

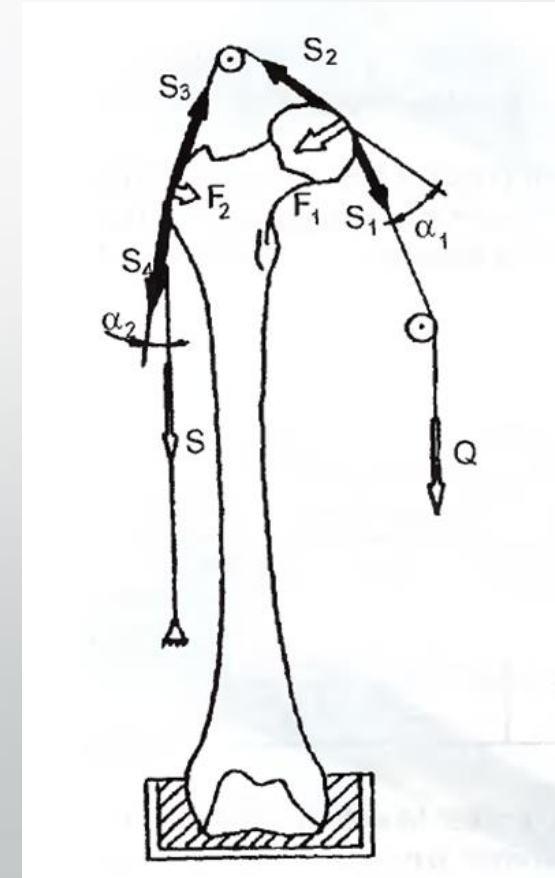


PODSTAWY BIOMECHANIKI

Wykład 6:

Model biomechaniczny kręgosłupa

Modele obciążenia stawu
biodrowego oraz kolanowego



dr Ewa Polak



Modele w biomechanice

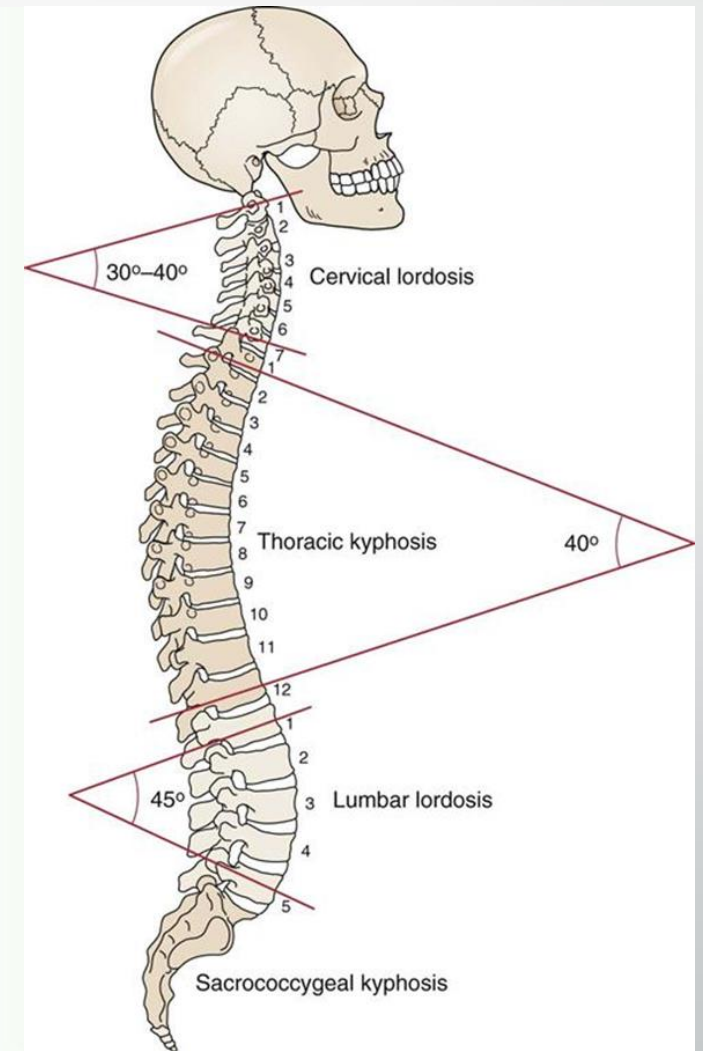
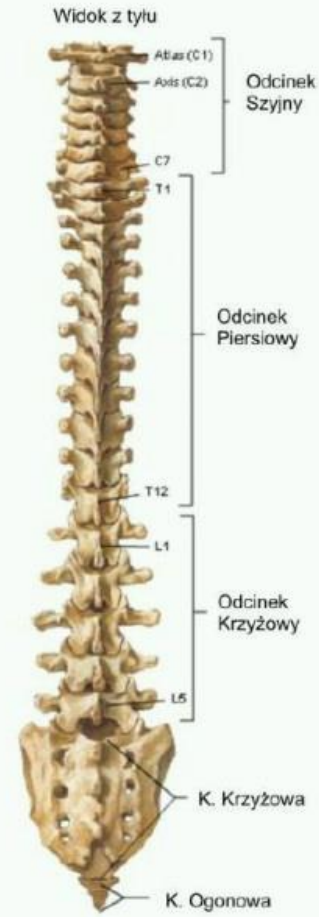
Model – system założeń, pojęć i zależności między nimi, pozwalający opisać (modelować) w przybliżony sposób jakiś aspekt rzeczywistości.

Żeby stworzyć model trzeba przyjąć jakieś założenia – uprościć rzeczywistość tak, aby dało się ją opisać.

Należy stosować najprostszy możliwy model pozwalający rozwiązać postawiony problem.



Kręgosłup





Kręgosłup

Kręgosłup składa się z 33-34 kręgów, połączonych ruchomo w odcinkach szyjnym, piersiowym i lędźwiowym.

Stanowi on podstawę dla narządu ruchu: opiera się na miednicy, a ona łączy się z podłożem za pośrednictwem kończyn dolnych. Poprzez klatkę piersiową i obręcz barkową kręgosłup uczestniczy we wszystkich czynnościach kończyn górnych. Jest też połączony z głową i dlatego bezpośrednio bierze udział w każdym ruchu ciała.

Tab. 1. Charakterystyczne kąty krzywizn kręgosłupa na podstawie publikowanych wyników badań:

	Kąt lordozy szyjnej [°]	Kąt kifozy piersiowej [°]	Kąt lordozy lędźwiowej [°]	Kąt kifozy krzyżowo-guzicznej [°]
Minimalny kąt	2	22	38	26
Średni kąt dla sylwetki prawidłowej	9	39	57	41
Maksymalny kąt	24	56	75	57



Funkcje kręgosłupa

Kręgosłup pełni funkcję : (1) ochronną, (2) podporową, (3) amortyzującą i (4) kinetyczną.

Ad1. Ochronna: ochrania rdzeń kręgowy i nerwy rdzeniowe

Ad2. Podporowa: w funkcji tej biorą udział trzony kręgów (na które przenoszone są obciążenia), oraz fizjologiczne krzywizny kręgosłupa (lordozy i kifozy).

W związku z pionizacją człowieka zmuszonego do stałego równoważenia postawy przez przesunięcie odpowiednich segmentów ciała nad płaszczyznę podparcia odporność kręgosłupa jest proporcjonalna do kwadratu liczby krzywizn „ +1”. W ten sposób kręgosłup posiadający 4 krzywizny fizjologiczne jest 17-krotnie bardziej odporny na działające siły, niż gdyby był prosty.

Dzieje się tak na skutek skośnego ustawienia trzonów kręgów, dzięki czemu siła ucisku jest rozkładana na wysokości każdego stawu kręgowego na dwie składowe :

- 1) dociskającą trzon do przodu,
- 2) ściskającą (powodują ześlizgiwanie się trzonów górnych z dolnych czemu przeciwstawiają się więzadła i wyrostki stawowe).

Nadmierne wygięcia powoduje niebezpieczeństwo, wynikające z przeciążenia tylnych wyrostków stawowych.



Funkcje kręgosłupa

Ad3. Amortyzacyjna: kształt krzywizn fizjologicznych kręgosłupa stanowi drugi po stopie element amortyzujący, łagodzący wstrząsy podczas wszelkich czynności lokomocyjnych.

Wielosegmentowy łańcuch stawowy kręgosłupa zbudowany jest z **24** elementów kostnych ułożonych szeregowo i posiada połączenia:

A. stawowe o charakterze stawów jamowych o 3 stopniach swobody ruchu,

B. elastyczne chrząstkozrosty w postaci krążków międzykręgowych.

Krążek składa się z pierścienia włóknistego i jądra miazdżystego, w pierścieniu włókna krzyżują się pod kątem 20 stopni. Pierścień włóknisty chroni przed ruchami rotacyjnymi. Krążek podczas nacisku zmniejsza się o 1-2mm. Natomiast rozciągając się zwiększa się o 3-5mm.

C. sprężyste więzozrosty w postaci więzadeł żółtych.

Element 2 i 3 czyli chrząstkozrosty i więzozrosty stanowią elementy biologicznej ochrony stawów międzykręgowych.





Funkcje kręgosłupa

Ad4. Kinetyczna: funkcja ta uzależniona jest od ruchomości krzywizn kręgosłupa.

Zmienna ruchomość kręgosłupa uwarunkowana jest odmienną budową trzonów, wielkością ustawienia wyrostków, wysokością krążków międzykręgowych, długością poszczególnych odcinków kręgosłupa, ilością i kierunkiem położenia mięśni w obrębie poszczególnych odcinków kręgosłupa.

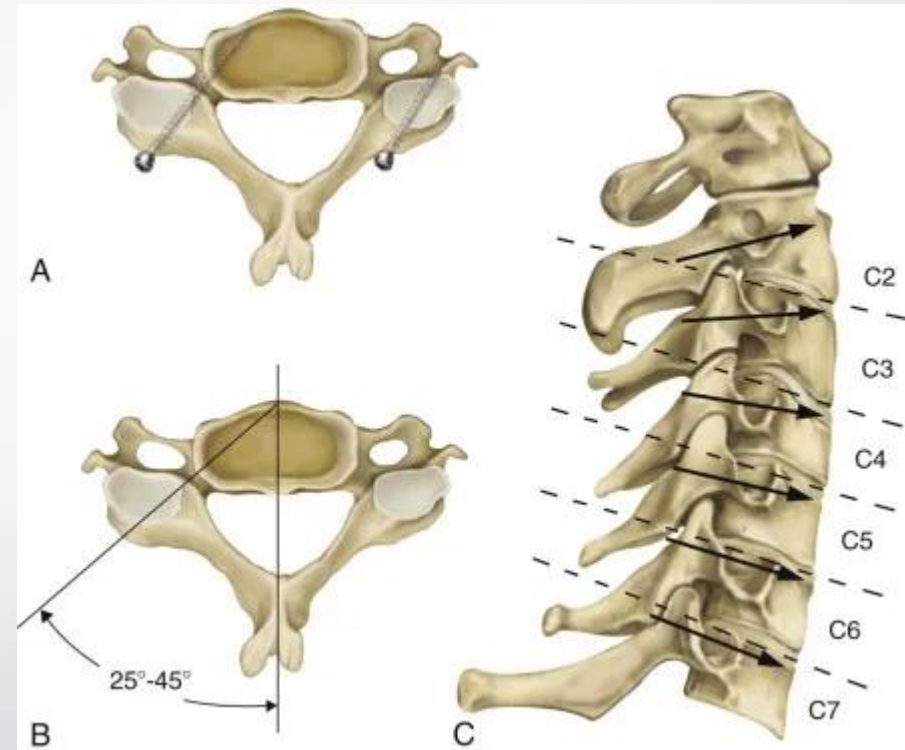
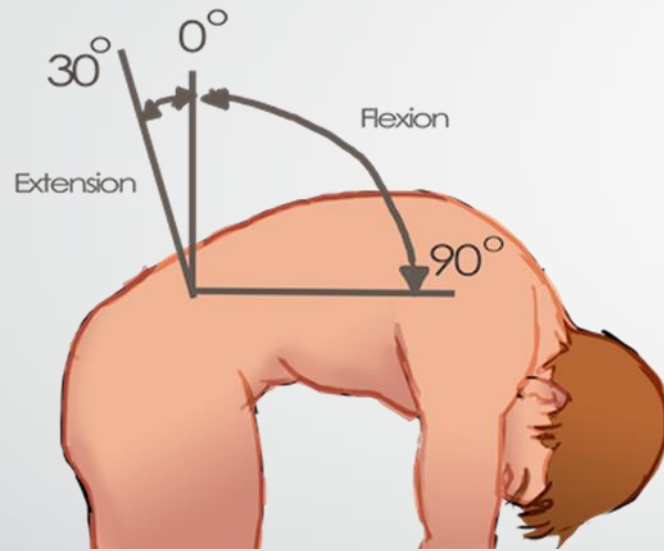
Odcinek szyjny - jest najbardziej mobilny.

Odcinek piersiowy - jest najmniej ruchliwy, zawdzięcza to budowie kręgów (identyczny kształt) jest to związane z funkcją jaką ma pełnić ten odcinek a więc: ochronną tkanki nerwowej, amortyzacją występujących przeciążeń powstających wzdłuż osi długiej ciała, stanowieniem rusztowania na którym zawieszono są narządy wewnętrzne klatki piersiowej i powłok brzusznych. Takie elementy jak dachówkowaty układ wyrostków kolczystych czy też połączenia stawowe żeber z kręgosłupem w znacznym stopniu zmniejszają jego mobilność zwłaszcza w płaszczyźnie strzałkowej.

Odcinek lędźwiowy – jest najkrótszym odcinkiem, o dość dużych możliwościach ruchowych, jest to miejsce w którym dochodzi do największych przeciążeń.

