

# Biofyzika elektrických projevů a účinků elektrické energie, diagnostické a terapeutické metody využívající elektrické energie

**Biofyzika**

**Doc. Ing. Jana Kolářová, PhD.**

**Ing. Vratislav Harabiš, (PhD.)**

**Ústav biomedicínského inženýrství, VUT v Brně**

# Elektrický proud

- Usměrněný pohyb nabitých částic
  - Vodiče: volné elektrony
  - Elektrolyty: ionty
  - Živá tkáň: makroskopická i mikroskopická nehomogenost: mezibuněčné prostředí, buněčná membrána, cytoplazmatické struktury, ...
    - Pasivní elektrické vlastnosti – chování tkání v el. poli
    - Aktivní elektrické vlastnosti – vznik el. potenciálů

# Vedení elektrického proudu

- Příčina:
  - elektrické napětí:  $U$  [V]
  - rozdíl napěťových potenciálů:  $U=U_A-U_B$  [V]
- Důsledek:
  - elektrický proud:  $I$  [A]
- Vlastnosti materiálů, které vedou el. proud:
  - elektrický odpor:  $R[\Omega]$ ,  $R=U/I$
  - Elektrická vodivost:  $G[S]$ ,  $G=1/R$ , [ $S=\Omega^{-1}$ ]

# Pasivní elektrické vlastnosti

- chování tkání v el. poli:

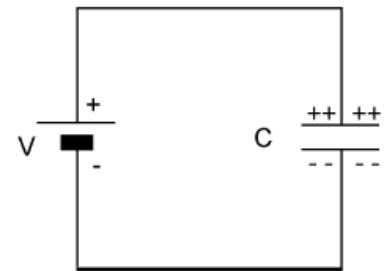
- Intenzita elektrického pole:  $E = \frac{F}{q}, \left[ \frac{V}{m}, N, C \right]$

- Vedení stejnosměrného proudu (ss)
  - Buněčné membrány vykazují velký odpor – 2-3% celkového ss proudu
  - Měrná vodivost membrán je výrazně nižší ( $10^6$ - $10^8$ ) než měrná vodivost mezibuněčného prostředí a cytoplazmy buněk
  - Ionty – nosiče nábojů – zastoupení iontů se v různých tkáních liší

# Pasivní elektrické vlastnosti

- Vedení střídavého proudu (st)
  - Buněčné membrány jsou průchodnější pro ionty při  $U_{st}$  s vyšší frekvencí
- Buněčné membrány vykazují rezistanci (odpor, rezistor) a kapacitanci (kondenzátor)
  - Kapacitance = impedance kondenzátoru: (zdánlivý odpor součástky s kapacitou):

$$Z = \frac{1}{2\pi f C}$$



- Většina buněk se chová jako dielektrikum (izolant)
  - Natočení dipólů
  - Vnitřní elektrické pole má opačnou polaritu než vnější el. pole

# Pasivní elektrické vlastnosti

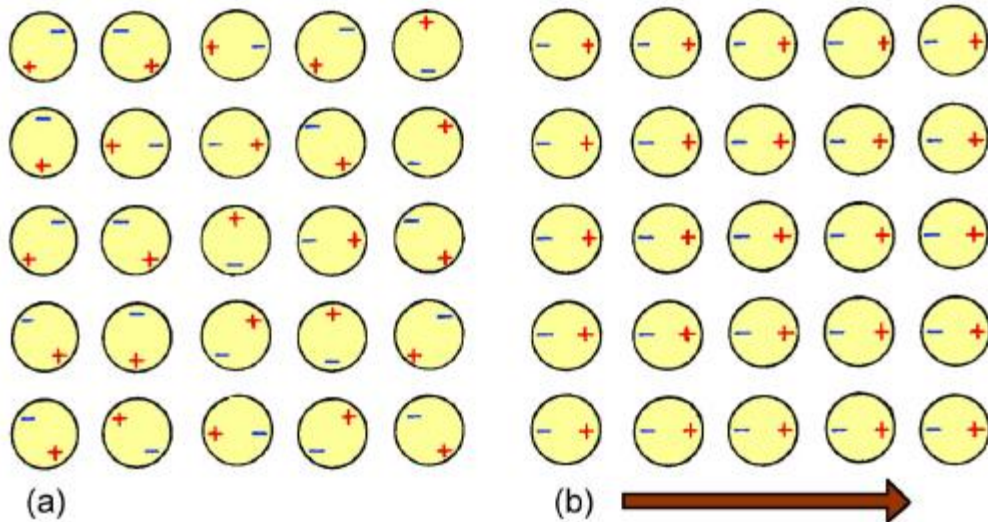


Figure 6.9  
(a) Unpolarized dielectric and  
(b) polarized dielectric

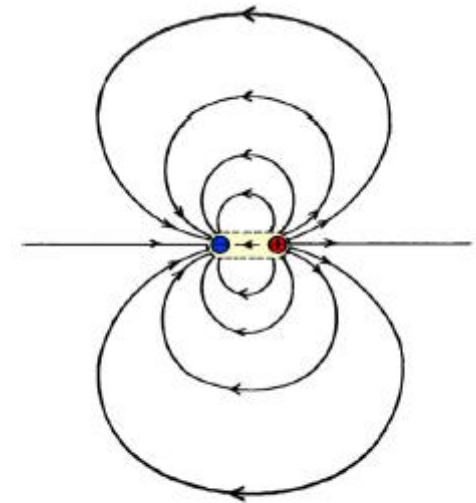


Figure 6.10  
Electric field of a dipole

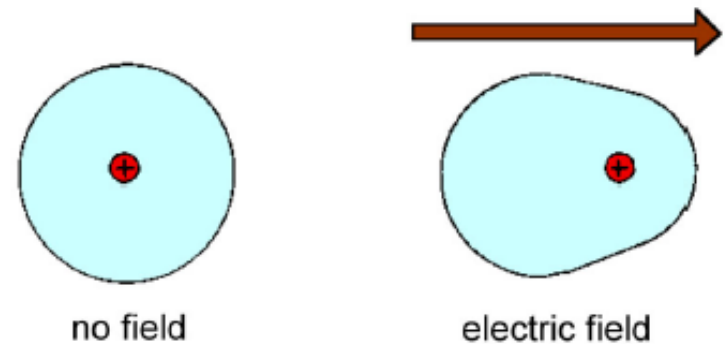
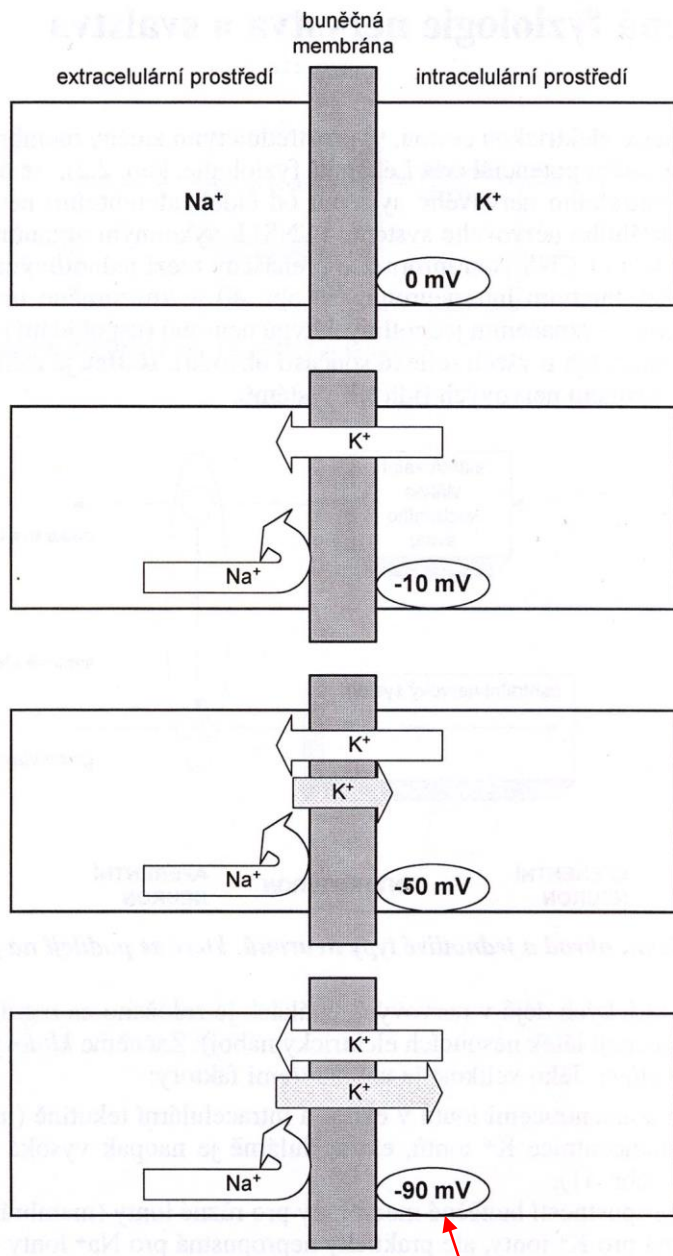


