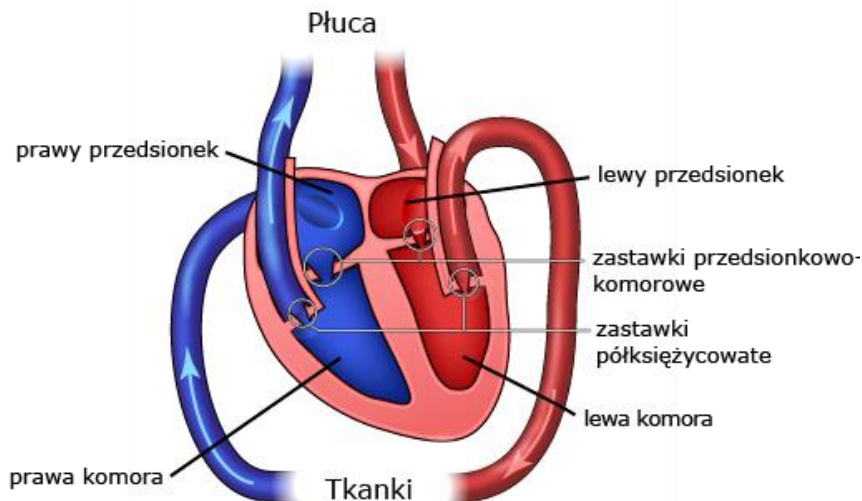


Podstawy teoretyczne: EKG i krążenie obwodowe

Serce jest układem dwóch pomp, determinujących krążenie krwi przez ciało i płuca. Krew wpływa do przedsionka serca pod niskim ciśnieniem, a wypływa z komór serca pod wysokim. Wysokie ciśnienie tętnicze dostarcza energii do napędu krwi przez układ krążenia. Rysunek 1 ilustruje schemat budowy ludzkiego serca i krążenia w nim krwi. Początkowo krew, powracająca z narządów, płynie do serca prawego i jest dalej pompowana do płuc. Tlen jest pobierany, a dwutlenek węgla oddawany. Utlenowana krew wraca do lewej strony serca i jest pompowana z powrotem do organizmu.

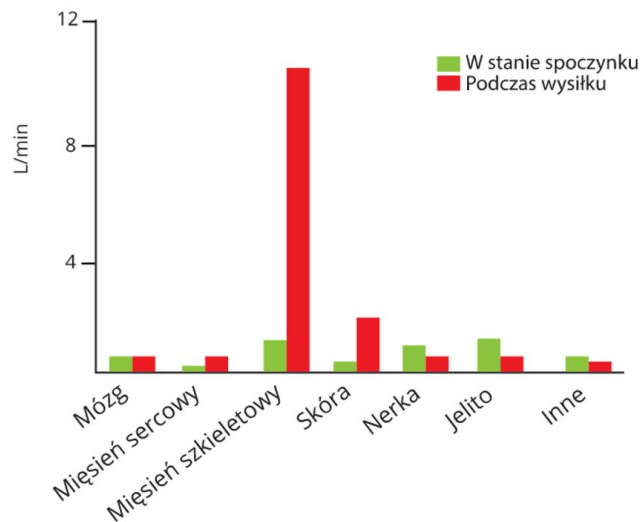


Rysunek 1. Schemat budowy i układu cyrkulacji serca człowieka

Układ krążeniowo-oddechowy jest bezpośrednio odpowiedzialny za rozprowadzanie utlenowanej krwi po całym ciele. Ponadto ponownie natlenia on krew, przepompowując ją z krążenia żylnego do krążenia płucnego, gdzie dwutlenek węgla (CO_2) wydostaje się z krwi, a tlen (O_2) dyfunduje do niej. Krew jest następnie przekazywana do naczyń obwodowych przez lewą stronę serca. Aby cały proces zachodził prawidłowo, serce i płuca uczestniczą w skomplikowanym procesie regulacji, wykorzystującym wewnętrzne i zewnętrzne sygnały. Podczas wysiłku fizycznego regulacja ta staje się znacznie bardziej widoczna.

