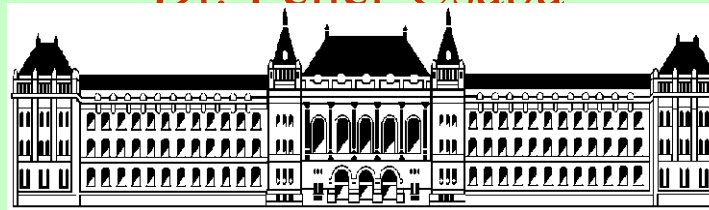


MEMBRÁN MŰVELETEK

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)



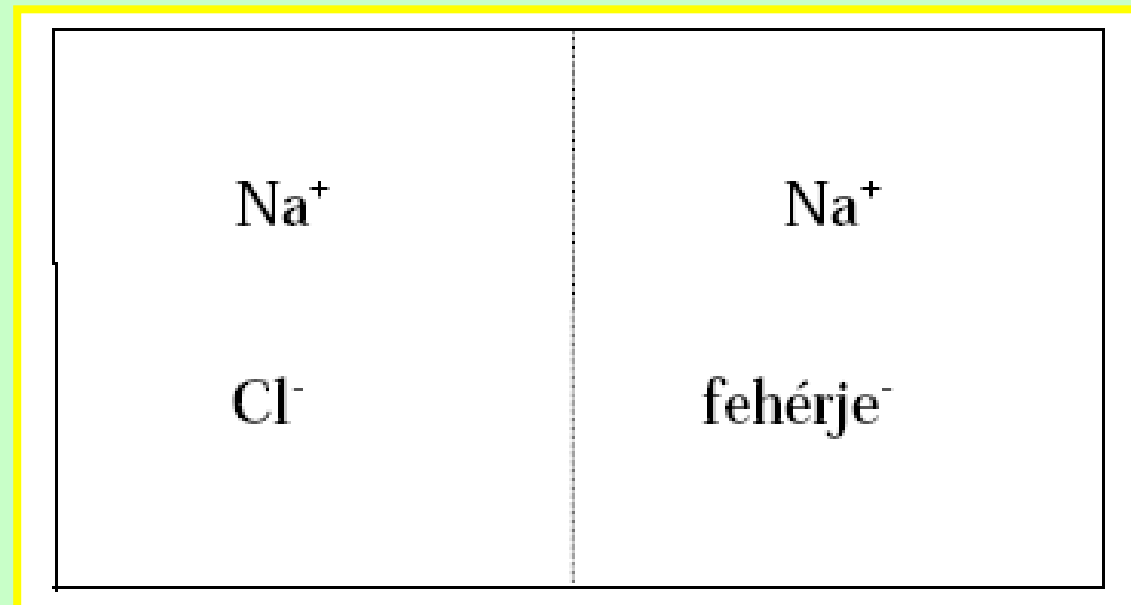
Bevezetés

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

A transzportok hajtóerejének megértéséhez végezzünk el egy gondolatkísérlet:

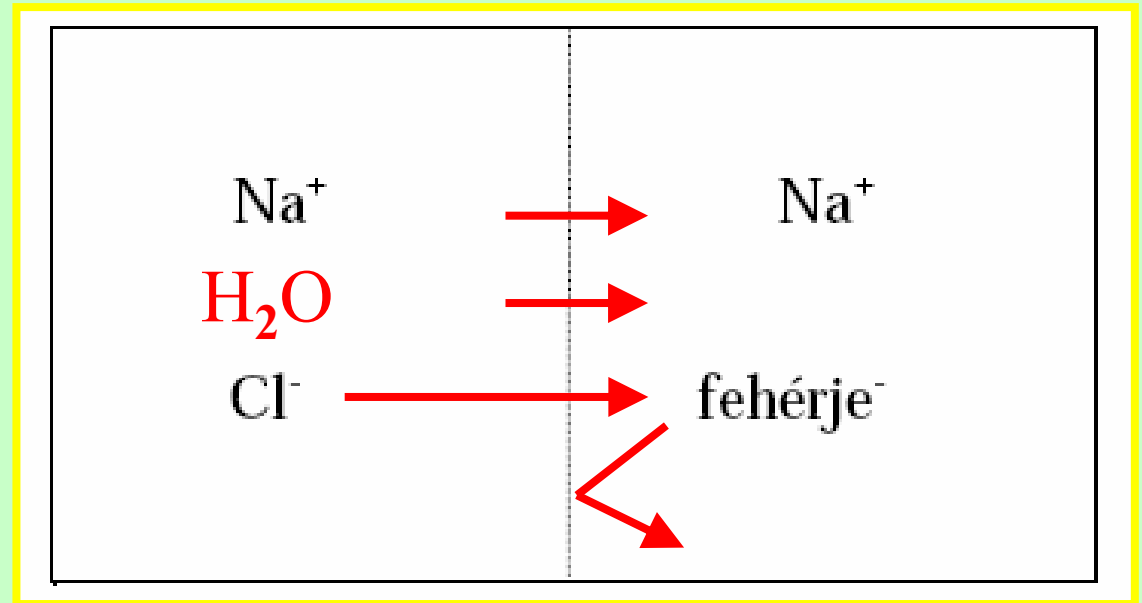
Ultraszűrő membránnal válasszunk ketté egy folyadékteret, amelyben azonos koncentrációban vannak jelen az alábbi anyagok:

Mi történik?



A klorid ionok a koncentrációkülönbség hatására megindulnak a jobboldali 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

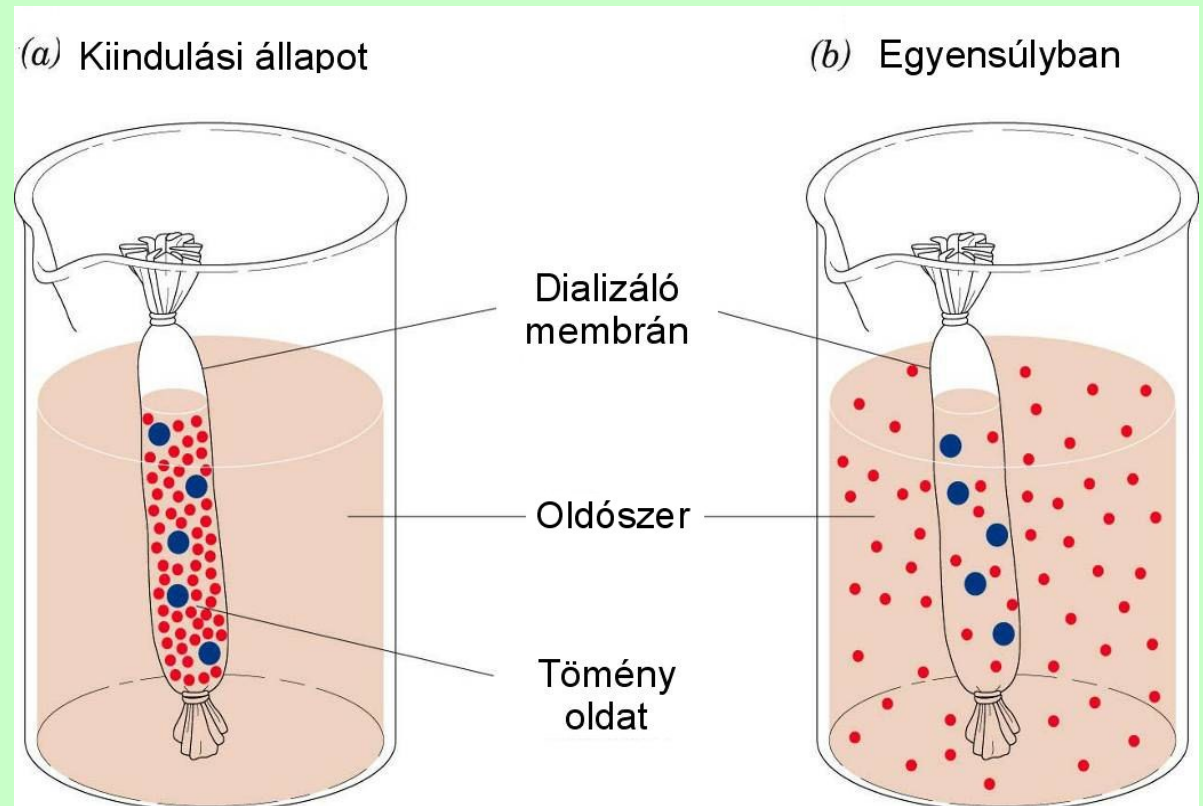
- folyadék komponensei anyagi minőségüktől függő mértékben oldódnak be a membrán anyagába és a túloldalon gőz formájában lépnek ki
- hajtóerő: komponens egyensúlyi gőznyomása és a gőztérnyomása közti különbség \longrightarrow vákuum
- biotechnológiai alkalmazása: etanol fermentáció
- analitikai alkalmazása: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



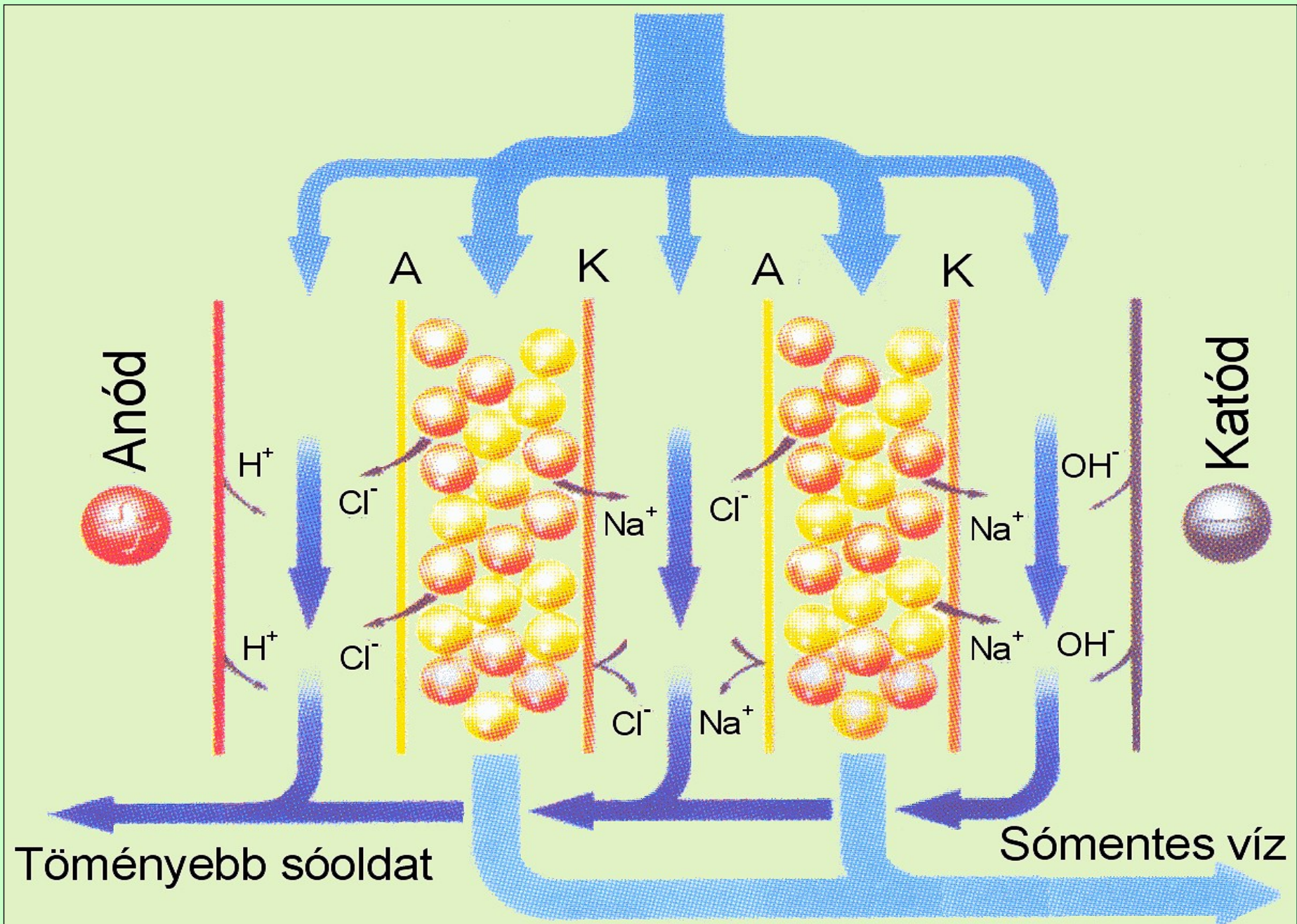
Membránműveletek jellemzése

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

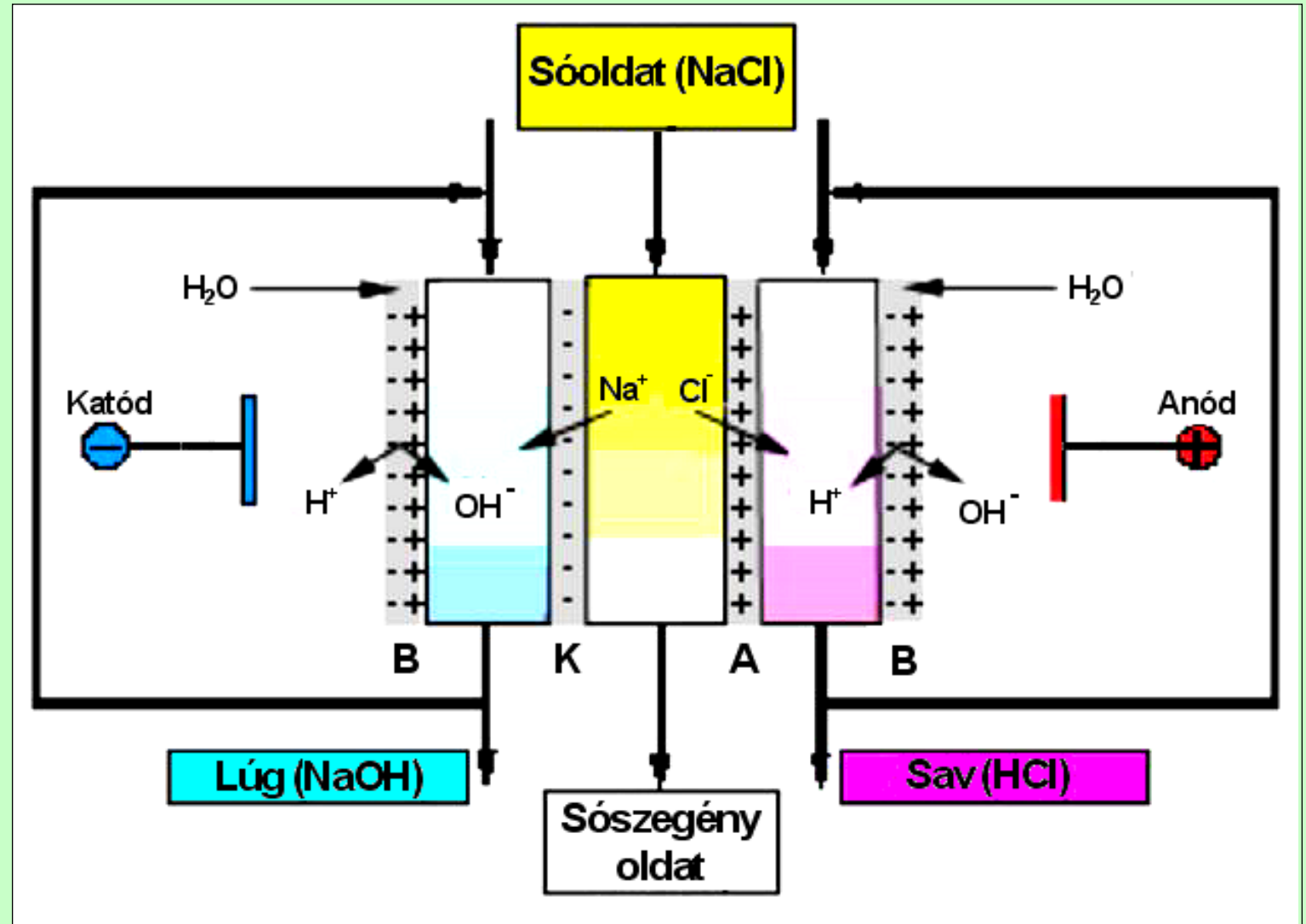


Bipoláris elektrodialízis

Bipoláris membránok: anion- és kationcserélő réteget tartalmaznak.