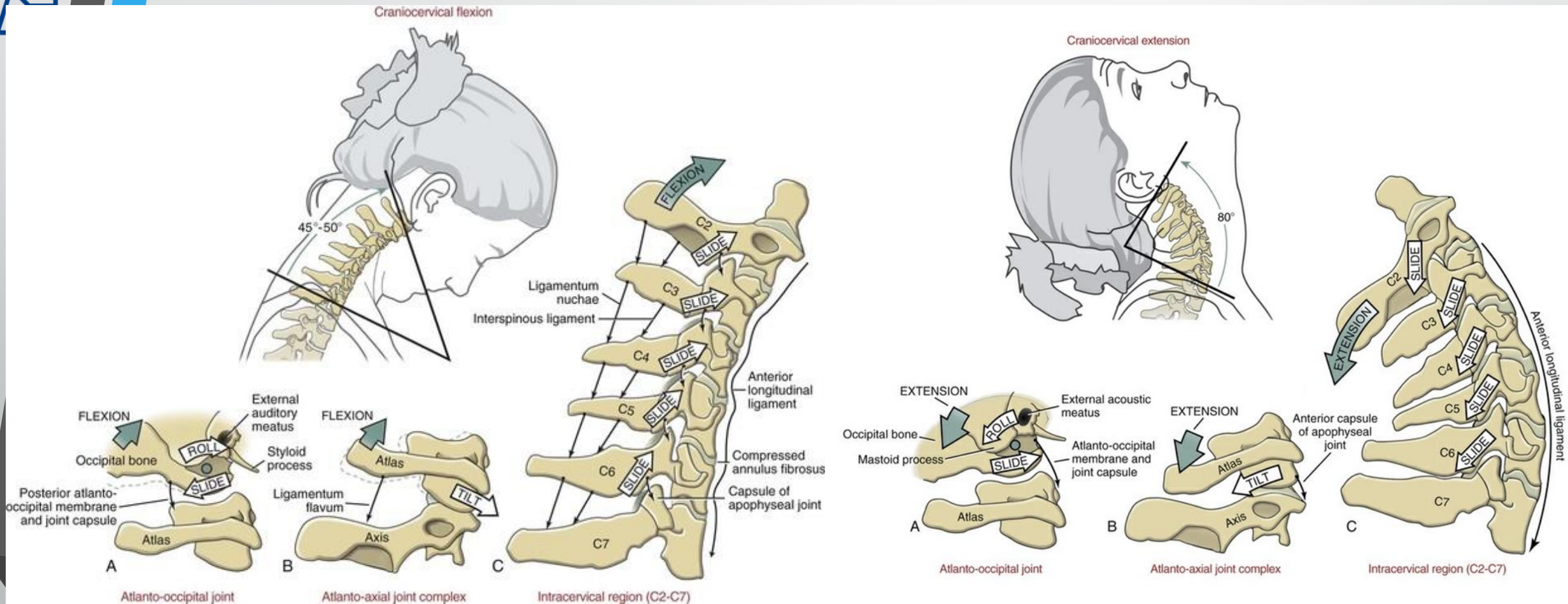


Ruchy kręgosłupa w pł. strzałkowej



Zakres ruchu można wyznaczyć dla całego kręgosłupa oraz dla każdego z odcinków.

Ruchy kręgosłupa w pł. strzałkowej



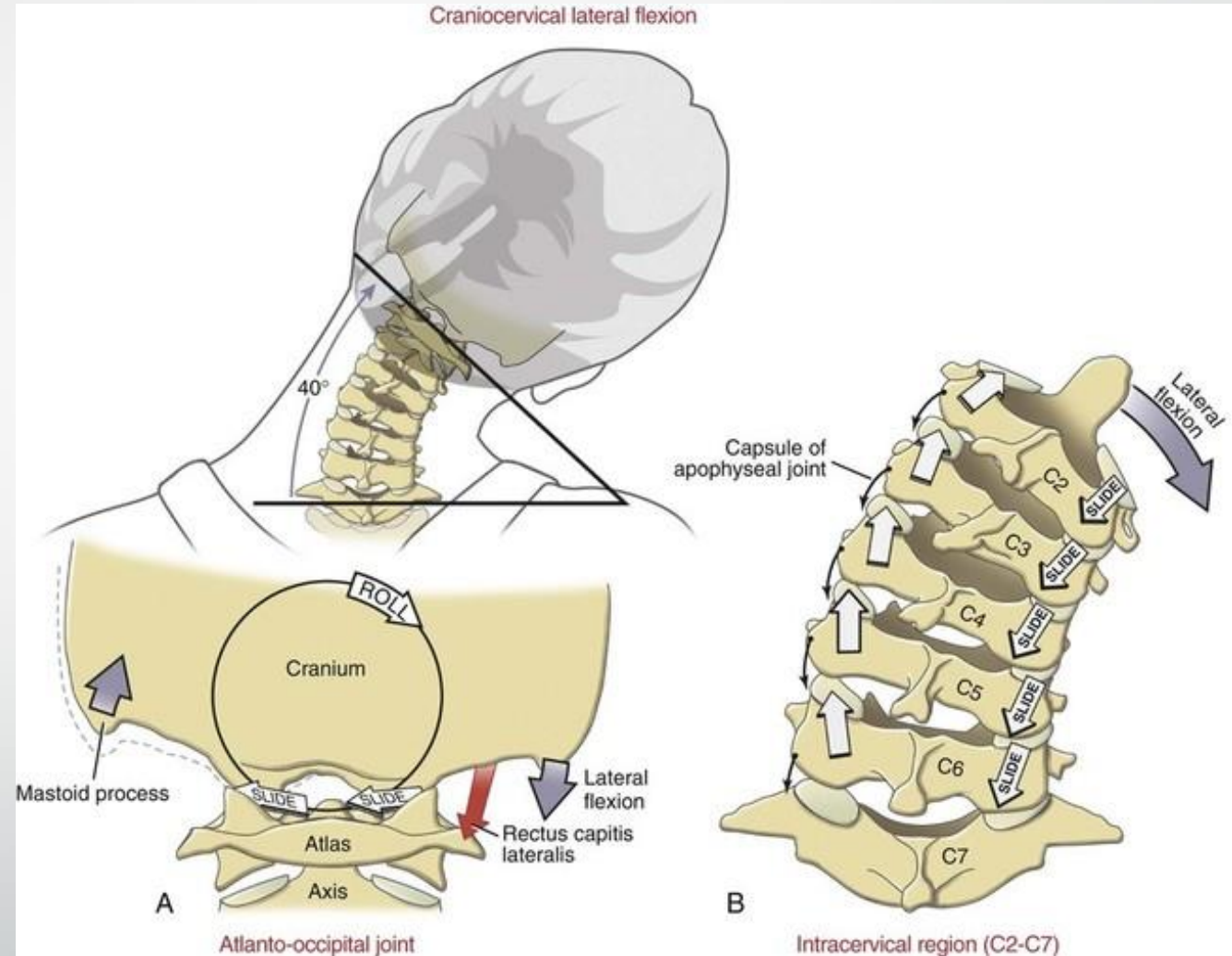
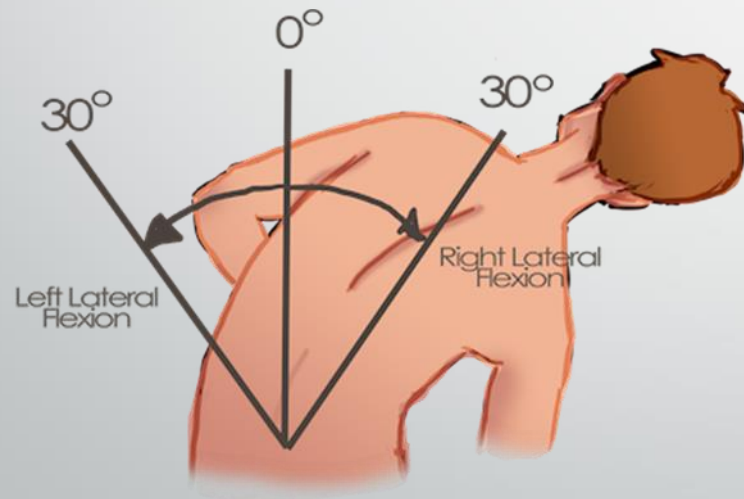
Wyrostki stawowe wykonują ruchy poślizgowe, a trzony przesuwają się po osi, którą stanowi krążek międzykręgowy.



Ruchy kręgosłupa w pł. czołowej

Zginanie boczne o całkowitym zakresie ok. 60° .

Największy udział w tym ruchu mają trzeci i czwarty kręg lędźwiowy.

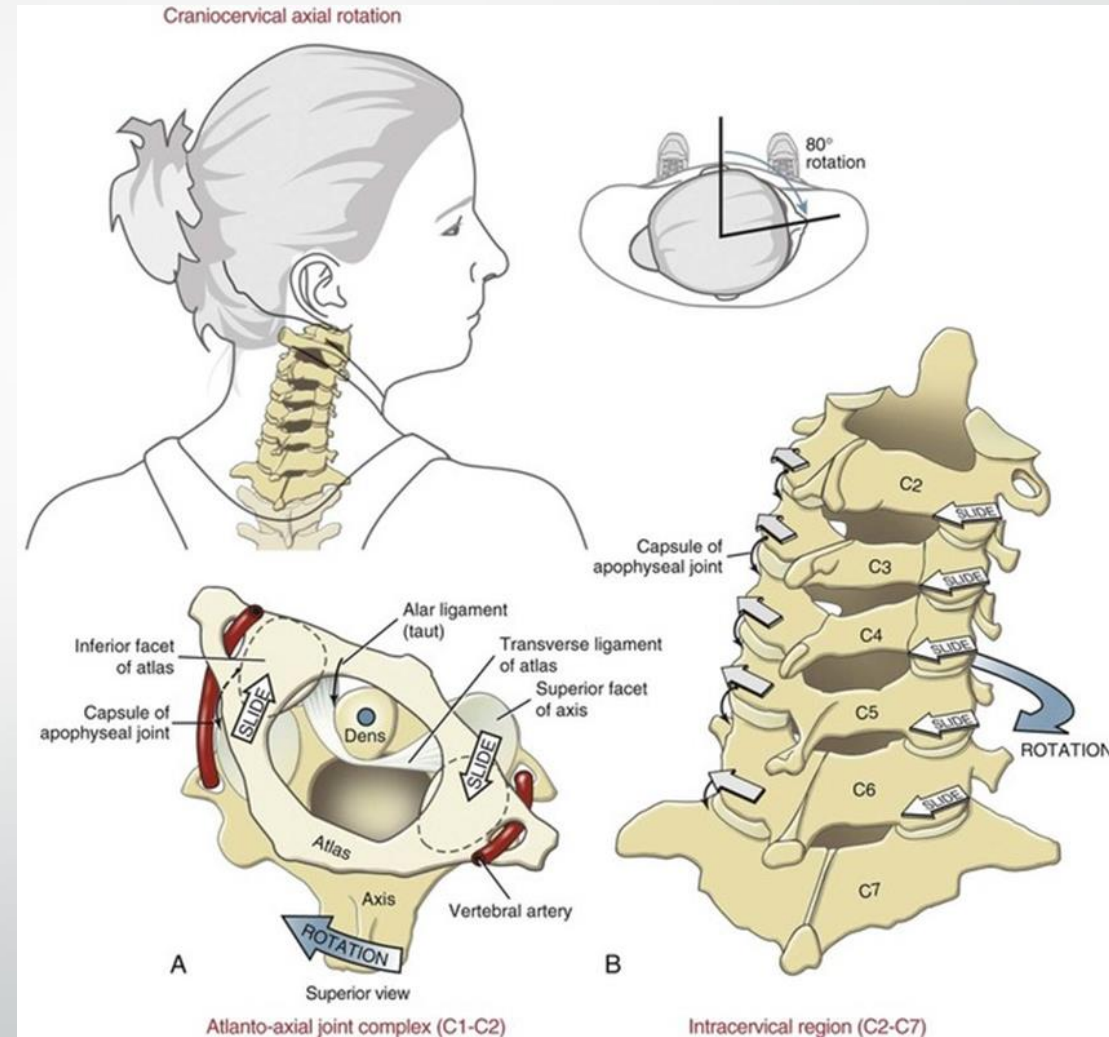
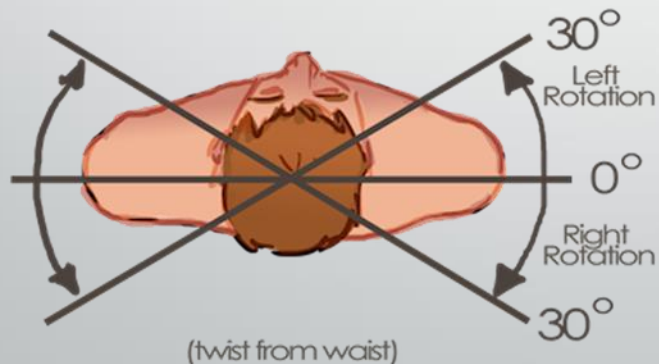




Ruchy kręgosłupa w pł. poprzecznej

Ruchy w płaszczyźnie poprzecznej to ruchy skrętne dookoła osi pionowej.

Są one najmniej poznane. Przypuszcza się, że umożliwiają je krzywizny kręgosłupa oraz podatność krążków międzykręgowych, które, zmieniając warunki przestrzenne, powodują unoszenie kręgów w stosunku do siebie i ich obrót.



