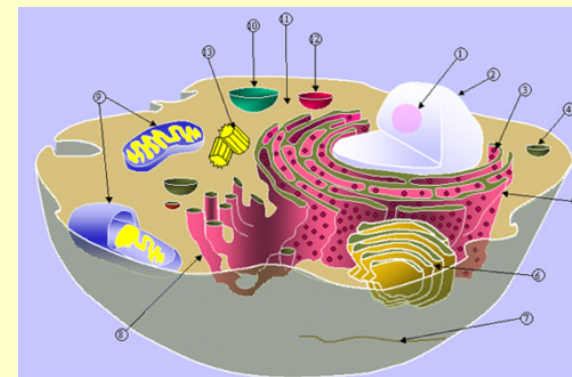


# Transzportfolyamatok a biológiai rendszerekben

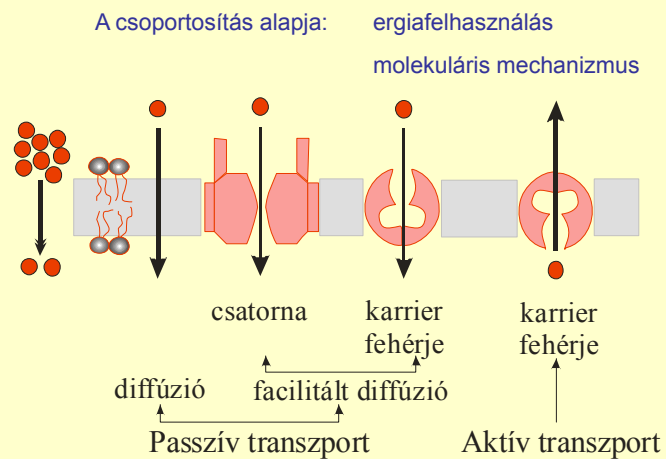
Transzportfolyamatok a sejt nyugalmi állapotában

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

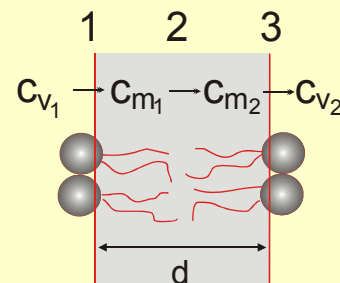
Diffúzió a lipid kettős rétegen keresztül

Fick I.

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

$$D_m \ll D$$

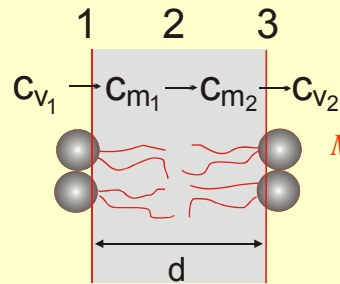
$$J_m = -D_m \frac{c_{m2} - c_{m1}}{d}$$



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 [ $ms^{-1}$ ]

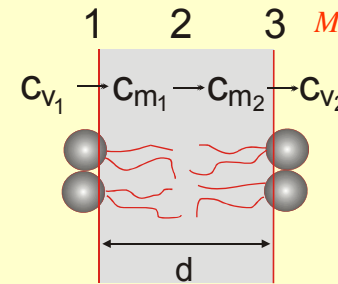
☹️ nem mérhető

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

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

## 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

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

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

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

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

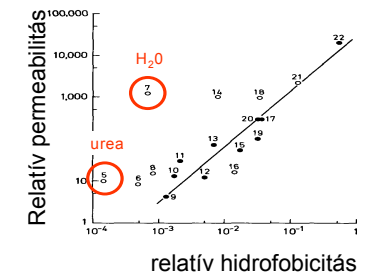
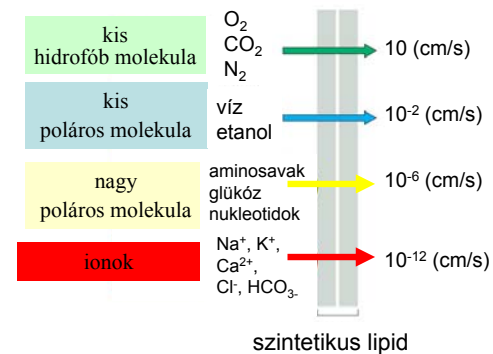
$$J_m = -p(C_{v2} - C_{v1})$$

