



# PODSTAWY BIOMECHANIKI

**Wykład 5:**  
**Biomechanika mięśni**  
**Dźwignie w ciele człowieka**  
**Równowaga ciała**





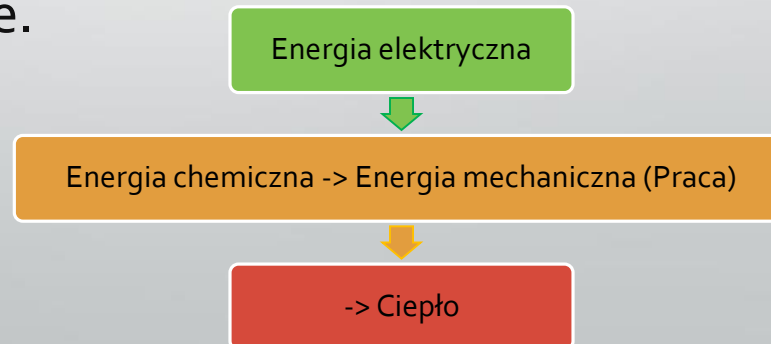
# Biomechanika mięśni

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.

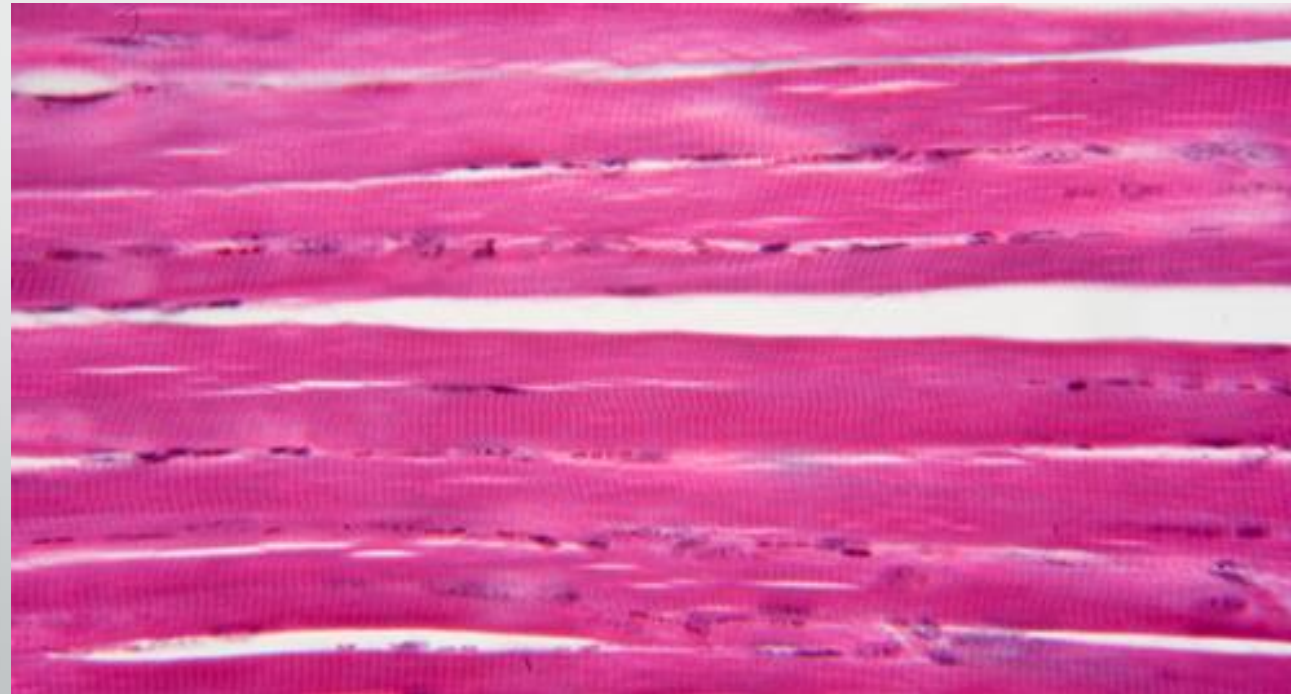




# Mięśnie szkieletowe (poprzecznie prążkowane)

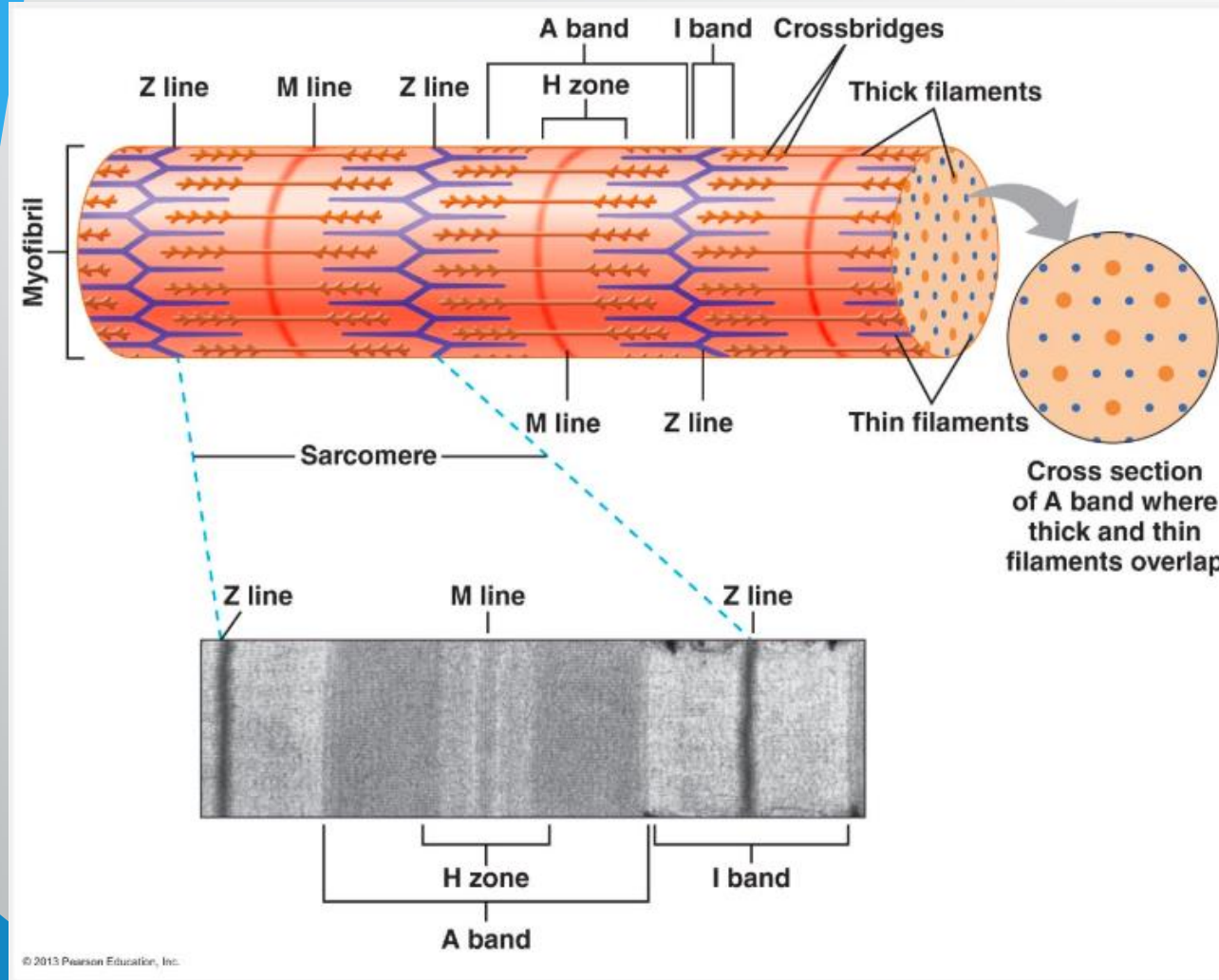
**Komórka mięśniowa** (włókno mięśniowe) wypełniona jest ułożonymi w pęczki włóknkami kurczliwymi (**miofibrylami**), które zbudowane są z dwóch rodzajów włókienek białkowych (**filamentów cienkich i filamentów grubych**), odpowiadających za skurcz mięśnia.

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.

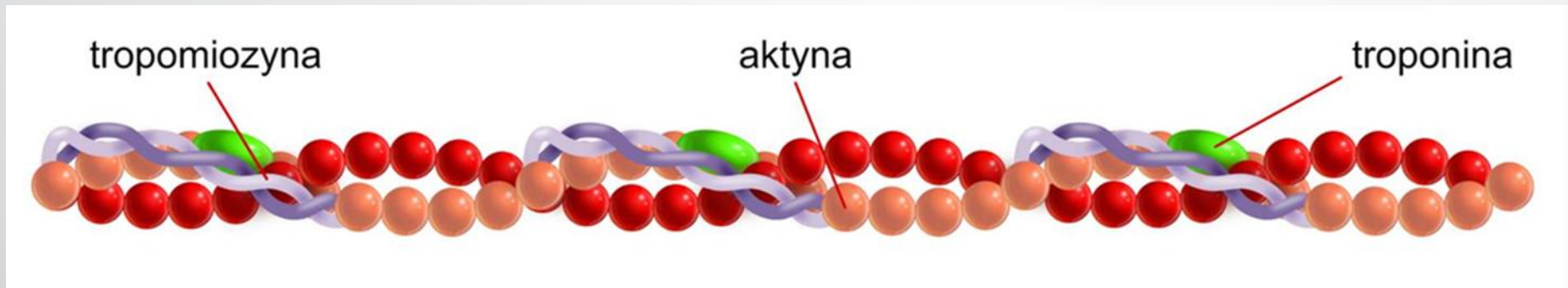
Obszar zawarty między dwiema liniami Z nosi nazwę **sarkomeru** i jest funkcjonalną jednostką miofibryli.



