

Układ sercowo-naczyniowy

Układ sercowo-naczyniowy ze względu na jego czynność dzieli się na serce składające się z czterech jam: **dwóch przedsionków prawego i lewego** (*atrium dextrum et atrium sinistrum*) i **dwóch komór prawej i lewej** (*ventriculus dexter et ventriculus sinister*). Przedsionki kurczą się pracują tak, jak pompy objętościowe, komory zaś pracują jak pompy ciśnieniowe, zwłaszcza komora lewa;

- tętnice (*arteries*) i żyły (*venae*) **krążenia dużego**, które tworzą dwa zbiorniki: **zbiornik tętniczy duży** (R_{a_s} — systemic arterial reservoir) i **zbiornik żylny duży** (R_{v_s} — systemic venous reservoir);
- tętnice i żyły **krążenia małego**, czyli płucnego, które tworzą dwa zbiorniki: **zbiornik tętniczy płucny** (R_{a_p} — pulmonary arterial reservoir) i **zbiornik żylny płucny** (R_{v_p} — pulmonary venous reservoir);
- dwie **sieci naczyń włosowatych**: pierwszą łączącą zbiornik tętniczy duży (R_{a_s}) ze zbiornikiem żylnym dużym (R_{v_s}) i drugą łączącą w płucach zbiornik tętniczy płucny (R_{a_p}) ze zbiornikiem żylnym płucnym (R_{v_p}).

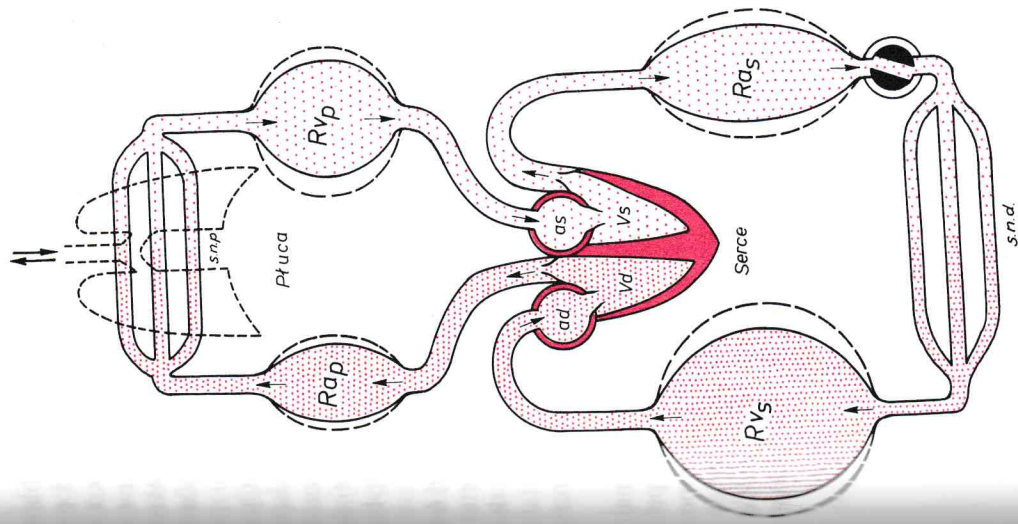
Postępując się najdalej idącym uproszczeniem, można przedstawić układ sercowo-naczyniowy jako układ składający się z:

- czterech pomp pracujących szeregowo po dwie, czyli z prawego przedsionka i prawej komory oraz z lewego przedsionka i lewej komory;
- czterech zbiorników krwi (blood reservoirs): dwóch zbiorników dużych i dwóch zbiorników płucnych;
- dwóch sieci naczyń włosowatych (capillary nets) łączących zbiorniki tętnicze ze zbiornikami żylnymi.

Każdy z czterech zbiorników zawiera inną objętość krwi (blood volume) oraz w każdym z nich panuje inne średnie ciśnienie. Mimo tych różnic pojemność krwi (blood capacity) tłoczona w jednostce czasu, np. w czasie 1 minuty lub 1 godziny, do zbiornika tętniczego dużego musi być prawie równa (tylko z niewielkim odchyleniem) pojemności krwi odpływającej ze zbiornika żylnego dużego.

W warunkach fizjologicznych, kiedy oddychanie jest swobodne, pojemność krwi tłoczona do zbiornika tętniczego dużego równa się pojemności krwi tłoczonej do zbiornika tętniczego płucnego.

W spoczynku pojemność krwi odpływającej ze zbiornika żylnego dużego równa się pojemności krwi odpływającej ze zbiornika żylnego płucnego.



Iluc. 165. Schemat układu sercowo-naczyniowego. Vd — komora prawa, Vs — komora lewa, ad — prawy przedsionek, as — lewy przedsionek, Ra_s — zbiornik tętniczy duży, Rv_s — zbiornik żylny duży, Ra_p — zbiornik tętniczy płucny, Rv_p — zbiornik żylny płucny, s.n.d. — sieć naczyń włosowatych krążenia dużego, s.n.p. — sieć naczyń włosowatych krążenia płucnego.

Pojemność krwi krążącej pomiędzy zbiornikami zmienia się w określonych stanach fizjologicznych organizmu. W czasie **pracy mięśni** i rozszerzenia naczyń krwionośnych w mięśniach szkieletowych lub w **czynie trawienia** i rozszerzenia naczyń krwionośnych w narządach jamy brzusznej początkowo więcej krwi odpływa z R_a , niż dopływa do R_v . Po zakończeniu pracy lub po strawieniu pokarmów w pewnym okresie więcej krwi dopływa do R_v , niż odpływa z R_a .

Postawa ciała ma również wpływ na objętość krwi wypełniającej zbiorniki żyłne. Po zmianie postawy ze stojącej na leżącej więcej krwi dopływa do zbiornika żylnego płucnego, niż z niego odpływa i zwiększa się objętość krwi wypełniającej ten zbiornik. Zmiana postawy z leżącej na stojącą powoduje zmniejszenie objętości krwi wypełniającej zbiornik żylny płucny.

Zasadniczym zadaniem serca jest pompowanie krwi ze zbiorników żylnych do zbiorników tętniczych i utrzymywanie w zbiornikach tętniczych odpowiedniego ciśnienia. Zbiorniki tętnicze gromadzą krew tłoczoną przez serce i dzięki panującemu w nich ciśnieniu zapewniają stały jej przepływ przez sieć naczyń włosowatych również w czasie rozkurczu serca.

Zbiorniki żyłne, zwłaszcza zbiornik żylny duży, w którym stale znajduje się około 54% krwi krążącej, gromadzą krew niezbędną do wypełnienia jam serca i tworzą jej rezerwę. W chwili zwiększonego zapotrzebowania na ten transportowany przez krew serce przyspiesza częstotliwość swych skurczów. Zwiększa się pojemność minutowa krwi tłoczonej przez komory (cardiac output) do zbiorników tętniczych. W tym samym czasie napływa do serca więcej krwi ze zbiorników żylnych.