Áram hatására a víz disszociál →

H^+ és OH^- ionokat ad le.



Membránműveletek jellemzése

Az elektrodialízis alkalmazásai:

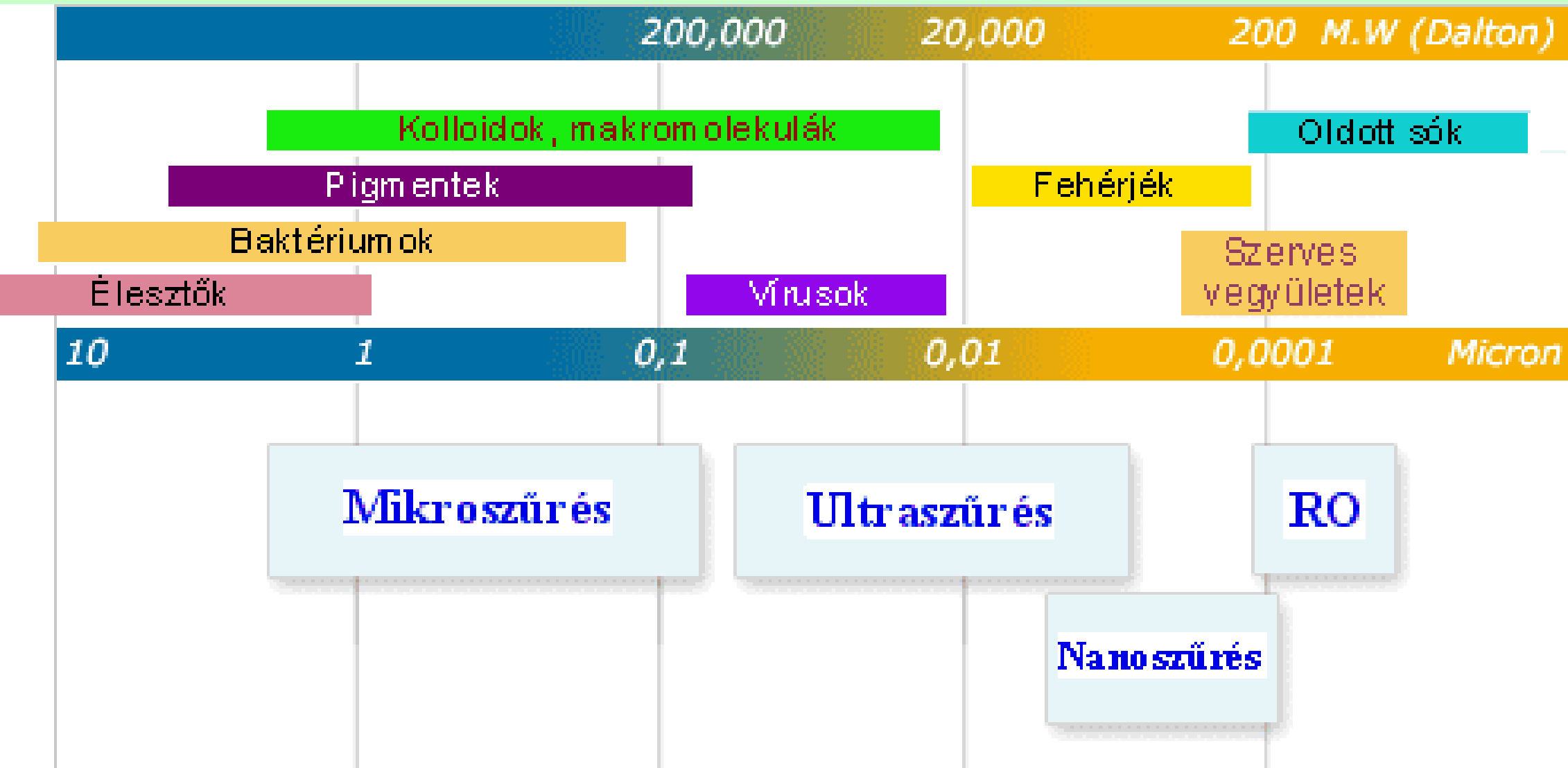
- nagy tisztaságú víz előállításához előkezelésként
- brakkvizek sótelenítése
- só előállítása tengervízből
- tejipari alkalmazások
- fermentációs felhasználások

Bipoláris elektrodialízis:

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



Membránműveletek mérettartománya

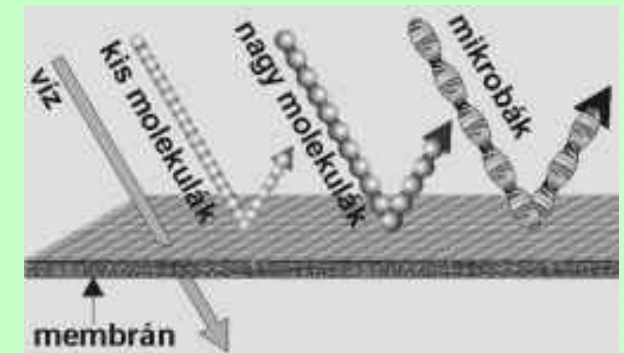


Membránműveletek mérettartománya

Ionok, kis
molekulák



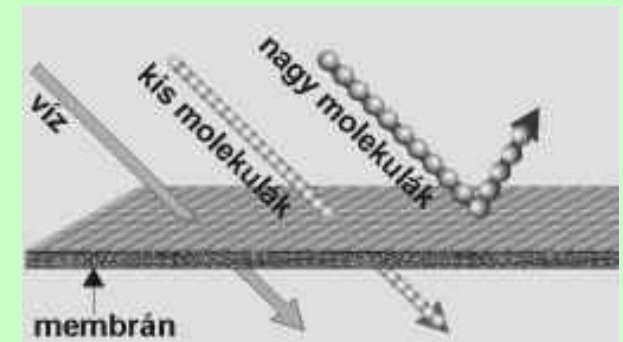
fordított
(reverz)
ozmózis



Makromolekulák



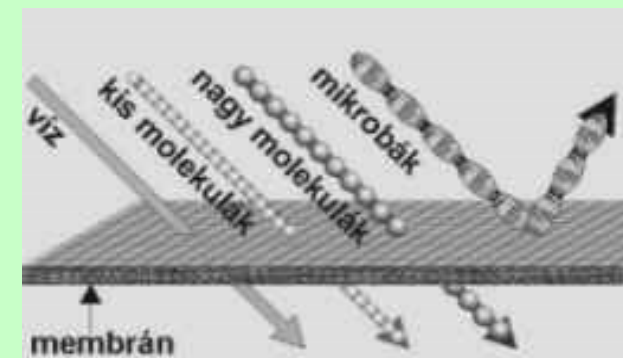
ultraszűrés



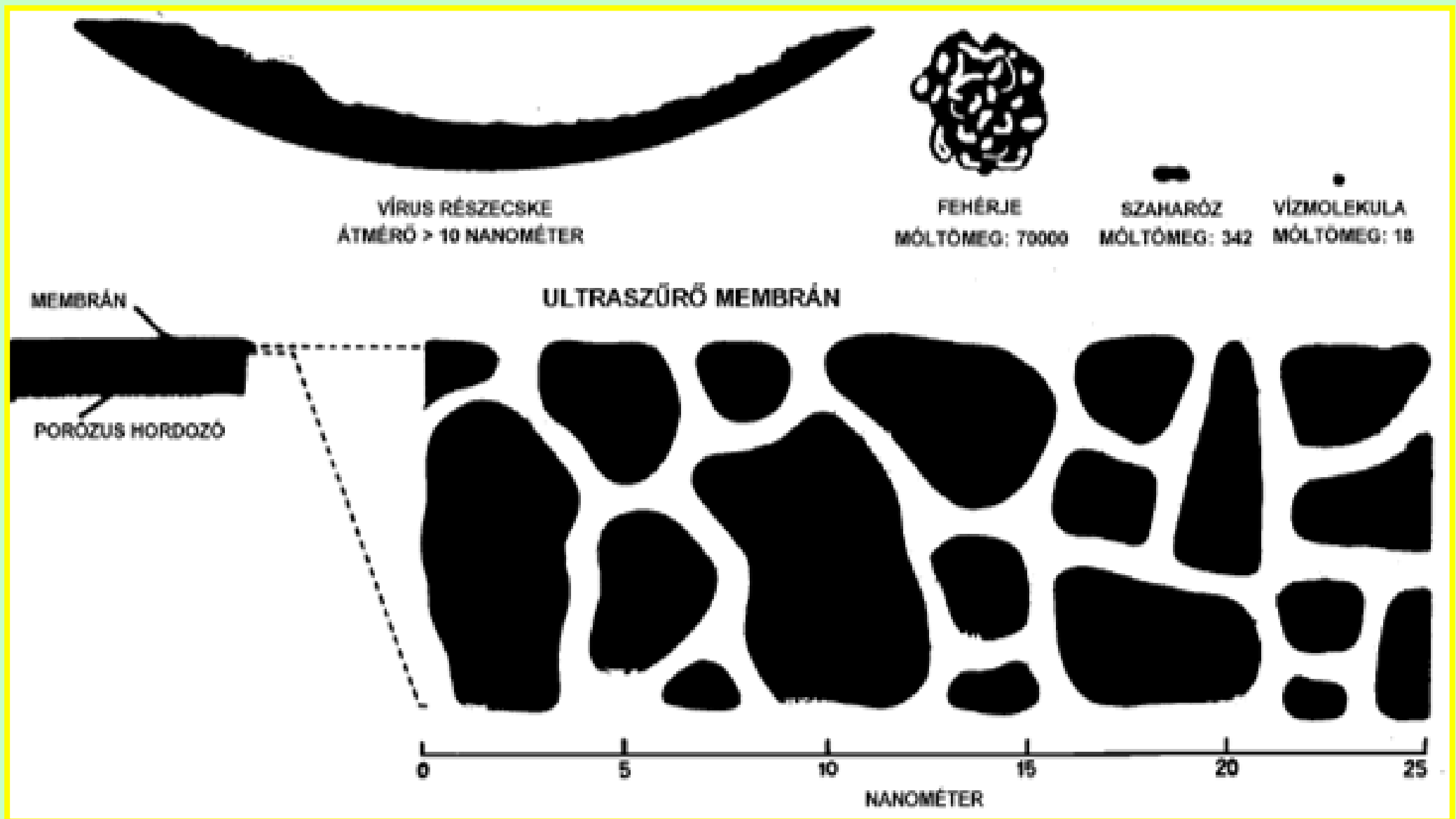
Lebegő, szilárd
részecskék



mikroszűrés



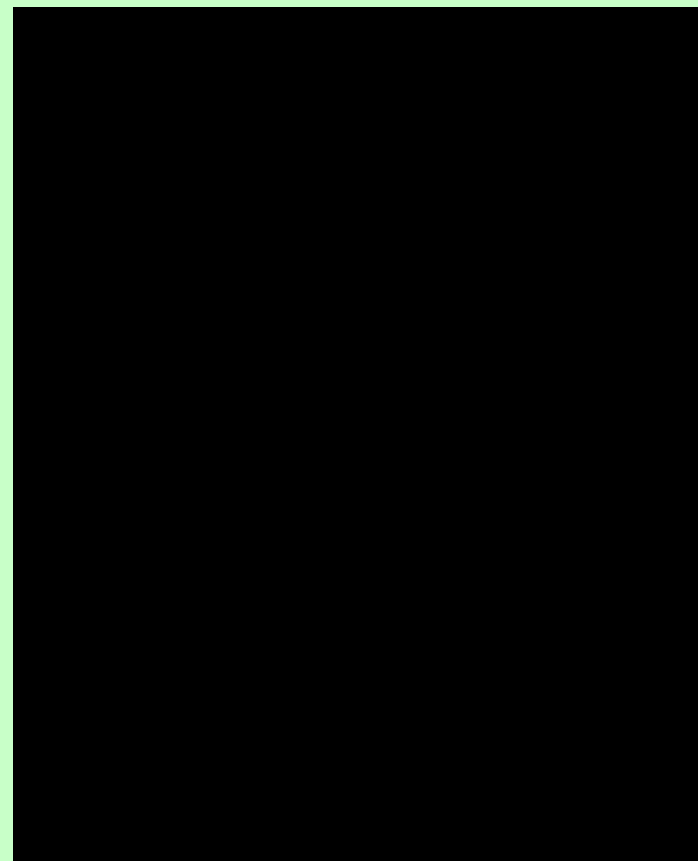
Az ultraszűrő membrán keresztmetszete és a különböző részecskék méretviszonyai



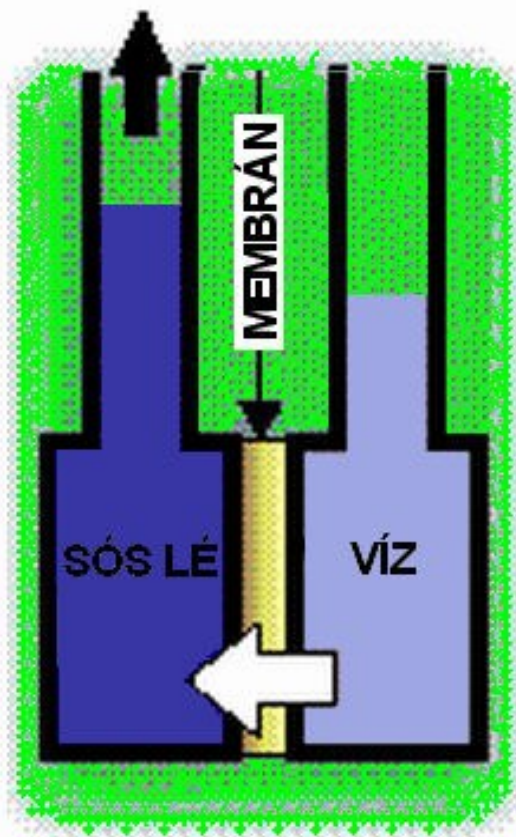
Membránműveletek jellemzése

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)

