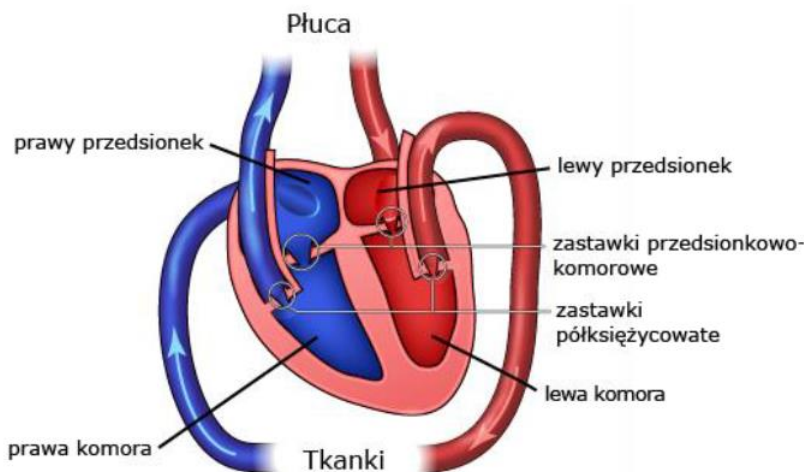


Układ krążenia w wysiłku

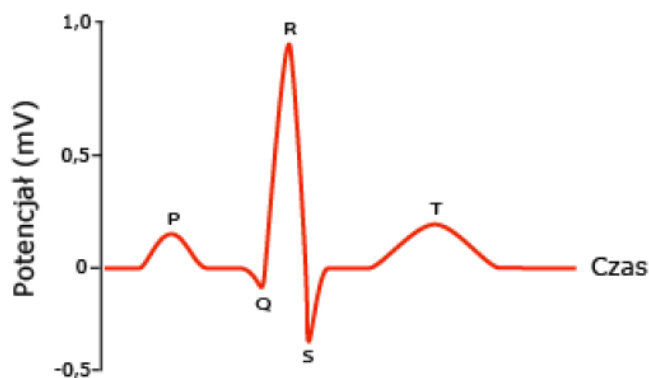
Serce jest pompą, determinującą krążenie krwi przez ciało i płuca. Krew wpływa do przedsionków serca pod niskim ciśnieniem, a wypływa z komór serca pod wysokim. Wysokie ciśnienie tętnicze dostarcza energii do napędu krwi przez układ krążenia. Rysunek 1 ilustruje schemat budowy ludzkiego serca i krążenia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



Rys. 1. Schemat budowy i układu cyrkulacji serca człowieka

Układ krążeniowo-oddechowy jest bezpośrednio odpowiedzialny za rozprowadzanie utlenowanej krwi po całym ciele. 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.

Cykl pracy serca jest uwarunkowany sekwencyjnym skurczem przedsionków i komór. Prawidłowy wykres załamek EKG jednego cyklu pracy serca został pokazany na Rysunku 2.



Rys. 2. Pojedynczy cykl pracy serca, ilustrujący załamek P i T oraz kompleks QRS

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

- załamek P jest równoznaczny z depolaryzacją przedsionków
- kompleks QRS oznacza depolaryzację komór; repolaryzacja przedsionków następuje również w tym czasie, ale jej udział jest nieistotny
- załamek T jest odzwierciedleniem repolaryzacji komór.

Przyspieszonej akcji serca podczas wysiłku fizycznego towarzyszą **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.

Częstość pracy serca 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, 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.**

Pojemność minutowa serca

Objętość krwi wyrzucanej przez serce do układu krążenia na minutę (minutowa pojemność wyrzutowa: 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. Stąd:

$$CO = HR \times SV = 70 \times 0,07 \approx 5,0 \text{ L/min.}$$

Na objętość wyrzutową wpływa wiele czynników, w tym:

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

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. Dlatego czynnikiem, który zwiększa objętość wyrzutową serca jest wzrost powrotu żylnego. W czasie wysiłku następuje wzrost aktywności układu współczulnego i ilości krążącej we krwi adrenaliny, co przyczynia się do wzrostu pojemności wyrzutowej serca.

