

PODSTAWY BIOMECHANIKI

Wykład 5:
Biomechanika mięśni
Dźwignie w ciele człowieka
Równowaga ciała



dr Ewa Polak



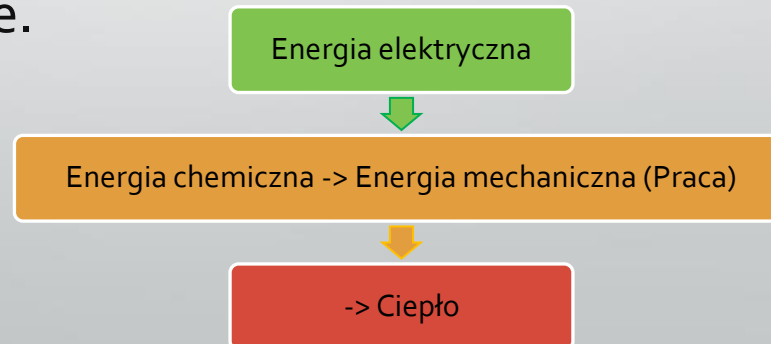
Biomechanika mięśni

Biomechanika mięśni opisuje ich **zdolność do wykonania pracy jako efektora**.

Mięśnie charakteryzuje sprężystość, czyli napięcie umożliwiające szybszą reakcję na pobudzenie oraz zdolność do **skurczu**. To właśnie dzięki synchronizowanemu skurczowi różnych grup mięśniowych możemy wprowadzić nasze ciało w ruch.

Włókna mięśniowe generują siłę m.in. bazując na rozciągnięciu i prędkości w celu wytworzenia ruchu (przemieszczenia w przestrzeni) segmentów ciała lub utrzymania ich w stabilności (równowadze).

Każda czynność mięśnia bierze początek w jego pobudzeniu, które wyraża się wzrostem aktywności elektrycznej, ta zaś wyzwala procesy, powodujące uruchomienie przemiany energii chemicznej na ciepło i energię mechaniczną, którą obserwujemy w postaci pracy wykonywanej przez mięśnie.

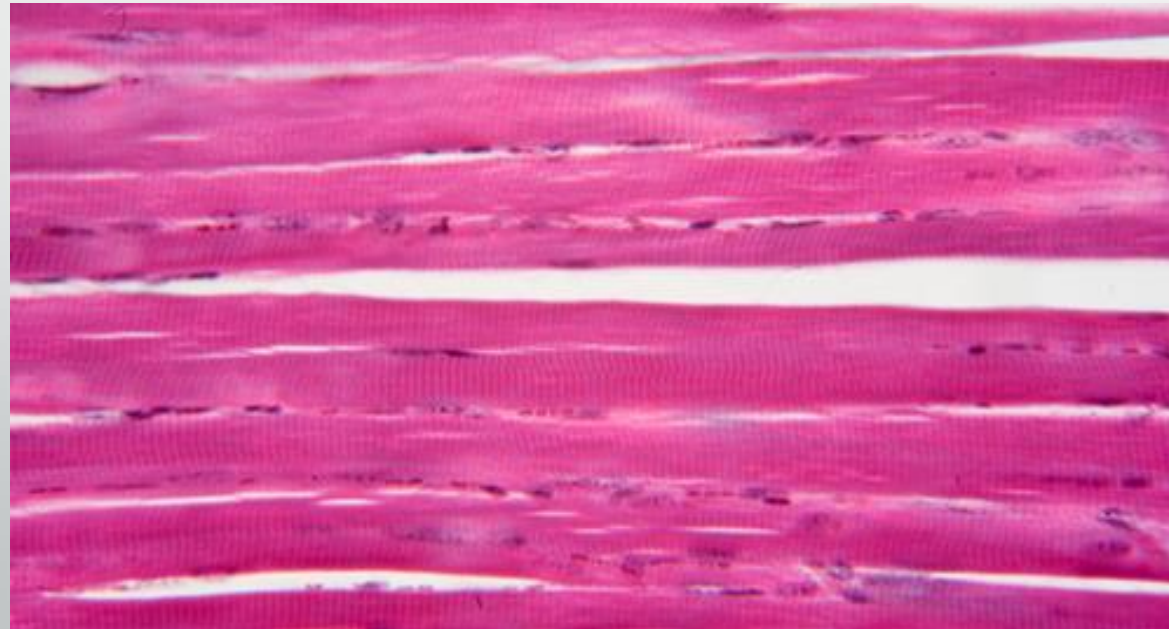




Mięśnie szkieletowe (poprzecznie prążkowane)

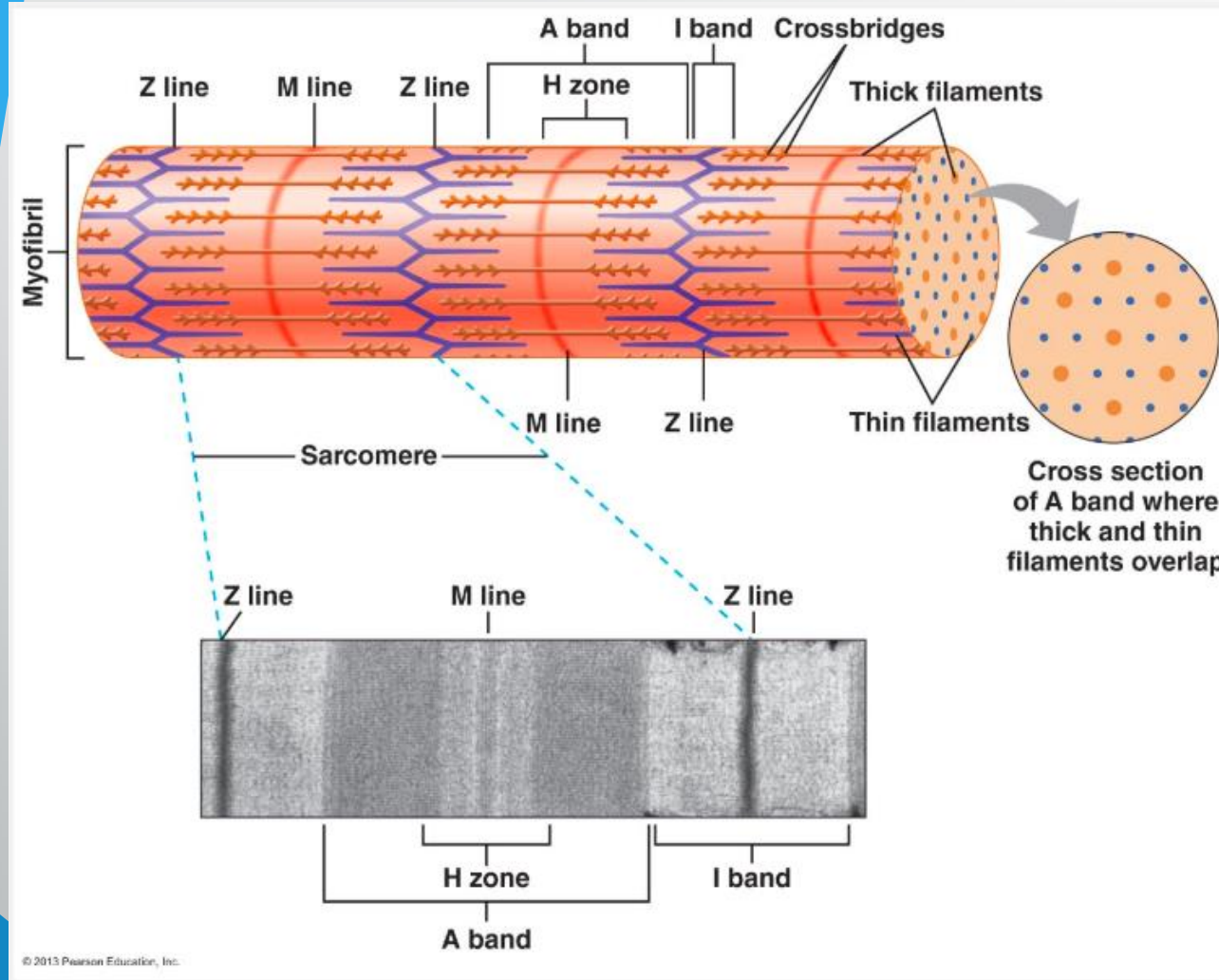
Komórka mięśniowa (włókno mięśniowe) wypełniona jest ułożonymi w pęczki włókienkami kurczliwymi (**miofibrylami**), które zbudowane są z dwóch rodzajów włókienek białkowych (**filamentów**), odpowiadających za skurcz mięśnia: filamentów cienkich i filamentów grubych.

Regularny układ włókienek białkowych (**filamentów**) uwidoczni się w naprzemiennym układzie prążków jasnych i ciemnych wzdłuż miofibryli. To właśnie naprzemienne ułożenie aktyny i miozyny warunkuje poprzeczne prążkowanie mięśni szkieletowych.





Mięśnie szkieletowe (poprzecznie prążkowane)

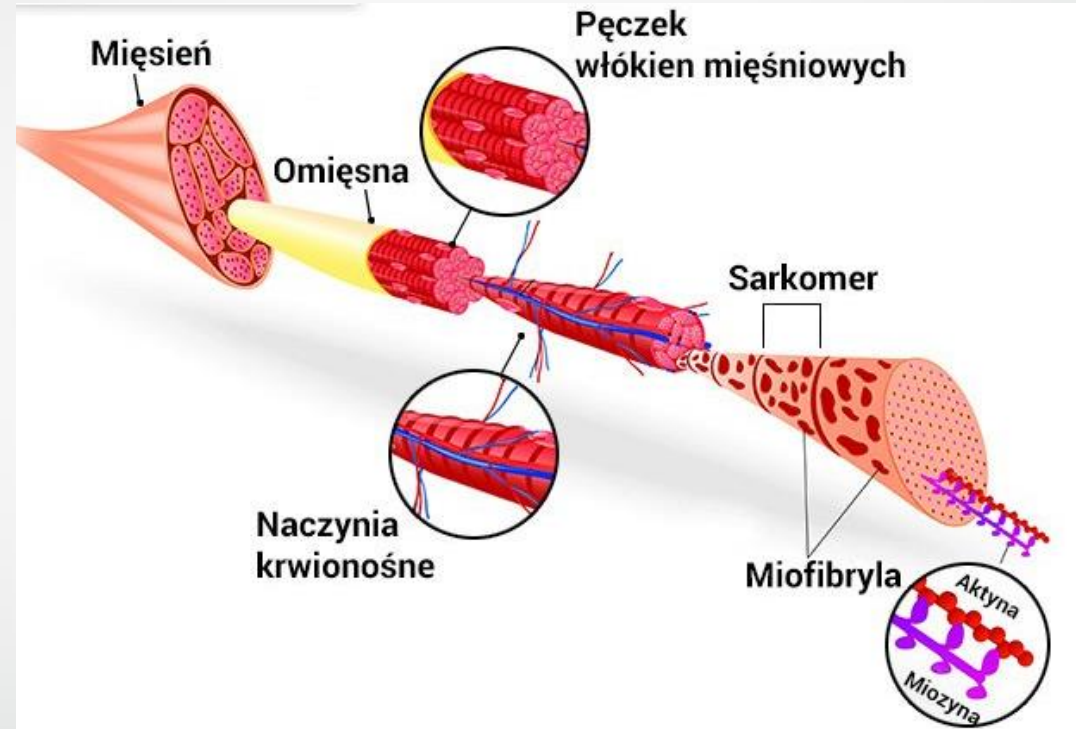
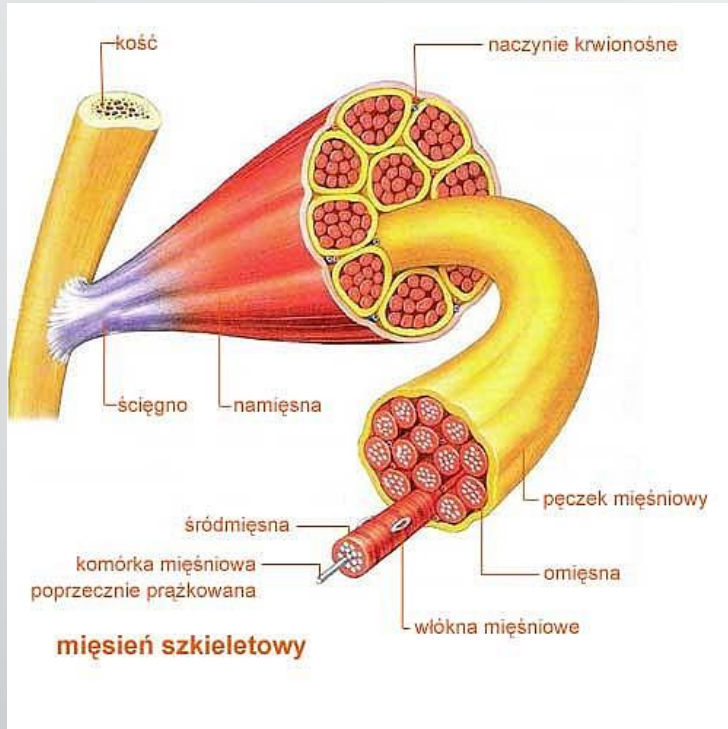


