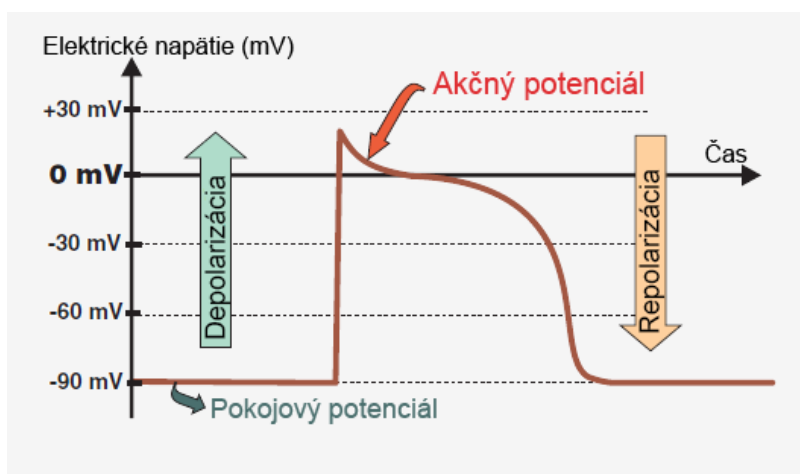


Základné poznatky o elektrofyziológii srdca, princíp vzniku EKG krivky, EKG zvody

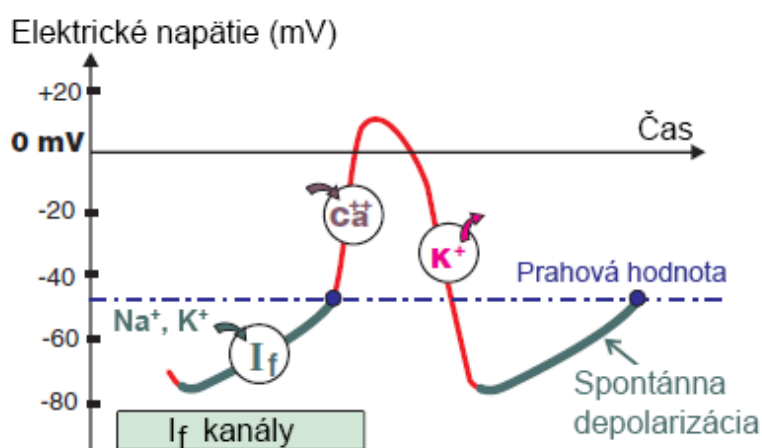
Z pohľadu elektrofyziológie je srdce tvorené bunkami pracovnej svaloviny a bunkami prevodového systému (špecializovaného vidového systému) a tieto dve skupiny buniek majú rozdielne elektrofyziologické vlastnosti.

Bunky pracovnej svaloviny – ich hlavnou funkciou v srdci je vykonávať mechanickú prácu – čerpaciu funkciu srdca, čo sa dosiahne pravidelným striedaním systoly a diastoly, čiže kontrakcie a relaxácie pracovnej svaloviny. Tieto bunky sú polarizované – ich vnútro je elektricky negatívne s hodnotou potenciálu blízko -90 mV a tieto bunky nemajú takú štruktúru membrány, ktorá by im umožnila za normálnych fyziologických okolností tvoriť vzruchy – chýba im tzv. If kanál, ktorým by do bunky vtekal sodík a draslík – tento sa ale nachádza v tzv. automatických bunkách prevodového systému, ktoré tvoria vzruchy spontánne. Udržujú tzv. pokojový membránový potenciál, pokiaľ nie sú podráždené dostatočne silným podnetom – elektrickým stimulom, ktorý má takú amplitúdu, že dokáže „otvoriť“ tzv. rýchle napäťovo riadené sodíkové kanály a vzniká akčný potenciál. Do bunky vteká sodík, následne sa otvárajú vápnikové kanály, do bunky vteká vápnik potrebný pre kontrakciu a vyteká z nej draslík – bunka sa depolarizuje. Na záver sa aktivitou ATP závislých transportných procesov ióny vrátia na svoje pôvodné miesto (von, alebo do bunky) – repolarizácia a tento proces sa pravidelne opakuje.



Bunky prevodového systému

Tieto bunky nemajú kontraktilnú funkciu, ich hlavnou funkciou v srdci je tvorba a prevod vzruchov. Bunky prevodového systému sú špecificky usporiadané do štruktúr ako je SA – sinoatriálny uzol, AV – atrioventrikulárny uzol a prevodové dráhy, ktoré spájajú uzly navzájom, a vedú vzduchy z AV zóny do komôr. Membrána týchto buniek disponuje tzv. pomalým sodíkovým kanálom, ktorý umožňuje spontánny vtok sodíkových katiónov do bunky z extracelulárneho prostredia – tzv. spontánnu diastolickú depolarizáciu (SDD, nazývanú aj prepotenciál) a keď hodnota napätia na membráne, ktorá sa spontánne depolarizovala dosiahne určité prahové napätie potrebné na otvorenie „rýchlych“ sodíkových kanálov (napätovo riadených) – vtedy vzniká vzruch. Za fyziologických okolností vzruch vzniká najrýchlejšie v SA uzle, ktorý je prirodzeným pacemakerom srdca. Vzruch sa potom šíri tkanivom predsiení a komôr z bunky na bunku pomocou medzibunkových spojení – gap junctions, ktoré majú nízky odpor a vzruchy vedú veľmi rýchlo. Dostatočne rýchly a synchronizovaný prevod vzruchov zabezpečí synchronizovanú depolarizáciu a repolarizáciu a s nimi spriahnuté mechanické procesy – kontrakciu a relaxáciu.