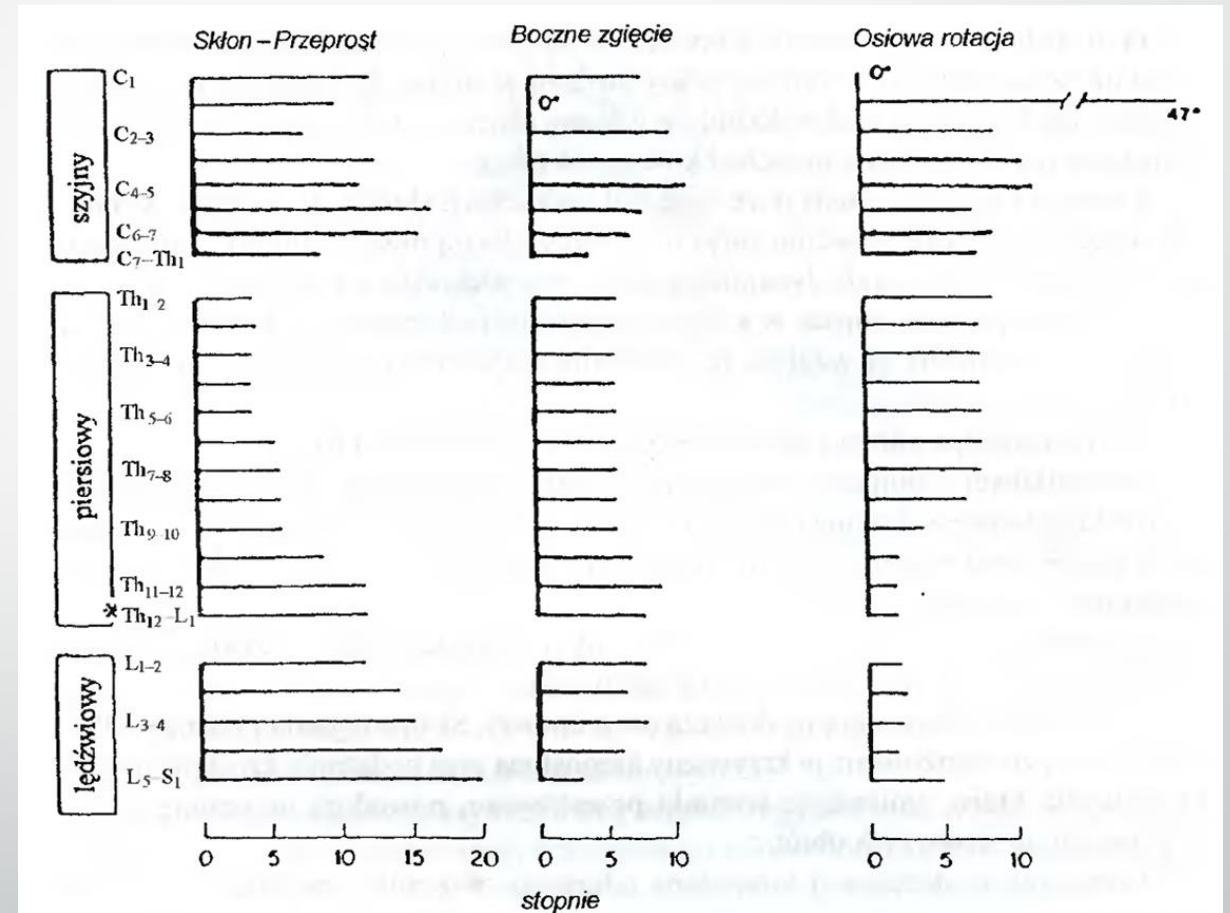


Zakresy ruchów kręgosłupa

Zasadniczy ruch kręgosłupa występuje w tym samym kierunku co działające obciążenie. Istnieją również tzw. ruchy towarzyszące (dlatego często mówi się o parowaniu ruchów).

Jeśli np. ruch skrętny kręgosłupa uzna się za główny, to towarzyszy mu zginanie w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej.

Zakresy ruchu poszczególnych części kręgosłupa:



Źródło: Będziński R., Biomechanika inżynierska : zagadnienia wybrane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.

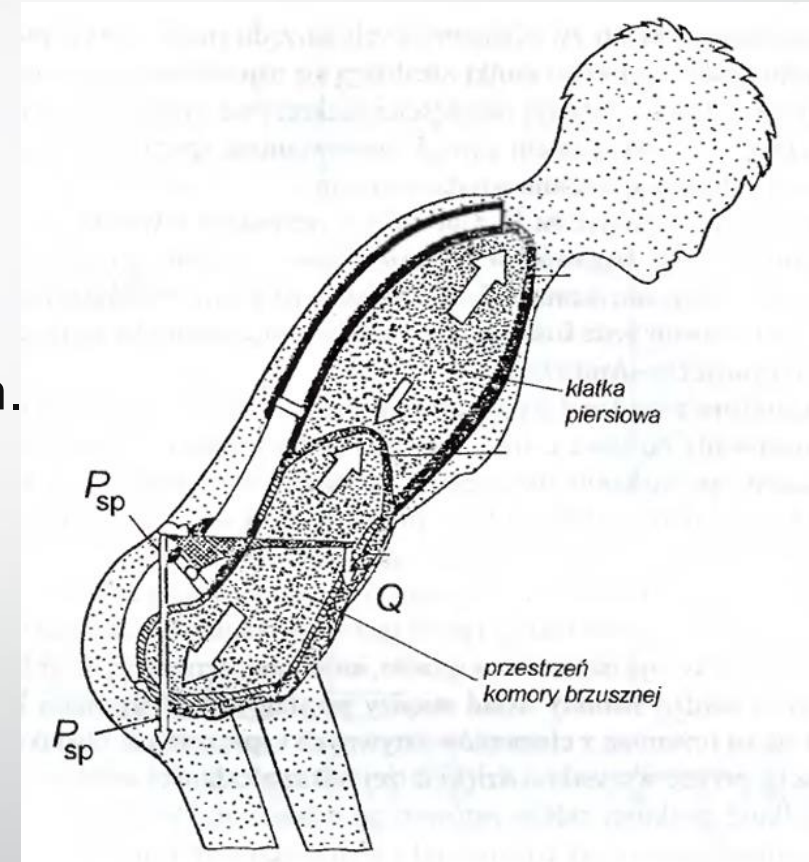


Obciążenie kręgosłupa

Istotny udział w przenoszeniu obciążeń przez kręgosłup mają mięśnie przykręgowce, przyczepione do boków i wewnątrz dwóch komór, tj. jamy brzusznej i klatki piersiowej, oddzielonych przeponą.

Pierwsza z nich jest wypełniona kombinacją stałych i płynnych substancji, druga zaś w dużej mierze powietrzem. Działanie mięśni przemienia te komory w cylindry o półsztywnych ścianach, wypełnione powietrzem oraz płynem, zdolne do przekazywania skumulowanych sił odciążających kręgosłup.

Działanie mięśni tułowia oraz ciśnienie występujące w jamach powoduje odciążenie kręgosłupa w części piersiowej o około 50%, a w części lędźwiowej o około 30%.

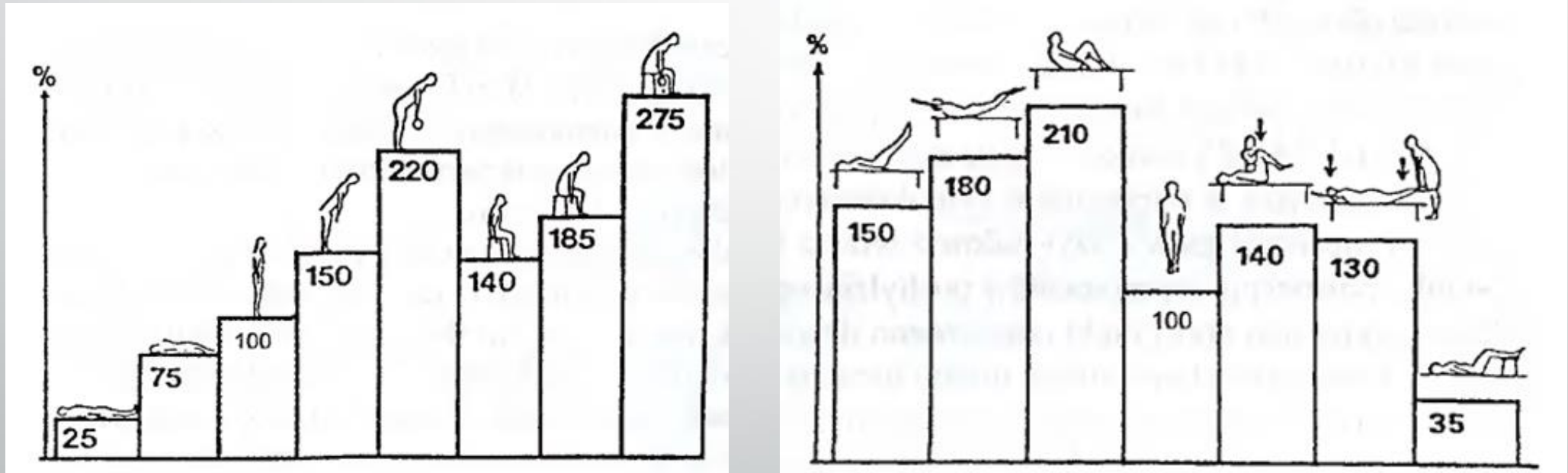




Obciążenie kręgosłupa

Nachemson [1975 r.] określił obciążenia kręgosłupa na poziomie lędźwiowym dla różnych pozycji ciała, a także różnych czynności. Wyniki swoich badań przedstawił w postaci zależności zmian ciśnienia, występującego w krążku międzykręgowym między trzecim a czwartym kręgiem lędźwiowym (L3-L4) od pozycji ciała.

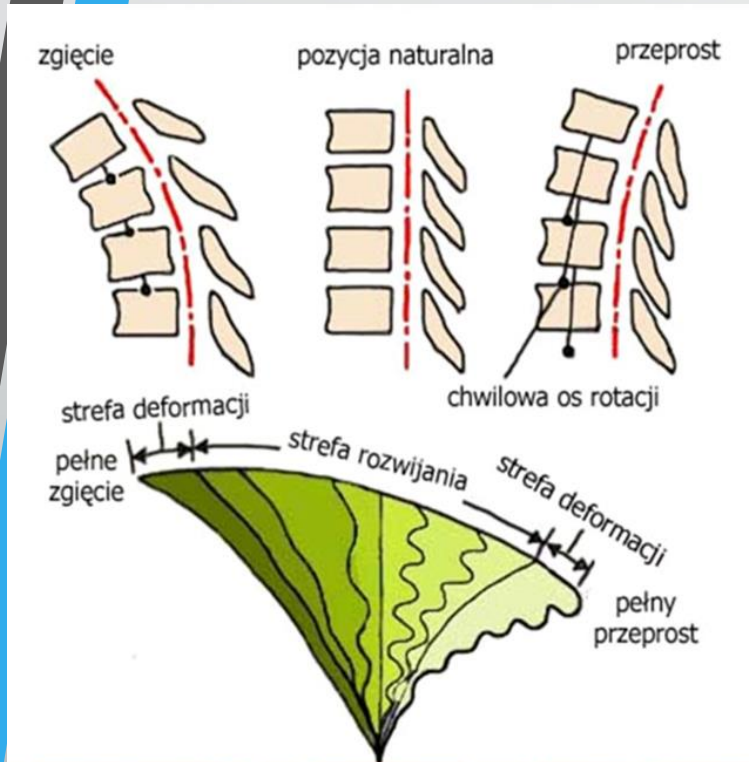
Odniesienie stanowiła wartość 100% dla pozycji stojącej.



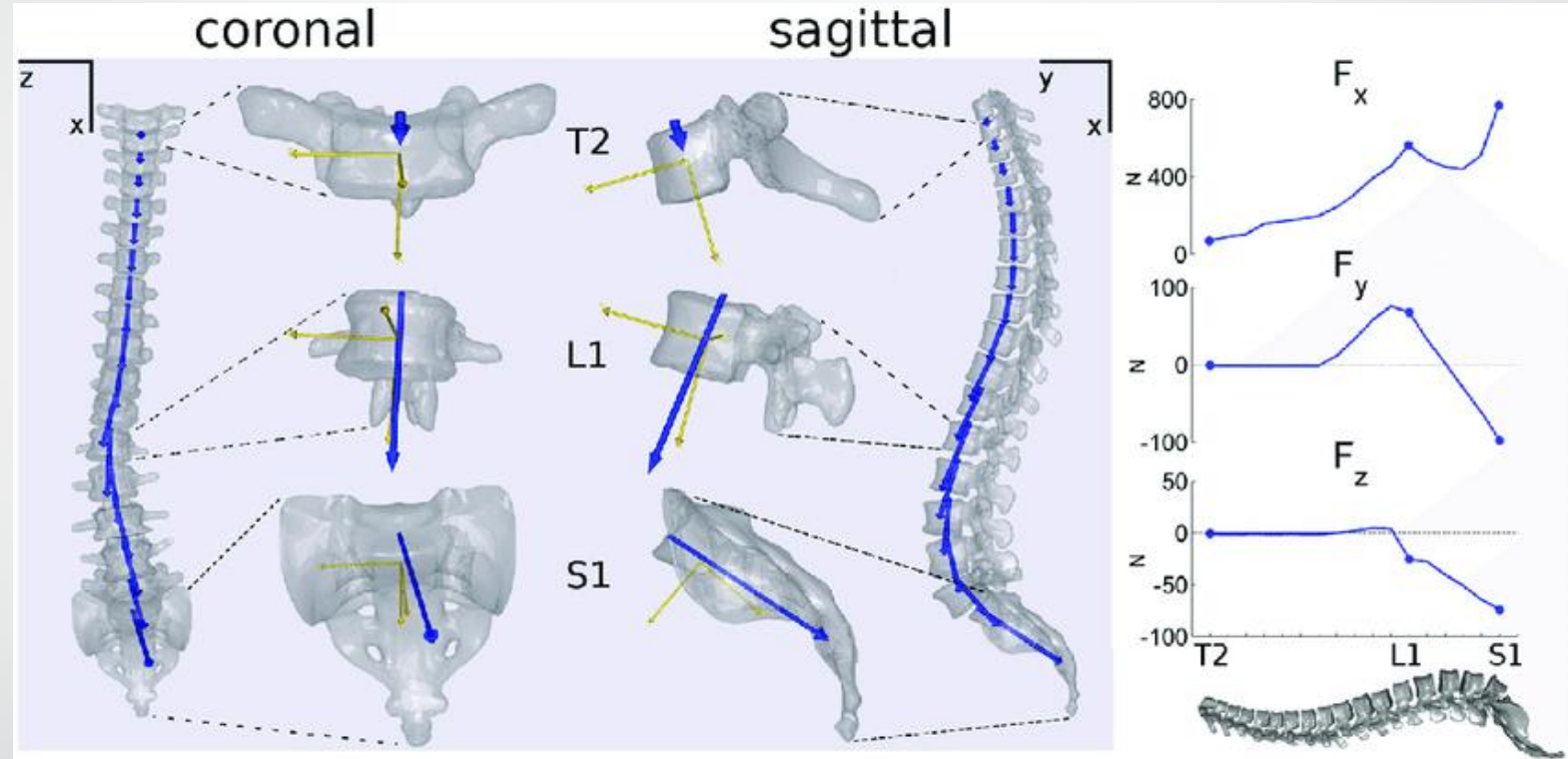
Źródło: Będziński R., *Biomechanika inżynierska : zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.



