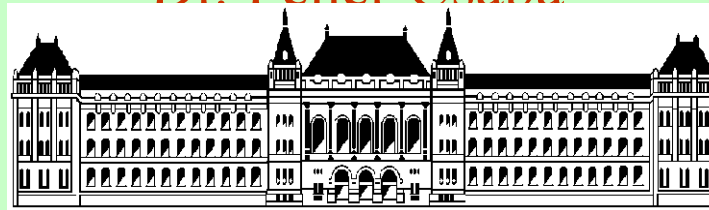


MEMBRÁN MŰVELETEK

Dr. Pécs Miklós

Dr. Fehér Csaba



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

MEMBRÁN MŰVELETEK

2. Koncentráló lépés(ek) → a nagyobb mennyiségben jelen lévő szennyezéseket, elsősorban a vizet választjuk el.

Jellemző műveletek:

Extrakció

Adszorpció

MEMBRÁNSZŰRÉS

Csapadékképzés

(bepárlás, desztilláció)



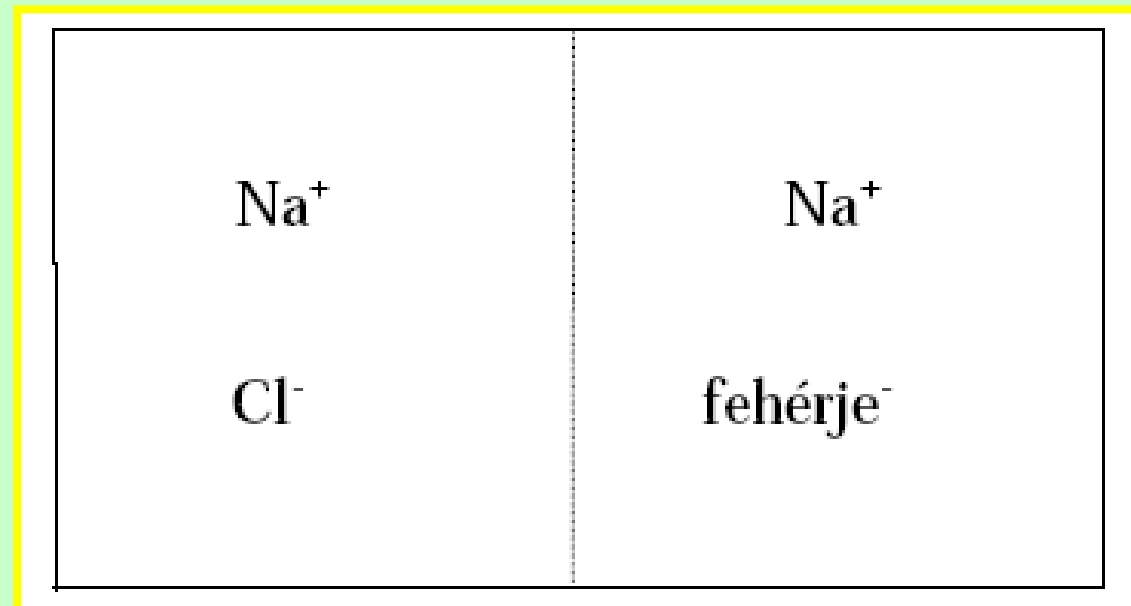
Bevezetés

A **membrán** közbenső fázis két fluidum között, amelyen szelektív anyagtranszport folyik.

A transzportok hajtóerejének megértéséhez végezzünk el egy gondolatkísérlet:

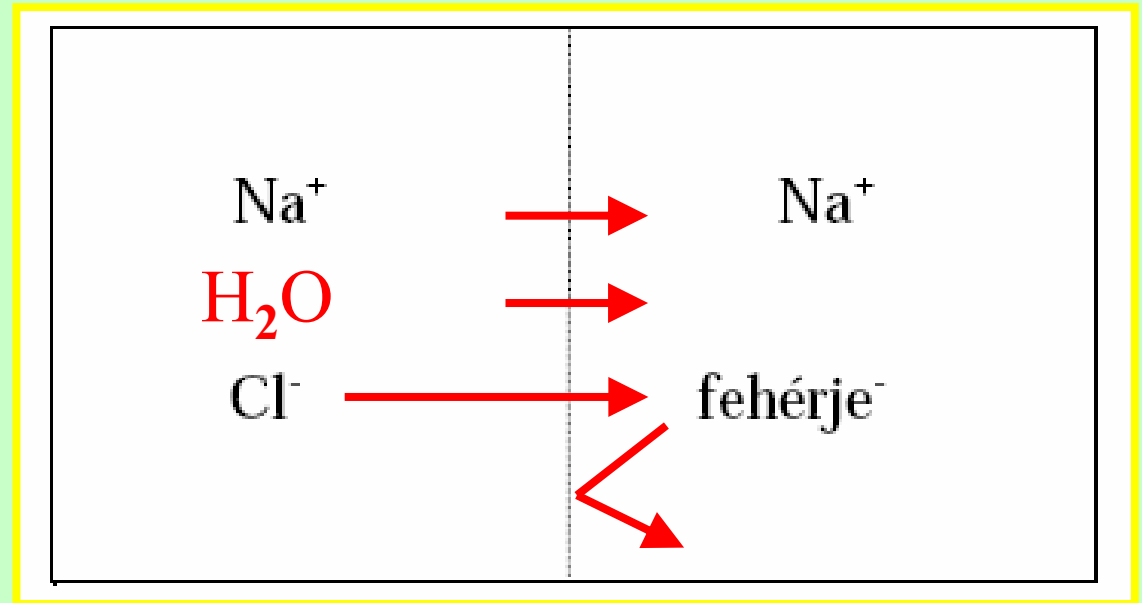
Ultraszűrő membránnal válasszunk ketté egy folyadékteret, amelyben azonos koncentrációban vannak jelen az alábbi anyagok:

Mi történik?



A klorid ionok a koncentrációkülönbség hatására megindulnak a jobb oldali térbe.

A fehérje ionok nem tudnak behatolni a bal oldali térbe.



A klorid ionok negatívvá teszik a jobb oldali teret – ennek hatására a nátrium ionok is megindulnak jobbra.

A jobb oldali térben nagyobb lesz a koncentráció (klorid és nátrium ion többlet) ennek hatására ozmózis lép fel: a víz is diffundálni kezd a jobb oldali térbe.



Hogyan kerül ez a rendszer egyensúlyba? Sem a koncentrációk, sem a töltések, sem az ozmózisnyomás nincsenek egyensúlyban!

A kémiai potenciálok válnak egyenlővé!

$$\mu_i = \mu_{i0} + S_i T + V_i p + RT \ln a_i + z_i F \varphi + \dots$$

A membrántranszportnak többféle hajtóereje lehet!



A membrános elválasztások csoportosítása

	Belépő fluidum	Kilépő fluidum	Hajtóerő	Átlép	Visszamarad
Gázpermeáció	gáz	gáz	koncentráció v. parciális nyomás	gáz	
Pervaporáció	oldat	Gáz (gőz)	koncentráció v. parciális nyomás	gáz	
Dialízis	oldat	oldat	koncentráció különbség	kismol. anyagok	nagymol. anyagok
Elektrodialízis	oldat	oldat	elektromos tér	ionok	
Reverz omózis	oldat	oldat	nyomás	oldószer	
Ultraszűrés	oldat	oldat	nyomás	kismol. anyagok	nagymol. anyagok
Mikroszűrés	szuszpenzió	oldat	nyomás	nagymol. anyagok	kolloid részecskék
Szűrés	szuszpenzió	szuszpenzió	nyomás	kolloid részecskék	makro-részecskék



Membránműveletek jellemzése

Gázpermeáció

- gázelegyben egyes komponensek feldúsítása, „molekulaszita”

Pervaporáció

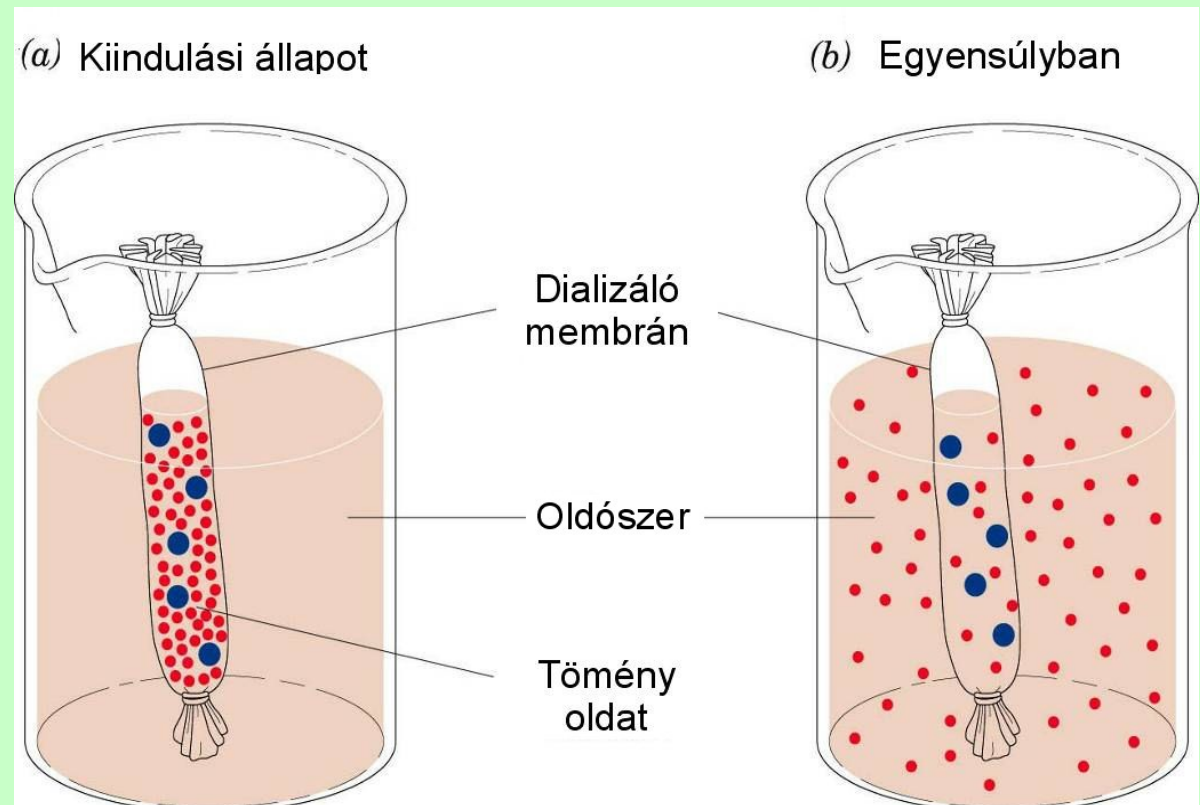
- folyadék komponensei anyagi minőségüktől függő mértékben oldódnak be a membrán anyagába és a túloldalon gőz formájában lépnek ki
- hajtóerő: komponens egyensúlyi gőznyomása és a gőztérnyomása közti különbség \longrightarrow vákuum
- biotechnológiai alkalmazása: etanol fermentáció
- analitikai alkalmazása: közvetlen mintavételezés a fermentorból tömegspektrometriás méréshez



Membránműveletek jellemzése

Dialízis

- fehérjék kis molekulatömegű szennyezéseinek eltávolítása (pl. ki-sózás után)
- hajtóerő: koncentráció-különbség
- mechanizmus: diffúzió
- laboratóriumi alkalmazás: dializáló hüvely
- orvosi alkalmazás: művese



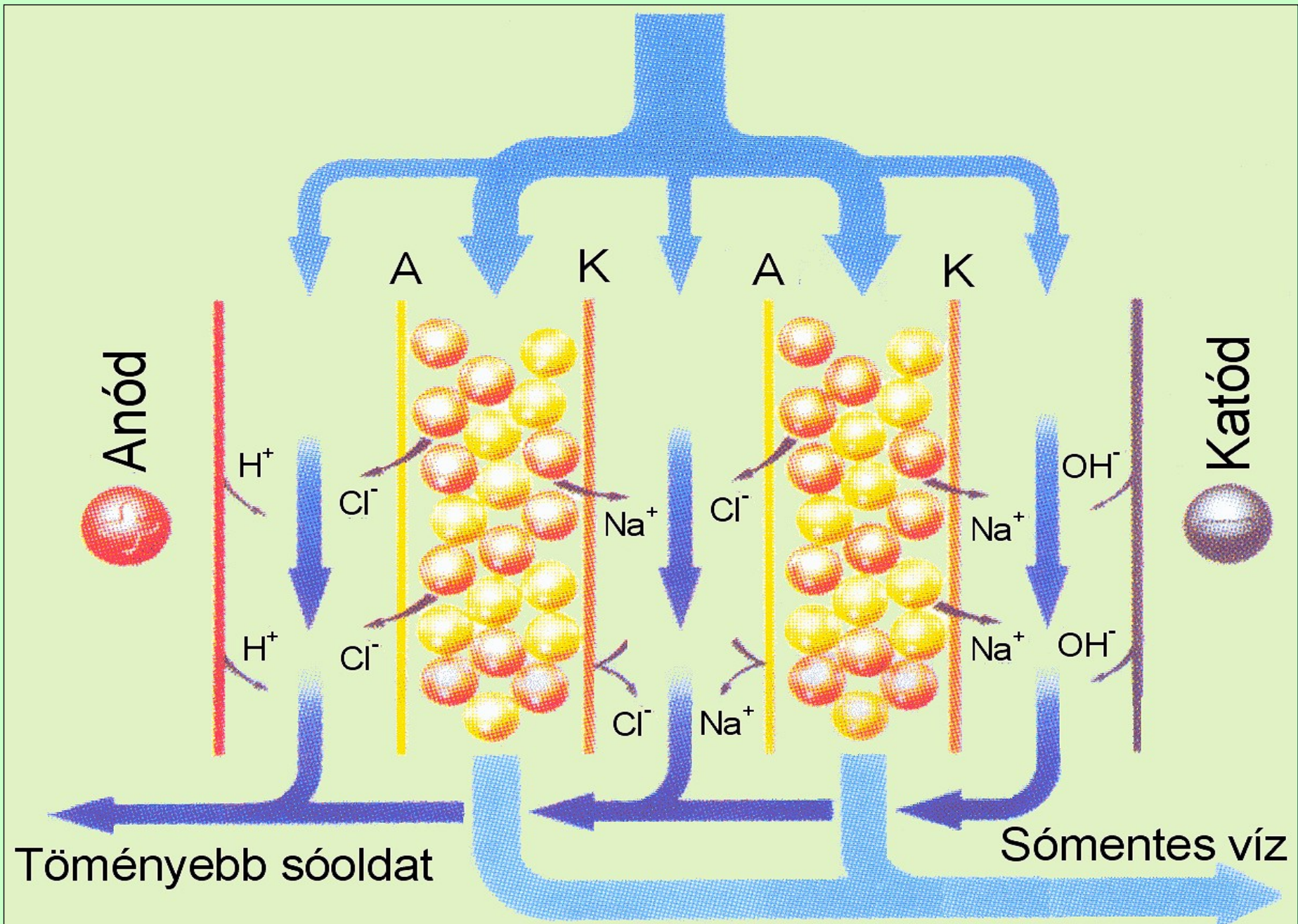
Membránműveletek jellemzése

Elektrodialízis

- hajtóerő: elektromos tér – egyenfeszültség
- mechanizmus: diffúzió
- szelektivitás: az anion- és kationcserélő membránok csak a kötődő ionokat engedik át.
- elektromos ellenállás: 3 - 20 Ω/cm^2 (0.5 M NaCl oldattal egyensúlyban)
- iontranszportszám: 0.85 - 0.95
- elektrooszmózis: 100 - 200 cm^3 víz/szállított ekvivalens ion
- ellenirányú diffúzió



(Hagyományos) elektrodialízis



A = anioncserélő membrán

K = kationcserélő membrán

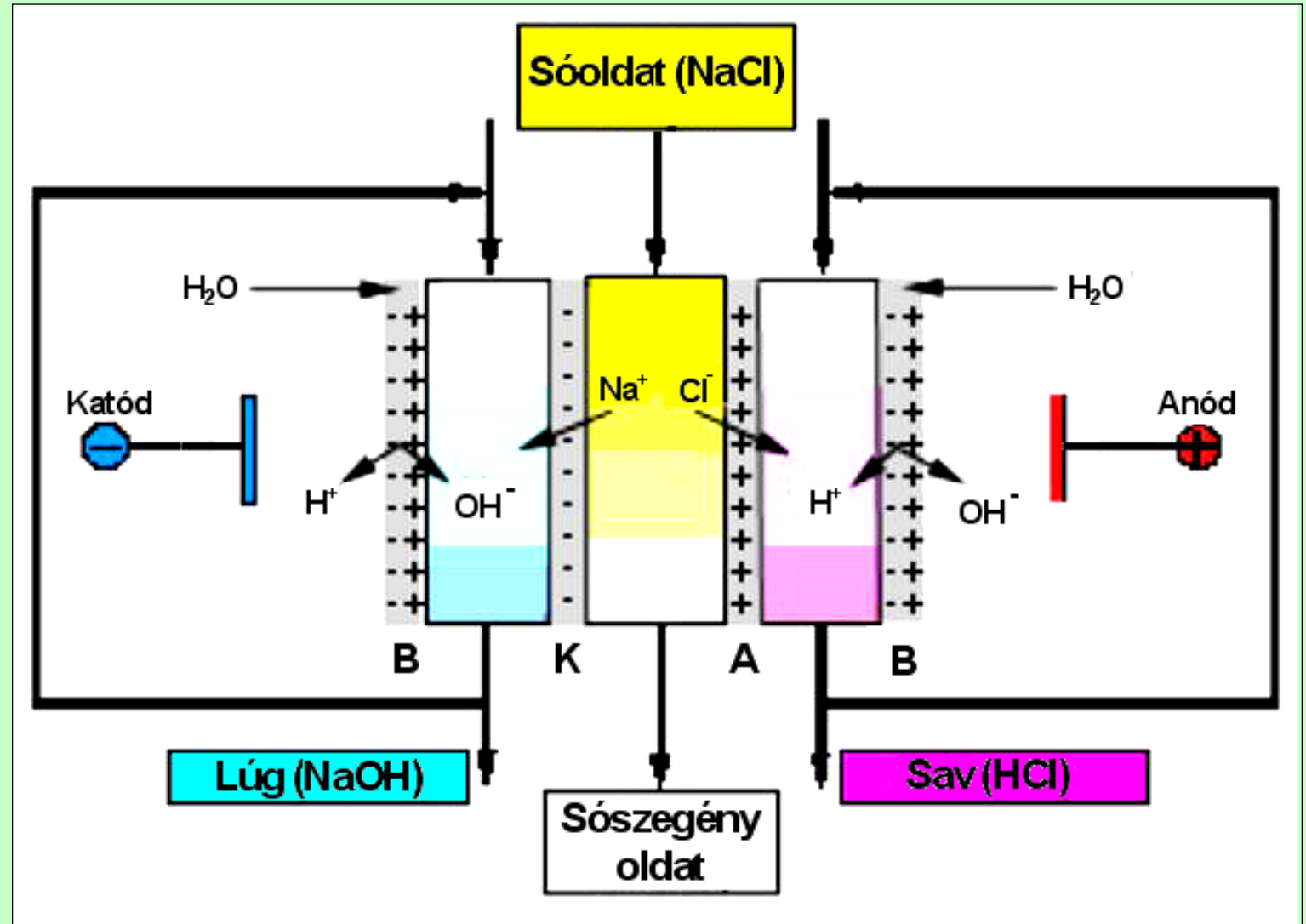


Bipoláris elektrodialízis

Bipoláris membránok: anion- és kationcserélő réteget tartalmaznak.

Áram hatására a víz disszociál →

H^+ és OH^- ionokat ad le.



