erreicht werden können. Diese Biegungsspannungen sind von zweierlei Art. Von den Druckpolen gehen regelmäßige Biegungsspannungen aus. Das an Größe stetig zunehmende Gehirn muß fortdauernd von neuen Biegungsspannungen in der Schädelwand hervorrufen, wie immer auch die Architektur der Schädelknochen gestaltet sein mag. Daß solche Biegungsspannungen dauernd bestehen, geht meines Erachtens mit großer Sicherheit aus der eigenartigen Lokalisation der Osteoblasten und der frisch apponierten Knochenlamellen hervor. Es scheint mir daher wahrscheinlich, daß die eigenartige Anordnung der kataklinen und anaklinen Knochenspangen und Knochenkanäle von diesen regelmäßigen Biegungsspannungen oder von der ungleichen Druckverteilung an der Schädelinnenfläche mitbestimmt wird. Ein Beweis ist allerdings augenblicklich nicht zu führen, da eine mathematische Analyse auf sehr große Schwierigkeiten stößt. Doch will ich darauf hinweisen, daß die tangentialen Zugspannungen die eigenartigen Formen der kataklinen und anaklinen Spangen und Kanäle nicht voll erklären. Sie verlangen nur in der Druckpolregion isodiametrische und in den Randzonen meridional verlängerte Maschen- oder Markräume. Diese aber könnten auf dem Normalmeridianschnitt auch ganz andere, ungleich einfachere Formen darbieten.

Außer den soeben besprochenen regelmäßigen, von dem Druckpol ausgehenden Biegungsbeanspruchungen dürften jedoch im Scheitelbeine wie in allen andern Skelettstücken unregelmäßige, nach Zeit und Ort vielfach wechselnde Biegungsbeanspruchungen vorkommen. Jede Berührung des fötalen Schädels mit den Eihäuten oder mit den Extremitäten, der wechselnde Muskelzug und jede Haltungsänderung des Körpers scheint geeignet zu sein, solche Wirkungen auszulösen. Diese unregelmäßigen Biegungsbeanspruchungen dürften jeweils nur geringfügige sein. Eine genauere Prüfung zeigt jedoch, daß sie an den Durchkreuzungsstellen der Knochenspangen in sehr beschränkter Ausdehnung relativ hohe Zug- und Druckspannungen auslösen müssen. Demgemäß dürften die unregelmäßigen Biegungsbeanspruchungen, von denen

während des ganzen Lebens kein Skeletteil verschont wird, zur Folge haben, daß an allen Durchkreuzungsstellen der Knochenspangen des Skeletts etwas mehr Knochenmaterial apponiert wird. Die scharfen Winkel, welche andernfalls an den Durchkreuzungsstellen der Knochenspangen zu erwarten wären, erfahren daher eine Abrundung. In dieser Weise erklärt sich ganz allgemein die abgerundete Gestalt der Spongiosaräume, welche auch in dem fötalen Scheitelbeine und Stirnbeine gefunden wurde.

Diese nach Erfüllung aller histomechanischen Anforderungen zwischen den Knochenspangen des fötalen Scheitelbeines verbleibenden Spongiosaräume enthalten keine mechanischen Spannungen. In denselben liegen Blutgefäße und ein weiches Schleimgewebe, welches nur unbedeutende Zugspannungen zu tragen vermag und mechanisch einer vermutlich unter sehr geringem Drucke stehenden Flüssigkeit gleichgestellt werden kann. Das Schleimgewebe geht später in Knochenmark über, vermutlich weil in ihm und in seinen vor jedem äußeren Drucke geschützten Venen der Aufbau und der Abbau der Zellen des Blutes relativ günstige Verhältnisse findet. Bei diesem Auf- und Abbau ist aber die Wand der Venen und Kapillaren in hohem Grade beteiligt. Es kann daher nicht auffallen, wenn an solchen durch besondere Stoffwechselvorgänge ausgezeichneten Stellen der Gefäßwand die Wachstumskonstanten der Venen- und Kapillarwandungen Änderungen erfahren, welche zur Folge haben, daß die Venen und in geringerem Maße auch die Kapillaren in relativ weite, plexiform gestaltete Gefäße verwandelt werden. Die Geschwindigkeit der Blutströmung in den kleinen Abstände β von der Gefäßwand¹⁾, also in nächster Nähe der Gefäßwandungen, wird dabei erheblich herabgesetzt.

Ausgiebige Bestätigungen der vorstehenden Befunde ergab die Untersuchung des Fötus B. Bei einer Scheitelsteiflänge von 85 mm (Alkoholpräparat) dürfte er nach den Zusammenstellungen von Mall etwa 92 Tage alt gewesen sein. Sein Schädel war jedoch nicht unerheblich größer als derjenige des erstuntersuchten Fötus A. Der Schädel des letzteren, welcher eine offenbar postmortal entstandene, jedoch nicht unerhebliche seitliche Kompression aufwies, maß nach Entfernung der Hautdecken im sagittalen Durchmesser ungefähr 28 mm und im transversalen 17 mm. Bei dem hier zu besprechenden Fötus B dagegen betrugen diese Durchmesser annähernd: sagittal 35 mm und transversal 30 mm. Dies ergibt, bei Berücksichtigung der Deformität, ein Verhältnis der Kubikinhalt von ungefähr 7 : 17. Dementsprechend erscheinen auch die Schädelwandungen bei dem Fötus B nicht unerheblich dicker und die Knochenspangen bedeutend breiter und gedrungener als bei Fötus A (vgl. Textfig. 8, I, II). Die Gestalt und Anordnung der Knochenspangen aber war bei beiden Föten eine in dem Grade übereinstimmende, daß ich auf Rekonstruktionen verzichtete.

Dagegen habe ich es mir angelegen sein lassen, eine größere Zahl von Normalmeridionalschnitten der Knochen des Schädeldaches des Fötus B anzufertigen und namentlich an den beiden Scheitelbeinen Normalmeridionalschnitte in verschiedenen Richtungen zu legen. Am linken Scheitelbein war der Normalmeridionalschnitt (Textfig. 8, II) frontal gerichtet, am rechten Scheitelbein dagegen vom Tuber parietale dext. zum Tuber front. sin. Dabei ergab sich, wie bereits aus der Untersuchung des Fötus A zu schließen war, daß die Architektur des Knochenkernes des

¹⁾ R. Thoma, D. Arch. f. klin. Med. Bd. 99, 1910; Virch. Arch. Bd. 204, 1911.

Scheitelbeines in den verschiedenen Meridianen eine prinzipiell übereinstimmende war. Zugleich bestätigte sich die prinzipielle Übereinstimmung der Architekturen des Knochenkernes des Stirnbeines, soweit dieses frei ist von den Knorpelmassen des Schädelgrundes. Das Hinterhauptbein, welches bei Fötus A durch einen Normalmeridionalschnitt annähernd in der Medianebene getroffen war, wurde bei Fötus B auf einigen zur Medianebene senkrechten Normalschnitten, die etwas oberhalb des Druckpols und oberhalb der Knorpelmassen des Schädelgrundes verliefen, untersucht. Nur rechterseits war der obere Rand der unter dem Knochenkerne der Hinterhauptsschuppe gelegenen Knorpelmassen in geringer Ausdehnung noch in die Schnittebene gefallen. Der Knochenkerne der Hinterhauptsschuppe aber zeigte, soweit sich diese auf einem nicht durch den Druckpol gelegten Schnitte nachweisen lassen, die gleichen Besonderheiten der Architektur wie die übrigen Knochen des Schädeldaches.

Dagegen wies die Struktur der einzelnen Knochenbalken einige Änderungen gegen früher auf. Im polarisierten Lichte konnte man sich davon überzeugen, daß auch jetzt noch in der überwiegenden Mehrzahl der Knochenbalken aller Schädeldachknochen die Knochenlamellen der Schädeloberfläche parallel gerichtet waren, Grundlamellen. In den dickeren zentralen Teilen der Knochenkerne waren indessen auch Speziallamellen in nicht unbeträchtlicher Menge nachweisbar, welche der Oberfläche der einzelnen Knochenbalken parallel verliefen. Die Verteilung der Osteoblasten ließ gegenüber dem Befunde bei Fötus A keine Unterschiede erkennen. Dagegen war die Zahl der Riesenzellen und Resorptionslakunen an der duralen Fläche des Scheitelbeines vermehrt. Die Resorptionsvorgänge an der duralen Seite des letzteren erstrecken sich jetzt von dem Druckpol bis in die Nähe der einschichtigen, äußeren Zone des Knochenkernes, Neben den Knochenappositionen an der Außenfläche des Scheitelbeines ist daher für diesen Fötus auch eine nicht unerhebliche Knochenresorption an der Innenfläche dieses Skelettstückes anzunehmen. In Verbindung mit einem entsprechenden Flächenwachstum des letzteren wurden dabei die Krümmungsradien der Innenfläche vielleicht etwas größer.

Diese Resorptionsvorgänge dürften indessen für sich allein nicht genügen für die ganze, durch die Zunahme der Krümmungsradien gekennzeichnete Umformung der Innenfläche des Scheitelbeines. Denn in den tiefen Schichten des Knochenkernes des Parietale waren in Entfernungen von 3 mm vom Druckpol immer noch Reste älteren, sich stärker färbenden Knochens nachweisbar. Einen solchen Befund hätte man nicht wohl erwarten können, wenn die Zunahme der Krümmungsradien ohne Mitwirkung eines interstitiellen Wachstums ausschließlich durch Resorptionsvorgänge vermittelt worden wäre. Ganz beweiskräftig allerdings waren die Befunde nicht. Doch gelangte man im Stirnbein und Hinterhauptbeine zu dem gleichen Schlusse, zumal da an der Innenfläche dieser Skelettstücke die Resorptionslakunen und Riesenzellen etwas spärlicher zu treffen waren.

Fötus C. Alkoholpräparat. Scheitelsteißlänge 118 mm, entsprechend einem Fruchtalter von ungefähr 108 Tagen (nach Mall). Sagittaler Schädeldurchmesser annähernd 40 mm. Der Kubikinhalt dieses Schädels würde sich nach dieser Messung verhalten zu dem Kubikinhalt des Schädels des Fötus B ungefähr wie 25 : 17. Einige aus einer lückenlosen Reihe von Normalmeridionalschnitten gewonnene Rekonstruktionen¹⁾, von denen eine in Textfig. 27 wiedergegeben ist, zeigen, daß die Anordnung der Knochenspannen des Schädeldaches gegen früher keine prinzipielle Änderung erfahren hat. Das Schädeldach ist jedoch nicht unerheblich dicker geworden, und die einzelnen Knochenspannen sind beträchtlich verlängert, so daß nunmehr die Zahl ihrer Durchkreuzungen eine größere geworden ist. Mikrometrische Messungen und der Vergleich der bei den Föten A und C ausgeführten Rekonstruktionen zeigten sodann, daß in der Gegend der Druckpole der Scheitelbeine die gegenseitigen Abstände der an die Dura mater grenzenden Fuß-

¹⁾ Zur Orientierung dienten einige stark gefärbte, aus Floßseide isolierte Kokonfäden, welche über eine Glasplatte gespannt und annähernd senkrecht zu der Schnittebene dicht am Objekt in die Zelloidinmasse eingebettet wurden.

punkte der schrägen, kataklinen Knochenspangen dieselben geblieben sind. Sie betragen bei den drei Föten A, B und C im Mittel annähernd 0,4 mm oder, wenn eine Spange nicht in der Schnittebene liegt, annähernd 0,8 mm. Große Genauigkeit bieten diese Messungen allerdings nicht. Immerhin beweisen sie jedoch, daß die Vorstellungen von J. Wolff¹⁾, welcher ein gleichmäßiges interstitielles Wachstum aller Teile eines Knochens nachzuweisen versuchte, unhaltbar sind. Da die linearen Dimensionen des Schädels C sich zu den linearen Dimensionen des Schädels A verhalten annähernd wie 3 : 2, so hätte ein gleichmäßiges interstitielles Wachstum notwendigerweise auch die gegenseitigen Abstände der Fußpunkte der schrägen Knochenspangen in dem gleichen Verhältnisse von 3 : 2 größer werden lassen müssen, was jedenfalls nicht zutrifft.

Die weitere Untersuchung zeigt sodann, daß die peripherische, einschichtige Zone des Knochenkernes des Parietale bei Fötus C sehr schmal ist, weil die schrägen Knochenspangen bis nahe an die Peripherie reichen. In der Anordnung der Osteoblasten und Osteoklasten dagegen ist keine Änderung eingetreten. Die offenbar durch postmortale Veränderungen bedingte, mangelhafte Färbbarkeit des Präparates aber dürfte es erklären, daß bei Fötus C die älteren und jüngeren Schichten

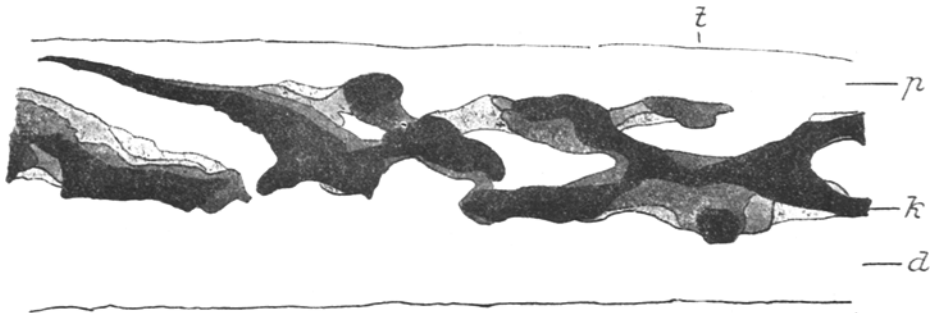


Fig. 27. Fötus C, 118 mm. Os parietale dext. Schichtenbild aus 4 Serienschnitten von 20 μ Dicke zusammengesetzt. Oberste, dem Beschauer zugewendete Schicht schwarz. *t* Druckpol, *p* äußeres Periost, *k* Knochen, *d* Dura mater. Vergr. 60 fach.

des Knochens sich nach der Färbung nicht in so auffallender Weise, wie gewöhnlich, durch verschiedene Farbtöne unterscheiden.

Fötus D. Alkoholpräparat. Nur der Kopf stand zur Verfügung. Sagittaler Durchmesser desselben ohne Hautdecken 54 mm. Das Fruchtalter beträgt annähernd 135 Tage. Wenn alle Teile gleichmäßig an Größe zugenommen hätten, würde sich der Kubikinhalt des Schädels D verhalten zu dem Kubikinhalt des Schädels C wie 62 : 25.

Die Schädelwand des Fötus D hat beträchtlich an Dicke zugenommen, in geringerem Grade auch die einzelnen Knochenspangen. Letztere erscheinen bei prinzipiell gleicher Anordnung auf dem Normalmeridionalschnitt beträchtlich länger als früher und erfahren demgemäß eine größere Zahl von Durchkreuzungen. Vor allem bemerkenswert aber ist, daß am Druckpol die Entwicklung einer *Eburnea interna* und *externa* beginnt. Die *Eburnea interna* entsteht in der Weise, daß an der Außenseite der Dura mater Knochenlamellen gebildet werden, welche die auf der Dura aufsitzenden Fußpunkte der schrägen Knochenspangen miteinander verbinden (Textfig. 28). Diese Knochenlamellen weisen allerdings stellenweise kleine Lücken auf, welche dem Durchtritte kleiner

¹⁾ J. Wolff, Virch. Arch. Bd. 50, 1870, Bd. 55, 1899. — Das Gesetz der Transformation der Knochen. Berlin 1892 u. a. a. O.

Blutgefäße dienen. Außerdem lassen sich die neu apponierten, der Dura anliegenden Knochenlamellen vielfach durch kleine Unterschiede der Färbung und Lichtbrechung von den schrägen Knochenspangen älterer Bildung unterscheiden. An der Dura mater reichen diese Anfänge der Eburnea interna bis auf eine Entfernung von etwa 3 mm von dem Druckpol. Sie stellen indessen kein neues Konstruktions-element dar, wie aus dem Schema der Textfig. 12 und den an diese geknüpften Erörterungen hervorgeht. Die Anfänge der Eburnea externa sind lückenhafter und besitzen eine etwas geringere Flächenausdehnung. Sie gehen kontinuierlich hervor aus den Verlängerungen, welche die schrägen Knochenbalken inzwischen erfahren haben. Im polarisierten Lichte treten an den schrägen Knochenbalken zahlreiche Speziallamellen hervor.

