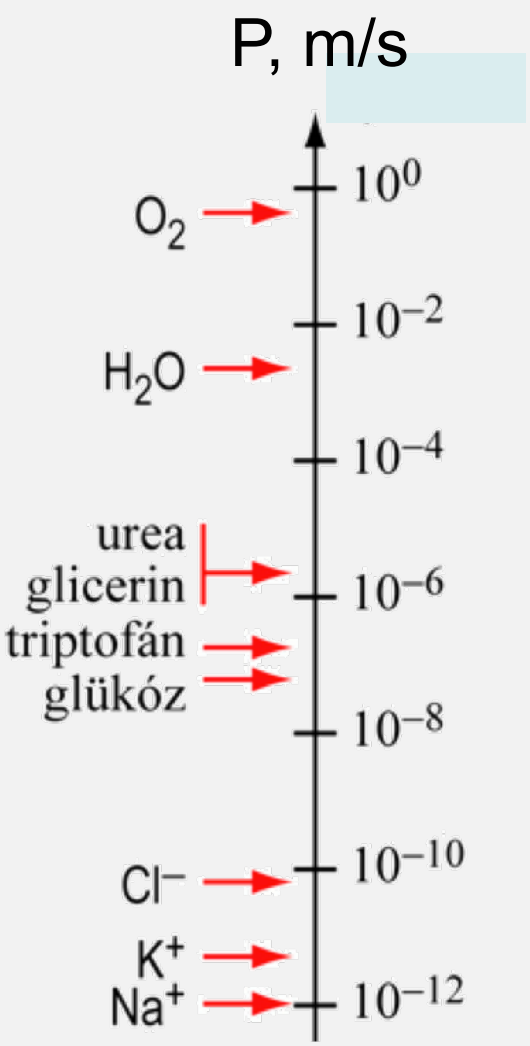
DFT Biofizika

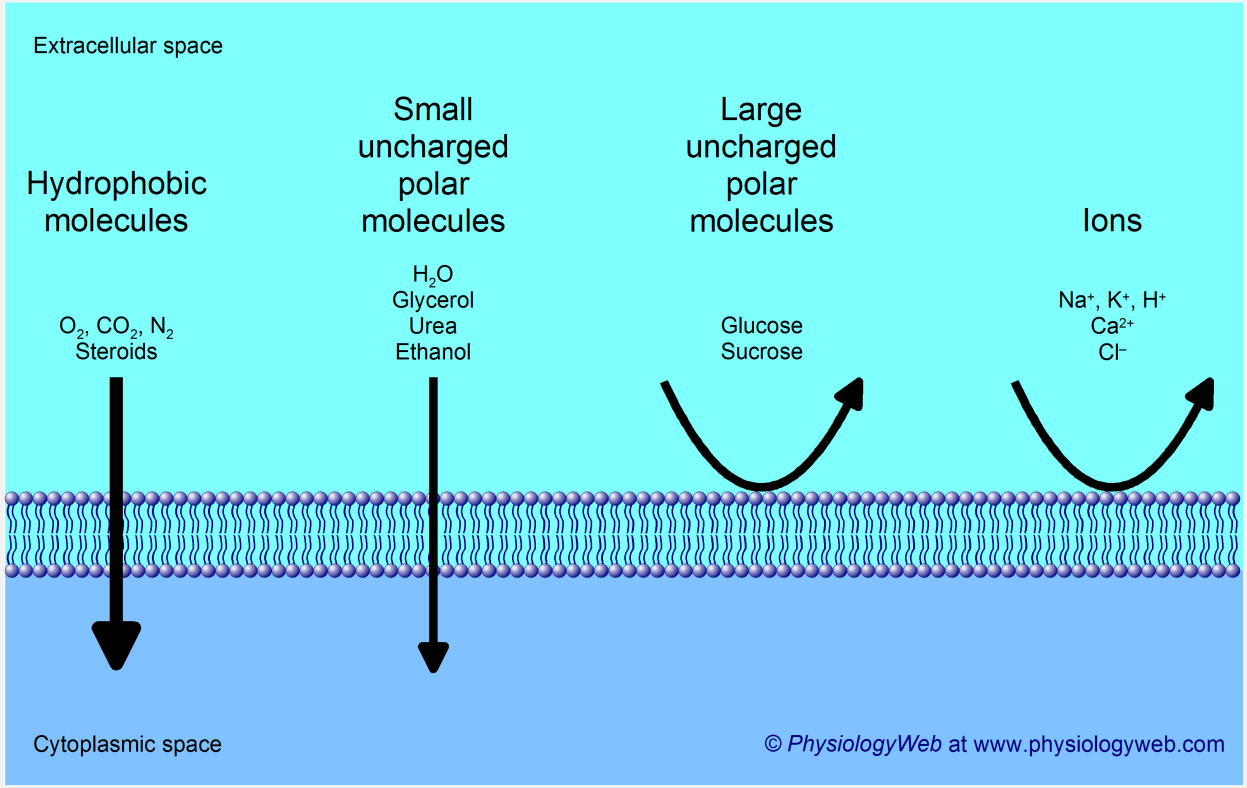
2. Membránpotenciál

Nyugalmi és akciós potenciál. Ingerületterjedés. EKG jel és mérése.

Dr. Liliom Károly
karoly.liliom.mta@gmail.com
2026. 09. 16.

Diffúzió membránon keresztül



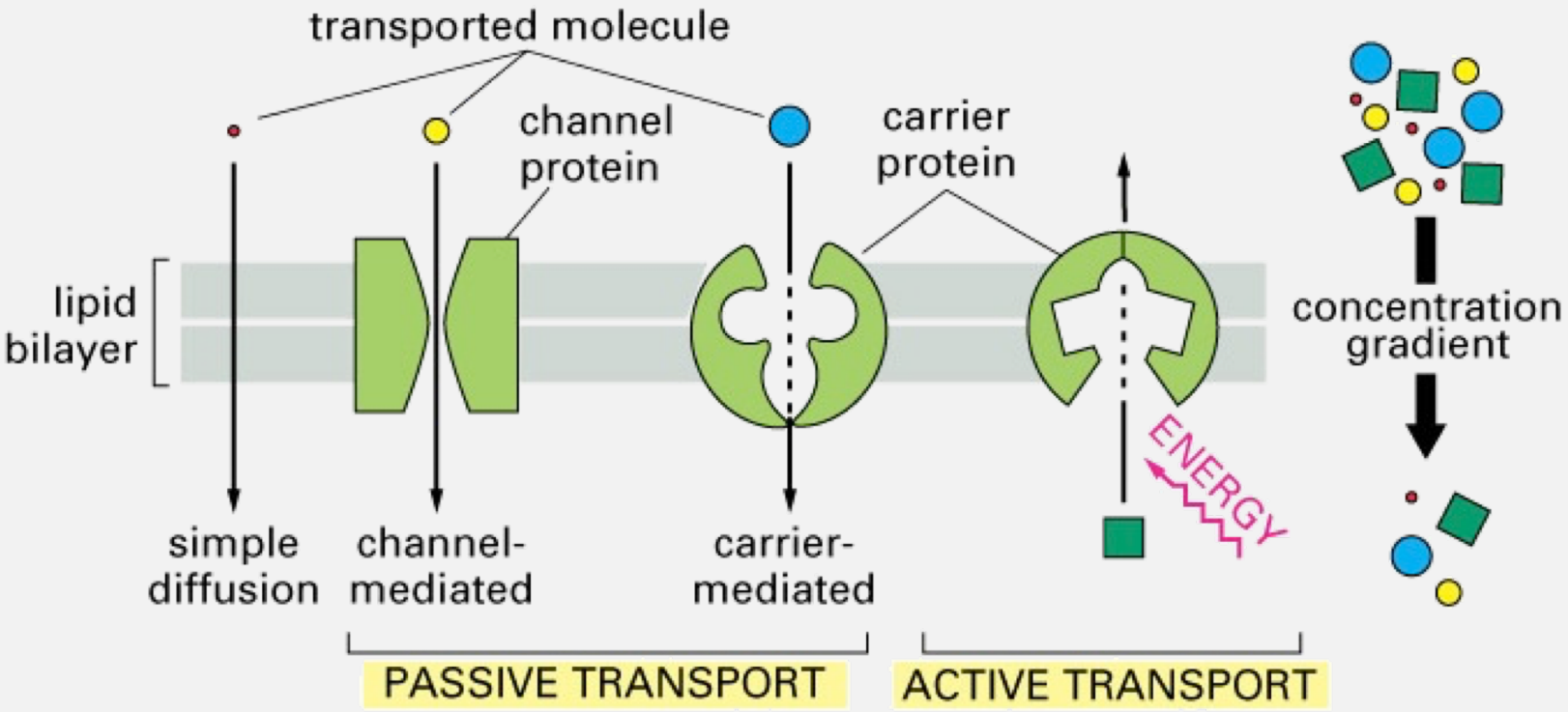


Fick I. tv.: $\mathbf{J = -P\,\Delta c}$

P: permeabilitási együttható

[P] = m/s

Transzport biológiai membránokban



- a biológiai membránokban a szabad diffúzió erősen korlátozott
- a szállítás mechanizmusa szerint a transzport lehet szállító molekula nélküli (csatornán keresztül), illetve szállító molekulával segített
- a transzport energiaigénye szerint lehet passzív vagy aktív

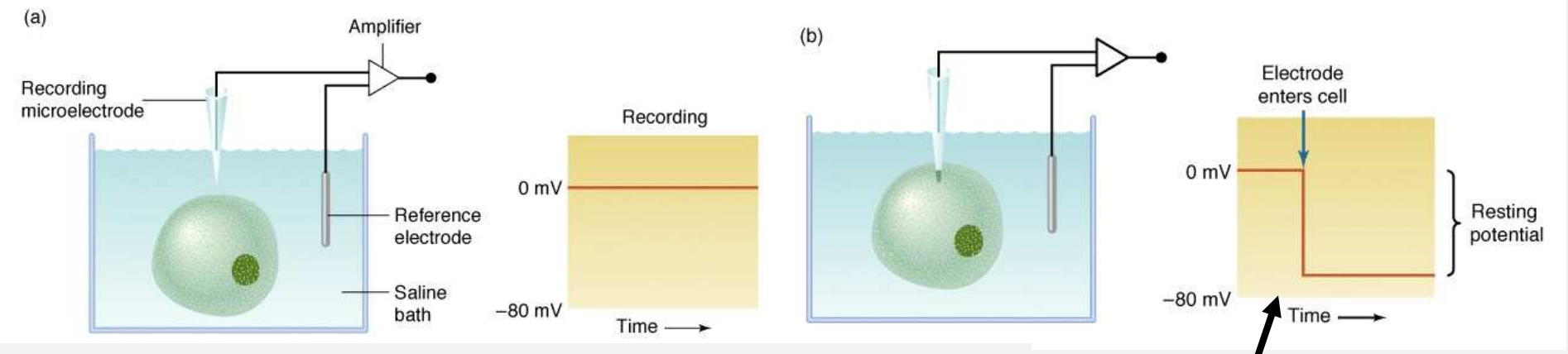
Tapasztalat-1:

A sejtmembrán két oldalán különbözik az ionösszetétel.

Szövet	$C_{Intracelluláris}$ (mmol/l)			$C_{Extracelluláris}$ (mmol/l)		
	$[Na^+]_i$	$[K^+]_i$	$[Cl^-]_i$	$[Na^+]_e$	$[K^+]_e$	$[Cl^-]_e$
Tintahal óriásaxon	72	**345**	61	**455**	10	540
békaizom	20	**139**	3,8	**120**	2,5	120
patkányizom	12	**180**	3,8	**150**	4,5	110

Tapasztalat-2:

A sejtmembrán két oldala között elektromos potenciálkülönbség van!



nyugalmi potenciál ~ -60 – -90 mV

Nyugalomban (!?) valamennyi sejt belseje negatív elektromos potenciált mutat a membrán külső felszínéhez képest.

Ionok diffúziója membránon keresztül

Fick I. $J_m = -D\frac{\Delta c}{\Delta x}$

Ionokra: kémiai potenciál és elektoromos potenciál együttesen!

elektrokémiai potenciál:

$$\mu_e = \mu + zF\varphi$$

$$J_k = -D_k\left(\frac{\Delta c_k}{\Delta x} + c_k\frac{z_k F}{RT}\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}\right)$$

k-adik ion anyagáram-sűrűsége

Elektrokémiai egyensúly

$$\mu_e = \mu + zF\varphi$$

$$\downarrow$$

$$\mu_{e,i}^{II} - \mu_{e,i}^{I} = 0$$

$$\downarrow$$

$$\mu_0 + RTlnc_i^I + zF\varphi_i^I = \mu_0 + RTlnc_i^{II} + zF\varphi_i^{II}$$

$$\downarrow$$

egyensúlyi potenciál $\rightarrow$ $\varphi_i^I - \varphi_i^{II} = \frac{RT}{zF} ln \frac{c_i^I}{c_i^{II}}$ Nernst-egyenlet

Donnan modell – egyensúlyi modell

- az elektrokémiai potenciál egyenlő a membrán két oldalán
- a membrán csak a K^+ -ra nézve átjárható
- a sejt és környezete termodinamikailag zárt rendszer

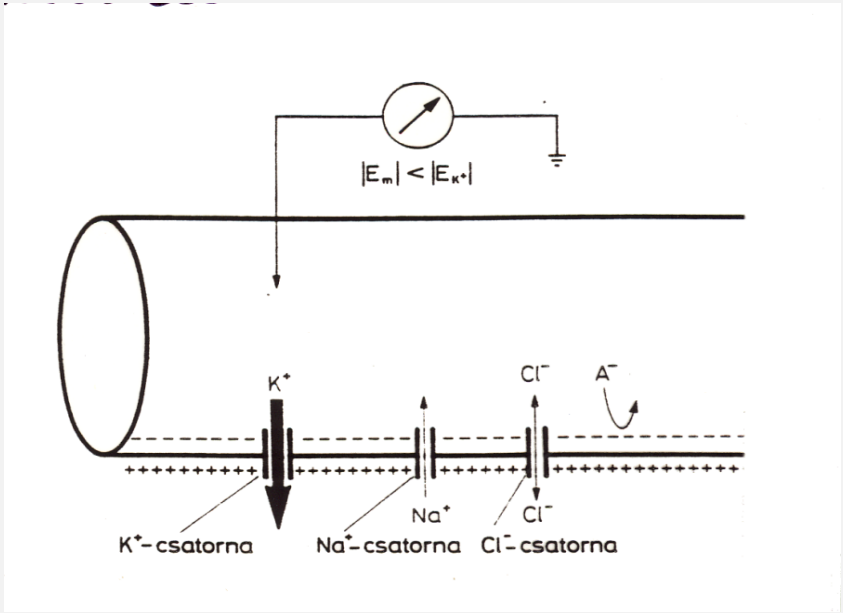
$$\varphi_e - \varphi_i = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_e}$$

A Donnan-modell tehát nem írja le a membránpotenciál kialakulását!