Membránműveletek jellemzése

Az elektrodialízis alkalmazásai:

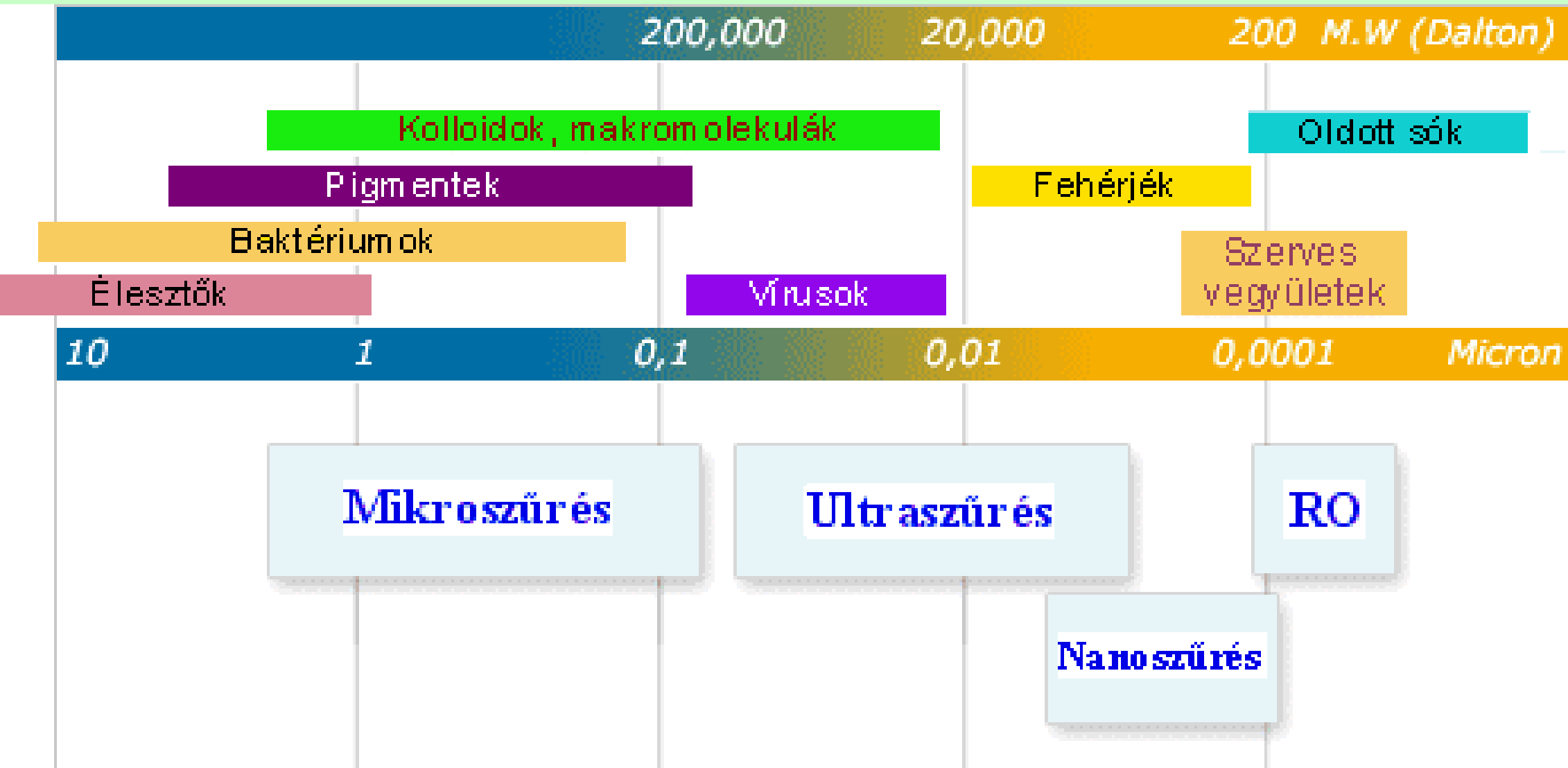
- nagy tisztaságú víz előállításához előkezelésként
- brakkvizek sótelenítése
- só előállítása tengervízből
- tejipari alkalmazások
- fermentációs felhasználások

Bipoláris elektrodialízis:

- savak felszabadítása sókból (pl. tejsav)
- borok savcsökkentése



Membránműveletek mérettartománya

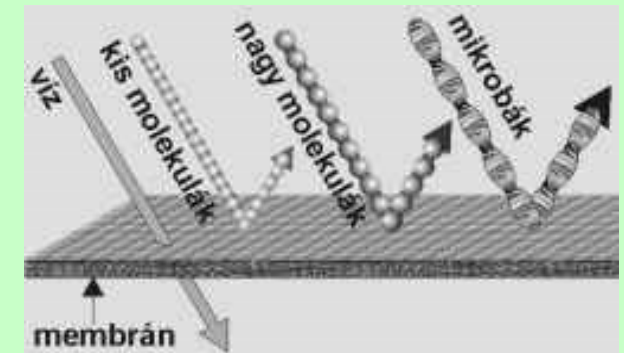


Membránműveletek mérettartománya

Ionok, kis
molekulák



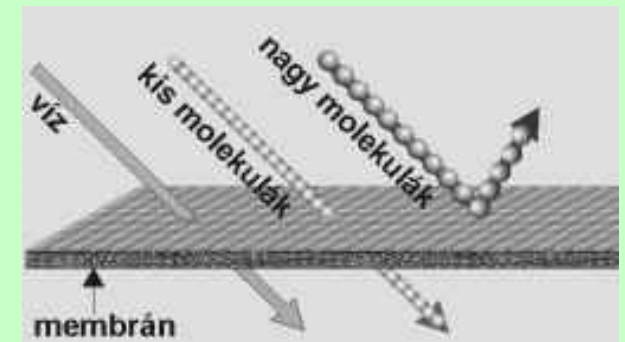
fordított
(reverz)
ozmózis



Makromolekulák



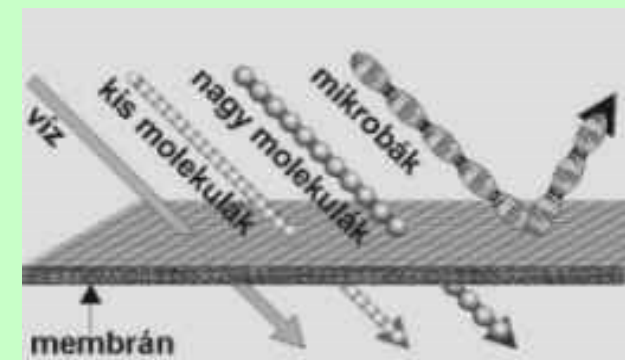
ultraszűrés



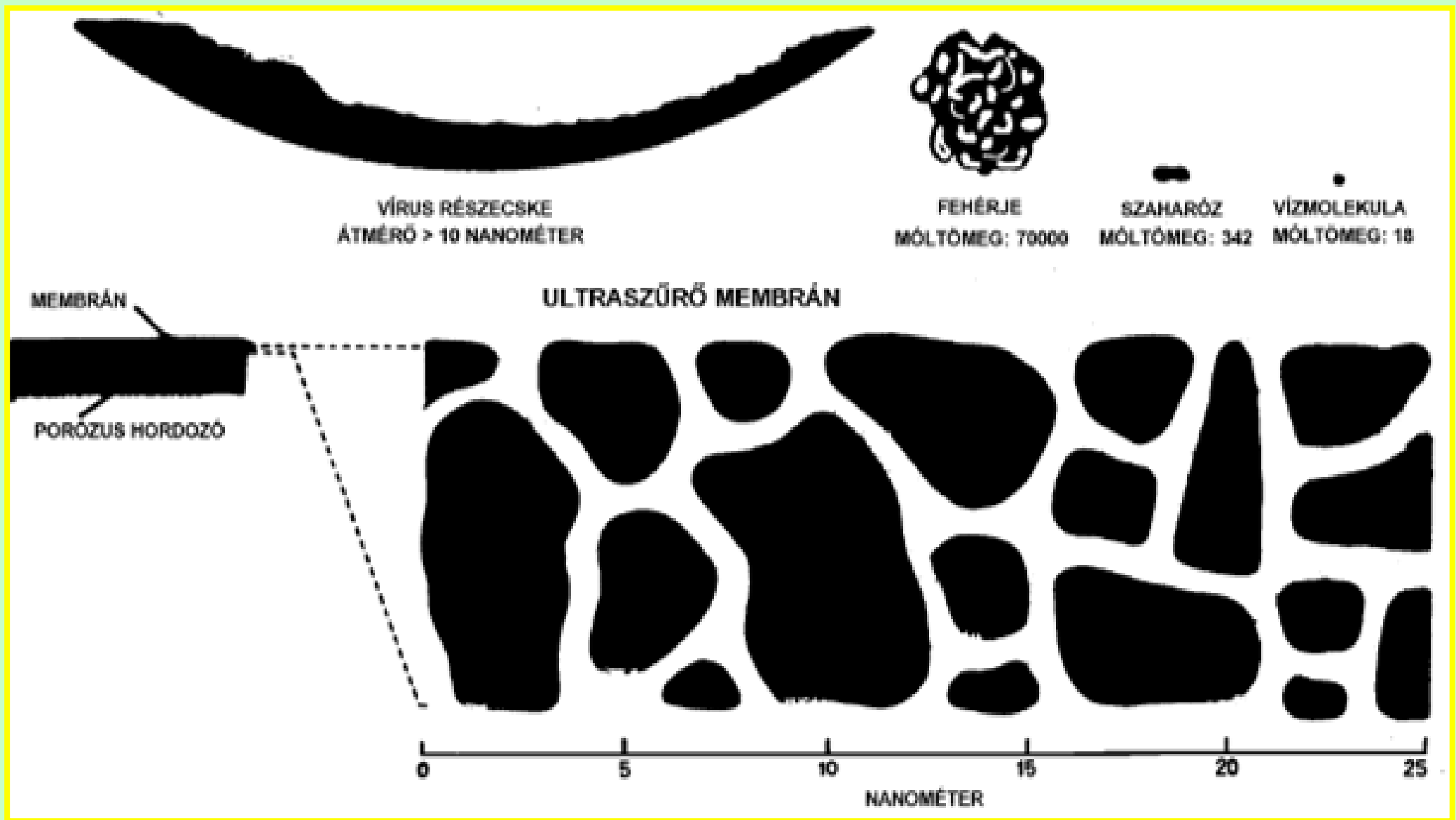
Lebegő, szilárd
részecskék



mikroszűrés



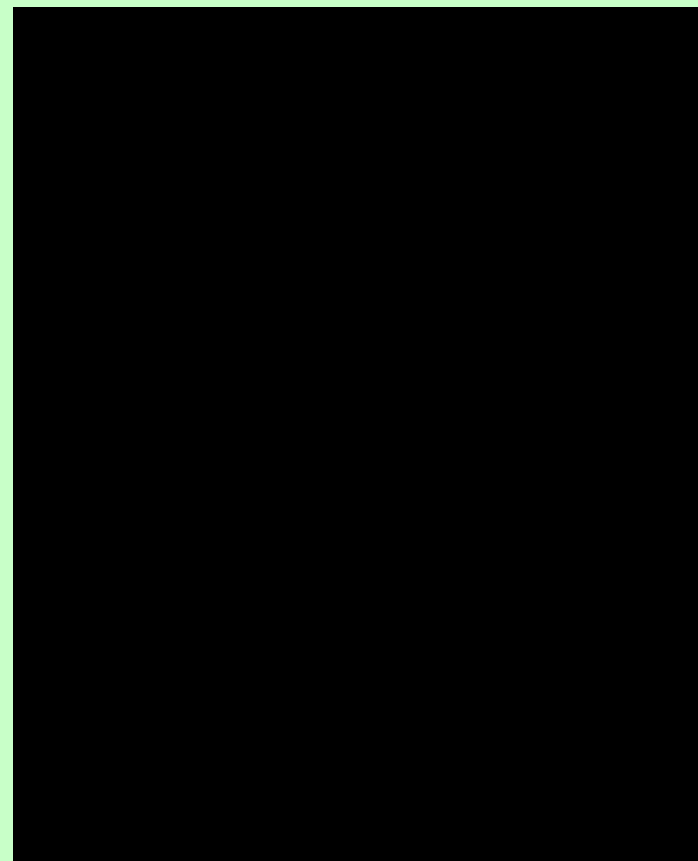
Az ultraszűrő membrán keresztmetszete és a különböző részecskék méretviszonyai



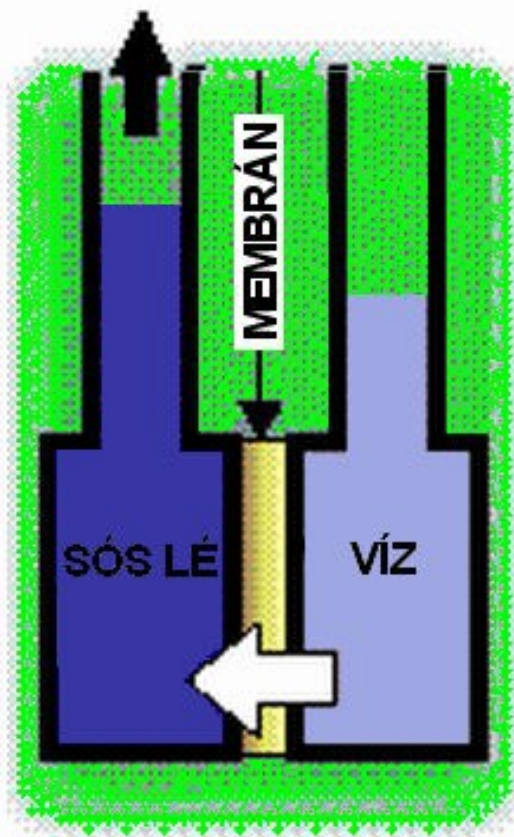
Membránműveletek jellemzése

Fordított (reverz) ozmózis (RO)

- hajtóerő: nyomás (20 - 100 bar)
- mérettartománya: 20 - 500 Dalton
- membrán: nincs valódi pórus
- alkalmazások:
 - tengervíz sótelenítése
 - kazántápvíz előkészítése
 - különlegesen tiszta vizek előállítása (szövettenyésztés, oltóanyagkészítés)

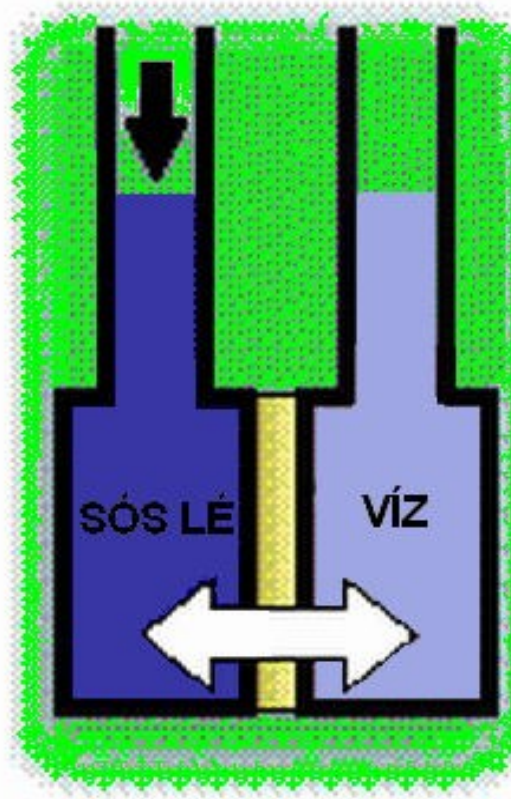


A fordított ozmózis elve



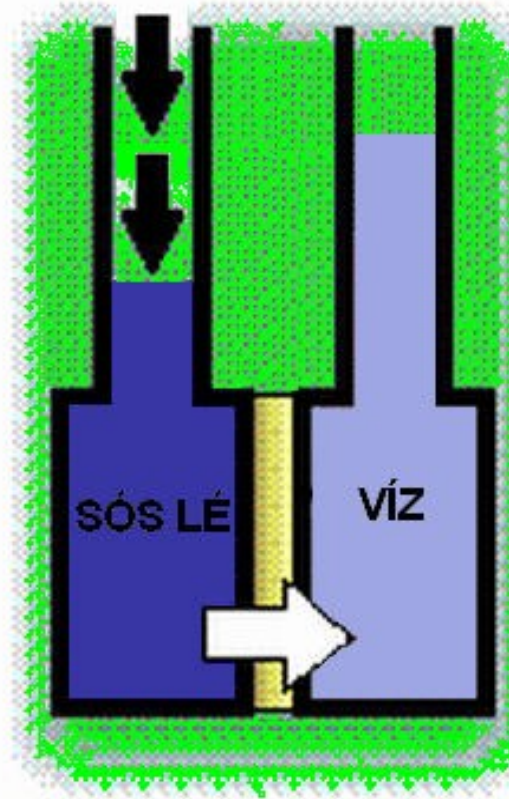
OZMÓZIS

Víz áramlik a töményebb oldatba



EGYENSÚLY

Az ozmózi nyomás egyenlő az üzemi nyomással



FORDÍTOTT OZMÓZIS

A nagyobb üzemi nyomás visszafordítja a víz áramlását a hígabb oldat felé



Membránműveletek jellemzése

Nanoszűrés:

Újabban a reverz ozmózisban belül megkülönböztetik a 100-500 Daltonos tartományt:

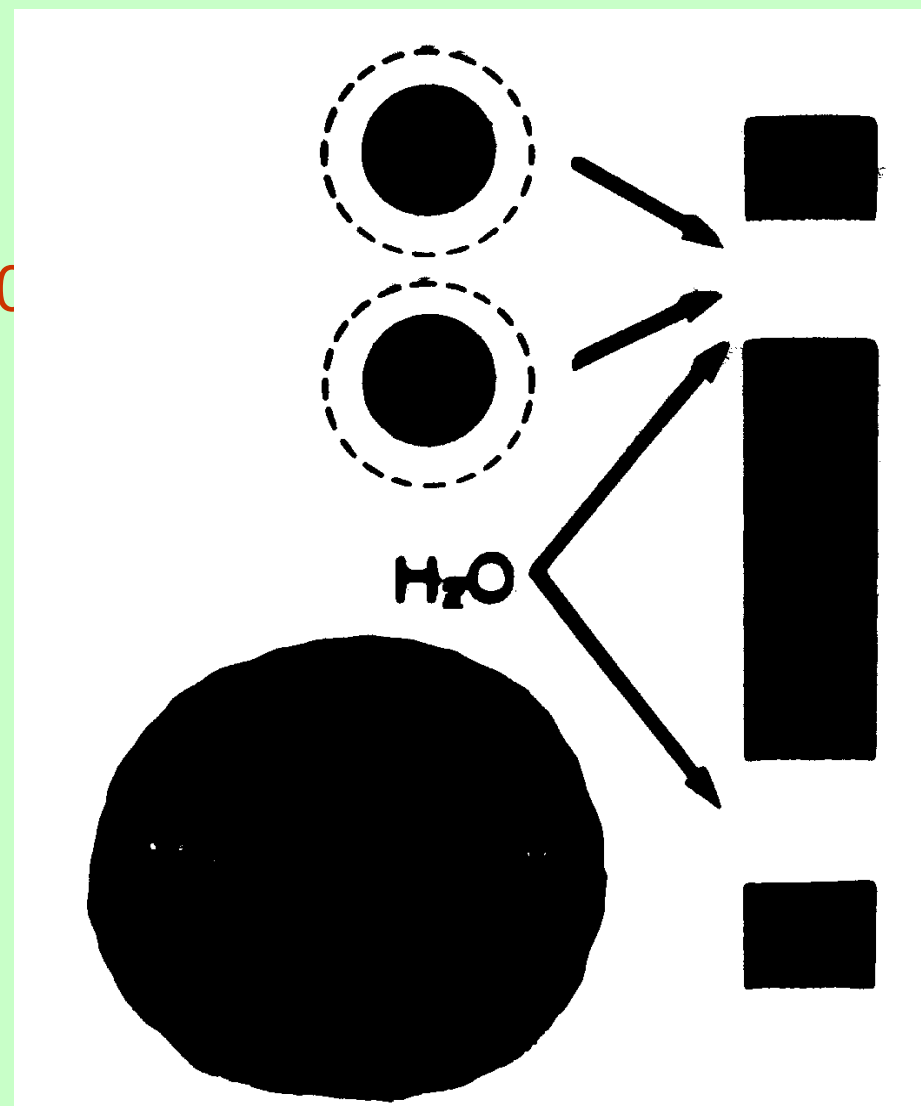
- hajtóerő: nyomás (kisebb, 10 - 30 bar)
- alkalmazások: kis molekulák közötti szelektív elválasztás, pl. savak és cukrok



Membránműveletek jellemzése

Ultraszűrés (UF)

- mérettartománya: 500 – 100 000 nm
- valódi pórusok: 1 – 1000 nm
- méret szerinti elválasztás
- hajtóerő: nyomás (2 - 20 bar)



Membránműveletek jellemzése

Mikroszűrés

- lebegő, szilárd részecskék elválasztása
- jól definiált pórusok: 0,1 – 1 μm
- Szitahatás
- élő sejtek visszatartása
- élelmiszeripari alkalmazása: oldatok sterilezése



