

Přednášky z lékařské biofyziky

Lékařská fakulta Masarykovy univerzity v Brně

Biologické membrány a bioelektrické jevy

Autoři děkují doc. RNDr. K. Kozlíkové, CSc., z LF UK v Bratislavě za poskytnutí
některých obrazových podkladů

Biologická membrána

- Předpokladem k pochopení vzniku klidového i činnostního napětí je znalost struktury a vlastností biologické membrány.
- Jejím základem je elektricky nevodivá tenká dvojvrstva (6-8 nm) molekul fosfolipidů.
- Hlavní složky: **fosfolipidy a cholesterol** (tmel mezi jednotlivými molekulami fosfolipidů)

Biologická membrána

Fosfolipidy – 3nm dlouhé, tyčinkovité útvary, složené z elektricky nabitě polární hlavice a 2 nepolárních hydrofobních řetězců mastných kyselin, tvoří dvojvrstvu, hydrofobní řetězce směřují proti sobě a hydrofilní hlavice směřují do prostředí.

Biologická membrána

Do této membrány jsou zabudovány **makromolekuly bílkovin**, které plní různé funkce. Z hlediska elektrických jevů jsou zcela podstatné dva druhy, které podle jejich funkce budeme označovat jako kanály a přenašeče. V obou případech se jedná o transportní mechanismy, umožňující přenos iontů přes nevodivou fosfolipidovou membránu. Tvoří cca 50% hmotnosti membrány.

Bioelektrické jevy

- Elektrické signály hrají klíčovou roli při řízení všech životně důležitých orgánů. Zabezpečují rychlý přenos informací v organismu. Šíří se vlákny buněk nervového systému i svalovými buňkami, kde spouštějí řetězec dějů, vedoucí k jejich kontrakci. Jsou zahrnuty v základních mechanizmech funkce smyslových a jiných orgánů.
- Vznikají na buněčné úrovni v membránových systémech, jejich šíření je doprovázeno vznikem elektromagnetického pole v okolním prostředí.
- Registrace elektrických nebo magnetických signálů na povrchu těla je podstatou významných klinických diagnostických metod.

Co to je biosignál?

Zjednodušeně lze říci, že dnes jej chápeme jako měřenou hodnotu napětí U , která poskytuje biologickou informaci. Příklady:

- EKG je $U(t)$ biosignál, který poskytuje informaci o fyziologii nebo patologii srdce.
- U ultrazvukového obrazu je biosignál U napětí, které vzniká v elementárním elektroakustickém měniči v důsledku zachycení odrazu ultrazvuku od tkáňové struktury
- Digitální rentgenový snímek je biosignál $U(x, y)$, u kterého hodnota napětí odpovídá každému pixelu o souřadnicích (x, y) .
- 3-D MRI obraz je biosignál $U(x, y, z)$, u kterého hodnota napětí odpovídá každému voxelu o souřadnicích (x, y, z) v těle pacienta.



Snímek 6

IH1

doplněno

Ivo Hrazdira, 11/22/2008

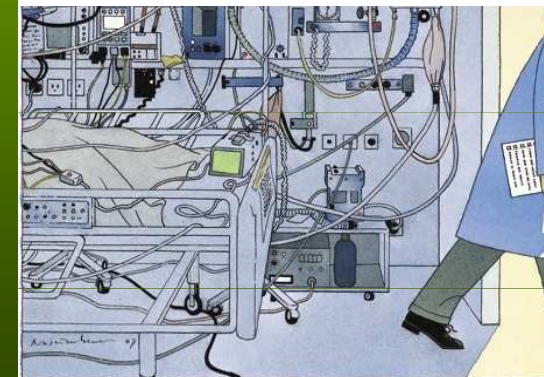
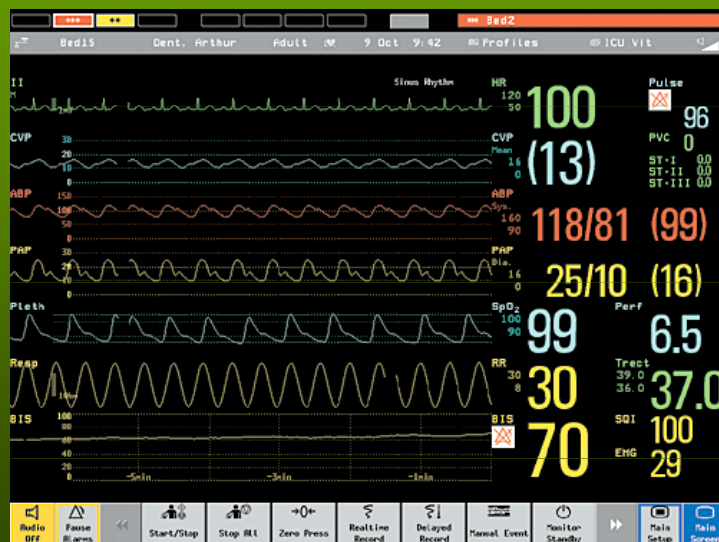
Druhy biosignálů

- Ø AKTIVNÍ (vlastní, generované) biosignály: zdrojem energie je sám biologický objekt, např. EKG.
- Ø PASIVNÍ (modulované) biosignály: vznikají při interakci „vnější“ energie s biologickým objektem, např. digitální rtg snímek, MRI obraz, ultrazvukový obraz.

Původ aktivních biosignálů elektrické povahy

- ∅ Živá buňka transportuje elektricky nabitě částice (ionty) přes membránu, vytváří takto napětí, které se mění v čase.
- ∅ Většina buněk lidského těla nevytváří elektrické napětí synchronně, nýbrž víceméně náhodně. Ve většině tkání je tudíž výsledné napětí nulové – různá náhodná napětí se vzájemně ruší.
- ∅ Jestliže je mnoho buněk současně aktivních, stejné elektrické proudy procházejí jejich membránami. Proto tyto buňky vytvářejí výsledné napětí, které je dostatečně vysoké, aby bylo měřitelným, např. při svalové kontrakci většina buněk vlákna jeví stejnou elektrickou aktivitu a objevuje se měřitelné elektrické napětí.

Monitorování biosignálů na jednotce intenzivní péče



Měření biosignálů elektrické povahy

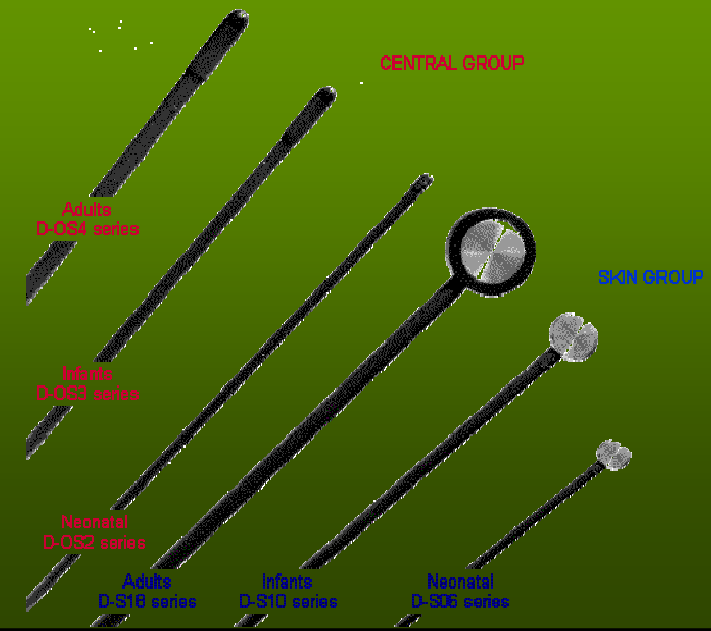
Aktivní biosignály: vždy potřebujeme zařízení, které se skládá ze tří částí:

A) Snímací elektrody: umožňují vodivé spojení vyšetřované části těla s měřicím systémem. (EKG)

B) Zařízení na zpracování signálu (včetně zesilovače, AD převodníku, filtru pro odstranění nadbytečného šumu, filtrů pro odstranění nežádoucích frekvencí atd.)

C) Záznamové zařízení (dnes obvykle monitor nebo zapisovač)

Pasivní biosignály (též aktivní neelektrické): snímací elektrody jsou nahrazeny vhodnými čidly - měniči (např. čidla rtg záření u digitálního rtg snímku nebo teplotní čidla).



Elektrody pro měření aktivních biosignálů

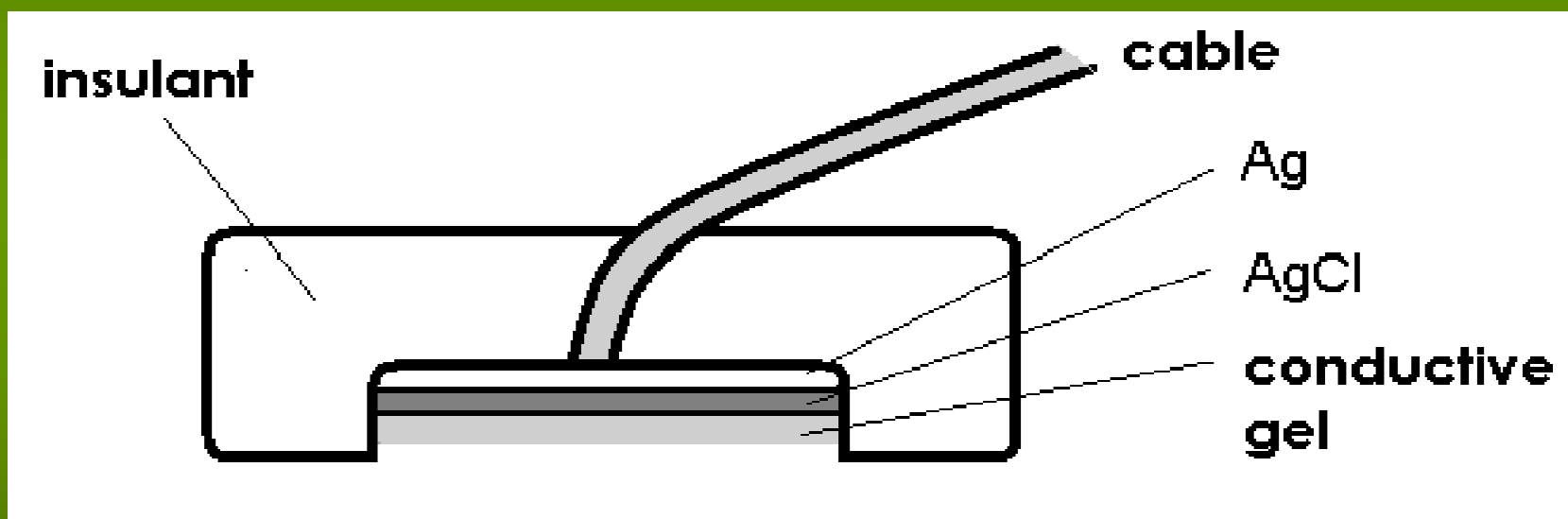
- Ø Polarizovatelné: měření biopotenciálů je nepřesné, protože elektrodové napětí je proměnlivé, např. v důsledku pohybů pacienta nebo elektrody, vlhkosti (pocení), chemického složení okolního prostředí atd. Většina polarizovatelných elektrod se vyrábí z ušlechtilých kovů. V případě koncentrační polarizace se v okolí elektrody mění koncentrace iontů v důsledku elektrochemických procesů. V případě chemické polarizace dochází k uvolňování plynů na povrchu elektrod.
- Ø Nepolarizovatelné elektrody: přesné měření biopotenciálů. V praxi se nejčastěji používá elektroda stříbrochloridová (Ag-AgCl).

Elektrody pro měření aktivních biosignálů

Ø **Makro- nebo mikroelektrody.** Mikroelektrody se používají pro měření biopotenciálů jednotlivých buněk. Mají malý průměr hrotu ($<0,5$ nm) a jsou vyrobeny z kovu (polarizovatelné) nebo skla (nepolarizovatelné). Skleněné m-e. jsou kapiláry s otevřeným koncem, naplněné elektrolytem o standardní koncentraci.

Ø **Povrchové nebo vpichové elektrody.** Povrchové elektrody jsou kovové destičky různého tvaru a velikosti. Dobrý elektrický kontakt je zajišťován vodivým gelem. Jejich tvar je často miskový. Vpichové elektrody se používají pro snímání biopotenciálů z malých oblastí tkáně. Vyrábějí se z ušlechtilých kovů a používají zejména pro měření svalových biopotenciálů nebo dlouhodobé snímání potenciálů srdčních či mozkových

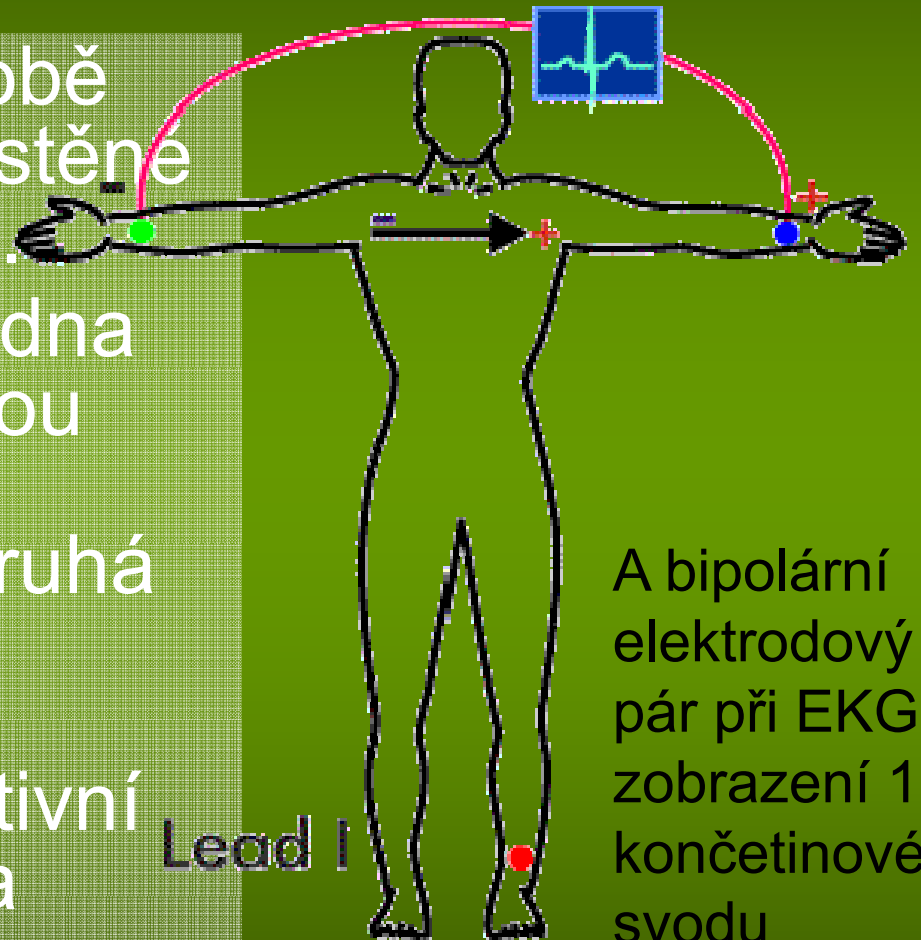
Snímací elektroda (misková, nepolarizovatelná)



Bipolární a unipolární dvojice elektrod

Při bipolární aplikaci jsou obě elektrody diferentní, tj. umístěné do elektricky aktivní oblasti.

Při unipolární aplikaci je jedna elektroda diferentní (většinou maloplošná), umístěná v elektricky aktivní oblasti. Druhá elektroda je indiferentní (většinou velkoplošná), umístěná v elektricky neaktivní oblasti. Výjimka: Wilsonova svorka používaná v elektrokardiografii.



A bipolární elektrodový pár při EKG – zobrazení 1. končetinového svodu

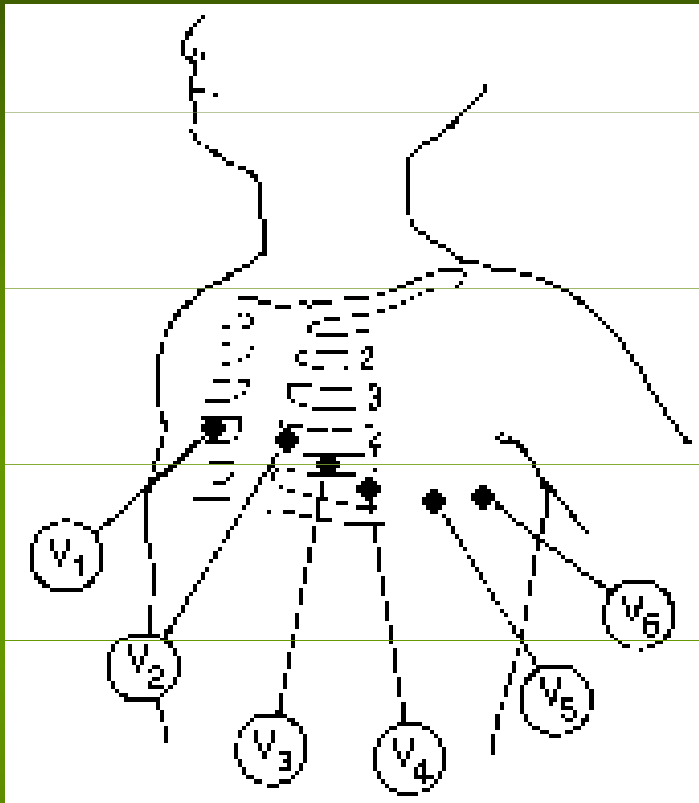
Zesilovač

Ø Nezkreslené zesílení biosignálu je podmínkou přesného měření. Moderní zesilovače tuto podmínku zpravidla splňují.

$$\text{Zisk zesilovače} = 20 \cdot \log U_o / U_i \text{ [dB]}$$

Ø Uživatel přístroje se zabývá pouze přesným nastavením různých filtrů (aby se potlačily některé artefakty).

