



...going one step further



V2050

(1001208, 4006549)

Bones belong to the hard substances of the organism. But bony tissue is not rigid. Owing to the great amount of living protoplasm (bone cells) and to its narrow connection with the vascular system it is able to adapt to changed strains by reconstruction processes which do not stop even in adults.

Tasks

1. Bones serve the body as a support and a protection of the inner organs
2. Joints in connection with the muscles permit motion
3. The bone participates in the mineral system of the body (calcium and phosphate)
4. The red bone-marrow is an important organ of hematopoiesis

Fig. A shows the thigh-bone (femur) as the example of a long tubular bone.

The upper of Fig. A represents a saw cut through head, neck, diaphysis and greater trochanter. Outside lies the periosteum which in the region of the head enters the hyaline articular cartilage. Below the periosteum follows a thick cortical layer of the bone (compact) which is thin in the region of head and neck, but increases in thickness towards the diaphysis. The compact substance contains arterial and venous with oxygen, nutrients and constructive substances.

The upper diaphysis region, neck and head are inwardly filled with a cancellous substance. In the upper part of the diaphysis it comes off the compact substance seeming to be foliated. In the spongy substance of the femur head a concentrated bony strip is to be seen as a sign of the synchondrosis (epiphyseal disk), important to the growth in length during the development. The spongy substance disappears in the diaphysis except for a few ledges attached to the compact. In that way develops the medullary cavity filled with bone marrow. The red hematogenic bone-marrow (neglected in the chart) fills out the meshes in the spongy substance and the marrow cavities. In the adult it is transformed in the diaphysis into yellow bone-marrow (fat marrow). But in certain bones (e.g. cranium, breastbone, wrist and tarsus bones) the red bone-marrow is retained. In an increasing call for blood-cells the fat marrow can retransform into hematogenic bone-marrow.

The middle part of Fig. A explains the innervation and blood supply of the periosteum and the bone. Arterial vessels from the surroundings enter the periosteum, ramify to a vascular network and finally penetrate the cortical substance by canals. The veins take the same way, but in an inverse sense. Besides, each bone still has 2 larger vessels which are destined to supply bone marrow (nutrient artery and vein). Beside the catabolites, the vein forwards also newly formed blood-cells. The thin nerves form plexi in the periosteum (very sensible to pain).

The lower part of Fig. A shows the turned-down periosteum attached to the bone by means of the perforating fibres of Sharpey. The collagenous fibres of the connective tissue penetrate from the periosteum into the cortical substance and ensure a firm attachment to the bone, an important fact for the alimentation of the bone. Moreover the collagenous fibres of the tendons of here inserted muscles fix fan-like in the periosteum which ensure an exact function by means of the perforating fibres of Sharpey. The efferent and the deferent vessels of the bone enter or leave by apertures in the bone surface.

Fig. B gives an idea of the functional architecture of the spongy substance. The body weight which acts on the head of the femur, and the muscles which draw upwards at the greater trochanter, or inwards, at the diaphysis, submit particularly the neck of the femur and the diaphysis to a bending strain. Bending strains are greatest at the edges of a loaded body. The cortical substance of the neck and, in particular, of the diaphysis is more strongly developed. The cortical substance of the inside of the femur receives compressive strains, the outside tensile stresses. The lamellae of the spongy substance are adjusted in the sense of the greatest tensile or compressive strains. Lines of the greatest strains are called trajectories. The spongy substance has a trajectory structure. The great trajectory system which extends from the lateral cortical substance to the lower part of the head, is suitable to intercept tensile stresses, whereas the 2 lines of spongy substance reaching up to the greater trochanter and the head of the femur are compressive trajectories.

Structure of the Bone

English

Tensile and compressive trajectories are mutually rectangular. In the centre of the neck of the femur the spongy substance is mostly reduced or spared. In this region the shearing strains which are always greatest in the middle of a loaded body reach their maximum. The absence of bony material at this place reduces the dangerous shearing strains. At those places where the spongy substance enters the cortical substance, its functional architecture is continued by the flow of the osteons.

Fig. C gives an idea of the minute structure of the bone. On the right side of the figure the periosteum is detached from the surface of the bone.

The connective-tissue periosteum consists of 2 layers: an outer layer rich in fibres, and an inner layer rich in cells. In the embryo the latter takes over the growth in thickness of the bone (perichondrial ossification) by depositing bony substance on the cartilaginously preformed part of the skeleton.

The capacity of the periosteum to form bones is generally not exhausted until old age. The healing of a fracture is operated by reuniting both ends to a new periosteal osteogenesis. Beside the bone cells (osteocytes) organic and inorganic substances take part in the synthesis of the bony tissue. The inorganic substances (in particular $(Ca_3(PO_4)_2)$ and $CaCO_3$) appear in form of hydroxylapatite crystals.

The cortical substance shows lamellar structure which consists of an organic cement substance with tight connective tissue fibres (collagenous fibrils). By the integration of inorganic material the bone gets its hardness. Between the lamellae are situated the osteocytes. The greater part of the lamellae is concentrically arranged in groups of 5 to 12 round the arterial or venous vessels called Haversian vessels or special lamellae. Within the lamella the collagenous fibrils are arranged in parallel and helically enrobe the Haversian canal. The tight collagenous fibrils of the adjoining lamellae, however, cross them. In that way lamellae with right turns of their collagenous fibrils alternate with those with left turns. The connection of the adjoining lamellae is effected by bundles of fibrils falling out of line.

The Haversian canal and the surrounding lamellar systems form an osteon. It can reach the length of several centimeters, generally runs parallel to the longitudinal axis of the bone and constitutes the functional unity of the cortical substance. Occurring tensile and compressive strains are intercepted by the diverse windings of the collagenous fibrils. Between the osteons are lamellar systems without relations to blood-vessels (interstitial lamellae).

In the boundary of the cortical substance lamellae with parallel surface are arranged outer and inner bone lamellae, which also have no characteristic relation to the vessels. The inner bone lamellae pass over into lamellae of the spongy substance. At the top of figure 3 outer bone lamellae are separately represented showing the crossed flow of the collagenous fibrils.

The spongy substance has no osteons. It is composed of parallel lamellae.

The arterial vessels of the bone come from the periosteum and penetrate the outer bone lamellae in the Volkmann's canaliculi which do not dispose of concentric lamellar system. The Volkmann's vessels break through the osteons and feed the Haversian vessels. Some vascular branches penetrate through the inner bone lamellae to the bone marrow.

Fig. D represents a section of the compact substance stained in the microscopic picture with hematoxylin-eosin (HE).

At the top of the section the connective-tissue periosteum covers the bony tissue. Visible are the connective-tissue cells and the collagenous fibres.

Adjoining are the outer bone lamellae and the zone of the osteons. In the centre of an osteon are the Haversian vessels (1 artery and 1 or 2 veins).

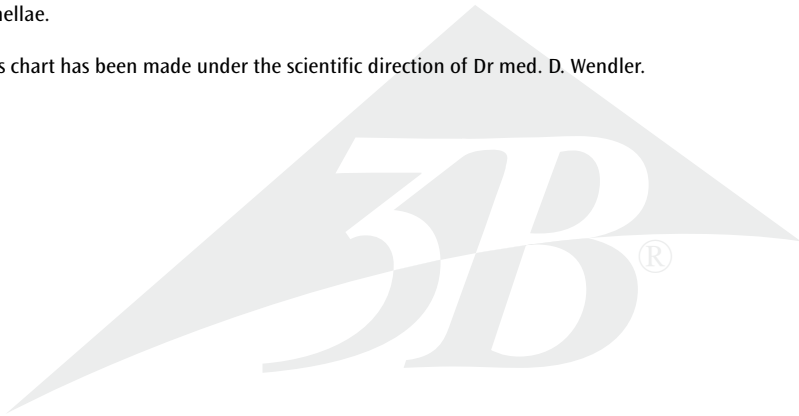
Structure of the Bone

The special lamellae with interspersed osteocytes are arranged around the vessels. Each osteon is bounded on the outside (like other groups of lamellae) by a cement line of organic substance free from fibrils (blue lines). They are boundary lines of the rhythmical osteogenesis. The individual osteons are connected by interstitial lamellae. In an HE section the flow of the collagenous fibrils within the lamellae cannot be discerned. It becomes visible only when looking at the section in polarized light.

Fig. E diagrammatically represents osteocytes in different cuts. An osteocyte is an oval cell with a longitudinal diameter of 30 μm . 1 mm^2 of bony substance holds 700 to 800 cells. From each all start numerous ramified processes which unite with those of the neighbouring cells. By means of these protoplasmic processes foodstuffs are forwarded from the blood (Haversian vessels) to the periphery of the osteon. The embedding of calcium salts in the fundamental substance renders an alimentation by diffusion impossible.

The fundamental substance placed between the lines of osteocytes (here ochrestained) corresponds to the lamellae.

This chart has been made under the scientific direction of Dr med. D. Wendler.



Bau des Knochens

Deutsch

Knochen gehören zu den Hartsubstanzen des Organismus. Knochengewebe ist aber nicht starr. Es kann sich dank der großen Menge lebenden Protoplasmas (Knochenzellen) und seinem engen Anschluß an das Gefäßsystem durch Umbauvorgänge, die auch beim Erwachsenen nicht ruhen, veränderten Beanspruchungen anpassen.

Aufgaben

1. Knochen dienen dem Körper als Stütze und zum Schutz innerer Organe
2. Gelenke ermöglichen in Verbindung mit der Muskulatur die Bewegungen
3. Der Knochen erfüllt Aufgaben im Mineralhaushalt (Kalzium- und Phosphatstoffwechsel)
4. Das rote Knochenmark ist ein wichtiges Blutbildungsorgan

Abb. A zeigt als Beispiel eines langen Röhrenknochens den Oberschenkelknochen (Femur).

Der obere Teil der Abb. A stellt einen Sägeschnitt durch Kopf, Hals, Schaft und großen Rollhügel (Trochanter major) dar. Außen liegt die Knochenhaut (Periost), die im Bereich des Kopfes in den hyalinen Gelenknorpel einstrahlt. Unter der Knochenhaut folgt eine dichte Rindenschicht des Knochens (Kompakta), die im Kopf- und Halsbereich dünn ist, im Bereich des Schafts aber an Stärke zunimmt. Die Kompakta enthält arterielle und venöse Gefäße, die halswärts spärlicher werden. Das arterielle Blut führt dem Knochen Sauerstoff, Nähr- und Aufbaustoffe zu. Die Venen leiten sauerstoffarmes, kohlendioxidreiches, mit Abbauprodukten und Mineralsalzen beladenes Blut aus dem Knochen ab. Oberer Schaftbereich, Hals und Kopf sind im Inneren ausgefüllt von einer schwammigen aufgelockerten Knochensubstanz (Spongiosa). Sie geht im oberen Teil des Schaftes aus der Kompakta hervor, so daß es den Eindruck erweckt, als ob diese sich aufblättert. Dort wo die Spongiosa des Oberschenkelkopfes sieht man einen verdichteten knöchernen Streifen als Ausdruck der für das Längenwachstum während der Entwicklung wichtigen Knorpelfuge (Epiphysenscheibe). Die Spongiosa verschwindet im Schaft bis auf wenige, der Kompakta anhaftende Leisten. Dadurch entsteht die mit Knochenmark erfüllte Markhöhle. Das rote, blutbildende Knochenmark (auf der Tafel vernachlässigt) füllt die Maschen der Spongiosa und die Markhöhlen aus. Beim Erwachsenen ist es in den Schäften in gelbes Knochenmark (Fettmark) umgewandelt. Jedoch in bestimmten Knochen (z. B. Schädeldach, Brustbein, Hand- und Fußwurzelknochen) ist das rote Knochenmark erhalten. Bei erhöhtem Blutzellbedarf kann sich das Fettmark wieder in blutbildendes Knochenmark umgestalten.

Der mittlere Teil der Abb. A erklärt die Innervation und Blutversorgung des Periostes und Knochens. Aus der Umgebung treten arterielle Gefäße in das Periost ein, verzweigen sich zu einem Gefäßnetz und durchdringen schließlich in Kanälen die Corticalis. Den gleichen Weg, nur rückläufig, nehmen die Venen. Daneben besitzt jeder Knochen noch 2 stärkere Gefäße, von denen Äste für die Versorgung des Knochenmarkes ausgehen. Die Vene transportiert neben den Stoffwechselprodukten auch neugebildete Blutzellen. Die dünnen Nerven bilden Geflechte im Periost (sehr schmerzempfindlich).

Der untere Teil der Abb. A zeigt das abgekappte Periost, das Hilfe sogenannter Sharpeyscher Fasern am Knochen befestigt ist. Die straffen (kollagenen) Bindegewebsfasern strahlen aus dem Periost in die Corticalis ein und gewährleisten ein festes Haften auf dem Knochen, was für die Ernährung des Knochens wichtig ist. Außerdem befestigen sich die kollagenen Fasern der Sehnen hier angreifender Muskulatur fächerförmig in der Knochenhaut, die mit Hilfe ihrer Sharpeyschen Fasern eine exakte Funktion gewährleistet. Die zu- und abführenden Gefäße des Knochens treten durch Öffnungen der Knochenoberfläche ein bzw. aus.