Figure 6.11  
Polarization of a molecule  
in an electric field

# Aktivní elektrické vlastnosti

- Vznik elektrického napětí na buněčné membráně
  - změna koncentrace iontů sodíku, draslíku, vápníku... v intra- a extracelulární tekutině
  - buněčná membrána: lipidová dvojstva obsahuje iontové kanály pro pasivní přenos iontů a iontové pumpy pro aktivní přenos iontů
  - změna napěťových potenciálů – vznik el. napětí
  - Klidové membránové napětí: vzniká difúzí iontů po koncentračním spádu, nerovnoměrné rozdělení základních fyziologických iontů (draslík, sodík, vápník) po obou stranách buněčné membrány
    - svalové, nervové buňky: -50mV až -100mV
  - Akční membránové napětí: vzniká náhlou (ale přechodnou) změnou el. vodivosti membrány



klidový membránový potenciál

## Klidové membránové napětí

u nervových a svalových buněk má hodnotu  $-50$  až  $-100 \text{ mV}$  (nitro buňky negativní)

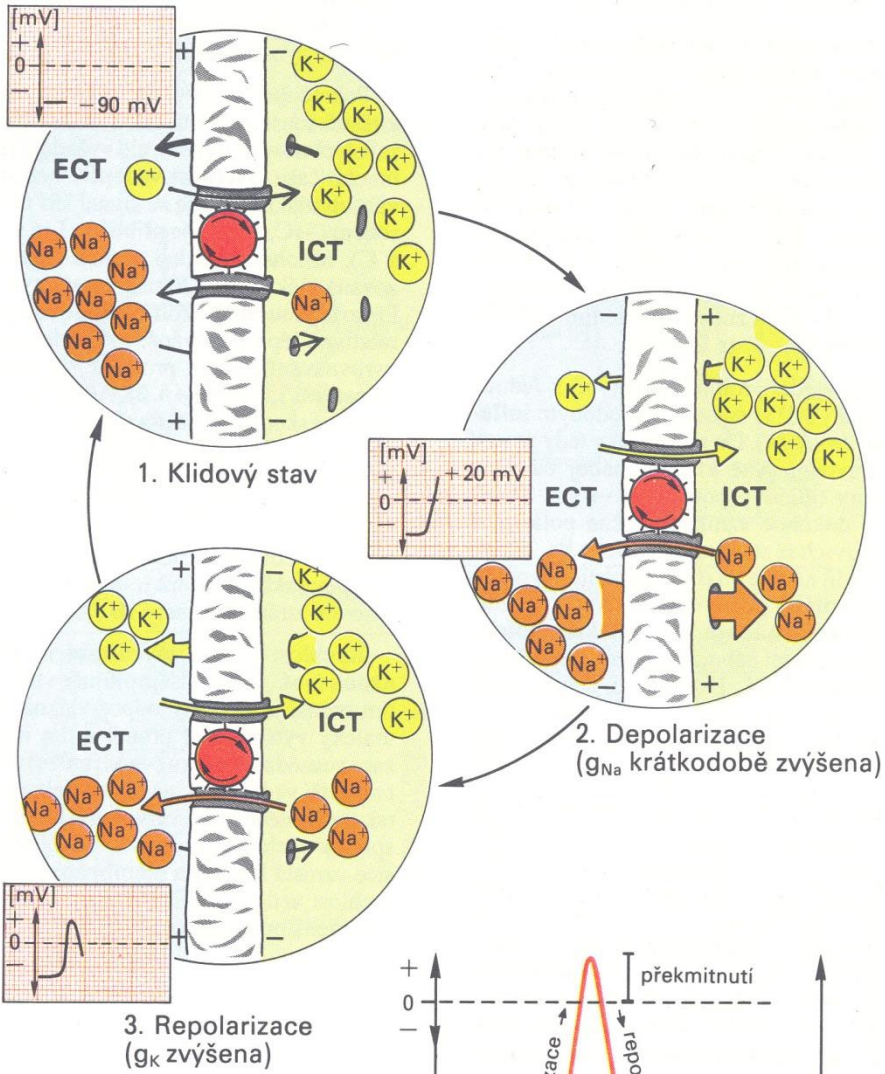
je dáno třemi faktory:

- 1. různé koncentrace iontů**  
(v intracelulární tekutině vysoká koncentrace  $\text{K}^+$ , v extracelulární zase vysoká konc.  $\text{Na}^+$  iontů)
- 2. rozdílnou propustností buněčné membrány** (lepší pro  $\text{K}^+$ , horší pro  $\text{Na}^+$ )
- 3. činností sodíko-draslíkové pumpy**, která udržuje dynamickou rovnováhu pohybu kationtů přes membránu

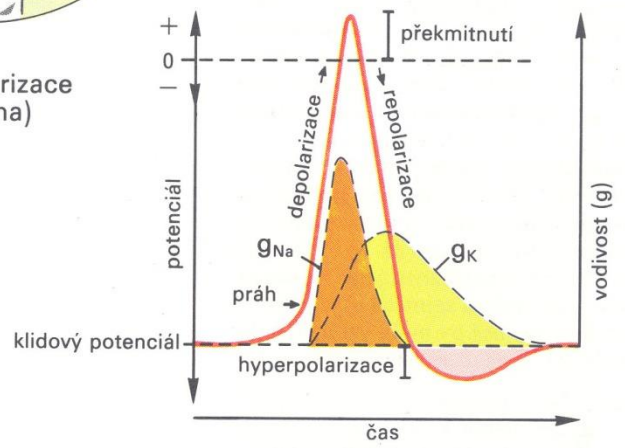


Nadbytek kationtů vně membrány





A. Depolarizace a repolarizace



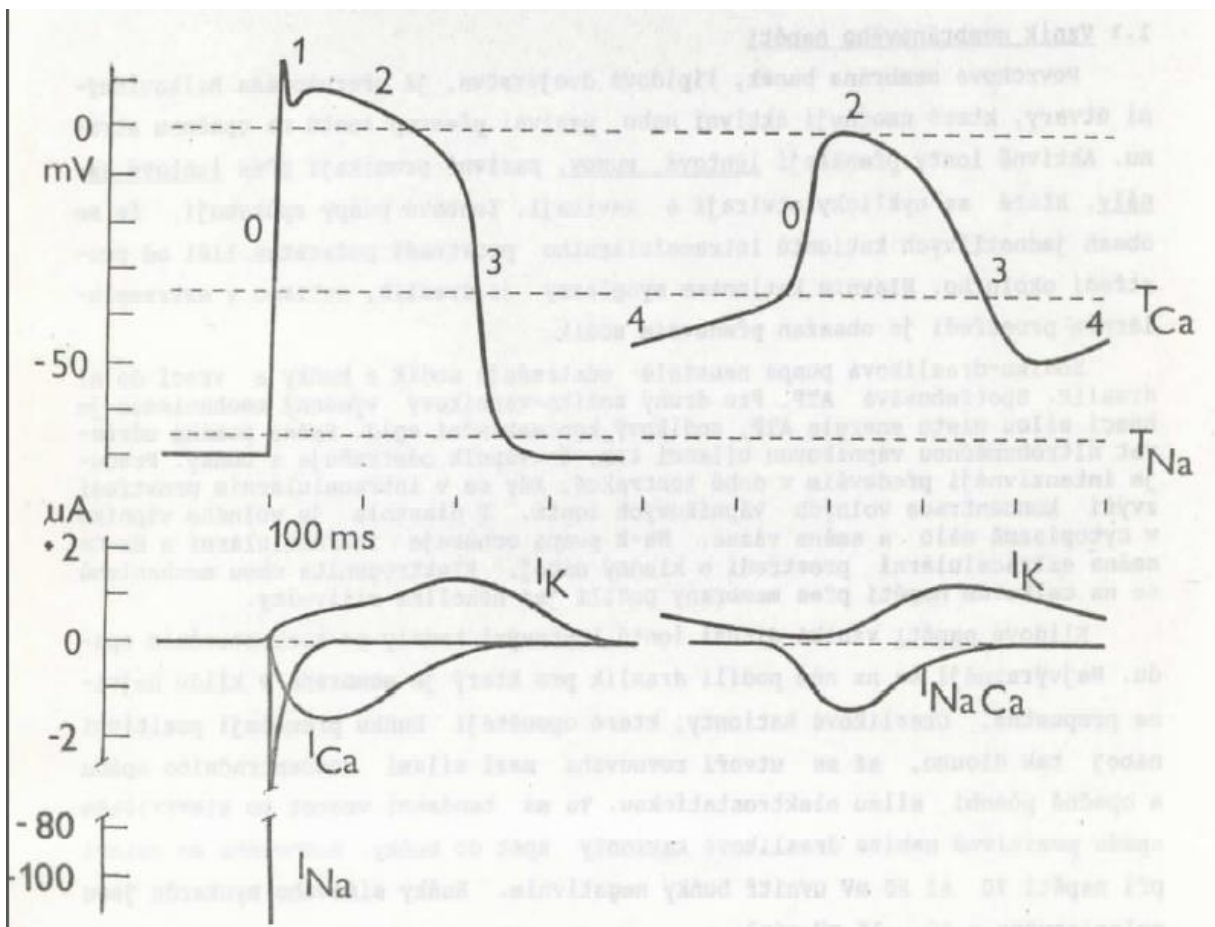
B. Vodivost pro ionty a akční potenciál (idealizováno)