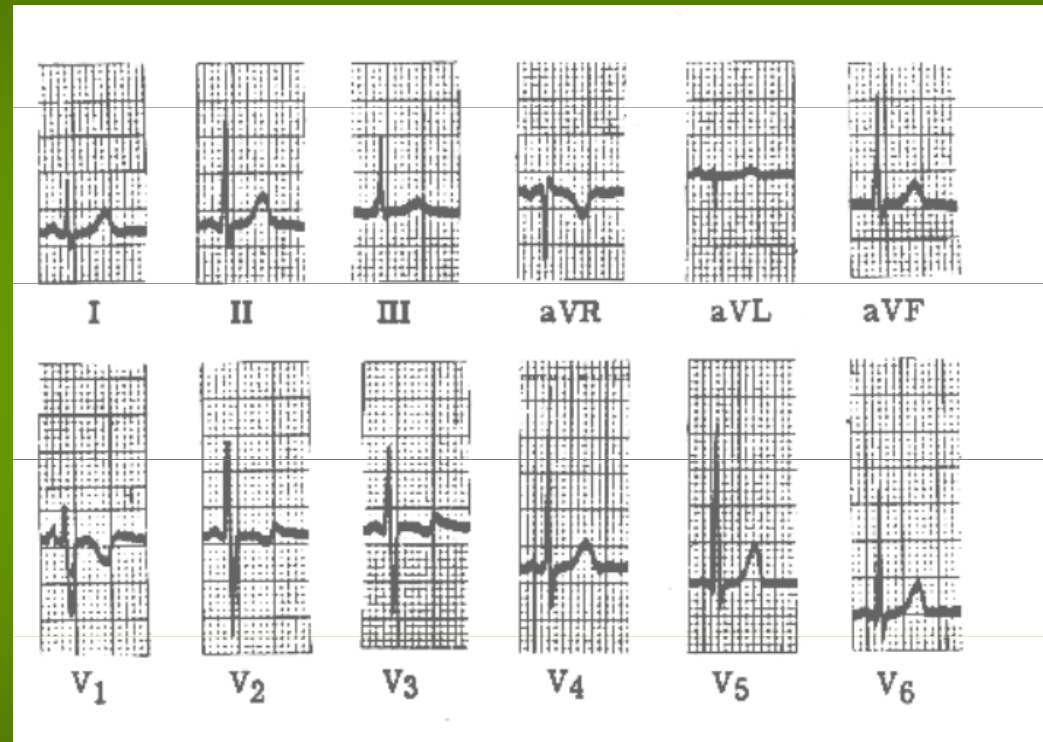
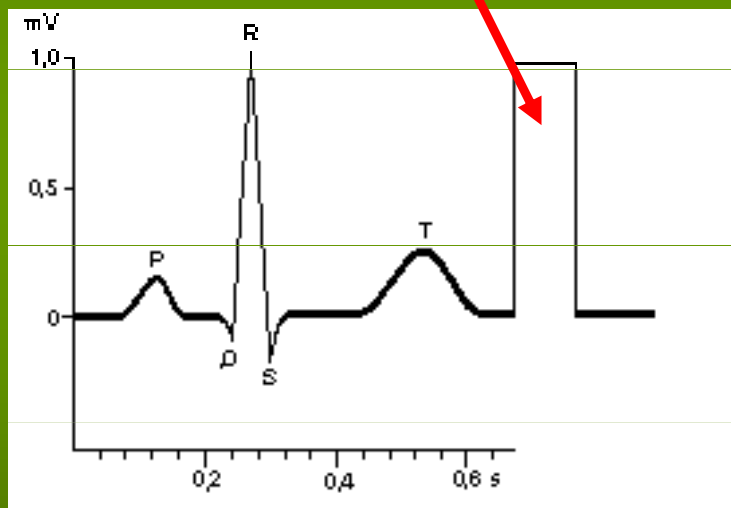
EKG - elektrokardiogram



- Ø EKG je nejsilnější a nejčastěji měřený aktivní biopotenciál.
- Ø Při měření EKG se tři elektrody umísťují na končetiny (2 na zápěstí, 1 na levý bérec) a 6 elektrod na hrudník (elektrody hrudních svodů na obrázku). Pravá noha se používá pro umístění elektrody, která částečně kompenzuje rušivé elektrodové potenciály.
- Ø Pár elektrod, mezi nimiž měříme napětí, se označuje jako **svod**.

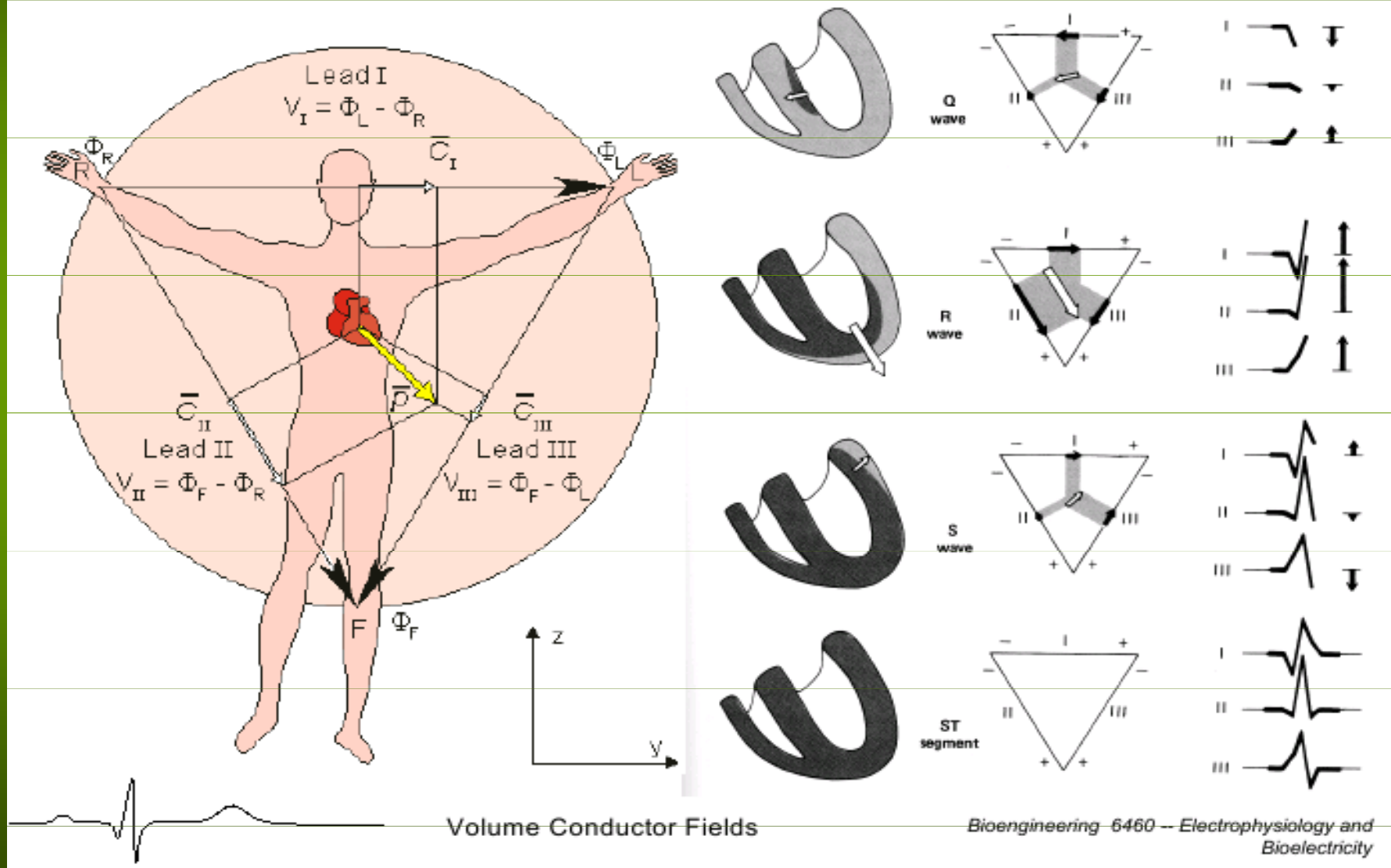
EKG

Kalibrační napěťový
impuls 1mV

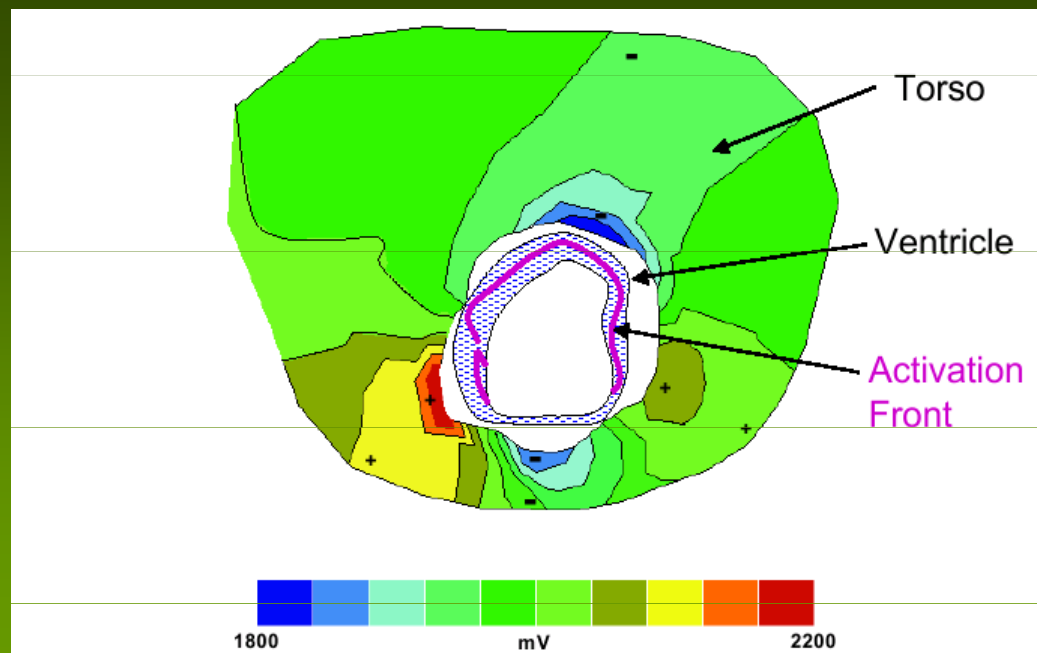


Einthovenův trojúhelník

Elektrický dipól srdce



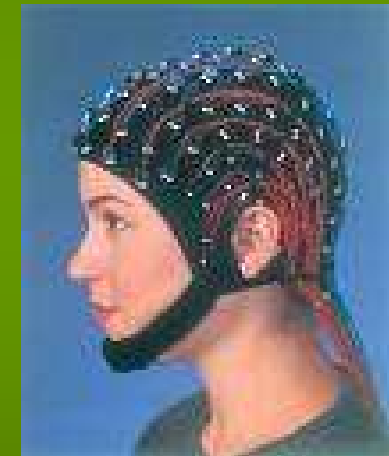
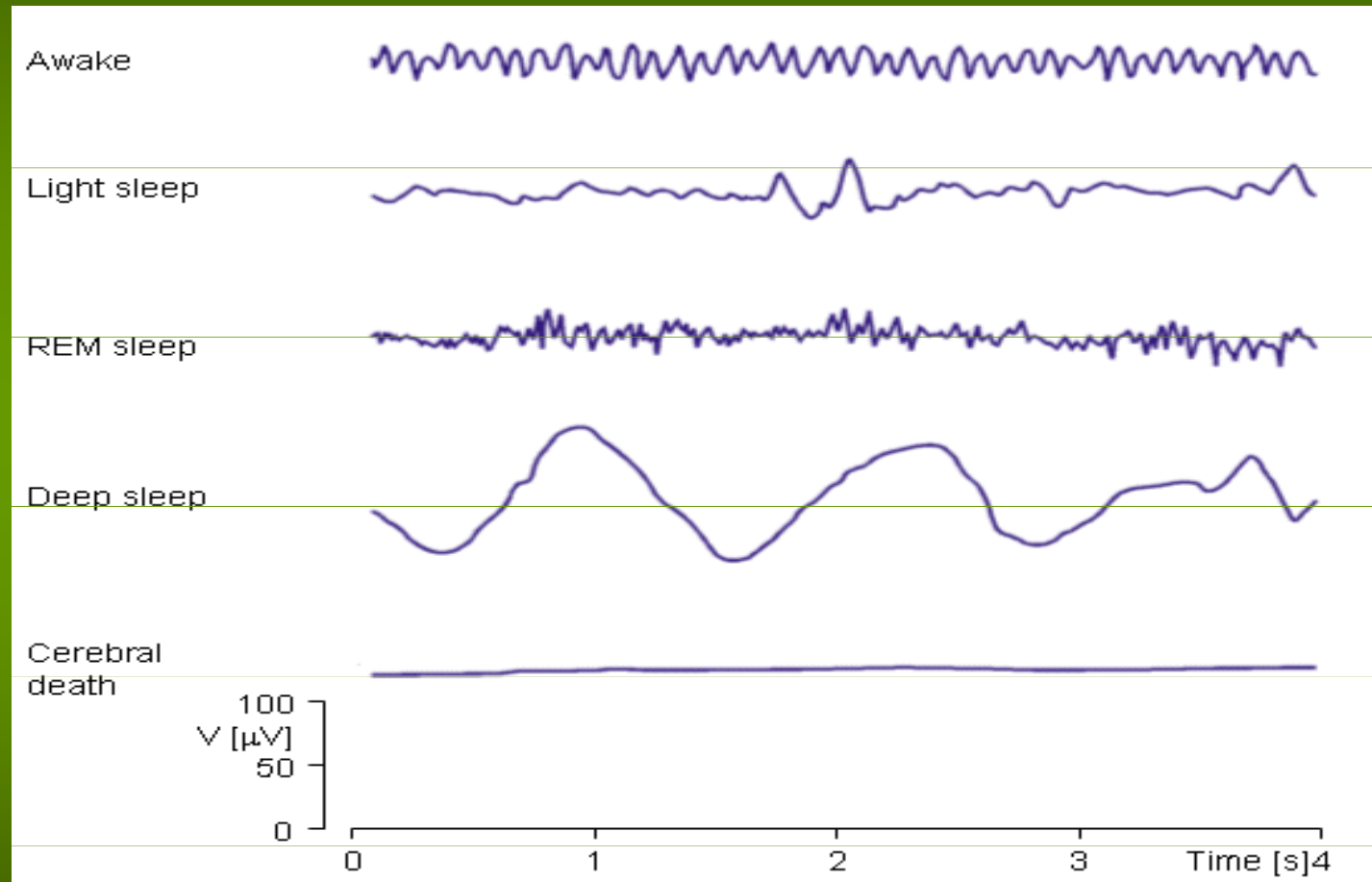
Princip vektorkardiografie



Elektrody umístěné na povrchu těla umožňují měření hodnot napětí „promítnutých“ ze srdce na příslušnou část povrchu těla. Protože známe polohu a tvar srdce, elektrické vlastnosti tkání a umístění elektrod, můžeme vypočítat původní hodnoty napětí v bezprostřední blízkosti srdce. Takto lze lokalizovat infarkt nebo problémy s přenosem vzruchů v myokardu.