Abb. B vermittelt einen Einblick in die funktionelle Architektur der Spongiosa. Durch das auf den Schenkelkopf wirkende Körpergewicht und die Muskulatur, die am großen Rollhügel nach oben bzw. am Schaft nach innen zieht, werden besonders Schenkelhals und Schaft auf Biegung beansprucht. Biegespannungen sind an den Rändern eines belasteten Körpers am größten. Deshalb ist die Corticalis des Halses und besonders des Schaftes stärker ausgebildet. Die Corticalis der Innenseite des Femur nimmt Druck-, die Außenseite Zugspannungen auf. Die Spongiosalamellen sind in Richtung der größten Zug- bzw.

Druckspannung orientiert. Linien der größten Spannungen nennt man Trajektorien. Die Spongiosa zeigt trajektorien Bau. Das große Trajektoriensystem, das sich von der seitlichen Corticalis bis in den unteren Teil des Kopfes erstreckt, ist zum Abfangen von Zugspannungen geeignet, während die beiden zum großen Rollhügel und Schenkelkopf aufstrebenden Spongiosazüge Drucktrajektorien darstellen. Zug- und Drucktrajektorien stehen senkrecht aufeinander. Im Zentrum des Schenkelhalses ist meist die Spongiosa verdünnt bzw. ausgespart. In diesem Bereich erreichen die Schubspannungen, die stets im Zentrum eines belasteten Körpers am größten sind, ein Maximum. Durch das Fehlen des Knochenmaterials an dieser Stelle werden die gefährlichen Schubspannungen gemindert. Wo die Spongiosa in die Corticalis einstrahlt, wird ihre funktionelle Architektur durch den Verlauf der Osteone fortgesetzt.

Abb. C gibt einen Einblick in den Feinbau des Knochens. Rechts auf der Abbildung ist das Periost von der Knochenoberfläche abgehoben. Das bindegewebige Periost besteht aus 2 Schichten: einer äußeren faserreichen und einer inneren zellreichen. Letztere übernimmt beim Embryo durch Ablagerung von Knochensubstanz auf das knorpelig vorgebildete Skelettstück das Dickenwachstum des Knochens (perichondrale Verknöcherung). Die Fähigkeit des Periostes, Knochen zu bilden, erschöpft sich meist erst im hohen Alter. Die Heilung eines Knochenbruchs (Fraktur) wird erreicht, indem die beiden Frakturrenden durch periostale Knochenneubildung wieder vereinigt werden.

Neben den Knochenzellen (Osteozyten) sind organische und anorganische Substanzen an der Zusammensetzung des Knochengewebes beteiligt. Letztere, besonders $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ und CaCO_3 , liegen in Form von Hydroxylapatitkristallen vor. Die Corticalis wird von Lamellen aufgebaut, die aus einer organischen Kittsubstanz bestehen. In ihr lagern straffe Bindegewebsfasern (kollagene Fibrillen). Durch den Einbau des anorganischen Materials erhält der Knochen seine Härte. Zwischen den Lamellen liegen Osteozyten. Der größte Teil der Lamellen ist konzentrisch zu 5-12 Stück um arterielle und venöse Gefäße geschichtet; man bezeichnet sie als Haverssche oder Speziallamellen. Innerhalb der Lamelle liegen die kollagenen Fibrillen einander parallel und umkreisen in Schraubentouren den Haversschen Kanal. Die straffen Bindegewebsfasern der benachbarten Lamellen dagegen verlaufen zu diesen gekreuzt. Dadurch wechseln Lamellen mit Rechts- und Linkstouren ihrer kollagenen Fasern einander ab. Die Verbindung angrenzender Lamellen wird durch ausscherende Fibrillenzüge hergestellt.

Haversscher Kanal und umgebende Lamellensysteme bilden ein Osteon. Es kann mehrere Zentimeter lang werden, verläuft meist parallel zur Längsachse eines Knochens und stellt die funktionelle Einheit der Corticalis dar.

Auftretende Zug- und Druckspannungen werden von den unterschiedlichen Wickelungen der kollagenen Fibrillen abgefangen. Zwischen den Osteonen liegen Lamellensysteme, die keine Beziehung zu Blutgefäßen aufweisen (Schalllamellen). Die Grenzen der Corticalis werden von oberflächenparallelen Lamellen eingenommen (äußere und innere Generallamellen), denen ebenfalls charakteristische Beziehungen zu den Gefäßen fehlen. Die inneren Generallamellen gehen in die Lamellen der Spongiosa über. Am oberen Rand der Abbildung sind 3 äußere Generallamellen mit dem gekreuzten Verlauf der kollagenen Fibrillen herausgezeichnet. Die Spongiosa besitzt keine Osteone. Sie baut sich aus parallelen Lamellen auf. Die arteriellen Gefäße des Knochens stammen aus dem Periost und durchdringen die äußeren Generallamellen in den Volkmannsehen Kanälen, die keine konzentrischen Lamellensysteme haben. Die Volkmannsehen Gefäße durchbrechen die Osteone und speisen die Haversschen Gefäße. Einige Gefäßzweige gelangen durch die inneren Generallamellen zum Knochenmark.

Abb. D stellt einen Schnitt durch die Kompakta mit Hämatoxylin-Eosin (HE) gefärbt im mikroskopischen Bild dar.

Oben im Ausschnitt bedeckt die bindegewebige Knochenhaut das Knochengewebe. Sichtbar sind Bindegewebszellen und kollagene Fasern.

Es folgen die äußeren Generallamellen, anschließend die Zone der Osteone. Im Zentrum eines Osteons

Bau des Knochens

Deutsch

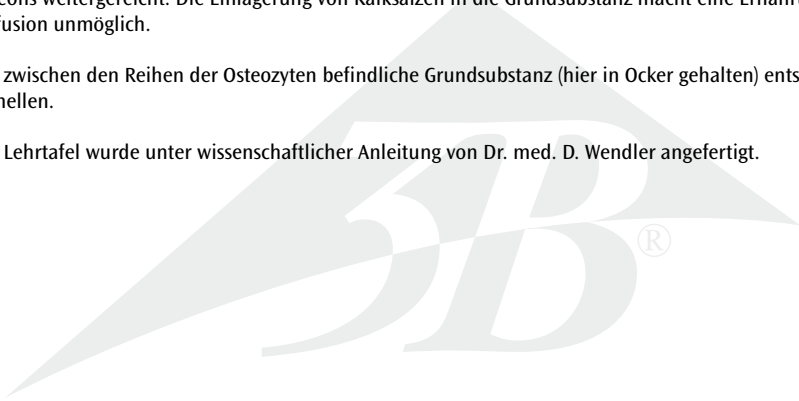
verlaufen die Haversschen Gefäße (1 Arterie und 1 bis 2 Venen). Um die Gefäße ordnen sich die Speziallamellen mit dazwischen gelagerten Osteozyten. Jedes Osteon wird außen (wie auch andere Gruppen von Lamellen) von einer Kittlinie aus fibrillenfreier organischer Substanz begrenzt (blau dargestellte Linien). Sie sind Grenzlinien der rhythmischen Knochenbildung. Die einzelnen Osteone sind verbunden durch Schaltlamellen.

In einem HE-Schnitt erkennt man nicht den Verlauf der kollagenen Fibrillen innerhalb der Lamellen. Sie werden erst sichtbar bei Betrachtung des Schnittes im polarisierten Licht.

Abb. E stellt schematisch Osteozyten in verschiedenen Anschnitten dar. Ein Osteozyt ist eine ovale Zelle mit einem Längsdurchmesser von 30 μm . Auf 1 mm^2 Knochensubstanz entfallen 700-800 Zellen. Von jeder Zelle gehen zahlreiche verzweigte Fortsätze aus, die sich mit denen der Nachbarzellen verbinden. Mit Hilfe dieser Protoplasmaausläufer werden Nährstoffe vom Blut (Haverssche Gefäße) zur Peripherie des Osteons weitergereicht. Die Einlagerung von Kalksalzen in die Grundsubstanz macht eine Ernährung durch Diffusion unmöglich.

Die zwischen den Reihen der Osteozyten befindliche Grundsubstanz (hier in Ocker gehalten) entspricht den Lamellen.

Die Lehrtafel wurde unter wissenschaftlicher Anleitung von Dr. med. D. Wendler angefertigt.



Los huesos son parte de los tejidos duros del organismo. Pero el tejido óseo no es rígido. Gracias a la gran cantidad de protoplasma vivo (células óseas) y su estrecha vinculación con el sistema vascular puede adaptarse a solicitaciones cambiantes mediante procesos de transformación, que no cesan siquiera en los adultos.

Tareas

1. Los huesos sirven al cuerpo de sustento y de protección de los órganos internos
2. Junto con la musculatura, las articulaciones permiten los movimientos
3. El hueso cumple funciones en la administración de las sustancias minerales (intercambio de calcio y fosfato)
4. La médula ósea roja es un órgano importante de hematopoyesis

La **figura A** muestra un fémur como ejemplo de hueso tubular largo.

La **parte superior de la figura A** es un corte sagital a través de la cabeza, el cuello, la diáfisis y el trocánter mayor. Fuera está el periostio, que en la zona de la cabeza se inserta en el cartílago hialino articular. Debajo del periostio hay una densa capa cortical (sustancia compacta), que en la zona de la cabeza es fina, aumentando de grosor en la diáfisis. La sustancia compacta contiene vasos arteriales y venosos, que se van haciendo más escasos en las proximidades del cuello. La sangre arterial aporta al hueso oxígeno, sustancias nutritivas y constructivas. Las venas eliminan del hueso la sangre pobre en oxígeno, rica en dióxido de carbono y saturada de productos resultantes de desintegración y sales minerales. La zona superior de la diáfisis, el cuello y la cabeza están rellenos en el interior por una sustancia ósea esponjosa (hueso esponjoso) que en la parte superior de la diáfisis sale de la sustancia compacta, por lo que da la impresión de que ésta se exfolia. En el tejido esponjoso de la cabeza del fémur se aprecia una banda ósea más densa, que muestra la sincondrosis (disco epifisario), muy importante para el crecimiento longitudinal durante la época de desarrollo. El tejido esponjoso desaparece en la diáfisis, a excepción de unas pocas tiras adheridas a la sustancia compacta. De esa forma se genera la cavidad medular, rellena de la médula ósea. La médula ósea roja hematogénica (omitida en la imagen) llena las cavidades del tejido esponjoso y de las cavidades medulares. En los adultos se transforma en la diáfisis en médula ósea amarilla (médula grasa). Pero en determinados huesos (por ejemplo cráneo, esternón, huesos del carpo y del tarso) se conserva la médula ósea roja. En caso de una mayor necesidad de células sanguíneas puede convertirse de nuevo la médula ósea en médula ósea hematogénica.

La **parte central de la figura A** ilustra la innervación y aporte sanguíneo del periostio y el hueso. Los vasos arteriales penetran desde los alrededores en el periostio, se ramifican para formar una red vascular y penetran finalmente la sustancia cortical en forma de canales. Las venas describen el mismo recorrido, solo que a la inversa. Además, cada hueso posee otros 2 vasos más gruesos, de los que salen ramificaciones para el suministro de la médula ósea. La vena transporta, junto a los catabolitos, también células sanguíneas de nueva formación. Los finos nervios forman entramados en el periostio (muy sensible al dolor).

La **parte inferior de la figura A** muestra el periostio abatido, que va fijado al hueso con ayuda de las denominadas fibras de Sharpey. Las fibras rígidas (colágeno) del tejido conectivo irradian desde el periostio hacia la sustancia cortical y garantizan una fijación firme sobre el hueso, que es importante para la alimentación del hueso. Además, las fibras de colágeno de los tendones de los músculos aquí insertados van sujetas en forma de abanico al periostio, que por medio de sus fibras de Sharpey garantiza una función precisa. Los vasos eferentes y aferentes del hueso entran y salen por los orificios de la superficie del hueso.