A membrános elválasztások elmélete

Koncentrációkülönbség hatására létrejövő komponens áram

Fick törvény:

$$J_i = -D_i \text{ grad } a_i = D \frac{\Delta c}{L}$$

Megoszlási hányados:

$$K = \frac{c_{s1}}{c_{m1}} = \frac{c_{s2}}{c_{m2}}$$

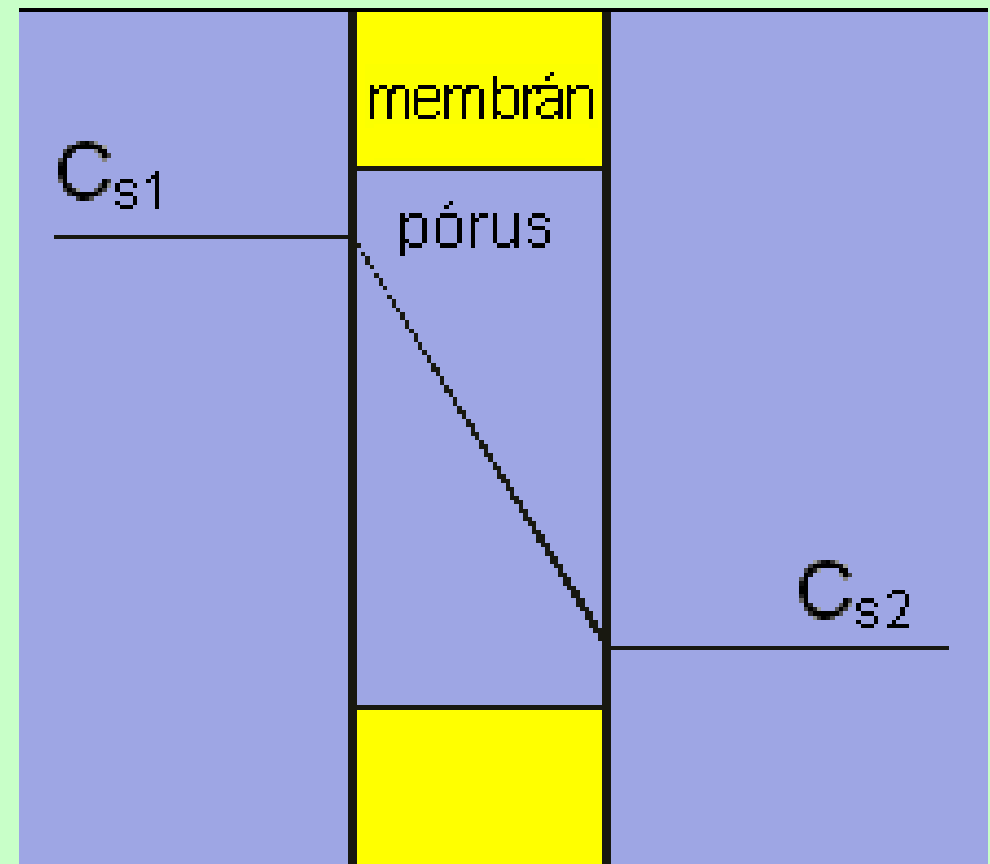


Az elméleti koncentrációprofil

A diffundáló oldott anyag árama:

$$J_i = \frac{D}{L}(c_{m1} - c_{m2}) = \frac{DK}{L}(c_{s1} - c_{s2}) = P_m \Delta c_s$$

- D – diffúziós állandó
- L – pórus hossza
- K – „megoszlási hányados”
- P_m – permeabilitás



A membrános elválasztások elmélete

Nyomáskülönbség hatására létrejövő komponens áram

D'Arcy törvénye:

$$J_{\text{vol}} = -\frac{k}{\mu} \text{ grad } p \quad \Rightarrow \quad = \frac{k \cdot \Delta p}{\mu L}$$

Hagen-Poiseuille törvény:

$$\Rightarrow = \frac{N\pi r^4 \Delta p}{8\eta \Delta x}$$



A membrános elválasztások elmélete

Ozmózisnyomás-különbség hatására létrejövő komponens áram

Van't Hoff törvény:

$$\pi = RT \sum c_i$$

Eredő szűrletáram:

$$J_v = L_p(\Delta p - \Delta\pi)$$

Visszatartóképesség:

$$\sigma = 1 - \frac{c_{s2}}{c_{s1}}$$



A membrános elválasztások elmélete

Anyagáram

az oldószerre:

$$J_v = L_p(\Delta p - \sigma \Delta \pi)$$

az oldott komponensekre:

$$J_i = P_m \Delta c_s + (1 - \sigma) c_s J_v$$



diffúziós
transzport



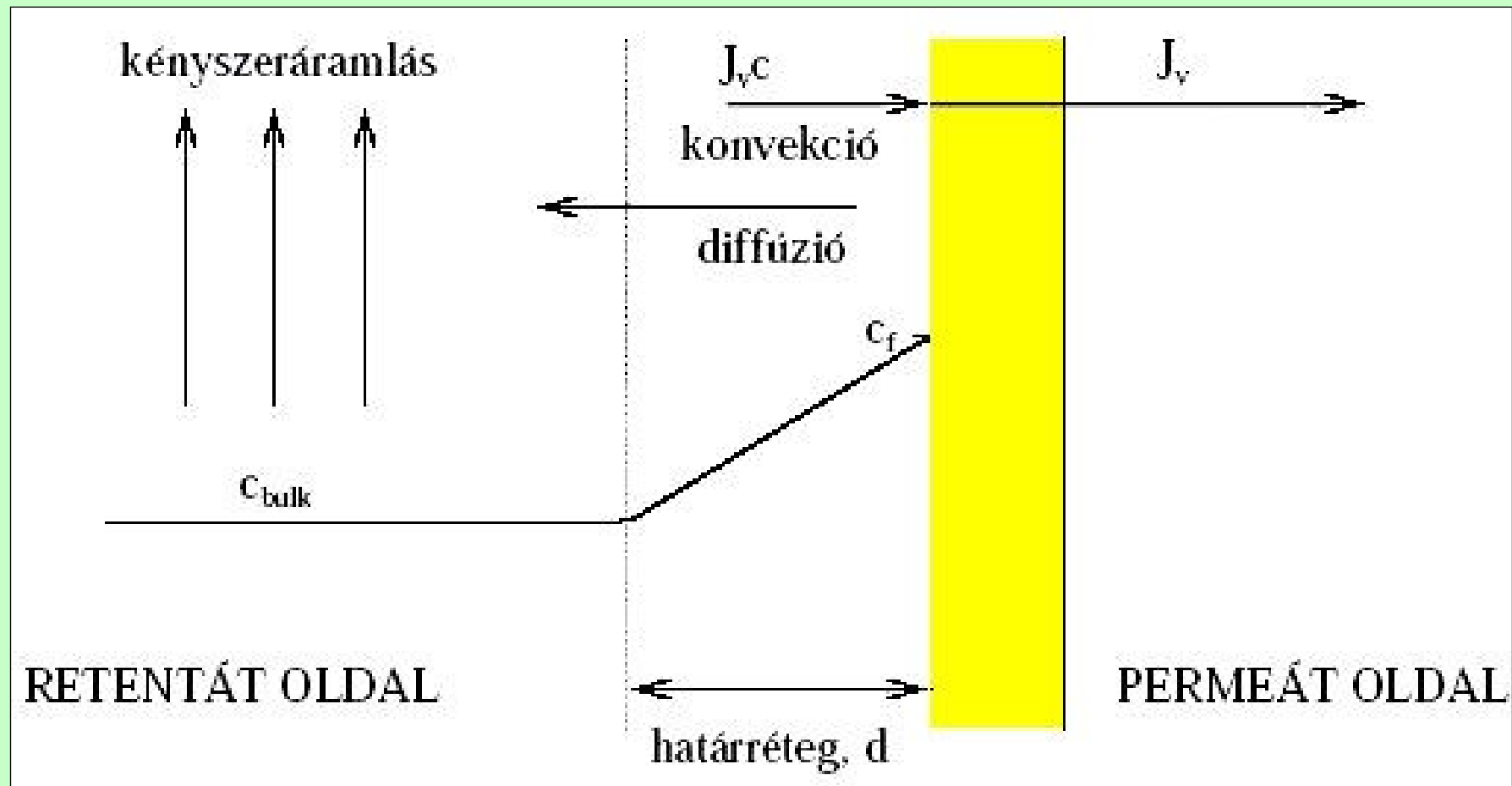
konvekciós
transzport



Eltérések az elméleti koncentrációprofiltól

Koncentrációs polarizáció

KONCENTRÁCIÓS
POLARIZÁCIÓ



Eltérések az elméleti koncentrációprofiltól

Állandósult állapotban:

a konvekció a membrán felületére =
= ellenirányú diffúzió a főtömegbe

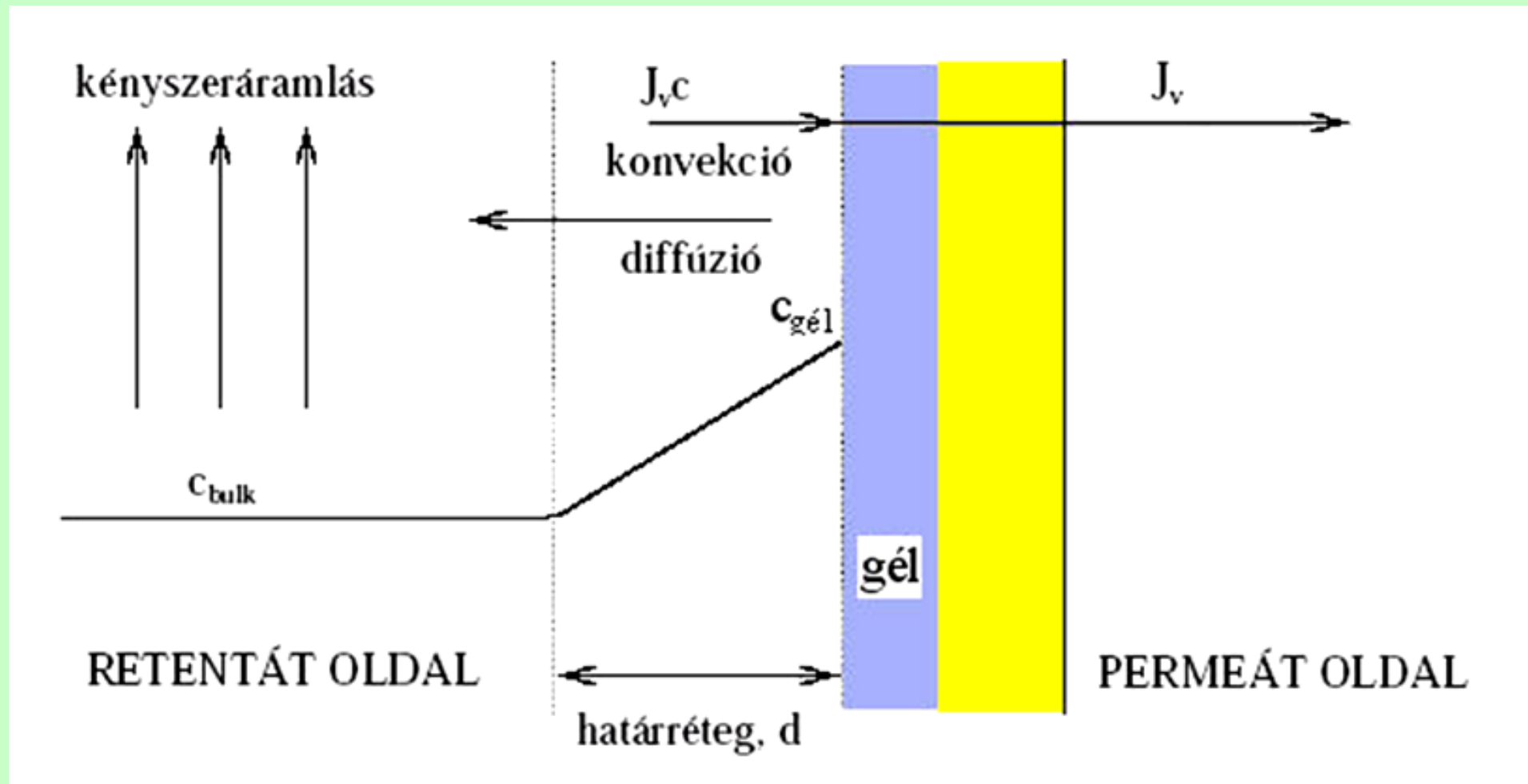
$$J_v c_{\text{bulk}} = D \frac{dc}{dx}$$

$$J_v = \frac{D}{x} \ln \frac{c_{\text{felületi}}}{c_{\text{bulk}}}$$



Eltérések az elméleti koncentrációprofiltól

Gélpolarizáció



Eltérések az elméleti koncentrációprofiltól

A határrétegben:

$$J_v = K \ln \frac{c_{\text{gélesedési}}}{c_{\text{bulk}}}$$

Ellenállásokkal felírva:

$$J_v = \frac{1}{R_m + R_{\text{gél}}} (\Delta p - \Delta \pi)$$

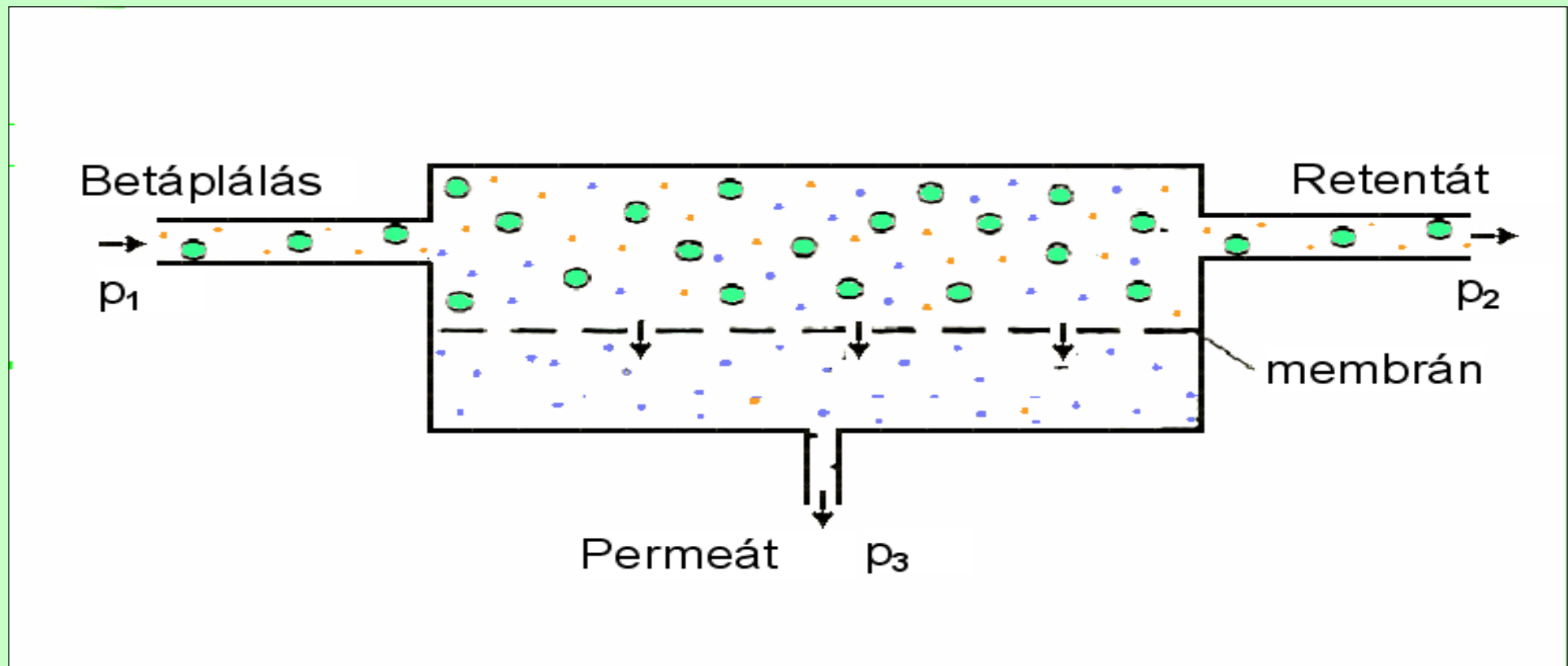


A technológiai paraméterek hatása

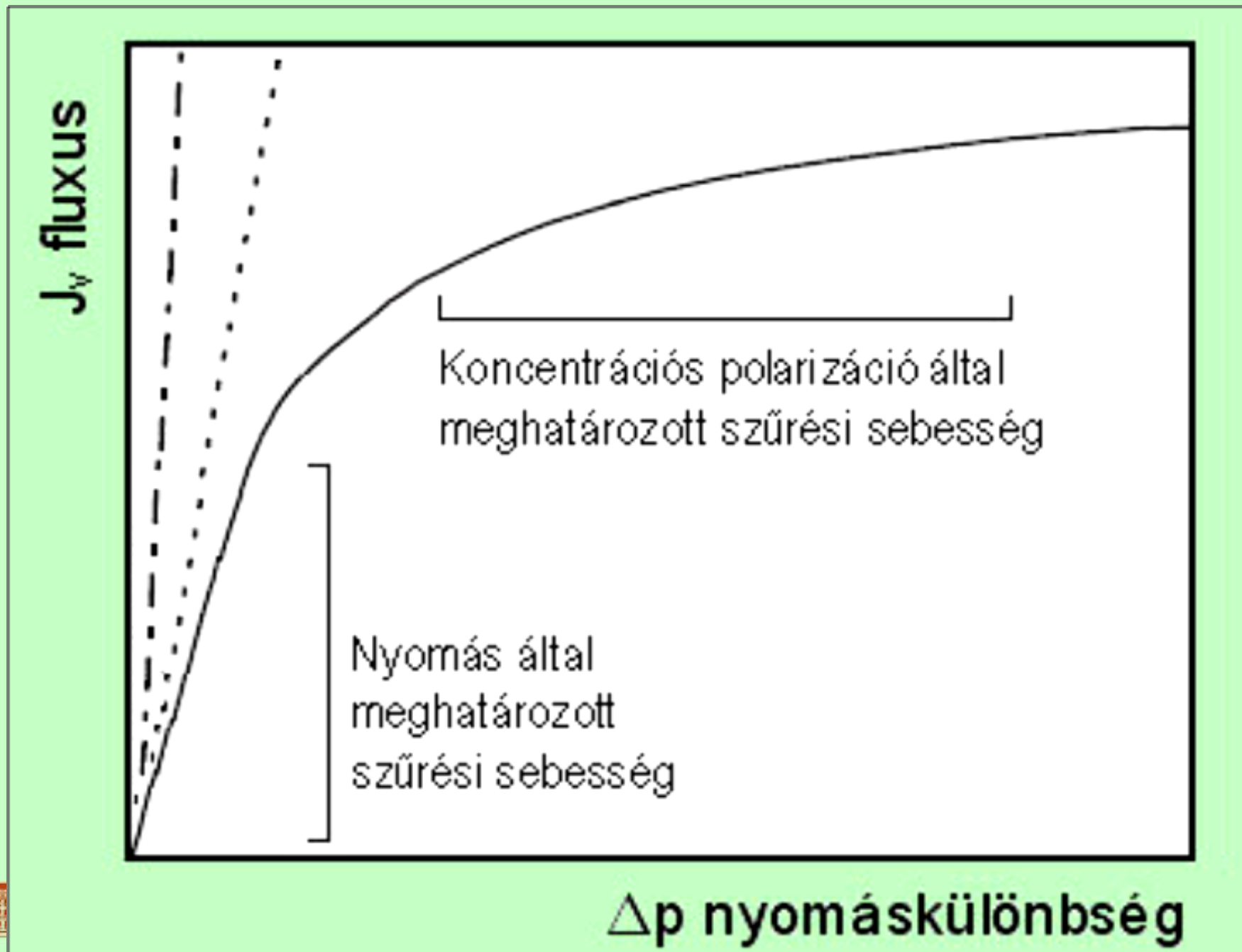
Nyomáskülönbség

hajtóerő:

$$\Delta p = \frac{p_1 + p_2}{2} - p_3$$



A nyomáskülönbség hatása a membránszűrés sebességére



A technológiai paraméterek hatása

Tangenciális sebesség

(keresztáramú szűrés, tangenciális szűrés)

Optimális áramlási sebesség meghatározása:

az áramlás gyorsítása növeli a szűrési sebességet és a retenciót
de nő a szivattyúzás energiaigénye \longrightarrow és a rendszer
melegedése.