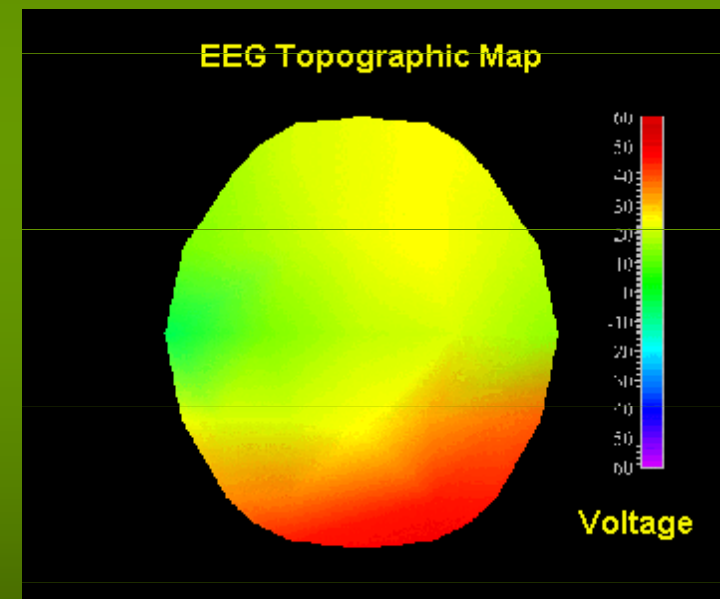
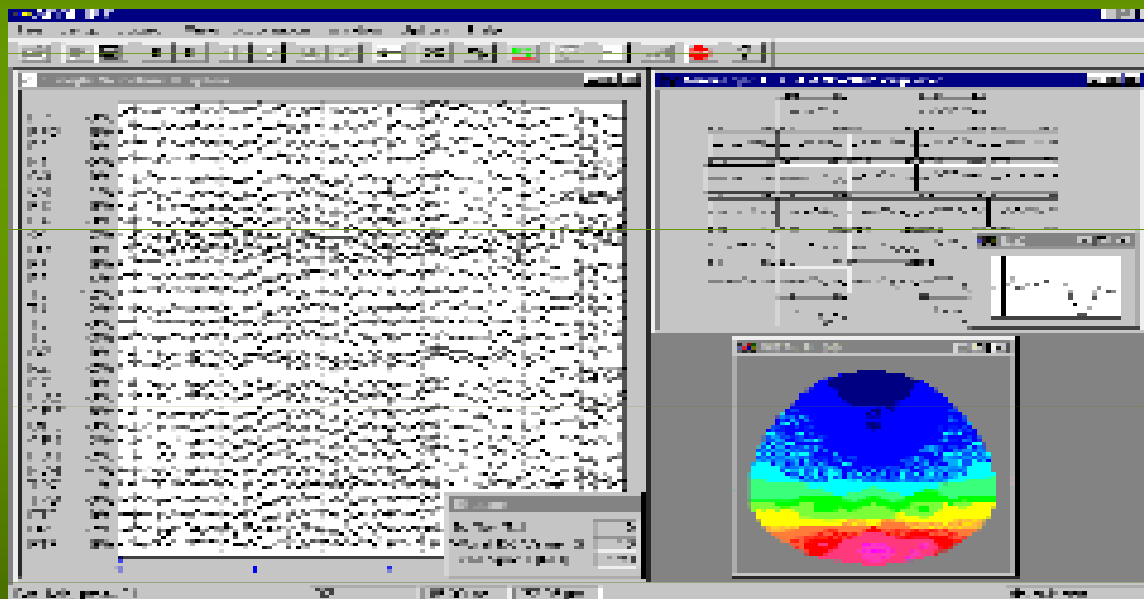
EEG

Elektroencefalografie



Colour Brain Mapping

(barvy představují intenzitu elektrické aktivity jednotlivých částí mozku)

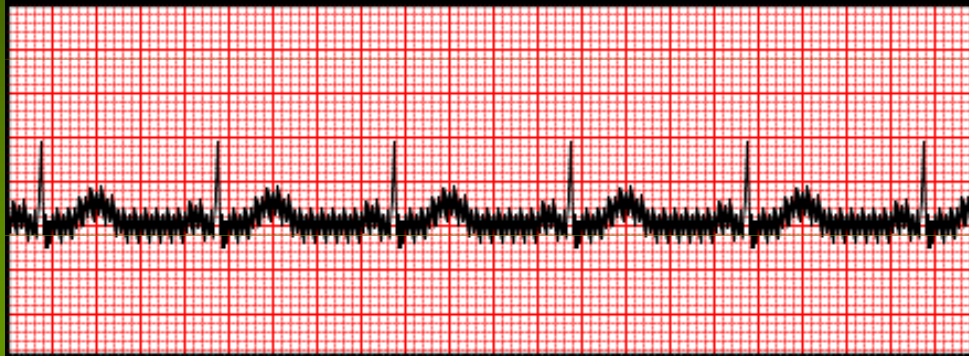


Artefakty

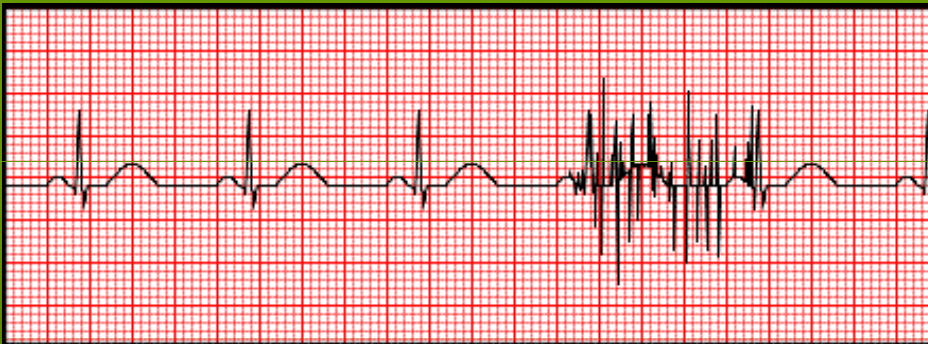
- Definice: Prvky (rysy) signálu, které nevznikají v cílové tkáni
- Vznikají pohybem pacienta, působením elektromagnetického pole v prostředí (např. 50 Hz síťová frekvence, mobilní telefony), v důsledku pocení etc.

EKG Artefakty

http://mauvila.com/ECG/ecg_artifact.htm



50Hz střídavého proudu
superponováno na signál
EKG

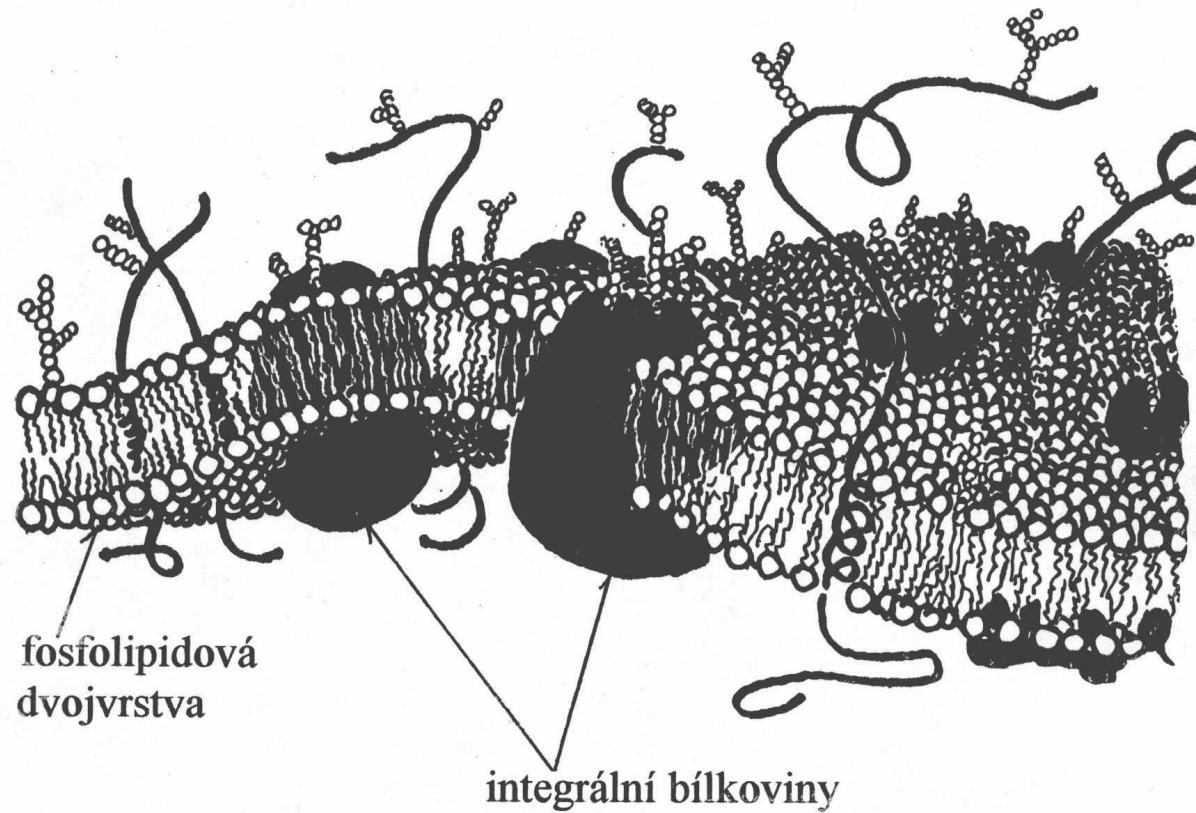


Svalový třes



Pohyb izoelektrické linie
v důsledku pohybu
pacienta, nečistých
elektrod, uvolněných
elektrod...

Struktura membrány



Kanály

- Základním mechanismem, který umožňuje výměnu iontů mezi vnitřním a vnějším prostředím buňky, jsou **membránové kanály**. Jsou to bílkovinné molekuly, avšak na rozdíl od přenašečů, které mají pevná vazebná místa pro přenášené ionty, vytvářejí v membráně póry přístupné pro vodu. Otevírání a uzavírání těchto kanálů (**vrátkování**) se může dít několika mechanismy. Vedle elektrického je vrátkování některých kanálů ovládáno jinými podněty (chemickou vazbou látek, mechanickým napětím aj.).
- Průchod iontů celým kanálem nelze považovat za volnou difuzi. Většina kanálů je totiž charakterizována větší či menší mírou selektivity v propustnosti iontů. V tomto smyslu hovoříme o sodíkových, draslíkových, vápníkových nebo chloridových kanálech.
- Transport iontů kanály nevyžaduje dodání energie.

Vrátkování napět'ové

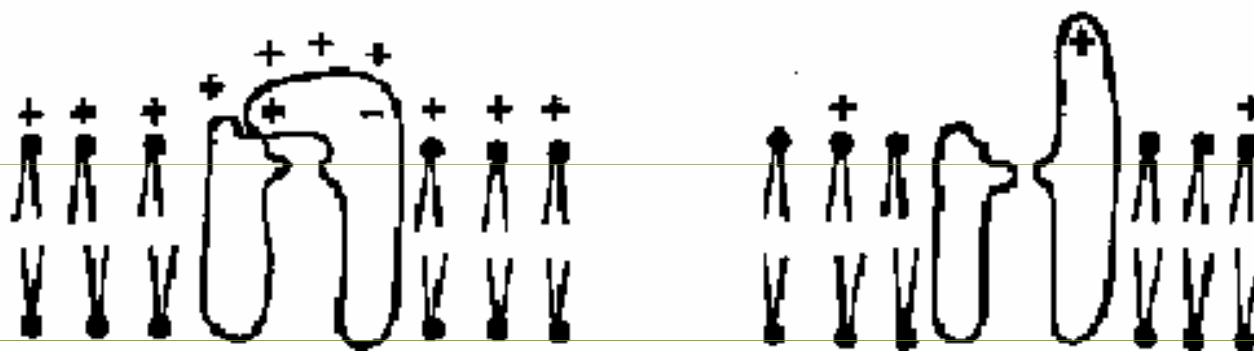
- „Voltage gating“

Změna elektrického napětí membrány →
změna konformace bílkovinné molekuly.

Vrátkování chemické

- „**ligand gating**“ – na kanálovou bílkovinu se naváže ligand → změna její konformace (zavírání a otevírání clony u fotoaparátu).
- Některé iontové kanály vykazují vrátkování kombinované (napětím a chemicky).
- Mechanické vrátkování (mikrofilamenta).

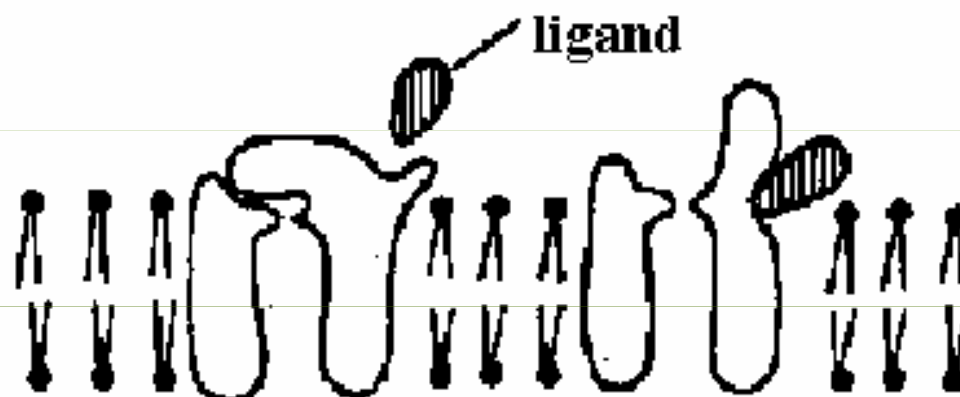
Elektrické a chemické vrátkování



polarizovaná
zavřený kanál

membrána

depolarizovaná
otevřený kanál



zavřený
kanál

otevřený
kanál

ligand

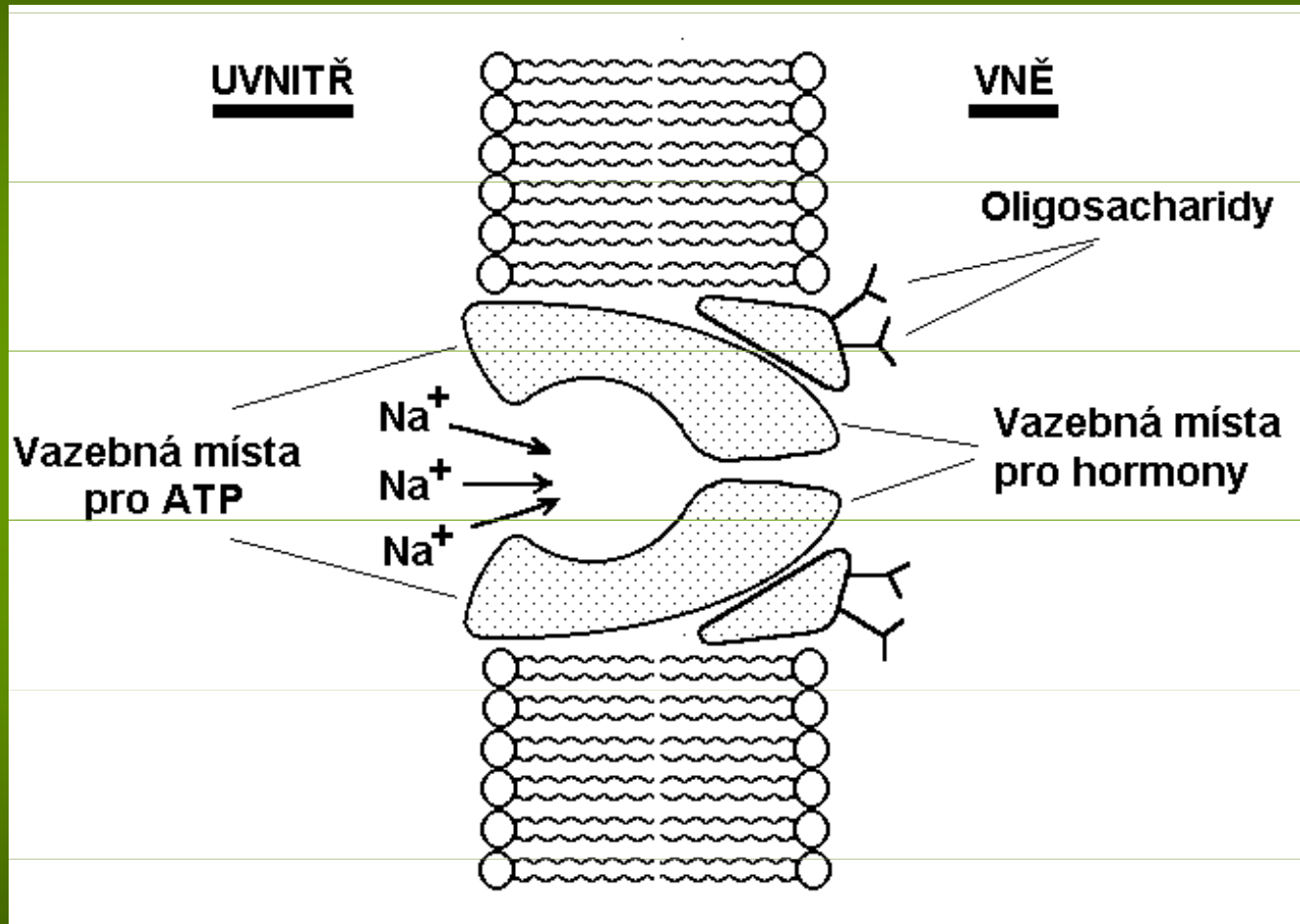
Přenašečové systémy

- V membránách buněk bylo odhaleno více přenašečových systémů. Jeden z nich, označovaný jako *sodíková-draslíková pumpa* (*Na/K pumpa*) má však pro vytvoření podmínek vzniku membránového napětí zcela základní význam. Vytěsňuje *Na*-ionty z buňky výměnou za *K*-ionty a tím zajišťuje, že koncentrace obou zúčastněných iontů v intracelulárním a extracelulárním prostředí (budeme je značit $[Na^+]$, $[K^+]$ a odlišíme je indexy *i*, *e*) jsou rozdílné, přičemž platí:

$$[Na^+]_e \gg [Na^+]_i, \quad [K^+]_i \gg [K^+]_e.$$

Funkce *Na/K* pumpy vyžaduje stálý přísun energie, kterou molekulám přenašeče poskytují v intracelulárním prostředí přítomné molekuly adenosintrifosfátu (*ATP*).

Princip sodíkové-draslíkové pumpy



Na vnější straně membrány dojde k uvolnění sodných iontů a ke konformační změně přenašečové molekuly, na níž se naváží draselné ionty, které jsou přeneseny dovnitř buňky

Sodíko – draselná pumpa

- Draselné a sodné ionty může přenášet v různých poměrech např. 1:2, 2:3.....
- Kromě sodných a draselných iontů existuje aktivní transport kationtů Ca, organických látek – cukry, aminokyseliny....
- Nebyl prokázán aktivní transport aniontů (jsou přenášeny pouze pasivním transportem).