Diesen Änderungen der Architektur entspricht das Vorkommen zahlreicher Osteoblasten. Indessen sind letztere nicht mehr in so großer Menge vorhanden,

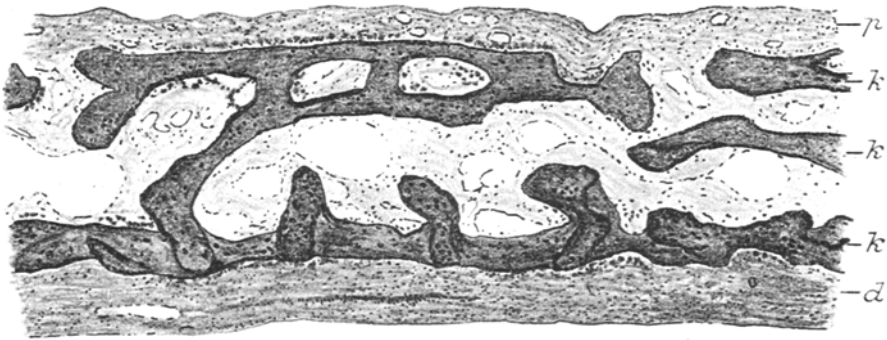


Fig. 28. Fötus D. 135 Tage. Os parietale sin. Normalschnitt nahe Tuber. *p* Periost der Außenfläche. *k, k, k* Knochenspangen. *d* Dura mater. Vergr. 60 fach.

wie in den früheren Entwicklungsstadien, vorausgesetzt, daß man gleichgroße Oberflächen an den Knochenspangen vergleicht. Die Osteoblasten bevorzugen aber immer noch die dem äußeren Periost zugewendeten Flächen der Knochenspangen. Außerdem kommen am Druckpol und in seiner Umgebung auch an der duralen Seite der neugebildeten Knochenlamellen, welche die Eburnea interna zu bilden beginnen, Osteoblastenreihen vor. Vielkernige Riesenzellen und Resorptionslakunen werden vorzugsweise an der duralen Seite des Knochenkernes in einer intermediären Zone gefunden, welche gleichweit vom Pol und von den Knochenrändern entfernt ist. Doch sind auch die Randzonen des Parietale an ihrer duralen Seite nicht ganz frei von Resorptionsvorgängen, und einzelne Riesenzellen und Resorptionslakunen finden sich in allen andern Teilen des Knochenkernes zerstreut vor. Die Resorptionsvorgänge an der duralen Seite des Knochenkernes sind namentlich an Tangentialschnitten in übersichtlicher Weise zu verfolgen. Der Versuch, am kalkhaltigen Knochen mit und ohne Karminfärbung Osteoidgewebe nachzuweisen, mißlang.

Fötus E des 8. Schwangerschaftsmonats. Knabe, 5½ Stunden nach künstlicher Frühgeburt gestorben. Sagittaler Durchmesser des Schädels 101 mm. Sein Kubikinhalt würde sich,

wenn die Formen geometrisch ähnlich wären, zu dem Kubikinhalte des Schädels des Fötus D verhalten wie 406 : 62. Die Fontanellen fehlen, indem die Ränder der Knochen des Schädeldaches nur durch schmale Nahtlinien getrennt werden. Mit der Lupe ist bei starkem durchfallendem Licht überall eine radiäre Zeichnung in den Schädeldachknochen nachweisbar, welche eine genaue Bestimmung der Druckpole der Scheitelbeine gestattet.

Die mikroskopische Untersuchung beschränkt sich auf die beiden Scheitelbeine. Diese haben, gegenüber den Scheitelbeinen des Fötus D, wiederum erheblich an Flächenausdehnung und Dicke zugenommen, und ihre Architektur zeigt deutlich den Beginn einer Umformung. Am Druckpol und in seiner Umgebung ist die Eburnea interna und namentlich die Eburnea externa sehr viel dicker geworden (Textfig. 29) durch Knochenapposition an der inneren und äußeren Fläche

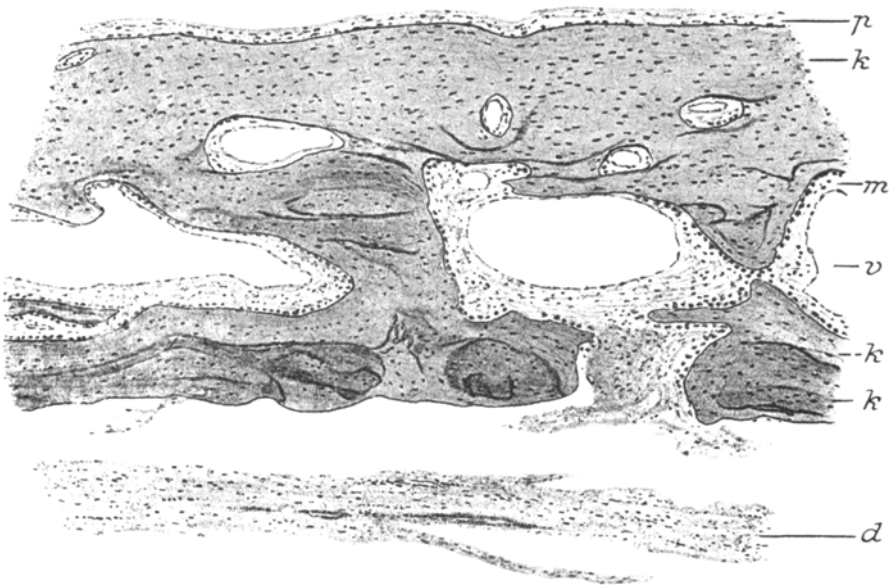


Fig. 29. Fötus E des 8. Schwangerschaftsmonates. Normalmeridionalschnitt am linken Tuber parietale. *p* Periost der Außenfläche. *k, k, k* Knochengewebe. *m* Knochenmark. *v* Venenlichtung. *d* Dura mater abgelöst. Vergr. 60 fach.

des Scheitelbeines. Die gleiche Dickenzunahme macht sich auch an den schrägen, anaklinen und kataklinen Knochenbalken bemerkbar, welche die Eburnea externa und interna verbinden. Indessen haben diese schrägen Knochenspannen an Zahl erheblich eingebüßt, so daß in der Umgebung der Druckpole die beiden Eburneae weithin die Hauptbestandteile der Scheitelbeine bilden, die nur durch eine geringe Zahl schräger Knochenbalken verbunden werden. Die Anordnung dieser schrägen, anaklinen und kataklinen Knochenbalken ist eine ausgesprochen meridionale, welche auf Tangentialschnitten bis unmittelbar an den Druckpol hin sehr auffällig hervortritt.

Am Druckpol und in seiner Umgebung macht sich sodann auf Tangentialschnitten der Eburnea externa eine zum Pol radiäre Anordnung der Gefäßkanäle des Knochens bemerkbar. Diese Kanäle sind sehr eng und erweisen sich auf Normalmeridionalschnitten zumeist als katakline Kanäle, während der Nachweis anakliner Kanäle in der äußeren Eburnea nicht mit Sicherheit gelingt. In der Eburnea interna der Druckpolregion werden gleichfalls einige Gefäßkanäle sichtbar. Sie sind ungleich weiter als die Gefäßkanäle der Eburnea externa und zugleich sehr kurz, indem sie die Eburnea interna nahezu senkrecht durchsetzen. Die Gesamtheit dieser Umformungen war begreiflicherweise nicht möglich ohne ausgedehnte Resorptions- und Appositionsvorgänge im Innern

des Knochens. Demgemäß lassen sich auch gegenwärtig noch Bruchstücke der früheren Architekturen durch die Hämatoxylinfärbung als ältere Bestandteile unterscheiden, welche von Knochenmassen jüngerer Bildung umhüllt werden (Textfig. 29). Diese Bruchstücke älterer Bildung finden sich bezeichnenderweise ausschließlich in der Eburnea interna, in den schrägen Knochenbalken und in den tiefen Schichten der Eburnea externa.

In weiteren Abständen von dem Druckpol kehren ähnliche Architekturen wieder, wie sie bei den jüngeren Föten beobachtet wurden (Textfig. 30). Die abgesehen von einzelnen kleinen Lücken zusammenhängende Eburnea interna reicht auf dem frontalen Normalmeridionalschnitt vom

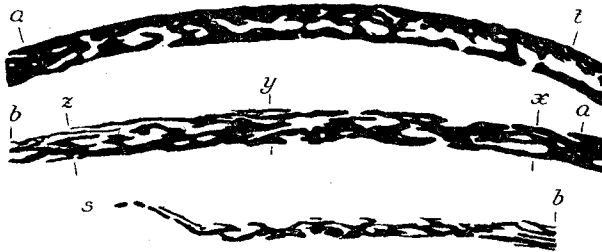


Fig. 30.



Fig. 31.



Fig. 33.



Fig. 32.

Fig. 30. Fötus E. Normalmeridionalschnitt des linken Scheitelbeines, vom Druckpol *t* bis zur Sutura sagittalis *s* reichend. Die drei Teile der Figur sind nach den Linien *a*, *a* und *b*, *b* zusammenzusetzen. Knochengewebe schwarz. Schnittdicke von *t* bis *b* = 15 μ , von *b* bis *s* = 10 μ . Vergr. 5 fach.

Fig. 31. Fötus E. Tangentialschnitt des linken Scheitelbeines. Die Mitte des Bildes ist von dem Druckpol annähernd ebensoweit entfernt als die Stelle *x* auf Fig. 30. Schnittdicke 10 μ . Vergr. 5 fach.

Fig. 32. Fötus E. Tangentialschnitt des linken Scheitelbeines annähernd entsprechend der zwischen *y* und *z* gelegenen Stelle der Fig. 30. Schnittdicke 15 μ . Vergr. 5 fach.

Fig. 33. Fötus E. Breitenparallelschnitt des r. Scheitelbeines, der Lage nach entsprechend einem zur Stelle *x* der Fig. 30 senkrechten Schnitte. *s* Symmetrielinie. Schnittdicke 10 μ . Vergr. 5 fach.

Druckpol etwa 19 mm weit aufwärts. Doch bleibt gegen die Sutura sagittalis hin immer noch eine Strecke von ungefähr 23 mm übrig, in deren Bereich eine zusammenhängende Eburnea interna nicht unterschieden werden kann. Die Eburnea externa ist ungeachtet ihrer größeren Dicke von etwas geringerer Flächenausdehnung. Auf dem hier gezeichneten linken Scheitelbeine reicht sie vom Druckpol aus in der Richtung zur Sutura sagittalis 16 mm weit, bis in die Nähe der Stelle *a* auf Textfig. 30. Auf dem rechten Scheitelbeine dieses Fötus wird sie dagegen bereits in einer Entfernung von 8 mm vom Druckpol in dem Grade lückenhaft, daß sie nicht mehr als eine einheitliche Knochenlamelle aufgefaßt werden kann. Eburnea interna und externa sind außerdem von einigen engeren Gefäßkanälen durchsetzt, welche wegen ihrer geringen Größe auf Textfig. 30 nicht hervortreten. Diese engeren Gefäßkanäle sind in der Eburnea interna so spärlich, daß ich über die Richtung ihres Verlaufes nichts Bestimmtes aussagen kann. In der Eburnea externa besitzen die engeren Gefäßkanäle vorwiegend katakline Richtungen.

Außerhalb des Bereiches der zusammenhängenden Eburnea externa gewinnen in den mehr peripherischen Zonen des Scheitelbeines die äußeren Schichten desselben ziemlich rasch die Formen, welche in Textfig. 33 auf einem sagittalen Breitenparallelschnitt des rechten Scheitelbeines zu erkennen sind. Der Mangel der Eburnea externa gibt sich hier zu erkennen durch das Ausmünden zahlreicher anakliner und kataklinen Knochenkanäle an der Außenfläche, während an der Innenfläche eine dünne, zusammenhängende Eburnea interna vorhanden ist. In dieser wurzeln zahlreiche anakline und katakline Knochenspangen, welche in Textfig. 33 um die Symmetrielinie *s* geordnet erscheinen, in Wirklichkeit jedoch ihre volle Längenausdehnung nur in Normalmeridionalschnitten zeigen, wie dies bereits für den Normalschnitt des Scheitelbeines bei Fötus A erörtert wurde. Die starke Längenentwicklung der meridional zum Druckpol geordneten kataklinen Spangen und Kanäle aber führt zu einer unregelmäßig röhrenförmigen Gestaltung der Markräume (Textfig. 31, 32), welche hier in einer intermediären, zwischen Tuber und Sutura gelegenen Zone sehr weite Venen führen. Bei starker Blutfüllung machen sich letztere als rote, meridional zum Druckpol geordnete Streifen auch dem unbewaffneten Auge bemerkbar.

In der marginalen Zone des Knochens, welche dem größeren Teile der Strecke *s—b* auf Textfigur 30 entspricht, dürfte endlich die Struktur der Spongiosa ziemlich vollständig mit den Befunden früherer Entwicklungsstadien übereinstimmen mit dem Unterschiede, daß der Knochenkern hier nur in sehr geringer Ausdehnung ein einschichtiges Knochennetz darstellt. Die leichte Verbiegung der an die Sutura sagittalis grenzenden Teile, welche in Textfig. 30 bemerklich wird, kann in ähnlicher Weise auch bei jüngeren Föten beobachtet werden und ist vermutlich eine postmortale Veränderung. Sie ergibt den Befund eines Cranium carinatum, welches in solchen Fällen indessen nur Folge ist der mit dem Schwunde des Blutdruckes eintretenden Volumsabnahme des Schädelinhaltes. Ähnlich dürften jedoch auch die Deformationen sein, welche der kindliche Schädel bei der Geburt, während seines Durchtrittes durch die Beckenge der Mutter, vorübergehend erleidet.

Die Untersuchung im polarisierten Lichte zeigt, daß auch jetzt noch die Knochenspangen des Scheitelbeines zahlreiche, der Schädeloberfläche parallel verlaufende Knochenlamellen, Grundlamellen enthalten. Doch kommen in nicht unbeträchtlicher Zahl auch Speziallamellen vor, welche den Grundlamellen anliegen, indem sie die unmittelbare Auskleidung der Spongiosaräume bilden.

Die Gesamtheit dieser Befunde legt die Frage nahe, ob in dem Schädeldache des nahezu reifen Fötus die mechanischen Beanspruchungen andere geworden sind als früher. Mit der beträchtlichen Größenzunahme der Schädelkapsel ist die von dem Drucke des Schädelinhaltes hervorgerufene, tangentielle Gesamtspannung der Schädelwand beträchtlich gestiegen. Ihr entspricht eine Zunahme der Dicke der Schädelwand, durch welche die Materialspannung des Knochengewebes vermutlich auf einen überall gleichen, den kritischen Wert etwas übersteigenden Betrag eingestellt wird. Sodann darf man mit großer Wahrscheinlichkeit annehmen, daß diejenigen Teile der Innenfläche des Scheitelbeines, auf welche ein mehr oder weniger großer Druck des Gehirns unmittelbar einwirkt, an Flächenausdehnung beträchtlich zugenommen haben. Wie hoch dieser Druck ist, bleibt allerdings vorläufig unbekannt. Er ist vielleicht etwas gestiegen. Doch kann man nicht wohl annehmen, daß er im gleichen Verhältnisse wie der Durchmesser der Schädelkapsel zugenommen habe. Ebenso dürfte der Druck der intrakraniellen Flüssigkeit keine erheblichen Veränderungen gegen früher aufweisen.

Man gelangt daher zu dem Schlusse, daß die mechanische Beanspruchung des Scheitelbeines, welche durch den Druck des Schädelinhaltes veranlaßt wird,

keine prinzipielle Änderung erfahren hat. Doch scheint es, daß die Biegungsspannungen, welche von dem Drucke des wachsenden Gehirns ausgelöst werden, jetzt geringer geworden sind im Verhältnis zu den tangentialen Zugspannungen der Schädelwand, welche der Druck des ruhenden Gehirns und des Liquor cerebrospinalis hervorruft.

Dieses Ergebnis erklärt einen großen Teil der nicht unerheblichen Änderungen der Schädelarchitektur, die namentlich in der Umgebung des Druckpoles hervortreten. Das gegenüber der Eburnea externa schnellere Dickenwachstum der Eburnea interna bei Fötus D, welches sich durch Apposition von jungen Knochenlamellen an der duralen Fläche des Knochenkernes vollzieht, setzt eine Verstärkung der tangentialen Zugspannung an dieser Fläche voraus. Diese Verstärkung ergibt sich in einfacher Weise aus der Abnahme der von dem Wachstumsdrucke des Gehirns erzeugten Biegungsspannung, weil diese Biegungsspannung die tangentialen Zugspannungen an der duralen Seite ermäßigt und an der äußeren, dem Perioste zugewendeten Seite verstärkt. Wenn aber bei Fötus E die Eburnea interna, wenigstens in bezug auf das Dickenwachstum, wieder von der Eburnea externa überholt worden ist, so könnte sich dieses erklären durch eine Inkonstanz der Größe des von dem wachsenden Gehirn erzeugten Druckzuwachses und der von diesem abhängigen Biegungsspannungen. Letztere müssen jedoch im Verhältnis zu den Tangentialspannungen auch bei Fötus E geringer geworden sein als bei den Föten A bis C, weil bei Fötus E die absolute Dicke der Eburnea interna erhebliche Fortschritte gemacht hat, während bei den Föten A bis C an der duralen Fläche des zentralen Teiles des Scheitelbeines überhaupt keine Knochenapposition im Gange war, sondern vielmehr eine Knochenresorption durch vielkernige Osteoklasten stattfand.