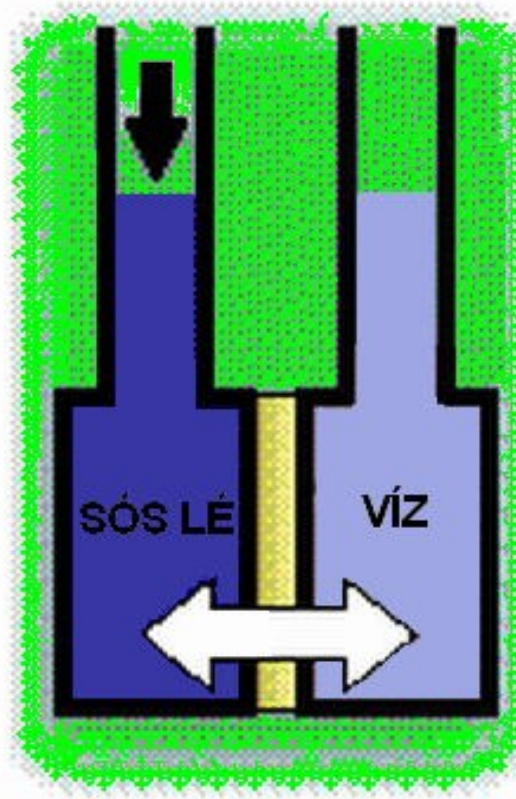


A fordított ozmózis elve



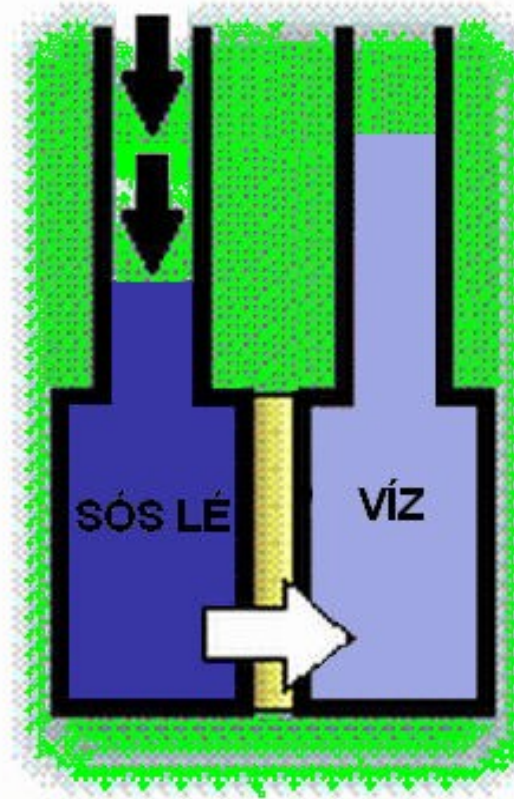
OZMÓZIS

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:

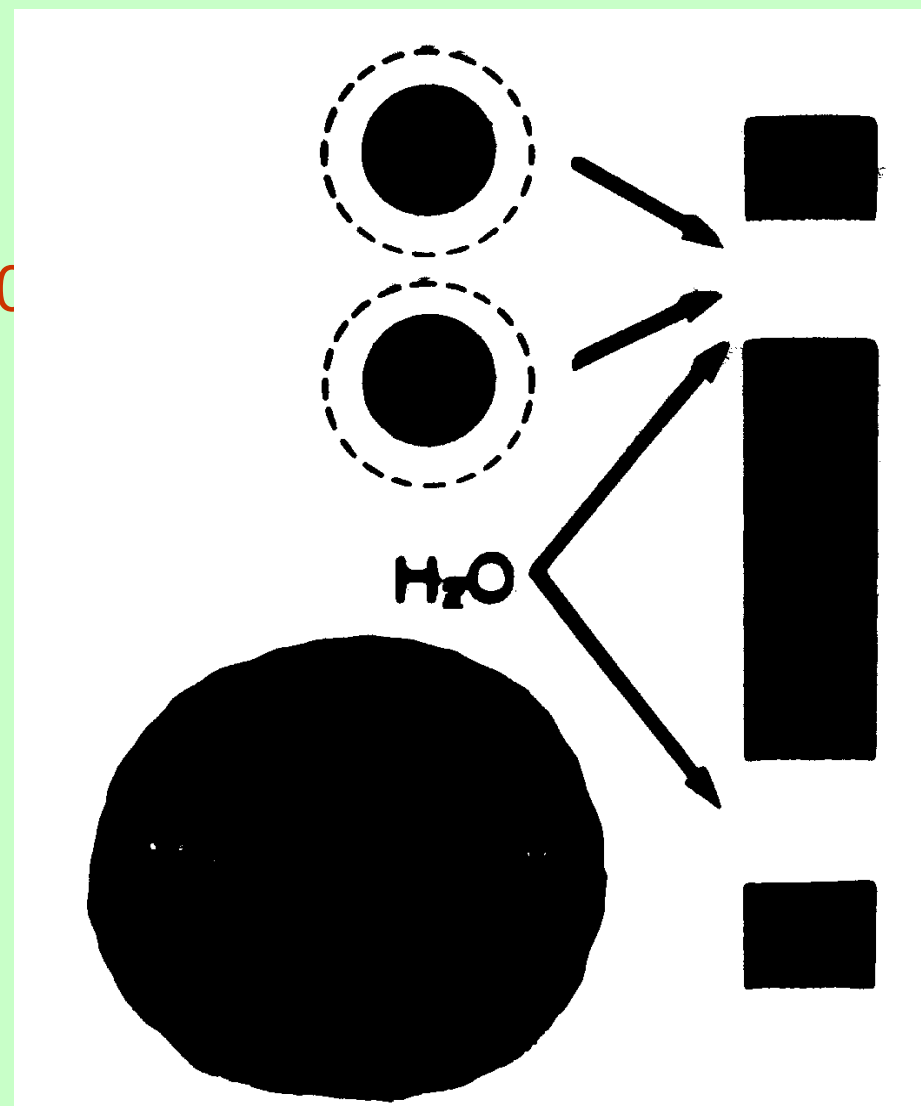
- hajtóerő: nyomás (kisebb, 10 - 30 bar)
- alkalmazások: kis molekulák közötti szelektív elválasztás, pl. savak és cukrok



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:

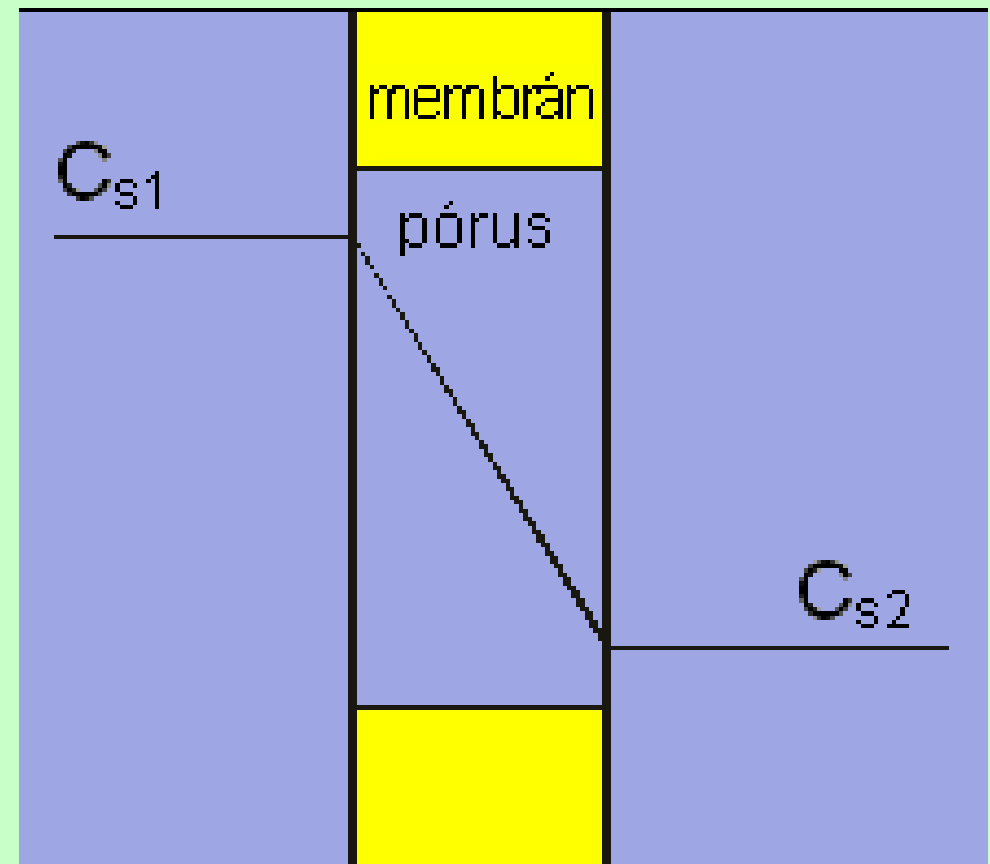
$$J_i = \frac{D}{L}(c_{m1} - c_{m2}) = \frac{DK}{L}(c_{s1} - c_{s2}) = P_m \Delta c_s$$

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



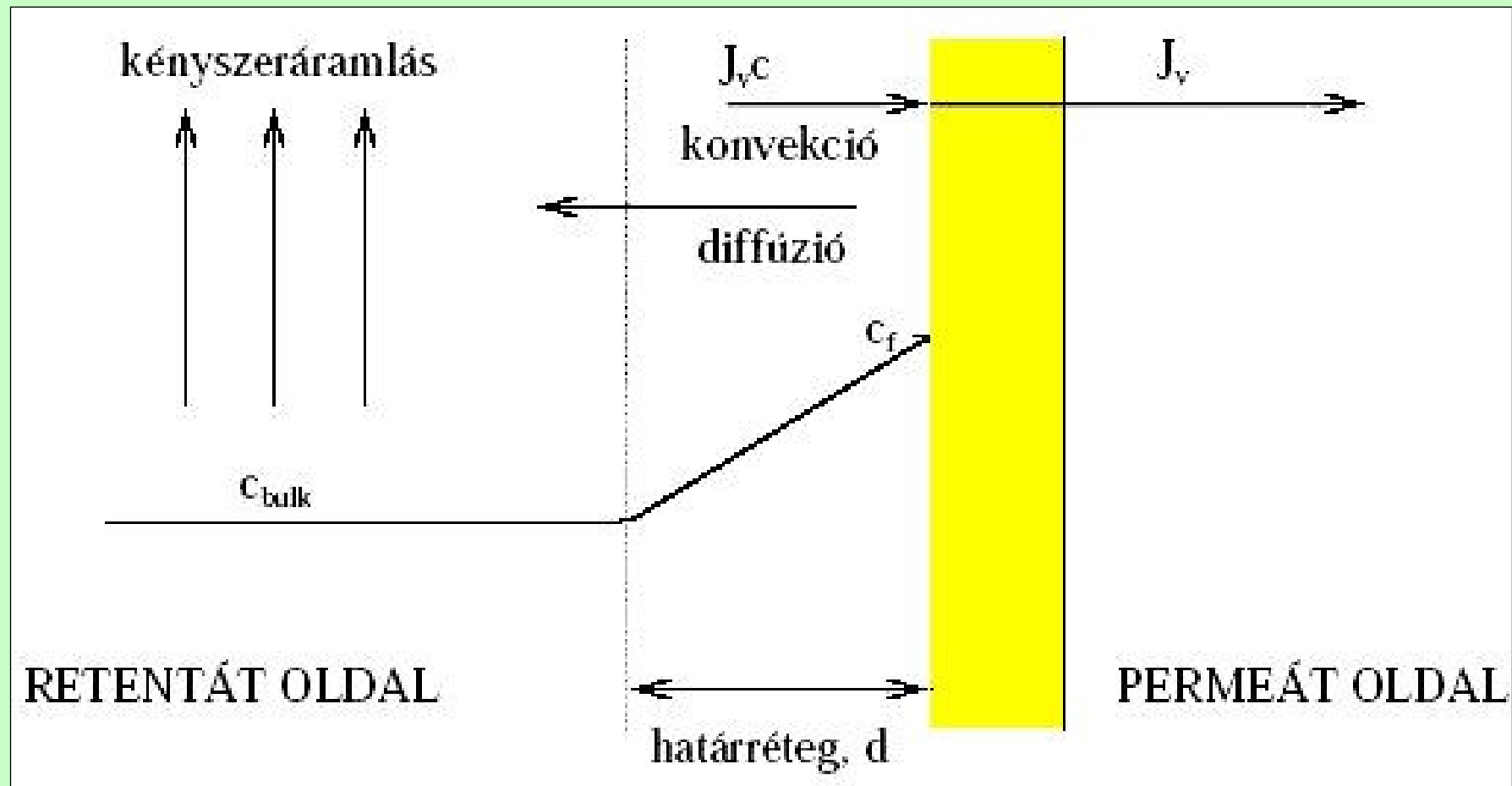
konvekciós
transzport



Eltérések az elméleti koncentrációprofiltól

Koncentrációs polarizáció

KONCENTRÁCIÓS
POLARIZÁCIÓ



Eltérések az elméleti koncentrációprofiltól

Állandósult állapotban:

a konvekció a membrán felületére =
= ellenirányú diffúzió a főtömegbe

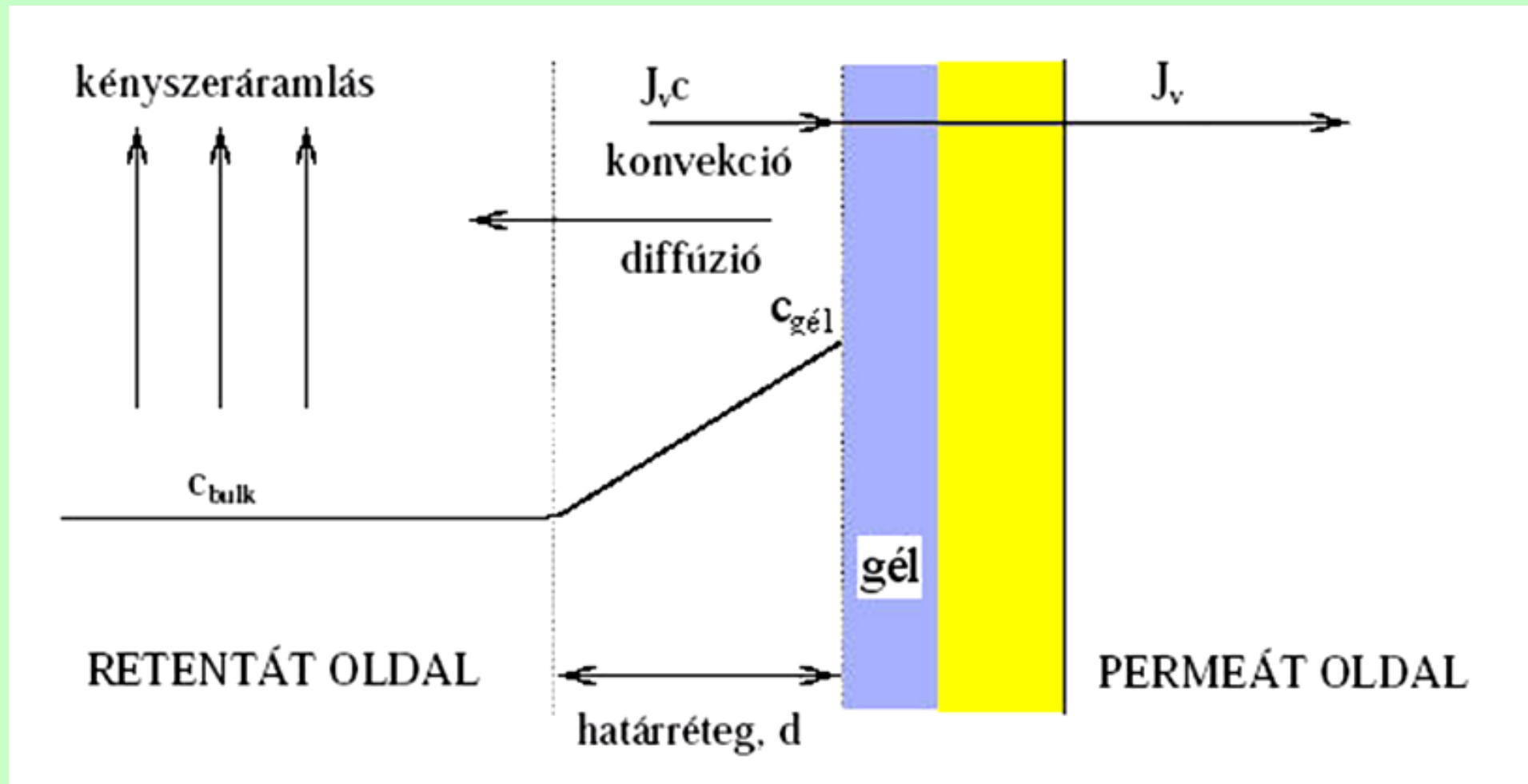
$$J_v c_{\text{bulk}} = D \frac{dc}{dx}$$