Obciążenie kręgosłupa



Ucisk na rdzeń kręgowy.



Przykłady wektorów obciążenia krążków międzykręgowych F (na niebiesko). Kręgi T2, L1 i S1 pokazano w powiększeniu, przedstawiając dodatkowo lokalne układy odniesienia kręgów (na żółto). Na prawym panelu progresja składowych F we współrzędnych globalnych $\{x, y, z\}$ przebiegająca wzdłuż kręgosłupa od T2 do S1.



Przeciążenia kręgosłupa

Przeciążenie to stan, w którym pod wpływem działania sił na kręgosłup w procesie przenoszenia obciążeń **została przekroczona fizyczna wytrzymałość tkanek, zdolność adaptacyjna oraz wydolność czynnościowa** mięśni, więzadeł, stawów oraz kości u człowieka i z tego powodu dochodzi do zachwiania równowagi statyczno-dynamicznej.

Kręgosłup można, z bardzo dużym uproszczeniem, przyrównać do pręta podtrzymującego wyprostowaną postawę ciała i jako taki jest poddawany działaniom różnego rodzaju obciążeń, np. ściskaniu, rozciąganiu, zginaniu lub też skręcaniu. Kręgosłup ma wewnętrzną i zewnętrzną stabilność: pierwszą dzięki podtrzymaniu przez krążki międzykręgowe i więzadła, drugą zaś dzięki mięśniom, zwłaszcza brzucha i klatki piersiowej. Wewnętrzna stabilność jest wynikiem ciśnienia wewnątrz krążków międzykręgowych. Ciśnienie płynu wchłanianego przez jądro powoduje odpychanie od siebie trzonów kręgów, opór stawiają natomiast więzadła, które mają tendencję do zbliżania trzonów.



Obciążenia kręgosłupa

Dzięki analizie zachowania kręgosłupa w różnych położeniach, przy różnym obciążeniu danego odcinka oraz przy warunkach określanych jako niepatologiczne, dowiedziono, że jest on zdolny do zgięcia i prostowania w zakresie $170-250^\circ$, maksymalnego zgięcia boczego do 110° , i ruchów obrotowych w prawo i lewo do 80° .

Dzięki innym badaniom biomechanicznym wykorzystując równania równowagi sił i momentów wyznaczonych względem przyjętego punktu lub płaszczyzny kręgosłupa można obliczyć momenty sił działających na poszczególne kręgi, czy np. wartości momentu sił oddziaływania mięśni prostowników grzbietu.

Istotnym czynnikiem jest opracowanie uproszczonych modeli, które w dużej mierze skracają i ułatwiają prowadzenie doświadczeń, gdyż wiadomym jest, że odtworzenie całkowitego, realnego modelu obciążeń kręgosłupa ludzkiego jest niewykonalne.

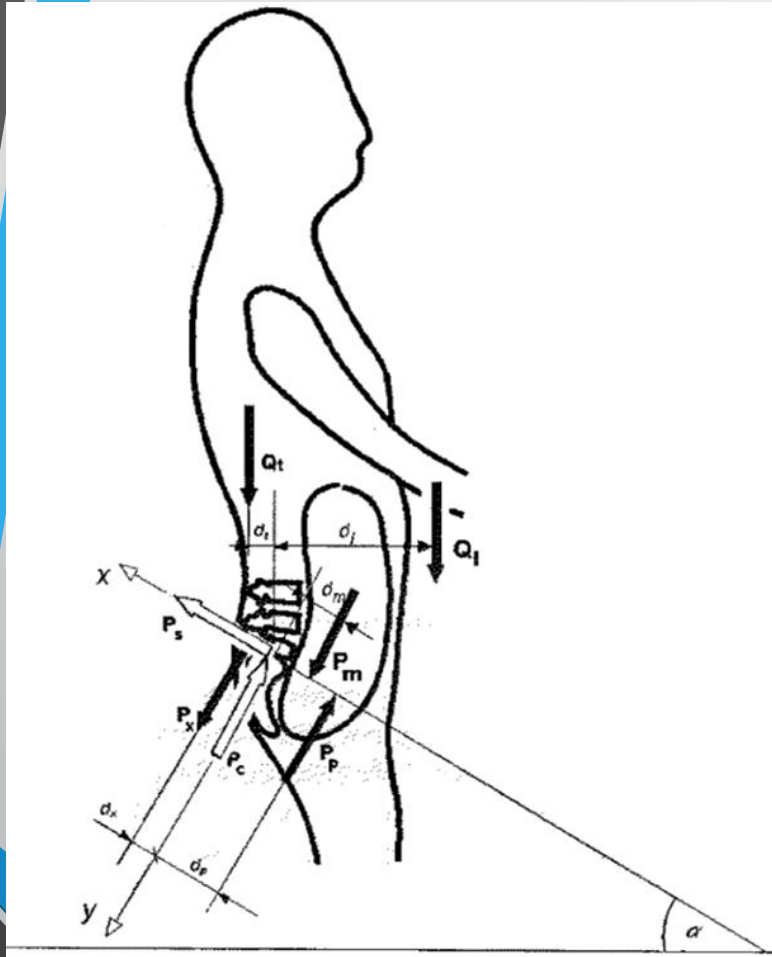
Przyjmuje się odpowiednie uproszczenia uzyskane w wyniku badań eksperymentalnych, głównie *in vivo*, które dotyczą przyjmowanych wartości, parametrów, jak i charakterystyk sił mięśniowych, więzadłowych, oddziaływań występujących w tkankach miękkich, czy ciśnieniu śródbrzusznym.

Obciążenia kręgosłupa wg. modelu Stotte'a

Jednym z modeli uproszczonych jest model Stotte'a.

Założeniem tego modelu jest to, że środek ciała pokrywa się ze środkiem ciężkości ciała, który jest podstawą do przyjmowania obciążeń działających na kręgosłup sił i obciążeń w rejonie danego kręgu.

Na rysunku 1 przedstawiono warunek równowagi obciążeń w rejonie kości krzyżowej i kręgu L5 dla pozycji kręgosłupa w skłonie do przodu.



Oznaczenia:

Q_t – ciężar głowy i karku (szyi) i tej części tułowia powyżej analizowanej płaszczyzny,

Q_l – ciężar ramion działający przez staw ramienny,

P_p – siła wywierana przez ciśnienie śródbrzusne przyłożone w środku pasa p (w środku jamy brzusznej),

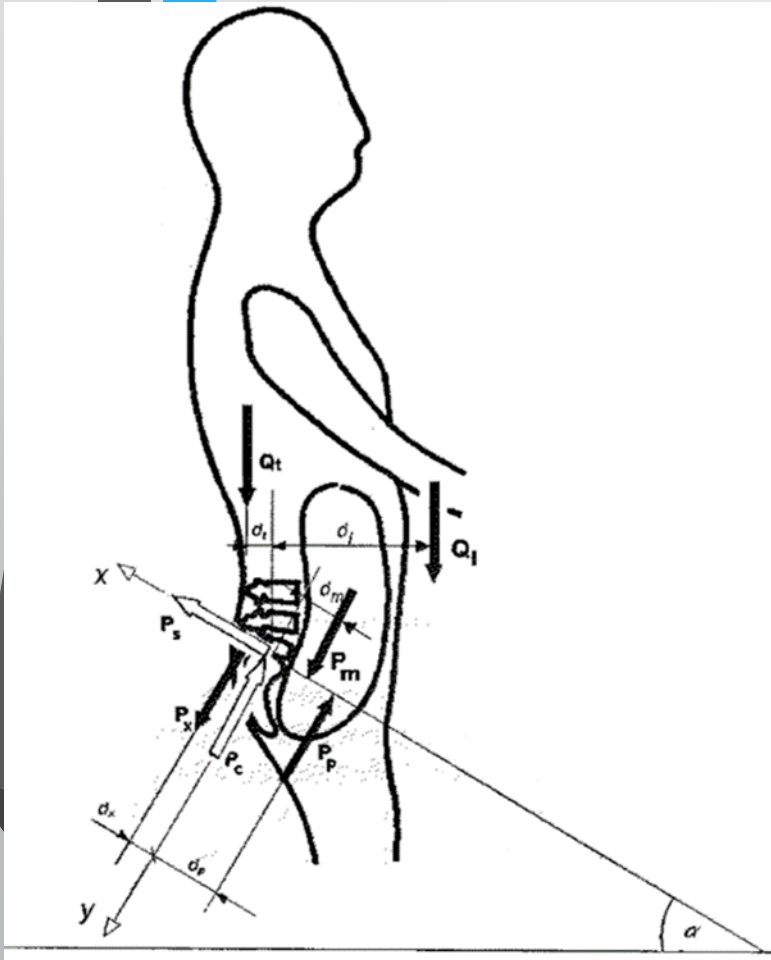
P_m – składowa siły wzłużnej mięśni brzucha,

P_x – siła mięśni prostowników grzbietu.

α – kąt pochylenia kości krzyżowej w stosunku do poziomu

Rys. 1: Model obciążeniowy kręgosłupa wg Stotte'a

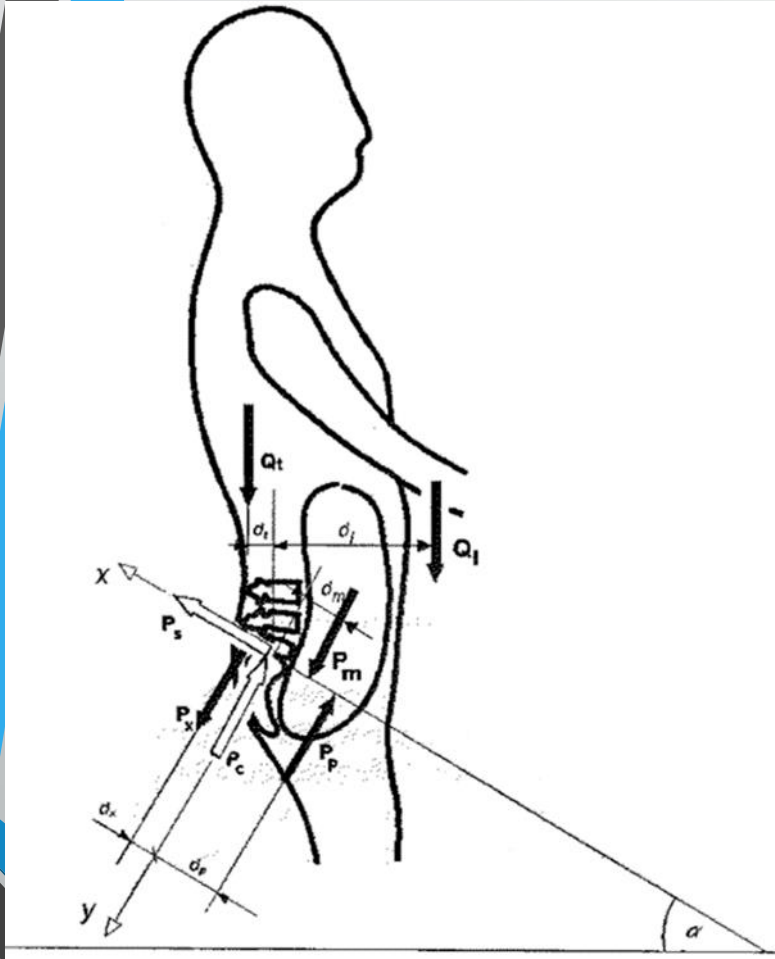
Obciążenia kręgosłupa wg. modelu Stotte'a



W tej pozycji możliwa jest analiza składowych sił oddziałujących na kręg w płaszczyźnie krążka międzykręgowego (dysku) L5-S1 jak i prostopadle do niej. Kąt α jest kątem pochylenia kości krzyżowej w stosunku do poziomu, punkt O (przyjętego układu współrzędnych) jest chwilowym środkiem obrotu umiejscowionym w środku analizowanego krążka międzykręgowego.

Wymienione obciążenia są równoważone przez składową siłę reakcji P_c , działającą pod kątem prostym do płaszczyzny x - x , która powoduje ściskanie krążka międzykręgowego. Natomiast siła P_s jest składową styczną, która wywołuje ścinanie krążka międzykręgowego oraz oddziałuje na wyrostki stawowe. Ciśnienie wewnątrz jamy brzusznej zależy od charakterystyk i mięśni skośnych (wewnętrznych, zewnętrznych) brzucha. Siła generowana przez mięśnie brzucha wywołuje reakcje podpierające kręgosłup i jest mniejsza.