A turbulencia jellemezhető:

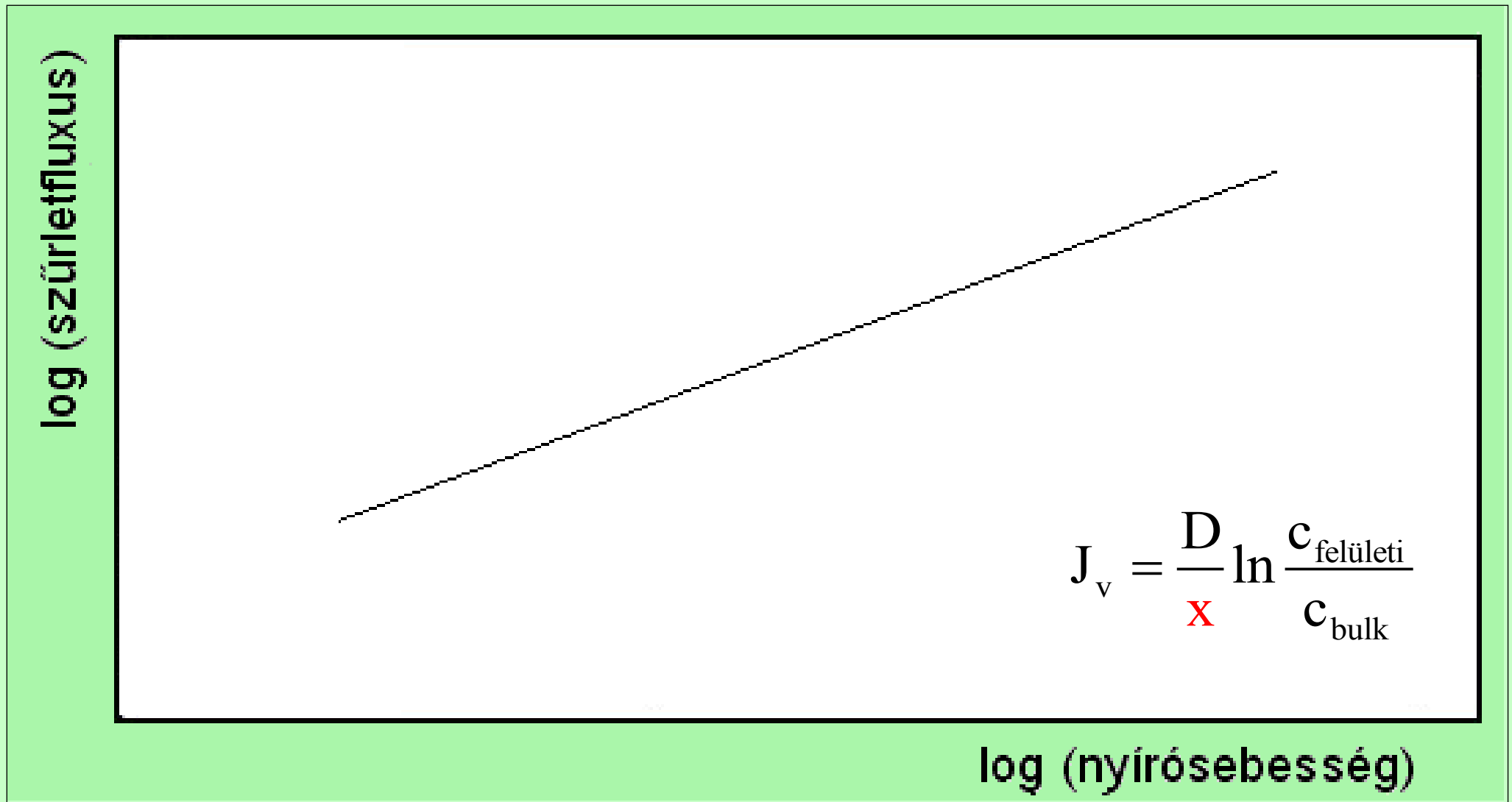
Re szám

P/V

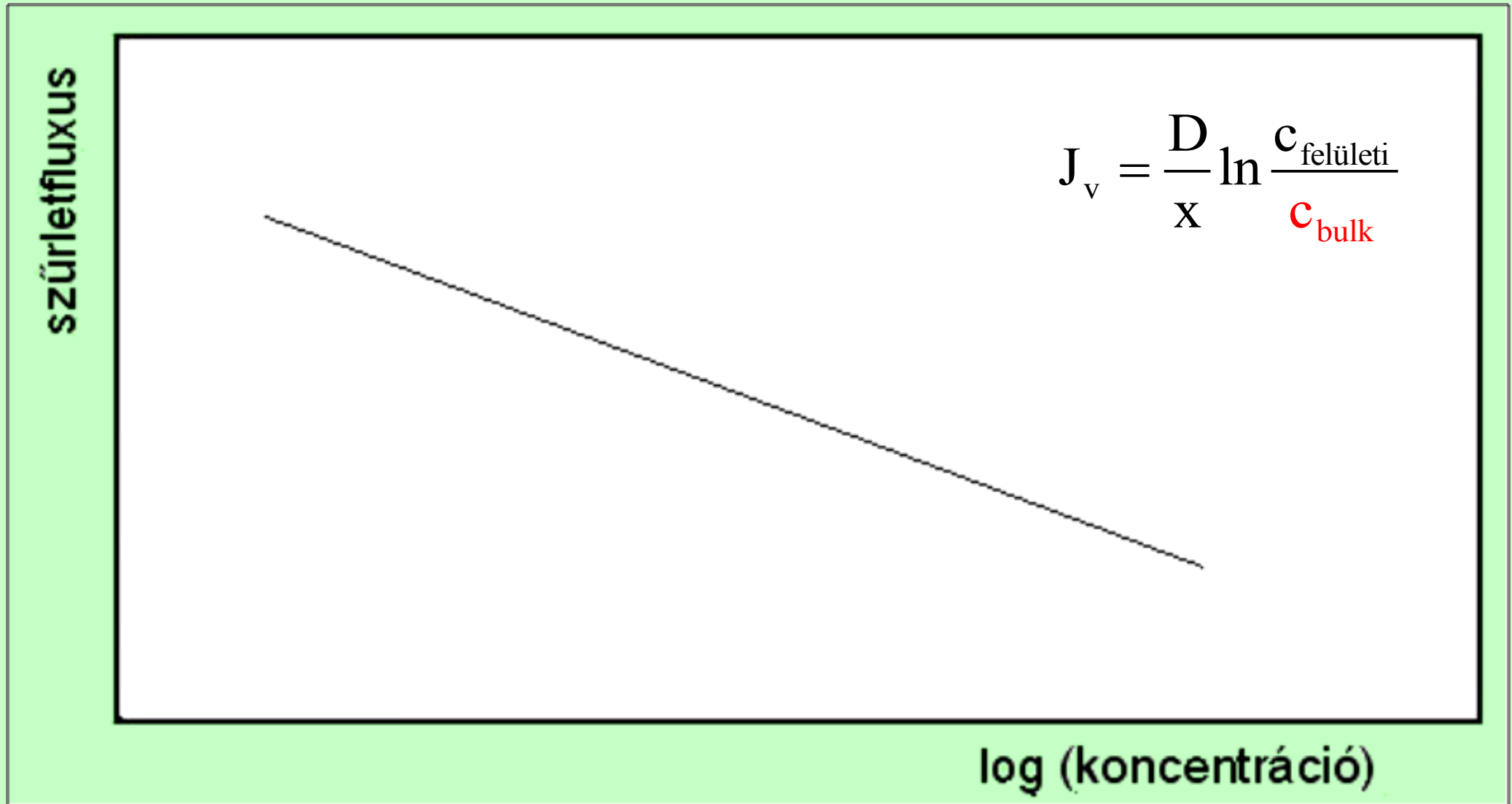
nyírósebesség



A permeát fluxus és a nyírósebesség összefüggése



A fehérjekoncentráció hatása a membránszűrés sebességére



A technológiai paraméterek hatása

A membrán (ifjú)kora

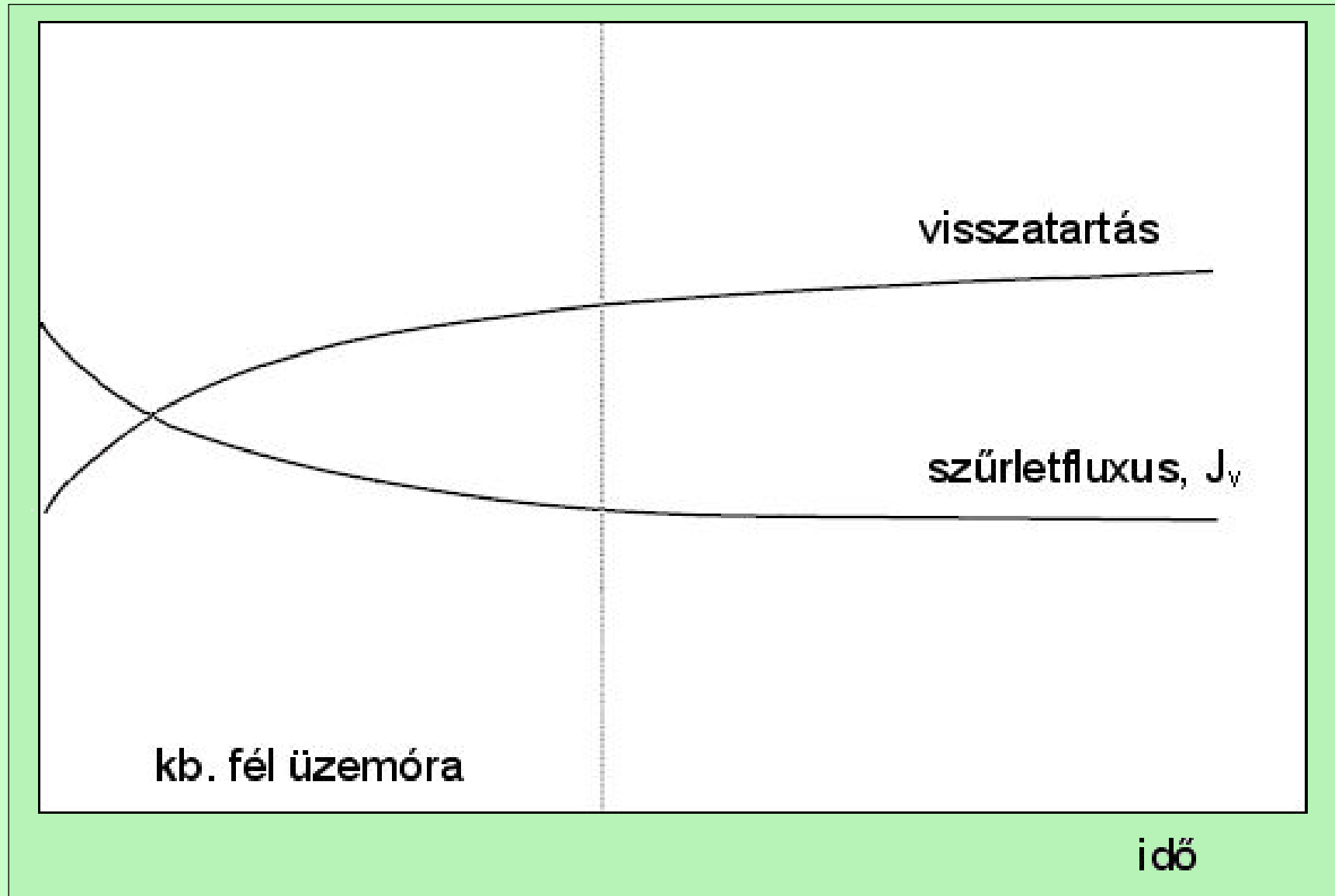
A vadonatúj membrán tulajdonságai a legelső használatba vételnél erősen megváltoznak.

A membrán öregedésére ható legfontosabb tényezők:

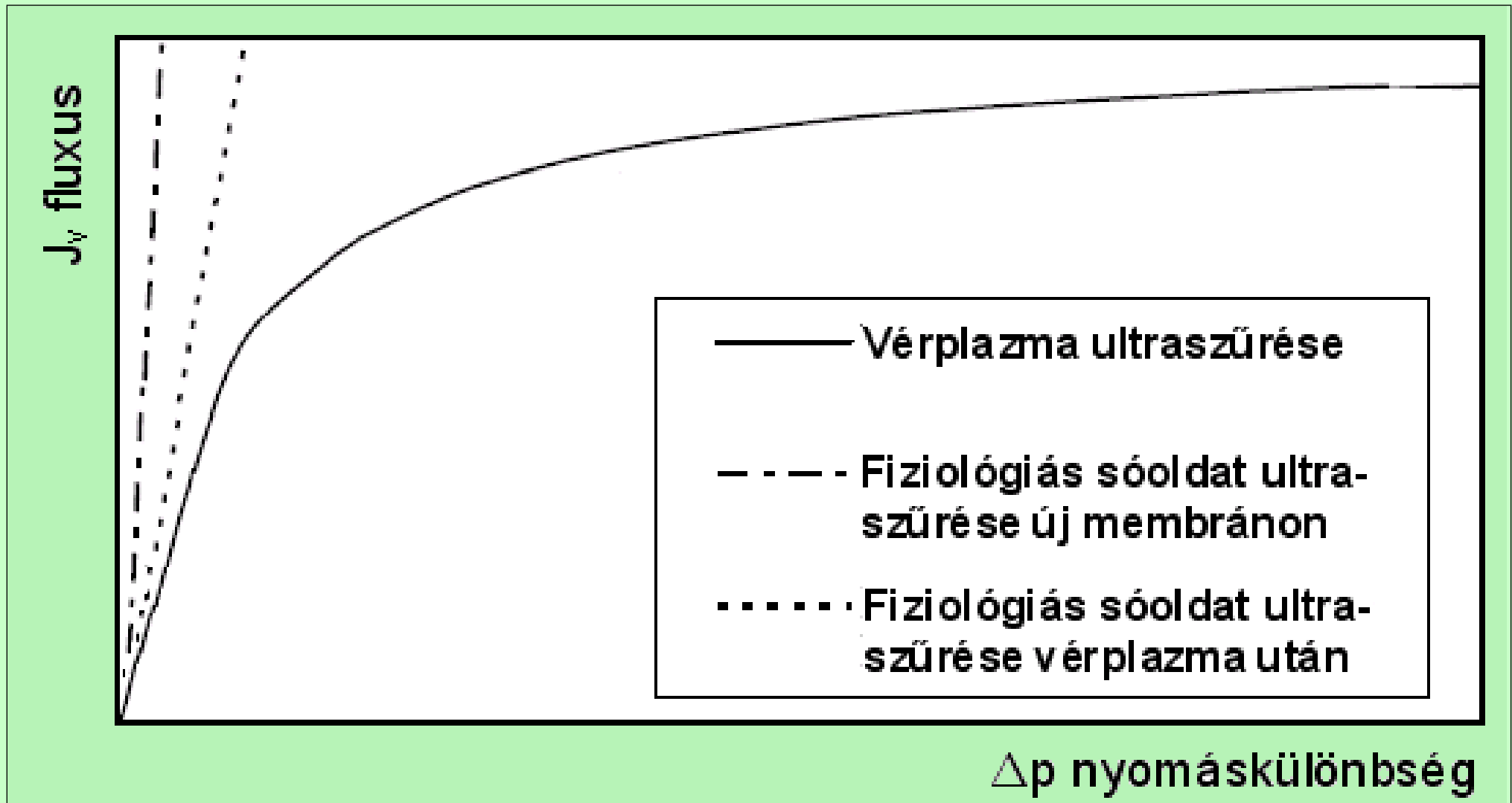
- a fehérjék adszorpciója a membrán felületén
- (irreverzibilis) gél vagy réteggképződés a felületen
- szilárd részecskék (sejttörmelékek), vagy fehérjék "beszorulása" a membrán pórusaiba



Az új membrán tulajdonságainak változása



A membrán “előéletének” hatása



A technológiai paraméterek hatása

Hőmérséklet

- viszkozitás,
- adszorpciós folyamatok egyensúlyi viszonyai,
- molekulák diffúziós állandói,
- membrán anyagának tulajdonságai változnak.



A technológiai paraméterek hatása

Káros hatások minimalizálása:

- koncentrációs polarizáció csökkentése
- adszorpció és aggregáció minimalizálása

Tisztítás, regenerálás:

- mosás
- kémiai kezelés (erős savak és/vagy bázisok)
- proteolitikus enzimekkel



A membránszűrés anyagmérlegei

Alapfogalmak

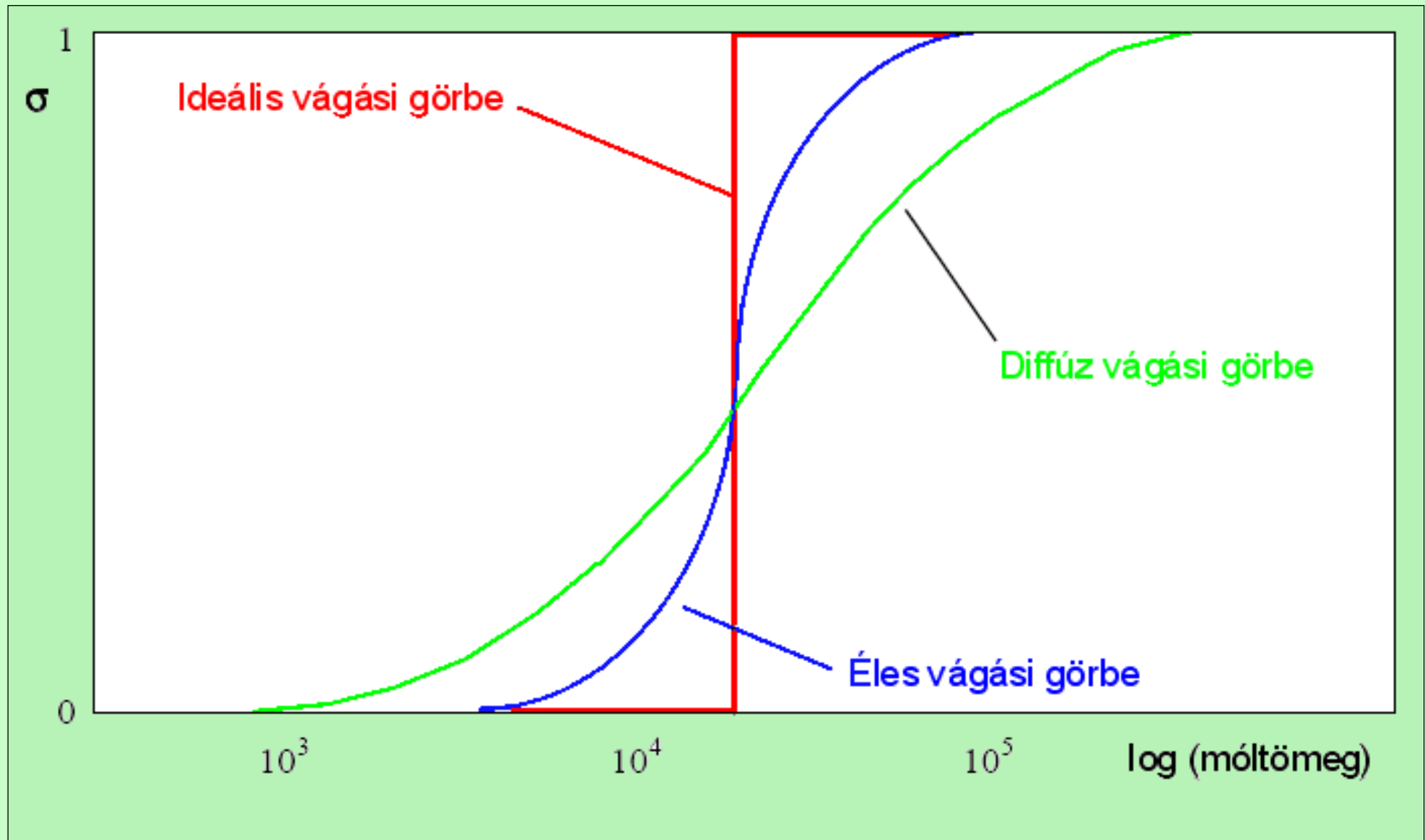
- membrán szelektivitása:

$$\sigma = 1 - \frac{c_p}{c_r}$$

- vágási (cutoff) érték: az a molekulatömeg, amelyet az adott membrán 90 %-ban (más konvenció szerint 50 %-ban) visszatart.