W połowie każdego prążka jasnego znajduje się tzw. **linia Z**, do której z obu jej stron przyłączone są filamenty cienkie (ang. *Thin filament*). Filamenty grube (ang. *Thick filament*) są częściowo wsunięte między filamenty cienkie.

Obszar zawarty między dwiema liniami Z nosi nazwę **sarkomeru** i jest funkcjonalną jednostką miofibryli.



Mięśnie szkieletowe (poprzecznie prążkowane)



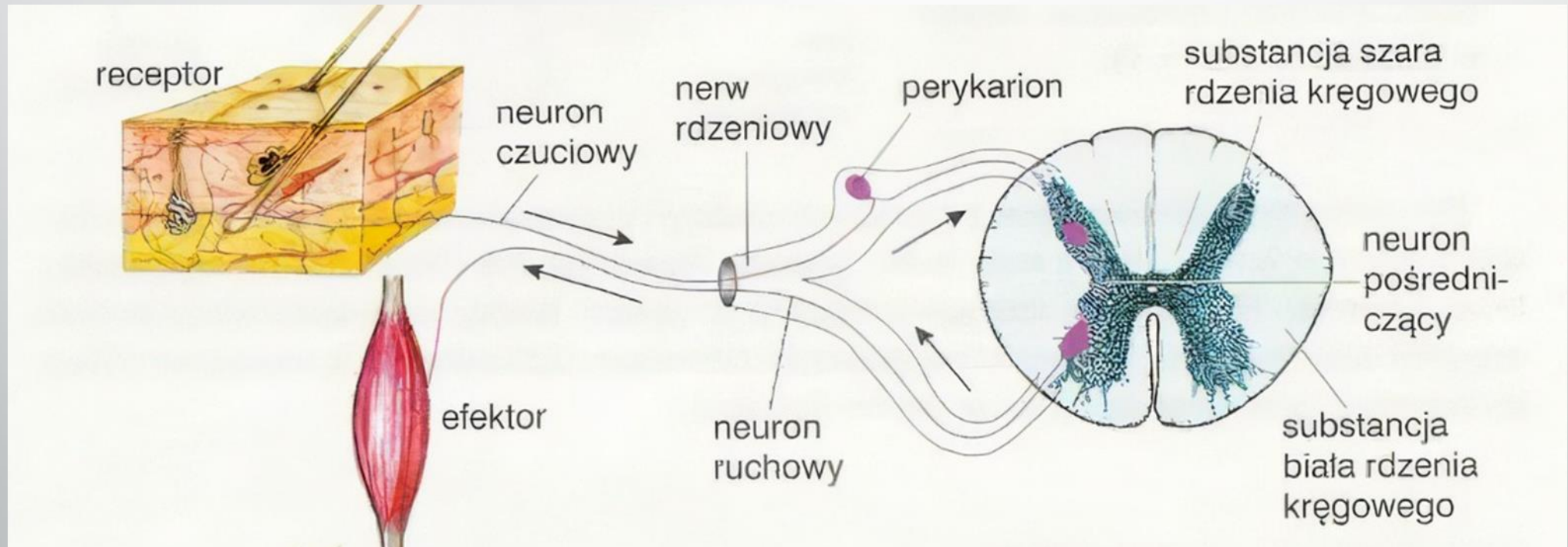
Filamenty grube zawierają cząsteczki białka **miozyny**, przy czym każda cząsteczka składa się z części o kształcie pałeczki oraz tzw. główki.

Filamenty cienkie zbudowane są z cząsteczek białka **aktyny** tworzących dwa splecione wokół siebie łańcuchy połączone z białkami **troponiną i tropomiozyną**.



Skurcz mięśnia

Przejawem pracy mięśni jest ich skurcz, który następuje pod wpływem impulsu nerwowego docierającego do włókna mięśniowego za pośrednictwem **nerwu ruchowego**.

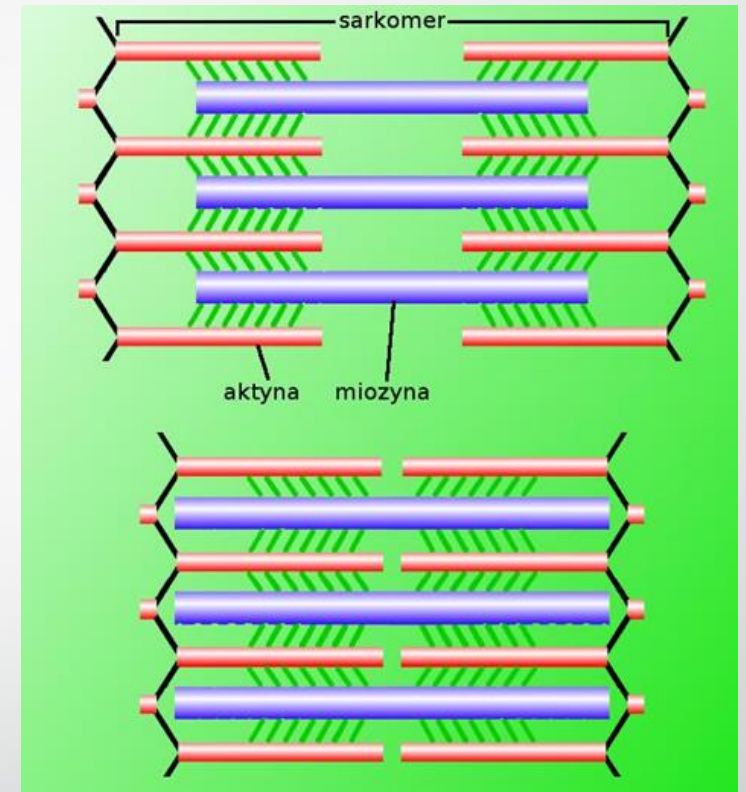
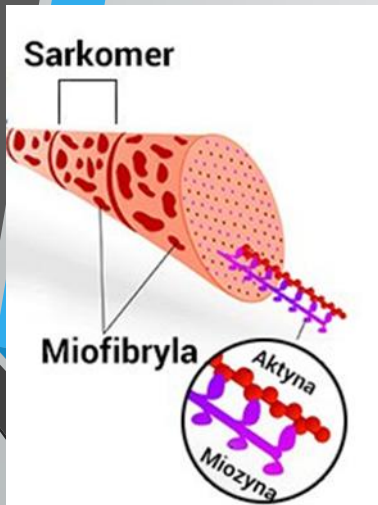




Skurcz mięśnia

Podczas skurczu komórki mięśniowej następuje skrócenie wszystkich sarkomerów, co spowodowane jest wsuwaniem się filamentów grubych między filamety cienkie. Mechanizm ten nazywany jest mechanizmem ślizgowym.

Główki wszystkich cząsteczek miozyny tworzących filament gruby przesuwają się płynnie wzdłuż filamentu cienkiego (aktynowego). Efektem jest przesunięcie tego ostatniego (ślizganie się filamentu cienkiego po filamencie grubym).



Model ślizgowy skurczu mięśnia
(wg Alberts, 1999)



Skurcz mięśnia





Skurcz mięśnia

Dla przesunięcia się filamentów niezbędne są przemiany biochemiczne. ATP (Trójfosforan adenozyne), przyłącza się do główki w cząsteczce miozyny i ulega hydrolizie do ADP (Dwufosforan adenozyne) i fosforanu nieorganicznego.

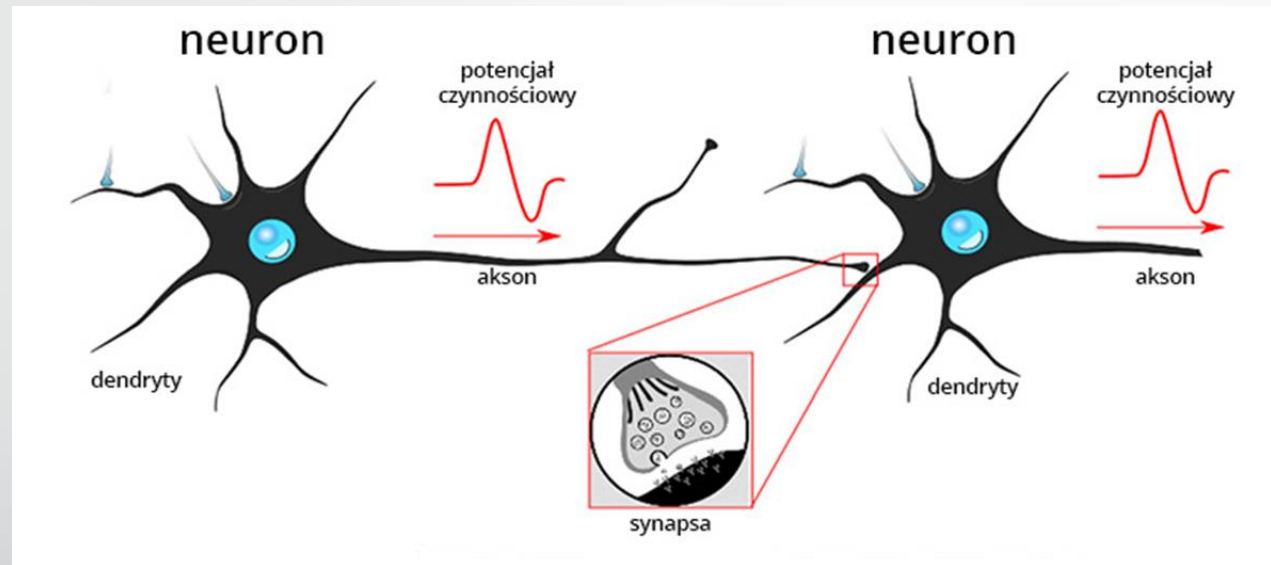
Powoduje to zmianę położenia główki w stosunku do pałeczkowatej reszty cząsteczki miozyny. Dzięki temu główka miozyny może związać się z aktyną.