■ Serce

Z czynnością serca ściśle związane są zjawiska:

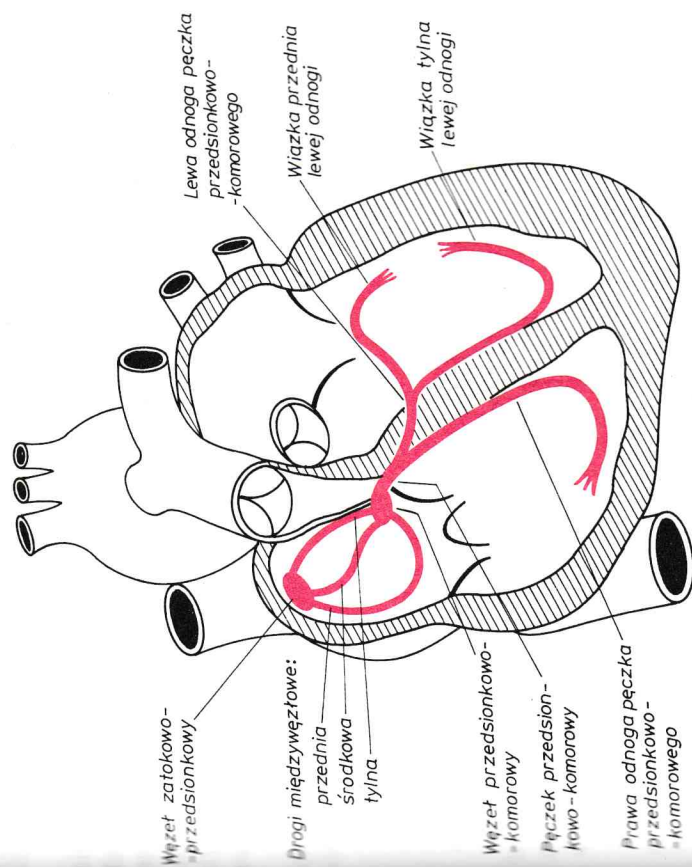
- elektryczne;
- mechaniczne;
- akustyczne.

■ Czynność bioelektryczna serca — EKG

Rozrusznikiem (pacemaker) dla potencjałów czynnościowych mięśnia sercowego, które wyprzedzają skurcz, jest tkanka układu przewodzącego

(conduction system). Błona komórkowa komórek tkanki układu przewodzącego odznacza się zdolnością do rytmicznej spontanicznej depolaryzacji (pacemaker potential). Komórki tworzące węzeł zatokowo-przedstonkowy depolaryzują się najszybciej w stosunku do pozostałych komórek tkanki układu przewodzącego. W związku z tym **węzeł zatokowo-przedstonkowy** stanowi ośrodek pierwszorzędowy, narzucając swój rytm całemu sercu (patrz str. 113).

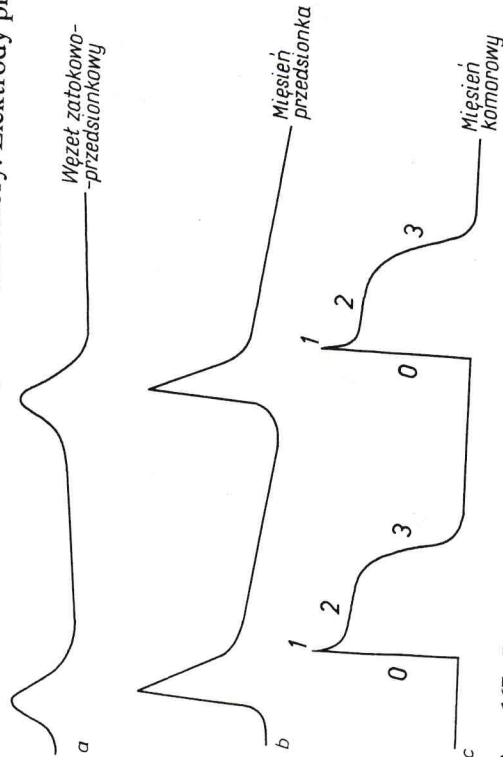
Depolaryzacja z węzła zatokowo-przedstonkowego przenoszą się do **węzła przedstonkowo-komorowego** (Hisa) za pośrednictwem trzech **węzłów międzywęzłowych**: przedniego (Bachmana), środkowego (Wenckebach) i tylnego (Thorela) oraz rozchodzi się na mięsień przedstonkowy, obejmując prawy i lewy przedsionek. W strefie granicznej i w samym węźle przedstonkowo-komorowym zaznacza się największe zwolnienie przewodzenia się depolaryzacji. Z tego węzła depolaryzacja przewodzona jest do mięśnia komór za pośrednictwem **węzła przedstonkowo-komorowego**.



Ryc. 166. Układ przewodzący serca.

Pęczek przedsionkowo-komorowy stanowi jedyne połączenie pomiędzy mięśniami przedsionków i mięśniami komór, przez które przewodzony jest stan czynny. W obrębie komór pęczek dzieli się na **dwie odnogi**: prawą biegnącą do prawej komory i lewą — do lewej komory. Odnoga lewa pęczka dzieli się w obrębie lewej komory na dwie wiązki: wiązkę przednią i wiązkę tylną. Odnoga prawa pęczka i wiązki odnogi lewej pęczka przechodzą pod wstędnym w komórki mięśniowe sercowe przewodzące (włókna Purkiniego). Depolaryzacja przewodzona przez pęczek przedsionkowo-komorowy zaczyna się szerzyć na komórki mięśnia komorowego w następującej kolejności: warstwa podwstędnia w dolnej $\frac{1}{3}$ przegrody międzykomorowej po stronie lewej, od lewej do prawej warstwy podwstędnia przegrody międzykomorowej, warstwa podwstędnia przegrody międzykomorowej po stronie prawej, podwstędnia wstępująca na prawej komory do nasierdza, ściana lewej komory, ściana lewej komory do nasierdza, ściana lewej komory do nasierdza, czopki przypodstawne przegrody międzykomorowej oraz prawej i lewej komory. Wędrówka dużej liczby jonów przez błonę komórkową związaną jest z postępującą depolaryzacją komórek mięśnia przedsionków i mięśni komór.

Zmiany ładunku elektrycznego występujące na powierzchni mięśnia sercowego mogą być odebrane za pomocą elektrod przystawionych bezpośrednio do serca lub do powierzchni skóry. Elektrody przystawione



Ryc. 167. Potencjały czynnościowe odbierane z wnętrza: a) komórki węzła zatokowo-przedsionkowego; b) komórki mięśnia przedsionka; c) komórki mięśnia komorowego (1, 2, 3 — fazy repolaryzacji).

Tabela 26

Prędkość przenoszenia się depolaryzacji w układzie przewodzącym i w mięśniu sercowym

Komórki	Prędkość przenoszenia (m/s)
Węzeł zatokowo-przedsionkowy	0,05
Mięśnia przedsionków	1,0
Ściany granicznej pomiędzy mięśniami przedsionków i węzłem przedsionkowo-komorowym	0,05
Węzeł przedsionkowo-komorowy	0,1
Pęczka przedsionkowo-komorowego	2,0
Przewodzące w mięśniu komór	4,0
Mięśnia komór pod wstędnym	1,0
Mięśnia komór pod osierdziem	0,4

do powierzchni skóry odbierają potencjał czynnościowy mięśnia sercowego o wielokrotnie niższej amplitudzie niż elektrody przystawione bezpośrednio do serca. Ze względów praktycznych stosuje się w medycynie odbiór potencjałów czynnościowych mięśnia sercowego za pomocą elektrod przystawianych do powierzchni skóry.

W celu ujednoczenia metody pomiaru i oceny potencjałów czynnościowych mięśnia sercowego zostały ustalone miejsca na powierzchni ciała, do których przystawia się elektrody.