Funkce biologických membrán

- Tvoří rozhraní mezi buňkami i uvnitř buněk.
- Udržují stálé chemické složení uvnitř ohraničených prostorů, a to selektivními transportními mechanismy.
- Jsou prostředím pro rychlou biochemickou transformaci pomocí enzymových systémů.
- Specifická struktura a selektivní iontová propustnost je základem bioelektrických jevů.

Dráždivost

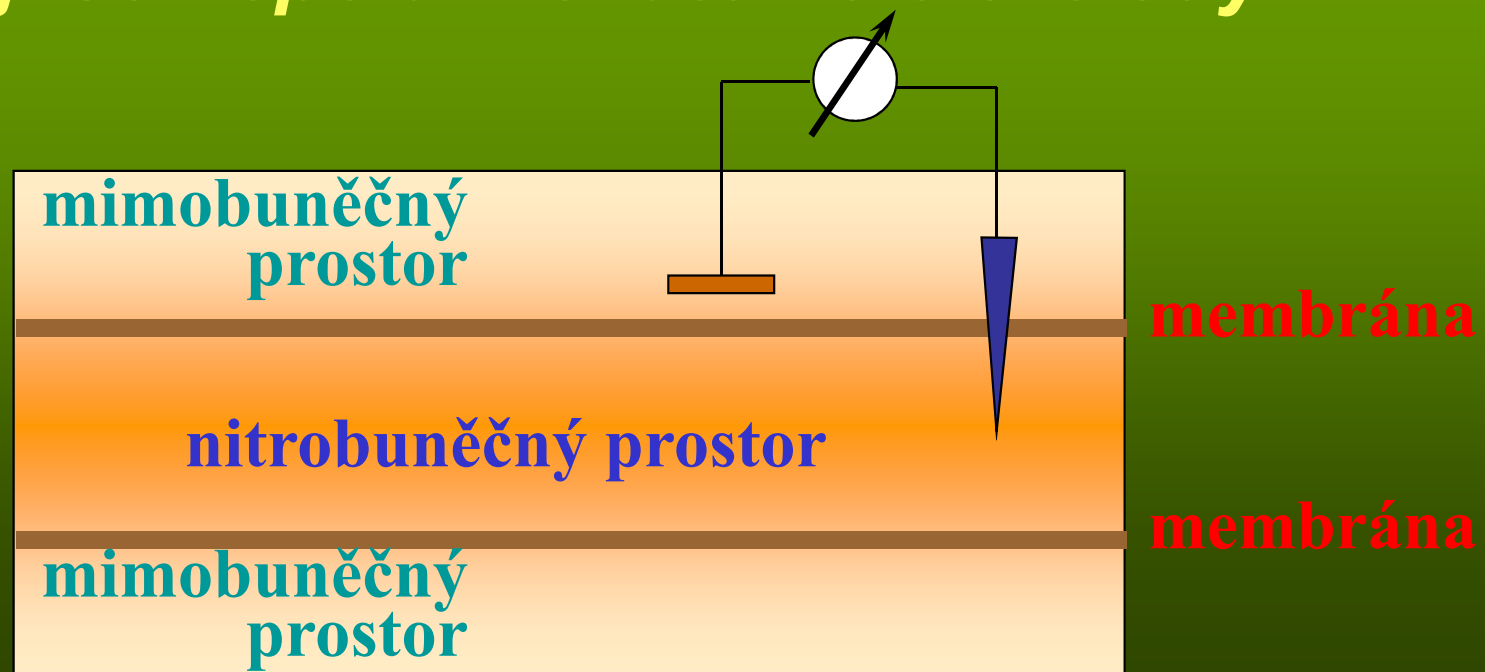
- **Specifická vlastnost všech živých systémů reagovat určitým způsobem na podráždění.**
- **Důležitá podmínka adaptace živého organismu na prostředí.**
- **Zvláště významná je tato vlastnost u smyslových buněk a u tzv. vzrušivých tkání (nervové a svalové).**
- **Každý typ vzrušivé tkáně reaguje nejnáze na určitý energetický impuls (adekvátní podnět). Jiným energetickým impulsem lze sice také vyvolat podráždění, ale při mnohem vyšší energii (neadekvátní podnět).**

Klidový membránový potenciál

Klidové membránové napětí (1)

membránové napětí představuje potenciálový rozdíl mezi mikroelektrodou zavedenou do buňky (*negativní potenciál*) a povrchovou elektrodou mimo buňku (*nulový potenciál*)

Používají se nepolarizovatelné elektrody



Klidové membránové napětí (2)

Jeho hodnoty závisí na:

- typu buňky
 - druhu živočicha, z něhož buňka pochází
 - u identických buněk – na skladbě a koncentraci iontových složek roztoků obklopujících buňky
- Hodnota klidového membránového napětí při normálním iontové skladbě IC a EC tekutiny: (-100 mV; -50 mV, 200mV - rejnok)

tloušťka membrány ~ 10 nm

intenzita elektrického pole v membráně ~ 10^7 V/m

intenzita elektrického pole na povrchu Země ~ 10^2 V/m

Modely klidového membránového potenciálu

(1): **elektrodifuzní:**

- popisují procesy fenomenologicky na základě termodynamiky
- spojují vznik napětí s difuzí iontů přes membránu - Nernstův a Donnanův model, model transportu iontů

(2): **fyzikální na bázi chování pevných látek nebo tekutých krystalů:**

- popisují pohyb iontů přes membránu a jeho blokování
- uvažují charakteristické vlastnosti strukturních prvků membrány (lipidy, proteiny)

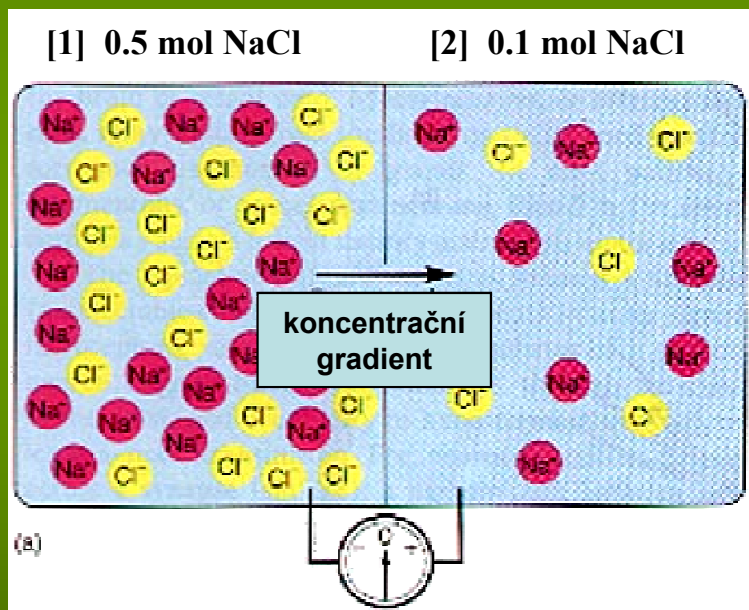
(3): **na bázi ekvivalentních elektrických obvodů:**

- popisují chování buněk v klidu a při jejich excitaci
- využívají elektrické vlastnosti buněk v souladu s elektrodifuzními a pevnolátkovými modely

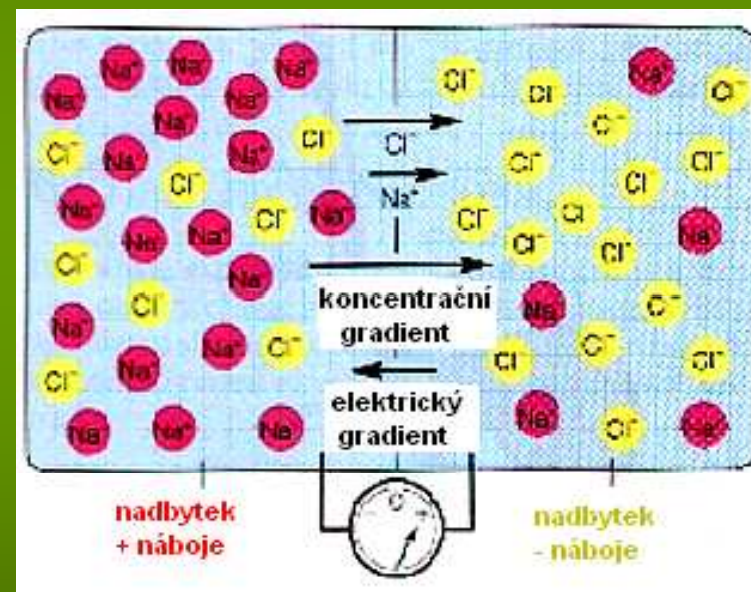
Difuzní napětí (1)

vzniká při difuzi nabitých částic

Difuzní napětí v neživých systémech - roztoky jsou oddělené membránou permeabilní pro Na^+ a Cl^-



Kompartmenty jsou elektricky neutrální, ale je přítomen koncentrační gradient
⇒ difuze iontů z [1] do [2]

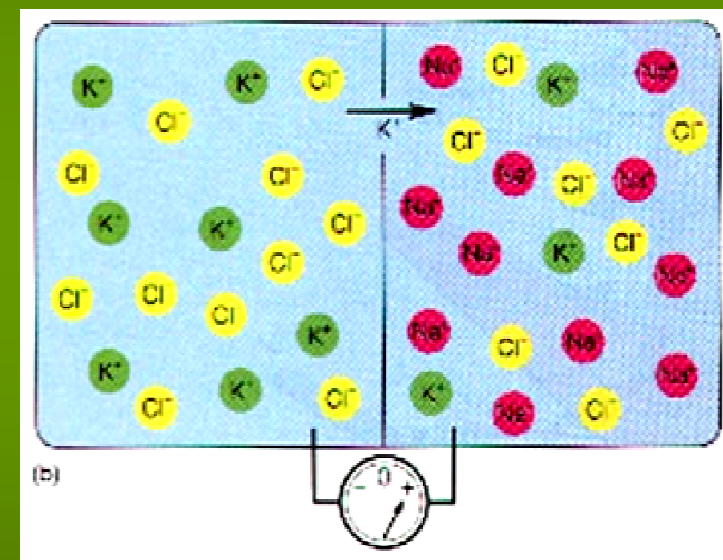
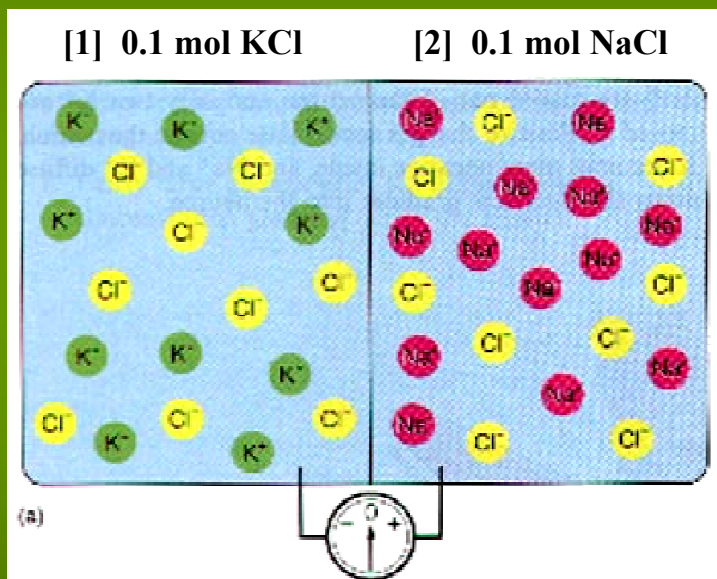


⇒ vznikne dočasné napětí mezi oběma kompartmenty

⇒ **difuzní napětí**

Difuzní napětí (2)

Difuzní napětí v živých systémech - roztoky oddělené membránou selektivně propustnou pro K^+ (vpravo)



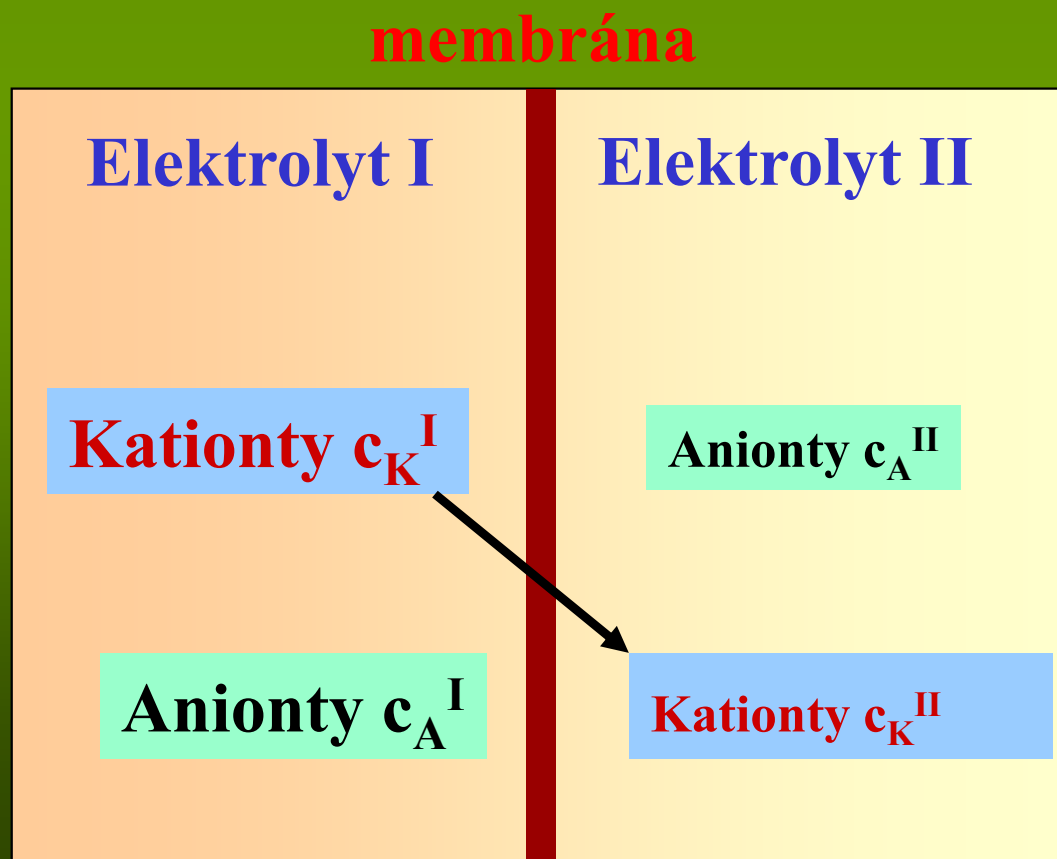
V takovém systému nastává rovnováha, když tam není žádný výsledný tok jednotlivých iontů

⇒ difuze K^+ po jeho koncentračním spádu, dokud nevznikne stejně velký, avšak opačně orientovaný elektrický gradient

⇒ vznikne rovnovážné napětí je-li výsledný difuzní tok nulový

Jednoduchý případ membránové rovnováhy (1)

Týž elektrolyt na obou stranách membrány, ale v různých koncentracích ($c^I > c^{II}$), membrána je permeabilní jen pro kationty



Výsledek:

elektrická dvojvrstva

vytvoří se na membráně

vrstva 1:

anionty zastaveny na straně I

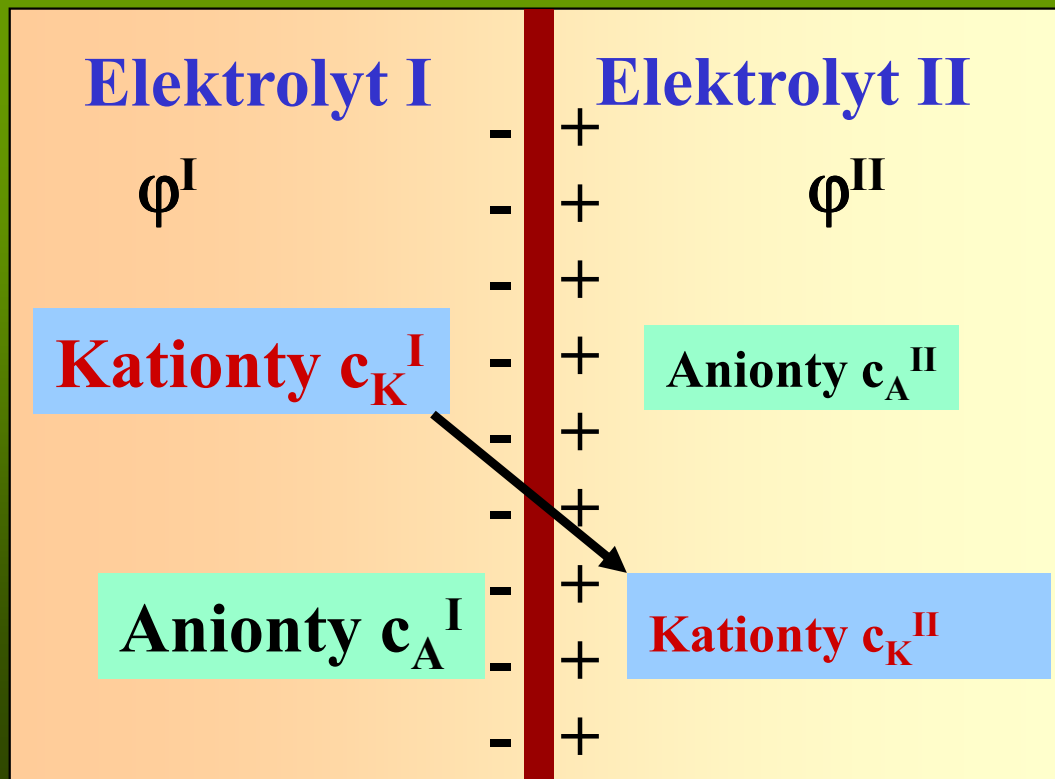
vrstva 2:

kationty přitahovány k aniontům (II)