Towarzyszy temu odłączenie się fosforanu (V) i wyzwolenie energii. Efektem jest ścisłe związanie główki miozynowej z aktyną, co wyzwala kolejne zmiany. Podczas tych zmian odłącza się ADP, a przesuwaną się główką miozyny połączoną z aktyną ciągnie filament cienki.



Impuls nerwowy

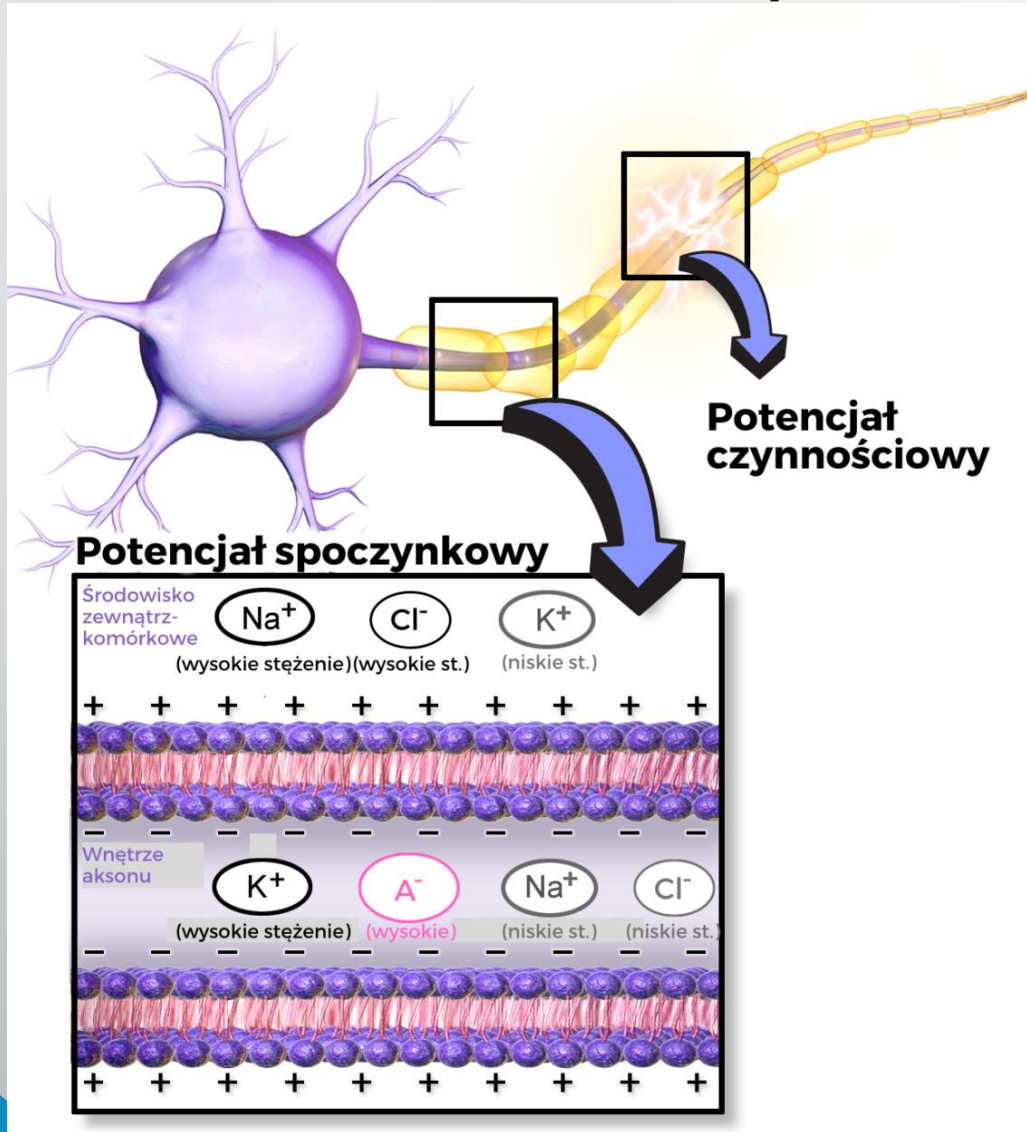
Neurony mają ważną cechę, którą jest pobudliwość. Oznacza to, że mają możliwość reagowania na bodźce: mogą odbierać pobudzenie i przekazywać je dalej w formie swojego rodzaju **prądu elektrycznego**.



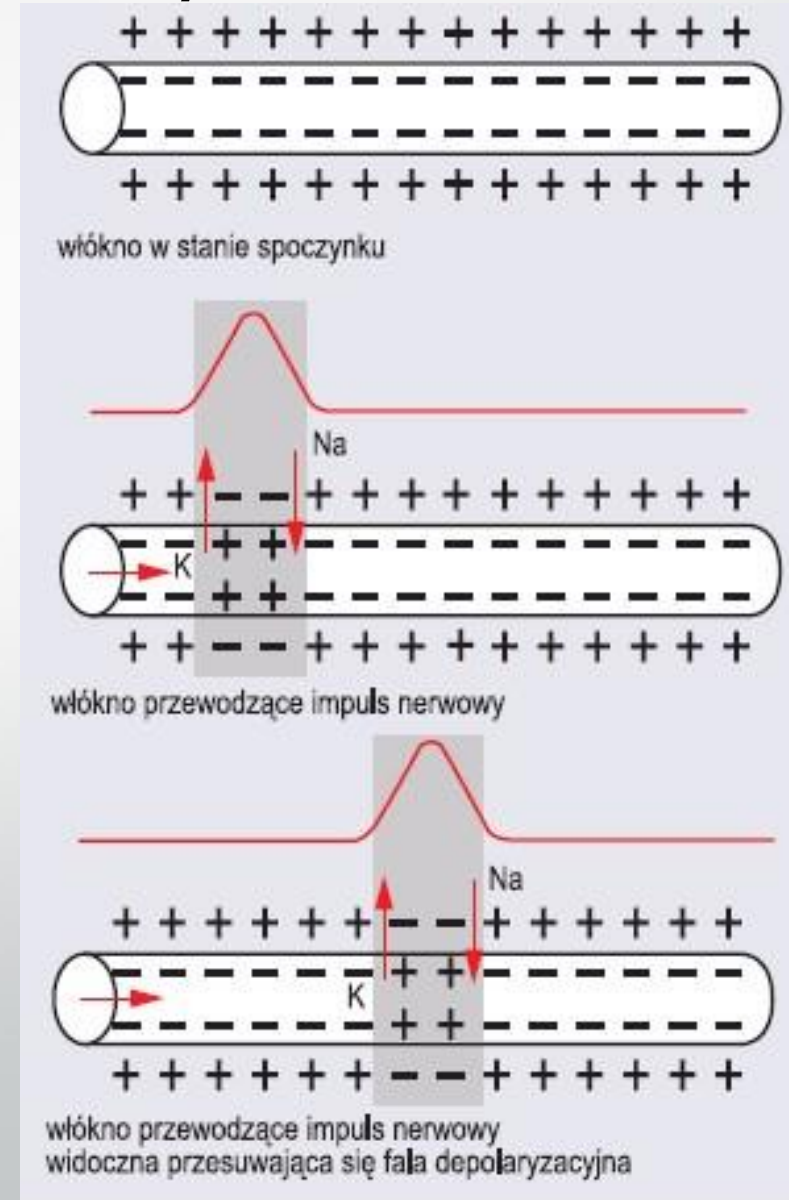
Istnieją różne typy pobudzeń ale najpopularniejszym przykładem jest pobudzenie, które może się rozprzestrzeniać. Nazywamy je impulsem nerwowym, a bardziej fachowo: **potencjałem czynnościowym**.