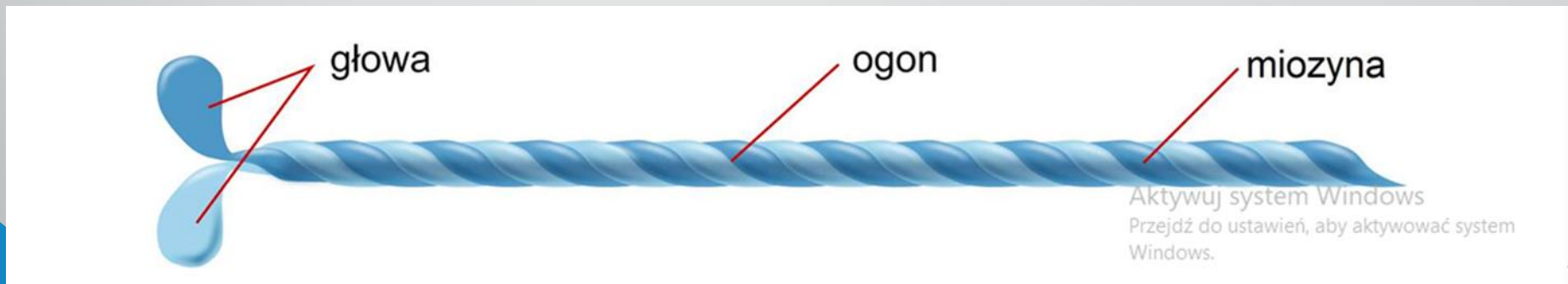


# Mięśnie szkieletowe (poprzecznie prążkowane)

**Filamenty cienkie** zbudowane są z cząsteczek białka **aktyny** tworzących łańcuch, który oplatają włókna **tropomiozyny** ze związaną **troponiną**



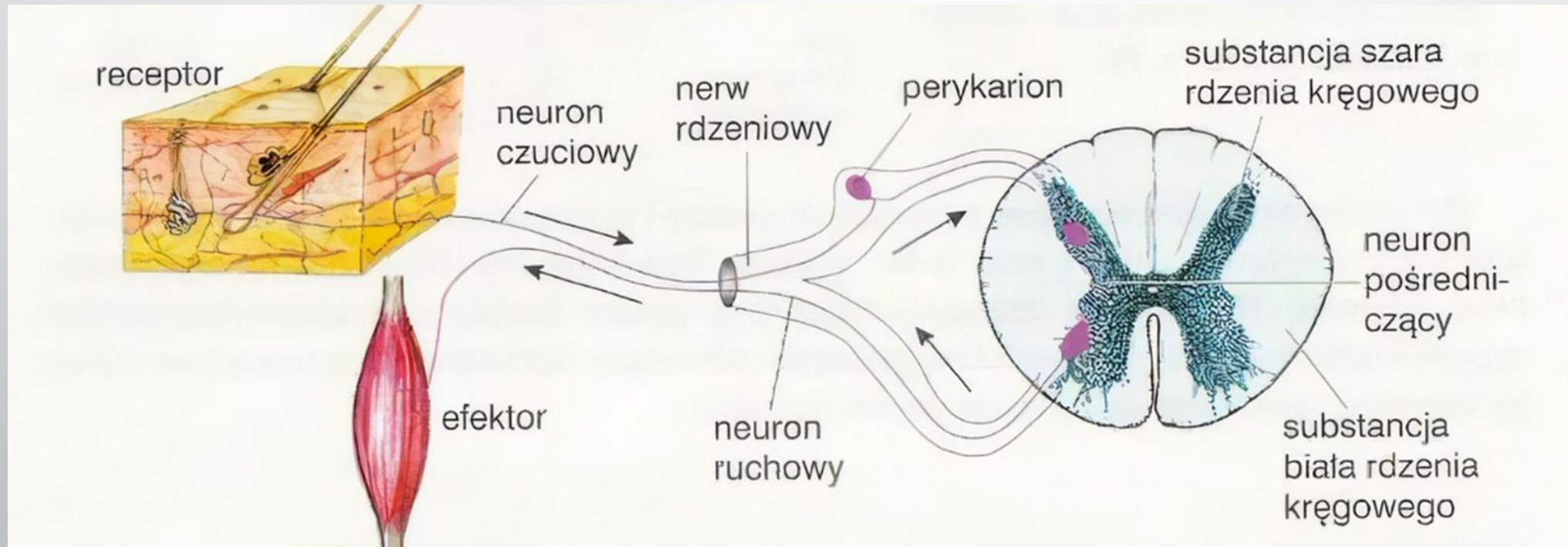
**Filamenty grube** zawierają dwa oplecione łańcuchy białka **miozyny** zakończone tzw. **głowami**.





# Skurcz mięśnia

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

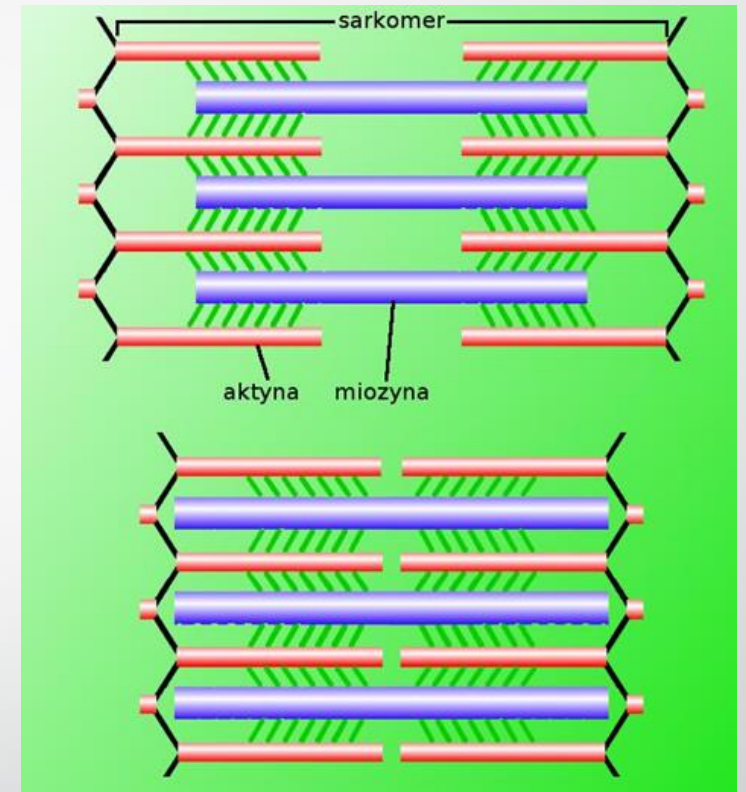
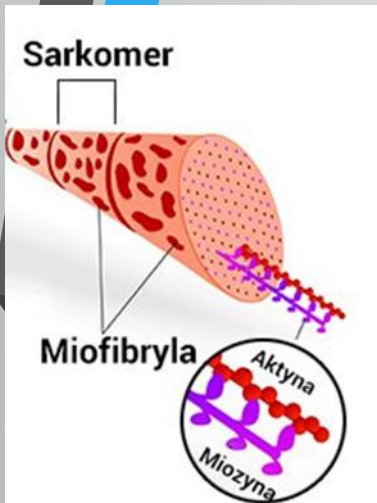




# Skurcz mięśnia

Podczas skurczu komórki mięśniowej następuje skrócenie wszystkich sarkomerów, co spowodowane jest wsuwaniem się filamentów grubych między filamenty 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.

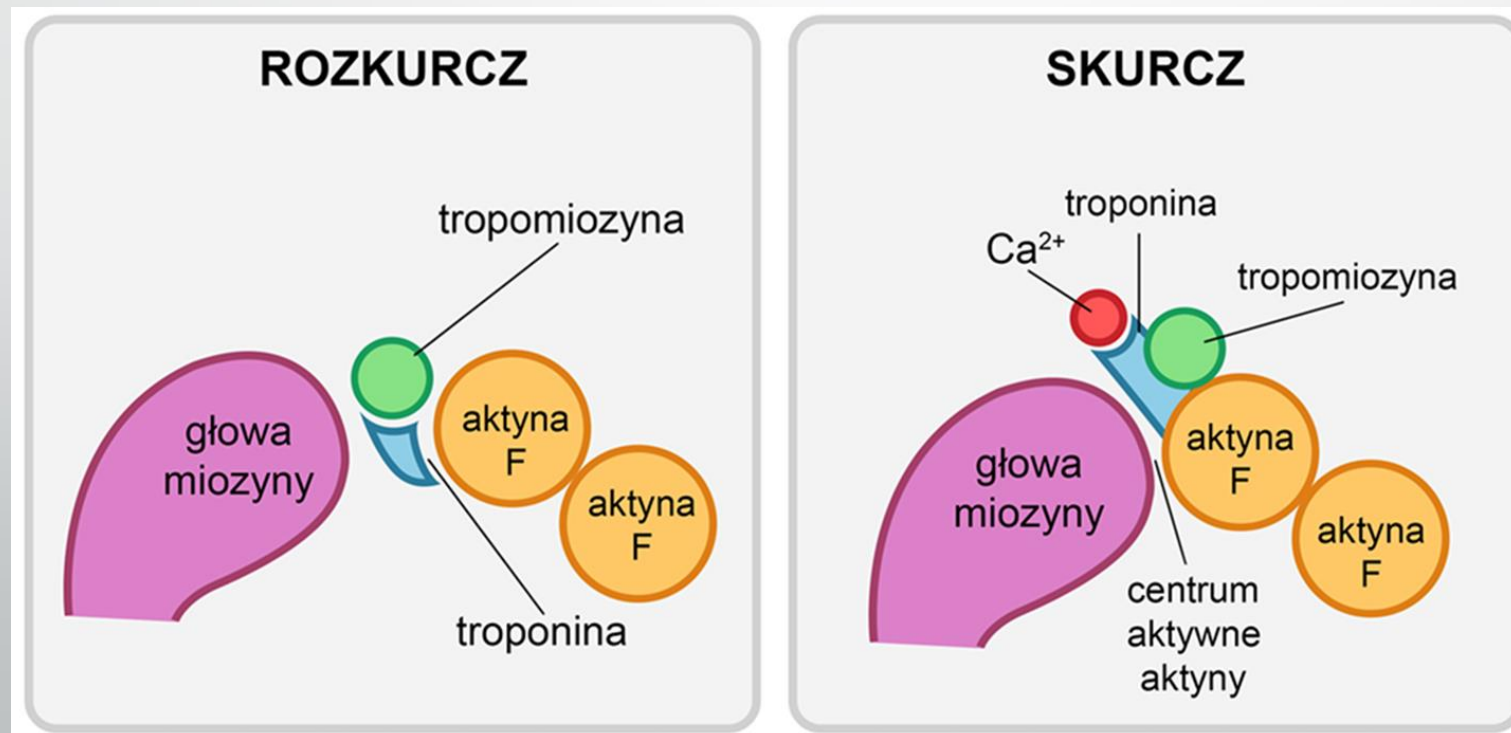
Towarzyszy temu odłączenie się fosforanu (V) i wyzwolenie energii. Efektem jest ścisłe związanie główki miozynowej z aktyną, co wyzwała kolejne zmiany. Podczas tych zmian odłącza się ADP, a przesuwaną się główką miozyny połączoną z aktyną ciągnie filament cienki.



