
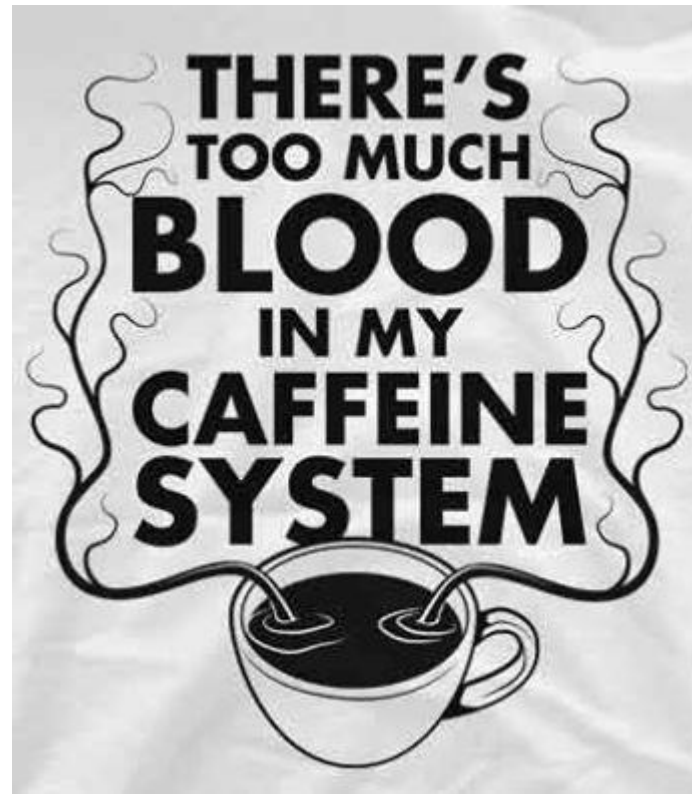


# **Fyziologie srdce**



**KEEP  
CALM  
AND...**

...ok, not THAT calm !



# 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

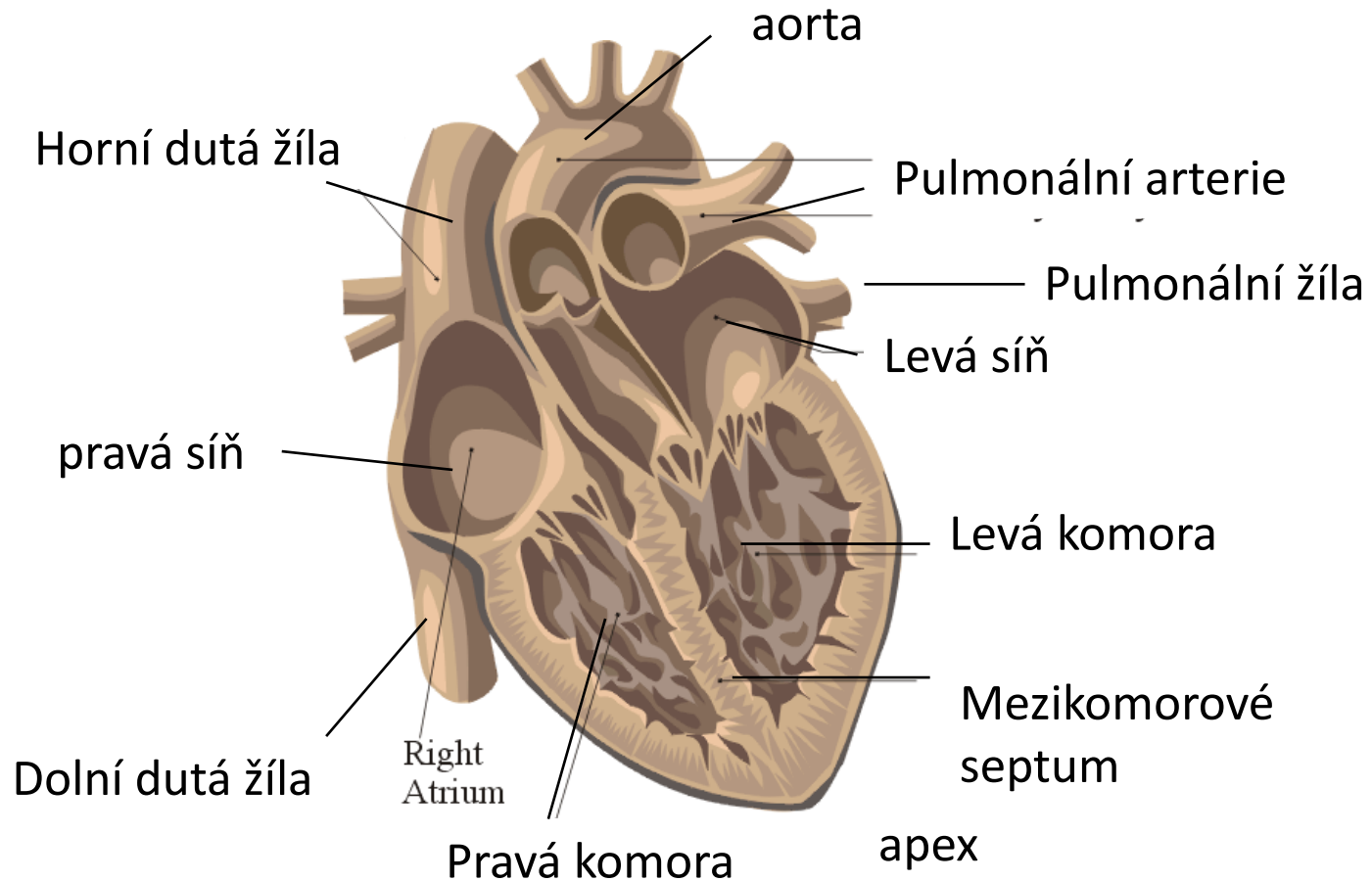


trochu komplikovanější, než se zdá....

# Morfologie – stavba srdce

Pravé a levé srdce jsou sériově zapojené pumpy.

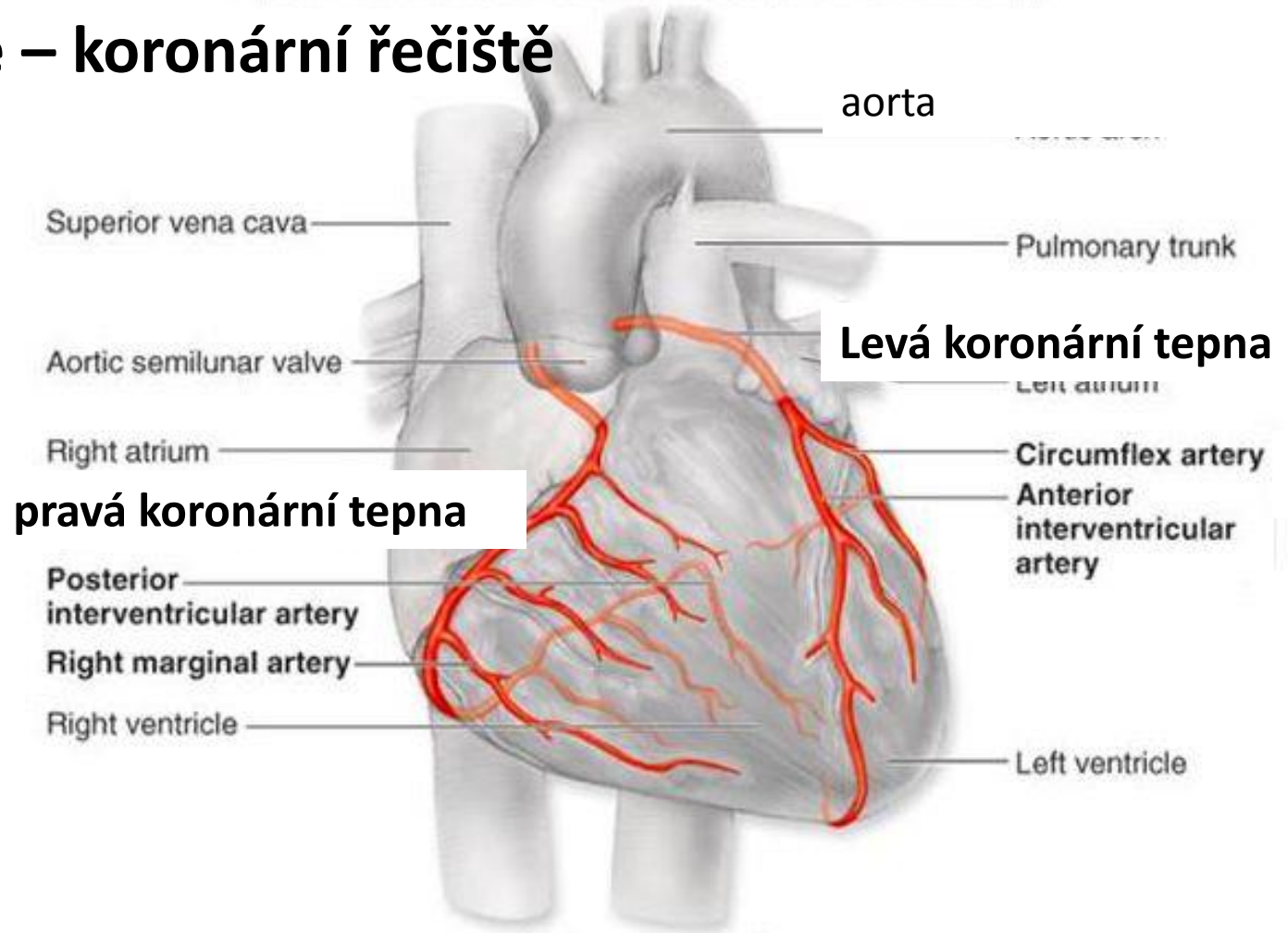
(pravé srdce – plíce – levé srdce – velký oběh – ....)



*Adapted from Corel Draw 9 Library*

[http://www.fpnotebook.com/\\_media/CvAnatomyHeartApicalFourChamberView.gif](http://www.fpnotebook.com/_media/CvAnatomyHeartApicalFourChamberView.gif)

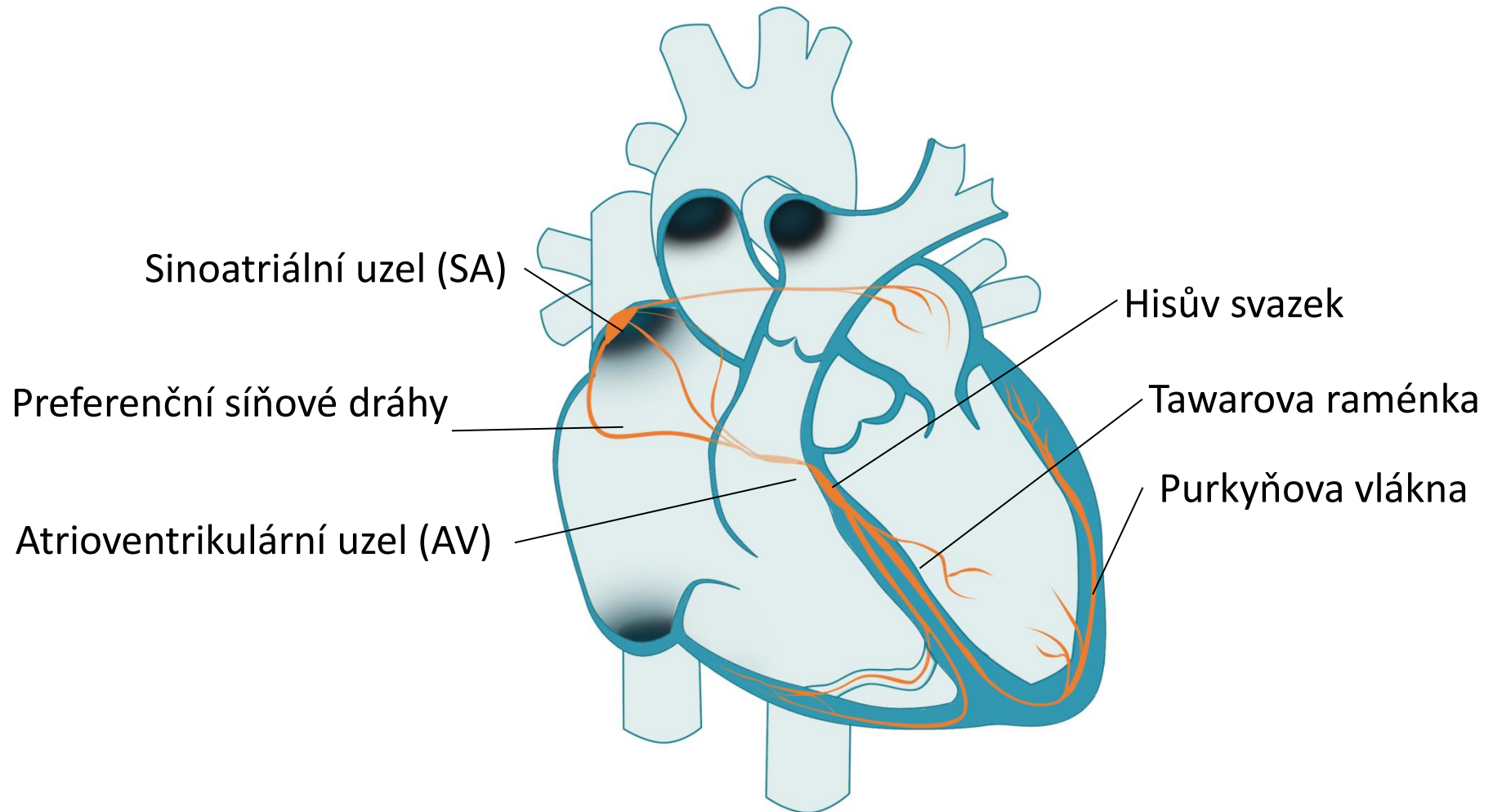
# Morfologie – koronární řečiště



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



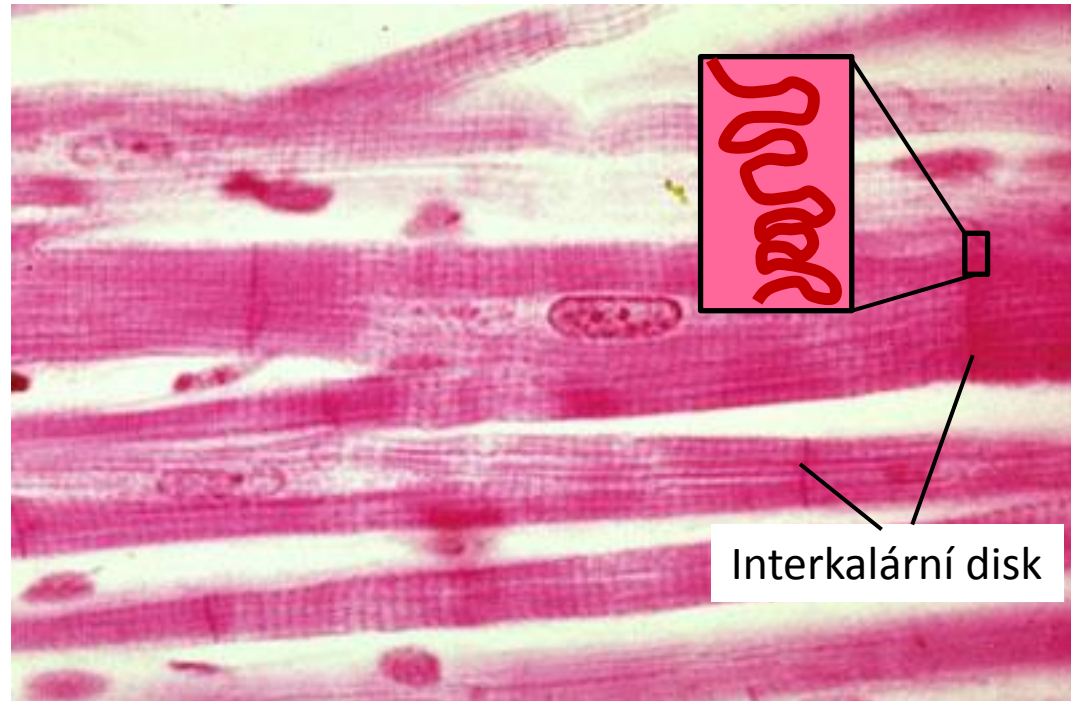


# Histologie

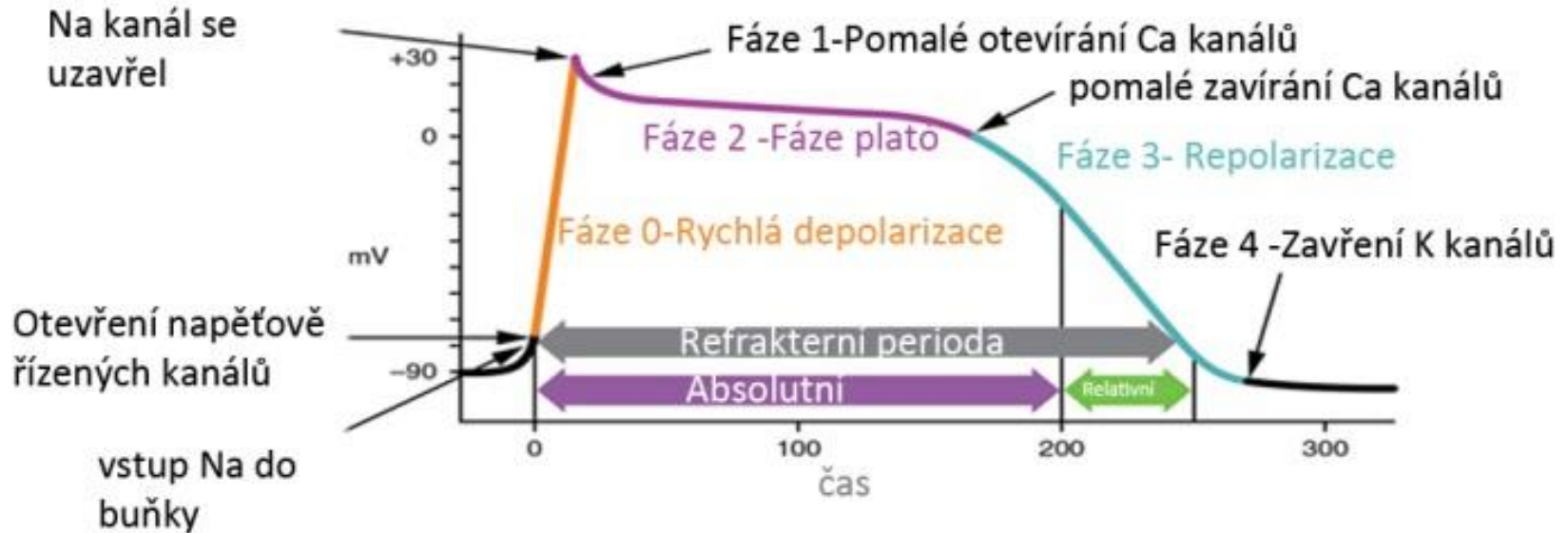
- Vlastnosti srdečních buněk: **excitabilita, kontraktilita, vodivost, automaticnost, rytmičnost**
  - **Buňky převodního systému** (primárně tvorba a vedení AP, sekundárně kontrakce)
  - **Buňky pracovního myokardu** síňového a komorového (primárně kontrakce, sekundárně vedení AP)
  - Další pojivové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

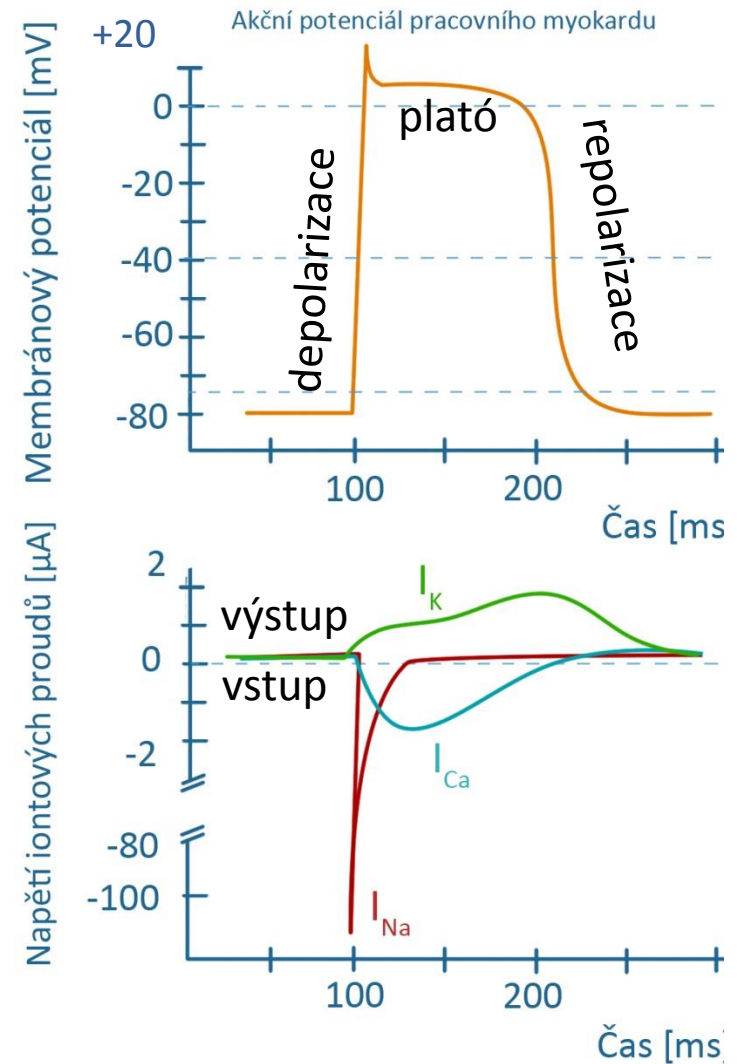
- V průběhu AP nelze vyvolat další depolarizaci, buňka je v **refrakterní fázi**, čímž brání vzniku tetanického stahu
- Má několik fází
  - **Depolarizace**
  - **Fáze plató** – její hlavní funkcí je prodloužení refrakterity buňky (**absolutní refrakterita**, nelze vyvolat další AP)
  - **Repolarizace**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

# Akční potenciál – pracovní myokard

Akční potenciál (AP)