Szövet	Nyugalmi potenciál (mV)	
	számított	mért
Tintahal óriásaxon	*91*	62
békaizom	*103*	92
patkányizom	*92,9*	92

Dinamikus egyensúlyi vagy transzportmodell

a membrán nemcsak a K^+-ra nézve átjárható, de az egyes ionokra nézve a permeabilitása különböző



az egyes ionok fluxusa ≠ 0,

de az eredő fluxus = 0

Transzportmodell

az eredő fluxus = 0

$$\Sigma J = J_{K^+} + J_{Na^+} + J_{Cl^-} = 0$$

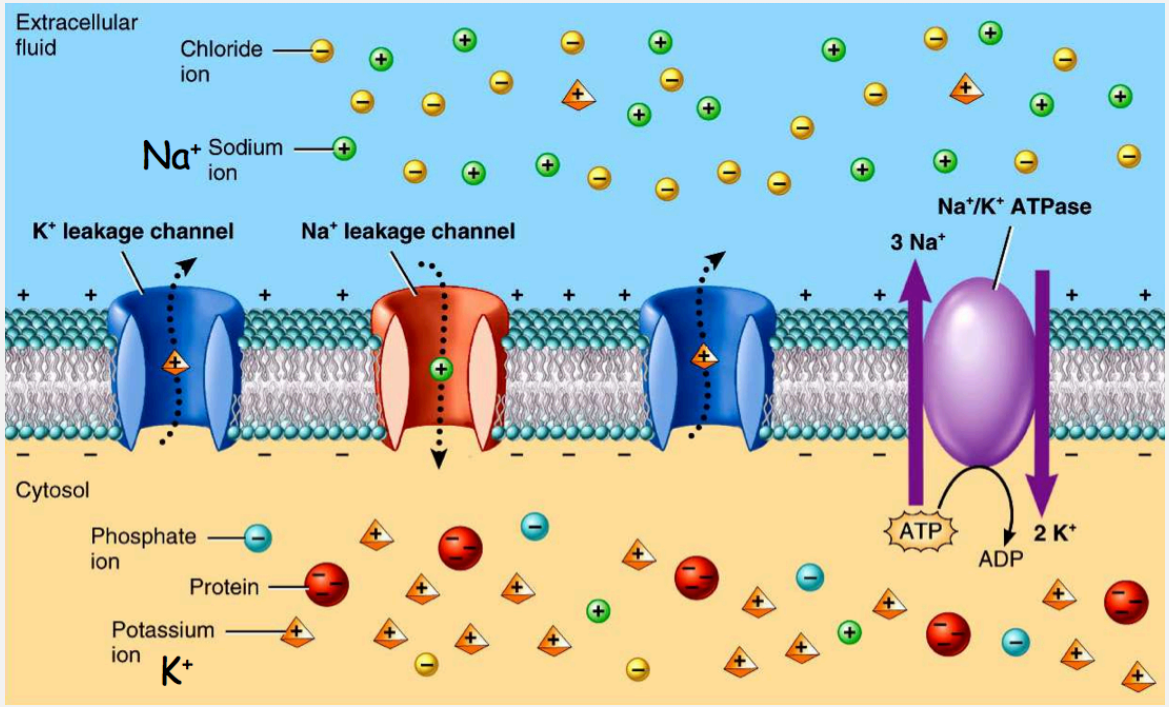
$$J_k = -D_k \left(\frac{\Delta c_k}{\Delta x} + c_k \frac{z_k F}{RT} \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \right)$$

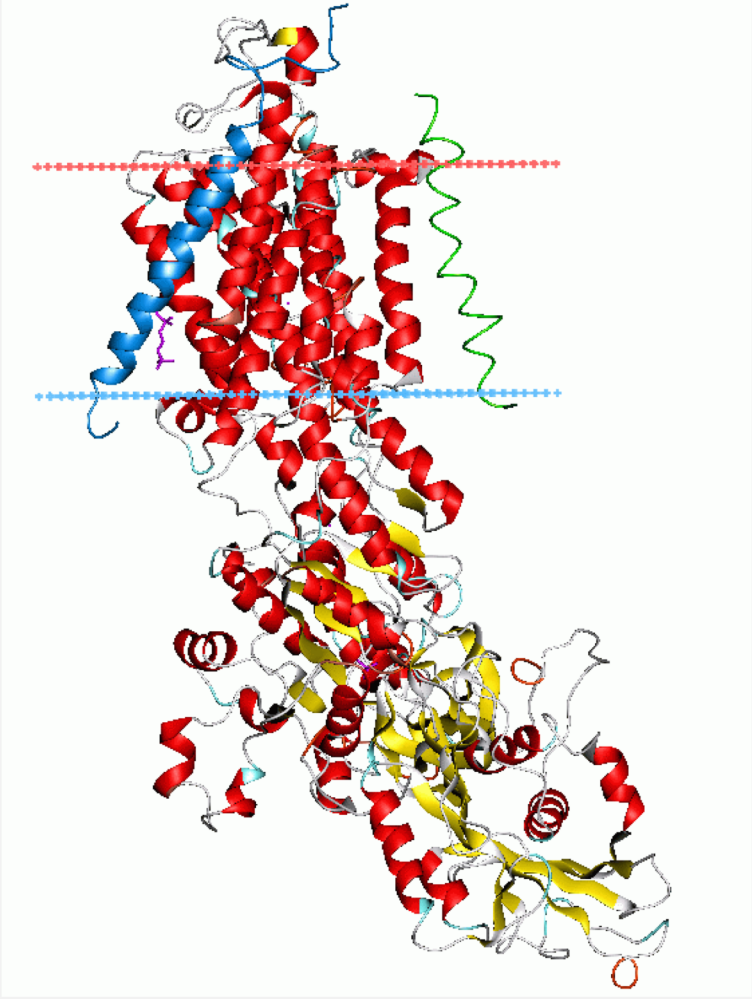
$$\varphi_e - \varphi_i = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\Sigma p_k^+ c_{ke}^+ + \Sigma p_k^- c_{ki}^-}{\Sigma p_k^+ c_{ki}^+ + \Sigma p_k^- c_{ke}^-}$$

Goldman – Hodgkin – Katz egyenlet

$P_K : P_{Na} : P_{Cl} = 1 : 0{,}05 : 0{,}45$

Na-K pumpa nélkül nincs membránpotenciál



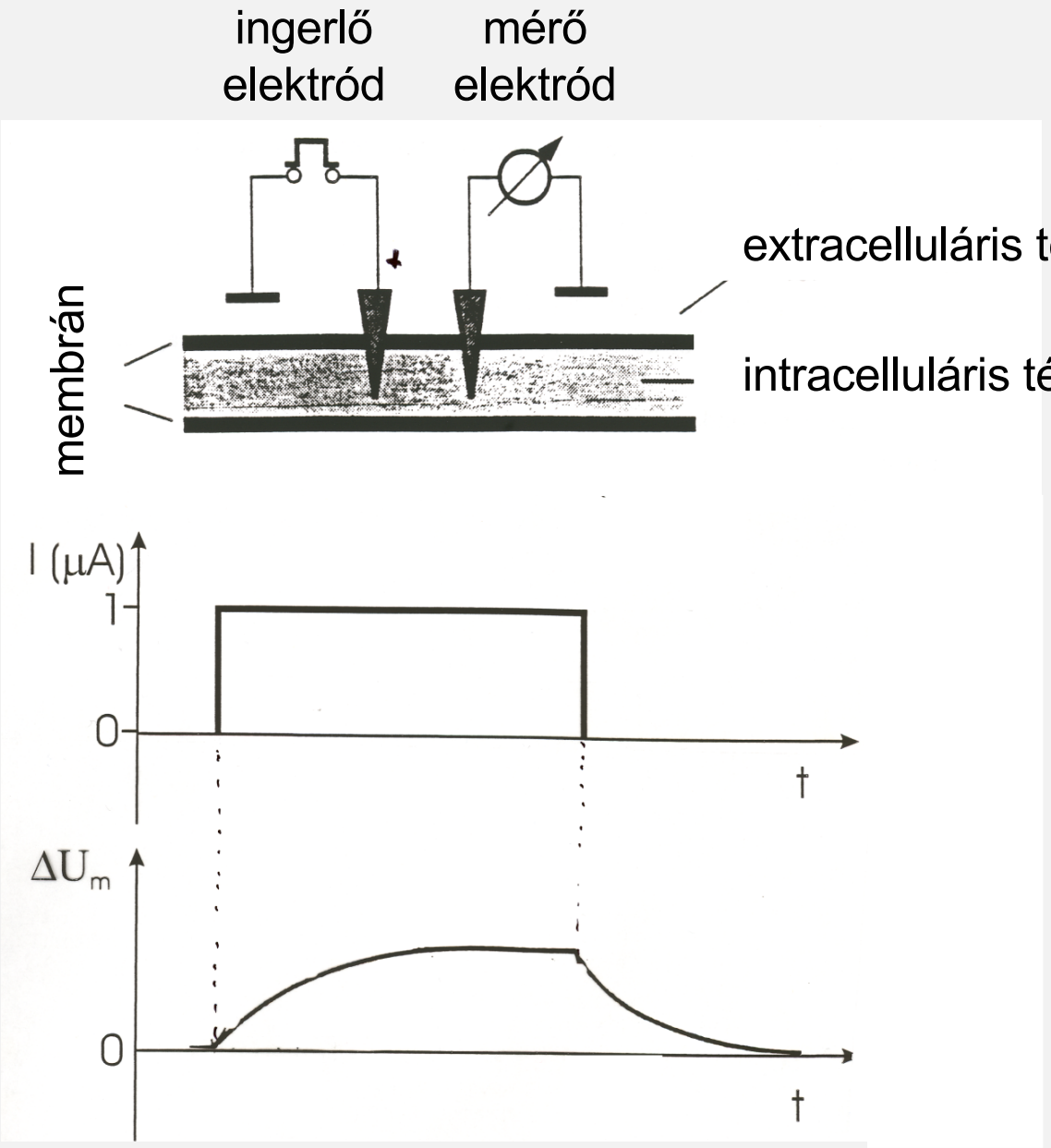


A sejtek energiafelhasználásának mintegy negyede a Na-K pumpa folyamatos működésére fordítódik!

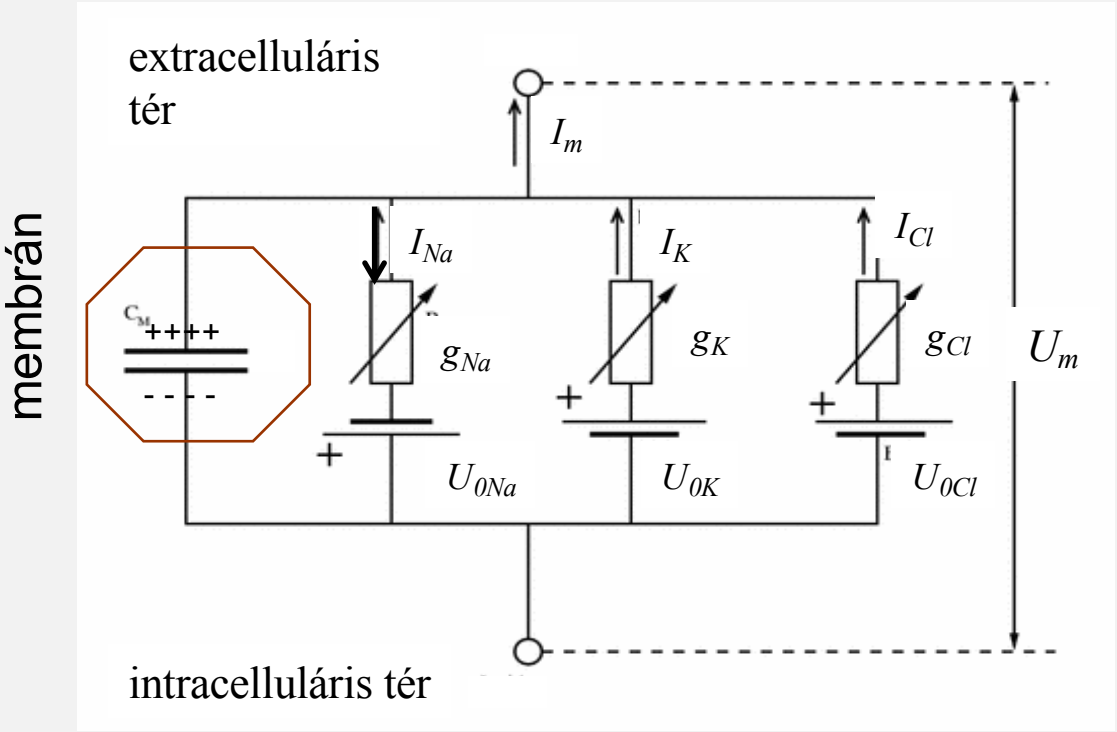
A membrán "passzív" elektromos tulajdonságai

Kísérlet

Áramirány : pozitív töltések áramlásának iránya.