# Fazy rozkurczu i skurczu mięśnia

W trakcie rozkurczu kompleks troponina-tropomiozyna zasłania miejsce aktywne aktyny, przez co tzw. głowa miozyny nie może związać się z aktyną.

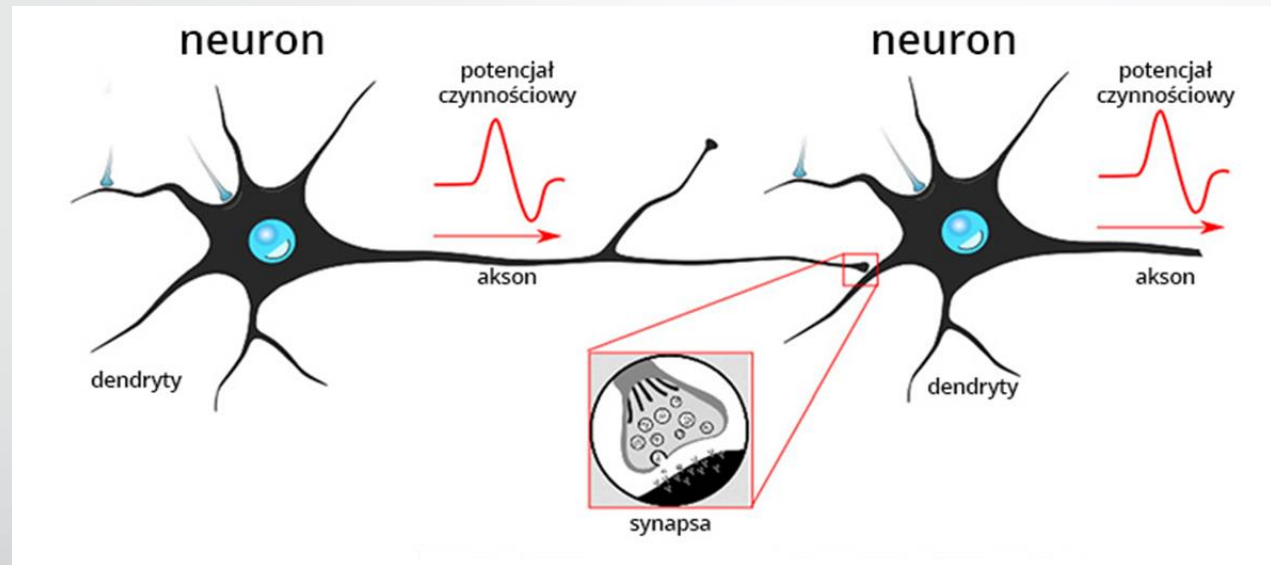
W momencie skurczu uwolnione jony wapnia wywołują zmianę ustawienia kompleksu troponina-tropomiozyna na aktynie i odsłonięcie jej miejsca aktywnego, co umożliwia wytworzenie wiązania pomiędzy aktyną i miozyną.





# Impuls nerwowy

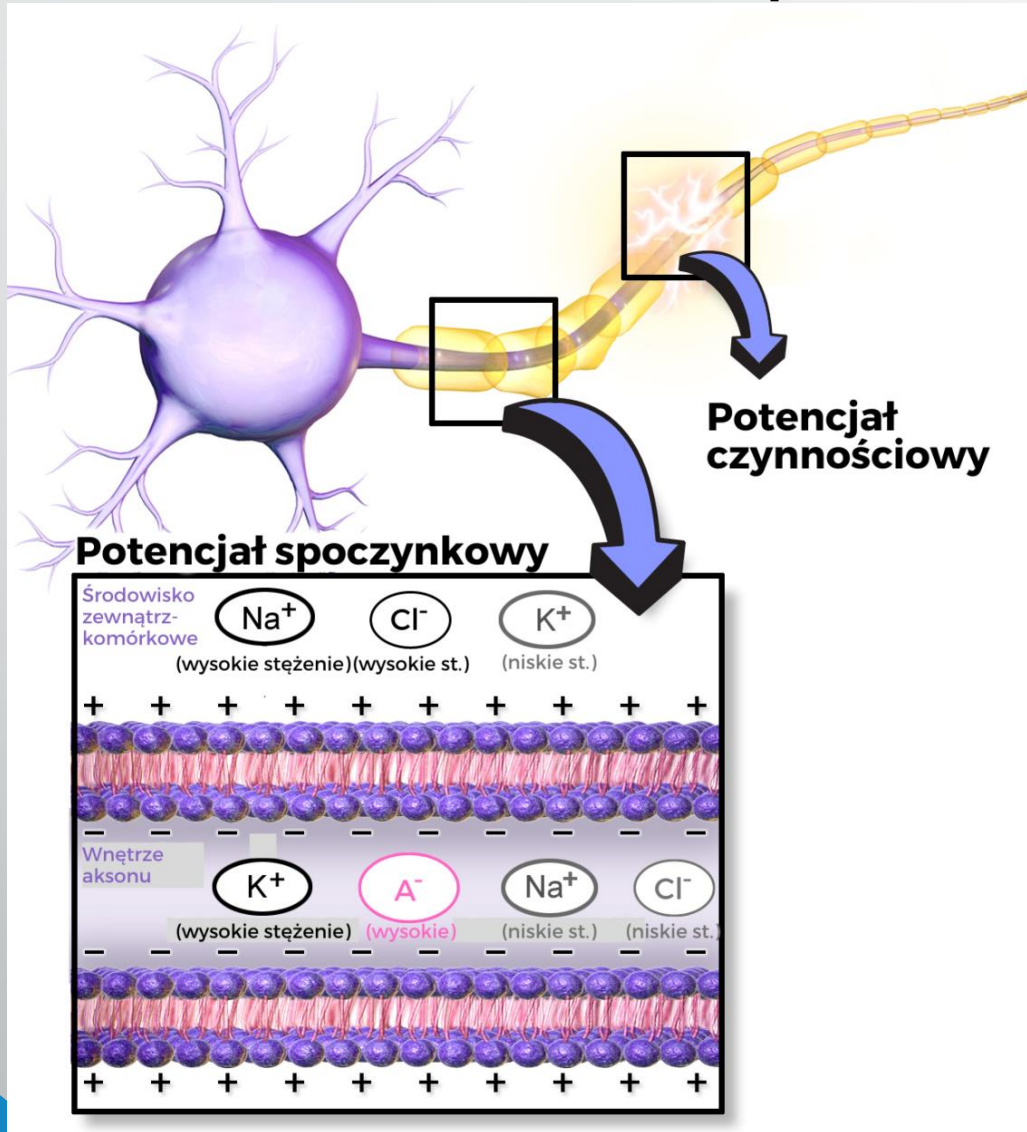
Neurony mają ważną cechę, którą jest pobudliwość. Oznacza to, że mają możliwość reagowania na bodźce: mogą odbierać pobudzenie i przekazywać je dalej w formie swojego rodzaju **prądu elektrycznego**.



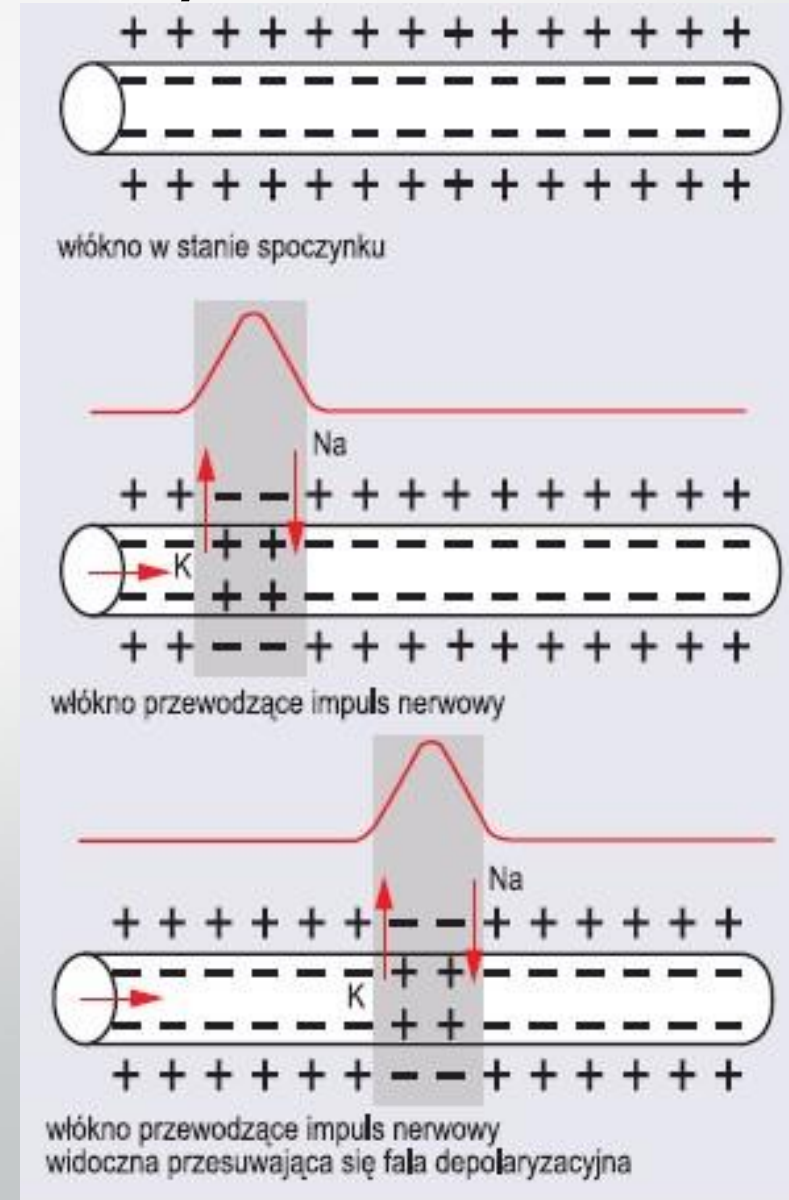
Istnieją różne typy pobudzeń ale najpopularniejszym przykładem jest pobudzenie, które może się rozprzestrzeniać. Nazywamy je impulsem nerwowym, a bardziej fachowo: **potencjałem czynnościowym**.