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

$$J_k = L_k X_k = -L_k \frac{\Delta \mu_{ek}}{\Delta x}$$

k-dik ion anyagáram-sűrűsége

## Ionok diffúziója membránon keresztül

$$J_k = L_k X_k = -L_k \frac{\Delta \mu_{ek}}{\Delta x}$$

$$\frac{\Delta \mu_{ek}}{\Delta x} = \frac{\Delta \mu_k}{\Delta x} + Z_k F \frac{\Delta \phi}{\Delta x} \quad \text{és} \quad L_k = c_k \frac{D_k}{RT}$$

$$J_k = -D_k \left( \frac{\Delta c_k}{\Delta x} + c_k \frac{Z_k F}{RT} \frac{\Delta \phi}{\Delta x} \right) \quad D = u k T$$

$$J_k = -u_k k T \left( \frac{\Delta c_k}{\Delta x} + c_k \frac{Z_k F}{RT} \frac{\Delta \phi}{\Delta x} \right)$$

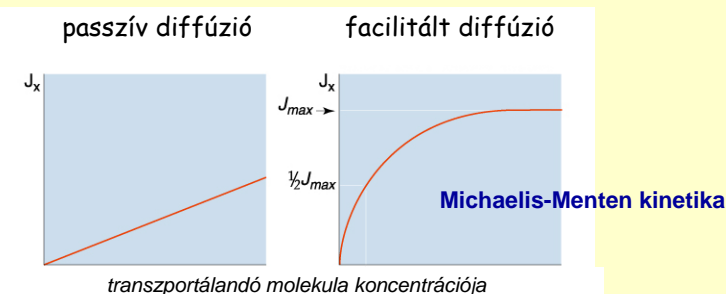
k-dik ion anyagáram-sűrűsége

Megfigyelés: számos esetben, habár a transzport nem energiatfüggő,  
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 diffúziónál nagyobb sebességű
- szelektív
- telítendő
- szelektíven gátolható



## Facilitált diffúzió membránon keresztül

a transzportált részecske és a membránfehérje közötti kapcsolat alapján

ioncsatorna

hidrofil pórus

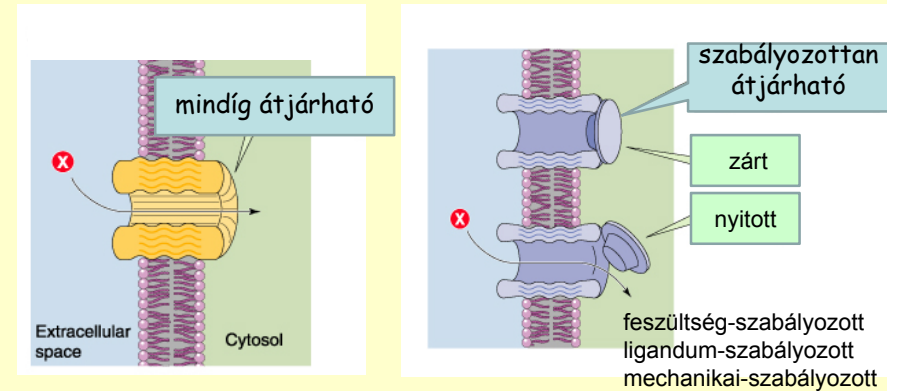
karrier fehérje

transzmembrán fehérje

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

## Facilitált diffúzió membránon keresztül

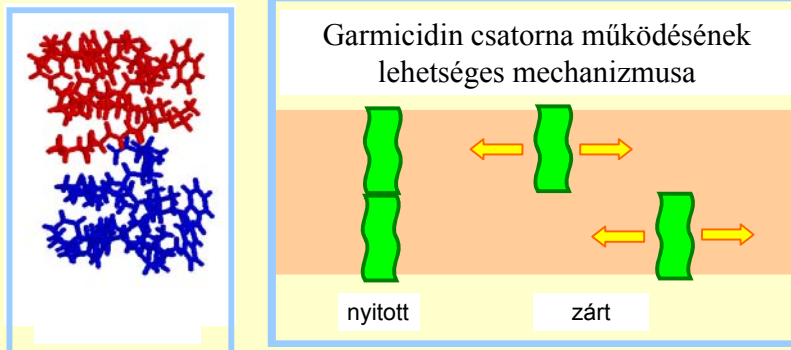
### 1. IONCSATORNA



## szabályozottan átjárható ioncsatorna

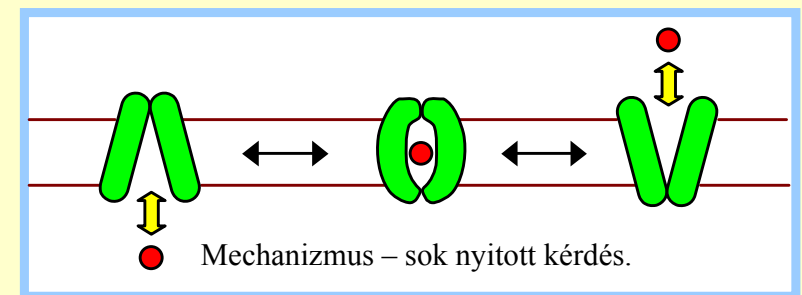
**Gramicidin** — ionofór : vátlakozva D és L aminosavakból felépülő fehérje.