# Akční membránové napětí

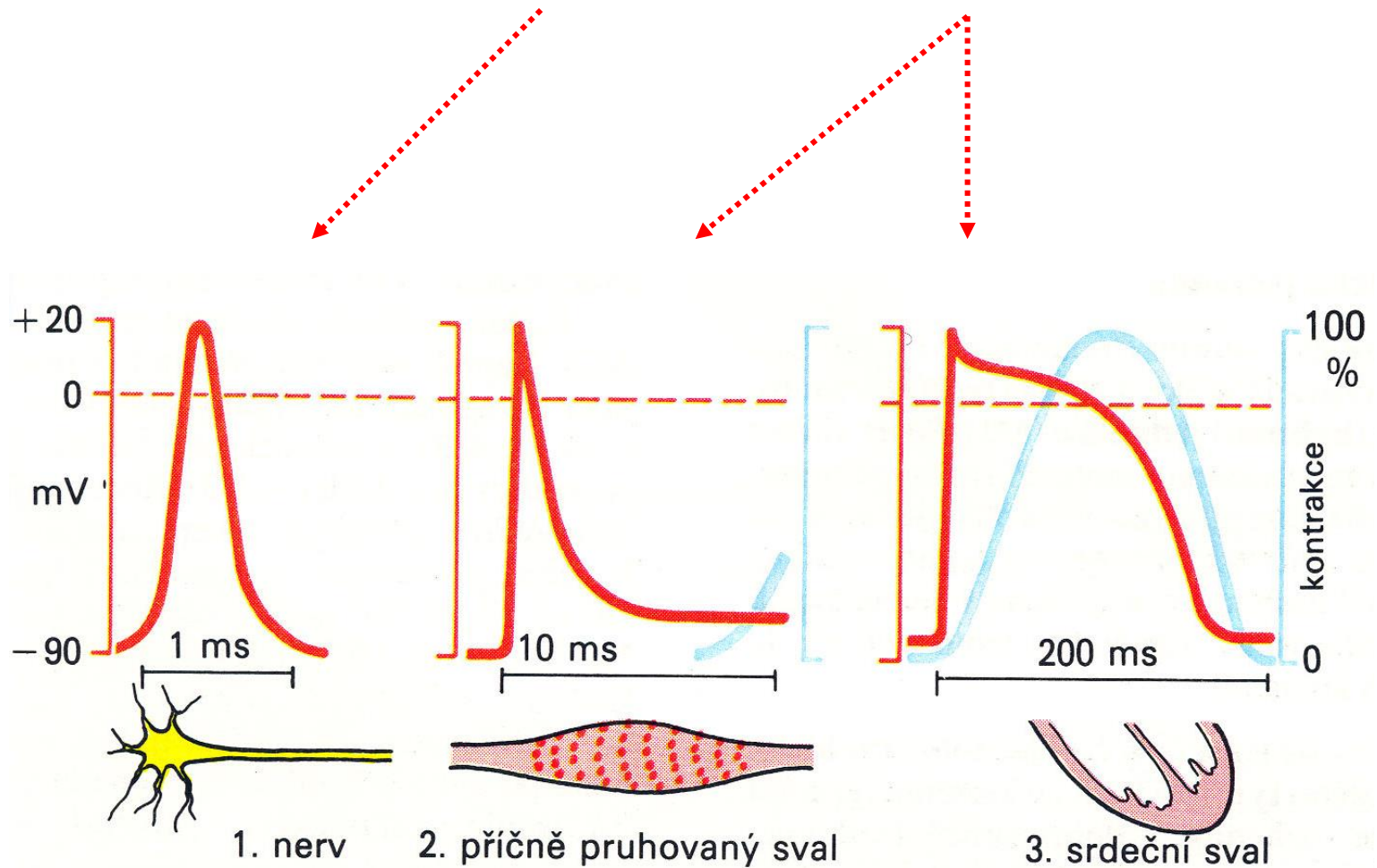
- vzniká u vzrušivé buňky (nervové nebo svalové).
- podrážděním buňky se mění vodivost její membrány pro ionty
- je-li podnět dostatečně silný, vznikne AP

podráždění → zvýšení propustnosti membrány pro  $Na^+$  (až 500 krát), zvýšení propustnosti pro  $K^+$  → sodíková pumpa vše zase vyrovná (proces trvá asi 3ms)

# Průběh akčního napětí srdeční buňky, vodivost membrány pro jednotlivé ionty



# Akční potenciály nervových a svalových vláken

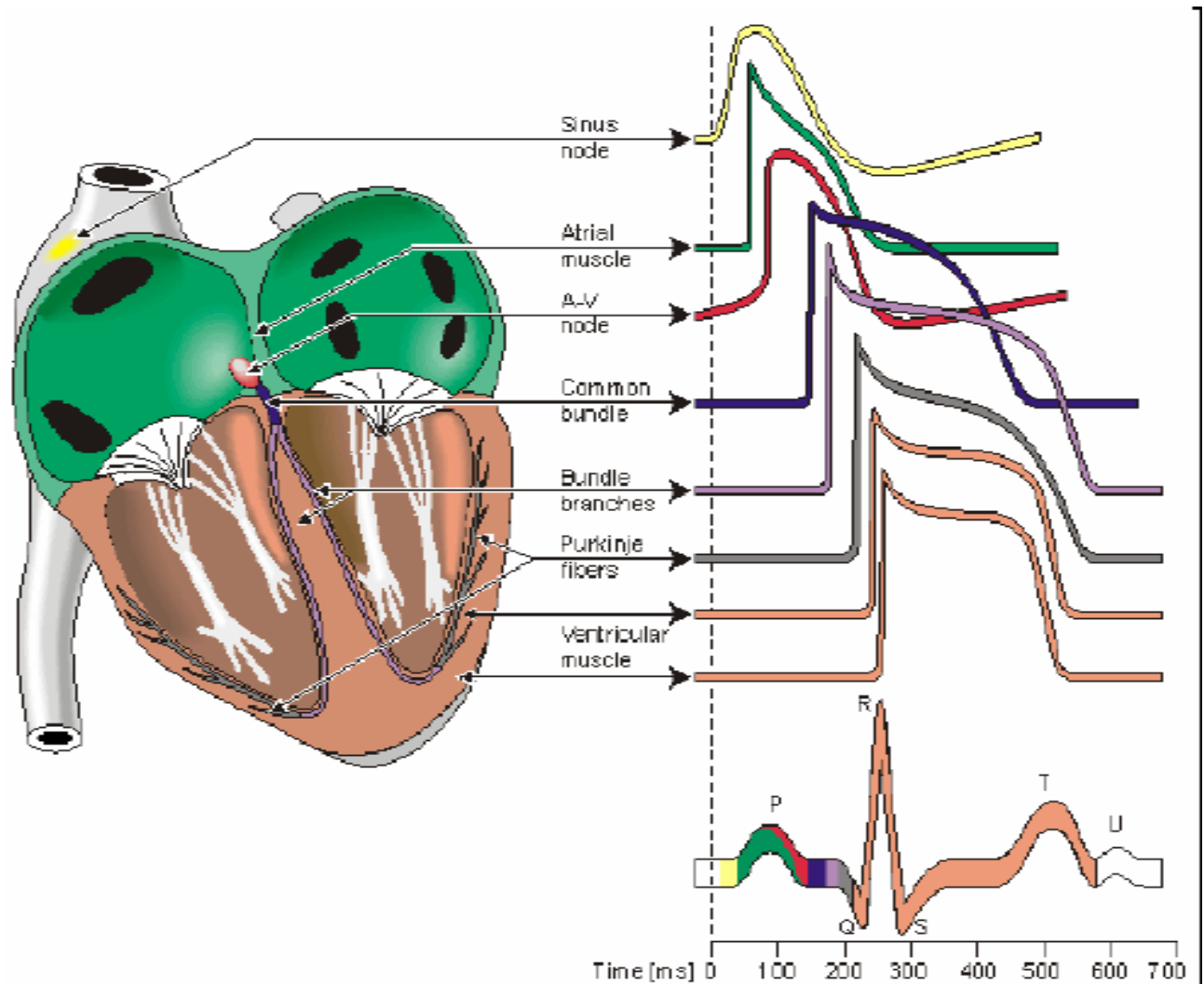
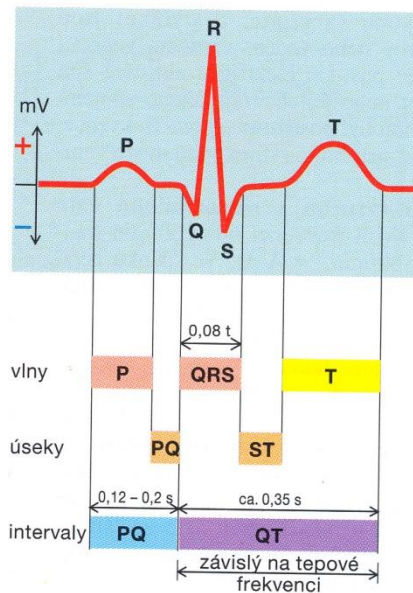


# Využití akčních potenciálů v diagnostice

- Elektrodiagnostika se zabývá registrací elektrických potenciálů vznikajících při činnosti excitabilních orgánů a tkání při diagnostických vyšetřeních

název vyšetření	zkratka	cíl vyšetření
elektrokardiografie	EKG	elektrická aktivita srdce
elektroencefalografie	EEG	elektrická aktivita mozku
elektrokortikografie	ECG	elektrická aktivita mozku
elektromyografie	EMG	elektrická aktivita svalů
elektrogastrografie	EKG	elektrická aktivita hladké svaloviny žaludku
elektroretinografie	ERG	elektrická aktivita oční sítnice
elektrohysterografie	EHG	elektrická aktivita dělohy

# Elektrické vlastnosti srdce



# Elektrická aktivita srdce

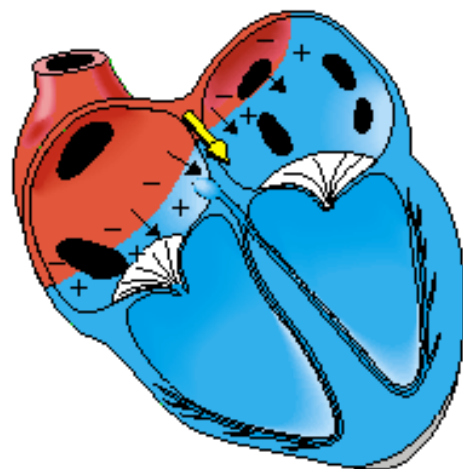
SA uzel – 70 tepů/min.

