

Fyziologie srdce

Funkce

Srdce je pumpa :

Funkcí srdce je přečerpávání (pumpování) krve do cévního systému. Protože cévní systém je uzavřený, srdce vytváří klesající tlakový gradient na začátku a na konci cévního systému, který je hnací silou pro tok krve cévami.

Srdeční aktivita

- Elektrická – srdeční buňky jsou schopné vytvářet akční potenciál a vést vzruch (EKG, VKG,...)
- Mechanická – pumpa, kontrakce srdečního svalů (FKG, TK, pulzová vlna, ultrazvuk)

Morfologie

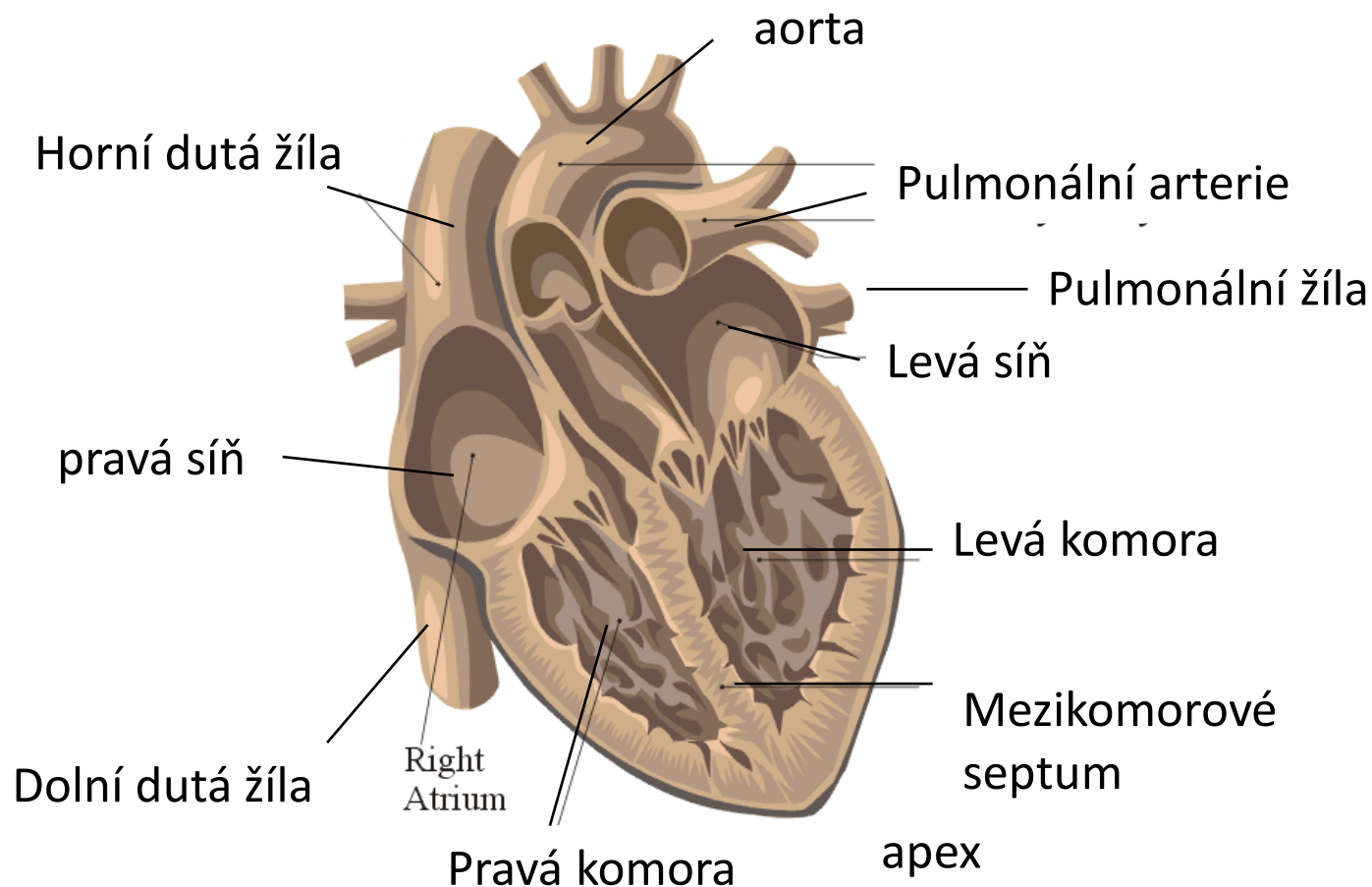


trochu komplikovanější, než se zdá....

Morfologie – stavba srdce

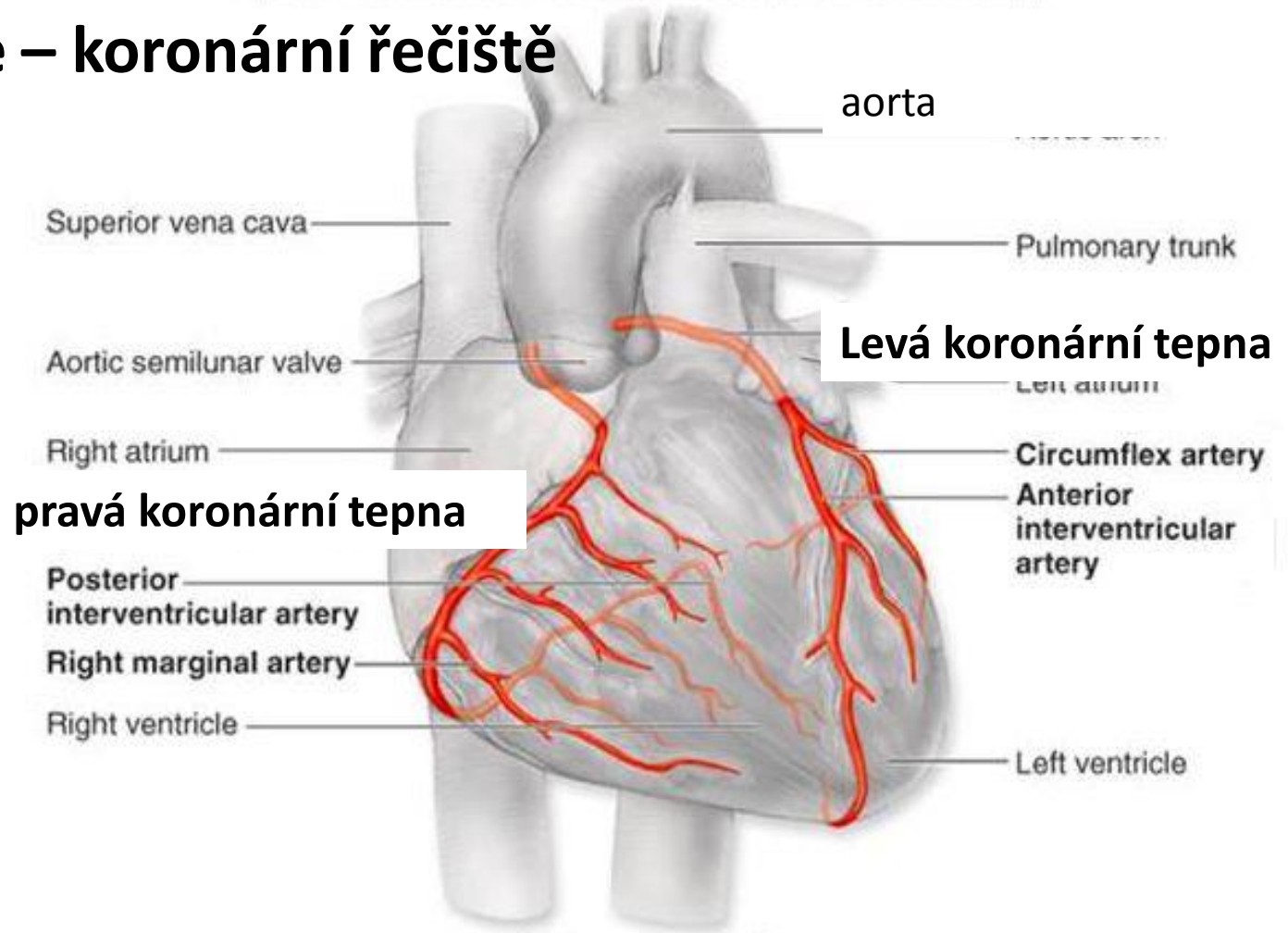
Pravé a levé srdce jsou sériově zapojené pumpy.

(pravé srdce – plíce – levé srdce – velký oběh –)



Adapted from Corel Draw 9 Library

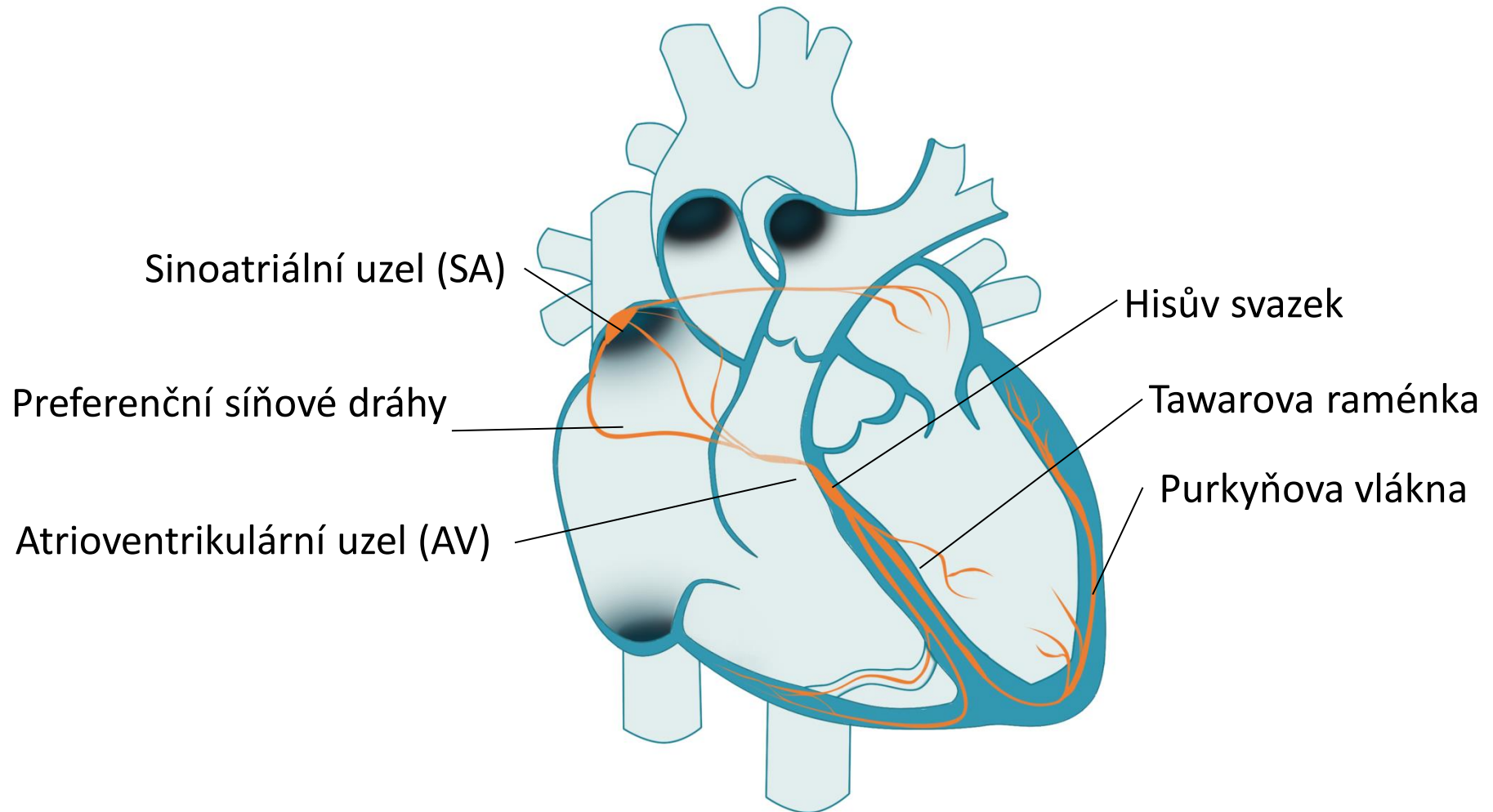
Morfologie – koronární řečiště



Věňčité (koronární) tepny vystupují z aorty (za chlopní) a zásobují srdeční sval krví. Hustá kapilarizace – poměr počtu svalových vláken ku kapilárám je cca 1:1. Žilní krev ústí do pravé síně, některá rovnou do komor.

Morfologie – převodní systém srdeční

- Tvorba a přednostní vedení akčního potenciálu
- Synchronizace a koordinace vedení vzruchu srdcem

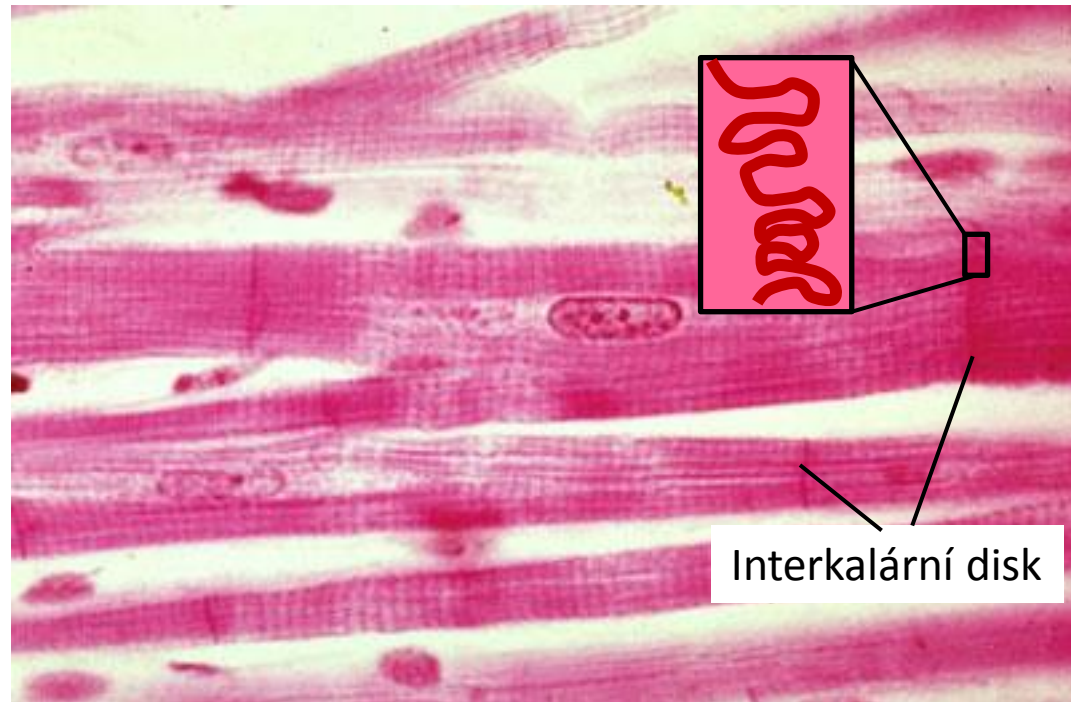


Histologie

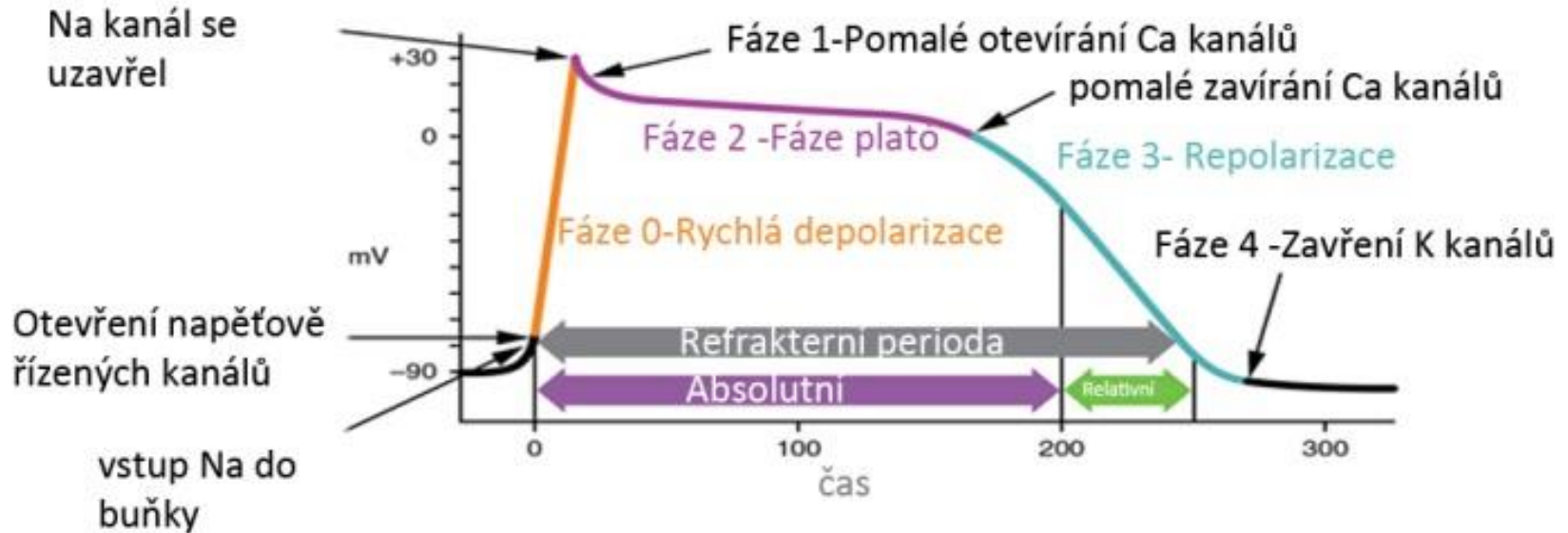
- Vlastnosti srdečních buněk: **excitabilita, kontraktilita, vodivost, automaticnost, rytmičnost**
 - **Buňky převodního systému** (primárně tvorba a vedení AP, sekundárně kontrakce)
 - **Buňky pracovního myokardu** síňového a komorového (primárně kontrakce, sekundárně vedení AP)
 - Další pojivové tkáně, vlákna (kolagenní, elastická), cévy,...

Myokard

- Příčně pruhovaný srdeční sval (aktin a myozin, mnoho mitochondrií, sarkoplazmatické retikulum – zásobník Ca^{2+})
- Interkalární disky - spojení svalových vláken
 - Nexy (gap junction) – kanály mezi buňkami, průtok iontů, vedení vzruchu - funkční syncytium



Akční potenciál – pracovní myokard



Klidový potenciál – záporné napětí na membráně (cca – 90 mV)

Jedině v tomto období je možné vyvolat depolarizaci a AP

Akční potenciál (AP)

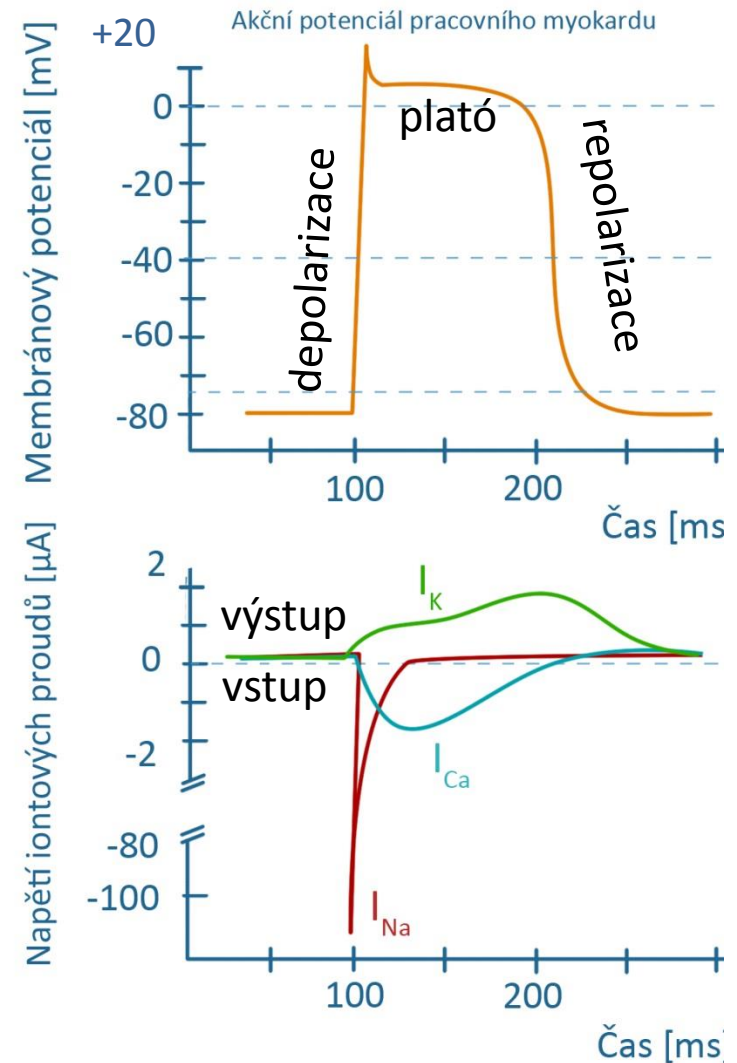
- V průběhu AP nelze vyvolat další depolarizaci, buňka je v **refrakterní fázi**, čímž brání vzniku tetanického stahu
- Má několik fází
 - **Depolarizace**
 - **Fáze plató** – její hlavní funkcí je prodloužení refrakterity buňky (**absolutní refrakterita**, nelze vyvolat další AP)
 - **Repolarizace** – **relativní refrakterita** (další příchozí AP může vyvolat následnou depolarizaci, která je však patologická)

Akční potenciál – pracovní myokard

Akční potenciál (AP)

- **Depolarizace** – vstup Na^+ do buňky (Na je depolarizačním iontem, rychlý)
- **Fáze plató** – vstup Ca^{2+} do buňky a výstup K^+ z buňky (zároveň pumpování Na^+ a Ca^{2+} z buňky)
- **Repolarizace** – výstup K z buňky (zároveň pumpování Na^+ (Na/K - ATPáza) a Ca^{2+} z buňky (Ca -ATPáza))

Pozn: Ionty vstupují a vystupují kanálem pasivně po konc. a el. gradientu. Pumpování iontů je aktivní děj, většinou proti gradientu



Akční potenciál – pacemakerová buňka (sinoatriálního uzlu)

Nemá stabilní klidový potenciál (prepotenciál)

- dochází k pomalé depolarizaci způsobené vstupem Ca^{2+} a Na^{+} do buňky pomalými kanály