La **figura B** ofrece una visión de la arquitectura funcional del tejido esponjoso. Debido al peso corporal que actúa sobre la cabeza del fémur y la musculatura, que tira en el trocánter mayor hacia arriba o en la diáfisis hacia el interior, el cuello del fémur y la diáfisis sobre todo están sometidos a un esfuerzo de flexión. Las tensiones de flexión son máximas en los márgenes de un cuerpo sometido a carga. Por eso, la sustancia cortical del cuello y, en especial de la diáfisis, tiene una conformación más fuerte. La sustancia

cortical de la parte interior del fémur absorbe las compresiones, mientras que la interior soporta las fuerzas de tracción. Las láminas del tejido esponjoso (trabéculas) están orientadas en la dirección de la máxima tracción o compresión. Las líneas de máxima tensión se denominan trayectorias. El tejido esponjoso presenta una estructura siguiendo las trayectorias. El sistema grande de trabéculas, que se extiende desde la sustancia cortical lateral hasta la parte inferior de la cabeza, es idóneo para absorber las tracciones, mientras que las dos bandas de tejido esponjoso que ascienden hasta el trocánter mayor y la cabeza del fémur, son trayectorias compresivas. Las trayectorias de tracción y compresión son perpendiculares entre sí. En el centro del cuello del fémur, el tejido esponjoso es muy fino o inexistente. En esta zona alcanzan el valor máximo los esfuerzos de cizallamiento, que siempre son más grandes en el centro de un cuerpo sometido a carga. La ausencia de sustancia ósea en este punto reduce las peligrosas cargas por cizallamiento. En el punto donde el tejido esponjoso se inserta en la cortical, su arquitectura funcional queda prolongada por el flujo de las osteonas.

La **figura C** ilustra la estructura fina del hueso. En la parte derecha de la figura aparece el periostio separado de la superficie ósea. El periostio de tejido conectivo está compuesto por 2 capas: una exterior, rica en fibras, y una interior rica en células. Esta última realiza en el embrión el crecimiento en grosor del hueso (osificación pericondral) mediante el depósito de tejido óseo sobre la parte del esqueleto de conformación cartilaginosa). La capacidad del periostio para generar hueso no se agota, por lo general, hasta una edad avanzada. La curación de una rotura ósea (fractura) se consigue volviendo a unir los dos extremos de la misma mediante osteogénesis periosteal.

Además de las células óseas (osteocitos), en la composición del tejido óseo participan sustancias orgánicas e inorgánicas. Estas últimas, sobre todo $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ y CaCO_3 , están presentes en forma de cristales de hidroxiapatita. La sustancia cortical tiene una estructura laminar, compuesta por una sustancia orgánica de cementación, en la que hay fibras rígidas de tejido conjuntivo (fibrillas de colágeno). La incorporación del material inorgánico confiere dureza al hueso. Entre las láminas se encuentran los osteocitos. La mayor parte de las láminas está dispuesta de forma concéntrica en grupos de 5 a 12 unidades alrededor de los vasos arteriales y venosos y reciben el nombre de láminas haversianas o especiales. Dentro de la lámina, las fibrillas de colágeno están dispuestas paralelamente entre ellas y rodean el conducto de Havers en forma de espiral. Por el contrario, las fibras rígidas de tejido conjuntivo de las láminas adyacentes discurren perpendicularmente al mismo. De esa forma, las láminas dispuestas a derecha e izquierda alternan sus fibras de colágeno. La conexión de láminas adyacentes se establece mediante haces de fibrillas fuera del ordenamiento.

El canal de Havers y los sistemas de láminas circundantes forman una osteona. Puede alcanzar varios centímetros de longitud, discurre por lo general paralelamente al eje longitudinal del hueso y constituye la unidad funcional de la sustancia cortical.

Las fuerzas de tracción y compresión existentes son absorbidas por los diferentes arrollamientos de las fibrillas de colágeno. Entre las osteonas existen sistemas laminares que no tienen ninguna relación con los vasos sanguíneos (láminas intersticiales). Los bordes de la sustancia cortical están ocupados por láminas paralelas a la superficie (láminas óseas exteriores e interiores), que carecen asimismo de relaciones características con los vasos. Las láminas óseas interiores se superponen con las láminas de la sustancia esponjosa. En el margen superior de la figura se han extraído 3 láminas óseas exteriores con la trayectoria transversal de las fibrillas de colágeno. La sustancia esponjosa no tiene osteonas, sino que se compone de láminas paralelas. Los vasos arteriales del hueso emergen del periostio y atraviesan las láminas óseas exteriores por los conductos de Volkmann, que no tienen sistemas de láminas concéntricos. Los vasos de Volkmann atraviesan la osteona y nutren a los vasos de Havers. Algunas ramificaciones vasculares llegan a través de las láminas óseas interiores hasta la médula ósea.

La **figura D** muestra un corte a través de la sustancia compacta, tintada en la imagen microscópica con hematoxilina-eosina (HE).

En la parte superior de la sección, el periostio de tejido conjuntivo recubre el tejido óseo. Resultan visibles las células del tejido conjuntivo y las fibras de colágeno.

A continuación se encuentran las láminas óseas exteriores y seguidamente la zona de las osteonas. En el centro de una osteona discurren los vasos de Havers (1 arteria y 1 o 2 venas). Alrededor de los vasos van dispuestas láminas óseas con osteocitos ubicados entremedias. Cada osteona está limitada por fuera (al igual que otros grupos de láminas) por una línea de cementación de sustancia orgánica exenta de fibrillas (líneas representadas en azul). Son líneas de contorno de la osteogénesis rítmica. Las distintas osteonas van unidas mediante láminas intersticiales.

En un corte HE no se aprecia la trayectoria de las fibrillas de colágeno en el interior de las láminas. Solamente resultan visibles si se analiza el corte con luz polarizada.

La figura E muestra esquemáticamente los osteocitos en diferentes cortes. Un osteocito es una célula ovalada con un diámetro longitudinal de 30 μm . En 1 mm^2 de tejido óseo hay 700-800 células. De cada célula parten numerosas ramificaciones, que se unen con las de las células vecinas. Con ayuda de estas extensiones del protoplasma se transportan los nutrientes desde la sangre (vasos de Havers) hasta la periferia de la osteona. El depósito de sales de calcio en la sustancia básica impide la alimentación por difusión.

El tejido básico existente entre las filas de osteocitos (aquí, tintado en ocre) corresponde a las láminas.

La lámina ha sido confeccionada bajo la supervisión científica del Dr. med. D. Wendler.

Structure de l'os

Français

Les os font partie des substances dures de l'organisme. Cependant le tissu osseux n'est pas rigide. Il peut s'adapter à des contraintes variables grâce à une quantité importante de protoplasmes vivants (cellules osseuses) et à sa liaison étroite avec le système vasculaire par le biais de processus de restructuration qui ne cessent pas à l'âge adulte.

Fonctions

1. Les os servent d'appui et de protection aux organes internes du corps
2. Les articulations permettent les mouvements, en liaison avec la musculature
3. Les os jouent un rôle dans l'équilibre minéral (métabolisme de calcium et de phosphate)
4. La moelle osseuse rouge est un organe important d'hématopoïèse.

La Fig. A montre comme exemple un os tubulaire : le fémur.

La partie supérieure de la Fig. A est une coupe présentant la tête, le cou, la tige et le grand trochanter. L'extérieur est constitué du périoste, qui converge avec le cartilage articulaire hyalin au niveau de la tête. Sous le périoste se situe une couche de cortex dense (l'os dense), fine au niveau de la tête et du cou, mais gagnant en épaisseur au niveau de la tige. L'os compact contient des vaisseaux artériels et veineux, présents de manière plus diffuse en direction du cou. Le sang artériel alimente l'os en oxygène, en nutriments et en substances régénérantes. Les veines évacuent quant à elles un sang pauvre en oxygène et riche en dioxyde de carbone, chargé de produits de dégradation et de sels minéraux. La partie supérieure de la tige, la tête et le cou sont remplis d'une substance osseuse spongieuse détendue (l'os spongieux). Cette dernière part de l'os compact dans la partie supérieure de la tige, si bien qu'elle donne l'impression de se déliter. Là où se situe l'os spongieux de la tête fémorale, on aperçoit une ligne osseuse condensée, signe de croissance en longueur durant le développement d'articulations cartilagineuses importante (cartilage de conjugaison). L'os spongieux disparaît dans la tige, à l'exception de quelques rares bandes qui adhèrent à l'os compact. C'est ainsi qu'apparaît la cavité médullaire, remplie de moelle osseuse. La moelle osseuse rouge, hématopoïétique (ne figurant pas sur l'illustration), remplit les aréoles de l'os spongieux les cavités médullaires. Chez les adultes, elle se transforme en moelle jaune (tissu adipeux) dans les tiges. La moelle rouge est toutefois conservée dans certains os (par ex. la voûte crânienne, le sternum, les os du carpe et ceux du tarse). Au cas où le besoin en cellules sanguines augmente, le tissu adipeux peut se transformer à nouveau en moelle hématopoïétique.

La partie médiane de la Fig. A expose l'innervation et l'approvisionnement sanguin du périoste et de l'os. Les vaisseaux artériels pénètrent dans le périoste, constituent un réseau vasculaire et s'introduisent ensuite en canaux dans l'os cortical. Les veines suivent le même chemin dans la direction inverse. L'os possède par ailleurs 2 vaisseaux plus puissants, à partir desquels partent des branches d'alimentation de la moelle osseuse. Outre les produits du métabolisme, la veine transporte également les nouvelles cellules sanguines. Les nerfs sont fins et s'imbriquent en tresses au niveau du périoste (partie très sensible à la douleur).

La partie inférieure de la Fig. A met en évidence le périoste, lequel est fixé sur l'os par des fibres dites de Sharpey. Les fibres de tissu conjonctif fermes (fibres de collagène) relient le périoste à l'os cortical et garantissent une parfaite adhérence à l'os, ce qui est très important pour son alimentation. En outre, les fibres de collagène des tendons de la musculature se fixent en compartiments au périoste, lequel, combiné avec ses fibres de Sharpey a une fonction bien déterminée. Les vaisseaux d'alimentation et d'évacuation de l'os vont et viennent par des ouvertures à la surface de l'os.

La fig. B présente une vue interne de l'architecture fonctionnelle de l'os spongieux. En raison du poids corporel pesant sur la tête fémorale et de la musculature tirant vers le haut ou bien vers l'intérieur de la tige au niveau du grand trochanter, le col du fémur et la tige sont soumis à des contraintes de flexion importantes. Tout corps soumis à des contraintes connaît les tensions dues à la flexion les plus fortes. C'est la raison pour laquelle l'os cortical du col et surtout de la tige sont constitués par de tissus plus résistants. L'os cortical de l'intérieur du fémur reçoit des tensions de compression, pendant que l'extérieur subit des tensions de traction. Les lamelles de l'os spongieux sont orientées en fonction des tensions de traction ou de compression

les plus importantes. Les lignes des tensions les plus importantes sont appelées trajectoires. L'os spongieux a une structure trajectorielle. Le grand système de trajectoires qui s'étend de l'os cortical latéral jusqu'à la partie inférieure de la tête fémorale est adapté à l'amortissement des tensions de traction. Les deux lignes menant au grand trochanter et à la tête fémorale sont quant à elles des trajectoires de compression. Les trajectoires de traction et de compression sont perpendiculaires les unes aux autres. Au centre du col de fémur, l'os spongieux est moins dense, voire évidé. Dans ce secteur, les tensions de cisaillement auxquelles un corps est soumis atteignent un maximum. L'absence de matière osseuse à cet endroit réduit les tensions de cisaillement dangereuses. L'architecture fonctionnelle de l'os spongieux se poursuit avec dans le tracé des ostéones à l'endroit où l'os spongieux converge avec l'os cortical.

La Fig. C présente une vue interne dans la structure fine de l'os. À droite de la figure, on aperçoit le périoste détaché de la surface osseuse. Le périoste, constitué de tissu conjonctif, est composé de 2 couches : une couche extérieure riche en fibres et une couche intérieure riche en cellules. Cette dernière prend en charge la croissance en diamètre de l'os (ossification périchondrale) chez l'embryon par un dépôt de substance osseuse sur le squelette préformé de matière cartilagineuse. La capacité du périoste à former de l'os ne s'épuise généralement qu'à un âge très avancé. La rémission d'une fracture est atteinte lorsque les deux extrémités de la fracture sont à nouveau réunies par l'ossification périostique.

Outre les cellules osseuses (ostéocytes), le tissu osseux se compose également de substances organiques et anorganiques. Ces dernières, en particulier le $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ et CaCO_3 , sont présentes sous forme de cristaux d'hydroxyapatite. L'os cortical est structuré en lamelles composées d'une substance fondamentale. C'est dans cette dernière que se trouvent les fibres fermes du tissu conjonctif (fibrilles de collagène). La présence de matériaux anorganiques confère à l'os sa dureté. Entre les lamelles se trouvent des ostéocytes. La plupart des lamelles sont concentriques, disposées en couche de 5 à 12 autour de vaisseaux artériels ou veineux. On les appelle lamelles de Havers ou lamelles spéciales. À l'intérieur des lamelles, on trouve des fibrilles de collagène, parallèles les unes aux autres qui entourent le canal de Havers en colimaçon. Les fibres fermes du tissu conjonctif des lamelles voisines les croisent. Ainsi, les lamelles alternent tours gauches et droits de leurs fibres de collagène. La liaison entre lamelles voisines est assurée par des détachements de lignes de fibrilles.