AV uzel – 50-60 tepů/min.

komorová centra – 25-45 tepů/min.

- Depolarizace vzniká v SA uzlu a šíří se paprskovitě předsíněmi k AV uzlu (depolarizace předsíní za 0,1 s).
- Vedení v AV uzlu je pomalejší a vzniká zpoždění asi 0,1 s. (Doba PQ je doba šíření excitace z SA uzlu k AV uzlu, Hisovu svazku a jeho větvím - u dětí do 14ti let 0,10 – 0,14 s, u dospělých do 0,2 s)
- Z horní partie septa se vlna depolarizace rozšíří přes Hisův svazek přes tzv. Purkyňova vlákna do všech částí komor (0,08 – 0,1 s) – doba QRS (komorový komplex)
- Depolarizace svaloviny komor začíná u člověka na levé straně mezikomorového septa a pokračuje napravo k srdečnímu hrotu, obrací se podél komorových stěn.
- Poslední části, které jsou depolarizovány, jsou části levé komory a nejhořejší části septa.
- Doba QT - trvání elektrické aktivity srdce, tj. tzv. elektrické systoly (od 0,34 s do 0,42 s)

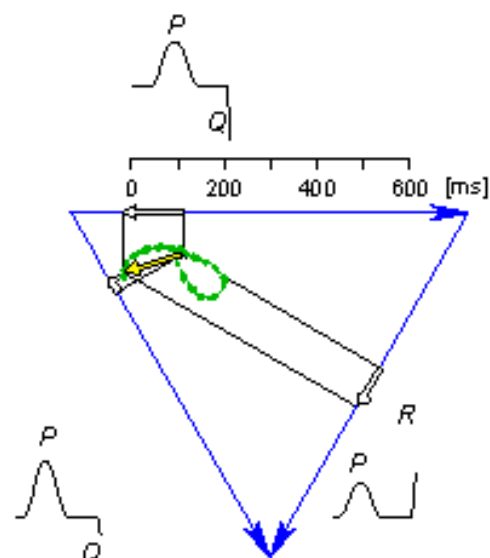
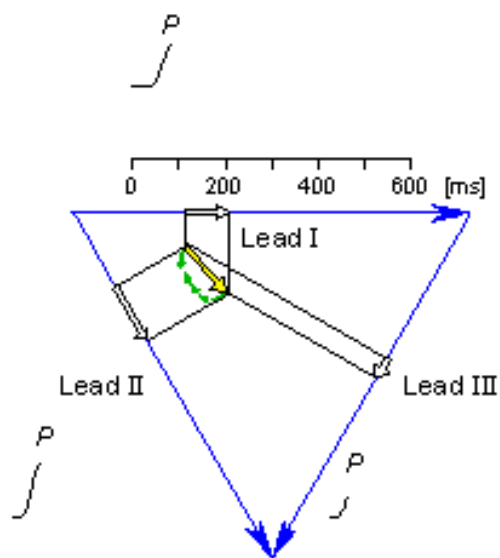
ATRIAL  
DEPOLARIZATION  
80 ms



SEPTAL  
DEPOLARIZATION  
220 ms



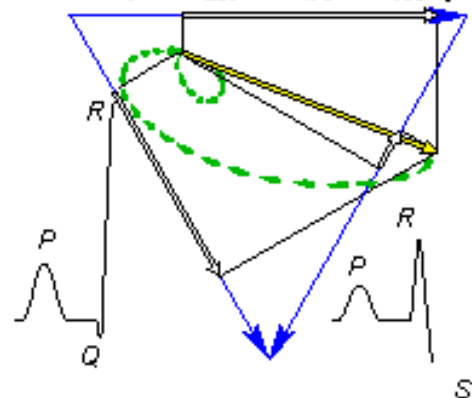
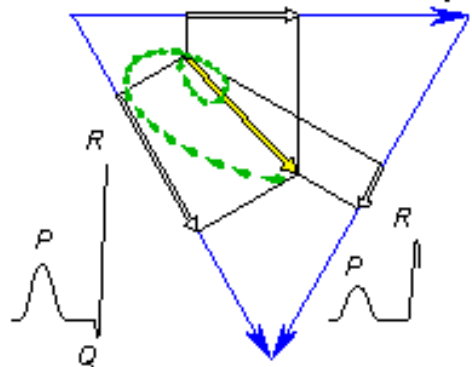
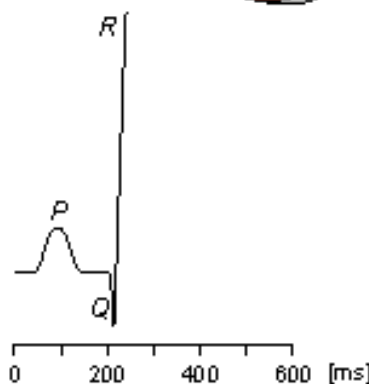
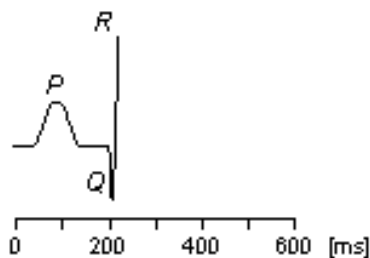
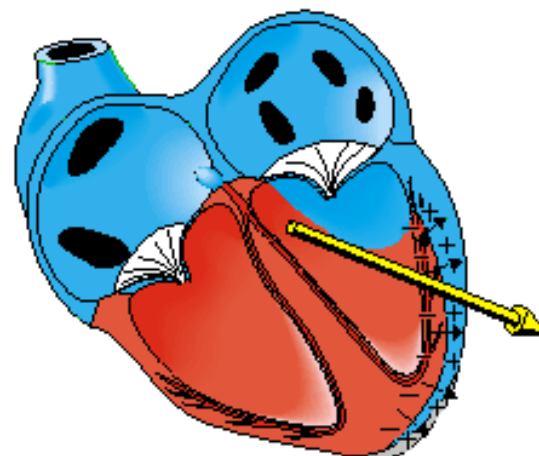
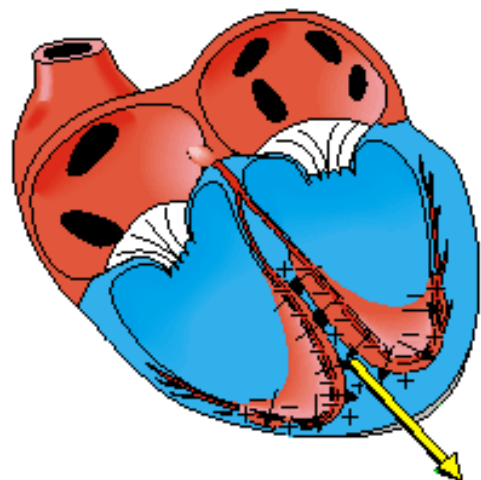
Fáze  
srdečního  
cyklu



APICAL  
DEPOLARIZATION  
230 ms

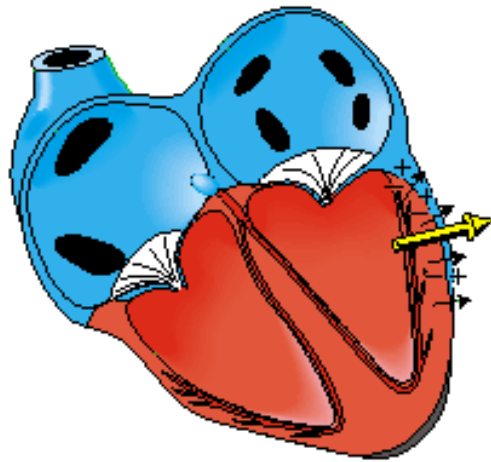
LEFT VENTRICULAR  
DEPOLARIZATION  
240 ms