Jednoduchý případ membránové rovnováhy (2)

Koncentrační rozdíl "pohání" kationty,
elektrické pole dvojvrstvy je "tlačí zpět"

membrána



V rovnováze: vznikne
potenciálový rozdíl U :

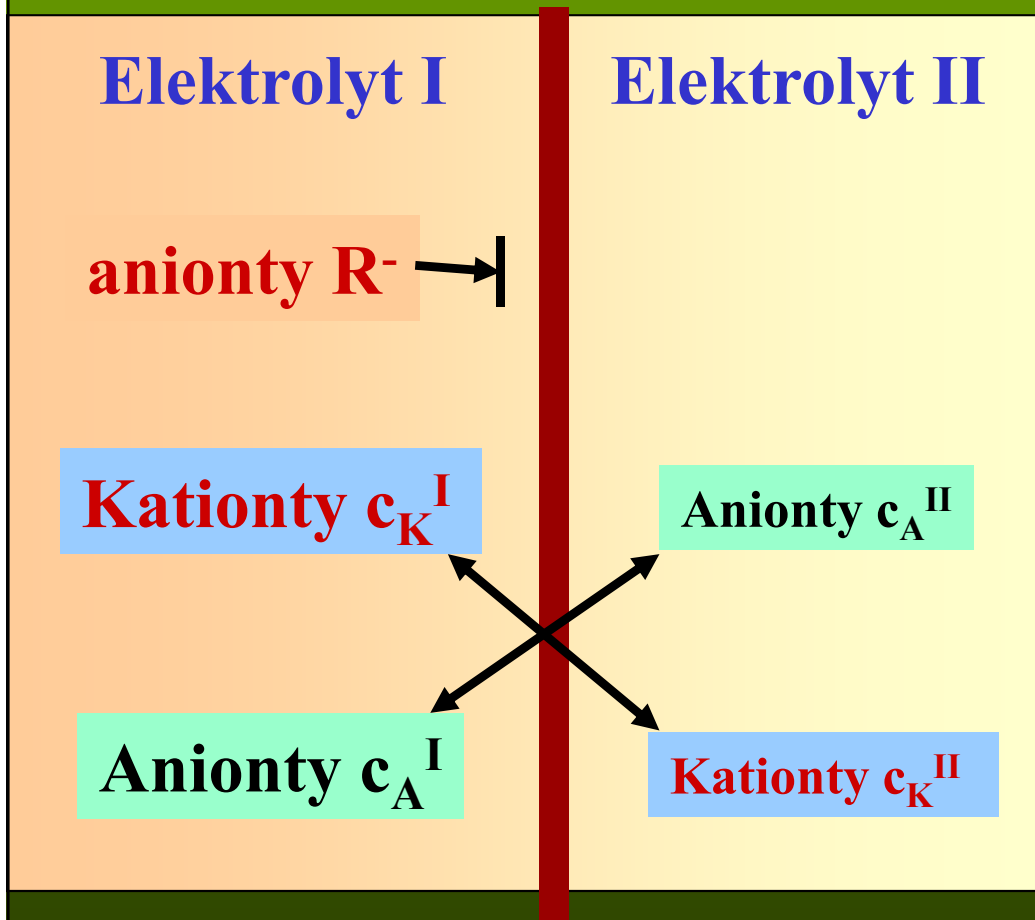
$$U = \varphi^{II} - \varphi^I =$$
$$= -\frac{R \times T}{z_C \times F} \ln \frac{c_K^I}{c_K^{II}}$$

(Nernstova rovnice)

Donnanova rovnováha (1)

Stejný elektrolyt na obou stranách, různé koncentrace ($c^I > c^{II}$), membrána permeabilní pro malé jednomocné ionty K^+ a A^- , nepermeabilní pro R^-

membrána



difuzibilní ionty: K^+ , A^-
volně difundují

nedifuzibilní ionty: R^-

přítomnost R^- :
nevznikne rovnoměrné
rozdělení K^+ i A^-
 \Rightarrow speciální případ
rovnováhy -

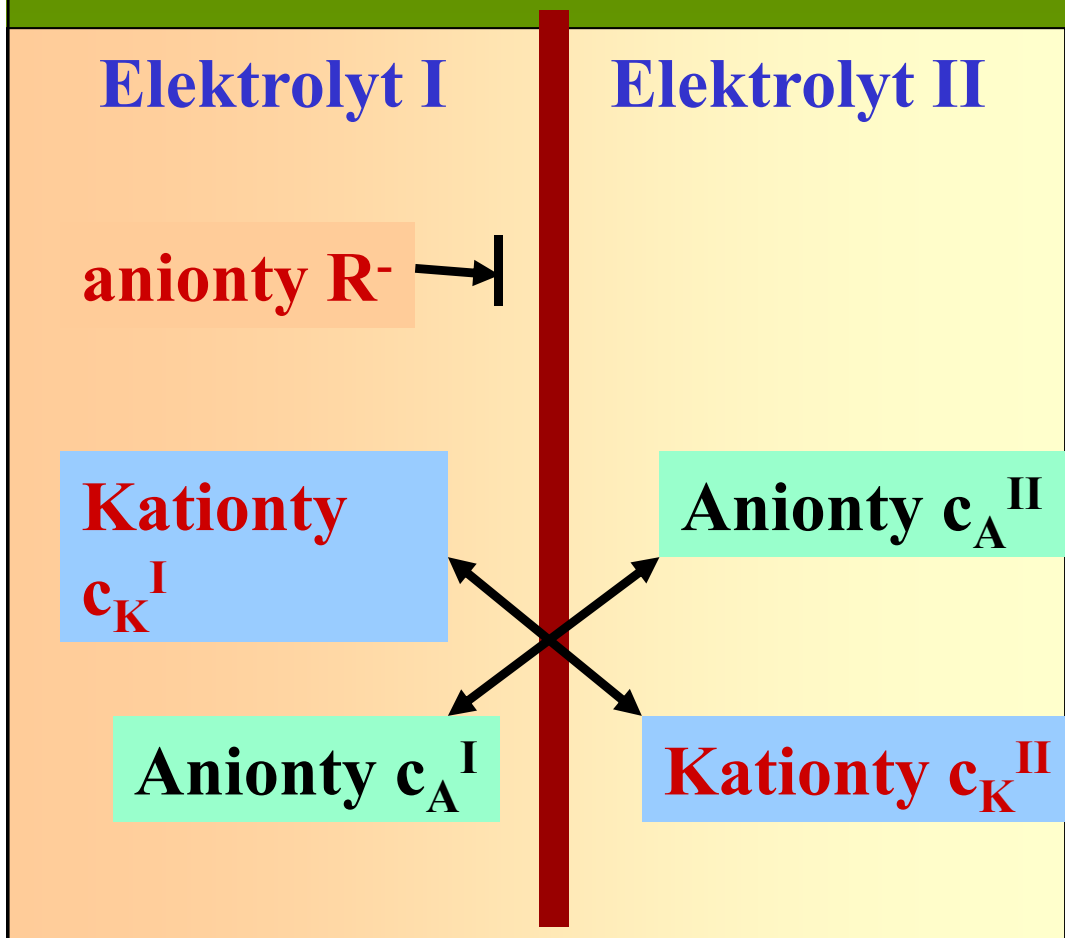
Donnanova rovnováha

Donnanova rovnováha (2)

Rovnovážné koncentrace:

$$c_K^I \times c_A^I = c_K^{II} \times c_A^{II}$$

membrána



Donnanův poměr:

$$\frac{c_K^I}{c_K^{II}} = \frac{c_A^{II}}{c_A^I} = r$$

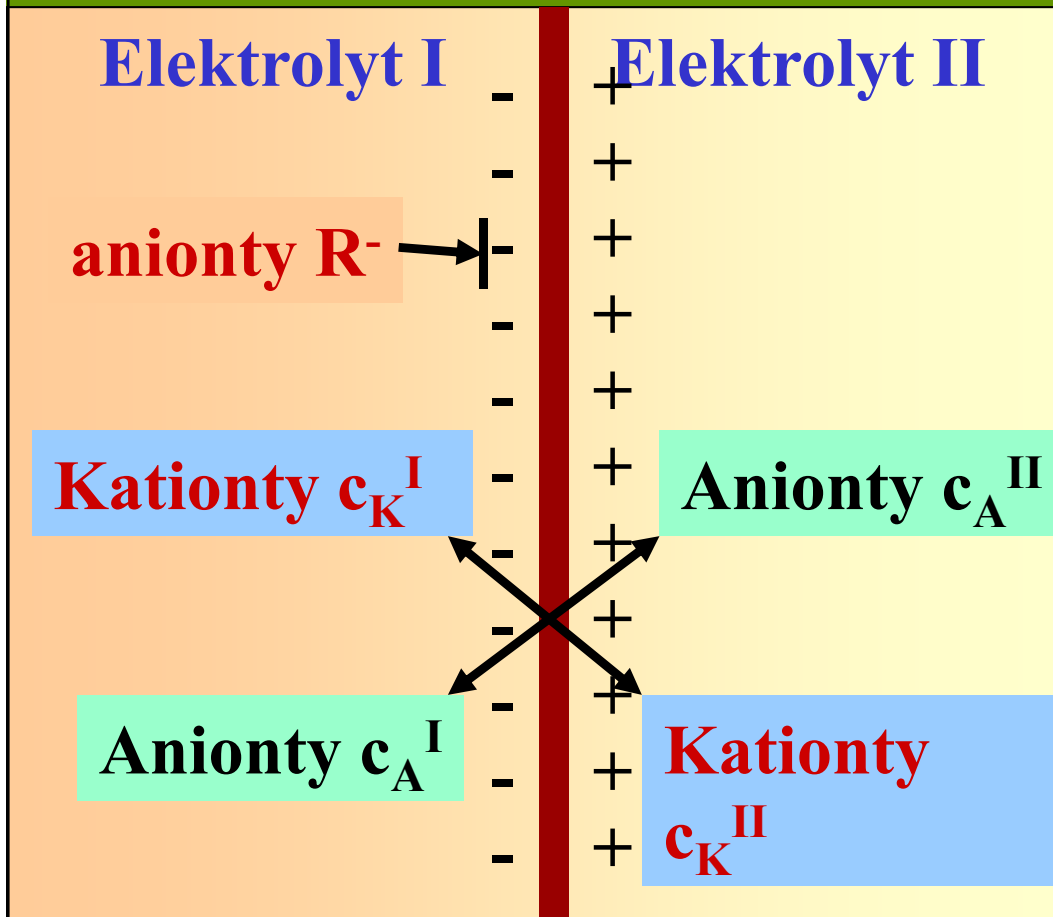
Donnanova rovnováha (3)

Donnanův poměr:

$$\frac{c_K^I}{c_K^{II}} = \frac{c_A^{II}}{c_A^I} = r$$

$$r = \sqrt{z_i \frac{c_i^I}{c_i^{II}}}$$

membrána

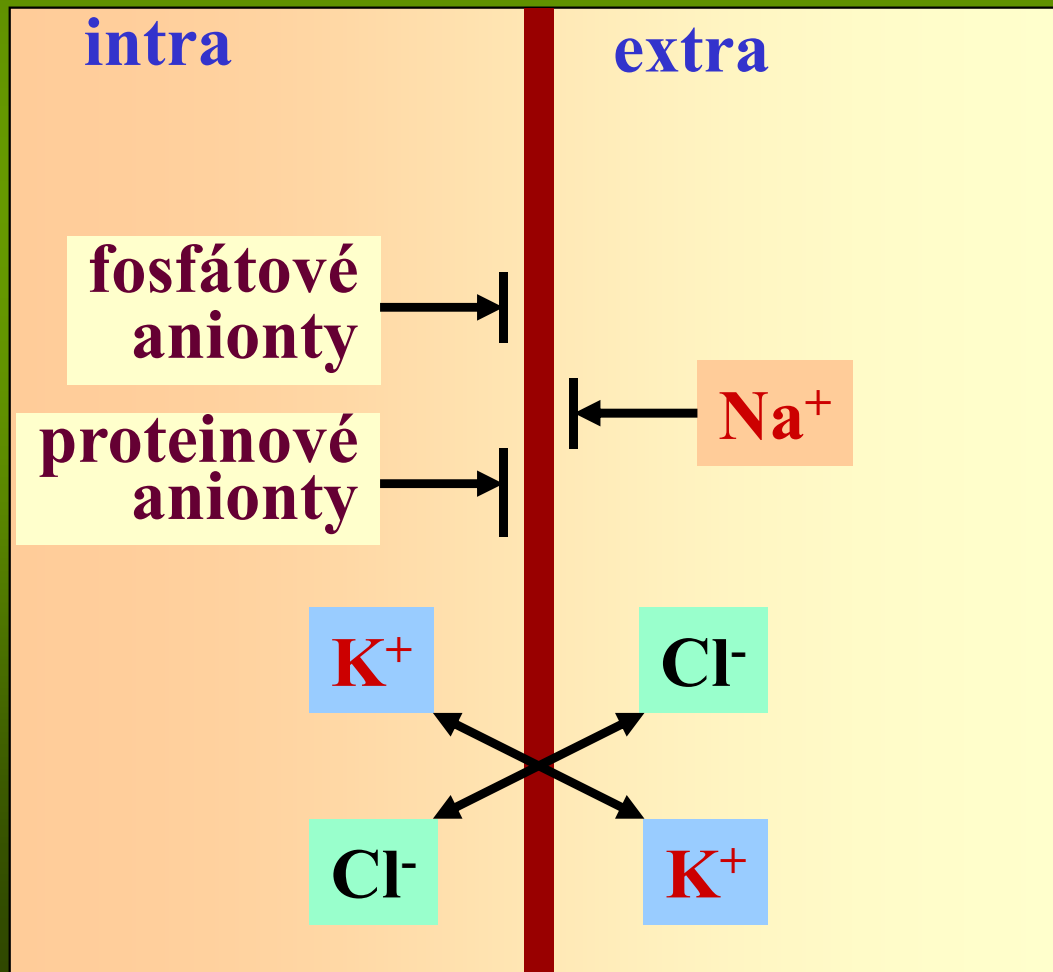


Donnanovo napětí:

$$\begin{aligned} U &= \varphi^{II} - \varphi^I = \\ &= -\frac{R \times T}{F} \ln \frac{c_K^I}{c_K^{II}} = \\ &= -\frac{R \times T}{F} \ln \frac{c_A^{II}}{c_A^I} = \\ &= -\frac{R \times T}{F} \ln r \end{aligned}$$

Donnanův model v živé buňce (1)

**buněčná
membrána**



difuzibilní: K^+ , Cl^-
nedifuzibilní: Na^+ , anionty

též bílkoviny a nukleové
kyseliny

Koncentrace:

$$[K^+]_{in} > [K^+]_{ex}$$

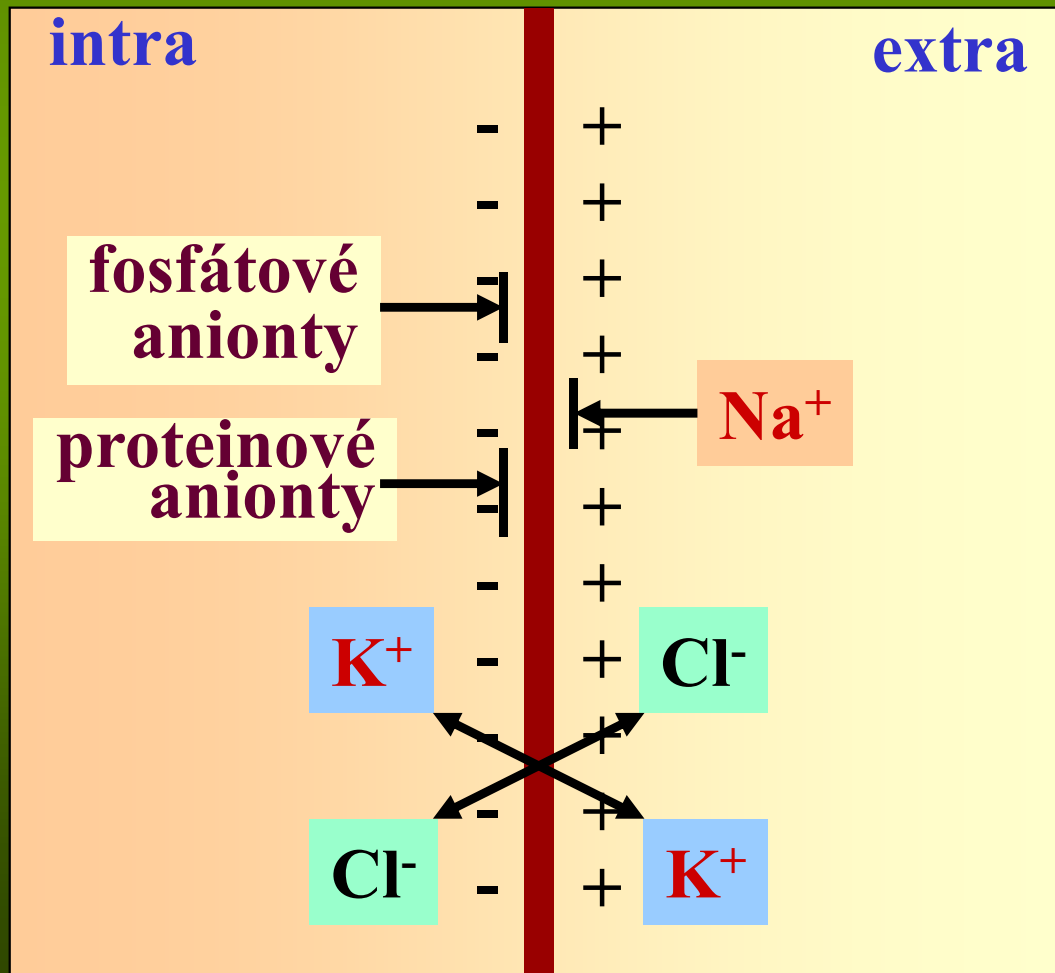
$$[Cl^-]_{in} < [Cl^-]_{ex}$$

Donnanův model v živé buňce (2)

Donnanův poměr:

buněčná membrána

$$\frac{[K^+]_{in}}{[K^+]_{ex}} = \frac{[Cl^-]_{ex}}{[Cl^-]_{in}}$$



Donnanovo napětí:

$$U = \varphi_{in} - \varphi_{ex} =$$

$$= - \frac{R \times T}{F} \ln \frac{[K^+]_{in}}{[K^+]_{ex}} =$$

$$= - \frac{R \times T}{F} \ln \frac{[Cl^-]_{ex}}{[Cl^-]_{in}}$$

Donnanův model v živé buňce (3)

Donnanovo napětí (klidové napětí) [mV]:

Objekt:	Výpočet:		Měření:
	K ⁺ :	Cl ⁻ :	
axon sépie	- 91	- 103	- 62
sval žáby	- 56	- 59	- 92
sval potkana	- 95	- 86	- 92

•Donnanův model se liší od reality:

•buňka a okolní prostředí se považují za termodynamicky uzavřené systémy

•Nedifuzibilní ionty se považují za úplně nedifuzibilní, membrána není překážkou pro difuzibilní ionty

•zanedbává se vliv iontových pump z hlediska koncentrace iontů

•interakce mezi membránou a ionty se nebere do úvahy

Model transportu iontů (1)

Elektrodifuzní model s menším počtem zjednodušení.