Obciążenia kręgosłupa wg. modelu Stotte'a



W stanie równowagi statycznej możliwe jest zapisanie następujących równań momentów działających względem punktu 0 (Rys. 1):

$$P_x d_x + P_p d_p = Q_l d_l \pm Q_t d_t + P_m d_m$$

Suma składowych sił w płaszczyźnie y-y:

$$P_c = (Q_t + Q_l) \cos \alpha + P_x - P_p + P_m$$

Suma składowych sił w płaszczyźnie x-x:

$$P_s = (Q_l \pm Q_t) \sin \alpha$$

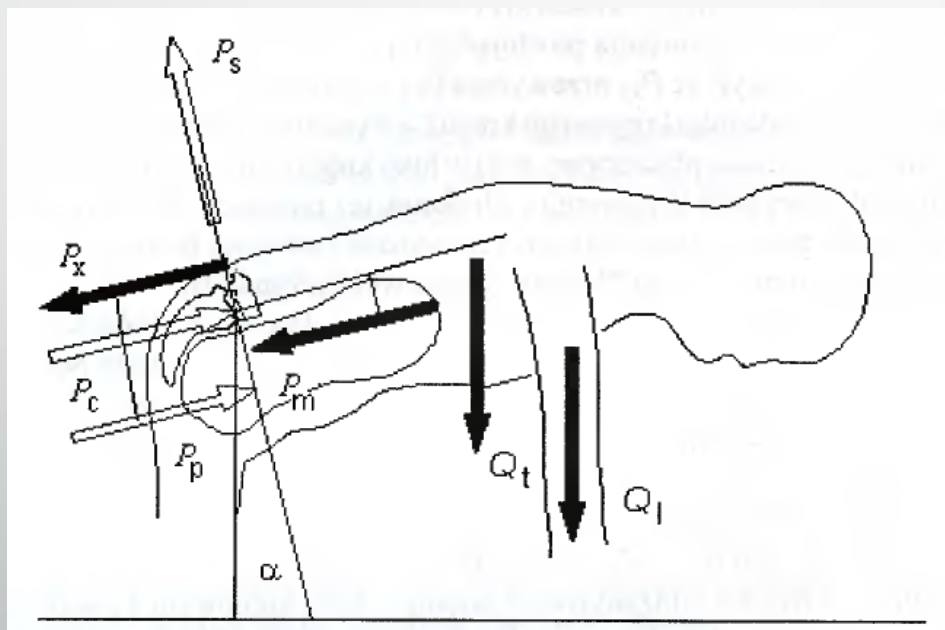
Ciśnienie wewnątrz jamy brzusznej jest redukowane siłą prostownika grzbietu (mięśnia prostującego) P_x i składową ściskającą w krążku międzykręgowym P_c , ale nie powoduje to zmniejszenia wartości siły stycznej.

Obciążenia kręgosłupa wg. modelu Stotte'a

W zgięciu tułowia do przodu, z wyprostowanymi kolanami, linia przebiegająca przez kość krzyżową tworzy z płaszczyzną poziomą kąt 71° (Rys. 2), mięsień prostujący natomiast działa w odległości $d_x=4,8$ cm od środka obrotu.

Ciężar tułowia na poziomie L5 wynosi $45,2\%$ masy ciała, tj. dla osobnika o masie 76 kg wyniesie $Q=746$ N; działa w odległości $d_t=24$ cm od chwilowego środka obrotu O .

Masa ramion wynosi $9,8\%$ masy ciała, wówczas $Q_r=73$ N i działa w odległości $d_r=55$ cm od punktu O .



Rys. 2. Obciążenia krążka międzykręgowego L5-S1 dla pozycji skłon do przodu.



Obciążenia kręgosłupa wg. modelu Stotte'a

Ciśnienie wewnętrzne jamy brzusznej 70 mm Hg (9,35kN/m²) działa na czynnej powierzchni 0,035m² wywołując siłę $P_p=326$ N i działa w odległości $d_p=10$ cm od środka obrotu 0.

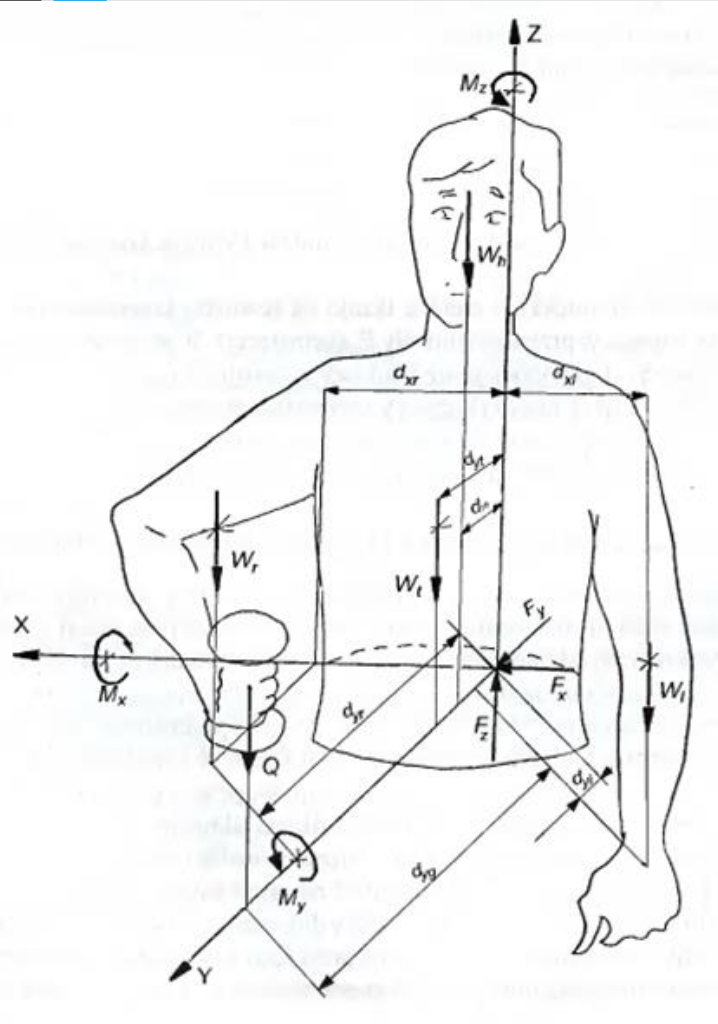
Na podstawie innych danych wzdłużne siły rozciągające, działające w środku jamy brzusznej, można przyjąć jako siłę skupioną ze środkiem przyłożenia w odległości $d_m=d_p=10$ cm od punktu 0. Wartość składowej wzdłużnej mięśni brzucha przyjęto na poziomie $P_m=75$ N.

Stosując wcześniejsze równania można wyznaczyć siły działające w płaszczyźnie krążka międzykręgowego L5-S1:

$$P_{x5} = \frac{Q_l d_l + Q_t d_t + P_m d_m - P_p d_p}{d_{x5}}$$



Model obciążeniowy Schultza



Model obciążeniowy górnej części tułowia wg. Schultza, który traktuje ciało ludzkie jako bryłę sztywną. Sposób postępowania można przedstawić na przykładzie określenia sił wewnętrznych na poziomie kręgu L3. Siły konieczne do wykonania czynności (np. podnoszenia, pchania, itp.) przedmiotami trzymanymi w ręku są zwykle przyłożone do kończyn górnych i mogą być zmierzone bezpośrednio. Siły ciężkości działają w środku masy segmentów górnej powierzchni ciała. Znając obciążenia i ciężar ciała z równań równowagi możemy obliczyć składowe reakcji:

$$F_x = 0$$

$$F_y = 0$$

$$F_z = Q + W_h + W_l + W_r + W_t$$

$$M_x = d_{yq} Q + W_h d_{yh} + W_l d_{yl} + W_r d_{yr} + W_t d_{yt}$$

$$M_y = W_r d_{xr} - W_l d_{xl}$$

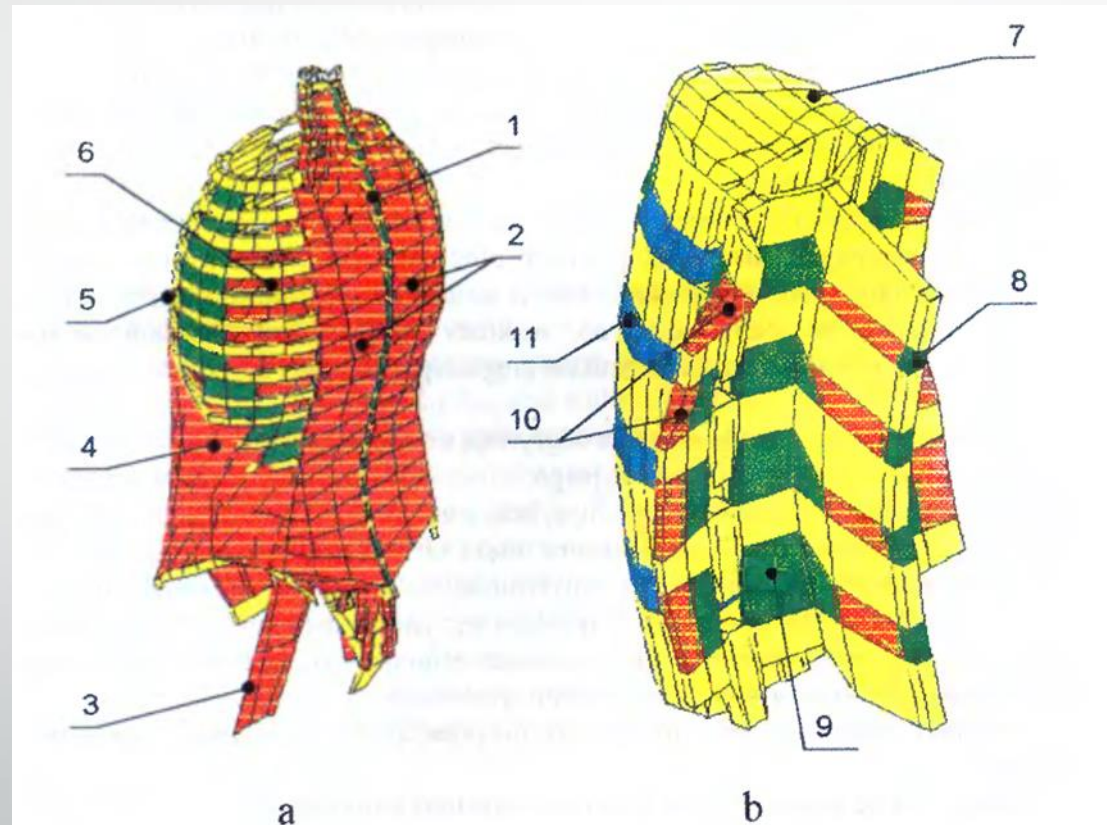
$$M_z = 0$$



Model obciążeniowy - numeryczny

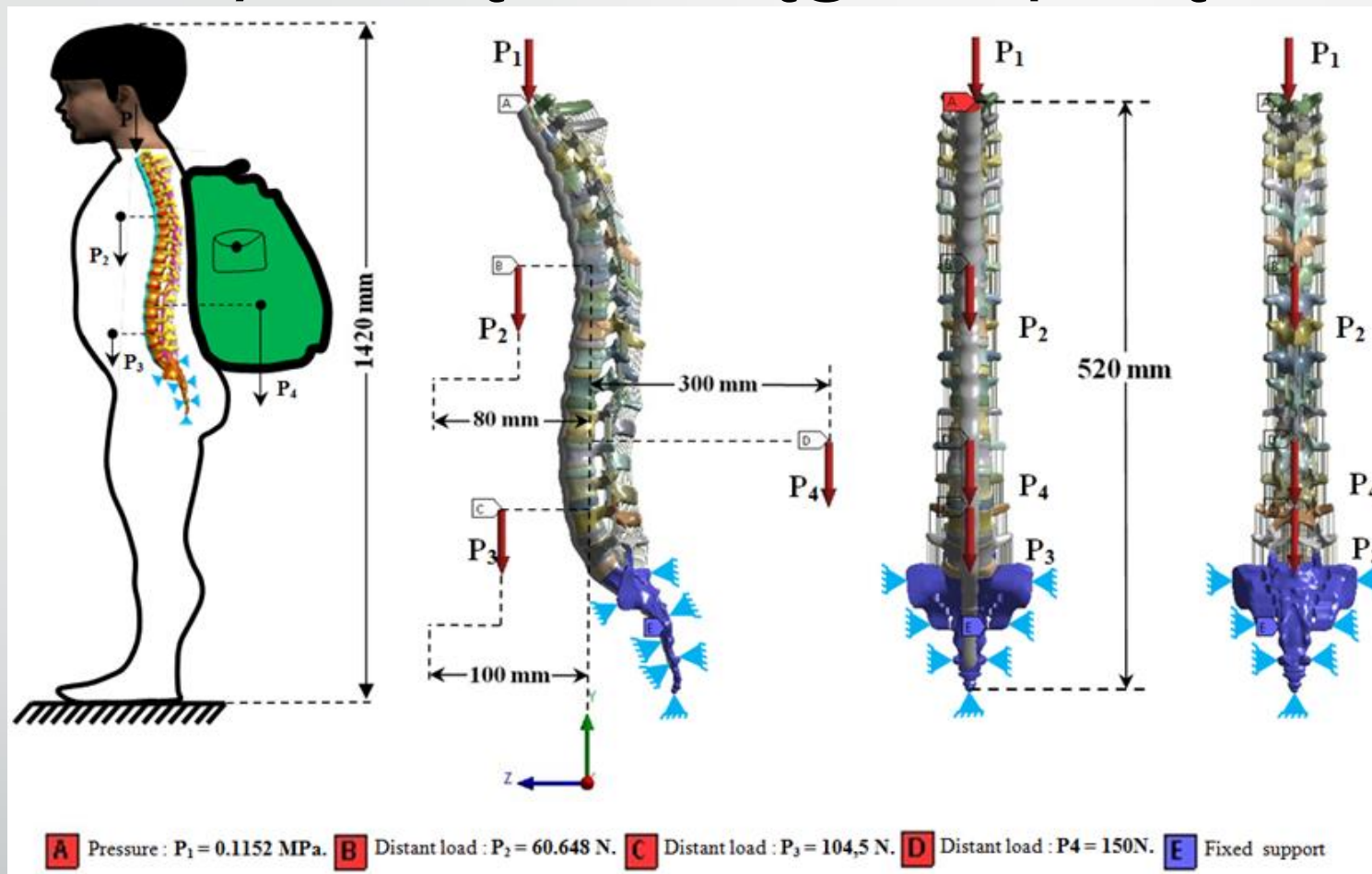
Zespół naukowców z Instytutu Lotnictwa i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej pod kierownictwem prof. Marka Dietricha oraz prof. Krzysztofa Kędziora opracował wiele biomechanicznych modeli elementów ciała człowieka, zwłaszcza kręgosłupa.

Modele te zostały opracowane z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES).