# Impuls nerwowy

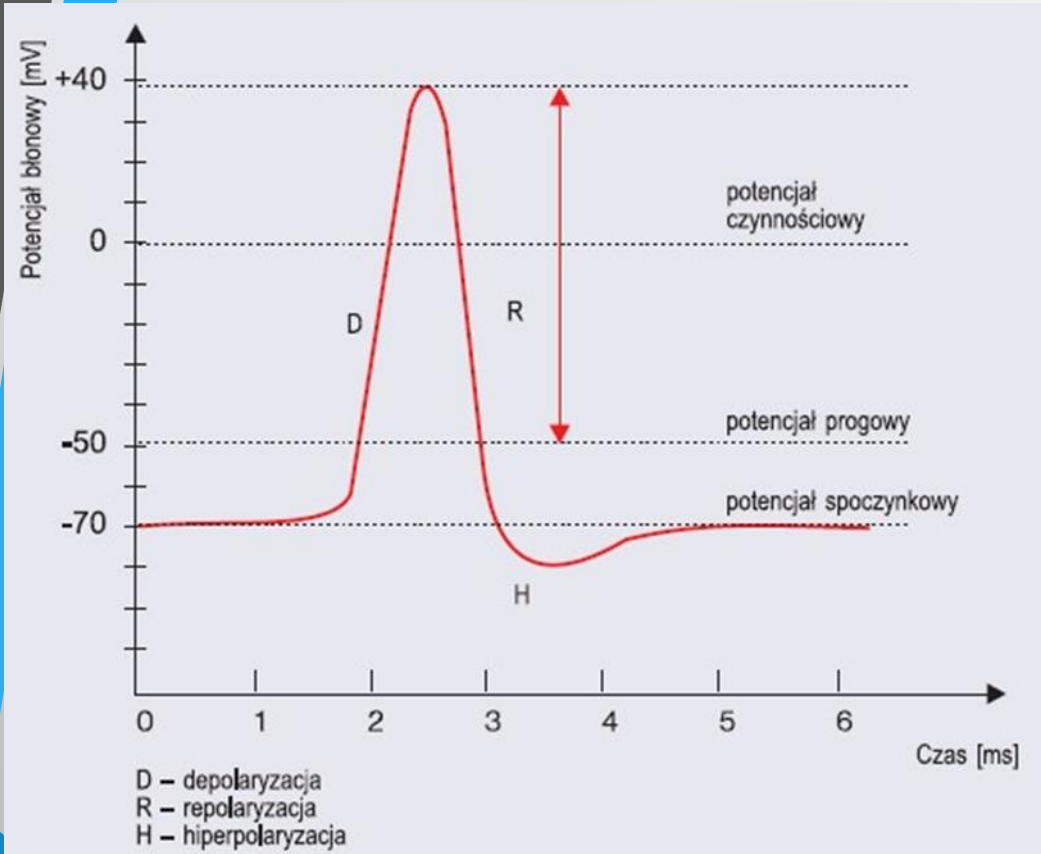


$\text{Na}^+$  - kationy sodu;  $\text{K}^+$  - kationy potasu

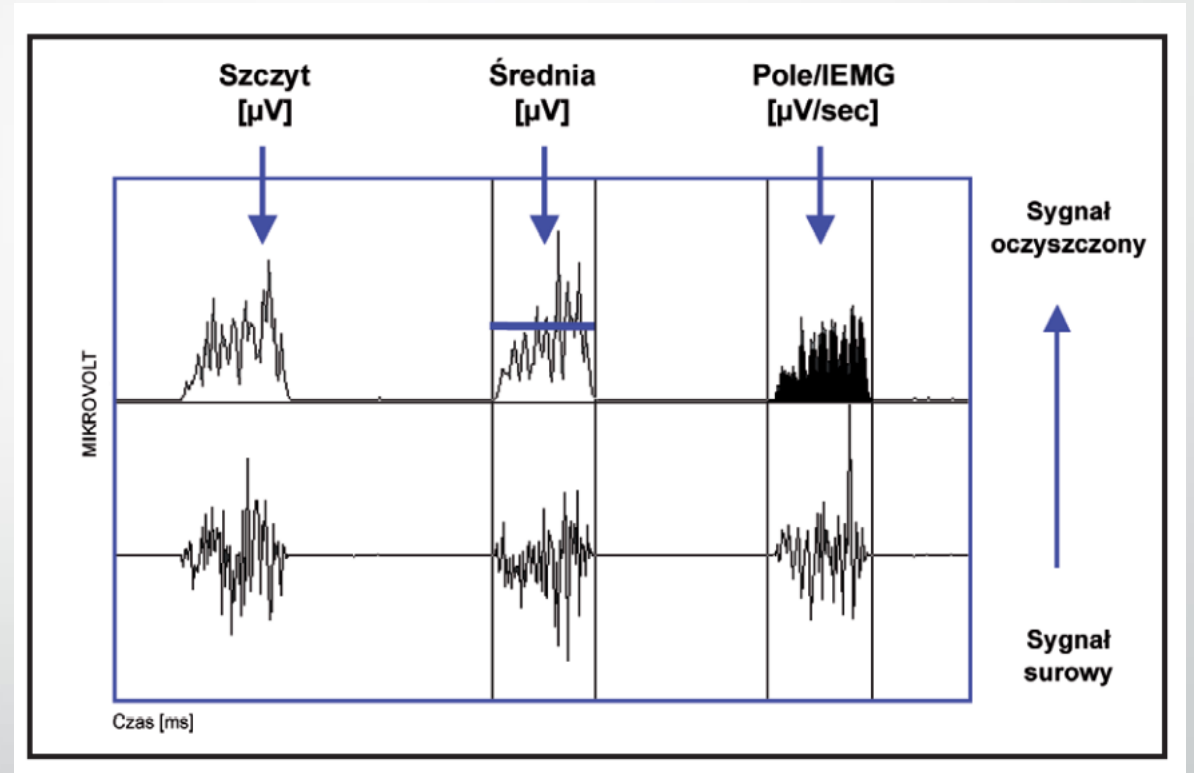




# Potencjał czynnościowy – zapis EMG



Potencjał czynnościowy.



Standardowe parametry amplitudy EMG na oczyszczonej krzywej zapisu.



# Rodzaje skurczów mięśnia w zapisie EMG

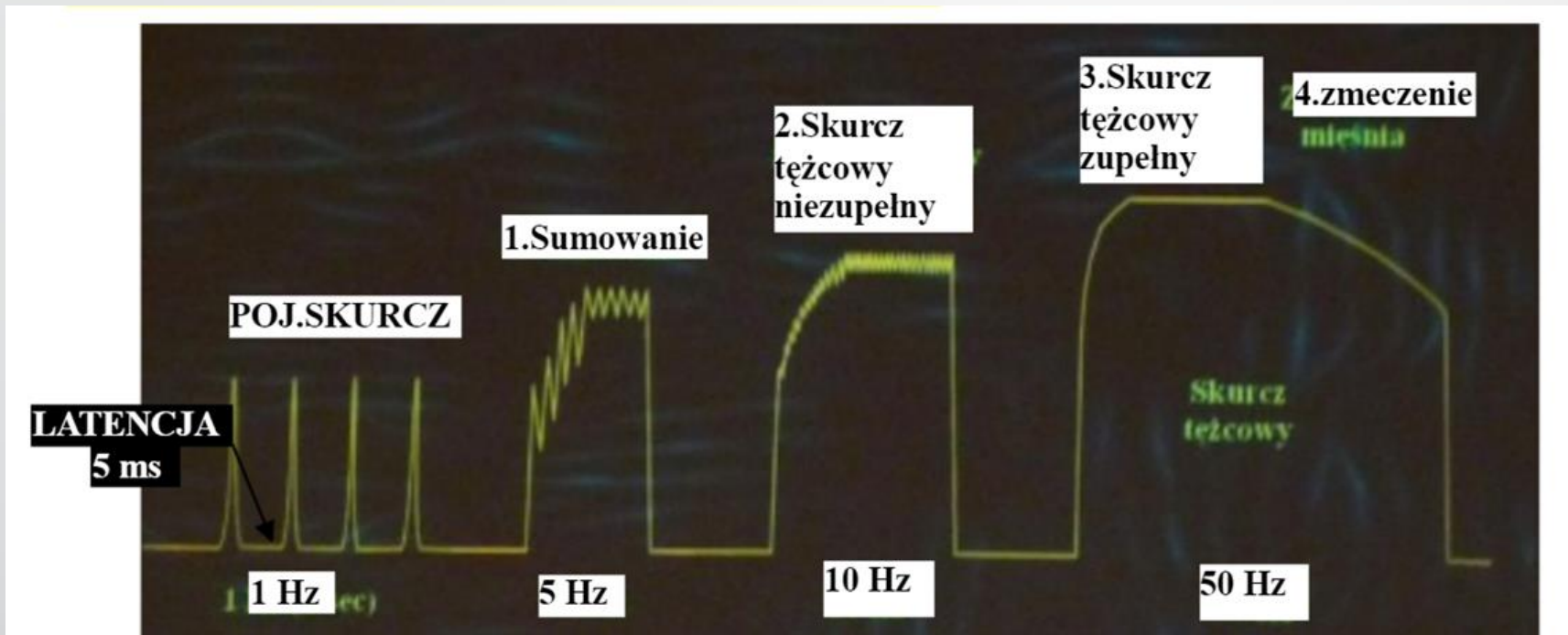
## POJEDYNCZY SKURCZ (ok. 150 $\mu$ s):