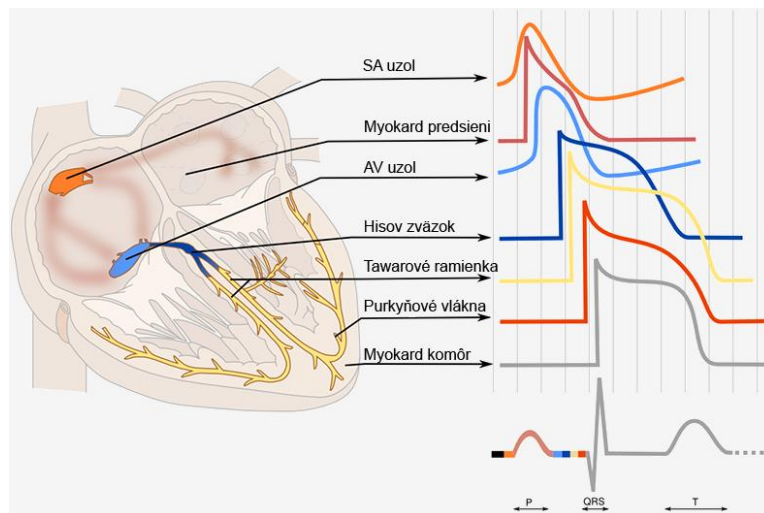


Schopnosť buniek spontánne sa depolarizovať závisí od ich východiskového potenciálu – čím je nižší (bližší k nule) tým je schopnosť spontánnej depolarizácie vyššia.

Aj bunky pracovnej svaloviny myokardu môžu získať schopnosť spontánne sa depolarizovať ak sa ich vlastnosti za patologických podmienok zmenia. Jedným z prejavov takejto zmeny je zníženie ich pokojového membránového potenciálu pod určitú hodnotu (napr. na menej ako

- 50mV), čo sa stáva vtedy, keď sú bunky poškodené napr. ischemiou, zápalom, hyperkaliémiou alebo inými patologickými procesmi, čo vedie k vzniku rôznych porúch srdcového rytmu.

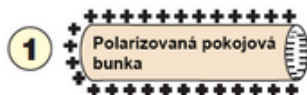
Ako už bolo uvedené, vzruchy za fyziologických okolností vznikajú v SA uzle a šíria sa internodálnymi dráhami a pracovnou svalovinou predsiení, následne sa prevod vzruchu spomalí v AV zóne a potom prebieha veľmi rýchlo depolarizácia – šírenie vzruchu medzi bunkami pracovnej svaloviny komôr, a tento dej je nasledovaný repolarizáciou, čo je proces obnovenia pokojového membránového potenciálu na -90 mV v bunkách pracovnej svaloviny a -60 mV v bunkách prevodového systému. Každému z týchto procesov zodpovedá na EKG krivke určitá časť, či už vlna, kmit, alebo segment, ktoré budeme spoločne hodnotiť, či sú fyziologické, alebo vykazujú znaky narušenej elektrofyziológie srdca.



Zopakovanie z fyziológie

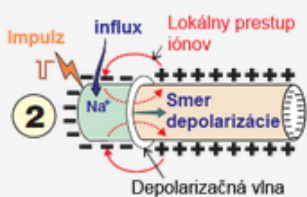
Tkanivá srdca nie sú dobrým elektrickým vodičom. Táto ich nevýhoda je eliminovaná niektorými inými vlastnosťami, napr. tou, že v bunkách s vysokým pokojovým membránovým potenciálom sa pri šírení podráždenia z bunky na bunku vytvára vzruch v každej nasledujúcej bunke „de novo“ (znova), veľkosť depolarizačného potenciálu v nasledujúcich bunkách teda neklesá – vzruch sa šíri po myokarde bez decrementu. Toto pravidlo neplatí pre bunky s nízkou hodnotou pokojového membránového potenciálu. V nich sa podráždenie šíri s decrementom (úbytkom) čo znamená, že môže počas šírenia sa z bunky na bunku aj vyhasnúť (je to jeden z mechanizmov blokády prevodu vzruchov v srdci).

Základom EKG krivky sú elektrické prúdy, ktoré vznikajú pri depolarizácii a repolarizácii svalových buniek a šíriacich sa v extracelulárnom priestore v smere prebiehajúcej depolarizácie. Tieto prúdy znižujú pokojový potenciál buniek nachádzajúcich sa vpredu pred depolarizačným frontom (približujú ho k ich prahovému potenciálu a pripravujú ich na blížiacu sa depolarizáciu). Teda, čím väčší je rozdiel napätia medzi už depolarizovanou a ešte normálne polarizovanou časťou svaloviny srdca, tým intenzívnejšie sú lokálne elektrické prúdy a tým vyššia je rýchlosť vedenia vzruchu v srdci. Lokálne prúdy môžu byť v srdci účinné až do vzdialenosti niekoľkých milimetrov, čo pri dĺžke svalovej bunky 50-100 μm znamená, že vzruch môže niekoľko buniek (normálnych alebo so zníženou vodivosťou, či absolútne nevodivých) aj „preskočiť“ a zabezpečiť pokračovanie vo vedení vzruchu aj za poškodenými bunkami.



Pokojevý membránový potenciál

- V pokoji je kardiomyocyt v **polarizovanom stave**
- **Extracelulárny priestor je elektricky pozitívny**
 - Pre vysokú extracelulárnu koncentráciu Na^+
- **Intracelulárny priestor je negatívny**
- Rozdiel napätí (intra a extracelulárne) je **-90mV**



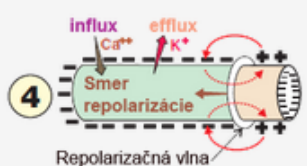
Depolarizácia

- Ak sa kardiomyocyt podráždi **negatívnym elektrickým impulzom**
 - Zo susednej bunky (impulzy spontánne vznikajú v **SA uzle**)
 - Z elektródy **kardiostimulátora**
- Tak sa **otvorí iónové kanály pre Na^+**
 - Nasleduje **influx Na^+ do bunky** po elektrickom gradiente
 - Začína sa meniť elektrické napätie
 - pretože intracelulárne stúpa koncentrácia Na^+
- Ak dosiahne napätie na membráne **prahový potenciál (-50mV)**
 - tak sa otvoria **ďalšie rýchle sodíkové kanály**
- Výsledok je **depolarizácia**
 - Ide o **zmenu polarity membrány**
 - **Extracelulárny priestor sa mení na negatívny**
 - Intracelulárny sa mení na pozitívny pre influx Na^+
 - Depolarizácia sa šíri **od miesta aktivácie ako depolarizačná vlna**