Indessen bleibt die Frage offen, ob nicht noch andere Umstände bei der Ausbildung der gegebenen Architekturen mitwirken. Diese könnten gesucht werden in Druckwirkungen, welche die Uteruswand gelegentlich auf die Außenfläche des jetzt beträchtlich vergrößerten Schädels ausübt. Außerdem kommen die Folgen eines interstitiellen Wachstums des Knochengewebes in Frage, wenn ein solches besteht. Dabei ist jedoch daran festzuhalten, daß auch bei Voraussetzung eines interstitiellen Wachstums des Knochengewebes die Architektur des Knochens jederzeit den gegebenen mechanischen Beanspruchungen genügen muß. Die Verfolgung dieser Fragen macht noch die Kenntnis einiger weiterer Tatsachen wünschenswert.

Fötus F der 38. Schwangerschaftswoche. Mädchen, künstliche Frühgeburt, am Tage nach intrauterinem Fruchttode. Chronische Endocarditis valv. mitralis und akute Herzinsuffizienz der 3 Stunden nach der Entbindung gestorbenen Mutter. Schädel des Fötus leicht brachykephal, normal, mit normal weiten Fontanellen. Sagittaler Schäeldurchmesser 109 mm. Der Kubikinhalte des fötalen Schädels F würde sich — unter der Voraussetzung geometrisch ähnlicher Formen — verhalten zu dem Kubikinhalte des Schädels E wie 510 zu 406.

Die mikroskopische Untersuchung der Scheitelbeine ergibt bei Schädel F im allgemeinen ähnliche Befunde wie bei Schädel E. Der Normalmeridionalschnitt

der Textfig. 34 läßt erkennen, daß die Schädelwand im allgemeinen etwas dicker geworden ist, während die kataklinen und anaklinen Knochenspangen nur in der weiteren Umgebung des Druckpols deutlich als solche zu erkennen sind. Weiter peripheriewärts dagegen bietet der Normalmeridionalschnitt mehr das Bild einer meridional gerichteten Röhrenstruktur, bis bei *s* eine kompakte Knochenmasse die Grenze gegen die Sutura sagittalis bildet.

In der Nähe des Druckpols (Textfig. 35) beruht die Dickenzunahme des Scheitelbeines zunächst auf einer Apposition zahlreicher Knochenlamellen an die innere und an die äußere Fläche des Knochens. Diese Apposition ist noch im Fortschreiten begriffen, wie lange Reihen von Osteoblasten kundgeben. Außerdem finden sich an der inneren wie an der äußeren Fläche des Scheitelbeines einige Knochenspangen, welche nur spärliche Verbindungen mit der inneren und äußeren Eburnea aufweisen. Sie erinnern an ähnliche Befunde, welche an der Knocheninnenfläche bei

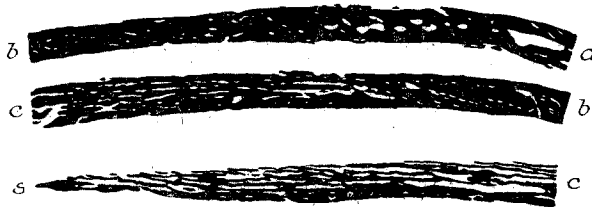


Fig. 34. Fötus F. 38. Woche. Normalmeridionalschnitt des linken Scheitelbeines. Knochengewebe schwarz. Die drei Teile der Figur sind an den Stellen *b, b* und *c, c* aneinander zu setzen. Der Druckpol liegt im Objekte 1 mm, im Bilde 5 mm rechts von der Stelle *a*. Bei *s* die Sutura sagittalis. Schnittdicke von *a* bis *c* = 20 μ , von *c* bis *s* = 15 μ . Vergr. 5 fach.

der Pachymeningitis ossificans, namentlich bei Nephritis und Gravidität, beobachtet werden. Hier stellen sie sich jedoch offenbar als Erscheinungen des normalen Wachstums dar. In der Eburnea externa verläuft eine Anzahl enger, kataklinen Knochenkanäle neben einzelnen, welche eine tangentiale, entweder mehr den Meridianen oder mehr den Breitenparallelen entsprechende Richtung darbieten. In der Eburnea interna kommen gleichfalls Gefäßkanäle vor, jedoch in sehr viel geringerer Zahl. Sie besitzen entweder anaklinen oder tangentialen Verlauf. Das System der anaklinen und kataklinen Knochenspangen, welche die äußere und innere Eburnea verbinden, ist in der Umgebung des Druckpols sehr vereinfacht. Stellenweise sind diese Spangen, wie die Textfig. 34 zeigt, vollständig geschwunden. Wo sie dagegen erhalten sind, werden sie von relativ mächtigen Knochenmassen gebildet und besitzen demgemäß ein plumpes, unförmliches Ansehen. In diesen massigen Knochenspangen erkennt man sodann infolge der zwischen dem Knochengewebe älterer und neuerer Bildung bestehenden Unterschiede der Färbbarkeit deutlich die Reste der schlanken Knochenspangen älterer Bildung. Diese unterscheiden sich in Textfig. 35 durch eine dunklere Färbung. Zugleich kann man sich davon überzeugen, daß die frisch apponierten Knochenmassen, welche in Textfig. 35 heller erscheinen, nicht selten mehrere Knochenspangen älterer Bildung zu einer einheitlichen Knochenspange umgestalten.

Mit Hilfe des Okularmikrometers findet man weiterhin, daß die gegen die Dura gerichteten Fußenden der anaklinen und kataklinen Knochenspangen älterer Bildung, welche jetzt von dicken, neugebildeten Knochenmassen umhüllt werden, in der Nähe des Druckpols auch gegenwärtig noch ungefähr dieselben Abstände aufweisen wie in früheren Perioden. Im Mittel betrugen diese Abstände in der Gegend der Druckpole der Scheitelbeine, in meridionaler Richtung gemessen, bei jedem der Föti A bis F annähernd 0,36 mm bis 0,40 mm. Indessen schwankten bei allen Föten die einzelnen Messungen zwischen 0,28 mm und 0,50 mm. Außerdem hat man zu beachten, daß es sehr schwierig ist, in den einzelnen Fußenden der Knochenspangen die Punkte zu finden, welche mit der Mikrometerteilung zur Deckung zu bringen sind. Man ist daher nur zu der Behauptung berechtigt, daß die genannten Entfernungen bei den verschiedenen Föten der gleichen Größen-

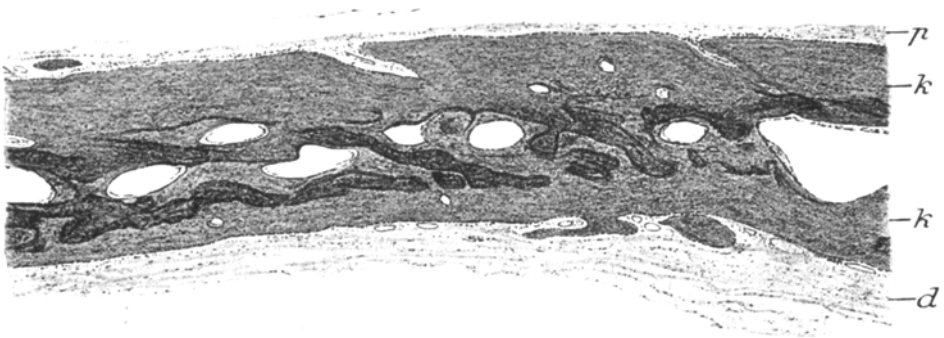


Fig. 35. Fötus F. 38. Woche. Normalmeridionalschnitt des Scheitelbeines. Der rechte Rand des Bildes ist im Objekt 2 mm, im Bilde 60 mm von dem weiter rechts liegenden Druckpol entfernt. *p* äußeres Periost, *k, k* Knochengewebe. *d* Dura mater. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 30 fach.

ordnung angehören und durchschnittlich keine größeren Unterschiede erkennen lassen.

Es ist daher nicht daran zu denken, mit Hilfe solcher Messungen das zeitlich und räumlich beschränkte interstitielle Wachstum des Knochengewebes nachzuweisen. Denn aus den Erörterungen einer meiner früheren Mitteilungen ¹⁾ ergibt sich, daß die einzelne Knochenlamelle des Radius des Kaninchens durch ihr zeitlich und räumlich beschränktes interstitielles Wachstum nur eine Längenzunahme im Verhältnis von ungefähr 100 auf 125 erfahren dürfte. Dieses Verhältnis würde sich nach den später zu erwähnenden Beobachtungen von v. Gudden und Egger für die Schädeldachknochen des Kaninchens vielleicht auf 100 : 150 erhöhen. Eine solche Zunahme der Entfernungen der Fußpunkte der einzelnen schrägen Knochenspangen, die nach obigen Erfahrungen als Teile einer vielfach unterbrochenen Knochenlamelle aufgefaßt werden dürfen, ist jedoch infolge der Ungleichheiten dieser Entfernungen und der genannten Messungsfehler nicht mit Bestimmtheit nachweisbar. Außerdem ist auch bei Voraussetzung eines solchen

¹⁾ R. Thoma, Synostosis suturae sagittalis. Virch. Arch. Bd. 188, 1907.

beschränkten interstitiellen Wachstums des Knochengewebes eine Zunahme der Entfernungen der Fußpunkte der schrägen Knochenspangen in der Gegend der Druckpole bei den Föten A bis F überhaupt nicht zu erwarten. Die Fußenden der schrägen Knochenspangen stellen die ältesten, zuerst gebildeten Teile des Knochenkernes dar, weil in den frühen Perioden die Knochenapposition auf die Außenfläche des Knochenkernes beschränkt war. Bei Voraussetzung eines interstitiellen Wachstums hat man nach dem Inhalte der soeben genannten Mitteilung anzunehmen, daß in den früheren Embryonalperioden das interstitielle Wachstum der einzelnen Knochenlamelle sehr rasch abläuft, so daß es für die Fußenden der schrägen Knochenspangen in der Gegend des Druckpols vielleicht bereits bei dem 78 mm langen Fötus A abgeschlossen war. Daraus würde sich sodann ergeben, daß am Schlusse der Föetalperiode die gegenseitigen Abstände dieser ältesten Teile des Knochenkernes in der Druckpolregion nicht größer sein können als bei Fötus A.

Dagegen beweisen diese Messungen mit Bestimmtheit, daß die Größenzunahme des fötalen Scheitelbeines nicht auf einem unbeschränkten interstitiellen Wachstum des Knochengewebes beruht, wie es von J. Wolff angenommen worden war. Denn in diesem Falle hätten die Abstände der Fußpunkte der schrägen Knochenspangen in demselben Verhältnisse zunehmen müssen, wie die andern Dimensionen des Skelettes. Der Abstand des Druckpols des Scheitelbeines von der Pfeilnaht beträgt bei Fötus A annähernd 11 mm und bei Fötus F annähernd 43 mm. Die Abstände der genannten Fußpunkte hätten daher vom 89. bis zum 263. Tage der Föetalzeit im Verhältnis von 1 : 4 und somit von 0,4 mm auf 1,6 mm wachsen müssen, wenn die Anschauungen von J. Wolff zutreffen würden. Ein solches Wachstum ist aber auf Grund obiger Messungen unbedingt auszuschließen. Für diese Untersuchungen nicht minder wichtig ist jedoch die aus obigen Befunden hervorgehende Tatsache, daß nach dem 135. Tage der Föetalzeit (Fötus D) keine Resorption an der Innenfläche der Druckpolregion des Scheitelbeines stattgefunden hat. Denn in dieser Zeit begann bei Fötus D in einem Gebiete von ungefähr 3 mm Radius die Apposition der Eburnea interna und hat, wie der mikroskopische Befund bei Fötus E und F erweist, seit jener Zeit keine Unterbrechung erlitten.

In größeren Abständen vom Druckpol erfahren die zwischen den Spangen des Knochengewebes enthaltenen Kanäle eine erhebliche Verengung, so daß sie bei der fünffachen Vergrößerung der Textfig. 34 bereits in einer Entfernung von $5 \times 7,5$ mm vom Pol nur wenig mehr hervortreten. Sie sind jedoch bei stärkeren Vergrößerungen leicht nachweisbar, wie der Breitenparallelschnitt auf Textfig. 36, I zeigt, welcher in einer Entfernung von 9 mm vom Druckpol angelegt wurde. Dieser Schnitt läßt zugleich die Knochenmassen älterer und neuerer Bildung durch ungleiche Färbung unterscheiden. Die älteren, dunkler gefärbten Knochenmassen sind indessen hier in etwas geringerer Reichlichkeit vorhanden als in der näheren Umgebung des Druckpols. Dies stimmt überein mit den Befunden bei den jüngeren

Föten A, B, C, welche zeigen, daß an diesen Stellen der Innenfläche früher etwas ausgiebigere Knochenresorptionen stattgefunden haben. Gegenwärtig dagegen findet man in Textfig. 36, I an der Innenfläche des Scheitelbeines neugebildete Knochenlamellen und eine nahezu ununterbrochene Lage von Osteoblasten, welche auf die Fortdauer der Knochenapposition hinweist. Diese aber vollzieht sich mit noch größerer Lebhaftigkeit an der Außenfläche der gegebenen Stelle des Scheitelbeines, wie ich aus den zahlreichen, frei über die Außenfläche hervor-

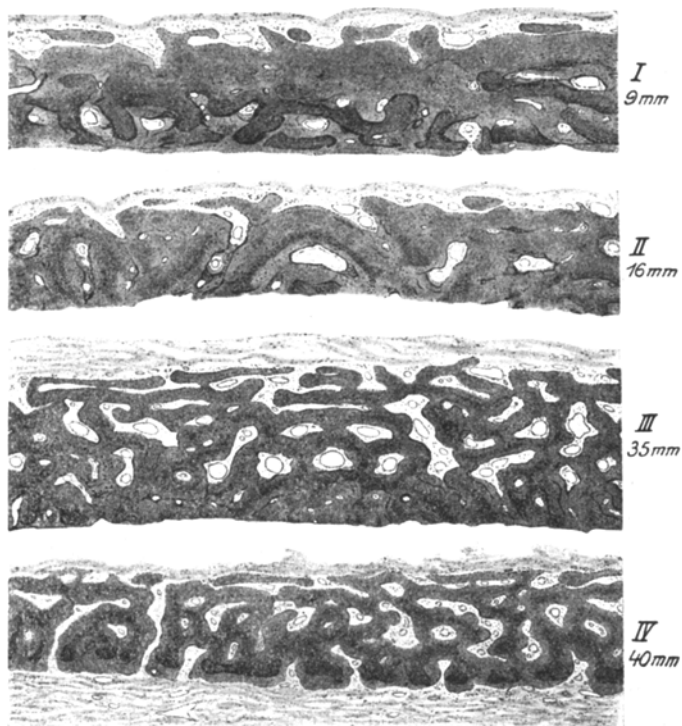


Fig. 36. Fötus F. 38. Woche. Rechtes Scheitelbein. Normalparallelschnitte. Die beigesetzten Zahlen geben in Millimetern den Abstand vom Druckpol an. Der Schnitt IV ist zugleich 2 mm von der Sutura sagittalis entfernt. Schnittdicke 15 μ . Vergr. 24 fach.

ragenden Knochenleisten und aus der großen Zahl der hier versammelten Osteoblasten schließe.

In einem Abstände von ungefähr 16 mm vom Druckpol werden die Knochenkanäle wieder etwas weiter. Man bemerkt jedoch, daß hier (Textfig. 36, II) die ältesten Teile der Knochenspannen zumeist fehlen infolge etwas ausgiebigerer Resorptionen an der Innenfläche des Scheitelbeines. Wie groß der Verlust ist, läßt sich allerdings direkt nicht wohl feststellen. Aus der Anordnung der stärker gefärbten älteren Knochenmassen ergibt sich jedoch auf Normalmeridionalschnitten sowohl als auf Normalparallelschnitten, daß das System der anaklinen und kataklinen Knochenspannen in Entfernungen von 16 bis 22 mm vom Druckpol an seiner

Innenfläche einen Defekt aufweist, der höchstens 0,4 mm tiefer greift als am Druckpol, wahrscheinlicherweise jedoch viel geringer ist. Indessen waren am Druckpol und in seiner näheren Umgebung nur bei Fötus A, B und C, also am 89. bis 108. Tage der Fötalzeit, Resorptionserscheinungen an der Innenfläche des Scheitelbeines erkennbar, während bei Fötus D, also am 135. Tage, bereits die Bildung der Eburna interna durch Knochenapposition an der Innenfläche der Druckpolregion eingeleitet wurde. Ich erhalte vermutlich einen annähernd richtigen Wert für die Resorptionsvorgänge in der Druckpolregion, wenn ich annehme, daß selbst die ganze Dicke des bei Fötus A bereits vorhandenen Knochens, also eine Schichte von 0,2 mm Dicke, wieder resorbiert worden sei.