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

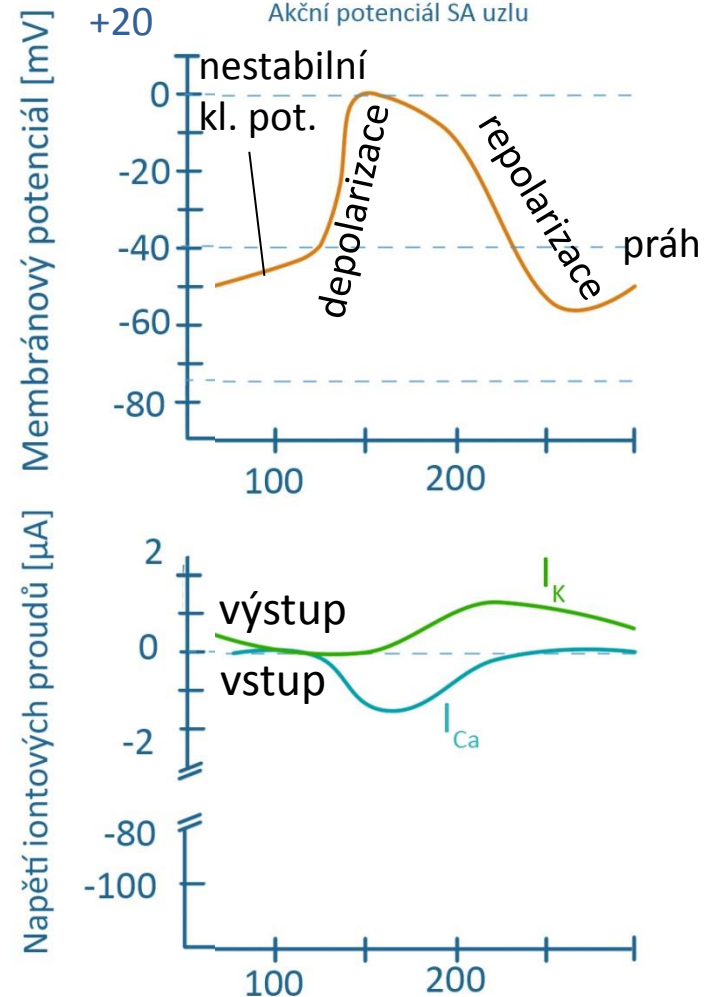
**Akční potenciál (AP)**

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



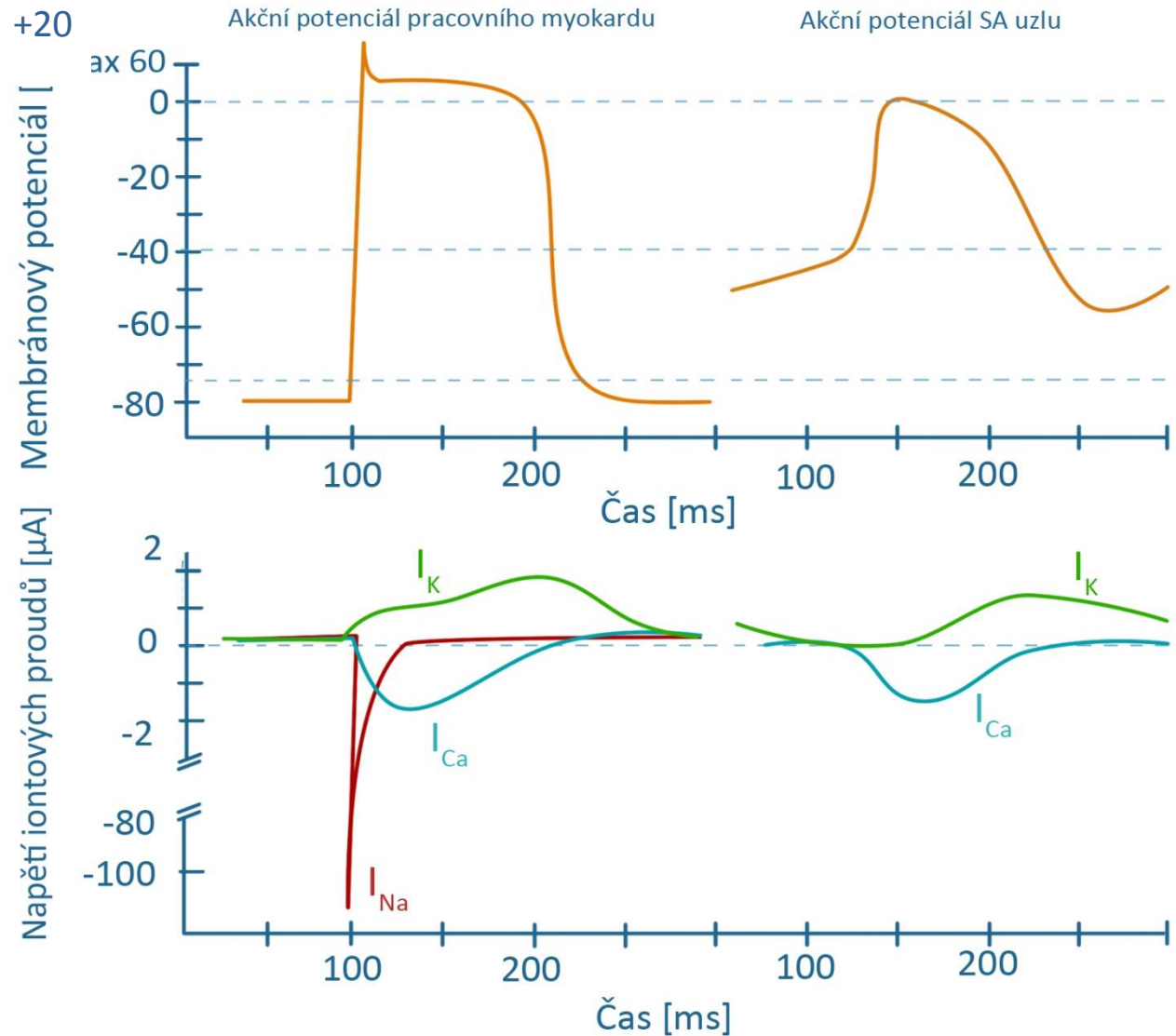
# Akční potenciál pracovní a pacemakerové buňky

## Pracovní myokard

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

## Pacemakerová buňka

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



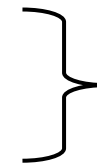


# Převodní systém srdeční – gradient srdeční automacie

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

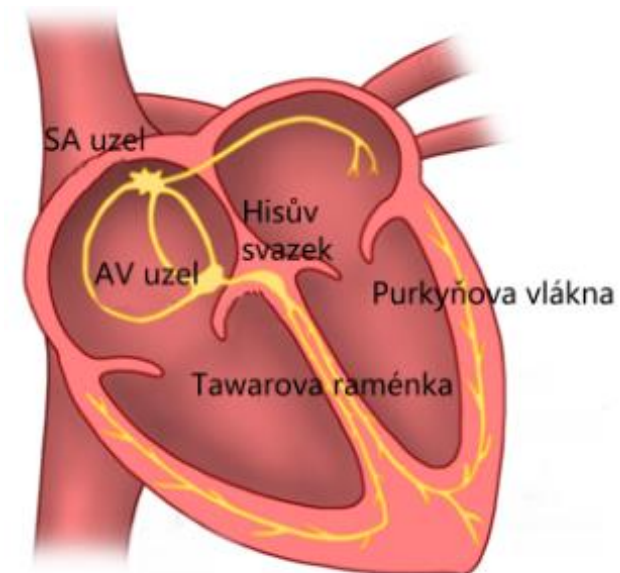
Sinusový rytmus – vzruch začíná v SA uzlu

Junkční rytmus – vzruch se tvoří v AV uzlu

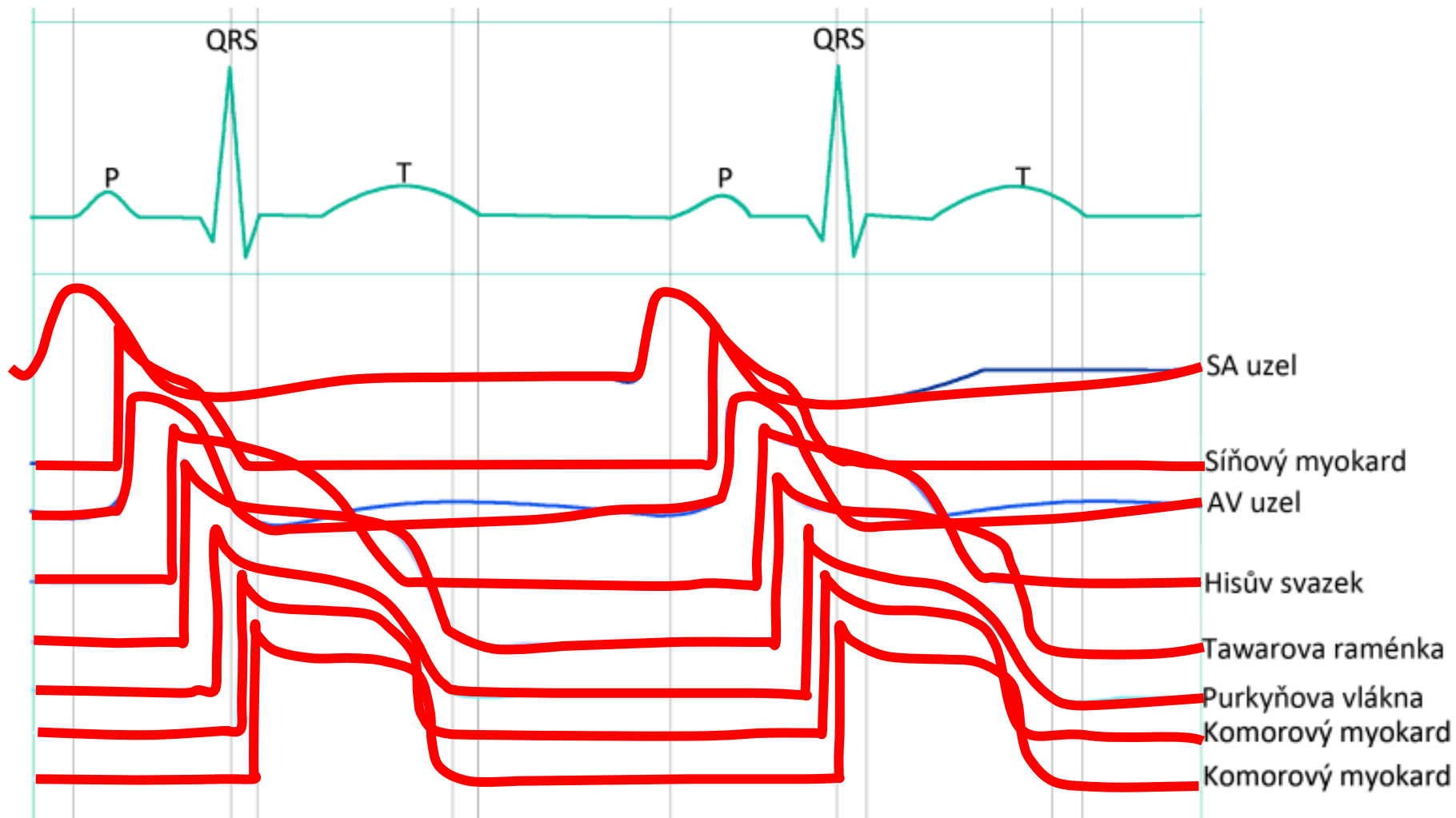
Aktivace komorového myokardu – z vnitřní strany k vnější

Repolarizace komorového myokardu – opačným směrem

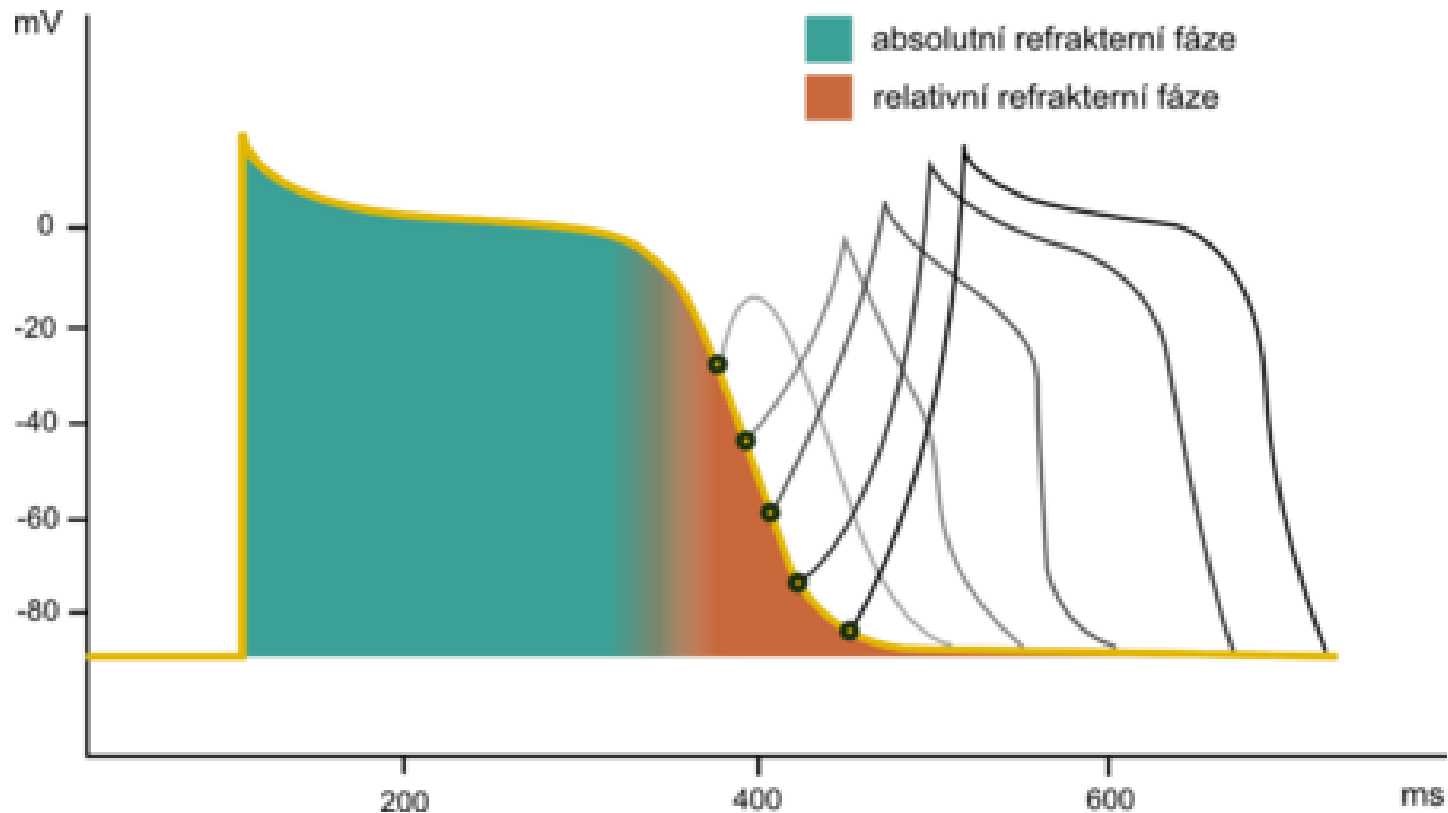
Pozn: vlastní frekvence je frekvence vzniku AP neovlivněná nervovým a hormonálním řízením



# Gradient akčního potenciálu



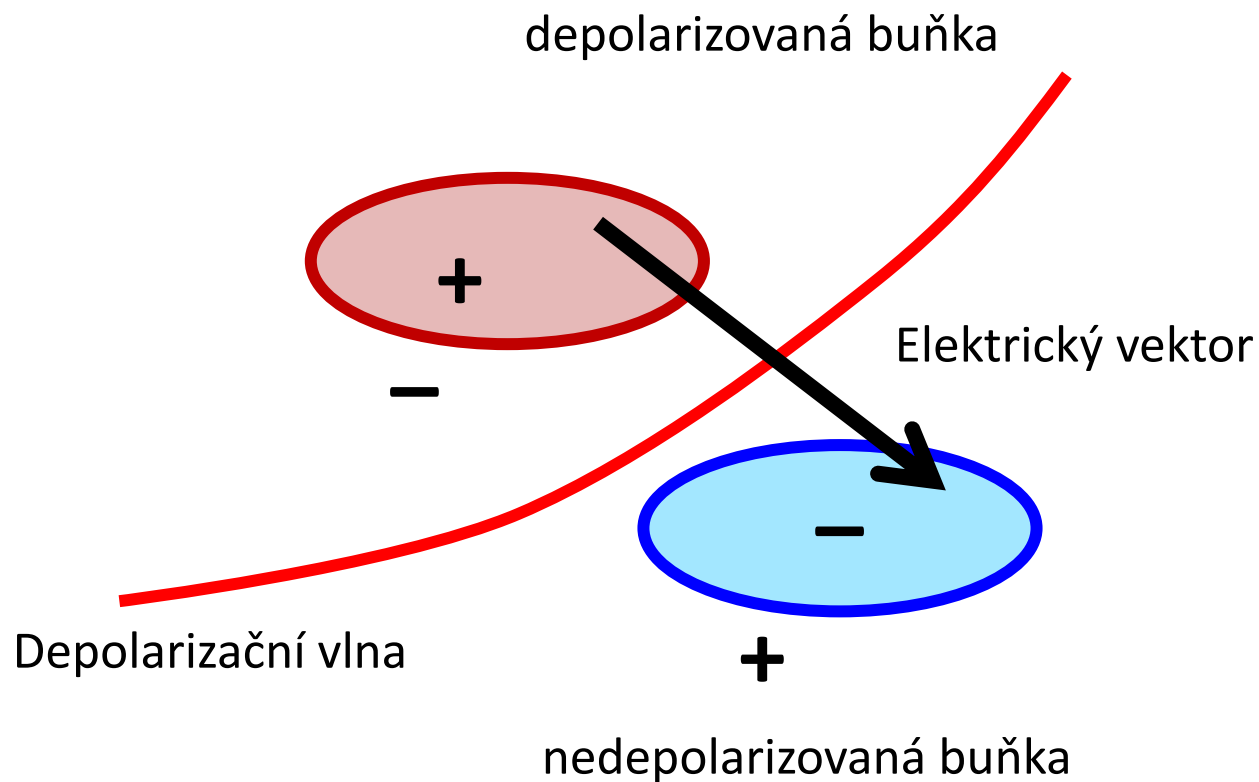
Následná depolarizace - vznik AP v relativní refrakterní fázi – patologické  
(netřeba znát ke zkoušce z fyziologie)