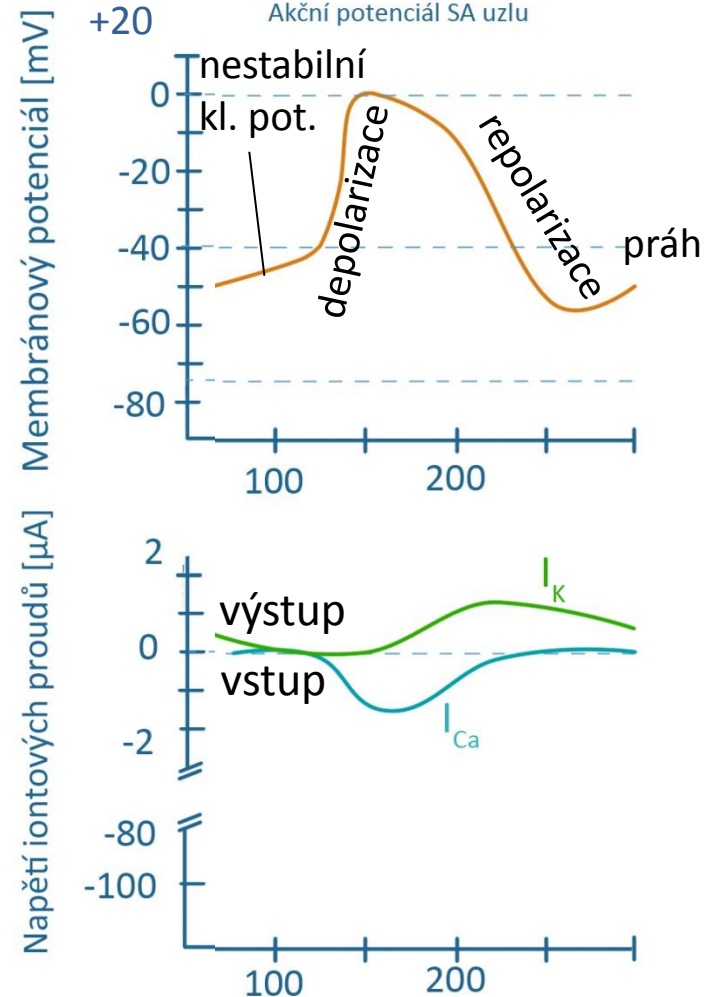
Akční potenciál (AP)

- k vlastní rychlé depolarizaci dochází, když prepotenciál překročí práh (-40 mV)
- Depolarizace – vstup Ca^{2+} do buňky (vápník je depolarizačním iontem, je pomalejší)
- Repolarizace – výstup K^{+} z buňky (zároveň pumpování Na^{+} (Na/K - ATPáza) a Ca^{2+} z buňky (Ca-ATPáza))

Pozn: Ionty vstupují a vystupují kanálem pasivně po konc. a el. gradientu. Pumpování iontů je aktivní děj, většinou proti gradientu

Pomalý depolarizační prepotenciál umožňuje rytmické vznikání AP v SA uzlu - pacemaker

Podobný tvar AP má buňka AV uzlu



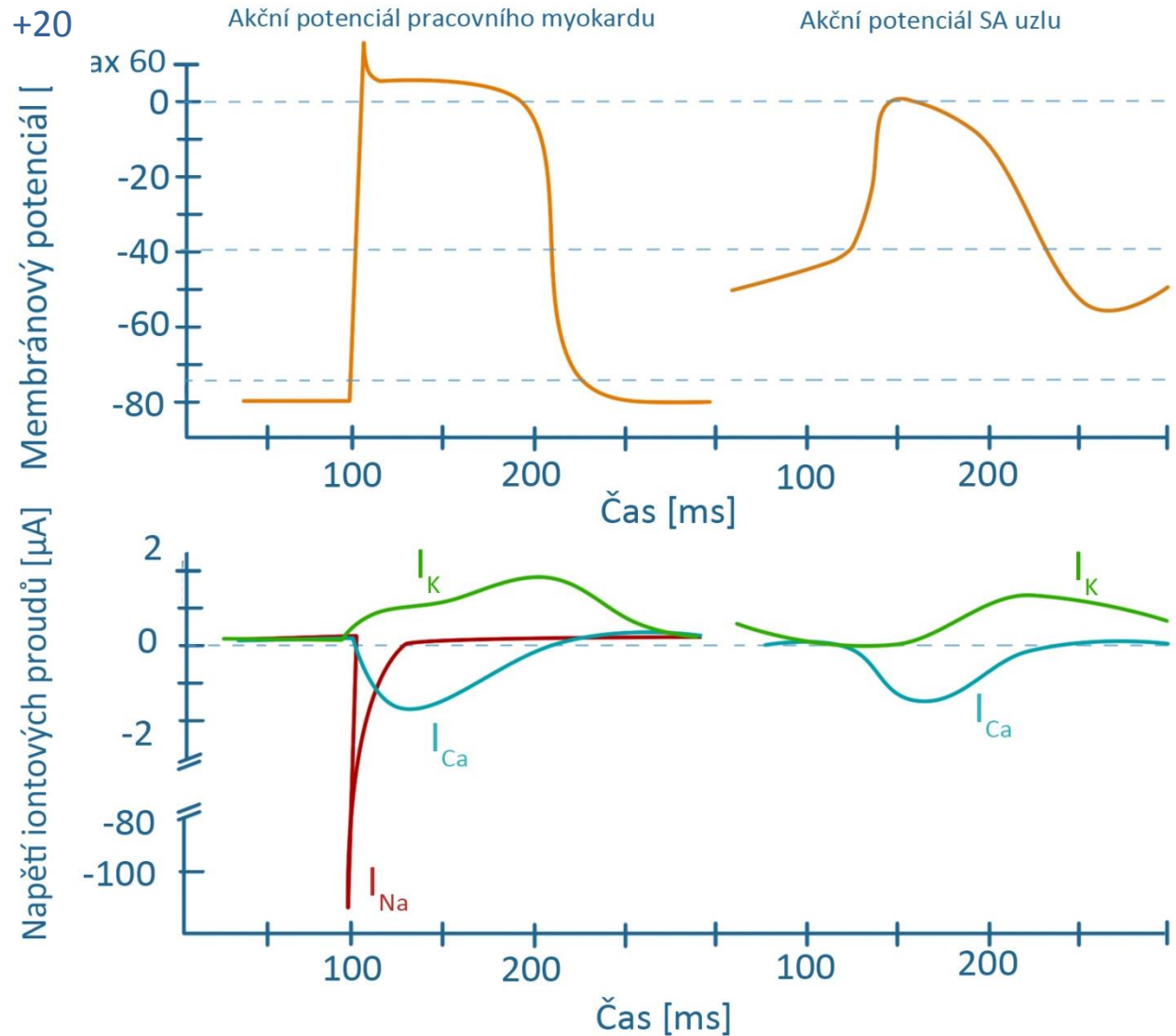
Akční potenciál pracovní a pacemakerové buňky

Pracovní myokard

- Stabilní klidový potenciál (-90 mV)
- Sodíkový depolarizační proud

Pacemakerová buňka

- Nestabilní klidový potenciál (-60 až -40 mV)
- Vápníkový depolarizační proud

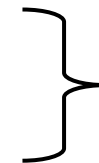


Převodní systém srdeční – gradient srdeční automacie

Rytmické vytváření AP a preferenční vedení vzruchu

Síně jsou od komor oddělené nevodivou vazivovou přepážkou

- **Sinoatriální uzel (SA)** – vlastní frekvence 100 bpm (většinou pod tlumivým vlivem parasympatiku), rychlost vedení vzruchu 0,05 m/s
- **Preferenční internodální síňové spoje** – rychlost vedení vzruchu 0,8 – 1 m/s
- **Atrioventrikulární uzel** – jediný vodivý spoj mezi síněmi a komorami, vlastní frekvence 40 – 55 bpm, rychlost vedení 0,05 m/s
- **Hisův svazek** – rychlost vedení 1 – 1,5 m/s
- **Tawarova raménka** – rychlost vedení 1 – 1,5 m/s
- **Purkyňova vlákna** – rychlost vedení 3 – 3,5 m/s



vlastní frekvence
20 – 40 bpm

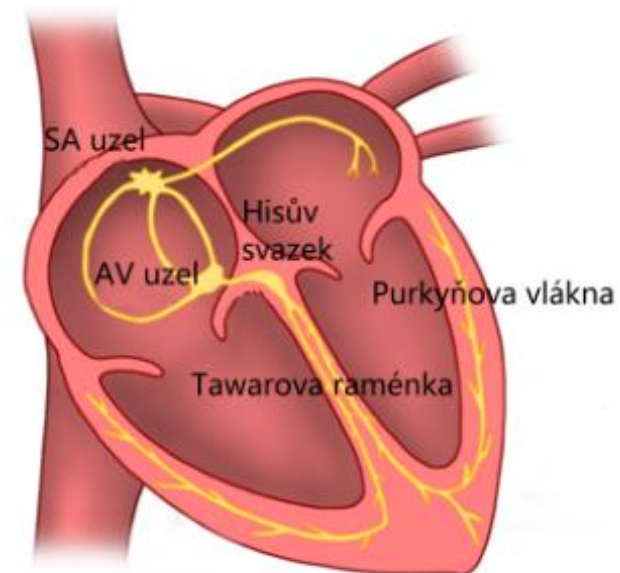
Sinusový rytmus – vzruch začíná v SA uzlu

Junkční rytmus – vzruch se tvoří v AV uzlu

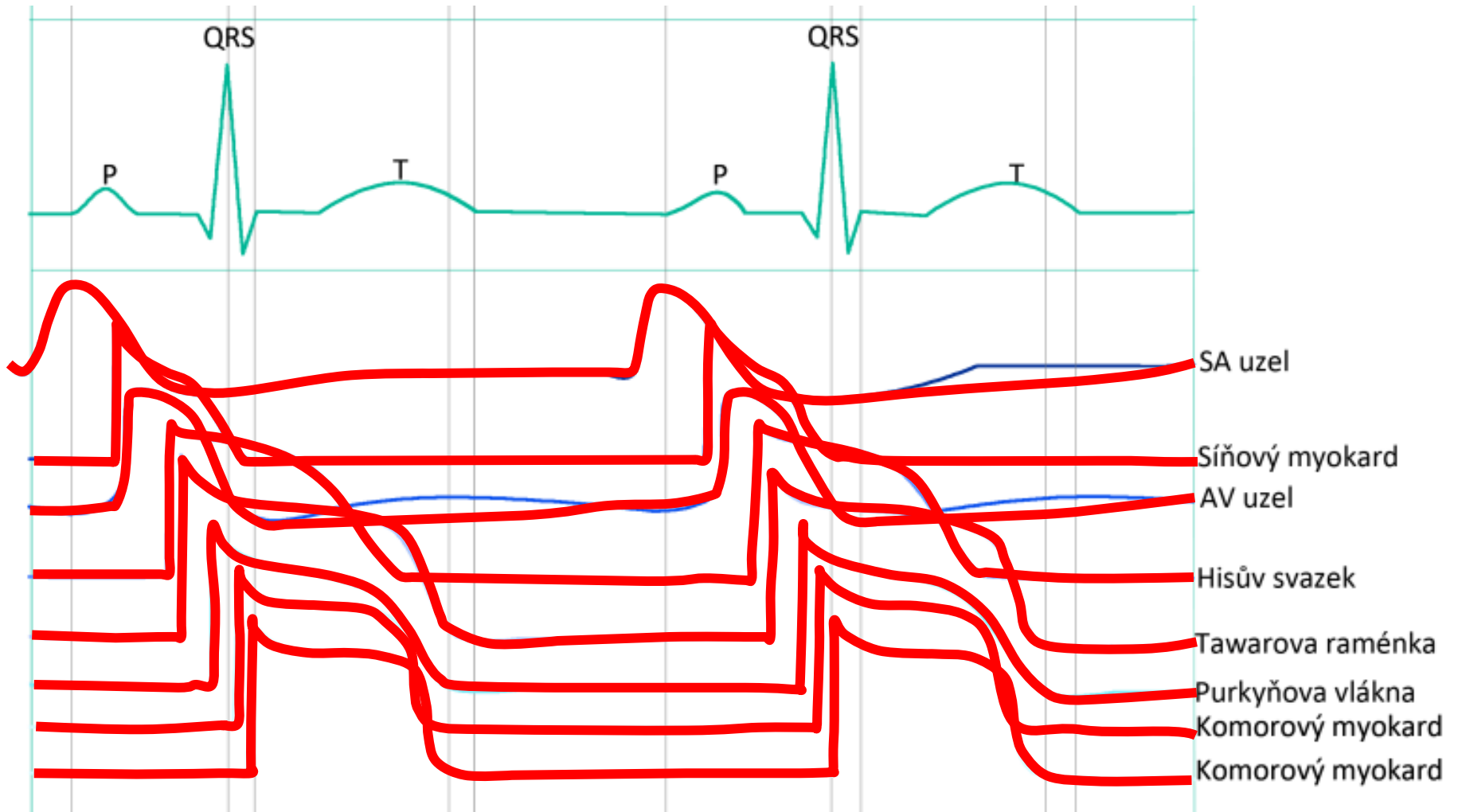
Aktivace komorového myokardu – z vnitřní strany k vnější

Repolarizace komorového myokardu – opačným směrem

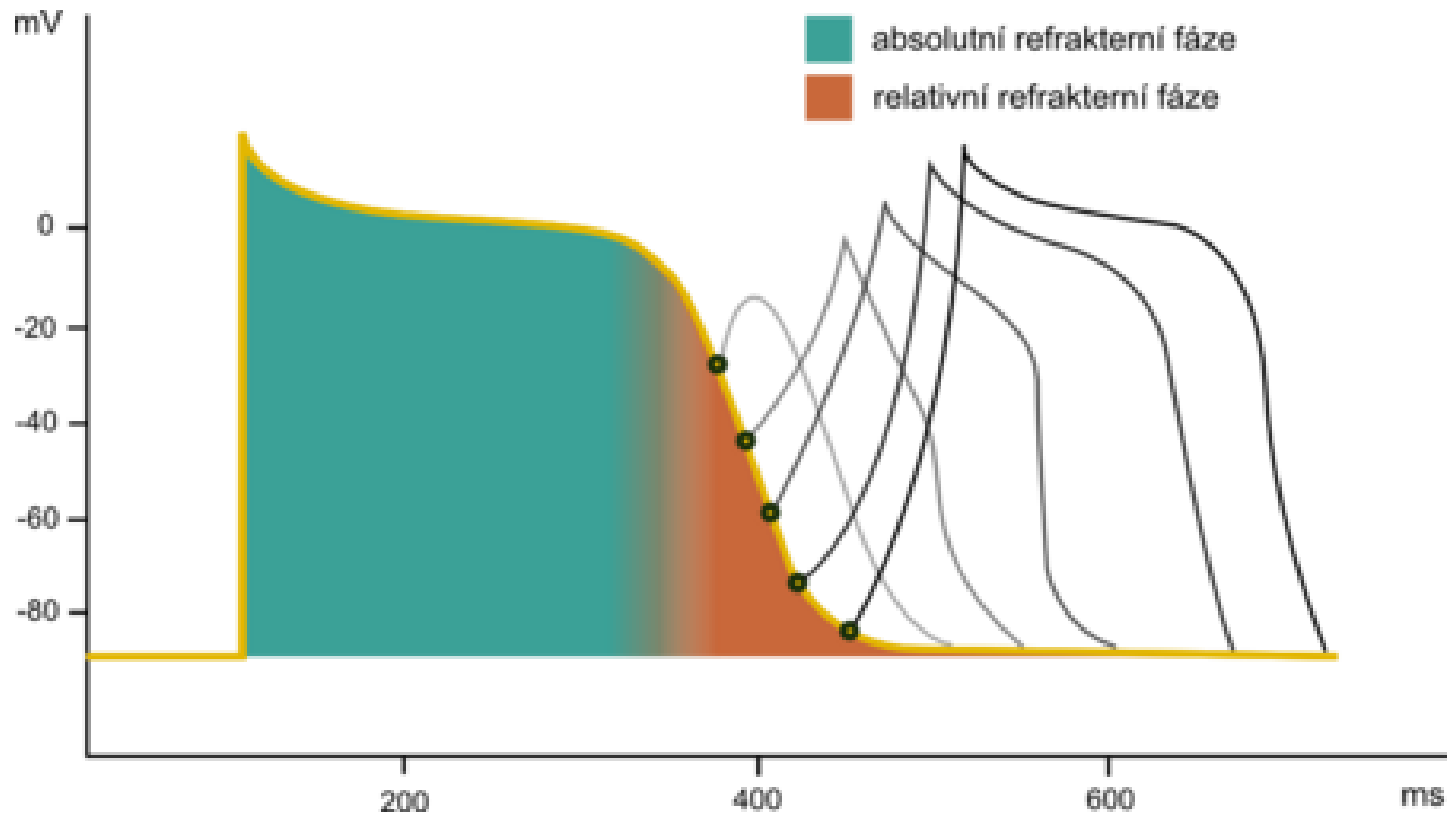
Pozn: vlastní frekvence je frekvence vzniku AP neovlivněná nervovým a hormonálním řízením



Gradient akčního potenciálu

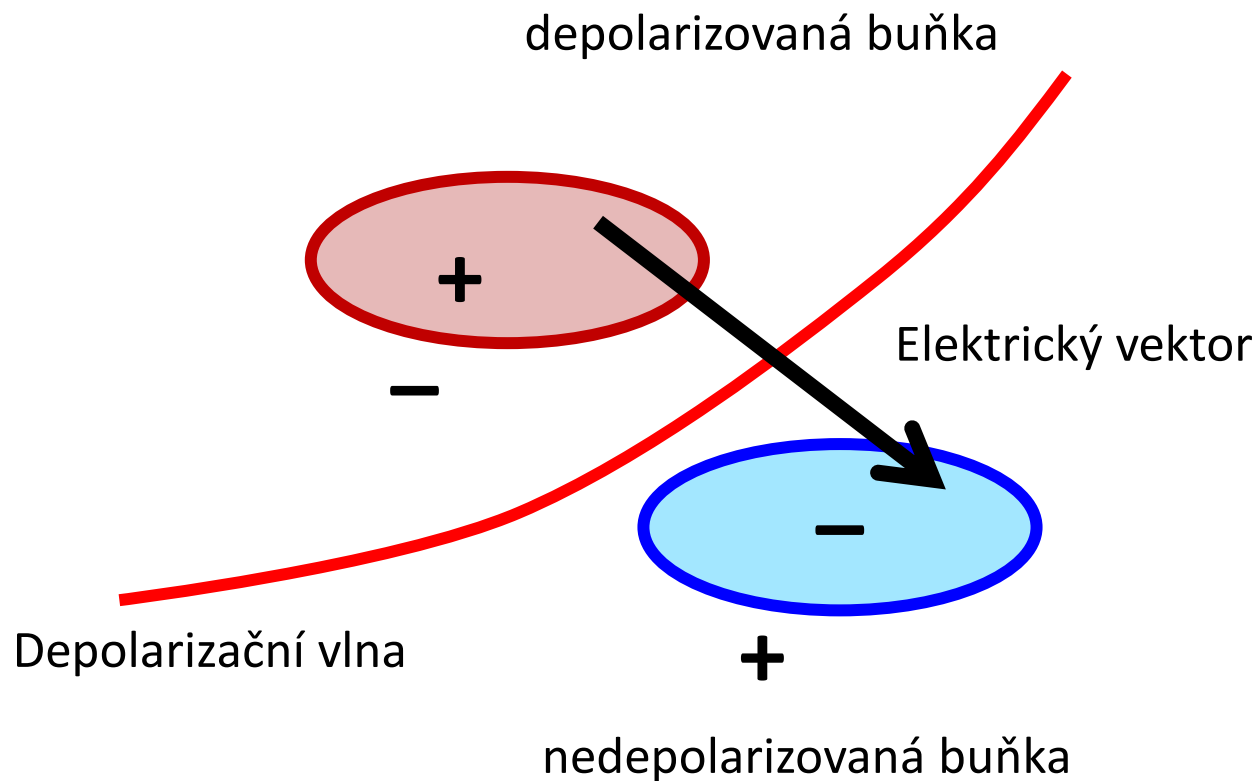


Následná depolarizace - vznik AP v relativní refrakterní fázi – patologické
(netřeba znát ke zkoušce z fyziologie)