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

# Rodzaje skurczów mięśnia w zapisie EMG

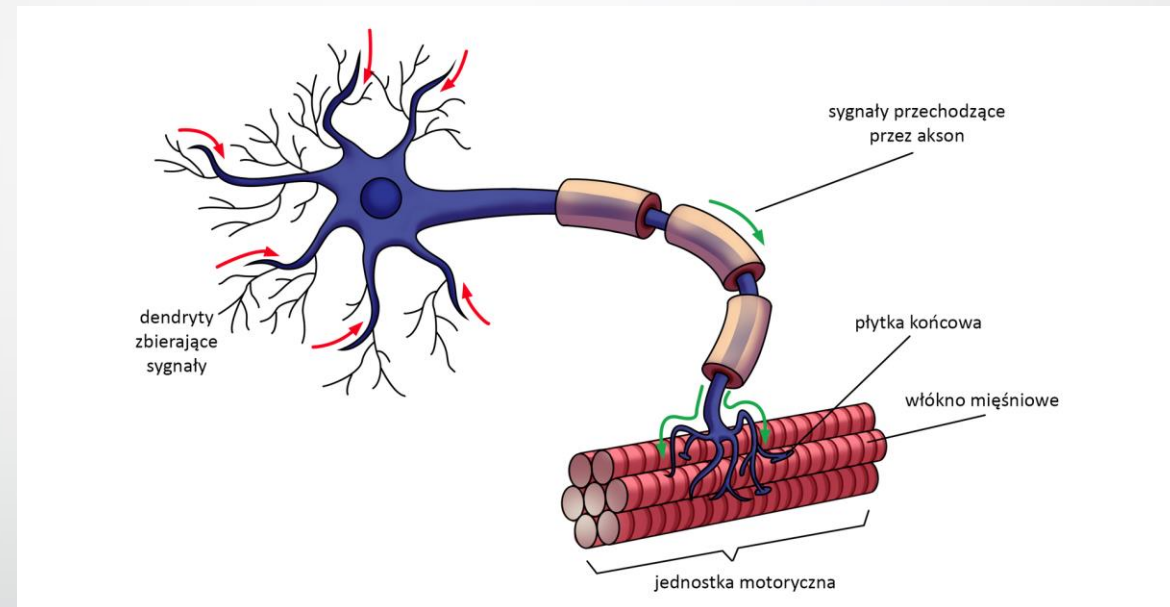


Stężenie pośmiertne to zeszywnienie mięśni w wyniku zatrzymania metabolizmu i ustania reakcji regeneracji ATP w miocytach. Dochodzi do trwałego połączenia główek miozyny z mikrofilamentami aktynowymi. Stężenie pośmiertne ustępuje po pewnym czasie w wyniku rozkładu białek mięśniowych



# Jednostka motoryczna mięśnia

Jest 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.

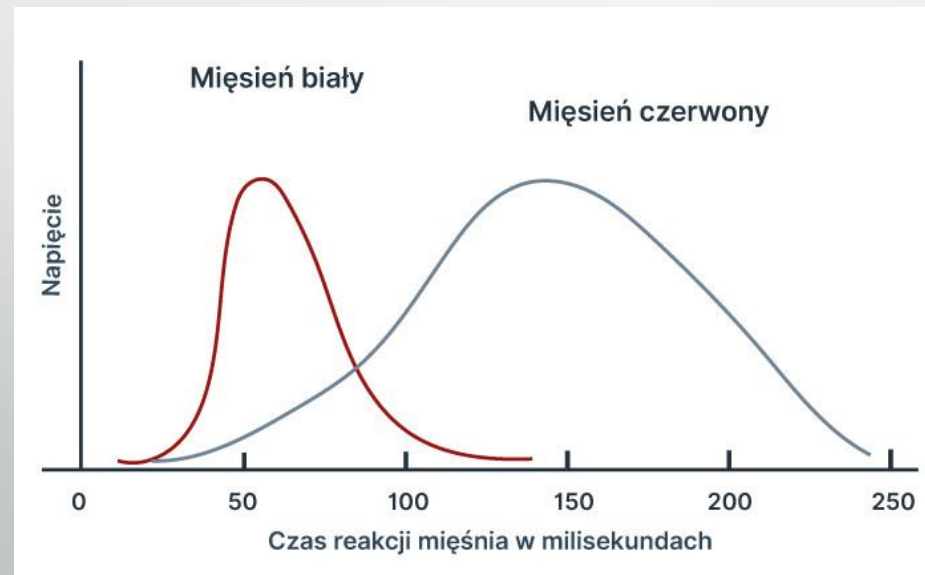


Impulsowy charakter bodźca o różnej częstotliwości oraz wzajemne przeplatanie się jednostek motorycznych tworzących „sieć” zapewniają w efekcie płynne działanie całego mięśnia i jego równomierną relaksację (różne jednostki motoryczne mają różną fazę pobudzenia/relaksacji w danym momencie).



# Rodzaje włókien mięśniowych

- oksydacyjne, wolnokurczące (typu I) – zawierają wiele mitochondriów i duże stężenie mioglobiny (stąd zwane są też czerwonymi); energię do skurczu czerpią z procesów oddychania tlenowego; charakteryzują się powolnym narastaniem siły skurczu i dużą wytrzymałością na zmęczenie; ten typ włókien dominuje w mięśniach posturalnych największy procentowy udział włókien oksydacyjnych u człowieka wykazuje mięsień płaszczkowaty, który jest aktywny w trakcie utrzymywania pozycji pionowej.





# Rodzaje włókien mięśniowych

- glikolityczne, szybkokurczące (typu II) – zawierają mniejsze stężenie mioglobiny (stąd zwane są też białymi); kurczą się szybciej, ale są mniej wytrzymałe; stanowią duży procent mięśni ramion, piersiowych oraz powiek, które odpowiadają za mruganie. Biorąc pod uwagę główne źródła energii, z jakich korzystają, wyróżnia się wśród nich włókna:
- glikolityczno-tlenowe (typu IIA) – wykorzystują energię wytworzoną w procesie glikolizy w cytoplazmie oraz w procesie fosforylacji oksydacyjnej w mitochondriach,
- glikolityczne (typu IIB) – korzystają głównie z energii wytworzonej podczas glikolizy i mają mniejszą liczbę mitochondriów.



# Rekrutacja włókien mięśniowych

Dzięki temu, że nie wszystkie jednostki motoryczne są pobudzone podczas skurczu, mamy do czynienia z różną siłą, z jaką kurczy się mięsień. W przeciwnym razie doszłoby do jego zerwania. W danym mięśniu maksymalnie może się kurczyć do 70% miocytów. Fizjologia promuje pracę mięśnia poprzez stymulację najpierw wolnych jednostek typu I jako bardziej korzystną dla organizmu, nie męczącą mięśnia. W drugiej kolejności pobudzone są szybkie jednostki typu II, kiedy mięsień musi pracować długo lub jest pożądana duża siła skurczu.

Jednym z głównych czynników decydujących o sile mięśnia jest zatem tzw. **rekrutacja włókien mięśniowych**, w szczególności rekrutacja przestrzenna oraz rekrutacja czasowa. Silny mięsień, to mięsień o dobrze skoordynowanej rekrutacji jednostek motorycznych, co jest również efektem zabiegów EMS, m.in. dlatego, że dzięki zewnętrznej elektrostymulacji możemy się skoncentrować na wcześniejszym uaktywnieniu włókien typu II.

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.



# 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).

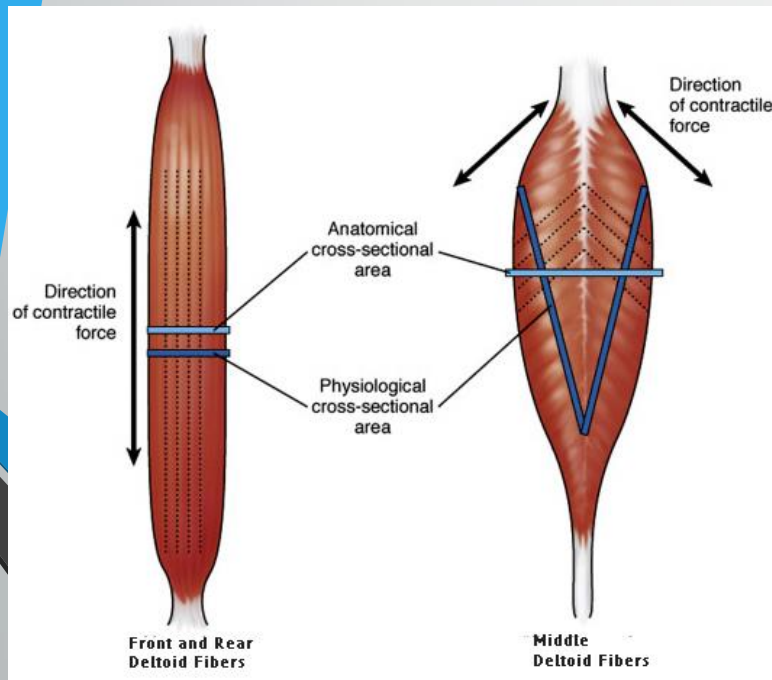
Zmiana długości mięśnia ( $\Delta l$ )	Czynności	Warunki wyzwalań siły ( $F$ )	Naprężenie ( $U$ )	Stosunek momentu mięśniowego ( $M_m$ ) do zewnętrznego ( $M_z$ )
Brak zmiany $\Delta l = 0$	Statyczna	Statyka	Izometryczne	$\sum M_m = \sum M_z$
Skracanie $\Delta l < 0$	Koncentryczna czyli pokonująca	Dynamika	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/cm<sup>2</sup>.