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



Eltérések az elméleti koncentrációprofiltól

Gélpolarizáció



Eltérések az elméleti koncentrációprofiltól

A határrétegben:

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

Ellenállásokkal felírva:

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

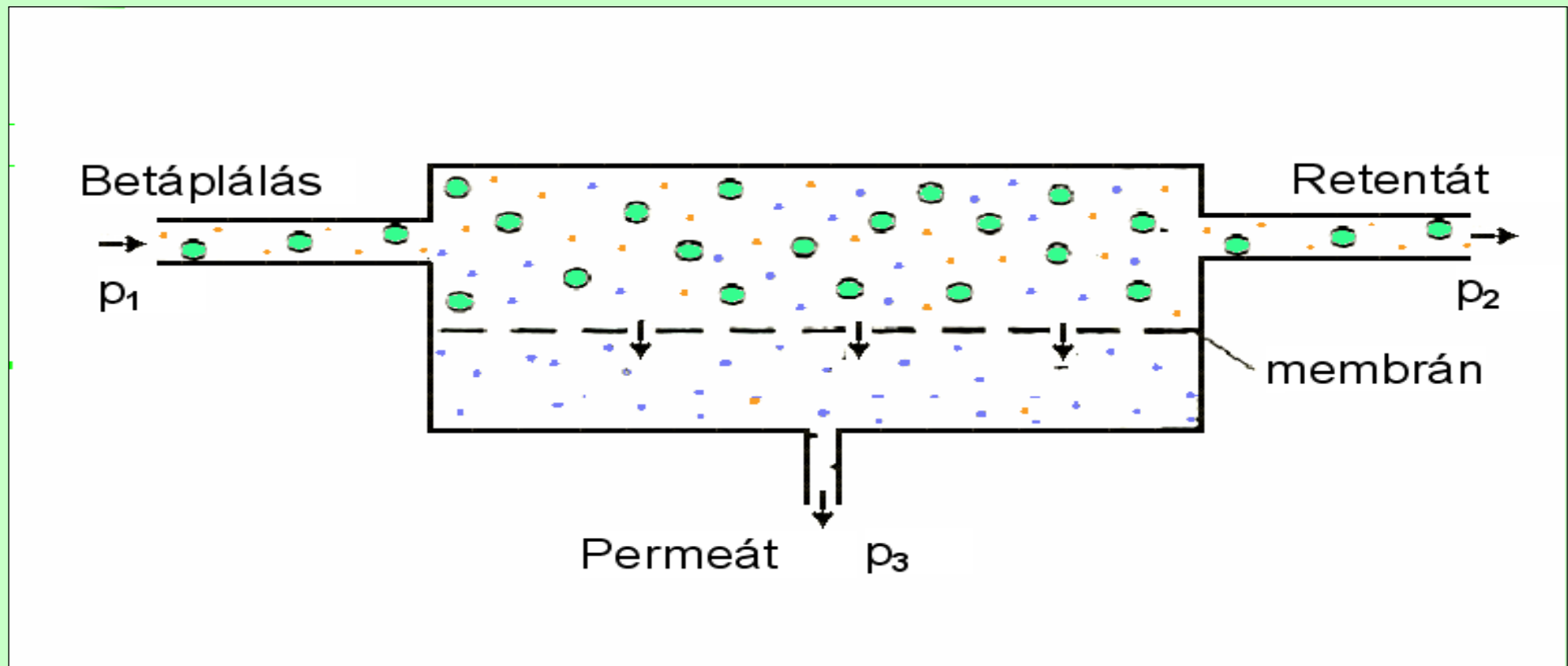


A technológiai paraméterek hatása

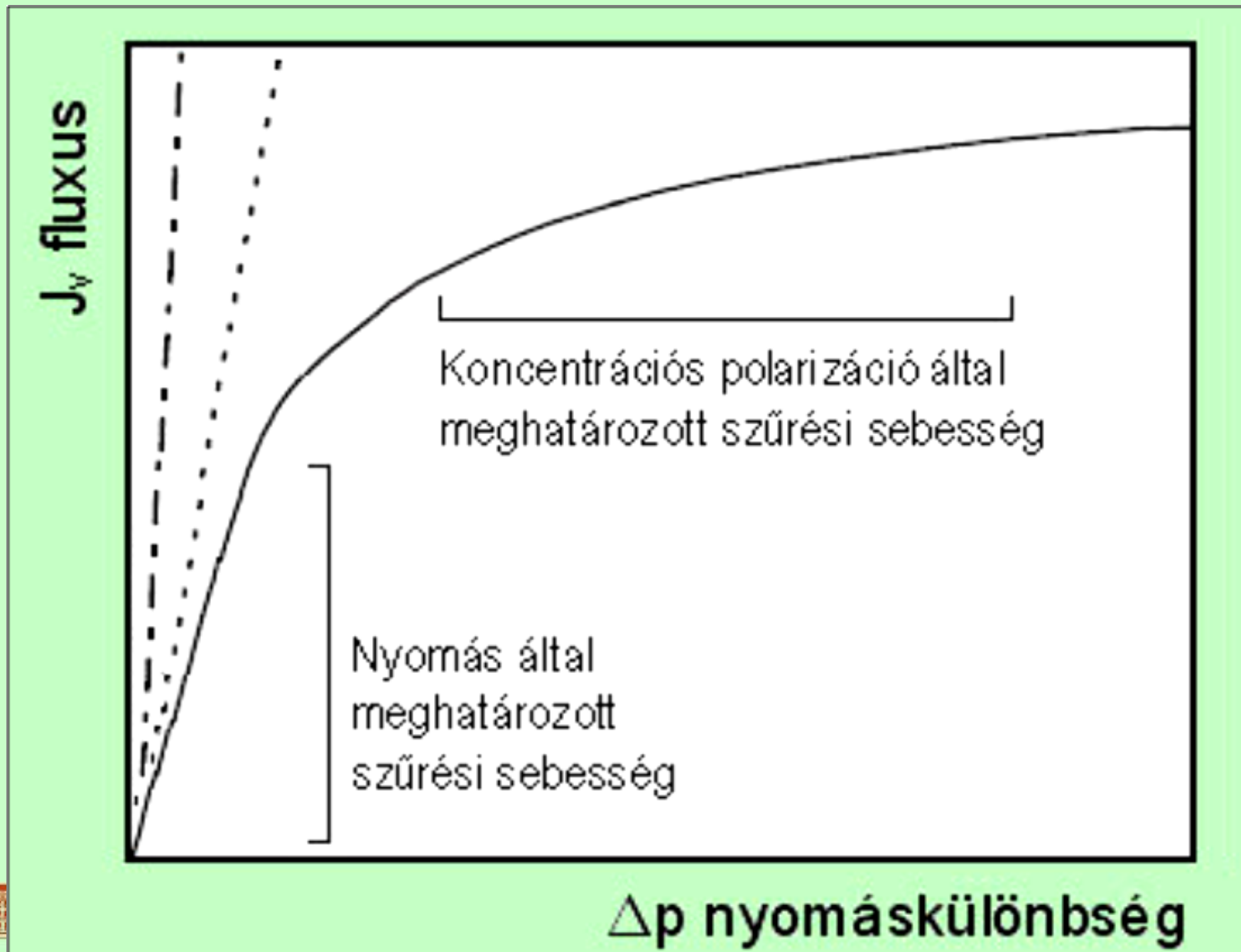
Nyomáskülönbség

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:

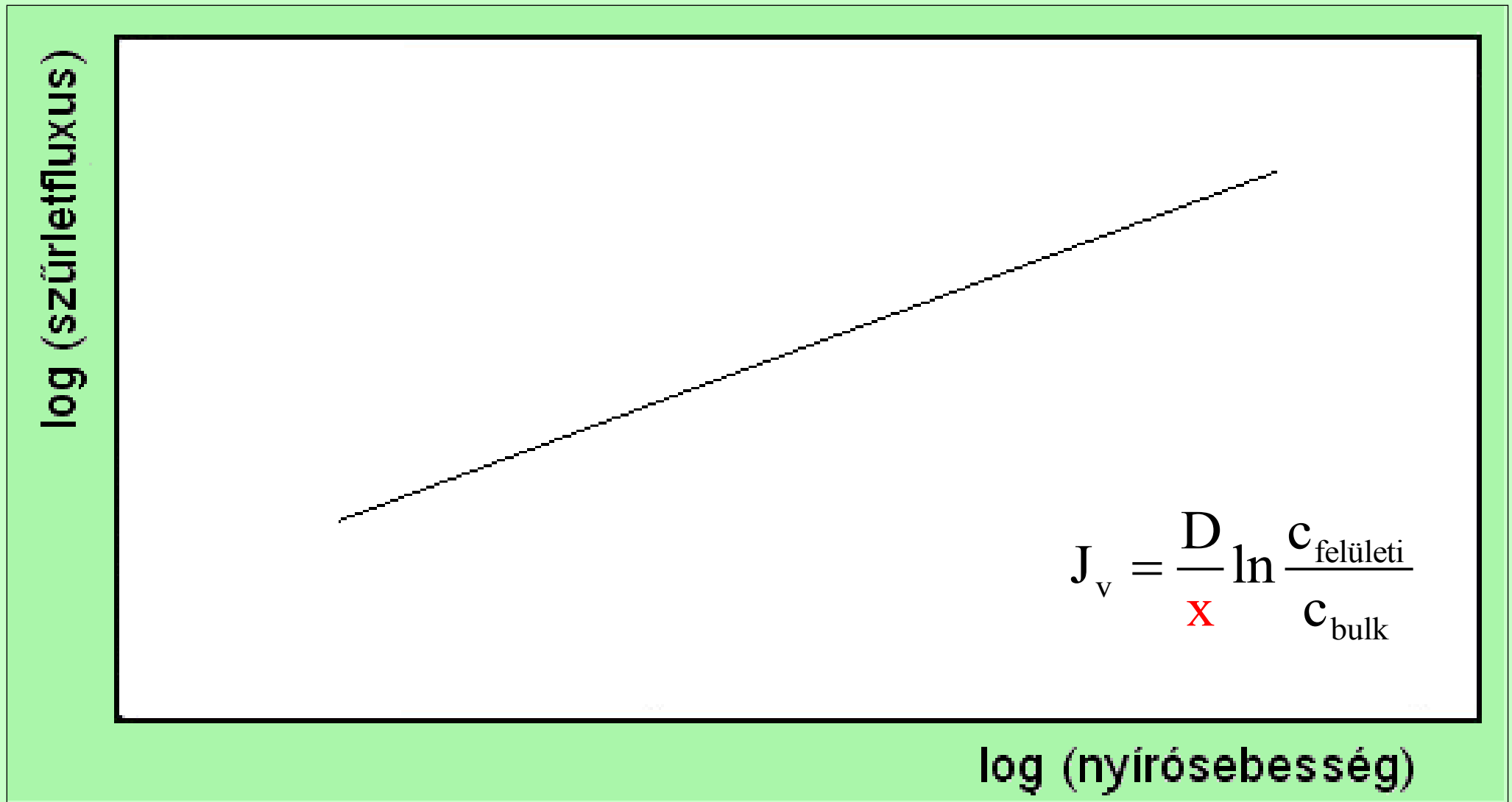
Re szám

P/V

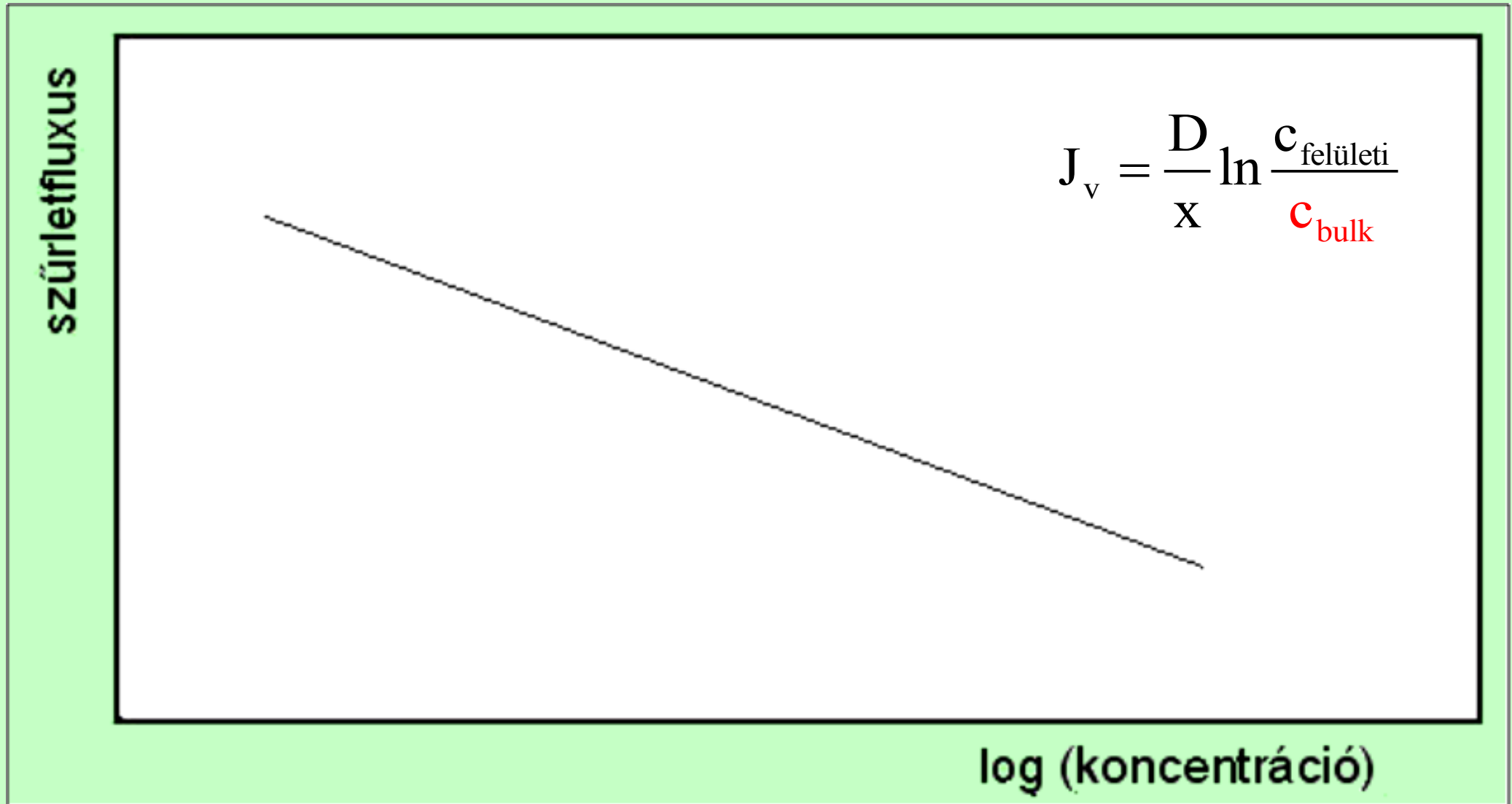
nyírósebesség



A permeát fluxus és a nyírósebesség összefüggése



A fehérjekoncentráció hatása a membránszűrés sebességére



A technológiai paraméterek hatása

A membrán (ifjú)kora

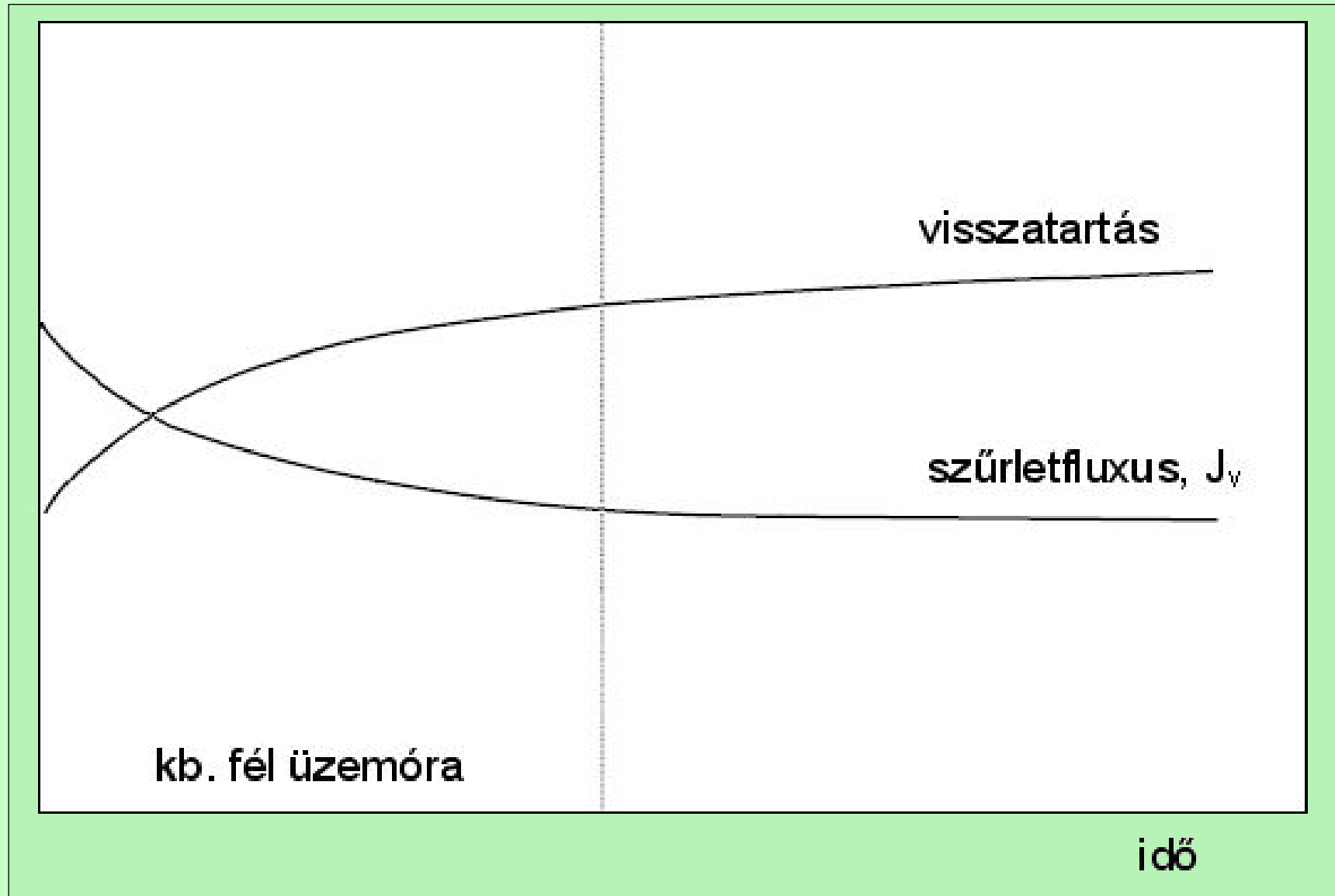
A vadonatúj membrán tulajdonságai a legelső használatba vételnél erősen megváltoznak.

A membrán öregedésére ható legfontosabb tényezők:

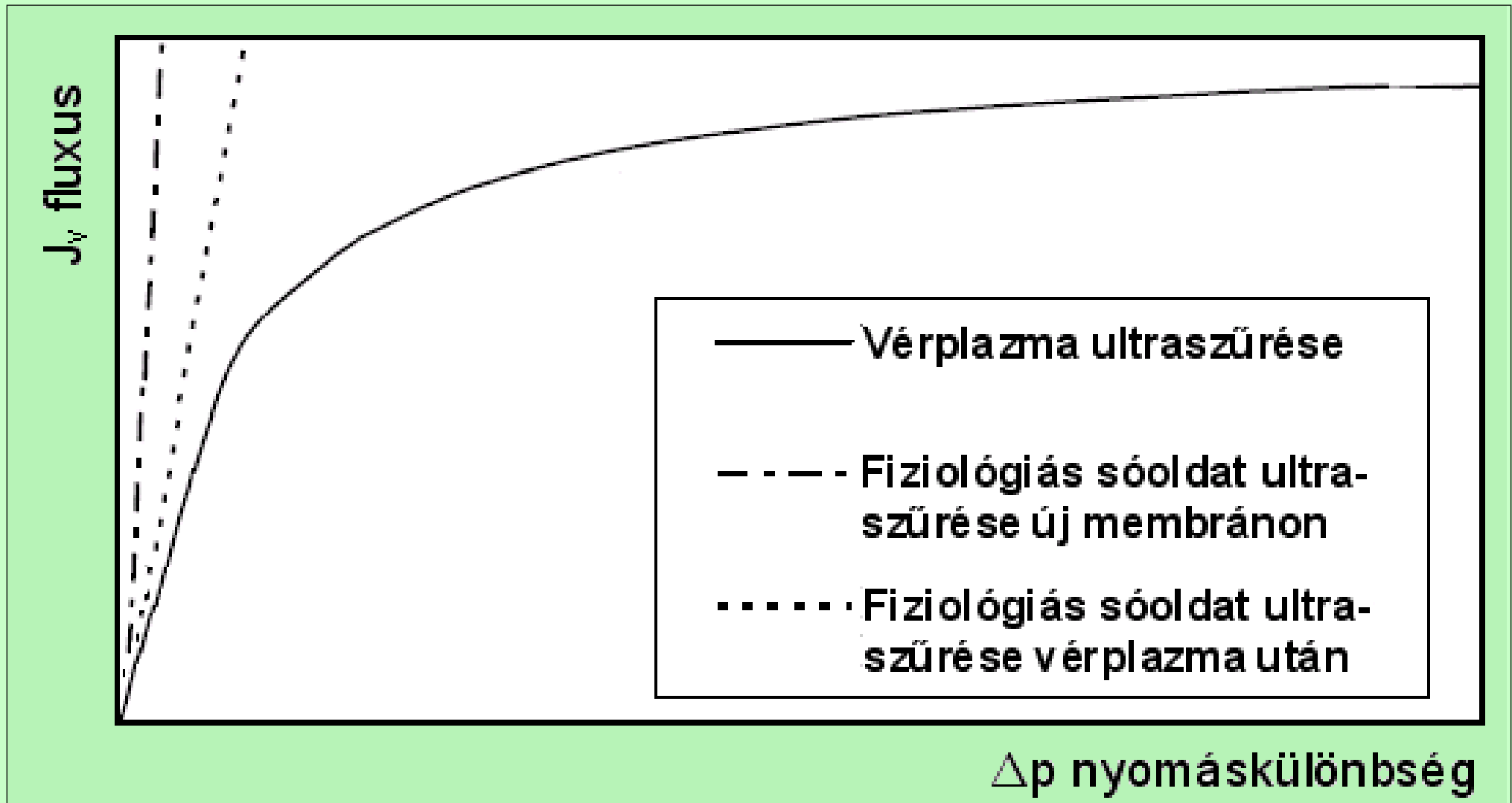
- a fehérjék adszorpciója a membrán felületén
- (irreverzibilis) gél vagy réteggképződés a felületen
- szilárd részecskék (sejttörmelékek), vagy fehérjék "beszorulása" a membrán pórusaiba



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

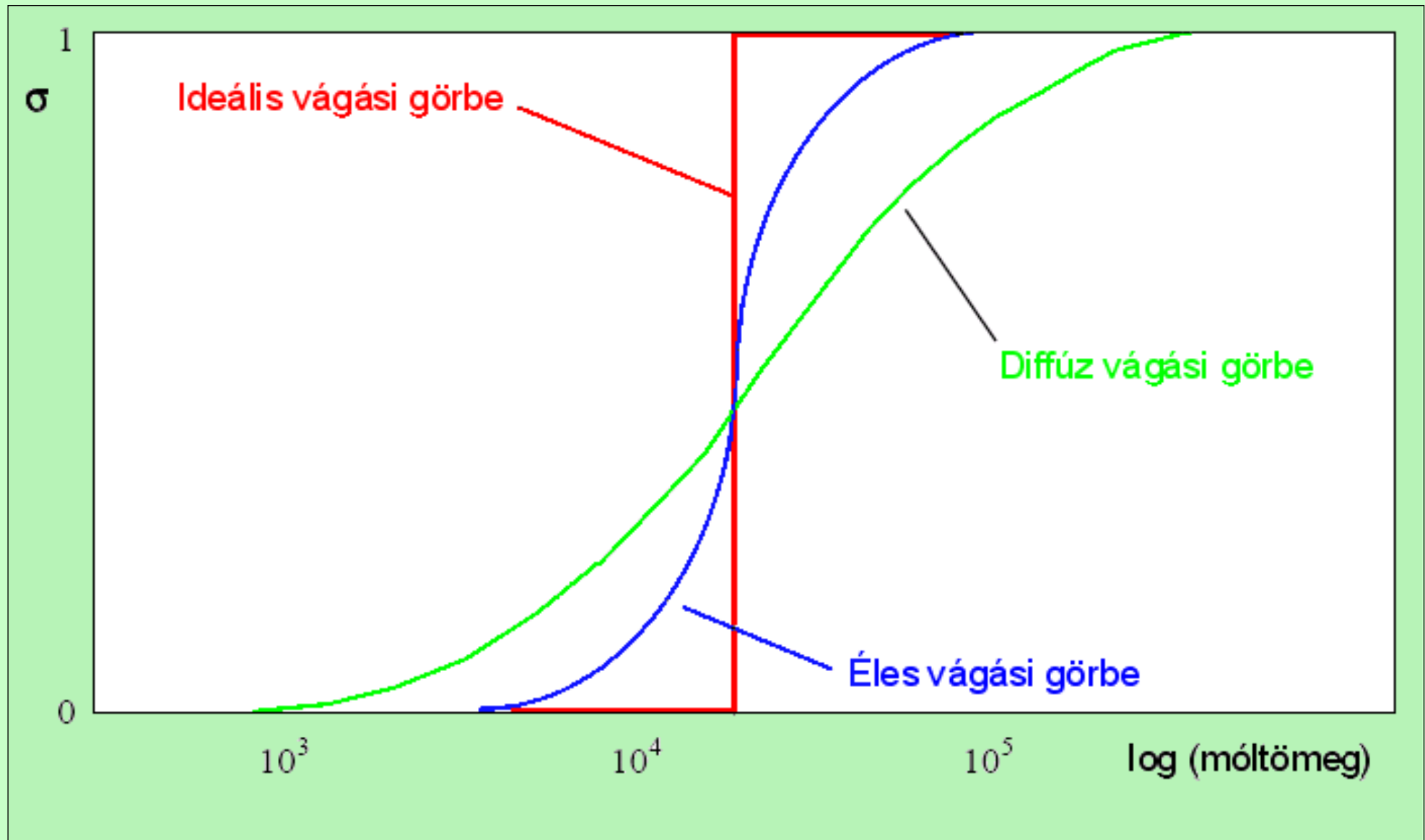
- membrán szelektivitása:

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

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



Vágási görbék

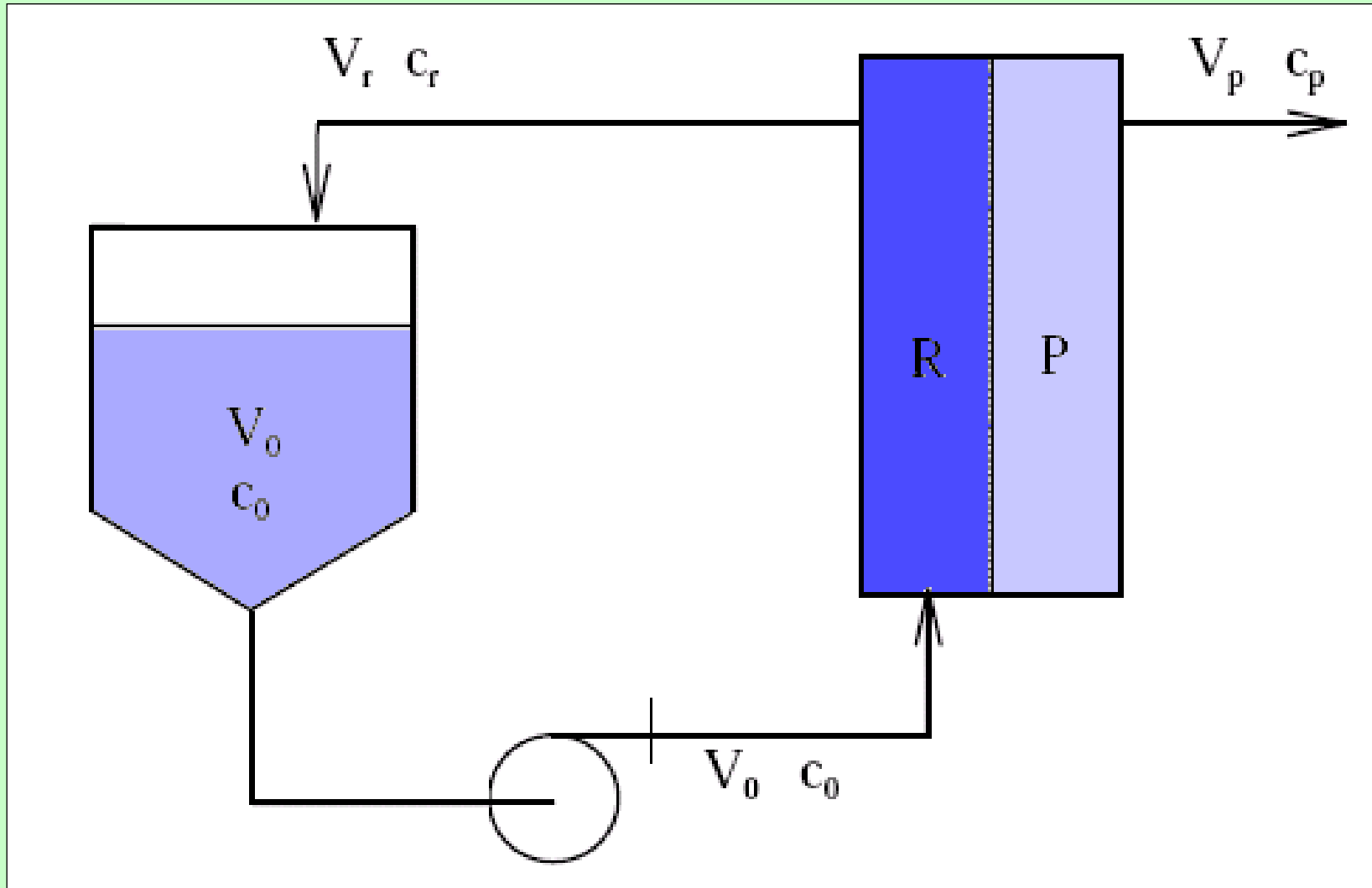


A membránszűrés anyagmérlegei

- 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:

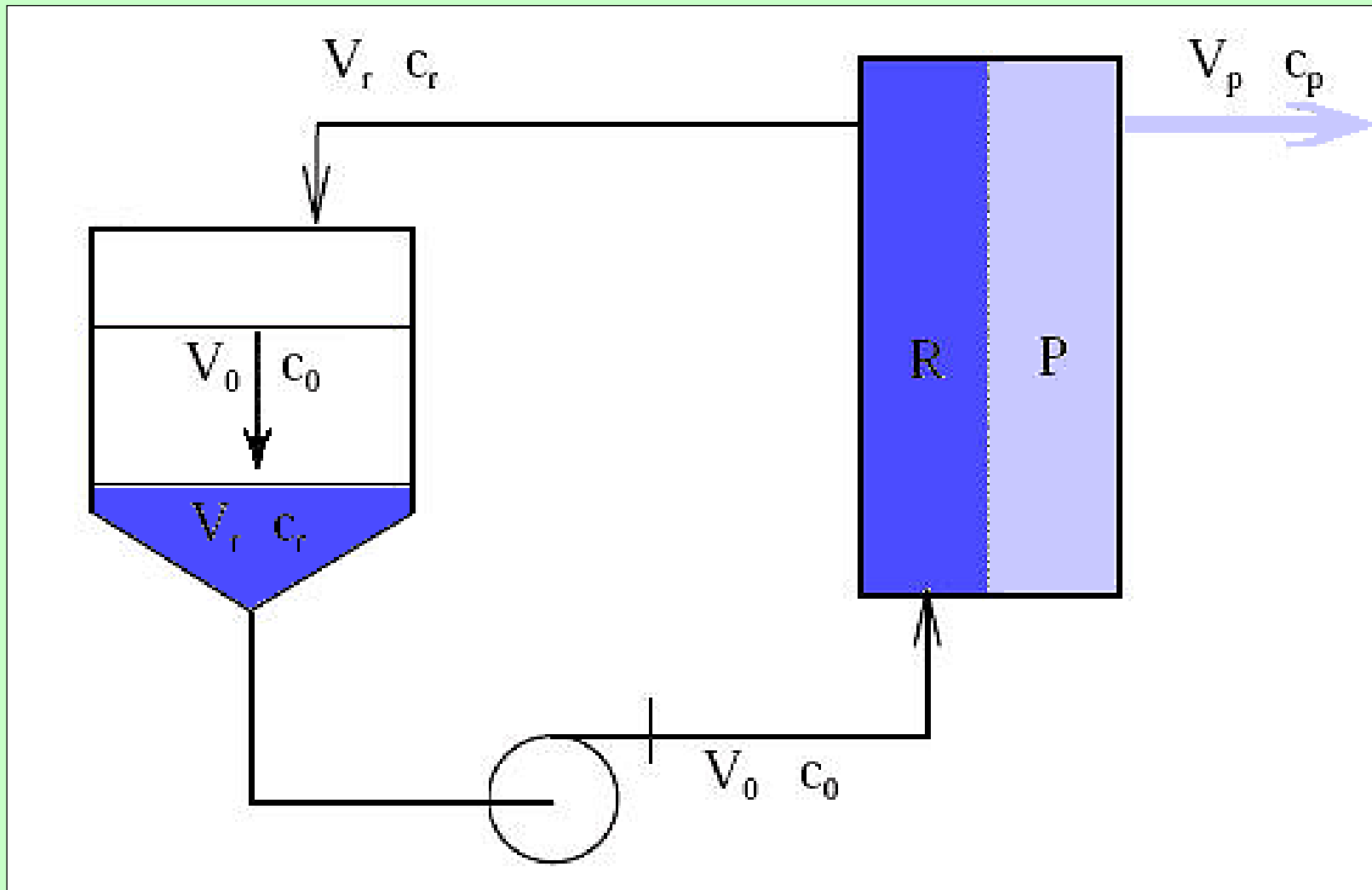
$$V_0 c_0 = V_r c_r + V_p c_p$$

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

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



Membrános koncentráció 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.

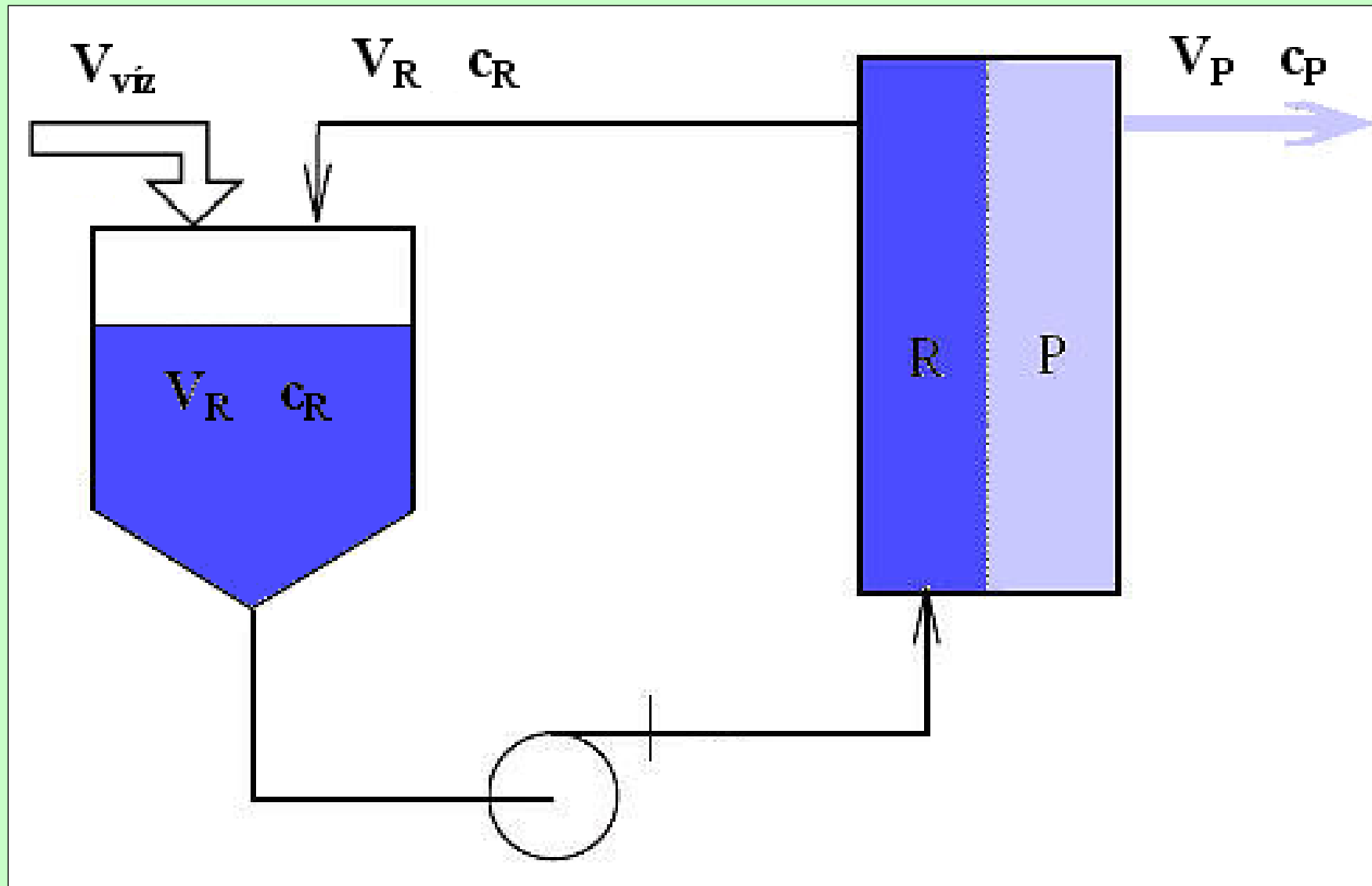
Állandó retentát térfogat:

$$V_0 = V_R$$

$$V_P = V_{\text{víz}}$$



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, $\sigma = 1$):

$$c_R = c_0$$



a koncentráció nem csökken.

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

$$c_R = c_0 e^{-\frac{V_{\text{víz}}}{V_0}}$$

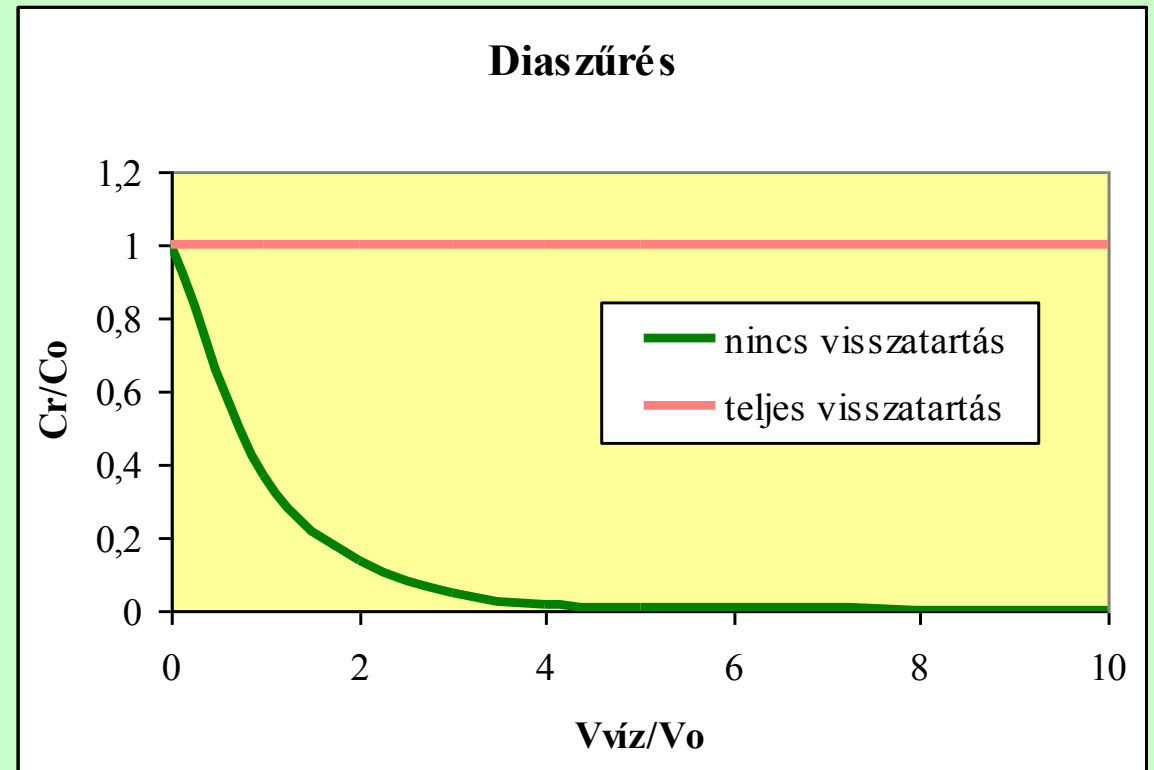


a koncentráció exponenciálisan csökken.