- 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

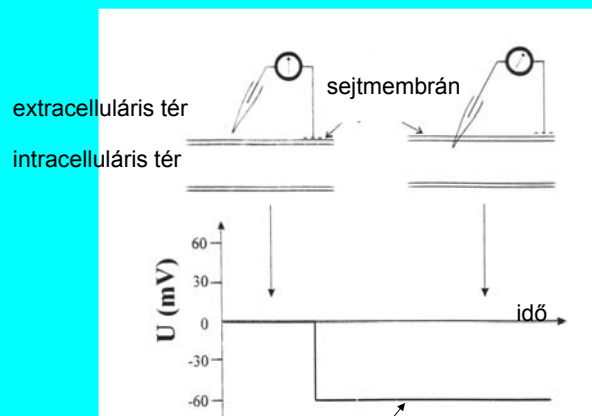
-fénnyel működő transzporterek

-csatolt transzporterek

## Elektrofiziológiai jelenségek és a transzportfolyamatok kapcsolata

### Tapasztalat 1:

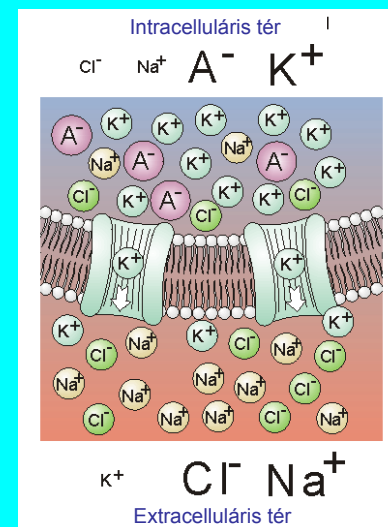
A sejtmembrán két oldala között elektromos potenciálkülönbség van



nyugalmi potenciál  $\sim 60 - 90$  mV

### Tapasztalat 2:

A sejtmembrán két oldalának sajátos az ionösszetétele



## Tapasztalat 2 (folyt.):

A sejtmembrán két oldalán egyenlőtlen az ionok eloszlása

Szövet	C <sub>Intracelluláris</sub> (mmol/l)			C <sub>Extracelluláris</sub> (mmol/l)		
	[Na <sup>+</sup> ] <sub>i</sub>	[K <sup>+</sup> ] <sub>i</sub>	[Cl <sup>-</sup> ] <sub>i</sub>	[Na <sup>+</sup> ] <sub>e</sub>	[K <sup>+</sup> ] <sub>e</sub>	[Cl <sup>-</sup> ] <sub>e</sub>
Tintahal óriásaxon	72	<b>345</b>	61	<b>455</b>	10	540
békaizom	20	<b>139</b>	3,8	<b>120</b>	2,5	120
patkányizom	12	<b>180</b>	3,8	<b>150</b>	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

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

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



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



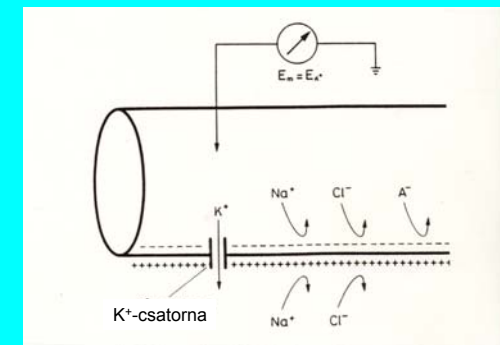
egyensúlyi potenciál  $\rightarrow \varphi_i^I - \varphi_i^{II} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_i^I}{c_i^{II}}$

Nernst-egyenlet

Tételezzük fel, (2) hogy **K<sup>+</sup>**-ra nézve korlátlanul

permeábilis a membrán

(3) hogy **Na<sup>+</sup>** 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 = 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 óriásaxon	békaizom
$U_{mért}$	-62	-92
$U_{0K^+}$	-91	-103
$U_{0Na^+}$	+47	+46
$U_{0Cl^-}$	-56	-88



