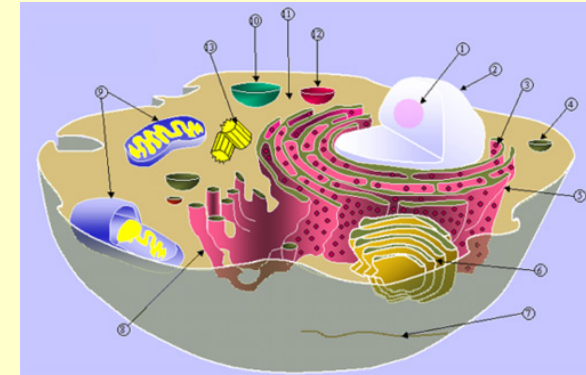


Transzportfolyamatok a biológiai rendszerekben

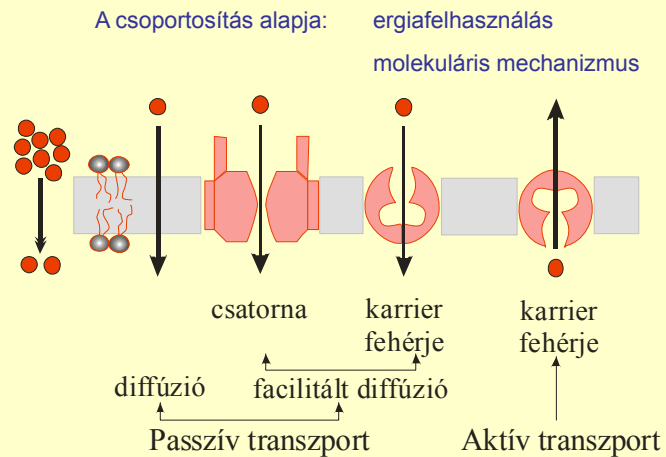
Transzportfolyamatok a sejt nyugalmi állapotában

A sejtben az anyagtranszport számára az oldattól eltérő körülmények találhatók.



- A citoplazmán belül is helyről helyre változik összetétel, viszkozitás.
- A sejtet/sejtganellumokat **membránok** - lipid kettősréteg – határolják.

A membránon keresztül történő anyagtranszport csoportosítása



Molekulák diffúziója membránon keresztül

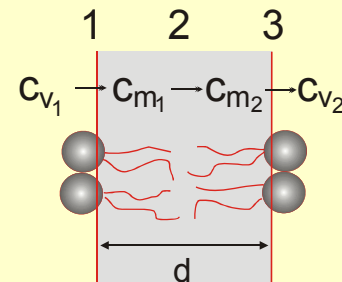
Diffúzió a lipid kettős rétegen keresztül

Fick I.

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

$$D_m \ll D$$

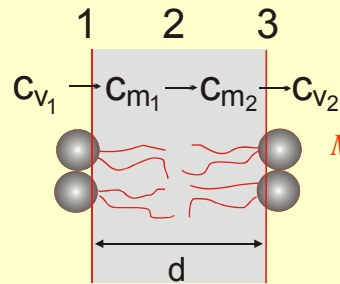
$$J_m = -D_m \frac{c_{m2} - c_{m1}}{d}$$



A koncentráció a membránon belül egyenletesen változik

Molekulák diffúziója membránon keresztül

Diffúzió a lipid kettős rétegen keresztül



$$J_m = -D_m \frac{c_{m2} - c_{m1}}{d}$$

$$J_m = -p_m(c_{m2} - c_{m1})$$

Membrán permeabilitási állandó [ms^{-1}]

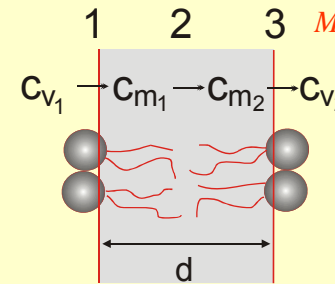
☹️ nem mérhető

$$\frac{C_{m1}}{C_{v1}} = \frac{C_{m2}}{C_{v2}} = K$$

$$C_{m1} = KC_{v1}$$

Molekulák diffúziója membránon keresztül

Diffúzió a lipid kettős rétegen keresztül



$$J_m = -p_m(c_{m2} - c_{m1})$$

Membrán permeabilitási állandó [ms^{-1}]