Předpokládáme:

- konstantní koncentrační rozdíl mezi vnější a vnitřní stranou membrány \Rightarrow konstantní transport přes membránu
- migrace iontů přes membránu \Rightarrow elektrická dvojvrstva na obou stranách membrány
- všechny druhy iontů na obou stranách membrány se berou v úvahu současně
- různá permeabilita pro různé ionty
- empirický fakt - membrána není ani úplně permeabilní, ani úplně nepermeabilní pro žádný druh iontů

Model transportu iontů (2)

$$U = \frac{R \cdot T}{F} \cdot \ln \frac{\sum P_{ki} \cdot c_{ki \text{ EXT}} + \sum P_{ai} \cdot c_{ai \text{ INT}}}{\sum P_{ki} \cdot c_{ki \text{ INT}} + \sum P_{ai} \cdot c_{ai \text{ EXT}}}$$

Goldman - Hodgkin - Katz

$$U = \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{F} \cdot \log \frac{P_{K^+} \cdot [K^+]_{\text{EXT}} + P_{Na^+} \cdot [Na^+]_{\text{EXT}} + P_{Cl^-} \cdot [Cl^-]_{\text{INT}}}{P_{K^+} \cdot [K^+]_{\text{INT}} + P_{Na^+} \cdot [Na^+]_{\text{INT}} + P_{Cl^-} \cdot [Cl^-]_{\text{EXT}}}$$

P - permeabilita

Model transportu iontů (3)

Tzv. obří axon sépie ($t = 25^\circ\text{C}$):

$$p_K : p_{\text{Na}} : p_{\text{Cl}} = 1 : 0,04 : 0,45$$

Výpočet: $U = -61 \text{ mV}$

Měření: $U = -62 \text{ mV}$

Sval žáby ($t = 25^\circ\text{C}$):

$$p_K : p_{\text{Na}} : p_{\text{Cl}} = 1 : 0,01 : 2$$

Výpočet: $U = -90 \text{ mV}$

Měření: $U = -92 \text{ mV}$

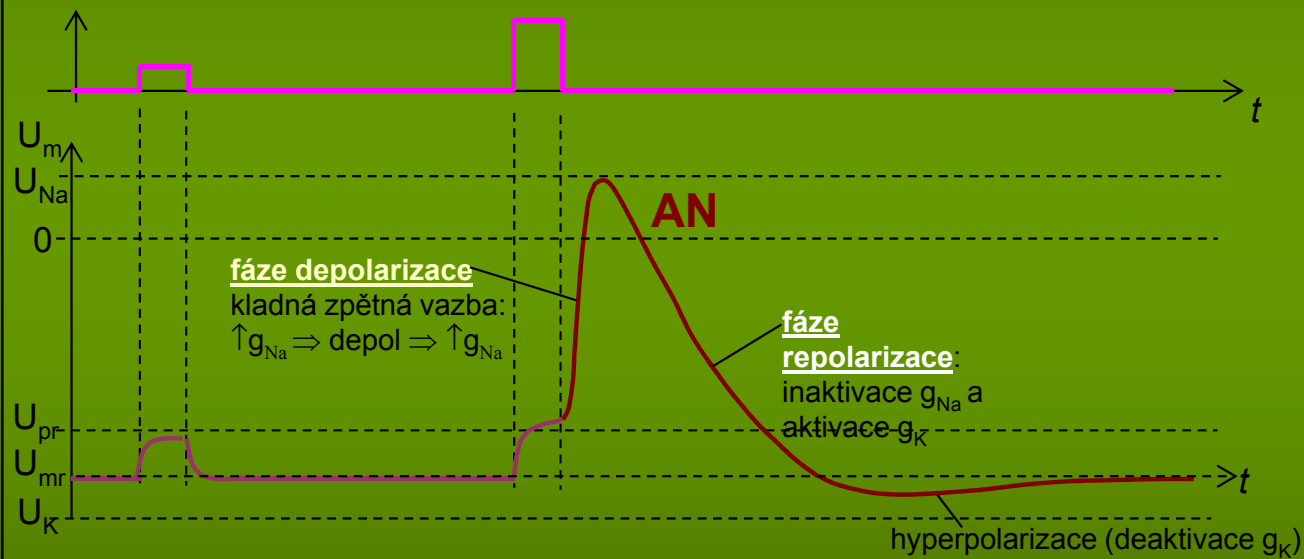
Činnostní
(akční)

potenciál

Činnostní (akční) potenciál

- Pojmem činnostní potenciál označujeme rychlou změnu klidového membránového napětí vzniklou po nadprahovém podnětu a šířící se do okolních okrsků membrány
- Tato napěťová změna je spojena s prudkou změnou propustnosti kanálů pro sodné a draselné ionty
- Činnostní potenciál může být vyvolán elektrickými nebo chemickými podněty, vedoucími k místnímu snížení klidového membránového napětí

Mechanismus spuštění činnostního potenciálu



Mechanismus spuštění činnostního potenciálu v buněčné membráně je analogický monostabilnímu klopnému obvodu v elektrotechnice

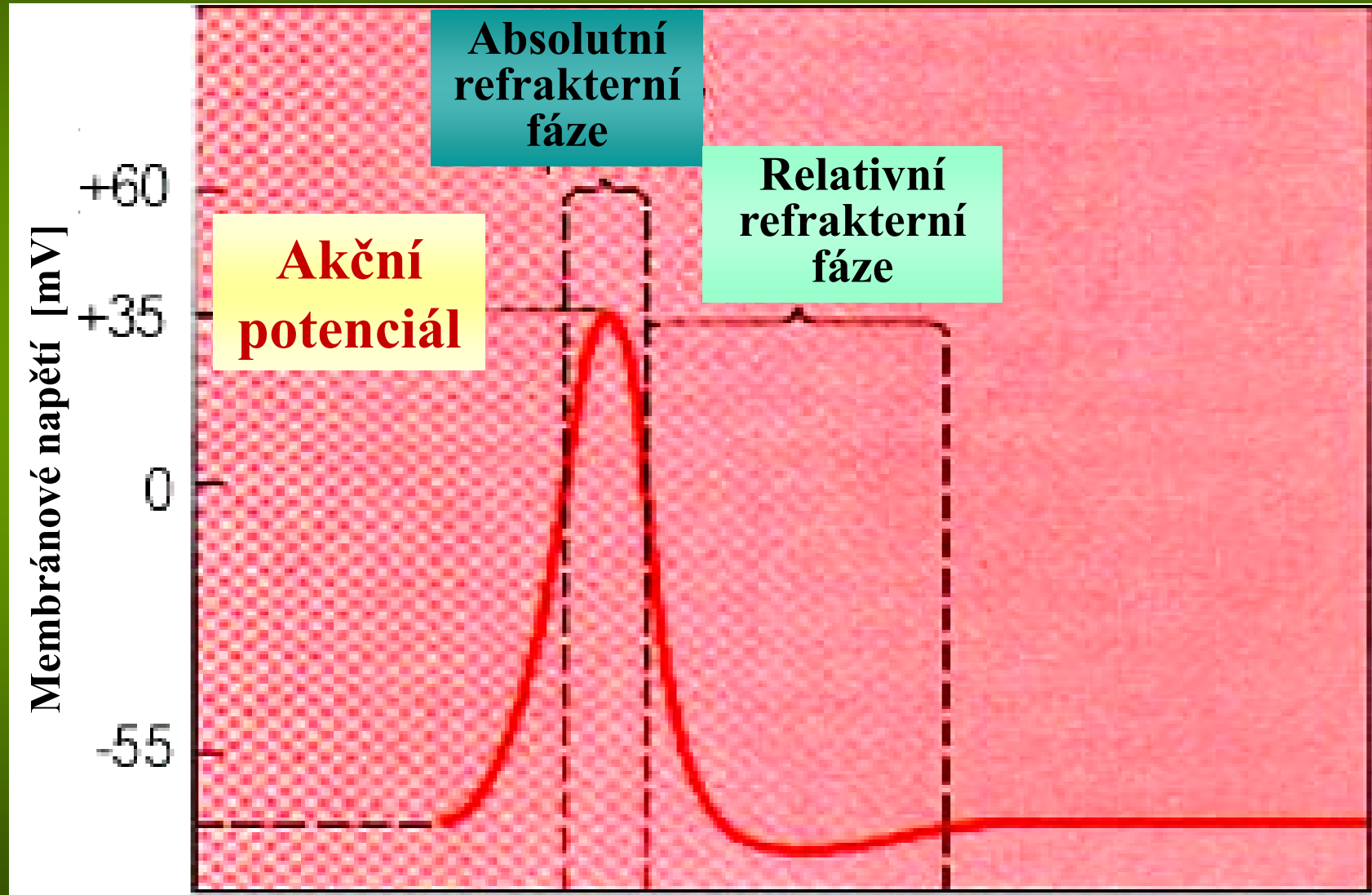
Mechanismus spuštění činnostního potenciálu

- Otevření sodíkových kanálů (propustnost se zvýší až 500x)
- → překmit membránového potenciálu do kladných hodnot
- = DEPOLARIZACE
- → zvýšení propustnosti draslíkových kanálů → draselné ionty proudí ven z buňky → zastavení překmitu potenciálu a jeho pokles = REPOLARIZACE → (HYPERPOLARIZACE)

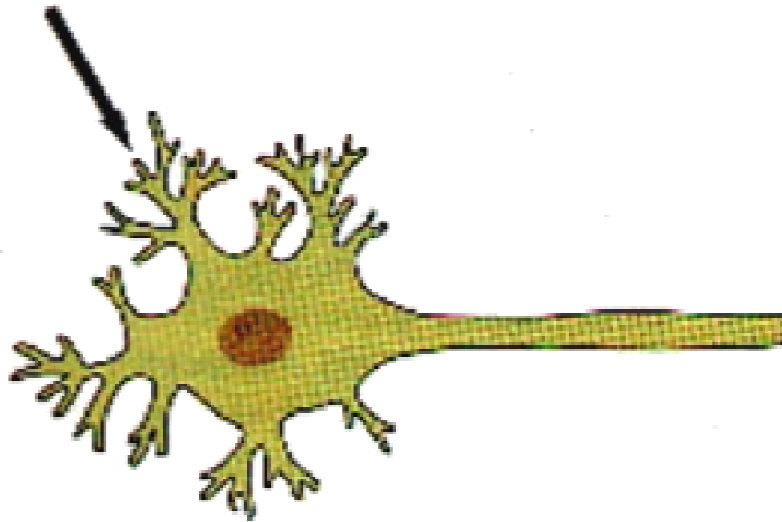
Mechanismus spuštění činnostního potenciálu

- Časový interval v němž je membrána hyperpolarizovaná = **REFRAKTERNÍ FÁZE**

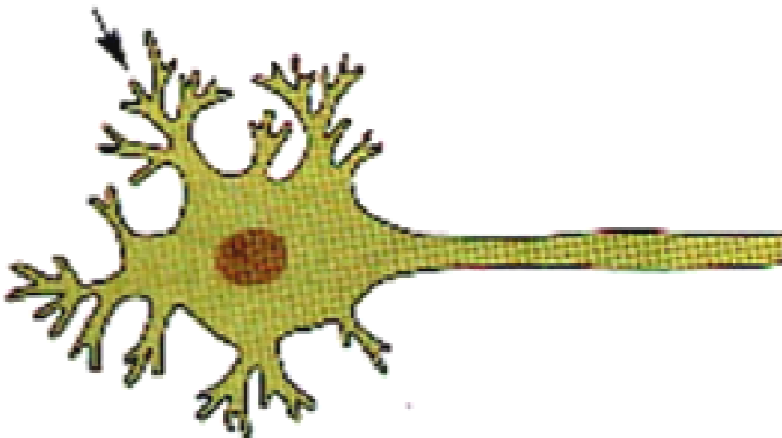
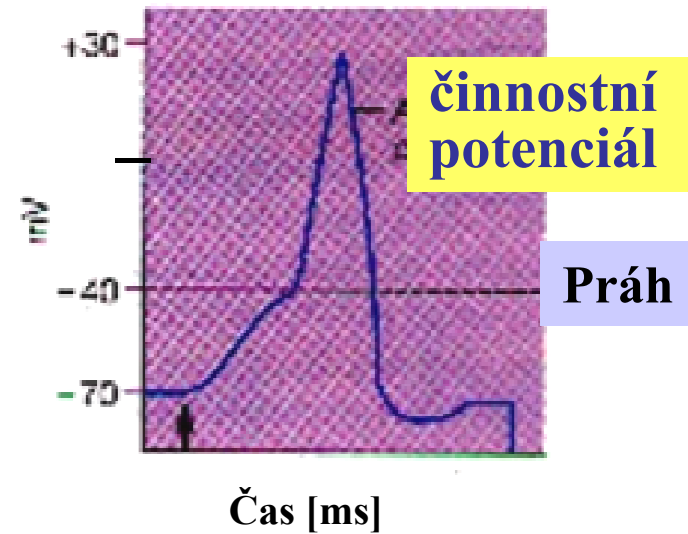
Refrakterní fáze