Le canal de Havers et les systèmes de lamelles qui l'entourent forment un ostéone. Il peut atteindre plusieurs centimètres de longueur, généralement disposé parallèlement à l'axe longitudinal, il représente l'unité fonctionnelle de l'os cortical.

Les contraintes de traction et de compression auxquelles l'os est soumis sont amorties par l'enchevêtrement diversifié des fibrilles de collagène. Entre les ostéones se trouvent des systèmes de lamelles sans relation avec les vaisseaux sanguins (lamelle de commande). Les rebords de l'os cortical sont intégrés aux lamelles parallèles à la surface (lamelles fondamentale externes et internes), lesquelles n'ont pas non plus de relation caractérisée avec les vaisseaux. Les lamelles fondamentales externes opèrent une transition avec les lamelles de l'os spongieux. L'illustration située sur le bord droit représente 3 lamelles fondamentales externes avec le croisement des fibrilles de collagène. L'os spongieux n'est pas composé d'ostéones, mais de lamelles parallèles. Les vaisseaux artériels de l'os proviennent du périoste et pénètrent les lamelles fondamentales externes dans les canaux de Volkmann, dotés de petits systèmes concentriques de lamelles. Les vaisseaux de Volkmann traversent les ostéones et alimentent les vaisseaux de Havers. Quelques faisceaux de vaisseaux parviennent à la moelle osseuse en passant par les lamelles fondamentales internes.

La Fig. D représente une coupe de vue microscopique de l'os compact, coloré à l'hématoxyline et à l'éosine (HE).

Dans la partie supérieure, le périoste, tissu fibreux, recouvre le tissu osseux. On distingue les cellules de tissu fibreux et les fibres de collagène.

Structure de l'os

Français

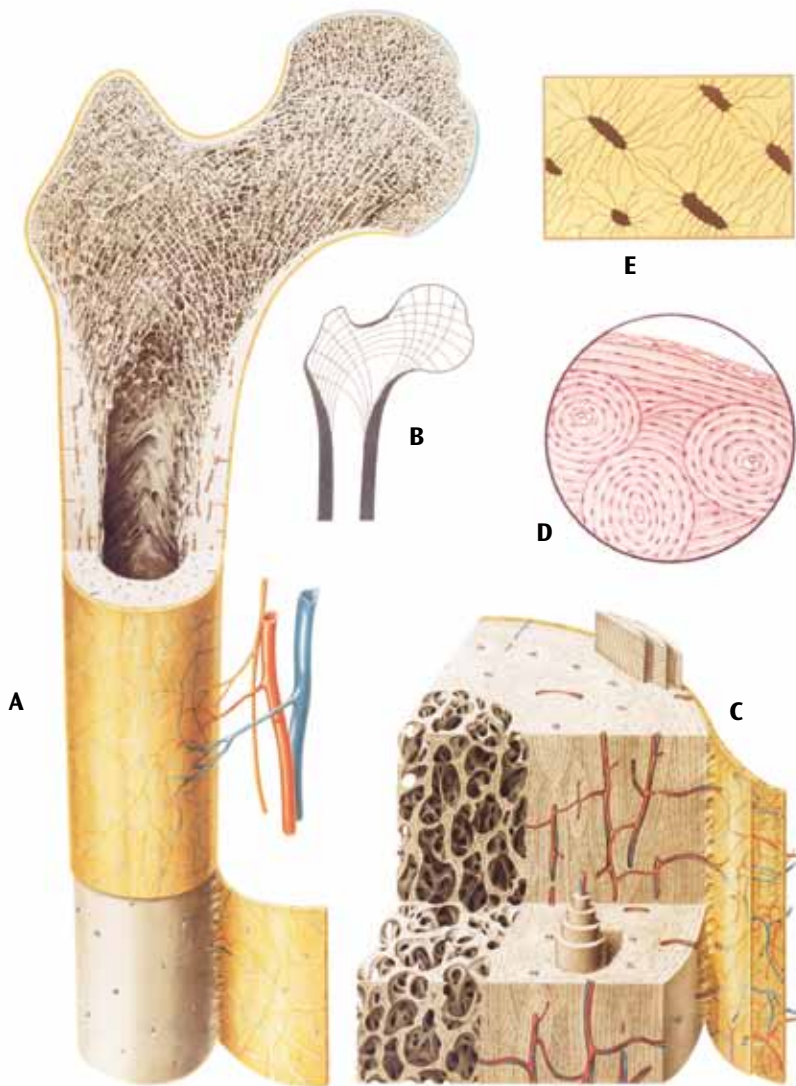
On aperçoit ensuite les lamelles fondamentales externes, puis la zone des ostéones. Les vaisseaux de Havers circulent au centre d'un ostéone (1 artère et 1 à 2 veines). Autour des vaisseaux sont disposées les lamelles spéciales avec entre elles, des ostéocytes. Chaque ostéone (comme d'autres groupes de lamelles) est délimité du côté externe par une ligne fondamentale composée de substances organiques sans fibrilles (lignes représentées en bleu). Ces lignes représentent des délimitations du rythme de l'ossification. Les ostéones sont reliés entre eux par des lamelles de commande.

Sur une coupe à coloration HE, on ne peut pas déceler le tracé des fibrilles de collagène à l'intérieur des lamelles. Elles ne deviennent visibles à l'observation de la coupe, que sous lumière polarisée.

La Fig. E représente les ostéocytes de façon schématiques sous plusieurs angles. Un ostéocyte est une cellule ovale d'un diamètre longitudinal de 30 μm . 1 mm^2 de substance osseuse recèle 700-800 cellules. Chaque cellule a de nombreux prolongements qui la relie avec les cellules voisines. Grâce à ces ramifications de protoplasmes, les nutriments sont acheminés depuis le sang (vaisseaux de Havers) jusqu'à la périphérie de l'ostéone. Le dépôt de sels calcaires dans la substance fondamentale rend une alimentation par diffusion impossible.

La substance fondamentale située entre les rangs d'ostéocytes (représentée en ocre) correspond aux lamelles.

Cette planche anatomique a été réalisée sous la direction du Dr. D. Wendler.



Estrutura do osso

Português

Os ossos pertencem às substâncias duras do organismo. Porém o tecido ósseo não é rígido. Graças à grande quantidade de protoplasma vivo (células ósseas) e à sua estreita ligação ao sistema vascular, é capaz de se adaptar a exigências alteradas através de processos de reconstrução, que persistem mesmo nos adultos.

Funções

1. Os ossos servem de suporte ao corpo e para proteger os órgãos internos
2. As articulações, juntamente com os músculos, possibilitam os movimentos
3. O osso cumpre funções no equilíbrio mineral (metabolismo de cálcio e fosfato)
4. A medula óssea vermelha é um importante órgão de hematopoese

A Fig. A mostra o fêmur como exemplo de um longo osso tubular.

A parte superior da Fig. A representa um corte de serra pela cabeça, pescoço, diáfise e grande trocânter. Por fora está a pele do osso (periósteo) que, na região da cabeça, penetra na cartilagem de articulação hialina. Sob a pele do osso está uma densa camada de córtex do osso (compacta), que é fina na zona da cabeça e do pescoço, mas fica mais grossa na zona da diáfise. A substância compacta contém vasos arteriais e venozos, que na direção do pescoço ficam mais raros. O sangue arterial transporta oxigênio, nutrientes e substâncias construtivas para o osso. As veias transportam sangue pobre em oxigênio, rico em dióxido de carbono, com produtos de decomposição e sais minerais para fora do osso. A parte superior da diáfise, o pescoço e a cabeça estão preenchidos no interior por uma substância óssea esponjosa e frouxa. Ela sobressai, na parte superior da diáfise, da substância compacta, de modo a fazê-la parecer foliforme. Na substância esponjosa da cabeça do fêmur, pode-se ver uma tira óssea concentrada como sinal da junta da cartilagem, que é importante para o crescimento em comprimento durante o desenvolvimento (disco de epífese). A substância esponjosa desaparece na diáfise, exceto algumas poucas camadas aderentes à substância compacta. Surge, assim, a cavidade medular preenchida com medula óssea. A medula óssea vermelha hematopoiética (negligenciada no quadro) preenche as malhas da substância esponjosa e as cavidades medulares. Nos adultos, é transformada nas diáfises em medula óssea amarela (medula gorda). Porém, determinados ossos (p. ex. crânio, esterno, ossos do pulso e do tarso) contêm a medula óssea vermelha. Se a necessidade de glóbulos sanguíneos aumentar, a medula gorda pode voltar a ser transformada em medula óssea hematopoiética.

A parte central da Fig. A explica a inervação e o fornecimento de sangue do periósteo e do osso. Os vasos arteriais das redondezas entram no periósteo, se ramificam numa rede de vasos e, por fim, penetram a substância cortical nos canais. As veias fazem o mesmo percurso, mas no sentido contrário. Além disso, cada osso tem ainda 2 vasos mais espessos, dos quais saem ramos para alimentar a medula óssea. A veia transporta também glóbulos sanguíneos novos, para além dos produtos metabólicos. Os nervos finos formam plexos no periósteo (muito sensíveis à dor).

A parte inferior da Fig. A mostra o periósteo ao contrário, que está fixado ao osso com a ajuda das chamadas fibras de Sharpey. As rígidas fibras conjuntivas (colágenas) penetram do periósteo para a substância cortical e asseguram uma fixação firme no osso, o que é importante para a alimentação do osso. Além disso, as fibras colágenas dos tendões dos músculos aqui inseridos se fixam em forma de leque na pele do osso, que garante uma função exata com auxílio de suas fibras de Sharpey. Os vasos deferentes e eferentes do osso entram e saem pelas aberturas da superfície do osso.

A Fig. B dá uma ideia da arquitetura funcional da substância esponjosa. O peso do corpo que atua sobre a cabeça do fêmur e os músculos que puxam para cima no grande trocânter ou para dentro na diáfise, sujeitam sobretudo o pescoço do fêmur e a diáfise a um esforço de flexão. As maiores tensões de flexão são verificadas nos bordos de um corpo sob carga. Por isso, a substância cortical do pescoço e sobretudo da diáfise tem uma constituição mais forte. A substância cortical do lado interior do fêmur recebe tensões de compressão, e o lado exterior recebe esforços de tensão. As lamelas da substância esponjosa estão orientadas no sentido da maior tensão de compressão ou esforço de tensão. As linhas das maiores tensões têm o nome de trajetórias. A substância esponjosa tem uma estrutura de trajetória. O grande sistema de tra-

jetória, que se estende desde a substância cortical lateral até à parte inferior da cabeça, é adequado para interceptar esforços de tensão, enquanto as duas linhas de substância esponjosa até ao grande trocânter e a cabeça do fêmur são trajetórias compressivas. As trajetórias de tensão e compressão estão perpendiculares uma à outra. No centro do pescoço do fêmur, a substância esponjosa está frequentemente reduzida ou em recesso. Nesta região, as tensões de cisalhamento, que são sempre maiores no centro de um corpo sob carga, atingem um máximo. A ausência de material ósseo neste ponto reduz as perigosas tensões de cisalhamento. Nos pontos onde a substância esponjosa penetra na substância cortical, a sua arquitetura funcional é continuada pelo fluxo do ósteon.

A Fig. C dá uma ideia da estrutura detalhada do osso. Do lado direito da imagem, o perióstio está levantado da superfície do osso. O perióstio de tecido conjuntivo é composto por 2 camadas: uma exterior rica em fibras e uma interior rica em células. Esta última assume, no embrião, o crescimento em espessura do osso (ossificação pericondral), através do depósito de substância óssea na parte cartilaginosa pré-formada do esqueleto. A capacidade do perióstio de formar ossos só se esgota normalmente numa idade muito avançada. Uma fratura de osso fica curada quando as duas extremidades da fratura se voltam a unir através da nova formação periosteal do osso.

Além das células ósseas (osteócitos), substâncias orgânicas e inorgânicas participam na composição do tecido ósseo. Estas últimas, sobretudo $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e CaCO_3 , se apresentam na forma de cristais de hidroxiapatita. A substância cortical tem uma estrutura lamelar, que consiste de uma substância orgânica fundamental. Ela tem fibras conjuntivas rígidas (fibrilas colágenas). O osso obtém a sua rigidez pela integração do material inorgânico. Entre as lamelas estão os osteócitos. A maior parte das lamelas está concentricamente disposta em grupos de 5-12 ao redor dos vasos arteriais e venosos; são designados de vasos de Havers ou lamelas especiais. Dentro das lamelas se encontram as fibrilas colágenas em paralelo, circundando helicoidalmente o canal de Havers. Em contrapartida, as rígidas fibras conjuntivas das lamelas adjacentes se cruzam com elas. Deste modo, as lamelas com giro à direita e à esquerda das suas fibras colágenas se alternam. A união das lamelas contíguas é estabelecida por grupos de fibrilas divergentes.

O canal de Havers e o sistema de lamelas que o envolve formam um ósteon. Ele pode chegar a ter vários centímetros de comprimento, normalmente correndo paralelamente ao eixo longitudinal do osso e representa a unidade funcional da substância cortical.