Podczas wysiłku fizycznego, **od lekkiego do średniego**, wzrost rzutu serca przewyższa efekty ogólnego rozszerzenia naczyń krwionośnych. Ponadto zarówno skurczowe, jak i rozkurczowe ciśnienie krwi ma tendencję do wzrostu. **Przy ciężkim** wysiłku fizycznym rozszerzenie naczyń krwionośnych w pracujących mięśniach i skórze powoduje wzrost ciśnienia skurczowego. Towarzyszy temu spadek ciśnienia rozkurczowego. W związku z powyższym rośnie też ciśnienie tętna (różnica między ciśnieniem skurczowym i rozkurczowym).

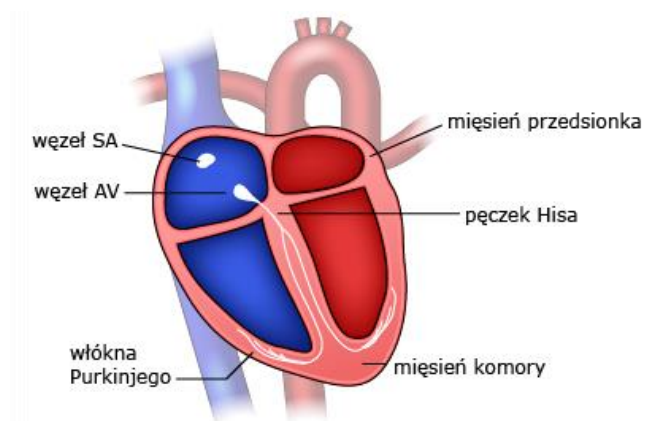
Przepływ krwi przez narządy w stanie spoczynku może być bardzo różny od tego obserwowanego podczas wysiłku fizycznego. Na przykład przepływ krwi przez jelita i nerki (który stanowi łącznie około 50% całkowitego przepływu krwi w stanie spoczynku) podczas ćwiczeń fizycznych znacznie spada. Dla porównania przepływ krwi przez mięśnie szkieletowe podczas wysiłku drastycznie wzrasta.



Rysunek 2. Zmiany przepływu krwi przez różne narządy na skutek wysiłku fizycznego.

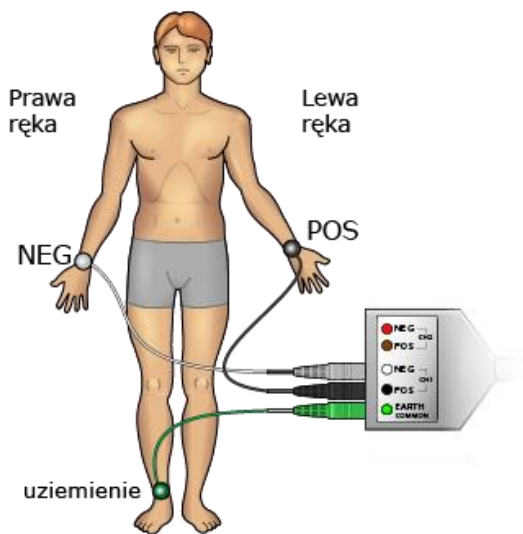
Skurcz serca nie zależy od jego unerwienia. Jednakże unerwienia przywspółczulne (vagus) i współczulne modyfikują podstawowy rytm pracy serca. Tą drogą centralny układ nerwowy może oddziaływać na ten rytm. Najlepiej poznanym przykładem takiej regulacji jest arytmia zatokowa, w której czynność oddechowa oddziałuje na tempo pracy serca. **W czasie aktywności fizycznej rośnie impulsacja układu współczulnego, co przyczynia się do przyspieszenia tempa pracy serca.**

Grupa wyspecjalizowanych komórek mięśniowych węzła przedsionkowo - komorowego, nodus sinuatrialis (SA), stanowi rozrusznik serca (Rysunek 3). Komórki te rytmicznie generują potencjały czynnościowe, rozprzestrzeniające się na włókna mięśniowe przedsionków. W wyniku skurczu tych mięśni krew jest przepychana do komór. Jedyne elektryczne połączenie między przedsionkami i komorami stanowi węzeł przedsionkowo- komorowy, nodus atrioventricularis (AV). Potencjał czynnościowy rozprzestrzenia się przez węzeł AV powoli, w ten sposób umożliwiając skurcz przedsionkowy, przyczyniający się do wypełnienia krwią komór, by następnie szybko przejść przez pęczek przedsionkowo-komorowy (Hisa) i włókna Purkiniego oraz spowodować pobudzenie obu komór.