Damit würde sich ergeben, daß in Entfernungen von 16 bis 22 mm vom Druckpol nicht mehr als eine Schichte von $0,4 + 0,2 = 0,6$ mm Dicke an der Innenfläche des Scheitelbeines der Resorption zum Opfer gefallen sein kann. Der am Druckpol eingetretene Resorptionsdefekt ist aber bei Fötus F teilweise wieder ausgeglichen, indem sich eine Eburna interna von 0,1 bis 0,2 mm Dicke auf demselben abgelagert hat.

Es fragt sich sodann, ob diese Resorptionsvorgänge imstande sind, die gleichzeitig eintretende Zunahme der Länge der Krümmungsradien der Schädellinnenfläche zu erklären. Bei Fötus D (135 Tage) beträgt, nach einem Umriss der Schädellinnenfläche gemessen, der frontale Krümmungsradius am Druckpole des linken Scheitelbeines ungefähr 29 mm. Die Messung ist jedoch infolge der Biegsamkeit des Knochens weniger genau. In der nächsten Umgebung der Tubera parietalia findet man auch nach der Geburt und in späteren Lebensperioden häufig Krümmungsradien ähnlicher Größe, wie aus den in der ersten Mitteilung niedergelegten Messungen hervorgeht. Es hängt dies jedoch zusammen mit der Ausgestaltung der Tubera und mit der Entstehung der Impressionen und Juga, die während der Fötalzeit im allgemeinen wenig hervortreten. Läßt man die Juga und Impressionen außer Acht, so ist die Zunahme der Krümmungsradien eine erhebliche. Bei dem Fötus F waren am linken Scheitelbeine keine deutlichen Impressionen und Juga vorhanden, und der frontale Krümmungsradius am Druckpol und in seiner weiteren Umgebung fand sich an einem Paraffinausgusse des Schädeldaches annähernd gleich 60 mm. Dies ergibt eine Zunahme der Länge des frontalen Krümmungsradius der Scheitelbeininnenfläche, welche ziemlich genau proportional ist der gleichzeitigen Zunahme des sagittalen Schädeldurchmessers.

Eine einfache Konstruktion zeigt sodann, daß die oben beobachteten Resorptionsvorgänge bei weitem nicht hinreichen, um die Zunahme des Krümmungsradius der Schädellinnenfläche zu erklären (Textfig. 37). In einer Entfernung von 16 mm vom Druckpol hätte in diesem Falle an der Innenfläche des Scheitelbeines eine Knochenschichte von ungefähr 2,4 mm Dicke resorbiert werden müssen und in einer Entfernung von 22 mm vom Druckpol eine Knochenschichte von ungefähr 4,7 mm Dicke. Da indessen das Scheitelbein des Fötus D nur ungefähr 0,5 mm dick ist, hätte gleichzeitig an der Außenfläche eine wenigstens gleichstarke

Apposition von Knochengewebe stattfinden müssen. In noch größeren Abständen vom Druckpol wäre der Verlauf der geweblichen Vorgänge ein noch verwickelterer gewesen, da an den Rändern des fötalen Scheitelbeines jederzeit Appositionen von Knochengewebe sowohl an der Außenfläche wie an der Innenfläche stattfinden. Ich will dies nicht im einzelnen schildern, sondern nur darauf hinweisen, daß der Abstand des Druckpols von dem Sagittalrande des Scheitelbeines in annähernd frontaler Richtung, der Außenfläche des Knochens entlang gemessen (Gurtmaß), bei Fötus D annähernd 22 mm und bei Fötus F annähernd 43 mm betrug.

Auf die großen Unterschiede der Krümmungsradien der Schädel jüngerer und älterer Föten ist bereits Welcker¹⁾ aufmerksam geworden, indem er sie als Einwand gegen die ältere Lehre von Flourens²⁾ geltend machte. Dieser war der Ansicht gewesen, das Schädeldach wachse durch Apposition an der Außenfläche bei gleichzeitiger Resorption an der Innenfläche, wobei die einzelnen Schichten wie die Jahresringe der Bäume aufeinander abgelagert werden sollten. Dies würde, wie Welcker richtig bemerkt, eine kolossale Materialverschwendung bedeuten. Letzterer gelangte daher zu der Ansicht, daß das fötale Schädeldach von dem wachsenden Gehirn mechanisch



Fig. 37. Krümmungen der Innenfläche des Scheitelbeines bei Fötus D und F. Die beiden Krümmungslinien sind als Teile von Kreisen dargestellt, welche sich am Druckpol berühren. Die punktierten Linien bezeichnen die Entfernungen von 16 mm und 22 mm vom Druckpol, gemessen am Umfange der beiden Kreise. Natürliche Größe.

aufgebogen werde, und versuchte die Möglichkeit einer solchen mechanischen Aufbiegung durch einen allerdings nicht ganz normalen Befund zu beweisen. Dieser Befund wird jedoch erst verständlich, wenn die normalen Krümmungsveränderungen der Schädelwand erklärt sind. Wichtiger ist daher die Tatsache, daß Welcker in ausgeschnittenen Streifen der fötalen Schädelwand Spannungen fand, welche die Streifen einrollen, also von einer Aufbiegung der Schädelwand hergeleitet werden können. Auch sprechen die drei Spalten der fötalen Hinterhauptschuppe, wie Welcker anführt, für mechanische Aufbiegungen. Diese Spalten hätten jedoch zugleich darauf hinweisen sollen, daß ausgiebige mechanische Aufbiegungen eines schalenförmigen Knochens undenkbar sind, wenn nicht zugleich Kontinuitätstrennungen oder Vorgänge des interstitiellen Wachstums oder irgendwelche andere, unbekannte Prozesse die Aufbiegung begleiten. Unter diesen Umständen mag es auffallend sein, daß Welcker ein interstitielles Wachstum bei diesen Aufbiegungen ablehnt, obwohl bereits R. Virchow³⁾ dasselbe für den Unterkiefer als möglich betrachtet hatte. Welckers Anschauungen fanden daher auch einen Gegner an Kölliker⁴⁾ welcher dem interstitiellen Wachstum des Knochens gleichfalls ablehnend gegenübersteht und die Entwicklung des Schädels durch ungleichmäßige Appositionen und Resorptionen an den Flächen und durch Knochenappositionen an den Nahtlinien zustande kommen läßt. Die Knochen-

¹⁾ Welcker, Untersuchungen über Wachstum und Bau des menschlichen Schädels. Leipzig 1862.

²⁾ Flourens, Théorie expérimentale de la formation des os. Paris 1847. Stand mir nicht zur Verfügung. Ich referiere nach Welcker.

³⁾ R. Virchow, Virch. Arch. Bd. 13, S. 350, 1858.

⁴⁾ A. Kölliker, Die normale Resorption des Knochengewebes und ihre Bedeutung für die Entstehung der typischen Knochenformen. Leipzig 1873.

aposition an den Nahtlinien war übrigens auch von Welcker angenommen worden. Positiv nachgewiesen aber haben die Untersuchungen von Kölliker für das Schädeldach eigentlich nur zwei Tatsachen, erstens — wenn man den Krappfütterungen trauen darf — eine Apposition an der Außenfläche des Schädeldaches und zweitens das Vorkommen von Resorptionsflächen, die mit vielkernigen Osteoklasten besetzt sind. Bestimmte Nachweise über die Lokalisation dieser Vorgänge am Schädeldach fehlen indessen, konnten auch bei einer mehr generellen Untersuchung der Resorptionsvorgänge, welche sich auf fast alle Teile des Skeletts des Menschen und zahlreicher Tiere erstreckte, kaum erwartet werden. Ebenso fehlen bei Kölliker ausreichende Nachweise über die Mengen des am Schädeldache apponierten und resorbierten Knochengewebes, so daß durch seine Untersuchungen weder die Ansichten von Flourens noch diejenigen von Welcker als widerlegt gelten können.

Die Ansichten von Flourens und diejenigen von Kölliker haben das Gemeinsame, daß sie das Wachstum des Schädeldaches ausschließlich durch Appositionen und Resorptionen von Knochengewebe zustande kommen lassen. Während aber Flourens das Wachstum des Schädeldaches der Ablagerung der Jahresringe der Baumstämme vergleicht, mit dem Unterschiede, daß die älteren Jahresringe wieder der Resorption verfallen, denkt sich Kölliker den Vorgang in der Weise, daß die Appositionen und Resorptionen sich vorwiegend an den Rändern der Schädeldachknochen vollziehen. Meine Untersuchungen zeigen indessen, daß beide Anschauungen nicht haltbar sind. Die Anschauungen von Flourens dürfen als widerlegt gelten, weil sie so ausgiebige Resorptionen voraussetzen, daß bei Fötus F überhaupt keine Reste der ältesten, anaklinen und kataklinen Knochenstangen mehr vorhanden sein könnten. Es sind jedoch auch die Anschauungen von Kölliker unhaltbar, weil in dem Scheitelbeine des Fötus F das in jüngere Knochenmassen eingebettete System der ältesten, anaklinen und kataklinen Knochenstangen nur geringe Defekte aufweist.

Wie oben besprochen und durch Textfig. 37 erläutert wurde, müßten bereits in mäßigen Abständen vom Druckpole ausgiebige Defekte im Bereiche der ältesten Knochenteile des Scheitelbeines nachweisbar sein, wenn die Zunahme des Krümmungsradius von 29 mm auf 60 mm durch Resorptionsvorgänge im Sinne von Flourens oder Kölliker zustande käme. Diese Resorptionen müßten auch durch Störungen des Verlaufes der Knochenlamellen bei Fötus F in auffallender Weise bemerkbar werden. Namentlich müßten zahlreiche Lamellen des alten Knochens schräg abgeschnitten an der Knocheninnenfläche endigen. Mit Hilfe des Polarisationsmikroskopes überzeugt man sich jedoch davon, daß die Grundlamellen des Scheitelbeines bei Fötus F überall annähernd der Schädellinnenfläche parallel verlaufen.

Diese Erfahrungen beweisen, daß die Zunahme der Krümmungsradien des Schädeldaches durch eine Aufbiegung der Schädelschale bewirkt wird, wie bereits Welcker annahm. Diese Aufbiegung kann sich jedoch nicht vollziehen ohne Änderungen im Gefüge der Schädelschale. Notwendigerweise müssen bei der Aufbiegung entweder Kontinuitätstrennungen auftreten oder Vorgänge des interstitiellen Wachstums oder andere Besonderheiten, welche die bei der Aufbiegung entstehenden Spannungen ermäßigen und aufheben. Am Hinterhauptbeine dürften beispielsweise die von Welcker erwähnten meridionalen Spalten solche Kontinuitätstrennungen vertreten, und am Scheitelbeine besitzt vielleicht die von Broca¹⁾ beschriebene Spalte, aus welcher später das Foramen parietale hervor-

¹⁾ P. Broca, Bull. de la Soc. d'Anthropol. de Paris Bd. 10, S. 326, 1875.

gehen soll, eine ähnliche Bedeutung. Ob diese Spalte des Scheitelbeines konstant ist, kann ich nicht angeben. Jedenfalls ist sie so klein, daß sie für die Zunahme der Krümmungsradien der Scheitelbeinnenfläche unerheblich ist. Wirkliche Kontinuitätstrennungen aber können auf Grund vorstehender Untersuchungen ausgeschlossen werden. Damit ist der Beweis gegeben, daß dem Scheitelbein ein interstitielles Wachstum zukommt, und daß dieses interstitielle Wachstum mindestens diejenige Größe besitzt, welche die Zunahme der Krümmungsradien unbedingt verlangt.

Dieses obligate interstitielle Wachstum, welches von der Zunahme der Krümmungsradien unbedingt verlangt wird, ist ein Wachstum in der Richtung der Breitenparallelen, welches sich ohne ein interstitielles Wachstum in den meridionalen Richtungen vollzieht. Seine Werte sind für die einzelnen, an die Schädelaußenfläche frisch apponierten Knochenlamellen ohne Schwierigkeit annäherungsweise zu bestimmen, wenn man für die einzelnen Wachstumsperioden die Meridianlängen des Scheitelbeines, beispielsweise den Abstand des Druckpoles von der Pfeilnaht und die zugehörigen Krümmungsradien, kennt. Eine einfache Rechnung¹⁾ ergibt die Zahlen folgender Zusammenstellung.

Obligates interstitielles Breitenparallelwachstum
des Randes der frisch apponierten Knochenlamellen, unter Voraussetzung konstanter Meridianlängen.

	Alter Tage	Krümmungs- radius mm	Meridian- länge = 11 mm $i =$	Meridian- länge = 15 mm $i =$	Meridian- länge = 22 mm $i =$	Meridian- länge = 40 mm $i =$	Meridian- länge = 43 mm $i =$
Fötus A	89	14,5	1,000	—	—	—	—
Fötus B	92	20	1,048	1,000	—	—	—
Fötus D	135	29	1,076	1,052	1,000	—	—
Fötus E	210	54	1,096	1,086	1,073	1,000	—
Fötus F	263	60	1,097	1,088	1,078	1,018	1,000
Erwachsener		120	1,101	1,097	1,097	1,077	1,067

¹⁾ Das Scheitelbein wird hier als eine Kugelhaube betrachtet. Wenn der Krümmungsradius derselben gleich R ist, so wird die Länge des Randes dieser Kugelhaube $= 2\pi r$, wobei r die halbe Sehne bezeichnet. Man kann sodann den halben Öffnungswinkel der Haube $= \alpha$ setzen, woraus folgt $r = R \sin \alpha$ und der Winkel α ist gleich $360 m$ geteilt durch $2\pi R$, wenn m den Meridionalabstand des Haubenrandes vom Pol in Gurtmaß angibt. Der Vergleich der Länge zweier Kugelhaubenränder ergibt schließlich das Breitenparallelwachstum.

Die angegebenen, der Rechnung zugrunde gelegten Meridianlängen und Krümmungsradien konnten an den durch die Alkohohlärtung geschrumpften Schädeln nur sehr ungenau gemessen werden. Sie entsprechen annähernd einer geometrischen Ähnlichkeit der verschiedenen Schädel und wurden zum Teil aus der Annahme einer geometrischen Ähnlichkeit berechnet. Der Krümmungsradius des erwachsenen Schädels ist absichtlich eher etwas groß angenommen.

Ungeachtet der großen Ungenauigkeiten, welche die hier gegebenen Krümmungsradien und Meridianlängen aufweisen, gewinnt man aus dieser Zusammenstellung doch einige wertvolle Ergebnisse. Man darf behaupten, daß der Rand einer frisch an das fötale Scheitelbein apponierten Knochenlamelle von 11 mm Meridianlänge und 14,5 mm Krümmungsradius im Laufe der Zeit mit zunehmendem Krümmungsradius mindestens ein obligates, interstitielles Breitenparallelwachstum durchlaufen muß, dessen Gesamtbetrag am Schlusse des Wachstums 1,101 erreicht. Die Länge dieses Randes wird in der genannten Zeit im Verhältnis von 1,000 : 1,101 zunehmen. Der Verlauf des durch diese Zahlen gekennzeichneten obligaten, interstitiellen Wachstums aber ergibt sich in anschaulicher Weise aus der Kurve A der Textfig. 38.

Diese Knochenlamelle bildete zur Zeit ihrer Apposition, also ungefähr am 89. Tage der Fötalzeit, die äußere Oberfläche des Scheitelbeines des Fötus A. Sie ist die erste Lamelle dieses Knochens, welche hier von Interesse ist, weil obigen

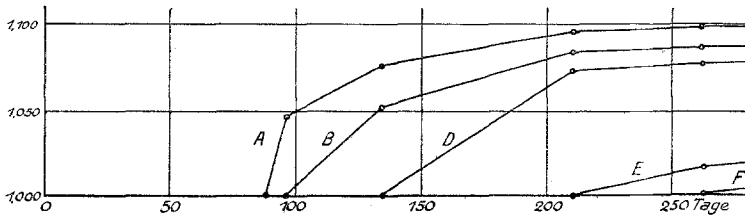


Fig. 38. Obligates, interstitielles Wachstum frisch apponierter Knochenlamellen des fötalen Scheitelbeines. Die angegebenen Tage rechnen vom Beginn der Fötalzeit.