Odprowadzenia EKG

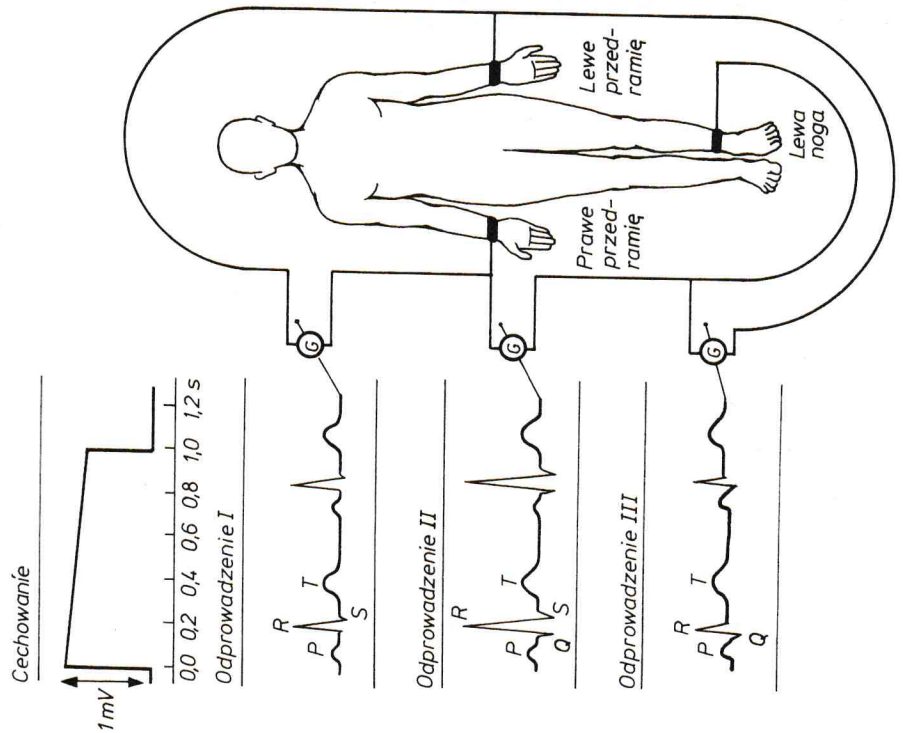
Umieszczając elektrody na kończynach i rejestrując różnice potencjałów występujące pomiędzy elektrodami, odbiera się czynność bioelektryczną mięśnia sercowego, czyli elektrokardiogram — EKG, za pomocą tzw. **odprowadzeń kończynowych**.

Trzy odprowadzenia kończynowe dwubiegunowe, klasyczne Einthovena, uzyskuje się rejestrując różnice potencjałów pomiędzy:

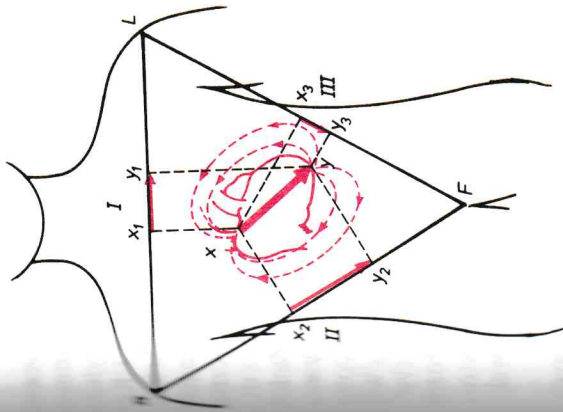
- prawym przedramieniem (R) i lewym przedramieniem (L) — I odprowadzenie kończynowe;

- prawym przedramieniem (R) i lewą golenią (F) — II odprowadzenie kończynowe;
- lewym przedramieniem (L) i lewą golenią (F) — III odprowadzenie kończynowe.

Elektrody przystawione do kończyn zachowują pewne stałe przestrzenne położenie w stosunku do mięśnia sercowego. Elektrody przystawione do kończyn, które spełniają tylko funkcję przewodników elektrycznych, odbierają z różnych stron czynność bioelektryczną serca. W związku



Ryc. 168. Odprowadzenie kończynowe dwubiegunowe standardowe stosowane w elektrokardiografii. G — galwanometr pisakowy. Załamki EKG: P, Q, R, S, T.



Ryc. 169. Trójkąt Einthovena, oś elektryczna serca ($x - y$) i pole elektryczne wokół serca w czasie szerzenia się depolaryzacji. I — odprowadzenie pierwsze kończynowe, II — odprowadzenie drugie kończynowe, III — odprowadzenie trzecie kończynowe, R — elektroda na prawym przedramieniu, L — elektroda na lewym przedramieniu, F — elektroda na lewej nodze.

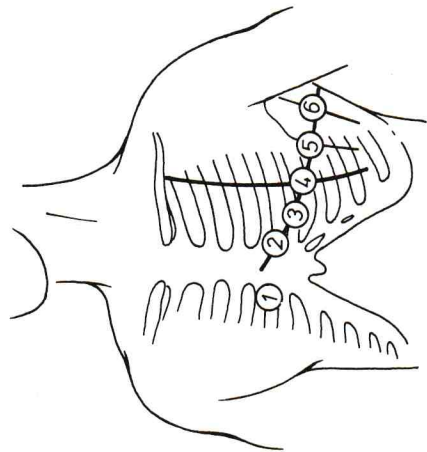
z tym każda z elektrod ustawiona jest pod innym kątem względem wektora siły elektromotorycznej serca (cardiac vector of the electromotive force). Szerzenie się w mięśniu przedsionków, a następnie w mięśniu komór dzieje się w kierunku repolaryzacji, powoduje stałą zmianę polaryzacji, za którą postępuje repolaryzacja, powoduje stałą zmianę chwilowego wektora siły elektromotorycznej serca. Największy wektor siły elektromotorycznej serca jest skierowany przestycznie wewnątrz klatki piersiowej od okolicy prawej pachy do lewego łuku żebrowego.

Zapis EKG zarejestrowany z każdego z trzech odprowadzeń kończynowych jest inny, ponieważ stanowi wypadkową potencjałów elektrycznych serca występujących w przestrzeni pomiędzy tymi elektrodami. Łącząc na przedniej ścianie klatki piersiowej wektor siły elektromotorycznej serca, można sprawdzić potencjały czynnościowe serca występujące w przestrzeni do procesu przebiegającego na płaszczyźnie. Łącząc ze sobą na płaszczyźnie punkty przystawiania elektrod, otrzymuje się trójkąt, którego środkiem znajduje się rzut serca na płaszczyznę czołową.

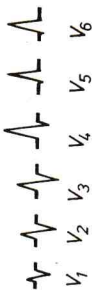
Wewnątrz rzutu serca znajduje się rzut wektora siły elektromotorycznej serca. Każda z trzech elektrod kończynowych jest ustawiona pod innym kątem w stosunku do rzutu wektora siły elektromotorycznej serca, czyli do osi elektrycznej serca (cardiac axis). W związku z tym załamki EKG zarejestrowane z poszczególnych odprowadzeń mają inną amplitudę, a nawet mogą być inaczej skierowane w stosunku do linii izoelektrycznej. Załamki EKG są dodatnie, jeśli są skierowane ponad linię izoelektryczną, oraz ujemne, jeśli są skierowane w dół od tej linii.

Do oceny EKG dogodniejsze są **odprowadzenia jednobiegunowe**. Za ich pomocą rejestruje się różnice potencjałów pomiędzy elektrodą aktywną i elektrodą nieaktywną. Jednobiegunowe odprowadzenie przedsercowe otrzymuje się po przystawieniu elektrody aktywnej do klatki piersiowej i rejestracji różnic potencjałów pomiędzy elektrodą i elektrodą nieaktywną. Zapis EKG odebrany za pomocą **odprowadzeń przedsercowych** różni się od EKG odebranego za pomocą odprowadzeń kończynowych. Elektrody przedsercowe są inaczej ustawione przestrzennie w stosunku do wektora siły elektromotorycznej serca.

