

PODSTAWY BIOMECHANIKI

Mechaniczne i fizyczne właściwości struktur kostno-stawowych człowieka

Kinematyka połączeń stawowych

Adaptacja funkcjonalna kości

Wykład 4:





Kości w ciele człowieka

Kości powstają już w życiu płodowym człowieka. Wtedy też zaczyna się ich rozwój, który kończy się w momencie osiągnięcia przez człowieka dojrzałości płciowej.

Same kości nie mają zdolności poruszania się, jednak dzięki współpracy z mięśniami umożliwiają ruch poszczególnych części ciała człowieka, tworząc bierną część układu ruchu. Stanowią one rusztowanie i podporę dla mięśni, ale też ochraniają narządy wewnętrzne, magazynują sole mineralne i pełnią funkcję krwiotwórczą.

Ciało człowieka składa się zwykle z 206 kości – 80 w szkielecie osiowym i 126 jako dodatkowych. Wykazują one dużą różnorodność kształtów, która zależy od funkcji, jaką pełnią w organizmie, oraz siły nacisku ze strony sąsiadujących z nimi mięśni i innych kości.



Rodzaje tkanki łącznej

Bierne elementy układu ruchu zbudowane są z różnych rodzajów tkanki łącznej:

- Tkanka łączna zbita składa się z włókien biegnących w jednym kierunku, zwartych i przylegających do siebie. Włókna te zbudowane są z kolagenu i elastyny zapewniającej sprężystość i dużą wytrzymałość (ścięgna, więzadła, torebki stawowe).
- Tkanka chrzęstna pełni rolę tkanki podporowej (powierzchnie stawowe, zakończenia żeber, w nosie i małżowinie usznej).
- Tkanka kostna składa się z komórek kostnych (osteocyty, osteoblasty i osteoklasty) i twardej, zbitej substancji międzykomórkowej przesyconej nieorganicznymi solami wapnia. Na powierzchni kości substancja ta tworzy zwartą istotę zbitą.



Tkanka chrzęstna

Tkanka chrzęstna to jedna z rodzajów tkanki łącznej szkieletowej, potocznie nazywana chrząstka. Mówi się o niej jako o tkance podporowej.

Zbudowana jest z komórek chrzęstnych, czyli chondrocytów oraz tzw. amorficznej substancji międzykomórkowej. Ta z kolei składa się głównie z kwasu hialuronowego i proteoglikanów. Żaden z elementów tkanki chrzęstnej nie zawiera naczyń limfatycznych ani krwionośnych. Jest słabo zmineralizowana i nie jest unerwiona. Pokryta jest substancją zwaną ochrzęstną.

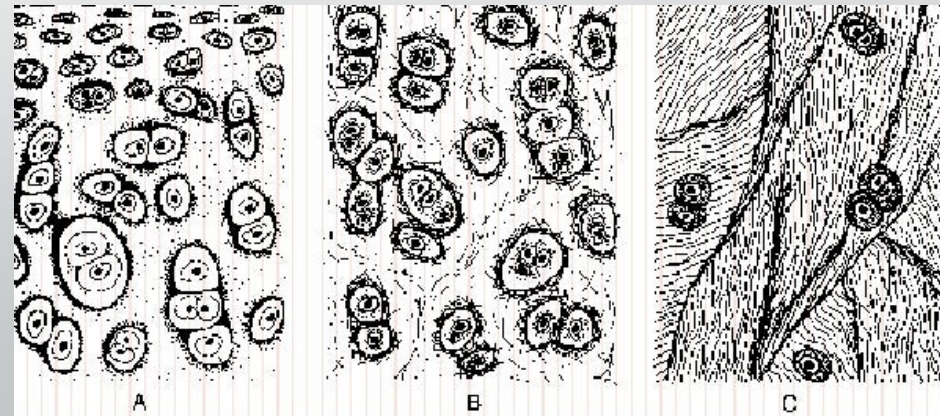
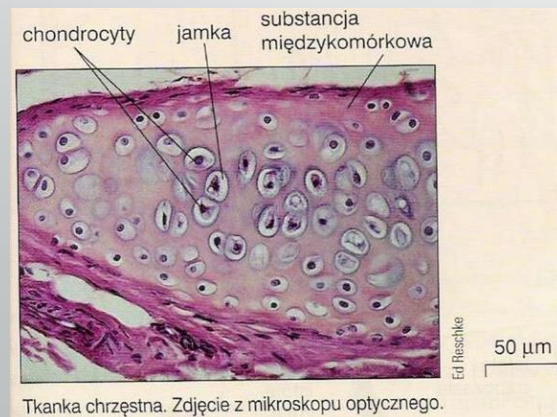
Tkanka chrzęstna spełnia w organizmie funkcje podporowe, co oznacza, że odpowiada za tworzenie powierzchni stawów, stabilizuje szkielet, łącząc ze sobą wszystkie elementy układów: kostnego i mięśniowego. Dzięki temu, że chrząstka międzystawowa jest wytrzymała, gładka i umożliwia łagodne przemieszczanie się elementów kostnych między sobą, zapewniając odpowiednią płynność ruchów. Zapewnia to elastyczność i odporność na urazy.



Tkanka chrzęstna

Wśród komórek tkanki chrzęstnej wyróżnia się kilka rodzajów. Różnią się one od siebie budową, proporcjami oraz funkcją w organizmie:

- tkanka chrzęstna szklista (A) - posiada gładką, twardą powierzchnię i zbudowana jest z silnych włókien kolagenowych. Tworzy elementy stawów, chrząstki krtani, tchawicy i oskrzeli, a także część żeber.
- tkanka chrzęstna sprężysta (B) - cechuje się dużą elastycznością, dlatego obecna jest przede wszystkim w małżowinach usznych, nosie, a także tworzy niektóre części krtani.
- tkanka chrzęstna włóknista (C) - odpowiada za tworzenie ścięgien i więzadeł. Również składa się głównie z kolagenu, ale innego typu, niż tkanka szklista. Dzięki temu jest bardziej elastyczna. Tworzy dodatkowo krążki międzykręgowe, chrzęstne części spojów łonowych oraz tzw. łąkotki w kolanach.





Tkanka kostna

Tkanka kostna jest podstawowym składnikiem budulcowym kości. Tworzy ich główny element konstrukcyjny, decydujący o kształcie, wielkości i wytrzymałości kości.

W skład tkanki kostnej wchodzi komórki kostne (osteoblasty, osteoklasty, osteocyty) oraz substancja międzykomórkowa, która zawiera zarówno elementy organiczne, jak i nieorganiczne. Do tych pierwszych należy głównie duża ilość włókien białkowych (w tym przede wszystkim kolagenu), do drugiej – związki mineralne, głównie sole wapnia i magnezu. Są to w znacznej mierze sole fosforanowe (hydroksyapatyty).

Procentowy skład tkanki kostnej to:

- związki organiczne (osseomukoid i osteoalbuminoid): 30-50%
- związki nieorganiczne (mieszanka soli wapniowych): 30-35%
- woda: 15-40%.

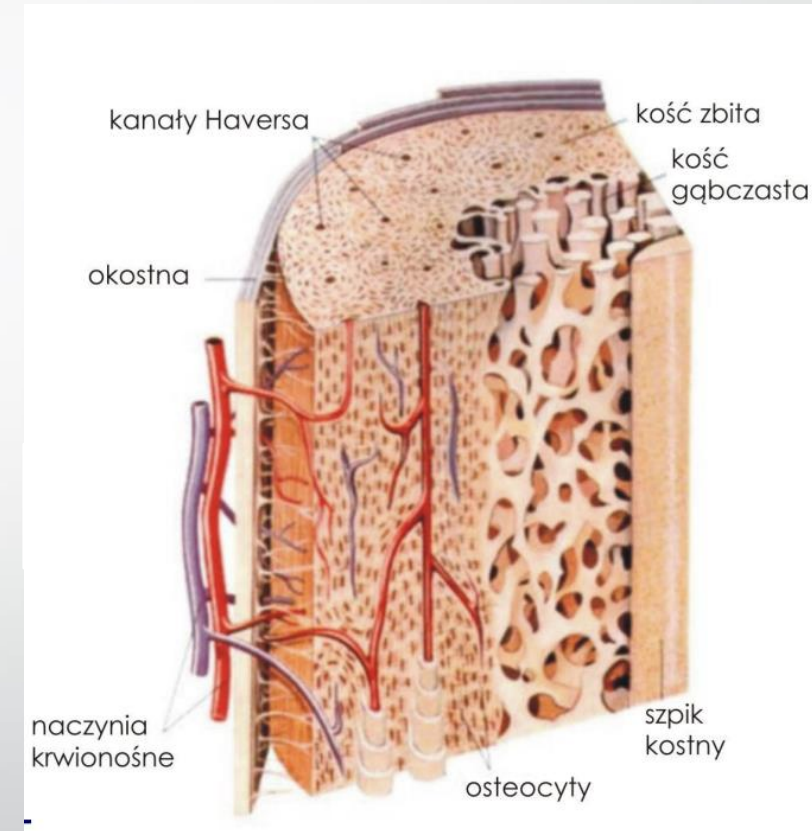
W zależności od ułożenia blaszek kostnych tkankę kostną dzieli się na gąbczastą i zbitą.



Tkanka kostna

Tkanka gąbczasta (istota gąbczasta), to rodzaj drobno włóknistej tkanki kostnej. Blaszki kostne układają się w luźne beleczki kostne. Pomiędzy nimi znajduje się szpik kostny czerwony, który jest miejscem tworzenia komórek krwi. Istotę gąbczastą znaleźć można w nasadach kości długich i we wnętrzu kości płaskich, krótkich i różnokształtnych.

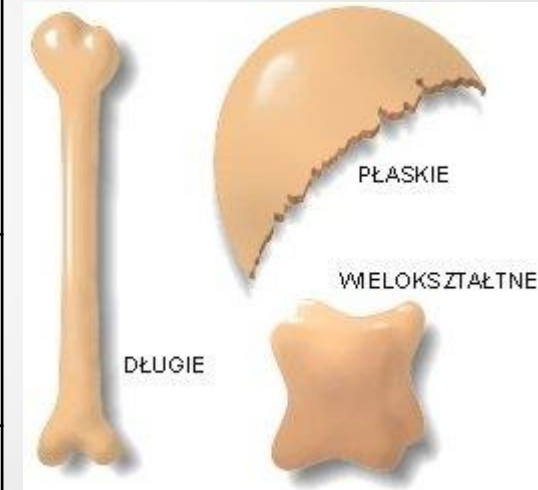
Tkanka kostna zbita zbudowana jest z koncentrycznie ułożonych blaszek kostnych. Składa się ona z tzw. osteonów, w których znajduje się kanał Haversa, gdzie znajdują się naczynia krwionośne. Ten rodzaj tkanki można znaleźć w czaszce i w trzonach kości długich.