Fáze  
srdečního  
cyklu

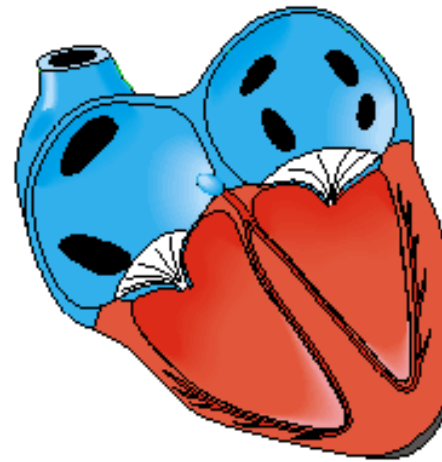




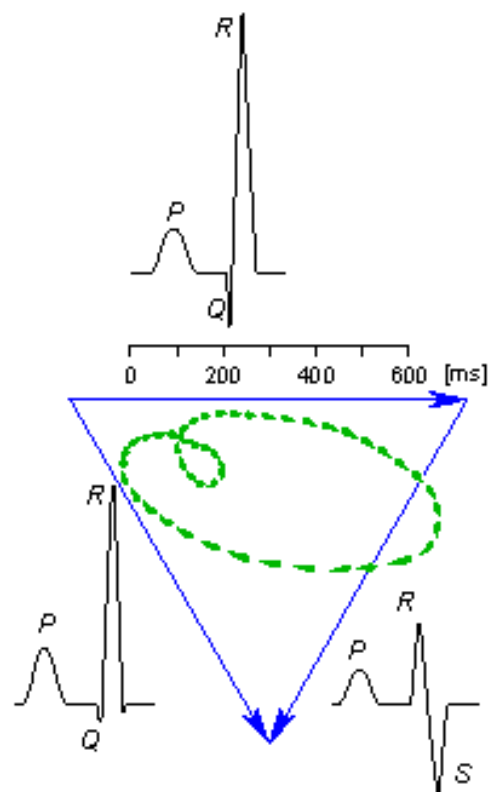
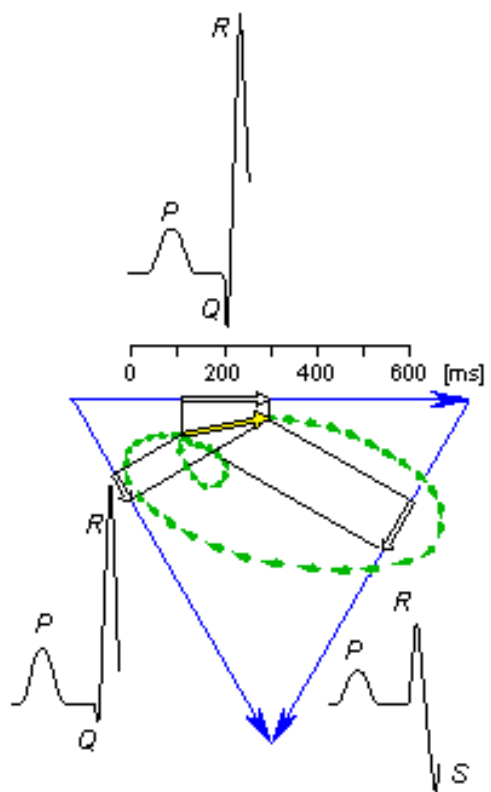
LATE LEFT VENTRICULAR  
DEPOLARIZATION  
250 ms



VENTRICLES  
DEPOLARIZED  
350 ms



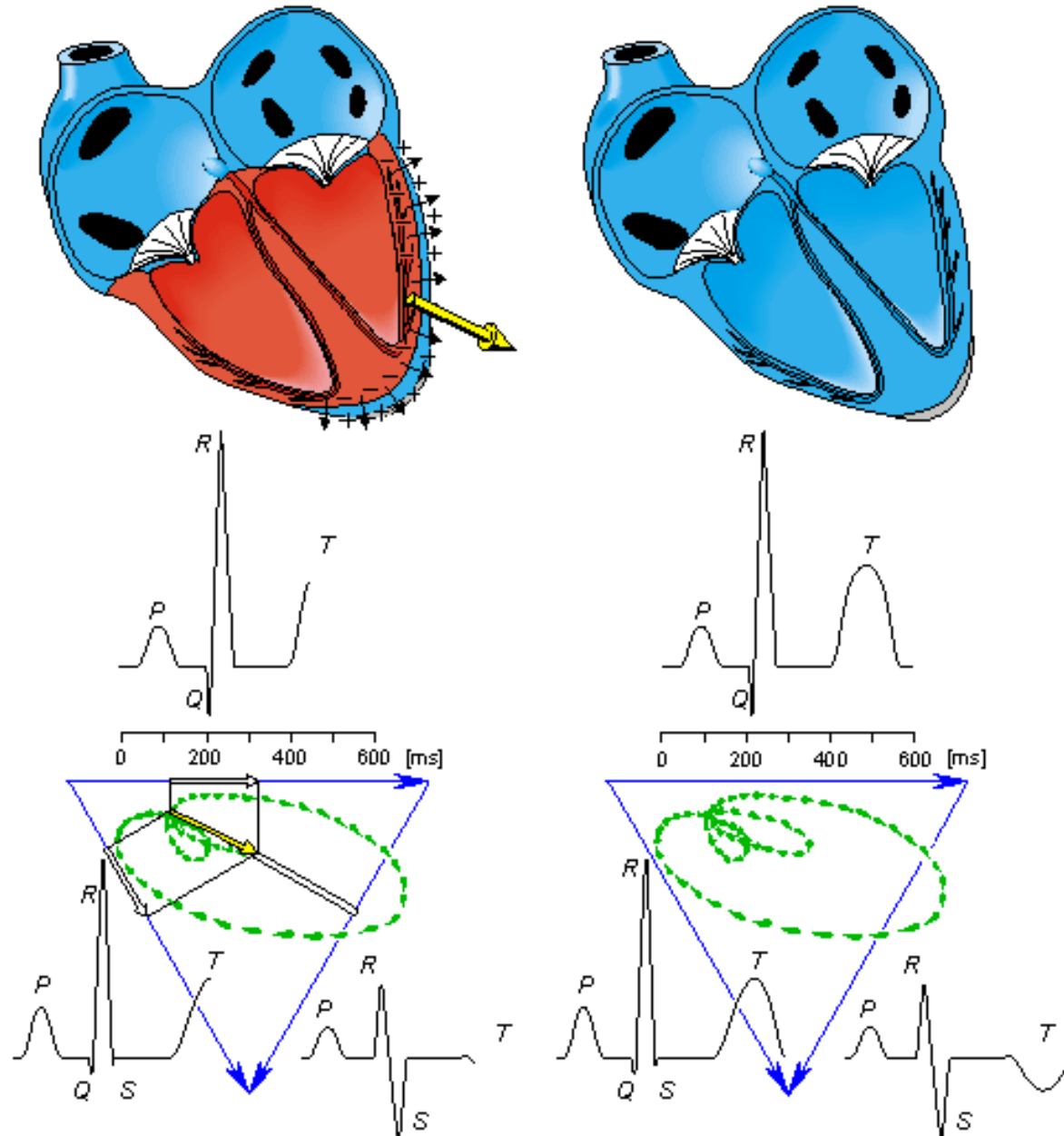
Fáze  
srdečního  
cyklu



VENTRICULAR  
REPOLARIZATION  
450 ms

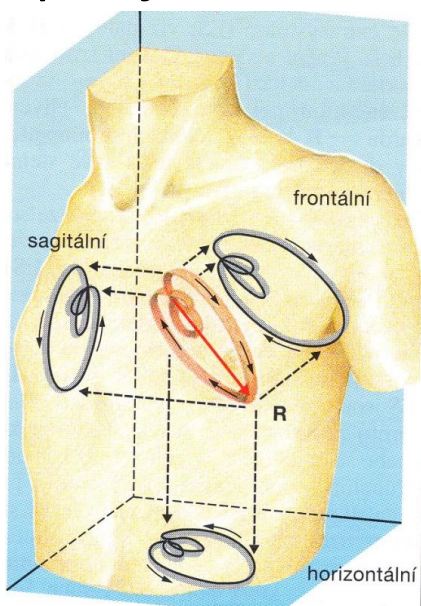
VENTRICLES  
REPOLARIZED  
600 ms

Fáze  
srdečního  
cyklu

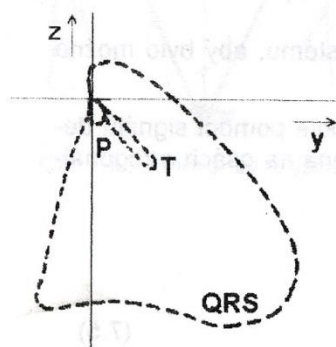


# Elektrokardiogram (signál EKG)

- zobrazuje součet akčních napětí - elektrickou aktivitou srdce
- el. napětí vzniká na rozhraní depolarizovaných a nedepolarizovaných úseků myokardu
- během postupu vlny podráždění vznikají el. potenciály, které se liší velikostí a směrem
- sumární vektor mění během cyklu velikost a směr, jeho vrchol opisuje dráhu smyčky

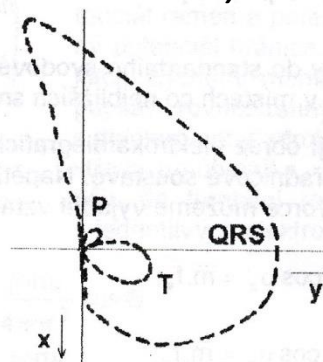


*frontální*



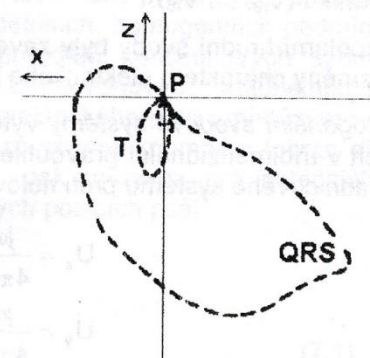
a)