Beobachtungen zufolge alle in früherer Zeit apponierten Knochenlamellen nach kurzem Bestande wieder resorbiert werden ¹⁾). Alle später apponierten Knochenlamellen weisen an ihren Rändern ein geringeres, obligates, interstitielles Wachstum auf, wie obige Zusammenstellungen und die Kurven der Textfig. 38 zeigen. In jeder einzelnen Knochenlamelle aber nimmt, wie sich leicht nachweisen läßt, das obligate, interstitielle Breitenparallelwachstum von den Rändern nach der Druckpolregion hin ab, um am Druckpol selbst gleich Null zu werden.

Man findet somit, daß das obligate, interstitielle Breitenparallelwachstum an keiner Stelle den Betrag von 1,101 überschreitet, und selbst dieser Wert dürfte praktisch kaum in Frage kommen. Denn die während der Fötalperiode gebildeten Knochenteile werden, wie es sich später zeigen wird, kurze Zeit nach der Geburt in dem Grade zerklüftet, daß von einem interstitiellen Wachstum derselben kaum

¹⁾ Diese Betrachtung geht von der Voraussetzung aus, daß alle Knochenlamellen in ihrer ganzen Ausdehnung gleichzeitig apponiert werden und vom Druckpol bis zu den Nahtlinien reichen. Diese Voraussetzung trifft, wie es sich später erweisen wird, nicht völlig zu. Man würde jedoch den Tatsachen vollständig gerecht werden, wenn man alle unmittelbar an das äußere Periost grenzenden Teile der Knochenlamellen als oberflächliche Schicht zusammenfassen wollte. Diese Schichte würde überall die Dicke einer Knochenlamelle aufweisen und überall aus frisch apponiertem Knochengewebe bestehen, also alle Eigenschaften der hier vorausgesetzten oberflächlichen Knochenlamellen besitzen.

Breitenparallelwachstums. Dieser Erfolg aber muß sofort eintreten, wenn die Knochenlamellen auch in meridionaler Richtung eine Verlängerung durch interstitielles Wachstum erfahren.

Ich betrachte es im allgemeinen nicht für wünschenswert, eine Beobachtungsreihe von einer andern abhängig zu machen, und werde daher zunächst fortfahren, nur das obligate, interstitielle Breitenparallelwachstum als festgestellt anzusehen. Doch liegen hier Beziehungen eigener Art vor. Wenn die Breitenparallelspannungen der Schädelknochen ein interstitielles Breitenparallelwachstum der frisch apponierten Knochenlamellen hervorrufen, wäre es durchaus unverständlich, wenn die Meridionalspannungen der Schädeldachknochen nicht in ähnlicher Weise ein interstitielles Meridionalwachstum veranlassen sollten. Man ist daher genötigt, auf Grund der hier erörterten Tatsachen ein interstitielles Meridionalwachstum als sehr wahrscheinlich zu bezeichnen. Auch lassen sich einige Messungen von v. G u d d e n als direkte Bestätigungen anführen. Letzterer ist sogar der Meinung, daß das interstitielle meridionale Wachstum dem interstitiellen Breitenparallelwachstum ungefähr gleich sei. Eine eingehendere Besprechung dieser Fragen scheint jedoch erst am Platze zu sein, wenn auch der anatomische Befund in den peripherischen Zonen des Scheitelbeines F etwas genauer geprüft ist.

Der Breitenparallelschnitt III der Textfig. 36 ist 35 mm vom Druckpol entfernt geführt. Er besitzt, wie ein Vergleich mit Textfig. 34 lehrt, eine ausgeprägte Röhrenarchitektur, welche einer extremen Abbeugung der kataklinen Knochenkanäle entspricht, zwischen denen nur wenige, gleichfalls der Oberfläche nahezu parallel verlaufende anakline Kanäle zu unterscheiden sind. Diese Anordnung der Knochenspannen dürfte auf einem starken Vorwiegen der meridionalen Spannungen beruhen. Zugleich bemerkt man an der duralen Fläche ausgiebige lakunäre Knochenresorptionen, während an der Außenfläche zahlreiche Osteoblasten eine lebhafte Knochenapposition dartun. In der Tat ist diese Zone des Scheitelbeines relativ neuer Bildung, jedoch immerhin, wie ein Vergleich der Meridianlängen des Scheitelbeines jüngerer Föten ergibt, ungefähr 70 bis 75 Tage alt. Es kann daher nicht auffallen, daß man auch hier ältere, sich dunkler färbende, und jüngere, sich weniger stark färbende Teile des Knochengewebes unterscheiden kann. Erstere sind, wie immer, außerordentlich zellreich. Deutlicher noch treten diese Unterschiede auf Tangential-schnitten ¹⁾ hervor, welche zugleich die netzförmige Anordnung dieser relativ alten Bestandteile des Knochens zeigen (Textfig. 40).

Die Resorptionsvorgänge, welche an der duralen Fläche des Abschnittes III der Textfig. 36 zu bemerken sind, dürften, wie aus dem Verhalten der jüngeren und älteren Teile der Knochenspannen hervorgeht, etwas geringer sein als die ausführlich besprochenen Resorptionsvorgänge des Abschnittes II derselben Figur. Ihre Erklärung ist jedoch schwierig. Es kann sein, daß infolge der größeren Festigkeit der Druckpolregion die von dem Wachstumsdrucke des Gehirns erzeugten Biegungsspannungen in den intermediären Zonen des Scheitelbeines stärker zur Wirkung gelangen und die Tangentialspannungen an der duralen Fläche des Knochens stark ermäßigen.

In den relativ dünnen Randzonen des Scheitelbeines, Textfig. 36, Breitenparallelschnitt IV, sind jedenfalls nur geringe Biegungsspannungen zu gewärtigen. Hier findet man demgemäß nicht

¹⁾ Alle hier besprochenen Schnitte der beiden Scheitelbeine des Fötus F liegen sehr nahe einer frontalen Ebene, welche die Pfeilnaht rechtwinklig schneidet und durch die Druckpole beider Scheitelbeine hindurchgeht. Sie können daher, unter Berücksichtigung des Meridionalabstandes vom Pol, mit einiger Vorsicht miteinander verglichen werden.

nur reichliche Knochenappositionen an der Außenfläche, sondern auch Knochenappositionen an der Innenfläche, welche allerdings nicht sehr ausgiebig zu sein scheinen.

Der Sagittalrand des Scheitelbeines des Fötus F wird auf Textfig. 34c von einer ziemlich mächtigen Knochenmasse gebildet, welche ein fremdes Glied in der röhrenförmigen Architektur dieses Skelettstückes zu bilden scheint. Es wäre möglich, daß diese Knochenmasse einen Durchschnitt durch den von Broca¹⁾ beschriebenen, angeblich bereits von Albinus beobachteten Randwulst des Scheitelbeines, *bourrelet marginal du pariétal*, darstellt. Ob dieses zutrifft oder nicht, ist schwer zu sagen, da Broca keine

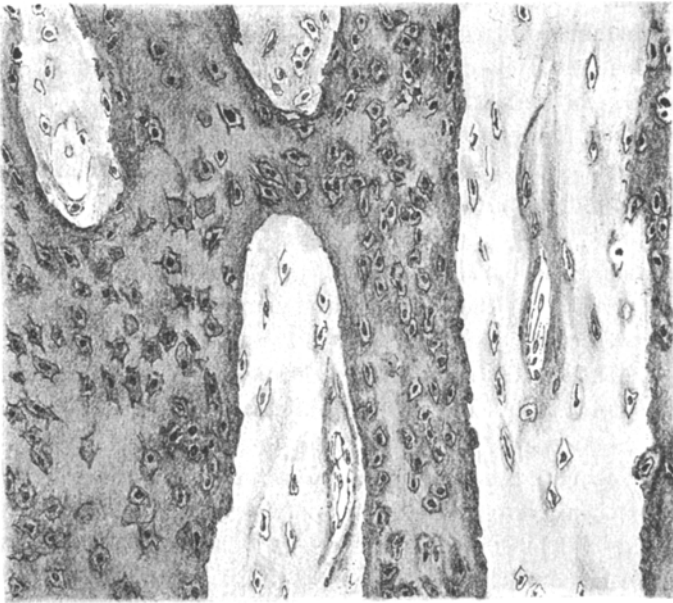


Fig. 40. Fötus F. 38. Woche. Tangentialschnitt des linken Scheitelbeines in der Nähe der duralen Fläche desselben. Das ältere Knochengewebe dunkel, das jüngere Knochengewebe hell schattiert. Die Mitte des Bildes steht 37 mm vom Druckpol ab. Letzterer ist oberhalb des Bildes gelegen. Schnittdicke 20 μ . Vergr. 209 fach.

Abbildungen gibt und nur mazerierte Schädel mit unbewaffnetem Auge untersucht hat. Ich bin der Ansicht, daß der von Broca beschriebene Randwulst auf einer Verwechslung mit den postmortalen Verbiegungen der Ränder der Schädeldachknochen beruht. Diese Ansicht stützt sich auf einige Normalmeridianschnitte durch die *Suturæ sagittalis, frontalis, coronalis* und *lambdoidea* der Föten E und F. Diese Schnitte zeigen, daß die Gestaltung der Nahränder der Schädeldachknochen mancherlei Unterschiede aufweist, jedoch keine Anhaltspunkte für die Annahme eines Randwulstes gibt. Charakteristisch für die Gestaltung der Nahränder der Schädeldachknochen älterer Föten ist jedoch ihre relativ große Mächtigkeit. Zwar

¹⁾ P. Broca, Bull. de la Soc. d'Anthropol. de Paris Bd. 10, S. 326, 1875.

gibt es auch bei Fötus F noch Stellen, an welchen die Nahtränder der Knochen ebenso dünn erscheinen wie in früheren Perioden, zumeist sind die Ränder jedoch ziemlich massig und abgerundet. Ich gewinne daher den Eindruck, daß die in früheren Perioden scharf und dünn zulaufenden Ränder der Scheitelbeine in ihrem weiteren Flächenwachstum durch ein etwa in der Mitte der Fötalperiode auftretendes Hindernis beschränkt werden.

Die Einschränkung und Hemmung des Randwachstums der Schädeldachknochen wurde bereits von v. G u d d e n bei seinen Versuchen an neugeborenen Kaninchen bemerkt, jedoch in ihren Ursachen nicht weiter verfolgt. Ich suche dieses Hindernis, welches vermutlich bereits vom 135. Tage der Fötalperiode an das Randwachstum verzögert, in den Nahtlinienbewegungen. Die bereits verknöcherten Teile des Scheitelbeines und der übrigen Skelettstücke des fötalen Schädels sind verhältnismäßig starr und wenig dehnbar, wenn man sie mit dem Verhalten des Bindegewebes vergleicht, welches die Ränder der Schädeldachknochen miteinander vereinigt. Die kleinen Volumschwankungen der Schädelhöhle, welche bei dem pulsatorischen Einströmen des Blutes in die Blutgefäße unvermeidlich sind, müssen sich daher vorzugsweise an den relativ stärker dehnbaren Nahtlinien geltend machen und geringe periodische Dehnungen der Nahtsubstanz hervorrufen, welche ich als Nahtlinienbewegungen bezeichnen möchte. Letztere aber werden für die Längeneinheit ¹⁾ um so ausgiebiger werden, je mehr die Breite der Nahtlinie abnimmt und je mehr die Flächenausdehnung des Scheitelbeines zunimmt. Es kann daher nicht auffallen, daß ihre Folgen sich erst am Schlusse der Fötalperiode deutlicher bemerkbar machen. Diese Folgen aber stellen sich dar als eine Beschränkung des marginalen Knochenwachstums, welche vergleichbar ist dem Auftreten fibröser Ankylosen an Stelle von Knochenkallus bei ungenügend immobilisierten Frakturen der Röhrenknochen. Die Verzögerung des Randwachstums der Schädeldachknochen aber hat zur unmittelbaren Folge die Abstumpfung der Ränder derselben, welche die charakteristische Besonderheit für die späteren Teile der Fötalperiode darstellt.

Die Nahtlinienbewegungen verhindern die weitere Ausbildung der peripherischen Randnetze von Knochengewebe, welche stark schräge Insertionen von Bindegewebsfasern gestatteten. Die Materialspannung in dem an den Knochen grenzenden Bindegewebe muß daher — wie aus den früheren Erörterungen hervorgeht — erheblich zunehmen. Damit ändert sich das Gefüge dieses Bindegewebes, indem dieses die Eigenschaften der Nahtsubstanz annimmt. Diese ist ausgezeichnet durch mächtige Bindegewebsfibrillen, welche als S h a r p e y s c h e Fasern in den Knochen eindringen. Nach den heute geltenden Anschauungen über die Histogenese der Knochensubstanz ist anzunehmen, daß auch in den früheren Entwicklungsstadien feine Bindegewebsfibrillenbündel in die Ränder des Scheitelbeines und der andern Schädeldachknochen einstrahlten. Allein jetzt erst sind diese Binde-

¹⁾ Die Länge ist hier in der Richtung der Meridiane, also quer zur Naht, zu messen. Parallel zu den Nahträndern des Knochens dürfte die Nahtsubstanz keine erhebliche Dehnung erleiden.

gewebsbündel so mächtig geworden, daß sie mit den einfachen, hier benutzten Methoden deutlich erkannt werden können.

Wie der Zellreichtum und die nach der Hämatoxylinbehandlung sich einstellende dunkle Färbung bereits bei schwacher Vergrößerung erkennen läßt, besteht der abgestumpfte Rand des Scheitelbeines großenteils aus derjenigen Knochensubstanz, welche bisher als relativ alte bezeichnet wurde (Textfig. 41). Bei etwas stärkerer Vergrößerung tritt sodann in der Regel die Lamellenstruktur etwas deutlicher hervor, wenn man auch zumeist nicht die einzelnen Knochenlamellen, sondern nur Gruppen von solchen zu unterscheiden vermag. Auch diese sind am gefärbten Objekt nicht ganz so deutlich erkennbar, als man nach Text-

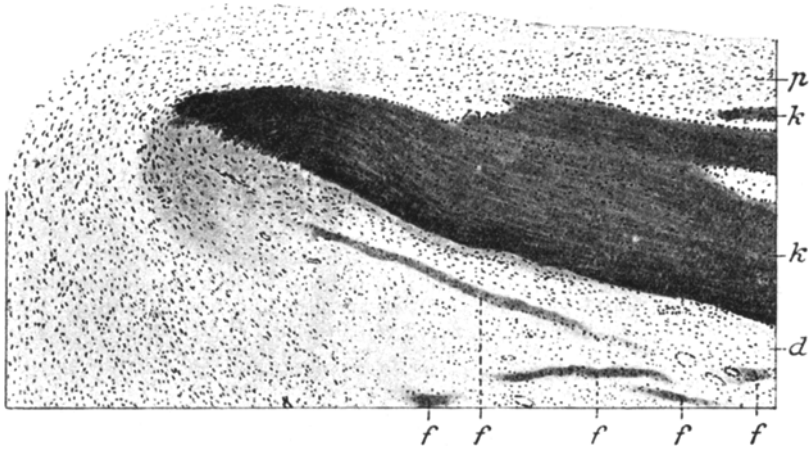


Fig. 41. Fötus F. 38. Woche. Sagittalrand des linken Scheitelbeines. Normalmeridional-schnitt. *p* Periost der Außenfläche. *k, k* Knochengewebe. *d* Dura mater. *f, f* konstant auftretende Faltungen des Dünnschnittes im Bereiche der Dura, welche vermutlich zu den postmortalen Verschiebungen der Scheitelbeinränder in Beziehung stehen. Schnittdicke 15 μ . Vergr. 59fach.

figur 41 erwarten sollte. Deutlichere Bilder gewinnt man erst mit Hilfe des Polarisationsapparates von ungefärbten oder nur mit Eosin unterfärbten Präparaten von 50 μ Schnittdicke. Man findet dann in der Regel, daß die Lamellenzüge des Knochenrandes geringe Verbiegungen offenbar postmortaler Entstehung darbieten, während das angrenzende Bindegewebe der Nahtsubstanz durch die postmortalen Verschiebungen der Knochen sehr stark bogenförmig verzerrt erscheint (Textfigur 41) und abnorm gerichtete Spannungen enthält, welche Faltungen im Schnittpräparat hervorrufen.