Rodzaje i funkcje kości

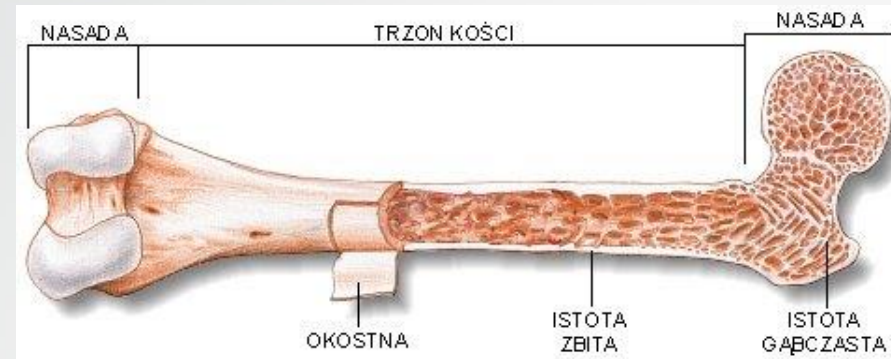
Rodzaje kości	Wymiary	Funkcja	Przykłady
Długie (łac. ossa longa)	długość większa niż szerokość i grubość	dźwignia, podpora ciała	kość udowa, kość piszczelowa, kość strzałkowa, kość ramienna, kość promieniowa, kość łokciowa oraz obojczyk
Krótkie (łac. ossa brevia)	długość, szerokość, grubość są do siebie zbliżone	precyzyjne, złożone ruchy	kości nadgarstka, kości stępu
Płaskie (łac. ossa plana)	długość, szerokość większe od grubości	osłona narządów, powierzchnie przyczepu mięśni	łopatka, mostek, kość biodrowa, kości sklepienia czaszki
Różnokształtne (łac. ossa multiformia)	nieregularne, tworzą różnowymiarowe bryły	osłona narządów, miejsce przyczepu mięśni	kręgi kręgosłupa, kosteczki słuchowe, zuchwa
Trzeczki skostniałe fragmenty ścięgien (łac. os sesamoideum)	płaskie zwykle o trójkątnym kształcie	ochrona ścięgna przed degradacją wskutek przeciążeń- oddalenie ścięgna od osi ruchu w stawie	rzepka, trzeczki palucha, trzeczki kciuka



TRZECZKA - RZEPKA



Struktura kości długiej



Kości długie, niezależnie od lokalizacji, mają podobną budowę. Anatomicznie dzieli się je na trzon (rurowatą część decydującą o całkowitej długości), przynasady i nasady.

Nasady są elementami znajdującymi się na obu końcach kości. Zwykle są one w przekroju większe niż trzon. Znajdują się na nich powierzchnie stawowe. Mogą tworzyć głowę kości lub różnego kształtu tzw. kłykcie – zaoblone zakończenia, będące zwykle elementami stawów przegubowych (zawiasowych).

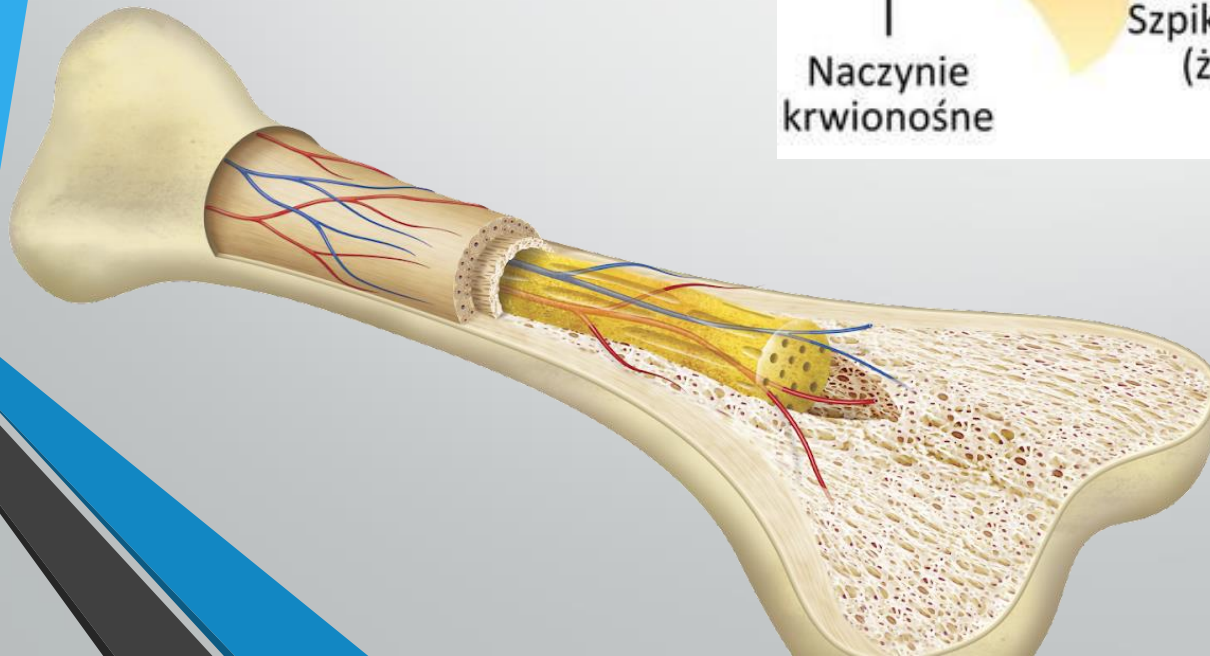
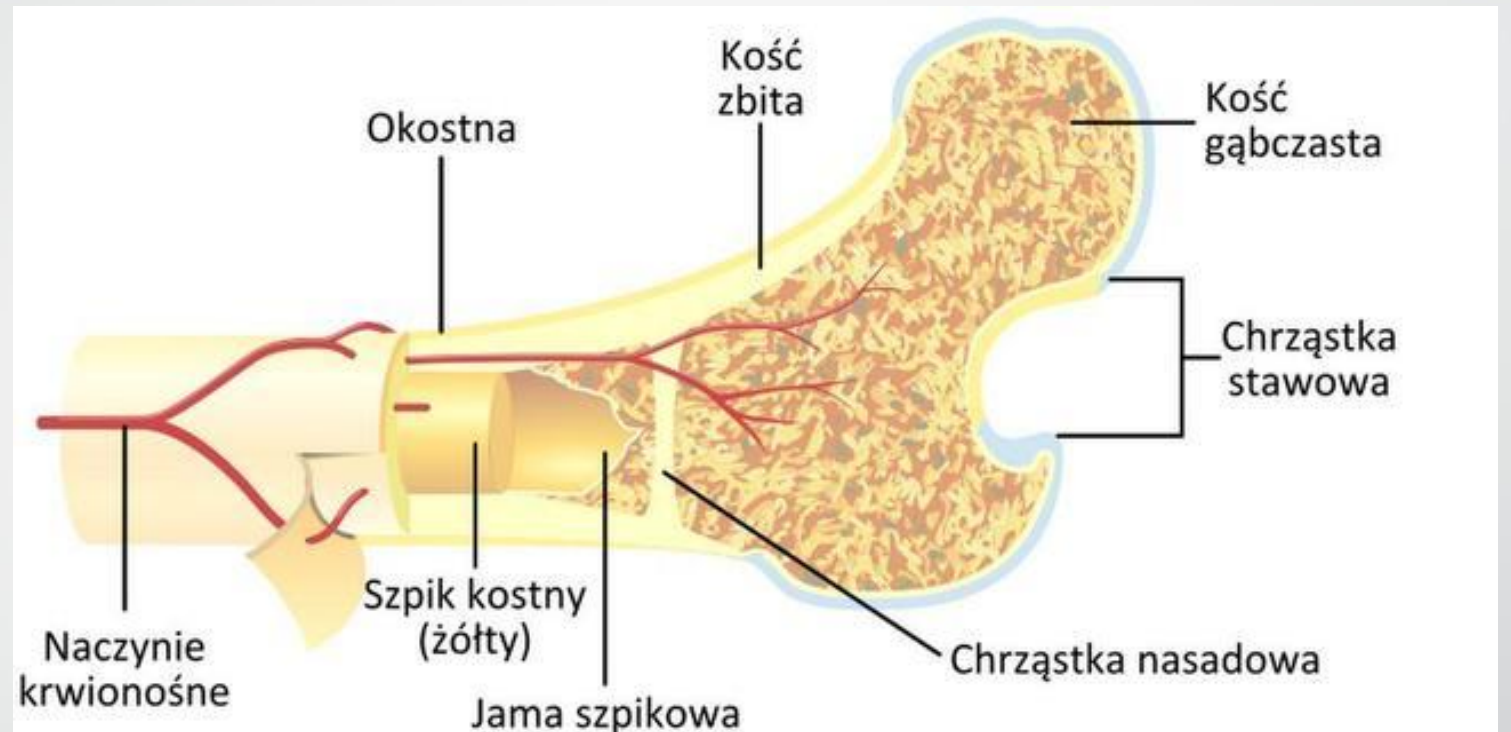
Przynasady to części spajające nasady z trzonami.

Kość pokryta jest mocną, elastyczną błoną łącznotkankową nazywaną okostną.

Wewnętrzne przestrzenie kości wypełnia szpik produkujący komórkowe (morfotyczne) składniki krwi – erytrocyty, leukocyty i płytki.