As tensões de compressão e esforços de tensão incidentes são interceptados pelas diferentes voltas das fibrilas colágenas. Entre os ósteons, encontram-se sistemas de lamelas, que não apresentam qualquer ligação com os vasos sanguíneos (lamelas intersticiais). Os limites da substância cortical são assumidos pelas lamelas paralelas à superfície (lamelas gerais exteriores e interiores), que também não têm qualquer ligação característica com os vasos. As lamelas gerais interiores transitam para as lamelas da substância esponjosa. Na margem superior da Figura estão representadas 3 lamelas gerais exteriores com o percurso cruzado das fibrilas colágenas. A substância esponjosa não possui ósteon. Ela é composta por lamelas paralelas. Os vasos arteriais do osso provêm do perióstio e penetram as lamelas gerais exteriores nos canais de Volkmann, que não têm sistemas de lamelas concêntricos. Os vasos de Volkmann atravessam o ósteon e alimentam os vasos de Havers. Algumas ramificações vasculares alcançam a medula óssea através das lamelas gerais interiores.

A Fig. D representa uma secção através da substância compacta na imagem microscópica com hematoxilina-eosina (HE) colorida.

Na parte superior da secção, a pele do osso conjuntiva cobre o tecido ósseo. Células conjuntivas e fibras colágenas podem ser vistas.

Seguem-se as lamelas gerais exteriores e depois a zona dos ósteons. No centro de um ósteon passam os vasos de Havers (1 artéria e 1 a 2 veias). As lamelas especiais com osteócitos ao centro estão dispostas ao redor dos vasos. Cada ósteon é delimitado por fora (como também outros grupos de lamelas) por uma

Estrutura do osso

Português

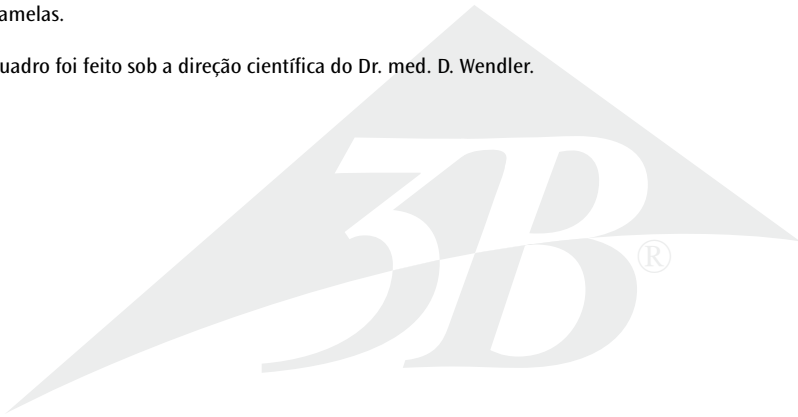
linha fundamental de substância orgânica sem fibrilas (linhas representadas em azul). Elas são linhas limite da formação rítmica do osso. Cada ósteon é unido por lamelas intersticiais.

Numa secção HE não se detecta o fluxo das fibrilas colágenas dentro das lamelas. Só ficam visíveis quando a secção é observada sob luz polarizada.

A Fig. E representa osteócitos esquematicamente em cortes diferentes. Um osteócito é uma célula oval com um diâmetro longitudinal de 30 μm . Em 1 mm^2 de substância óssea existem 700-800 células. De cada célula saem inúmeras extensões ramificadas que se unem aos das células vizinhas. Com a ajuda destas extensões protoplasmáticas, os nutrientes são encaminhados do sangue (vasos de Havers) para a periferia do ósteon. A inserção de sais calcários na substância base impossibilita a alimentação por difusão.

A substância base (aqui representada em ocre), que se encontra entre as filas dos osteócitos, corresponde às lamelas.

O quadro foi feito sob a direção científica do Dr. med. D. Wendler.



Le ossa appartengono alle sostanze dure dell'organismo, anche se, in realtà, il loro tessuto non è rigido. Esso è in grado di adattarsi a sollecitazioni diversificate, grazie all'elevata quantità di protoplasma vivente (cellule ossee) e al suo stretto rapporto con l'apparato circolatorio per mezzo dei processi di rimodellamento, che proseguono anche in età adulta.

Funzioni

1. Le ossa sostengono il corpo e proteggono gli organi interni
2. Le articolazioni, insieme alla muscolatura, consentono i movimenti
3. Le ossa contribuiscono al bilanciamento dei minerali (metabolismo del calcio e del fosforo)
4. Il midollo osseo rosso è un importante organo emopoietico

La fig. A mostra un femore come esempio di osso tubolare lungo.

La parte superiore della fig. A rappresenta una sezione longitudinale attraverso l'epifisi, la metafisi, la diafisi e il grande trocantere. All'esterno si trova il periostio, che si inserisce nella cartilagine ialina in corrispondenza dell'epifisi. Al di sotto del periostio si trova una dura corteccia ossea (tessuto compatto), la quale si assottiglia nella zona dell'epifisi e della metafisi, mentre diventa più resistente nella zona della diafisi. Il tessuto compatto contiene vasi arteriosi e venosi che si diradano man mano che ci si avvicina alla metafisi. Il sangue arterioso convoglia all'osso ossigeno, nutrienti e sostanze costruttive, mentre le vene trasportano dall'osso sangue povero di ossigeno, ricco di anidride carbonica e contenente prodotti di scarto e sali minerali. La parte superiore della diafisi, la metafisi e l'epifisi sono colme al loro interno di una sostanza ossea spugnosa e soffice (tessuto spugnoso). Nella parte superiore della diafisi essa fuoriesce dal tessuto compatto, dando così l'impressione che quest'ultimo si apra a foglia. Nel tessuto spugnoso della testa del femore è visibile una striscia ossea ispessita, segno della sincondrosi, importante per la crescita in lunghezza durante lo sviluppo (disco epifisario). Il tessuto spugnoso sparisce nell'epifisi, ad eccezione di alcune trabecole attaccate al tessuto compatto. Da qui si sviluppano le cavità midollari contenenti midollo osseo. Il midollo osseo rosso emopoietico (assente in figura) riempie le areole del tessuto spugnoso e le cavità midollari: negli adulti, esso viene trasformato in midollo osseo giallo (midollo adiposo) all'interno della diafisi. Il midollo rosso è tuttavia contenuto in determinate ossa, come la volta cranica, lo sterno, il carpo della mano e il tarso del piede. In caso di aumento della richiesta di globuli rossi, il midollo adiposo è in grado di trasformarsi nuovamente in midollo osseo emopoietico.

La parte centrale della fig. A illustra l'innervazione e l'apporto sanguigno al periostio e all'osso. Dall'area circostante si introducono nel periostio vasi arteriosi che si ramificano fino a formare una rete vascolare e penetrano infine nel tessuto compatto sotto forma di canali. Le vene seguono lo stesso percorso, ma in direzione opposta. Ogni osso possiede inoltre altri due vasi più grandi, da cui si dipartono rami che alimentano il midollo osseo. Le vene trasportano, oltre ai cataboliti, globuli rossi di nuova formazione. I nervi sottili formano plessi nel periostio (molto sensibili al dolore).

La parte inferiore della fig. A mostra il periostio sollevato, fissato all'osso per mezzo delle cosiddette fibre di Sharpey. Queste robuste fibre collagene del tessuto connettivo fuoriescono dal periostio e penetrano nel tessuto compatto, garantendo una tenuta sicura, condizione importante per l'alimentazione dell'osso. Inoltre, le fibre collagene dei tendini della muscolatura che si inserisce in questo punto sono fissate a ventaglio al periostio, il quale assicura un funzionamento preciso grazie alle fibre di Sharpey. I vasi afferenti ed efferenti entrano ed escono per mezzo di aperture sulla superficie dell'osso.

La fig. B offre una panoramica dell'architettura funzionale del tessuto spugnoso. Attraverso il peso corporeo che agisce sulla testa del femore e la muscolatura che esercita una tensione verso l'alto sul grande trocantere e verso l'interno sulla diafisi, quest'ultima e la metafisi vengono sottoposte a una particolare forza flettente. Le sollecitazioni alla flessione sono più intense ai margini di un corpo sottoposto a carico, perciò il tessuto compatto della metafisi e soprattutto della diafisi è molto robusto. Il tessuto compatto della parte interna del femore riceve le sollecitazioni alla pressione, mentre la parte esterna le sollecitazioni alla tensione. Le lamelle del tessuto spugnoso sono orientate in direzione delle più marcate forze tensionali o

compressive. Le linee delle sollecitazioni maggiori vengono denominate traiettorie e il tessuto spugnoso mostra una struttura traiettoriale. Il grande sistema traiettoriale che si estende dal tessuto compatto laterale alla parte inferiore dell'epifisi è adatto ad assorbire le sollecitazioni di tensione, mentre le due strisce di tessuto spugnoso che raggiungono il grande trocantere e la testa del femore costituiscono traiettorie compressive. Le traiettorie tensionali e compressive sono posizionate perpendicolarmente le une rispetto alle altre. Al centro della metafisi, il tessuto spugnoso è per la maggior parte assottigliato e rado: gli sforzi di taglio, che al centro di un corpo sottoposto a carico sono sempre al massimo, raggiungono il proprio apice in questa regione. Qui, l'assenza di materiale osseo ammortizza appunto le pericolose forze di taglio. Nei punti in cui il tessuto spugnoso penetra nel tessuto compatto, la sua architettura funzionale è assicurata dall'orientamento degli osteoni.

La fig. C illustra in dettaglio la struttura dell'osso. A destra dell'immagine si osserva il periostio sollevato dalla superficie ossea. Questo tessuto connettivo è costituito da due strati: uno esterno ricco di fibre e uno interno ricco di cellule. Nell'embrione, quest'ultimo controlla la crescita in spessore dell'osso (ossificazione pericondrale) accumulando sostanza ossea sulla porzione cartilaginea preformata dello scheletro. La capacità del periostio di generare tessuto osseo si esaurisce di solito solo in età avanzata. La guarigione di una frattura avviene riunendo le due estremità fratturate attraverso l'osteogenesi periostale.

Oltre agli osteociti, alla sintesi del tessuto osseo prendono parte anche sostanze organiche e inorganiche. Le ultime, in particolare $\text{Ca}_3(\text{P}_0\text{A})_2$ e CaCO_3 , sono presenti sotto forma di cristalli di idrossiapatite. Il tessuto compatto è caratterizzato da una struttura lamellare, costituita da una sostanza cementante organica, al cui interno si trovano robuste fibre collagene di tessuto connettivo. È attraverso l'integrazione del materiale inorganico che un osso ottiene la propria durezza. La maggior parte delle lamelle, tra le quali si trovano gli osteociti, è disposta concentricamente a gruppi di 5-12 intorno ai vasi arteriosi e venosi. Esse vengono definite lamelle di Havers o lamelle speciali. Al loro interno, le fibrille collagene sono disposte in parallelo le une rispetto alle altre e avvolgono in senso elicoidale il canale di Havers. Le robuste fibre connettive delle lamelle adiacenti, invece, le incrociano. In questo modo, le lamelle le cui fibre collagene curvano a destra si alternano a quelle le cui fibre curvano a sinistra. Le lamelle limitrofe vengono collegate per mezzo di fasci di fibrille che deviano dal percorso normale.

Il canale di Havers e il sistema lamellare circostante costituiscono un osteone. Esso può raggiungere una lunghezza di svariati centimetri, corre per la maggior parte parallelamente all'asse longitudinale di un osso e rappresenta l'unità funzionale del tessuto compatto.

Le sollecitazioni di tensione e pressione che si verificano vengono intercettate dalle diverse fibrille collagene concentriche. Tra gli osteoni si trovano sistemi lamellari che non hanno alcuna relazione con i vasi sanguigni (lamelle interstiziali). I margini del tessuto compatto sono occupati da lamelle parallele alla superficie (lamelle circonfenziali esterne e interne) che non presentano a loro volta alcuna relazione caratteristica con i vasi. Le lamelle circonfenziali interne si fondono con le lamelle del tessuto spugnoso. Nella parte superiore della figura sono illustrate separatamente tre lamelle circonfenziali esterne con l'andamento incrociato delle fibrille collagene. Il tessuto spugnoso non contiene alcun osteone, bensì è costituito da lamelle parallele. I vasi arteriosi dell'osso hanno origine nel periostio e penetrano le lamelle circonfenziali esterne nei canali di Volkmann, privi di sistemi lamellari concentrici. I canali di Volkmann si introducono nell'osteone e alimentano i canali di Havers. Alcuni rami vascolari attraversano le lamelle circonfenziali interne e raggiungono il midollo osseo.

La fig. D rappresenta una sezione del tessuto compatto al microscopio a colorazione con ematosilina eosina (EE).

La parte superiore mostra come il tessuto connettivo del periostio copra il tessuto osseo: sono visibili le cellule connettive e le fibre collagene.