Depolarizovaný kardiomyocyt

- **Je extracelulárne negatívny**
- Depolarizačná vlna postupne **depolarizovala celý kardiomyocyt**
 - Potom pokračuje na ďalšie kardiomyocyty



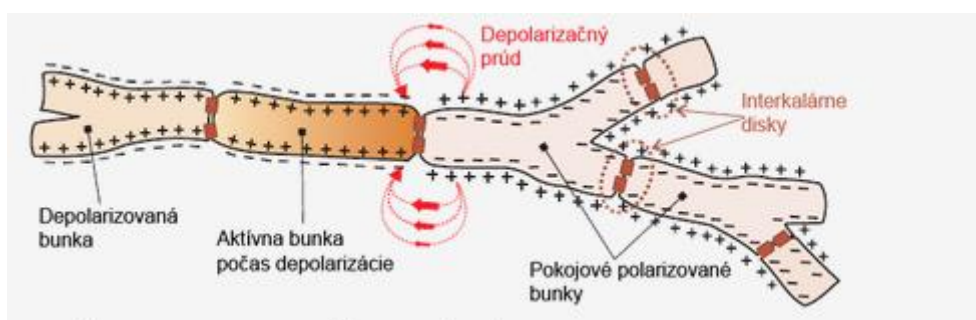
Repolarizácia

- Na konci depolarizácie dochádza **opäť k prestupu iónov cez kanály**
 - Ide hlavne o ióny Ca^{++} a K^+
- Nastáva **návrat do pôvodného polarizovaného stavu**
- **Repolarizačná vlna sa šíri pomaly a opačne ako depolarizačná**
 - V **myokarde** sa **epikard začína repolarizovať skôr ako endokard**
- Extracelulárne prostredie sa opäť mení na **pozitívne**

EKG krivka a jej zaznamenávanie

EKG krivka zaznamenávaná z povrchu tela vzniká **sumáciou AP všetkých depolarizovaných a nasledovne repolarizovaných buniek pracovného myokardu**. Depolarizácia buniek prevodového systému srdca sa na bežnom EKG zázname nezobrazuje, pretože suma akčných potenciálov buniek tohto tkaniva je taká malá, že je pod úrovňou citlivosti EKG prístroja. Ak však použijeme intrakardiálne snímacie elektródy, potom môžeme zaregistrovať aj elektrickú aktivitu štruktúr prevodového systému srdca, čo sa aj využíva v diagnostike niektorých dysrytmíí.

Základom EKG krivky sú elektrické prúdy, ktoré vznikajú pri depolarizácii a repolarizácii svalovej bunky. Tieto prúdy „tečú“ vnútri bunky, okolo bunky a medzi vnútrom a vonkajškom bunky, teda cez bunkovú membránu. Pri vysvetľovaní interpretácie EKG často hovoríme, že depolarizácia (jej výsledný vektor) smeruje od SA uzla doľava a dolu vo frontálnej rovine – t.j. akoby z „pravého ramena“ smerom doľava dolu. Neskôr si vysvetlíme prečo je dôležité poznať predpokladaný smer šírenia depolarizácie v srdci (hlavne jeho výsledného vektora tzv. elektrickej osi srdca).

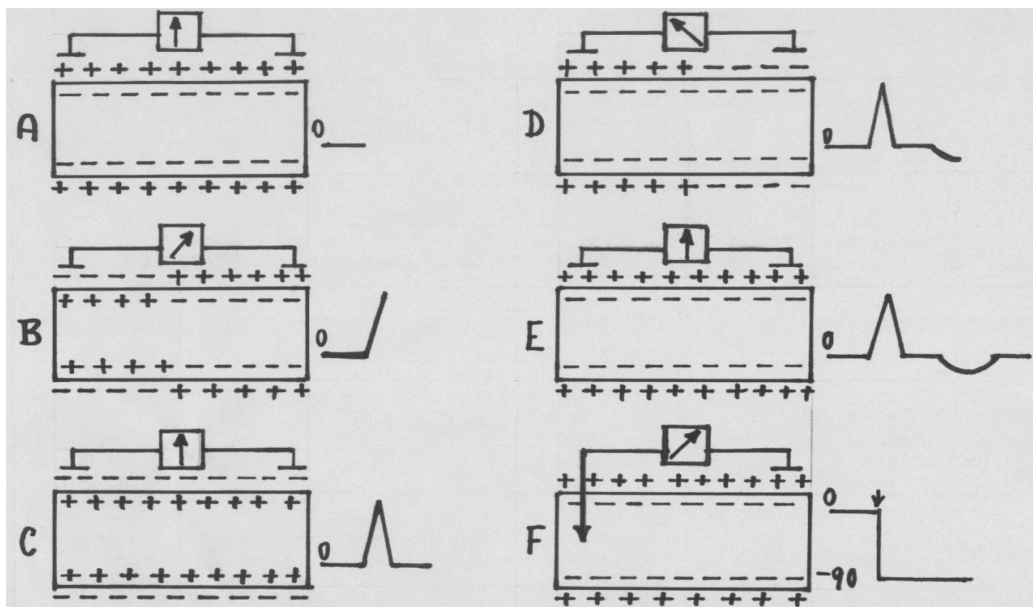


Schematicky sú tieto procesy znázornené na prúžku pracovnej svaloviny srdca.

Dôležitá poznámka: na EKG sa znázorňuje izoelektrická línia (rovná čiara) vtedy, ak myokardom neprechádza žiadny elektrický prúd – nie sú prítomné žiadne vlny a kmity - vidíme rovnú čiaru, a to znamená

- a) nič nie je depolarizované
- b) všetko je depolarizované

V prípade, že sa myokardom šíri el. prúd (depolarizačný alebo repolarizačný), tak sa na EKG krivke znázornia vlny a kmity a ak sa el. prúd šíri smerom „ku“ snímajúcej elektróde, tak sa na EKG zaznamená pozitívna vlna, či kmit. Ak sa naopak el. prúd šíri smerom „od“ elektródy – tak sa na EKG zaznamená negatívna výchylka. Preto napríklad ST segment v prípade ischémie sa posúva vplyvom „ranového“ prúdu smerom hore, alebo smerom dole podľa toho, či smeruje ku elektróde, alebo od elektródy.