Struktura kości długiej

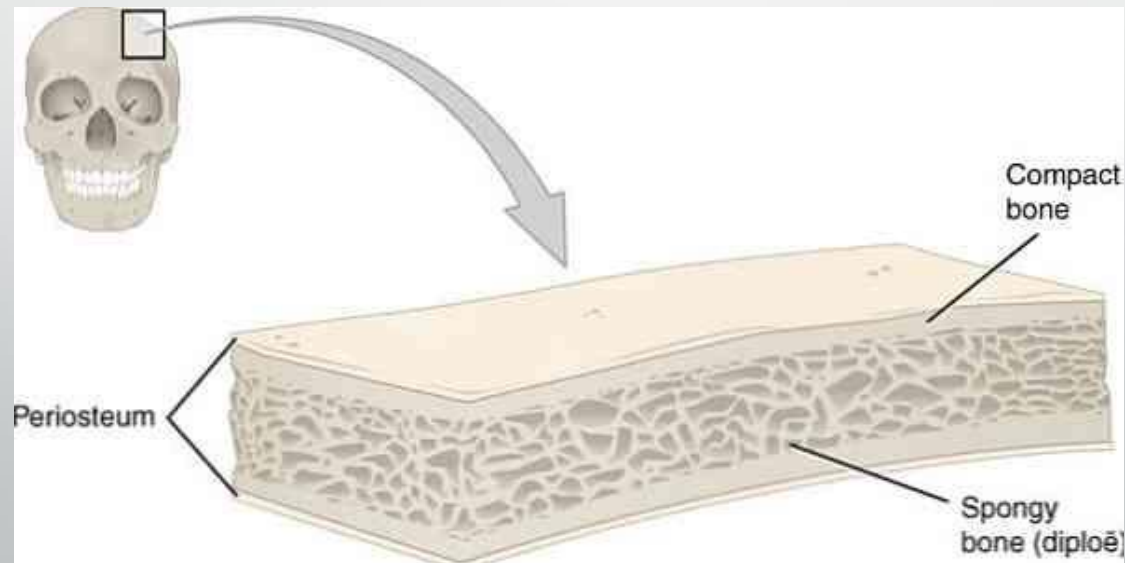




Struktura kości płaskiej

Budowa kości płaskich jest nieco inna niż w przypadku innych kości, na przykład kości długich. Różne warstwy strukturalne kości płaskiej obejmują:

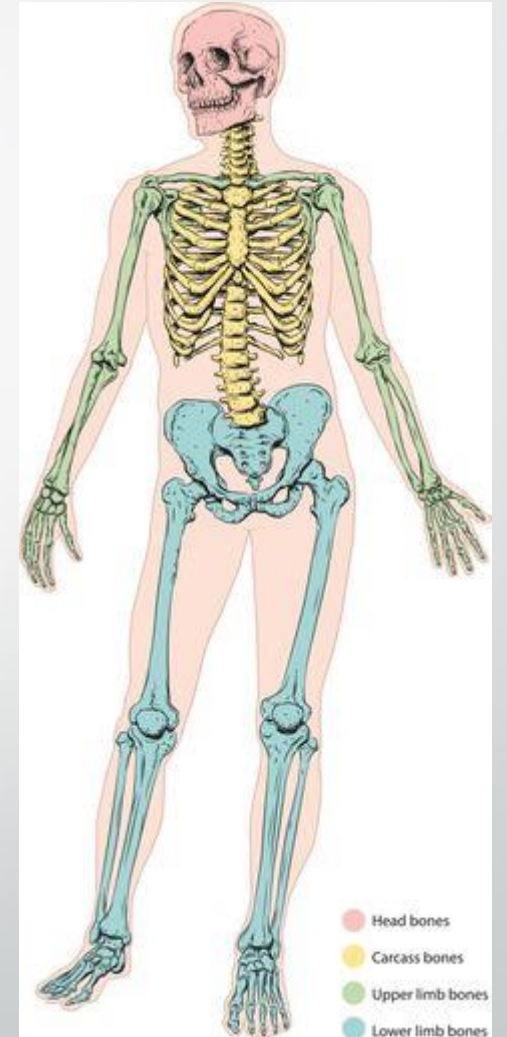
- Okostną. To jest zewnętrzna powierzchnia kości. Zawiera naczynia krwionośne i nerwy, które pomagają w dostarczaniu składników odżywczych do kości.
- Zwartą kość. To jest warstwa kości poniżej okostnej. To bardzo twardy, gęsty rodzaj tkanki kostnej.
- Gąbczastą kość. To jest najbardziej wewnętrzna warstwa. Jest lekka i pomaga absorbować nagły nacisk, taki jak uderzenie w głowę.





Topograficzny podział kości

- kości czaszki, w tym kości mózgowczaszki, kości twarzoczaszki oraz kości słuchowe,
- kości tułowia - przede wszystkim kręgosłup z tworzącymi go kręgami (szyjnymi, piersiowymi, lędźwiowymi, krzyżowymi i kością ogonową, a także klatka piersiowa z żebrami i mostkiem,
- kości kończyny górnej - np. łopatki, obojczyk, kość ramienna, kość promienna, kość łokciowa, kości ręki i palców,
- kości kończyny dolnej - np. kość miednicza (miednica większa i mniejsza), kości biodrowe, kość kulszowa, kość łonowa, kość udowa, rzepka, goleń, kość piszczelowa, kość strzałkowa, kości stopy.





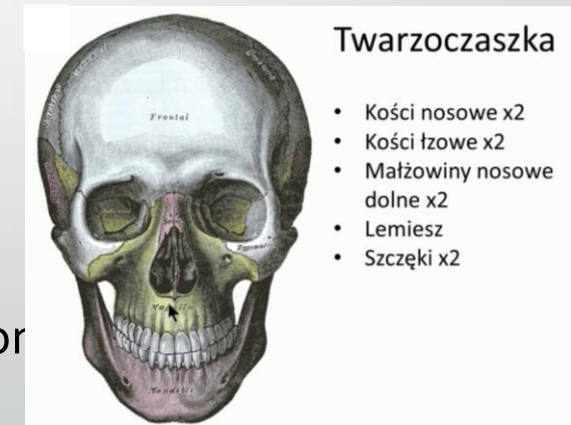
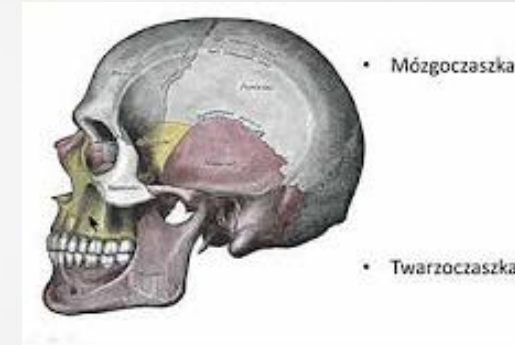
Funkcje kości czaszki

Kości czaszki zawdzięczają swój kształt ciśnieniu oraz siłom, z którymi oddziałują na nie mięśnie: żucia, karku oraz wyrazowe. Współtworzą również górny staw głowy oraz oba stawy skroniowo-żuchwowe.

Główne funkcje czaszki mają charakter statyczny. Kości czaszki tworzą przestrzenie, w których znajdują się narządy wymagające ochrony. Konstrukcja tych kości oraz znajdujące się w nich otwory umożliwiają również przyjmowania pożywienia i powietrza, a także funkcjonowanie narządów zmysłów.

Podstawowe funkcje czaszki pełnią:

- jama czaszki, która odpowiada za ochronę mózgowia;
- oczodół, który chroni oko;
- błędnik kostny, który otacza narządy słuchu i równowagi ciała;
- jama nosowa i jej zatoki, które umożliwiają krążenie powietrza oraz chronią zmysł powonienia;
- jama ustna, za pośrednictwem której możliwe jest pobieranie i rozdrabnianie pożywienia.





Mechaniczne właściwości kości czaszki

Poszczególne kości czaszki łączą się ze sobą ściśle i nieruchomo za pomocą chrząstkozrostów oraz więzozrostów. Jedynie żuchwa jest zawieszona na czaszce za pomocą połączenia stawowego, co umożliwia tej strukturze największy zakres ruchomości. Łącznotkankowe więzozrosty widoczne na czaszce bywają nazywane szwami.

Czaszka zawdzięcza wysoką wytrzymałość znacznej zdolności sprężystego odkształcania się.

Pod wpływem bocznego ucisku może zmniejszyć swój wymiar poprzeczny nawet o 3-4 mm, by po ustaniu ucisku powrócić do pierwotnych wymiarów. **Sprężystość czaszki jest istotnym czynnikiem ochronnym mózgowia.**

Dodatkowo konstrukcja czaszki musi odpowiadać wymaganiom mięśni żwaczowych, które działają na nią z największą siłą. Wpływ masy samej głowy oraz innych mięśni poruszających głowę mają mniejsze znaczenie.





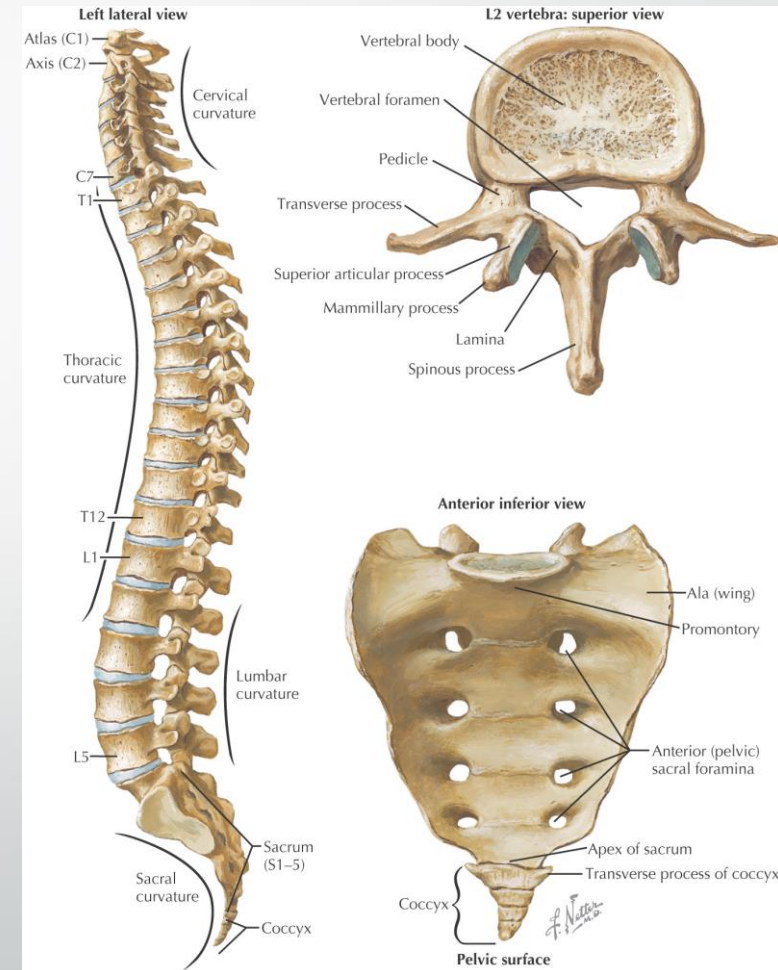
Kości tułowia – funkcje kręgosłupa

Kości tułowia tworzą kręgosłup i klatka piersiowa.

Kręgosłup to podstawowy i najważniejszy organ z naszym ciele. To oś, na której opiera się całe ciało człowieka: organy wewnętrzne i mięśnie. Składa się z 33 lub 34 kręgów. Kręgosłup tworzy także kilka kręgów niepełniących żadnej funkcji (kość ogonowa – pozostałość po przodkach).

Najważniejsze funkcje jakie pełni to utrzymywanie całego ciężaru ciała i zapewnienie równowagi. Dodatkowo amortyzuje on wstrząsy, chroni rdzeń kręgowy oraz nerwy rdzeniowe przed uszkodzeniem.