*transverzální  
(horizontální)*



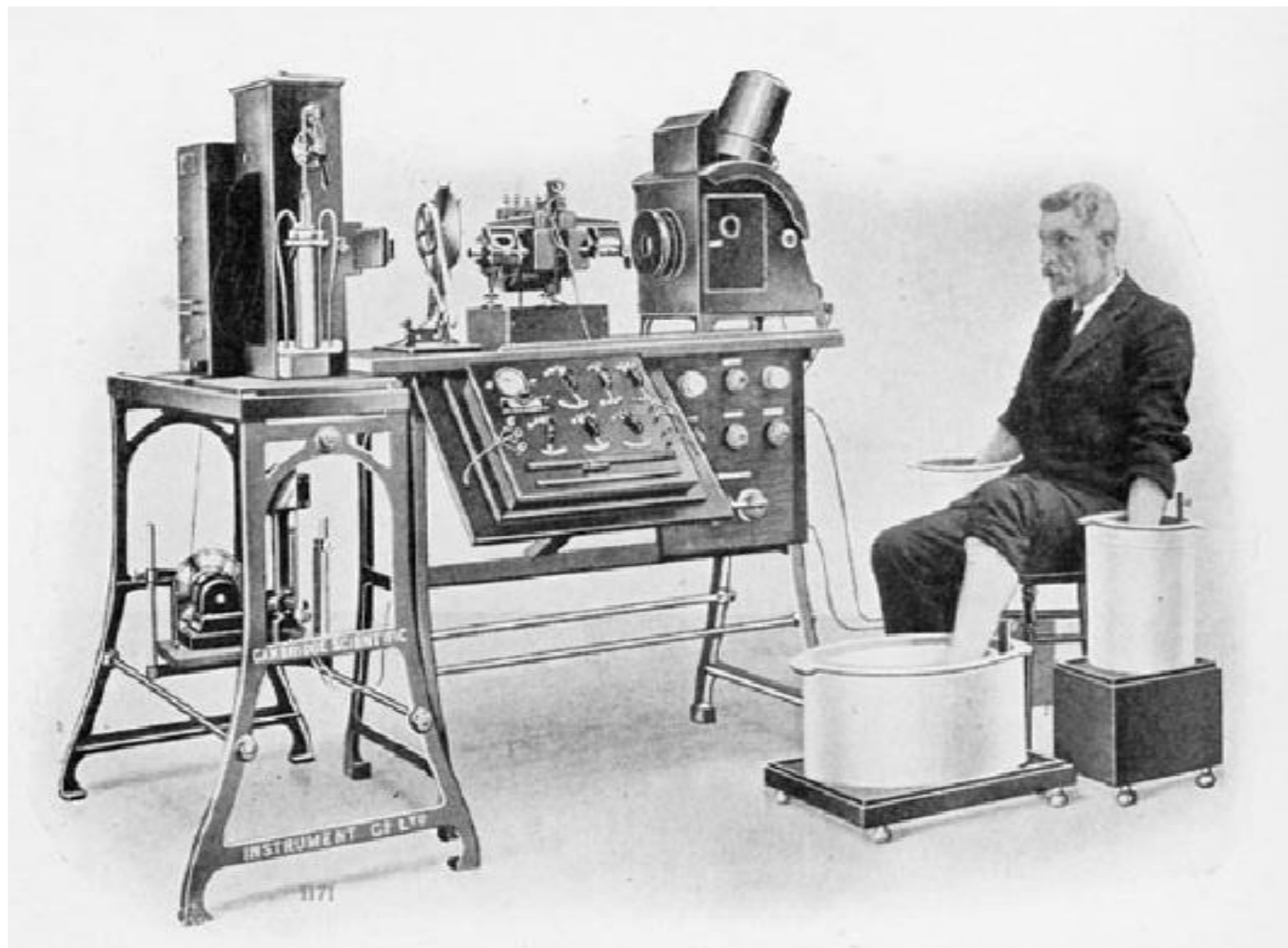
b)

*sagitální*



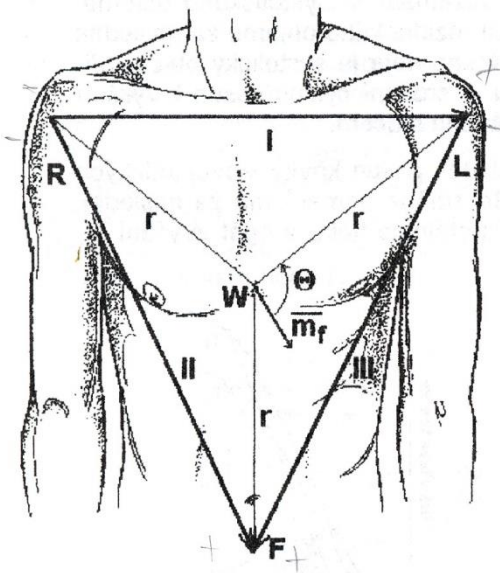
c)

zobrazení jako **vektorkardiogram**

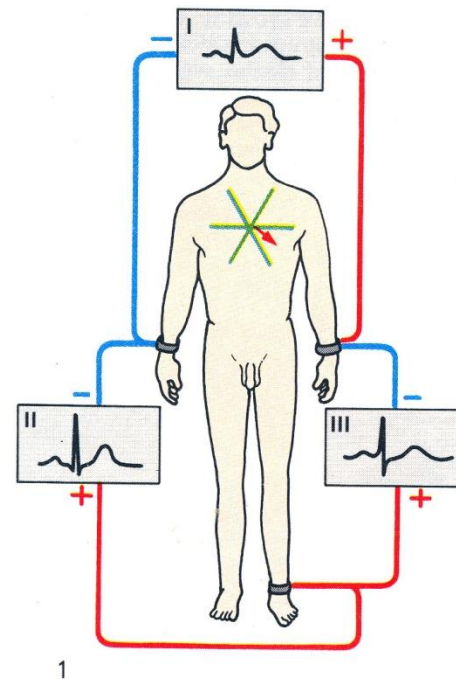


# Snímání signálů EKG

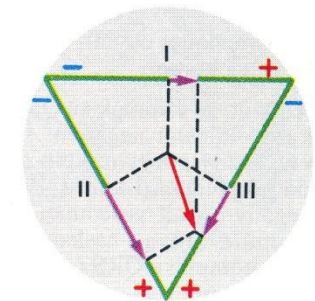
- (u nás je nejběžnější **12svodové EKG**)
- bipolární Einthovenovy svody (I, II, III)
- unipolární Goldbergerovy svody (aVL, aVR, aVF)
- unipolární hrudní svody (V1 - V6)



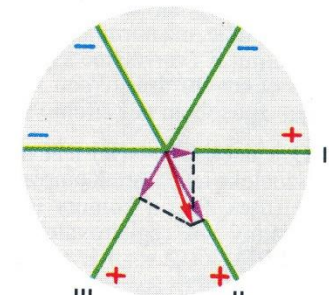
Einthovenův trojúhelník



Einthovenovy bipolární svody

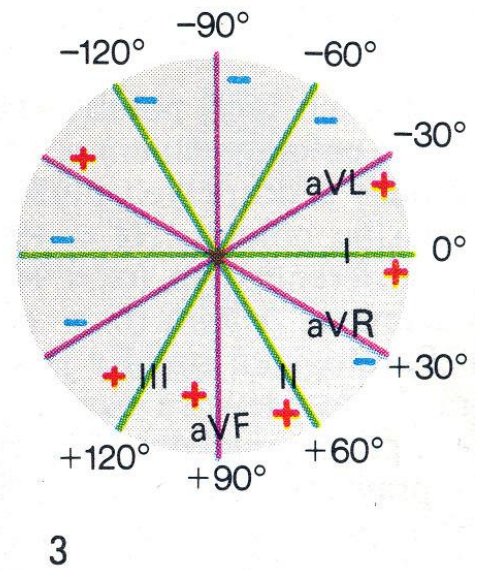
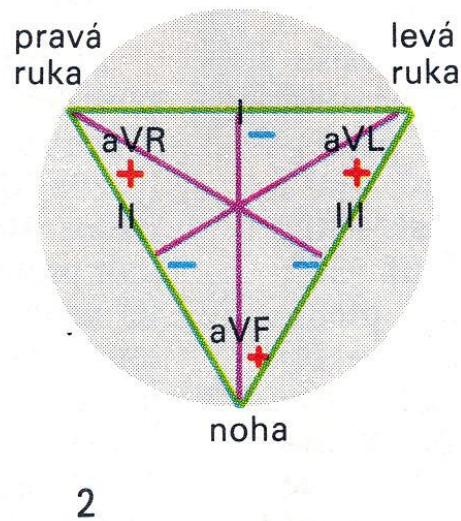
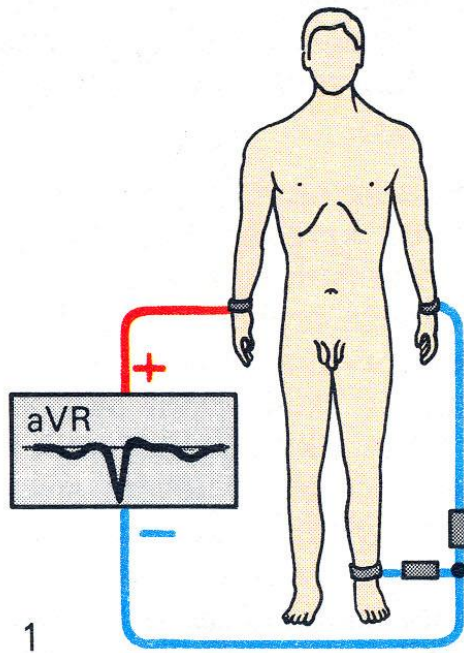