Impuls nerwowy

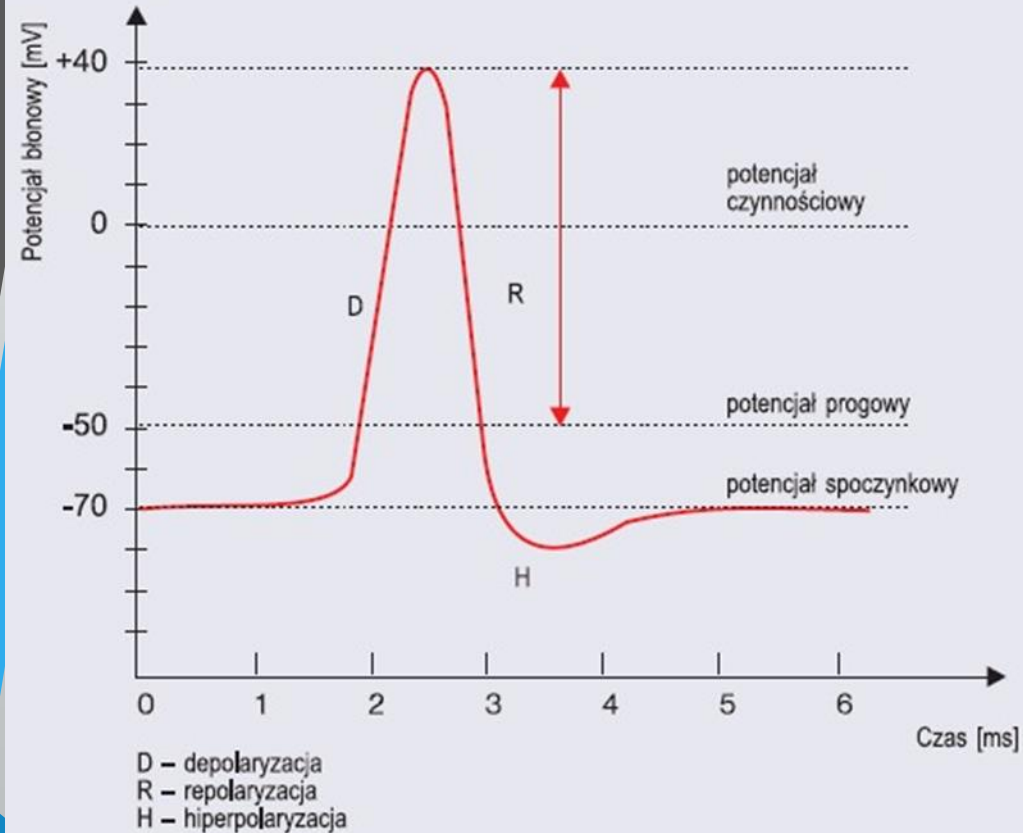


Na^+ - kationy sodu; K^+ - kationy potasu

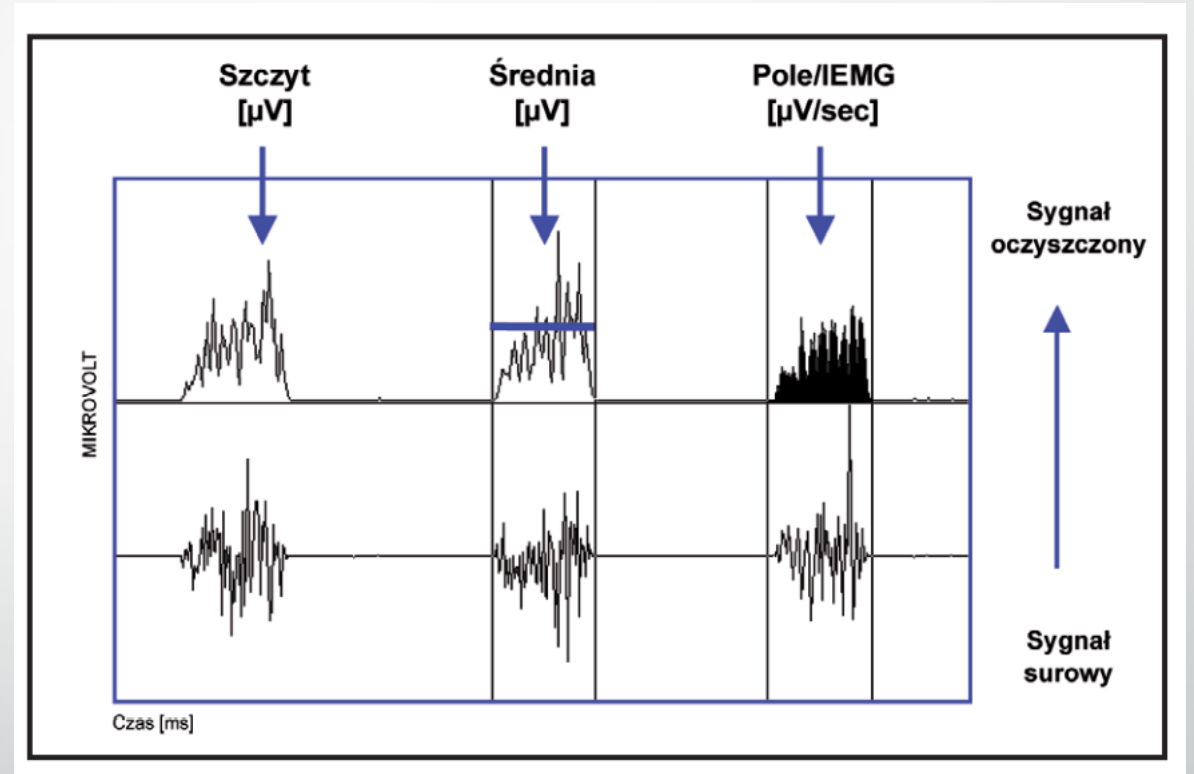




Potencjał czynnościowy – zapis EMG



Potencjał czynnościowy.



Standardowe parametry amplitudy EMG na oczyszczonej krzywej zapisu.



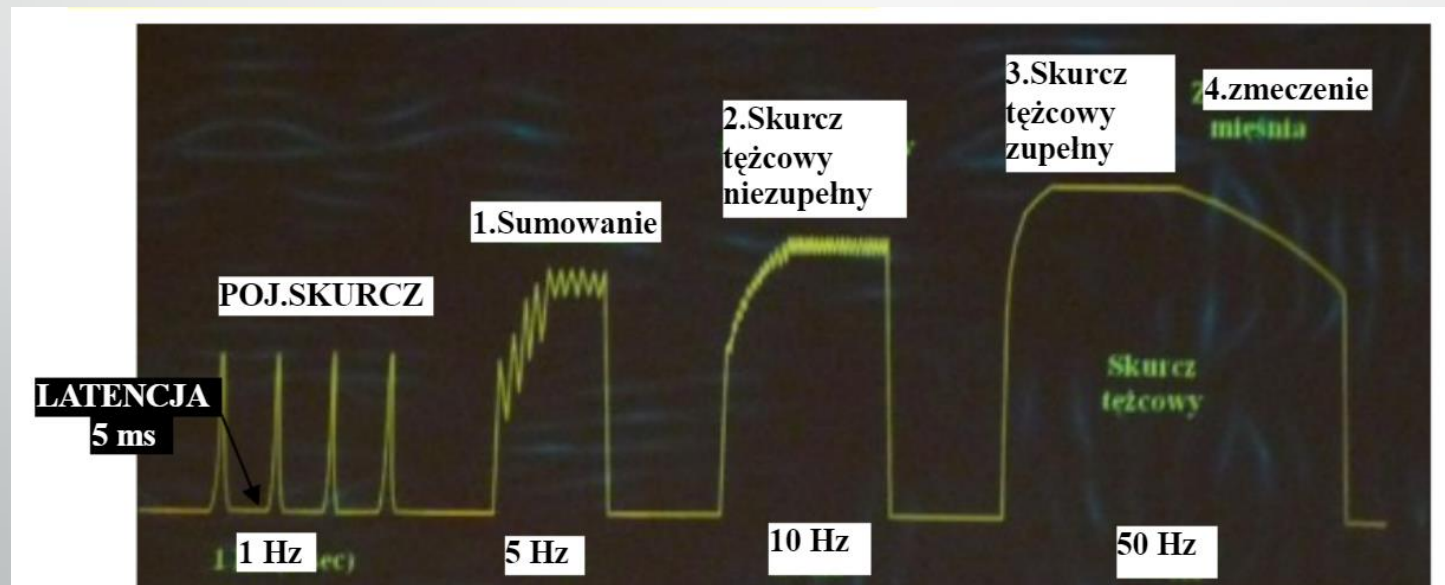
Rodzaje skurczów mięśnia w zapisie EMG

POJEDYNCZY SKURCZ (ok. 150 μ s):

- latencja (5 μ s) = czas potrzebny na dopływ impulsu do płytki motorycznej i „kaskadę zdarzeń” w miocycie, prowadzącą do ślizgu miofilamentów-1-3 μ s podczas depolaryzacji włókno refrakcja bezwzględna (całkowita niewrażliwość)
- faza skurczowa = 10-100 μ s (wzrost napięcia mięśnia aż do punktu szczytowego)
- faza rozkurczowa = 30-300 μ s (spadek napięcia od punktu szczytowego do wartości spoczynkowej)

SKURCZ TĘŻCOWY ZUPEŁNY:

- maksymalna siła skurczu = ok. 3-5 razy większą niż skurcz pojedynczy.
- im wolniejszy skurcz tym mniejsza częstotliwość. Wystarczy żeby wprowadzić go w skurcz tężcowy.

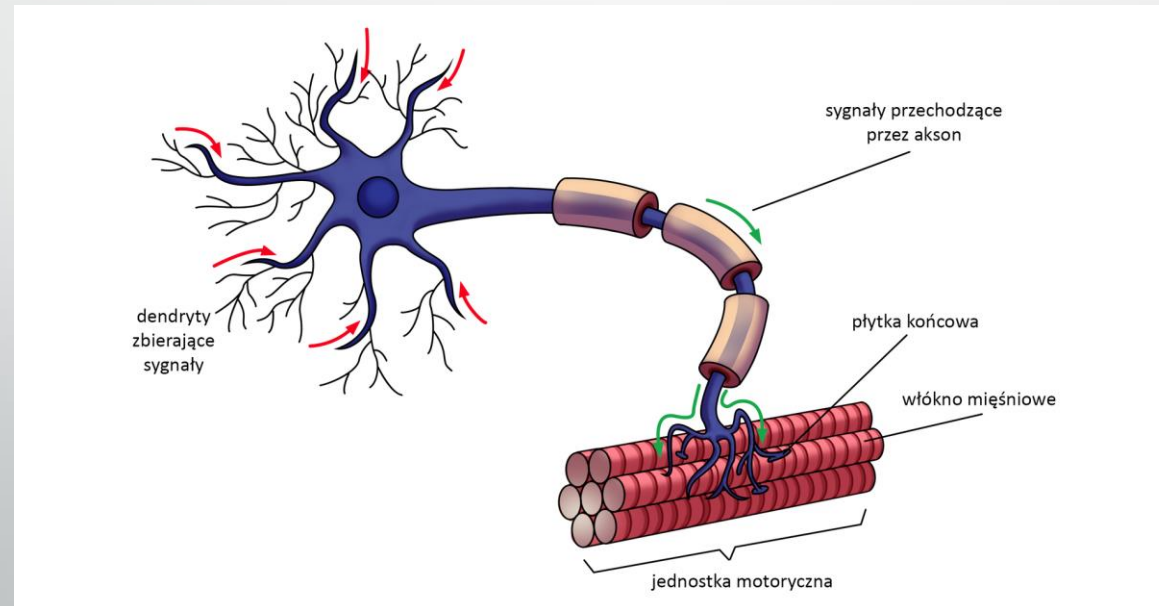




Jednostka motoryczna mięśnia

Jednostka motoryczna – to zespół komórek mięśnia szkieletowego (**miocytów**) unerwianych przez odgałęzienia tego samego neuronu ruchowego (**motoneuronu**). Cechą charakterystyczną miocytów danej jednostki motorycznej jest to, że kurczą się one zawsze jednocześnie.

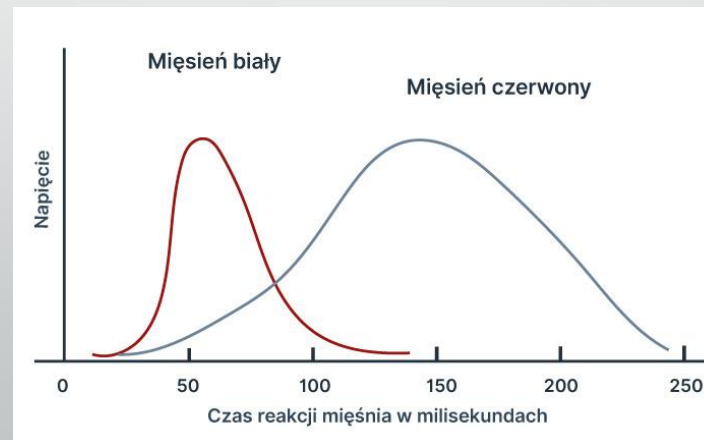
Impulsowy charakter bodźca o różnej częstotliwości oraz wzajemne przeplatanie się jednostek motorycznych tworzących „sieć” zapewniają w efekcie płynne działanie całego mięśnia i jego równomierną relaksację (różne jednostki motoryczne mają różną fazę pobudzenia/relaksacji w danym momencie).





Rodzaje włókien mięśniowych

- Wolnokurczliwe, (włókna czerwone) typu I mają metabolizm tlenowy, kurcząc się wolno i słabo, lecz mogą pracować długotrwale, bez zmęczenia. Przeważają w mięśniach obecnych w obrębie tułowia, odpowiedzialnych za powolny, długotrwały skurcz (np. utrzymanie pionowej postawy ciała lub chodzenie).
- Szybkokurczliwe, (włókna białe) typu II kurczą się szybko i silnie, mają metabolizm beztlenowy, przez co szybko się męczą. Wśród nich rozróżnia się jeszcze dwa rodzaje: odporne na zmęczenie (tlenowo – glikolityczne; typu IIA lub FOG) i podatne na zmęczenie (glikolityczne; typu IIX lub FG). Włókna te przeważają w mięśniach, znajdujących się głównie w obrębie kończyn.