Funkcje ruchowe poszczególnych odcinków kręgosłupa są zróżnicowane pod względem zakresu i kierunków ruchu. Największy zakres ruchomości występuje w odcinku szyjnym, następnie w lędźwiowym, a najmniejszy w krzyżowym. Więcej możliwości ruchów dają też tzw. miejsca kluczowe kręgosłupa, czyli połączenia międzyodcinkowe





Połączenia kostno-stawowe kręgosłupa

Połączenia ściste:

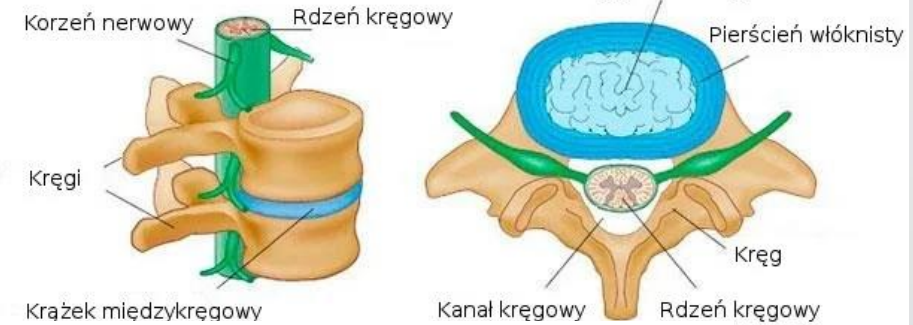
- więzozrosty - więzadła długie i krótkie
- chrząstkozrosty – krążki międzykręgowe
- kościzrosty – kość krzyżowa

Połączenia ruchome

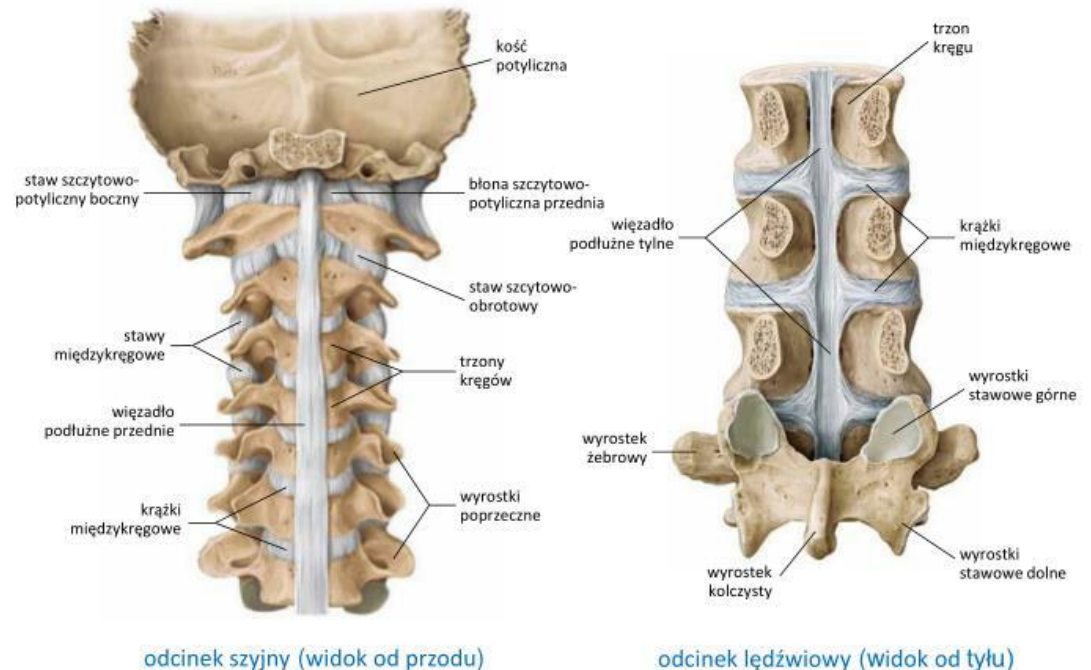
- stawy międzykręgowe



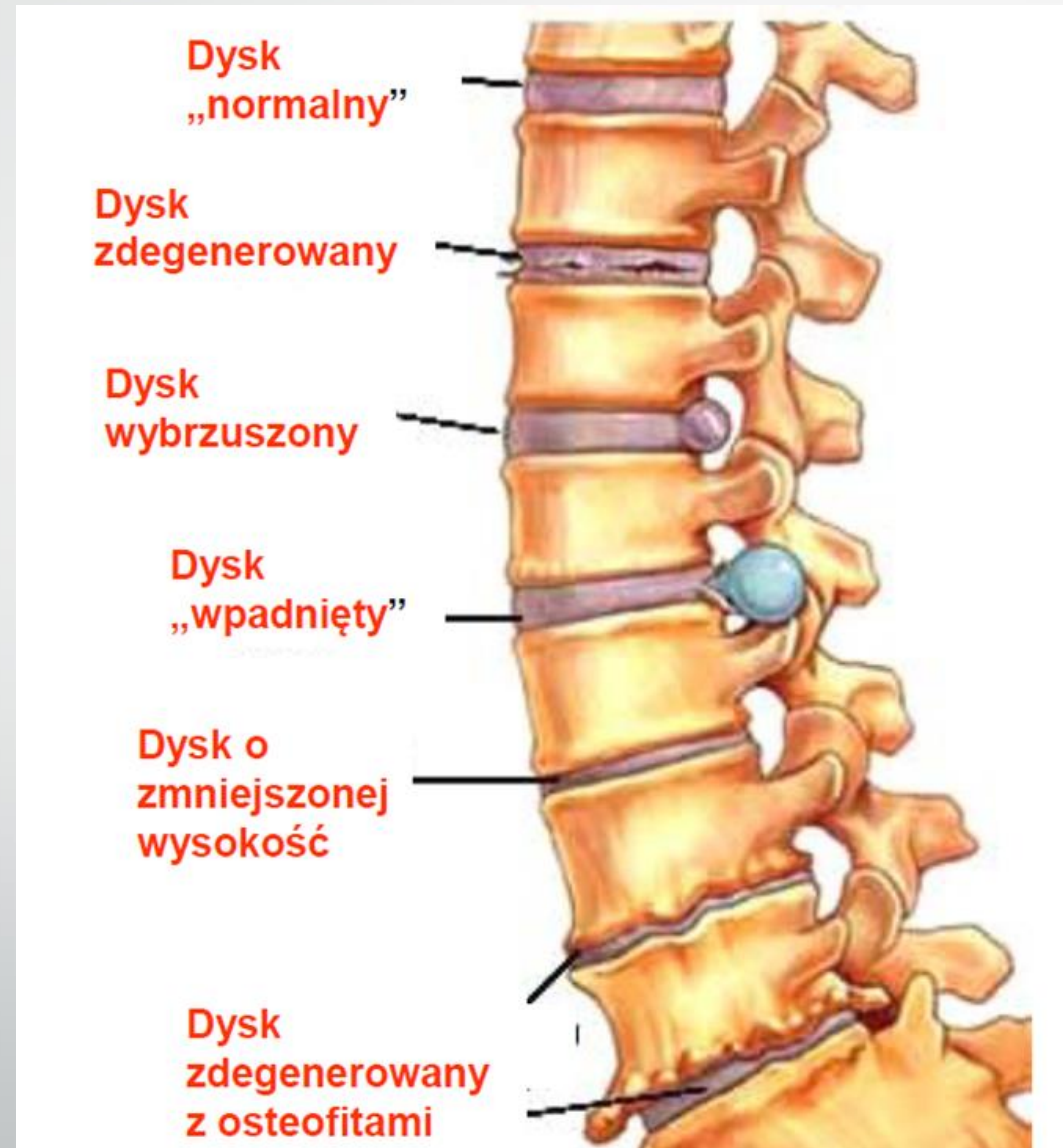
Budowa krążka międzykręgowego



połączenia trzonów kręgów



Przykładowe zmiany chorobowe kręgosłupa



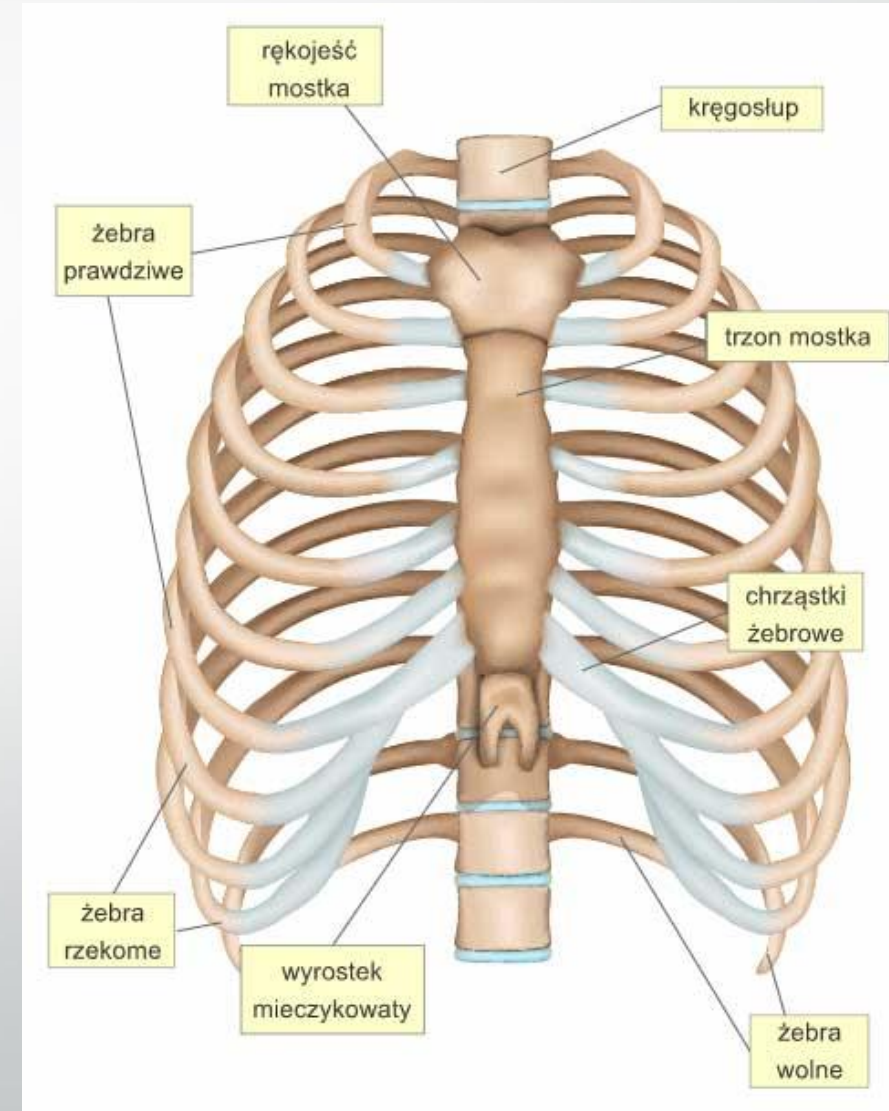


Kości tułowia – funkcje klatki piersiowej

Kości klatki piersiowej tworzą mostek, 12 kręgów piersiowych i 12 par żeber:

- 7 par żeber prawdziwych (I-VII) – żebra, których przednie części zrosnięte są bezpośrednio z mostkiem;
- 3 pary żeber rzekomych (VIII-X) – żebra, które są połączone z mostkiem za pomocą chrząstek żeber położonych wyżej;
- 2 pary żeber wolnych (XI-XII) – żebra nie zrosnięte z mostkiem.