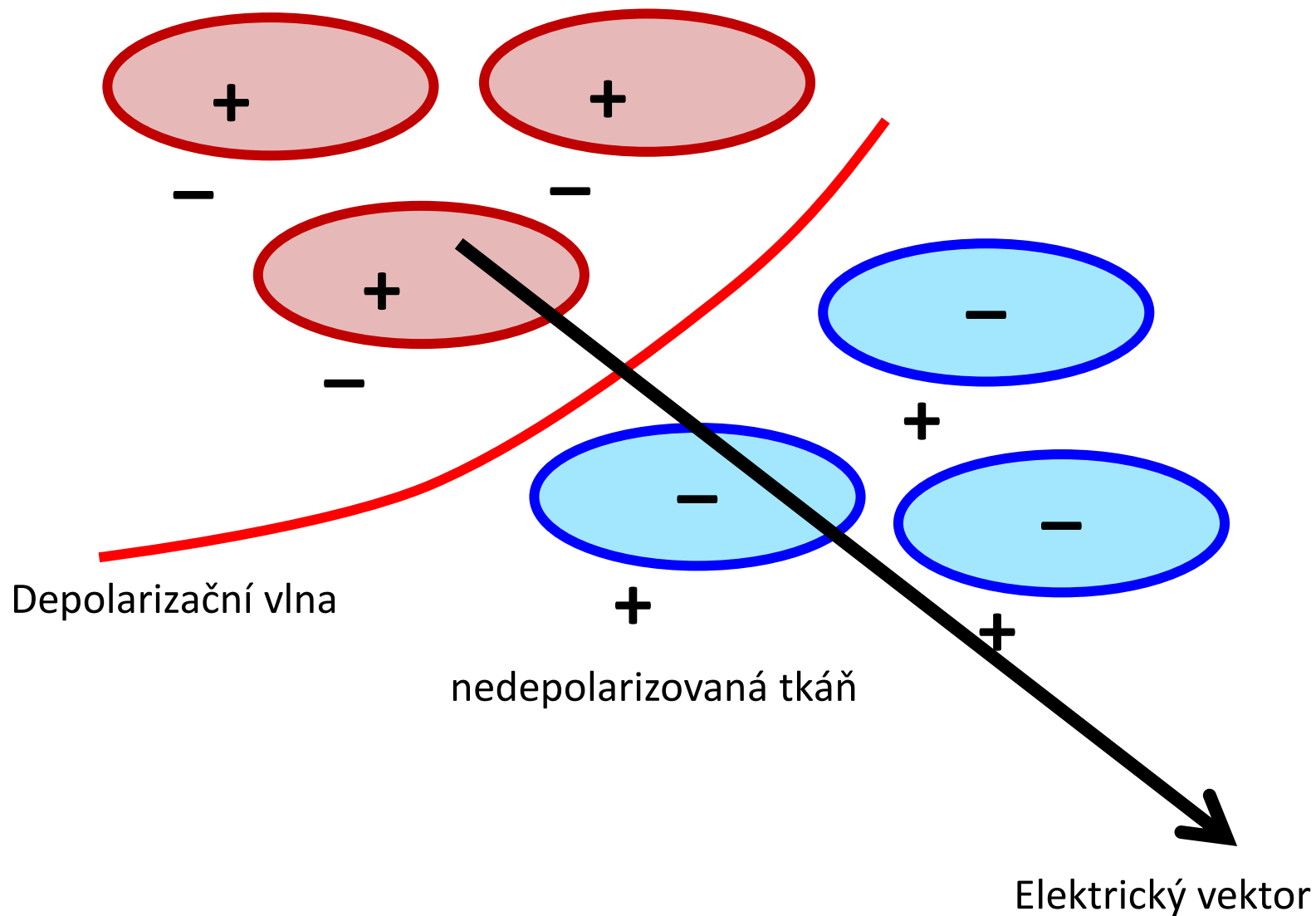
Elektrický dipól

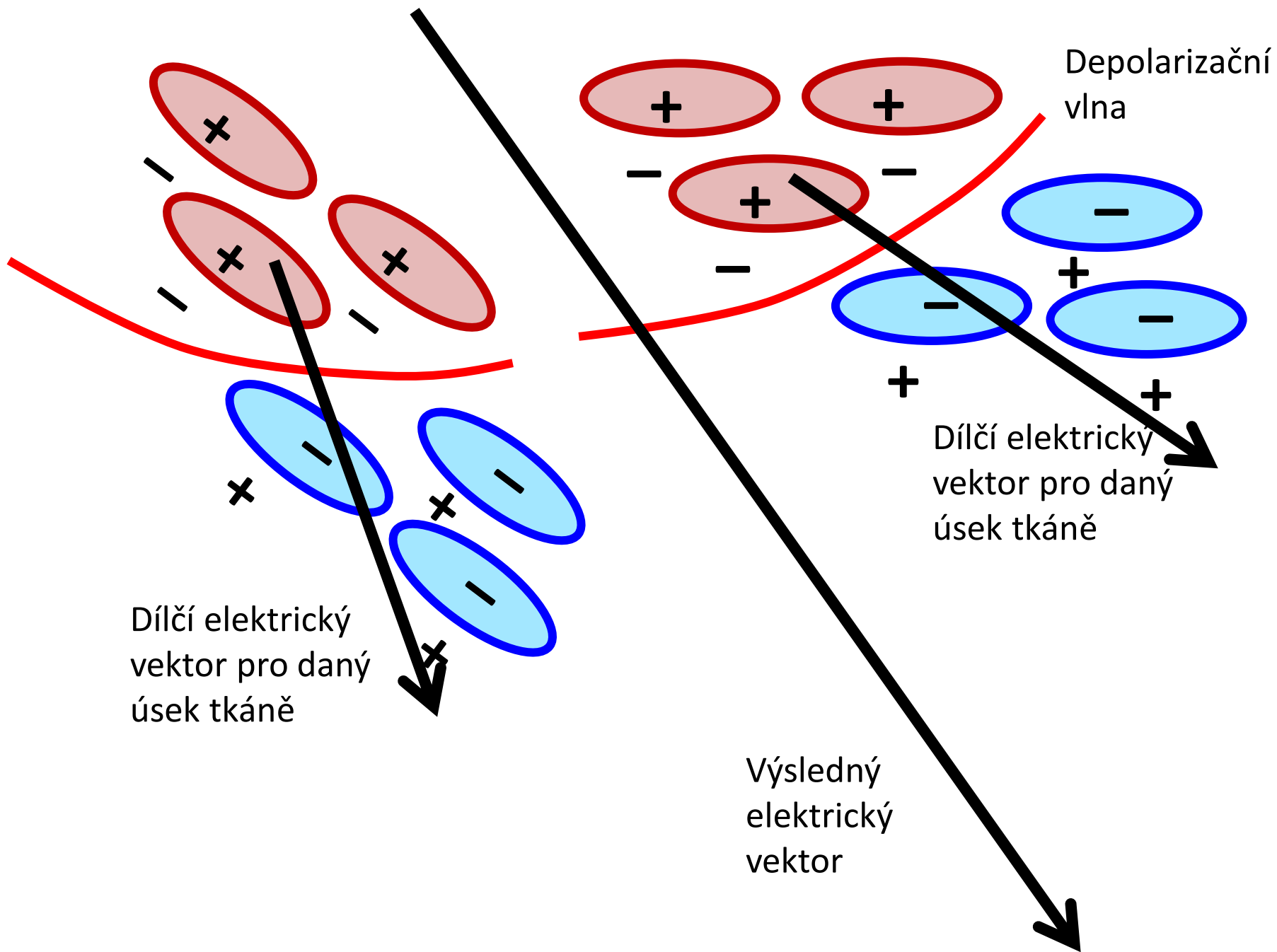
EKG: Elektrická aktivita srdce měřená z povrchu těla



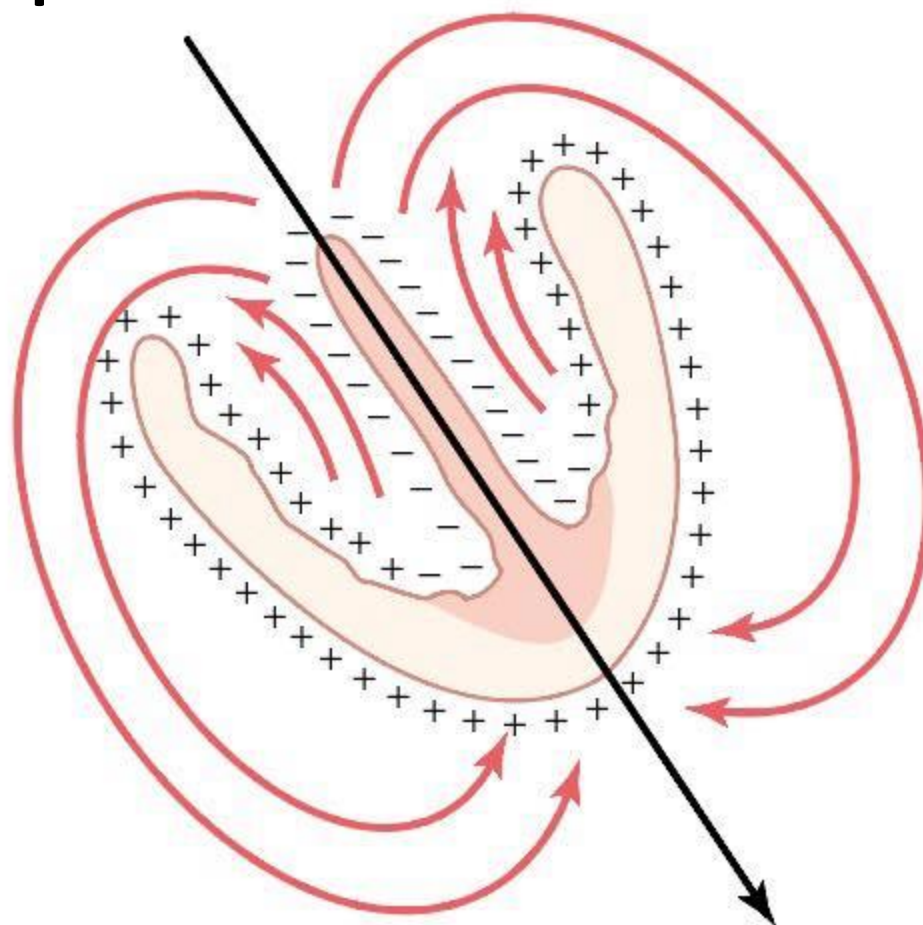
Elektrický dipól

depolarizovaná tkáň





Elektrický dipól



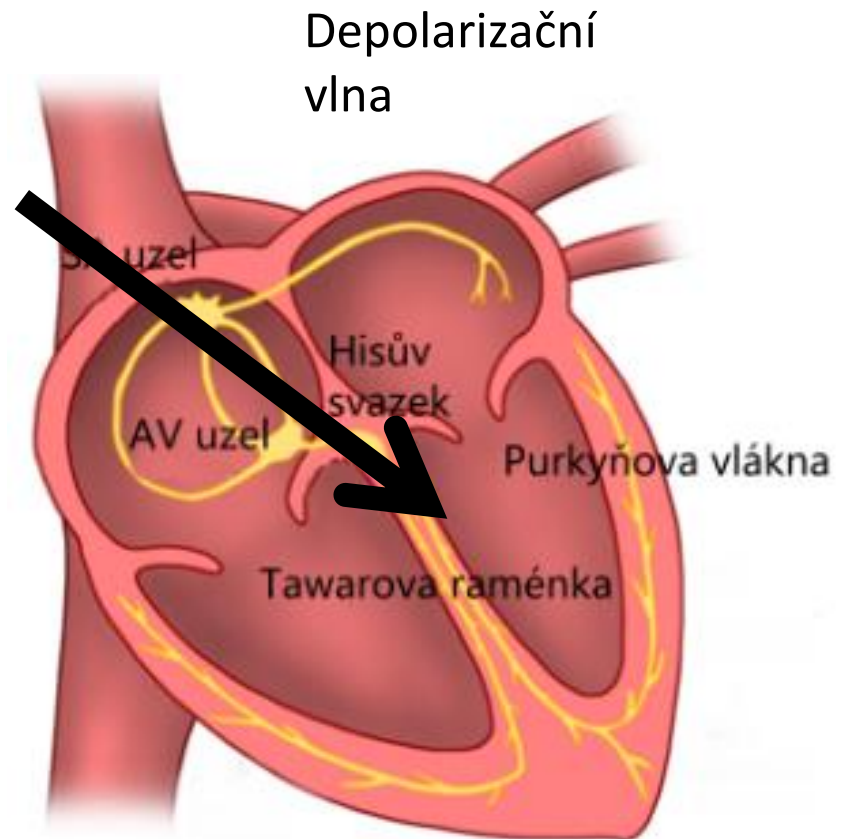
Elektrokardiografie

EKG: Elektrická aktivita srdce měřená z povrchu těla

Elektrický vektor srdeční vzniká součtem dílčích elektrických vektorů v srdci

Elektrický vektor má v daném čase

- **Velikost** – určena počtem buněk, které mění svoji polaritu v daném směru
- **Směr** - kolmý na depolarizační vlnu



Elektrokardiografie

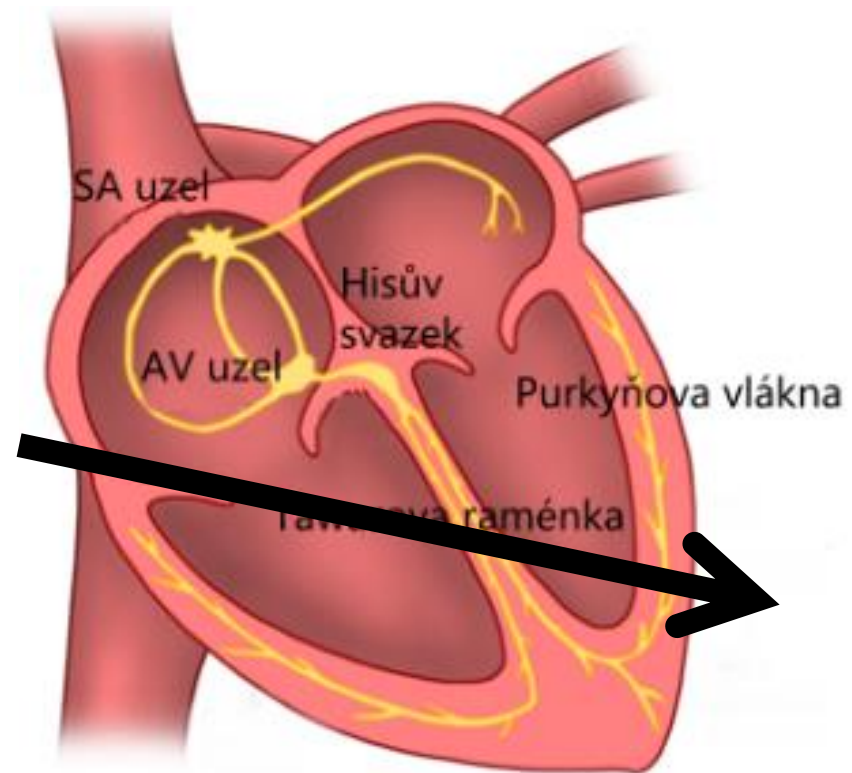
Elektrický vektor srdeční vzniká součtem dílčích elektrických vektorů v srdci

Elektrický vektor má v daném čase

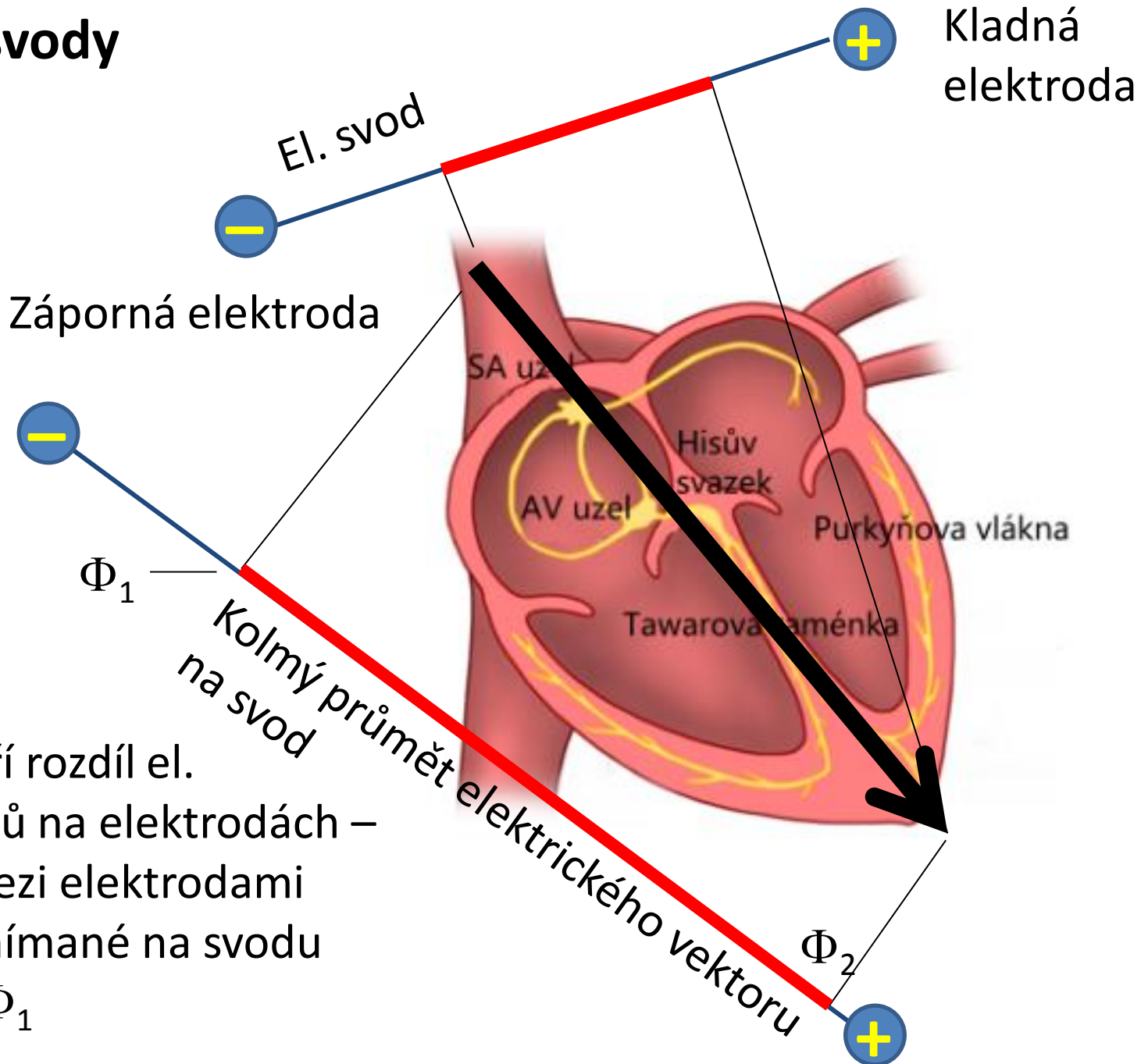
- **Velikost** – určena počtem buněk, které mění svoji polaritu v daném směru
- **Směr** - kolmý na depolarizační vlnu

El. vektor je proměnlivý v čase

(tak, jak se šíří depolarizační nebo repolarizační vlna)



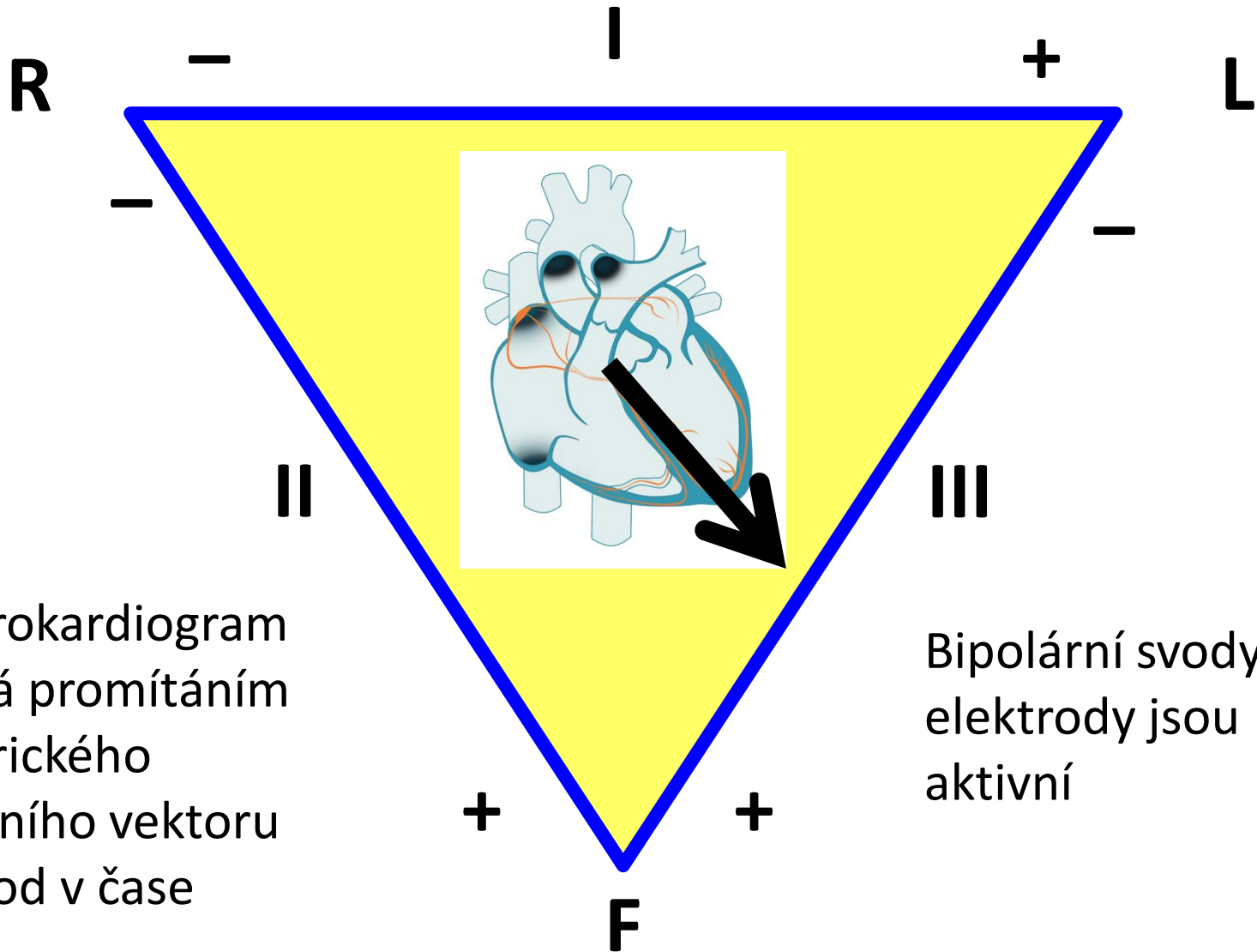
EKG svody



Svod měří rozdíl el. potenciálů na elektrodách – napětí mezi elektrodami
Napětí snímané na svodu

$$V = \Phi_2 - \Phi_1$$

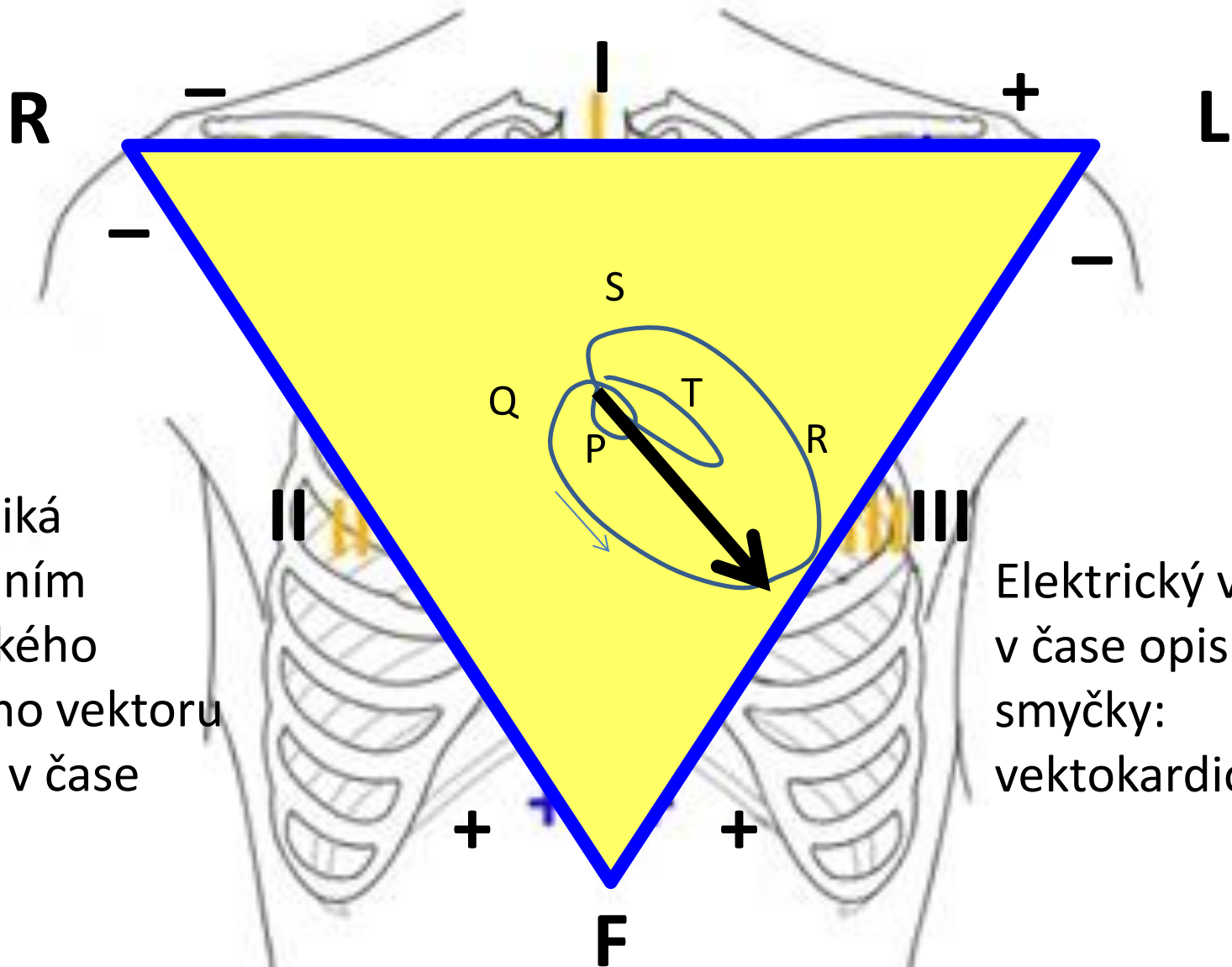
EKG – základní, bipolární (Einthovenovy svody)