Čo vidíme na obrázku:

A: Ak sú bunky svaloviny v pokojnom stave (ak ide o celé srdce, tak je to diastola) a priložíme na jeho povrch dve elektródy pripojené na voltmeter nezistíme žiadny rozdiel napätia, pretože povrch membrány buniek má na všetkých miestach rovnaké napätie. Ak je voltmeter pripojený na dostatočne citlivé registračné zariadenie bude zapisovať **izoelektrickú líniu** (nulový potenciál). Ak zanoříme jednu z týchto elektród do svaloviny (do vnútra bunky) a druhá zostane na povrchu, ihneď dôjde k **zmene polohy zaznamenávanej línie** – posunie sa smerom dole, čo dokumentuje, že **vnútri bunky je prevaha negatívne nabitých častíc oproti vonkajšej**

strane membrány. Rozdiel potenciálov medzi vnútrom a vonkajškom bunky je cca 85-90 mV. Je to jasný znak polarity bunkovej membrány bunky pracovnej svaloviny.

B: Keď sa začne depolarizácia svalového vlákna vyvolaná elektrickým impulzom, pričom obe registračné elektródy sa nachádzajú na povrchu bunky, zaznamenáme na pripojenom voltmetri elektrickú aktivitu, ktorá má dve hlavné fázy. Prvou je **fáza depolarizácie**, čo znamená, že polarita svaloviny v depolarizovanej časti sa obráti – na povrchu bude negatívny náboj, vo vnútri jej buniek náboj pozitívny. **Proces depolarizácie je rýchly dej** (preto je trvanie zaznamenaného depolarizačného kmitu krátke) **a amplitúda depolarizačného kmitu je vysoká** (závisí od výšky pokojového potenciálu a množstva depolarizovaných buniek). Uvedené parametre má preto, že medzi povrchom bunky a vnútrom bunky je veľký potenciálový rozdiel. Všeobecne môžeme povedať, že **depolarizačný kmit je tým rýchlejší a jeho amplitúda tým vyššia, čím je pokojový potenciál bunky pred depolarizáciou väčší.** Výsledkom tohto procesu je tiež vznik elektrického napätia medzi časťou svalového vlákna už depolarizovaného a ešte nedepolarizovaného. Napätie vedie k toku elektrického prúdu, smer ktorého je od pozitívne nabitej časti k negatívne nabitej. Z toho dôvodu tečie prúd vnútri buniek prúžka od už depolarizovanej k ešte nedepolarizovanej časti (na povrchu je smer prúdu opačný). Záznam týchto dejov ukáže pozitívnu výchylku, pretože podráždenie (depolarizácia) smeruje ku vzdialenejšej elektróde.

C: Keď depolarizačná vlna prejde celým vláknom bude jeho polarita v celej dĺžke opačná v porovnaní s normálnou polaritou. V bunkách ani mimo buniek však nebudú žiadne rozdiely potenciálov, preto nebudú prítomné ani žiadne prúdy. Záznam elektrickej aktivity svalového prúžka sa vráti späť na izoelektrickú líniu. Po depolarizácii ihneď nasleduje **kontrakcia svalových buniek** – teda mechanická aktivita.

D: Po skončení depolarizácie nasleduje **fáza repolarizácie**. V izolovanom svalovom vlákne tento proces začína **na tom konci, kde začínal proces depolarizácie**. V začiatkovej fáze repolarizácie je teda časť ľavej strany prúžka už repolarizovaná, kým na jeho pravej strane repolarizácia ešte nezačala - je teda ešte depolarizovaná. Opäť vzniká potenciálový rozdiel medzi uvedenými časťami svaloviny, ako to bolo pri depolarizácii, ale s jedným podstatným rozdielom – polarita na oboch koncoch je opačná ako bola pri depolarizácii. Z toho vyplýva, že aj intracelulárne a extracelulárne prúdy budú mať opačný smer ako pri depolarizácii. Intracelulárne bude tiecť prúd od pozitívne nabitej časti (ktorou je jej pravá strana) ku negatívnej časti (ľavá strana). Prúd tečie od už repolarizovanej časti svaloviny ku ešte

nerepolarizovanej, teda smerom od vzdialenejšej elektródy. Výsledkom je negatívna výchylka krivky elektrickej aktivity svalového prúžka. Zo schémy je vidieť, že **repolarizačná vlna trvá dlhšie a jej amplitúda je menšia, ako vlna depolarizačná**. Je to preto, že repolarizačný dej prebieha podstatne pomalšie ako dej depolarizačný. Dôvod je ten, že repolarizačný proces je náročný na energiu, ktorá sa získava biochemickými procesmi trvajúcimi dlhšie ako procesy súvisiace s depolarizáciou.

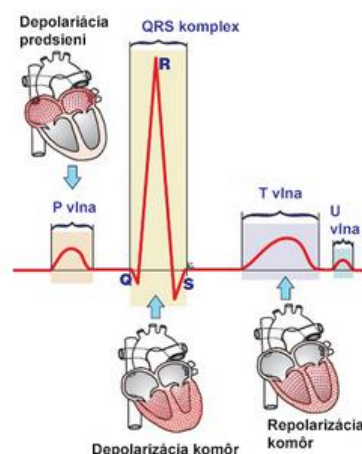
E: Repolarizačný proces prebehne celým prúžkom, obnoví sa jeho normálna polarita, zaniknú rozdiely potenciálov na povrchu i vo vnútri buniek, ktoré ho tvoria, preto sa záznam elektrickej aktivity vráti opäť na izoelektrickú úroveň. Dôležité je vedieť, že **repolarizačné elektrické prúdy nevyvolajú kontrakciu myokardu!** – pretože bunky myokardu sa nachádzajú v refraktérnej fáze – teda nie sú schopné odpovedať ani elektrickou, ani mechanickou aktivitou na podráždenie.