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

gdzie:

$F_m$  – siła mięśnia

PPF – pole przekroju fizjologicznego

$\sigma$  (delta) – napężenie jednostkowe (bezwzględna siła mięśniowa)

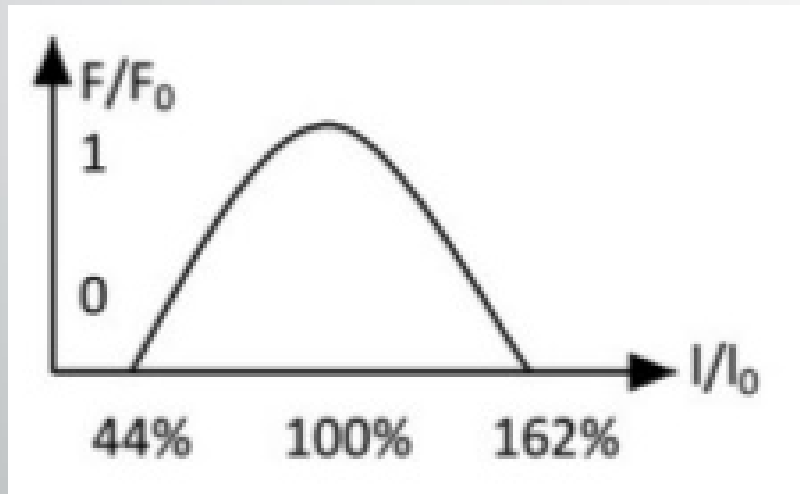
Zalecana lektura: Wiktoria Wojnicz: *Biomechaniczne modele układu mięśniowo-szkieletowego człowieka*. Wydanie I. – Gdańsk, 2018



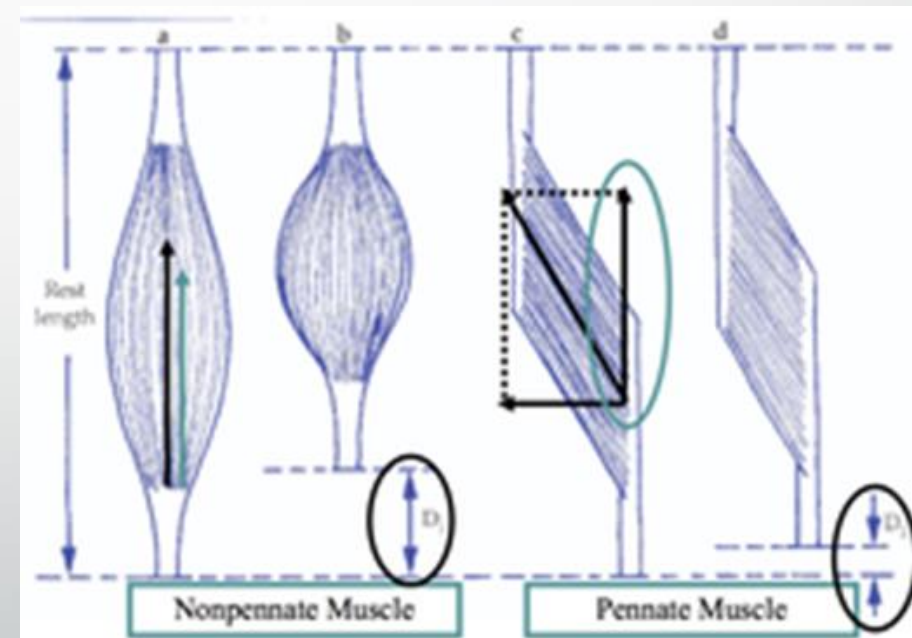
# Zależność siła-długość

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.



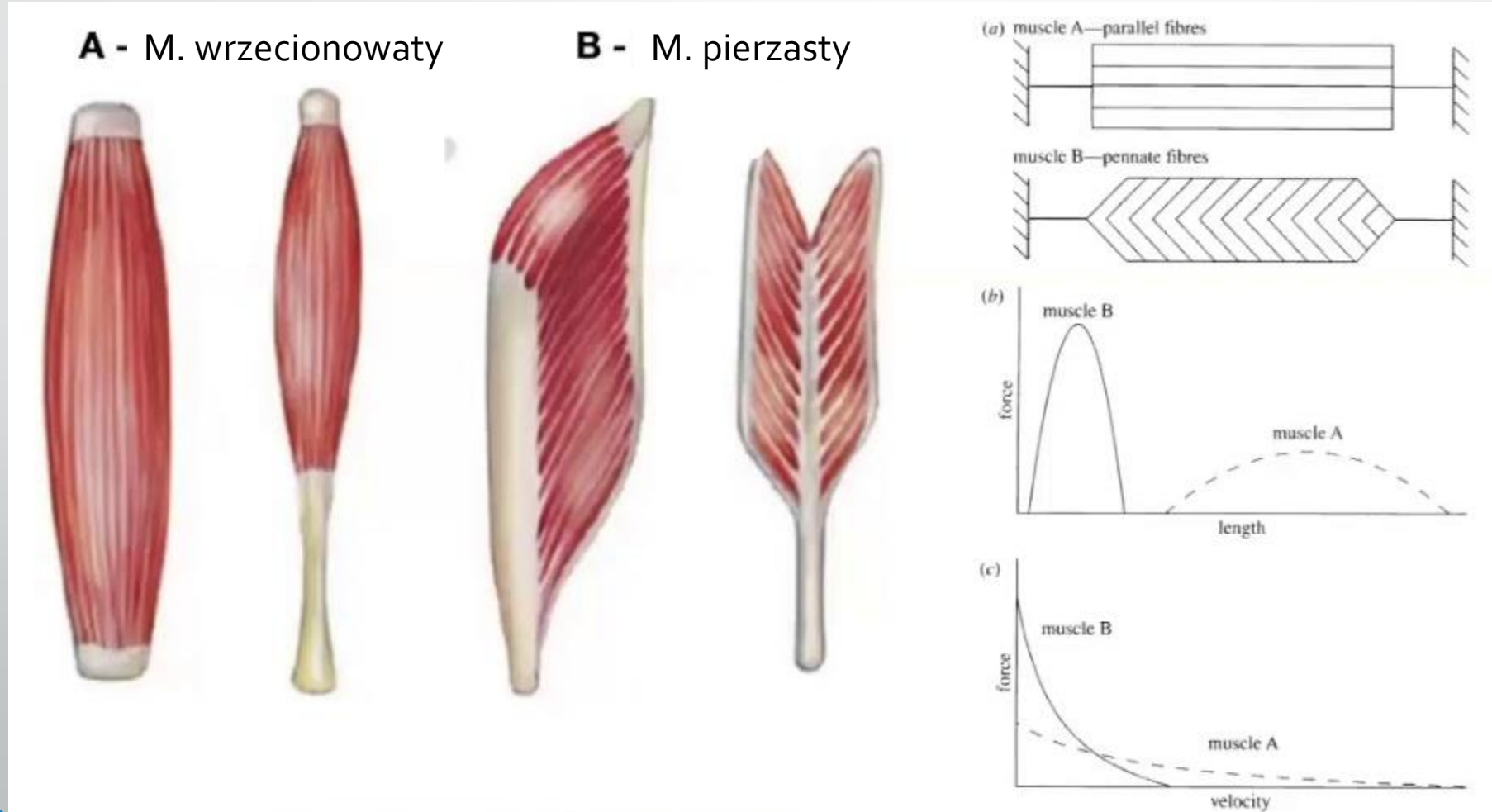
Siła względna  $F/F_0$  zależna od stanu długości względnej  $l/l_0$  sarkomeru (dla mięśnia izolowanego - tylko elementy aktywne)





# 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.

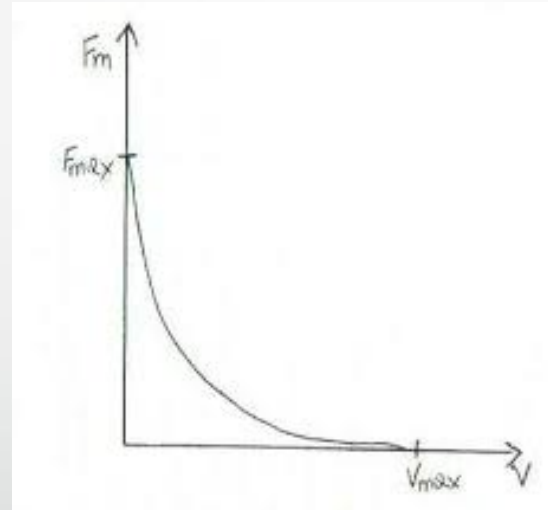
$F_{\max}$  – maksymalna wartość siły generowanej przez mięśnie przy założeniu, że  $v = 0$



# 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 $\mu$ m/s**.

Im większa długość mięśnia tym większa jest prędkość skracania.

Im większy kąt pierzastości mięśnia tym mniejsza jest prędkość skracania.

W warunkach naturalnych:

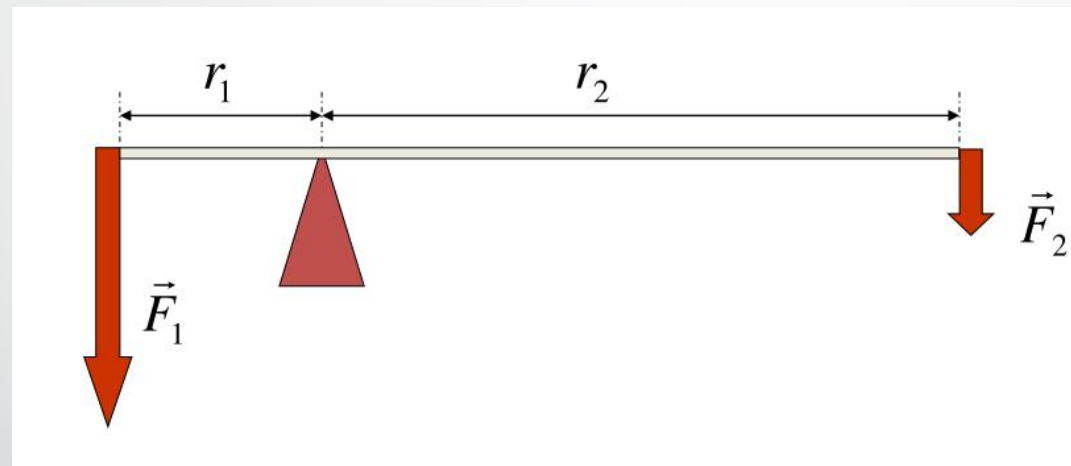
- Małe obciążenie – możliwa duża prędkość skracania mięśnia
- Duże obciążenie – możliwa mała prędkość skracania mięśnia.