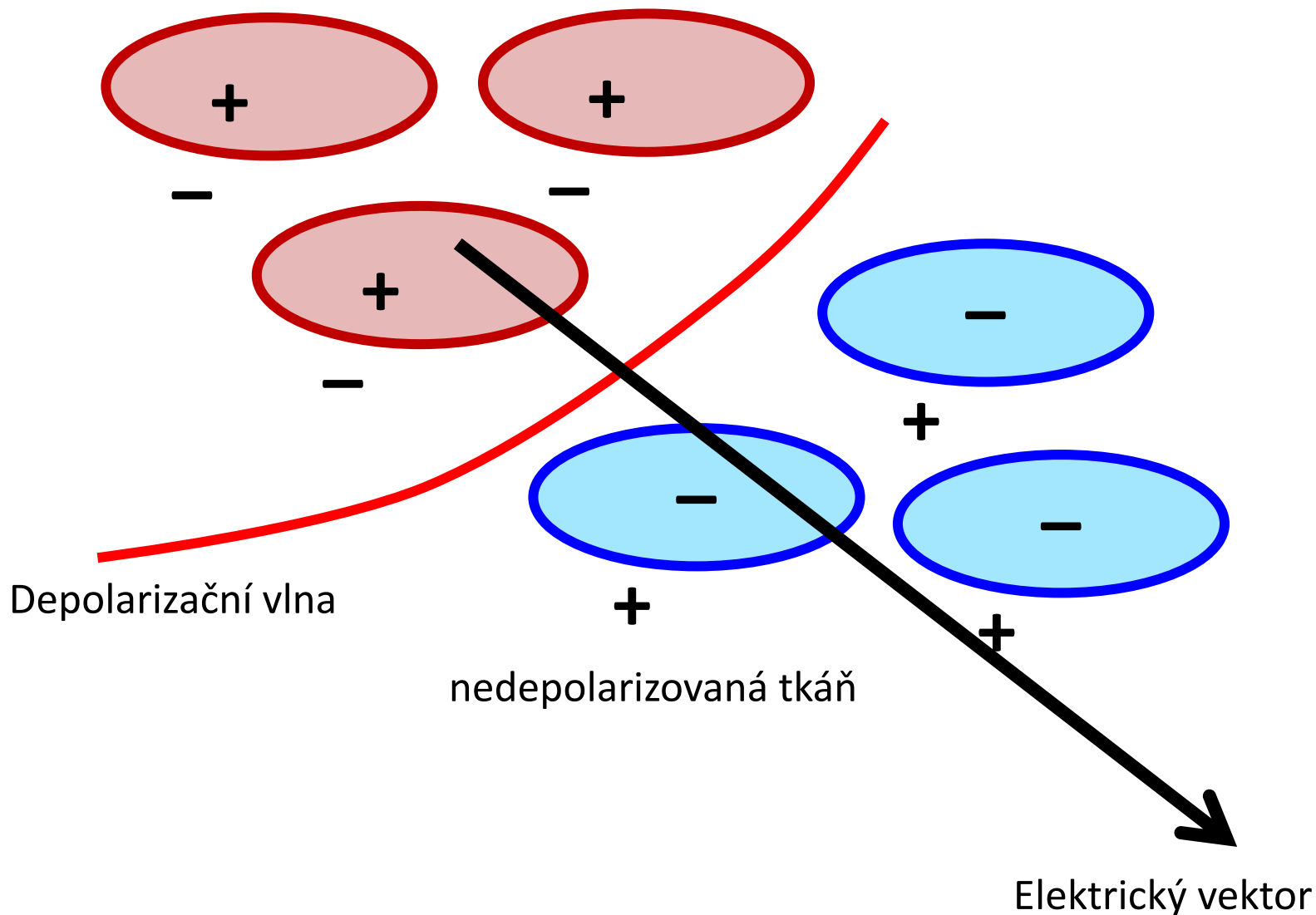
# Elektrický dipól

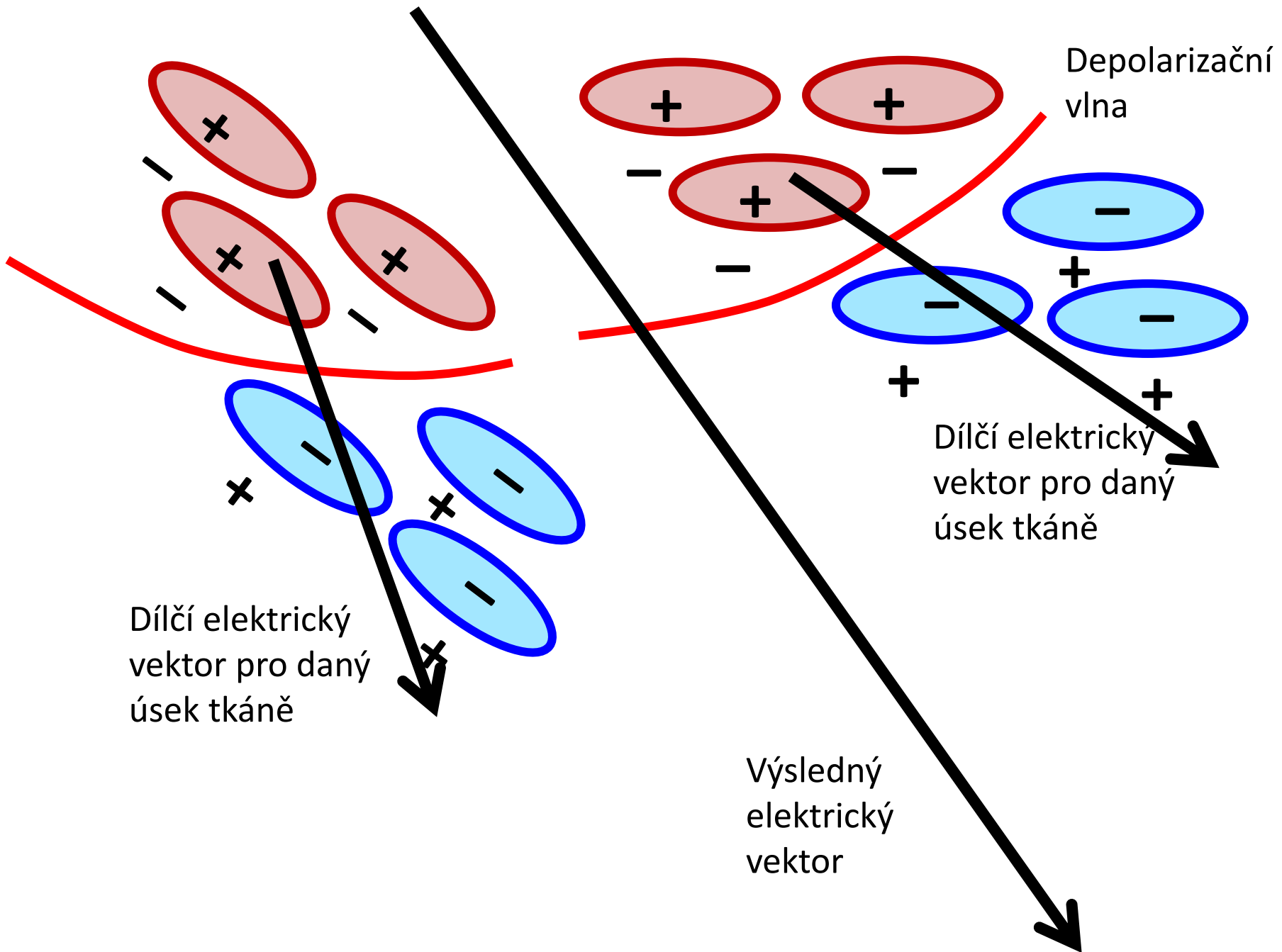
EKG: Elektrická aktivita srdce měřená z povrchu těla



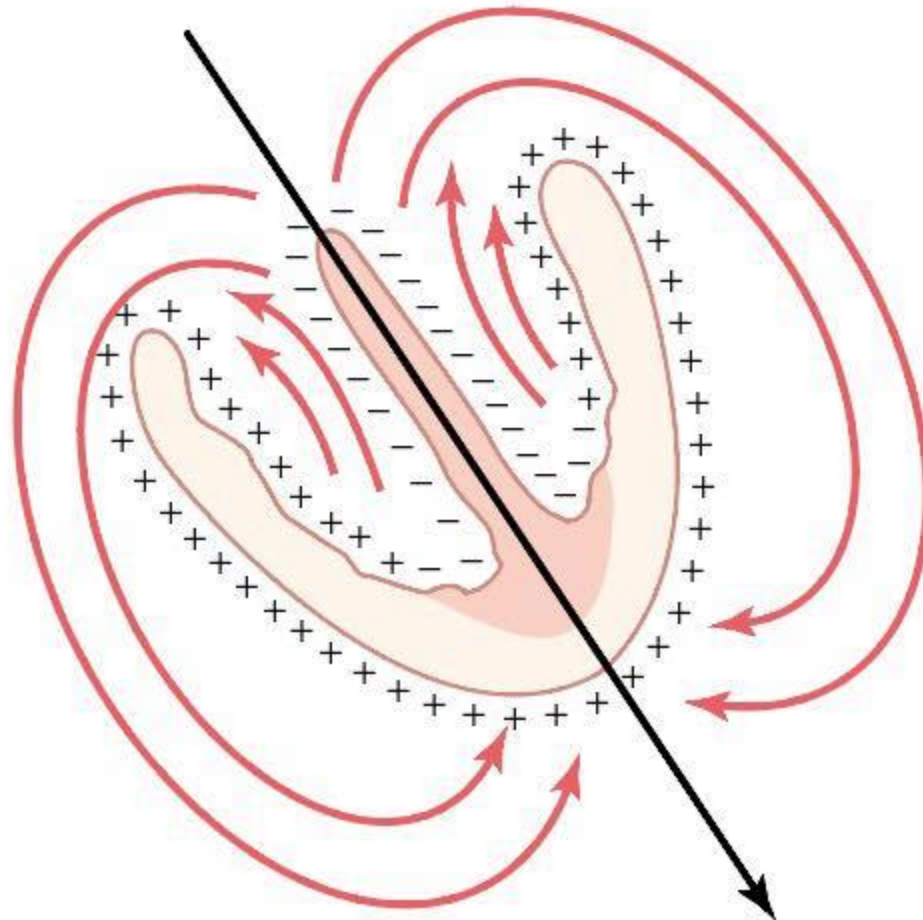
# Elektrický dipól

depolarizovaná tkáň





# Elektrický dipól



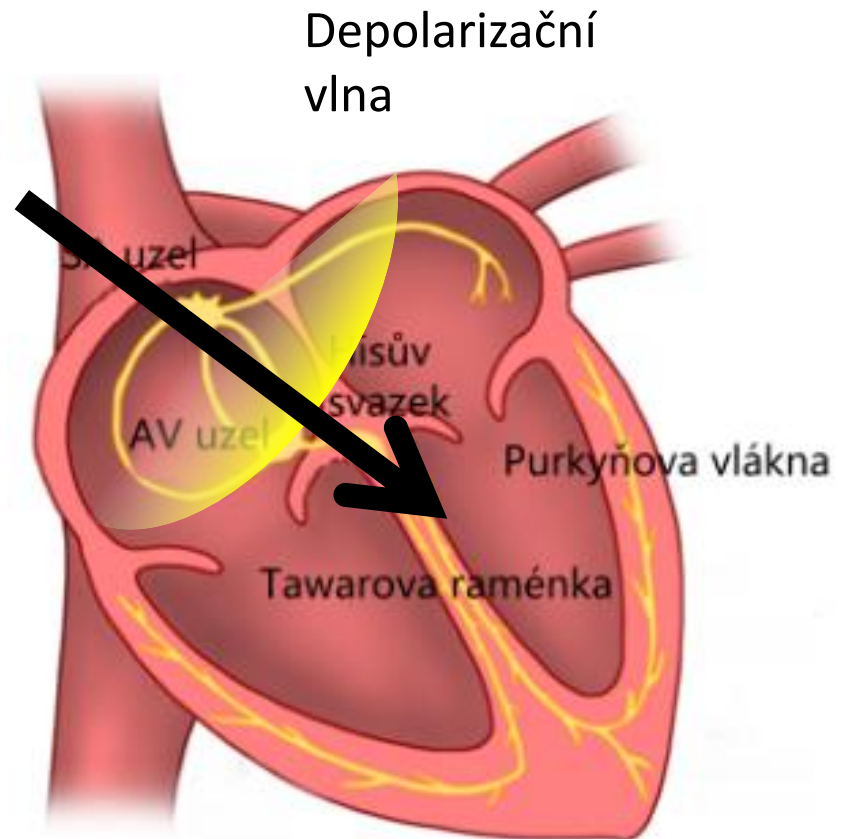
# Elektrokardiografie

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

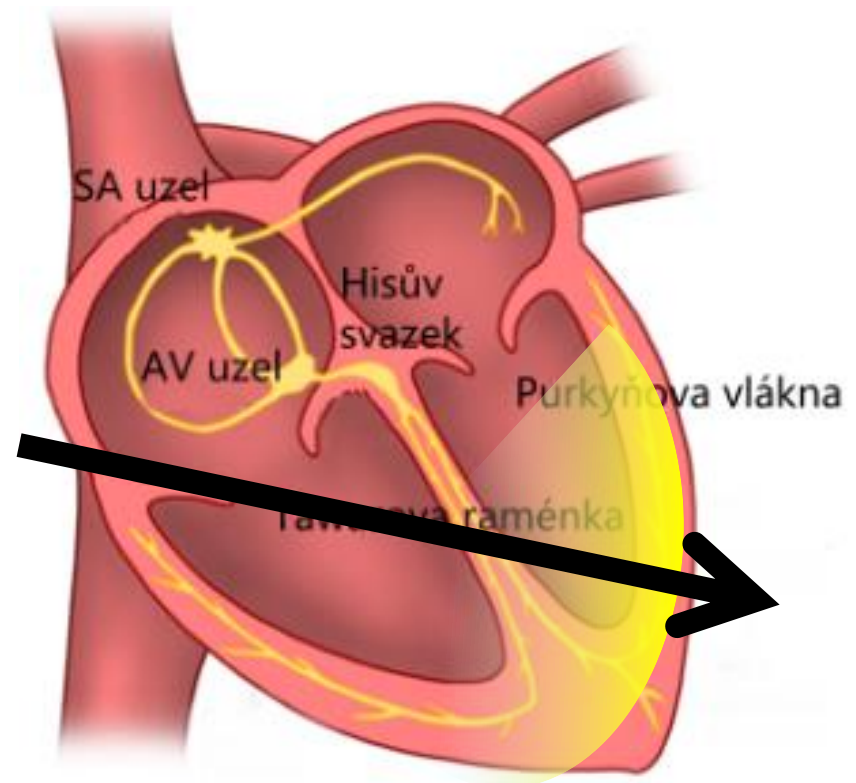
**Elektrický vektor srdeční** vzniká součtem dílčích elektrických vektorů v srdci

Elektrický vektor má v daném čase

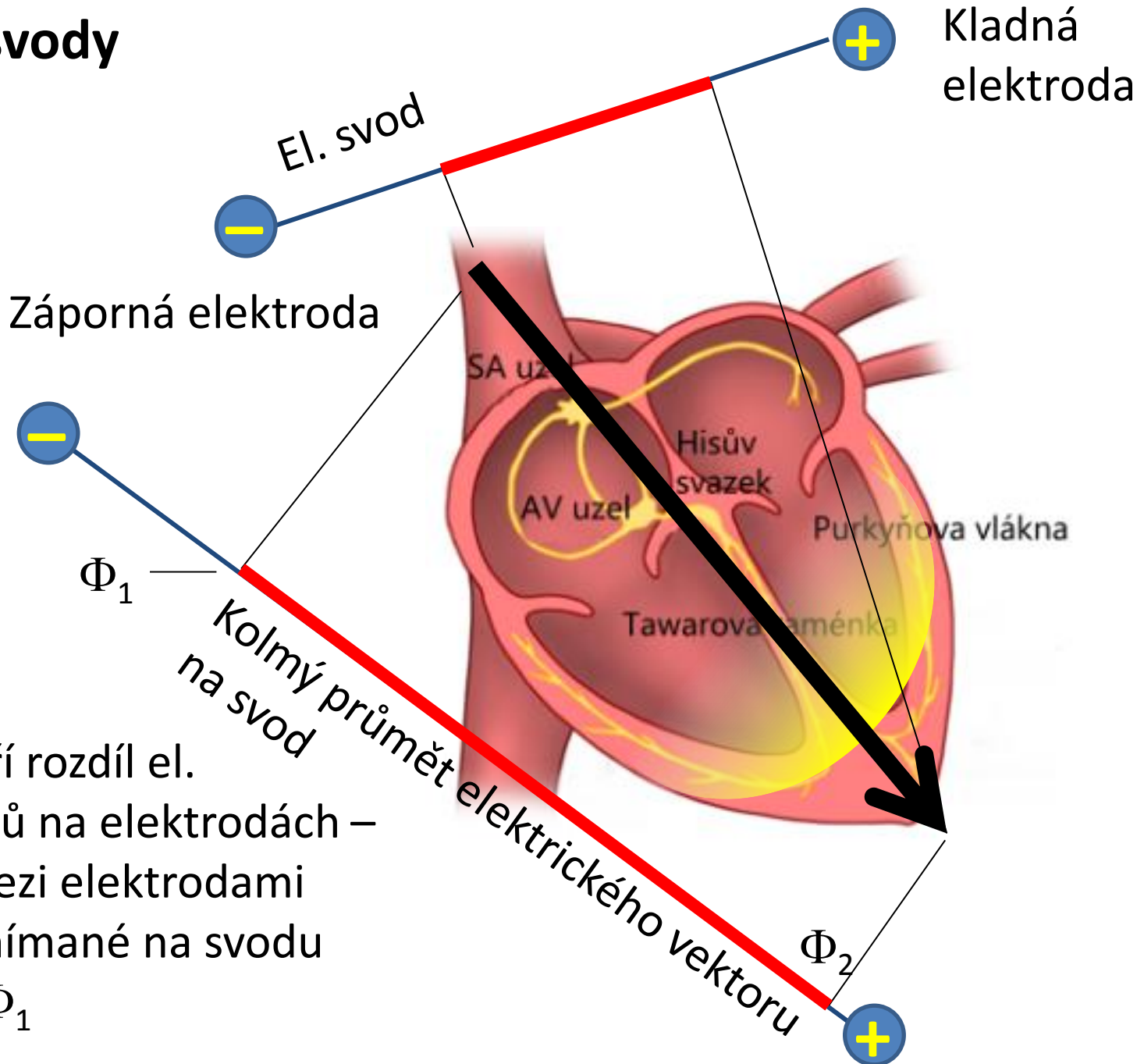
- **Velikost** – určena počtem buněk, které mění svoji polaritu v daném směru
- **Směr** - kolmý na depolarizační vlnu

**El. vektor je proměnlivý v čase**

(tak, jak se šíří depolarizační nebo repolarizační vlna)



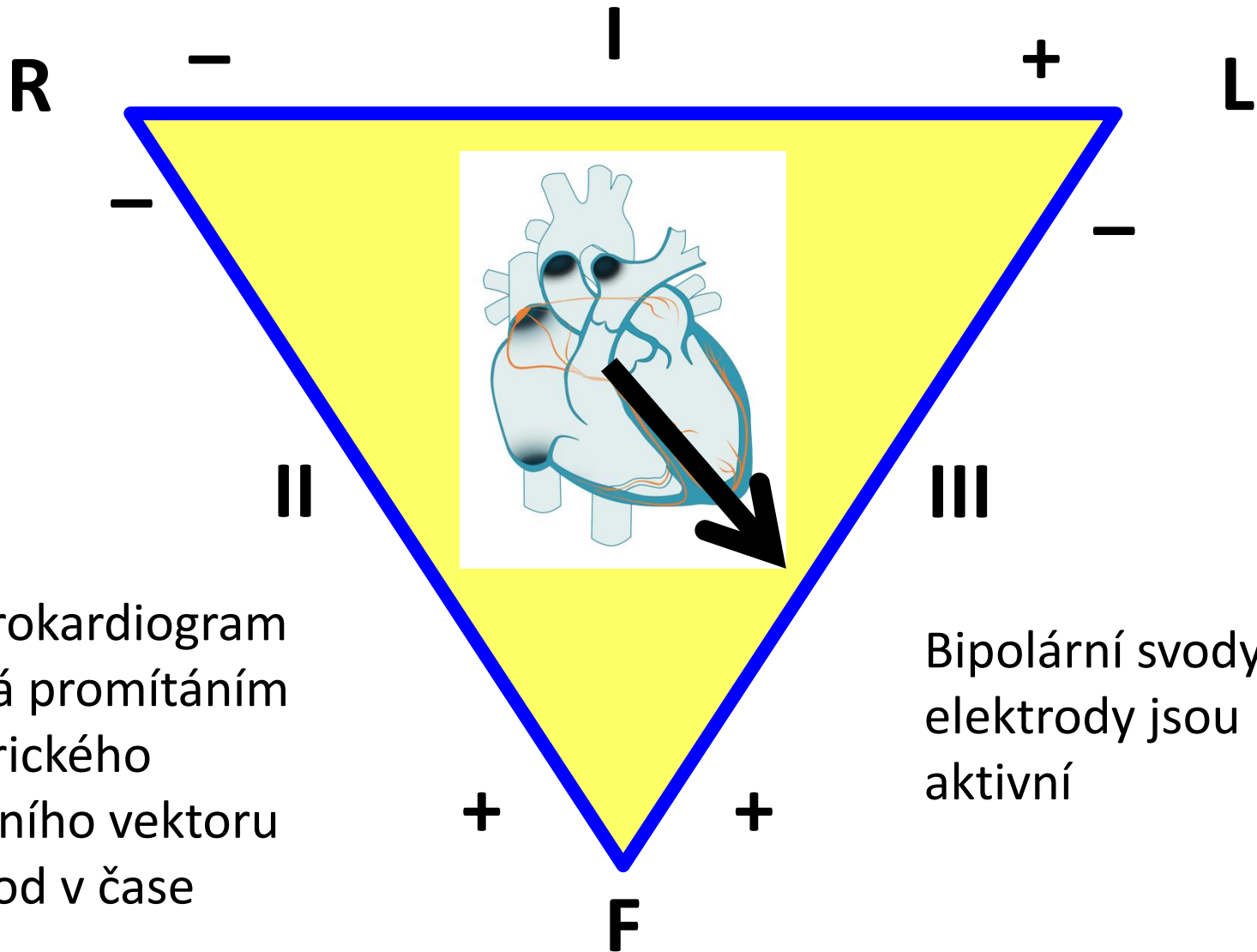
# EKG svody



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

$$V = \Phi_2 - \Phi_1$$

# EKG – základní, bipolární (Einthovenovy svody)

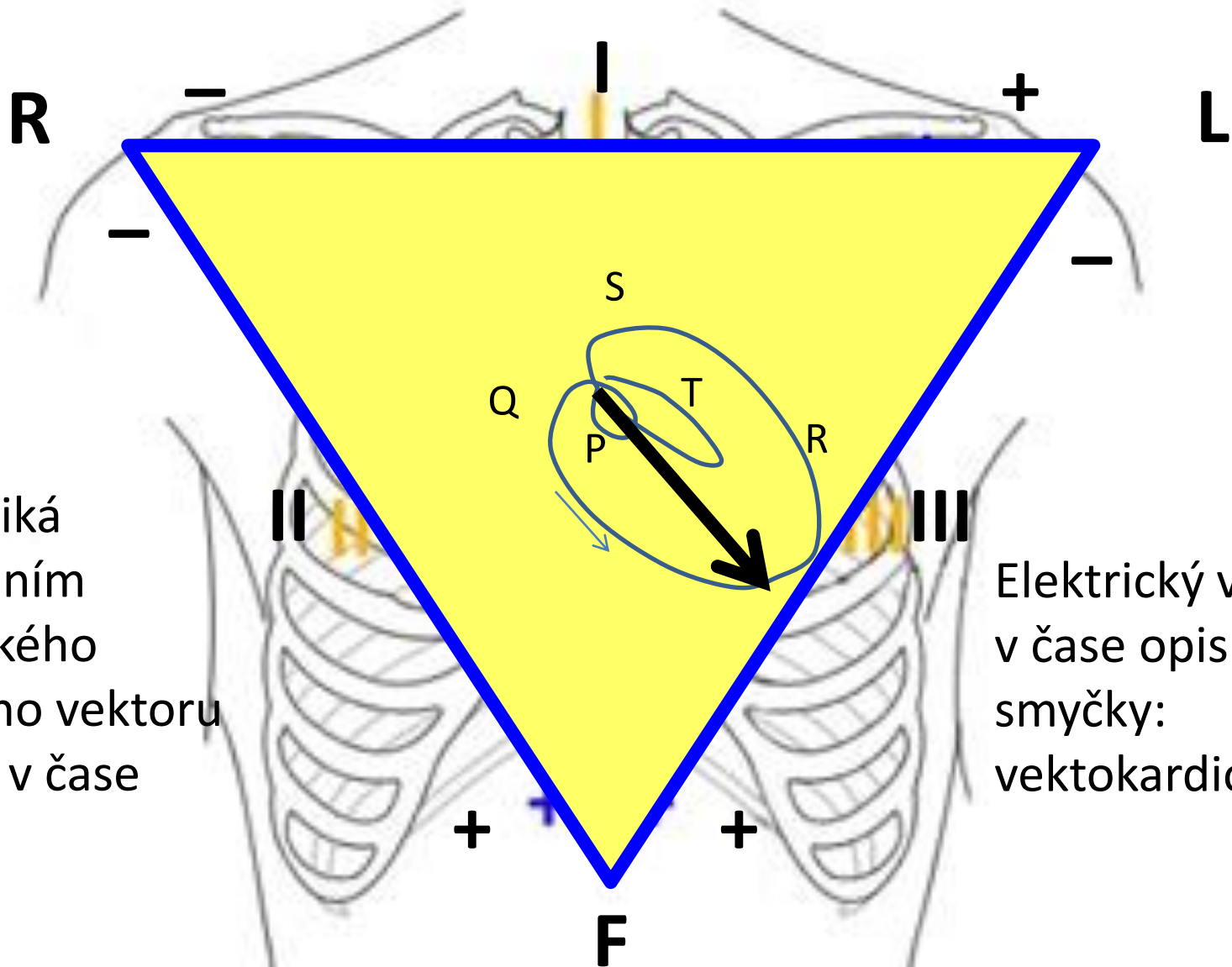


Elektrokardiogram vzniká promítáním elektrického srdečního vektoru na svod v čase