Klatka piersiowa jest mocna i wytrzymała, a zarazem lekka i sprężysta. Dzięki temu stanowi ochronę dla płuc i serca, a zarazem umożliwia wykonywanie ruchów oddechowych.

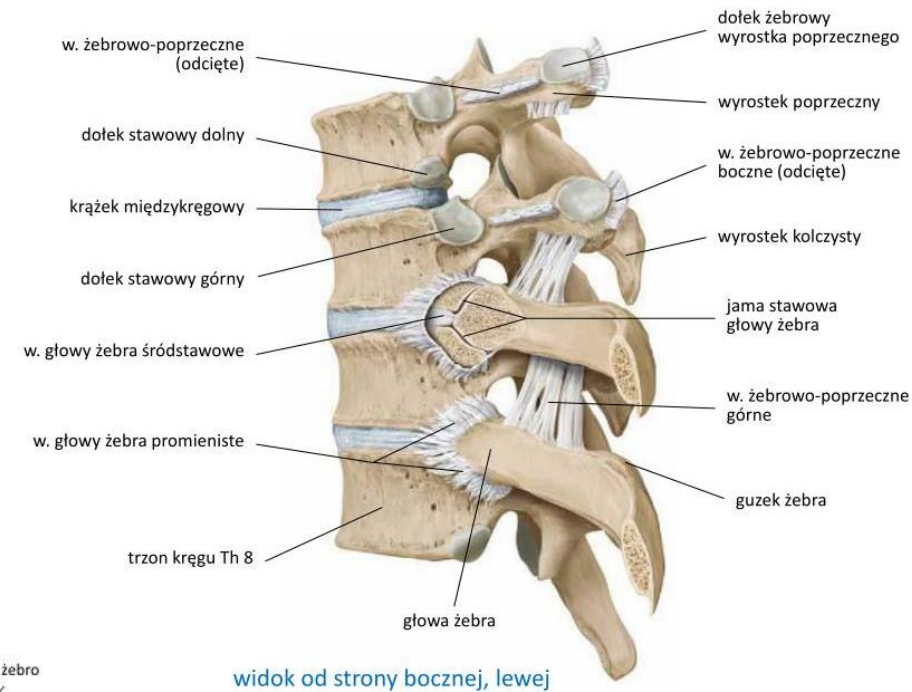




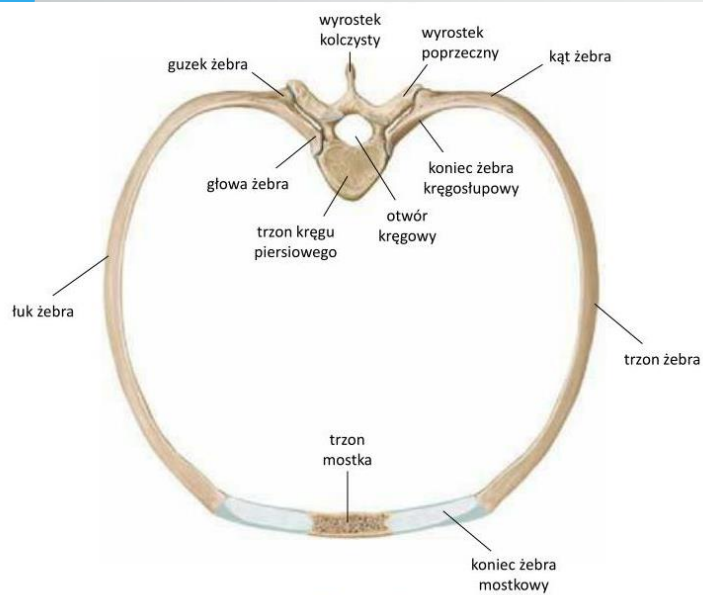
Połączenia w klatce piersiowej

- Stawy żebrowo-kręgowe
- Stawy mostkowo-żebrowe
- Kościorost

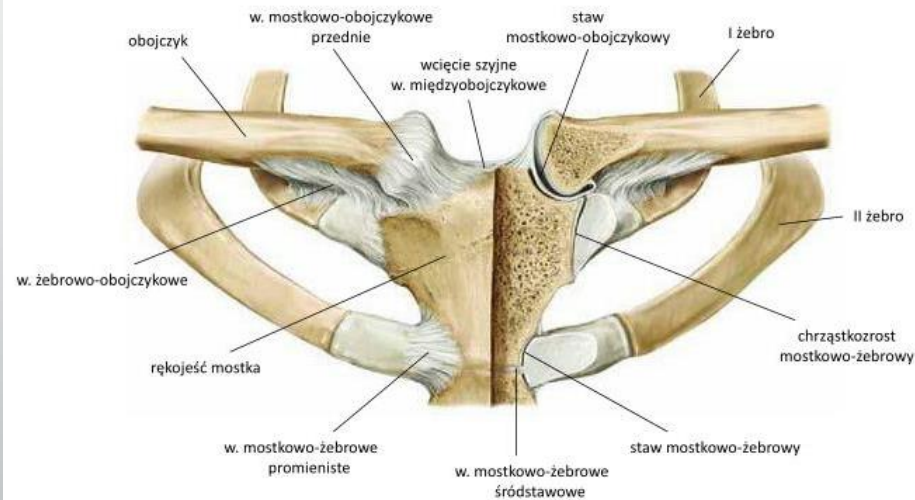
Dzięki elastycznym połączeniom żeber z mostkiem za pomocą chrząstek możliwe są ruchy żeber związane z pracą klatki piersiowej – jej unoszeniem się i opadaniem podczas oddychania.



widok od strony bocznej, lewej



widok od góry



widok od przodu



Kości i funkcje kończyny górnej

Kości kończyny górnej to: kości obręczy barkowej (obojczyk i łopatką), kość ramienna, kości przedramienia (promieniowa i łokciowa) oraz kości ręki (8 kości nadgarstka, 5 kości śródręcza, 14 kości palców – paliczków).

Kości kończyny górnej człowieka to kościec służący do poruszania ręką i chwytania.

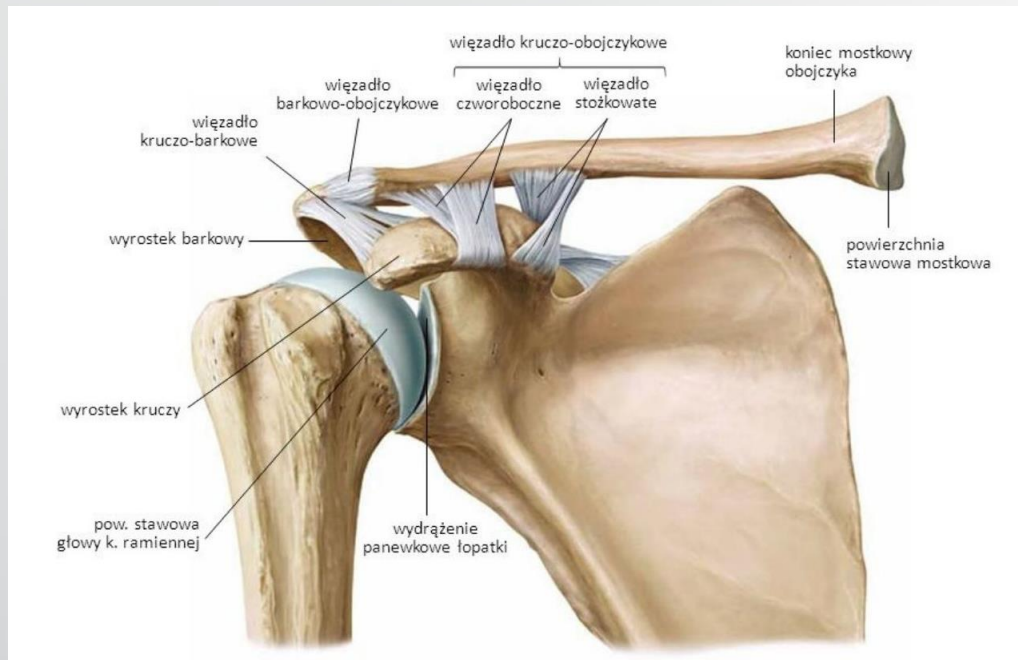
Główną funkcją kończyn górnych są czynności chwytne, manipulacyjne i manualne. Zasadniczą rolę w ich wykonywaniu odgrywa przeciwstawne ułożenie kciuka w stosunku do pozostałych palców.

Kończyny górne mają duży zakres ruchów dzięki znacznej ruchomości w stawie barkowym, praktycznie we wszystkich płaszczyznach oraz ruchom zginania i prostowania w stawie łokciowym. Ponadto kości przedramienia, łokciowa oraz promieniowa, wykazują wobec siebie znaczną ruchliwość. Ostatnim elementem jest odpowiednia budowa ręki dzięki której jesteśmy w stanie wykonywać bardzo precyzyjne ruchy.