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:

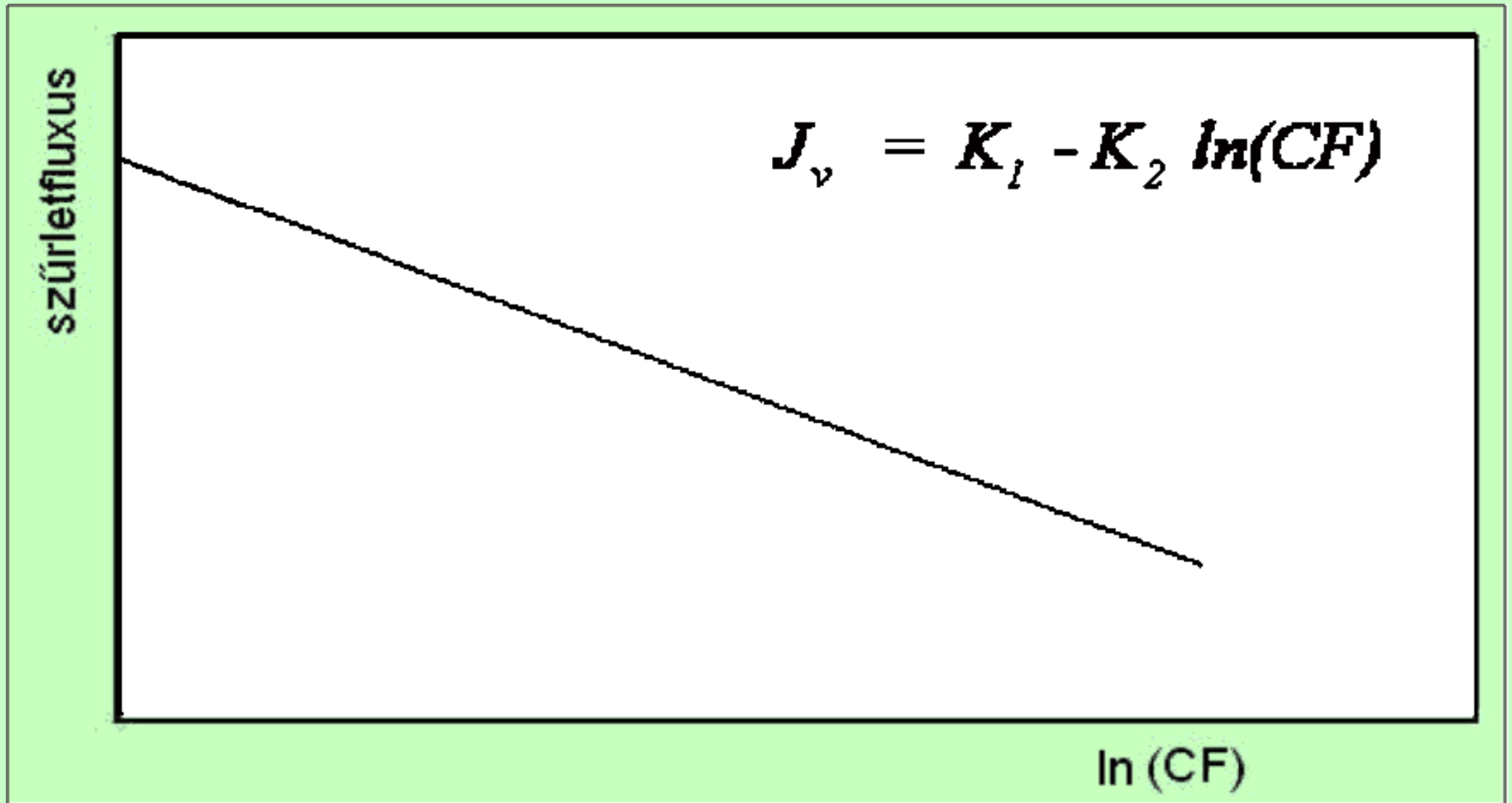
$$J_v = A_1 - A_2 \ln c_b$$

$$c_R = c_0 CF^\sigma$$

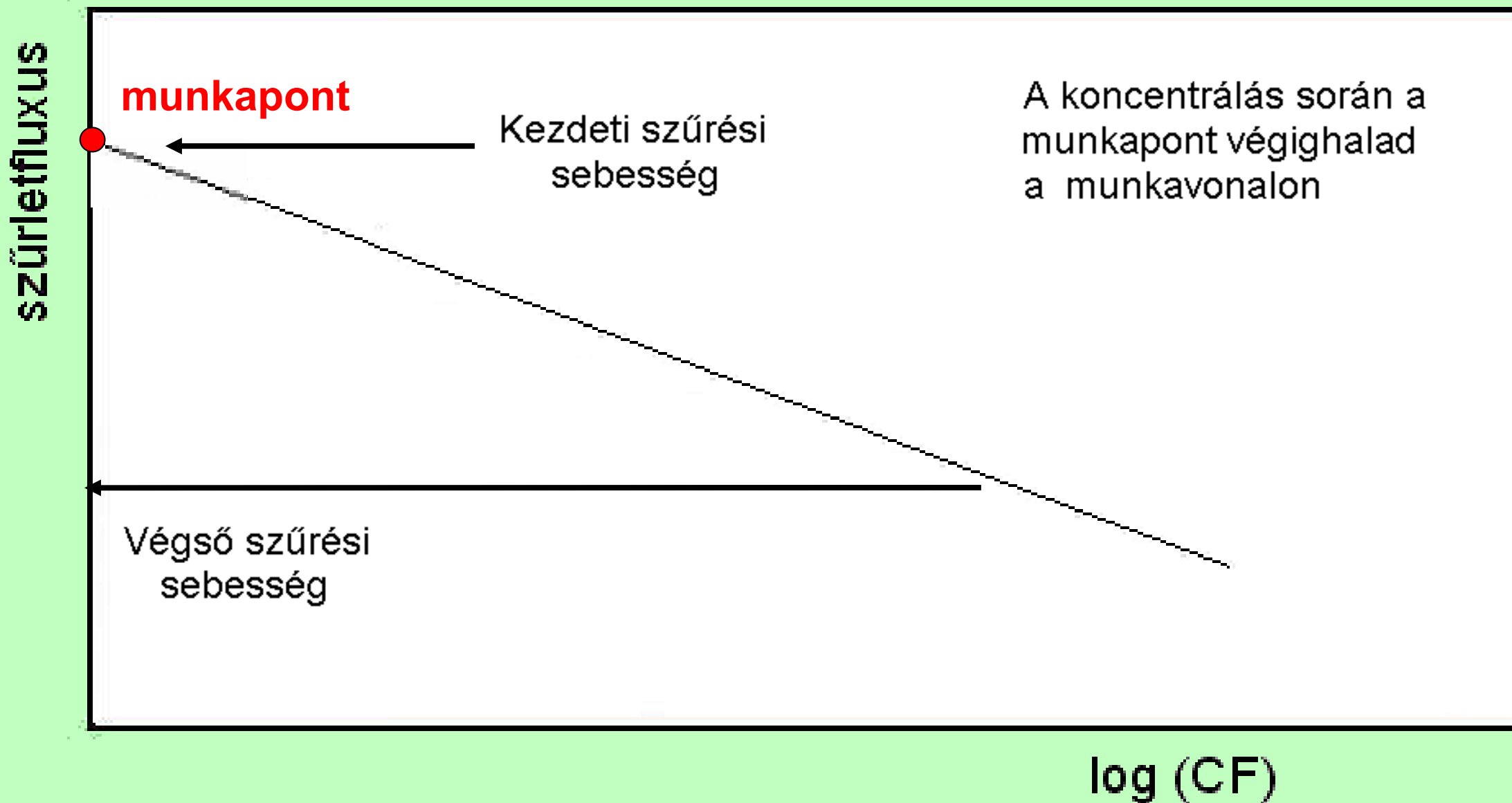
$$J_v = K_1 - K_2 \ln CF$$



Az ultraszűrés munkavonala



A membránszűrés munkavonala



A membránszűrés anyagmérlegei

Térfogatáram:

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

Átlagos fluxus:

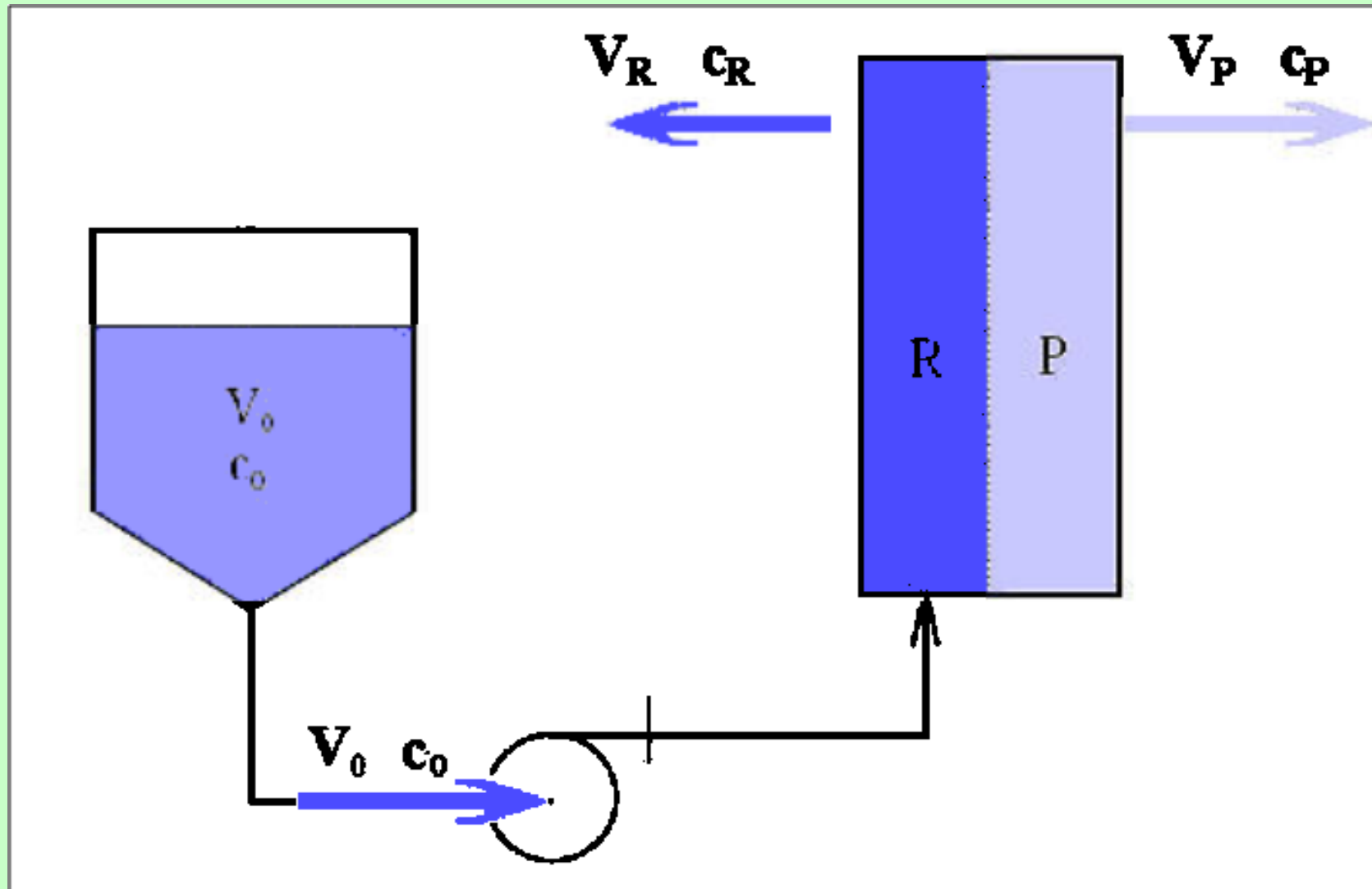
$$J_v = L_p (\Delta p - \Delta \pi)$$

Szűréségi 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

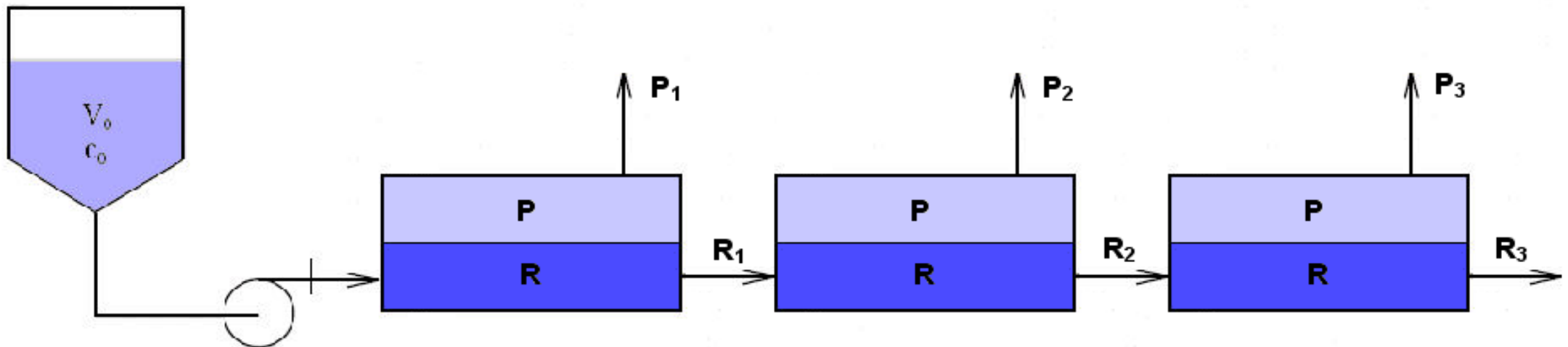
a munkapont nem vándorol \longrightarrow a berendezés állandóan a
legnagyobb fluxus értéken működik



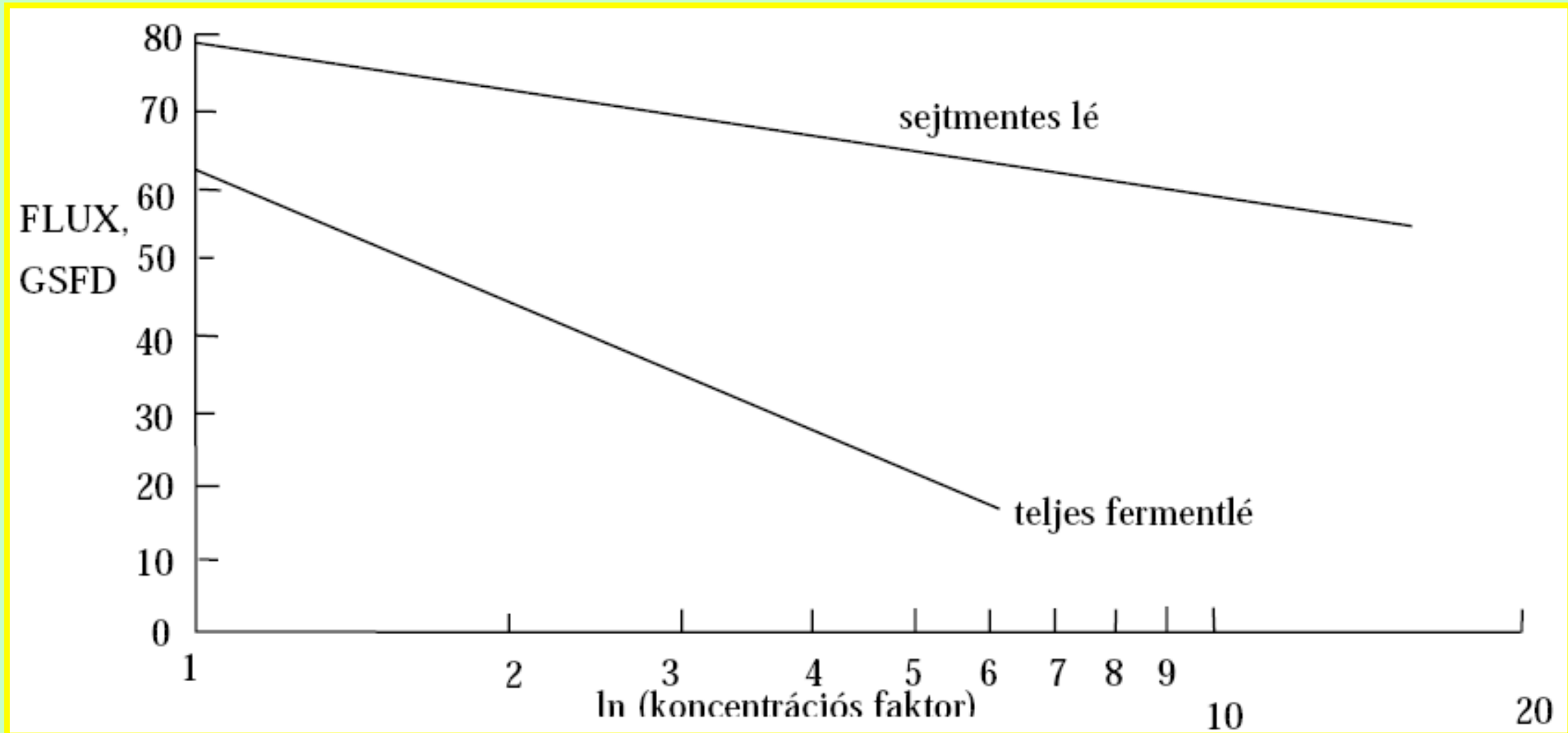
A többlépcsős folyamatos membránszűrés folyamatábrája