A sejtmembrán elektromos modellje:



vezetőképesség

(ellenállás)

kapacitás

$$I_m = I_{ion} + I_c$$

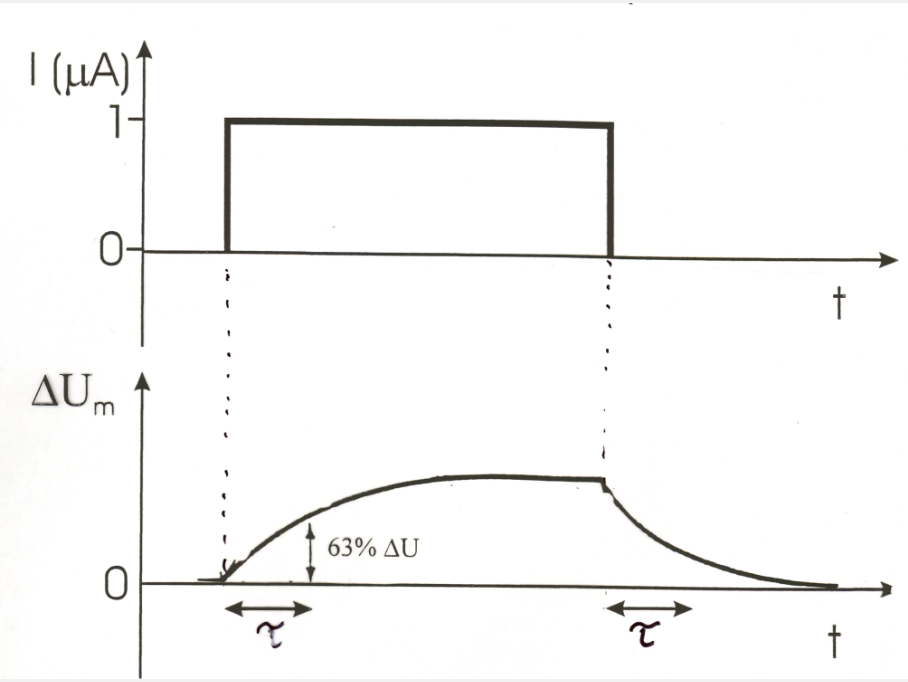
Konduktív áram — Kapacitív áram

Változik, ha a csatorna vezetőképessége potenciálfüggő

$$I_c = C_m \frac{\Delta U_m}{\Delta t}$$

A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

helyi potenciál: a sejtmembrán kis részletén átmenetileg kialakuló potenciálváltozás



a membrán kapacitása

a membrán ellenállása

$$\tau = C_m R_m$$

$$U_m(t) = U_t\left[1 - e^{-\frac{t}{R_m C_m}}\right]$$

τ = a membrán időállandója:

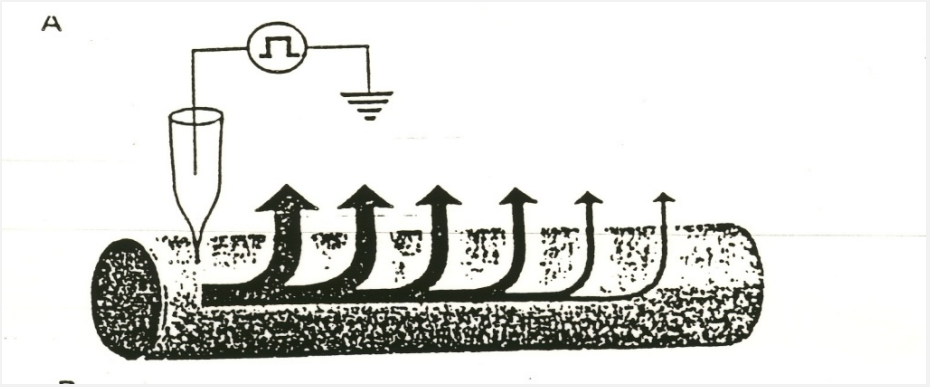
az az idő, ami alatt az impulzussal keltett feszültségváltozás

- eléri a telítési érték 63%-át vagy

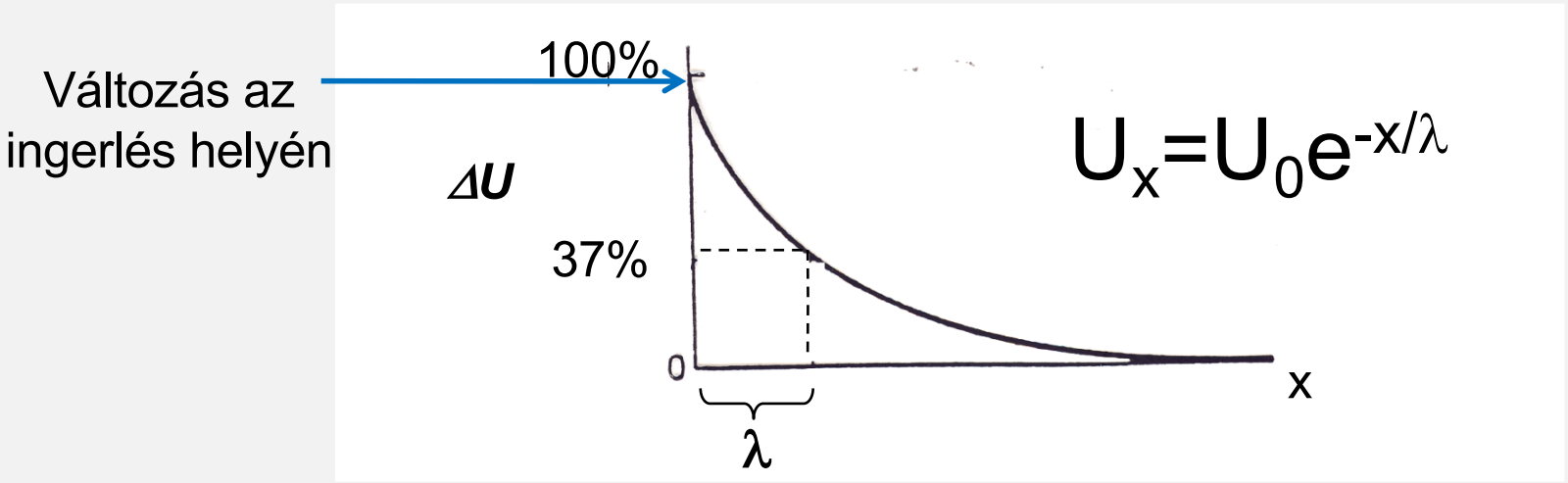
- az ingerlés megszünte után e-ed részére csökken

A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

helyi potenciál: a sejtmembrán kis részletén átmenetileg kialakuló potenciálváltozás



$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}}$$



λ = a membrán térkonstansa:

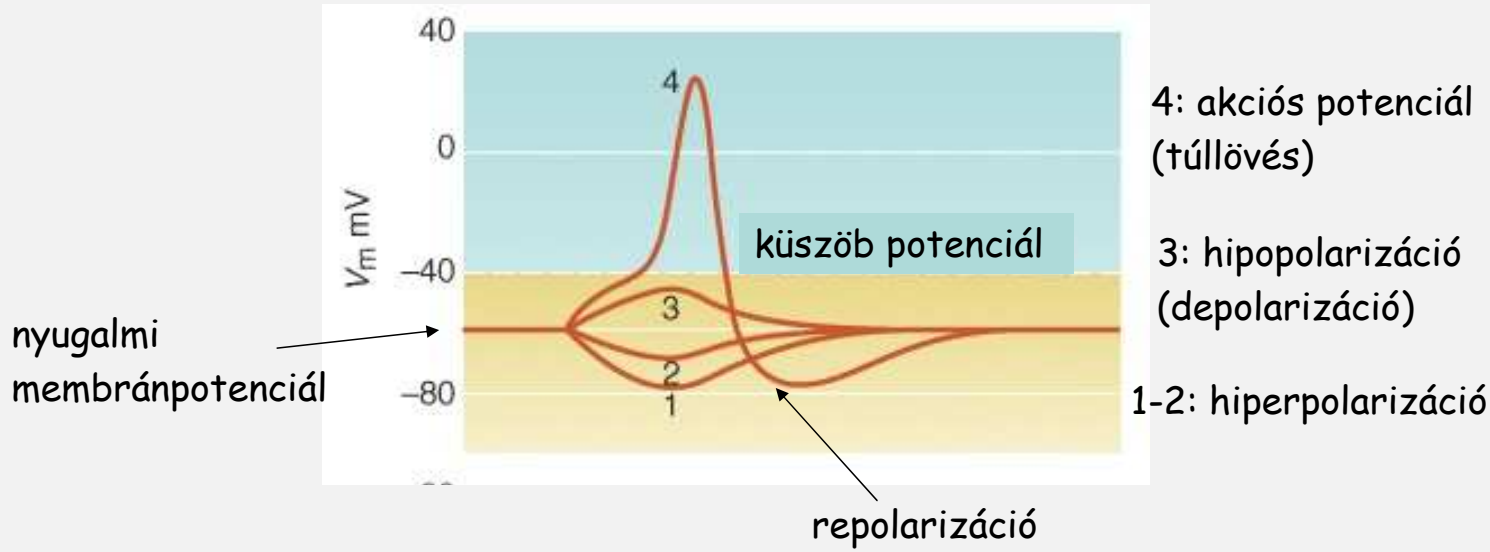
az a távolság, amely alatt az impulzussal keltett feszültségváltozás maximális értékének e-ed részére csökken

A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

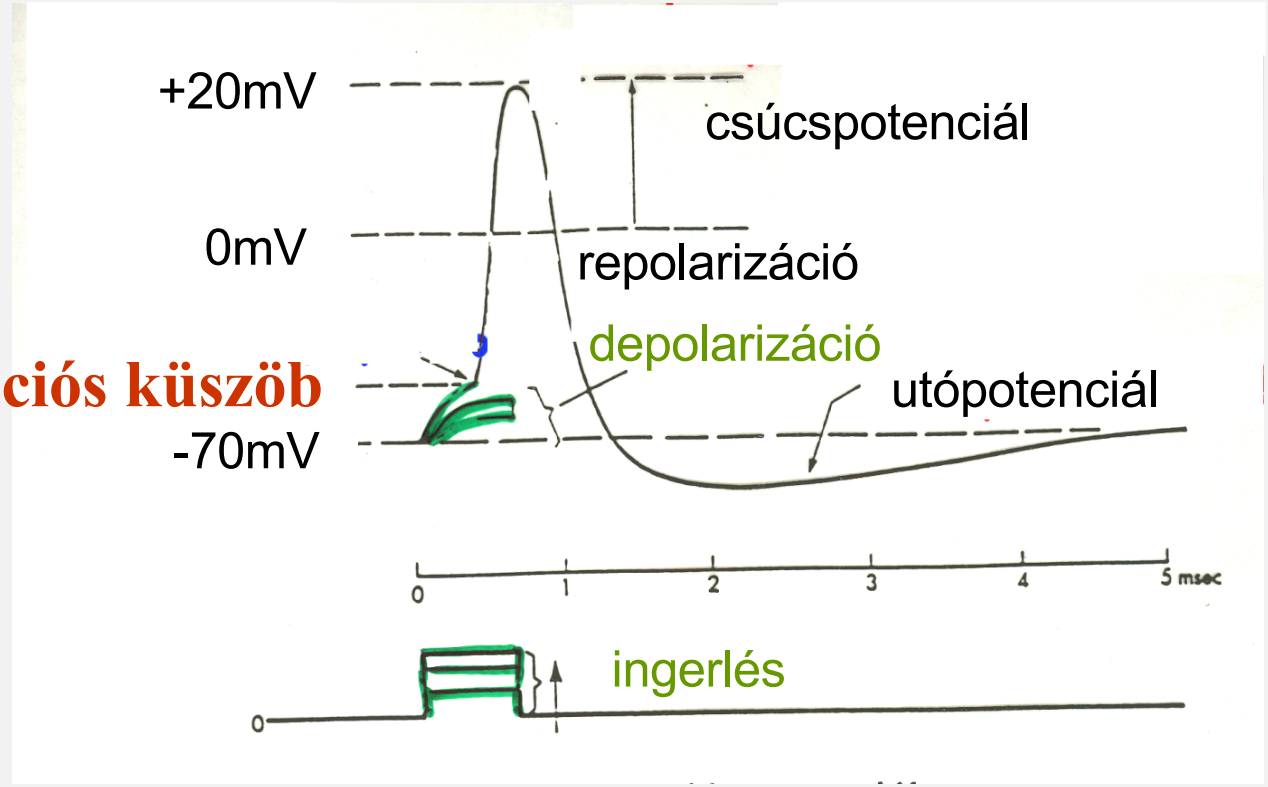
helyi potenciál: a sejtmembrán kis részletén átmenetileg kialakuló potenciálváltozás

Kiváltható:	*obligát*
- kísérletileg áramimpulzusokkal	*ugrásmentes (analóg)*
- élettanilag: adekvát ingerekkel	*változtatható amplitúdójú*
- posztszinaptikus membránon neurotranszmitterekkel:	*változtatható irányú*
Jelentősége: érzékelés, ingerületvezetés, jelátadás	*lokalizált (lecseng)*

TÉR- és IDŐBELI SZUMMÁCIÓ = helyi potenciálok összegződése



Az akciós potenciál kialakulása



depolarizációs küszöb

fakultatív

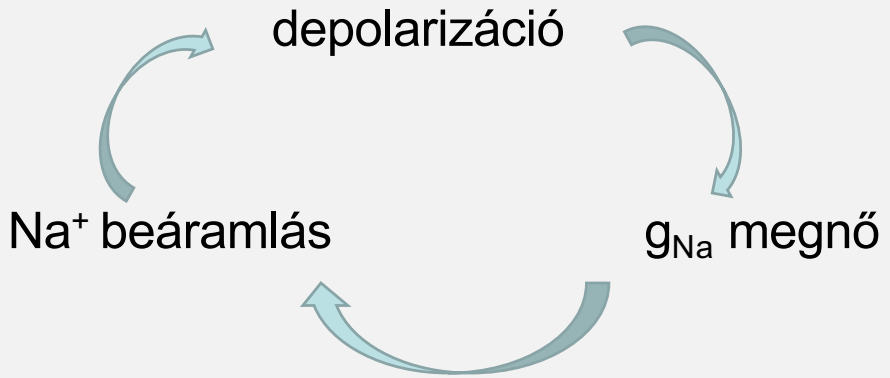
azonos amplitúdójú – minden vagy semmi

nem lokalizált

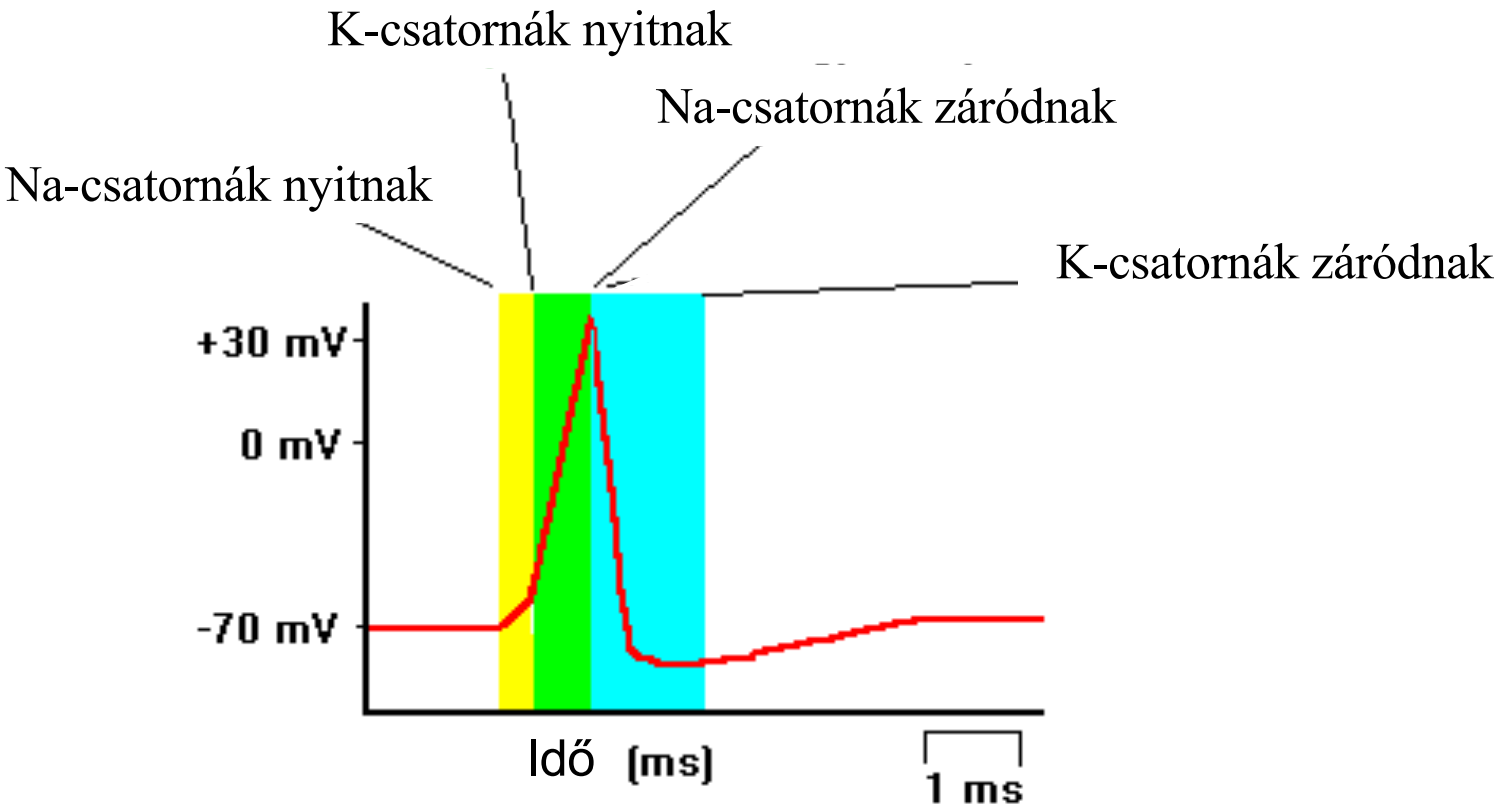
Hodgkin-Katz hipotézise az akciós potenciál kialakulásáról