2

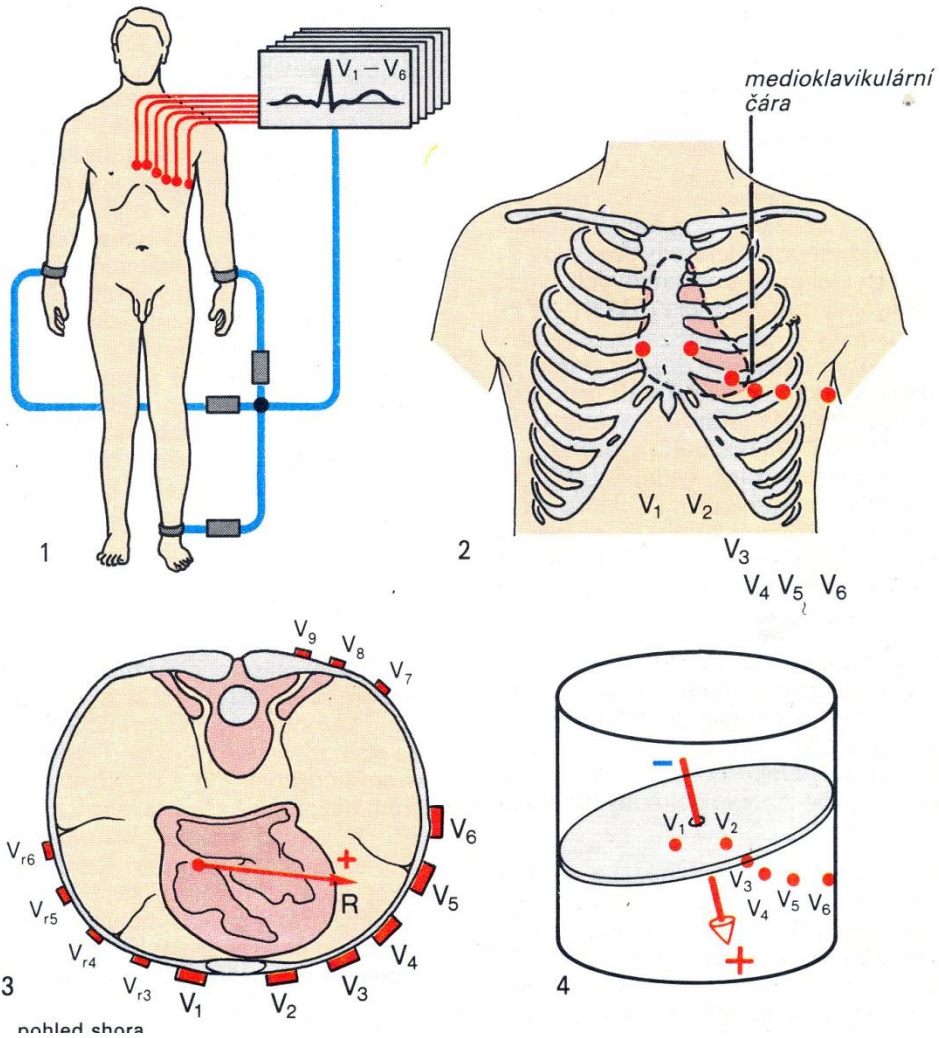


3

# Končetinové unipolární Goldbergerovy svody



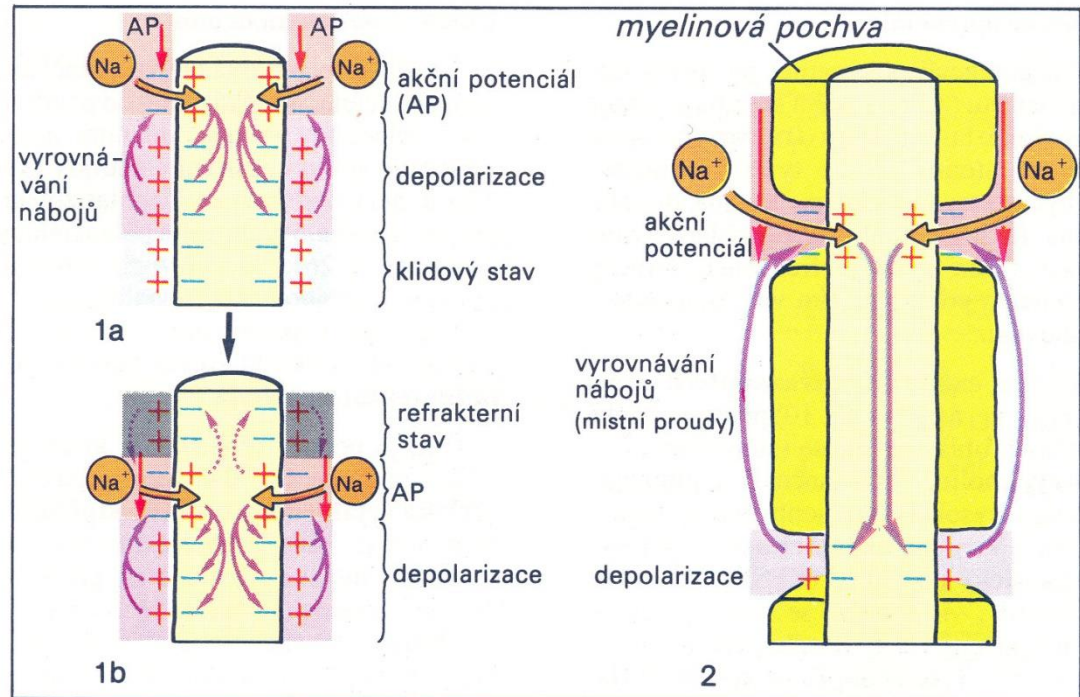
# Unipolární hrudní svody



# Šíření akčního potenciálu nervem

- nervové vlákno má relativně velký odpor a není dobře izolované od okolí
- postupující impuls musí být „osvěžen“ znovuvytvořením AP
- šíření podél nemyelinizovaného axonu (do 1,5 m/s)
- šíření podél myelinizovaného axonu (do 130 m/s)

*nemyelinizovaný a myelinizovaný axon*



A. Kontinuální (1a, 1b) a saltatorní (2) vedení akčního potenciálu



# Účinky elektrického proudu na organismus

žádoucí, cílené x nežádoucí

závisí na:

1. druhu proudu
2. velikosti proudu
3. frekvenci proudu
4. impedanci lidského těla
5. dráze proudu
6. době průchodu proudu
7. fyziologickém stavu a psychickém stavu organismu
8. velikosti dotykového napětí

# Účinky elektrického proudu na organismus

1. Odpor vlastního těla a dalších předmětů v cestě průchodu el. proudu  
kožní odpor (vlhká, suchá kůže, překrvená), odpor vnitřních orgánů je nižší ( $500\Omega$ )
2. Intenzita proudu:  
ss: bezpečná hodnota intenzity ss proudu je menší než 25mA, život ohrožující:  
nad 200mA  
st: život ohrožující nad 10mA, nebezpečné frekvence: 30-150Hz.
3. Napětí:  
50V může být nebezpečné – záleží na proudu  
110-220V může být příčinou fibrilace komor
4. Proud prochází tělem nepřímočaře – cesta nejmenšího odporu: krev, nervová  
vlákna,  
průchod srdcem: fibrilace komor, průchod hlavou: zástava dýchání , srdeční  
činnosti, tonicko-klonické křeče kosterního svalstva, tepelné poškození mozkové  
tkáně.
5. První pomoc při zasažení elektrického proudu:
  1. Přerušeni el. obvodu
  2. Defibrilace srdce, masáž srdce, dýchání z plic do plic.....

# Elektrická stimulace srdce

- **Kardioverze – obnova funkce síní**
  - pomocí elektrického výboje se upraví rytmus srdce, zejm. jeho nadměrně rychlá činnost (fibrilace či flutter síní apod.). Provádí se po přípravě pacienta, v krátké narkóze.
- **Defibrilace – obnova funkce komor**
  - použití elektrického výboje, kterým se na čas „vymaže“ veškerá chaotická srdeční činnost a umožní nástup pravidelnějšího rytmu. Fibrilace komor bez léčby vede rychle k smrti,
  - provádí se okamžitě, jakmile je to možné (pacient při fibrilaci je v bezvědomí). Dvě elektrody se přikládají na hrudník a aplikuje se krátký elektrický výboj. Není-li defibrilace dostupná, je nutná kompletní resuscitace (umělé dýchání, srdeční masáž) až do doby, kdy d. bude možné uskutečnit.
- **Kardiostimulátory - dlouhodobá podpora srdeční funkce**
  - Externí
  - Implantabilní

# Typy kardiostimulátorů

Identifikační kód kardiostimulátorů byl navržen komisí ICHD (1981 – Intersociety Commission for Heart Disease) a zaveden jako kód NBG (1987).

Funkční vlastnosti jsou vyjádřeny třemi případně dalšími dvěma písmennými znaky, jejichž význam je uveden NBG kód kardiostimulátorů.

Zde značí: A - síň, V - komora, O - žádná, D - obojí, T - spouštění, I - inhibice.

1. znak	2. znak	3. znak	4. znak	5. znak
místo stimulace	místo snímání	způsob stimulace	programovatelnost	antiarytmická funkce
A V D (A+V) O	A V D (A+V) O	O I I D (T+I)	P - jednoduchá M - multi-programovatelný C - komunikovatelný R - frekvenčně adaptabilní	P - antitachykardiální stim. S - šok D - (P + S)

# Typy kardiostimulátorů

1. doby trvání stimulace - dočasná (klinické), trvalá (implantabilní),
2. způsobu dráždění - přímé: endokardiální, myokardiální, epikardiální,  
nepřímé: hrudní, jícnové,
3. funkce stimulátoru - neřízené, řízené, programovatelné,
4. počtu ovládaných srdečních dutin - jednodutinové, dvoudutinové,
5. typu stimulačních elektrod - unipolární (záporný pól), bipolární,
6. typu napájení stimulátoru - bateriové, vysokofrekvenčně buzené.

# Dlouhodobá kardiostimulace

- 1960 jednokomorový, asynchronní, neprogramovatelný stimulátor s hmotností 250 g.
- dnes kardiostimulátor dvoudutinový, multiprogramovatelný s diagnostickou funkcí i sběrem dat. (fyziologická kardiostimulace – přizpůsobeno pacientovi), hmotnost 25 g, životnost 10 let.