Bipolární svody: obě elektrody jsou aktivní



# EKG – základní, bipolární (Einthovenovy svody)



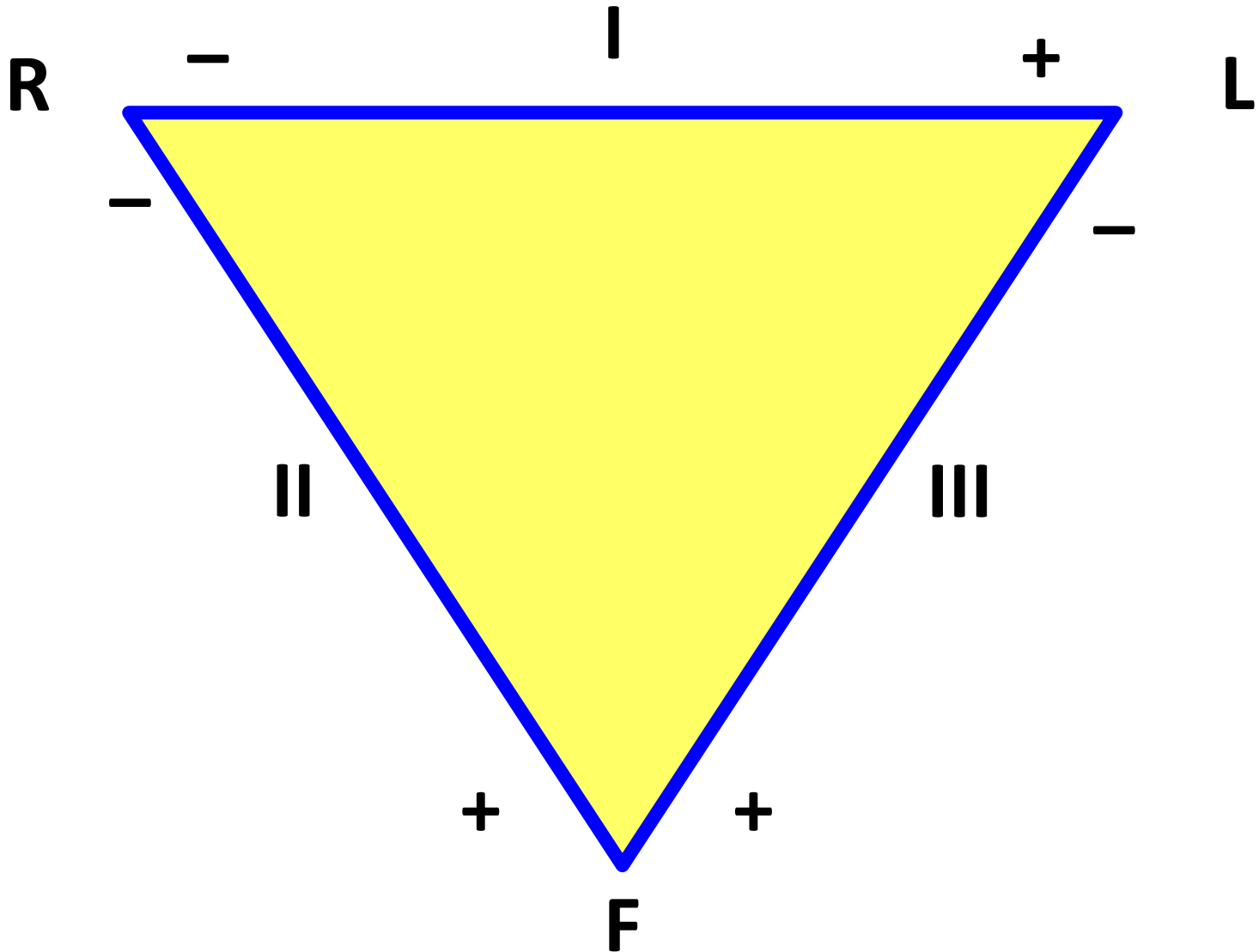
EKG vzniká promítáním elektrického srdečního vektoru na svod v čase

Elektrický vektor v čase opisuje tři smyčky: vektokardiogram

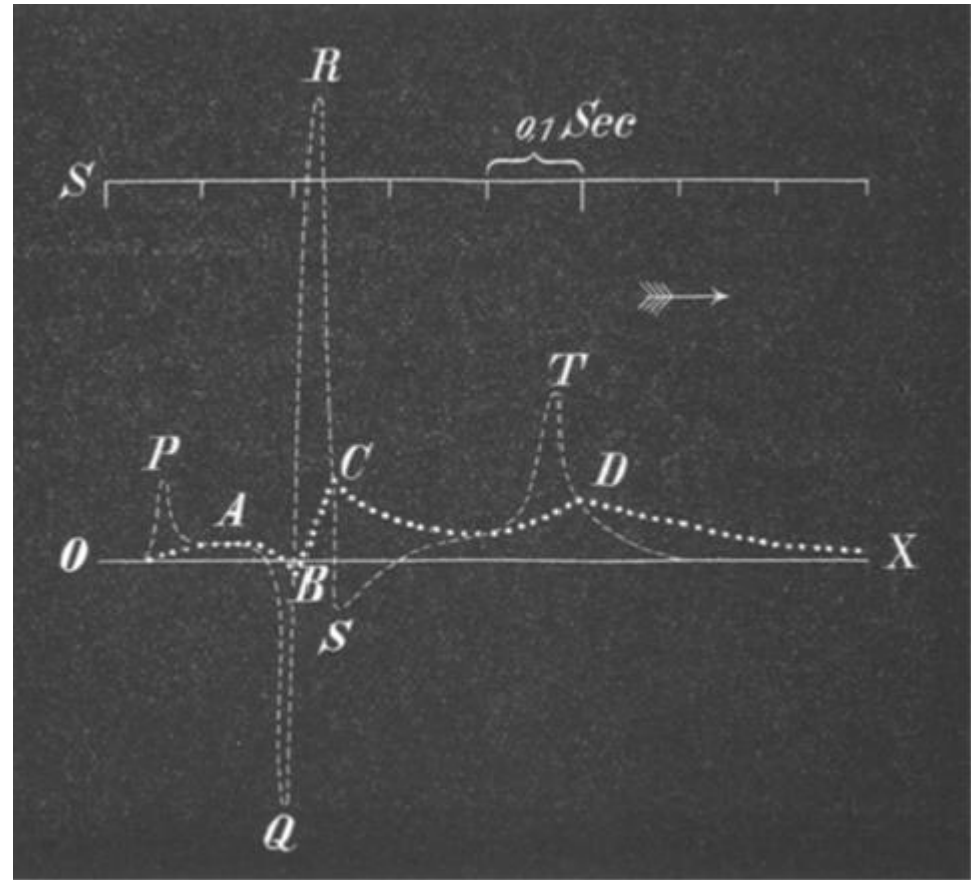
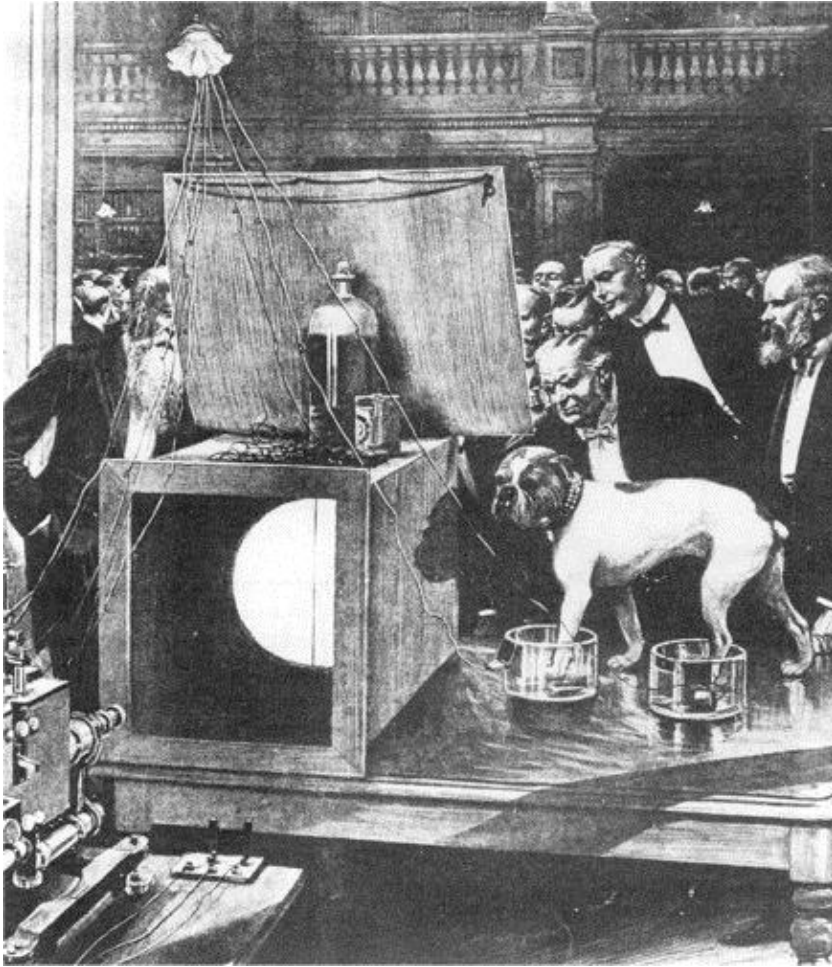
# EKG – základní (Einthovenovy svody)

video

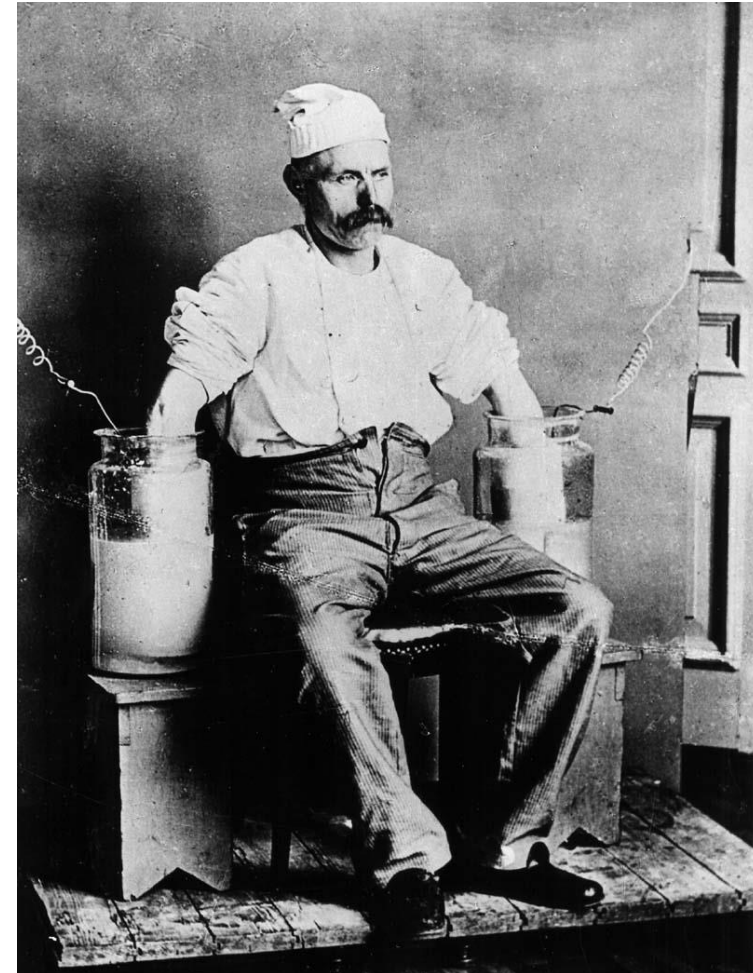
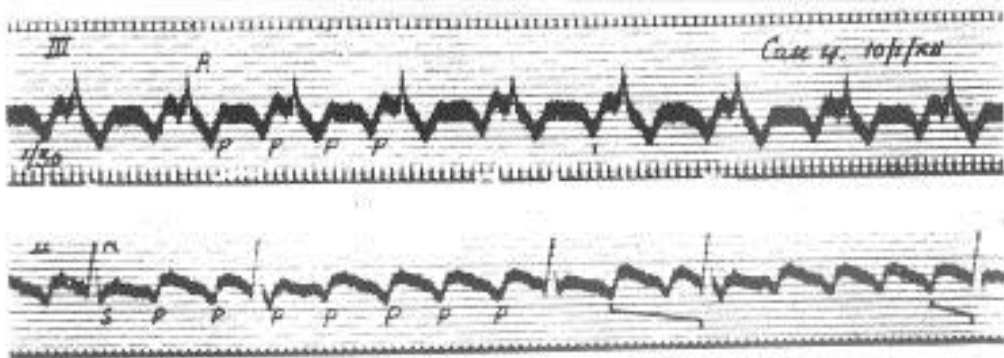
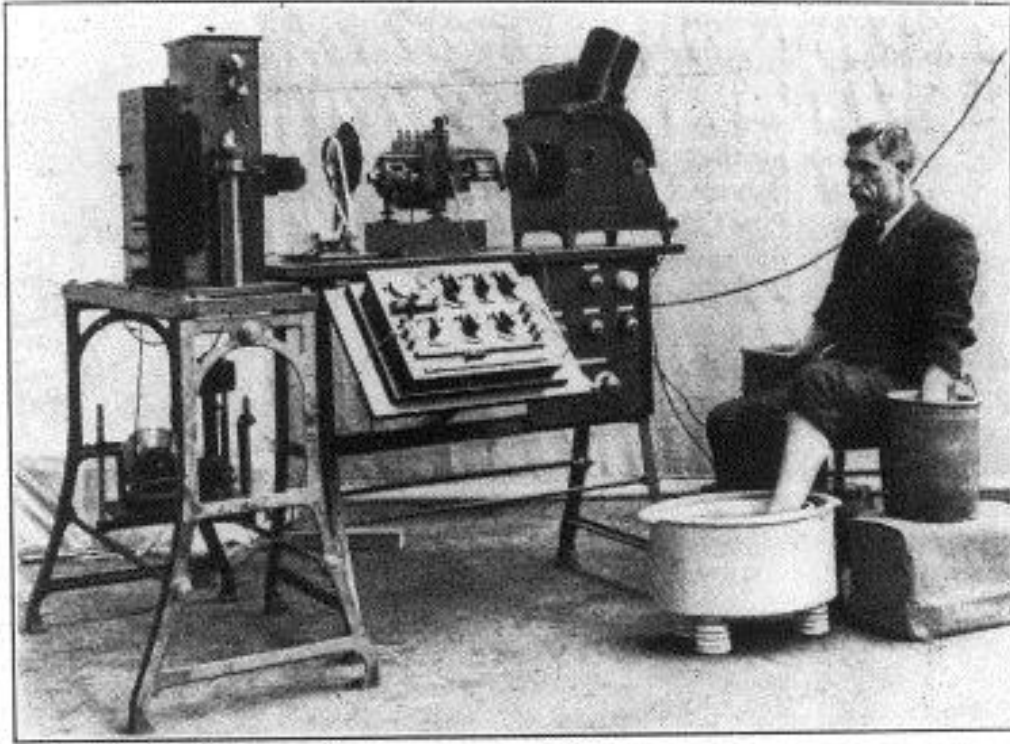
# EKG – základní (Einthovenovy svody)



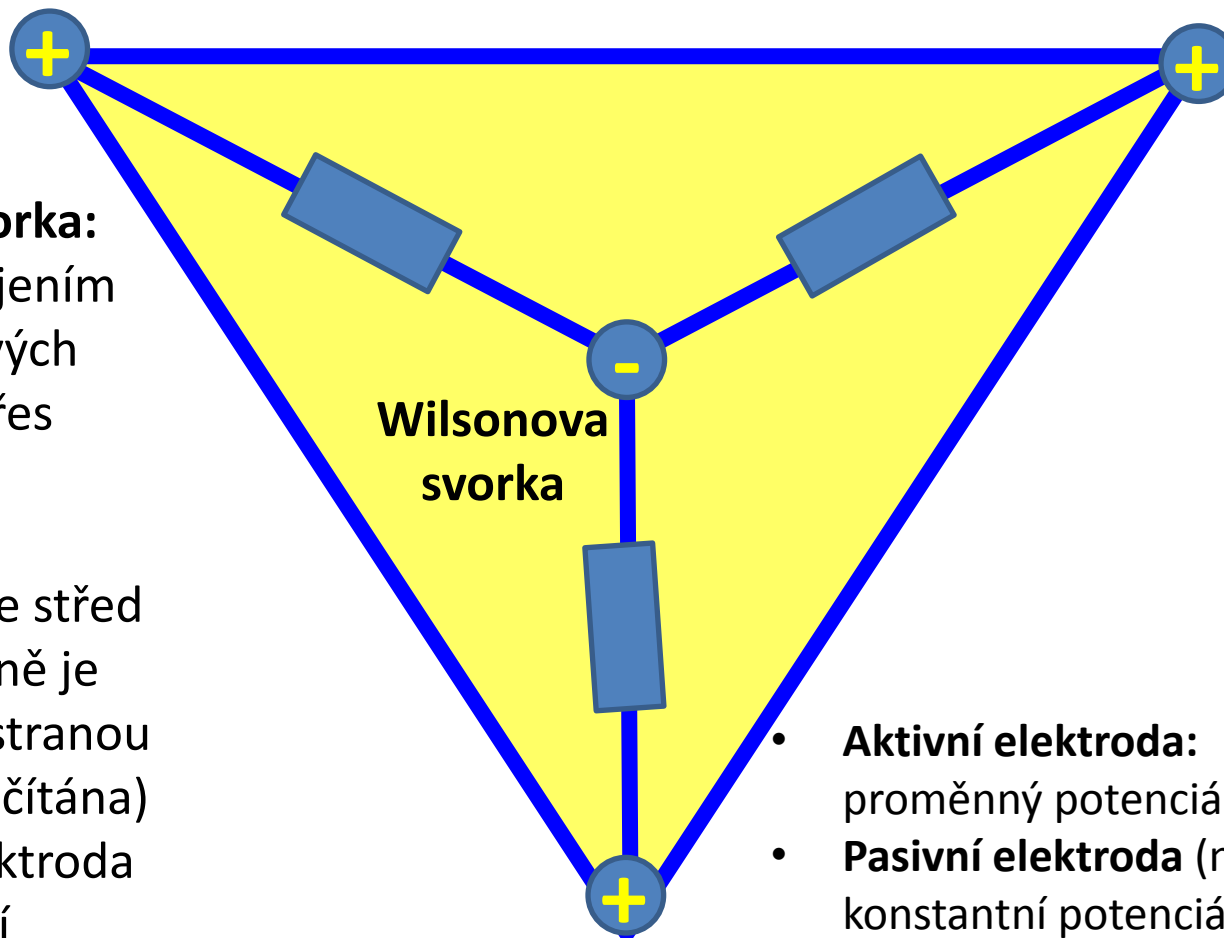
# EKG - historie



# EKG - historie



# EKG – Wilsonova svorka



## Wilsonova svorka:

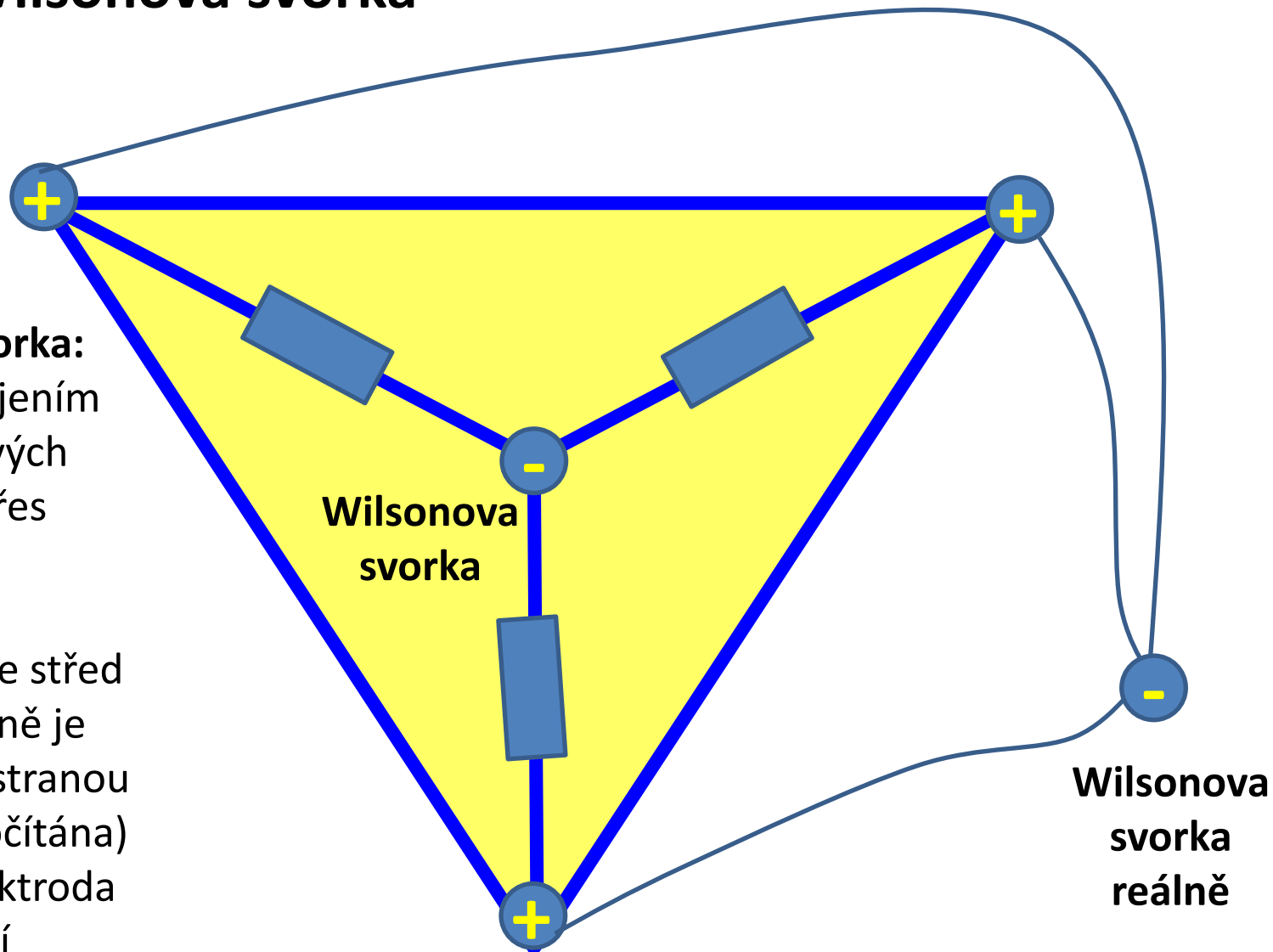
- Vzniká spojením končetinových elektrod přes odpory
- elektricky představuje střed srdce (reálně je vyvedena stranou nebo dopočítána)
- Pasivní elektroda (konstantní potenciál)