Vágási görbék

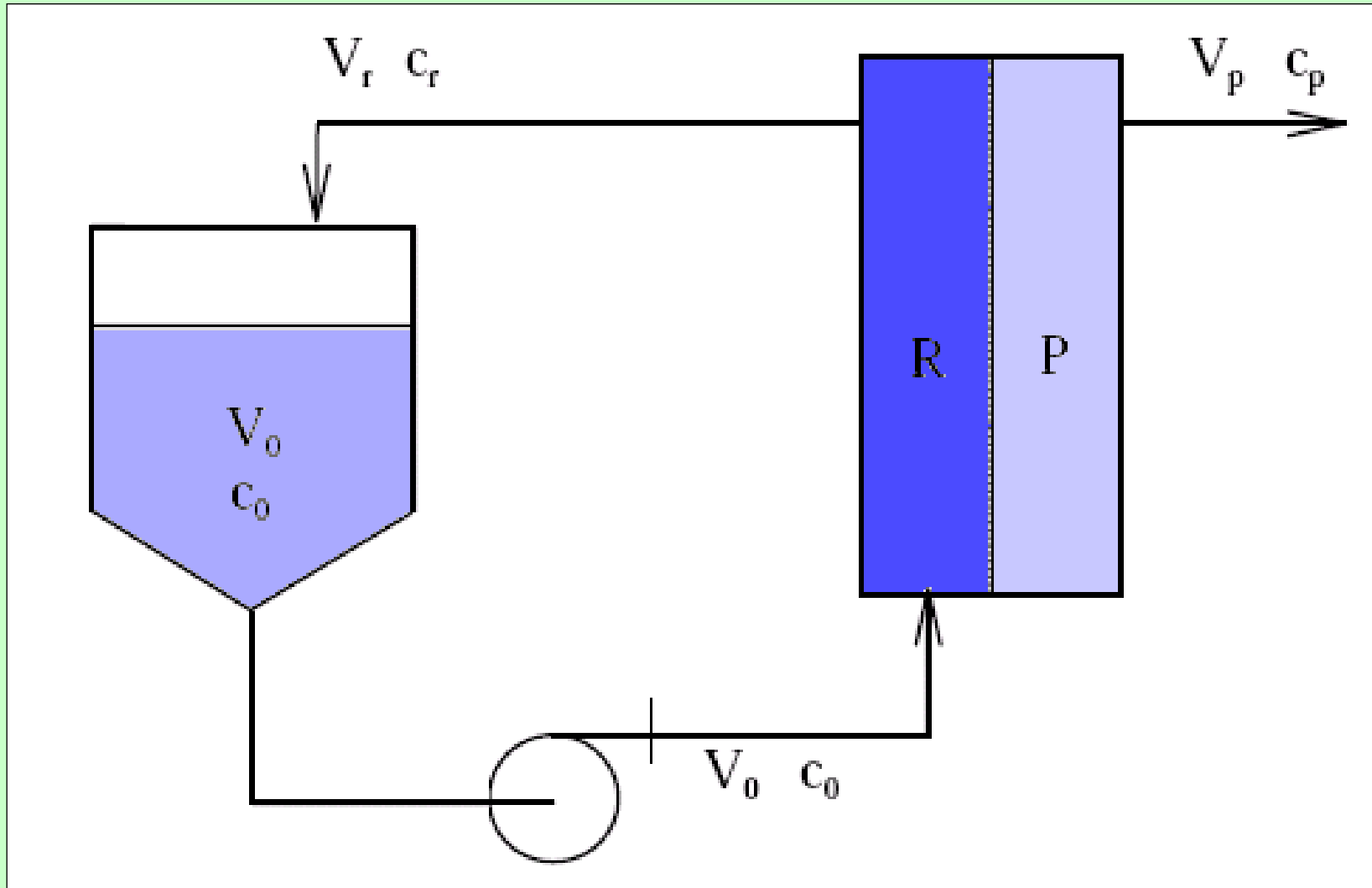


A membránszűrés anyagmérlegei

- permeabilitás (L_p) vagy vízérték: a tiszta oldószer (ionmentes víz) fluxusa a membránon üzemi nyomáson és hőmérsékleten.
[$m^3/m^2 \times h$] vagy [$m^3/m^2 \times h \times bar$]
- folyadékáramok:
 - betáplálás (feladás, input) ($V_0 ; c_0$)
 - membránon áthaladó anyag: szűrlet = permeátum ($V_p ; c_p$)
 - visszatartott anyag: koncentrátum = retentát ($V_r ; c_r$)



Membránszűrő berendezés folyamatábrája



A membránszűrés anyagmérlegei

- koncentrációs faktor (CF): a visszatartott komponensek betöményítésének mértékét adhatjuk meg vele:

$$CF = \frac{\text{bevitt térfogat}}{\text{visszatartott térfogat}} = \frac{V_0}{V_r}$$

- kihozatal (recovery): a megszűrt, megtisztított oldat mennyiségére jellemző:

$$R = \frac{\text{permeát térfogat}}{\text{bevitt térfogat}} = \frac{V_p}{V_0}$$

- összefüggésük:

$$CF = \frac{1}{1 - R}$$



A membránszűrés anyagmérlegei

Koncentrálás membránnal

Az oldat keringetése során az oldószer és a vissza nem tartott komponensek folyamatosan távoznak a rendszerből, ezáltal a térfogat csökken, azaz a visszatartott komponensek koncentrációja növekszik.

Anyagmérleg:

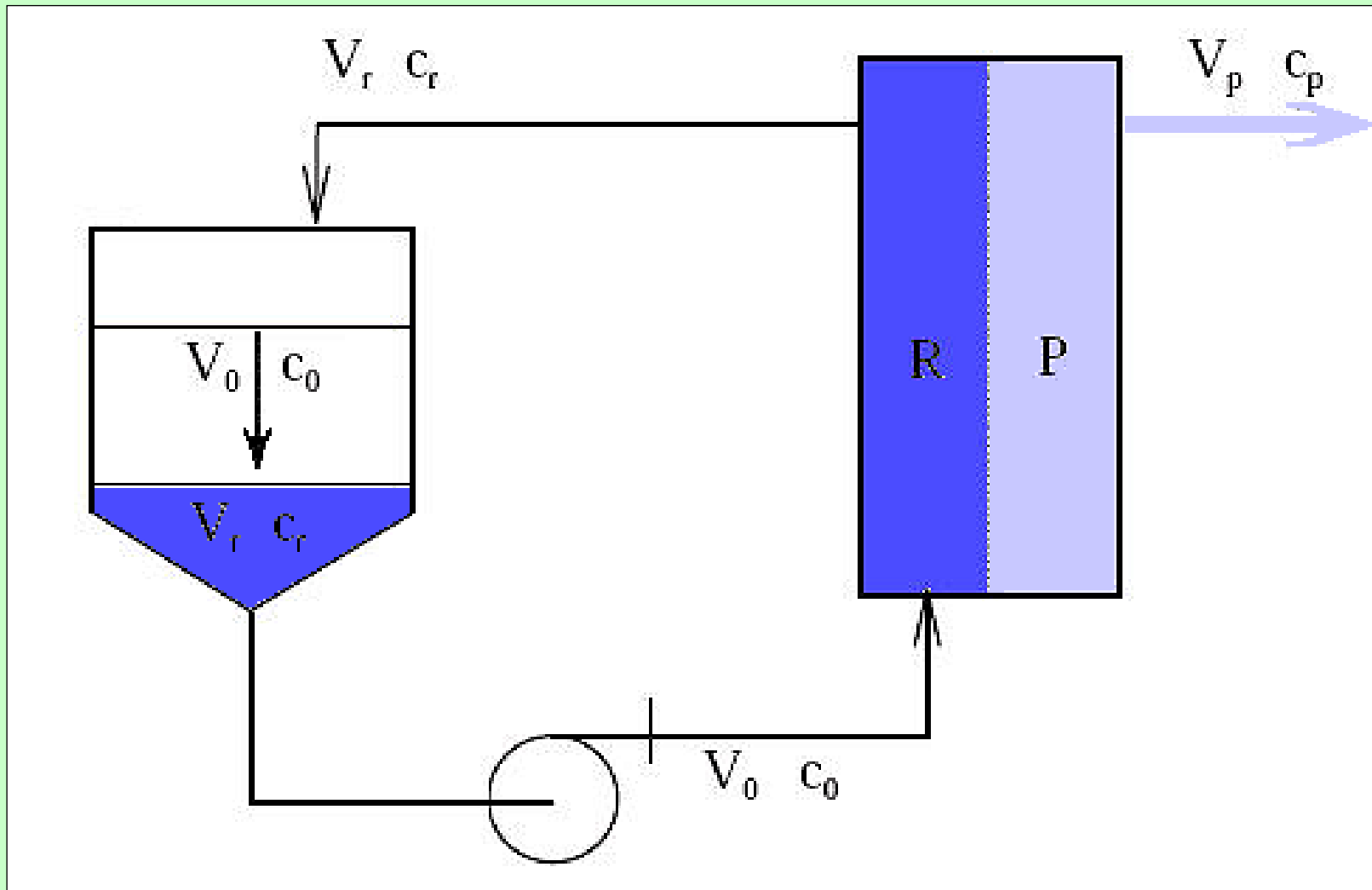
$$V_0 c_0 = V_r c_r + V_p c_p$$

$$c_p = \frac{V_0 c_0 - V_r c_r}{V_p}$$

$$c_r = \frac{V_0 c_0 - V_p c_p}{V_r}$$



Membrános koncentráls folyamatábrája



A membránszűrés anyagmérlegei

A koncentráció differenciális anyagmérlege:

$$\frac{d(V_R c_R)}{dt} = 0 - W c_R (1 - \sigma)$$

ahol:

$$W = -\frac{dV}{dt}$$

integrálva:

$$\ln \frac{c_R}{c_0} = \sigma \ln CF$$



$$c_R = c_0 CF^\sigma$$



A membránszűrés anyagmérlegei

Elválasztás membránszűréssel

A különböző visszatartást az eltérő σ értékek számszerűsítik. Azonos σ értékek esetén az elválasztás nem valósítható meg.

Elválasztás vizsgálatához:

$$\frac{c_{1R}}{c_{2R}} = \frac{c_{10}}{c_{20}} \frac{CF^{\sigma_1}}{CF^{\sigma_2}}$$

$$\left(\frac{c_1}{c_2} \right)_R = \left(\frac{c_1}{c_2} \right)_0 CF^{(\sigma_1 - \sigma_2)}$$



Sajtgyári savó ultraszűrése

4.3.5.3.1. táblázat: Sajtgyári savó ultraszűrése

	Betáplált savó	Koncentrátum	Permeátum
Fehérje, %	0,80	5,87	0
Laktóz, %	4,80	4,80	4,80
Só, %	0,70	0,70	0,70
Zsír, %	0,05	0,37	0
Fehérje % /összes szárazanyag	12,60	50,00	0
Laktóz % / összes szárazanyag	75,59	40,89	87,27
Fehérje/laktóz %	16,67	122,29	0



A membránszűrés anyagmérlegei

Diaszűrés

Víz hozzáadásával és szűrlet formájában való elvételével a kis molekulatömegű anyagokat szelektíven eltávolítják, kimossák az oldatból.

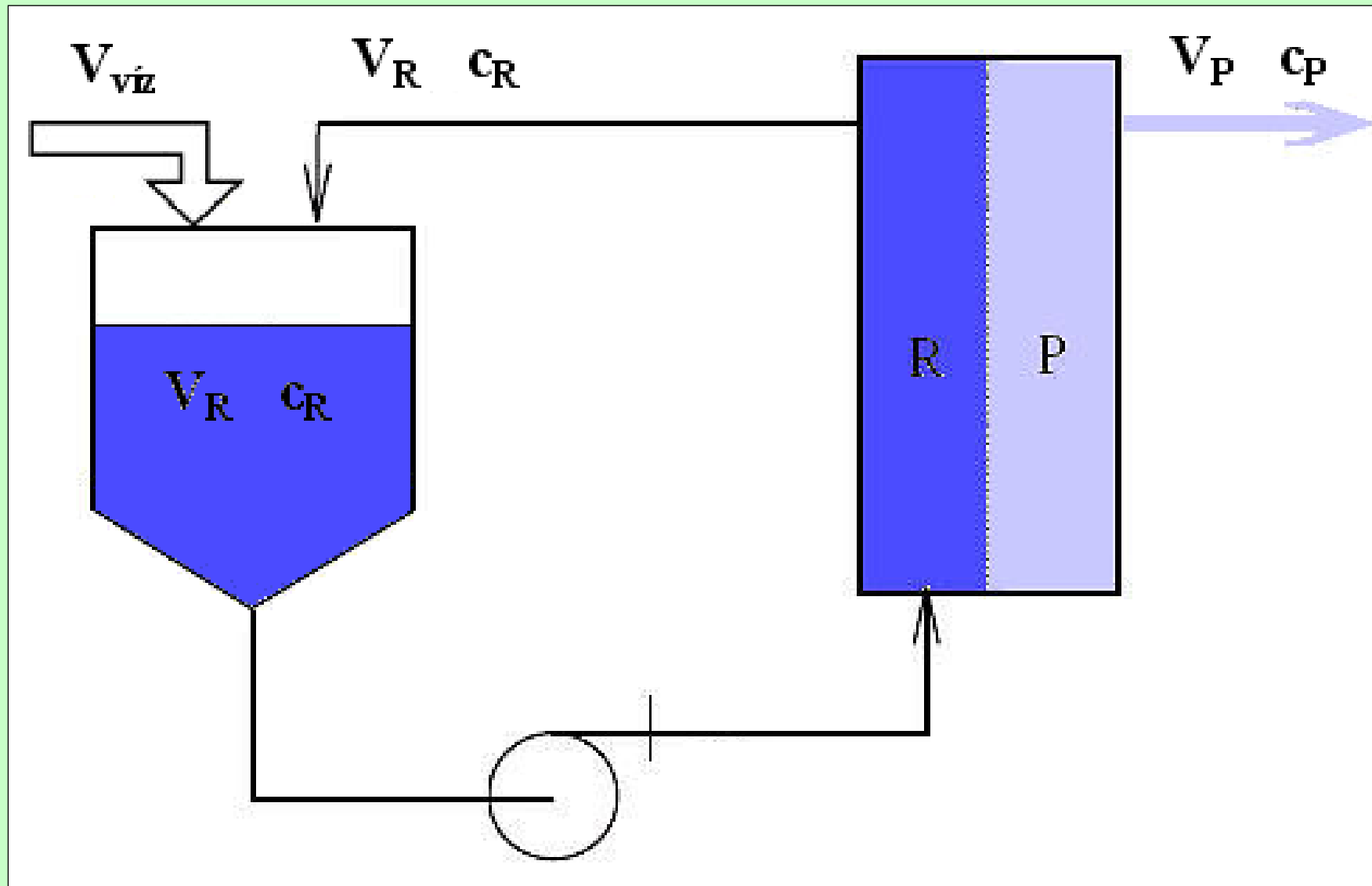
Állandó retentát térfogat:

$$V_0 = V_R$$

$$V_P = V_{\text{víz}}$$



A diaszűrés folyamatábrája



A diaszűrés anyagmérlegei

Anyagmérleg:

$$\frac{d(V_R c_R)}{dt} = 0 - W c_R (1 - \sigma)$$

mivel $V_R = V_0 = \text{állandó}$:

$$V_R \frac{dc_R}{dt} = 0 - \frac{dV_{\text{víz}}}{dt} c_R (1 - \sigma)$$

integrálva:

$$\ln \frac{c_R}{c_0} = - \left(1 - \sigma\right) \frac{V_{\text{víz}}}{V_0}$$



$$c_R = c_0 e^{- \left(1 - \sigma\right) \frac{V_{\text{víz}}}{V_0}}$$



A membránszűrés anyagmérlegei

Teljes visszatartás esetén (nagy molekulatömeg, $\sigma = 1$):

$c_R = c_0$ \longrightarrow a koncentráció nem csökken.

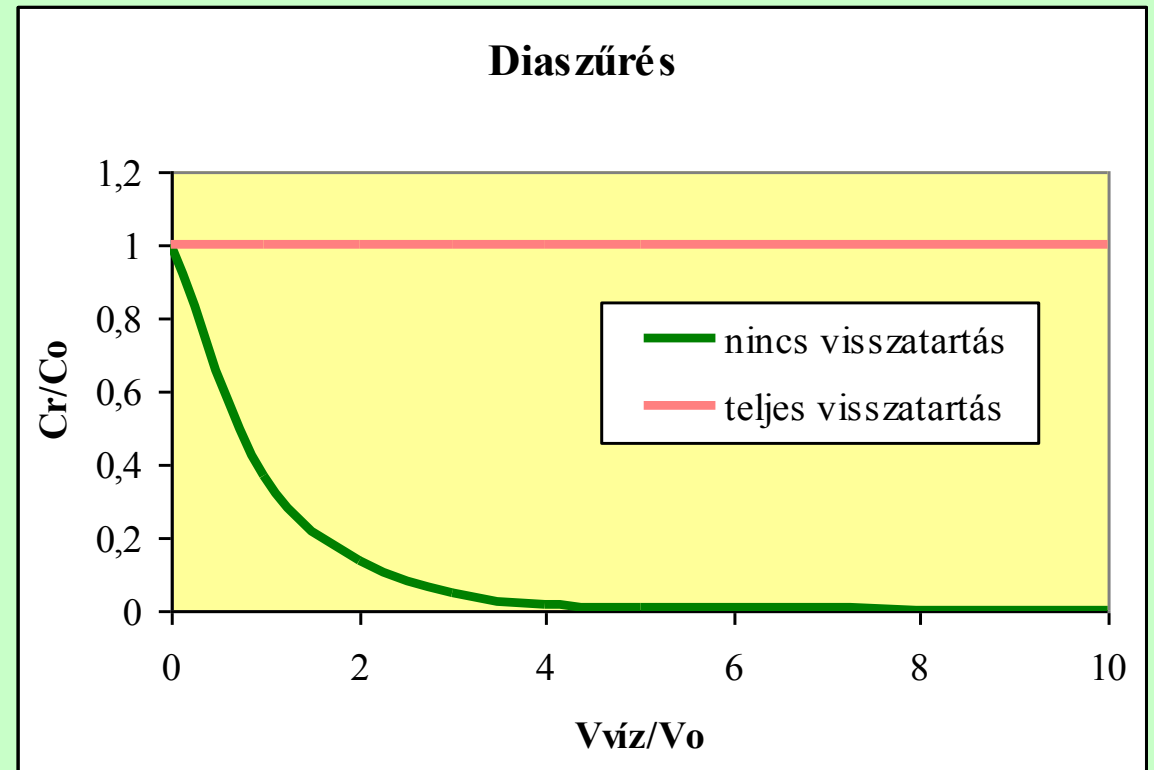
Kis molekulájú anyagoknál ($\sigma = 0$):

$c_R = c_0 e^{-\frac{V_{\text{víz}}}{V_0}}$ \longrightarrow a koncentráció exponenciálisan csökken.