☹️ nem mérhető

$$\frac{C_{m1}}{C_{v1}} = \frac{C_{m2}}{C_{v2}} = K$$

$$C_{m1} = KC_{v1}$$

$$J_m = -p_m K (c_{v2} - c_{v1})$$

$$J_m = -p(c_{v2} - c_{v1})$$

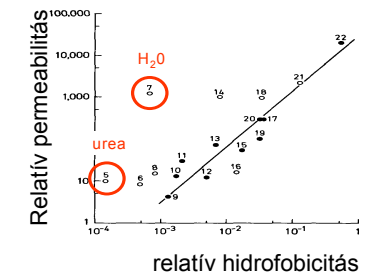
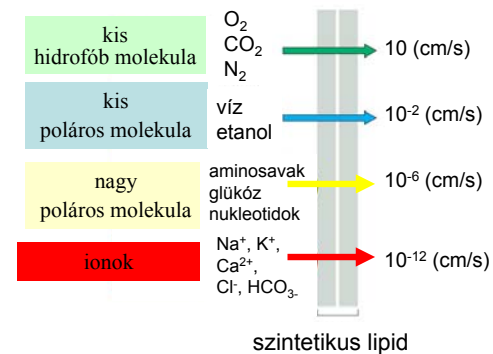
$$J_m = -p(C_{v2} - C_{v1})$$

Permeabilitási állandó [ms^{-1}]

Értékét befolyásolja:

- diffúziós állandó a membránban
- membrán vastagsága
- megoszlási hányados a vizes és lipid fázis között

Permeabilitás és polaritás összefüggése



Ionok diffúziója membránon keresztül

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

kémiai potenciál
és
elektromos potenciál
együttesen

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

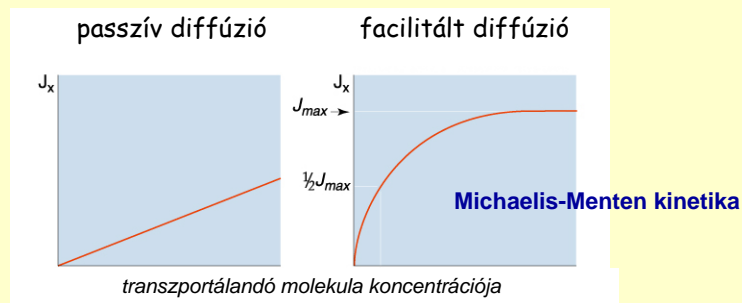
k-dik ion anyagáram-sűrűsége

Megfigyelés: számos esetben, habár a transzport nem energiatülszóró,
a kémiai/elektrokémiai potenciálnak megfelelően folyik,
**anyagáram-sűrűsége – sebessége – mégsem írható le
passzív diffúzióként a Fick törvénnyel.**

Facilitált diffúzió membránon keresztül

Fehérje természetű közvetítők – szelektív diffúziós útvonalak

- passzív diffúzióhoz nagyobb sebességű
- szelektív
- telítethető
- szelektíven gátlható



Facilitált diffúzió membránon keresztül

a transzportált részecske és a membránfehérje közötti kapcsolat alapján

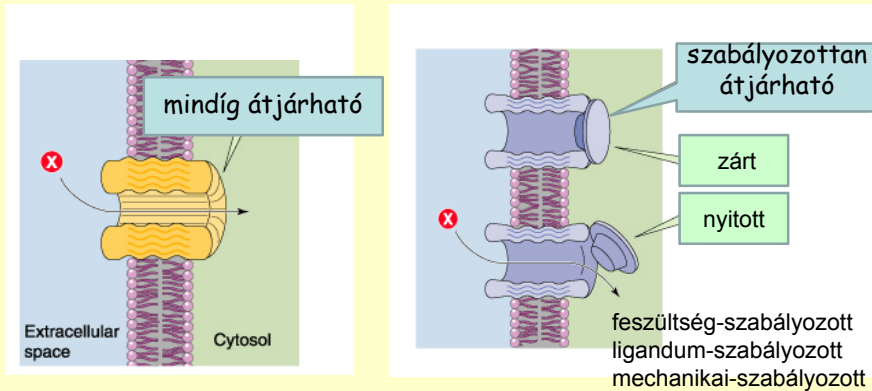
ioncsatorna
hidrofil pórus

karrier fehérje
transzmembrán fehérje

$$v_{\text{csatorna}} > v_{\text{karrier fehérje}} > v_{\text{passzív diffúzió}}$$