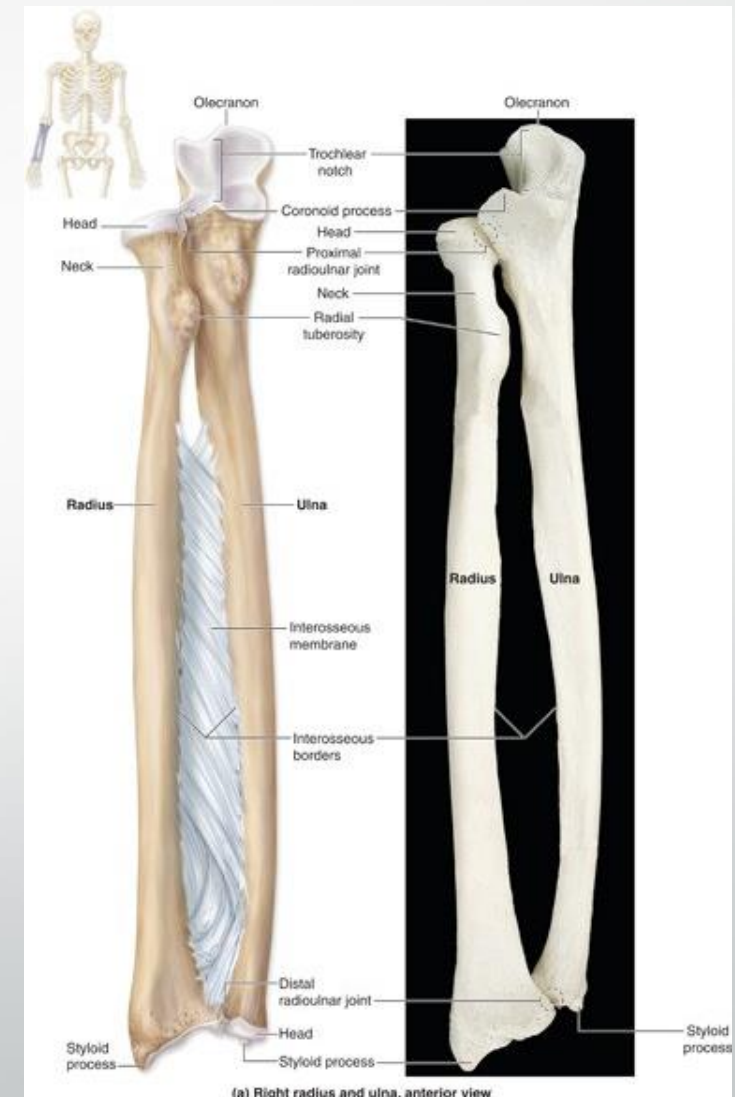
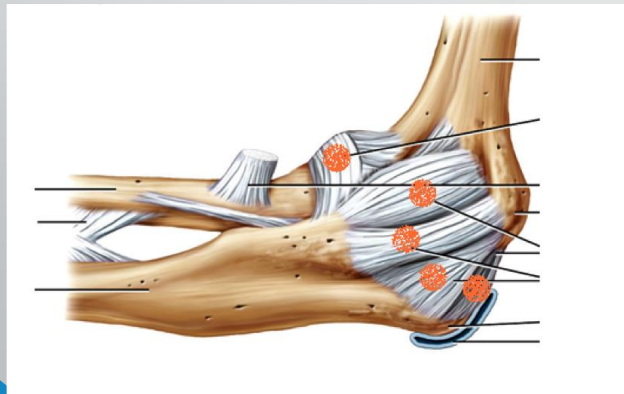




Połączenia kończyny górnej



Stawy barkowo-obojczykowy i ramienny.
Staw łokciowy i promieniowo-łokciowy dalszy.



Błona międzyczkostna przedramienia – więzozrost przedramienia



Kości i funkcje kończyny dolnej

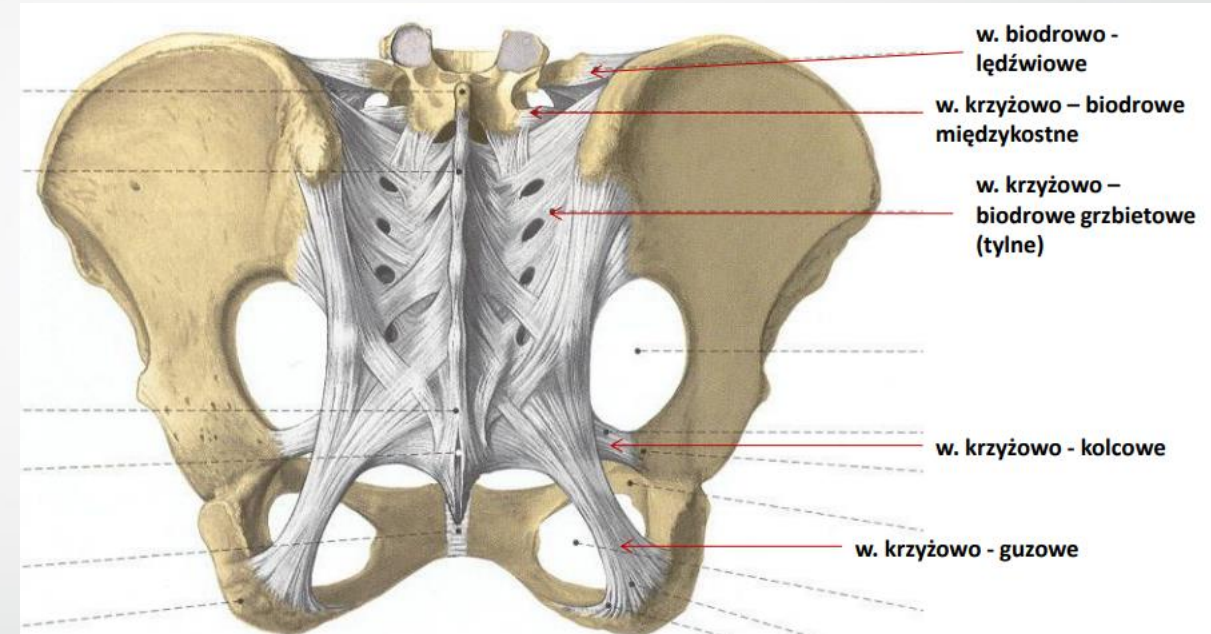
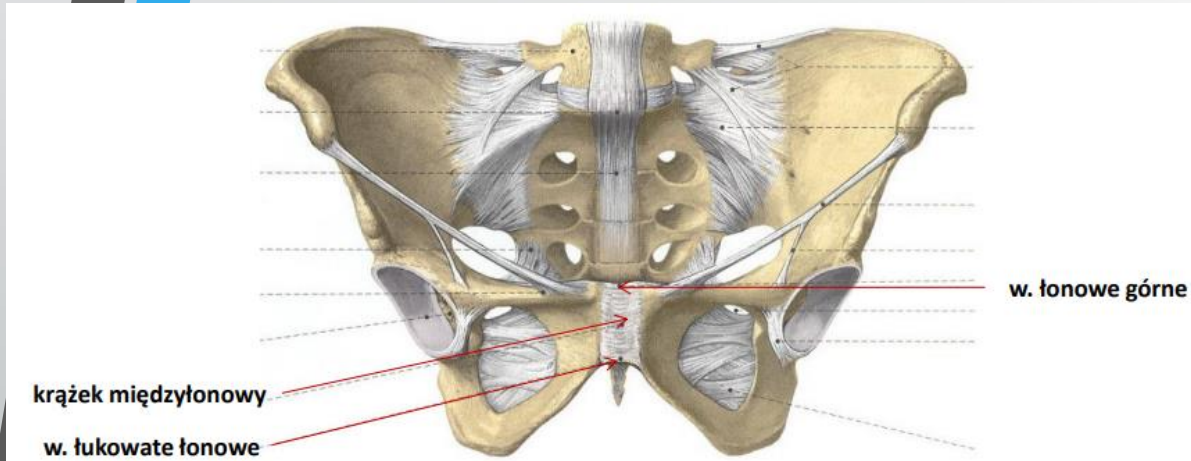
Kości kończyny dolnej to: kości obręczy kończyny dolnej (2 kości kulszowe, 2 kości biodrowe, 2 kości łonowe), kość udowa, kości podudzia (piszczelowa i strzałkowa) oraz kości stopy (7 kości stępu, 5 kości śródstopia i 14 kości palców).

Główną funkcją kończyn dolnych jest lokomocja. Podporę dla kończyn dolnych stanowi obręcz miedniczna.





Połączenia kończyny dolnej



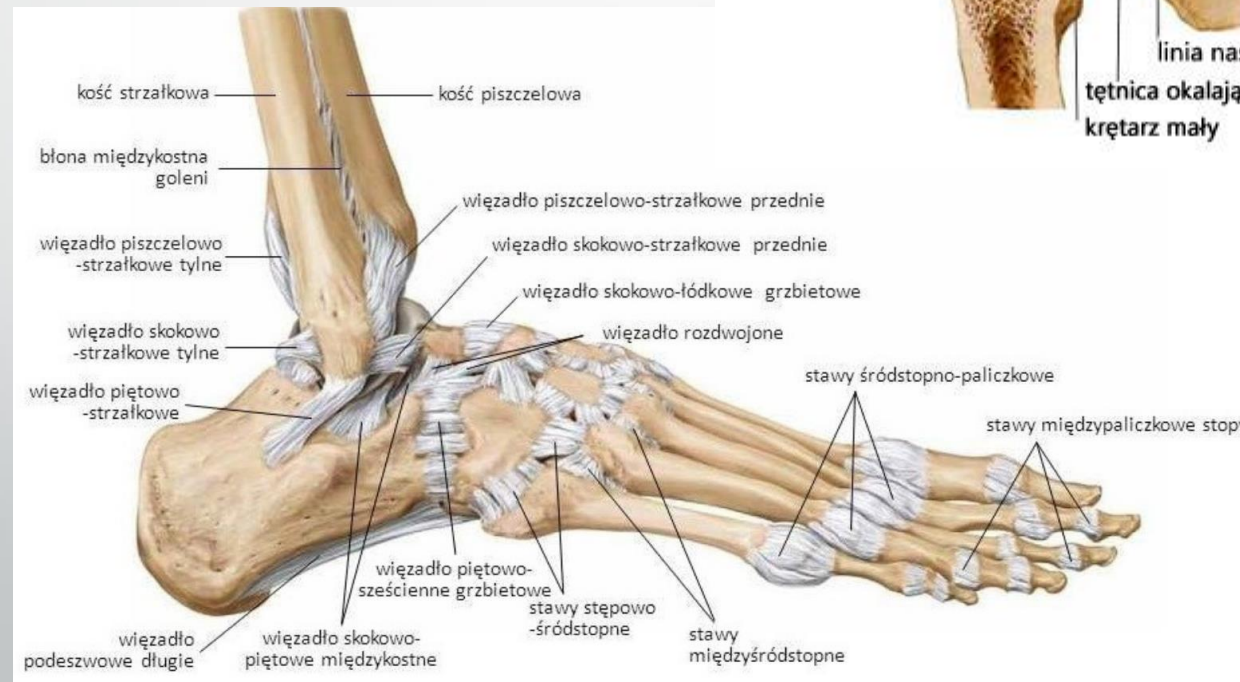
Połączenia miednicy:

- więzozrosty
- chrząstkozrosty (spojenie łonowe)
- kościzrosty (kość krzyżowa, kość miedniczna)
- staw krzyżowo-biodrowy



Połączenia kończyny dolnej

- staw biodrowy
- staw kolanowy
- staw piszczelowo-strzałkowy
- więzozrost piszczelowo-strzałkowy
- błona międzykostna podudzia
- stawy stopy





Połączenia kości

RUCHOME	ŚCISŁE	
stawy	chrząstkozrosty	kościorzrosty
połączenia z sąsiadujących kości, między którymi znajduje się jama stawowa	stykające się ze sobą kości są połączone tkanką chrzęstną	stykające się ze sobą kości są połączone tkanką kostną
całkowita ruchomość	ruchomość częściowa	całkowita nieruchomość
staw biodrowy, staw łokciowy	spojenie łonowe, połączenia żeber z mostkiem, połączenia kręgów za pośrednictwem krążków międzykręgowych	szwy czaszki, szwy obręczy miednicznej



Ścinanie

Warunek wytrzymałościowy na ścinanie mówi, że:

Rzeczywiste naprężenia styczne w przekroju ścinanym S nie mogą być większe od naprężenia dopuszczalnego k_t czyli:

$$\tau_t = \frac{F}{S} \leq k_t$$

gdzie:

τ_t (gr. *tau*) – naprężenia styczne przy ścinaniu [Pa]

F – siła ścinająca [N]

S – pole powierzchni przekroju ścinanego [m²]

k_t – naprężenia dopuszczalne przy ścinaniu [Pa]

Naprężenia dopuszczalne na ścinanie są mniejsze od naprężeń dopuszczalnych na rozciąganie

$k_t = (0,5 - 0,8)k_r$, najczęściej przyjmuje się $k_t = 0,65 k_r$

Po przekształceniu wyrażenia $\frac{F}{S} \leq k_t$ otrzymujemy: $F \leq S * k_t$ przy czym określa największą siłę ścinającą, którą może jeszcze bezpiecznie przenieść rozważany przekrój ścinany S .