Rodzaje włókien mięśniowych

Jednostki motoryczne typu I składają się z włókien tonicznych, a typu II z fazowych. Ma to znaczenie zasadnicze w fizjologii skurczu mięśnia, gdyż w warunkach normalnych pobudzeniu podlegają najpierw wolne jednostki typu I, zaś przy pożądanej sile mięśnia w dalszej kolejności włączają się szybkie jednostki typu II.

Kluczową rolę w skurczu mięśni szkieletowych odgrywa rekrutacja jednostek motorycznych. Kiedy mięsień musi wygenerować większą siłę, rekrutowane są dodatkowe jednostki motoryczne, które przyłączają się do skurczu.

Ten proces rekrutacji jest zgodny z zasadą wielkości (tzw. zasadą Hennemana), zgodnie z którą mniejsze jednostki motoryczne są aktywowane jako pierwsze, a w miarę wzrostu zapotrzebowania na siłę rekrutowane są coraz większe jednostki motoryczne.

Skoordynowana aktywacja i rekrutacja jednostek motorycznych przyczynia się do ogólnej kontroli, siły i wydajności skurczów mięśni. Rekrutując jednostki motoryczne o różnej wielkości, mięsień może precyzyjnie regulować siłę i kontrolować swoje skurcze.



Formy działania mięśnia

Skurcz **izotoniczny** – zmiana długości mięśnia przy zachowaniu stałego poziomu napięcia mięśniowego. Przykładem tego zjawiska jest „zgięcie ręki w stawie łokciowym”.

Skurcz **izometryczny** – zwiększanie napięcia mięśnia, przy zachowaniu tej samej długości. Skurcze izometryczne występują podczas „nieruchomego” stania i charakteryzuje je równowaga dźwigni kostnych.

Skurcz **auksotoniczny** – zmiana długości oraz napięcia mięśnia. Skurcz auksotoniczny dzieli się na koncentryczny oraz ekscentryczny. O skurczu koncentrycznym mówimy wtedy, gdy dochodzi do zwiększenia napięcia mięśnia oraz jego skrócenia. Siła generowana przez mięsień jest większa niż działające obciążenie. W przypadku skurczu ekscentrycznego wzrasta napięcie mięśnia natomiast jego długość ulega zwiększeniu (rozciągnięciu).



Czynności mięśnia

Czynność mięśnia to takie jego działanie, któremu towarzyszy elektryczny potencjał czynnościowy, w odróżnieniu np. od działania rozciągniętego i niepobudzonego mięśnia na dźwignię kostną.

Rodzaj czynności mięśnia zależy od relacji między siłą przez niego wyzwoloną (lub momentem siły) a siłą (momentem siły) zewnętrzną. Siłę wyzwoloną towarzyszy zmiana długości mięśnia, utożsamiana ze zmianą odległości między jego przyczepami (początkowym i końcowym).

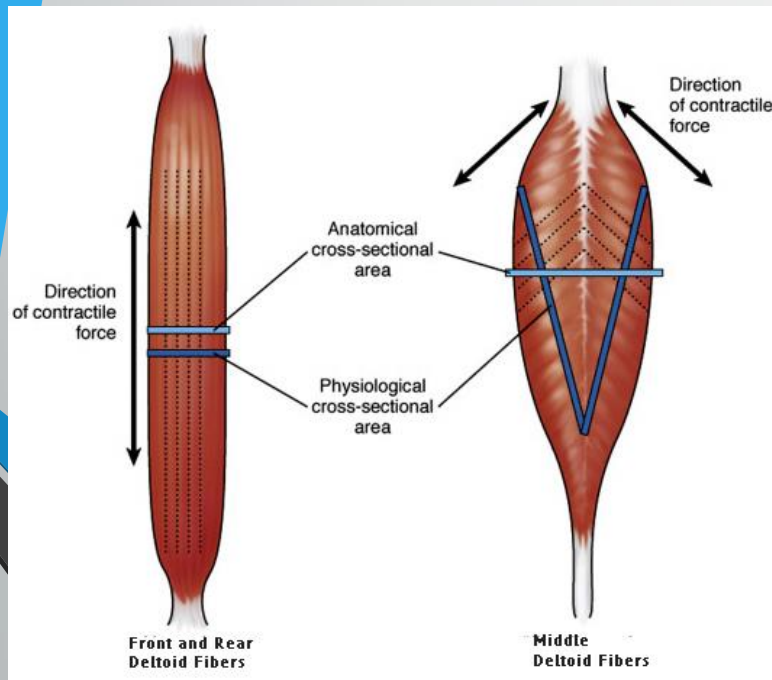
Zmiana długości mięśnia (Δl)	Czynności	Warunki wyzwalań siły (F)	Naprężenie (U)	Stosunek momentu mięśniowego (M_m) do zewnętrznego (M_z)
Brak zmiany $\Delta l = 0$	Statyczna	Statyka	Izometryczne	$\sum M_m = \sum M_z$
Skracanie $\Delta l < 0$	Koncentryczna czyli pokonująca	Dynamika	Auksotoniczne, czyli mieszane	$\sum M_m > \sum M_z$
Wydłużanie $\Delta l > 0$	Ekscentryczna czyli ustępująca			$\sum M_m < \sum M_z$

Zależności siły rozwijanej przez mięsień

Siła rozwijana przez mięsień jest zależna od: powierzchni przekroju, długości i prędkości skracania.

Stosunek siły mięśnia do jego **przekroju fizjologicznego** nazywa się siłą jednostkową mięśnia lub siłą właściwą. Jest to wartość siły mięśnia przypadająca na jednostkę powierzchni jego przekroju fizjologicznego.

Jej wartość waha się od 16 do 30 N/cm².



$$F_m = PPF \cdot \sigma \text{ [N/cm}^2\text{]}$$

gdzie:

F_m – siła mięśnia

PPF – pole przekroju fizjologicznego

σ (delta) – napężenie jednostkowe (bezwzględna siła mięśniowa)

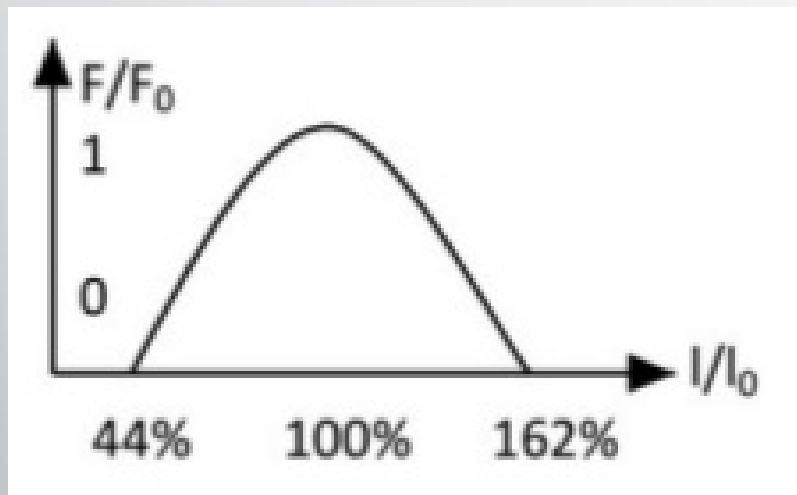
Zalecana lektura: Wiktoria Wojnicz: *Biomechaniczne modele układu mięśniowo-szkieletowego człowieka*. Wydanie I. – Gdańsk, 2018



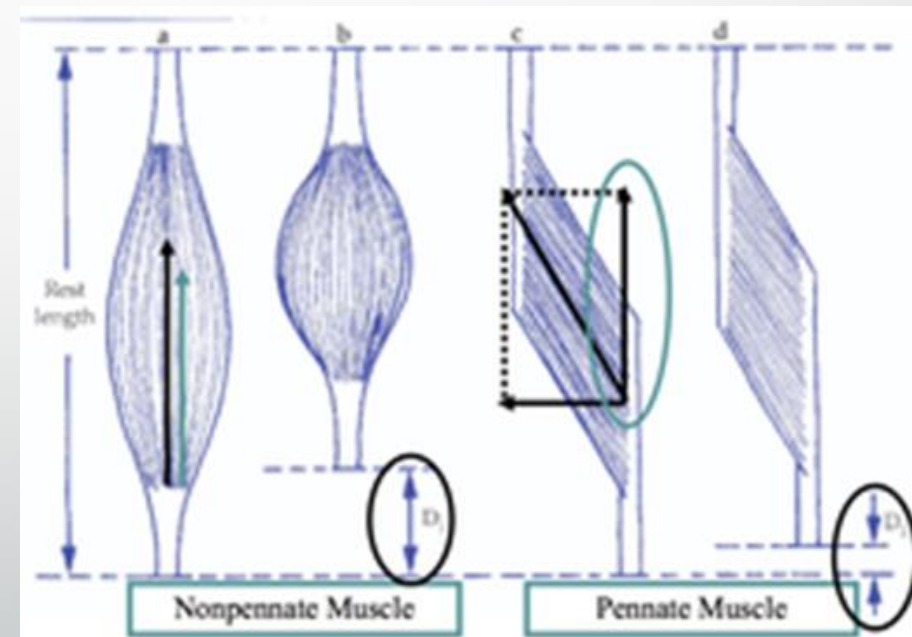
Zależność siła-długość

Długość mięśnia, który nie jest skrócony, ani rozciągnięty to długość spoczynkowa (l_0).

W żywym ciele występuje wstępne rozciągnięcie mięśnia – powstaje siła bierna, która dąży do skrócenia mięśnia rozciągniętego o ok. 20 % długości spoczynkowej.