feszültségfüggő ioncsatornák működése

$$\varphi_e - \varphi_i = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\Sigma p_k^+ c_{ke}^+ + \Sigma p_k^- c_{ki}^-}{\Sigma p_k^+ c_{ki}^+ + \Sigma p_k^- c_{ke}^-}$$

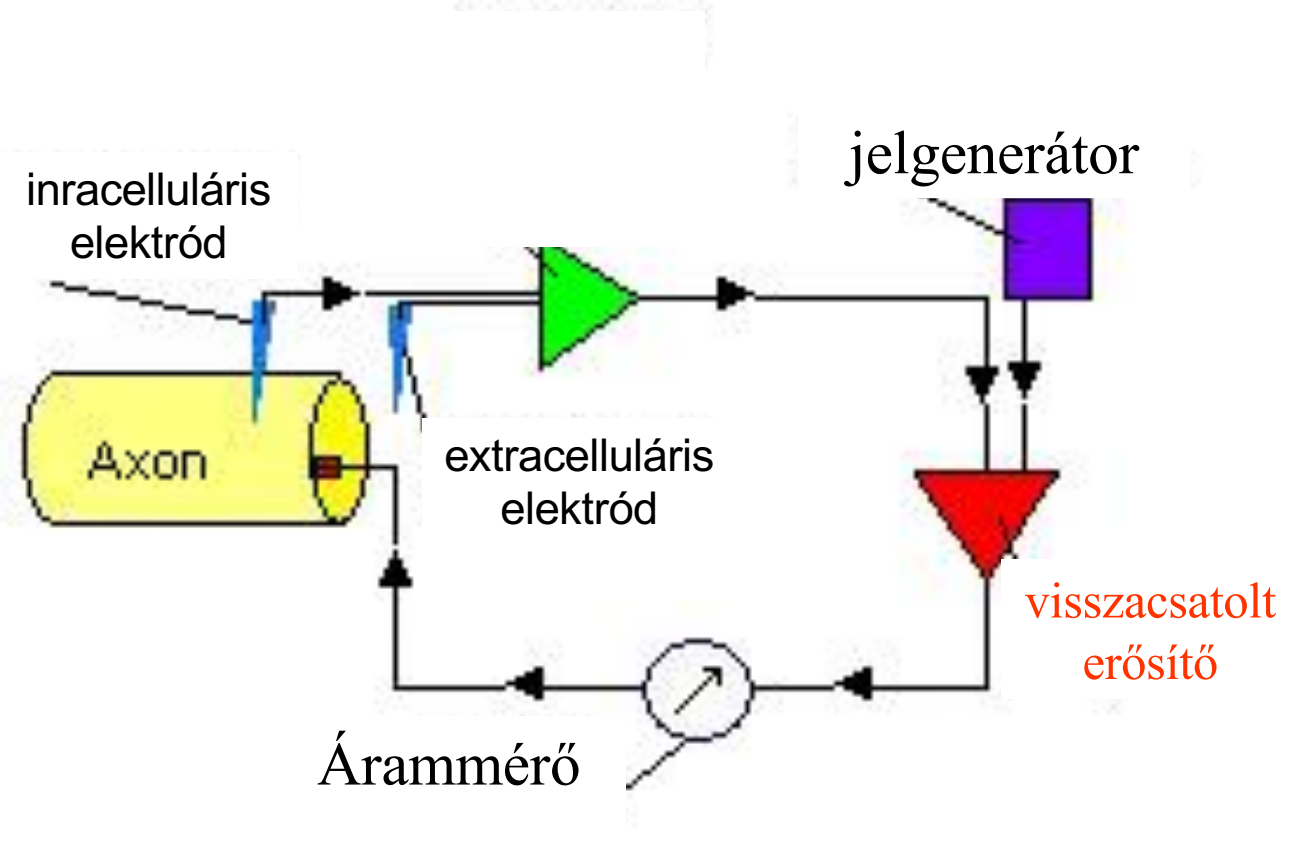


Hodgkin-Katz hipotézise az akciós potenciál kialakulásáról



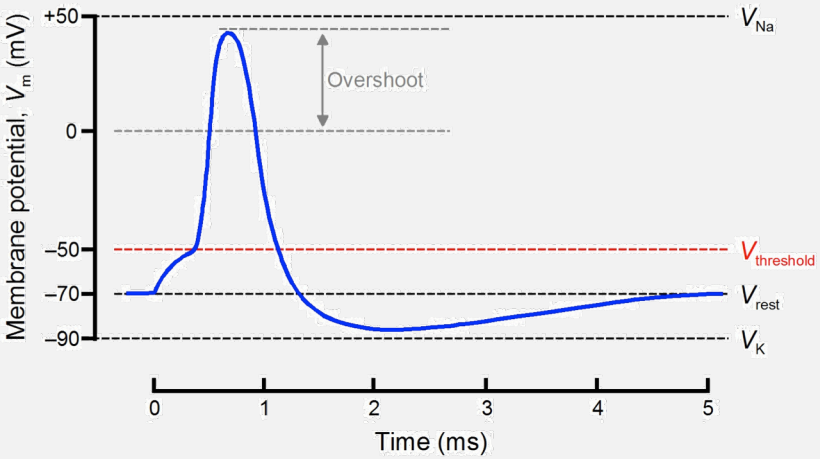
Hogyan lehetne az egyedi ionáramokat mérni?

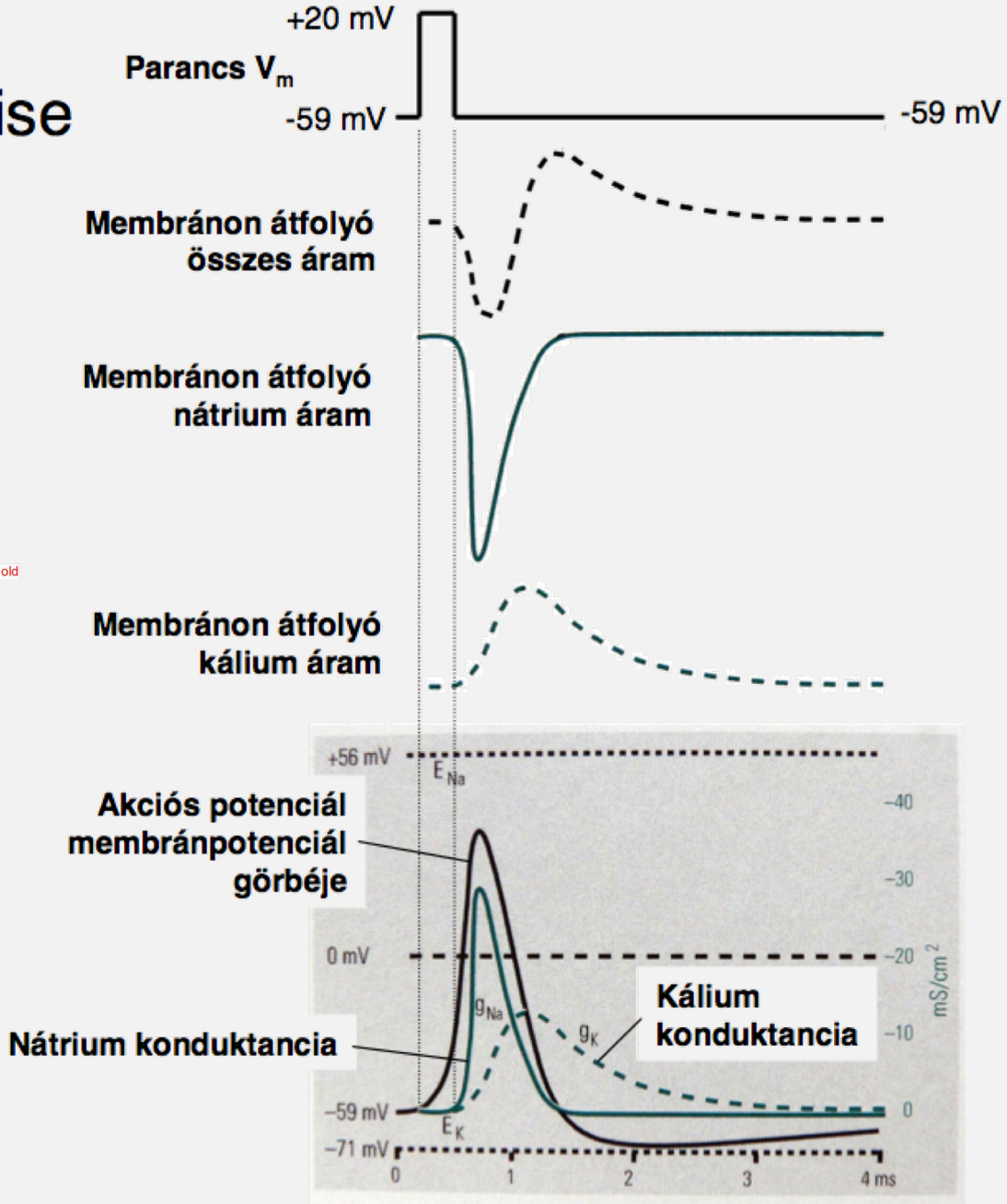
Voltage Clamp



- membránpotenciált állandó értéken tartja
- az ionáramot – áramerősséget – méri

Az akciós potenciál voltage-clamp analízise





Ion-szelektív elektródák:

A küszöb-potenciál elérésekor gyors Na^{2+}-áram keletkezik, amit lassabb K^+-áram követ.

Nátrium mozgás felelős az akciós potenciál kialakulásáért

1. Na influx depolarizálja a membránt (Hodgkin and Huxley, 1939)

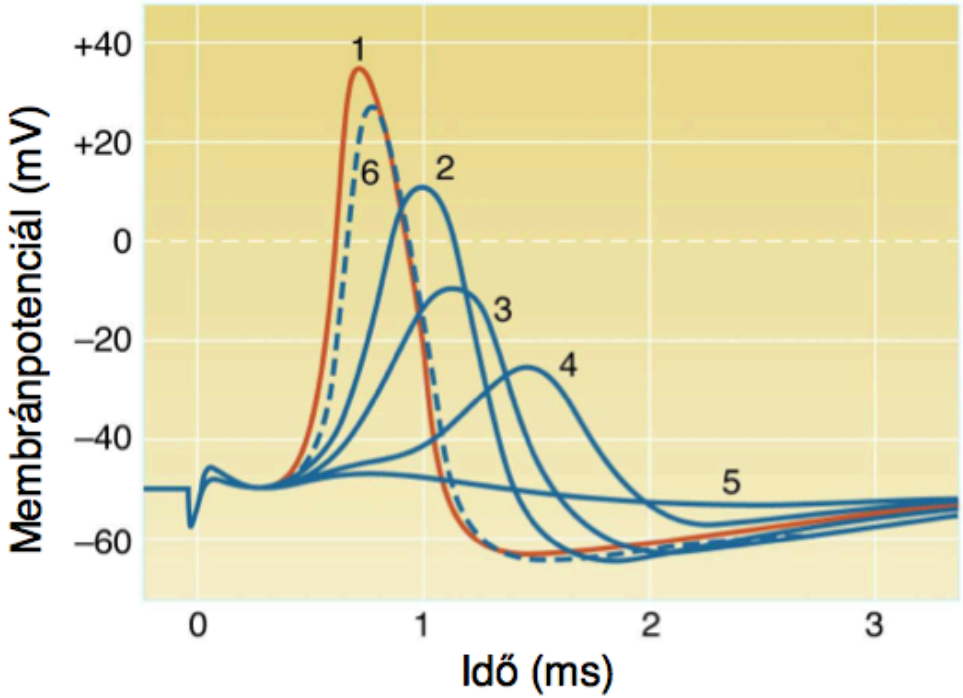
2. Túllövés alatt E_{Na} közelében a V_m

$$E_{Na} = \frac{0.058}{1} \log 10 = 0.058\ \text{V} = +58\ \text{mV}$$

3. A túllövés amplitúdója a külső Na koncentráció függvénye

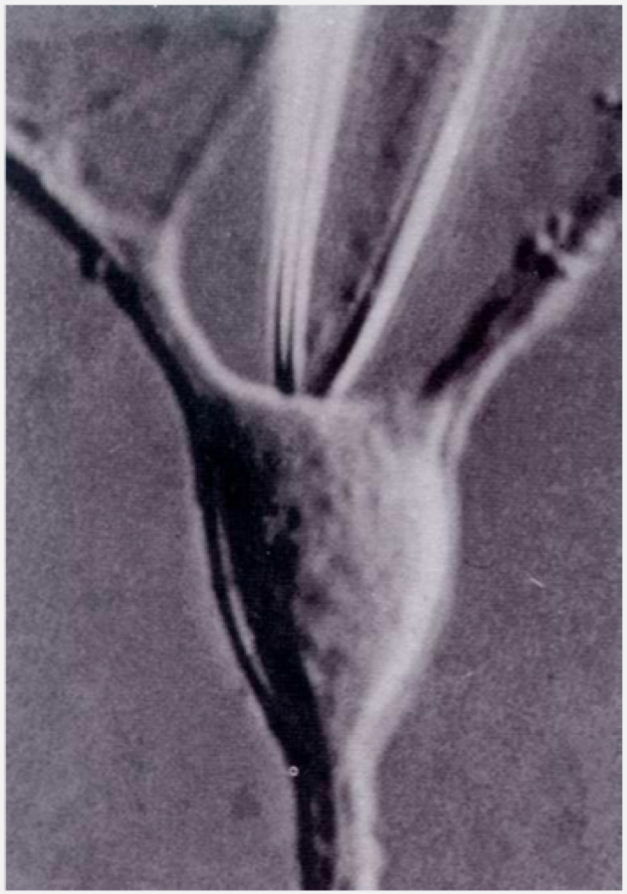
Hodgkin and Katz (1949)