Rys. 4.19. Model numeryczny kręgosłupa do obliczeń MES: 1 – kręgosłup, 2 – mięsień prostownik grzbietu, 3 – mięsień lędźwiowy, 4 – mięśnie brzucha, 5 – klatka piersiowa, 6 – przepona, 7 – kręg L₁, 8 – więzadło nadkolcowe, 9 – więzadło żółte, 10 – mięśnie rotacyjne, 11 – dysk międzykręgowy L₂–L₃ [126]

Zmiany obciążeń kręgosłupa lędźwiowego

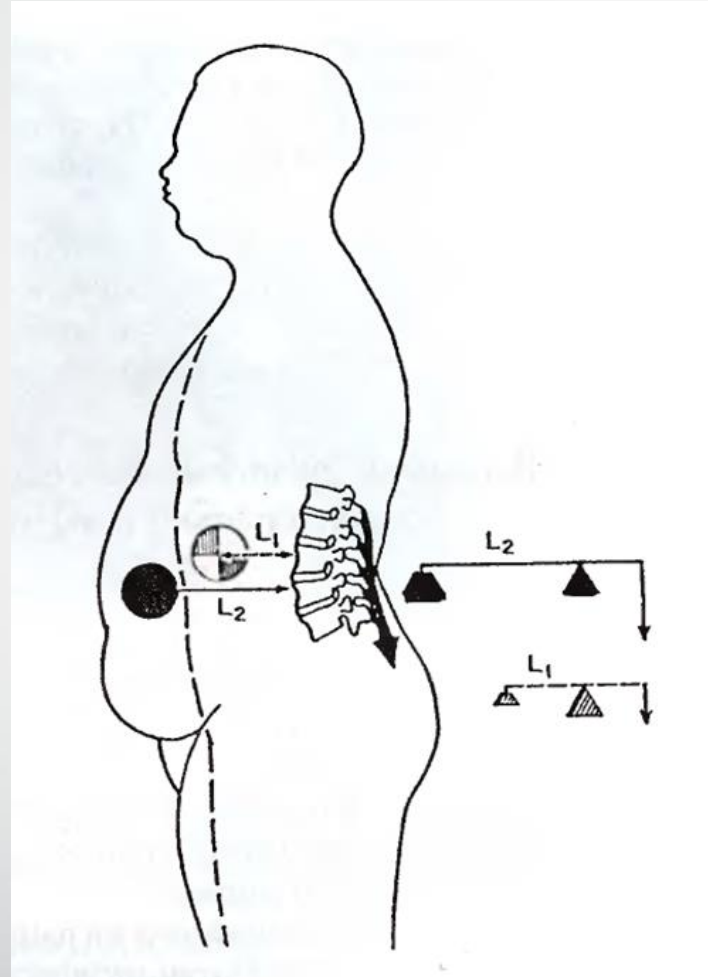


Mechaniczny model przedniego obciążenia kręgosłupa - Dziecko w wieku szkolnym o masie całkowitej 38 kg (w tym ciężar ciała 23 kg, ciężar plecaka 15 kg).

26

Źródło: Zahaf S., Mansouri B., Belarbi A., Azari Z. *The Effects Induced by a Backpack Eccentric Load on the Spine of Children. Biomedical Science and Engineering.* 2016, 4(1), 6-22 doi:10.12691/bse-4-1-2

Zmiany obciążeń kręgosłupa lędźwiowego



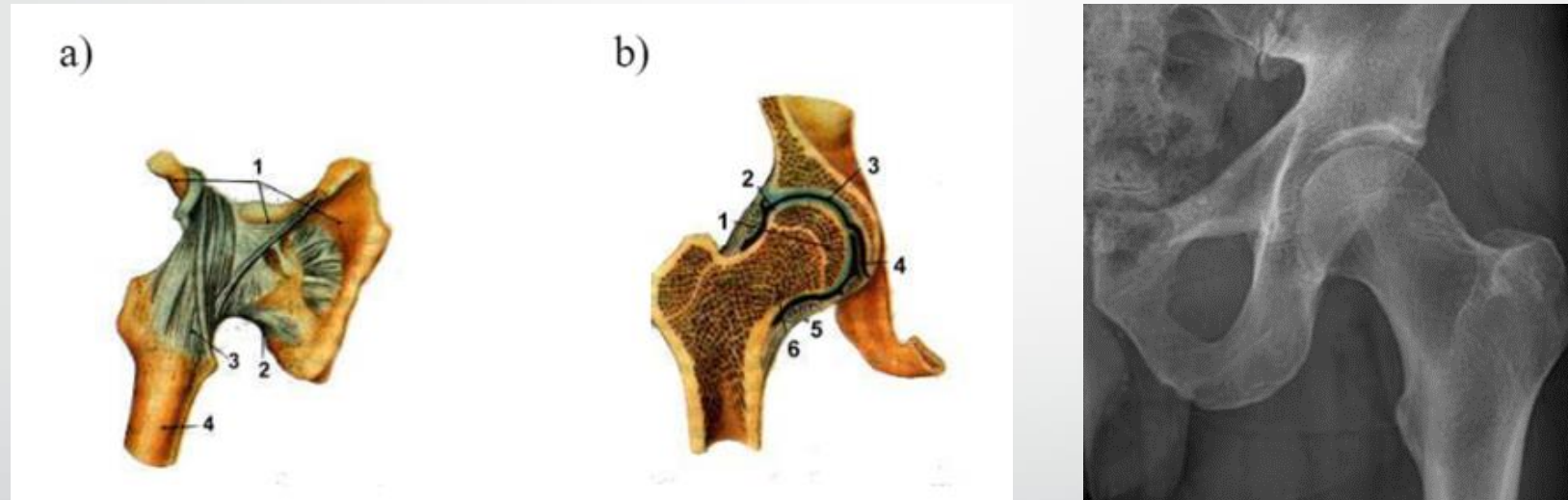
Zmiany obciążeń kręgosłupa lędźwiowego na skutek przerostu tkanki tłuszczowej w rejonie brzucha.

Źródło: Będziński R., *Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997



Staw biodrowy

Ten wieloosiowy staw jest stawem kulistym. Główkę stawową tworzy głowa kości udowej, stanowiąca 2/3 wycinka kuli. Głęboka panewka stawowa, utworzona przez kość miedniczną, otoczona jest obrąbkami panewkowymi, który ją znacznie pogłębia.



Budowa anatomiczna stawu biodrowego:

- a) widok z zewnątrz: 1. kość miedniczna, 2. więzadło kulszowo-udowe, 3. więzadło biodrowo-udowe, 4. kość udowa;
- b) b) przekrój wzdłużny: 1. głowa kości udowej, 2. obrąbek panewkowy, 3. panewka, 4. więzadło głowy kości udowej, 5. włókna warstwy okrężnej, 5. szyjka kości udowej



Ruch w stawie biodrowym

Prawidłowa, pionowa postawa ciała stanowi dla **stawu biodrowego** położenie krańcowe. W położeniu pośrednim, w którym wszystkie włókna torebki stawowej są odprężone, udo znajduje się w położeniu miernego zgięcia, odwiedzenia i obrotu na zewnątrz. Z racji tego, że staw biodrowy jest stawem kulistym panewkowym, ruchy mogą się w nim odbywać dokoła nieskończonej liczby osi.

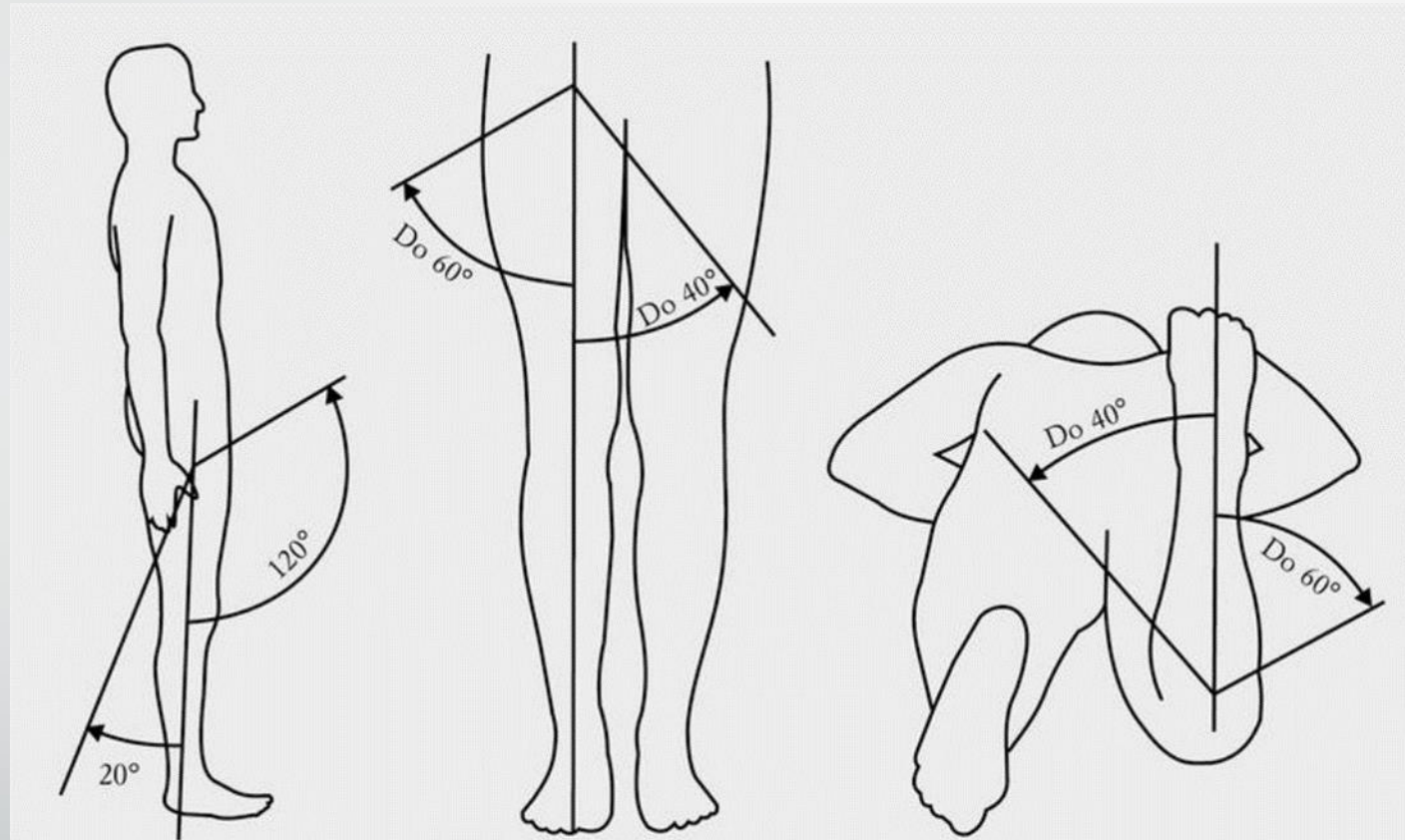
Możemy z nich wyróżnić trzy główne: oś poprzeczna, wokół której wykonywane są ruchy unoszenia, czyli **zgięcia i prostowania** uda lub też, w przypadku ustalonego uda, ruchy zgięcia i prostowania miednicy.

Druga oś biegnie w kierunku strzałkowym przez środek głowy. Dokoła niej odbywają się ruchy **odwodzenia i przywodzenia**, a w przypadku ustalonego uda pochylenie boczne miednicy.

Trzecia oś jest osią obrotu, wokół której odbywają się ruchy obrotowe do wewnątrz (**nawracanie**) i na zewnątrz (**odwracanie**), względnie, w przypadku ustalonego uda – obroty miednicy.



Ruch w stawie biodrowym



Fizjologiczne zakresy ruchu w stawie biodrowym.



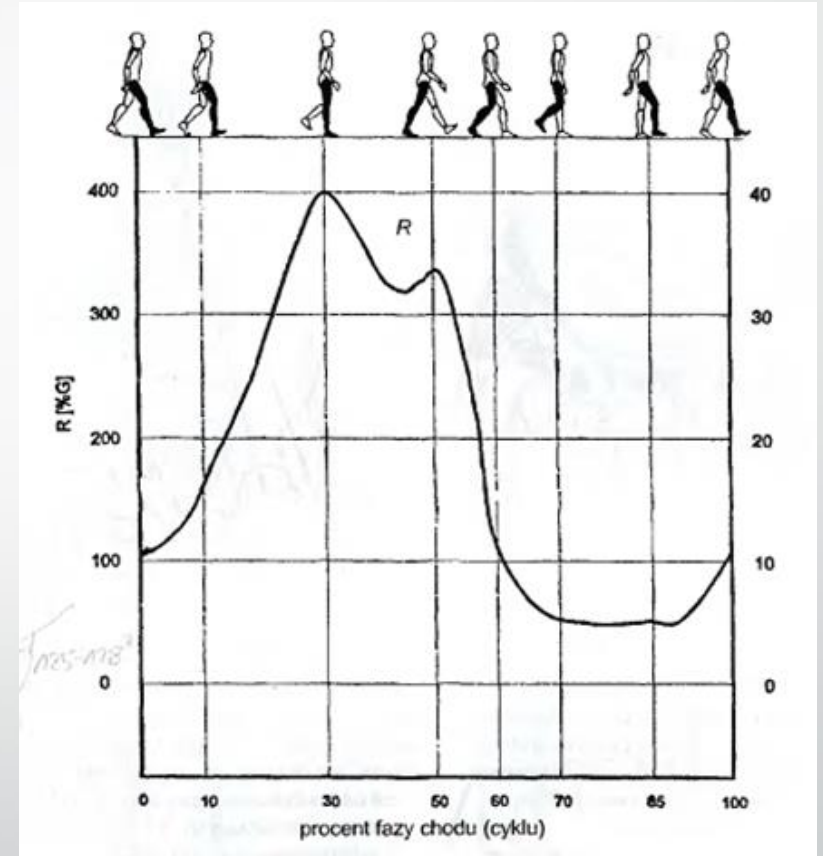
Obciążenia stawu biodrowego

Obciążenia stawu biodrowego wynikające z aktywności fizycznej, a w szczególności chodu.