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 (zweżenie) 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.

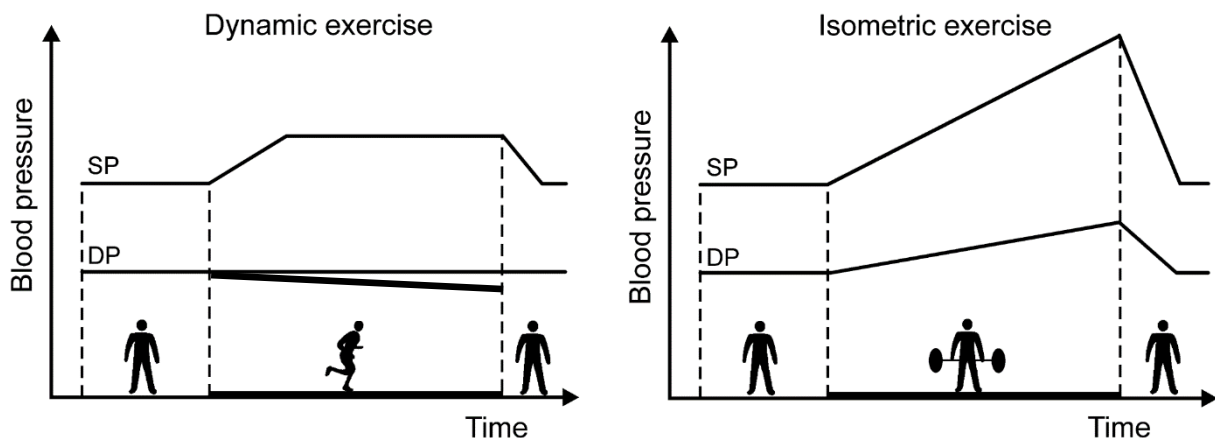
Podczas wysiłku fizycznego rośnie tempo pracy serca i objętość wyrzutowa, co skutkuje wzrostem pojemności minutowej serca, będącej iloczynem częstości skurczów serca i objętości wyrzutowej.

Objętość wyrzutowa serca (SV, ang. stroke volume) może jednak rosnać tylko do pewnego momentu. Przy intensywności wysiłku równej ~50% wysiłku maksymalnego, wzrost pojemności minutowej osiągany 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 wyrzutu serca w znacznie większym stopniu, niż ma to miejsce u osoby niewysportowanej.

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

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.

Na zmiany ciśnienia krwi w czasie wysiłku ma wpływ jego charakter, statyczny lub dynamiczny (Rys. 3). W czasie wysiłku statycznego rośnie zarówno ciśnienie skurczowe, jak i rozkurczowe. Podczas wysiłku dynamicznego ciśnienie rozkurczowe nie zmienia się lub nawet spada.



Rys. 3. Zmiany ciśnienia skurczowego (SP) i rozkurczowego (DP) w czasie wysiłku dynamicznego (Dynamic exercise) i statycznego (Isometric exercise). Z: Bakke et al., 2007.

Maksymalne tempo pracy serca

Najbardziej znanym sposobem na obliczenie maksymalnego tempa pracy serca (HRmax) jest odjęcie wieku od liczby 220: jeśli masz 20 lat, to maksymalne tempo pracy serca powinno wynosić 200 uderzeń na minutę. Obecnie proponuje się nieco inne równanie, które daje dokładniejsze wyniki:

$$\text{HRmax} = 208 - 0,7 \times \text{wiek w latach},$$

W powyższym przykładzie byłoby to: $\text{HRmax} = 208 - 0,7 \times 20$ czyli 194 uderzeń na minutę.

Wartości te są pewnym przybliżeniem. Aby poznać dokładną wartość HRmax 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).

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 (redystrybucja krwi).
- 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.