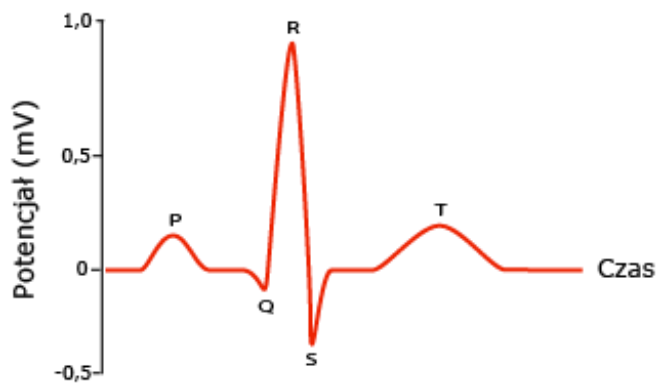
Rysunek 3. Części serca ludzkiego zaangażowane w czynność skurczową

Cykl pracy serca jest uwarunkowany sekwencyjnym skurczem przedsionków i komór. Wspólna czynność elektryczna różnych komórek myocardium generuje prądy elektryczne, które rozprzestrzeniają się przez płyny w organizmie. Prądy te są wystarczająco duże, by zostać zarejestrowane przez elektrody umieszczone na skórze (Rysunek 4).



Rysunek 4. Standardowe połączenie elektrod kończynowych w EKG

Prawidłowy wykres załamków EKG jednego cyklu pracy serca został pokazany na Rysunku 5.



Rysunek 5. Pojedynczy cykl pracy serca, ilustrujący załamki P i T oraz kompleks QRS

Elementy zapisu EKG można skorelować z czynnością elektryczną kardiomiocytów przedsionków i komór:

- załamek P – powstaje przez depolaryzację przedsionków
- kompleks QRS jest wytworzony przez depolaryzację komór; repolaryzacja przedsionków następuje również w tym czasie, ale jej udział jest nieistotny
- załamek T jest odzwierciedleniem repolaryzacji komór.

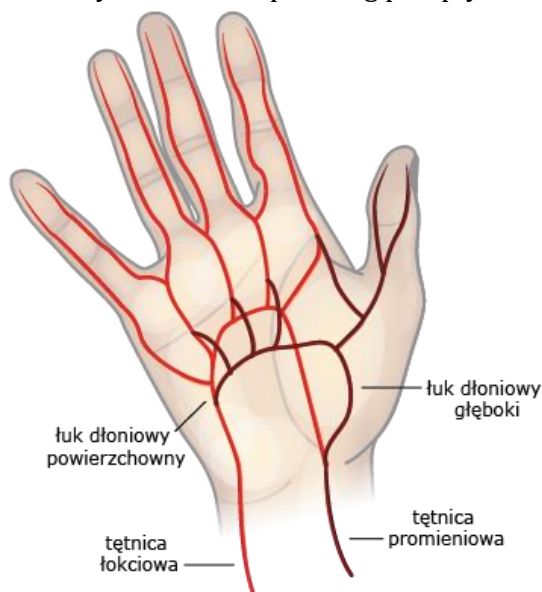
Krażenie peryferyjne

Układ tętniczy funkcjonuje jak rezerwuar ciśnienia. Krew wypływa z tętnic w sposób ciągły przez kapilary, pomimo że z serca wpływa pulsacyjnie. Komory kurczą się w czasie systola, zastawki półksiężycowate otwierają i krew przepływa do systemu tętniczego. W tym momencie tętnice są rozciągnięte i ciśnienie krwi rośnie.

Ciśnienie skurczowe jest definiowane jako szczyt ciśnienia osiągnięty w czasie cyklu pracy serca. Okres w czasie relaksacji komór jest nazywany rozkurczem. W tym czasie komory napełniają się krwią powracającą układem żylnym, krew kontynuuje przepływ z tętnic do naczyń włosowatych. Przepływ ten jest uwarunkowany sprężystością głównych tętnic. W konsekwencji ciśnienie tętnicze spada. Najniższą wartość tętniczego ciśnienia krwi – bezpośrednio przed skurczem komór wyrzucających krew ponownie do tętnic - nazywamy ciśnieniem rozkurczowym. **Szczyt skurczu fali ciśnienia ujawnia się w tętnicach peryferyjnych po kompleksie QRS. Jest to czas, w którym fala ciśnienia skurczowego dociera do kończyn i jest mierzona przez nasz czujnik.** Fala dykrotyczna (małe plateau lub obniżenie fali ciśnienia) jest spowodowane zamknięciem zastawki aortalnej.