Seguono quindi le lamelle circonfenziali esterne e infine la zona dell'osteone. Al centro di un osteone

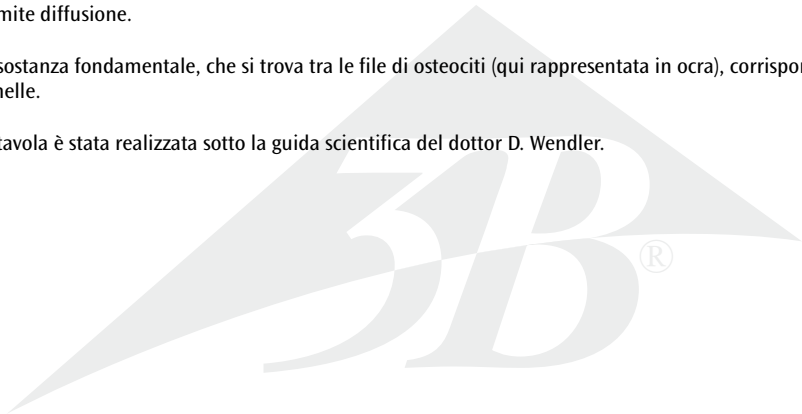
scorrono i canali di Havers (1 arteria e 1-2 vene), mentre intorno a essi sono disposte le lamelle speciali inframmezzate dagli osteociti. Ogni osteone, come anche altri gruppi di lamelle, è delimitato all'esterno da una linea cementante di sostanza organica priva di fibrille (linee blu in figura). Si tratta di linee di delimitazione della osteogenesi ritmica. I singoli osteoni sono collegati dalle lamelle interstiziali.

In una sezione EE non è possibile riconoscere l'andamento delle fibrille collagene all'interno delle lamelle: esso è visibile solo osservando la sezione con luce polarizzata.

La fig. E riporta una rappresentazione schematica degli osteociti in sezioni diverse. Un osteocita è una cellula ovale con un diametro longitudinale di 30 μm . 1 mm^2 di sostanza ossea contiene 700-800 cellule. Da ogni cellula si diramano numerosi prolungamenti che si collegano a quelli delle cellule vicine. Grazie a tali processi protoplasmatici, i nutrienti vengono convogliati dal sangue (canali di Havers) alla periferia dell'osteone. L'accumulo di sali di calcio nella sostanza fondamentale rende impossibile un'alimentazione tramite diffusione.

La sostanza fondamentale, che si trova tra le file di osteociti (qui rappresentata in ocra), corrisponde alle lamelle.

La tavola è stata realizzata sotto la guida scientifica del dottor D. Wandler.



骨の構造

日本語

骨は硬組織に属しますが、変化がないわけではありません。活動する無数の原形質（骨細胞）と血管系との密接なつながりによって、成人となっても止むことのない再生プロセスから生じる周囲の変化にも適応する性質を有しています。

役割

1. 骨は体を支え、また内臓を守っています
2. 筋肉とともに関節を形成し、動作を可能にしています
3. 体内のミネラル分の調整（カルシウム、リン酸塩）を行います
4. 骨内の赤色骨髄は造血を行っています

Fig. A は長い管状の骨の例として大腿骨を描いています。

Fig. A の上部： 骨頭・骨頸・骨幹・大転子部分の断面を描いています。

骨頭部分の外側にある骨膜は硝子軟骨に入り込んでいます。

骨膜の下には緻密質の層があります。緻密質は骨頭・骨頸では薄いですが骨幹に行くに従い厚くなります。緻密質には動脈・静脈が通っており、酸素や栄養分が運ばれています。

骨幹の上部、骨頭と骨頸の内部は海綿質で満たされています。

骨幹の上部では海綿質が緻密質から剥離しているように見えます。大腿骨頭の海綿質は軟骨結合（骨端線）の代表的な箇所です。発達時期における重要な伸長部位です。海綿質は骨幹では見られなくなりますが、例外として骨幹の端では緻密質と結合して存在しています。このため、髄腔が形作られ、腔内は骨髄で満たされます。

造血を行う赤色骨髄（図には描かれていません）は海綿質の網目と髄腔を満たします。成人では大腿骨骨幹内の骨髄は黄色骨髄（脂肪化した骨髄）に換わります。しかし、いくつかの骨（例：頭蓋、胸骨、手根・足根骨）では赤色骨髄が残ります。血液細胞の要求が増加すると黄色骨髄は再び造血能をもつ赤色骨髄へと変わります。

Fig. A の中部： 骨膜と骨に対する神経支配と血液供給を示しています。

周囲の動脈は骨幹に入り血管網へと分岐、最終的には栄養孔から緻密質に入ります。静脈も同様ですが、動脈とは逆の働きを持ちます。

また各骨は2つの大きな血管をもち骨髄の栄養交換の役割を果たします（栄養動脈・静脈）。この静脈から新しく作られた代謝産物と血液細胞が送り出されます。神経線維は骨膜内で網状になります（痛みに対して非常に敏感）。

Fig. A の下部： 骨膜がシャープピー繊維によって下層骨組織と結合している状態を表しています。

結合組織の膠原線維は骨膜から緻密質に入り込み強く骨と結合しており、これは骨への栄養供給に重要な役割を果たしています。また骨膜の表面には筋肉から伸びる腱の膠原繊維が扇状に広がって固着します。求心性・遠心性の血管は骨表面の開口部を通過しています。

Fig. B は海綿質の機能構造を表現しています。

大腿骨頭部にかかる体重と、下肢を動かす度に大転子と骨幹を引張る筋力によって、骨頸部と骨幹には負荷が集まります。特に末端部分の負荷が大きくなります。

そのため、骨頸部、そして特に骨幹の緻密質は非常に頑強に作られています。大腿骨内部の緻密質には圧力が、また骨の外側には引張りの負荷がそれぞれ働くこととなりますが、これらの強い力のベクトルにあわせて骨梁が海綿質内では形成されており、骨の強度を高めています。

大転子側から骨頭側に向かって横に伸びる骨梁は張力に対応し、骨頸部下部から上に向かって縦に伸びる骨梁は圧力に対抗します。張力と圧力の線は互いに直角に交差しています。

日本語

骨頭の中央部分には最も大きな剪断力がかかりますが、この部分では海綿質の密度が非常に低くなっていることで剪断の危険性を減少させています。海綿質が緻密質と混ざり合う部分では、骨単位も浸食を受けます。

Fig. C は骨の微細構造を表現しています。図の右側では骨膜が骨表面から外して描いています。骨膜は2層からなり、外層は繊維が、内層は細胞が豊富です。

発生初期では後者が軟骨部に骨質を蓄えることにより骨の肥大成長を担っています（軟骨外骨化）。

骨膜の骨形成能は通常老齢期まで失われません。

骨折の回復は両切断面が骨膜から形成された新しい骨によって再結合することで起こります。骨細胞では有機物・無機物が骨組織の合成に使われます。無機物（特に $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ と CaCO_3 ）はハイドロキシアパタイトの結晶の合成に使われます。

緻密質では層構造が見られ、有機セメント質と厚い結合組織の繊維（膠原繊維）から形成されています。

無機物が混ざることにより骨はその強度を増します。層構造の間に骨細胞があります。層構造の大部分は、5～12の円が動脈もしくは静脈を取り囲む同心円状の形状になっており、この構造をハバース層板、中心の管をハバース管と呼びます。層内の膠原繊維は平行かつらせん状にハバース管を囲んでいます。

膠原繊維は隣り合うハバース層を横断するので、右巻きと左巻きのハバース層が交互に重なるようになります。

ハバース管とそれを取り囲む層構造で形成される構造を骨単位と呼びます。骨単位は数センチの長さには達することもあり、大抵は長軸方向に対して平行に走って、骨を折れにくくします。

多様に屈曲した膠原繊維は張力や圧力といった負荷も遮るように働きます。

骨単位の間には血管との相関性を持たない介在層板があります。

緻密質の表層側は外基礎層板、内側には内基礎層板がそれぞれ平行に走り、これらも血管との相関性をもちません。内基礎層板は海綿質の層へと続きます。上部に描かれた外基礎層板の3層では、それぞれの膠原繊維の方向が隣の層板とは交差していることが確認できます。

海綿質は骨単位を持たず、並行する層を構成しています。骨膜からくる動脈はフォルクマン管を通り外基礎層板を貫通します。フォルクマン管は骨単位のハバース管へとつながります。いくつかの血管枝は内基礎層板を通り骨髄まで伸びています。

Fig. D はヘマトキシリン・エオジン（HE）染色した緻密質の顕微鏡観察象を示しています。

切片の上部では骨膜が骨組織を包んでいるのがわかります。結合組織細胞と膠原繊維が観察できます。その内側には外基礎層板があり、続いて骨単位のエリアがあります。骨単位の中心にはハバース管も見えます（動脈1本と1～2本の静脈が通っています）。

血管の周りは骨細胞が点在する特殊な層が囲んでいます。各骨単位は有機セメントで束ねられ、タンパク繊維は含みません。これが周期的な骨形成の境界線となります。個々の骨単位は介在層板によってつながっています。

HE染色では骨層内の膠原繊維は観察できず、偏光観察でのみ見ることができます。

Fig. E は骨細胞の模式図です。

骨細胞は卵形細胞で縦径 $30\mu\text{m}$ 程度です。 1mm^2 の骨組織に700～800の細胞が含まれています。

隣あう細胞とつながる分岐がおこり、これらの原形質突起により栄養分が血液（ハバース管内）から骨単位の

骨の構造

日本語

周囲へと運ばれます。骨基質（細胞間質）は多量のカルシウム塩沈着により形成されています。

骨基質は骨細胞（黄土色で示しています）の列の間に存在し、層構造に対応しています。

このチャートは医学博士D. Wenderの指導の下に作成されています。



Строение кости

Кости относятся к твердым тканям организма. Но костная ткань не ригидна. Благодаря большому количеству живой протоплазмы (костных клеток) и своей тесной связи с сосудистой системой она способна адаптироваться к изменяющимся нагрузкам за счет процессов реконструкции, которые не прекращаются даже у взрослых.

Задачи

1. Кости служат организму опорой и защищают внутренние органы.
2. Суставы с мышцами обеспечивают движение.
3. Костная ткань является частью минеральной системы организма (кальций и фосфат).
4. Красный костный мозг является важным органом гемопоэза.

Рис. А: показана бедренная кость (femur) в качестве примера длинной трубчатой кости

В верхней части рис. А представлен распил через головку, шейку, диафиз и большой вертел. С внешней стороны располагается надкостница, которая в области головки переходит в гиалиновый суставной хрящ. Под надкостницей находится толстый кортикальный слой кости (компактная кость), который тоньше в области головки и шейки, с утолщением ближе к диафизу. В компактной кости проходят артериальные и венозные сосуды, которых меньше в области шейки. Артериальная кровь снабжает кость кислородом, питательными и строительными веществами. Вены обеспечивают отток крови с низким содержанием кислорода и большим содержанием углекислого газа, уносящей из кости продукты распада и минеральные соли. Верхняя часть диафиза, шейка и головка заполнены внутри губкообразным рыхлым костным веществом (губчатая кость). В верхней части диафиза она переходит в компактную кость, на вид слоистую. В губчатой кости головки бедренной кости видна концентрическая костная полоска — признак синхондроза (эпифизеальная пластинка), — необходимая для роста кости в длину в процессе развития. Губчатая кость исчезает в диафизе, за исключением двух выступов, прикрепленных к компактной кости. Таким образом формируется медуллярная полость, заполненная костным мозгом. Красный кроветворный костный мозг (не показан на схеме) заполняет ячейки губчатой кости и полости костного мозга. У взрослых он трансформируется в желтый костный мозг (жировой костный мозг), находящийся в диафизах. Но в некоторых костях (например, черепе, грудице, костях запястий и стоп) красный костный мозг сохраняется. При повышенной потребности в клетках красного костного мозга жировой мозг может заново трансформироваться в кроветворный костный мозг.

В средней части рис. А представлены иннервация и кровоснабжение надкостницы и кости.

Артериальные сосуды из окружающих тканей входят в надкостницу, разветвляются в виде сосудистой сети и пронизывают корковое вещество по каналам. Вены проходят тот же путь, но в обратном порядке. Кроме этого, каждая кость имеет 2 крупных сосуда, которые разветвляются для доставки крови в костный мозг. Кроме катоболитов, вены также выносят вновь образовавшиеся клетки крови. Тонкие нервы образуют сплетения в надкостнице (очень чувствительной к боли).

В нижней части рис. А показана отогнутая надкостница, прикрепленная к кости Шарпеевскими волокнами. Коллагеновые волокна соединительной ткани проникают из надкостницы в кортикальное вещество и обеспечивают надежное прикрепление к кости, что важно для питания костной ткани. Кроме этого, коллагеновые волокна мышечных сухожилий веерообразно фиксируются в надкостнице, обеспечивая точное функционирование при помощи Шарпеевских волокон. Приносящие и выносящие сосуды кости входят или выходят через отверстия на поверхности кости.