Stosuje się sześć jednobiegunowych odprowadzeń przedsercowych (unipolar chest leads), czyli odprowadzeń przedsercowych Wilsona, oznac-



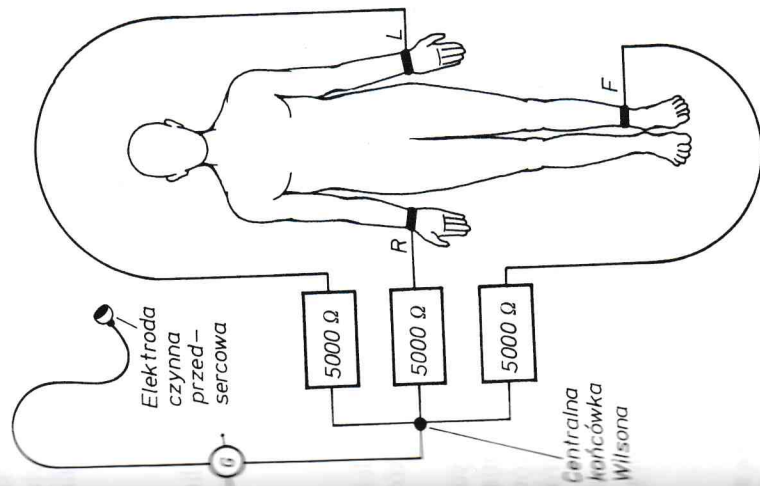
Ryc. 170. Miejsca przystawienia elektrod na klatce piersiowej przy jednobiegunowych odprowadzeniach przedsercowych Wilsona (V_1 — V_6).



czonych: V_1 , V_2 , V_3 , V_4 , V_5 i V_6 . Elektroda I przedsercowego odprowadzenia V_1 jest przystawiona do skóry w czwartym międzyżebrowiu po stronie prawej mostka. Pozostałe elektrody V_2 — V_6 są przystawiane do skóry po stronie lewej klatki piersiowej.

Trzeci rodzaj odprowadzeń stanowią **odprowadzenia kończynowe jedno-biegunowe**. Zwierając bezpośrednio dwie elektrody kończynowe, uzyskuje się z trzeciej elektrody aktywnej EKG o załamkach o wyższej amplitudzie. Otrzymuje się w ten sposób trzy **odprowadzenia EKG kończynowe, jednobiegunowe nasilone** (augmented unipolar limb leads), czyli odprowadzenia Goldbergera:

- aVR — elektroda aktywna na prawym przedramieniu;
- aVL — elektroda aktywna na lewym przedramieniu;
- aVF — elektroda aktywna na lewej nodze.



Ryc. 171. Schemat połączeń pomiędzy elektrodami nieaktywnymi przymocowanymi do kończyn za pośrednictwem oporu 5000 omów i elektrodą czynną stosowaną w odprowadzeniach przedsercowych Wilsona. G — galwanometr pisakowy elektrokardiografu, R — prawe przedramię, L — lewe przedramię, F — lewa noga.

Porównywalność zapisów EKG wymaga nie tylko stosowania tych samych warunków, lecz również jednakowych warunków rejestracji. Aparaty — elektrokardiografy — rejestrują krzywą EKG przy podłożeniu czasu 2 sekundy, prędkości przesuwu papieru 25 lub 50 mm/s i wzniesieniu odpowiadającemu 1 mV = 10 mm.

Elektrokardiogram

Elektrokardiogram (EKG) zarejestrowany za pomocą II odprowadzenia kończynowego dwubiegunowego ma pięć załameków oznaczonych kolejno literami: P, Q, R, S i T. Załamek P odpowiada początkowi depolaryzacji mięśnia przedsionków. Załamki Q, R i S występują obok siebie, tworząc zespół QRS odpowiadający początkowi depolaryzacji mięśnia komór, czyli fазie 0 potencjału czynnościowego komórek mięśniowych komór (patrz Mięsień sercowy, str. 110). Załamki T wiąże się z szybką repolaryzacją mięśnia komór, co odpowiada фазie 3 potencjału czynnościowego komórek mięśnia sercowego.

Analiza krzywej EKG obejmuje:

- **załamki** — kierunek ich wychylenia ku górze lub ku dołowi od linii izoelektrycznej, ich amplitudę, czas trwania, częstotliwość występowania i kształt;
- **odcinki** — czas trwania linii izoelektrycznej pomiędzy załamekami;
- **odstęp** — obejmujące łączny czas trwania załameków i odcinków.

Czas trwania poszczególnych załameków, odcinków i odstępów zależy od czasu trwania potencjałów czynnościowych mięśnia przedsionków i komór.

Amplituda załameków zależy od wielu czynników. U ludzi dorosłych jest przede wszystkim wykładnikiem liczby synchronicznie depolaryzujących i repolaryzujących się komórek mięśniowych. Amplituda załameków zależy od oporu elektrycznego tkanek znajdujących się pomiędzy elektrodą i sercem, od budowy ciała i położenia serca w klatce piersiowej.

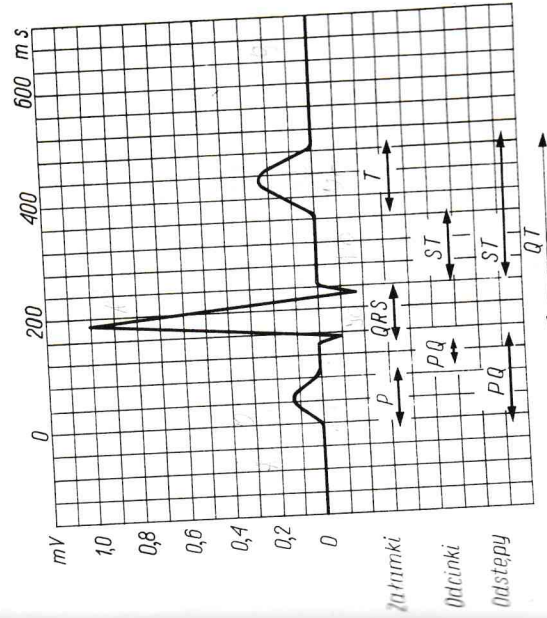
Amplituda poszczególnych załameków w każdym odprowadzeniu jest inna. Mierzona w II odprowadzeniu wynosi dla:

- załamka P 1—2,5 mm = 0,1—0,25 mV;
- zespołu QRS 7—18 mm = 0,7—1,8 mV;
- załamka T 2,5—6 mm = 0,25—0,6 mV.