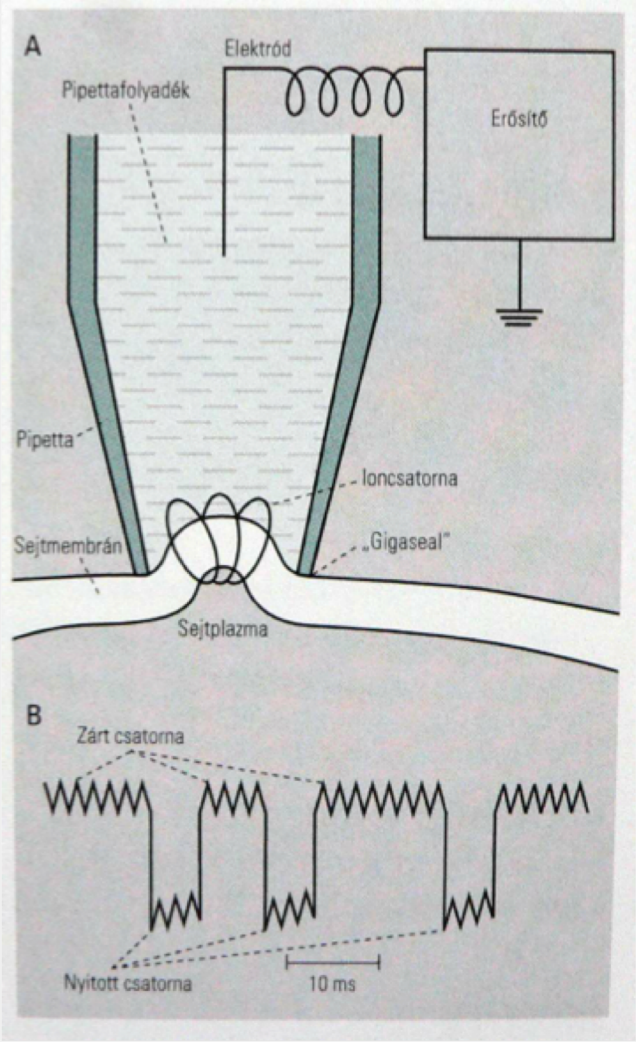
Extracelluláris tengervíz NaCl tartalmának fokozatos (1-5) cseréje kolin-kloridra, majd NaCl visszamosása a kolin-klorid helyett (6):

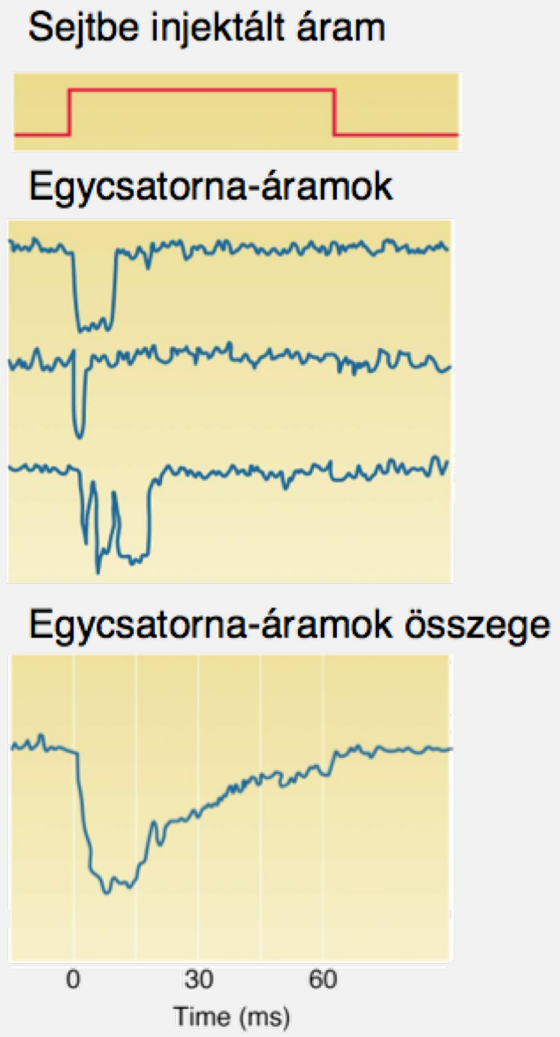


Ionáramok mérése: patch clamp

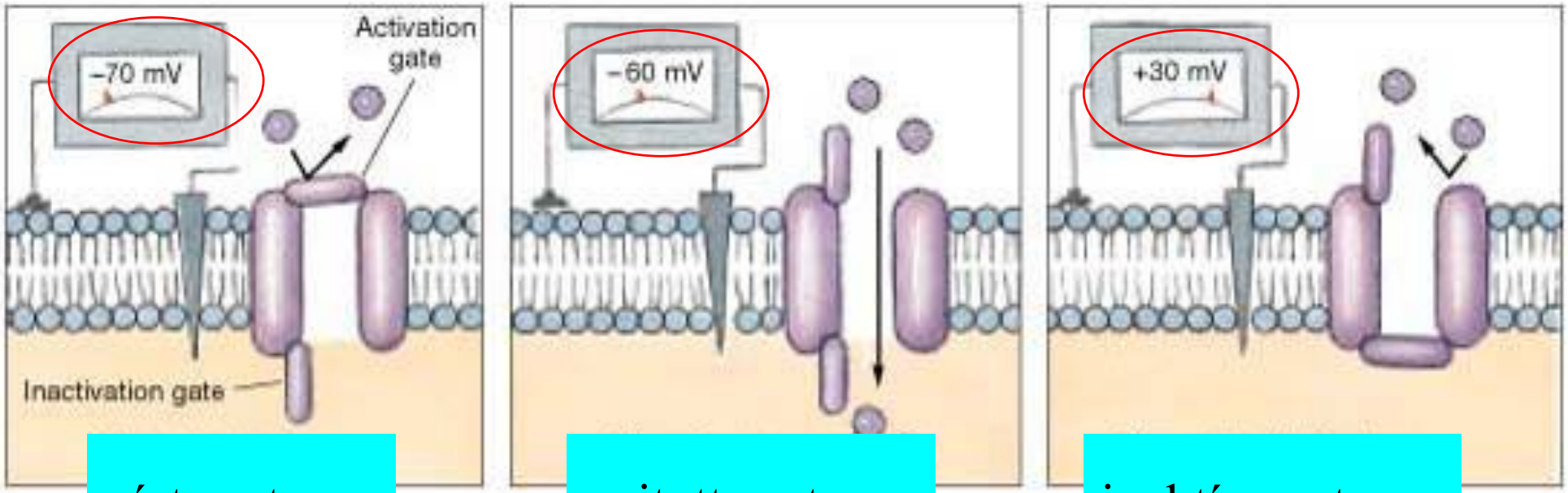
Neher and Sakmann (1976), Nobel-díj 1992







Feszültségszabályozott Na^+ -csatornák állapotai



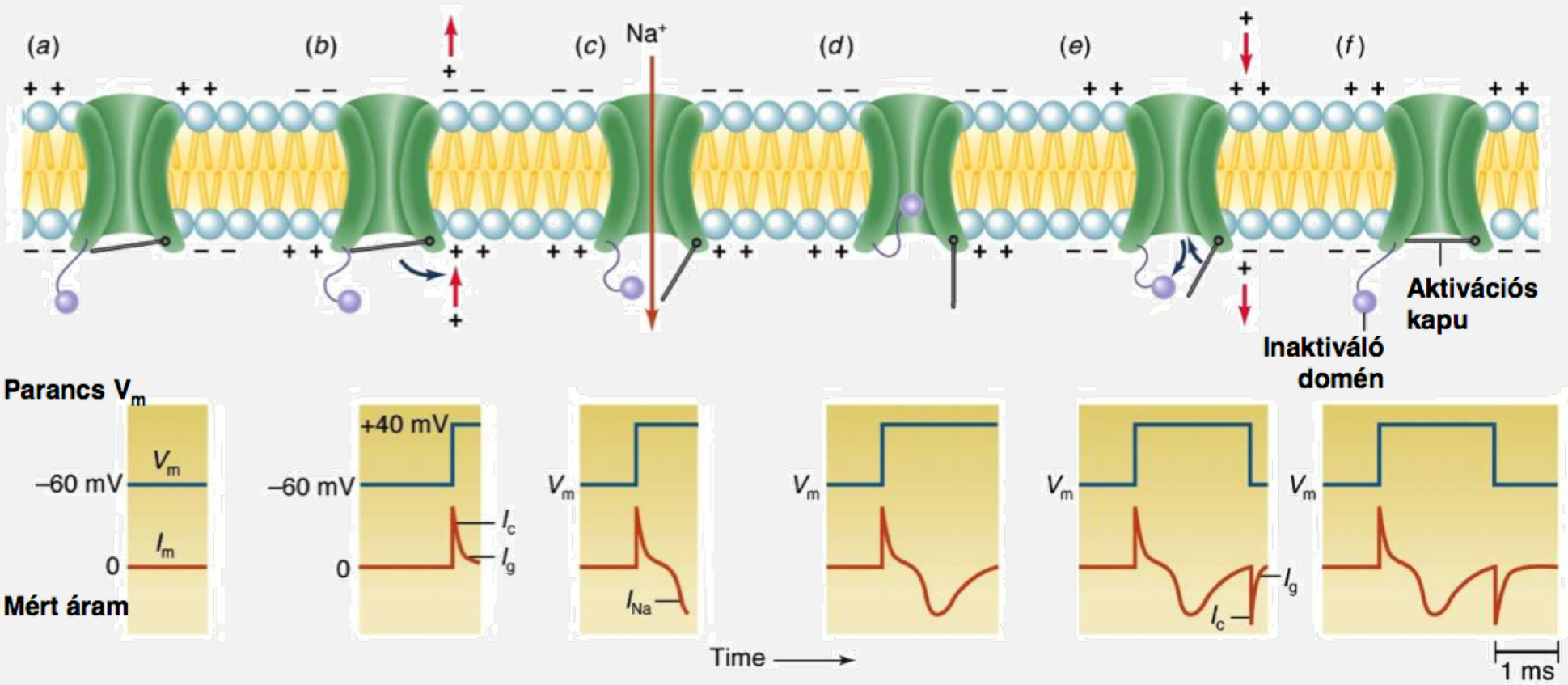
zárt csatorna

nyitott csatorna

inaktív csatorna

depolarizációs küszöb felett

A gyors nátrium csatorna működése



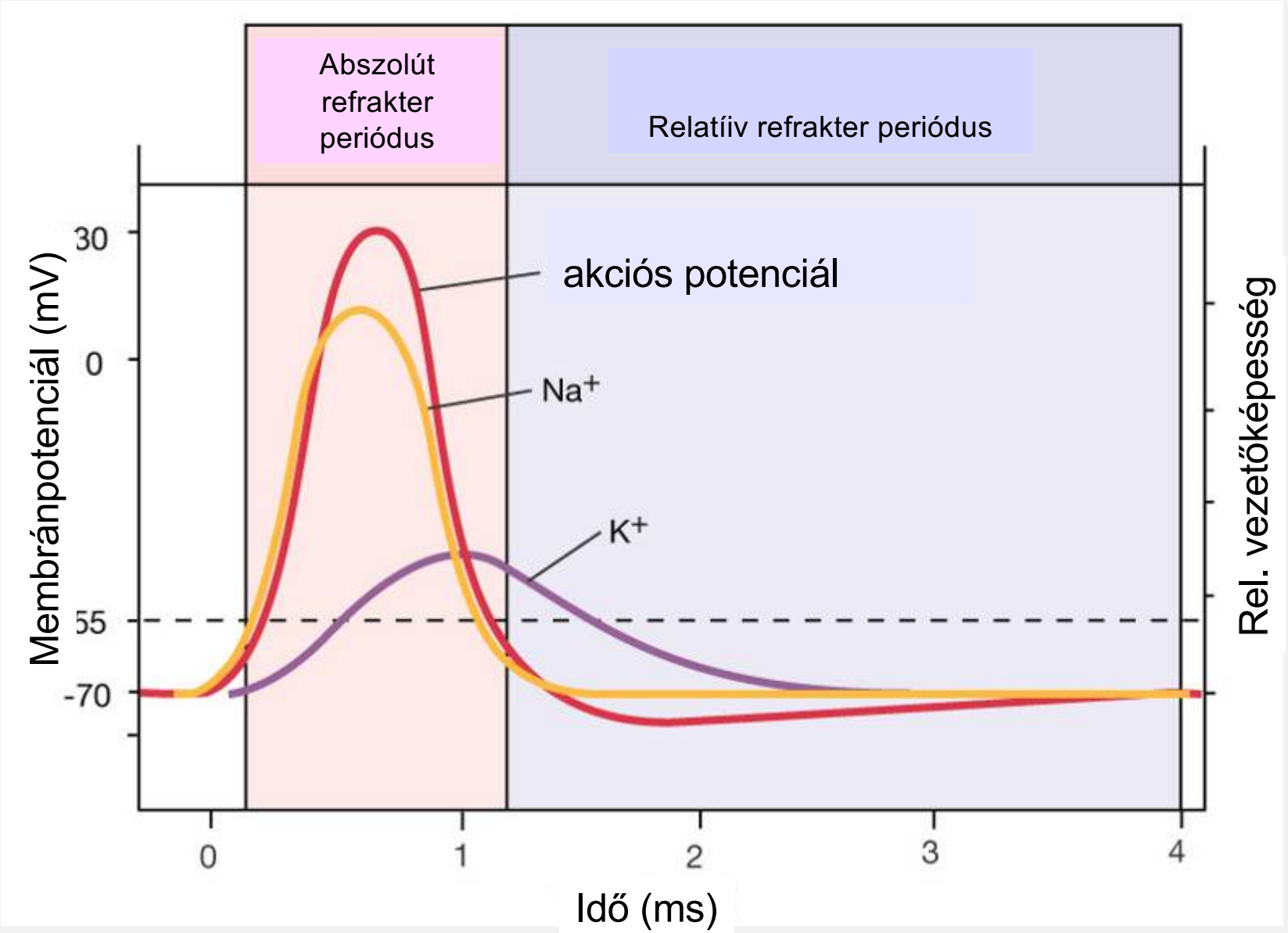
1. Feszültségfüggő csatorna: depolarizáció (-75 ➔ -25 mV) konformációváltozást okoz
2. Óriási feszültségváltozás a csatornafehérjére vonatkoztatava: 100000 V/cm
3. Kapu áram (gating current) töltéssel rendelkező csoportok elmozdulhatnak
4. Zárt, nyitott és inaktivált működési állapota lehetséges.