Facilitált diffúzió membránon keresztül

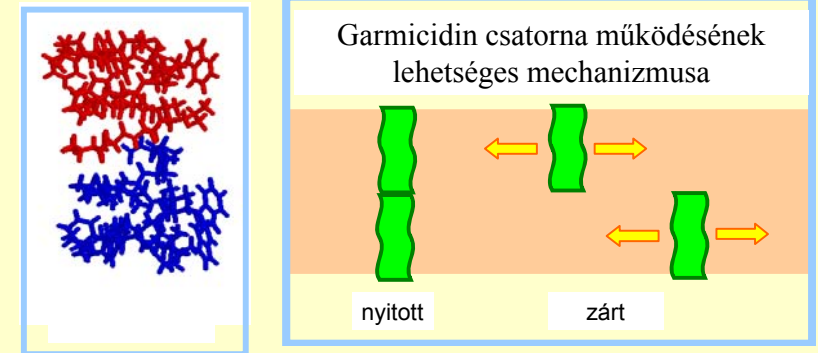
1. IONCSATORNA



szabályozottan átjárható ioncsatorna

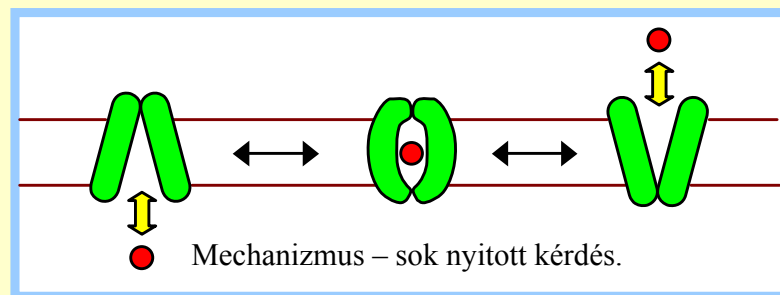
Gramicidin — ionofór : vátlakozva D és L aminosavakból felépülő fehérje.

- dimerizációra képes
- a dimer mérete \cong membrán vastagsága



Facilitált diffúzió membránon keresztül

2. KARRIER FEHÉRJE



feltehetően transzmembrán fehérjék;
a kötődés konformáció változást okoz
tipikus Michaelis-Menten kinetika

Aktív transzport membránon keresztül

-a transzport a kémiai/elektrokémiai **potenciáleséssel szemben**

folyik,

-**energiafüggő**

-ATP-vel működő transzporterek

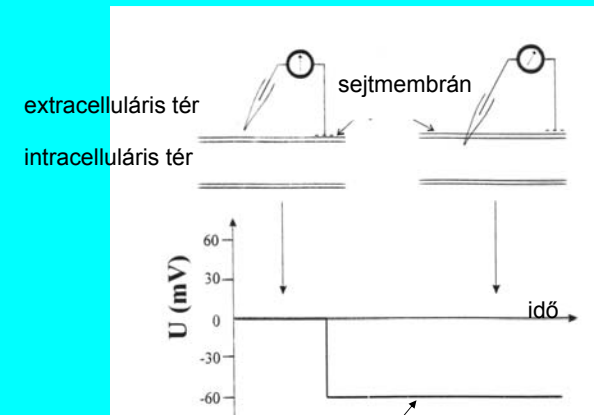
-fénnyel működő transzporterek

-csatolt transzporterek

Elektrofiziológiai jelenségek és a transzportfolyamatok kapcsolata

Tapasztalat 1:

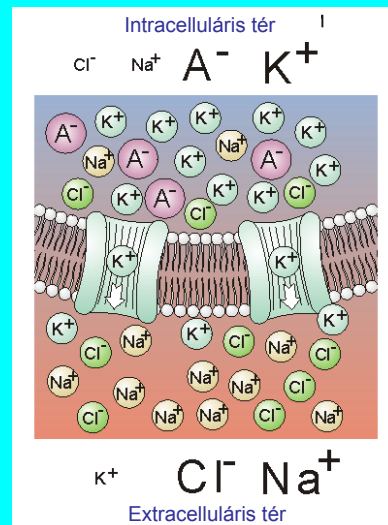
A sejtmembrán két oldala között elektromos potenciálkülönbség van



nyugalmi potenciál $\sim 60 - 90 \text{ mV}$

Tapasztalat 2:

A sejtmembrán két oldalának sajátos az ionösszetétele



Tapasztalat 2 (folyt.):

A sejtmembrán két oldalán egyenlőtlen az ionok eloszlása

Szövet	$C_{\text{Intracelluláris}} \text{ (mmol/l)}$			$C_{\text{Extracelluláris}} \text{ (mmol/l)}$		
	$[\text{Na}^+]_i$	$[\text{K}^+]_i$	$[\text{Cl}^-]_i$	$[\text{Na}^+]_e$	$[\text{K}^+]_e$	$[\text{Cl}^-]_e$
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