Reálny záznam elektrickej aktivity celého srdca je komplikovanejší, veď srdce nie je prúžok svaloviny, ale trojrozmerný orgán s komplikovanou stavbou, v ktorom sa nešíri depolarizačná vlna tak jednoducho, ako vo svalovom prúžku. Princípy depolarizácie a repolarizácie objasnené v predchádzajúcom texte a pomocou schém sú však platné aj pre celé srdce.

EKG krivka a jej časti

Depolarizácia a Repolarizácia

- EKG sníma a zobrazuje
 - len elektrickú aktivitu myokardu
 - nie mechanickú aktivitu
 - nie elektrickú aktivitu prevodového systému
- P vlna
 - je depolarizácia predsieni
- Ta vlna
 - je repolarizácia predsieni
 - bežne ju nevidíme, je skrytá v QRS komplexe
- QRS komplex
 - je depolarizácia komôr
- T vlna
 - je repolarizácia komôr



P vlna

Dominantným srdcovým pacemakerom je SA uzol. Vsruchy v ňom vytvorené sa šíria **po predsieňach radiálne** a depolarizačná vlna sa šíri po bunkách pracovnej svaloviny ako aj po

preferenčných vodivých dráhach v predsieňach. **Výsledný depolarizačný vektor vznikajúci pri depolarizácii predsiení smeruje sprava zhora doľava a dopredu.** Na EKG krivke sa **zapíše ako P vlna.** Zisťujeme jej **trvanie** (je do 0,1 s), **amplitúdu** (nepresahuje 0,25 mV) a **polaritu** (je buď negatívna alebo pozitívna, môže byť aj taká plochá, že je nerozoznatelná od izoelektrickej línie).

PQ (PR) interval

Podráždenie sa z predsiení **prevedie na svalovinu komôr cez AV vodivý systém (AV uzol, Hisov zväzok, Tawarove ramienka a Purkyňove vlákna).** Potenciál vznikajúci pri depolarizácii tohto vodivého systému je veľmi malý, preto sa na EKG nezaznamená vo forme kmitu, či vlny ale zaznamená sa len vo forme izoelektrickej línie ako **PR (PQ) interval** (podľa toho, či komorový komplex začína kmitom R alebo Q). Meriame ho od začiatku vlny P po začiatok Q, resp. R kmitu (trvá od 0,12-0,2 s) **či nie je skrátený alebo predĺžený.** PR (PQ) interval **môže byť vychýlený z izoelektrickej línie aj fyziologicky,** keď sa do neho premietne repolarizácia predsiení (repolarizačný potenciál predsiení je však obyčajne príliš malý na to, aby vychýlil segment z izoelektrickej línie, alebo sa premietne až do začiatku depolarizácie komôr a tam sa „stratí“ vzhľadom na neporovnateľne väčší potenciál vznikajúci pri depolarizácii komôr).

QRS komplex

Manifestáciou **depolarizácie pracovnej svaloviny komôr** je na EKG krivke komplex kmitov označený písmenami **QRS – depolarizácia komôr má tri fázy preto pozorujeme 3 kmity v rámci komorového komplexu.** Dokumentuje **trvanie depolarizácie komôr, teda časový ako aj priestorový postup depolarizačnej vlny** po komorách. Všetky tri uvedené parametre sú zdrojom dôležitých informácií o činnosti srdca najmä preto, že sú za patologických podmienok veľmi často a charakteristicky zmenené. Postup depolarizačnej vlny po komorách bol popísaný vyššie. Tu treba ešte pripomenúť, že **amplitúdy jednotlivých kmitov QRS komplexu závisia od celého radu podmienok, napr. od polohy srdca v hrudníku, od veľkosti (masy) svaloviny srdcových komôr, ktorá je depolarizovaná, od polohy registračnej elektródy (zvodu) vzhľadom na smer šíriaceho sa podráždenia, od vodivosti (odporu) štruktúr nachádzajúcich sa medzi srdcom a registračnou elektródou, od telovej teploty.**

ST segment

Repolarizácia komôr začína ST segmentom. Je to časť krivky, ktorá sa fyziologicky nachádza v izoelektrickej rovine a má horizontálny priebeh. Izoelektricitá ST segmentu neznamena, že v tomto čase „netečú“ v myokarde žiadne elektrické prúdy. Tok prúdov medzi vnútrom a vonkajškom bunky existuje, smerujú do bunky aj z bunky a ich veľkosť je približne ekvivalentná (Na^+ , Ca^{2+} idú do bunky, K^+ ide z bunky). Teda, **ST segment je reálne prejavom dokončovania depolarizácie a začiatok repolarizácie svaloviny komôr.** Ani za fyziologických podmienok nemusí byť ST segment v ideálnej izoelektrickej polohe, ale jeho prvá polovica môže byť mierne pod a druhá zase mierne nad izoelektrickou líniou. Stanovenie polohy ST segmentu je z diagnostického hľadiska veľmi dôležité, pretože **významné patologické procesy sa prejavujú práve zmenou jeho polohy, teda depresiou alebo eleváciou.** Či je ST segment v normálnej polohe alebo nie je, je niekedy ťažko jednoznačne rozhodnúť. Pomôckou v tomto rozhodovaní môže byť nájdenie a stanovenie polohy **junkčného bodu** (bod, v ktorom prechádza kmit S alebo R, ak S kmit chýba, do ST segmentu. **Tento bod (J bod) je normálne v tej istej úrovni ako odstup Q kmitu z izoelektrickej línie.** Aj na EKG zdravého človeka môže byť tento bod zvýšený vo zvodoch $V_1 - V_4$ až do 3 mm (0,3 mV pri citlivosti EKG prístroja 1 mV = 10 mm). Za patologických podmienok je však často znížený hlboko pod uvedenú úroveň.