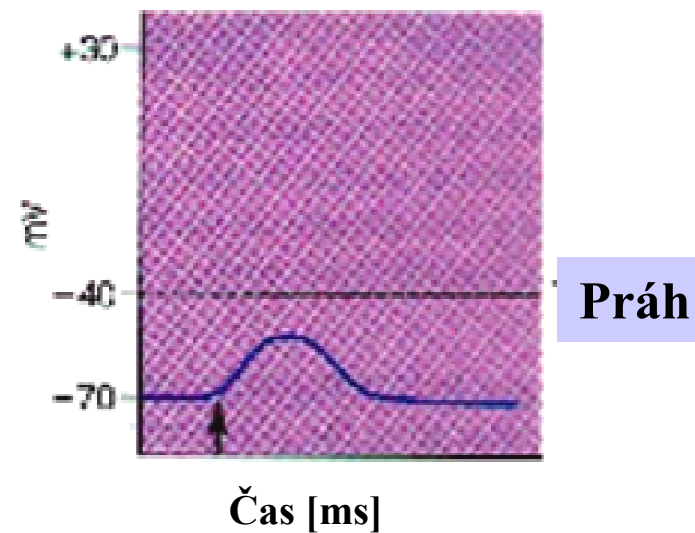
Vznik činnostního (akčního) potenciálu



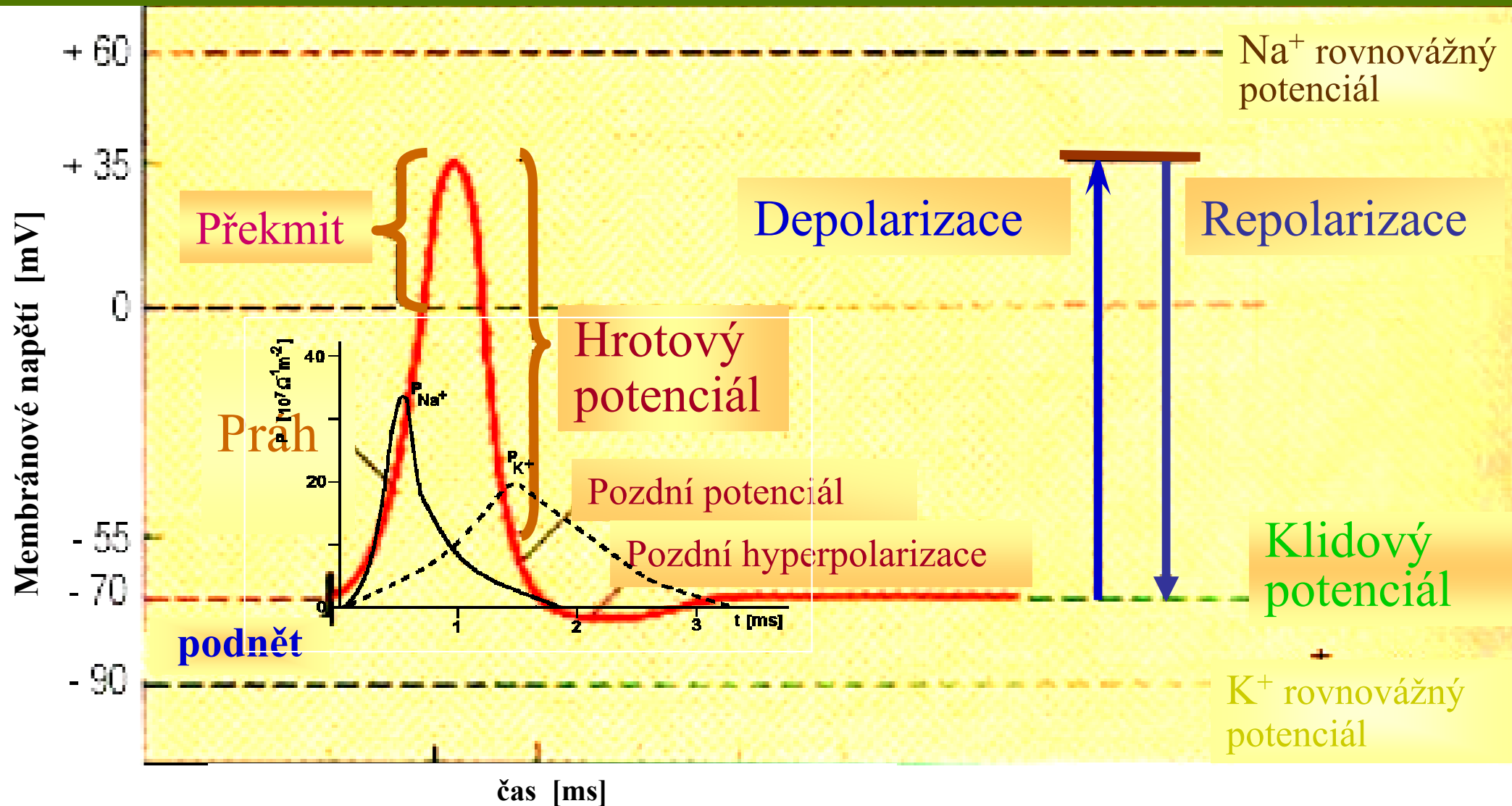
Nadprahový podnět



Podprahový podnět



Popis akčního potenciálu



Sodíková elektrogeneze

- Vznik akčního potenciálu je podmíněn především vtokem sodných iontů do buňky.
- U myokardu i kalciová elektrogeneze
- Pozn. Celkové množství iontů přestupujících přes membr.nepatrné, nabývá význam až při častém opakování akčního potenciálu, stacionární stav vyžaduje intenzivní činnost iontových pump (proto např.nervová činnost vyžaduje značný přísun energie).

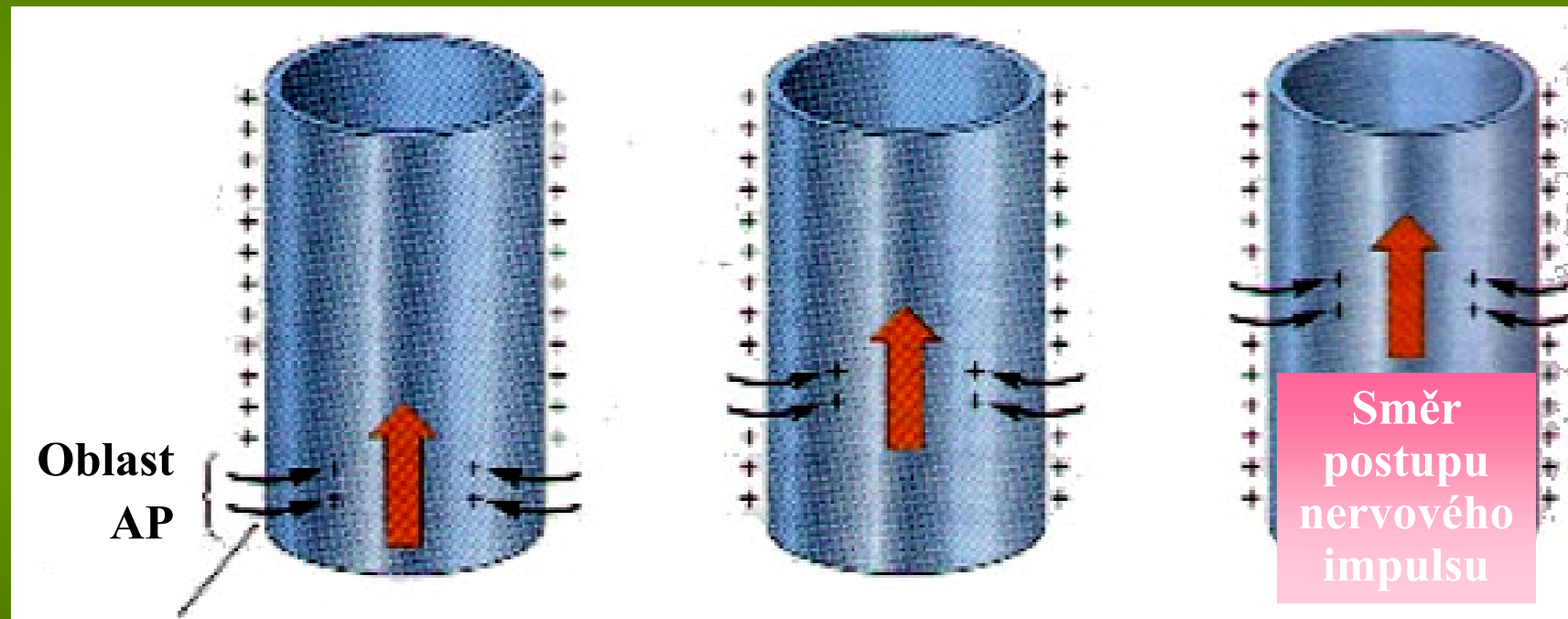
Činnostní potenciál

- Změny v rozložení iontů, k nimž dochází v důsledku činnostního potenciálu, jsou vyrovnávány činností iontových pump (aktivním transportem)
- Činnostní potenciál patří k jevům označovaným jako „vše nebo nic“. Takový jev má vždy stejnou velikost. Zvyšování intenzity nadprahového podnětu se proto projeví nikoliv zvýšením amplitudy činnostního potenciálu nýbrž zvýšením jeho frekvence.

Šíření činnostního potenciálu

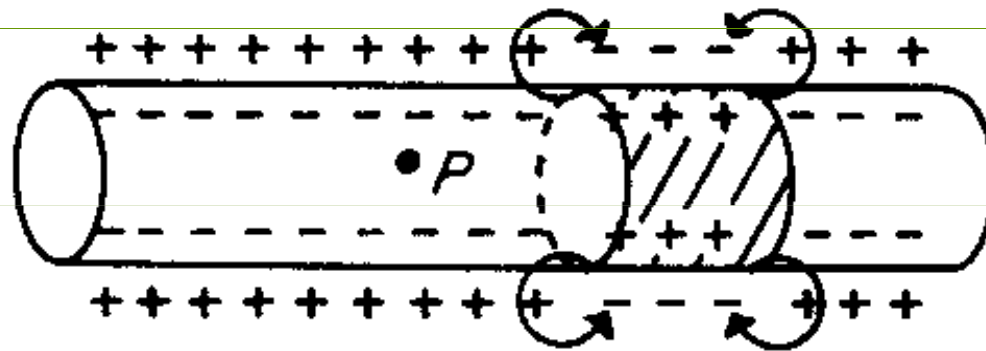
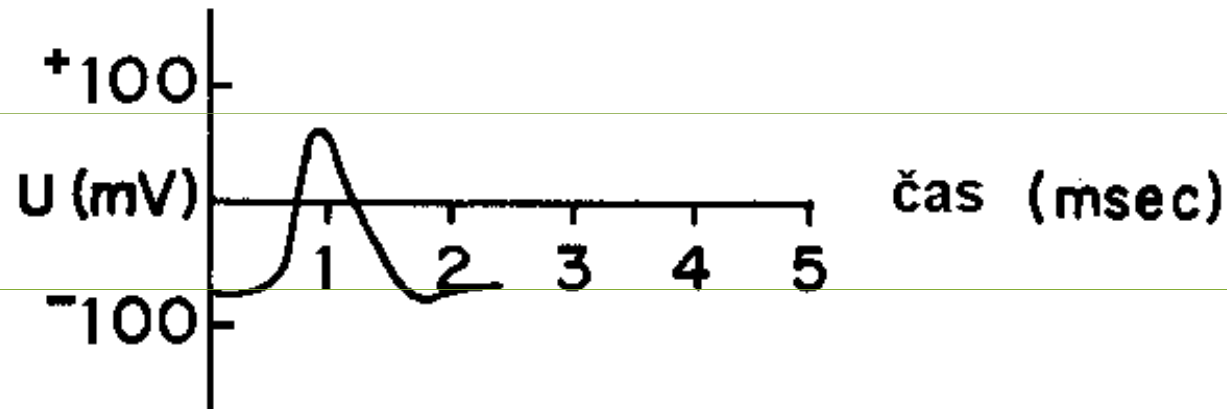
- Rychlost šíření je značně proměnlivá a závisí na stavbě nervového vlákna (myelinová pochva).
- V CNS až 120m/s.
- Vegetativní nervy (bez myelin. Pochvy) 0,5m/s.
- Myelin + větší průměr vlákna zvyšuje rychlost až 100x!!!

Vedení vzruchu po membráně



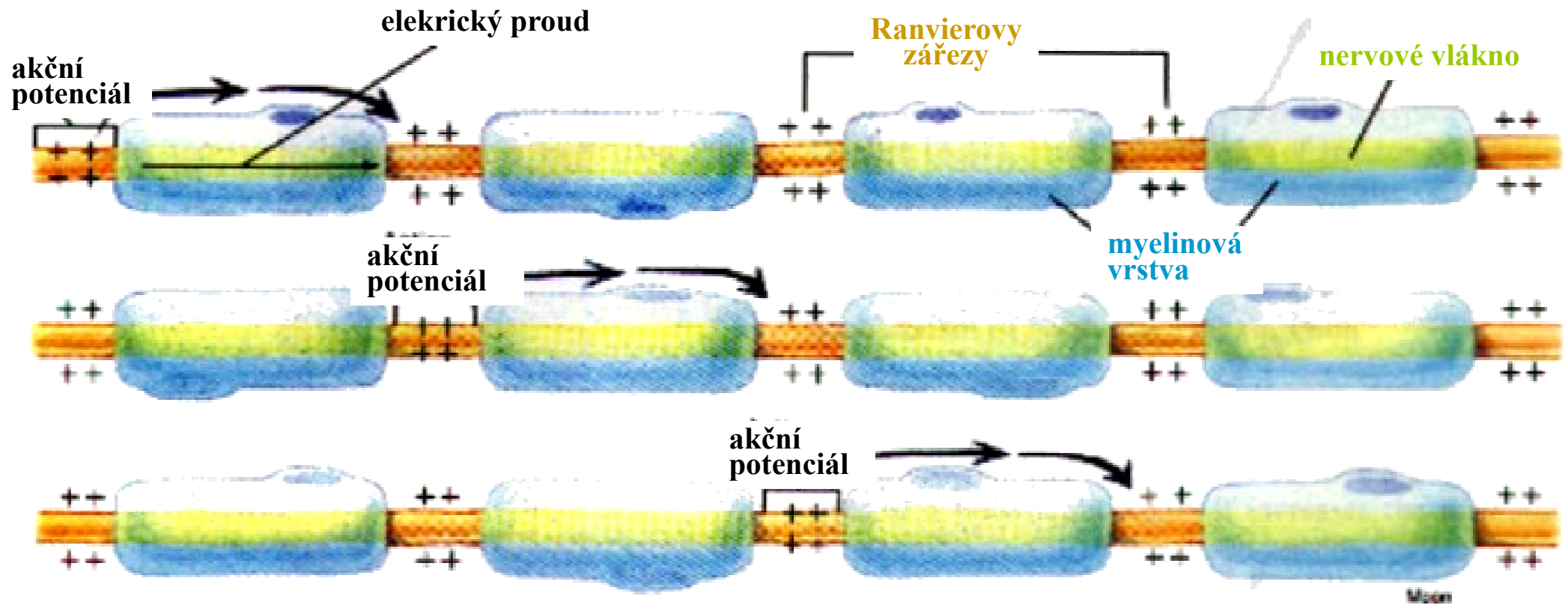
Vedení vzruchu je jednosměrné protože opačná strana membrány se nachází v refrakterní fázi

Šíření činnostního potenciálu

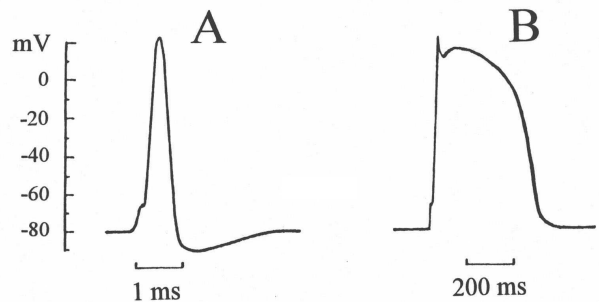


Činnostní potenciál se šíří po membráně jako vlna negativity prostřednictvím místních proudů

Vedení vzruchu po (myelinizovaném) nervovém vlákně saltatorické - skokem

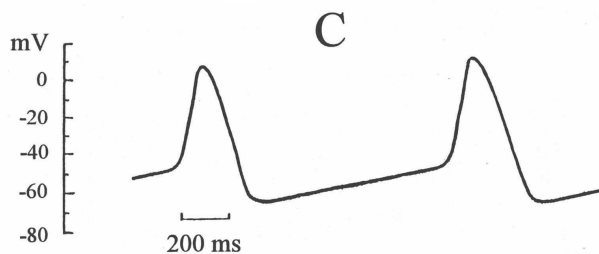


Příklady činnostních potenciálů

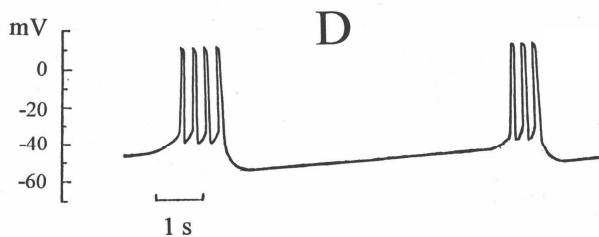


A - nervové vlákno,

B - svalová buňka srdeční komory;



C - buňka sinoatriálního uzlu;



D - buňka hladkého svalu.