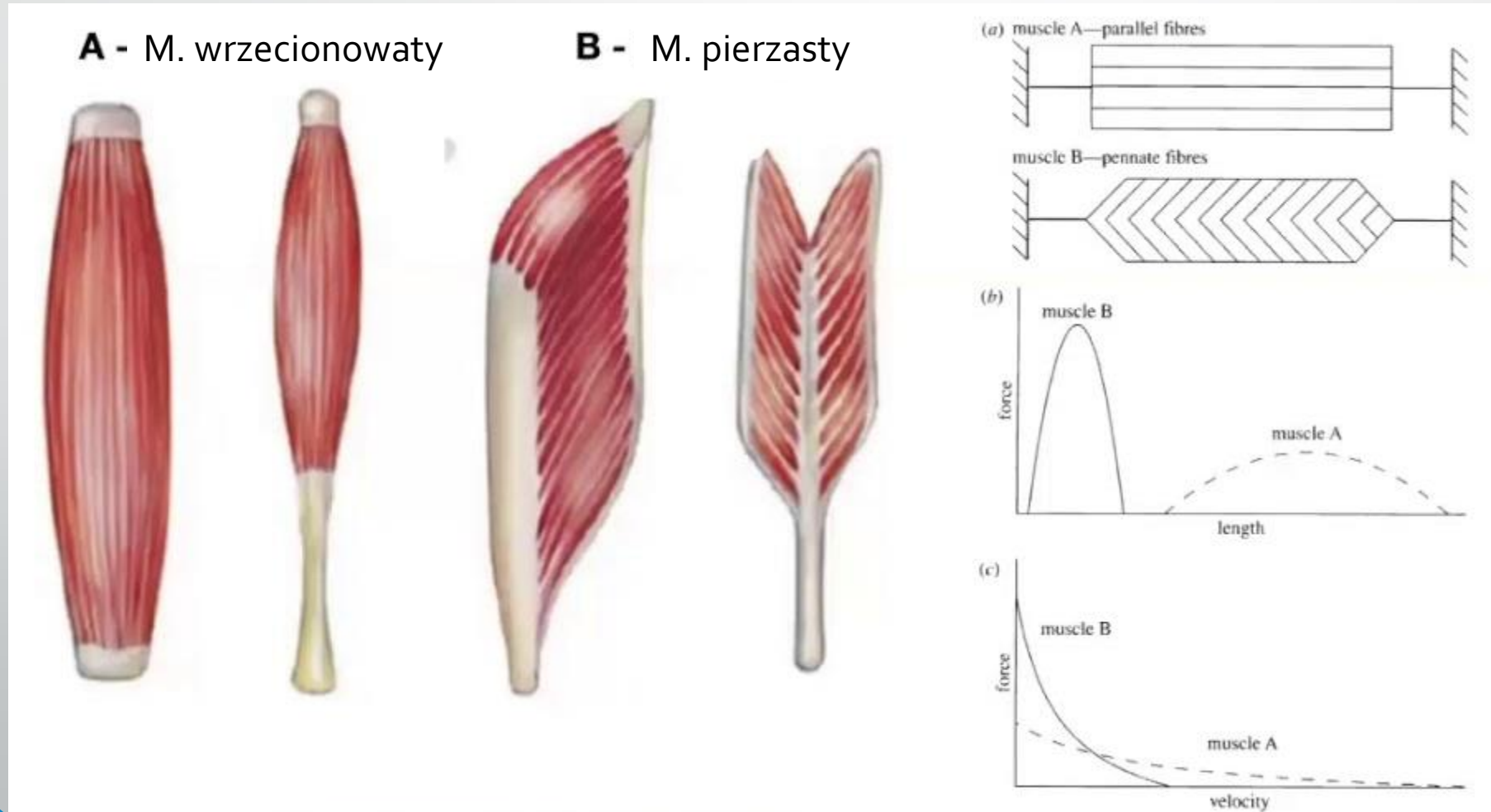
Siła względna F/F_0 zależna od stanu długości względnej l/l_0 sarkomeru (dla mięśnia izolowanego - tylko elementy aktywne)





Zależność siła-długość

Siła (F) wyzwalana przez pobudzony sarkomer jest funkcją jego długości (l): $F = f(l)$





Zależność siła-prędkość skracania

Wartość siły rozwijanej przez mięsień zależy od **prędkości jego skracania się**.

W przybliżeniu wartość ta jest odwrotnie proporcjonalna.

Dokładnie tą zależność zobrazował A. V. Hill, laureat nagrody nobla w 1922 r. Wyznaczył on charakterystyczne równanie:

$$(F_m + a)v = (F_{\max} - F_m)b$$

lub

$$(F_m + a)(v + b) = (F_{\max} + a)b = \text{const.}$$

gdzie:

F_m – siła rozwijana przez mięsień skracający się z prędkością v

a – stała charakterystyczna dla mięśnia, zależna od ciepła jego skracania się oraz oporu wewnętrznego

b – stała zależna od długości mięśnia i jego temp.

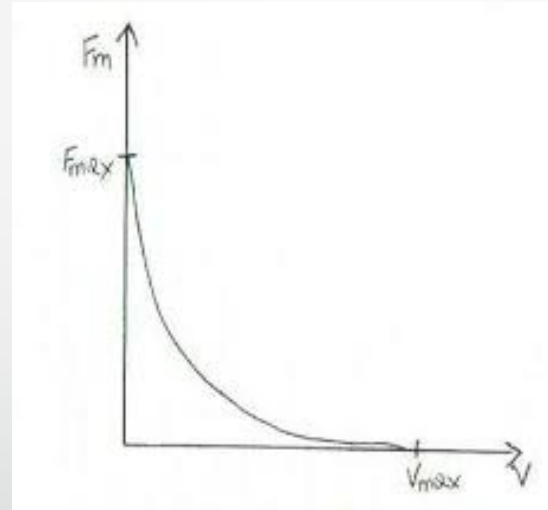
F_{\max} – maksymalna wartość siły generowanej przez mięśnie przy założeniu, że $v = 0$



Zależność siła-prędkość skracania

Krzywa charakterystyczna Hilla, przedstawiająca zależność $F_m = f(v)$

Krzywa przecina oś F_m w punkcie o współrzędnych $(0, F_{max})$ oznacza to, że istnieje wartość maksymalna siły danego mięśnia. Podobny wniosek wysunąć można śledząc punkt przecięcia się wykresu z osią V . Punkt ten $(V_{max}, 0)$ stanowi maksymalną prędkość skracania się mięśnia.



Zależność siły mięśnia od prędkości jego skurczu ściśle wiąże się z jego mocą. Analizując krzywą charakterystyczną Hilla zauważyć można, że moc rozwijania przez pracujący izometrycznie (tzn. wyzwalający maksymalną siłę) lub kurczący się z maksymalną prędkością jest równa zero. W tych przypadkach moc użyteczna (i praca) jest równa zero.



Zależność siła-prędkość skracania

Prędkość skracania sarkomeru mięśni człowieka jest stała i wynosi średnio **6 μ m/s**.

Im większa długość mięśnia tym większa jest prędkość skracania.

Im większy kąt pierzastości mięśnia tym mniejsza jest prędkość skracania.

W warunkach naturalnych:

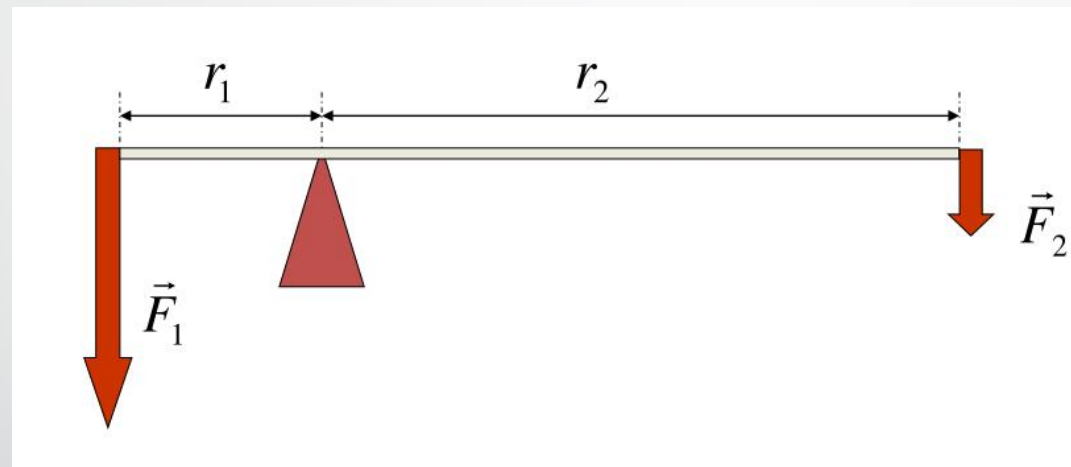
- Małe obciążenie – możliwa duża prędkość skracania mięśnia
- Duże obciążenie – możliwa mała prędkość skracania mięśnia.

Przy nie obciążonych kończynach możemy osiągać duże prędkości, ale nie możemy nadać dużej siły. W miarę zmniejszania siły oporu możemy zwiększyć prędkość ruchu.



Dźwignie w ciele człowieka

Zależność między oddziałującymi siłami a odległościami na których te siły działają względem punktu podparcia (osi obrotu) została przedstawiona przez Archimedesesa. Wynika z niej jaką minimalną siłą czynną F_2 należy przyłożyć poprzez ramię r_2 aby podnieść ciężar (siłę ciężkości) F_1 oddalony na odległość r_1 od punktu podparcia.



Ramię pomnożone przez odległość na której działa siła nazywana jest **momentem siły**. Moment siły możemy zwiększyć przykładając dłuższe ramię - dzięki czemu jesteśmy w stanie pokonać czasem nawet znaczny ciężar.



Dźwignie w ciele człowieka

W organizmie człowieka jest wiele podobnie działających dźwigni, przy czym siły F_2 i F_1 są to siły pochodzące z pracy mięśni i sił ciężkości działających na nasz organizm lub jego części. System dźwigni w ciele człowieka, dzięki którym siła wyzwalana przez mięśnie jest przenoszona na obiekty zewnętrzne stanowi szkielet kostny.

Układ kości jako biernych narzędzi ruchów oraz mięśni odpowiedzialnych za ruch możemy porównać do dźwigni, wyróżniając w nich kilka podstawowych elementów:

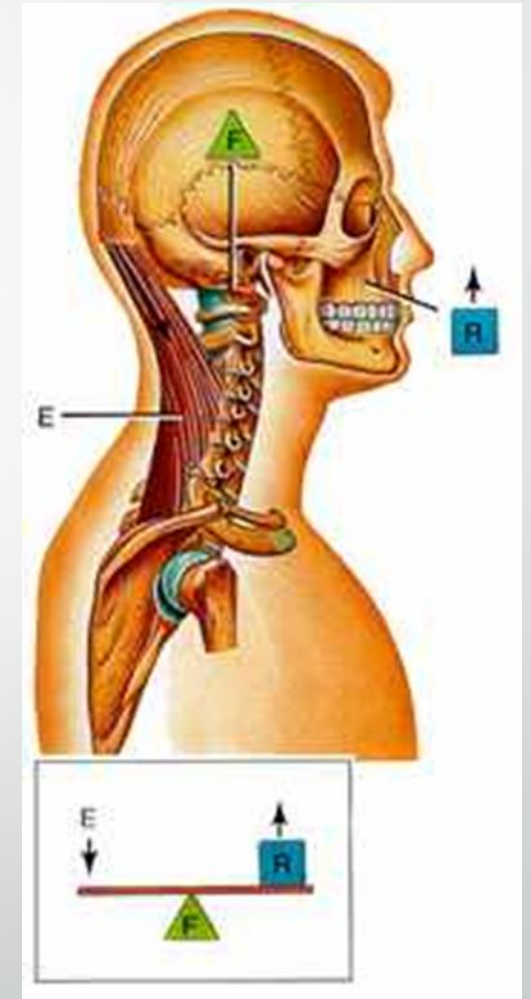
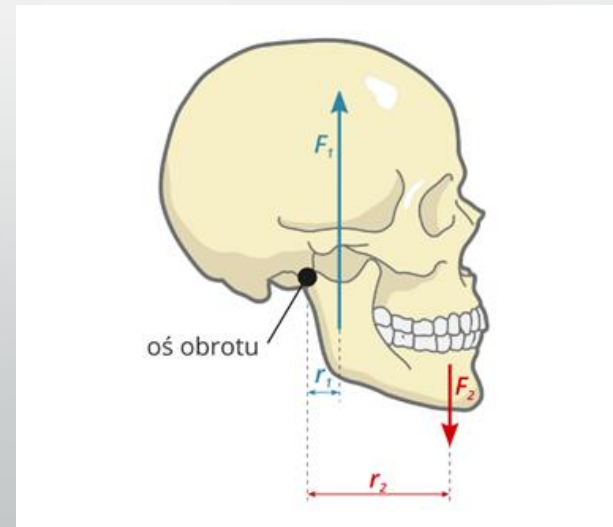
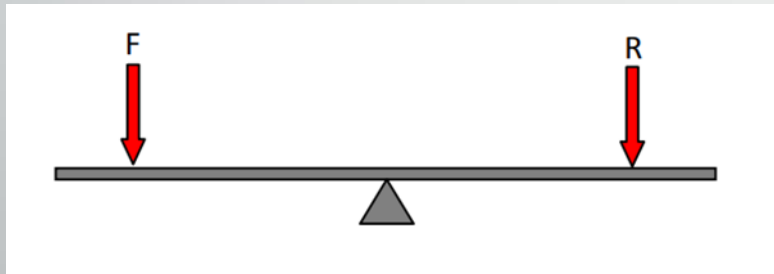
- Punkt oparcia - nieruchomy, dookoła którego obraca się dźwignia - odpowiadający stawowi
- Siła czynna - którą wywołują mięśnie starające się poruszać dźwignię
- Ciężar (opór) – siła ciężkości do pokonania przez siłę czynną



Dźwignia I-go typu

Dźwignia I-go typu - dwuramienna, w której punkt podparcia (oś obrotu) jest położony między punktem przyłożenia siły a punktem przyłożenia oporu – działającej siły ciężkości.