Przetwornik pulsu palca

W tych ćwiczeniach zastosujemy przetwornik pulsu palca. Mierzony puls jest indykatorem absolutnego przepływu krwi do opuszki palca. Oprogramowanie komputerowe umożliwia obliczanie całek przebiegów czasowych pulsu i wyświetlenie ich w panelu LabTutor. To z kolei jest wskaźnikiem zmian objętości w czasie pomiaru pulsu w palcu. W eksperymentach tych możemy zilustrować przebieg przepływu krwi w małych tętnicach podczas cyklu pracy serca.



Rysunek 6. Dystrybucja przepływu krwi w dłoni

Pojemność minutowa serca

Objętość krwi wyrzucanej przez serce do układu krążenia na minutę (rzut serca: CO) jest iloczynem częstości akcji serca (HR w uderzeniach na minutę) i objętości wyrzutowej (SV w litrach na uderzenie). SV to objętość krwi wyrzucanej podczas każdego uderzenia. U ludzi $CO = HR \times SV = 70 \times 0,07 \approx 5,0 \text{ L/min}$.

Częstość pracy serca ssaków jest kontrolowana przez autonomiczny układ nerwowy. Stymulacja z nerwów współczulnych zwiększa częstość akcji serca. Stymulacja z nerwu przywspółczulnego unerwiającego serce (nerwu błędnego) zmniejsza tętno. W spoczynku dominuje działanie nerwu błędnego (stan napięcia nerwu błędnego), a serce bije wolniej niż w przypadku braku aktywności nerwów autonomicznych. **Podczas ćwiczeń fizycznych zmniejsza się aktywność nerwu błędnego, a rośnie poziom stymulacji z układu współczulnego. To, w połączeniu ze zwiększonym poziomem krążącej w krwi adrenaliny, powoduje zwiększenie częstości akcji serca.**

Na objętość wyrzutową wpływa wiele czynników, w tym:

- objętość krwi powracającej do serca (powrót żylny),
- działanie układu współczulnego,
- poziom krążącej w krwi adrenaliny.

Wraz ze wzrostem intensywności wysiłku ciśnienie skurczowe stopniowo rośnie, ponieważ rośnie objętość wyrzutowa. Ciśnienie rozkurczowe rośnie tylko w niewielkim stopniu, ponieważ całkowity opór naczyń obwodowych niewiele się zmienia (nieznaczny wzrost), jako że wazokonstrykcja (zwężenie) naczyń skórnych i trzewnych jest kompensowana przez wazodylatację (rozszerzenie) naczyń krwionośnych w pracujących mięśniach szkieletowych. W efekcie wzrost średniego ciśnienia krwi jest mniejszy niż wzrost ciśnienia skurczowego.

Czynnikiem, który zwiększa objętość wyrzutową jest też wzrost powrotu żylnego. Prawo Franka-Starlinga mówi, że im więcej krwi dopływa do serca w czasie rozkurczu tym więcej krwi serce wyrzuci w czasie kolejnego skurczu. Dzięki temu możliwa jest równowaga między powrotem żylnym a objętością wyrzutową.

Objętość wyrzutowa serca (SV, ang. stroke volume) może rosnać tylko do pewnego momentu. Przy intensywności wysiłku równej ~50% wysiłku maksymalnego, wzrost pojemności minutowej osiągnany jest tylko przez wzrost częstości skurczów serca (HR, ang. heart rate).

U osób o dużej sprawności fizycznej objętość wyrzutowa jest wyższa, a tętno niższe. Pozwala im to na zwiększenie rzutu serca w znacznie większym stopniu, niż ma to miejsce u osoby niewysportowanej.

Przyspieszonej akcji serca podczas wysiłku fizycznego towarzyszą też **zmiany w zapisie EKG**. Wzrost częstości akcji serca powoduje skrócenie cyklu pracy serca (zmniejsza się odstęp RR). Największemu skróceniu ulega odstęp TP. Oznacza to, że wraz ze wzrostem tętna okres rozkurczu (relaksacji komór) skraca się bardziej niż okres skurczu. Dzieje się tak dlatego, że skurcz jest już aktywną częścią cyklu pracy serca i trudno go bardziej skrócić, a zwiększenie aktywności mięśnia podczas fazy biernego rozkurczu umożliwia jej skrócenie. Skraca się również odstęp QT, ale tylko nieznacznie.