Lehetséges magyarázatok - modell 1

Nyugalomban nem változik az ioneloszlás



vagyis nem folyik transzport



Tételezzük fel, (1) hogy **egyensúlyban** van a rendszer

vagyis

az **elektrokémiai potenciál** egyenlő a membrán két oldalán

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

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



$$\mu_0 + RT \ln c_i^I + zF \varphi_i^I = \mu_0 + RT \ln c_i^{II} + zF \varphi_i^{II}$$



egyensúlyi
potenciál

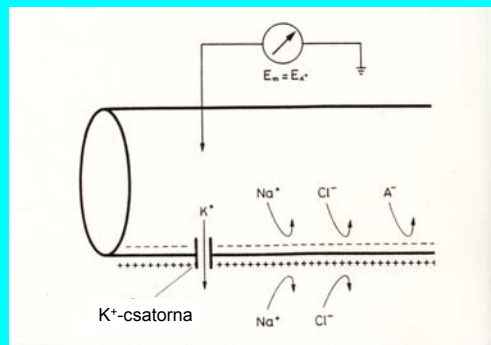
$$\rightarrow \varphi_i^I - \varphi_i^{II} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_i^I}{c_i^{II}}$$

Nernst-egyenlet

Tételezzük fel, (2) hogy **K⁺**-ra nézve korlátlanul

permeábilis a membrán

(3) hogy **Na⁺** teljesen immobilis



Donnan modell – egyensúlyi modell

-az elektrokémiai potenciál egyenlő a membrán két oldalán

-a membrán csak a K⁺-ra (és Cl⁻-ra) nézve átjárható

-a sejt és környezete termodinamikailag zárt rendszer



egyensúlyi potenciál \equiv nyugalmi potenciál

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

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

Ellenőrizzük!

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

A többi ionfélésegre is kiszámítva az egyensúlyi potenciált

potenciál (mV)	tintahal	békaizom
	óriásaxon	
$U_{\text{mért}}$	-62	-92
U_{0K^+}	-91	-103
U_{0Na^+}	+47	+46
U_{0Cl^-}	-56	-88



Nem kapunk jó egyezést

Finomítsuk:

Lehetséges magyarázatok - modell 2

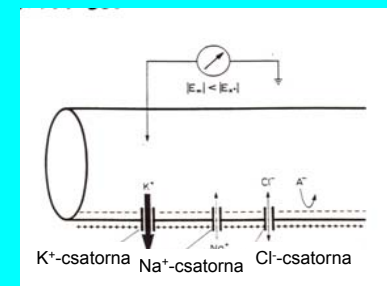
Tételezzük fel: nincs egyensúly



vagyis folyik transzport

Vegyük tekintetbe a membrán valós permeabilitását

a membrán nemcsak a K^+ -ra nézve átjárható,



de az egyes ionokra nézve a permeabilitás különböző lehet

az egyes ionok fluxusa $\neq 0$

az eredő fluxus = 0

Transzportmodell

az eredő fluxus = 0

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

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

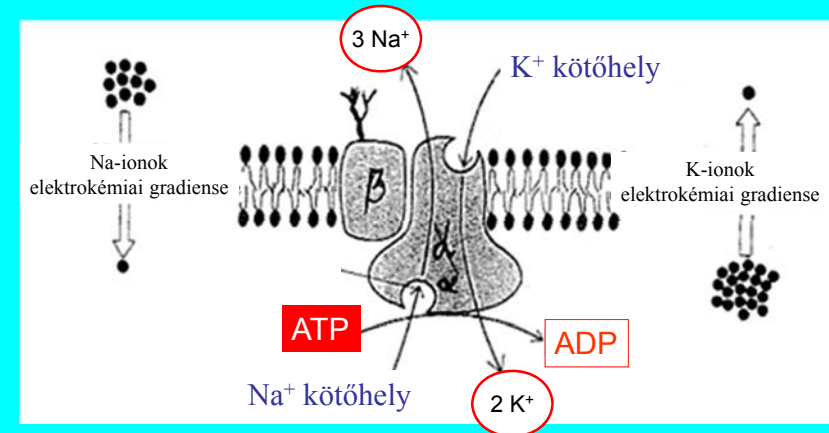
$$\varphi_e - \varphi_i = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\Sigma p_k^+ c_{ke}^+ + \Sigma p_k^- c_{ki}^-}{\Sigma p_k^+ c_{ki}^+ + \Sigma p_k^- c_{ke}^-}$$