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:

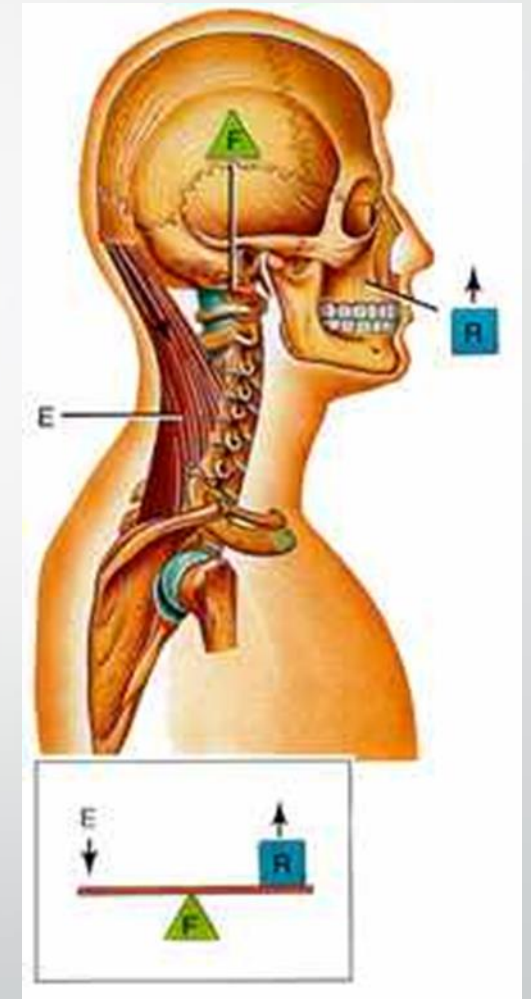
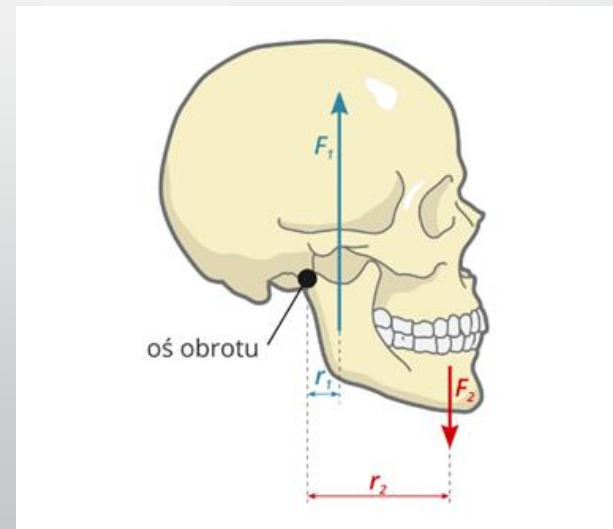
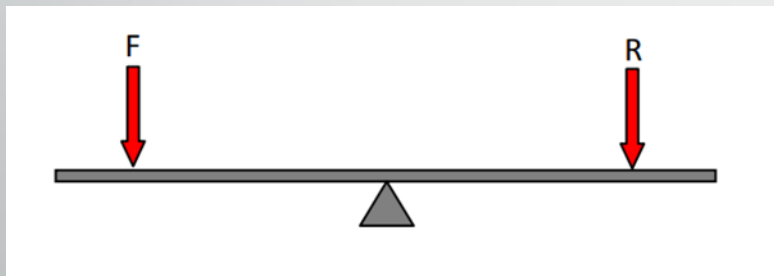
- Punkt oparcia - nieruchomy, dookoła którego obraca się dźwignia - odpowiadający stawowi
- Siła czynna - którą wywołują mięśnie starające się poruszać dźwignię
- Ciężar (opór) – siła ciężkości do pokonania przez siłę czynną



# 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.

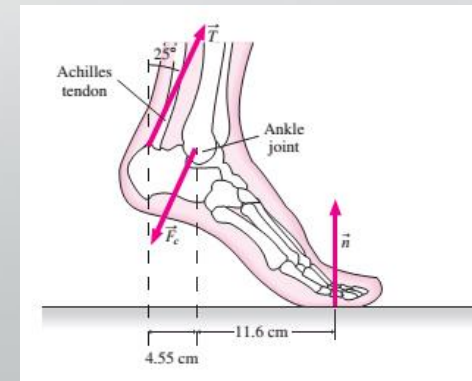
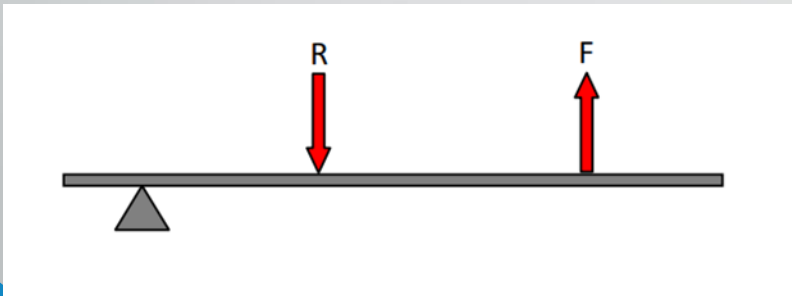




# Dźwignia II-go typu

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.

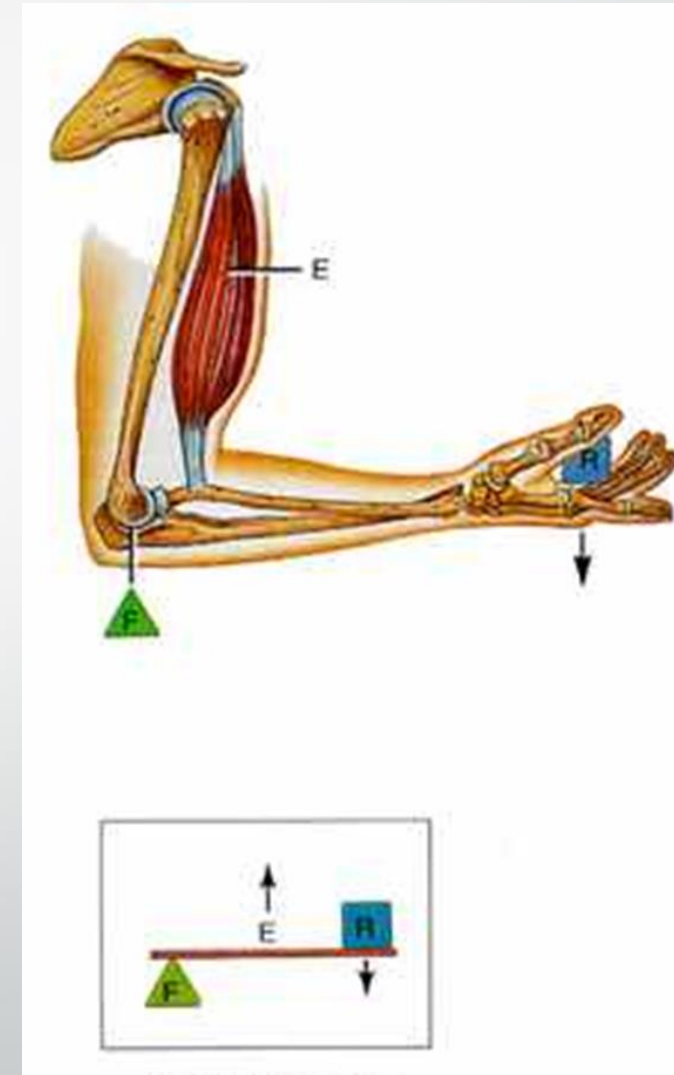
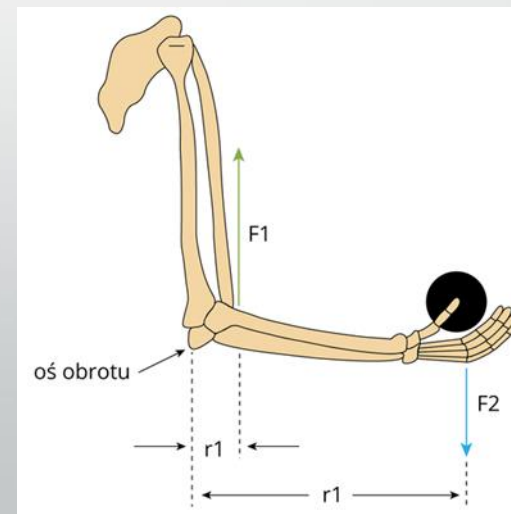
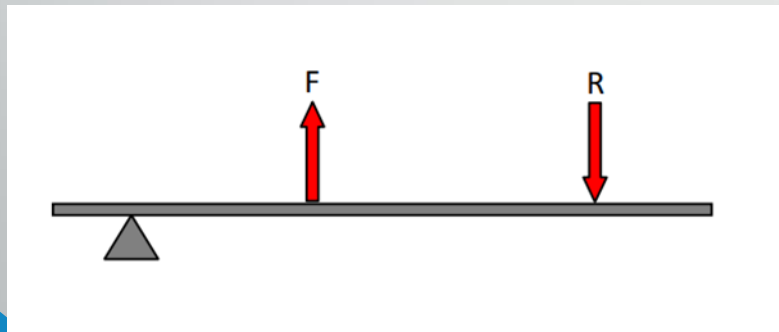




# Dźwignia III-go typu

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:

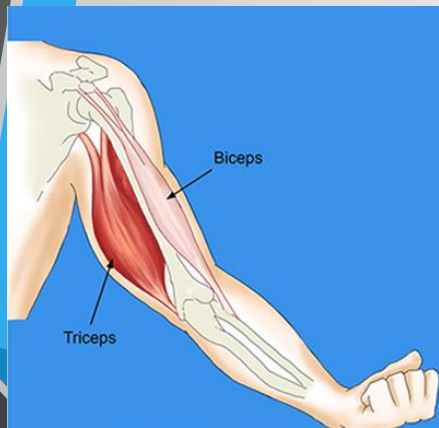
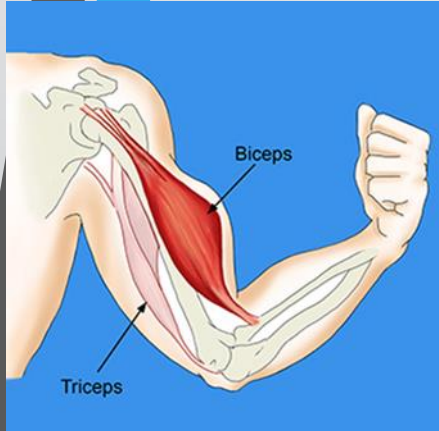
- mięśnie jednostawowe – przyczepione są tylko do jednego stawu (mięsień piersiowy lub naramienny - staw barkowy)
- mięśnie wielostawowe – przyczepione są do dwóch stawów (mięsień dwugłowy ramienia - staw barkowy i staw łokciowy; mięśnie brzuchate łydek – stopa i staw kolanowy).