Nem kapunk jó egyezést

## Finomítsuk:

### Lehetséges magyarázatok - modell 2

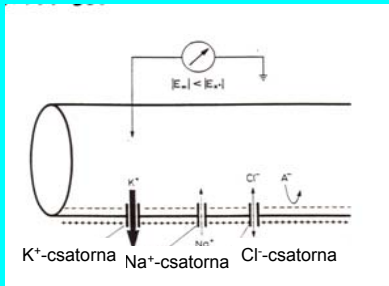
Tételezzük fel: nincs egyensúly



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

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

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

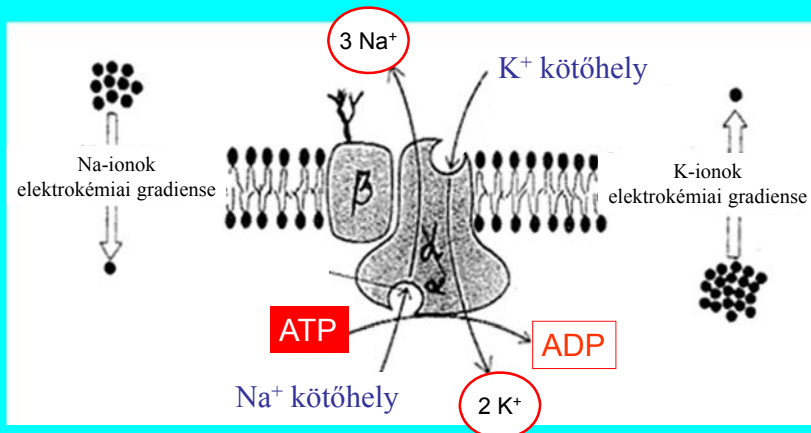
$$\varphi_e - \varphi_i = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\Sigma p_k^+ c_{ke}^+ + \Sigma p_k^- c_{ki}^-}{\Sigma p_k^+ c_{ki}^+ + \Sigma p_k^- c_{ke}^-}$$

Goldman – Hodgkin – Katz egyenlet

## Nátrium - kálium pumpa

antiporter

Ioneloszlás fenntartása aktív transzporttal



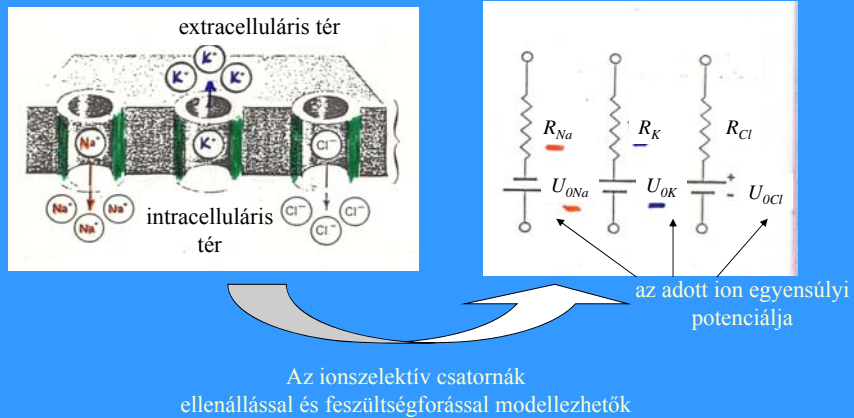
Sejtek energiafelhasználásának kb. harmada fordítódik erre

## Ellenőrizzük!

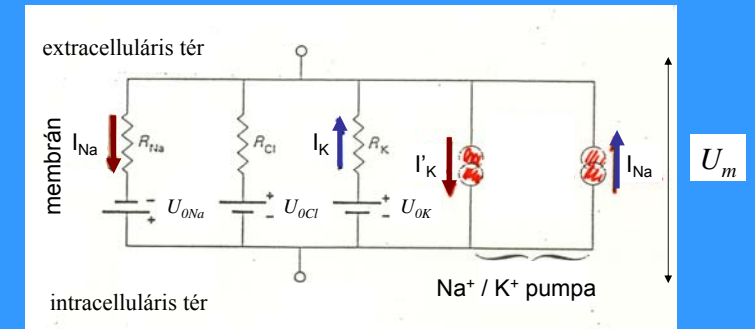
	tintahal óriás axon	békaizom
$U_{mért}$	-62	-92
$U_{GHK}$	-61,3	-89,2
$U_{0Na^+}$	+47	+46
$U_{0K^+}$	-91	-103
$U_{0Cl^-}$	-56	-88



## A sejtmembrán elektromos modellje



## Az állandó ionkoncentráció fenntartásához szükséges a Na<sup>+</sup> és K<sup>+</sup> 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

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

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

behelyettesítve:

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

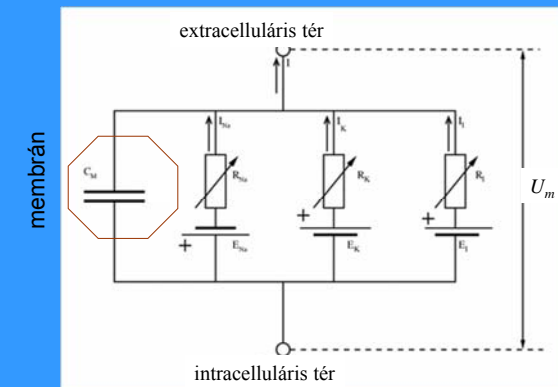
$U_m$ -et kifejezve

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

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

## *A sejtmembrán elektromos tulajdonságai*

elektromotoros erő

ellenállás

kapacitás