Goldman – Hodgkin – Katz egyenlet

Nátrium - kálium pumpa

antiporter

Ioneloszlás fenntartása aktív transzporttal

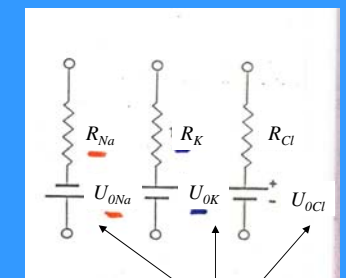
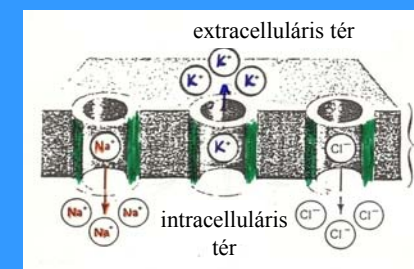


Sejtek energiafelhasználásának kb. harmada fordítódik erre

Ellenőrizzük!

	tintahal óriás axon	békaizom
$U_{mért}$	-62	-92
U_{GHK}	-61,3	-89,2
U_{0Na^+}	+47	+46
U_{0K^+}	-91	-103
U_{0Cl^-}	-56	-88

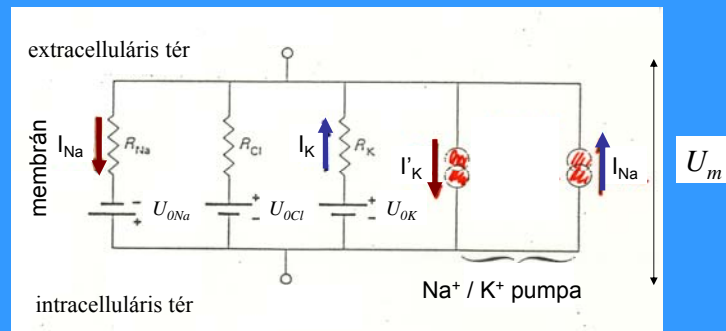
A sejtmembrán elektromos modellje



az adott ion egyensúlyi
potenciálja

Az ionszelektív csatornák
ellenállással és feszültségforrással modellezhetők

Az állandó ionkoncentráció fenntartásához szükséges
a Na^+ és K^+ pumpa működése



Ohm-törvény alapján:

$$I_j = 1/R_j(U_m - U_{0j})$$

A nyugalmi potenciál értelmezése az elektromos modell alapján

$$I_j = 1/R_j(U_m - U_{0j})$$

U_{0j} – Nernst egyenlet alapján számolható

Tudjuk, hogy

$$\Sigma I_j = I_{\text{ion}} = 0$$

$$\Sigma I_j = I_{\text{Na}} + I_{\text{K}} + I_{\text{Cl}} = 0$$

behelyettesítve:

$$g_K(U_m - U_{0K}) + g_{\text{Na}}(U_m - U_{0\text{Na}}) = 0$$

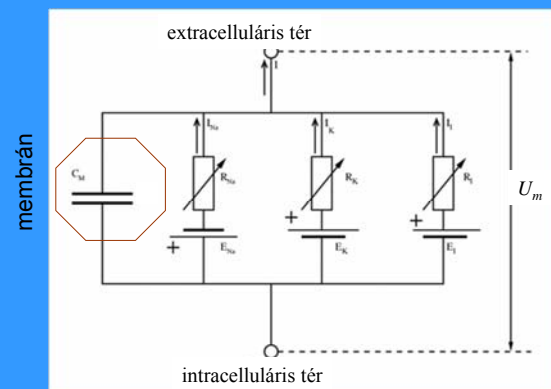
U_m -et kifejezve

$$U_m = \frac{(U_{0K} \times g_K) + (U_{0\text{Na}} \times g_{\text{Na}})}{g_K + g_{\text{Na}}}$$

Próbaszámítás:

$$U_m = \frac{(-100 \times 5) + (50 \times 1)}{5 + 1} = -75 \text{ [mV]}$$

A sejtmembrán kondenzátorként viselkedik



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

Kapacitása: $\sim 10^{-6} \text{ F/cm}^2$ \longrightarrow ~ 5000 pár töltés/ $1 \mu\text{m}^2$

A sejtmembrán elektromos tulajdonságai

elektromotoros erő

ellenállás

kapacitás