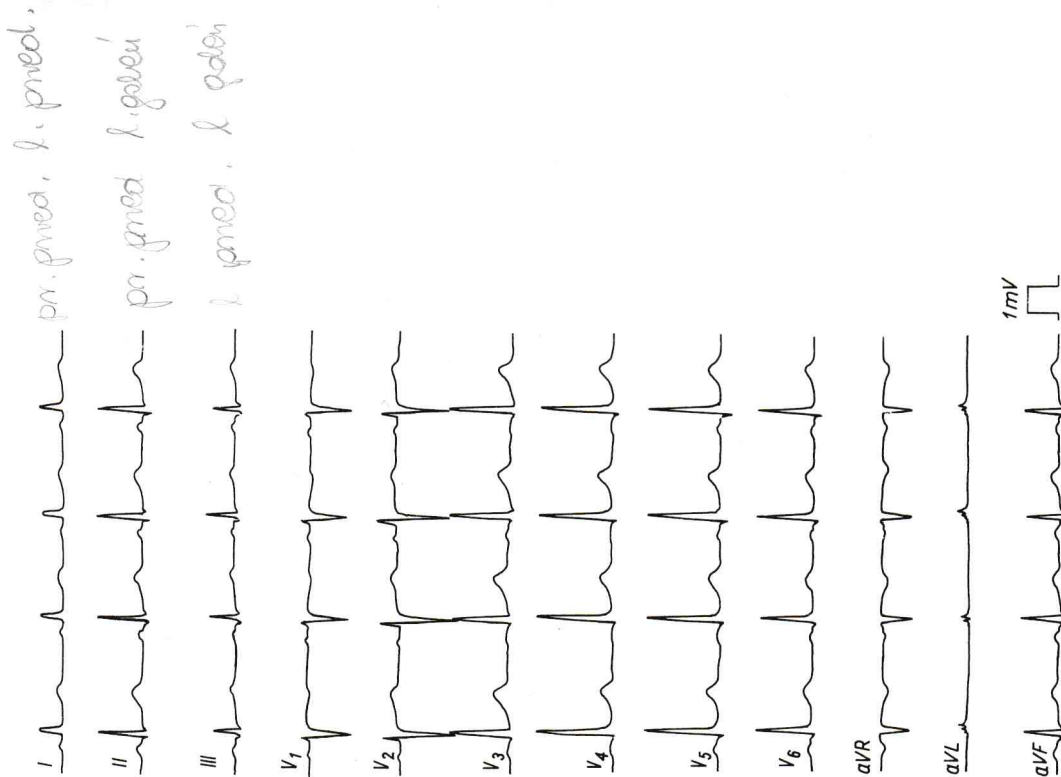
Tabela 27

Tablica 27 Czas trwania poszczególnych załameków, odcinków i odstępów w EKG

Załamek	P	100 ms
Odcinek	PQ	50 ms
Odstęp	PQ	150 ms
Zespół	QRS	90 ms
Odcinek	ST	120 ms
Załamek	T	120 ms
Odstęp	ST	280 ms
Odstęp	QT	370 ms
Odstęp	RR	800 ms



Ryc. 172. Typowa krzywa elektrokardiograficzna zarejestrowana w II odprowadzeniu kończynowym.

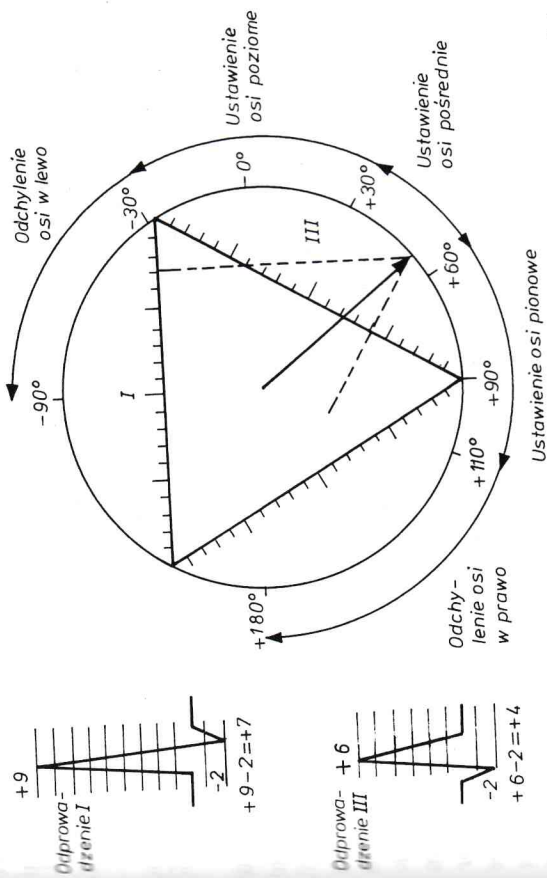


Ryc. 173. Prawidłowe zapisy elektrokardiograficzne zarejestrowane w czasie stosowania I—III — odprowadzeń kończynowych dwubiegunowych, V₁—V₆ — odprowadzeń przedsercowych jednobiegunowych, aVR, aVL i aVF — odprowadzeń kończynowych jednobiegunowych, nasilonych (aVR — elektroda aktywna na prawym przedramieniu, aVL — elektroda aktywna na lewym przedramieniu, aVF — elektroda aktywna na lewej nodze). Oś elektryczna serca u badanego jest nachylna pod kątem +45°.

Nieprawidłowy kształt i amplituda załamków oraz nieprawidłowe wartości odnoszące się do odcinków i odstępów wskazują na zaburzenia w czynności bioelektrycznej mięśnia sercowego. Wydłużenie odstępu PQ powyżej 200 ms świadczy o zwolnieniu przewodzenia stanu czynnego przez układ przewodzący, zwłaszcza przez węzeł przedstonkowo-komorowy. Brak załamka S, uniesienie odcinka ST ponad linię izoelektryczną lub inne zniekształcenia zespołu QRST mogą wskazywać na zaburzenia w krążeniu krwi w naczyniach wieńcowych serca na skutek np. zaciśnięcia odgałęzienia jednej z tętnic wieńcowych.

Oś elektryczna serca

W zależności od ustawienia serca w klatce piersiowej zmienia się wektor siły elektromotorycznej serca, jak również jego rzut na płaszczyznę czołową, czyli oś elektryczną serca — AQRS (cardiac axis). Na podsta-



Ryc. 174. Wyznaczenie osi elektrycznej serca (AQRS) na podstawie odprowadzeń kończynowych dwubiegunowych I i III. Prawidłowe ustawienie osi serca: poziome (od +30° do -30°), pośrednie (od +30° do +60°) i pionowe (od +60° do +110°). I — pierwsze odprowadzenie kończynowe, III — trzecie odprowadzenie kończynowe.

wie pomiarów załamków Q, R i S w I i II odprowadzeniu EKG można wyznaczyć oś elektryczną serca.

W warunkach prawidłowych oś elektryczna serca jest skierowana podobnie jak bok trójkąta Einthovena wyznaczonego przez II odprowadzenie. Prawidłowe nachylenie osi elektrycznej serca w stosunku do skali w stopniach przedstawionej na rycinie 174 wynosi od -30° w lewo i do $+110^\circ$ w prawo. Oś elektryczna serca jest zorientowana: poziomo w zakresie od -30° do $+30^\circ$, pośrednio w zakresie od $+30^\circ$ do $+60^\circ$ i pionowo w zakresie od $+60^\circ$ do $+110^\circ$. Odchylenie w lewo od elektrycznej serca, poza wartości fizjologiczne, występuje wtedy, kiedy kąt jest powyżej -30° . Odchylenie w prawo zaś występuje przy kącie większym niż $+110^\circ$.

! Czynność mechaniczna serca

Za falą depolaryzacji szerzy się skurcz mięśnia przedsionków i mięśnia komór, repolaryzacja zaś wyprzedza ich rozkurcz. **Skurcz i rozkurcz przedsionków i komór** powtarzają się cyklicznie, w spoczynku w rytmie 1,2 Hz (72 na minutę). Jeden cykl trwa około 800 ms.

Skurczowi i rozkurczowi mięśnia sercowego towarzyszy napełnianie się i opróżnianie z krwi jam serca. Jeden kierunek przepływu krwi od zbiorników żylnych do zbiorników tętniczych — wiąże się z samą budową jam serca i istnieniem zastawek, które uniemożliwiają cofanie się krwi.

Krew szybko napływa z obu zbiorników żylnych do przedsionków i przez otwarte ujścia przedsionkowo-komorowe do komór w fazie rozkurczu w okresie szybkiego wypełniania się komór krwią.