Die Faserungen des Bindegewebes, welche aus den Nahträndern des Knochens hervorgehen, zeichnen sich durch etwas stärkere Lichtbrechung aus, was auf Textfigur 41 durch eine diffuse graue Färbung angedeutet ist. Diese Fasern beginnen an der duralen Fläche des Scheitelbeines bereits in einigem Abstände vom äußersten Rande des Knochens. An dem Rande selbst erreichen sie ihre stärkste Ausbildung, während sie an der Außenfläche des Scheitelbeines nur in der nächsten Nähe des

Randes nachweisbar sind. Sie dürften diejenigen Bindegewebsfibrillenbündel darstellen, auf welche die Spannung der Knochenlamellen unmittelbar übergeht. Außerdem scheint es wahrscheinlich, daß sie sämtlich in das Knochengewebe eindringen. Indessen kann man nur die stärksten derselben als *Sharpey* Fasern im Knochengewebe selbst nachweisen (Textfig. 42). Ich habe diesen Befund am rechten Scheitelbeine gezeichnet, weil hier die Verlaufsrichtung der *Sharpey* Fasern auch bei schwacher Vergrößerung leicht kenntlich ist (Textfig. 43). Die *Sharpey* Fasern liegen hier ziemlich genau in der

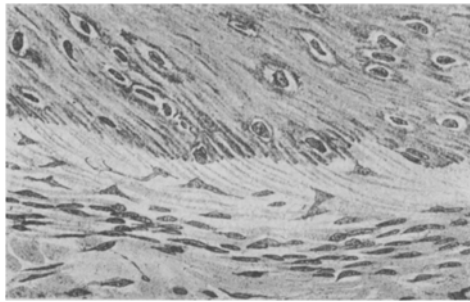


Fig. 42. Fötus F. 38. Woche. Normalmeridianschnitt des rechten Scheitelbeines nahe dem Sagittalrande. Zahlreiche *Sharpey* Fasern aus dem Knochengewebe in die Dura eindringend. Teil der Textfig. 43 bei 294 facher Vergrößerung.

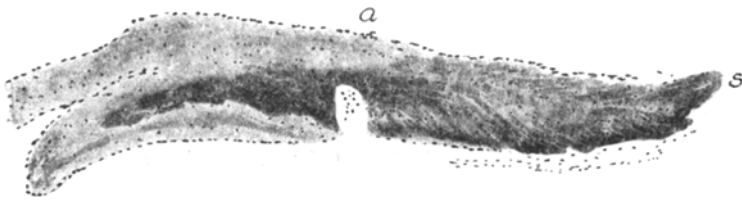


Fig. 43. Fötus F. 38. Woche. Rand des rechten Scheitelbeines, vermutlich postmortal etwas nach außen gekrümmt. Normalmeridianschnitt. *a* Außenfläche. *s* Sagittalrand. Die fächerförmige Anordnung der *Sharpey* Fasern ist durch helle Streifen angedeutet. Schnittdicke 15 μ . Vergr. 60 fach.

Normalmeridianebene und zeigen in der abgerundeten Randzone des Scheitelbeines eine fächerförmige Anordnung, die allerdings nicht überall in so übersichtlicher Weise hervortritt. Indem aber diese Fasern und Bindegewebsbündel sich unter spitzen Winkeln an den Knochenrand ansetzen, ist der Bedingung Genüge geleistet, welche es ermöglicht, daß die Materialspannungen im Knochen höher sind als im Bindegewebe. Doch können bei der gegebenen Sachlage die Materialspannungen in beiden Geweben keine sehr hohen Unterschiede mehr darbieten. In dem Knochengewebe des Scheitelbeinrandes sind sodann die *Sharpey* Fasern zuweilen weithin zu verfolgen. Gar nicht selten kommt es vor, daß die *Sharpey* Fasern, welche in den Knochenrand eingetreten sind, bei ihrem weiteren

Verlaufe in einen Markraum einstrahlen und, diesen durchsetzend, zum zweiten Male in das Knochengewebe eindringen (Textfig. 44).

Die mächtigen Sharpey'schen Fasern bilden auch in späteren Lebensperioden ein auffallendes Strukturelement der Nahtsubstanz. Letztere gewinnt somit gegen das Ende der Fötalzeit ihre spezifischen Eigenschaften und namentlich auch ihre relativ hohe Materialspannung, weil mit der allmählich zunehmenden Nahtlinienbewegung das Flächenwachstum der Schädeldachknochen eine Grenze



Fig. 44. Sharpey'sche Fasern, einen Markraum durchsetzend. Aus der Randzone des Scheitelbeines des Fötus F in der Gegend des späteren Obelion. *p, p* äußeres Periost. *k* Knochengewebe. *m* Markraum. Vergr. 138 fach.

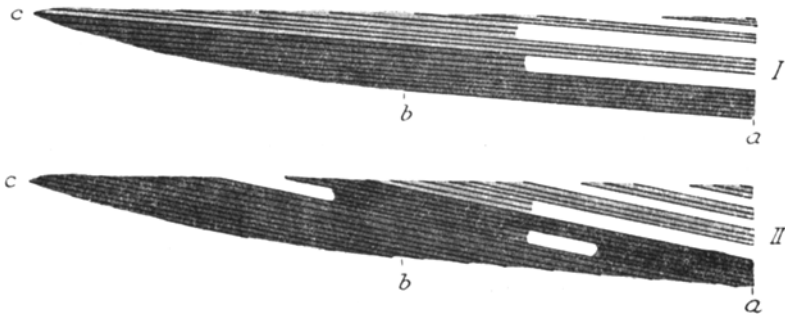


Fig. 45. Schema des Lamellenbaues am Sagittalrande des Scheitelbeines des Fötus F. 38. Woche. *c* Sagittalrand. *b* innere durale Fläche. Die Speziallamellen der Knochenkanäle sind nicht wiedergegeben.

findet, an welcher die Ränder dieser Knochen sich zunächst abrunden und stumpf werden. Untersucht man nunmehr diese Ränder etwas genauer, so bemerkt man, daß die Knochenlamellen an diesen Rändern scharf abgeschnitten endigen, wie dies in schematischer Weise auf Textfig. 45 dargestellt ist. Indessen ist die Lamellenstruktur des Knochengewebes hier sehr unvollkommen. Der ganze Knochen besteht hier noch aus einem Gewebe, welches Gegenbaur als Wurzelstock und v. Ebner als geflechtartigen Knochen bezeichnete. In den peripherischen, an Sharpey'schen Fasern reichen Zonen des Scheitelbeines und der zugekehrten Ränder des Stirn- und Hinterhauptbeines ist diese Übereinstimmung sogar eine vollkommene. Ich will dieses Gewebe als primäres

Knochengewebe bezeichnen, um es von den später zu beschreibenden sekundären und tertiären Formen zu unterscheiden.

Das primäre Knochengewebe besitzt je nach seinem Alter einen sehr ungleichen Zellreichtum und eine sehr verschiedene Färbefähigkeit, wie bereits ausführlich besprochen wurde. Seine etwas unregelmäßig verlaufenden Fibrillen sind im allgemeinen den Lamellenzügen parallel. Unter den vielen, dem Lamellenverlauf parallelen Richtungen wird jedoch, wie bereits bei Fötus A bemerkt wurde, in der Umgebung des Druckpols keine bestimmte Richtung bevorzugt. In den peripherischen Zonen wiegen dagegen die annähernd meridionalen Verlaufsrichtungen der Knochenfibrillen vor. Nur in den äußersten Randzonen der Scheitelbeine E und F ist die Verlaufsrichtung der Fibrillen vielfach in dem Grade gestört, daß die Polarisationserscheinungen unklar werden. Vielleicht hängt dies gleichfalls mit der hemmenden Wirkung der Nahtlinienbewegungen zusammen. Die jüngeren, oberflächlichen Schichten der Eburnea externa der Druckpolregion beginnen dagegen bei Fötus F stellenweise eine regelmäßige, annähernd senkrechte Überkreuzung der Fibrillen je zweier aufeinanderfolgender Lamellen zu zeigen. Damit wird der Lamellenbau im polarisierten

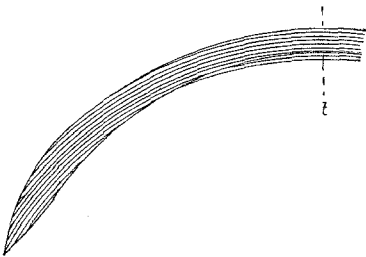


Fig. 46. Schema des Verlaufes der Knochenlamellen des Scheitelbeines in den späteren Perioden der Fötalzeit. In der Druckpolregion entsprechen die beiden tiefsten, der Dura anliegenden Lamellen der Eburnea interna. Normal-Meridianschnitt.

Lichte vollkommen deutlich, da die Lamellen jetzt abwechselnd hell und dunkel erscheinen. Dieser Befund bildet den Übergang zu der Gestaltung des sekundären und tertiären Knochengewebes, welches nach der Geburt in großer Reichlichkeit auftritt. Zugleich bemerkt man, daß die Druckpolregion, wie in andern Beziehungen, so auch in Beziehung auf den fibrillären Bau des Knochengewebes den peripherischen Zonen des Scheitelbeines zeitlich etwas vorangeht.

Die nach dem Rande hin etwas aufgerichtete Stellung der Knochenlamellen, welche in Textfigur 45 schematisch dargestellt ist, läßt sich bei Fötus E und F, wenigstens im Bereiche des äußeren Drittels der Meridianlänge, nachweisen.

Sie dürfte wohl Folge des Umstandes sein, daß in den Randzonen des Scheitelbeines jederzeit eine allerdings geringfügige Apposition von Knochengewebe an der duralen Fläche stattfand. Die Aufrichtung wird in den dem Druckpol näheren Zonen allmählich geringer, und am Druckpol verlaufen auch am Schlusse der Fötalzeit die Knochenlamellen annähernd der Oberfläche parallel (Textfig. 46). Nirgends aber findet man Lamellen, welche vom Druckpole bis zu den Rändern der Scheitelbeine reichen. Alle an die Außenfläche dieses Knochens apponierten Knochenlamellen endigen an der äußeren Oberfläche desselben, unter dem äußeren Perioste, und zwar in der Weise, daß die Lamellen, welche am Druckpole oberflächlicher liegen, in geringeren Entfernungen vom Druckpol endigen als die am Druckpole tiefer gelegenen Lamellen. Im allgemeinen bilden daher die Ränder der einzelnen Knochenlamellen an der Außenfläche des Scheitelbeines eine vom Druckpol her absteigende Treppe, deren Stufen allerdings wegen der geringen Dicke der Lamellen wenig auffällig sind. Die Osteoblasten aber erscheinen in großer Zahl ziemlich gleichmäßig über diese ganze Treppe verteilt.

Ich gelange daher zu der Anschauung, daß bei dem appositionellen Wachstume des Scheitelbeines alle einzelnen, an der Oberfläche desselben endigenden Knochen-

lamellen gleichzeitig mehr oder weniger starke Verlängerungen erfahren. Man kann diesen Vorgang als eine treppenförmige Apposition des Knochengewebes bezeichnen und durch Textfig. 47 in schematischer Weise zum Ausdruck bringen. Auf dieser Figur würde die Osteoblastenreihe *a* Knochen- substanz erzeugen, welche die Lamelle 1 verlängert, während die Osteoblastenreihe *b* in gleicher Weise eine Verlängerung der Lamelle 2 bewirken würde. Indem sich sodann dieser Vorgang in gleicher Weise auf allen Stufen der Treppe wiederholt, würde die Dicke des Knochens zunehmen, die Treppengestalt seiner Oberfläche jedoch erhalten bleiben.

Beachtet man sodann die Anordnung der Knochenlamellen an den Rändern der Scheitelbeine (Textfig. 45), so erscheint es durchaus nicht schwierig, anzunehmen, daß durch diese treppenförmige Apposition an die Außenfläche des Scheitelbeines auch seine Meridianlänge zunimmt. Es ist wenigstens durchaus nicht einzusehen, weshalb nicht auch die Knochenlamelle, welche an dem äußersten Rande des Knochens endet, eine Verlängerung erfahren solle. Ich bin auch der Meinung,

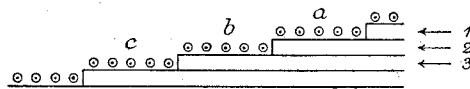


Fig. 47. Schematische Darstellung des treppenförmigen, appositionellen Randwachstums der Knochenlamellen.

daß solches wenigstens in den früheren Perioden der fötalen Entwicklung vorkommt, wenn auch in jener Zeit der lamelläre Bau der Randzone zu undeutlich ist, um eine Beweisführung zu gestatten. Wenn aber, wie dies tatsächlich der Fall ist, bei Fötus E und F am Schlusse der Fötalzeit Osteoblasten am Rande des Scheitelbeines vermißt werden oder doch sehr selten sind, so könnte dies eine einfache Folge der Nahtlinienbewegungen darstellen. Für die etwas früheren Perioden beweisen daher diese Befunde nichts gegen die Möglichkeit eines ausgiebigen appositionellen, treppenförmigen Wachstums des Randes des Scheitelbeines. Die spärlichen Osteoblasten an den Rändern der Scheitelbeine E und F sprechen vielmehr dafür, daß auch in den späteren Fötalperioden trotz der Nahtlinienbewegungen noch ein geringes appositionelles, treppenförmiges Randwachstum des Scheitelbeines stattfindet. Auch scheint dieses, wie später mitzuteilende Befunde zeigen werden, noch lange nach der Geburt in langsamem Verlaufe fortzuschreiten.

Man hat daher erstens mit der Möglichkeit zu rechnen, daß nicht nur das Dickenwachstum, sondern auch das gesamte meridionalgerichtete Flächenwachstum des Scheitelbeines durch die treppenförmige Apposition des Knochengewebes an die äußere und innere Fläche gedeckt wird. In diesem Falle wird das oben nachgewiesene obligate, interstitielle Breitenparallelwachstum genügen, um in Verbindung mit der treppenförmigen Apposition die Erklärung zu bieten für das Dickenwachstum, für das gesamte Flächenwachstum und für die Zunahme der Krümmungsradien des Scheitelbeines.

Diese Erklärung läßt indessen, wie bereits oben berührt wurde, zwei wichtige Beziehungen unerklärt. Wenn die Breitenparallelspannungen ein interstitielles Breitenparallelwachstum auslösen, würde es durchaus unverständlich bleiben, weshalb die ihrer Größe nach vorwiegenden Meridionalspannungen nicht zugleich auch ein interstitielles Wachstum in der Richtung der Meridiane erzeugen sollten. Sodann würde die rechnermäßig leicht feststellbare Größe des obligaten, interstitiellen Breitenparallelwachstums durchaus nicht genügen zu einer Erklärung des relativ starken, interstitiellen Breitenparallelwachstums, welches v. G u d d e n und E g g e r am Schädel des Kaninchens gefunden haben. Dies gilt um so mehr, weil sich die Versuche dieser Autoren auf Stellen des Kaninchenschädels beziehen, welche bereits sehr große Krümmungsradien besaßen, also während der Versuchszeit nur ein sehr geringes obligates, interstitielles Breitenparallelwachstum aufweisen konnten. Für die Zuverlässigkeit dieser Tierversuche aber spricht meines Erachtens am deutlichsten die während der Versuche eintretende Verzerrung der Gestalt der Bohrlöcher, welche allerdings die Messung der gegenseitigen Abstände der Bohrlöcher sehr erschwert, jedoch die Tatsache eines starken, zeitlich und räumlich beschränkten interstitiellen Wachstums bestätigt. Denn diese Verzerrungen scheinen mir, ganz unabhängig von allen Messungen und von den sicherlich relativ großen Messungsfehlern, die durch das beschränkte interstitielle Wachstum bewirkten Verschiebungen zwischen den einzelnen Knochenlamellen wahrscheinlich zu machen. Die von verschiedenen Forschern gegen die Lehre von dem interstitiellen Wachstum der Knochenlamellen erhobenen Bedenken habe ich bereits in meiner Mitteilung über die sagittale Synostose ausführlich widerlegt, und zwar unter Voraussetzung der objektiven Richtigkeit aller früheren, sich anscheinend direkt widersprechenden Beobachtungen und Versuche.

Ich gelange zu dem Ergebnis, daß höchst wahrscheinlicher Weise der meridional gerichtete Anteil des Flächenwachstums des Scheitelbeines und der übrigen Schädel-dachknochen nicht ausschließlich appositionell ist, sondern wenigstens zum Teil auf einem zeitlich und räumlich beschränkten interstitiellen Wachstum in der Richtung der Meridiane beruht. Wie groß jedoch der Anteil des appositionellen und derjenige des interstitiellen Wachstums an diesem Erfolge ist, läßt sich im voraus nicht mit Genauigkeit feststellen.