# Neřízená kardiostimulace

- stimulátory s pevnou opakovací frekvencí a šíří impulsů, ~ 1 Hz a 1,2 až 1,5 ms,
- nejjednodušší konstrukce,
- aplikace při chronické AV bloádě pro obnovení spontánního srdečního rytmu,
- řízení činnosti komor, síně tepou vlastním rytmem. (asynchronní),
- Interferencí činnosti stimulátoru s obnovenou spontánní srdeční aktivitou mohou být vyvolány salvy extrasystol, komorová tachykardie či fibrilace komor. Stimulační impuls proto nesmí být aplikován ve **vulnerabilní fázi** EKG signálu (vzestupné rameno T vlny).

# Řízená kardiostimulace

- Stimulace synchronní, řízeno vlnami P nebo R,
- mohou pracovat jako inhibované nebo spouštěné vlnami.

## Kardiostimulace řízená P vlnou

Stimulátor nahrazuje narušený srdeční převodní systém při normální činnosti síní.

1. elektroda - snímání aktivity síní - P vlny
2. elektroda - stimulace komor po časovém zpoždění (160 ms)
3. elektroda – společná – umístěna na stimulátoru

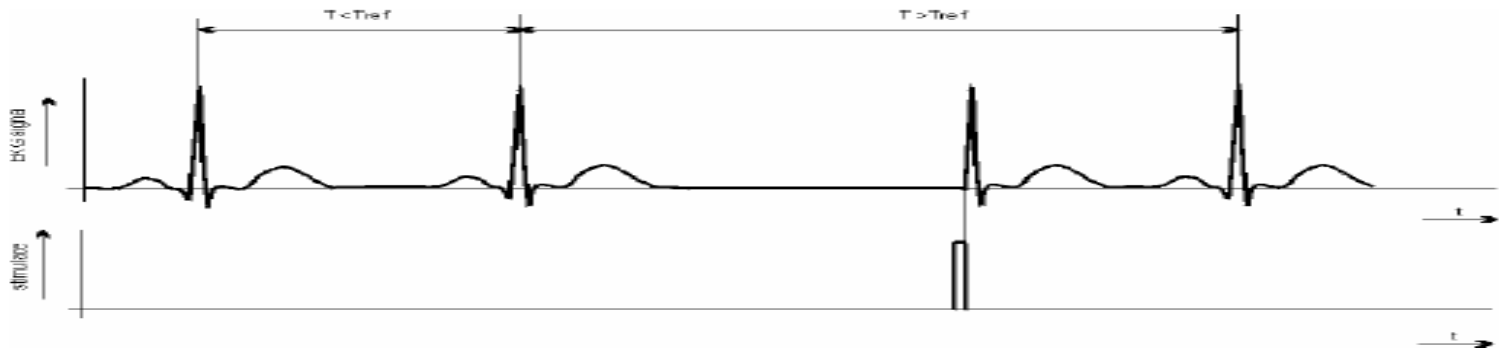
- sledování námahy
- při poklesu frekvence síní pod jistou minimální mez pokračuje stimulátor v asynchronní stimulaci komor s touto minimální frekvencí,
- při vysoké frekvenci síní se uplatní *refrakterní doba stimulátoru* (doba necitlivosti k detekci EKG) a komory jsou stimulovány bezpečnou, např. poloviční frekvencí síní.



# Řízená kardiostimulace

## Kardiostimulace řízená R vlnou – inhibovaná (on demand)

- řízen komorovou aktivitou – R vlny EKG signálu,
- jedna elektroda - snímání i stimulace, (zpravidla se zavádí do hrotu pravé komory),
- hodnocen je R-R interval,
- zamezení možnosti interference rytmů,
- kontrola frekvence generovaných impulsů - zabudované magneticky ovládané spínače. Vnější magnetem lze vyřadit z činnosti inhibiční obvody a stimulátor potom pracuje jako neřízený s pevnou (vyšší) frekvencí.



# Řízená kardiostimulace

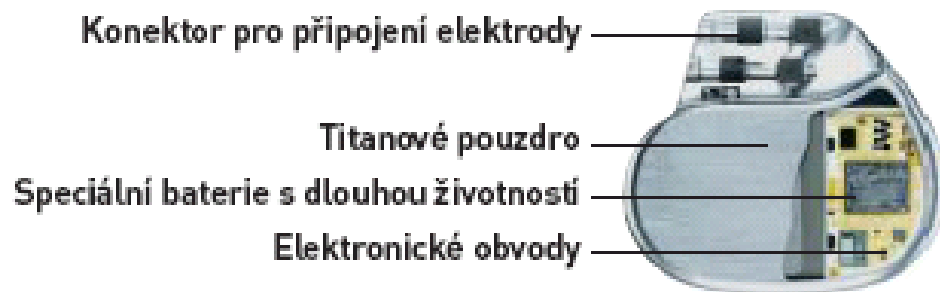
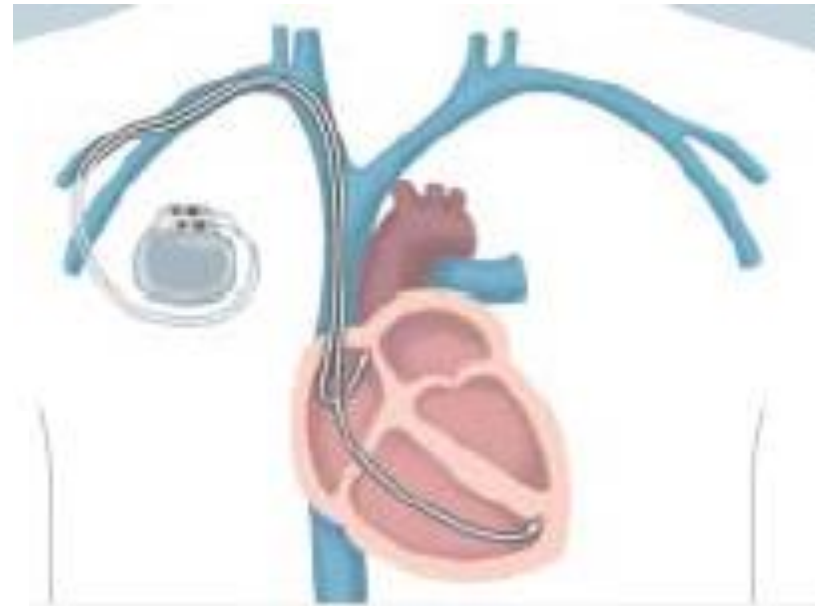
## Kardiostimulace řízená R vlnou – spouštěná (*stand by*)

- je okamžitě spouštěn každou R vlnou EKG signálu.
- stimulační impuls (asi 1,5 ms) časově zapadá do QRS komplexu (zhruba 80 ms) a tím nezpůsobí další,
- při snížení frekvence spontánní činnosti pod nastavenou minimální hodnotu je vyslán funkční stimulační impuls,
- při zvýšení frekvence nad zvolenou maximální hodnotu je stimulátor spouštěn jen každou druhou nebo třetí R vlnou.

# Dvoudutinová kardiostimulace

- označení jako „bifokální“
- tvořeno dvěma bloky typu *on demand* řízenými komorovou aktivitou, (jeden blok stimuluje síně, druhý komory),
- inhibiční interval bloku pro síně je kratší oproti inhibičnímu intervalu pro komory o dobu fyziologického zpoždění vzruchu šířícího se ze síní do komor (A-V zpoždění)

# Umístění elektrod



## Použitá literatura:

Navrátil L., Rosina J. a spol.: Medicínská biofyzika, Grada, 2005.

Rozman J. a kol. Elektronické přístroje v lékařství, Akademia, 2006

# Šíření vzruchu nervovými vlákny

- vzruch - projev činnosti nervové soustavy
- informace je kódována frekvencí a počtem vzruchů
- na membráně každé buňky, tedy i neuronu, je v klidu nerovnoměrné rozložení iontů a náboje (polarizace membrány, klidový potenciál)
- vně buňky je vyšší koncentrace  $\text{Na}^+$ , uvnitř  $\text{K}^+$
- vně buňky je kladný náboj (převažují kationty), uvnitř je záporný náboj (převažují anionty) – o 70mV se liší el. potenciály
- v místě podráždění neuronu se zvýší propustnost membrány pro  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Na}^+$  vnikají dovnitř neuronu, tím se mění i rozložení náboje na membráně (depolarizace membrány, akční potenciál)
- po podráždění se zvýší propustnost membrány pro  $\text{K}^+$ ,  $\text{K}^+$  unikají z neuronu po koncentračním i potenciálovém spádu a obnoví tak rozložení náboje na membráně (depolarizace membrány)
- původní rozložení iontů  $\text{Na}^+$  a  $\text{K}^+$  poté zajistí a udržuje sodíková-draslíková pumpa

# Neuromuskulární stimulátory

- stimulace nervů a kosterního svalstva
- stimulace vnější (transkutánní aplikace – přes kůži)
- stimulace vnitřní (implantabilní aplikace)
- vícekanálová

Z pohledu umístění stimačních elektrod:

- odpor kůže a podkožních tkání se podstatně liší
- impedance kůže a podkoží – *kapacitní charakter* →
  - nízké frekvence – stimulační energie je pohlcována převážně kůží – podráždění mnoha receptorů – nepříjemné pocity
  - vyšší frekvence – do vnitřních orgánů se dostává více stimulační energie