Diaszűrés

	Eltávolítás, %
1	63.2121
2	86.4665
3	95.0213
4	98.1684
5	99.3262
10	99.9995



A diaszűrés anyagmérlegei

Elválasztás, tisztítás diaszűréssel

két komponensre:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}_R = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}_0 \exp\left[-\frac{V_{\text{viz}}}{V_0}(\sigma_2 - \sigma_1)\right]$$



Diaszűrés

4.3.5.6.1. táblázat: Diaszűrés hatása a makromolekulák tisztaságára

$\frac{V_{\text{víz}}}{V_0}$	$C_{\text{fehérje}} \%$	$C_{\text{só}} \%$	$C_{\text{só}}$	összes szárazanyag	$C_{\text{fehérje}} \%$
			$C_{\text{fehérje}}$		összes szárazanyag
0	15	4,00	0,27	19,0	79,0
1	15	1,50	0,10	16,5	90,9
2	15	0,54	0,04	15,5	96,8
3	15	0,20	0,01	15,2	98,7



A membránszűrés anyagmérlegei

Az ultraszűrés munkavonala

$$J_v = \frac{D}{x} (\ln c_f - \ln c_{bulk})$$

konstansokkal felírva:

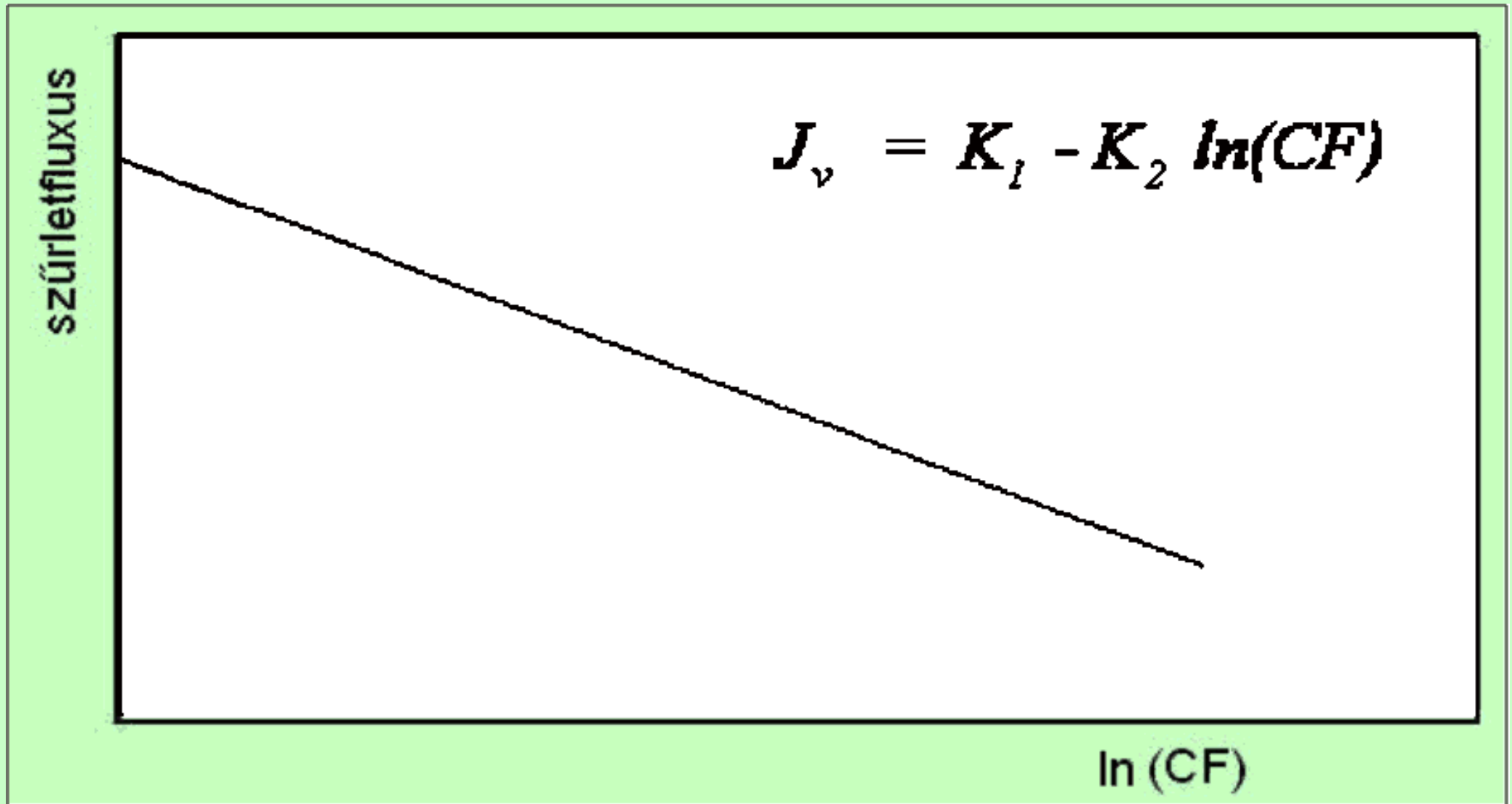
$$J_v = A_1 - A_2 \ln c_b$$

$$c_R = c_0 CF^\sigma$$

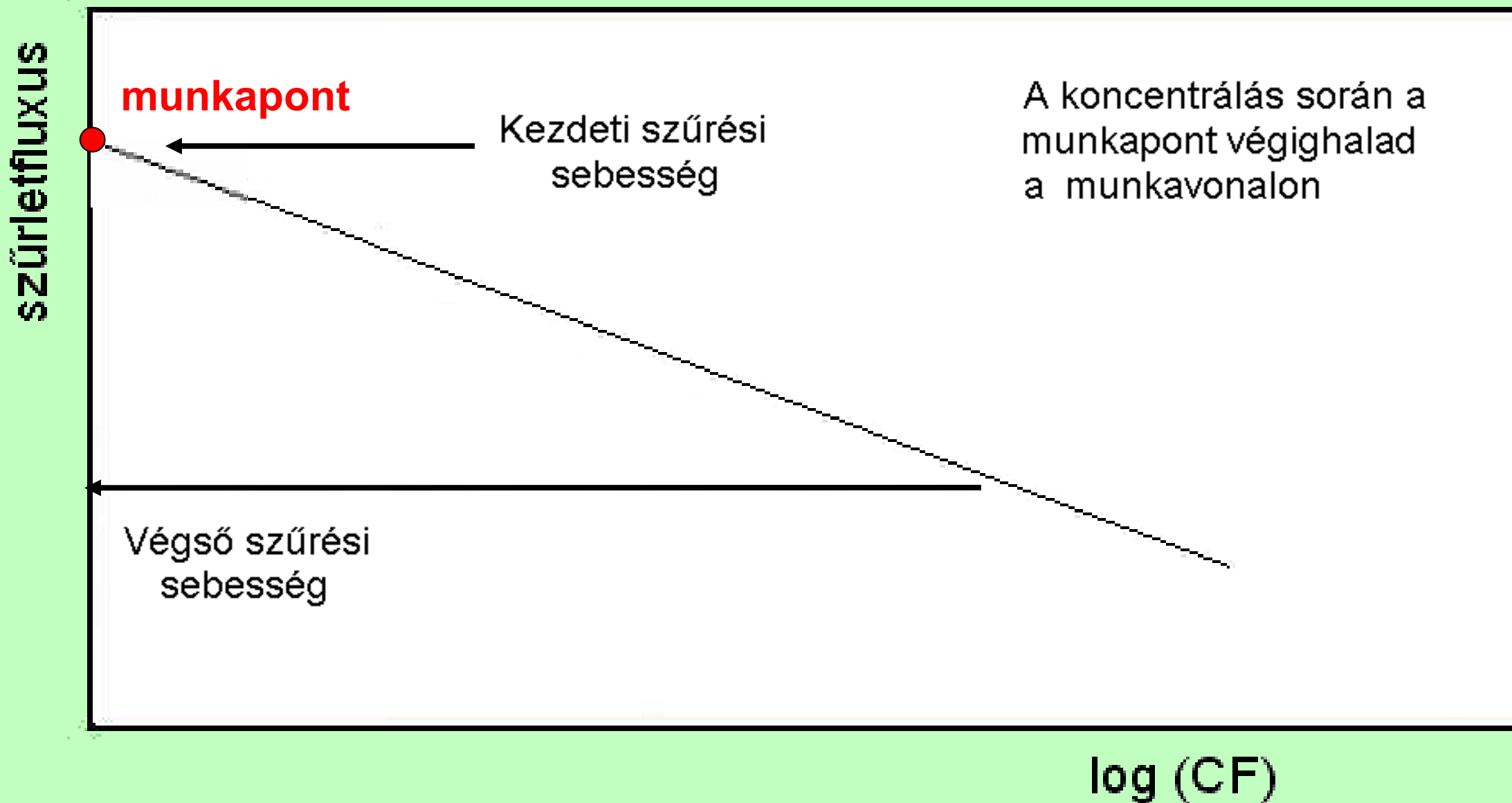
$$J_v = K_1 - K_2 \ln CF$$



Az ultraszűrés munkavonala



A membránszűrés munkavonala



A membránszűrés anyagmérlegei

Térfogatáram:

$$\frac{dV}{dt} = -AJ_v$$

Átlagos fluxus:

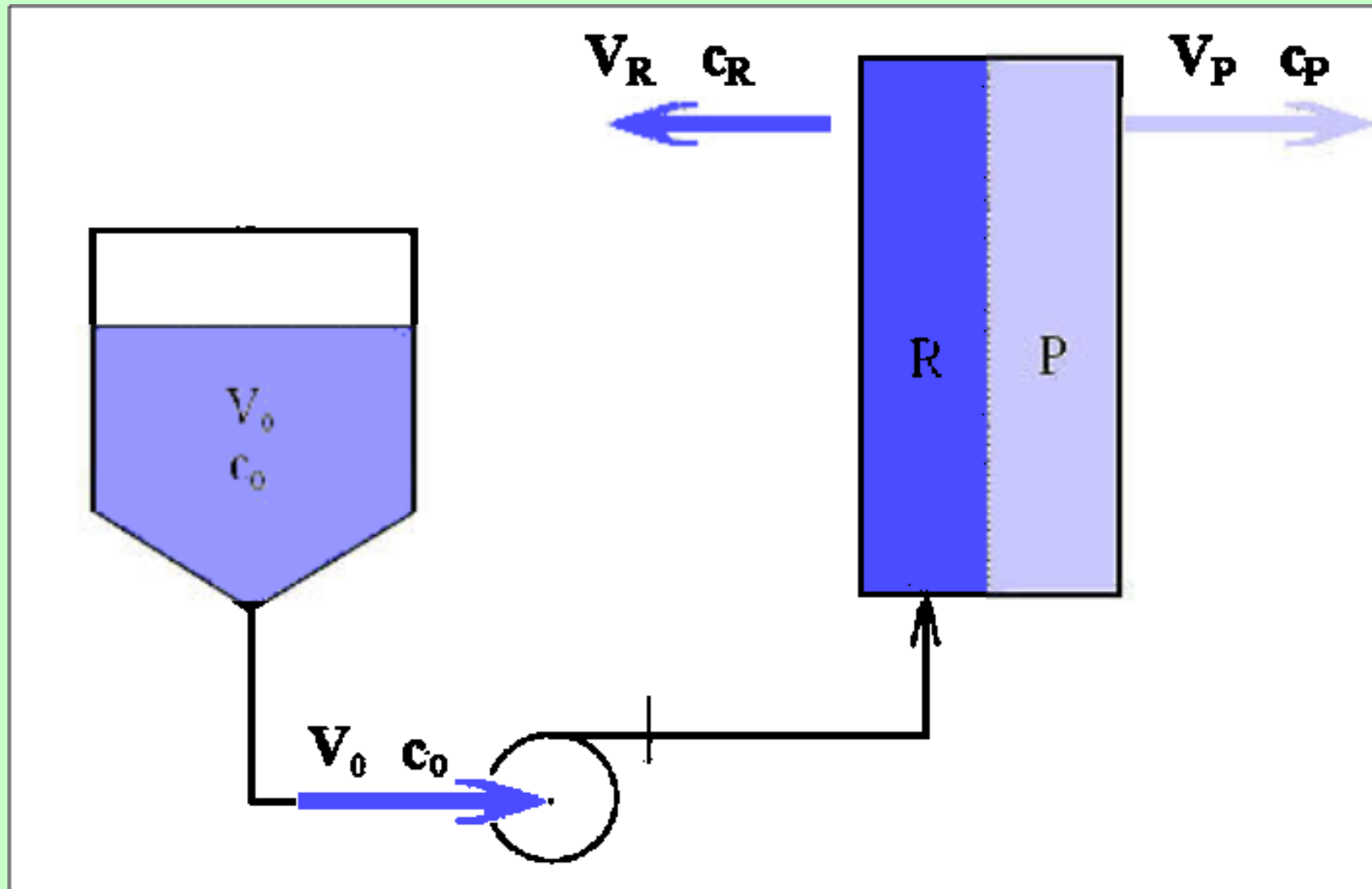
$$J_v = L_p (\Delta p - \Delta \pi)$$

Szűrés idő:

$$t = \frac{1}{AL_p \Delta p} \left(V_0 - V + \frac{RTn}{\Delta p} \cdot \ln \left(\frac{V_0 - RTn/\Delta p}{V - RT/\Delta p} \right) \right)$$



A folyamatos membránszűrés folyamatábrája



A membránszűrés anyagmérlegei

A koncentrációs faktor értelmezése megváltozik:

$$CF = \frac{\text{betáplált térfogatáram}}{\text{koncentrátum térfogatáram}} = \frac{W_0}{W_r} = \text{állandó}$$

Folyamatos működés \longrightarrow állandósult állapot \longrightarrow

a paraméterek az idővel alig változnak \longrightarrow csak a membrán "öre-
gedése,, miatt

Állandó retentát oldali koncentráció \longrightarrow állandó fluxus \longrightarrow

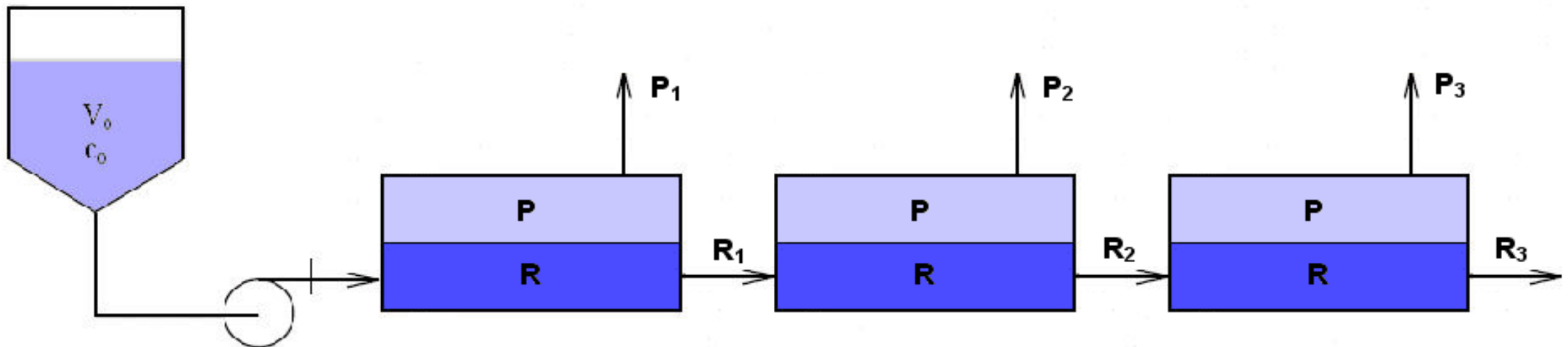
a munkapont nem vándorol \longrightarrow a berendezés állandóan a
legnagyobb fluxus értéken működik



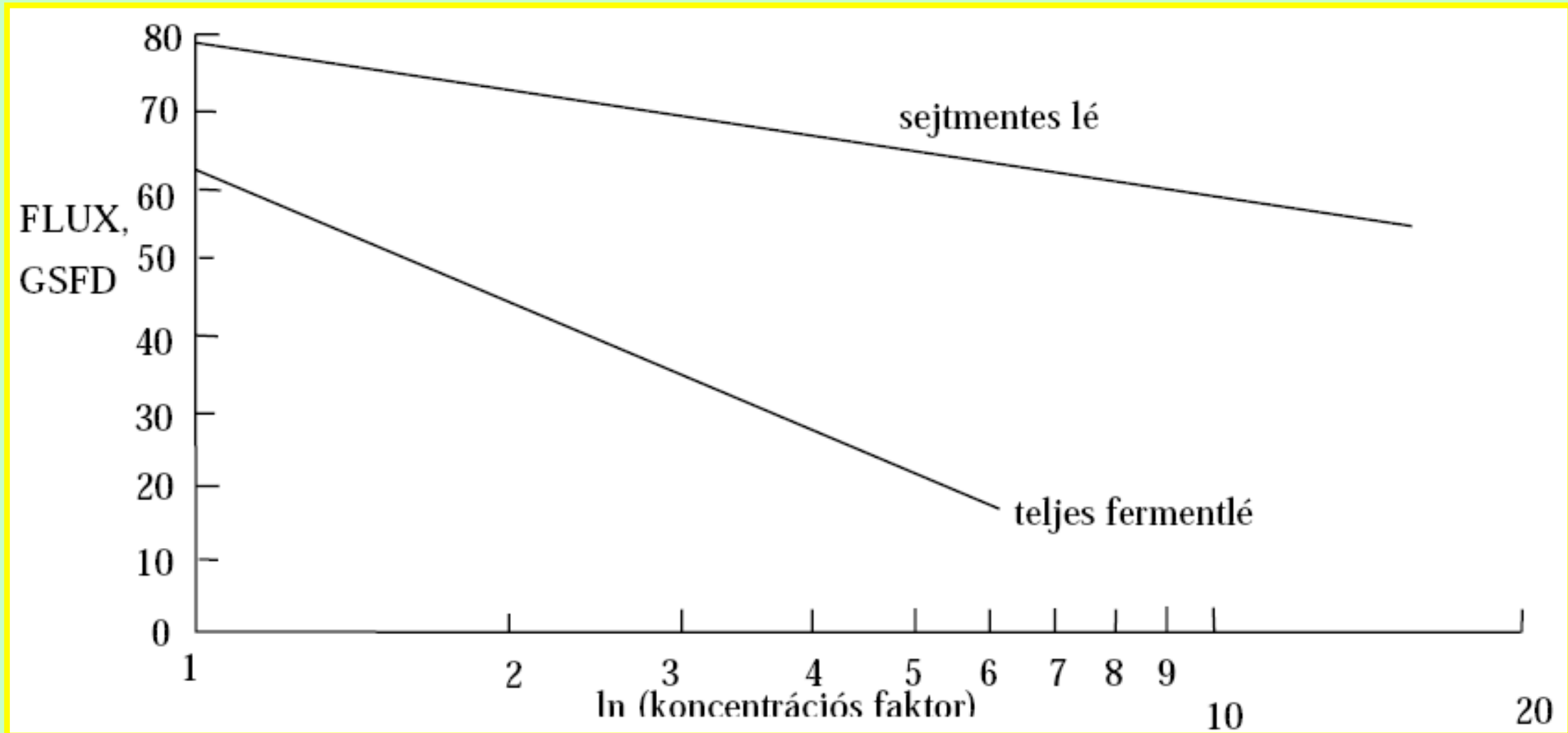
A többlépcsős folyamatos membránszűrés folyamatábrája

TÖBBLÉPCSŐS
ULTRASZŰRŐK

$$CF_1 = \sqrt[3]{CF_{összes}}$$



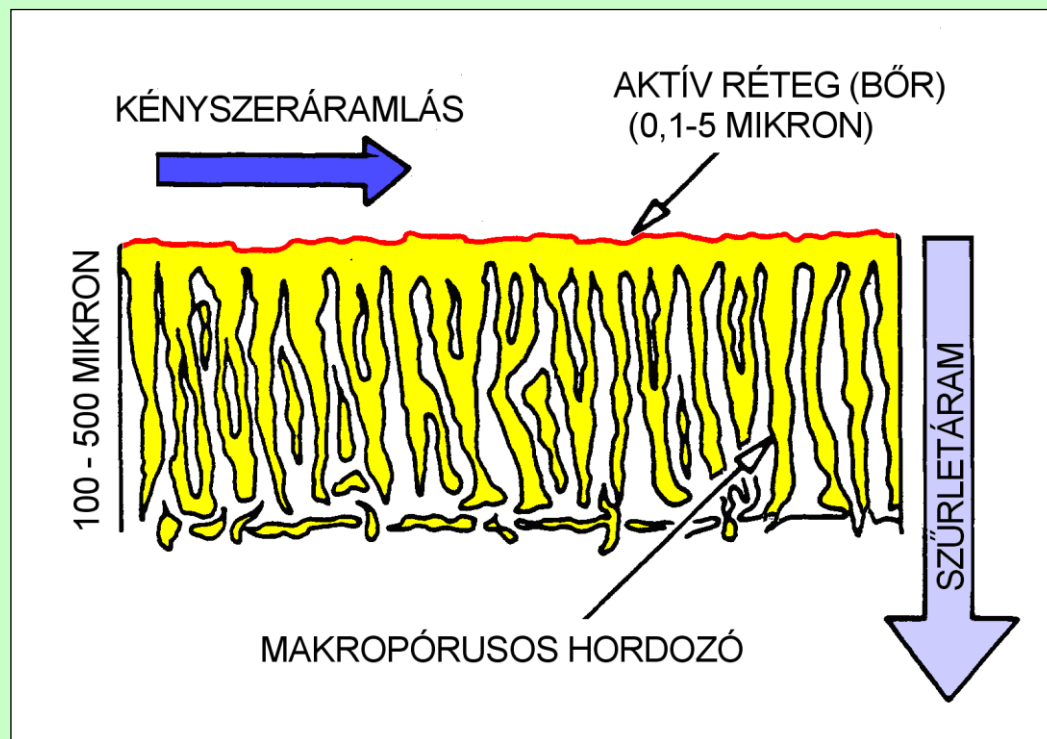
Teljes és szűrt fermentlé membránszűrésének összehasonlítása



A membránok jellemzői

Membránok csoportosítása

Szerkezet szerint: izotróp vagy anizotróp



A membránok jellemzői

Ha a membrán rétegei eltérő anyagból készülnek, akkor beszélünk összetett, vagy **kompozit membránról**.

Hagyományos **szénalapú polimer hárttyát** szinte bármely hordozóra fel lehet vinni, de előfordulnak teljesen szervesetlen rendszerek is, pl. **fémoxid bevonat** szinterelt kerámián.

A **folyadékmembránok** nem elegendő folyadékréteget képeznek, amely szelektíven engedi át a különböző komponenseket \longrightarrow két permeábilis film között, folyadék felszínén, emulgeáló szerekkel vagy anélkül is létrehozható.



A membránok jellemzői

Membránok előállítása

Alapanyagok:

- regenerált cellulóz
- polimerek (teflon, poliszulfon, poliakrilnitril, PVC, poliészter, polietilén, polipropilén)
- kerámia
- fémek

Tendencia: egyre ellenállóbb, nagyobb hőmérsékleten és extrém pH értékeken is használható membránok.