T vlna

Repolarizácia komôr srdca je reprezentovaná hlavne T vlnou. Jej amplitúda, smer a trvanie je ovplyvnené rovnakými faktormi ako depolarizačný QRS komplex. **Čím je rýchlosť a veľkosť repolarizačného prúdu väčšia, tým bude T vlna hrotnejšia a jej amplitúda vyššia.** Týmto procesom sa polarita svalových buniek vracia k východiskovému stavu, **ale to neznamena, že iónové zloženie intra- a extracelulárneho priestoru sa tam vráti tiež.** Treba vziať do úvahy fakt, že počas depolarizácie „natieklo“ do svalových buniek mnoho Na^+ a počas repolarizácie zase z bunky vyteklo mnoho K^+ . V nasledujúcej fáze srdcového cyklu preto pokračuje obnovovanie aj východiskového stavu v mineráloch (diastola).

Častou otázkou študentov je, **prečo má T vlna na fyziologickej krivke rovnaký smer ako QRS komplex** (tzv. konkordantný smer), keď pri depolarizácii prúžka svaloviny je smerovanie depolarizačnej a repolarizačnej časti opačné (diskordantný smer). Z toho, čo je nám už známe vyplýva, že to môže byť spôsobené len **zmenou smeru repolarizácie svaloviny komôr srdca – repolarizácia v skutočnosti prebieha opačným smerom a to od epikardu k endokardu –** **details sú uvedené v materiáli „postup hodnotenia EKG“,** teda repolarizácia musí začínať

v mieste, kde končila depolarizácia (v epikardiálnej vrstve svaloviny). To sa však zdá na prvé počutie nelogické. Ale len na prvé! **Ak však vezmeme do úvahy fakt, že repolarizácia je výrazne závislá od dostupnosti energie, potom sa to už také nelogické nebude zdať.** Ako to teda je? Na tvorbu energie je potrebný dobrý prísun kyslíka a živín. Na tie je „najchudobnejšia“ subendokardiálna vrstva svaloviny, pretože tá je v čase repolarizácie exponovaná vysokému vnútrokomorovému tlaku (mechanická práca - systola komôr), čo znižuje prítok krvi aj živín cez intramyokardiálne vetvy koronárnych artérií. Subepikardiálna vrstva svaloviny je v tom čase zásobená kyslíkom lepšie, pretože na ňu nepôsobí taký tlak ako na subepikardiálnu vrstvu a aj tlak a prítok krvi v intramyokardiálnych zásobovacích artériách je v tejto vrstve svaloviny vyšší. Toto môžu byť dôvody, pre ktoré nezačína repolarizácia v subendokardiálnej vrstve ako by sme očakávali na základe porovnania so svalovým prúžkom, ale vo vrstve subepikardiálnej a šíri sa smerom k vrstve subendokardiálnej. Keď si túto zmenu premietnete do záznamu repolarizácie svalového vlákna, potom vám bude jasné, prečo je smerovanie QRS komplexu a T vlny na fyziologickej EKG krivke rovnaké – teda konkordantné.

EKG záznam

Štandardný EKG záznam pozostáva z 12 zvodov uložených na povrchu tela

3 štandardných končatinových (bipolárnych) zvodov I, II, III

3 zosilnených končatinových (unipolárnych) zvodov aVR, aVL, aVF

6 hrudných (unipolárnych) zvodov V1-V6

Nazývajú sa **zvodmi nepriamymi**, pretože nesnímajú potenciály priamo z povrchu srdca. **Všetky EKG zvody snímajú tú istú elektrickú aktivitu srdca, ale jej zápis je v každom zvode iný, pretože každý zo zvodov sa na srdce „pozerá“ z inej pozície.**

Predstavme si, že v miestnosti (triede) nainštalujeme dve GoPro kamery – jednu na okno a druhú ku dverám, ktoré sú oproti sebe. Ak bude učiteľ kráčať miestnosťou od okna ku dverám, obe kamery zachytia ten istý proces, ale jedna bude zaznamenávať tvár učiteľa a pohyb, ktorý smeruje KU KAMERE a kamera na okne bude zachytávať chrbát učiteľa a pohyb, ktorý sa OD KAMERY vzdáľuje. Stále je to ale ten istý proces, avšak sledovaný z inej perspektívy a rovnako je tomu aj v prípade zvodov zaznamenávajúcich elektrickú aktivitu srdca.

Štandardné končatinové zvody

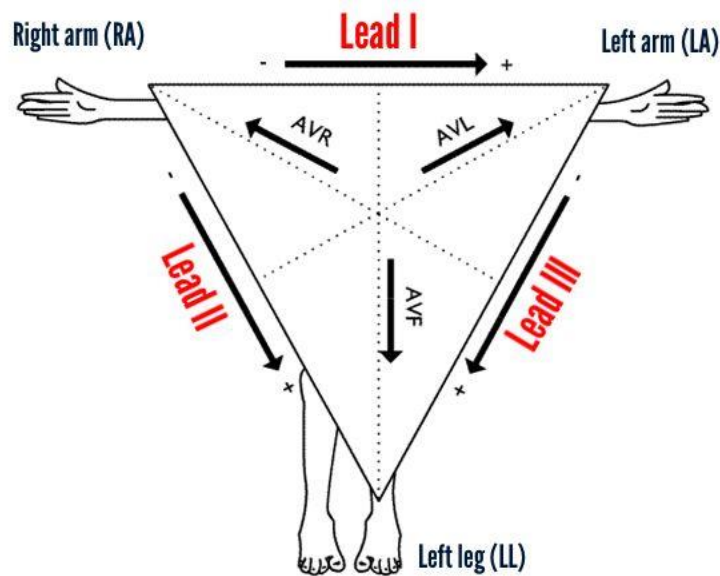
Sú naložené na končatinách, pravej a ľavej hornej končatine a ľavej dolnej končatine. Pri štandardných bipolárnych končatinových zvodoch treba spomenúť **polaritu jednotlivých miest uloženia elektród**. Zjednodušene možno povedať, že **elektróda na pravej ruke je počas depolarizácie srdca negatívna ako prvá**, pretože „najlepšie a najskôr vidí“ na depolarizovanú prvú časť srdca, teda pravú predsieň. V tom čase je **elektróda na ľavej ruke ešte pozitívna**. V prvom zvode teda „tečie prúd“ **od elektródy na pravej ruke k elektróde na ľavej ruke**. **Ako posledná sa negatívnou stáva elektróda na ľavej nohe**, to znamená, že je pozitívna voči obom predchádzajúcim elektródam. **Prúd teda „tečie“ od elektródy na ľavej ruke k elektróde na ľavej nohe a od elektródy na pravej ruke k elektróde na ľavej nohe**. Štandardné bipolárne končatinové zvody teda zaznamenávajú rozdiely potenciálov medzi miestami uloženia jednotlivých elektród, ktoré vznikajú počas elektrickej aktivity srdca. Štandardné bipolárne končatinové zvody „nevidia“ na všetky časti srdca rovnako dobre a niektoré časti srdca „nevidia“ vôbec. **Zaznamenávajú potenciály len vo frontálnej rovine**, preto potenciály predozadného smeru nezachytia. Z toho je zrejmé, že **nemusia zaznamenať všetky patologické elektrické prejavy v činnosti srdca**. Tieto zvody tvoria strany rovnostranného trojuholníka (Einthovenov trojuholník), v strede ktorého sa nachádza srdce.