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:

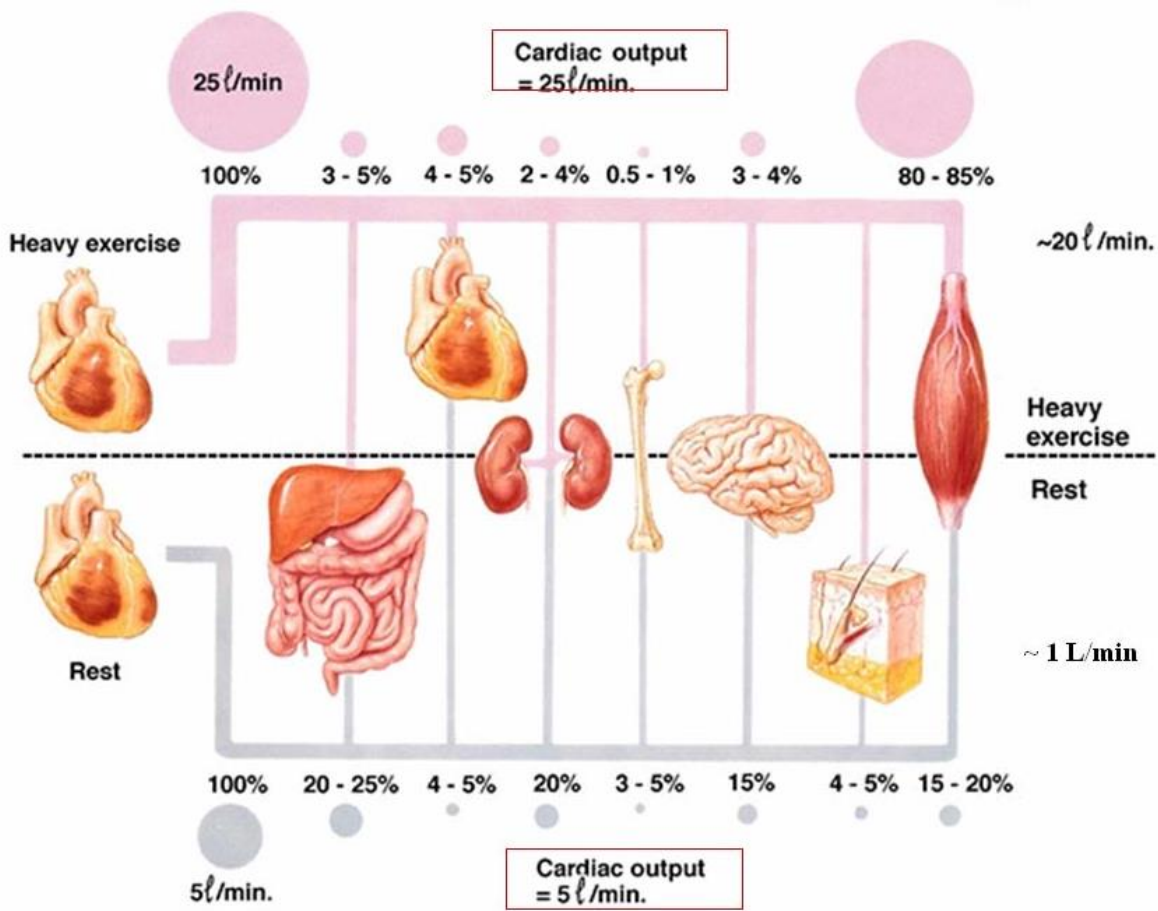
- spoczynkowa pojemność minutowa serca u zdrowych młodych dorosłych wynosi około 5 L/min, osoby z wolnym rytmem serca muszą mieć większą objętość wyrzutową. Sportowcy mają zwykle większą objętość lewej komory i grubsze ściany lewej komory, co pozwala na zmniejszenie objętości wyrzutowej w spoczynku.
- 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 wysiłku.

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.

Redystrybucja krwi

Przepływ krwi przez narządy w stanie spoczynku może być bardzo różny od tego obserwowanego podczas wysiłku fizycznego (Rys. 3). 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 bardzo wzrasta.



Rys. 3. Zmiany przepływu krwi przez różne narządy na skutek intensywnego wysiłku fizycznego. CO – minutowa pojemność wyrzutowa (<https://anitacardioresp.blogspot.com/2010/05/process-for-redistributing-blood-during.html>).