A membránok jellemzői

Módszerek:

- vizes kicsapás (lap, cső-, és üregesszál membránok előállítására)
- illékony oldószerben oldott polimerek esetében a felületről elpárolgó oldószerből filmréteg marad vissza
- kicsapás hűtéssel
- szintereléssel (porkohászati úton) (kerámia, fémek, teflon)
- extrudálással ill. húzással



A membránok jellemzői

Pórusok utólagos létrehozásának eszközei:

- nyújtás (a pórusok közel azonos méretűek, de nem kör keresztmetszetűek)
- lézersugaras perforálás
- bombázás elemi részecskékkel (a besugárzás következtében létrejött szerkezeti hibákat maratófürdőben tágítják pórusokká)



Membránmodulok

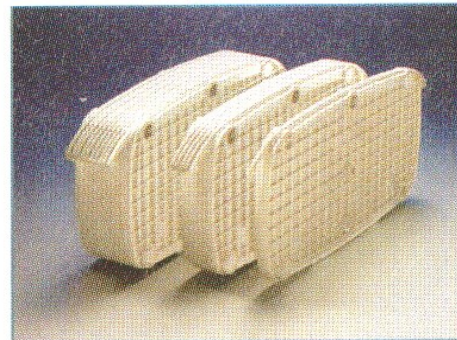
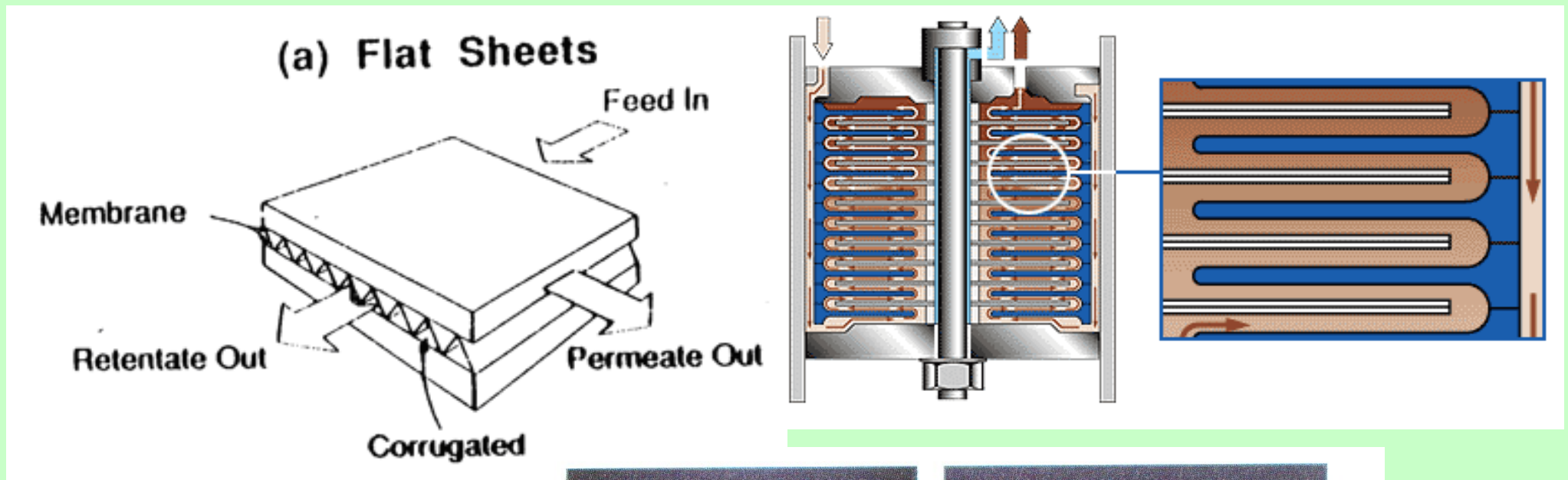
Hordozóval, távtartókkal, csatlakozókkal, burkolattal ellátott cserélhető egységek az ún. membránmodulok.

Főbb kialakítási típusaik:

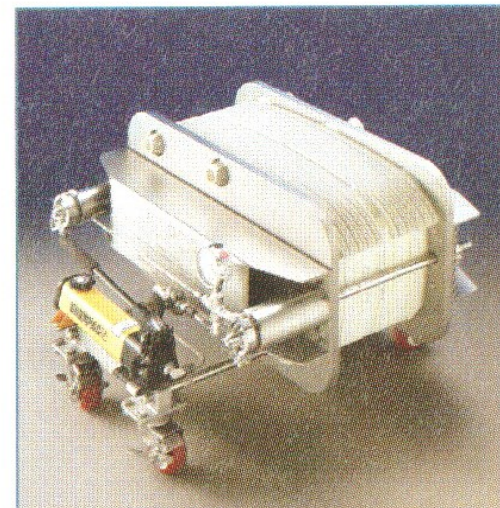
- sík formájú membránok (csak lamináris áramlás)
 - **lapmembránok** (legrégebbi, több rétegű lehet, eltömődésre hajlamos, könnyen javítható)



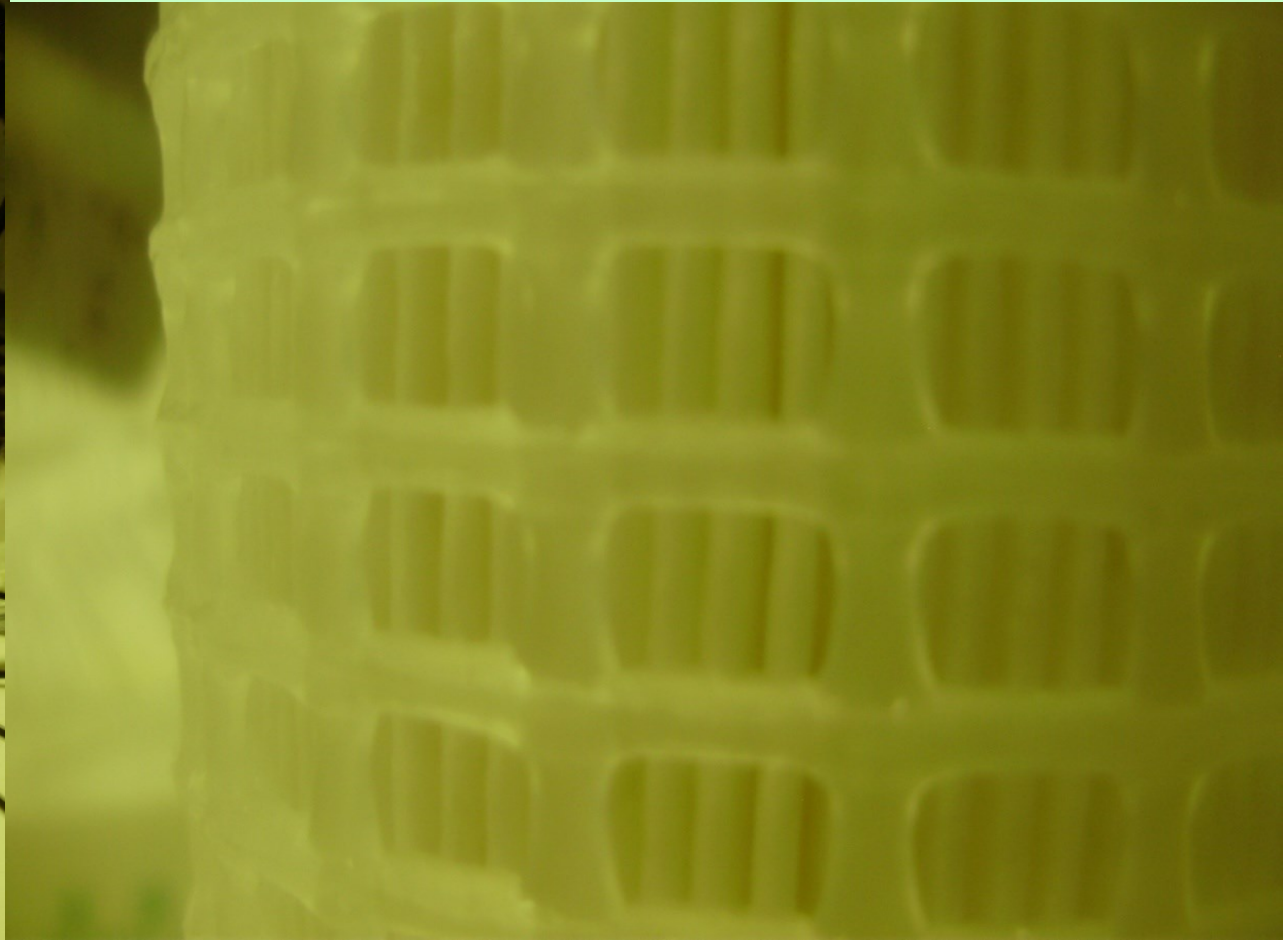
Lapmembrán modulok



Modular 0.1, 0.5 and 1 m² Pods can be scaled up to 30 m².

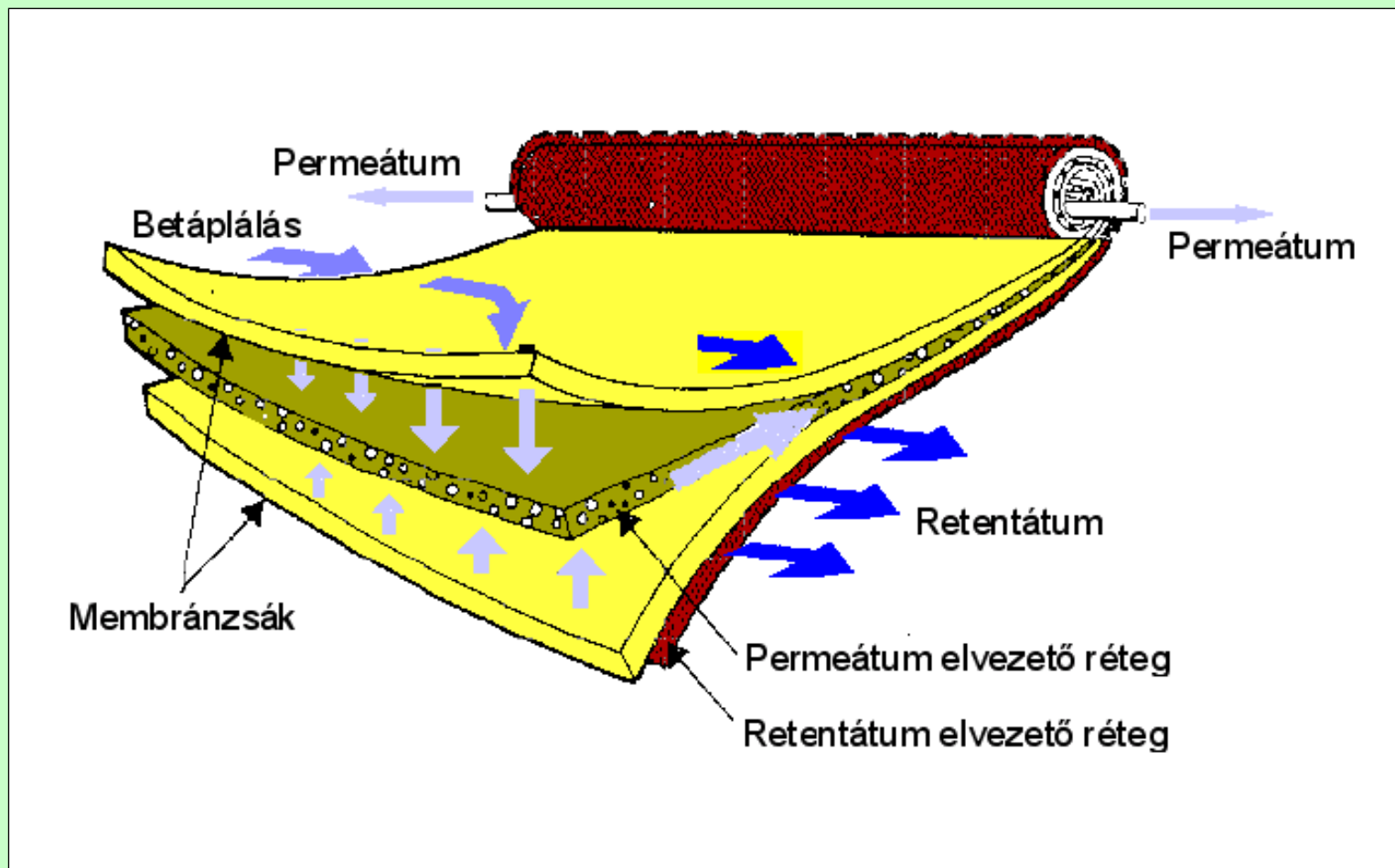


Lapmembrán modulok



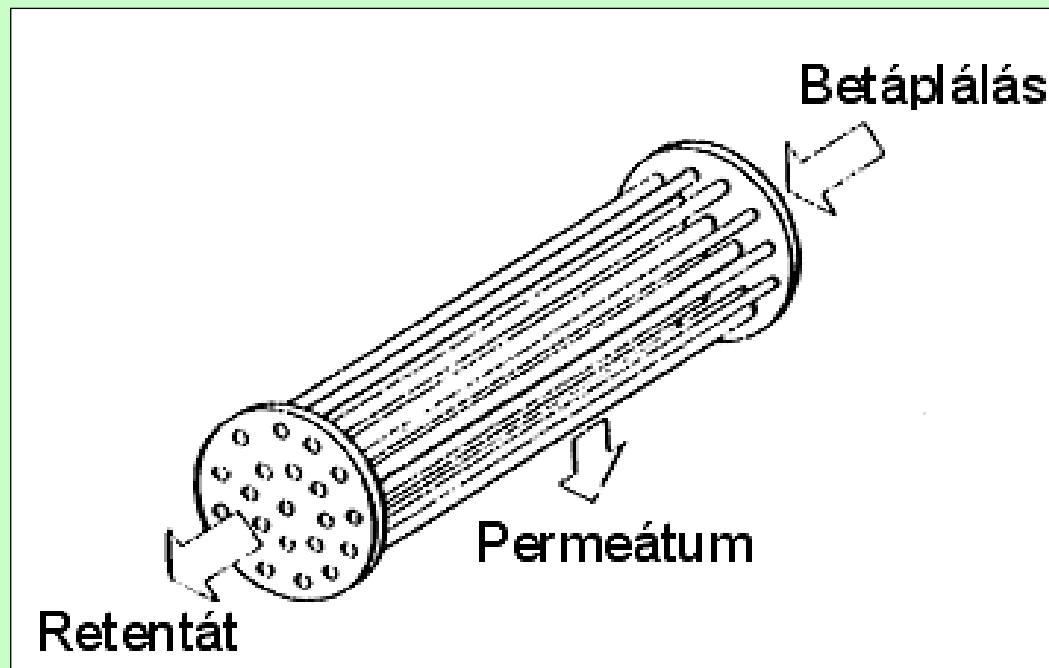
Membránmodulok

spirális membránmodulok: feltekercselt zsákszerű membránokból áll. Távtartó hálók. Nem javítható.



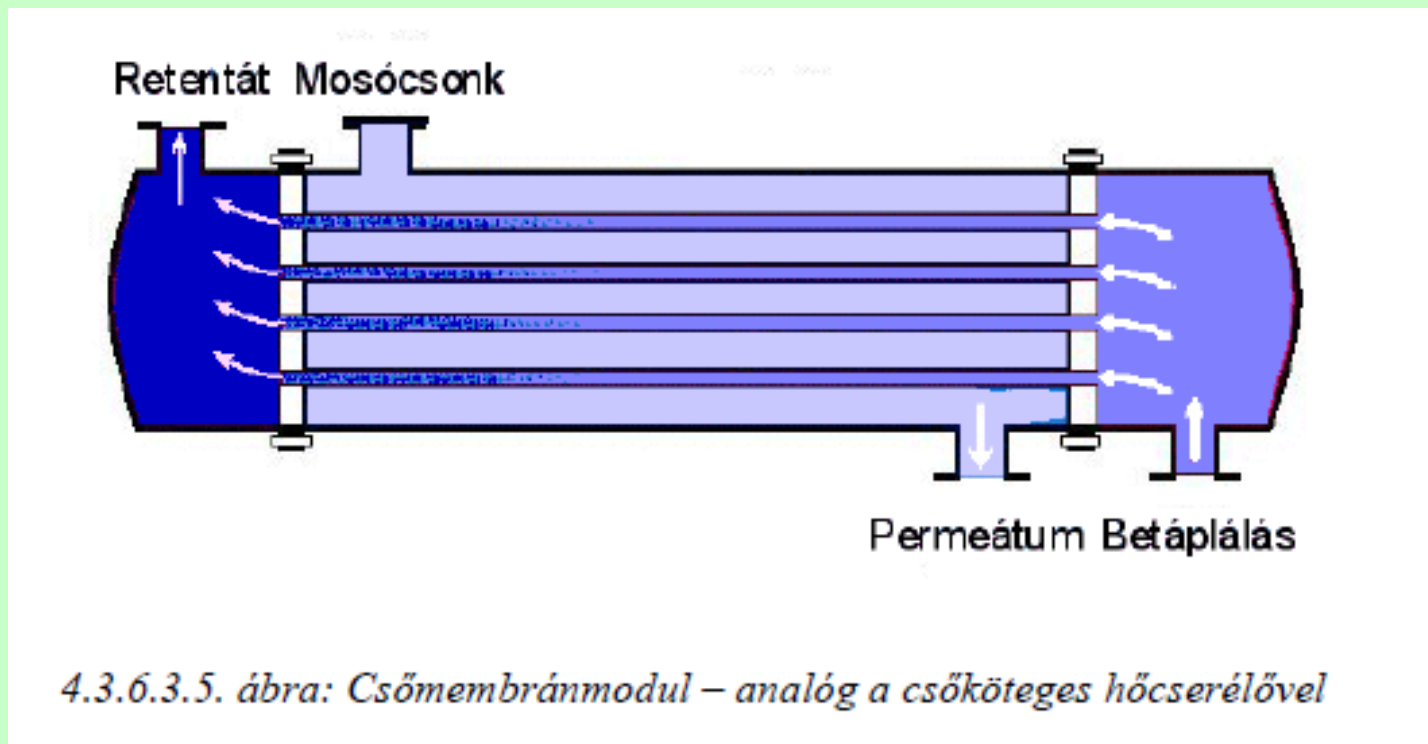
Csőmembrán modulok

- cső formájú membránok (turbulens áramlás is lehet)
 - **csőmembránok** (belméret 12-25 mm, belső és külső membránok, 6-20 cső egy modulban, egyszerű tisztítás, nagy helyigény)



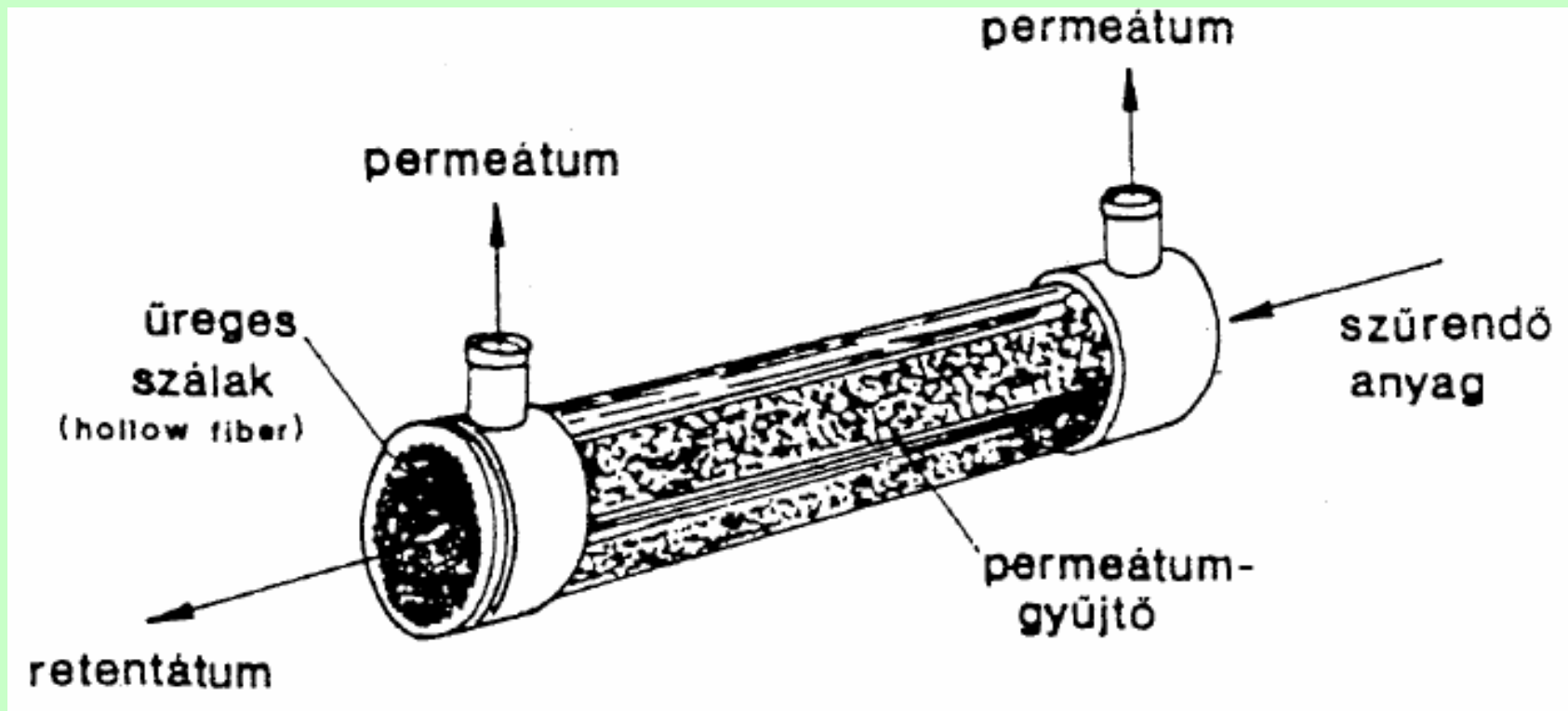
Csőmembrán modulok

- cső formájú membránok (turbulens áramlás is lehet)
 - **csőmembránok** (belméret 12-25 mm, belső és külső me-revítésűek, 6-20 cső egy modulban, egyszerű tisztítás, nagy helyigény)