Behufs weiterer Prüfung dieser Frage kann man das Scheitelbein ohne Rücksicht auf den Verlauf seiner Lamellen in Schichten gleichen Appositionsalters zerlegen. Die jüngste, oberflächliche Schicht des Knochengewebes reicht dann in allen Entwicklungsperioden von dem Druckpol genau bis zu den Nahträndern des Knochens. Diese frisch apponierte Knochenschicht besitzt daher zur Zeit ihrer Apposition dieselbe Meridianlänge wie ihre Vorgängerin, welche bereits einen kleinen Teil ihres interstitiellen Wachstums durchlaufen hat. Man gelangt sodann zu einer allen Erfahrungen Genüge leistenden Anschauung der Wachstumsvorgänge, wenn man in Übereinstimmung mit den Ausführungen, welche ich bei Besprechung der sagittalen Synostose gegeben habe, annimmt, daß das interstitielle Wachstum

jeder einzelnen Knochenschicht in einer gesetzmäßigen Abhängigkeit von der Materialspannung steht. Denn in diesem Falle muß, da die Materialspannung, wie oben gezeigt wurde und wie aus der ersten Mitteilung hervorgeht, während des Wachstums in der Richtung der Meridiane und Breitenparallelen annähernd gleichgroß ist, auch das interstitielle Wachstum in diesen beiden Richtungen annähernd gleichgroß sein.

Ich beginne mit einer Betrachtung der an die Außenfläche des Scheitelbeines apponierten Knochenmassen. Wenn man diese in eine größere Anzahl von Schichten gleichen Appositionsalters zerlegt, so erhält man eine Einteilung der Knochen- substanz, welche auf Textfig. 48 in schematischer Weise dargestellt ist. Die frei unter dem äußeren Periost liegenden Enden der einzelnen, treppenförmig appo- nierten Knochenlamellen, welche in dieser Figur weiß erscheinen, würden die jüngste, frisch apponierte Knochenschicht darstellen, welche in ihrer ganzen Ausdehnung gleich- zeitig apponiert wurde. Auf diese erste Schicht folgt eine zweite, auf Textfig. 48 durch helle Schattierung ausgezeichnete



Fig. 48. Schema der Knochenschichten gleichen Appositionsalters unter Voraus- setzung einer treppenförmigen Apposition der Lamellen.

Schicht, deren Bestandteile zwar unter sich gleichaltrig sind, jedoch zeitlich vor der äußersten, ersten Schicht apponiert wurde. Die dritte Schicht gleichaltrigen Knochengewebes ist zeitlich wiederum vor der zweiten apponiert und in der Figur durch dunklere Schraffierung ausgezeichnet. In der gleichen Weise aber kann man offenbar die ganze Dicke des Knochens in Schichten gleichen Appositions- alters zerlegen. Sodann darf man annehmen, daß jede Schichte zur Zeit ihrer Apposition vom Druckpol bis zu den Rändern des Schädelsbeines reicht, jedoch erst apponiert wurde, nachdem ihre Vorgängerin durch das appositionelle und durch das zeitlich und räumlich beschränkte, interstitielle Wachstum eine Ver- längerung im Verhältnis von $1 : (1 + \alpha)$ in meridionaler Richtung erfahren habe.

Durch diese Schichteneinteilung des treppenförmig apponierten Knochen- gewebes des Scheitelbeines werden für diese Schichten die Voraussetzungen erfüllt, welche ich in meiner Mitteilung über die sagittale Synostose für einzelne Knochen- lamellen gemacht habe. Man kann daher in Übereinstimmung mit meinen da- maligen Ausführungen die Größe $(1 + \alpha)$ empirisch bestimmen durch die Gleichung

$$l(1 + \alpha)^m = L$$

In dieser Gleichung würde jetzt m die Zahl der Knochenschichten bezeichnen, welche während eines bestimmten Zeitraumes apponiert wurden, während l und L die Längen der frisch apponierten Knochenschichten am Anfange und am Schlusse dieses Zeitraumes angeben.

Alle Knochenschichten reichen zur Zeit ihrer Apposition vom Druckpol bis an die Ränder des Scheitelbeines somit auch bis zur Sutura sagittalis. Unter Voraussetzung einer annähernden geometrischen Ähnlichkeit der verschiedenen Schädel kann man daher die Länge der jüngsten, frisch apponierten Knochenschicht gleich dem als Gurtmaß gemessenen Abstände des Druckpols von der Sutura sagittalis setzen. Man erhält dann für den 135. Tag der Fötalzeit (Fötus D)

den Wert von $l = 22$ mm und für den 263. Tag (Fötus F) den Wert von $L = 43$ mm. Die Zahl der vom 135. bis zum 263. Tage apponierten Knochenschichten findet man weiterhin aus der Messung der Dicke der an der Außenfläche des Druckpols apponierten Knochensubstanz, wobei die noch leicht erkennbaren Fußpunkte der schrägen Knochenspannen älterer Bildung die Ausgangspunkte für die Messung abgeben. Diese Dicke hat in dem gegebenen Zeitraume um 0,24 mm zugenommen. Wenn man sodann die Knochendicke des Vergleiches halber, wie früher, in Schichten von 8μ Dicke zerlegt, ergeben sich 30 Schichten. Der Exponent m wird somit gleich 30.

Auf Grund dieser Messungen ergibt die Auflösung obiger Gleichung:

$$(1 + \alpha) = 1,023.$$

Das gesamte meridionale Wachstum des Scheitelbeines erklärt sich somit durch die treppenförmige Apposition an die Außenfläche desselben, wenn die einzelnen, 8μ dicken Schichten desselben jeweils durch das appositionelle und das interstitielle Wachstum in meridionaler Richtung im Verhältnis von 1 : 1,023 verlängert werden, ehe eine neue Schicht von Knochengewebe apponiert wird. Vergleicht man diese Verhältniszahl mit den früher bei Besprechung der sagittalen Synostose gefundenen, für die Röhrenknochen menschlicher Embryonen geltenden Werten, so ergibt sich bei einer Schichtendicke von 8μ :

für den 49. bis 73. Tag der Fötalzeit $(1 + \alpha) = 1,151$ (Röhrenknochen),

„ „ 73. „ 85. „ „ „ $(1 + \alpha) = 1,069$ „

„ „ 135. „ 263. „ „ „ $(1 + \alpha) = 1,023$ (Scheitelbein).

Die Übereinstimmung ist eine befriedigende, da auch andere damals namhaft gemachte Gründe dafür sprechen, daß der Wert von $(1 + \alpha)$ mit zunehmendem Lebensalter kleiner wird. Außerdem dürfte dieser Wert nach der Höhe der Materialspannungen innerhalb enger Grenzen variieren.

Vorstehende Untersuchungen haben gezeigt, daß nirgends Kontinuitätstrennungen im Gefüge des fötalen Scheitelbeines vorkommen. In diesem Falle ist das interstitielle Breitenparallelwachstum desselben immer mindestens ebenso stark als das interstitielle meridionale Wachstum, da die geometrische Ähnlichkeit der Gestalt des Schädels während des Wachstums annähernd erhalten bleibt. In Anbetracht der nach der Richtung der Meridiane und der Breitenparallelen annähernd gleichen Materialspannungen mußte indessen als wahrscheinlich angenommen werden, daß auch das interstitielle Wachstum der einzelnen Knochenschichten nach diesen beiden Richtungen gleichgroß sei. Diese Annahme ist jedoch nur annähernd zutreffend, weil mit zunehmendem Appositionsalter das interstitielle Wachstum des Knochengewebes sich verlangsamt, so daß die älteren Schichten des Scheitelbeines dem interstitiellen Wachstum der jüngeren Schichten nicht völlig zu folgen imstande sind. Da aber die Zunahme der Krümmungsradien für alle Schichten dieselbe ist, muß in den älteren Knochenschichten das interstitielle Wachstum in der Richtung der Breitenparallelen etwas überwiegen. Die Unterschiede zwischen dem interstitiellen Wachstum in den beiden Hauptrichtungen halten sich jedoch vermutlich innerhalb enger Grenzen und sind im Verhältnis zu dem gesamten interstitiellen Wachstum der einzelnen Lamellen ohne Bedeutung. Sie können auch prinzipiell keine Bedenken erregen. Die geometrische Ähnlich-

keit des Schädels trifft in den verschiedenen Entwicklungsperioden nur annäherungsweise zu, so daß man von vornherein genötigt wird anzunehmen, daß das interstitielle Wachstum in der Richtung der Meridiane und Breitenparallelen geringe Abweichungen aufweisen kann.

In dem gegebenen Falle sind jedoch die Abweichungen offenbar dadurch bedingt, daß die älteren Schichten der Schädeldachknochen, in dem Maße, als ihr interstitielles Wachstum demjenigen der jüngeren Schichten nicht mehr zu folgen vermag, durch die tangentialen Spannungen eine geringe Aufbiegung erfahren. Wenn nun im übrigen die Materialspannungen nach allen Richtungen gleichgroß sind, so wird durch diese Aufbiegung die Materialspannung der älteren Schichten in der Richtung der Breitenparallelen etwas erhöht. Diesem Ergebnisse entspricht sodann eine geringe Beschleunigung des interstitiellen Breitenparallelwachstums. Man gelangt daher auch hier zu dem Ergebnis, daß das zeitlich und räumlich beschränkte interstitielle Wachstum in strenger Abhängigkeit von der Materialspannung steht.

Ich nehme an, daß das Scheitelbein des Fötus D (135. Tag) aus einer größeren Zahl von Knochenschichten bestehe, deren Krümmungsradius nahezu gleichgroß, deren Appositionsalter verschieden sei. Wenn dann das gesamte interstitielle Wachstum einer Schicht, also der Wert $(1 + n)$, welcher oben aus den Versuchen von v. G u d d e n und E g g e r berechnet wurde und welcher bis zum 150. Tage nach der Apposition vermutlich noch bis auf 1,5 ansteigt, der Betrachtung zugrunde gelegt wird, so genügt dieses interstitielle Wachstum nicht zu einer Erklärung der Zunahme der Meridianlängen und Krümmungsradien, welche am 263. Tage der Fötalzeit bei Fötus F nachzuweisen sind. Denn in dieser Zeit ist sowohl der Krümmungsradius als die Meridianlänge im Verhältnisse von 1 : 2 größer geworden. Dagegen bietet das zeitlich und räumlich beschränkte interstitielle Wachstum der einzelnen Schichten, wie oben gezeigt wurde, eine einfache Erklärung, wenn der Faktor $(1 + \alpha)$ sowohl in der Richtung der Meridiane als in der Richtung der Breitenparallelen gleich 1,023 ist. In diesem Falle wird die äußerste, frisch apponierte Knochenschicht des fötalen Scheitelbeines F von vornherein die Verdoppelung der Krümmungsradien und Meridianlängen aufweisen, und zwar auch dann, wenn die Gestalt des Schädels beliebig weit von der Kugel-form abweicht, sich jedoch dauernd geometrisch ähnlich bleibt.

Etwas abweichende Verhältnisse bietet dagegen die Schicht, welche bei Fötus D als äußerste, frisch apponierte Schicht zu betrachten war. Jede einzelne Schicht kann sich bei ihrem interstitiellen Wachstum nur im Verhältnisse von 1 : $(1 + n)$ in allen Richtungen verlängern. Ihre Meridianlänge und ihr Krümmungsradius wird daher, wenn das interstitielle Wachstum in der Richtung der Meridiane und Breitenparallelen gleichgroß ist, nur im Verhältnisse von 1 : $(1 + n)$ größer werden. Für die Meridianlänge kann dies vorläufig als annähernd zutreffend angesehen werden. Die Meridianlänge der oberflächlichsten Schicht war bei Fötus D gleich 22 mm. Wenn dann $(1 + n) = 1,500$ ist, wird diese Schicht bei Fötus F eine Meridianlänge von $1,5 \times 22 = 33$ mm aufweisen und bei diesem Fötus 0,24 mm unter der äußeren Oberfläche des Scheitelbeines liegen. Gleichzeitig würde auch der Krümmungsradius dieser Schicht im Verhältnis von 1 : 1,5, also von 29 mm auf 43,5 mm, zugenommen haben, wenn das interstitielle Wachstum derselben nach allen Richtungen gleichgroß war.

Bei Fötus F beträgt indessen der Krümmungsradius dieser Schicht 60 mm. Diese Verlängerung ist nur möglich, wenn zwischen dem 135. Tage und dem 263. Tage der Fötalzeit das interstitielle Breitenparallelwachstum dieser Schicht um ein geringes größer war als das interstitielle Meridionalwachstum. Der Rand dieser Schicht müßte ein Breitenparallelwachstum im Verhältnisse von 1 : 1,572 durchlaufen haben, wenn ihr Meridionalwachstum im Verhältnisse von

1 : 1,500 sich vollzog. Der Unterschied beider Größen würde indessen für alle dem Druckpol näher liegenden Zonen dieser Schichte geringer sein, und am Druckpol selbst wäre das interstitielle Wachstum nach allen Richtungen hin gleichgroß, und zwar gleich 1,500, gewesen. Ähnlich verhält es sich mit allen übrigen Schichten, welche an die Außenfläche des Scheitelbeines apponiert werden. Die äußerste, frisch apponierte Schicht des Schädels F aber muß bei ihrem späteren Wachstum unter die gleichen Bedingungen geraten, wenn auch die Unterschiede für die später apponierten Schichten geringer ausfallen.

Zugleich erkennt man die Bedeutung der an die Innenfläche der Randzonen des Scheitelbeines apponierten Schichten. Sie bewirken, daß die Randzonen des Scheitelbeines jederzeit eine gewisse Mächtigkeit bewahren. Ohne sie würde die Apposition an der Außenfläche in Verbindung mit dem interstitiellen Wachstum außerordentlich dünn auslaufende Knochenränder erzeugen, wie dies in meinem Aufsätze über die sagittale Synostose erläutert ist. Außerdem hat die Apposition an der Innenfläche der Randzonen die in Textfig. 46 schematisch dargestellte Aufrichtung der Knochenlamellen des Scheitelbeines zur Folge.

Schließlich kann es sich noch um die Frage handeln, ob der gefundene Wert $(1 + \alpha) = 1,023$ mit den räumlichen und zeitlichen Verhältnissen des interstitiellen Wachstums, wie sie aus den Versuchen von v. Gudden und Egger hervorgehen, in Übereinstimmung steht. Dieser Wert beruht auf der Annahme, daß zwischen dem 135. und 163. Tage der Fötalzeit 30 Knochenschichten von 8 μ Dicke an die Außenfläche des Scheitelbeines apponiert wurden. Demgemäß ist zwischen der Apposition je zweier aufeinanderfolgender Schichten durchschnittlich ein Zeitraum von 4 Tagen und 6 Stunden verflossen, und während dieses Zeitraumes erfuhr jede frisch apponierte Schicht durch appositionelles und interstitielles Wachstum eine Verlängerung von 1 : 1,023. Das ist beträchtlich weniger, als nach den oben genannten Beobachtungen von v. Gudden und Egger zu erwarten gewesen wäre. Denn aus diesen konnte ich für das Ende des 4. Tages ein interstitielles Wachstum im Verhältnis von 1 : 1,065 berechnen. Indessen ist es gegenwärtig nicht zu entscheiden, ob diese mangelhafte Übereinstimmung Folge ist von Verschiedenheiten in dem Verhalten der Knochen des Menschen und des Kaninchens oder von den verhältnismäßig großen Bestimmungsfehlern. Wenn meine Untersuchungen erschwert und ungenau gemacht wurden durch den Mangel alkohol-injizierter und wegen solcher Injektion wenig deformierter Schädel, leiden die Versuche von v. Gudden und Egger an den Unvollkommenheiten der mit unbewaffnetem Auge vorgenommenen Messungen und an manchen andern schwer zu beseitigenden Unvollkommenheiten, die vielleicht durch eine sachgemäße mikroskopische Untersuchung der Bohrlöcher beseitigt werden könnten.

Bei dieser Sachlage muß man sich vorläufig begnügen mit der Feststellung, daß die soeben berechneten Werte für das viertägige Wachstum des Knochengewebes derselben Größenordnung angehören wie die aus den Beobachtungen von v. Gudden und Egger sich ergebenden Werte. Diese Berechnung beruht auf der Annahme eines in meridionaler und in breitenparalleler Richtung annähernd gleichgroßen interstitiellen Wachstums der einzelnen Knochenschichten. Es ist dies eine Annahme, welche von vornherein sehr naheliegt, weil sie in Übereinstimmung steht mit dem anatomischen Baue des Scheitelbeines,

welcher auf eine nach allen tangentialen Richtungen gleichgroße, d. h. den kritischen Wert um den gleichen Betrag übersteigende Materialspannung hinweist. Die Erhöhung der Materialspannung erscheint dann als Ursache des nach allen tangentialen Richtungen annähernd gleichen interstitiellen Wachstums der einzelnen Knochenschichten. Außerdem kann diese Annahme begründet werden durch einige Beobachtungen von v. G u d d e n, aus denen mit Bestimmtheit ein interstitielles Meridionalwachstum der Knochenschichten hervorgeht, welches derselben Größenordnung angehört wie das interstitielle Breitenparallelwachstum, jedoch um ein geringes kleiner ist als letzteres. Auch die letztgenannte Besonderheit stimmt vollständig mit obigen Ausführungen überein. Obige Ausführungen bestätigen daher das bereits von v. G u d d e n und E g g e r in seinen allgemeinen Umrissen erkannte interstitielle Wachstum des Knochengewebes, welches ich — bei Besprechung der sagittalen Synostose — verständlich gemacht habe, indem ich es auf die einzelnen Knochenschichten bezog und in seiner Abhängigkeit von der Zeit sowohl numerisch als analytisch darstellte. Auch aus der fötalen Entwicklung des Scheitelbeines geht nach obigen Ausführungen hervor, daß dieses interstitielle Wachstum zeitlich und räumlich beschränkt ist und sich in jeder Knochenschicht in den ersten Wochen nach der Apposition sehr rasch vollzieht, um nach der vierten bis fünften Woche langsamer zu werden und nach einem etwas längeren Zeitraume seinen endgültigen Abschluß zu finden.