Refrakter periódus: Na inaktiváció és K konduktancia együttes hatása

Intracelluláris Na koncentráció alig változik (0,001-1 % /AP, $\Delta V_{membrán}$: 0,3 mV) 10^{-12} M Na^+; 100 mV; 160-500 $Na^+/\mu m^2$/AP;

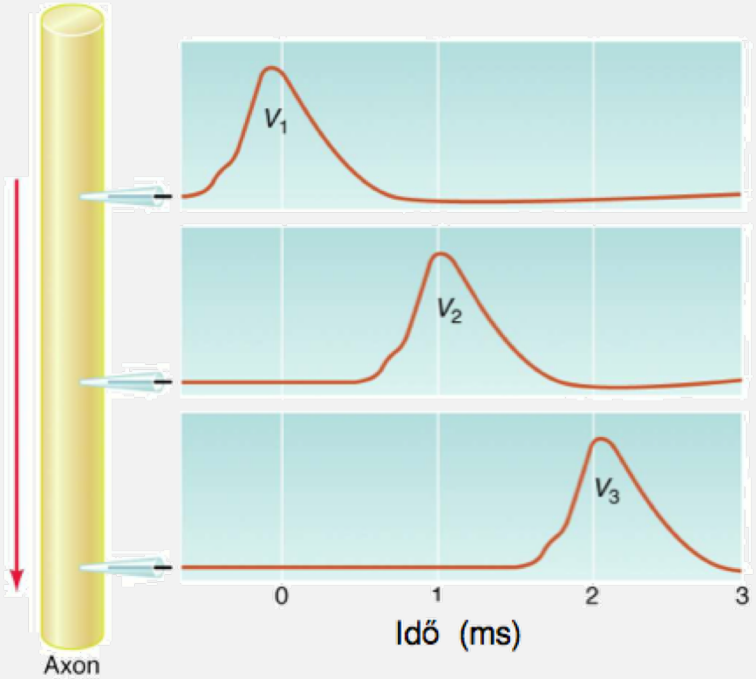
Extracelluláris K koncentráció: rendkívül limitált tér (~30-40 nm a sejtek között) gliális K felvétel

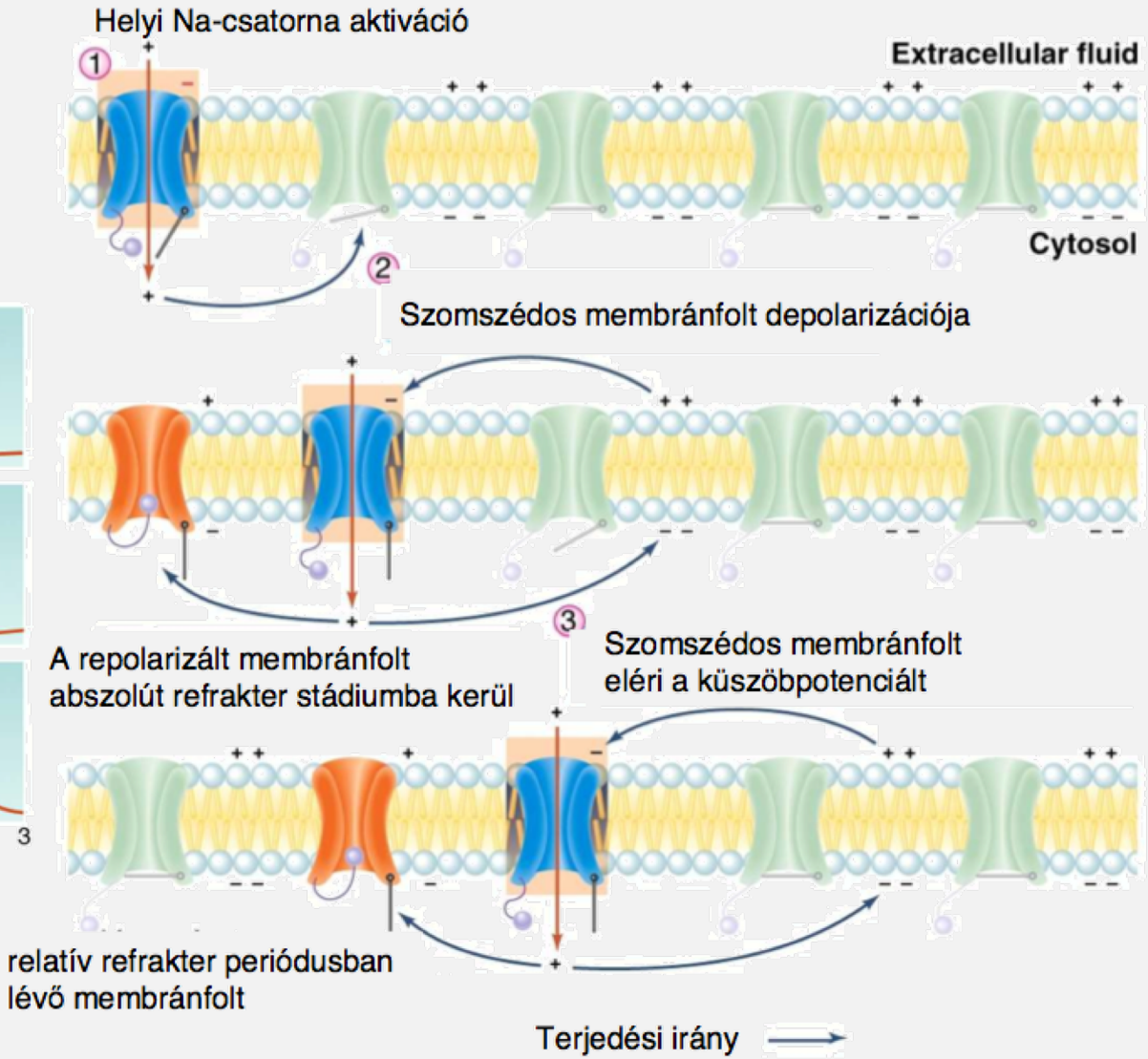
Vezetőképesség az akciós potenciál alatt



Az akciós potenciál pontról pontra terjedése

Az akciós potenciál terjedési tulajdonságai:
1. változatlan amplitúdóval és
2. egy irányban terjed





***Az axon sugarának hatása a vezetés sebességére*:**

$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}} \qquad \tau = C_m R_m$$

r↑ ⇒ R_i↓ (~1/r^2) ⇒ τ↓

R_m↓ (~1/r) λ↑

tintahal óriás axon r = 250 μm

v = 25 m/s

emberi idegsejt r = 10 μm

v ≠ 1 m/s !? (100 m/s)

R_m – nagyon nagy ⇒ nagy térkonstans

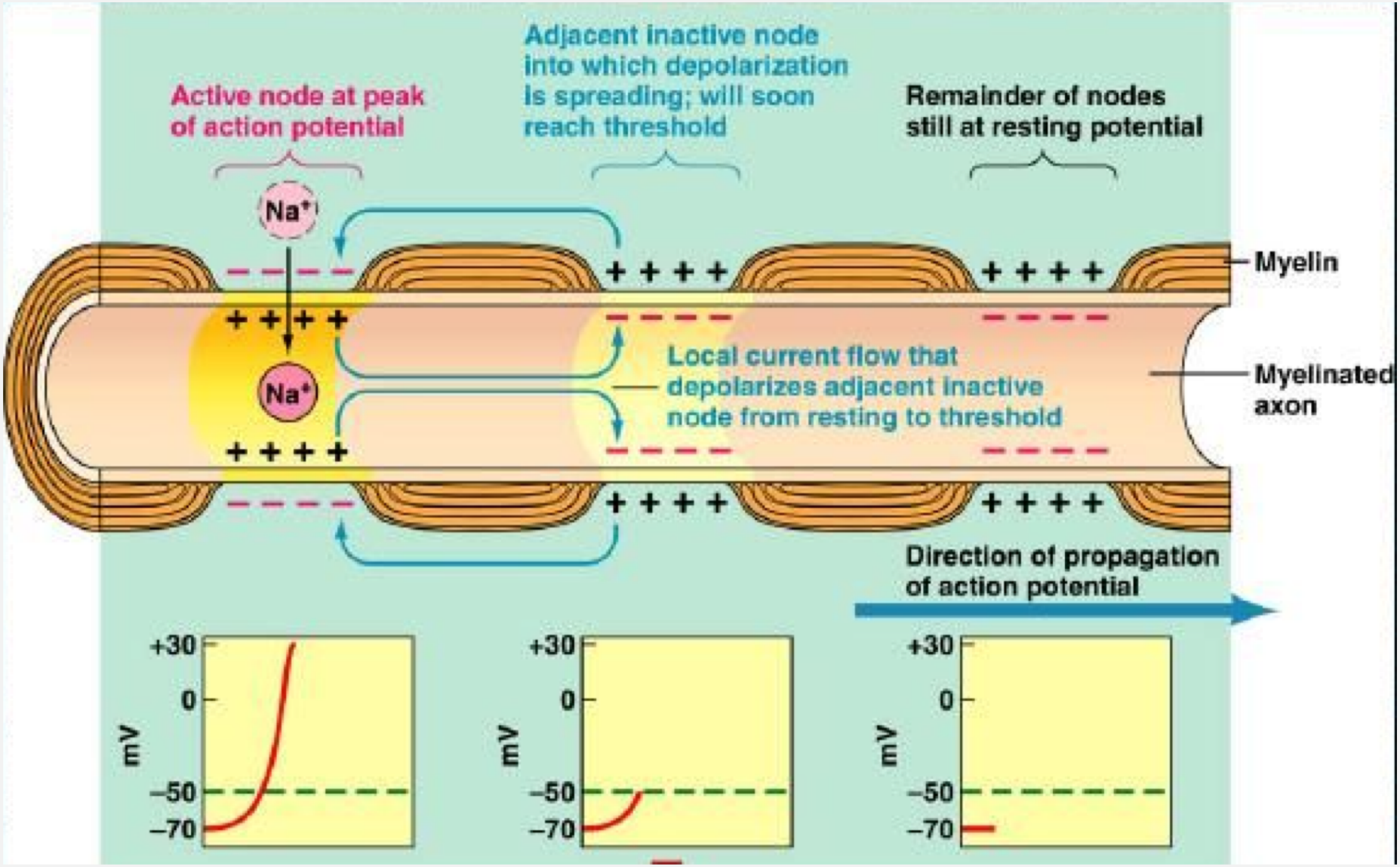
C_m – nagyon kicsi ⇒ kis időállandó

Megoldás: mielinhüvely

emberi idegsejt r = 10 μm

v ~ 100 m/s

Szaltatorikus ingerületvezetés



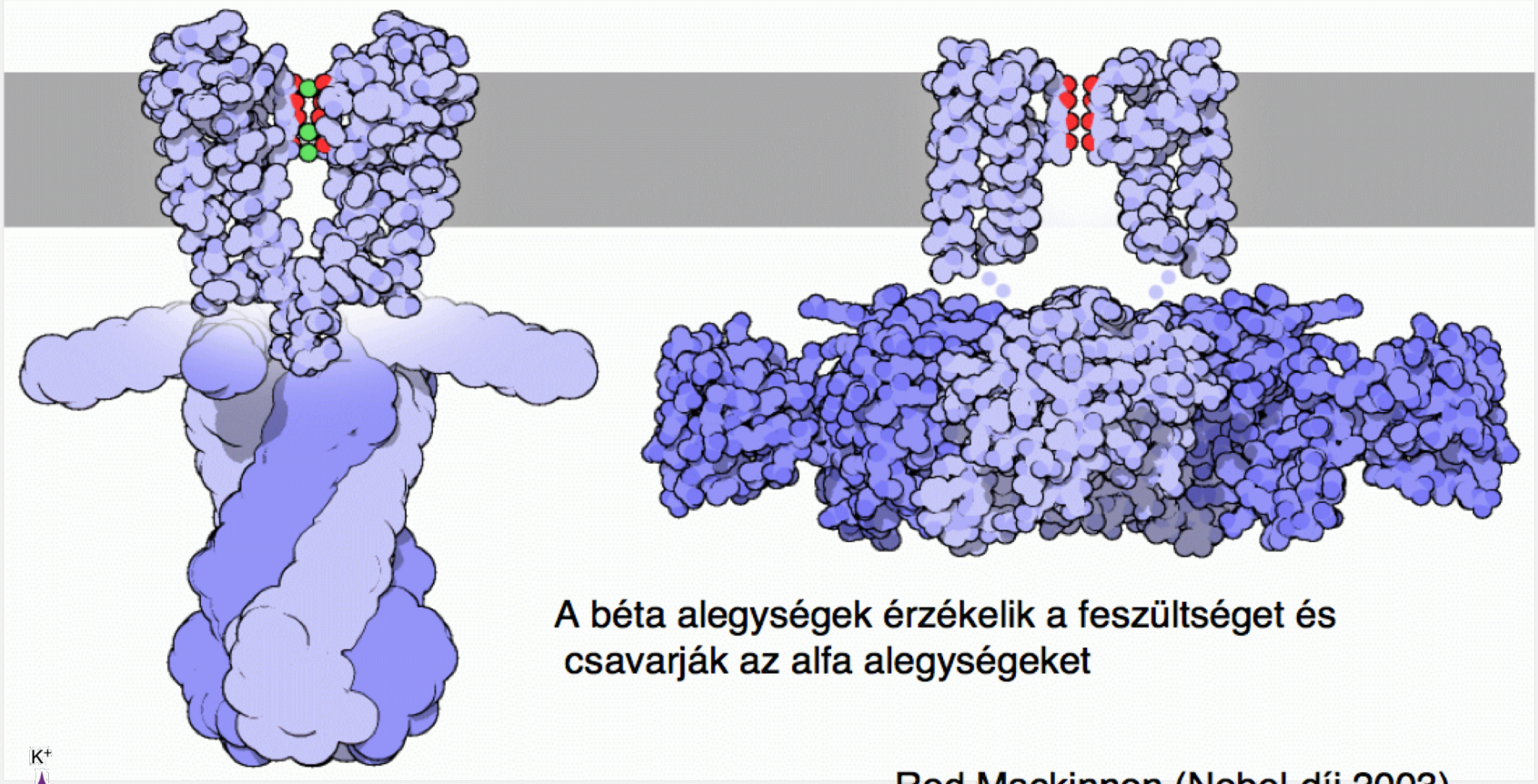
Akciós potenciál terjedése

típus	átmérő (μm)	vezetési sebesség (m/s)	funkció
mielinált			
Aα	12-20	70-120	vázizim mozgatóneuron, propriocepció, szomatikus motoneuron
Aβ	8	30-70	tapintás, nyomás
Aγ	5	15-30	izomorsó afferensek
Aδ	<3	12-30	fájdalom, hideg, érintés
B	3	3-15	vegetatív idegrendszer, preganglionáris rostok
nem-mielinált			
C	<1	0,5-2	fájdalom- és hőmérséklet-érző gerincvelői dorzális afferensek, reflexek, mechanoreceptorok