Unipolárne končatinové zvody

Tieto zvody **zaznamenávajú reálnu hodnotu elektrického potenciálu počas elektrickej činnosti srdca v mieste ich uloženia**. Teda aVR na pravom ramene, aVL na ľavom ramene a aVF na ľavej nohe. Do praxe ich zaviedol a názov stanovil Dr. Goldberger zo začiatkových písmen slov vyjadrujúcich ich hlavné charakteristiky (**augmented Voltage Right, Left, Foot**).

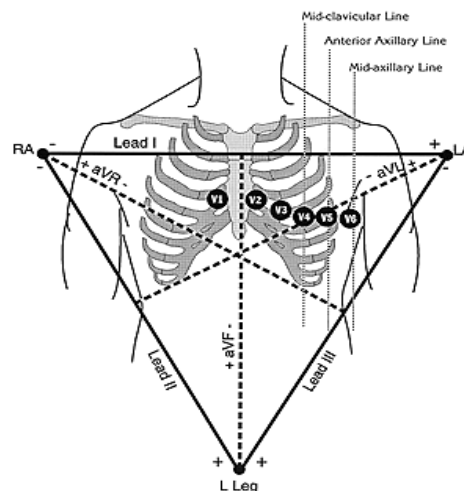
Záznam zo zvodu aVF je teda suma potenciálov získaných zo štandardných zvodov II. a III. (podobne je to aj pri zvodoch aVL a AVF). **Všetky tri elektródy sú pozitívne (v čase elektrickej inaktivity srdca) a ich polarita sa mení v priebehu depolarizácie a repolarizácie srdca**. Aj tieto zvody snímajú potenciály srdca prebiehajúce **iba vo frontálnej rovine**. Oproti štandardným končatinovým zvodom je **však uhol, z ktorého sa „pozerajú“ na srdce posunutý o 30°**. Ak teraz „rozpojíme“ strany (zvody) Einthovenovho trojuholníka a posunieme ich tak, aby prebiehali cez jeho stred, potom do tejto konštrukcie vložíme zvody Goldbergerove, získame 6 zvodov pretínajúcich sa v strede (v srdci), ktoré sú vzájomne posunuté o 30°. Použitím tejto

sústavy zvodov dokážeme zachytiť viac informácií o elektrických dejoch v srdci, **stále však len vo frontálnej rovine**



Bipolárne a unipolárne končatinové zvody a polarita jednotlivých končatín/elektrod

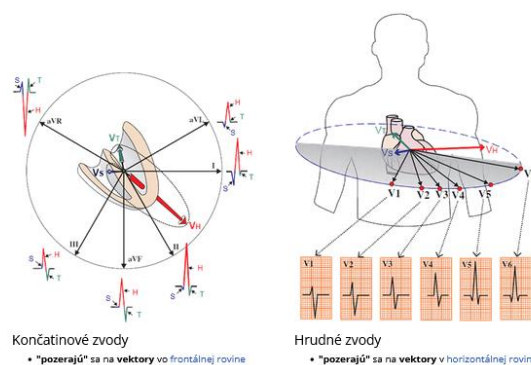
Unipolárne hrudné zvody snímajú elektrickú aktivitu srdca zo šiestich rôznych miest na hrudníku. „Pozerajú“ sa teda na srdce z rôznych uhlov a je preto pochopiteľné, že každý zvod „vidí“ túto aktivitu trochu ináč. Pre dobrého pozorovateľa prinášajú viac informácií o srdci, pretože mu umožňujú vidieť viac ako dokáže jedna elektróda uložená na jedno konštantné miesto na tele. **Tieto zvody, označené ako V₁ – V₆, zaznamenávajú elektrické prúdy šíriace sa v horizontálnej rovine, teda spredu dozadu a naopak.**



Prekordiálne zvody, porovnanie s polohou končatinových zvodov

Sú pozitívne, preto ak sa bude šíriť depolarizačná vlna smerom k nim, bude sa na zvode zapisovať pozitívna výchylka, a naopak, pri šírení sa depolarizačnej vlny od zvodov sa bude na nich zapisovať výchylka negatívna. **Zvody V₁₋₂ sú uložené prevažne nad pravou polovicou srdca**, preto môžu „vidieť“ najmä zmeny elektrickej aktivity tejto časti srdca. **Zvody V₅₋₆ ležia nad ľavou komorou**, „vidia“ preto najlepšie tie zmeny elektrickej aktivity, ktoré sa odohrávajú v tejto časti srdca (napr. pri infarkte myokardu). Elektródy V₃₋₄ sú lokalizované približne nad oblasťou prednej steny srdca a interventrikulárneho septa. Obyčajne zaznamenávajú rovnako veľké amplitúdy R aj S kmitu – **prechodná zóna**. Tieto fakty si treba zapamätať, pretože sú potrebné pre pochopenie mechanizmov, ktoré určujú tvar a veľkosť vln a kmitov EKG krivky. **Najviditeľnejším znakom komorového komplexu v hrudných zvodoch je malá amplitúda r kmitu a veľká amplitúda S kmitu vo V₁, pričom R kmit sa vo zvodoch od V₂ k V₅₋₆ postupne zväčšuje a S kmit, naopak, znižuje**. Prečo sa QRS komplex mení práve takto? Je to podmienené nižšie uvedenými faktormi:

- **polohou snímačej elektródy** k šíriacej sa depolarizácii a repolarizácii po svalovine komôr,
- **masou svaloviny jednotlivých častí komôr** (medzikomorového septa, ľavej a pravej komory, čím je väčšia masa svaloviny v jednotlivých častiach srdcových komôr, tým je väčší potenciál, ktorý vzniká pri ich depolarizácii alebo repolarizácii),
- **časovou postupnosťou depolarizácie a repolarizácie v jednotlivých častiach komôr**,
- **polohou srdca v hrudníku**.