Pierwszy kurczy się mięsień przedsionków (atrial systole) i krew wypełniająca jamy przedsionków zostaje wtłoczona do komór przez otwarte **ujście przedsionkowo-komorowe** prawe i lewe (*ostium atrioventriculare dextrum et sinistrum*). Następnie **skurczem izowolumetrycznym** (isovolumetric ventricular contraction) rozpoczyna się **skurcz komór** (ventricular systole). Zastawki przedsionkowo-komorowe: prawa — trójdzielna i lewa — dwudzielna (*valvae atrioventriculares: dextra — tricuspidalis et sinistra — mitralis*) zamykają się, napięcie mięśnia komór szybko zwiększa się czemu towarzyszy szybki wzrost ciśnienia w obu komorach (tab. 28 i tab. 29, str. 351).

W momencie kiedy ciśnienie krwi w komorach przewyższy ciśnienie w zbiornikach tętniczych, zastawka pnia płucnego (*valva trunci pulmonalis*)

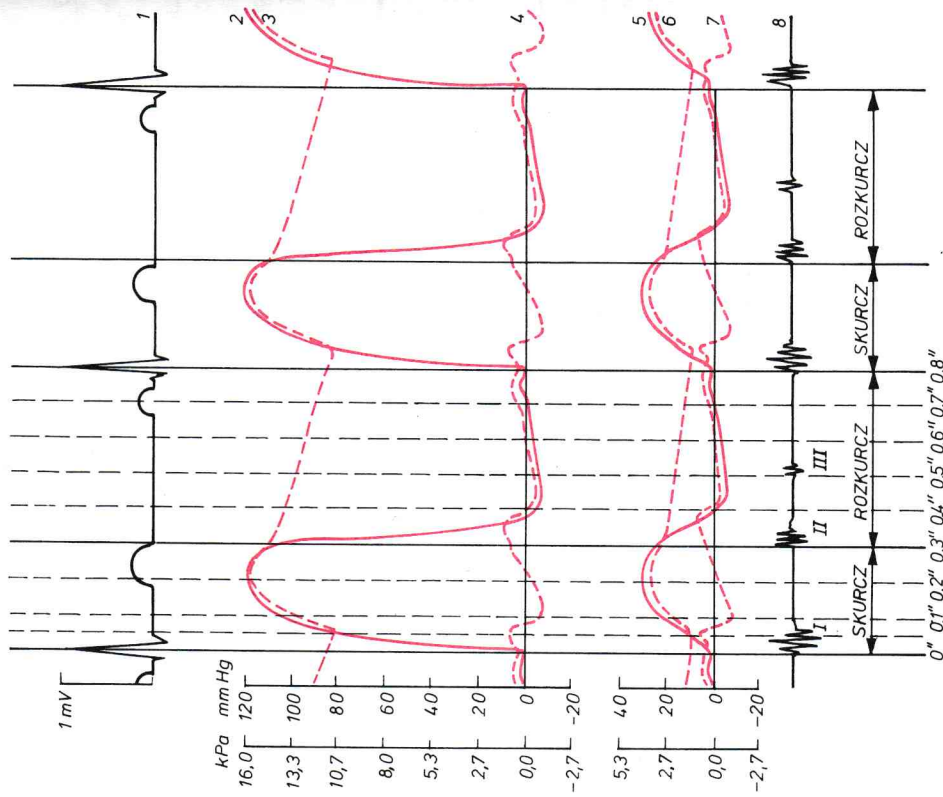
Tabela 28

Fazy cyklu pracy serca	Czas trwania (ms)	Zastawki	
		przedsionkowo-komorowe	pnia płucnego i aorty
Rozkurcz komór	okres protodiastolyczny	zamknięte	zamknięte
	izowolumetryczny	otwarte	zamknięte
	okres szybkiego wypełniania się komór		
	przerwa		
	skurcz przedsionków		
Skurcz komór	izowolumetryczny	zamknięte	otwarte
	okres maksymalnego wyrzutu		
		izotomiczny	
	okres zredukowanego wyrzutu		
Rozkurcz komór	okres protodiastolyczny	40	
	izowolumetryczny	80	
	okres szybkiego wypełniania się komór	110	
	przerwa	190	
	skurcz przedsionków	110	
Łączny czas trwania skurczu i rozkurczu komór	800		

118) i zastawka aorty (*valva aortae*) otwierają się i krew jest wtłaczana do zbiorników tętniczych. Otwieranie się zastawek pnia płucnego i aorty rozpoczyna **skurcz izotoniczny komór** (isotonic ventricular contraction), w czasie którego krew jest wtłaczana do zbiorników tętniczych (ventricular ejection).

Faza rozkurczu komór (ventricular diastole) rozpoczyna się z chwilą wystąpienia krótkiego **okresu protodiastolycznego** (protodiastole), w którym ciśnienie w komorach zaczyna opadać. Potem występuje **rozkurcz izowolumetryczny komór** (isovolumetric ventricular relaxation), w czasie którego zarówno zastawki pnia płucnego i aorty, jak i przedsionkowo-komorowe są zamknięte.

Okres szybkiego wypełniania się komór (rapid inflow) rozpoczyna się od otworzenia się zastawek przedsionkowo-komorowych i przepływu do



Ryc. 175. Zjawiska elektryczne i mechaniczne zachodzące w sercu w czasie dwóch cykli. 1 — elektrocardiogram, 2 — ciśnienie krwi w lewej komorze, 3 — ciśnienie krwi w aorcie, 4 — ciśnienie krwi w lewym przedsionku, 5 — ciśnienie krwi w prawej komorze, 6 — ciśnienie krwi w pniu płucnym, 7 — ciśnienie krwi w prawym przedsionku, 8 — fonokardiogram: I, II i III ton serca.

Tabela 29

Miejsce pomiaru	Ciśnienie					
	rozkurczowe			skurczowe		
	SI: kPa	mm Hg	mm Hg	SI: kPa	mm Hg	mm Hg
Przedsiónek prawy	0	0	0	0,8	6	6
Komorą prawa	0	0	0	3,3	25	25
Zbiornik tętniczy płucny	0,9	7	7	3,3	25	25
Przedsiónek lewy	0	0	0	0,9	7	7
Komorą lewa	0	0	0	16,0	120	120
Zbiornik tętniczy duży	9,3	70	70	16,0	120	120

komór krwi nagromadzonej w przedsionkach. Następnie występuje okres przerwy (diastasis), po którym kurczy się mięsień przedsionków i druga porcja krwi wypełniającej jamy przedsionków zostaje wtłoczona pod nie-wielkim ciśnieniem do komór. Kolejny cykl pracy serca rozpoczyna się od skurczu izowolumetrycznego komór.

Przyspieszenie częstości skurczów serca skraca czas trwania poszczególnych cykli. W większym stopniu ulega skróceniu czas rozkurczu, w mniejszym zaś czas skurczu. Bez względu na częstotliwość skurczów serca czas trwania skurczu izowolumetrycznego komór zmienia się tylko nieznacznie.

Objętości krwi tłoczonej przez prawą i lewą komorę do zbiorników tętniczych w czasie pojedynczego cyklu pracy serca są sobie prawie równe, natomiast ciśnienie skurczowe w lewej komorze jest pięciokrotnie wyższe od ciśnienia w prawej komorze.

Wyrzut serca

Objętość wyrzutowa serca — SV (stroke volume) — jest to ilość krwi wtłaczanej przez jedną z komór serca do odpowiedniego zbiornika tętniczego. U dorosłego mężczyzny o masie ciała 70 kg, w spoczynku, w pozycji leżącej, każda z komór tłoczy około 75 mL krwi w czasie jednego cyklu pracy serca. W końcu skurczu pozostaje w każdej komorze około 50 mL krwi stanowiącej **objętość krwi zalegającej** (residual blood volume), która warunkuje objętość późnoskurczową komór (end-systolic ventricular volume).