На рис. В представлена функциональная архитектура губчатой кости. Масса тела, действующая на головку бедра, и мышцы, которые тянут вверх на большом вертеле и внутрь — на диафизе, подвергают шейку бедренной кости и диафиз деформации изгиба. Деформация изгиба является максимальной по краям объекта нагрузки, поэтому кортикальное вещество шейки и, особенно, диафиза развито наиболее сильно. Кортикальное вещество внутренней части бедренной кости подвергается компрессионной

нагрузке, напряжению растяжения и извне. Пластинки губчатой кости ориентированы с учетом максимальной деформации растяжения или компрессии. Линии наибольших нагрузок называются траекториями. Губчатая кость имеет траекторную структуру. Система большой траектории, которая проходит от латерального кортикального вещества до нижней части головки, поглощает деформацию растяжения, в то время как две линии губчатой кости, идущие до большого вертела и головки бедренной кости, являются компрессионными траекториями. Траектории растяжения и компрессии перпендикулярны друг к другу. В центре шейки бедренной кости губчатая кость максимально разрежена и ослаблена. В данной области напряжение сдвига, которое обычно наиболее выражено в центре объекта нагрузки, достигает своего максимума. Отсутствие костного материала в данном месте снижает опасное напряжение сдвига. В тех местах, где губчатая кость входит в кортикальное вещество, ее функциональная архитектура продолжается зоной остеонов.

На рис. С представлено гистологическое строение кости. В правой части рисунка надкостница отсоединена от поверхности кости. Соединительнотканная надкостница состоит из 2 слоев: внешнего слоя, богатого волокнами, и внутреннего слоя, богатого клетками. В эмбриональном периоде последний отвечает за рост кости в толщину (перихондральная оксификация) путем отложения костных веществ на ранее сформированной хрящевой части скелета. Способность надкостницы формировать кости обычно сохраняется вплоть до пожилого возраста. Срастание перелома достигается путем соединения концов кости в процессе нового периостального остеогенеза.

Кроме клеток кости (остеоцитов), в структуру костной ткани также входят органические и неорганические вещества. Неорганические вещества (в частности, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и CaCO_3) существуют в виде кристаллов гидроксиапатита. Кортикальное вещество имеет пластинчатую структуру, в его состав входит органическое цементное вещество и плотные волокна соединительной ткани (коллагеновые волокна). Интеграция неорганического материала обеспечивает твердость кости. Остеоциты расположены между пластинами. Большая часть пластин концентрически сгруппирована по 5-12 штук вокруг артериальных и венозных сосудов, которые называются гаверсовыми сосудами, или особыми пластинами. В пределах пластины коллагеновые волокна сгруппированы параллельно и спирально охватывают гаверсов канал. Однако их пересекают плотные коллагеновые волокна прилежащих пластин. Таким образом, пластины с правыми витками коллагеновых волокон чередуются с таковыми с левыми витками. Соединение прилежащих пластин обеспечивается пучками волокон, выходящих за пределы этой структуры.

Гаверсов канал и окружающие системы пластин формируют остеон. Он может достигать длины в несколько сантиметров и обычно расположен параллельно продольной оси кости и составляет функциональную единицу кортикального вещества.

Возникшие деформации растяжения и компрессии нейтрализуются различными изгибами коллагеновых волокон. Между остеонами находятся ламеллярные системы, не связанные с кровеносными сосудами (интерстициальные пластины). Пластины с параллельными поверхностями (внешние и внутренние костные пластины), которые также не имеют характерной связи с сосудами, сгруппированы на границе кортикального вещества. Внутренние костные пластины переходят в пластины губчатой кости. В верхней части рисунка 3 наружные костные пластины показаны отдельно, демонстрируя перекрестный ход коллагеновых волокон. Губчатая кость не имеет остеонов. Она состоит из параллельных пластин. Артериальные сосуды кости идут от надкостницы и пронизывают наружные костные пластины в канале Фолькмана, у которых нет концентрических ламеллярных систем. Сосуды Фолькмана проходят через остеоны и питают гаверсовы сосуды. Некоторые сосудистые ветви проходят через внутренние костные пластины к костному мозгу.

На рис. D представлена микроскопическая картина среза компактной кости, окрашенной гематоксилин-эозином (ГЭ).

В верхней части среза соединительнотканная надкостница покрывает костную ткань. Видны клетки соединительной ткани и коллагеновые волокна.

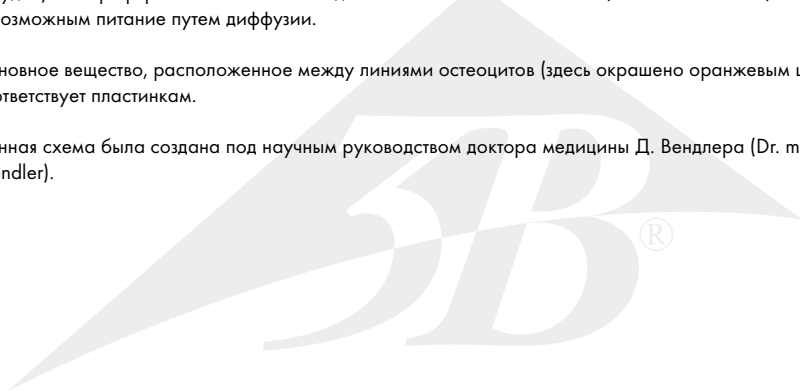
К ним прилегают внешняя костная пластина и зона остеонов. В центре остеона располагаются гаверсовы сосуды (1 артерия и 1-2 вены). Особые пластины с рассеянными остеоцитами располагаются вокруг сосудов. Каждый остеон окружен с внешней стороны (как другие группы пластины) цементной линией из органических веществ без волокон (линии синего цвета). Это линии границ ритмического остеогенеза. Отдельные остеоны соединяются интерстициальными пластинами.

На срезе с окраской ГЭ ход коллагеновых волокон в пределах пластины выделить невозможно. Он становится видимым только при изучении среза в поляризованном свете.

На рис. Е схематично представлены остеоциты в различных разрезах. Остеоцит — это овальная клетка с продольным диаметром 30 мкм. 1 мм² костного вещества содержит 700-800 клеток. Многочисленные разветвленные отростки отходят от каждой клетки и соединяются с отростками соседних клеток. При помощи этих протоплазматических отростков питательные вещества попадают из крови (гаверсовых сосудов) на периферию остеона. Необходимость включения солей кальция в основное вещество делает невозможным питание путем диффузии.

Основное вещество, расположенное между линиями остеоцитов (здесь окрашено оранжевым цветом), соответствует пластинкам.

Данная схема была создана под научным руководством доктора медицины Д. Вендлера (Dr. med. D. Wendler).



骨骼属于有机组织的硬质物质。但是骨组织却并非硬质。由于其中存在大量活质原生质（骨细胞），并且与血管系统之间有狭窄连接，因此能够通过重建的过程而对变化的应变情况加以适应，这样的过程在成年人身体中永远不停止。

任务

1. 骨骼的作用在于为身体提供支撑，并为内部器官提供保护。
2. 与肌肉之间的关节使得骨骼可以活动。
3. 骨骼参与到人体的矿物质体系之中（钙和磷）
4. 红骨髓是具备造血功能的重要器官。

图 A 展示了大腿骨（股骨）的图片，作为对长管状骨的示例。

图 A 的上半部分表现的是从头部、颈部、骨干和大转子的锯痕。外部是骨膜，位于顶部进入透明关节软骨的区域。骨膜之下，是骨头（密质骨）的厚皮质层，在顶部和颈部厚度小，朝向转子厚度逐渐增加。密质骨中含有的动脉和静脉血管，在朝向颈部位置也越来越稀少。动脉血为骨骼提供氧气、营养物质和骨骼构造物质。静脉排出血液，其中含氧量低，二氧化碳含量高，并从骨骼中携带走降解产物和矿物质。上骨干区域、颈部和顶部的内部填充有弹性胶状的骨性物质（骨松质）。在骨干的上部，密质骨似乎是叶片状。在股骨顶部的骨松质中，可见密集的骨质条带，作为软骨连接的标记（骨骺板盘），对于发育期骨骼长度的增加极为重要。骨干中不存在任何骨松质，只有少量呈片状与密质骨相连接。就这样，形成了骨髓填充其中的髓腔。骨松质的空隙以及骨髓腔之中填充有自体红骨髓（图中略去）。在成人体内，是在骨干之中转化为黄色骨髓（黄骨髓）的。但是在某些骨骼之中（比如：头盖骨、胸骨、腕骨和跗骨），包含红骨髓。如果出现了对比血液细胞的更高需求，黄骨髓可以重塑成为造血红骨髓。

图 A 的中间部分展示了骨膜和骨骼的神经分配和血液供应。周围的动脉血管进入骨膜，成枝杈状进入血管网，并最终通过管道渗入皮质。静脉的路径相同，但是方向相反。除此之外，每根骨骼还有两个较大血管，存在分支，以供应骨髓。除了代谢物之外，静脉还运送新生成的血液细胞。在骨膜之中细小的神经形成神经丛（对于疼痛非常敏感）。

图 A 的下半部分列出了翻转的骨膜通过夏比骨纤维与骨骼相连。结缔组织的成胶纤维从骨膜深入到皮质之中，并确保与骨骼之间有稳定连接，这对于骨骼的营养而言是很重要的。除此之外，这里还存在肌腱的胶原纤维，在骨膜中如扇状固定，通过夏比骨纤维确保其准确的功能。骨骼的输出和输入管通过骨骼表面的空隙进入或者引出。

图 B 给出的是骨松质的功能结构。身体的重量作用于股骨的端部，在大转子位置肌肉向上拉伸，或者在骨干位置向内拉伸，让股骨颈部以及骨干承受弯曲应变。在受力身体的边缘，弯曲应变最大。因此，颈部的皮质，特别是骨干部分发育更强。股骨内部的皮质受到压缩应力，其外部受到拉伸应力。骨松质的片层在最大拉伸或者最大压缩应力之中调节。最大应变线被称为轨迹线。骨松质具有轨迹线构造。大轨迹系统从外侧皮质伸出，到达顶部的下部，适合于拦截拉伸应变，而到达大转子和股骨顶部的骨松质的两条线则为压缩轨迹。拉伸和压缩轨迹线彼此垂直。在股骨颈部的中心，骨松质大量减少，甚至不含骨松质。在这一区域，在受力体中间总是最大的剪切应变达到其最大值。在此位置缺少骨骼物质，从而降低了危险的剪切应变的发生。如果骨松质进入皮质的区域，通过骨单位的流动延续其功能结构。

图 C 给出的是骨骼的细部结构。在图的右边，骨膜从骨骼表面上剥离。结缔组织骨膜包含两层：外层，富含纤维；内层，富含细胞。在胚胎期，骨膜内层不再于骨头厚度上生长（软骨膜骨化），而是沉积骨质于骨骼的类软骨预先成形部分。骨膜成骨的能力通常到年老时都不会衰竭。骨折愈合是接合一个新的骨膜成骨两端而实现的。

除了骨细胞（骨细胞）之外，有机物质和无机物质也是骨组织的构成部分。无机物质（特别是 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 CaCO_3 ）以羟基磷灰石晶体的形式存在。骨松质呈现片层结构，其中包含有机胶物质，具有强有力的结缔组织纤维（胶原纤维）。通过把无机物质纳入其中，骨骼产生了硬度。骨细胞位于片层之间。片层的较大部分成同心状5至12个为一组分布在被称为哈弗斯管或者特殊片层

的动脉或者静脉血管周围。在片层之中，胶原纤丝平行或螺旋分布，覆盖于哈弗氏管之上。但是，相邻片层中牢固的胶原纤丝与之交错。这样，向右弯折的胶原纤丝与向左弯折的胶原纤丝相互交错。相邻片层的连接通过纤维束实现。

哈弗斯血管和周围的骨板层系统构成骨单位。长度可达数个厘米，一般来讲是与骨骼的纵轴平行，构成皮质的功能统一体。

拉伸应力和压缩应力通过胶原纤丝的交错缠绕而受到阻挡。与血管无关的薄层系统（间骨板）在骨单位之间分布。具有平行表面的片层（外部和内部骨片层），与血管也无显著关系，分布在皮质的边界。内部骨片层越过骨松质的片层。在图3的上部，单独展示了外部骨片层，列出了胶原纤丝的交错成束分布。骨松质中不含骨单位。其中包含平行片层。

骨骼之中的动脉血管来自于骨膜，进入曼氏管中的外部骨骼片层，其中并不具备同心层状系统。某些血管枝通过内部骨片进入骨髓之中。

图.D 列出的是显微镜图片之中涂色的密质骨，使用苏木素伊红HE染色。

在这一部分的顶部，由结缔组织骨膜覆盖着骨组织。结缔组织细胞和胶原纤维可见。

相邻的是外骨片和骨单位区域。在骨单位的中心，是哈弗斯血管（1条动脉以及1或者2条静脉）。具有分散骨细胞的特殊片层在血管周围分布。各个骨单位通过不含有纤丝的有机物的黏合线（蓝色线）与外界形成边界（与其他片层组类似）。它们是节律性骨生成的边界线。各个单独的骨单位通过间骨板连接在一起。

在一个HE截面之中，无法识别在片层中的胶原纤维束。只有当在偏振光之下查看这一截面，才可见到胶原纤维束。

图.E 中用图解的方式列出了不同切面的骨细胞。骨细胞为椭圆形细胞，其长直径为 $30\ \mu\text{m}$ 。1 mm²骨骼物质之中包含有700至800个细胞。存在来自于各个细胞的无数分枝的过程，从而使其与相邻细胞联为一体。通过这些原生质过程，营养物质从血液中（哈弗斯血管）送入到骨单位的周围。基础物质中所含有的钙盐不可能发生营养扩散。

基础物质位于骨细胞线之间（黄褐色应变线），与片层相对应。

本章是在医学博士Wendler的科学指导之下完成的。

Kemikler organizmanın sert maddeleri arasında yer alır. Fakat kemik doku sert değildir. Çok miktardaki canlı protoplazma (kemik hücresi) ve damar sistemiyle olan dar bağlantıları sayesinde yetişkinlerde bile devam eden yeniden oluşma süreçleri ile değişen yük ve gerilim durumlarına uyum sağlayabilir.