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

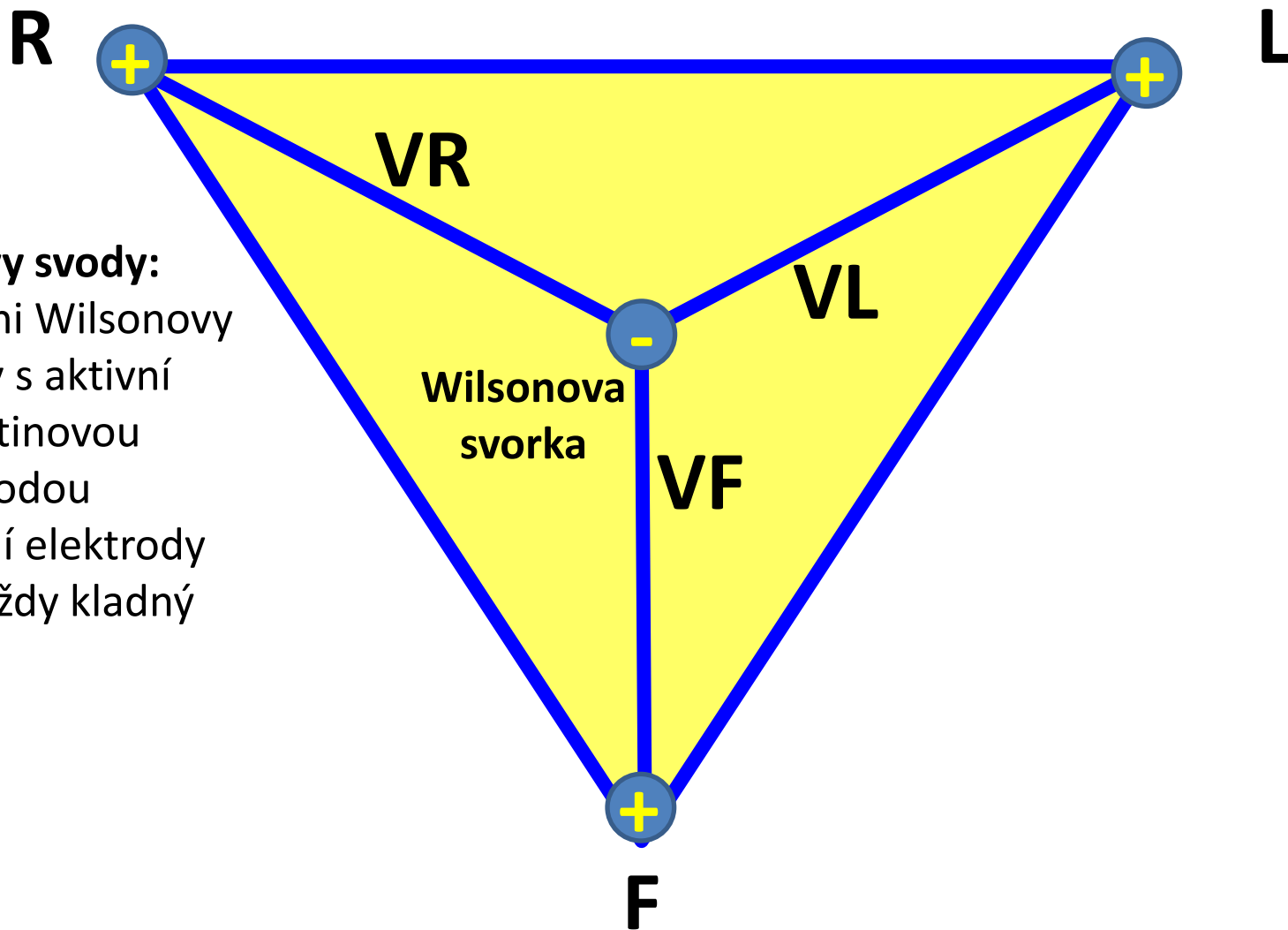
# EKG – Wilsonova svorka

## 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**



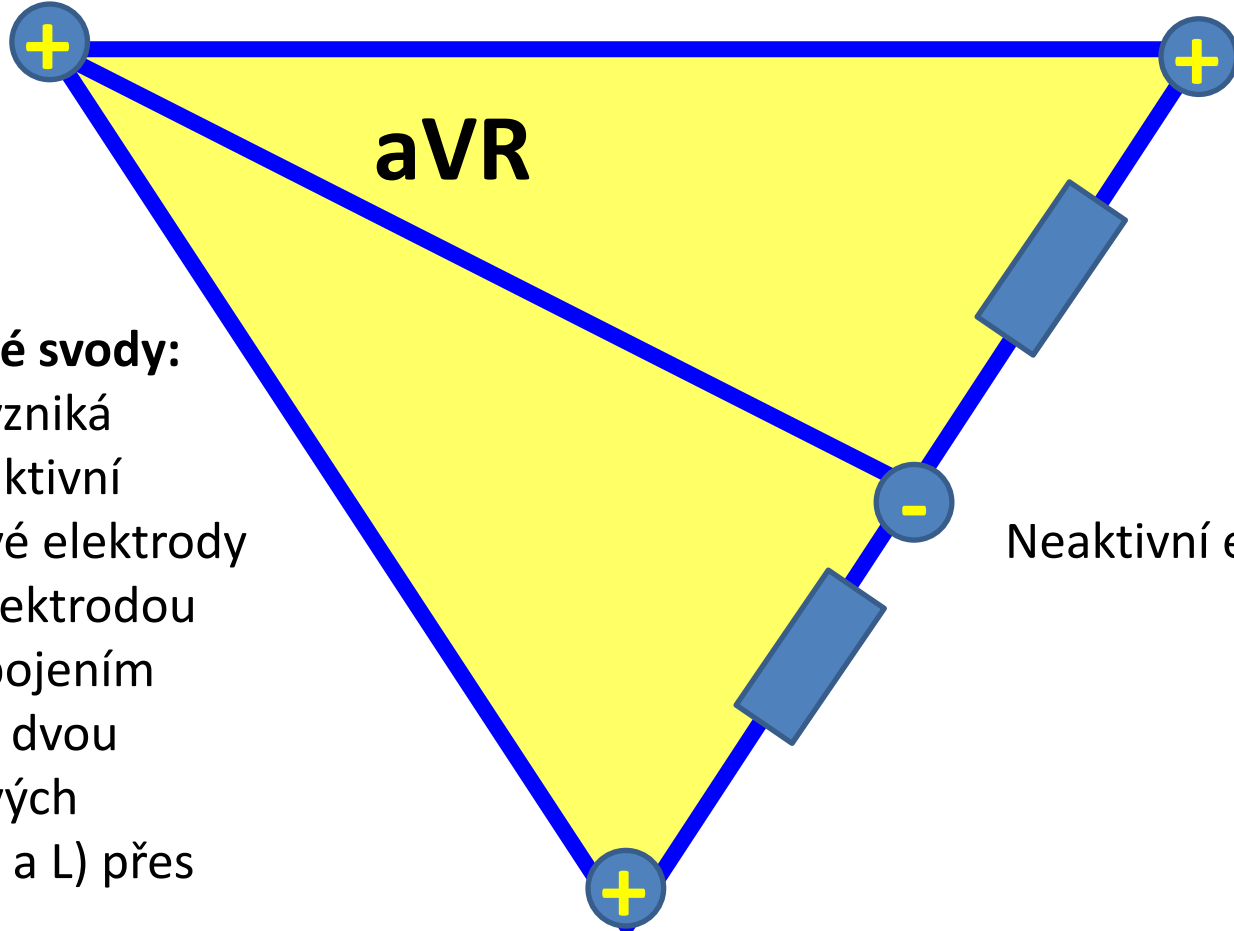
## augmentované svody:

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

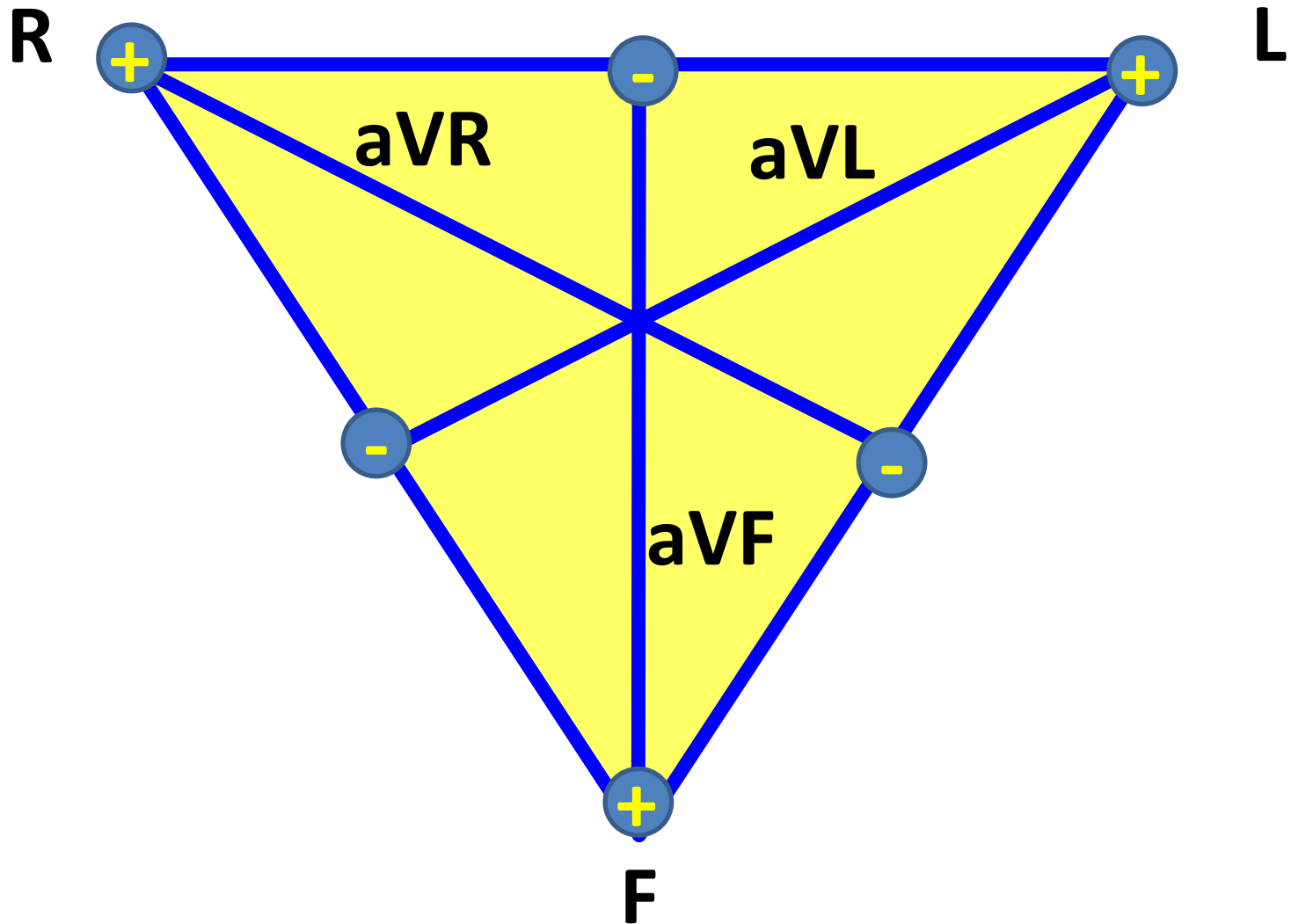
Neaktivní elektroda



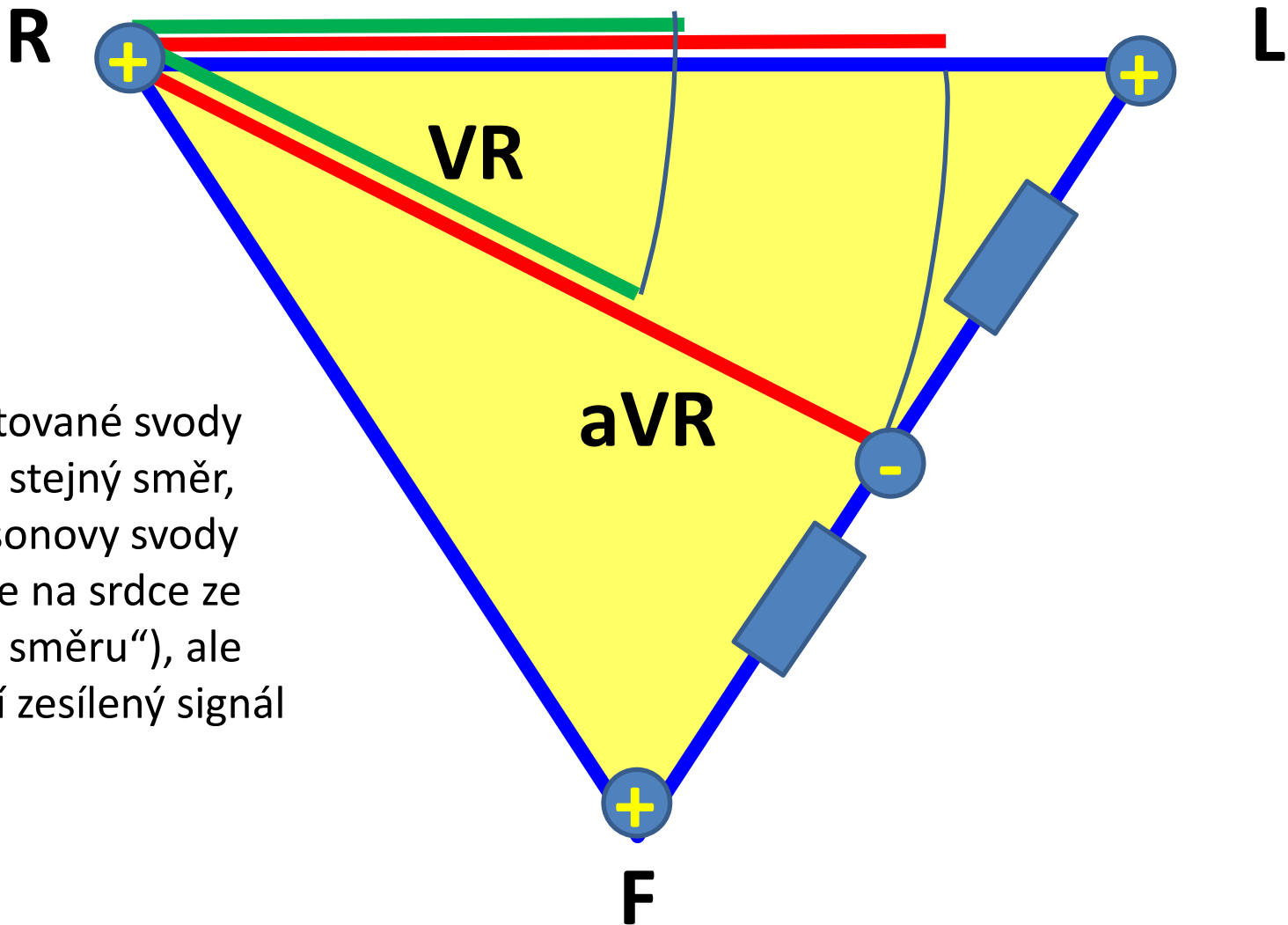
**F**



# EKG – augmentované Golbergerovy svody (unipolární)

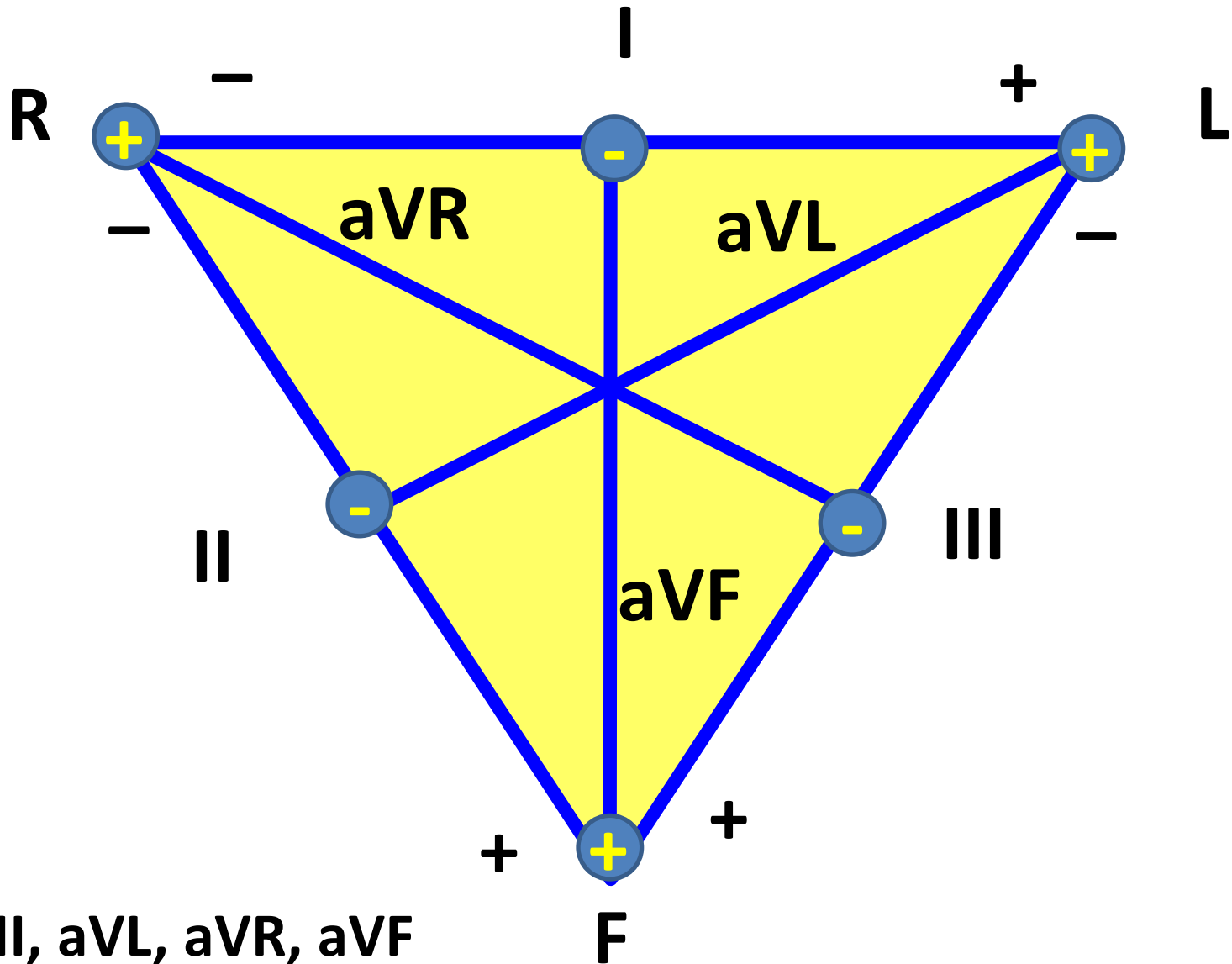


# EKG – Wilsonovy a augmentované svody



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

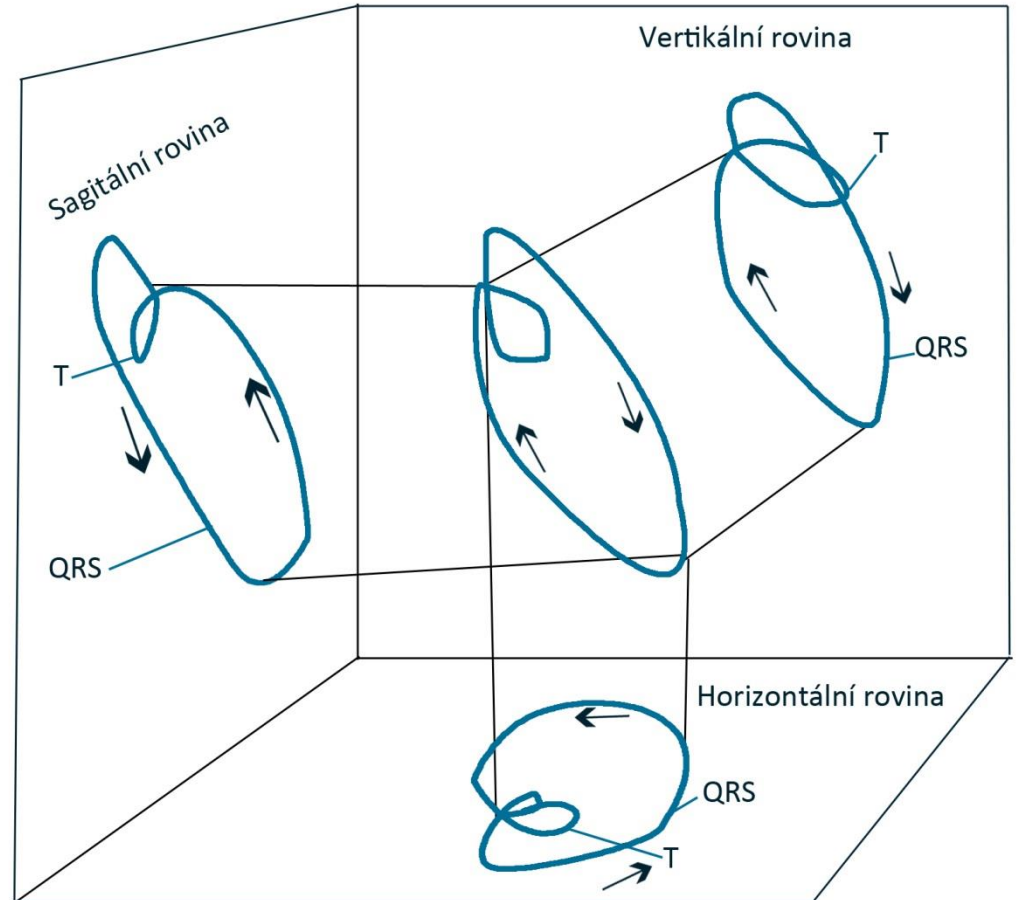
# Končetinové svody – frontální rovina



# Vektokardiografie

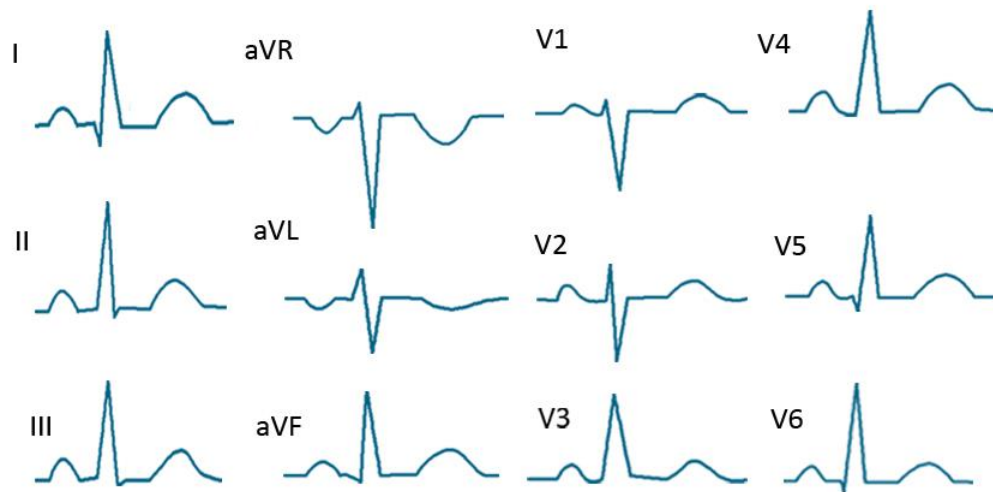
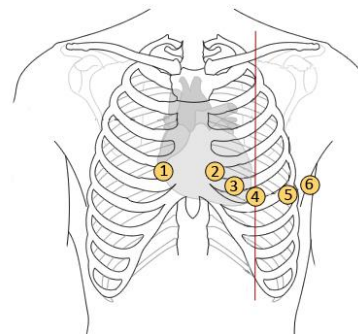
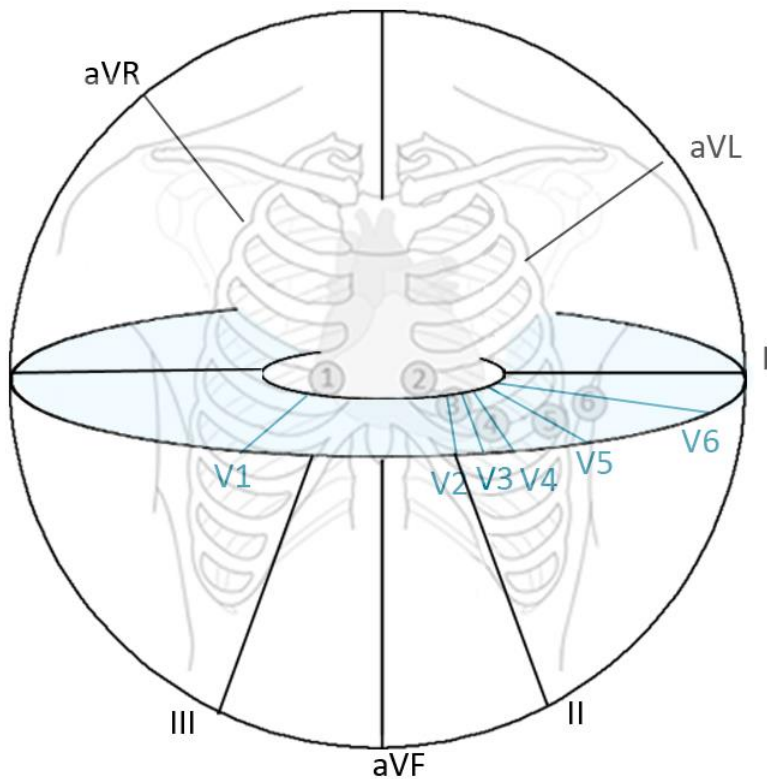
Elektrický vektor se pohybuje ve třech rozměrech. Křivka EKG záleží na směru svodu, na který se vektor promítá.

Končetinové svody se „dívají“ na srdeční elektrickou aktivitu jen ve frontální rovině. Ale co ostatní roviny?  
→ hrudní svody

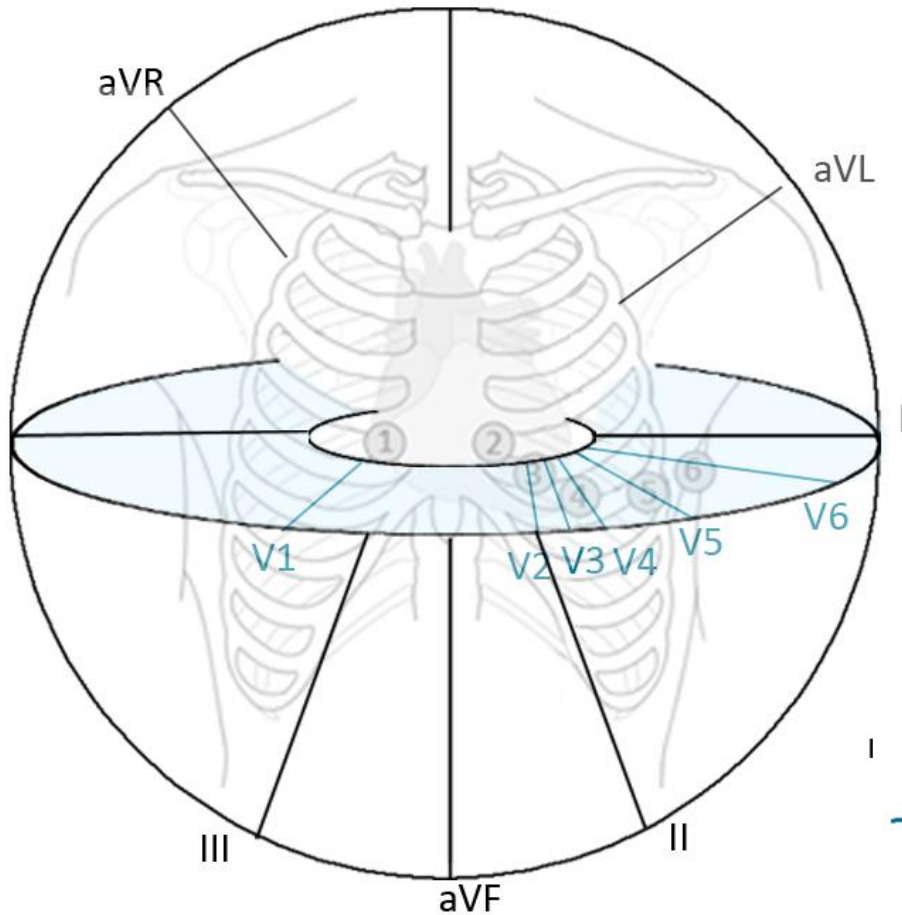


# EKG – hrudní svody (unipolární)

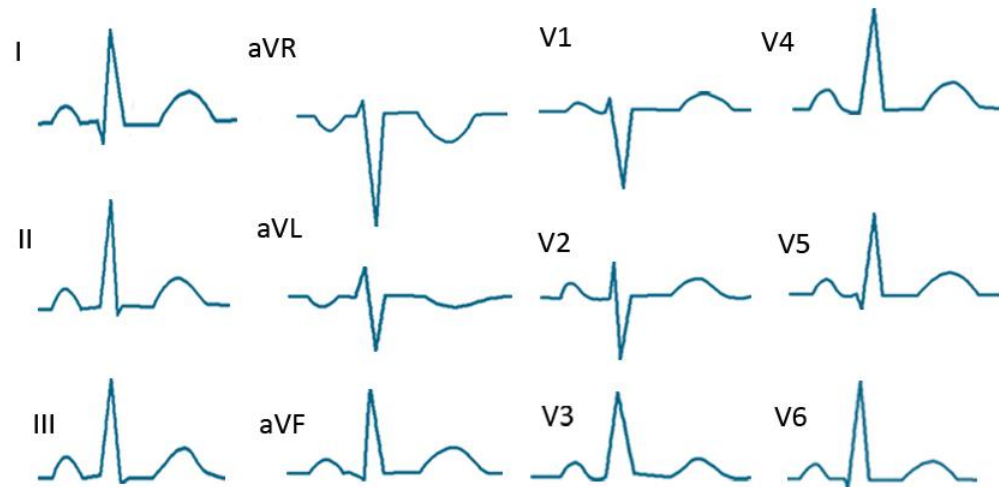
- Spojení hrudní elektrody (aktivní, kladné) s Wilsonovou svorkou (záporná, neaktivní)
- 6 hrudních svodů – V1, ... V6



# EKG – 12 svodové EKG



- 3 Einthovenovy svody (bipolární) – I, II, III
- 3 Golgbergerovy augmentované svody (unipolární) – aVL, aVR, aVF
- 6 hrudních svodů (unipolární)

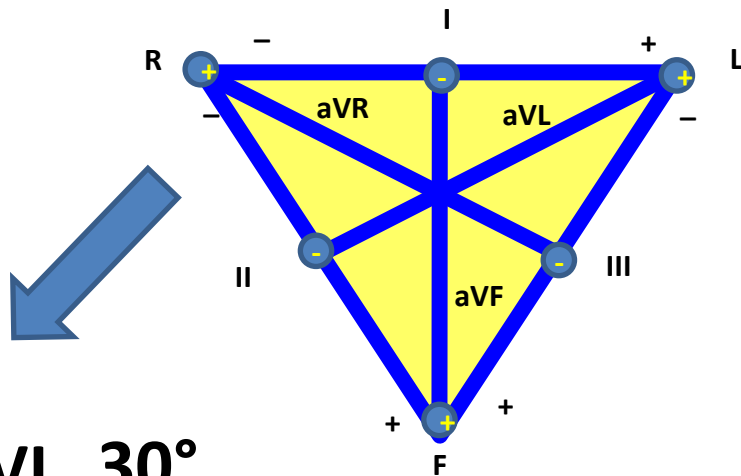
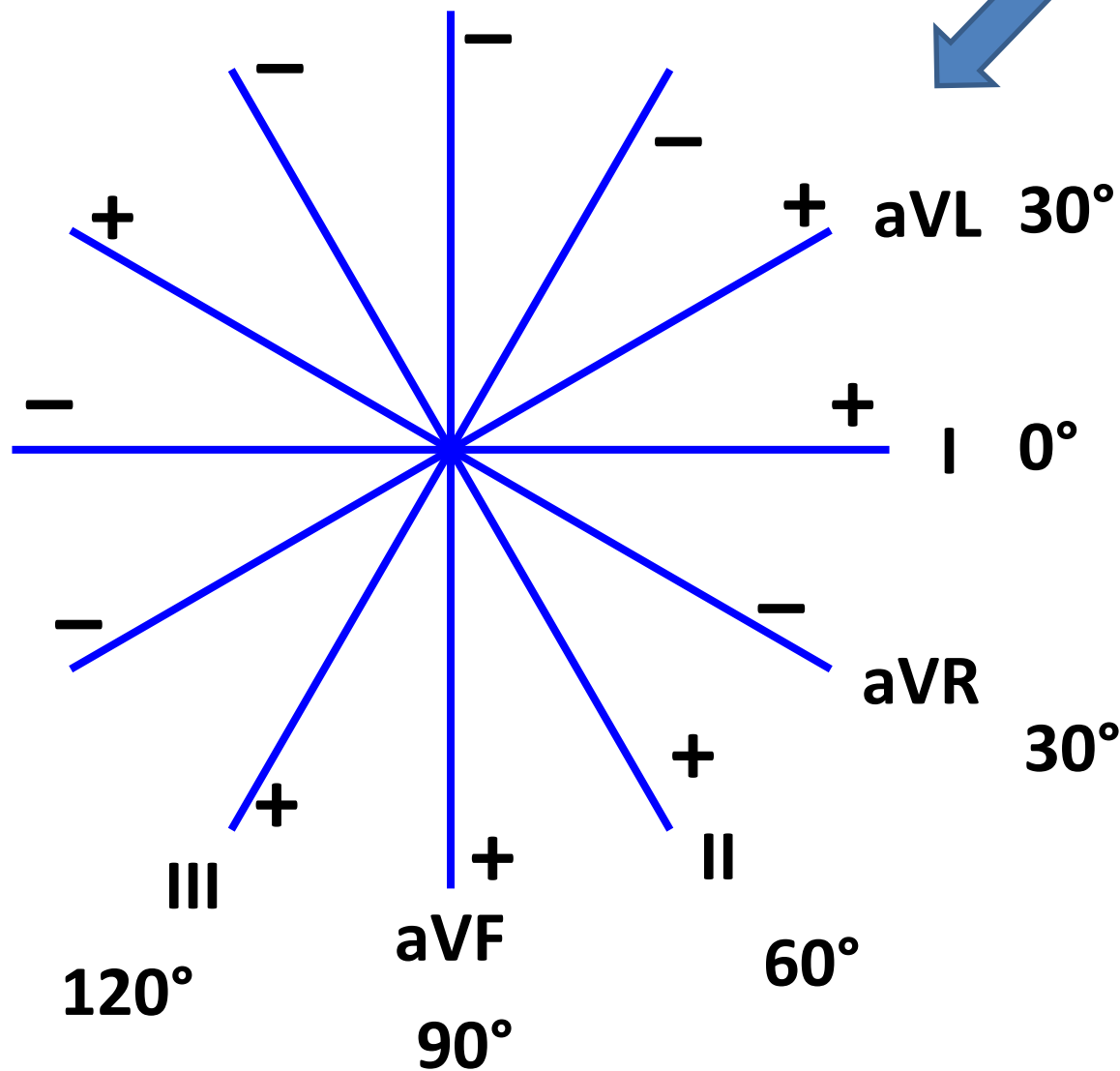


# EKG – 12 svodové EKG



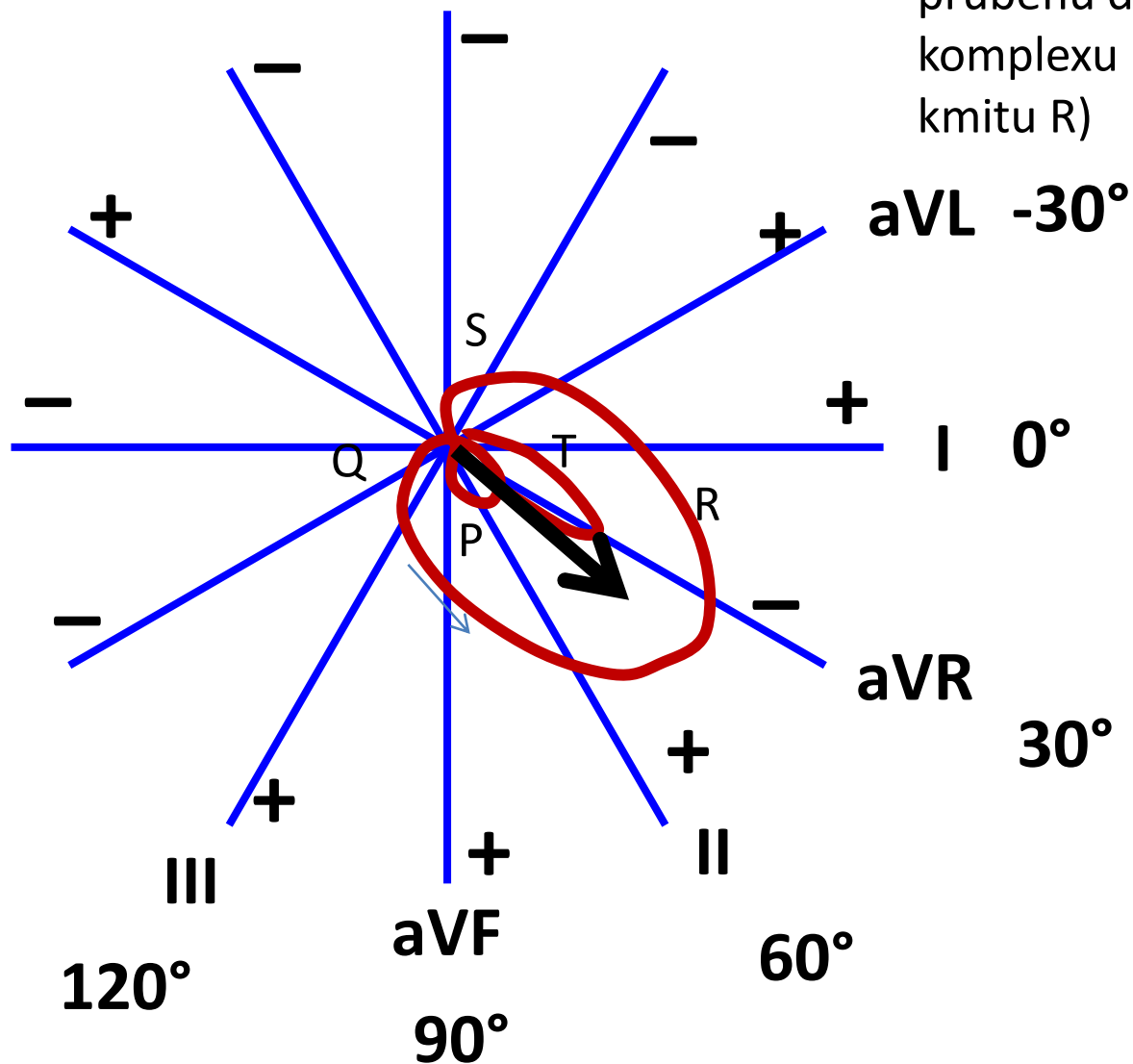


# EKG svody podle Cabrery



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  $0^\circ - 90^\circ$

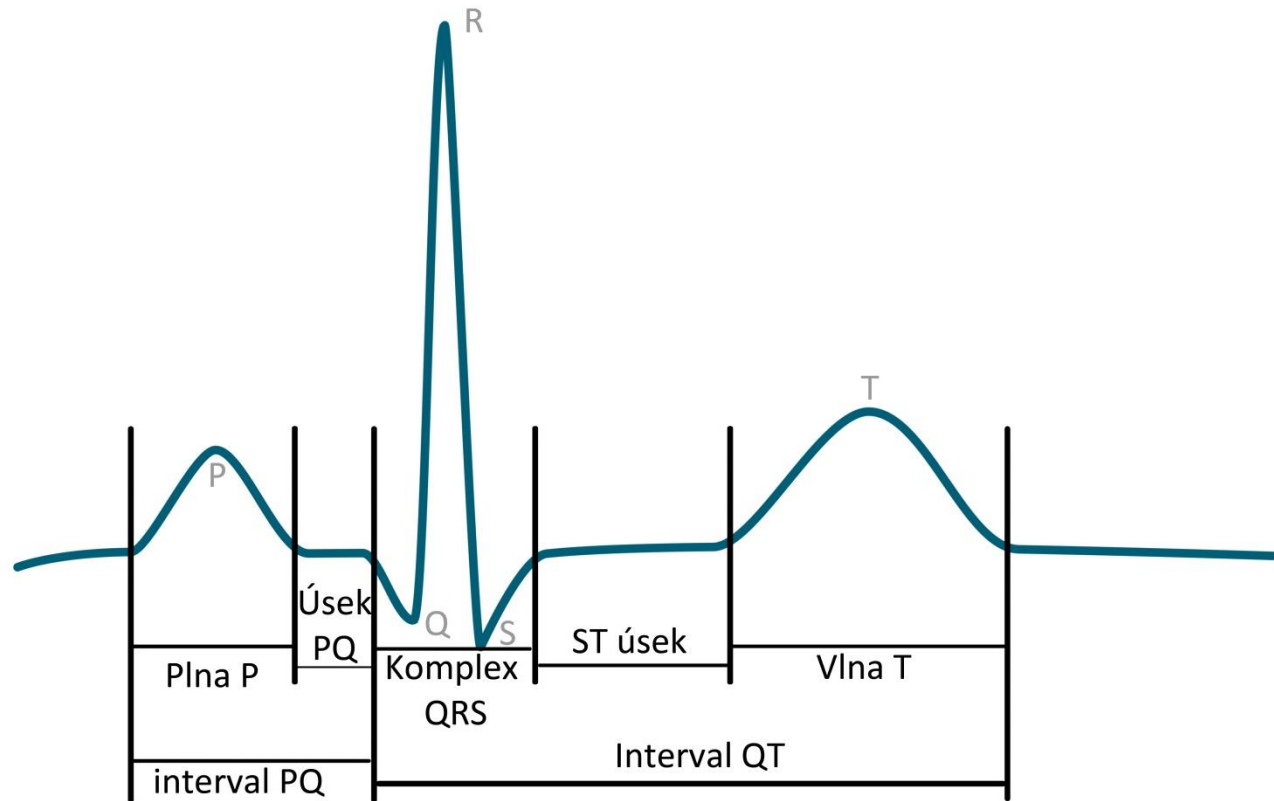
Levý typ  $-30^\circ - 0^\circ$

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):