Skrećanie

Maksymalne naprężenia podczas skrećania:

$$\varphi = \frac{M_s l}{GJ_0}$$

Gdzie:

φ (gr. *fi*) – kąt skrećania pręta

M_s – moment skrećający

l – długość pręta

G – moduł sprężystości postaciowej

J_0 – biegunowy moment bezwładności przekroju

$$\tau_{\max} = \frac{M_s}{W_0} \leq k_s$$

$$W_0 = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16D}$$

Gdzie:

M_s - moment skrećający

W_0 – wskaźnik wytrzymałości na skrećanie

k_s – naprężenia dopuszczalne na skrećanie

D – średnica zewnętrzna

d – średnica wewnętrzna



Zginanie

- W pręcie zginanym największe naprężenia występują w wyniku, z jednej strony rozciągania, a z drugiej ściskania jego zewnętrznych warstw leżących po przeciwnych stronach przekroju.
- O maksymalnych naprężeniach, podobnie jak w przypadku skręcania decyduje kształt i rozmiar przekroju.
- W przypadku belek obciążonych zawsze w tym samym kierunku optymalny (wytrzymały i zapewniający małą masę belki) jest przekrój dwuteowy.
- W przypadku, gdy kierunek obciążenia może się zmieniać optymalny jest przekrój kołowy z wydrążonym środkiem.



Maksymalne naprężenia podczas zginania

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_z} \leq k_g \quad W_z = \frac{J_z}{y_{\max}} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$$

Gdzie:

σ_g – (gr. *sigma*) naprężenie

M_g – moment gnący

W_z – wskaźnik wytrzymałości na zginanie

k_g – naprężenia dopuszczalne na zginanie

J_z – moment bezwładności przekroju

y_{\max} – maksymalna odległość przekroju od osi obojętnej

D – średnica zewnętrzna

d – średnica wewnętrzna



Definicje sił normalnych, sił tnących i momentów gnących

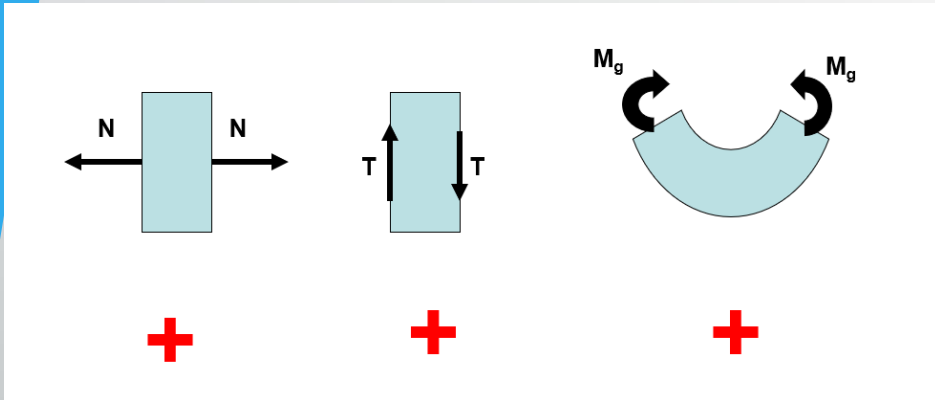
Siłą normalną N w danym przekroju poprzecznym belki nazywamy rzut na kierunek normalnej wypadkowej wszystkich sił zewnętrznych działających na część belki odciętą tym przekrojem.

Siłą tnącą T w danym przekroju poprzecznym belki nazywamy rzut na płaszczyznę tego przekroju wypadkowej wszystkich sił zewnętrznych działających na część belki odciętą tym przekrojem.

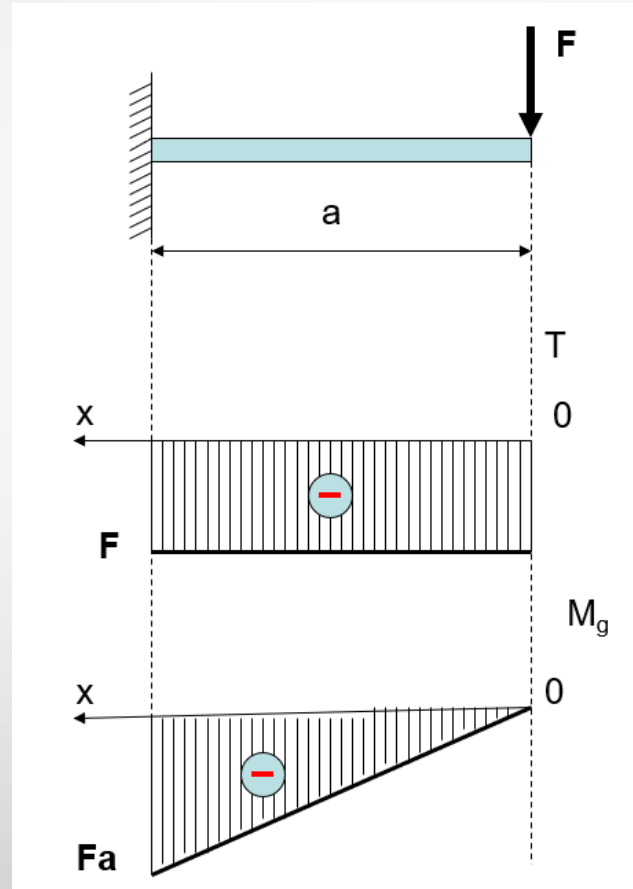
Momentem gnącym Mg w danym przekroju belki nazywamy sumę momentów wszystkich sił zewnętrznych działających na część belki odciętą tym przekrojem.



Dodatnie wartości sił normalnych N , sił tnących T i momentów gnących M_g



Dodatnie wartości sił normalnych N ,
sił tnących T i momentów gnących M_g



$$M_g = xF$$

$$\frac{dM_g}{dx} = T$$

Wykresy sił tnących i momentów gnących



Adaptacja funkcjonalna kości

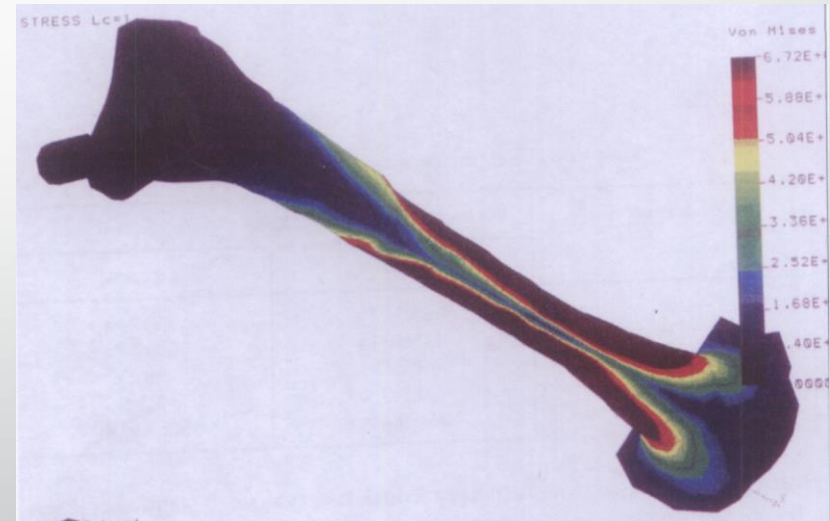
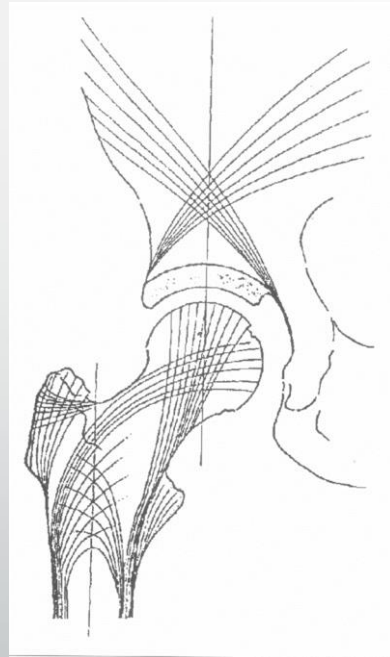
- Z punktu widzenia mechaniki, kości można traktować jako materiały kompozytowe o zróżnicowanej, hierarchicznej strukturze.
- Ich wewnętrzna budowa przystosowana jest zarówno do przenoszenia dużych obciążeń jednorazowych, jak i cyklicznych obciążeń o mniejszej amplitudzie.
- Na obciążenia cykliczne kość, jako aktywna, żywa, tkanka reaguje dzięki zintensyfikowanej cyrkulacji płynów odżywczych, zwiększeniem masy i wzrostem grubości.
- Wykazano, że aktywność fizyczna, a w szczególności ćwiczenia o charakterze siłowym, wpływają regenerująco na tkankę kostną i zapobiegają osteoporozie.



Dostosowanie kości do obciążeń

- Aparat ruchu człowieka jest obiektem zoptymalizowanym pod względem wielu kryteriów w tym wytrzymałościowych.
- Przekrój poprzeczny kości długich często przypomina wydrążony przekrój kołowy.
- Brak gwałtownych zmian w przekroju.
- Kończyny górne są przede wszystkim rozciągane, a dolne ściskane.

Kształtowanie się beleczek kostnych w panewce stawu biodrowego i kości udowej pod wpływem obciążeń (analogie do sklepień gotyckich).