Frakcja wyrzutowa lewej komory serca określa stosunkiem objętości wyrzutowej (75 mL) do objętości późnorozkurczowej (75 mL + 50 mL =

Przemiana i odżywianie mięśnia sercowego

Przez naczynia wieńcowe przepływa około 5% krwi stanowiącej pojemność minutową serca, czyli około 270 mL krwi na minutę w spoczynku. Mięsień sercowy jednocześnie zużywa około 10% całego zapotrzebowania organizmu na tlen. Czerpie energię niezbędną do skurczów z składników odżywczych dopływających z krwią, takich jak: glukozę, mleczan, pirogromiany i wolne kwasy tłuszczowe — FFA.

■ Krążenie duże

Krew tłoczona przez lewą komorę do aorty wypełnia zbiornik tętniczy duży — R_{a_s} , z którego poprzez sieć naczyń włosowatych odpływa do zbiornika żylnego dużego — R_{v_s} .

■ Zbiornik tętniczy duży

Zbiornik tętniczy jest pojęciem czynnościowym. Zbiornik tętniczy duży (systemic arterial reservoir) zawiera krew wypełniającą wszystkie duże, średnie i małe tętnice krążenia dużego. Zbiornik ten charakteryzuje następujące parametry:

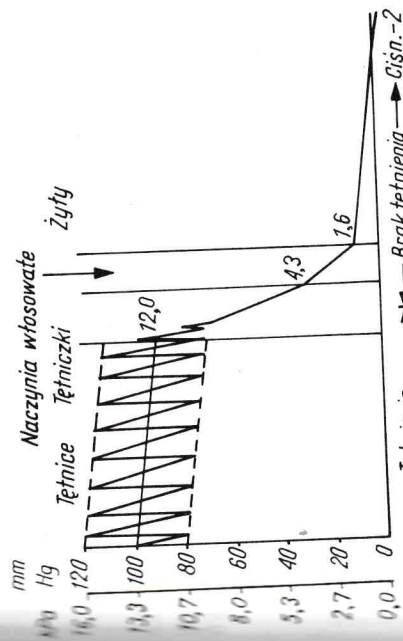
- pojemność;
- ciśnienie;
- prędkość przepływu krwi;
- fala tętna.

W zbiorniku tętniczym dużym mieści się około 550 mL krwi. Stanowi to około 11% całkowitej objętości krwi krążącej w organizmie (TBV)

Ciśnienie tętnicze krwi

Ciśnienie tętnicze krwi (arterial blood pressure) zależy od dopływu i odpływu krwi ze zbiornika tętniczego. Przy zrównoważonym odpływie i dopływie średnie ciśnienie panujące w tym zbiorniku nie ulega zmianom, jeżeli nie zmienia się jednocześnie napięcie ścian tętnic wywołane skurczem błony mięśniowej.

Ciśnienie w zbiorniku tętniczym dużym waha się w zależności od okresu cyklu pracy serca. W okresie maksymalnego wyrzutu lewej komory jest najwyższe i określa je jako **ciśnienie skurczowe** (systolic arterial pressure). W praktyce lekarskiej mierzone w tętnicy ramiennej na poziomie ujęcia lewej komory do aorty (*ostium aortae*) wynosi 16 kPa (120 mm Hg). W rozkurczu i w okresie skurczu izowolumetrycznego komór, przed utworzeniem się zastawek aorty, **ciśnienie** jest najniższe, czyli **rozkurczowe** (diastolic arterial pressure) i wynosi 9,3 kPa (70 mm Hg).



Ryc. 180. Ciśnienie krwi w tętnicach, tętniczkach, naczyniach włosowatych i żyłach krążenia dużego. Gradient ciśnienia w tętnicach, w sieci naczyń włosowatych i w żyłach. Średnie ciśnienie: tętnice — 12,0 kPa, w naczyniach włosowatych przytętnicznych — 4,3 kPa, i w naczyniach włosowatych przyżylnych 1,6 kPa.

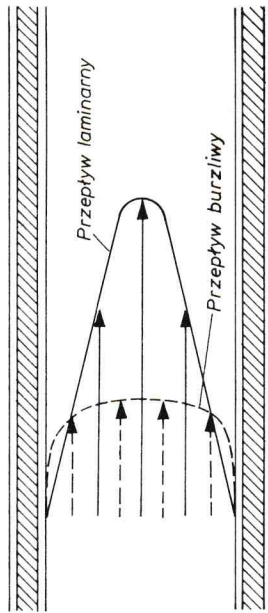
Ciśnienie w czasie rozkurczu serca nie obniża się do zera dzięki temu, że ściany zbiornika tętniczego są sprężyste. Krew tłoczona przez lewą komorę do aorty w czasie każdego skurczu serca rozciąga ściany zbiornika tętniczego i **napięcie sprężyste** jego ścian zapewnia utrzymanie ciśnienia w okresach rozkurczu serca. Jest to zgodne z zasadą powietrzni. Energia skurczów serca jest magazynowana w elastycznych ścianach zbiornika tętniczego (force of recoil). **Średnie ciśnienie tętnicze** (mean arterial pressure) w pozycji leżącej wynosi około 12 kPa (90 mm Hg), amplituda wahań ciśnienia wynosi zaś 6,7 kPa (50 mm Hg). Prawidłowe wartości ciśnienia skurczowego/ciśnienia rozkurczowego wynoszą 16/9,3 kPa (120/70 mm Hg) i odnoszą się do pomiaru wykonywanego w tętnicy ramiennej na poziomie ujścia lewej komory do aorty u człowieka poz.

stającego w spoczynku w pozycji leżącej. Po zmianie pozycji na stojącą w czasie ruchu, a zwłaszcza w czasie pracy fizycznej, ciśnienia skurczowe i rozkurczowe odpowiednio podwyższają się.

W pozycji stojącej zaznaczają się wyraźne różnice w ciśnieniu w zbiorniku tętniczym dużym wywołane siłą ciężenia. Powyżej serca ciśnienie tętnicze opada, a poniżej wzrasta o 0,10241 kPa na każdy centymetr różnicy poziomów. Przy średnim ciśnieniu w zbiorniku tętniczym dużym w pozycji stojącej na poziomie ujścia lewej komory do aorty równemu 13,3 kPa średnie ciśnienie w tętnicach głowy wynosi około 9,3 kPa, w tętnicach stopy zaś około 26,7 kPa.

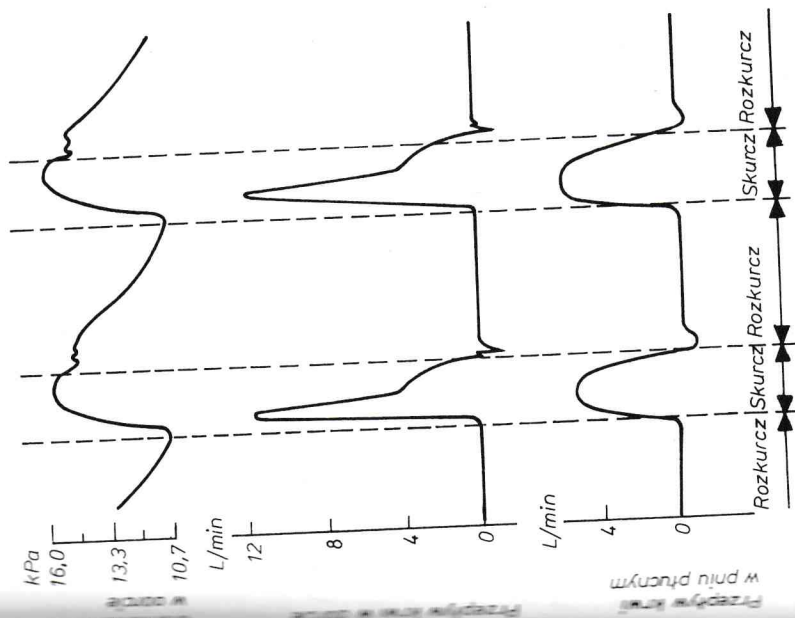
Przepływ krwi

W ciągu minuty w spoczynku w pozycji leżącej dopływa do zbiornika tętniczego dużego około 5,4 L krwi, co równa się pojemności minutowej lewej komory. Tyle samo krwi odpływa ze zbiornika do sieci naczyń włosowatych.