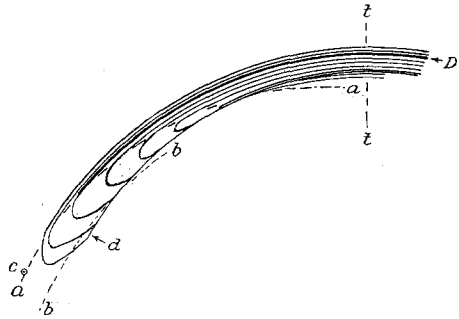


Fig. 49. Schema des Scheitelbeines des Fötus F (263. Tag) mit den Schichten gleichen Appositionsalters. Am Druckpol *tt* entsprechen die zwei tiefsten, an die Dura grenzenden Schichten der Eburnea interna. Normalmeridianschnitt.

Eine Vorstellung über die Gesamtheit der im fötalen Scheitelbeine sich vollziehenden Wachstumsvorgänge kann die schematische Textfig. 49 bieten. Sie berücksichtigt nicht den Lamellenverlauf, welcher auf Textfig. 46 schematisch dargestellt ist, sondern gibt für das Scheitelbein des Fötus F (263. Tag) schematisch die Schichten gleichen Appositionsalters. Dabei wurde hier wie auf Textfig. 46 der Deutlichkeit halber die Dicke des Scheitelbeines verhältnismäßig viel zu groß gezeichnet, wodurch zugleich beide Figuren vergleichbar wurden. Die durch etwas kräftigere Strichführung hervorgehobene Schicht *D* auf Textfig. 49 entspricht der äußersten Schicht des Scheitelbeines des Fötus *D* (135. Tag). Sie hat indessen jetzt ihr interstitielles Wachstum nahezu vollständig durchlaufen, wobei ihre Länge im Verhältnis von 1 : 1,5 größer geworden ist. Die Reihe der auf die Außenfläche des Scheitelbeines in den verschiedenen Tagen der Fötalzeit apponierten Knochenschichten ist durch die gestrichelte Linie *aa* abgegrenzt. Man bemerkt, daß diese Schichten im Laufe der Zeit in ähnlicher Weise länger geworden sind, wie ich dies

bei Besprechung der sagittalen Synostose ausführlicher dargestellt habe. An der Innenfläche des Scheitelbeines aber weisen diese Schichten einen Defekt auf, welcher zum Teil durch die Schichten der Eburnea interna wieder ausgefüllt ist. Der Defekt wurde durch die lakunären Resorptionen an der Innenfläche des Scheitelbeines bewirkt. Er reicht vom Druckpol bis an die Stelle *d*, greift somit auch auf die Knochenmassen über, welche zwischen der gestrichelten Linie *aa* und der Innenfläche des Scheitelbeines liegen. Hätte keine Resorption stattgefunden, so müßten die der Außenfläche parallelen Schichten in der Druckpolregion noch etwas über die gegenwärtige Innenfläche des Schädeldaches hervortreten und den freien Raum zwischen den Linien *aa* und *tt* ausfüllen. Der Deutlichkeit halber wurde allerdings die Linie *aa* so gelegt, daß dieser Raum etwas zu groß wurde. Der Nahtrand der an die Außenfläche des Schädeldaches apponierten Schichten würde bis zu dem Punkte *c* reichen, wenn das meridionale Wachstum des Scheitelbeinrandes nicht durch die Nahtlinienbewegungen etwas beschränkt worden wäre.

Wenn man die an die Außenfläche des Scheitelbeines apponierten Knochen-schichten als das Ergebnis eines von den tangentialen Materialspannungen erzeugten Dickenwachstums betrachtet, so erscheinen die zwischen der gestrichelten Linie *aa* und der Innenfläche liegenden Knochenmassen als das Ergebnis eines von denselben tangentialen Materialspannungen veranlaßten Längenwachstums. Setzt man eine annähernde geometrische Ähnlichkeit des Scheitelbeines in den verschiedenen Fötalperioden voraus, so muß dieses Längenwachstum im Verhältnis zum Dickenwachstum um ebensoviel ergiebiger sein, als die meridiene Länge des Scheitelbeines im Verhältnis zu seiner Dicke mißt. Die Kurven gleichen Appositions-altern dürften daher annähernd den in Textfig. 49 gezeichneten Verlauf nehmen. Von diesen Knochenmassen waren jedoch die zwischen der gestrichelten Linie *bb* und der Schädelinnenfläche enthaltenen Knochenteile an die Innenfläche des Scheitelbeines apponiert worden. Auch sie haben, wie aus der Zeichnung hervorgeht, durch die Resorptionsvorgänge eine kleine Einbuße erfahren. Die zwischen den gestrichelten Linien *aa* und *bb* enthaltenen Knochenmassen wurden dagegen, wie ein Vergleich mit Textfig. 46 ergibt, erzeugt durch ein Fortschreiten der treppenförmigen Apposition der Knochenlamellen, welche der Außenfläche des Schädeldaches annähernd parallel verlaufen. Alle zwischen der Linie *aa* und der Schädelinnenfläche liegenden Schichten haben jedoch an dem interstitiellen Wachstum teilgenommen, und zwar annähernd in gleichem Maße und in den gleichen Richtungen wie die zwischen der Linie *aa* und der Schädelaußenfläche liegenden Schichten. Diese Richtungen entsprechen den Meridianen und den Breitenparallelen, weil auch die Materialspannungen, welche das interstitielle Wachstum hervorrufen, die Richtung der Meridiane und Breitenparallelen besitzen. Da indessen eine dieser Richtungen, die meridiene, annähernd senkrecht auf den Schichtflächen¹⁾ steht, ist es nicht möglich, die oben gegebene Gleichung hier zu einer Bestimmung des interstitiellen Wachstums zu verwenden.

¹⁾ Schichtflächen, zu unterscheiden von Lamellenflächen.

Ein Blick auf die Textfig. 49 zeigt endlich, daß die Knochenschichten, aus denen die peripherischen Zonen des Scheitelbeines gebildet werden, aus Knochengewebe bestehen, welches in relativ frühen Stadien seines interstitiellen Wachstums begriffen ist. Bei der Abhängigkeit, in welcher die Zunahme der Krümmungsradien von dem interstitiellen Wachstum des Knochengewebes steht, kann es daher nicht auffallen, wenn diese Krümmungsradien in den peripherischen Zonen etwas rascher zunehmen als in der Druckpolregion. Dieses Verhältnis konnte in allen Stadien der fötalen Entwicklung nachgewiesen werden. Jederzeit bestand, wie auch aus Textfig. 49 zu entnehmen ist, die Druckpolregion und ihre Umgebung aus relativ älteren Knochenmassen. Die Folge ist, daß während der Fötalperiode die Gestalt des Scheitelbeines etwas von der Gestalt einer Kugelschale abweicht. An dem Druckpol werden die Krümmungsradien in den späteren Perioden der fötalen Entwicklung etwas kleiner gefunden als in den Randzonen des Scheitelbeines. Sein Normalmeridionalschnitt wird bei genauerer Betrachtung nicht von Kreisbogen begrenzt, sondern von Kurven, welche Parabeln ähnlich erscheinen. Demgemäß tritt in der Regel gegen das Ende der Fötalperiode hin die Druckpolregion des Scheitelbeines als *Tuber parietale* hervor. Wo dies aber der Fall ist, bedingen die kleineren Krümmungsradien an der Druckpolregion — wie aus dem Inhalte der ersten Mitteilung hervorgeht — eine geringere Knochendicke, während diese in den mehr peripherischen Zonen des Scheitelbeines allmählich zunimmt.

Bei dieser Auffassung erscheint das gesamte Längen- und Dickenwachstum des Scheitelbeines und der übrigen Knochen des Schädeldaches abhängig von den in der Richtung der Meridiane und der Breitenparallelen wirkenden Zugspannungen, welche von dem Drucke des Schädelinhaltes erzeugt und durch die Biegungsspannungen stellenweise erhöht, stellenweise erniedrigt werden. Diese Zugspannungen bestimmen die Appositionsvorgänge und das interstitielle Wachstum der frisch apponierten Knochenschichten. Die Untersuchung der Einzelheiten aber führt zu dem Ergebnis, daß das interstitielle Wachstum ebenso wie die Materialspannungen in jeder einzelnen Schicht des Scheitelbeines in der Richtung der Meridiane und Breitenparallelen wahrscheinlicher Weise annähernd gleichgroß ist.

Als Maß für das Wachstum werde dabei die Größe $(1 + \alpha)$ benutzt. Sie ermöglicht einen bestimmten Ausdruck für den Erfolg des appositionellen und des zeitlich und räumlich beschränkten interstitiellen Wachstums der frisch apponierten Knochenschichten. Dieser Erfolg wird offenbar im wesentlichen bestimmt durch die besonderen Eigenschaften des Knochengewebes. Letztere scheinen indessen mit dem Lebensalter und mit dem Grade der Belastung Änderungen innerhalb engerer Grenzen zu erfahren, welche in Änderungen der Größe $(1 + \alpha)$ zum Ausdruck gelangen.

Das nach den Richtungen der Meridiane und Breitenparallelen annähernd gleichgroße, interstitielle Wachstum der frisch apponierten Knochenschichten erklärt nicht nur die Zunahme der Krümmungsradien der Schädeldachknochen, sondern auch alle übrigen einschlägigen Beobachtungen und Versuche in so vollständiger Weise, daß die hier vertretenen Auffassungen als wohlbegründete erscheinen. Sie kommen offenbar der Wahrheit sehr nahe und dürfen daher augenblick-

lich als berechtigt anerkannt werden. Ihre Bestätigung aber müssen sie auf dem pathologischen Gebiete finden. Denn dieses ist imstande, Beobachtungen zu liefern, welche willkürlich herbeigeführten Versuchen gleichwertig sind. Eine Synostose der Pfeilnaht des Fötus D (135. Tag) würde beispielsweise die Zunahme des gegenseitigen Abstandes der beiden Scheitelbeinhöcker nicht augenblicklich unterbrechen, sondern zunächst nur verzögern, bis die frisch apponierte Knochen-schicht des Schädels D ihr gesamtes interstitielles Wachstum durchlaufen hat.

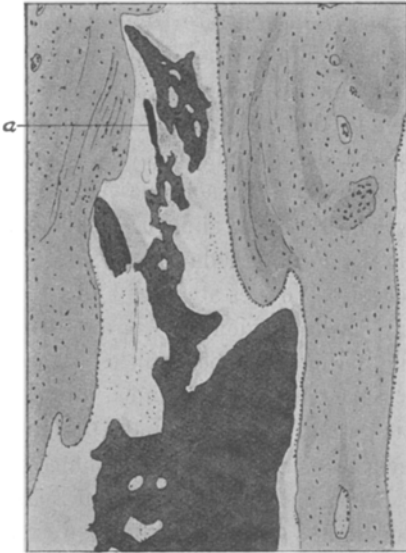


Fig. 50.

Fig. 50. Fötus F. 38. Woche. Tangentialschnitt des Scheitelbeines, etwas schematisiert, indem die Lichtung der Blutgefäße dunkel schattiert und die Zellen und Fasern des Knochenmarkes zumeist weggelassen wurden. *a* kleine Arterie, übergehend in einen Venenplexus. Knochen-spangen hellgrau. Der Druckpol liegt sehr nahe an dem oberen Rande des Bildes. Schnittdicke 15 μ . Vergr. 50 fach.

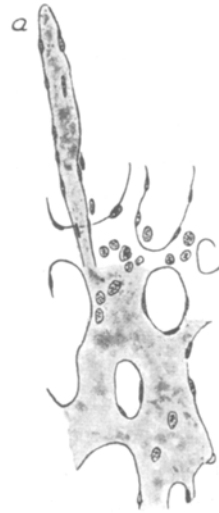


Fig. 51.

Fig. 51. Die auf Textfig. 50 gezeichnete Arterie *a* und ihre Einmündung in den Venenplexus. Die Gefäßlichtungen sind mit Blut gefüllt, welches postmortal etwas verändert ist. Vergr. 200 fach.

Die meridionalen Abstände der Druckpole der beiden Scheitelbeine von der Pfeilnaht würden dabei noch von 22 mm auf annähernd 33 mm zunehmen. Sowie jedoch dieses Ergebnis erreicht ist, muß der gegenseitige Abstand der beiden Scheitelhöcker fernerhin konstant bleiben. Das pathologische Gebiet wird indessen zweckmäßigerweise erst betreten, nachdem das normale Schädelwachstum auch der postfötalen Periode klargelegt ist. Außerdem habe ich noch in Kürze des Inhaltes der Spongiosaräume des Schädeldaches zu gedenken.

Die Entwicklung der Spongiosaräume in dem fötalen Scheitelbeine ließ sich darauf zurückführen, daß die kritische Materials Spannung des Knochengewebes allen Erfahrungen zufolge erheblich höher ist als die kritische Materials Spannung

des Bindegewebes. Statt des Knochengewebes findet man in den Spongiosaräumen zunächst ein indifferentes Schleimgewebe. Dieses ist ebenso wie die von ihm umschlossenen Blutgefäße frei sowohl von den mechanischen Spannungen des Knochengewebes als von äußeren Druckwirkungen und bietet daher sehr günstige Bedingungen für die Regeneration der Blutzellen. So wenigstens kann man es sich erklären, wenn gegen Schluß der Fötalzeit das Schleimgewebe der Spongiosaräume durch Knochenmark ersetzt wird. Da aber die Wand der Kapillaren und Venen in erheblichem Maße bei der Regeneration des Blutes beteiligt ist, erscheint es durchaus verständlich, daß auch die Wachstumskonstanten dieser Gefäße Änderungen erfahren, welche sich durch Änderungen der Gestalt der Blutbahn geltend machen.

Bereits bei Besprechung des Fötus A konnten einige einschlägige Erfahrungen gemacht werden. Bei Fötus F stellten sich die Venen des Knochenmarkes des Scheitelbeines als zartwandige Gefäße dar, deren Kaliber sehr große Unterschiede darbot. Stellenweise sind die Venen so weit, daß sie die Lichtung der Spongiosaräume nahezu völlig ausfüllen. Andere Venen sind enger, und an den kleinen Venen tritt an einzelnen Stellen deutlich eine plexiforme Anordnung hervor (Textfigur 50). Die Arterien erscheinen als zylindrische Röhren, deren Wandungen eine verhältnismäßig kleine Zahl glatter, zirkulärer Muskelfasern enthalten. An den terminalen Arterienzweigen sind letztere sogar nur vereinzelt nachweisbar. Wiederholt konnte ich sodann einen direkten Übergang der kleinsten Arterienzweige in relativ enge Venen wahrnehmen. Indessen ergaben sich nur an der in Textfig. 50 und 51 gezeichneten Stelle durchaus übersichtliche Befunde. Hier mündete ein kleiner Arterienzweig unmittelbar in eine kleine Vene, welche sich weiterhin in eine größere Vene fortsetzte. Auch die Textfig. 51 ist noch etwas schematisch gehalten, weil eine vollkommen naturgetreue Zeichnung nur bei sehr viel stärkerer Vergrößerung eine hinreichende Deutlichkeit gewährt hätte. Der gesamte Befund jedoch erinnert in auffälliger Weise an die von N. Sokoloff¹⁾, Kalenkiewicz²⁾, S. Golz³⁾ und mir⁴⁾ beschriebenen Verbindungen und Anordnungen der Arterien und Venen der Milz, welches Organ ebenso wie das Knochenmark besonderen mechanischen Beanspruchungen nicht unterliegt und infolge des von den angrenzenden lufthaltigen Organen gewährten Schutzes äußeren Druckwirkungen nur in sehr geringem Grade zugänglich ist.

1) N. Sokoloff, Virch. Arch. Bd. 112, 1888.

2) Kalenkiewicz, Das Ödem der Milzpulpa. Diss. Dorpat, 1892.

3) S. Golz, Unters. über die Blutgefäße der Milz. Diss. Dorpat, 1893.

4) R. Thoma, Arch. f. Anat. 1899.