# 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:

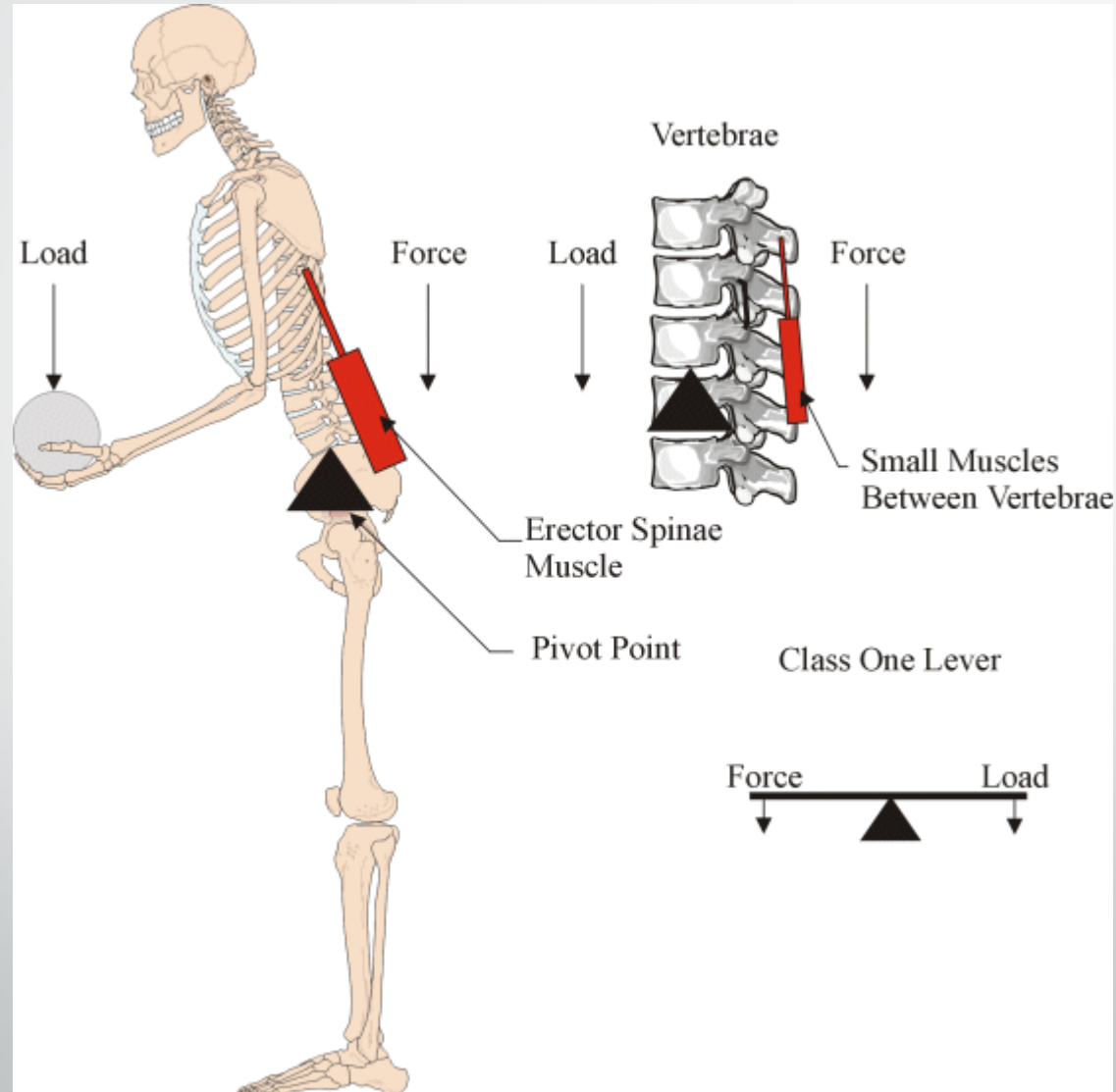
$$F_1 r_1 = F_2 r_2$$

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.

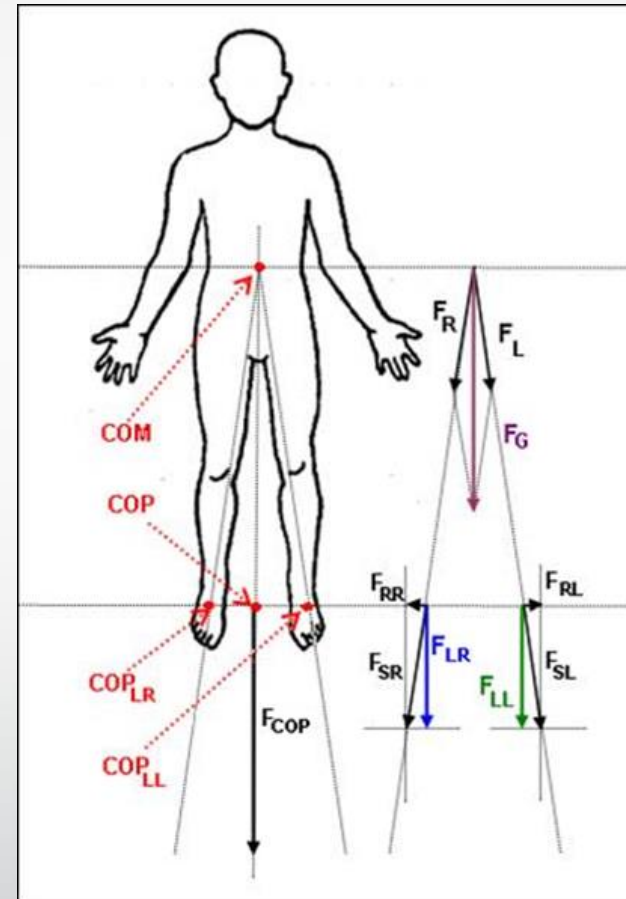
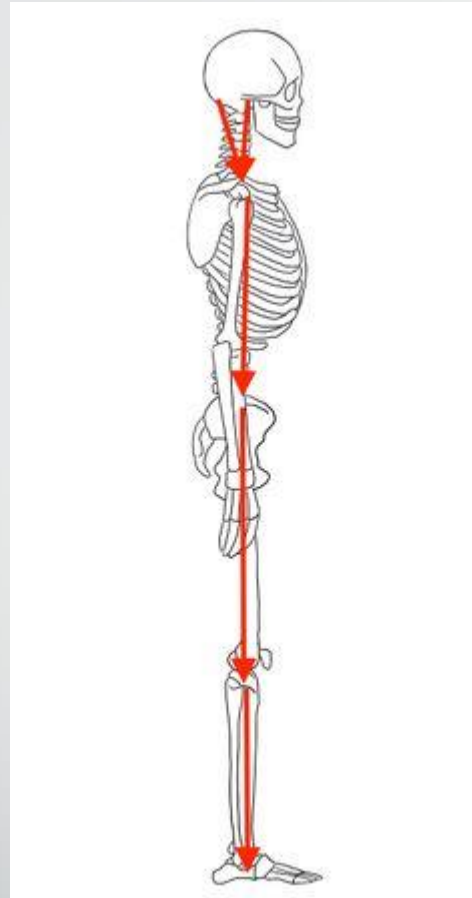


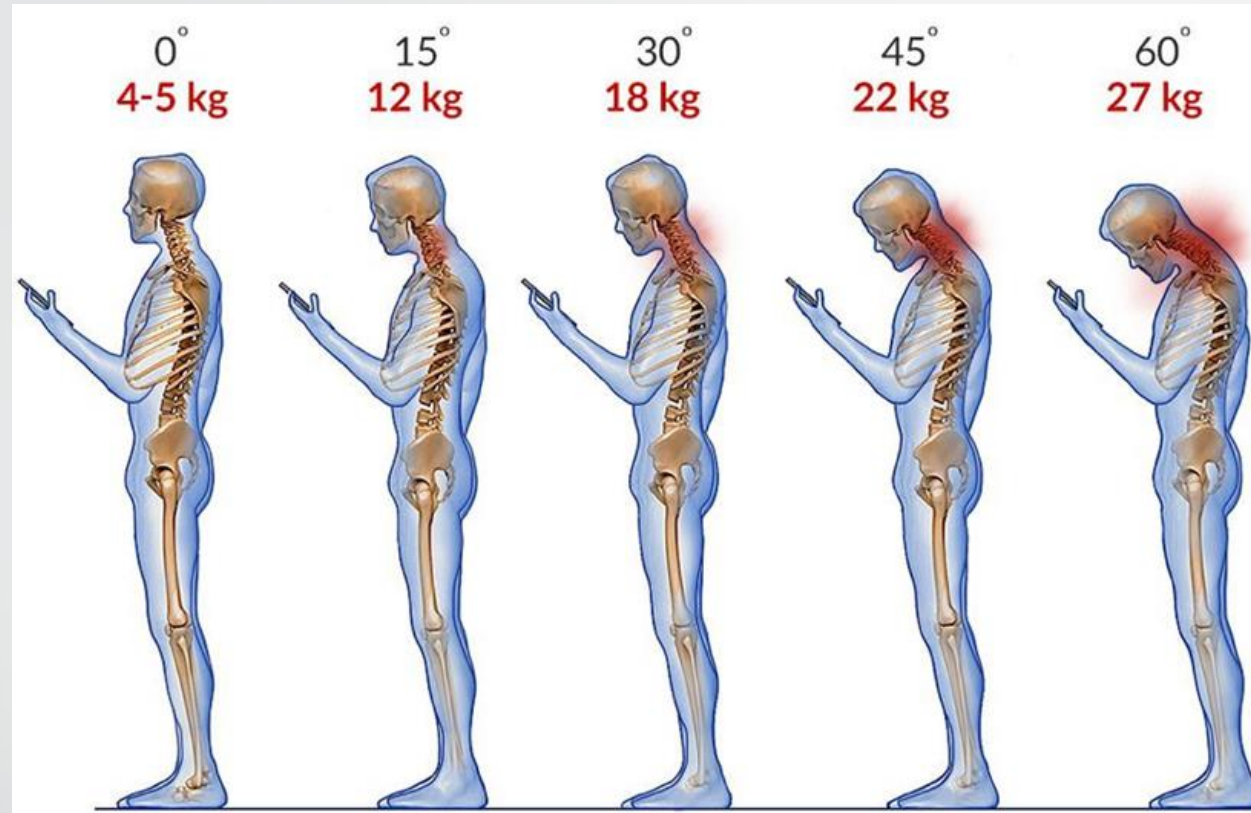
# Równowaga ciała





# Równowaga ciała w statyce





Dziękuję za uwagę  
i zapraszam na kolejny wykład