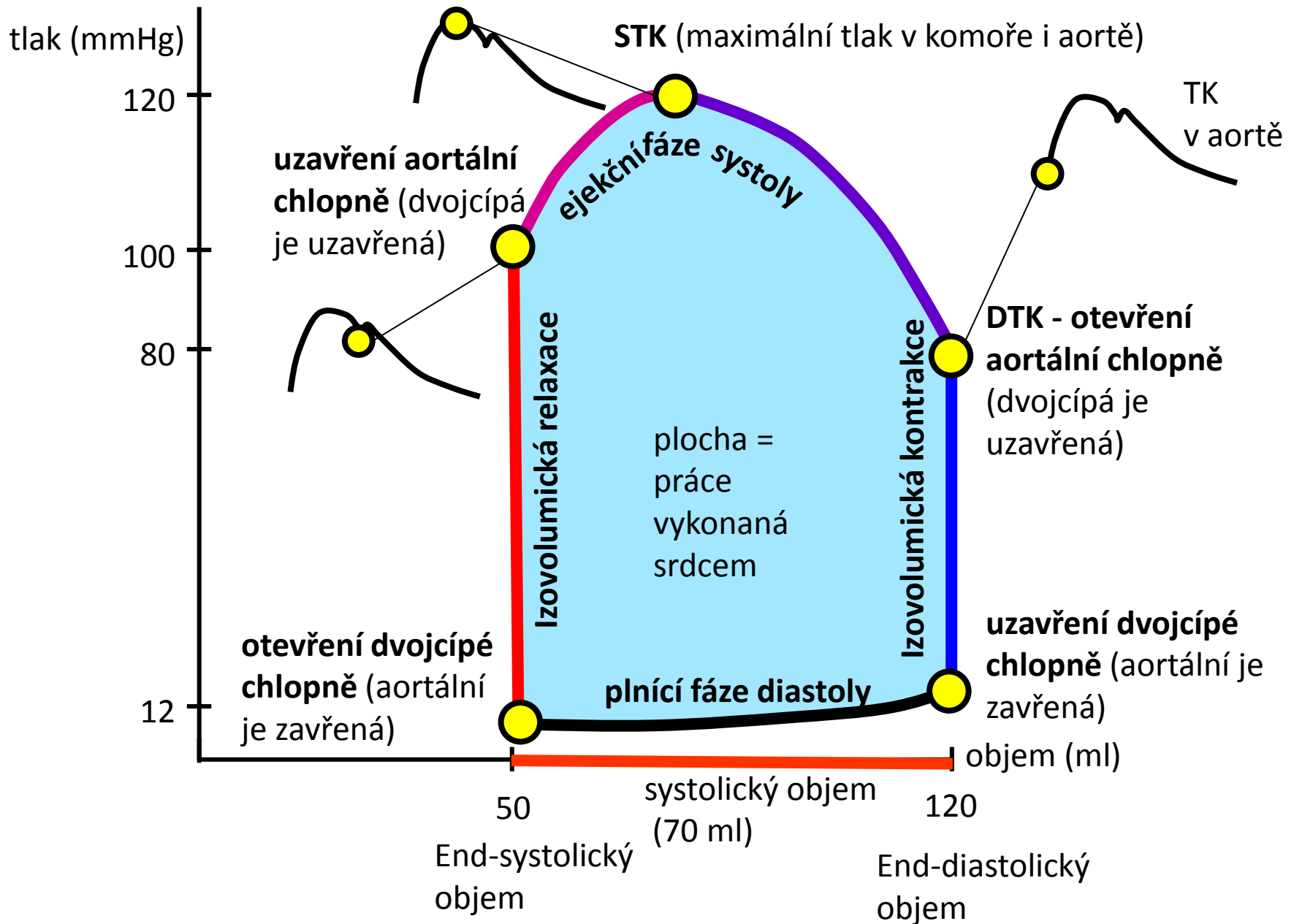
- **P**: depolarizace síní
- **Úsek PQ**: síně jsou depolarizované, komory se ještě nezačaly depolarizovat
- **Q**: první negativní kmit QRS komplexu (depolarizace komorového septa)
- **R**: první pozitivní kmit QRS komplexu (depolarizace srdečního hrotu)
- **S**: negativní kmit následující po R (depolarizace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

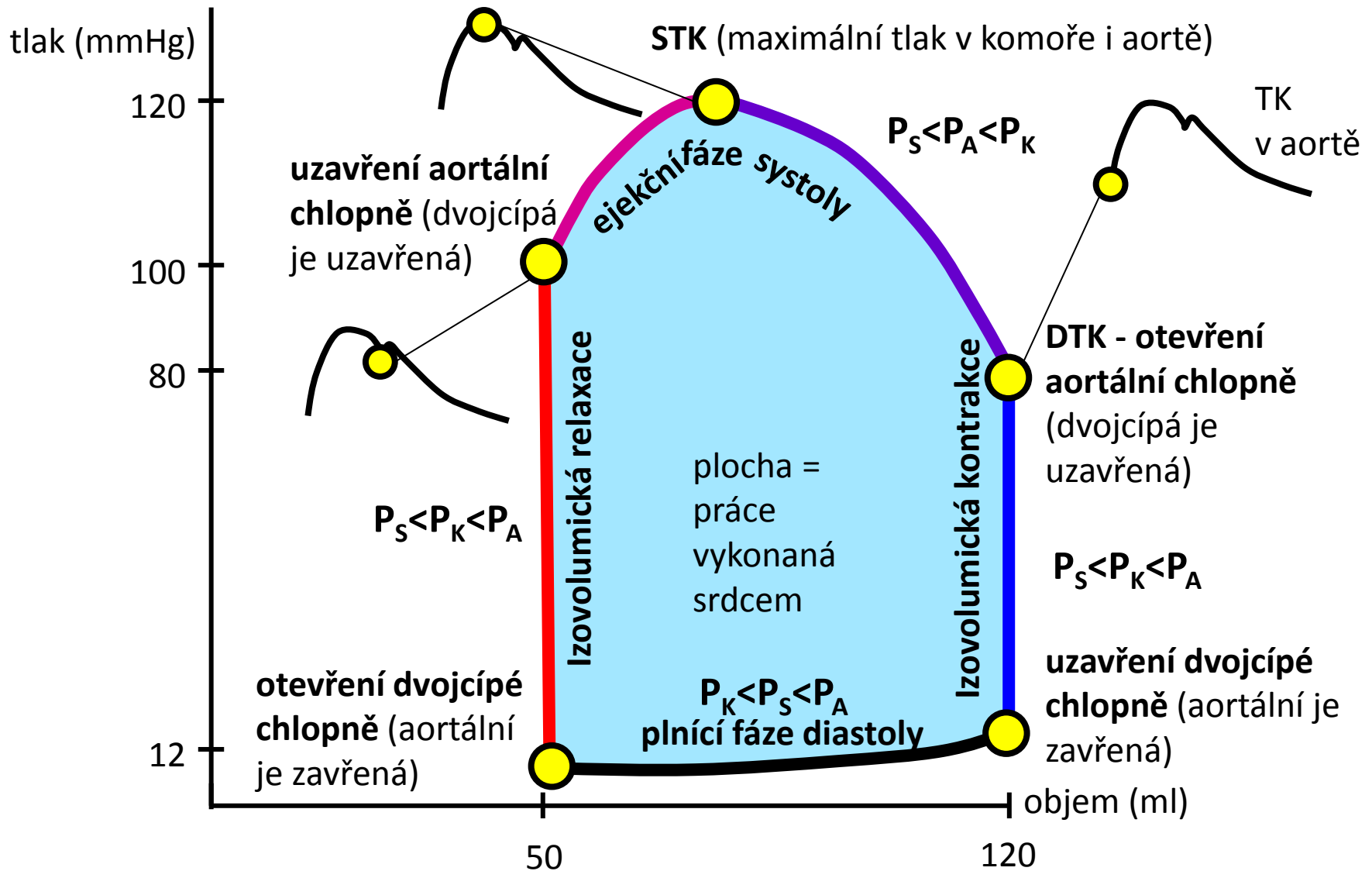
**Chlopně jsou jednosměrné, uzavírají se, když je tlakový gradient „protisměrný“**

- 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)