Elektrokardiogram vzniká promítáním elektrického srdečního vektoru na svod v čase

Bipolární svody: obě elektrody jsou aktivní

EKG – základní, bipolární (Einthovenovy svody)



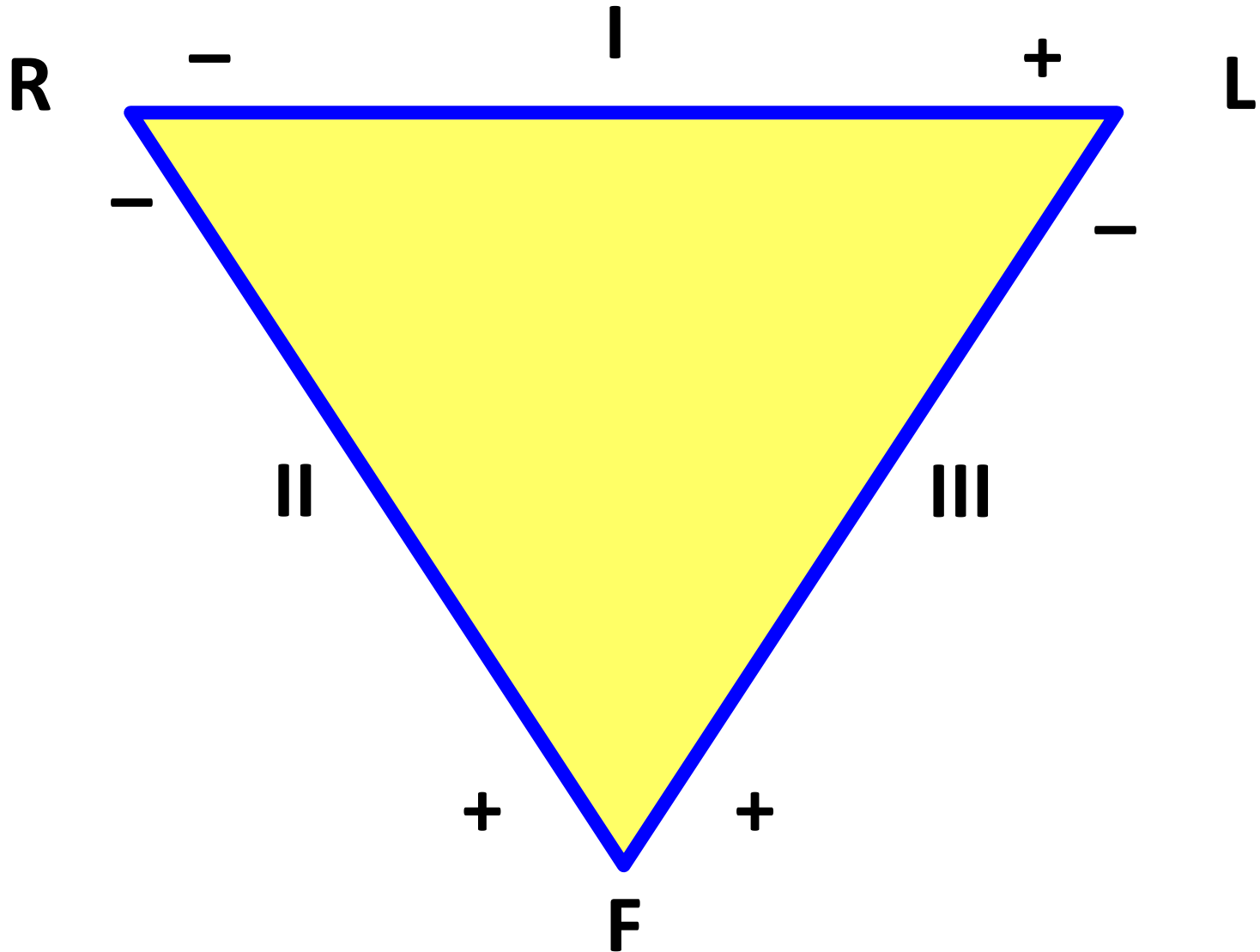
EKG vzniká promítáním elektrického srdečního vektoru na svod v čase

Elektrický vektor v čase opisuje tři smyčky: vektokardiogram

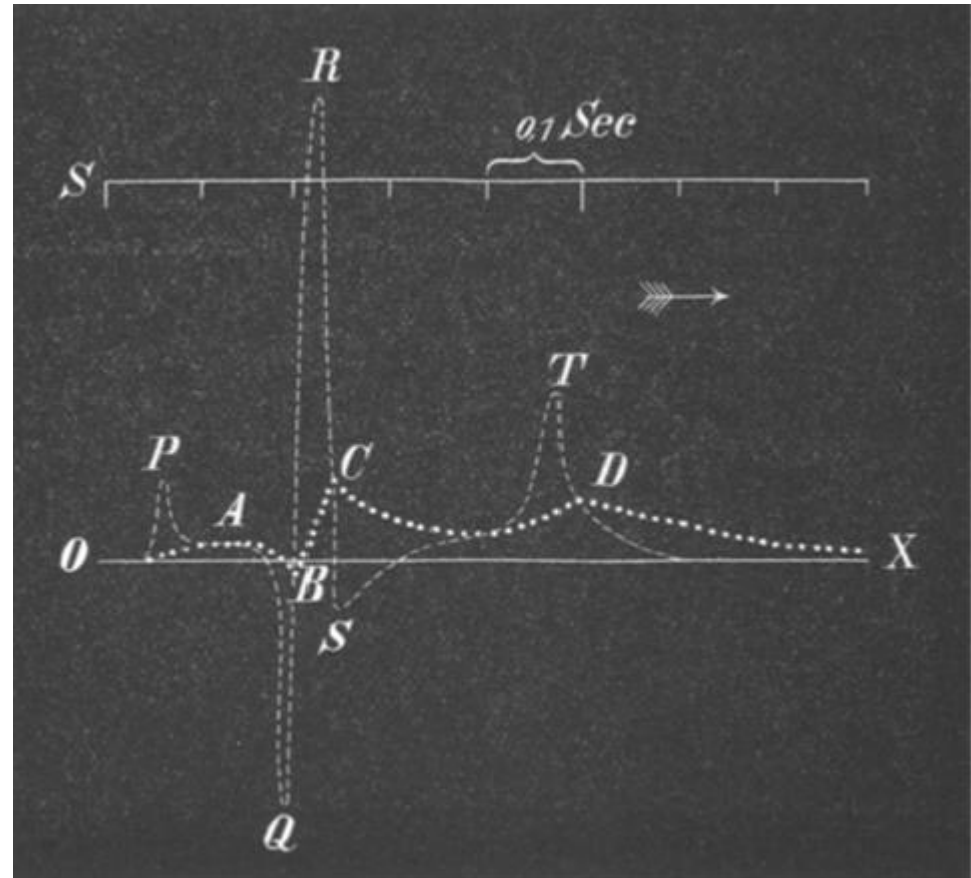
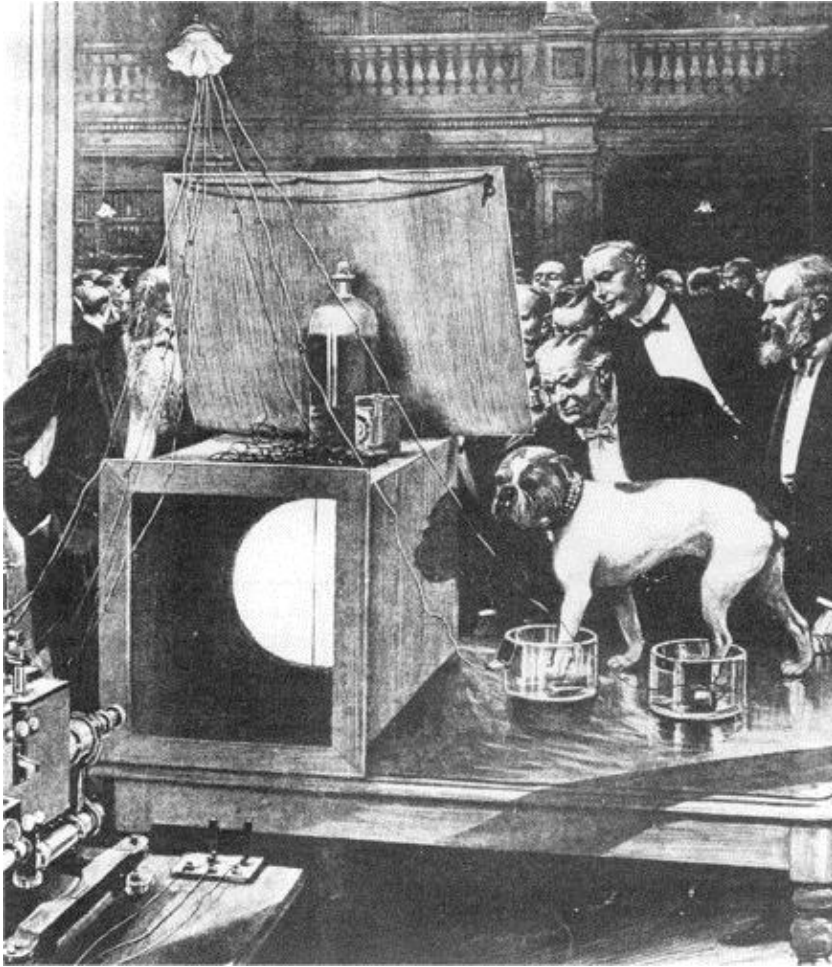
EKG – základní (Einthovenovy svody)

video

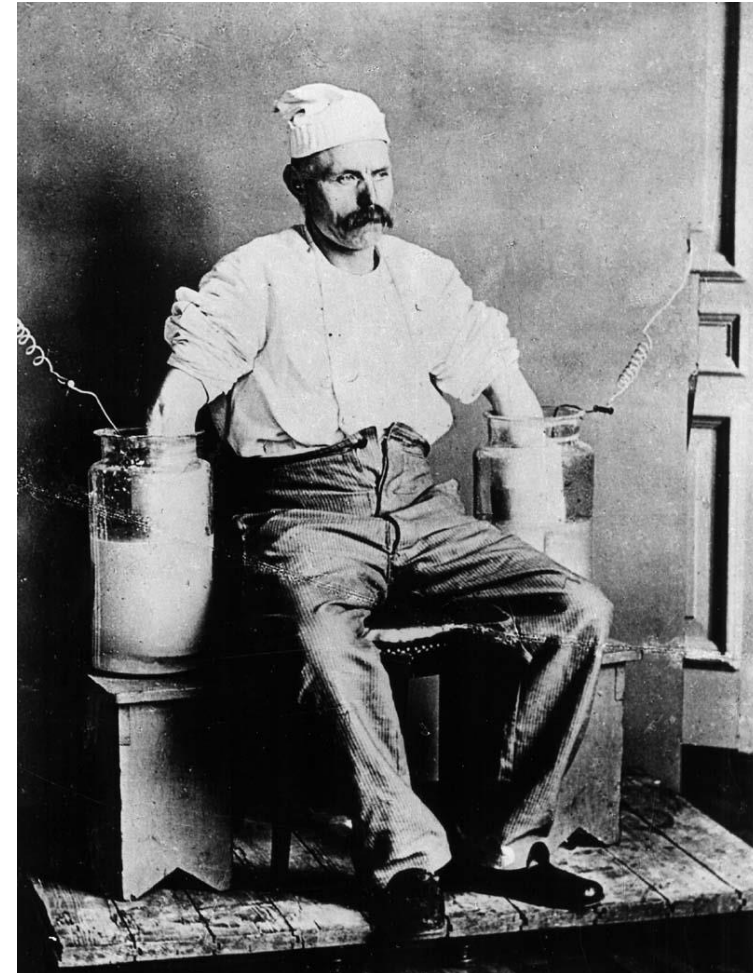
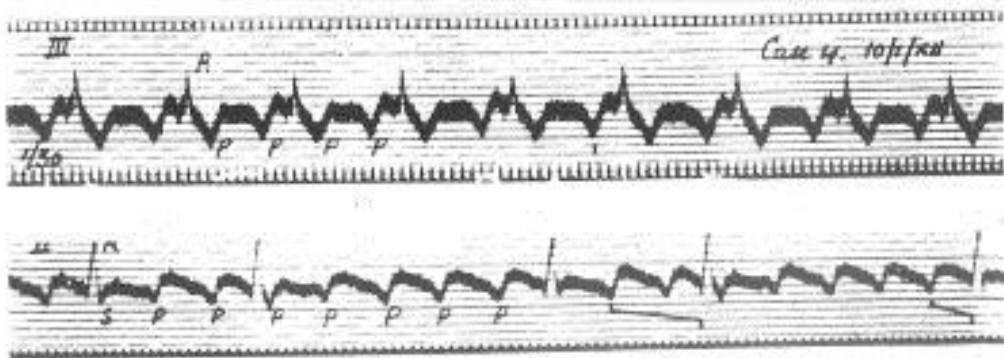
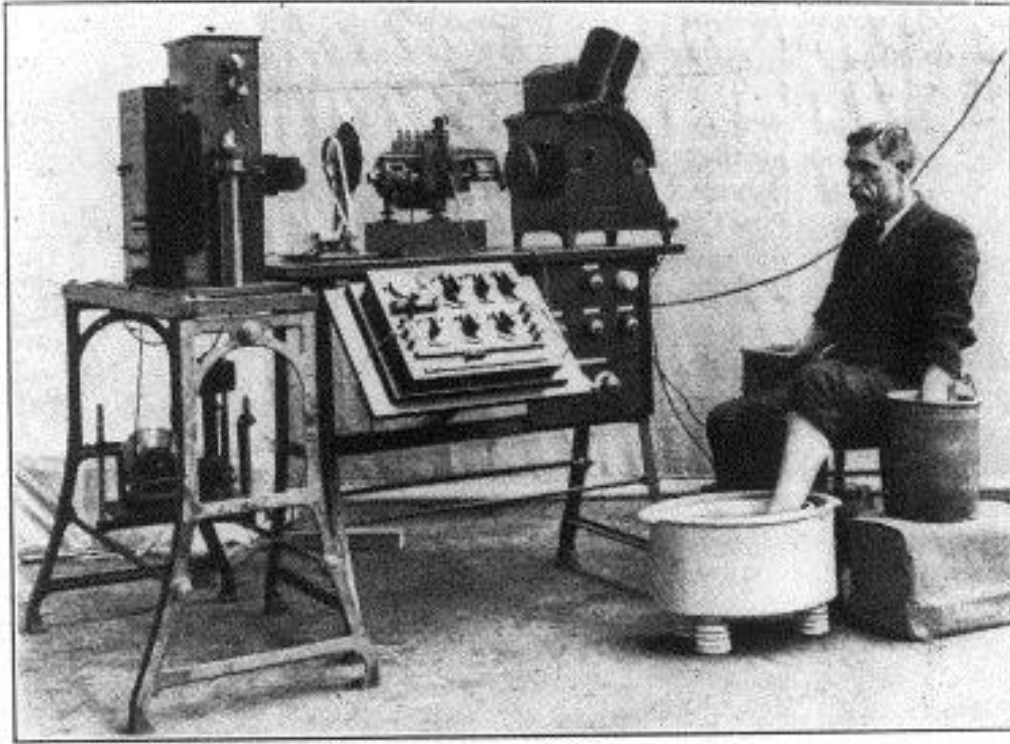
EKG – základní (Einthovenovy svody)



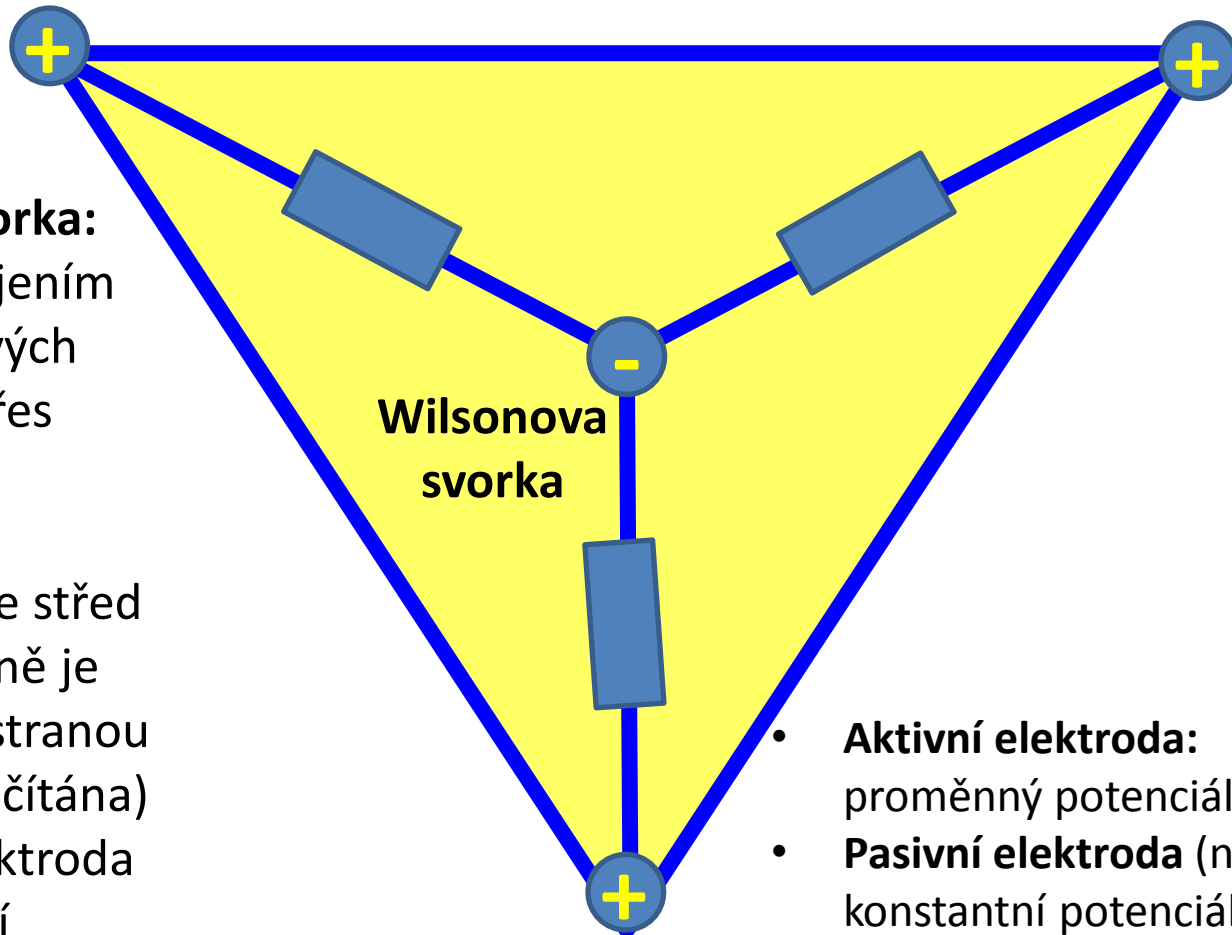
EKG - historie



EKG - historie



EKG – Wilsonova svorka



Wilsonova svorka:

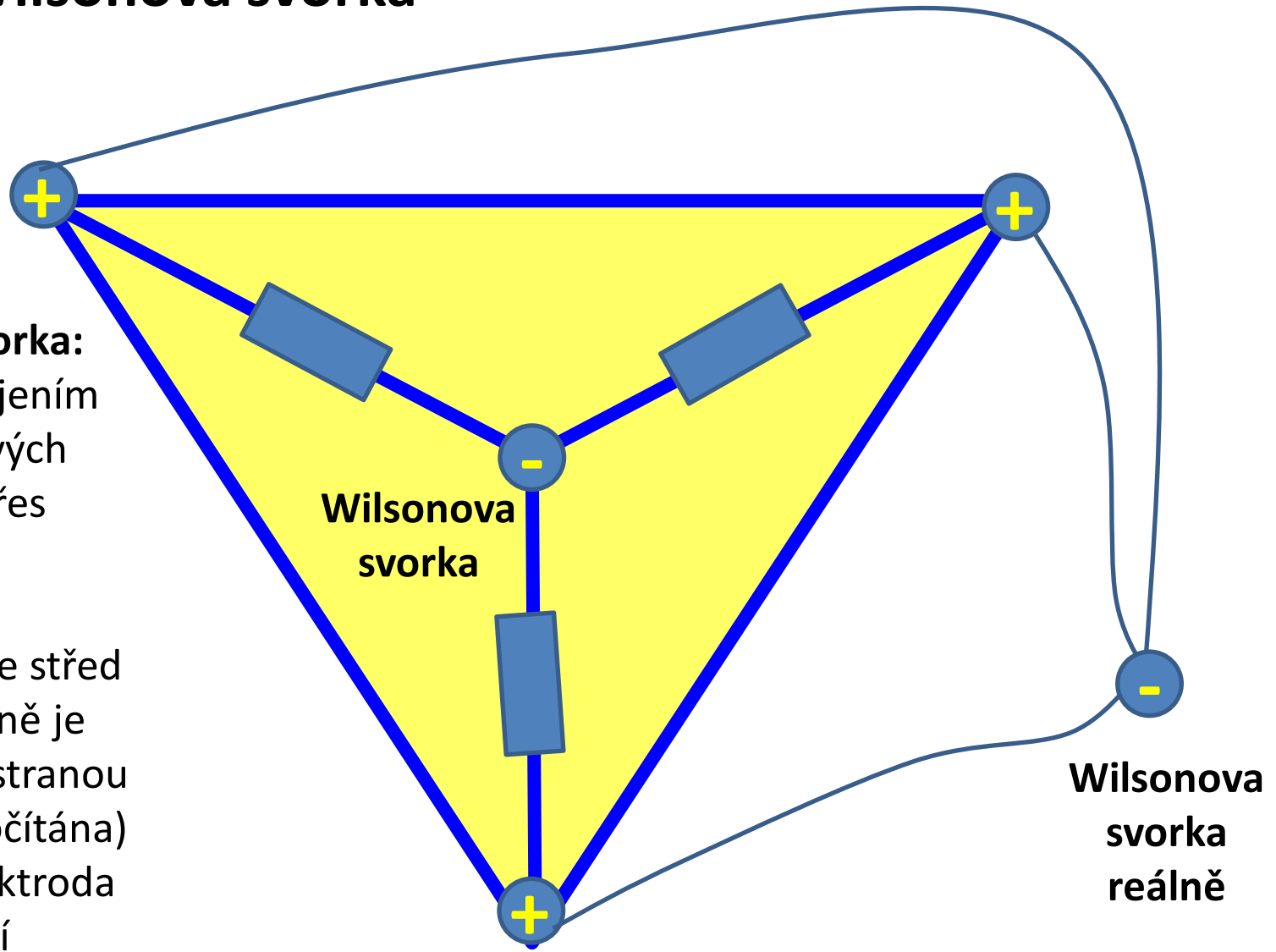
- Vzniká spojením končetinových elektrod přes odpory
- elektricky představuje střed srdce (reálně je vyvedena stranou nebo dopočítána)
- Pasivní elektroda (konstantní potenciál)

- **Aktivní elektroda:** proměnný potenciál
- **Pasivní elektroda (neaktivní):** konstantní potenciál

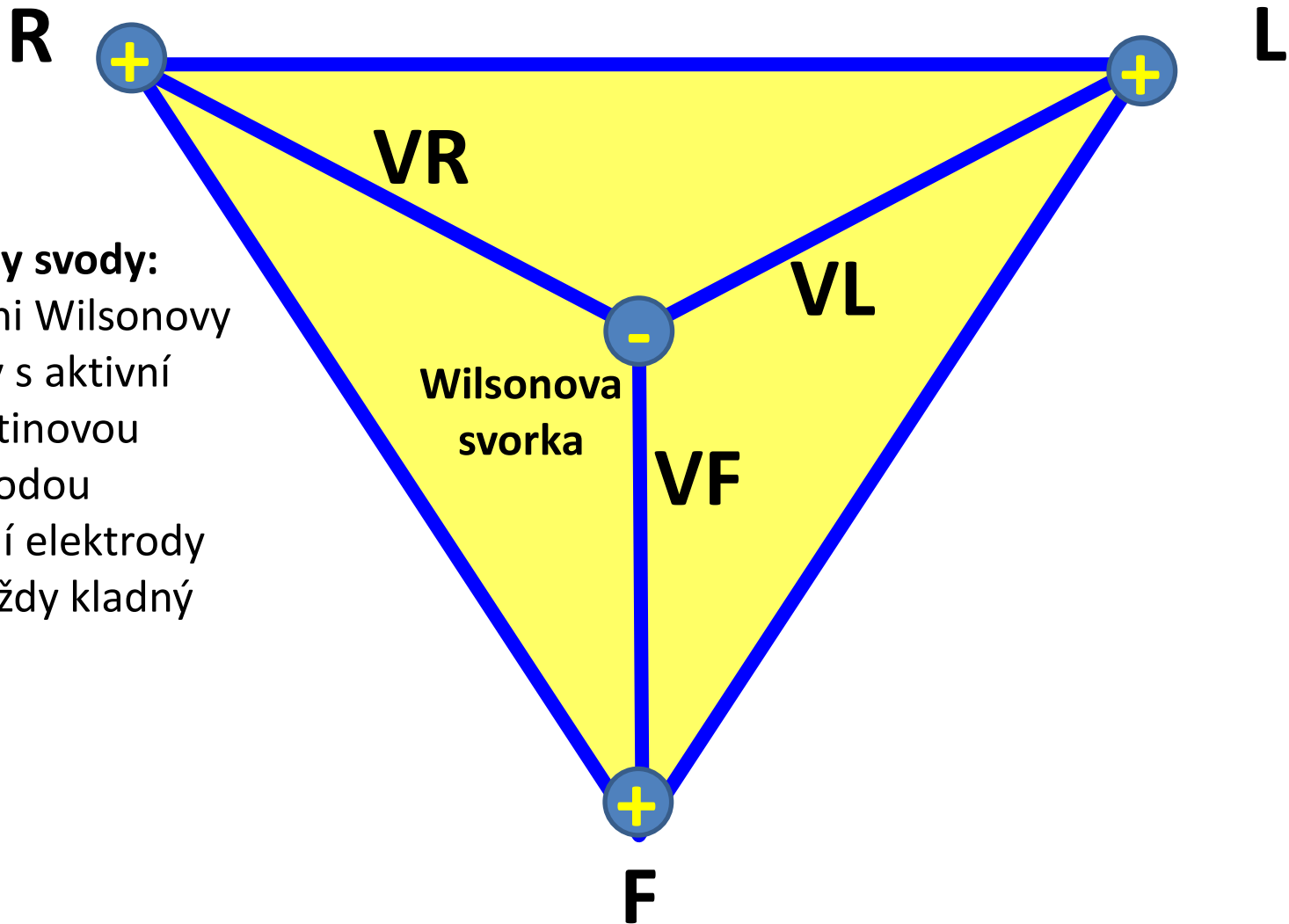
EKG – Wilsonova svorka

Wilsonova svorka:

- Vzniká spojením končetinových elektrod přes odpory
- elektricky představuje střed srdce (reálně je vyvedena stranou nebo dopočítána)
- Pasivní elektroda (konstantní potenciál)



EKG – Wilsonovy svody (unipolární)



Wilsonovy svody:

- Spojení Wilsonovy svorky s aktivní končetinovou elektrodou
- Aktivní elektrody mají vždy kladný náboj

EKG – augmentované Golbergerovy svody (unipolární)

aktivní elektroda

R



aVR

L



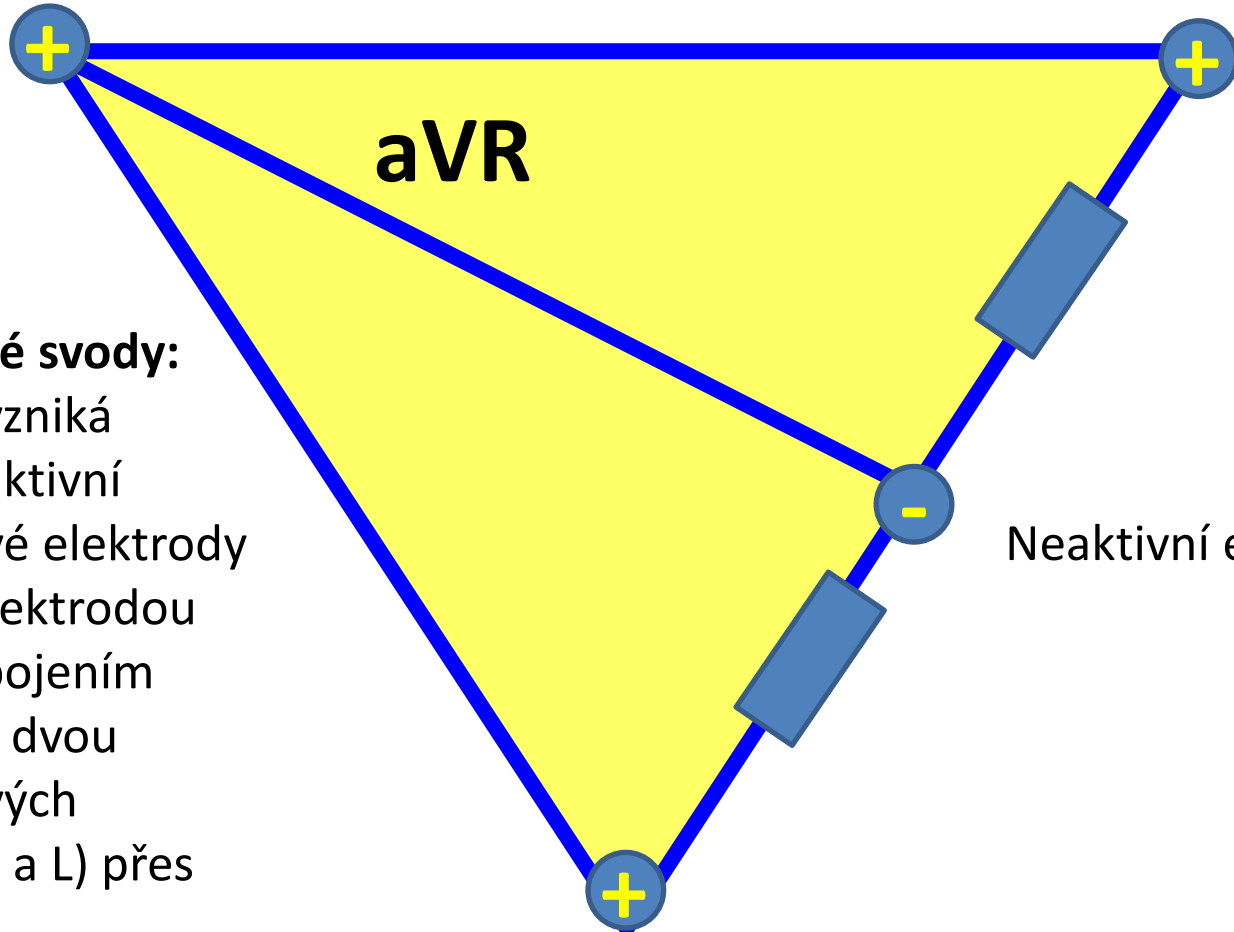
augmentované svody:

- Svod aVR vzniká spojením aktivní končetinové elektrody (zde R) s elektrodou vzniklou spojením zbývajících dvou končetinových elektrod (F a L) přes odpory

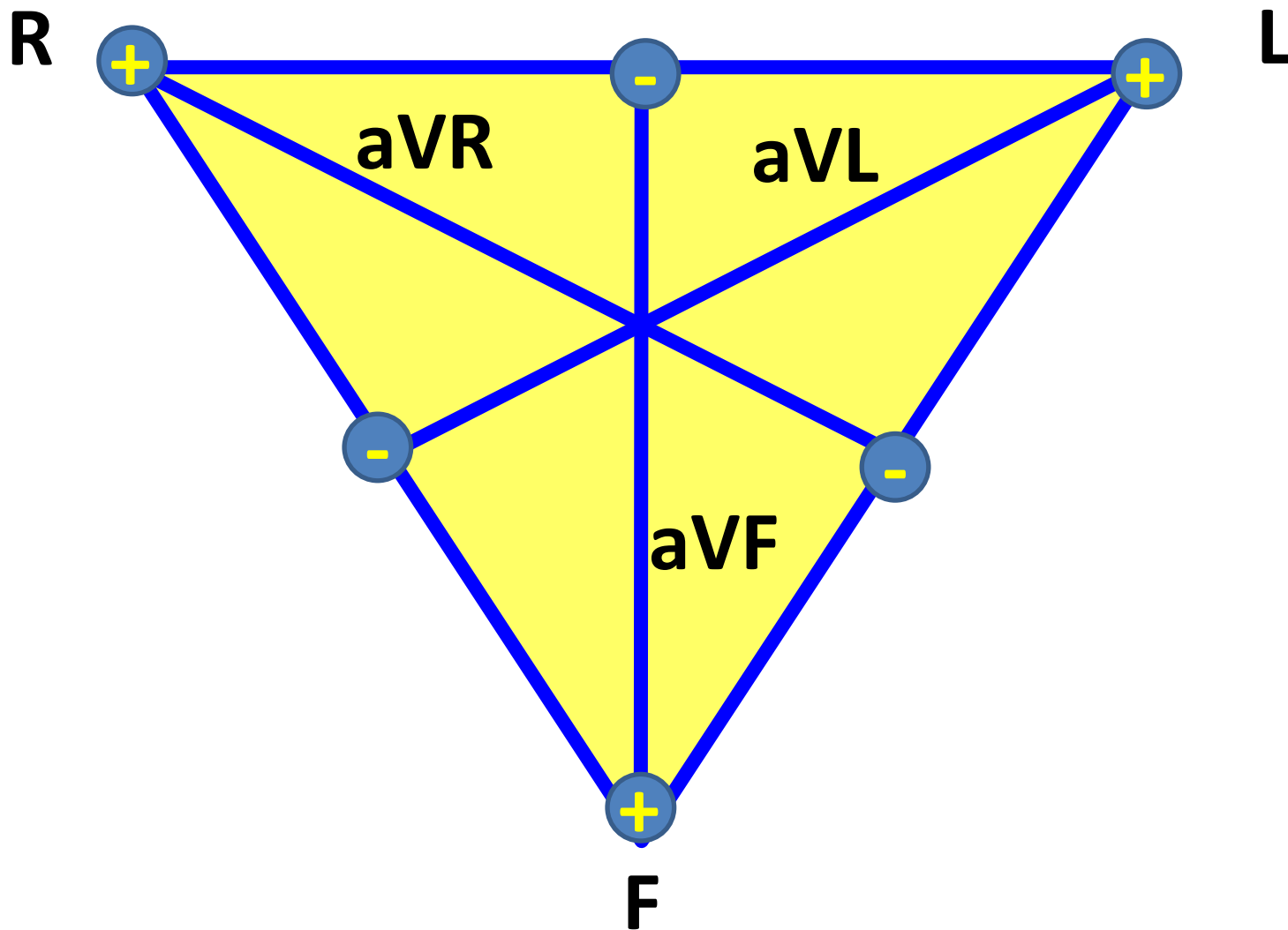
Neaktivní elektroda



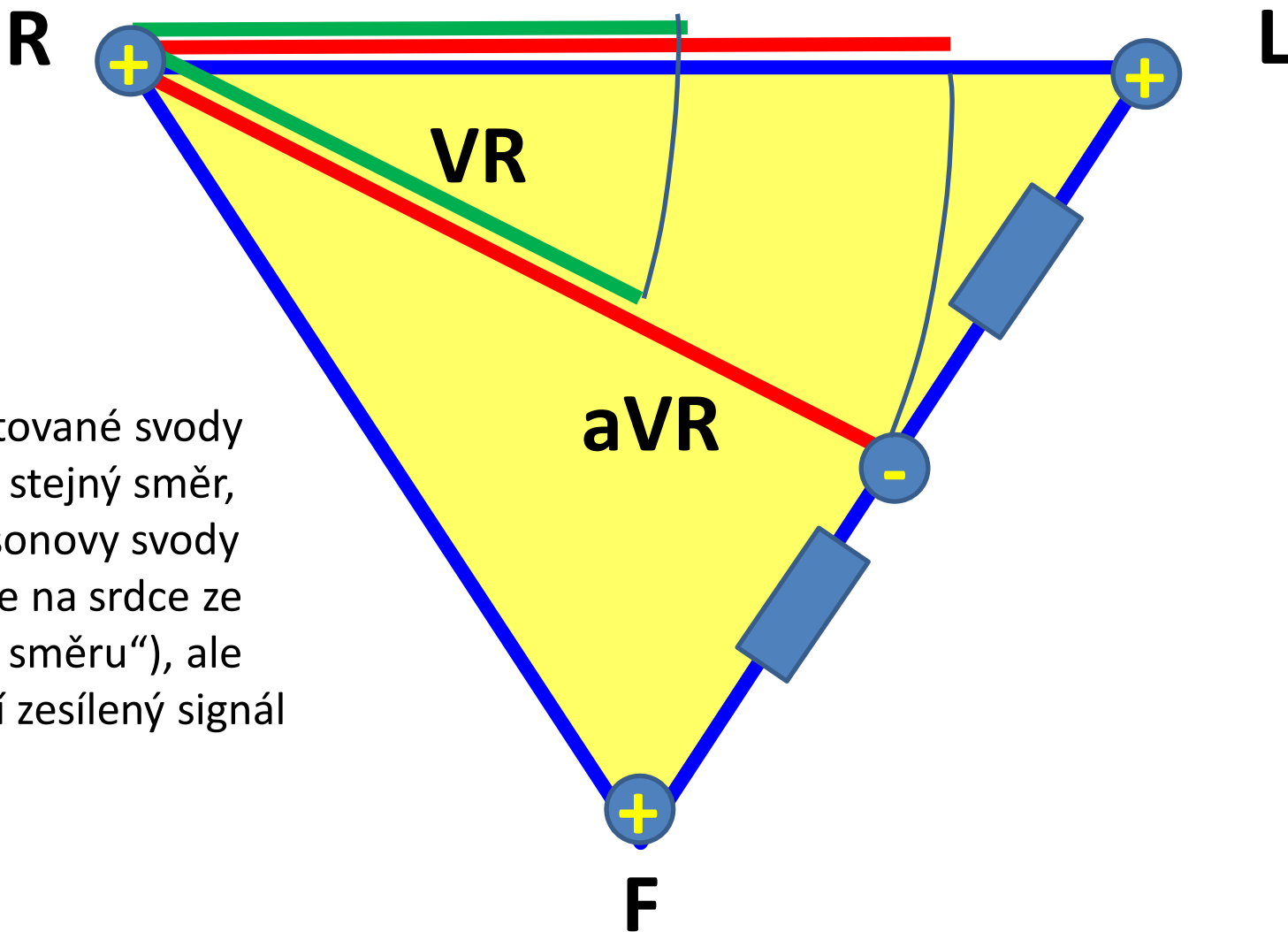
F



EKG – augmentované Golbergerovy svody (unipolární)

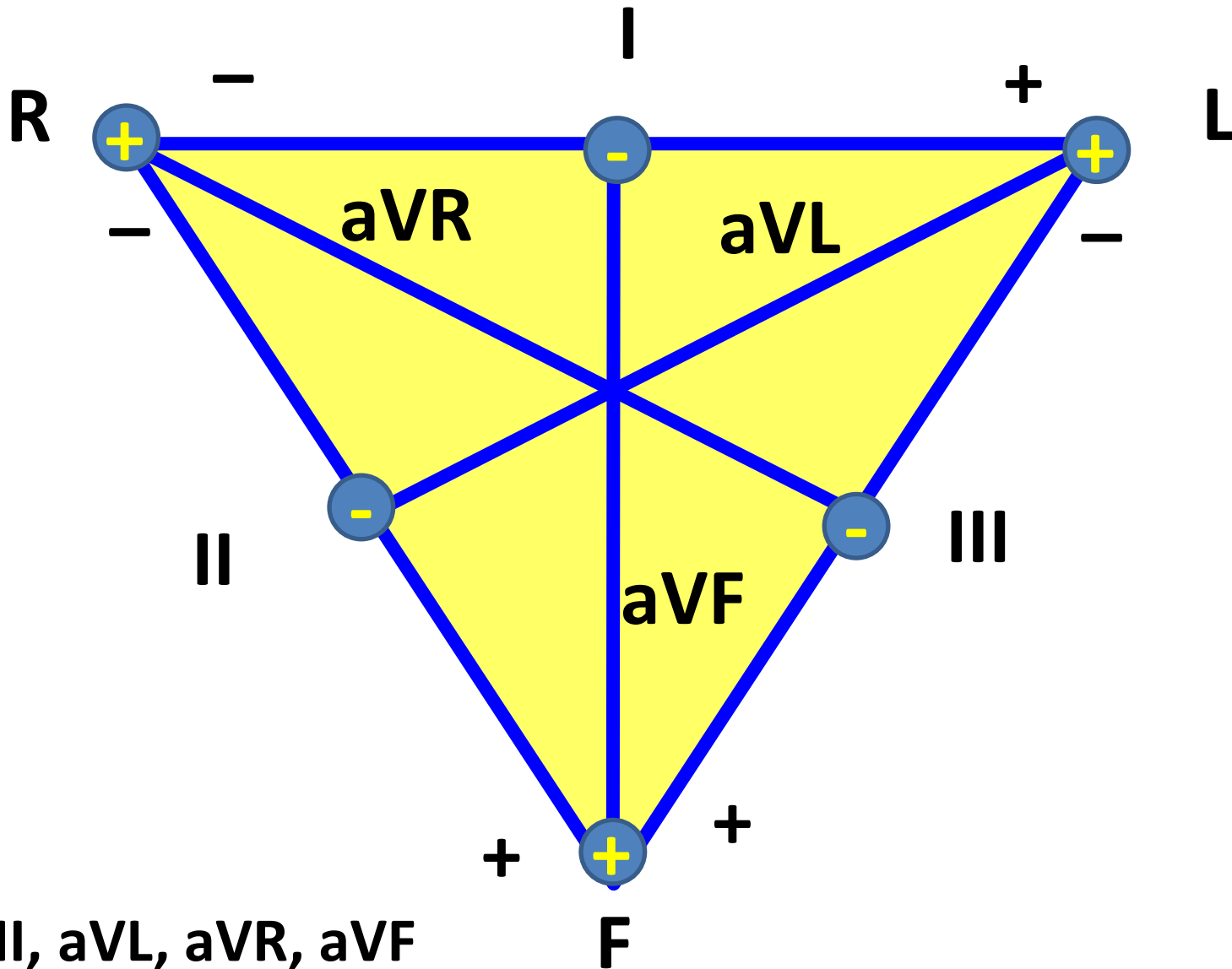


EKG – Wilsonovy a augmentované svody



Augmentované svody mají sice stejný směr, jako Wilsonovy svody („dívají se na srdce ze stejného směru“), ale poskytují zesílený signál

Končetinové svody – frontální rovina



I, II, III, aVL, aVR, aVF

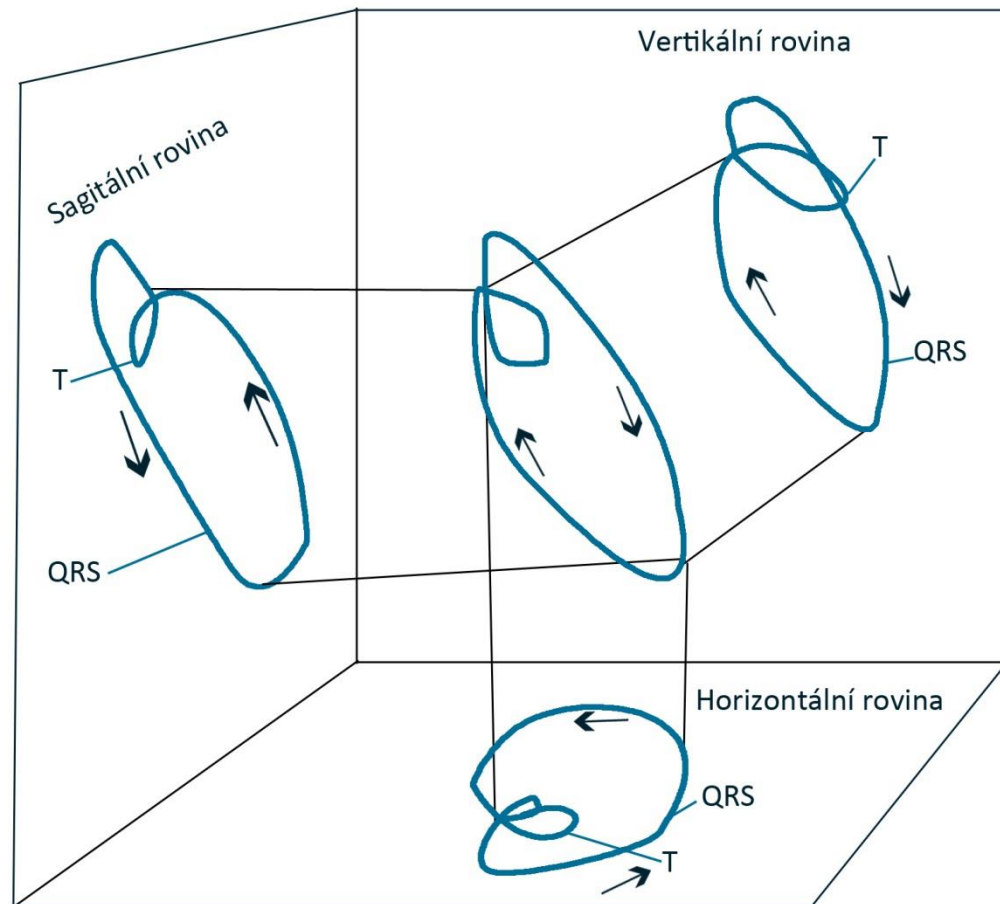
Vektokardiografie

Elektrický vektor se pohybuje ve třech rozměrech. Křivka EKG záleží na směru svodu, na který se vektor promítá.