Są one efektem całego szeregu oddziaływań zewnętrznych (np. siły grawitacji na ciało) i wewnętrznych reakcji pochodzących od współpracy elementów układu kostno-stawowego, układu więzadłowego i mięśniowego.

Staw biodrowy przenosi zarówno siły statyczne jak i dynamiczne, w zależności od wykonywanej czynności i fazy ruchu (Rys. 3).

Najpopularniejszymi modelami opisującymi obciążenia w stawie biodrowym są: model Pauwelsa, model Maqueta oraz model Będzińskiego.



Rys. 3. Udział masy ciała w obciążeniu stawu biodrowego podczas chodu.



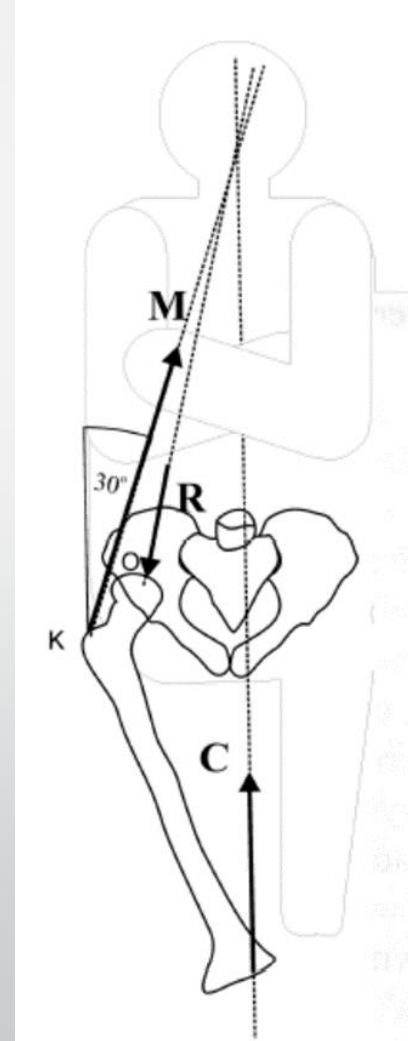
Model obciążenia stawu biodrowego

Model Pauwelsa zakłada, że obciążenia powstające w trakcie stania na jednej kończynie dolnej są jednymi z najważniejszych, jakie oddziałują na staw biodrowy człowieka.

Model Pauwelsa zakłada równowagę momentów sił wokół środka kości udowej, która jest uważana jednocześnie za środek obrotu.

Model jest złożony z członu zawierającego kończynę dolną oraz reszty ciała. Oba te człony połączone są w stawie biodrowym.

Na dolny człon działają trzy siły. Pierwsza z nich to siła reakcji podstawy C, która w przypadku stania na jednej nodze jest przesunięta od osi symetrii w kierunku od nogi, na której osoba jest podparta, a ciężar C jest pomniejszony o ciężar kończyny. Siła M jest rozwijana przez mięśnie odwodziciele stawu biodrowego. Jest ona przyłożona w punkcie K krętarza kości udowej i nachylona pod kątem 30 stopni do pionu. Siła reakcyjna R działa na głowę kości udowej i przechodzi przez środek geometryczny głowy.





Model obciążenia stawu biodrowego

Model Maqueta odmiennie opisuje oddziaływanie i funkcje pasma biodrowo-piszczelowego.

W modelu Maqueta przesuwa się ono swobodnie po powierzchni krętarza większego, powodując powstanie reakcji zwróconej prostopadle do powierzchni krętarza, w kierunku przyśrodkowym.

Powoduje to zarówno zmianę proporcji sił powstających wokół stawu biodrowego, jak również kierunku i wartości reakcji obciążającej głowę kości udowej.

Modele Maqueta i Pauwelsa uwzględniają jedynie oddziaływanie mięśni głównie w płaszczyźnie czołowej, natomiast w rzeczywistości siły mięśniowe działają w wielu kierunkach i jest to o wiele bardziej złożone.

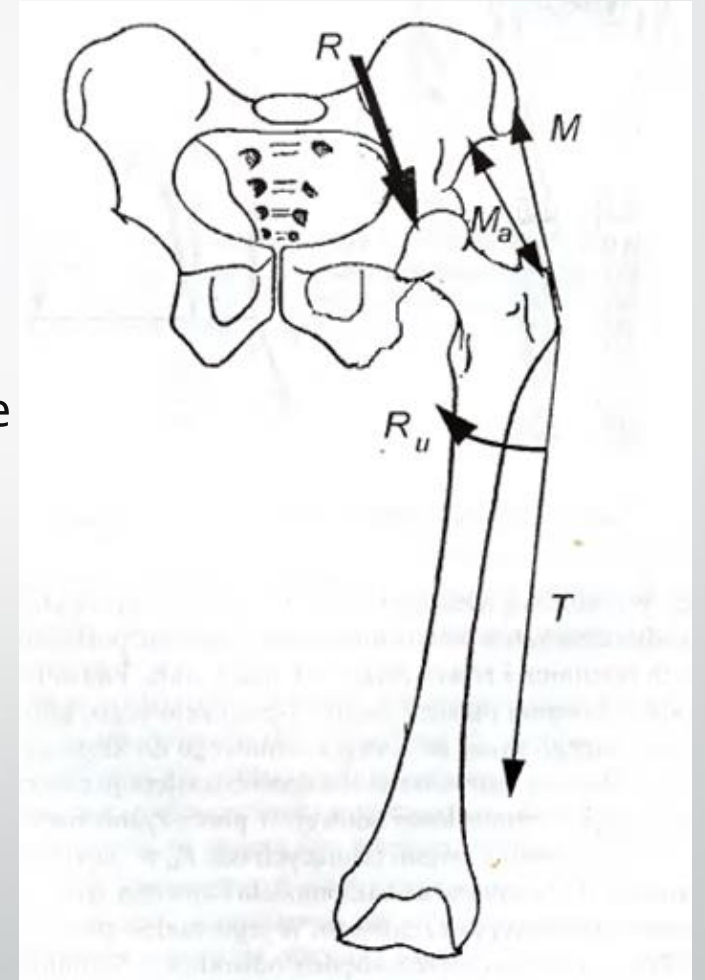


Model obciążenia stawu biodrowego

Model obciążenia stawu biodrowego **Będzińskiego** obejmuje dodatkowo mięśnie rotujące kość udową względem miednicy.

Model ten opisuje sytuacje bardziej złożone, np. wchodzenie po schodach. Uwzględnia oddziaływanie mas tułowia na głowę kości udowej (R), oddziaływanie mięśni odwodzicieli (M), oddziaływanie pasma biodrowopiszczelowego (T) oraz oddziaływanie rotatorów wywołujących skręcenie kości udowej (R_u).

Z uwagi na złożoność obciążeń, a także różnorodność cech anatomicznych człowieka, stworzenie modelu dokładnie odwzorowującego działanie sił i momentów jest bardzo trudne.





Model obciążenia stawu biodrowego

Współczesne metody numeryczne umożliwiają uzyskanie bardziej złożonych modeli obciążenia uwzględniających większość grup mięśniowych, biorących udział w przenoszeniu obciążenia oraz ruchu kończyny dolnej.

Przykładem może być program Visible Human Projekt. Wykonany w tym programie pełny model kończyny dolnej umożliwia bardziej realistyczne określenie sił mięśniowych oraz reakcji w stawach zarówno w sytuacjach obciążenia statycznego jak i dynamicznego.

Model anatomiczny kończyny dolnej, Visible Human Projekt:



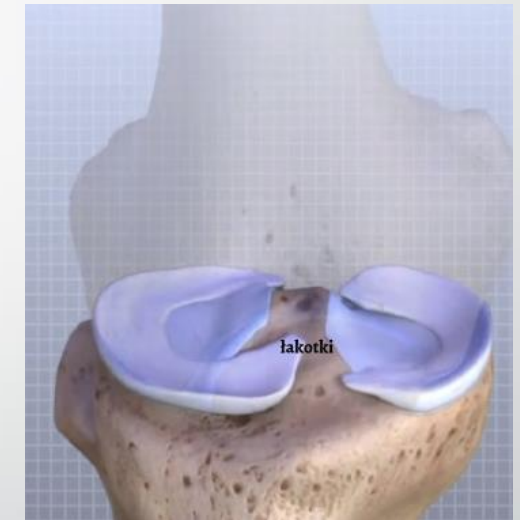
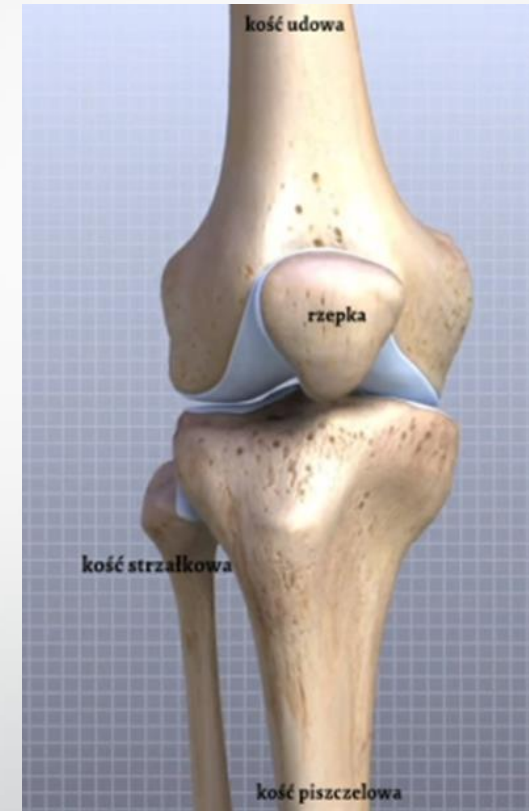


Staw kolanowy - budowa

Staw kolanowy to największy staw ciała człowieka.

Jest to staw złożony (zawiasowy zmodyfikowany) - łączą się tu kość udowa i kość piszczelowa (kość strzałkowa nie buduje stawu kolanowego).

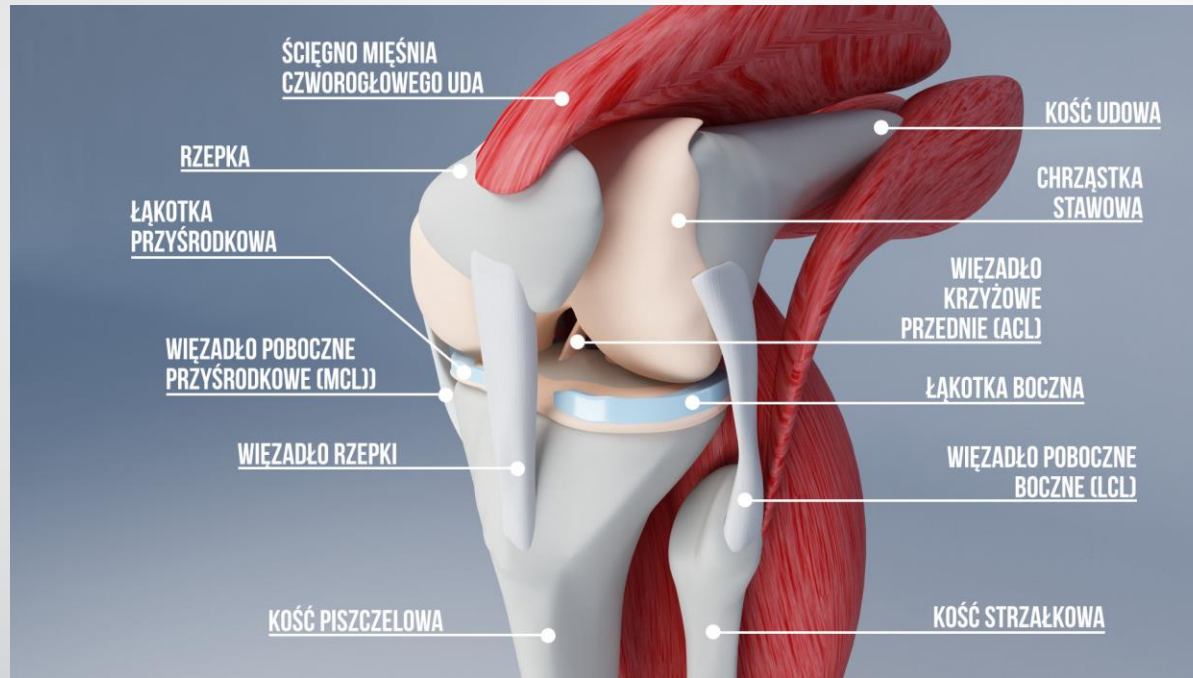
Staw współtworzy trzeszczka w postaci rzepek. Staw posiada dwie łącznotkankowe łąkotki dopasowujące do siebie powierzchnie stawowe w czasie ruchów.





Staw kolanowy – budowa

Działanie stawu kolanowego jest zależne od osi mechanicznej stawu, kształtu powierzchni stawowych oraz działania stabilizatorów czynnych i biernych.



Staw kolanowy jest narażony na przeciążenia związane z potężną siłą mięśnia czworogłowego uda (ciąg na rzepkę max. 300 kg). Ponadto jest drugim (po stawie skokowym) najbardziej obciążanym stawem człowieka.

Staw kolanowy – powierzchnie stawowe

W stawie kolanowym łączą się trzy elementy, w tym dwie kości: kość udowa, kość piszczelowa oraz trzeszczka czyli rzepka.

Główkę stawu tworzą wypukłe kłykcie kości udowej, natomiast jego panewkę lekko wklęsłe kłykcie kości piszczelowej i powierzchnie stawowe rzepki.