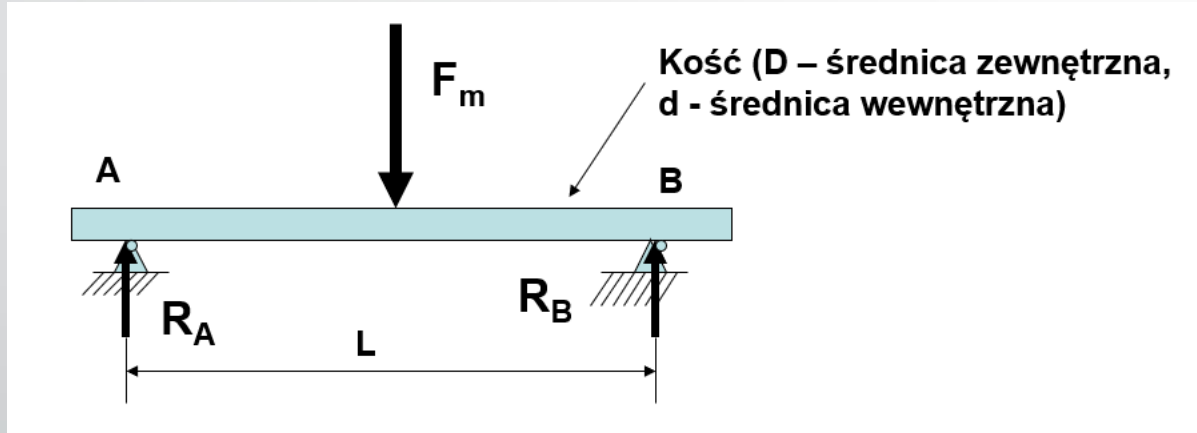
Przykład naprężeń występujących w kości udowej (metoda elastooptyczna)



Wytrzymałość kości

Wytrzymałością na zginanie, wg Polskich Norm nazywamy naprężenie które jest umowne i odpowiada maksymalnej sile obciążającej, otrzymanej podczas wykonywania próby statycznej zginania.

Sposób pomiaru wytrzymałości kości długiej na zginanie:



Legenda:

A, B – punkty podparcia kości

L – odległość punktów podparcia

F_m – maksymalna siła naciskająca kość

R_A, R_B – siła reakcji podpór ($R_A = R_B = 1/2 F_m$)

$M_{g\max} = 1/2 L R_A = 1/2 L R_B = 1/2 L 1/2 F_m = 1/4 F_m L$

Gdzie:

σ_g – (gr. *sigma*) wytrzymałość na zginanie

M_g – moment gnący

W_z – wskaźnik wytrzymałości na zginanie

k_g – naprężenia dopuszczalne na zginanie

J_z – moment bezwładności przekroju

y_{\max} – maksymalna odległość przekroju od osi obojętnej

D – średnica zewnętrzna; d – średnica wewnętrzna

Warunek wytrzymałościowy naprężeń normalnych na zginanie ma postać:

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_z} \leq k_g \quad W_z = \frac{J_z}{y_{\max}} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$$



Gęstość a wytrzymałość kości

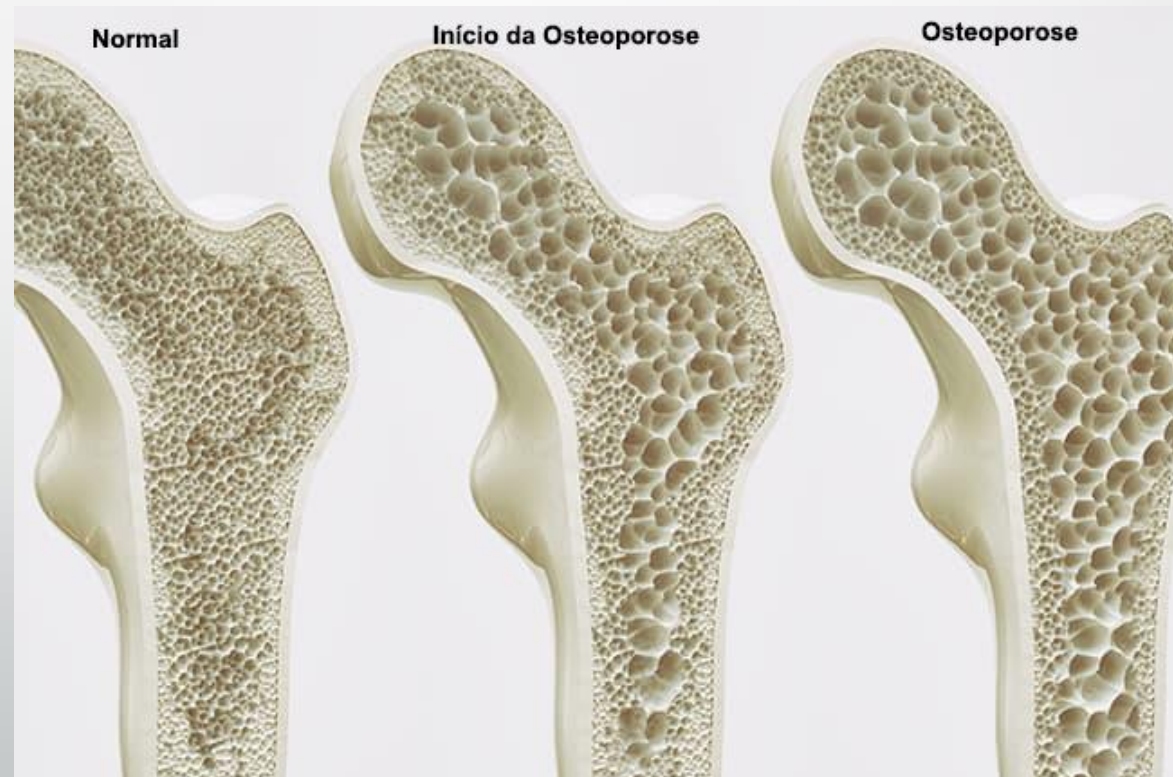
Mow i Hayes na podstawie licznych badań wysunęli tezę o bezpośrednim związku między gęstością kości gąbczastej a jej własnościami wytrzymałościowymi.

Na podstawie licznych prób, z dużym przybliżeniem, zapisano to w postaci następujących zależności dla naprężeń (wg R. Będziński (1997) str. 43):

$$\sigma \text{ (gr. } \sigma \text{)} = 60 \rho^2 \text{ [MPa]}$$

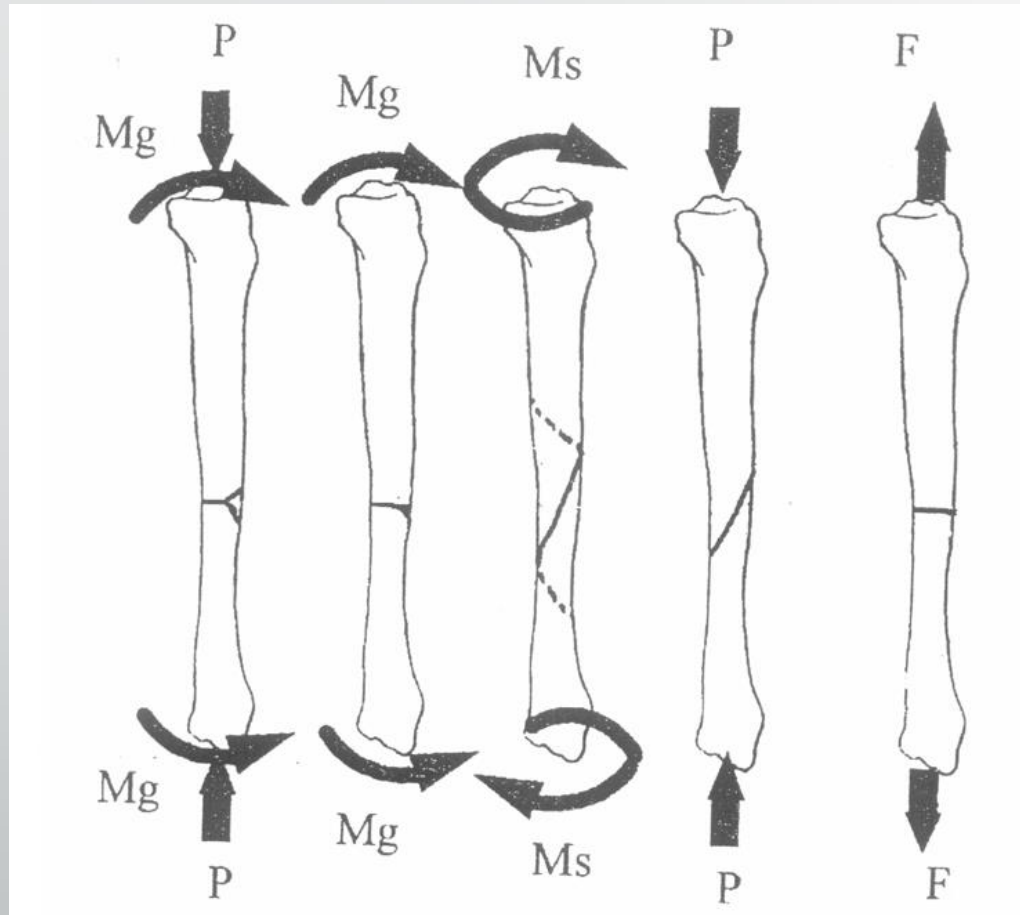
$$E \text{ (gr. } \epsilon \text{)} = 2,195 \rho^3 \text{ [MPa]}$$

$$\rho \text{ (gr. } \rho \text{)} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$





Skutki obciążenia kości



Rodzaje złamań w zależności od obciążenia



Badanie zespołów chirurgicznych -
Druty Kirschnera



Fenomen budowy kości

- **Hierarchiczność budowy.** Istotną cechą kości jest wielopoziomowość jej wewnętrznej struktury. Najdrobniejsze elementy strukturalne składają się na elementy większe, z których z kolei, zbudowane są elementy jeszcze większe itd.
- **Spiralne ułożenie elementów przestrzennych.** Na każdym poziomie strukturalnym można wyróżnić elementy, których wzajemne ułożenie przypomina przenikające się spirale. Choć dotyczy to szczególnie tkanek miękkich to skręcanie struktur obserwowane jest również w kościach.
- **Zdolność do adaptacji.** Kość aktywnie reaguje na działające obciążenia i pojawiające się uszkodzenia struktury. Następuje wewnętrzna przebudowa (procesy remodellingu), której intensywność zależy od przykładanych obciążeń. Zdolność ta w największym stopniu odróżnia żywe tkanki od innych materiałów.



Fenomen budowy kości cd.

- **Odporność na różnorodne obciążenia.** Kości, jako materiały kompozytowe, zawierają różnego rodzaju wtrącenia, które, z technicznego punktu widzenia, można sklasyfikować jako rozproszone wtrącenia, włókna, warstwy lub nawet trójwymiarowe kratownice. Zapewniają one wytrzymałość na działanie naprężeń stycznych i normalnych, a szczególny sposób zapobiega propagacji pęknięć.
- **Optymalna kombinacja własności mechanicznych.** Z technicznego punktu widzenia, własności tkanki kostnej są dalece zoptymalizowane pod względem kryterium odporności na działanie różnorodnych, zewnętrznych czynników mechanicznych. Spełnione zostają przy tym również warunki pozwalające na wypełnienie przez tkankę kostną innych funkcji biologicznych, niezwiązanych bezpośrednio z przenoszeniem obciążeń.



Dziękuję za uwagę
i zapraszam na kolejny wykład.