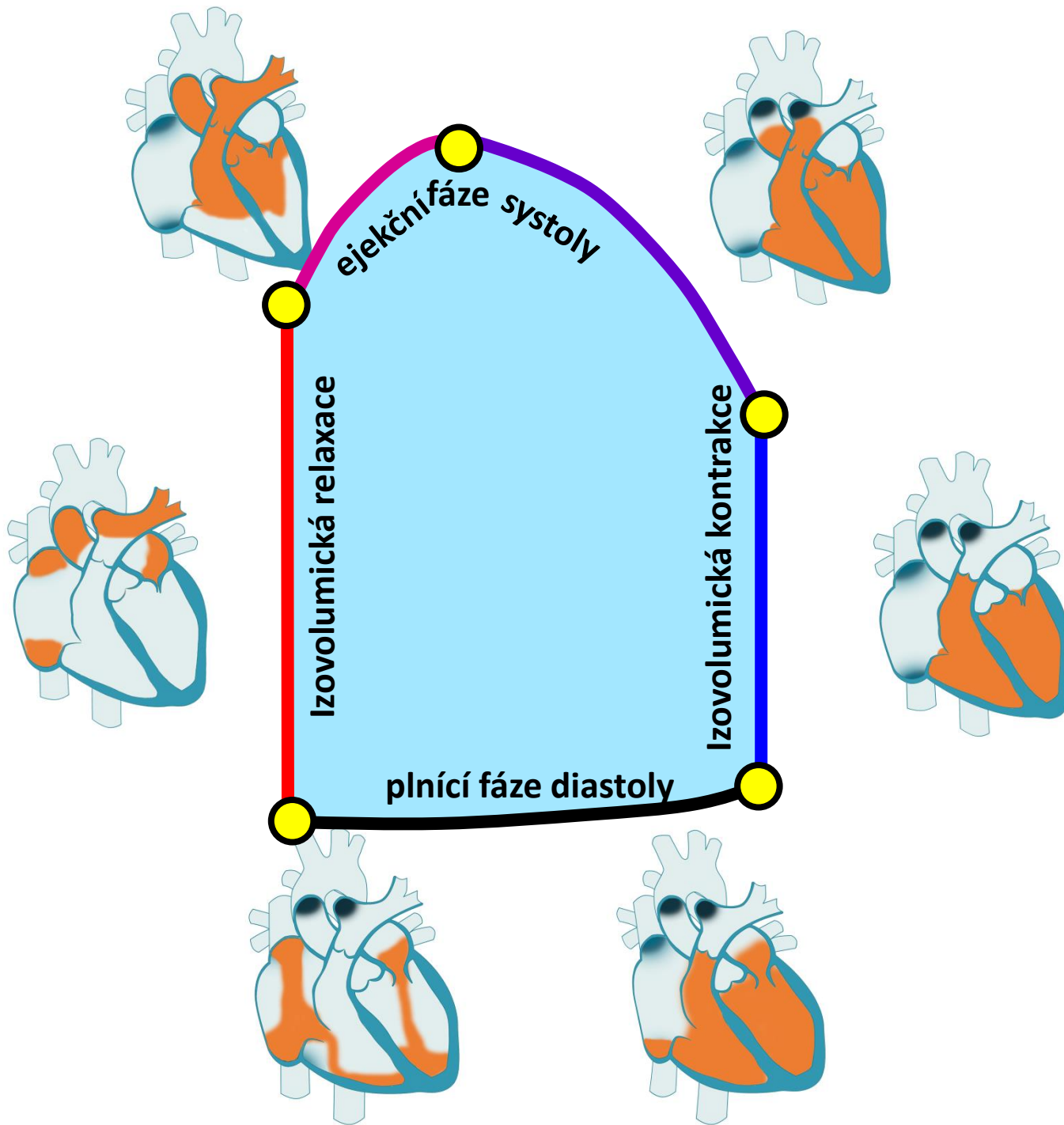


# Srdeční cyklus P-V diagram (levá komora)



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

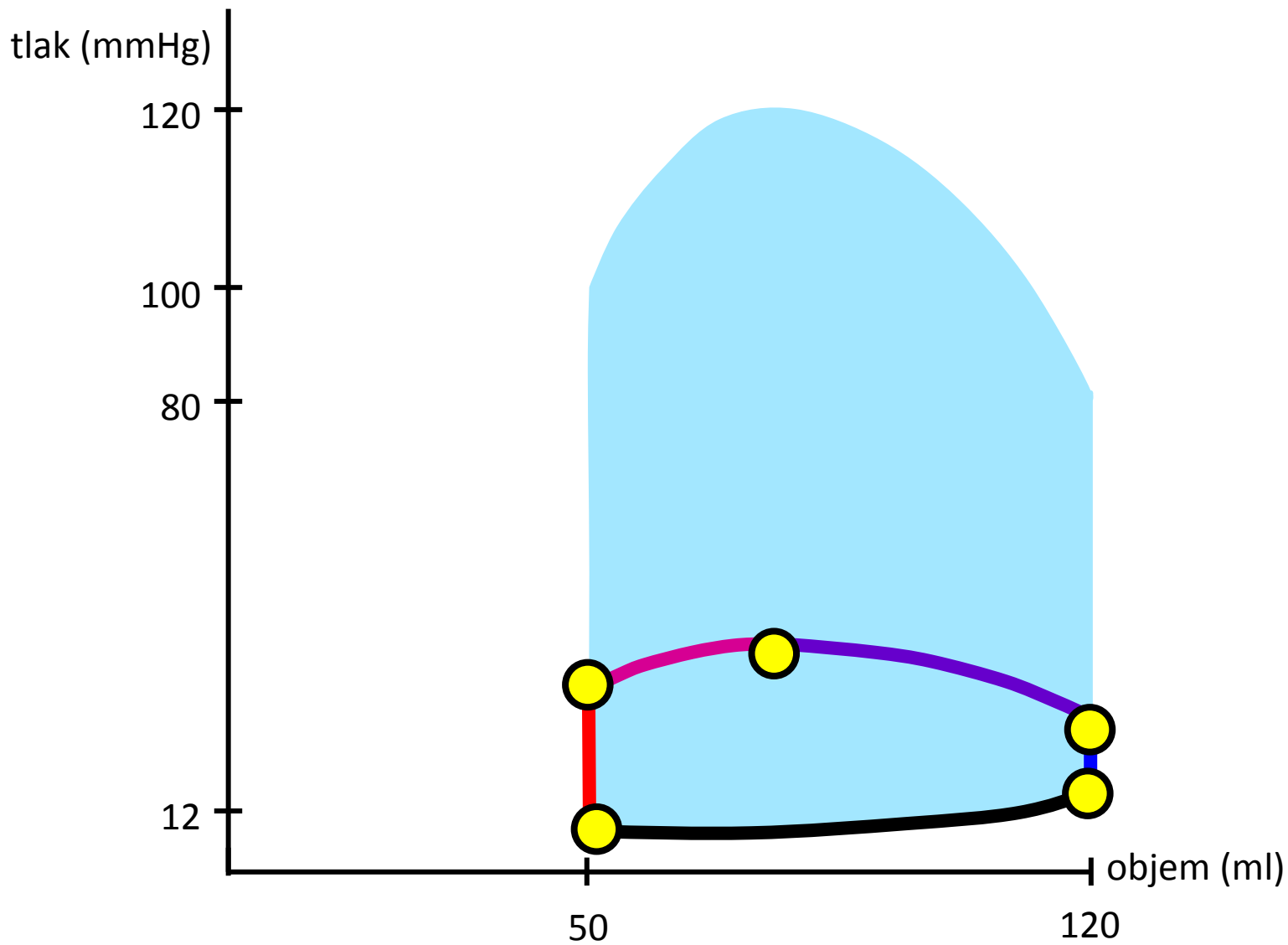
Tok krve pouze síně → komora → aorta

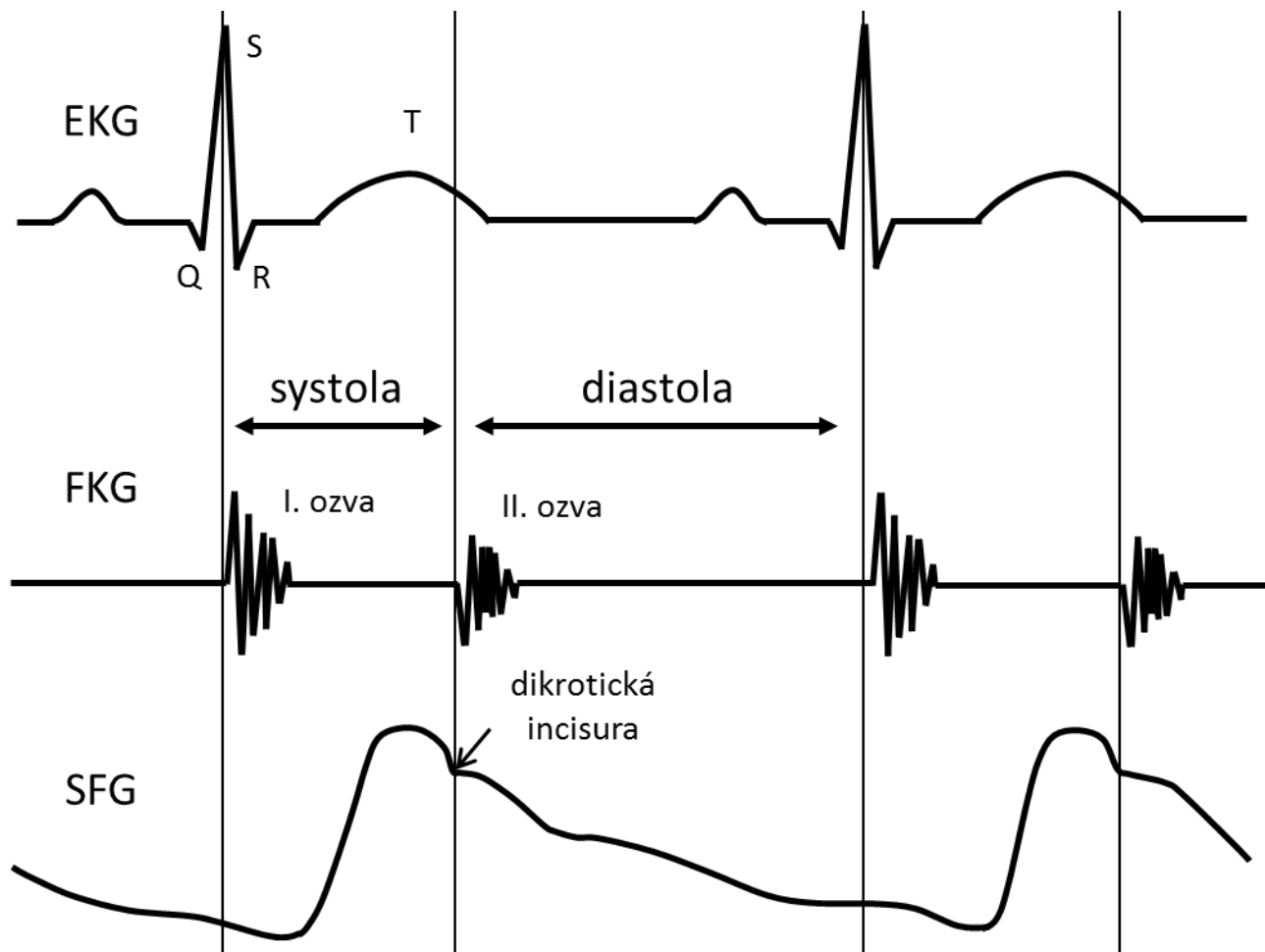


Video PV diagram



# Srdeční cyklus P-V diagram (pravá komora)





Mechanická aktivita komor

Mechanická aktivita síní

Aktivace myokardu

Srdeční cyklus

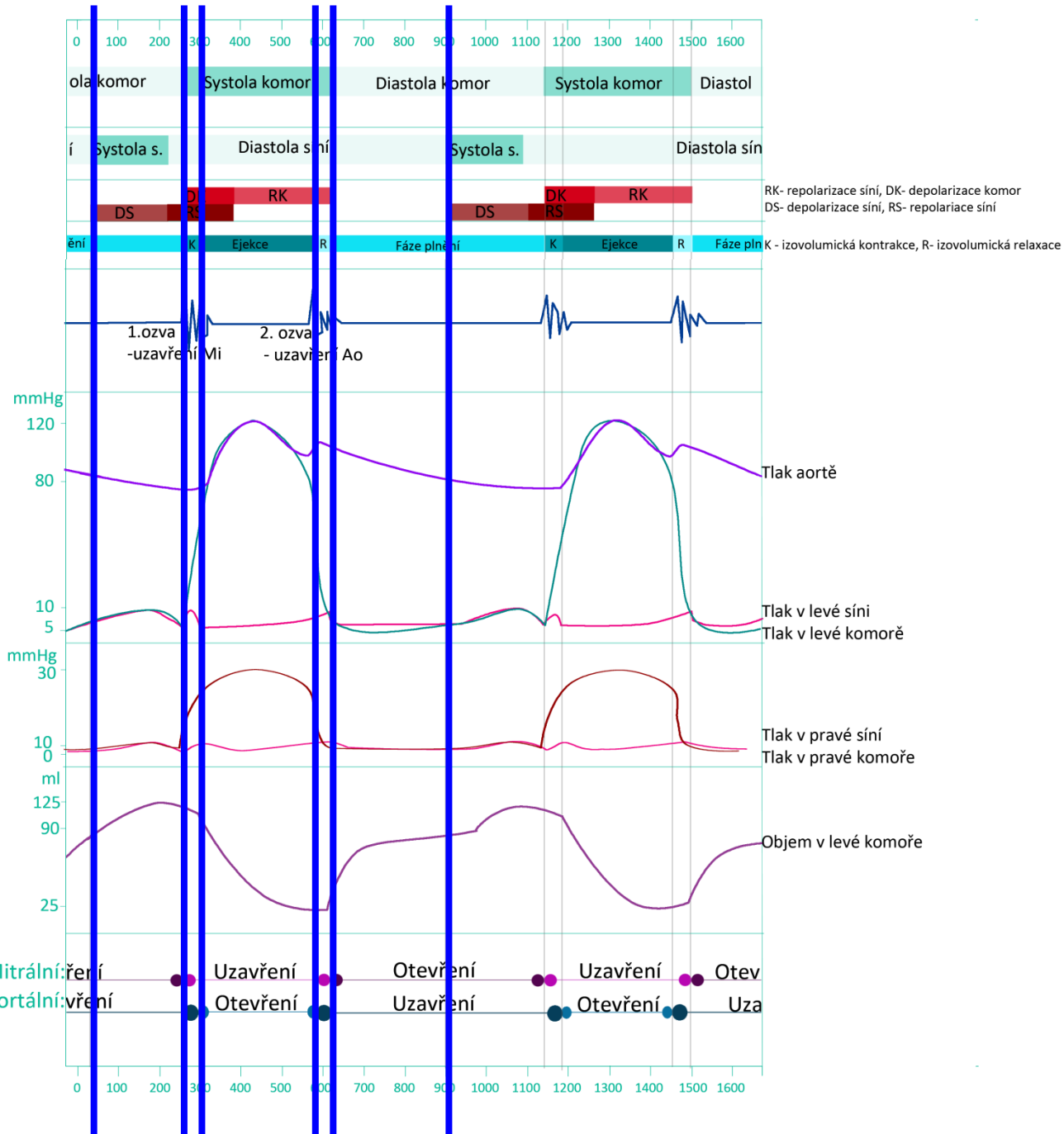
Srdeční ozvy

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

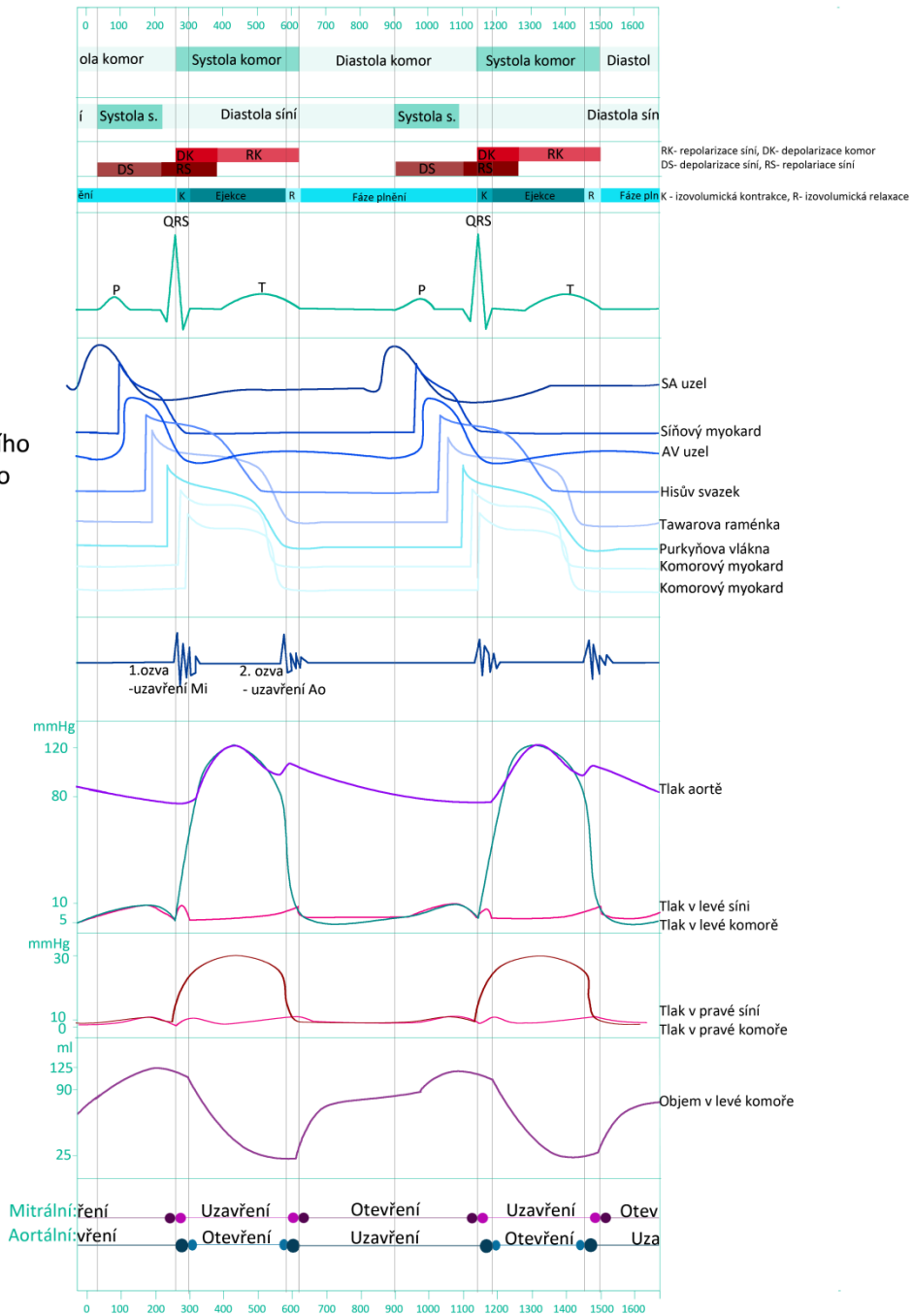
Srdeční ozvy

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**

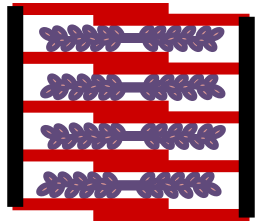
	<b>vleže</b>	<b>vsedě</b>	<b>vestoje</b>
<b>Minutový objem (l/min) klid</b>	<b>4 – 8</b>	<b>4 – 7</b>	<b>4 – 6</b>
<b>Srdeční index (l/min/m<sup>2</sup>) klid</b>	3 – 5	2,2 – 4,5	2 – 3
<b>Tepový objem (ml)</b>	<b>80 – 160</b>	<b>60 – 80</b>	<b>40 – 70</b>
<b>Minutový objem (l/min) při maximální zátěži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

# Autoregulace stahu srdečního svalu

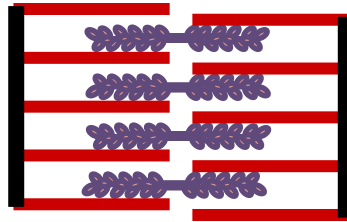
## Heterometrická autoregulace (Frank-Starlingův princip):

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

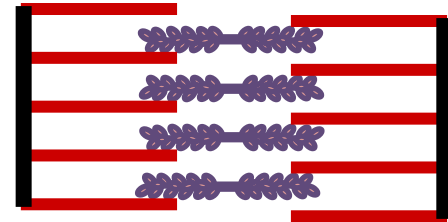
Principy: 1) vzájemný vztah aktinu a myozinu při různém protažení vláken,  
2) protažení vlákna zvyšuje citlivost troponinu na vápník



malá náplň srdce



zvýšená náplň srdce

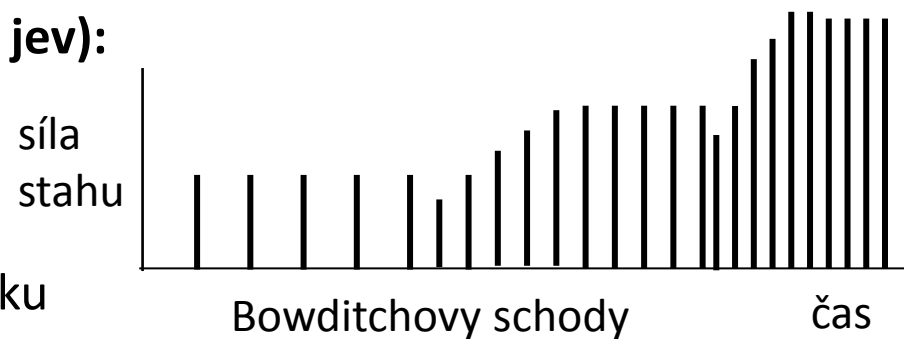


extrémní protažení  
srdečního svalu

## 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 kontraktivity

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 kontraktivity

EF je ovlivněna nejen kontraktivitou 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

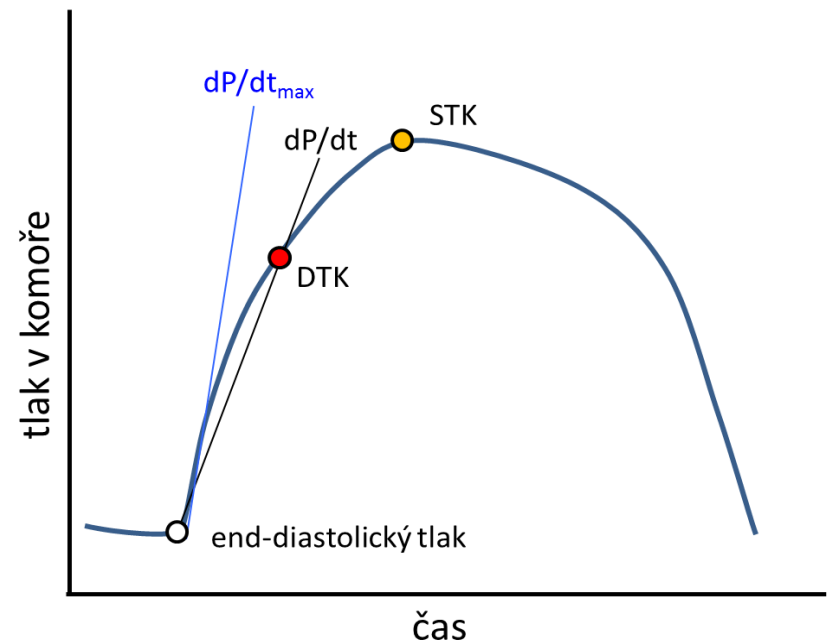
## Indexy kontraktivity odvozené z izovolumické fáze systoly

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 kontraktivity 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  $\Delta$*



# Srdeční rezerva

Kolikrát je srdce schopné navýšit svůj výkon

$$\text{srdeční rezerva} = \frac{\text{hodnota v zátěži}}{\text{hodnota v klidu}}$$

**Minutový srdeční objem:** netrénovaný člověk dokáže navýšit průtok krve srdcem 4 – 5 x (5,6 → 18 l/min), trénovaný 10 – 13 x (5,6 → 35 l/min)

**Tepový objem:** netrénovaný 2 x (70 → 100 ml), trénovaný 4 x (140 → 190 ml)

**Chronotropní rezerva** (srdeční frekvence): netrénovaný (80 → 180 bpm), trénovaný (40 → 180 bpm)

**Koronární rezerva:** navýšení průtoku krve koronárními cévami je 2 – 5x (v závislosti na trénovanosti)

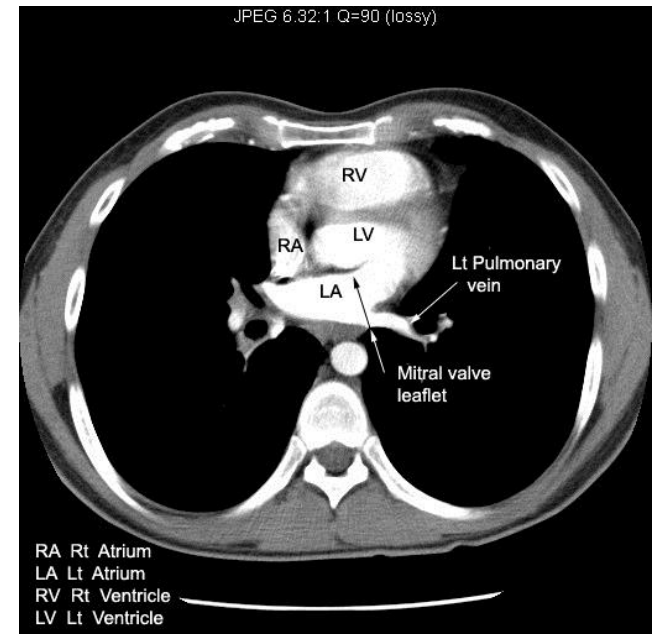
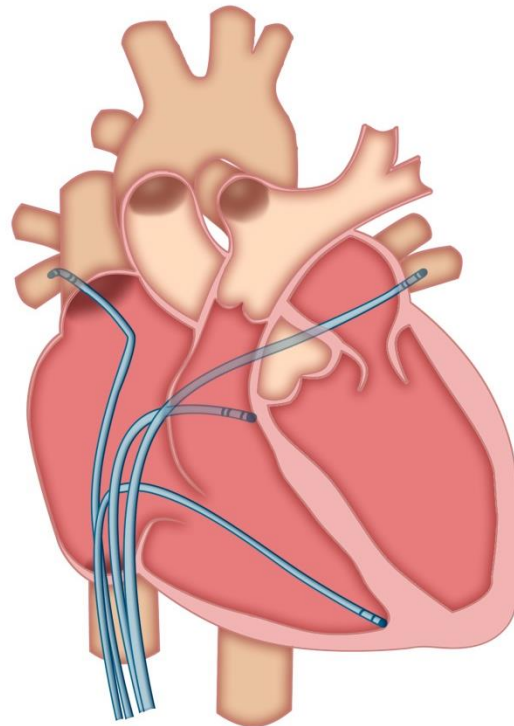
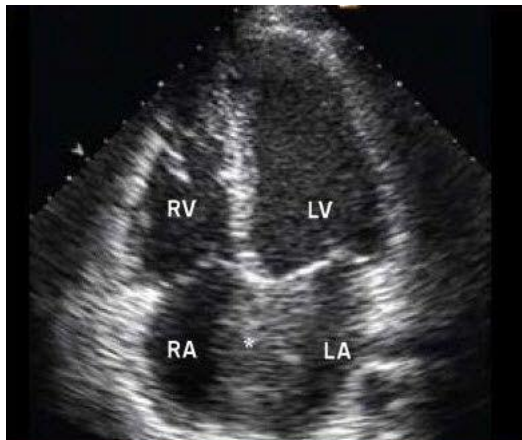
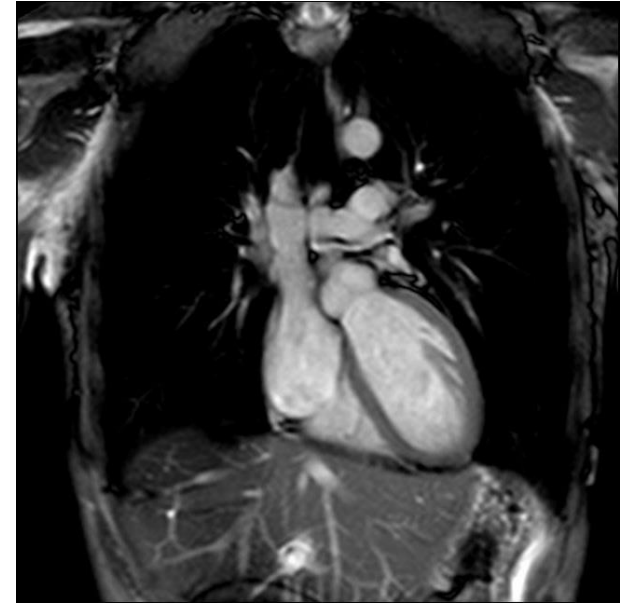
## Sportovní srdce

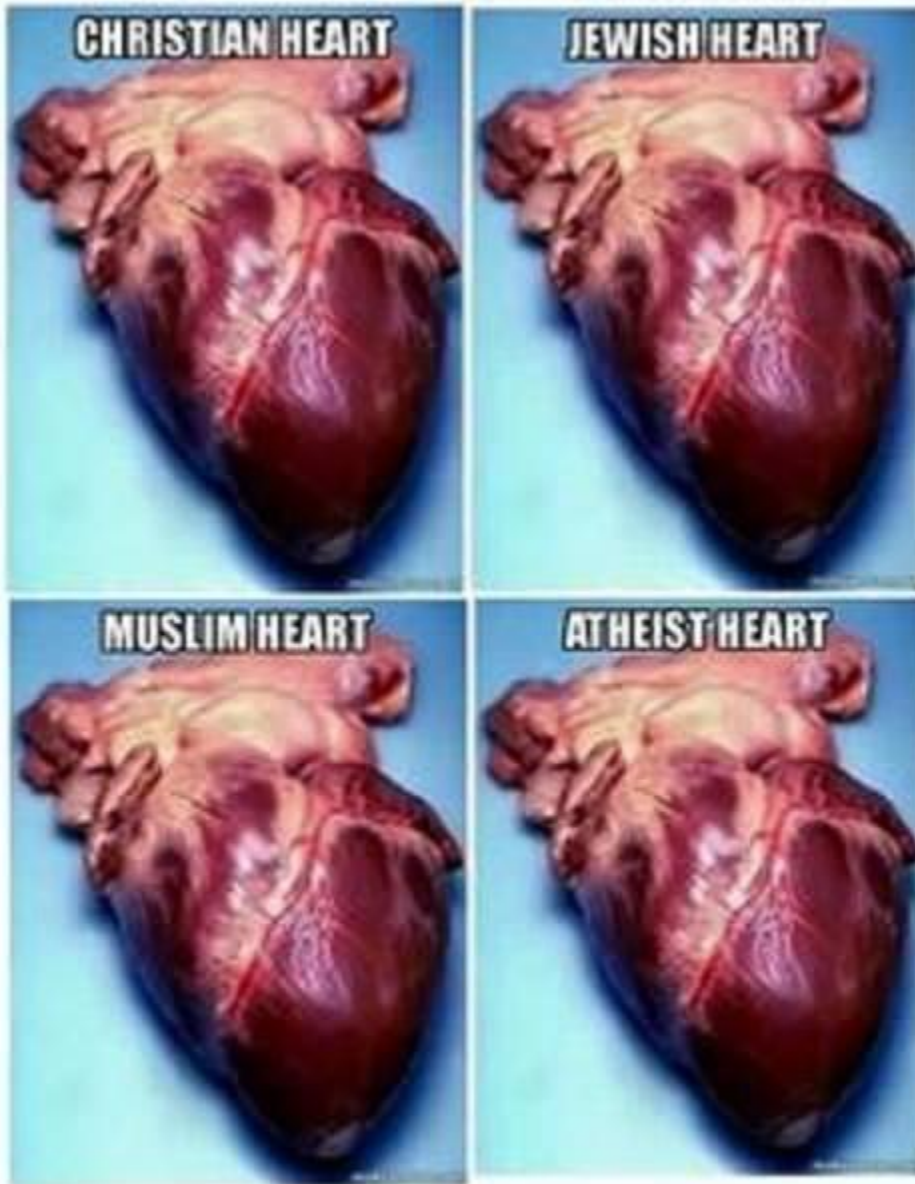
Srdce se dlouhodobým tréninkem adaptuje na zvýšenou zátěž: zvýší se tloušťka srdeční stěny (při zachování dobrého prokrvení, vaskularizace) a objem komor. Takto je zvýšen systolický objem. V klidu má trénovaný i netrénovaný člověk minutový výdej (= systolický objem x srdeční frekvence) skoro stejný (5,5 l/min). Díky většímu systolickému objemu stačí trénovanému v **klidu** nižší srdeční frekvence (140 ml, 40 - 50 bpm) než netrénovanému (70 ml, 80 bpm). Maximální srdeční frekvence je do 200 bpm u trénovaného i netrénovaného. Ale trénovaný začíná na nižší klidové srdeční frekvenci, takže má vyšší chronotropní rezervu.

Sportovní adaptace srdce spočívá ve zvýšení systolického objemu a snížení klidové srdeční frekvence, čímž se dosahuje zvýšené srdeční rezervy.

# Metody vyšetření srdce

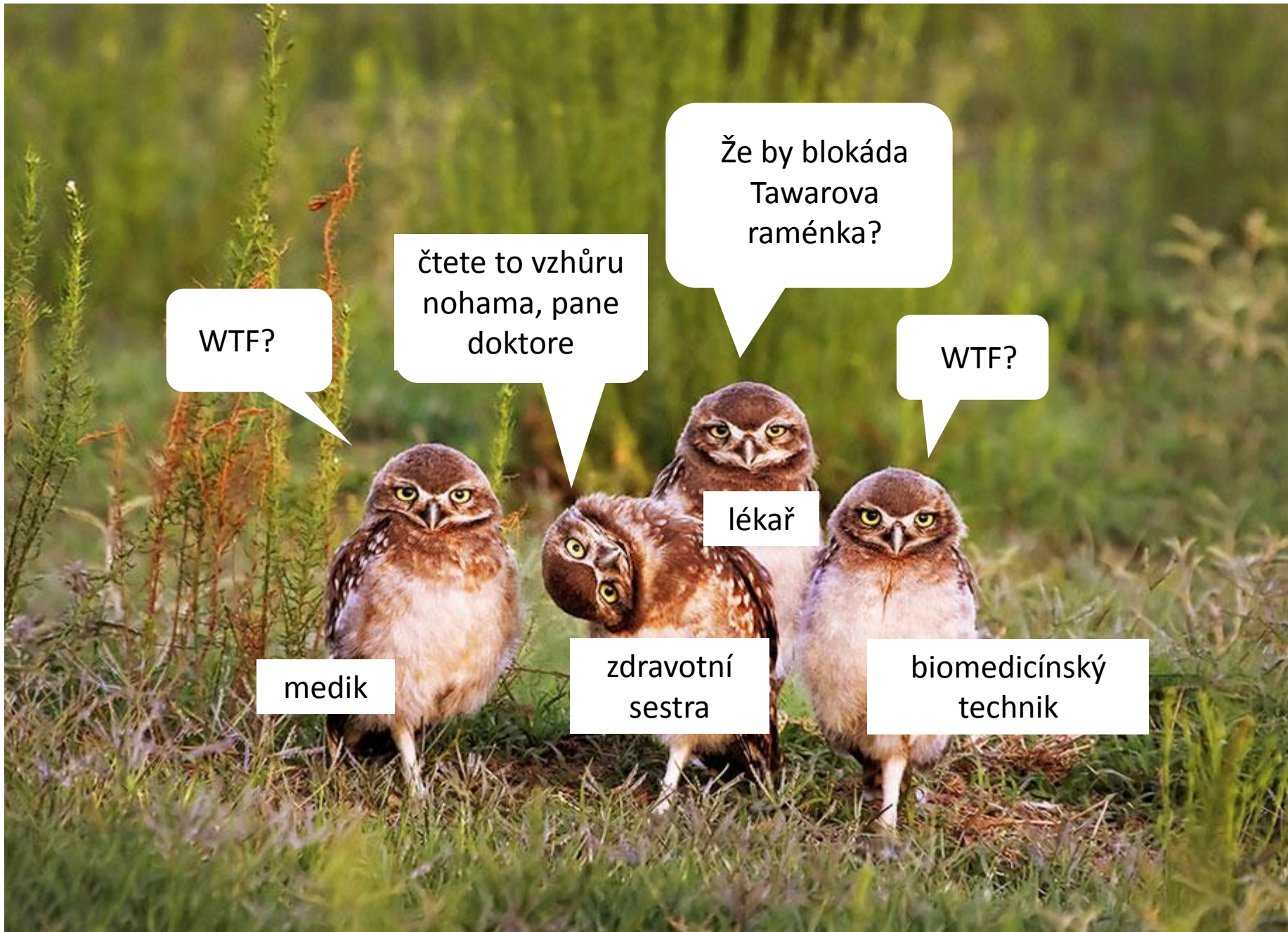
- Fonokardiografie – vyšetření srdečních ozev
- Echokardiografie - 2D, 3D, 4D, dopler
- Katetrizace – měření tlaků, teploty, průtoku, objemů, biopsie
- Jiné zobrazovací metody – MRI, rentgen, CT





Not making a point...  
Just showing off my collection





WTF?

čtete to vzhůru  
nohama, pane  
doktore

Že by blokáda  
Tawarova  
raménka?

WTF?

medik

lékař

zdravotní  
sestra

biomedicínský  
technik