Görevleri

1. Kemikler iç organları destekler ve korur
2. Kaslara bağlı olan eklem hareket etmeyi sağlar
3. Kemikler vücudun mineral sistemi içinde yer alır (kalsiyum ve fosfat)
4. Kemik iliği önemli bir hematopoiez organıdır.

Şekil. A' da uzun tubuller tip kemiğe örneği olarak uyluk kemiği (femur) gösterilmiştir.

Şekil A'nın üst kısmı kafadan, boyundan, kemik gövdesi (diyafizden) ve büyük trokanterden kesilmiş bir kısmı gösterir. Dış kısım kafa bölgesinde saydam eklem kıkırdağına giren periost (kemik dış zarı) ile kaplıdır. Periostun altında kafa ve boyun bölgesinde ince olan fakat kalınlığı diyafize doğru artan kalın kortikal (kabuksal) kemik katmanı (sert kemik) vardır. Sert kemik boyun bölgesine doğru azalan arter ve toplardamarlar içerir. Arterial (temiz) kan kemiklere oksijen, besin ve katkı maddeleri sağlar. Damarlar oksijeni az, karbon dioksit bakımından zengin olan ve yıkım ürünleri ile mineral tuzları taşıyan kanı kemiklerden boşaltırlar. Üst diyafiz bölgesi, boyun ve kafanın iç kısmı süngersi ve yumuşak kemik maddesiyle (süngerimsi kemik) doludur. Diyafiz bölgesinin üst kısmında sert kemiğin üstüne çıkar ve katmanlı bir görünüm oluşturur. Femur başındaki süngerimsi kemikte bulunan konsantrite kemiğimsi şerit, sinkondroz (epifizeal disk) işareti olarak görülebilir ve bu, gelişme sürecinde kemiğin uzaması için önemlidir. Süngerimsi kemik sert kemiğe bağlı olan birkaç kenar dışında diyafiz-in içerisinde kaybolur. Bu şekilde, kemik iliği ile dolu medüller kavite şekillenir. Kırmızı hematobenik kemik iliği (şemada gösterilmemiştir) süngerimsi kemiği ve ilik boşluklarını örgülerle doldurur. Yetişkinlerde bu, diyafizde sarı kemik iliğine dönüşür. Fakat bazı belirli kemiklerde (örneğin kafatası kemiği, göğüs kemiği, el ve ayak bileği kemiklerinde) kırmızı kemik iliği tutulur. Eğer kan hücresine duyulan ihtiyaç artarsa, sarı ilik tekrar hematobenik kemik iliğine dönüşebilir.

Şekil A'nın orta kısmı inervasyonu (sinir sistemine bağlanmayı) ve periost ve kemik için kan akışını gösterir. Çevredeki arter damarlar periosta (kemik zarına) girerler, damarsal bir ağ oluşturarak kollara ayrılırlar ve kanallarla kabuk maddeye nüfuz ederler. Venler (damarlar) da aynı yolu tersten kullanırlar. Bununla beraber her kemiğin kemik iliği sağlamak için dallanan 2 tane geniş damarı (kanalı) vardır. Katabolitlerin yanı sıra, damarlar yeni oluşturulmuş kan hücrelerini de taşırlar (iletirler). İnce sinirler periosta pleksileri oluştururlar (acıya oldukça duyarlıdır).

Şekil A'nın alt kısmı Sharpey lifleri sayesinde kemiğe tutunan kıvrık periostu gösterir. Bağ dokusunun kolajen lifleri periosttan kabuk maddeye nüfuz eder ve kemiğin beslenmesi için önem teşkil eden bir bağ ile kemiğe sıkıca bağlanırlar. Bunun yanı sıra, buraya bağlanan kas tendonlarının buraya bağlanan kolajen lifleri kendilerini periost içerisinde yelpaze biçimine getirirler, ki bu da Sharpey lifleri aracılığıyla hassas bir işlev sağlar. Kemiğin götürücü (efferent) ve taşıyıcı (deferent) damarları, kemik yüzeyindeki delikler sayesinde kemiğe girip çıkarlar.

Şekil B süngerimsi kemiğin işlevsel mimarisi hakkında bilgi verir. Femur başına uygulanan vücut ağırlığı, büyük trokanterde (uyluk kemiği yumrusu) yukarı doğru çeken ya da diyafizde içeri çeken kaslar, özellikle femur boyununu ve diyafizi eğilme gerginliğine maruz bırakır. Eğilme gerginliği yüklü bir vücudun kenarlarında en büyük değerlere ulaşır. Bu yüzden boynun kabuksu maddesi ve özellikle diyafizin kabuksu maddesi daha güçlü şekilde gelişir. Femurun içindeki kabuk madde basınç gerilimini, dış kısım ise çekme gerilimini karşılar. Süngerimsi kemiğin lameli, büyük çekme ve basınç gerilimlerine uygun olacak şekilde ayarlanmıştır. Büyük gerilim hatları trajektör olarak adlandırılmıştır. Süngerimsi kemiğin trajektör bir yapısı vardır. Büyük trokantere ve femur başına ulaşan süngerimsi kemiğin 2 hattı basınç gerilimlerine dayanan trajektörlerdir, lateral kabuk maddeden başın alt kısmına doğru uzanan büyük trajektör sistemi ise çekme gerilimlerine müdahale etmeye uygundur. Çekme ve basınç trajektörleri birbirlerine dikeydirler. Femur boynunun merkezinde süngerimsi kemik genellikle az ve seyrek. Her zaman yüklü bir vücudun ortasında en yüksek değerde olan kesme gerilimleri bu bölgede maks-

muma ulaşır. Bu bölgedeki kemiksi maddelerin yokluğu tehlikeli kesme gerilimlerini azaltır. Süngerimsi kemiğin kabuk maddeye girdiği kısımlarda ise, işlevsel mimari osteon akışıyla devam ettirilir.

Şekil C kemiğin ayrıntılı yapısına dair fikir verir. Şeklin sağ tarafında periost, kemik yüzeyinden ayrılmıştır. Periostun bağ dokusu, lif bakımından zengin olan dış katman ve hücre bakımından zengin olan iç katman olmak üzere 2 katmandan oluşur. Embryoda iç katman, iskeletin kıkırdak olarak önceden şekillendirilmiş kısımlarında kemik maddelerini depolayarak kemik kalınlığındaki büyümeyi devam ettirir (perikondral kemikleşme- kıkırdak zarı kemikleşmesi). Periostun kemik şekillendirme kapasitesi genellikle geç yaşlara kadar devam eder. Kırıklar, her iki ucun yeni bir periostal kemik oluşumu ile birleşmesiyle tedavi edilir.

Kemik hücrelerinin (osteositler) yanı sıra, organik ve inorganik maddeler de kemik dokunun oluşturulmasında görev alırlar. İnorganik maddeler [özellikle (Ca₃ (PO₄)₂ ve Ca CO₃)] hidroksilapatit kristaller şeklinde ortaya çıkarlar. Kabuk madde sıkı bağ doku lifleriyle (kolaj teller) organik çimento maddesinden oluşan katmanlı (lamel) bir yapı gösterir. İnorganik maddelerin entegrasyonu kemik sertlik kazanır. Osteositler lameller arasında konumlanmışlardır. Lamellerin büyük kısmı, Haversian damarlar olarak adlandırılan arter ya da toplardamar çevresinde ya da özel lamel çevresinde 5 ile 12'lik gruplar halinde eş merkezli olarak toplanmışlardır. Lamel içinde kolajen lifler paralel bir şekilde bir araya gelmiş ve helisel olarak Haversian kanalını kaplamışlardır. Ancak, bitişikteki lamellerin sıkı kolajen lifleri bunları çapraz keser. Böylelikle, kolajen lifler sağa dönük olan lameller, sola dönük olanlarla alternatif çalışabilir. Bitişikteki lamellere bağlantı, hat dışına çıkan fibril kümeler sayesinde gerçekleştirilir.

Haversian kanalı ve çevresindeki lamel sistemleri osteonu oluştururlar. Birkaç santimetre uzunluğa ulaşabilirler, genellikle kemiğin boy eksenine paralel ilerlerler ve kabuk maddenin işlevsel bütünlüğünü oluştururlar.

Çekme ve basınç gerilimi oluşumları, muhtelif kolaj sargıları tarafından durdurulur. Kan damarlarıyla ilişkisi olmayan lamel sistemler (interstisyel lamel) osteonlar arasında yer alır. Yine damarlarla karakteristik ilişkisi olmayan paralel yüzeyli lameller (dış ve iç kemik lameli) de kabuk madde sınırlarında yer alırlar. İç kemik lameli, süngerimsi kemiğin lamelinin üzerinden geçer. Şekil 3'ün en üst kısmında dış kemik lamelleri ayrı ayrı olarak kolaj fibrillerin çapraz akışlarını göstermektedir. Süngerimsi kemikte osteon yoktur. Paralel lamellerden oluşur. Kemiğin atardamarları periosttan gelir ve konsentrik lamel sistemi olmayan Volkmann kanallarından dış kemik lameline nüfuz eder. Volkmann kanalları osteonlardan geçer ve Havers (Haversian) kanallarını beslerler. Bazı damarlar (damar dalları) iç kemik lameli boyunca kemik iliğine nüfuz ederler.

Şekil D, mikroskopik resimde hematoksilen eosin (HE) ile işaretli olarak görülen, sert kemiğin bir bölümünü gösterir. Bölümün en üst kısmında, periost bağ dokusu kemik dokuyu kaplar. Bağ doku hücreleri ve kolajen lifler görülebilir. Dış kemik lameli ve osteon bölgesi bitişiktedir. Bir osteonun merkezinde Havers (Haversian) kanalları bulunur (1 atardamar ve 1 ya da 2 toplardamar). Serpiştirilmiş kemik hücreleriyle özel lameller damarların çevresinde bulunurlar. Her bir osteon fibrillerden bağımsız organik maddelerle (mavi hatlar) dış kısma bağlıdır (lamel grupları gibi). Bunlar ritmik osteojenezin (kemik doku oluşumu) sınır çizgileridir. Her bir osteon interstisyel lamel tarafından bağlanmış. HE bölümünde lamel içerisindeki kolajen fibril akımı seçilemez/fark edilemez. Yalnızca polarize ışıkta bakıldığında görülebilir.

Şekil E farklı kesitlerdeki osteositleri grafiksel olarak gösterir. Bir osteosit 30 µm çapında oval bir hücredir. Kemik maddesinin 1 mm²' si 700 ile 800 arası hücre taşır. Çok sayıda dallanma işlemi, komşu hücrelerle birleşen hücreler aracılığıyla oluşur. Bu protoplazmik süreçler sayesinde besinler kandan (Havers kanalı) osteon merkezine iletilir. Ana maddenin içindeki kalsiyum tuzları difüzyon ile beslenmeyi imkânsız kılar.

Osteosit hatları arasında bulunan ana madde lamelle uyumludur.

Bu grafik Dr D. Wandler'in bilimsel direktifleri ışığında hazırlanmıştır.

3B Scientific

A worldwide group of companies



3B Scientific GmbH

Rudorffweg 8 • 21031 Hamburg • Germany

Tel.: + 49-40-73966-0 • Fax: + 49-40-73966-100

www.3bscientific.com • 3b@3bscientific.com

© Copyright 1998 / 2014 for instruction manual and design of product:
3B Scientific GmbH, Germany