Synapse

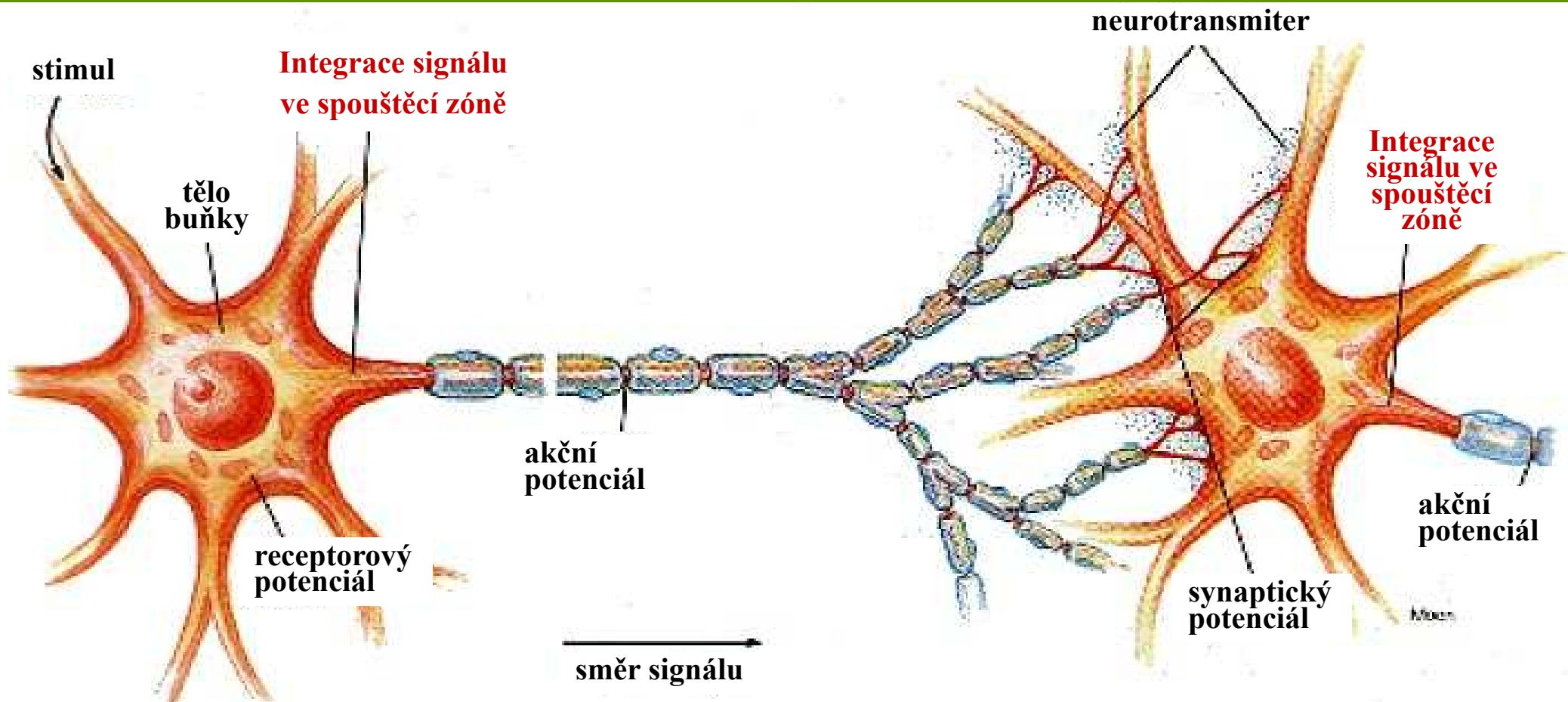
Definice

- **Synapse** představuje specifické spojení mezi nervovými buňkami navzájem a mezi nervovými a jinými cílovými buňkami (např. svalovými), umožňující přenos činnostních potenciálů

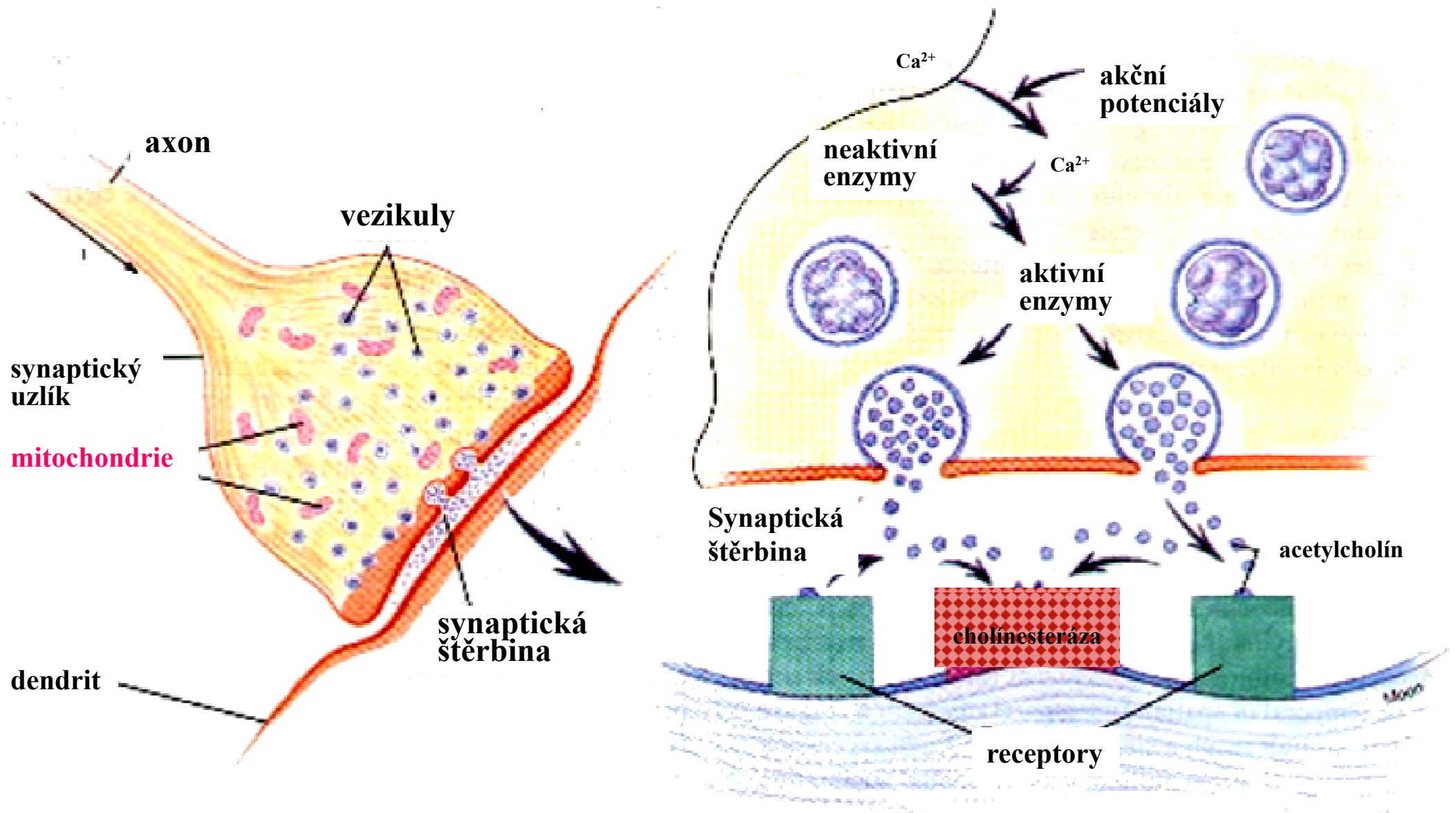
Rozlišujeme:

- **synapse elektrické** – těsné spojení dvou buněk pomocí iontových kanálů, umožňující rychlý oboustranný přenos vzruchu
- **synapse chemické** - jsou častější, jsou vázány na specifické struktury a zajišťují jednosměrný přenos vzruchu

Vedení vzruchu mezi nervovými buňkami

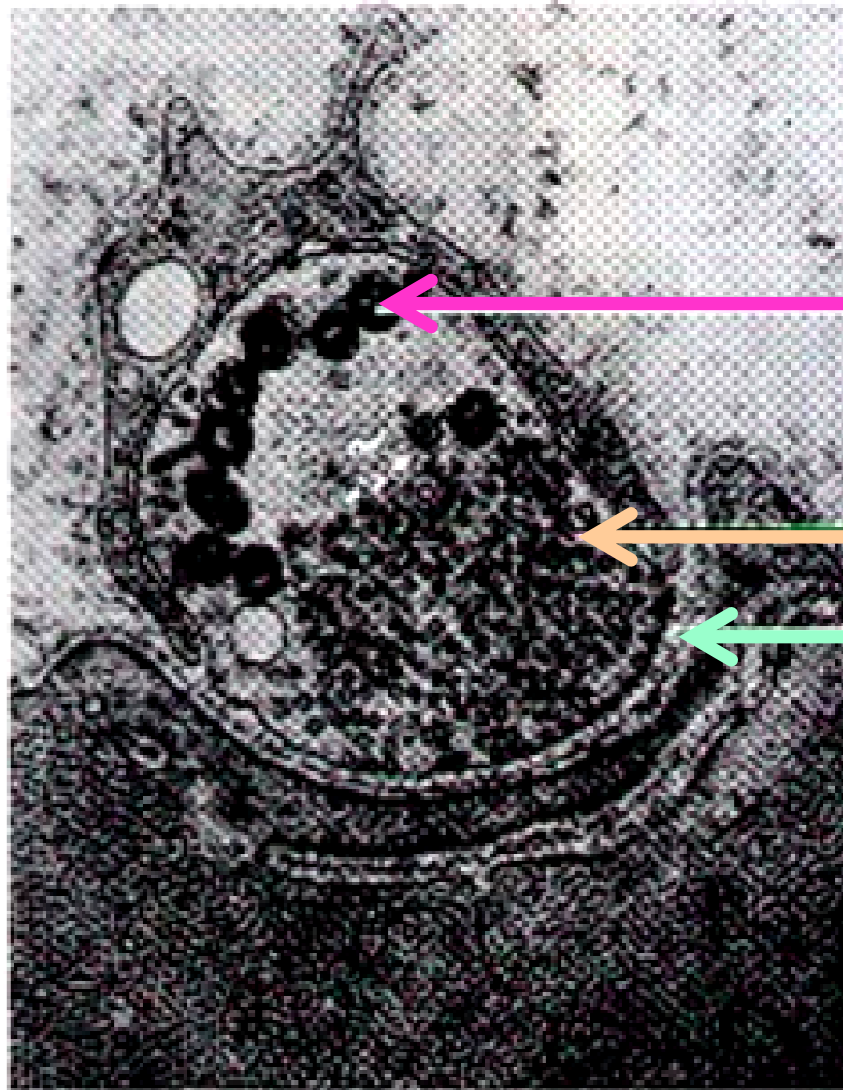


Chemická synapse



Chemická synapse

záznam z elektronového mikroskopu



Mitochondrie

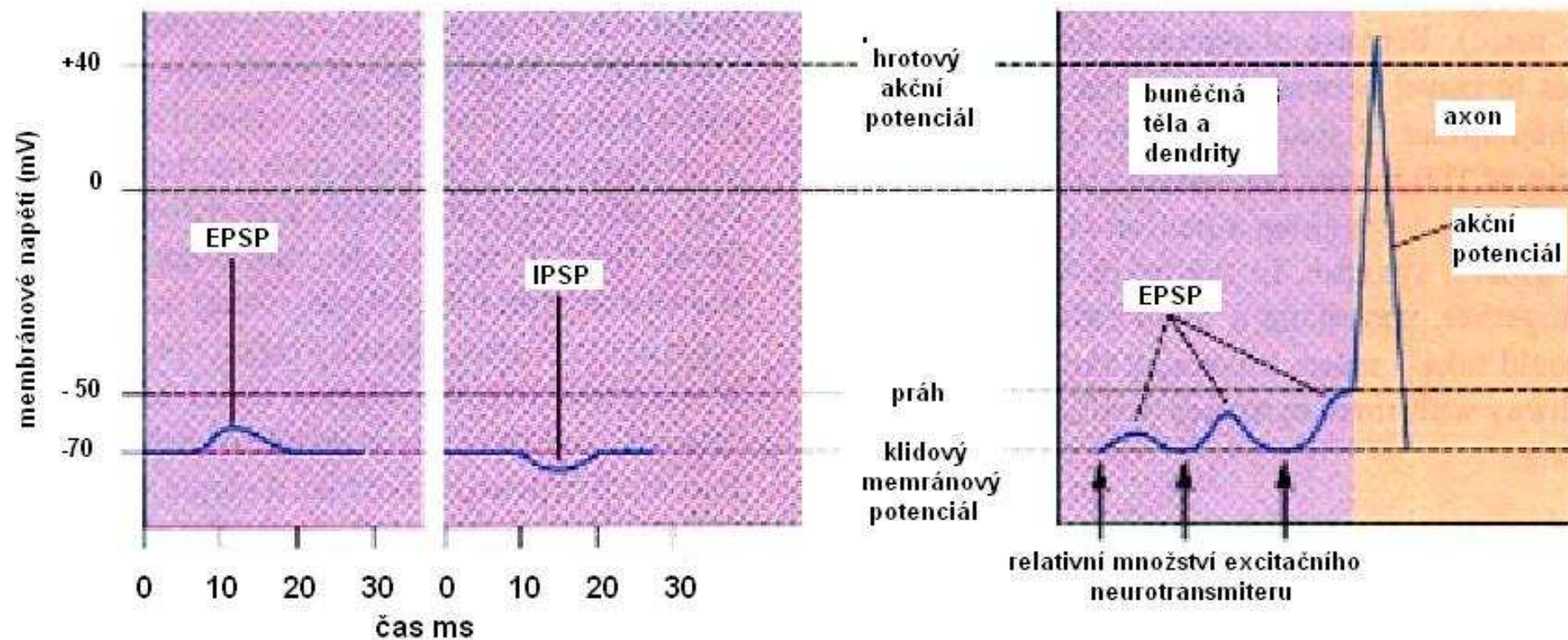
Vezikuly

Synaptická
štěrbina

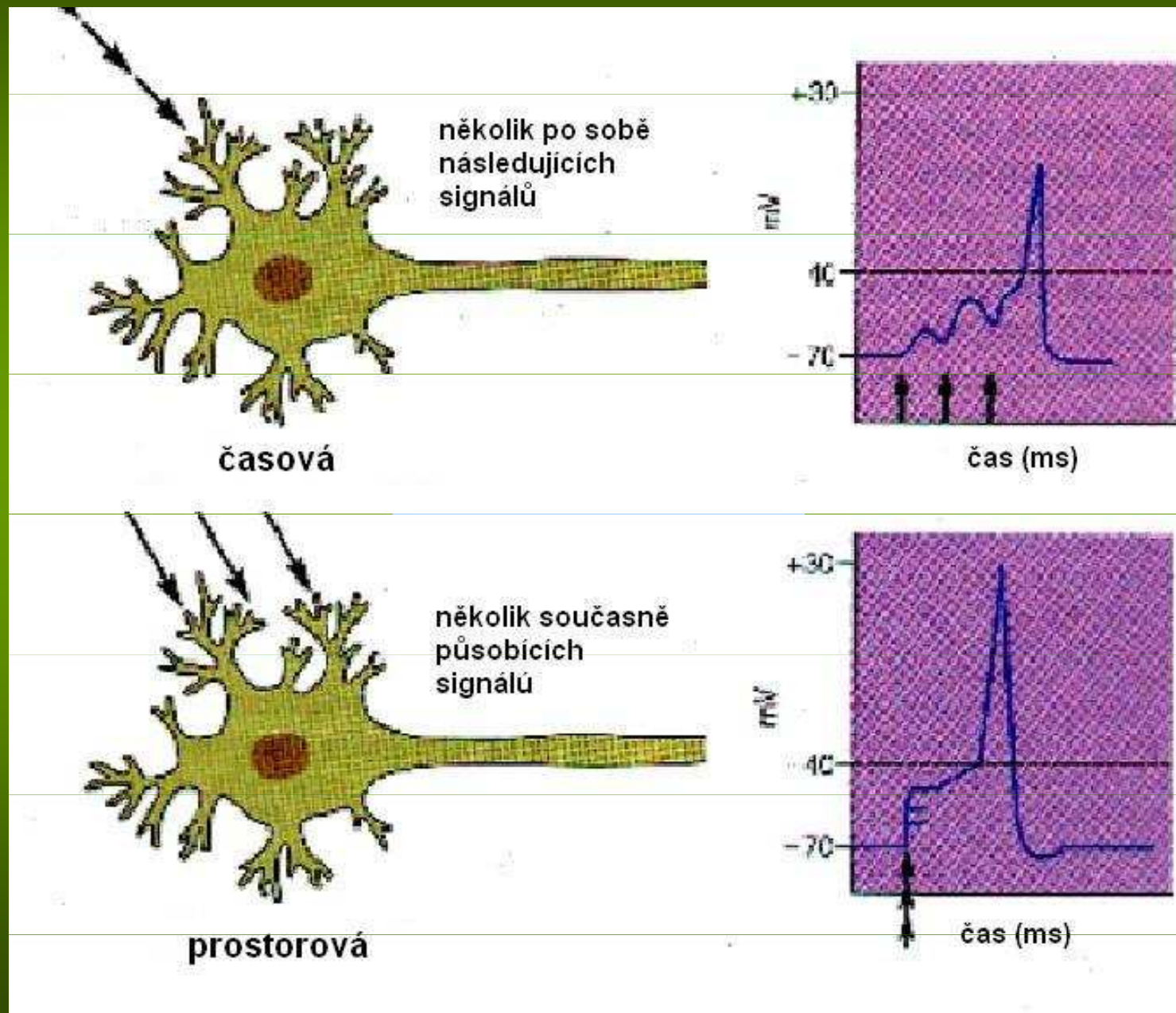
Synaptické mediátory (neurotransmitery)

- Mediátorem excitačních synapsí je nejčastěji **acetylcholin** (v nervosvalových ploténkách a CNS) a **kyselina glutamová** (v CNS). Obě látky působí jako vrátkovací ligandy především pro sodíkové kanály. Průnik sodných iontů do buňky vyvolá potenciálovou změnu membrány v kladném smyslu – depolarizace membrány (excitační postsynaptický potenciál).
- Mediátorem inhibičních synapsí v mozku je kyselina **gama-aminomáselná (GABA)**. Působí jako vrátkovací ligand chloridových kanálů. Chloridové ionty vniklé do buňky vyvolají potenciálovou změnu membrány v záporném smyslu, jejímž důsledkem je hyperpolarizace membrány (inhibiční postsynaptický potenciál)

Excitační a inhibiční postsynaptický potenciál



Sumace vzruchů



Shrnutí

- Elektrické jevy na biologických membránách mají rozhodující význam pro funkci vzrušivých tkání
- Klidový membránový potenciál (fyzikálně správně: membránové napětí) je důsledkem nerovnoměrného rozložení iontů na obou stranách membrány.
- Toto je udržováno dvěma základními mechanismy: selektivně propustnými kanály a přenašečovými systémy. Oba systémy jsou bílkovinné povahy
- Změny membránového napětí po podráždění označujeme jako činnostní (akční) potenciál
- Membrána prochází po podráždění dvěma fázemi: depolarizací – spojenou s vtokem sodných iontů do buňky a následnou repolarizací – spojenou s výtokem draselných iontů z buňky
- V refrakterní fázi je membrána buď zcela nebo částečně nedráždivá
- Synapse představuje místo spojení dvou buněk, umožňující přenos činnostního potenciálu



**„Dvě věci jsou nekonečné:
vesmír a lidská blbost;
vesmírem si ale nejsem
zcela jist“.**

Albert Einstein