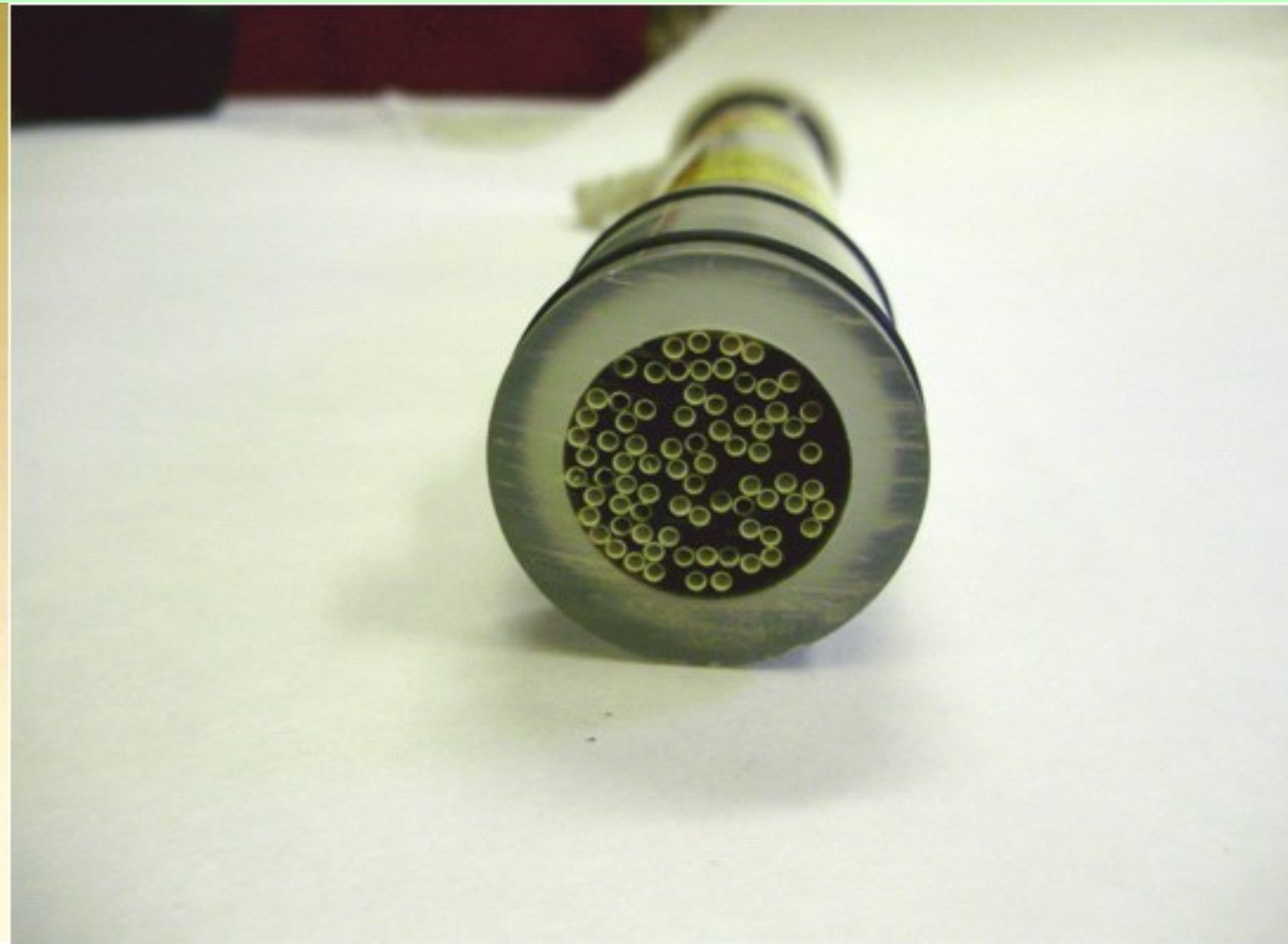


Membránmodulok

- **üregesszál (hollow fiber) membránok** (belméret 0,5-1,5 mm, üzemi nyomás korlátozott, több száz szál egy modulban)



Membránmodulok



Membránmodulok

- **mikrokapilláris membránok** (belméret 5-20 μm , több ezer kapilláris egy modulban, nagy nyomásesés, kis áramlási sebesség)



Ipari membránszűrő telep



Szervetlen (kerámia, fém) modulok

Szinterelés : porkohászati formázás. Az elválasztás a járatok belső felületén kialakított vékony, szűkebb pórusú kerámiarétegen történik.

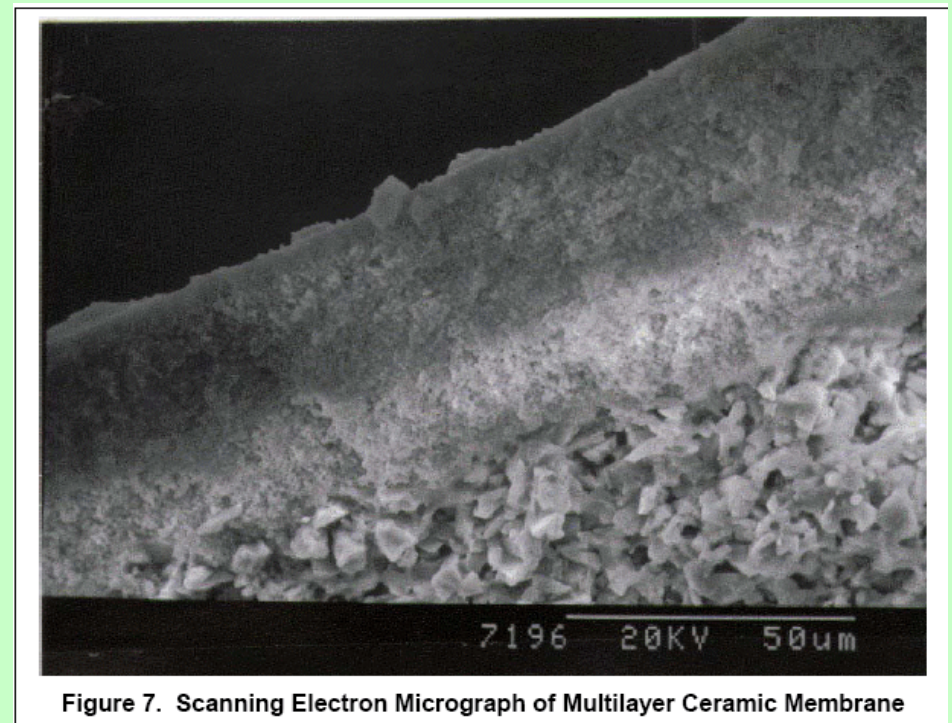
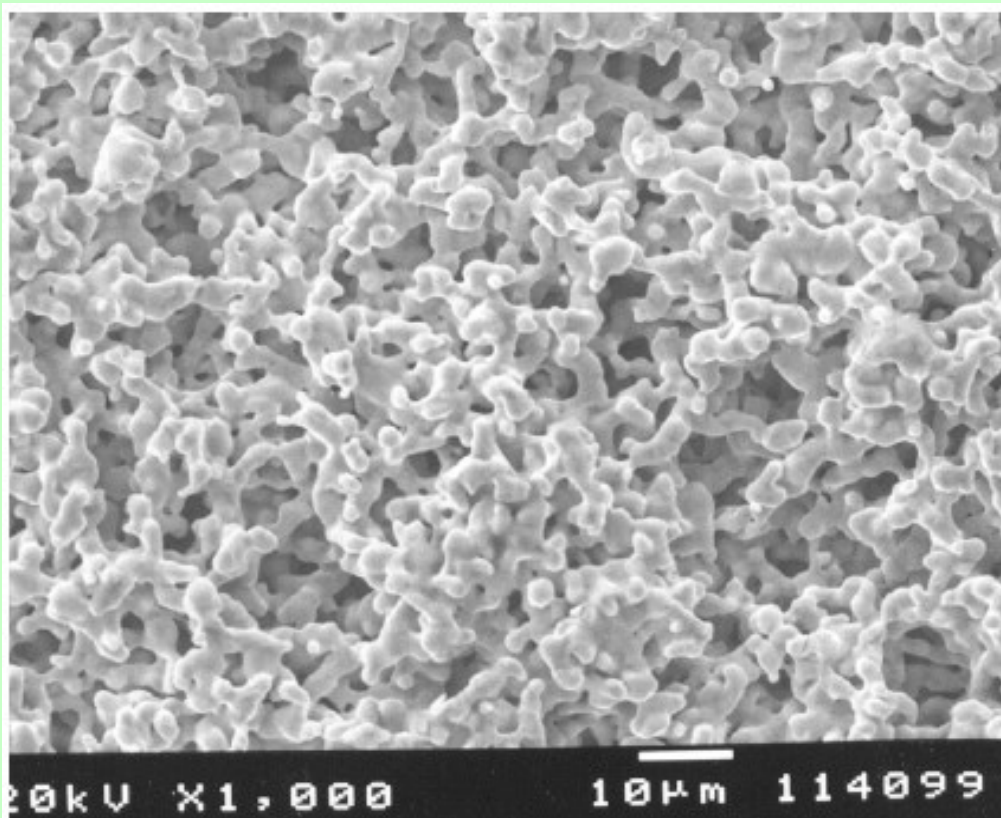
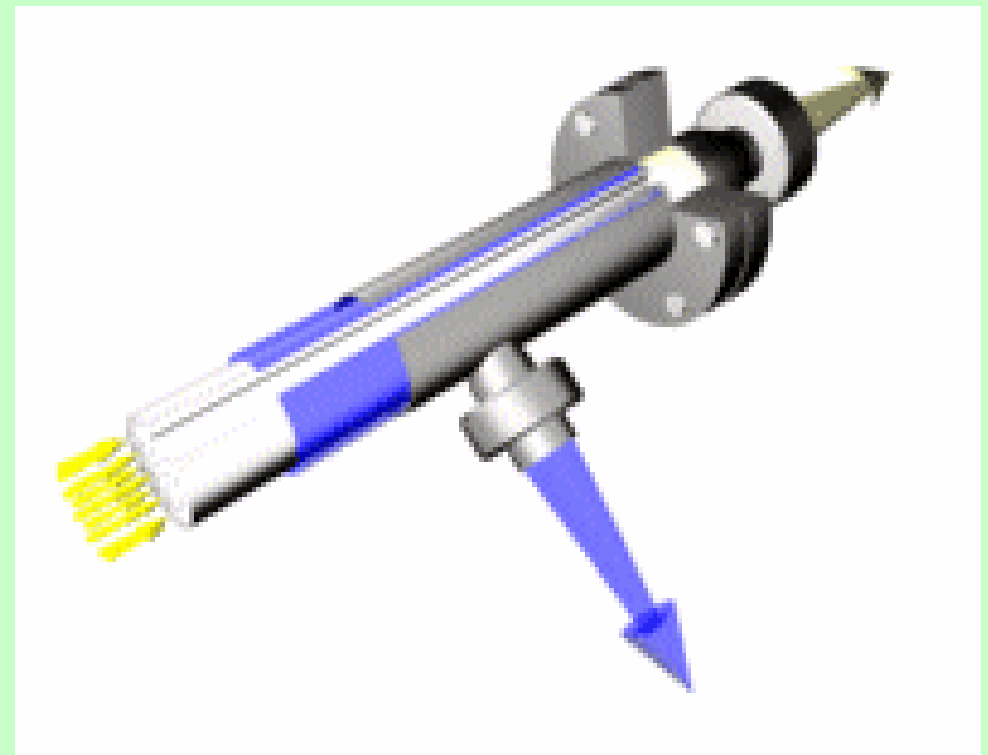
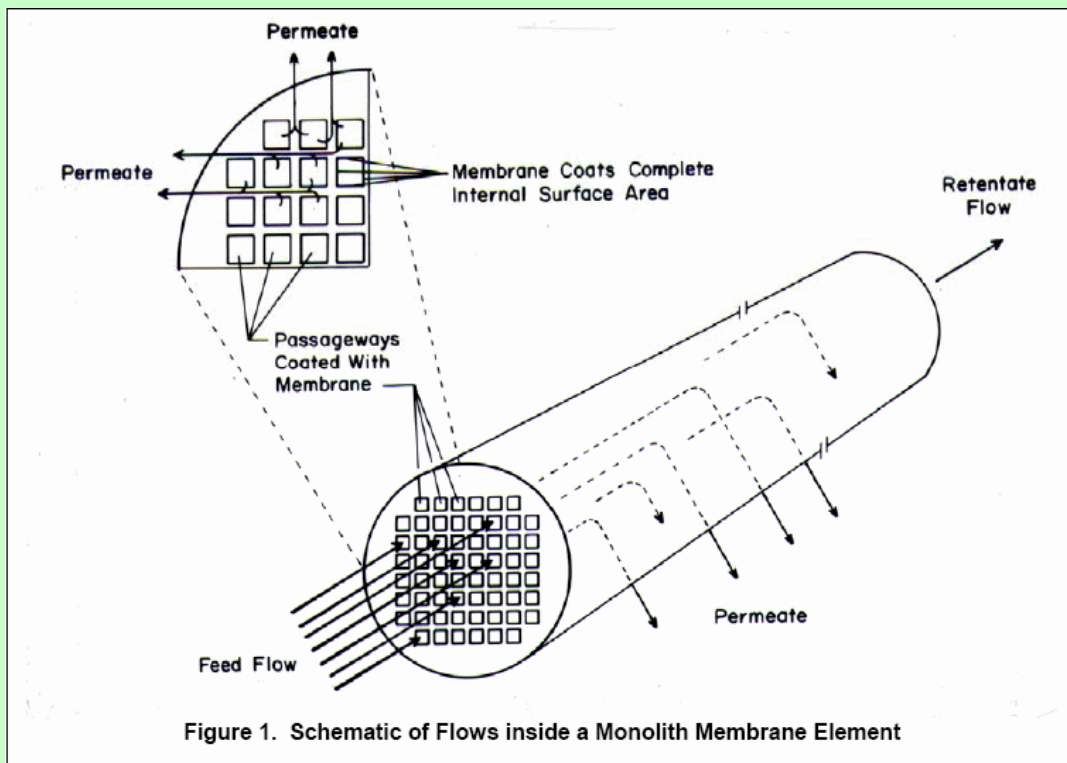


Figure 7. Scanning Electron Micrograph of Multilayer Ceramic Membrane



Szinterelt membránok

A permeátum a kerámia test pórusaiban vándorolva a hasáb külső felületén jelenik meg.



Szinterelt membránok

Szinterelt kerámia hasáb, amelyben párhuzamosan csőszerű járatok futnak.



Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

Mikor kell cserélni a használt membránt? —————> üzemközi
vizsgálatok —————> vízérték, integritásvizsgálat.

Vízérték: fehérjék adszorpciója irreverzibilis változásokat okoz
—————> vizsgálat: köbözés



Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

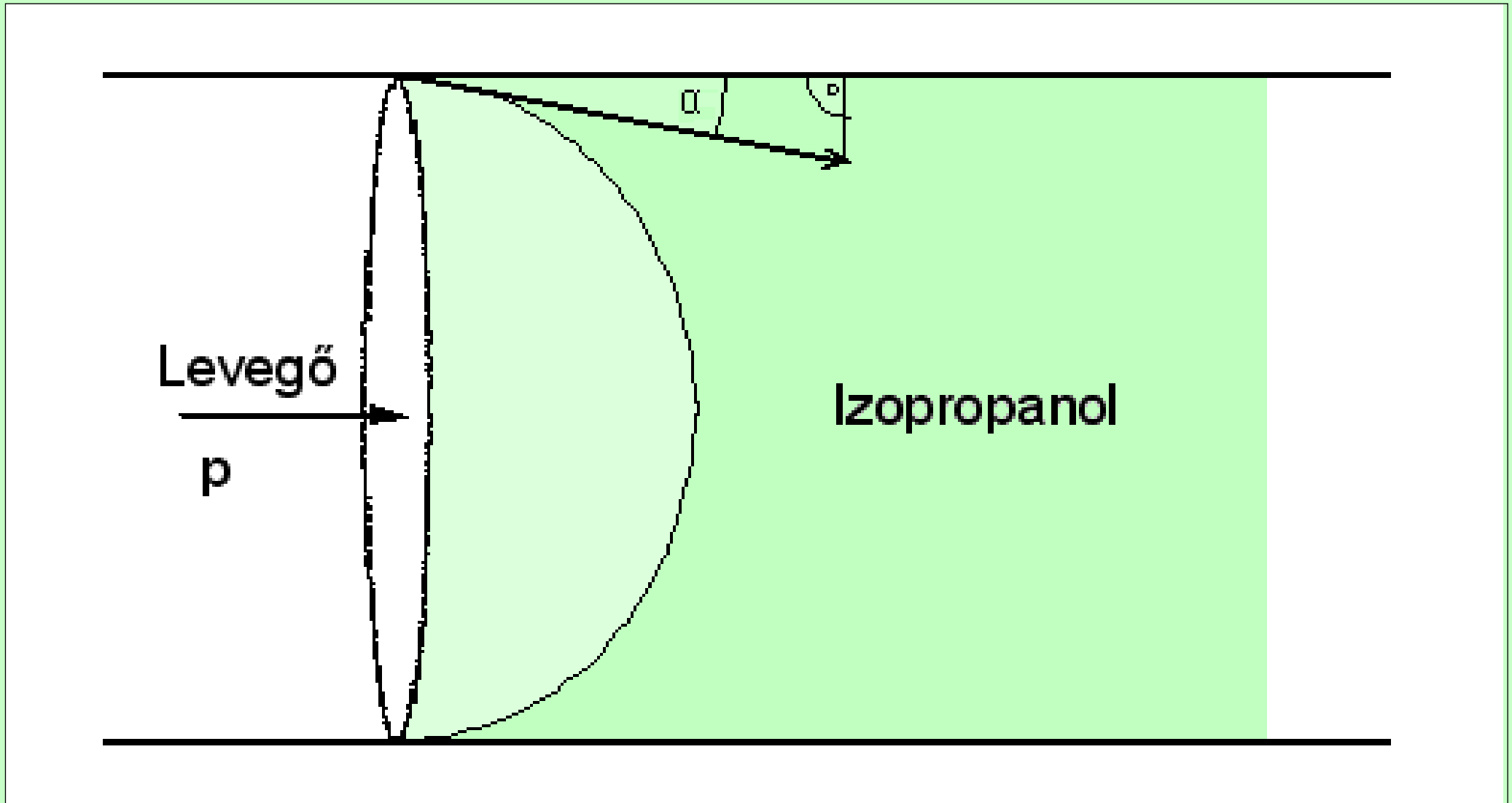
Integritásvizsgálat: buborékpont meghatározás

elsősorban hidrofil, mikropórusos membránoknál használható

alapelv: ha egy kapillárisból gáznyomással szorítjuk ki a folyadékot, a nyomás és a kapilláris átmérője fordítottan arányos egymással.



A gáz-folyadék határfelület kapillárisban



Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

Az erőegyensúly:

$$p_{\text{gaz}} \left[\frac{d^2 \pi}{4} \right] = d \pi \gamma \cos \alpha$$



$$p_{\text{gaz}} = \frac{4 \gamma \cos \alpha}{d}$$

Ha fokozatosan növeljük a gáz nyomását, akkor elsőként a legnagyobb átmérőjű pórusból szorul ki a folyadék, tehát az áttörési nyomás (buborékpont) jellemző a legnagyobb pórus méretére.



A buborékpont meghatározás térfogatáram-görbéje