Przykładem tego typu dźwigni jest staw szczytowo-potyliczny (miejsce w którym kości czaszki kontaktują się z pierwszymi kręgami kręgosłupa). W stawie tym mają miejsce pionowe ruchy głową - potakiwanie.

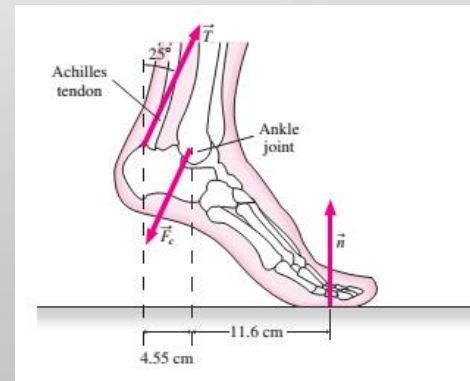
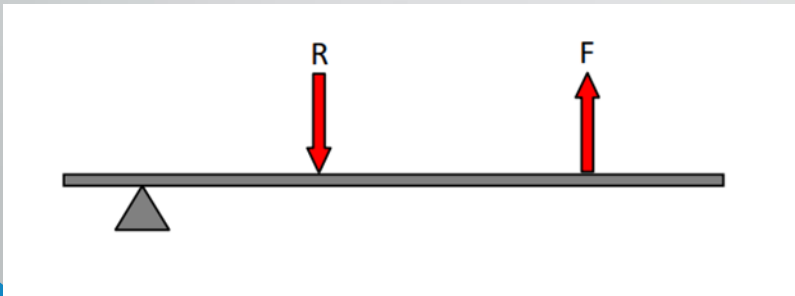




Dźwignia II-go typu

Dźwignia II-go typu - jednoramienna, w której punkt przyłożenia siły tzw. czynnej i siły ciężkości (oporu) leżą po tej samej stronie przy czym ramię siły czynnej jest dłuższe od ramienia oporu.

Jest to dość ekonomiczny staw w naszym organizmie a jego przykładem jest np. stopa, gdzie punktem podparcie w tym stawie będą stawy międzypaliczkowe palców bliższych stopy podczas stawania na palcach. Ramię siły (E) pochodzącej od mięśni łydki przechodzącej w ścięgno Achillesa jest dłuższe niż ramię siły ciężkości (R), co powoduje generowanie odpowiednio dużego momentu siły i pozwala w sposób stosunkowo łatwy podnieść ciężar naszego ciała.

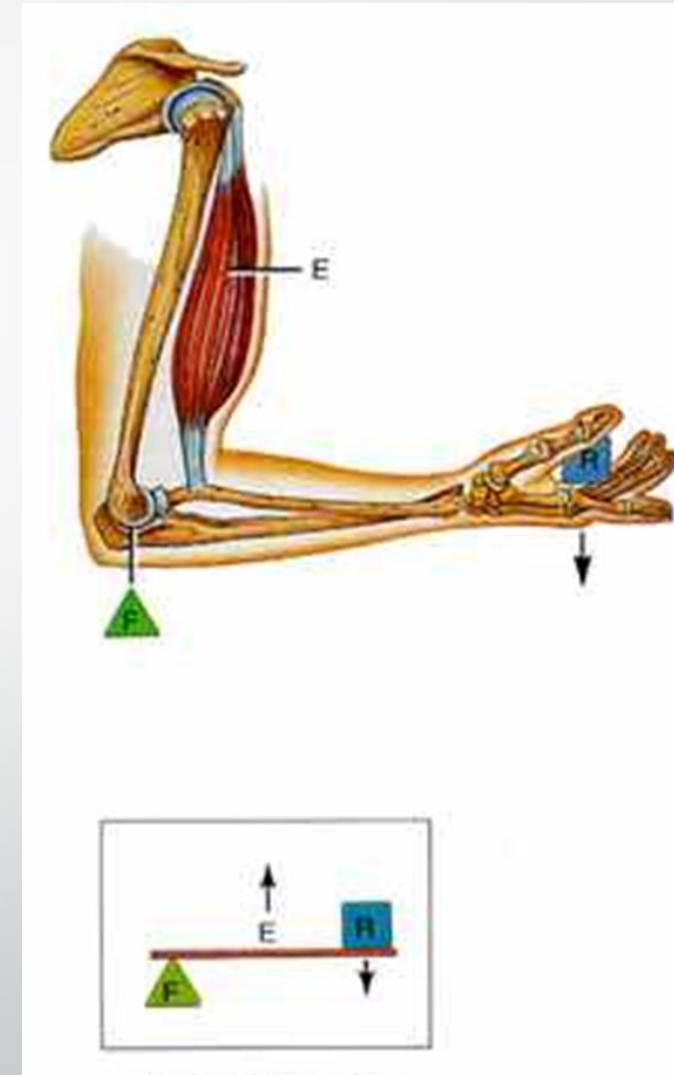
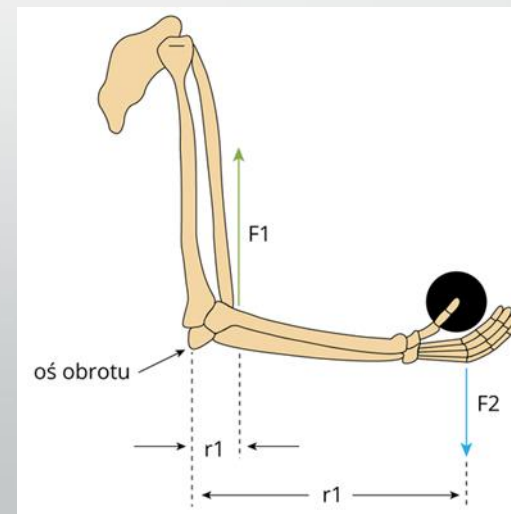
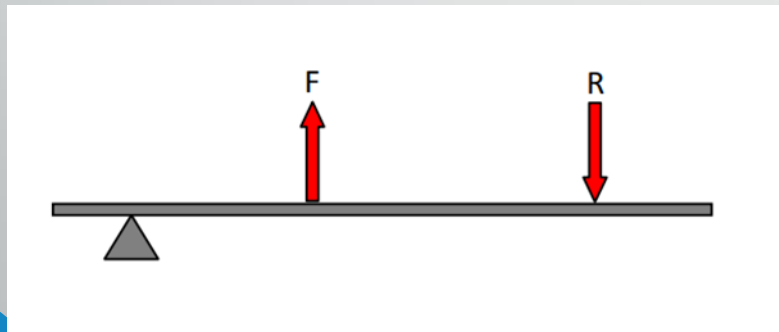




Dźwignia III-go typu

Dźwignia III-go typu - jednoramienna, w której punkt przyłożenia siły tzw. czynnej i siły ciężkości (oporu) leżą po tej samej stronie przy czym ramię siły czynnej jest krótsze od ramienia oporu. Jest to bardzo powszechny i zarazem mało ekonomiczny staw występujący w organizmie człowieka.

Przykładem jest np. kończyna górna, w której osią obrotu w tej dźwigni jest staw łokciowy. Gdy podnosimy jakikolwiek przedmiot trzymany w dłoni do poziomu pracuje właśnie ta dźwignia.





Mięśnie jedno- i wielostawowe

Mięśnie szkieletowe ogólnie podzielić można na dwie kategorie z punktu widzenia liczby stawów do których są umocowane:

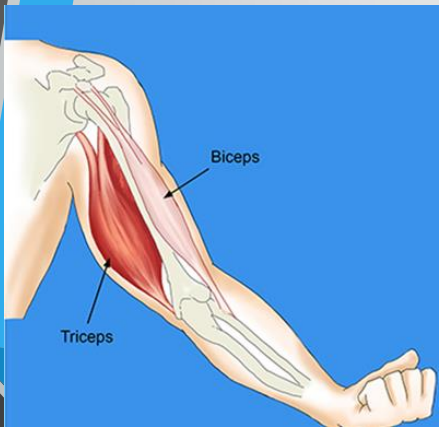
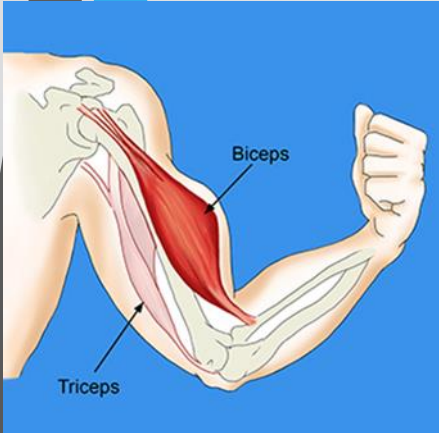
- mięśnie jednostawowe – przyczepione są tylko do jednego stawu (mięsień piersiowy lub naramienny - staw barkowy)
- mięśnie wielostawowe – przyczepione są do dwóch stawów (mięsień dwugłowy ramienia - staw barkowy i staw łokciowy; mięśnie brzuchate łydek – stopa i staw kolanowy).





Funkcjonalny podział mięśni

- agonistyczne – jednakowe działanie
- antagonistyczne – przeciwne działanie, przeciwdziałają nadmiernemu skurczowi mięśni agonistycznych, wpływają na płynność i szybkość ruchów
- synergistyczne – wspólne działanie
- stabilizujące – ustalają odcinki ciała, nie biorące udziału w danym ruchu, np. stawy sąsiednie, uniemożliwiające ruchy w niewłaściwej płaszczyźnie oraz zapewniające stałość pozycji podczas wykonywania ruchu



Synergizm mięśniowy – oznacza współruchy, które w sposób mimowolny dołączają się do ruchów dowolnych i jakby je uzupełniają. Niekiedy „nie widać” efektu ruchów, lecz występuje tylko skurcz izometryczny, lub wzmożone czynności bioelektryczne mięśni odległych tj. niebiorących udziału w danym ruchu.

Współdziałanie mięśniowej synergii w warunkach prawidłowych sprowadza się do wspomaganie aktywności mięśni stabilizujących, co ułatwia zdecydowanie wykonywanie ruchu podstawowego.

Poza tym synergia polega na dostosowawczej zmianie napięcia w grupie agonistów podczas wykonywania ruchu, w zależności od wielkości oporów zewnętrznych.