QRS komplex v kontexte hrudných elektród

Pri pohľade na obrázok je zrejmé, že potenciál vznikajúci pri depolarizácii komorového septa (zľava doprava) smeruje k elektródam V₁₋₂ - preto bude v týchto zvodoch ako prvá výchylka pozitívna (r, teda vo V₁ nevidíme Q alebo q kmit) a jej amplitúda bude malá, pretože masa

svaloviny septa je malá. Vo zvodoch V_{5-6} vidíme ako prvú negatívnu výchylku (q), pretože depolarizačná vlna v septe sa šíri (prevažne) od týchto zvodov.

Ďalej prebieha depolarizácia oboch komôr súčasne od endokardu k epikardu, avšak potenciály z ľavej komory prevažujú fyziologicky nad potenciálmi z pravej komory, preto výsledný vektor smeruje viac doľava (tejto fáze zodpovedá kmit S vo $V1-2$ a kmit R vo $V5-6$). Od zvodu $V1$ kmit R postupne narastá a jeho amplitúda je rovnako veľká ako amplitúda kmitu S vo zvodoch $V3-4$ – prechodová zóna – v tejto oblasti hrudných zvodov je rovnováha medzi elektrickými potenciálmi z pravej a ľavej komory, ta touto hranicou už by mali mať komorové komplex tvar qRs.

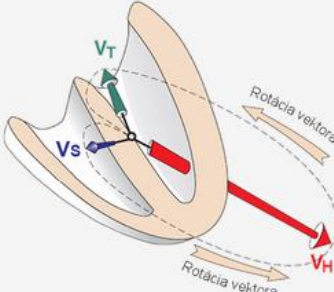
Malý kmit s vo $V5-6$ je výsledkom depolarizácie svaloviny výtokového traktu ľavej komory a šíri sa smerom „od“ elektród $V5-6$ – preto je tu malý negatívny kmit a vo $V1-2$ túto elektrickú aktivitu ani nemôžeme pozorovať, pre jej nízku amplitúdu.

Veľkosť výsledného depolarizačného potenciálu v pravej komore je podstatne menší ako v komore ľavej (masa svaloviny v ľavej komore je približne trojnásobná v porovnaní s pravou komorou) a **smer depolarizačných potenciálov v stenách pravej a ľavej komory je opačný a časovo totožný** (preto sa podľa zákonov fyziky od seba odčítajú) a výsledný potenciál bude mať smer väčšieho z nich.

Vznik výsledného smeru a veľkosti komorového depolarizačného potenciálu v srdci nie je v skutočnosti taký jednoduchý, ako je to znázornené na schéme, pretože komory sú trojrozmernou štruktúrou a potenciály vznikajúce v ich stene nemajú presne opačné smerovanie, ako je to znázornené na schéme 1a. Smer a veľkosť výsledného komorového potenciálu je možno vysvetliť skladbou vektorov a **pri normálnej polohe srdca v hrudníku smeruje od AV uzla dolu a doľava.**

Komorové vektory

- Najprv sa aktivuje **tenké komorové septum**
 - Vzniká **malý septálny vektor (V_S)**
 - Q kmit
- Potom sa aktivuje **masívna ľavá komora**
 - Vzniká **veľký hlavný vektor (V_H)**
 - Súčasne sa aktivuje aj tenká pravá komora
 - **Malý vektor pravej komory**
 - nemá na smer hlavného vektora vplyv
 - R kmit
- Nakoniec sa aktivuje **báza ľavej komory**
 - Vzniká **malý terminálny vektor (V_T)**
 - S kmit
- **Vektory si musíte predstaviť v 3D priestore**
 - **EKG zvody zaznamenávajú vektory v čase**



Vychádzajúc z uvedených poznatkov môžeme vznik a amplitúdu kmitov R a S v hrudných zvodoch vysvetliť nasledovne:

- vo zvodoch V_{1-2} vzniká hlboký S kmit, pretože výsledný komorový potenciál smeruje od nich,
- vo zvodoch z ľavého prekordia vzniká vysoký kmit R, pretože sa výsledný komorový potenciál šíri prevažne k nim.

Očakávame, že po pochopení tejto časti textu čitateľa napadne myšlienka, že **stačí aj relatívne malá zmena polohy srdca** (napr. zvislé srdce vysokých chudých ľudí alebo priečne uložené srdce ľudí nižšej postavy, so širším hrudníkom) **a už budú pomery v amplitúdach R a S kmitov v jednotlivých hrudných zvodoch iné ako sme vyššie uviedli**, pretože zmena polohy srdca vedie aj k zmene smeru šírenia sa depolarizácie vzhľadom na snímacie elektródy! **Ak sa k tomu pridá aj rotácia srdca pozdĺž vertikálnej alebo horizontálnej osi, resp. vznikne hypertrofia jednej z komôr**, je zrejmé, že to bude mať za následok ďalšie zmeny R a S kmitov.

Literatúra:

HANÁČEK J, PLEVKOVÁ J: Elektrokardiografia, 2016, ISSN 1337-7396, <https://portal.ifmed.uniba.sk/clanky.php?aid=88>

FETISOVOVÁ, Ž. a kol. Klinická propedeutika ošetrovateľstva a pôrodnej asistencie. Martin: Osveta, 2012. 228 s. ISBN 978-80-806-3373-8.

BLAHÚT P: EKG a arytmológia. <https://www.techmed.sk/ekg-a-arytmologia-kniha/>