Končetinové svody se „dívají“ na srdeční elektrickou aktivitu jen ve frontální rovině.

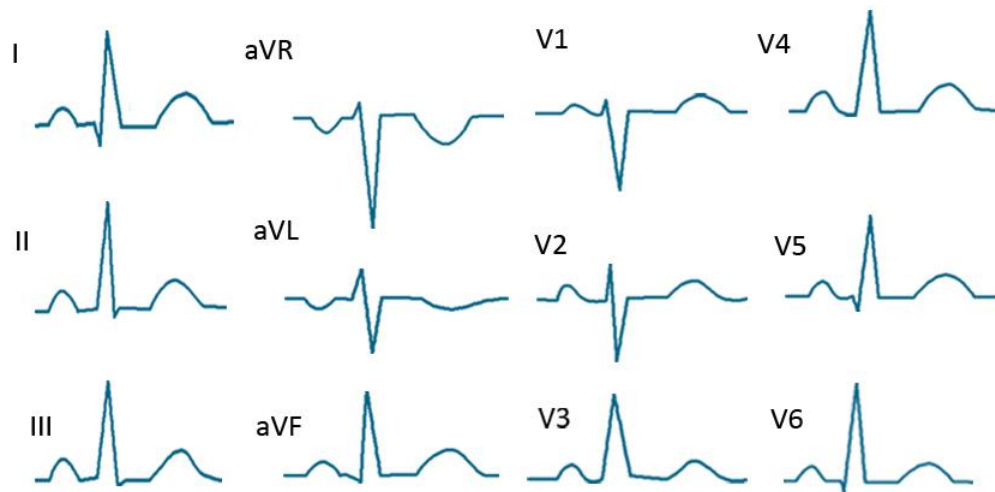
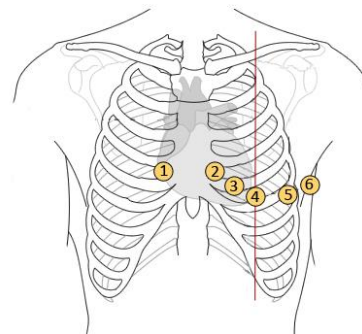
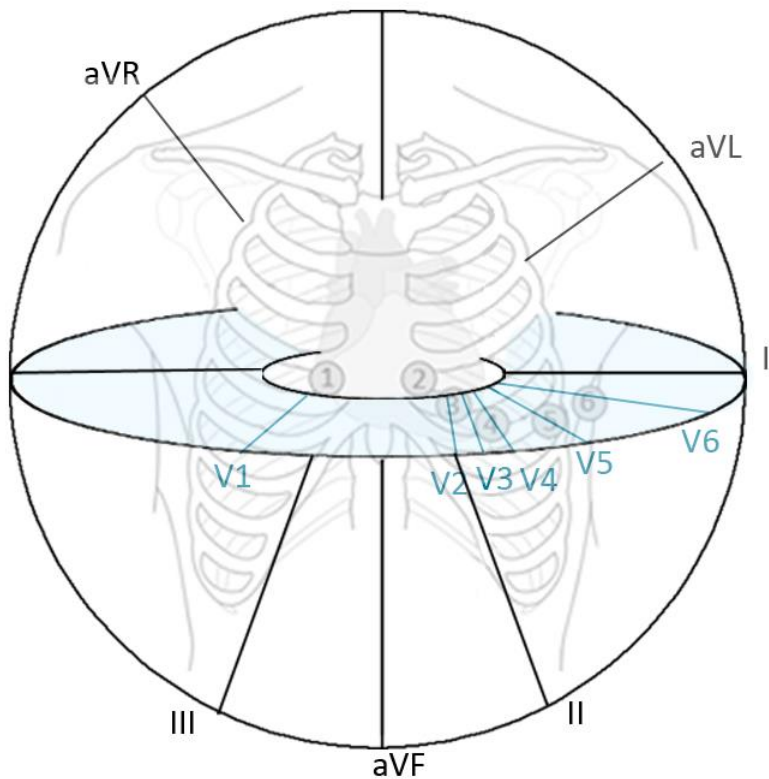
Ale co ostatní roviny?

→ hrudní svody

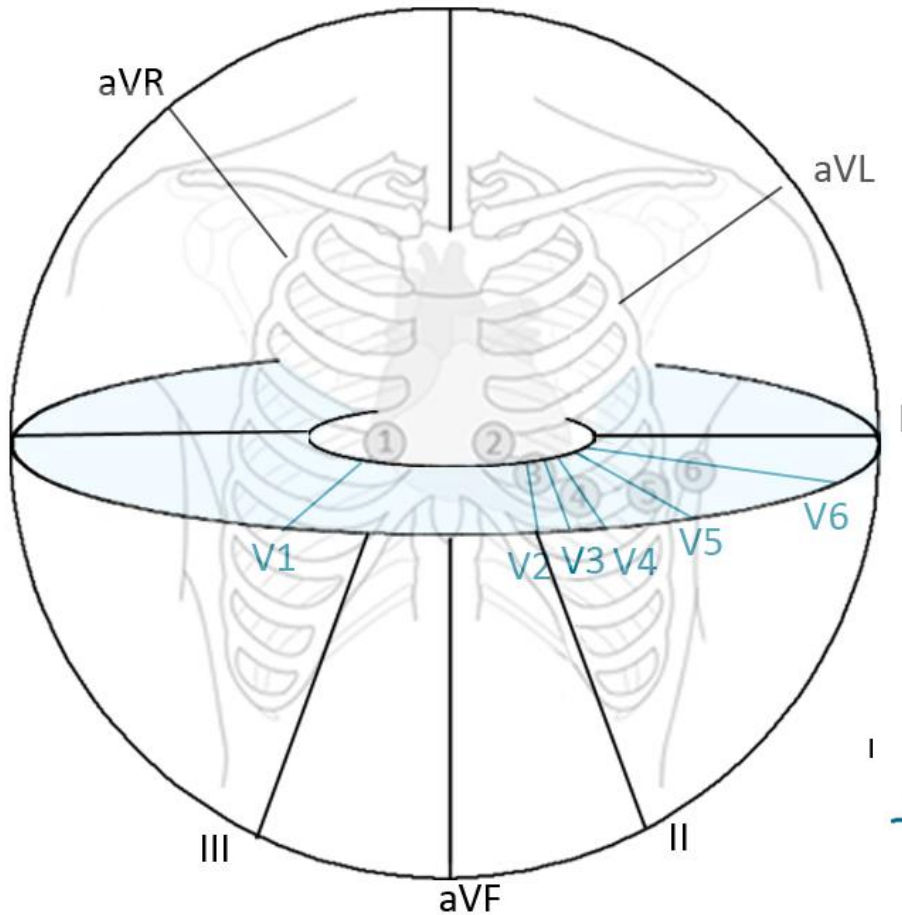


EKG – hrudní svody (unipolární)

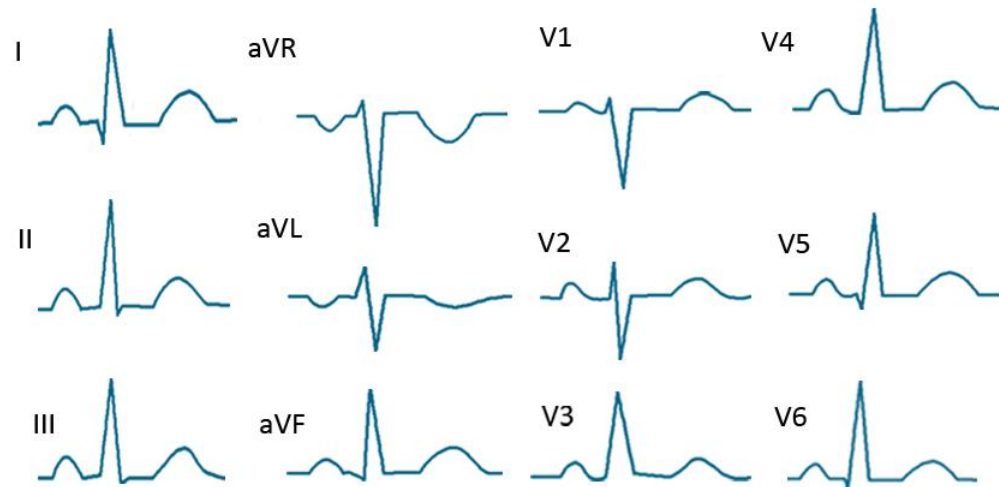
- Spojení hrudní elektrody (aktivní, kladné) s Wilsonovou svorkou (záporná, neaktivní)
- 6 hrudních svodů – V1, ... V6



EKG – 12 svodové EKG



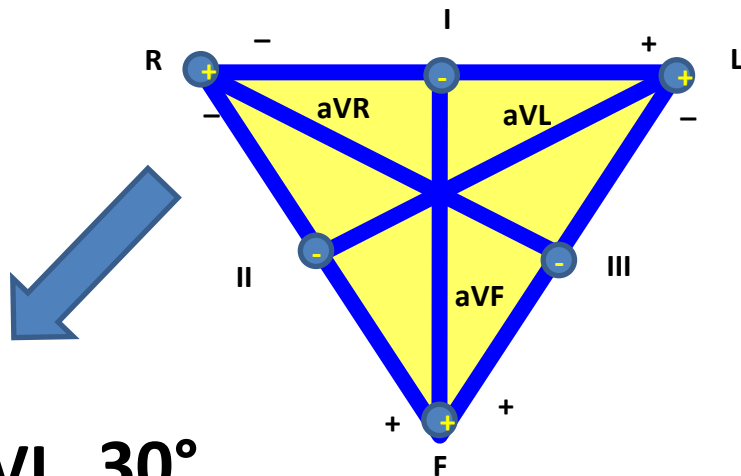
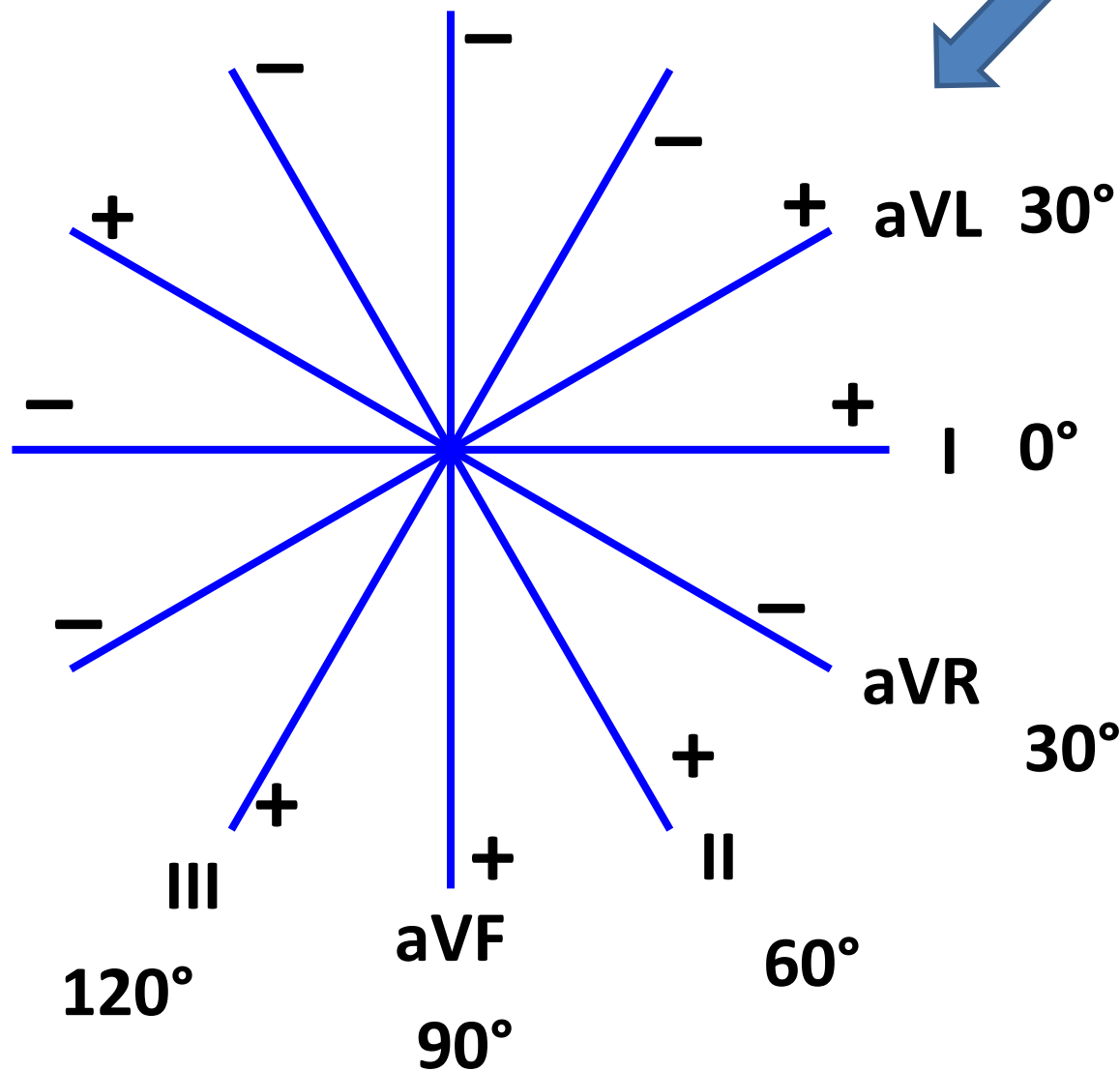
- 3 Einthovenovy svody (bipolární) – I, II, III
 - 3 Golgbergerovy augmentované svody (unipolární) – aVL, aVR, aVF
 - 6 hrudních svodů (unipolární)
- Používáme 13 elektrod.... Proč?



EKG – 12 svodové EKG

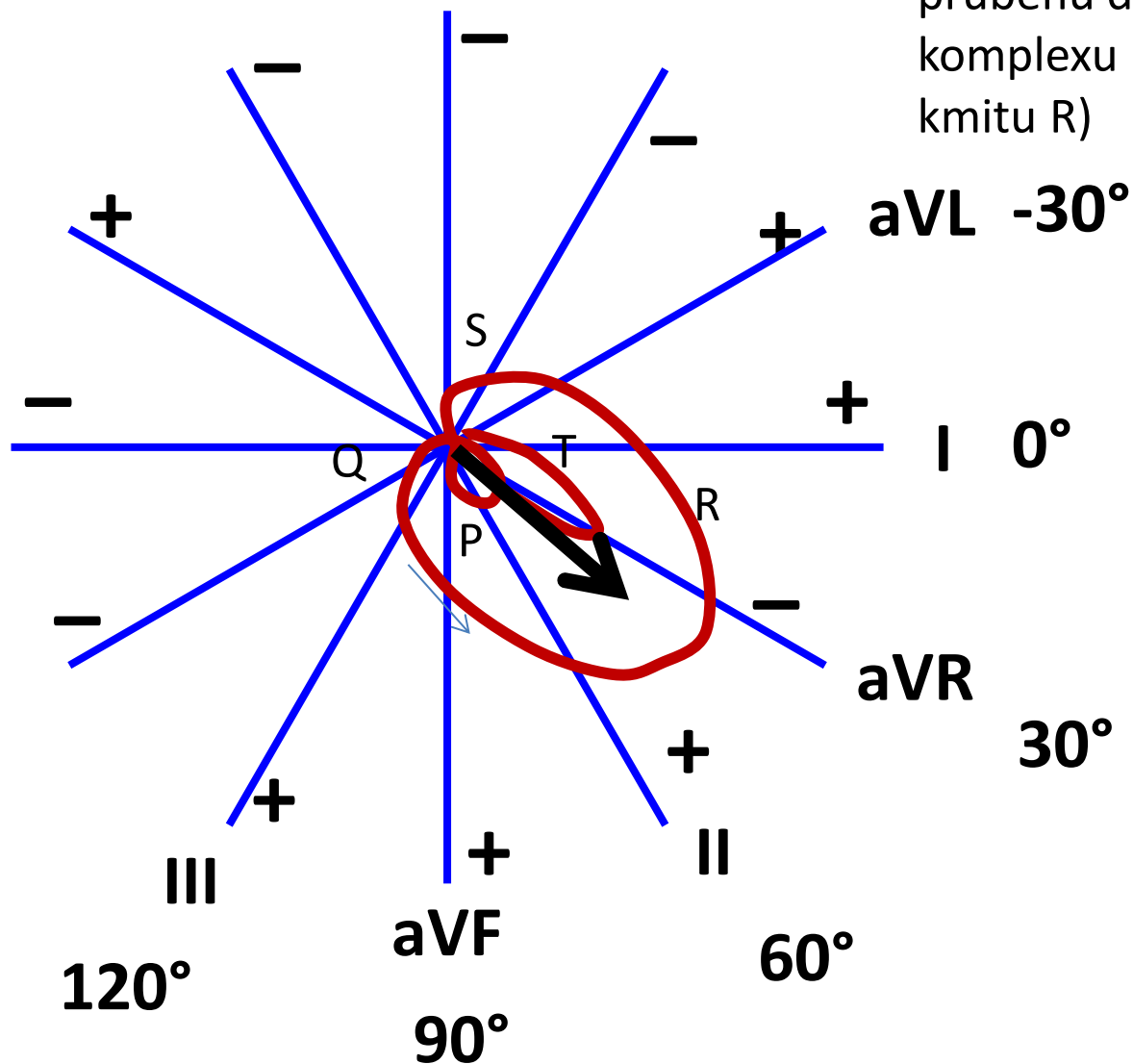


EKG svody podle Cabrery



Směry končetinových svodů jsou zachované. Jsou pouze přeskládané tak, aby se protínaly ve středu.