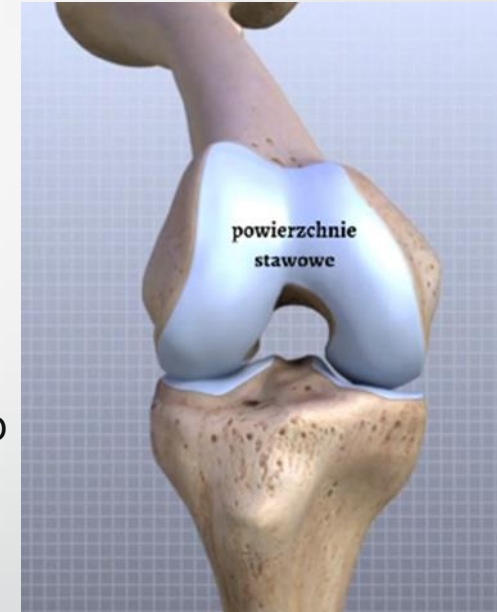
Połączenie pomiędzy kością udową a kością piszczelową (staw udowo-piszczelowy,):

- kłykieć boczny kości udowej – powierzchnia stawowa kłykcia bocznego kości piszczelowej,
- kłykieć przyśrodkowy kości udowej – powierzchnia stawowa kłykcia przyśrodkowego kości piszczelowej.

Połączenie pomiędzy kością udową a rzepką (staw udowo-rzepkowy):

- kłykieć boczny kości udowej – powierzchnia stawowa rzepkowa boczna,
- kłykieć przyśrodkowy kości udowej – powierzchnia stawowa rzepkowa przyśrodkowa.

Kłykcie kości udowej na powierzchni dolnej są płaskie, dzięki czemu bardzo dobrze przylegają do kłykci kości piszczelowych, a tym samym stabilizują staw w pozycji wyprostowanej.





Ruch w stawie kolanowym

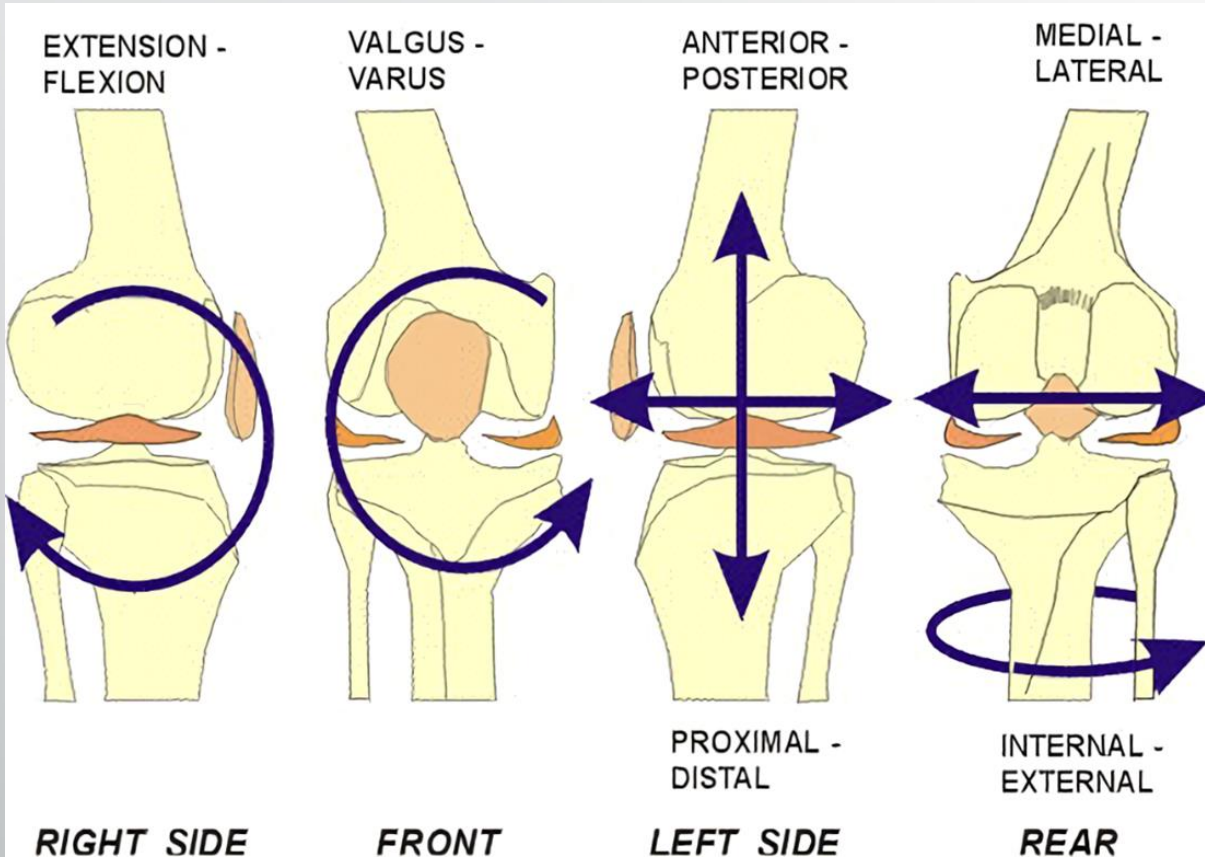
Staw kolanowy jest stawem dwuosowym. Funkcjonalnie jest to staw zawiasowy, umożliwiający ruchy zginania i prostowania, ale w zgięciu (z wyjątkiem maksymalnego) możliwe są również ruchy rotacyjne. Wzmocniony jest więzadłami zewnętrznymi (pobocznymi oraz torebki stawowej) oraz dodatkowo bardzo silnymi więzadłami wewnętrznymi – więzadłem krzyżowym przednim i tylnym.

Wokół osi poprzecznej, która przechodzi przez kłykcie kości udowej, odbywa się **zginanie i prostowanie**. Zgięcie max. dochodzi do 160° , np. w przysiadzie, kiedy części miękkie uda stykają się z golenią. Prostowanie u dorosłej osoby wynosi $10-15^\circ$ – udo i goleń tworzą linię prostą. Ruchy te odbywają się głównie między kłykcami kości udowej i łąkotkami – w stawie łąkotkowo-udowym. Podczas prostowania napinają się stopniowo więzadła poboczne, które w maksymalnym wyproście całkowicie unieruchamiają staw kolanowy.

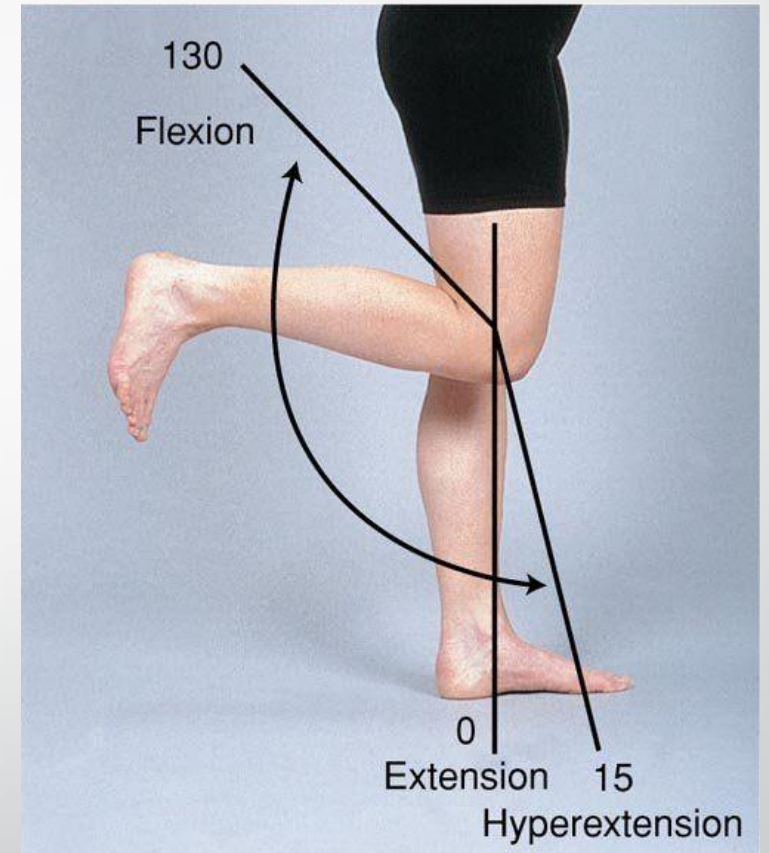
Gdy kolano jest zgięte, może odbywać się ruch wokół osi pionowej – **obrót do wewnątrz i na zewnątrz**. Czynne ruchy obrotowe odbywają się w każdym położeniu stawu kolanowego z wyjątkiem krańcowego zgięcia i krańcowego wyprost. Przy krańcowym wyproście dochodzi do wymuszonego obrotu goleni na zewnątrz. Przy kolanie zgiętym obrót goleni, do wewnątrz wynosi $5-10^\circ$, na zewnątrz - $30-40^\circ$.



Ruch w stawie kolanowym



Rodzaje ruchów stawu kolanowego.



Zakresy zgięcia i wyprostu.



Obciążenia stawu kolanowego

Biomechanika stawu kolanowego była i jest przedmiotem wielu badań. Niektóre z zaproponowanych modeli biomechanicznych jak m.in. **model Maqueta** stały się dominującymi schematami obciążeń stawu kolanowego.

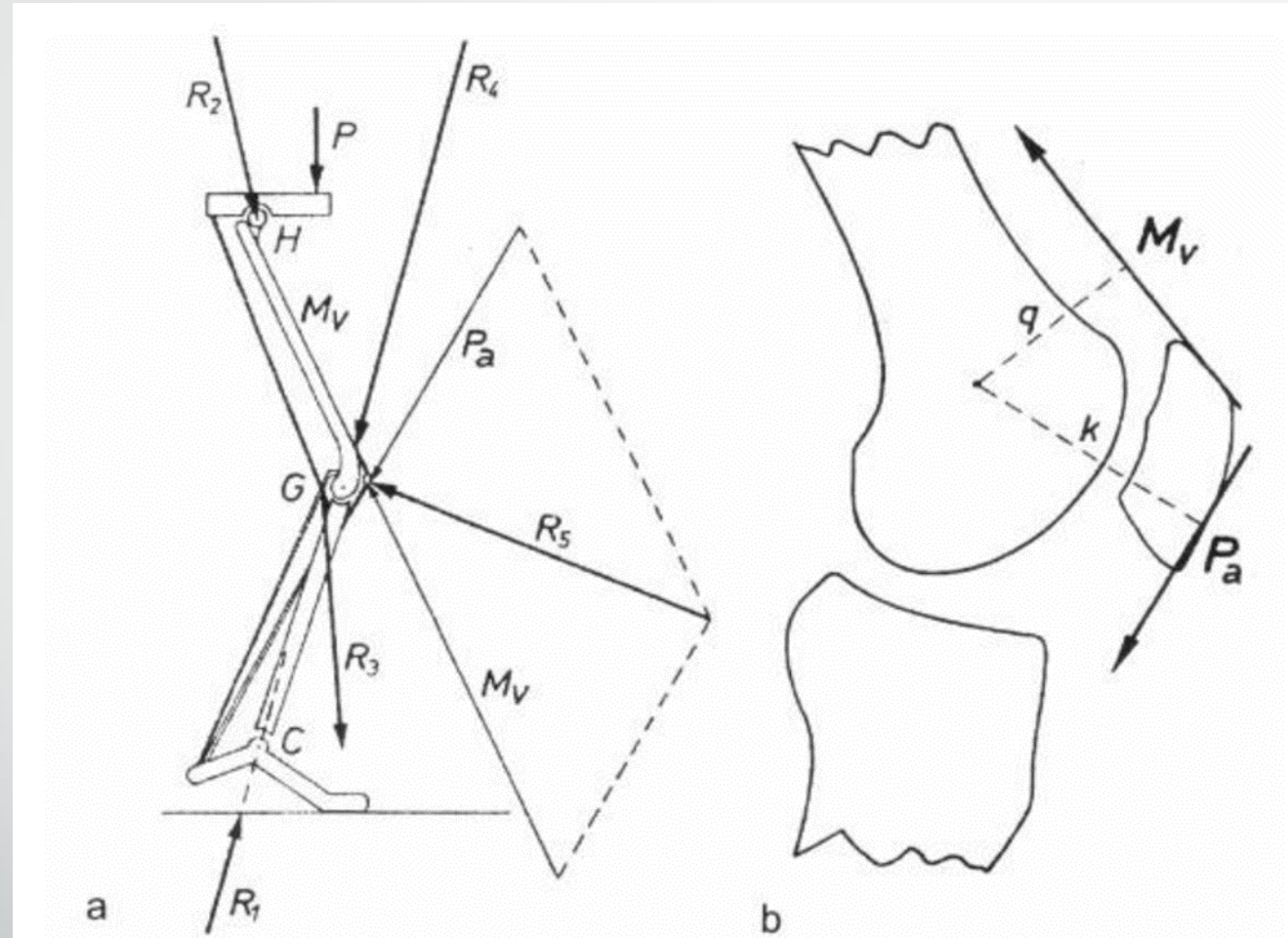
Opracowane modele biomechaniczne opisują schemat obciążeń stawu kolanowego w czasie wykonywania różnych pozycji (stanie na dwóch lub jednej nodze) lub wykonywania typowych czynności (chodzenie, wchodzenie po schodach).

Model biomechaniczny stawu kolanowego zaproponowany przez Maqueta, obejmuje opis sił działających na kolano zarówno w płaszczyźnie strzałkowej jak i czołowej w trakcie wykonywania przez człowieka różnych czynności. Badacz ten opisuje wektory sił i momentów działających na poszczególne elementy stawu z uwzględnieniem oddziaływania najważniejszych grup mięśniowych.

Źródło: Tejszerska D., Świtoński E., Gzik M. (red.), Biomechanika narządu ruchu człowieka: praca zbiorowa. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom, 2011



Model obciążenia stawu kolanowego



Model obciążeniowy stawu kolanowego w płaszczyźnie strzałkowej, zaproponowany przez Maqueta: a) staw udowo-piszczelowy, b) staw udowo-rzepkowy.



Dla zainteresowanych

Więcej szczegółowych informacji o modelach biomechanicznych można znaleźć w podręczniku:
Będziński Romuald, ***Biomechanika inżynierska: zagadnienia wybrane***. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997.

Dostęp online: [Biomechanika inżynierska : zagadnienia wybrane - Dolnośląska Biblioteka Cyfrowa \(dbc.wroc.pl\)](http://dbc.wroc.pl)



Dziękuję za uwagę
i zapraszam na kolejny wykład