A feszültségfüggő K^+-csatorna működése

Nyitott állapot

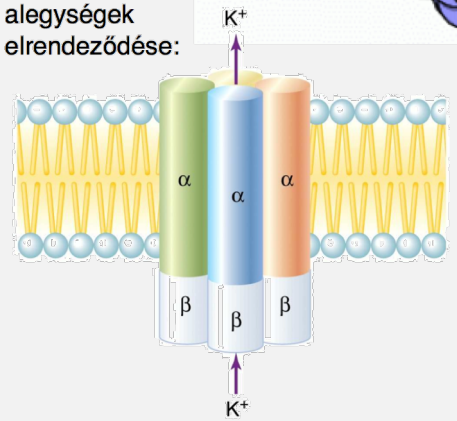
Zárt állapot



A béta alegységek érzékelik a feszültséget és csavarják az alfa alegységeket

Rod Mackinnon (Nobel-díj 2003)

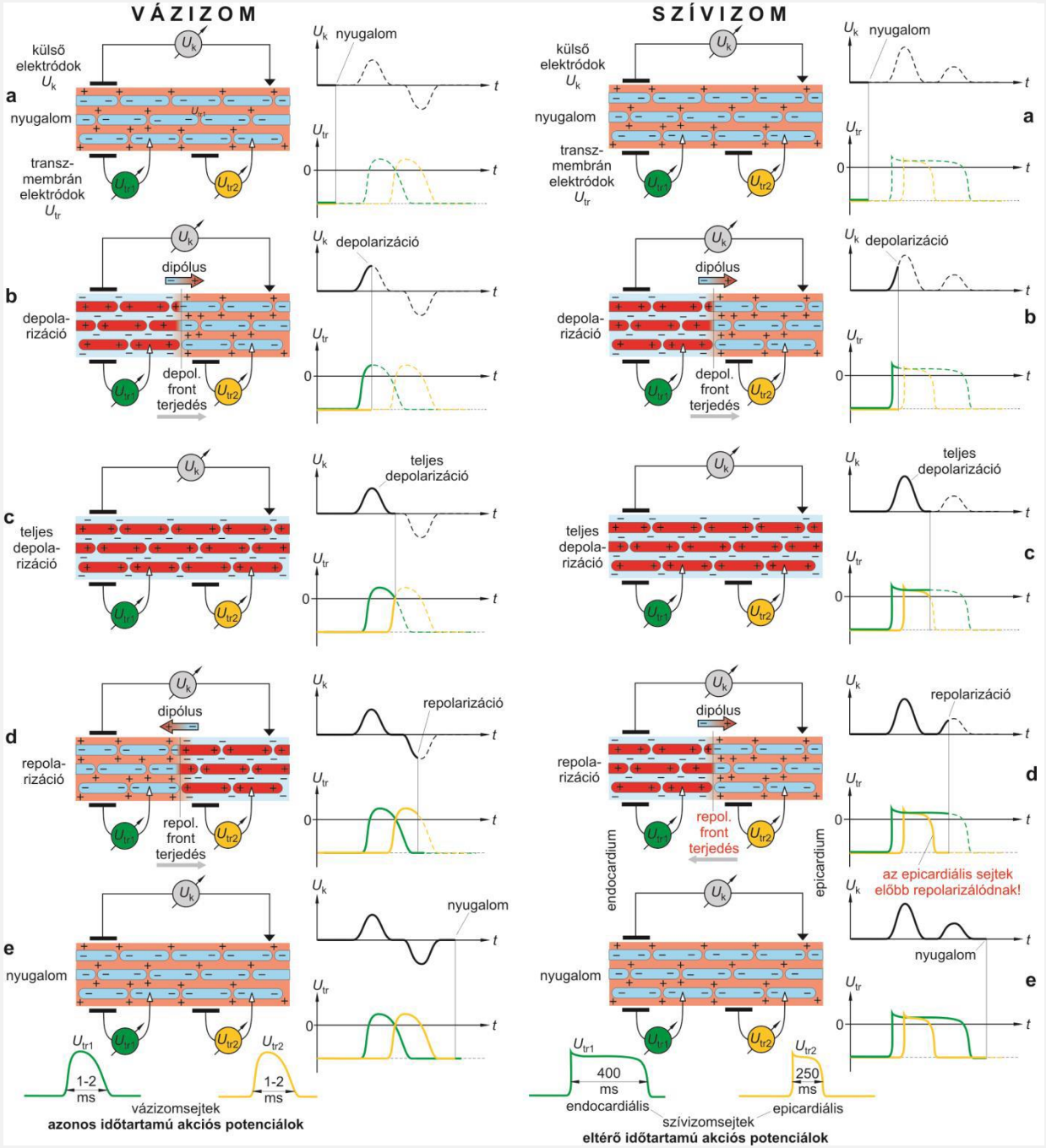
Eukariota alegységek elrendeződése:



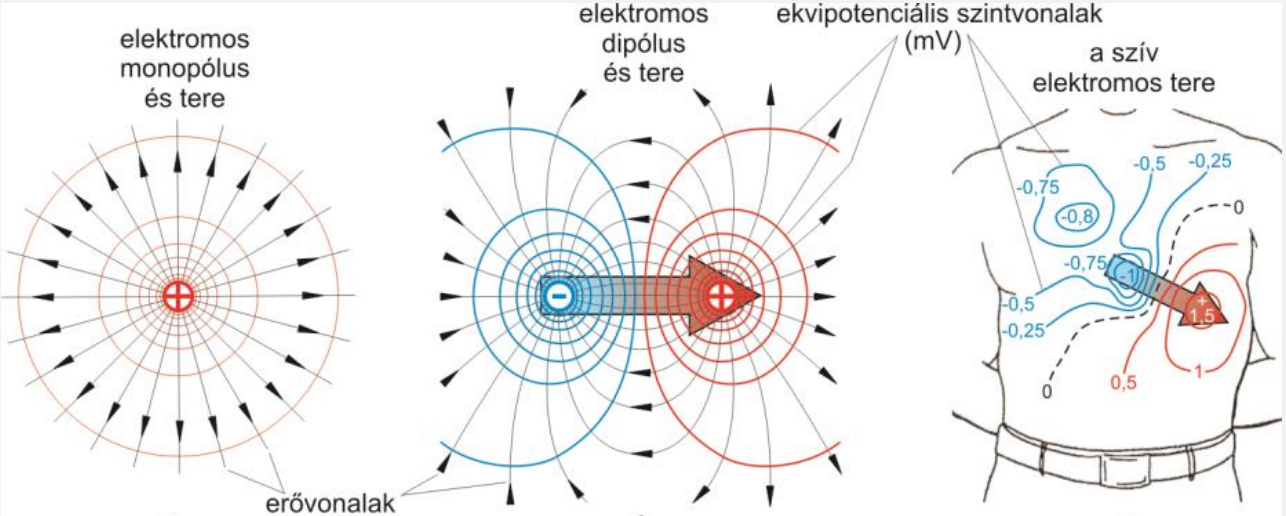
~50 mV / 5 nm ➔
10.000.000 V/m



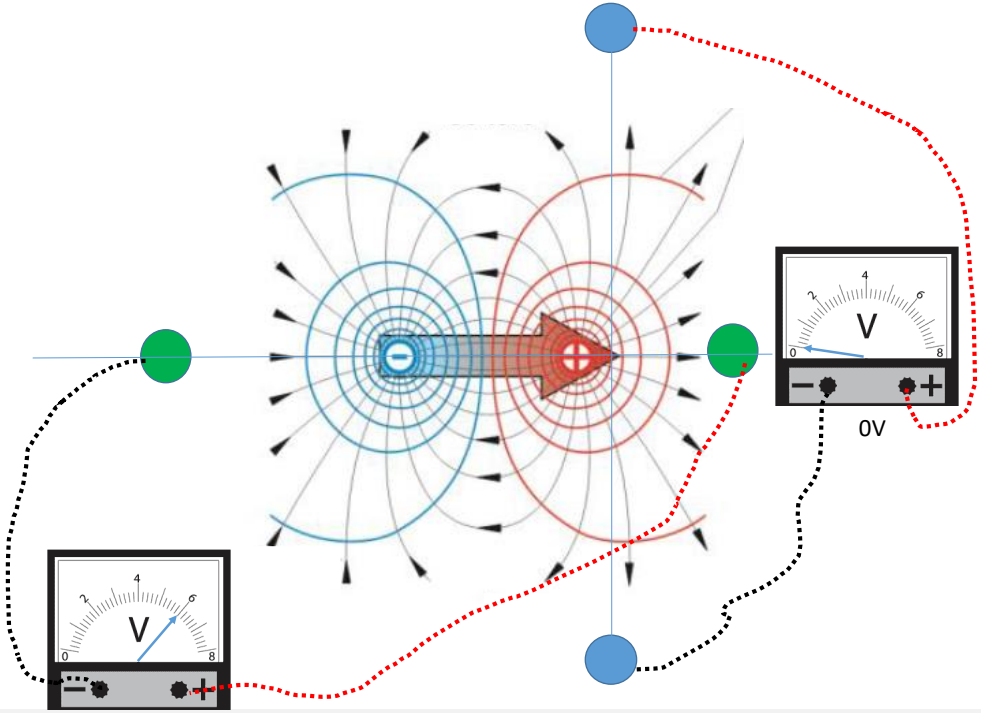
Akciós potenciál izmokban

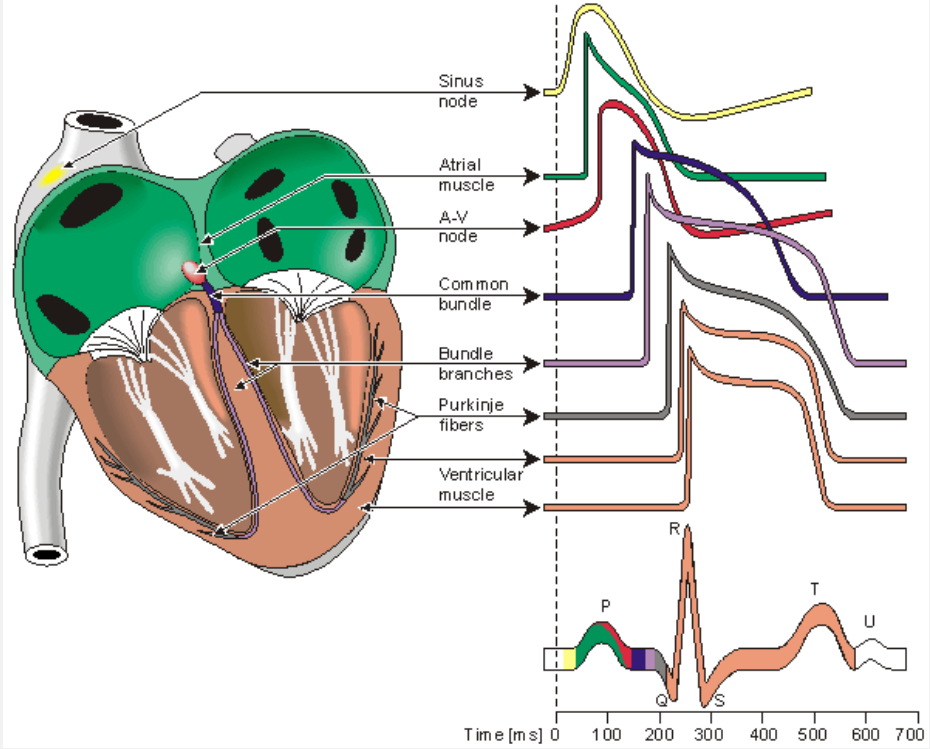


A szív elektromos aktivitása

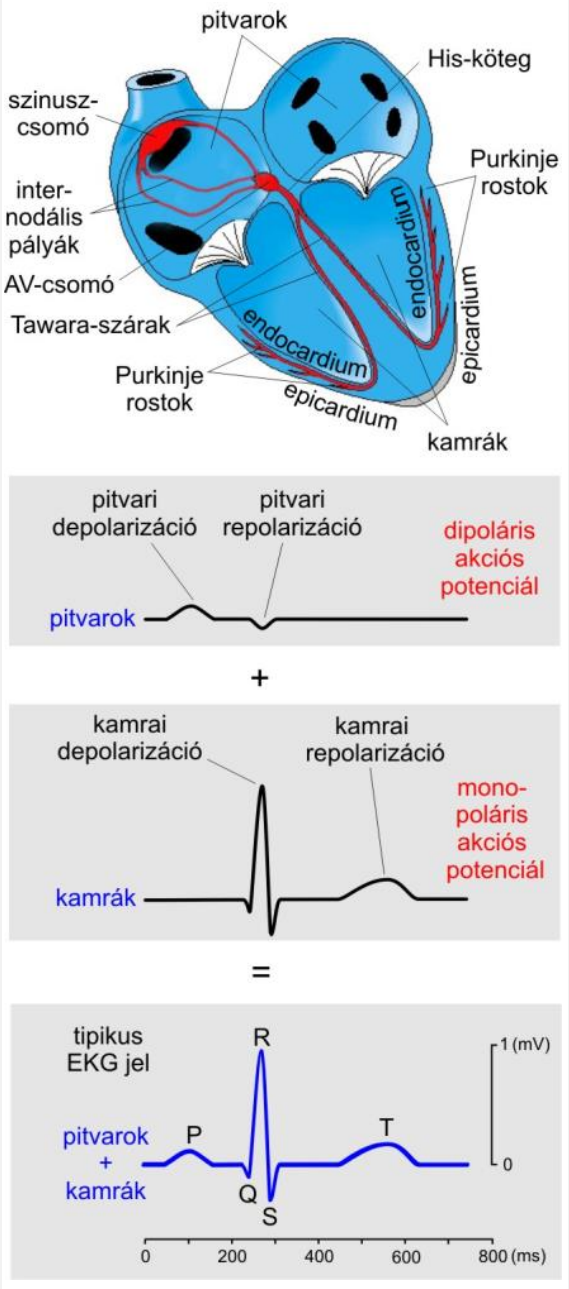


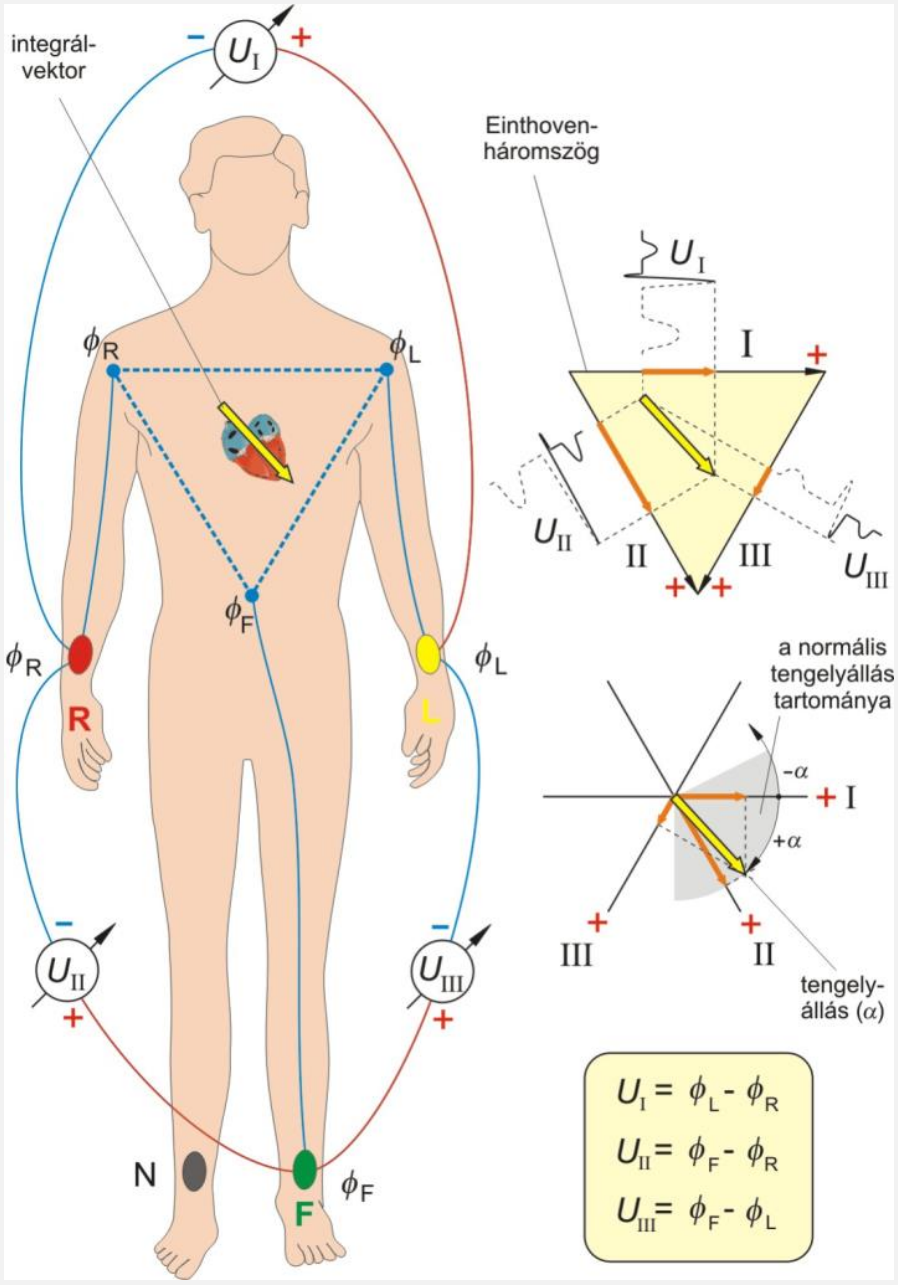
A mért feszültség arányos a dipólus vektor mérőirányra eső vetületével.





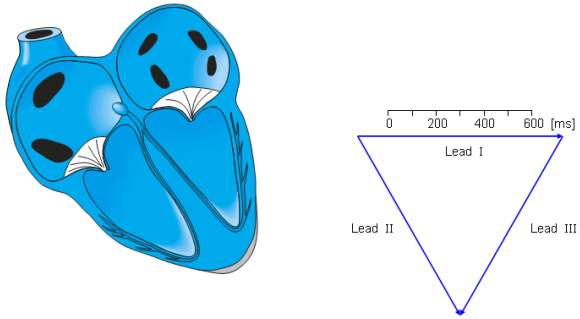
Elektrokardiogram (EKG)



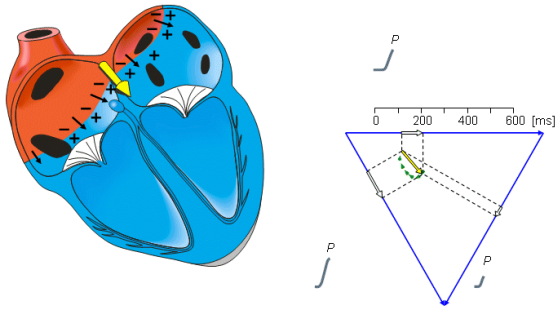


Elektrokardiogram (EKG)

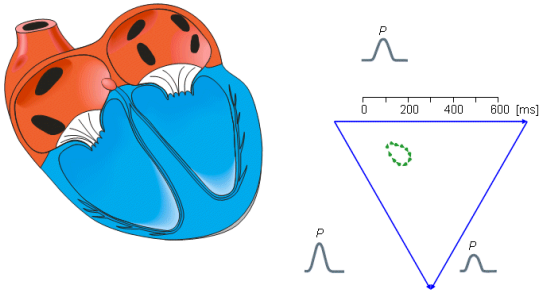
SINUS NODE
0 ms



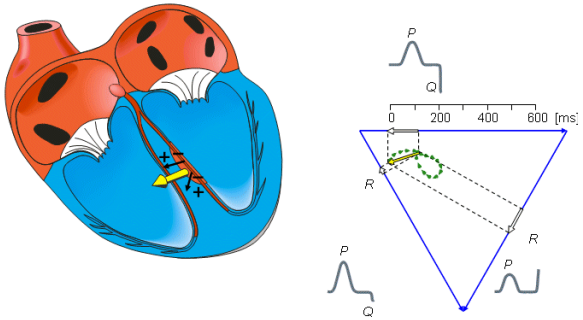
ATRIAL DEPOLARIZATION
80 ms



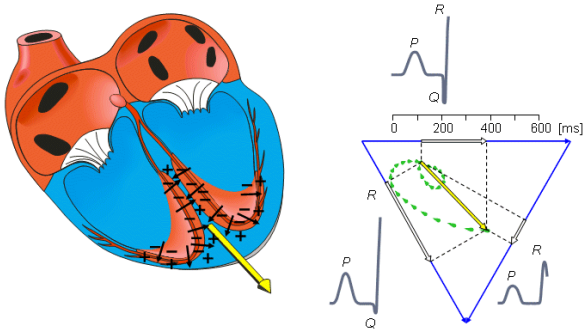
DELAY AT A-V NODE
200 ms



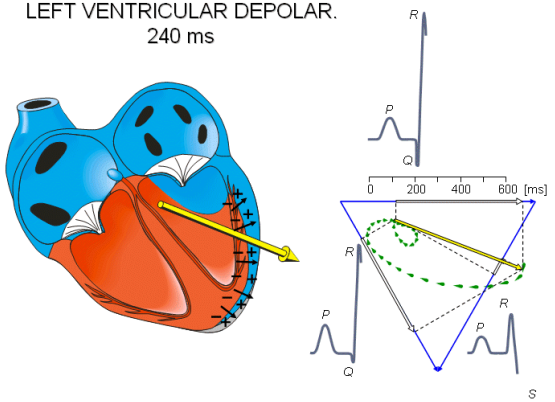
SEPTAL DEPOLARIZATION
220 ms



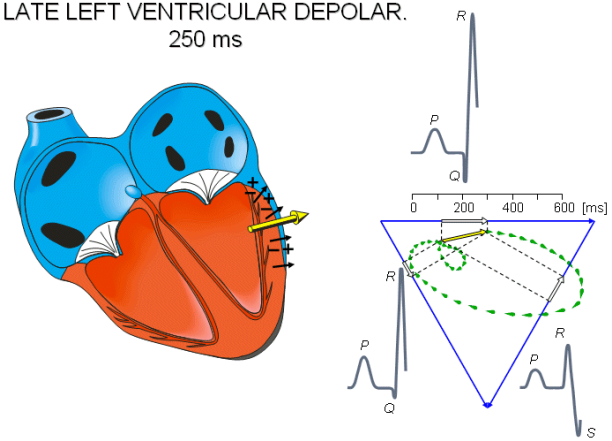
APICAL DEPOLARIZATION
230 ms



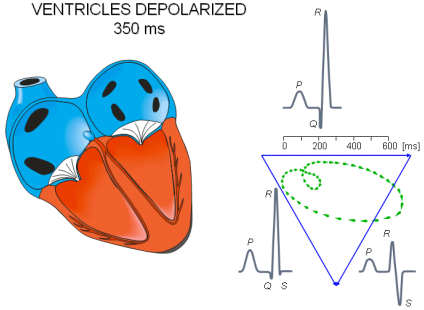
LEFT VENTRICULAR DEPOLAR.
240 ms



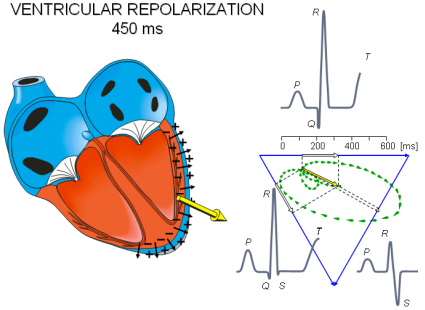
LATE LEFT VENTRICULAR DEPOLAR.
250 ms



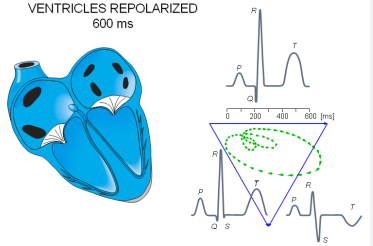
VENTRICLES DEPOLARIZED
350 ms



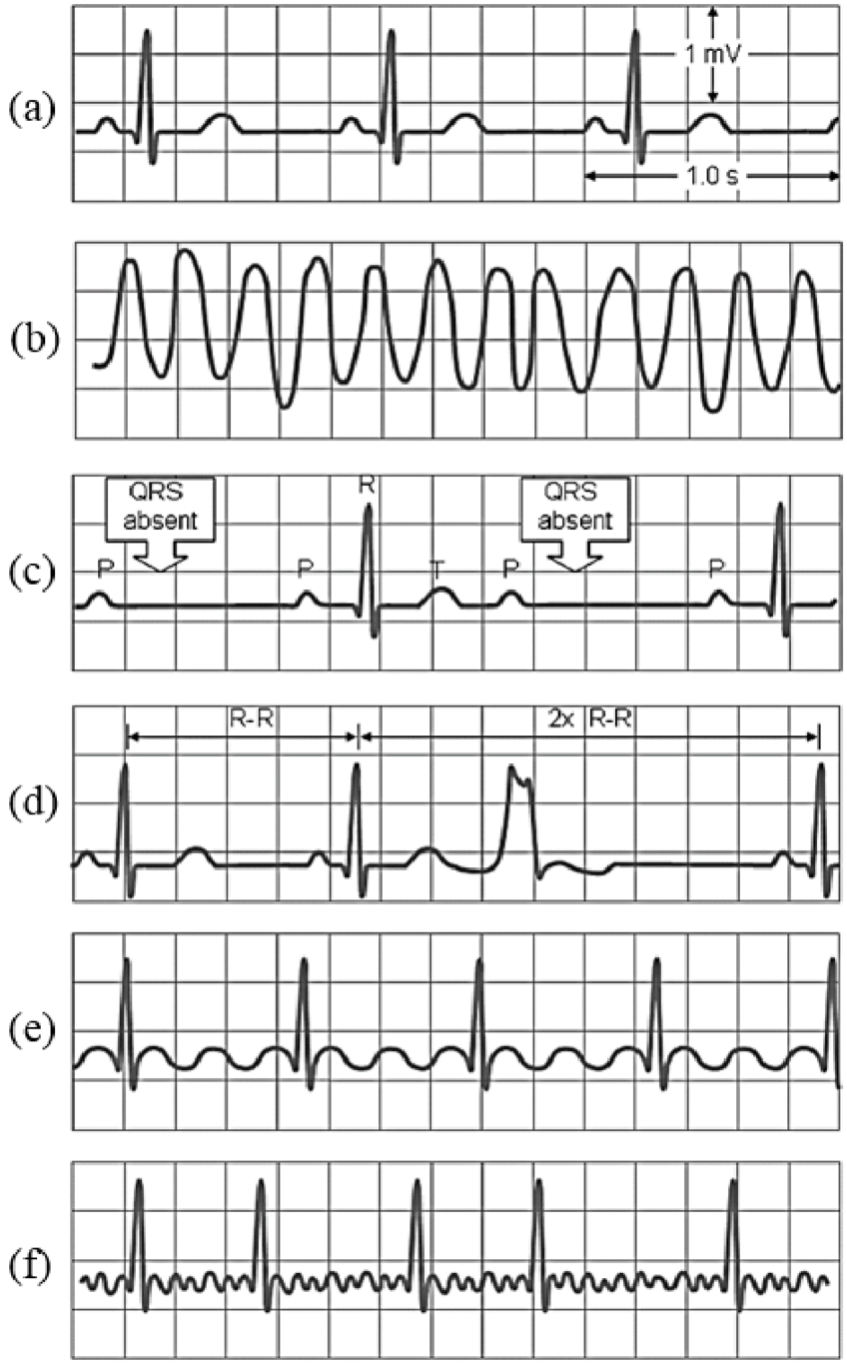
VENTRICULAR REPOLARIZATION
450 ms



VENTRICLES REPOLARIZED
600 ms



Az EKG jel tükrözi a szívműködés zavarait



(a) Normal Sinus Rhythm

(b) Ventricular Fibrillation

(c) Atrioventricular Block

(d) Premature Ventricular Contraction

(e) Atrial Flutter

(f) Atrial Fibrillation.