Elektrická osa srdeční



Elektrická osa srdeční: průměrný směr elektrického vektoru srdečního v průběhu depolarizace komor : QRS komplexu (lze odhadnout podle velikosti kmitu R)

Srdeční osa fyziologicky směřuje dolů, doleva, dozadu

Rozmezí fyziologické:

Střední typ $0^\circ - 90^\circ$

Levý typ $-30^\circ - 0^\circ$

Pravý typ $90^\circ - 120^\circ$

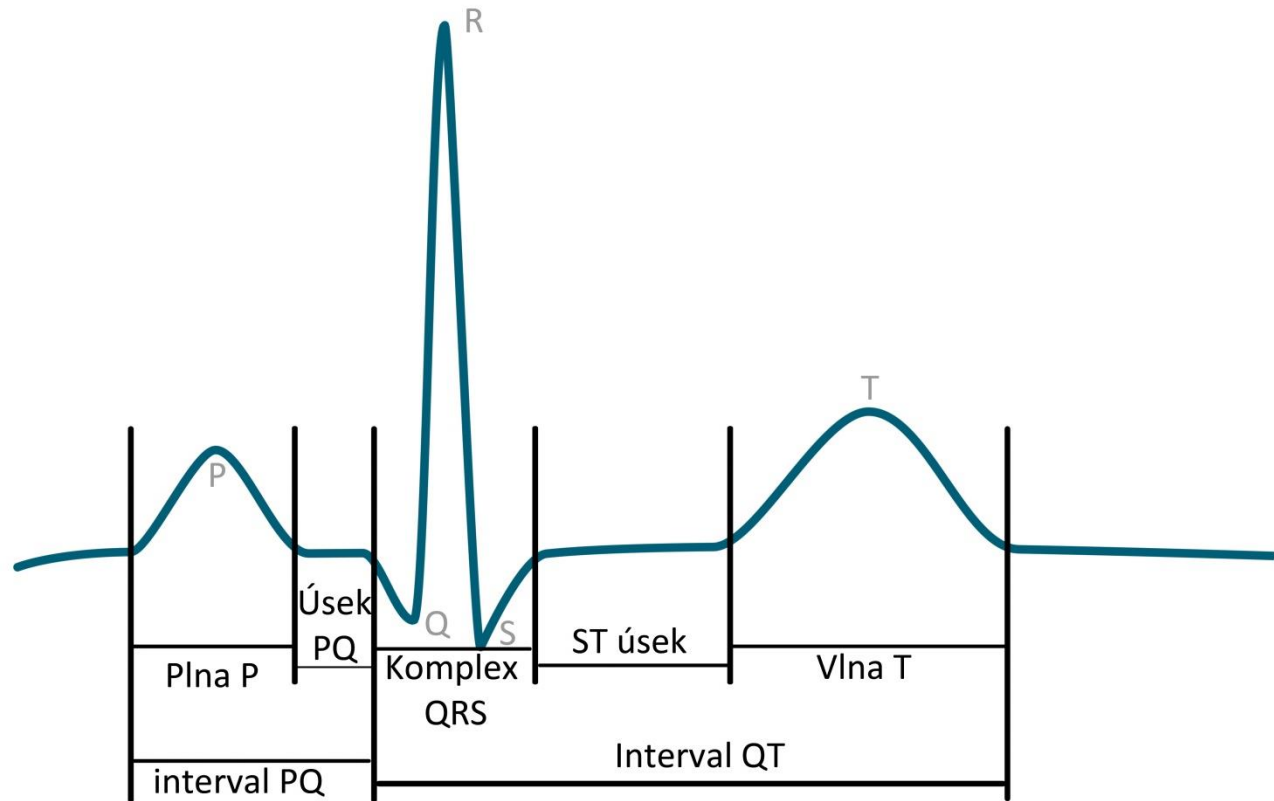
Deviace doprava: $> 120^\circ$

(hypertrofie LK, dextrokardie)

Deviace doleva: $< -30^\circ$

(hypertrofie LK, těhotenství, obezita)

EKG křivka



EKG (II svod):

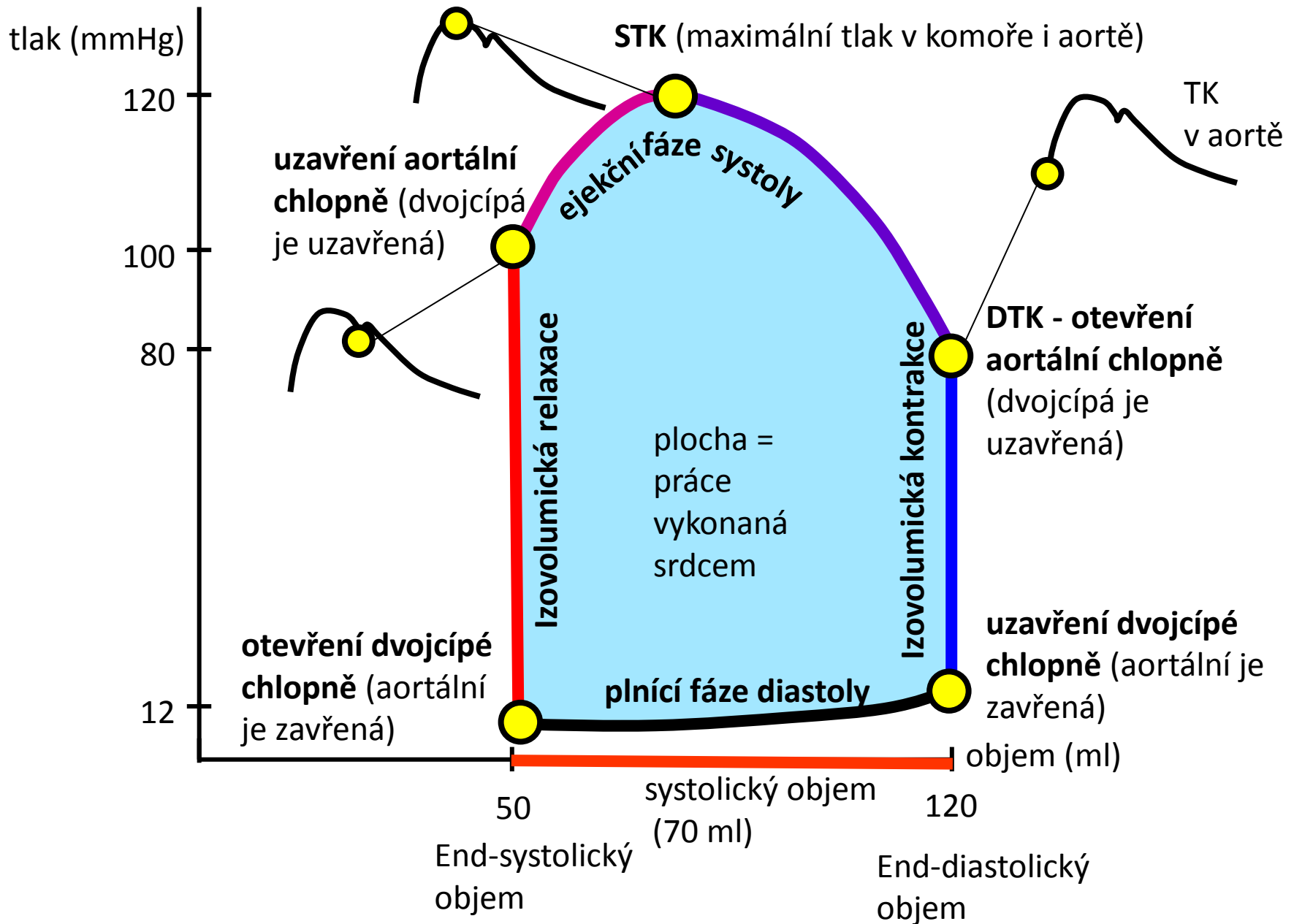
- **P:** depolarizace síní
- **Úsek PQ:** síně jsou depolarizované, komory se ještě nezačaly depolarizovat
- **Q:** první negativní kmit QRS komplexu (depolarizace komorového septa)
- **R:** první pozitivní kmit QRS komplexu (depolarizace srdečního hrotu)
- **S:** negativní kmit následující po R (depolarizace bazální části LK)
- **Úsek ST:** komory jsou depolarizované a ještě se nezačaly repolarizovat
- **P:** repolarizace komor

Srdeční cyklus - střídání systoly a diastoly síní a komor

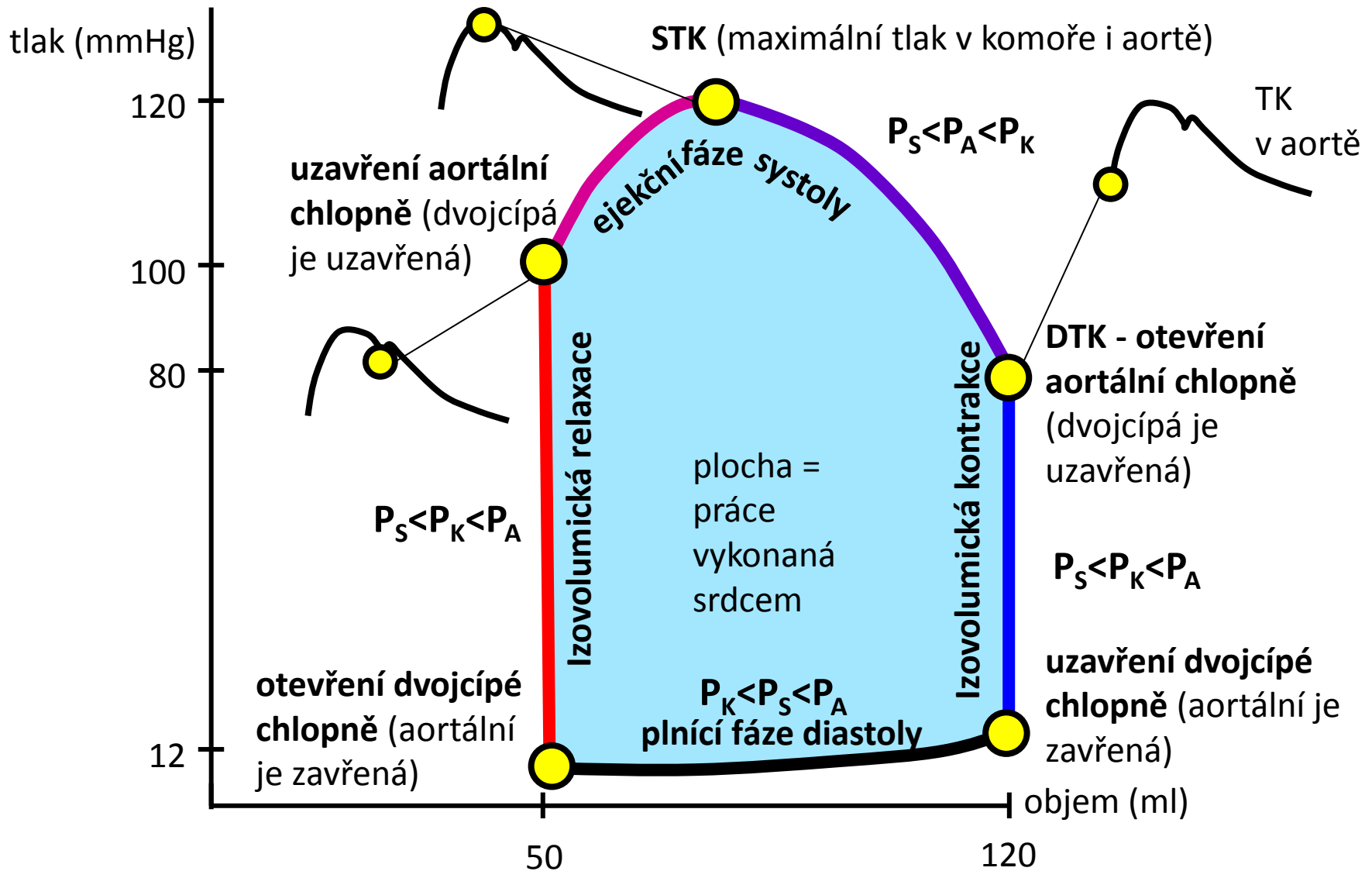
Chlopně jsou jednosměrné, uzavírají se, když je tlakový gradient „protisměrný“

- systola: kontrakce
- diastola: relaxace
- **depolarizace síní** → **systola síní** – krev je dopumpována do stále relaxovaných komor
- depolarizace komor → systola komor
- **systola komor:**
 - **izovolumická kontrakce** – stoupá tlak v komorách ale krev ještě není vypuzována
 - začíná zavřením síňokomorových chlopní (tlak v komoře větší než tlak v síni)
 - Končí otevřením aortální a pulmonální chlopně (tlak v komorách se vyrovná tlaku v aortální a pulmonální tepně = diastolický tlak)
 - **ejekční fáze** – krev je vypuzována do tepen (tlak v komorách větší než v tepnách)
 - Začíná otevřením aortální a pulmonální chlopně a končí jejich uzavřením
- **diastola komor:**
 - **izovolumická relaxace** – klesá tlak v komorách (menší než v tepnách), ale komory se ještě neplní
 - Začíná uzavřením aortální a pulmonální chlopně a končí otevřením síňokomorových chlopní (komorový tlak klesne pod síňový)
 - **fáze plnění** – otevírají se síňokomorové chlopně a krev teče po tlakovém gradientu do komor
 - Na začátku fáze rychlého plnění komor
 - Ke konci depolarizace a systola síní → doplnění komor
- depolarizace a systola komor....

Srdeční cyklus P-V diagram (levá komora)

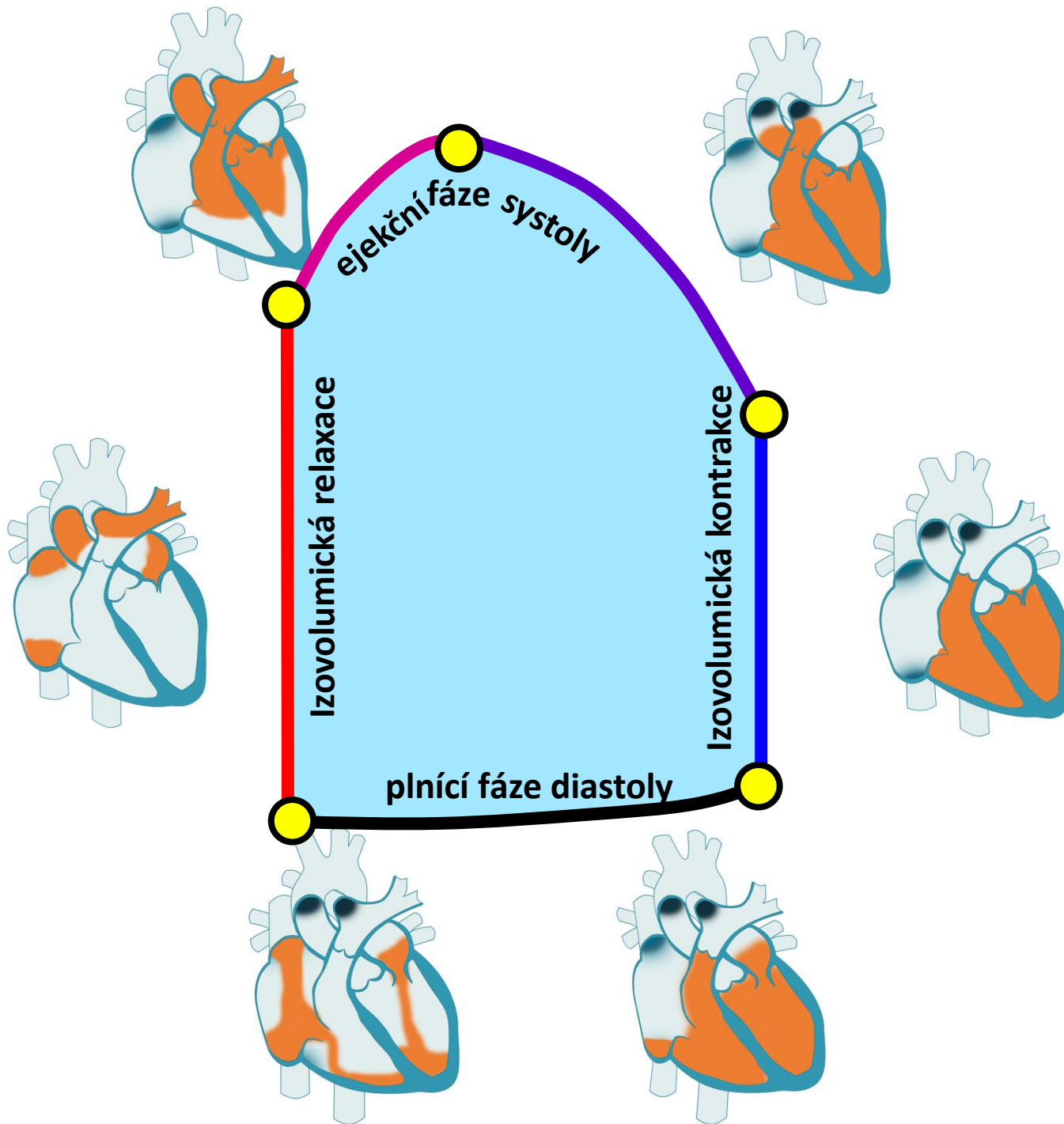


Srdeční cyklus P-V diagram (levá komora)



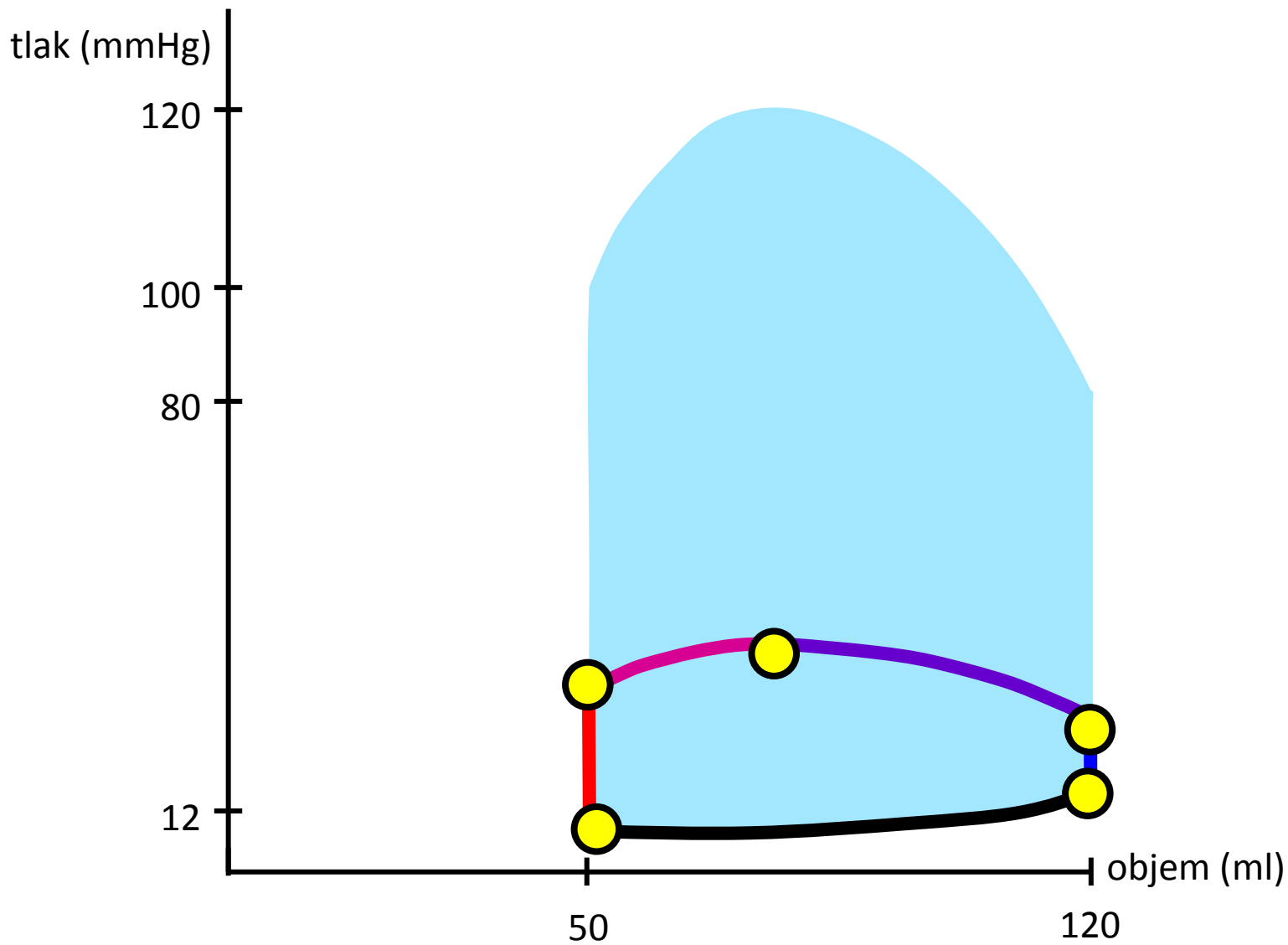
P_S : tlak v síni, P_A : tlak v aortě, P_K : tlak v komoře

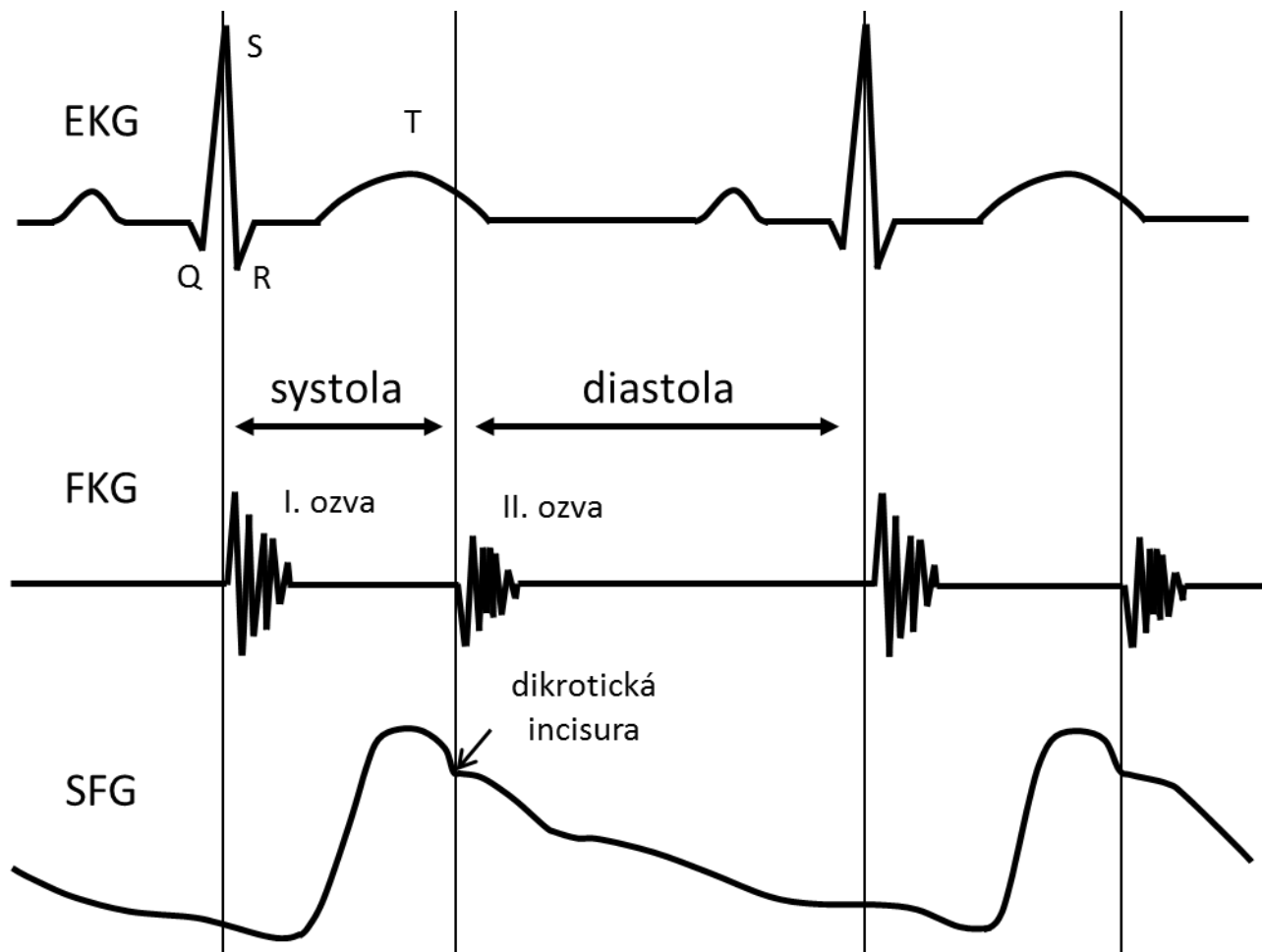
Tok krve pouze síně → komora → aorta



Video PV diagram

Srdeční cyklus P-V diagram (pravá komora)