Wszystkie systemy zaangażowane podczas wysiłku fizycznego, tak jak i podczas spoczynku, znajdują się pod kontrolą ośrodkowego układu nerwowego (CNS), który koordynuje ich pracę. Zmiany dotyczące układu krwionośnego to:

- Na skutek aktywacji płynącej z CNS, już od chwili rozpoczęcia wysiłku rośnie tempo pracy serca i rozszerzają się naczynia krwionośne (wazodylatacja naczyń) aby dostarczyć więcej krwi do pracujących mięśni.
- Podczas wysiłku pracujące mięśnie uwalniają zwiększoną ilość CO₂ i jonów H⁺, dzięki czemu następuje dalsze rozszerzenie naczyń krwionośnych i zwiększony przepływ krwi.
- Aby otrzymać odpowiednie ciśnienie krwi, jej przepływ do układu pokarmowego i nerek zmniejsza się, dzięki czemu więcej krwi przepływa przez mięśnie.
- Naczynia krwionośne ulegają wazodylatacji również na skutek ciepła, które generują pracujące mięśnie.
- Ciepło musi być tracone z organizmu aby nie doszło do przegrzania (hipertermii), dlatego skórne naczynia krwionośne rozszerzają się i ciepło jest tracone z powierzchni skóry na drodze promieniowania i konwekcji. Rozszerzone naczynia sprawiają, że skóra staje się bardziej zaczerwieniona.

Maksymalne tempo pracy serca

Najbardziej znanym sposobem na obliczenie maksymalnego tempa pracy serca (HR_{max}) jest odjęcie wieku od liczby 220: jeśli masz 20 lat, to maksymalne tempo pracy serca powinno wynosić 200 uderzeń na minutę. Obecnie proponuje się równanie:

$$\text{HR}_{\text{max}} = 208 - 0,7 \times \text{wiek w latach,}$$

które daje dokładniejsze wyniki. W powyższym przykładzie byłoby to: HR_{max} = 208 - 0,7 x 20 czyli 194 uderzeń na minutę.

Wartości te są pewnym przybliżeniem. Aby poznać dokładną wartość HR_{max} należałoby zmierzyć rzeczywiste tempo pracy serca podczas maksymalnego wysiłku tlenowego. Najdokładniejszym sposobem oceny intensywności ćwiczeń jest pomiar maksymalnego zużycia O₂ (VO₂max). W tym samym czasie można również określić produkcję (VCO₂).

TEMPO PRACY SERCA SPORTOWCÓW ZAWODOWYCH

Zawodowi sportowcy bardzo często mają niskie spoczynkowe tempo pracy serca, osiągające zaledwie 40 uderzeń na minutę. Taka bradykardia spoczynkowa ma duże znaczenie podczas intensywnego wysiłku, ponieważ:

- spoczynkowa pojemność minutowa serca u zdrowych młodych dorosłych wynosi około 5 L/min, osoby z wolnym rytmem serca muszą mieć większą objętość wyrzutową. Sportowcy mają zwykle większą objętość lewej komory i grubsze ściany lewej komory, co wpływa na objętość wyrzutową.
- 25-latek będzie miał maksymalne tętno na poziomie około 195 uderzeń na minutę. Gdyby dana osoba miała tętno spoczynkowe równe 90, podwojenie tętna zbliżyłoby je do tętna maksymalnego. Ale jeśli tętno osoby wynosi 40, to może wzrosnąć prawie 5 razy, zanim zostanie osiągnięty maksymalny poziom.

- Profesjonalny sportowiec z większą spoczynkową objętością wyrzutową i niższym tętnem spoczynkowym może w znacznie większym stopniu zwiększyć pojemność minutową serca podczas ćwiczeń.

Wpływ treningu tlenowego na układ krążenia:

- Spoczynkowe tempo pracy serca spada. Pozwala to na większe przyspieszenie pracy serca przed osiągnięciem poziomu maksymalnego w czasie intensywnego wysiłku fizycznego.
- Spoczynkowa objętość wyrzutowa zwiększa się, a więc taka sama spoczynkowa pojemność minutowa serca jest uzyskiwana przy wolniejszej pracy serca.
- Tempo pracy serca, objętość wyrzutowa i ciśnienie tętnicze krwi zmieniają się w kierunkach, które ułatwiają poprawę wydajności podczas ćwiczeń.