Ryc. 181. Przepływ burzliwy (linia przerywana) i przepływ laminarny krwi przez naczynie krwionośne.

Krew przepływa w zbiorniku tętniczym dużym zgodnie z gradientem ciśnienia od serca aż do naczyń włosowatych. **Przepływ krwi** ma charakter **pulsujący** (pulsatile blood flow). Prędkość zwiększa się w czasie skurczu izotonicznego komór w okresie maksymalnego wyrzutu i zmniejsza do zera w czasie rozkurczu serca. Krew wciągana do aorty przepływa przez nią ze średnią prędkością 0,6 m/s. W miarę oddalania się od serca **średnia prędkość przepływu krwi** (mean velocity of blood) w tętnicach małego kalibru zmniejsza się do kilku centymetrów na sekundę.

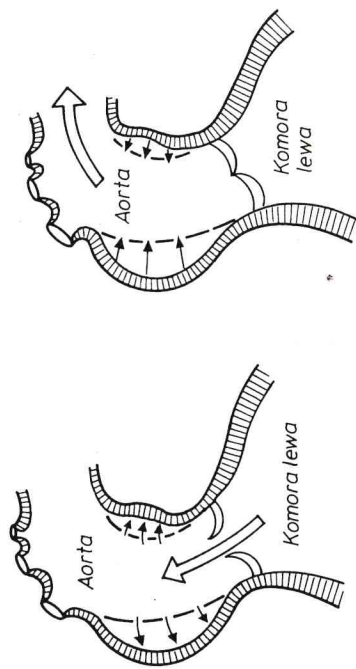


Ryc. 182. Ciśnienie i przepływ krwi w aorcie i w pniu płucnym.

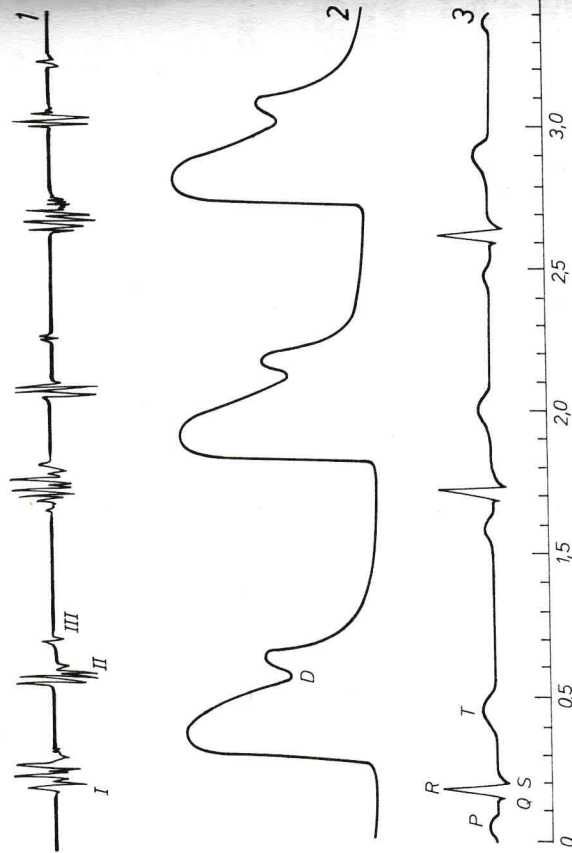
Odpływ krwi ze zbiornika tętniczego dużego zależy przede wszystkim od światła naczyń oporowych, czyli od światła małych tętniczek, oraz od lepkości krwi — jej lepkości (viscosity of blood).

Fala tętna

Lewa komora, wciągając do aorty w czasie jednego skurczu objętość wyrzutową krwi, powoduje jednoczesny wzrost ciśnienia i powstanie fali ciśnieniowej oraz odkształcenie się ścian tętnic. Fala ciśnieniowa z towarzyszącym jej odkształceniem ścian tętnic, określana jako fala tętna (arterial pulse), rozchodzi się wzdłuż ścian zbiornika tętniczego dużego od

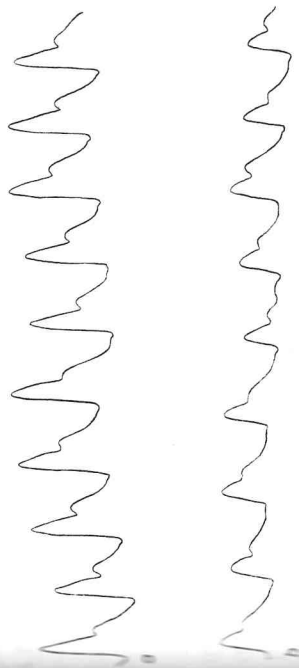


Ryc. 183. Powstawanie fali tętna w aorcie w czasie wyrzutu krwi z lewej komory serca.



Ryc. 184. Fonokardiogram (1), sfigmogram lewej tętnicy szynicznej wspólnej (2) i elektrokardiogram (3) odprowadzenia II kończynowego zarejestrowane w czasie trzech cykli pracy serca. Fonokardiogram: I, II i III ton serca. Sfigmogram: D — załamek dykrotyczny. Elektrokardiogram: załamki P, Q, R, S i T.

serca aż do naczyń przedwłosowatych tętniczych, a nawet do naczyń włosowatych. **Prędkość** rozchodzenia się **fali tętna** zależy od elastyczności ścian tętnic oraz ich przebiegu i mieści się w granicach od 5 do 9 m/s. W tętnicach o ścianach elastycznych fala tętna przesuwa się wolniej, natomiast w tętnicach o ścianach stwardniałych, mniej elastycznych, rozchodzi się szybciej. W tętnicach o prostym przebiegu fala tętna przesuwa się szybciej, w tętnicach krętych zaś wolniej.



Ryc. 185. Fala tętna odebrana z: a — tętnicy szynicznej wspólnej; b — tętnicy promieniowej.

Odształcanie się ścian tętnicy w czasie przechodzenia przez nią fali tętna może być odebrane za pomocą specjalnych czujników i zarejestrowane na papierze, najczęściej za pomocą aparatu do elektrokardiografii. Zapisana fala tętna, czyli **sfigmogram**, charakteryzuje się ramieniem wstępującym i zstępującym. Na ramieniu zstępującym zaznacza się niewielka oscylacja, zwana **załamkiem** lub **falą dykrotyczną** (dicrotic notch), spowodowana odbiciem się stupa krwi o zamykającą się zastawkę aorty.

Rola naczyń oporowych

Błona mięśniowa małych tętniczek pozostaje pod stałym wpływem impulsacji nerwowej z ośrodków naczyńnozwężających. W zależności od zapotrzebowania na tlen w jakimś obszarze naczyńnowym rozszerzają się w nim małe tętniczki i przepływ krwi zwiększa się. Jednocześnie w innych obszarach naczyńnowym w tym samym czasie dochodzi do dalszego zwężania się światła małych tętniczek.

Czynność naczyń oporowych, czyli małych tętniczek, w dużym krążeniu można porównać do czynności kurków. Są one stale prawie