Mechanická aktivita komor

Mechanická aktivita síní

Aktivace myokardu

Srdeční cyklus

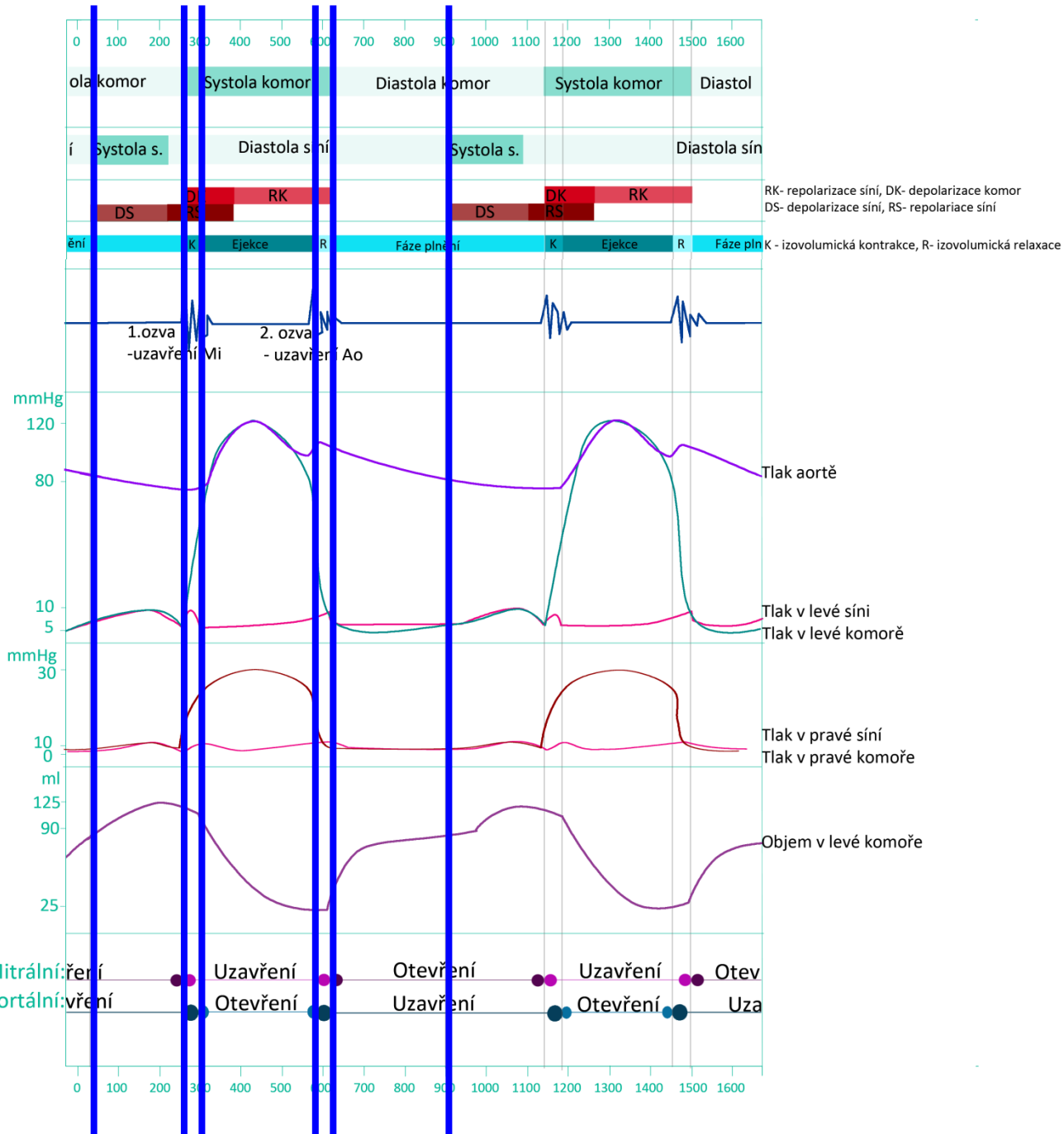
Srdeční ozvy

Tlaky v levém srdci

Tlaky v pravém srdci

Objem krve v levém srdci

Aktivita chlopní



Mechanická aktivita komor
 Mechanická aktivita síní
 Aktivace myokardu
 Srdeční cyklus

EKG

Aktivace převodního systému srdečního

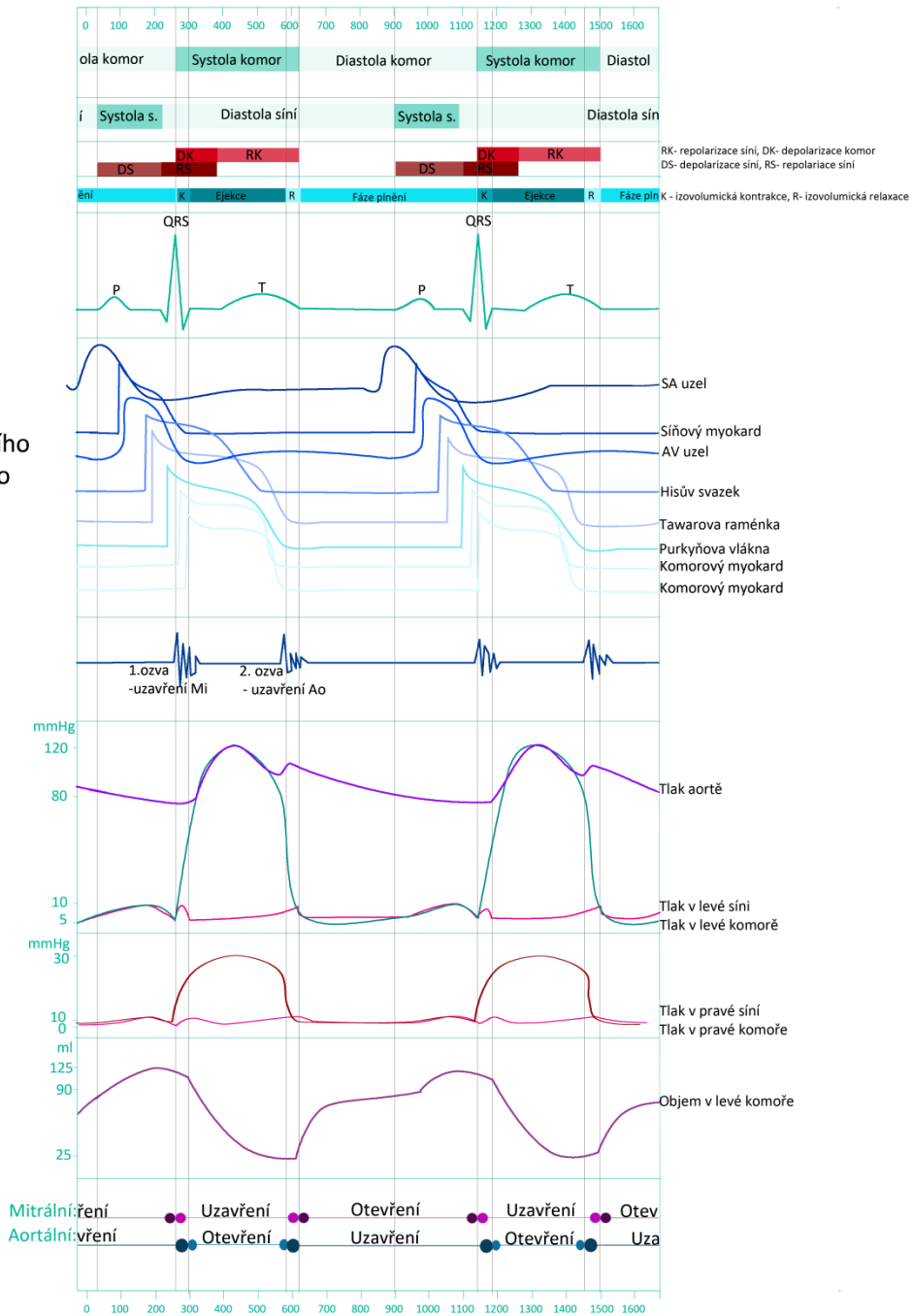
Srdeční ozvy

Tlaky v levém srdci

Tlaky v pravém srdci

Objem krve v levém srdci

Aktivita chlopní



Tlaky v komorách, síních, aortě a plicnici

	Systolický tlak [mmHg]	Konečný diastolický tlak [mmHg]	Střední tlak [mmHg]
Pravá síň	--	--	6
Pravá komora	30	6	--
Plicnice	30	12	20
V zaklínění	--	--	12
Levá síň	--	--	12
Levá komora	140	12	--
aorta	140	90	105

Levé srdce

Vysokotlaký systém

Silná stěna komory

Tlak v aortě 120/80 mmHg

Větší práce komor

Pravé srdce

Nízkotlaký systém

Tenčí stěna komory

Tlak v plicnici 30/12 mmHg

Menší práce komor

Objem krve přečerpaný pravým a levým srdcem je téměř totožný!

Objemy přečerpané srdcem

Minutový objem (srdeční výdej):
objem krve, který proteče srdcem za minutu

Tepový objem (systolický objem):
objem krve vypuzený srdcem během jednoho srdečního cyklu

Srdeční index:
minutový objem vztažený na jednotku plochy povrchu těla

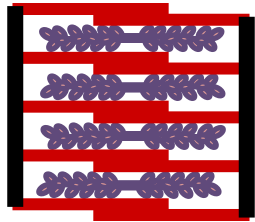
	vleže	vsedě	vestoje
Minutový objem (l/min) klid	4 – 8	4 – 7	4 – 6
Srdeční index (l/min/m²) klid	3 – 5	2,2 – 4,5	2 – 3
Tepový objem (ml)	80 – 160	60 – 80	40 – 70
Minutový objem (l/min) při maximální zátěži	15 – 21	13 – 18	16 – 18
Srdeční index (l/min/m²) při maximální zátěži	7 – 11	7 – 8	10 – 12
Tepový objem (ml) při maximální zátěži	110 – 120	90 – 120	90 – 120

Autoregulace stahu srdečního svalu

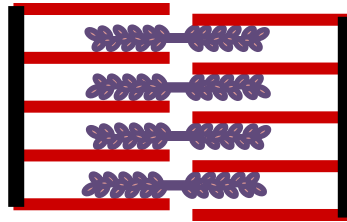
Heterometrická autoregulace (Frank-Starlingův princip):

Se zvyšující se náplní srdce (protažení srdečního svalu) roste síla stahu

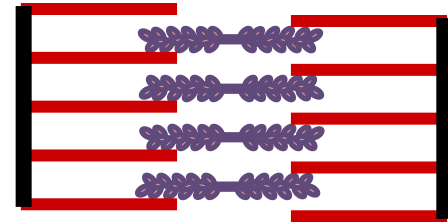
Principy: 1) vzájemný vztah aktinu a myozinu při různém protažení vláken,
2) protažení vlákna zvyšuje citlivost troponinu na vápník



malá náplň srdce



zvýšená náplň srdce

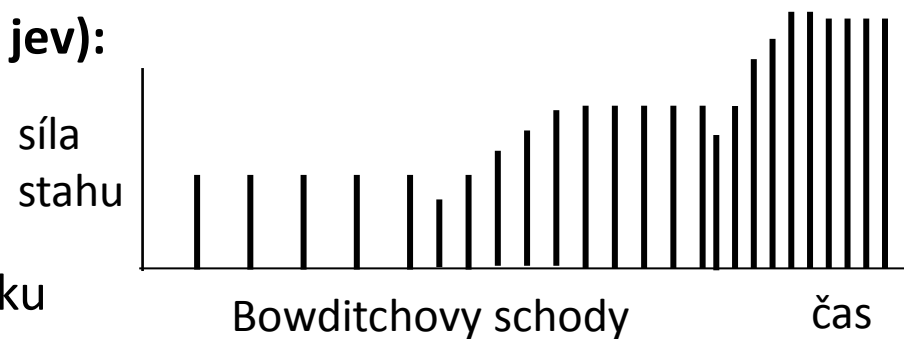


extrémní protažení
srdečního svalu

Homeometrická autoregulace (frekvenční jev):

Se zvyšující se srdeční frekvencí dochází ke zvyšování síly stahu.

Příčina: Zvyšuje se poměr koncentrace intracelulárního ku extracelulárnímu vápníku



Frekvenční jev je jakousi analogií časové sumace u kosterního svalu, u srdečního svalu však díky dlouhé refrakterní fázi nemůže nastat tetanický stah.

Řízení a regulace srdeční aktivity

Srdce pracuje automaticky, jeho činnost je pouze regulována

Ovlivnění srdce

Chronotropie – schopnost zvýšit srdeční frekvenci

Inotropie – schopnost zvýšení síly kontrakce

Dromotropie – schopnost zrychlení vedení vzruchu

Autonomní nervový systém

Sympatikus: přímý pozitivně chronotropní, dromotropní a inotropní vliv
→ zvýšení minutového srdečního výdeje

Parasympatikus: negativně chronotropní, dromotropní a inotropní vliv (v některých případech nepřímo)
→ snížení minutového srdečního výdeje

Indexy srdeční kontraktility

Srdeční stažlivost (kontraktilita, schopnost stahu) ovlivňuje především tepový objem. Pozitivně inotropní účinek má noradrenalin z nervových sympatických zakončení v srdci, který je podpořen kolujícími katecholaminy. Vagus má nepřímý negativně inotropní účinek.

Hyperkapnie, hypoxie, acidóza, chinidin, barbituráty a prokainamid potlačují srdeční stažlivost.

Ejekční frakce:

$$EF = \frac{\textit{systolický objem}}{\textit{end} - \textit{diastolický objem}}$$

Fyziologicky je EF okolo 70% (někde se píše o 60%). EF menší než 40% (někde se píše 30%) hovoří o systolické dysfunkci (porucha kontrakce). Takto nízká EF diagnostikuje srdeční selhání. Ale pozor, existují srdeční selhání se zachovanou EF (u koncentrické hypertrofie srdce způsobené hypertenzí a/nebo diabetem). EF lze zjistit fonokardiograficky na základě velikostí komory na konci systoly a na konci diastoly. Také radiologicky lze měřit objemy, ale měření doprovází zátěž způsobená radioaktivními izotopy použitými (kontrastní látka). Katetrizace a angiografie je další metodou pro měření EF.

Indexy srdeční kontraktility

EF je ovlivněna nejen kontraktilitou ale i náplní srdce (Starling)

Vztah end-diastolického tlaku (EDP) a end-diastolického objemu (EDV) v klidu a při zátěži.

Systolická dysfunkce – stoupá EDV a EDP při zátěži v porovnání s klidem

Diastolická dysfunkce (porucha relaxace) – při zátěži EDP stoupá, ale EDV se nemění

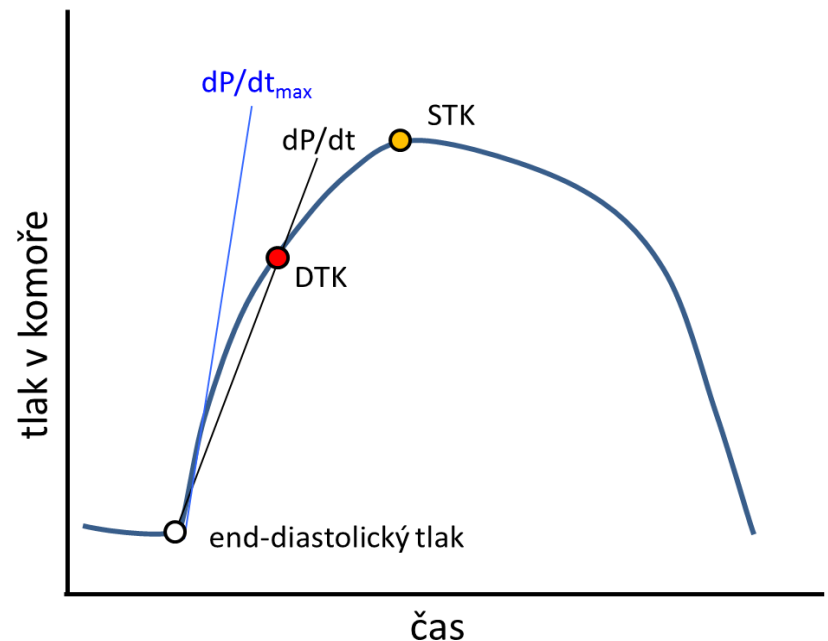
Indexy kontraktility odvozené z izovolumické fáze systoly

V praktikách jste dělali průměrnou rychlost nárůstu tlaku během izovolumické

kontrakce
$$dP/dt = \frac{DTK - EDP}{\text{čas IVK}}$$

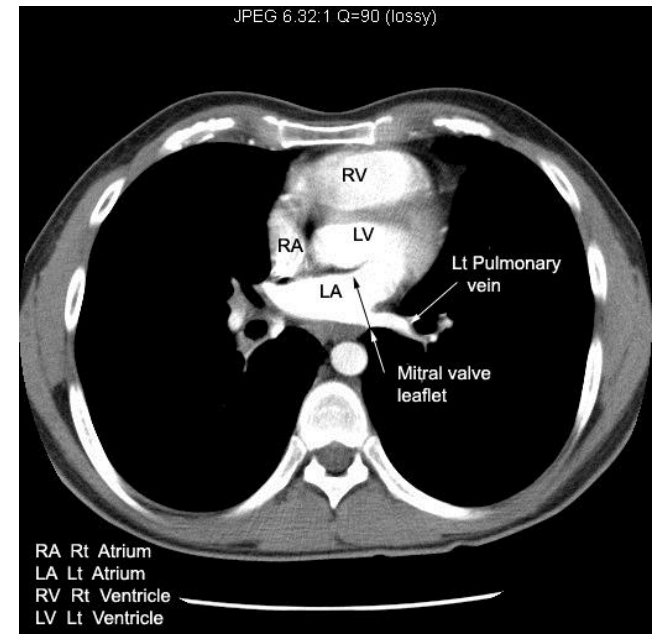
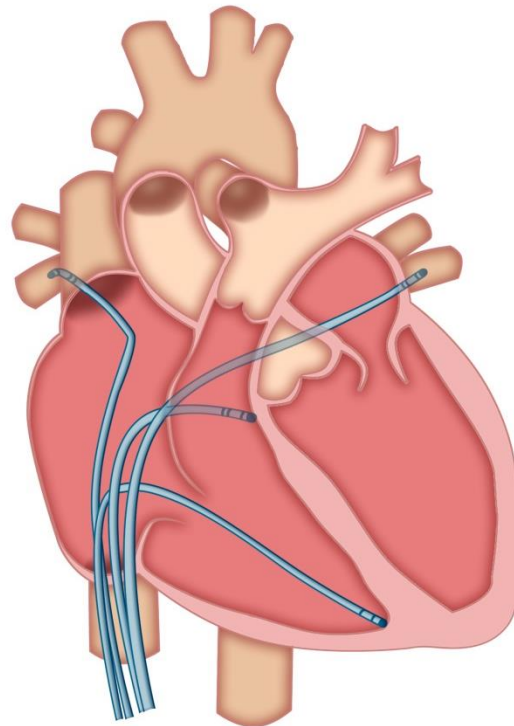
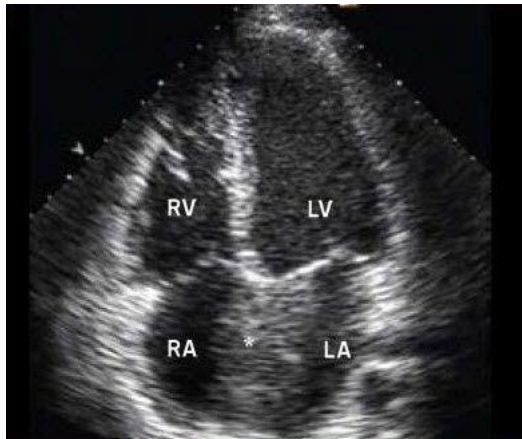
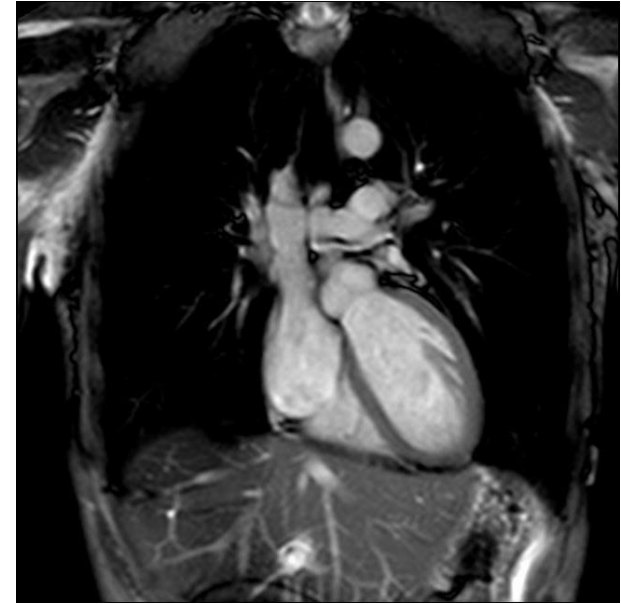
Častěji se však používá dP/dt_{\max} – nejvyšší rychlost nárůstu tlaku v komoře za čas Srdeční komora by měla vyvinout za krátký časový úsek dostatečný tlak, takže porucha kontraktility povede ke snižování těchto indexů.

Pozn. d znamená diferenci (u nespojitých veličin) nebo derivaci (u spojitých veličin), takže dT znamená změnu tlaku, dt znamená změnu času. Často se využívá znaku delta Δ



Metody vyšetření srdce

- Fonokardiografie – vyšetření srdečních ozev
- Echokardiografie - 2D, 3D, 4D, dopler
- Katetrizace – měření tlaků, teploty, průtoku, objemů, biopsie
- Jiné zobrazovací metody – MRI, rentgen, CT



A group of four owls is shown in a grassy field. The owls are brown and white with large yellow eyes. One owl in the center is looking to the left. There are four white text boxes and three white speech bubbles overlaid on the image. The text boxes contain the words 'medik', 'biomedicínský technik', and 'zdravotní sestry'. The speech bubbles contain the text 'WTF?' and a question in Czech: 'Nejsou zaměněné elektrody ve III svodu?'.

WTF?

Nejsou
zaměněné
elektrody ve
III svodu?

WTF?

WTF?

medik

zdravotní
sestry

biomedicínský
technik