Równowaga w ciele człowieka

Z wcześniejszego przykładu (przedstawionego na slajdzie 22) wynika iż jeśli siła F_2 będzie mniejsza niż pewna siła minimalna – ciężar (F_1) po drugiej stronie punktu podparcia nie zostanie podniesiony.

Ponadto, im dłuższe ramię r_2 na którym oddziałuje siła F_2 , tym mniejsza siła jest potrzebna do pokonania siły ciężkości F_1 .

A zatem **stan równowagi** można opisać wzorem:

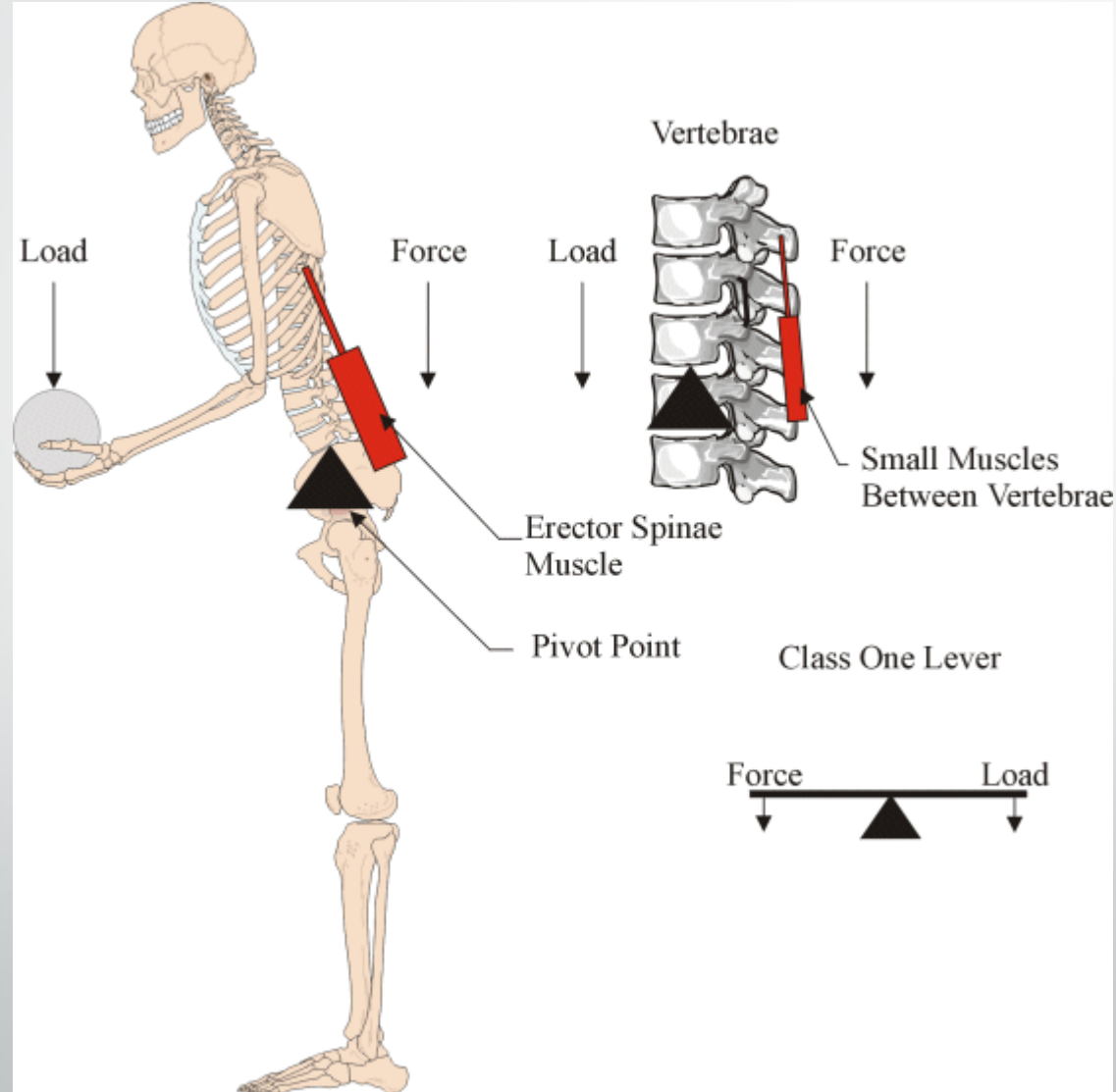
$$F_1 r_1 = F_2 r_2$$

Dwie siły równoważą się wzajemnie jeżeli mają ten sam punkt przyłożenia, ten sam kierunek działania te same wartości lecz przeciwne zwroty.

Wypadkowa sił równoważących się wynosi 0.

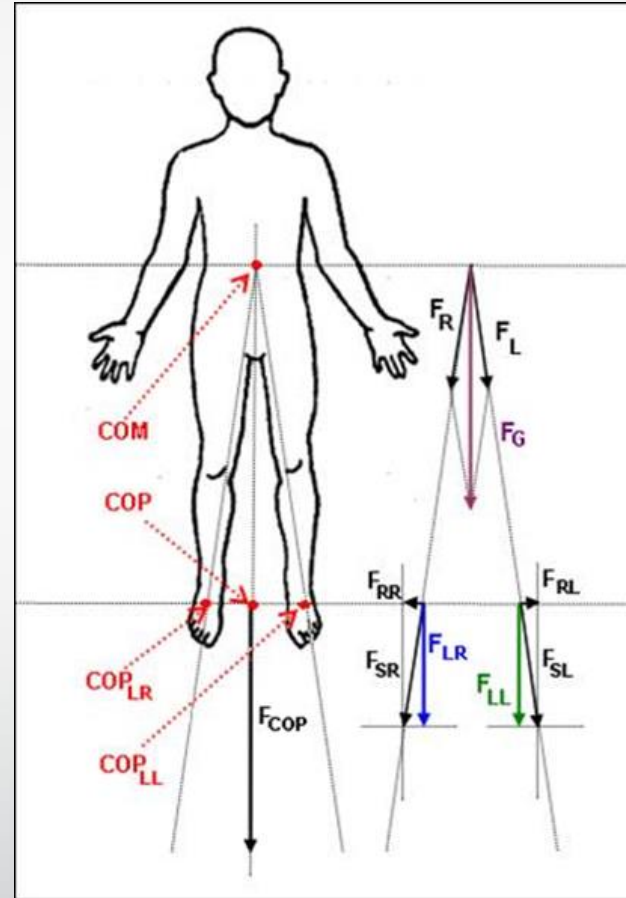
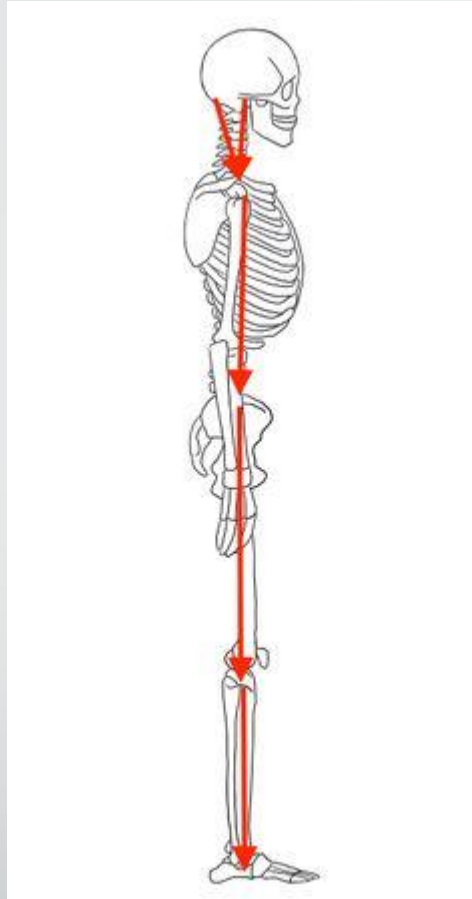


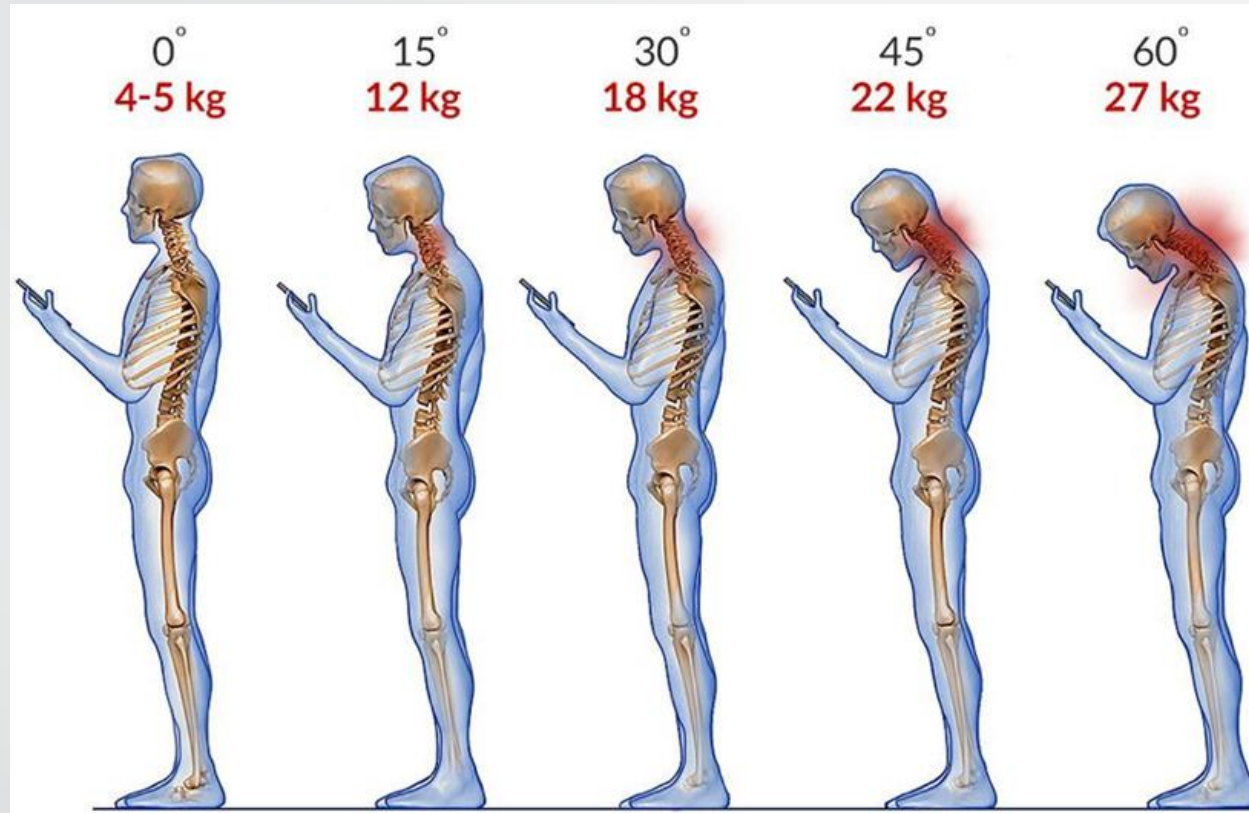
Równowaga ciała





Równowaga ciała w statyce





Dziękuję za uwagę
i zapraszam na kolejny wykład