TÖBBLÉPCSŐS
ULTRASZŰRŐK

$$CF_1 = \sqrt[3]{CF_{összes}}$$



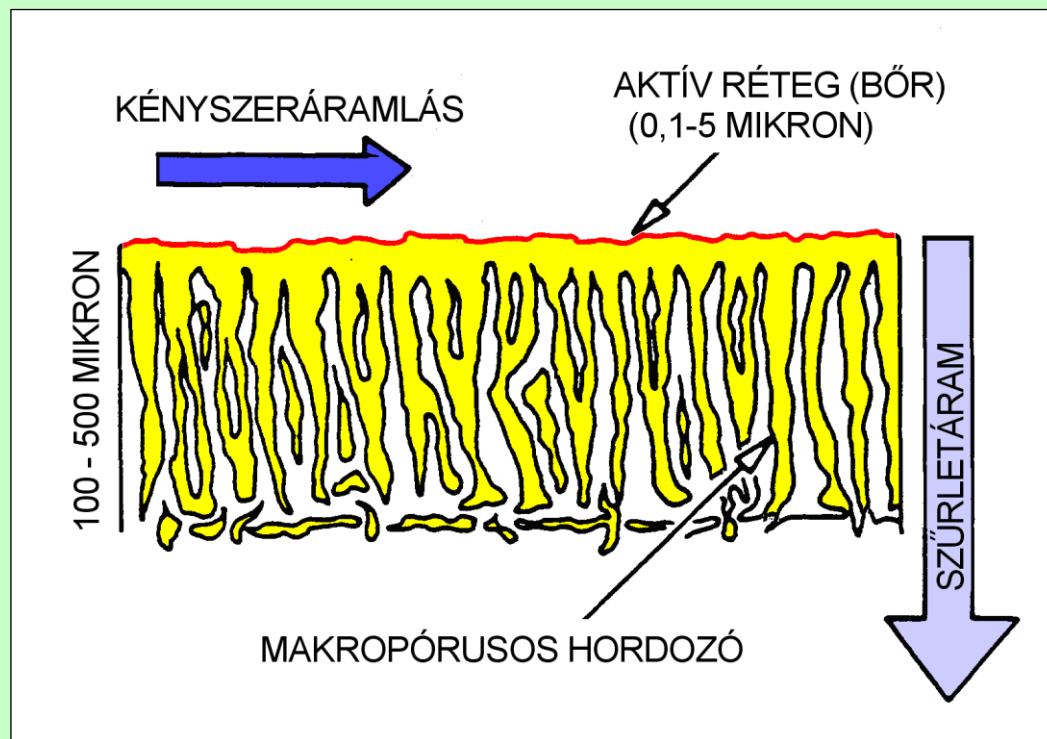
Teljes és szűrt fermentlé membránszűrésének összehasonlítása



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 permeabilis 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

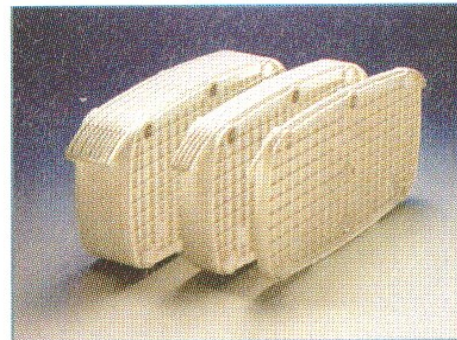
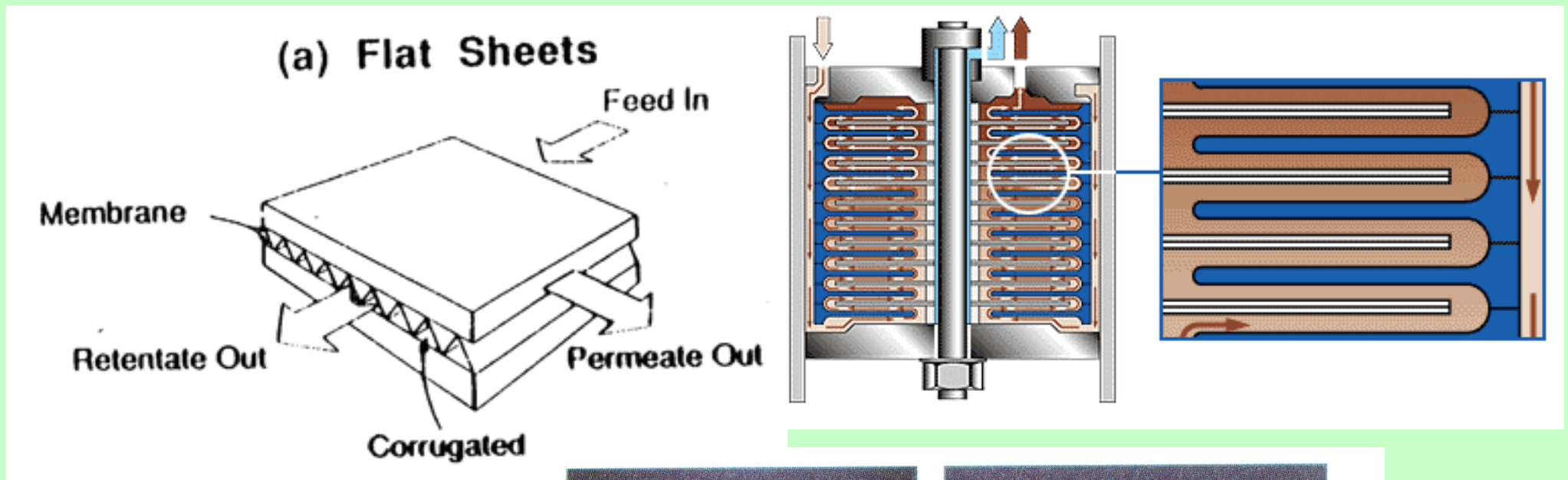
Hordozóval, távtartókkal, csatlakozókkal, burkolattal ellátott cserélhető egységek az ún. membránmodulok.

Főbb kialakítási típusaik:

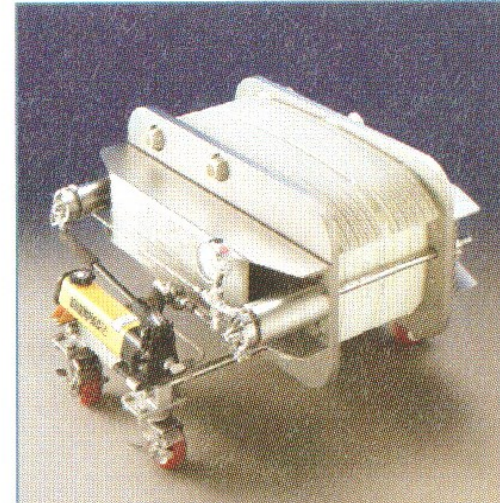
- sík formájú membránok (csak lamináris áramlás)
 - **lapmembránok** (legrégebbi, több rétegű lehet, eltömődésre hajlamos, könnyen javítható)



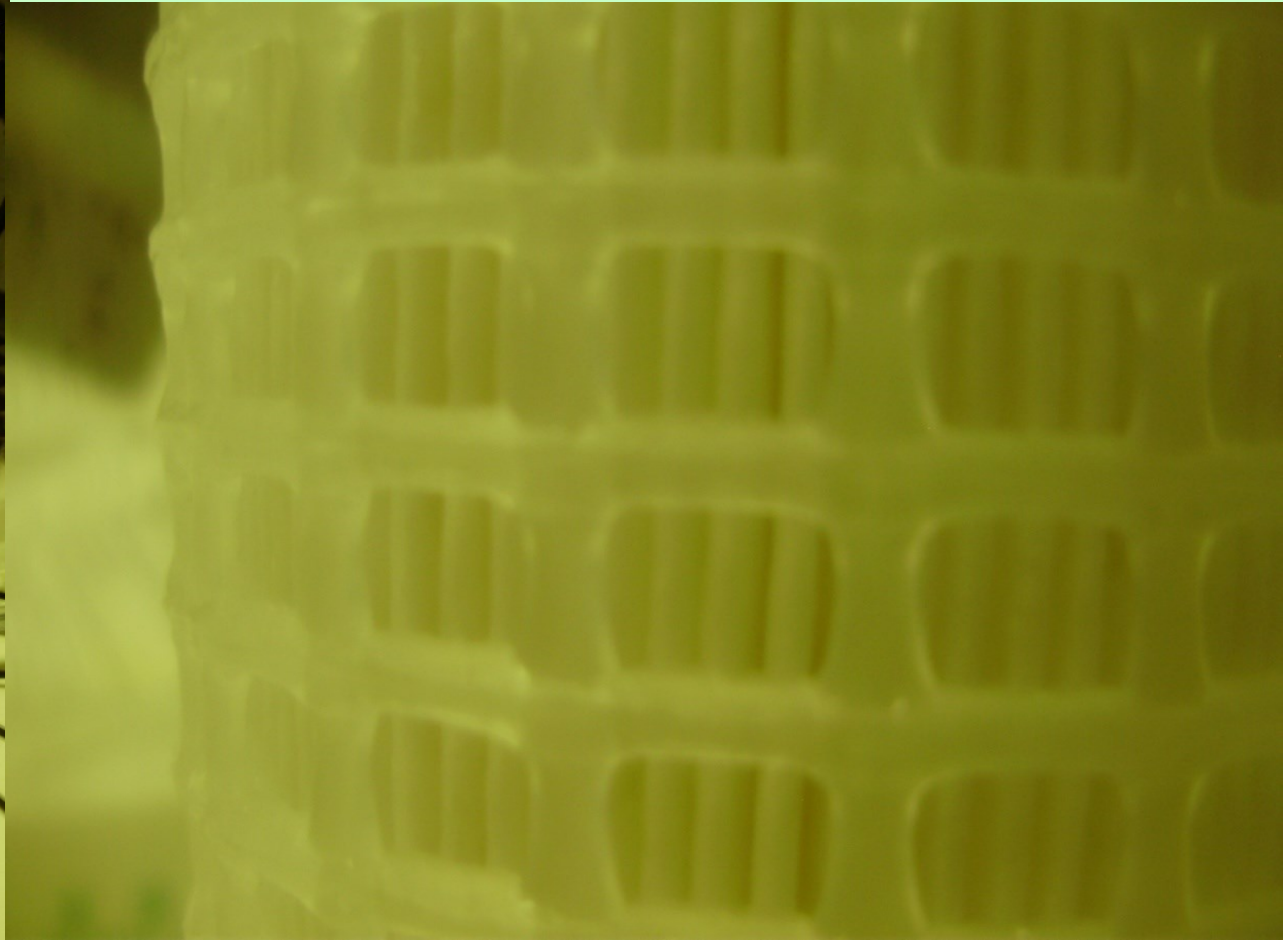
Lapmembrán modulok



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

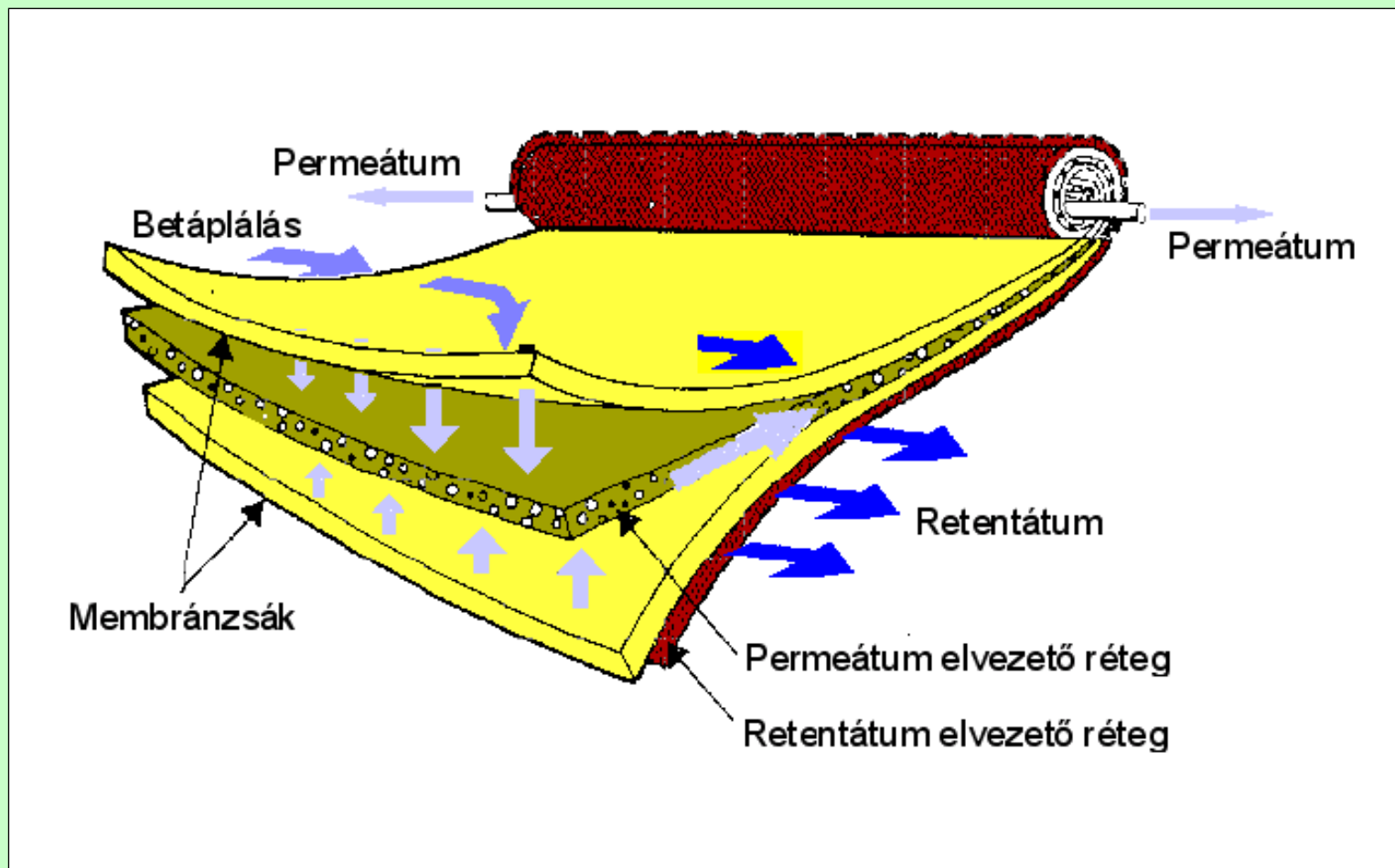


Lapmembrán modulok



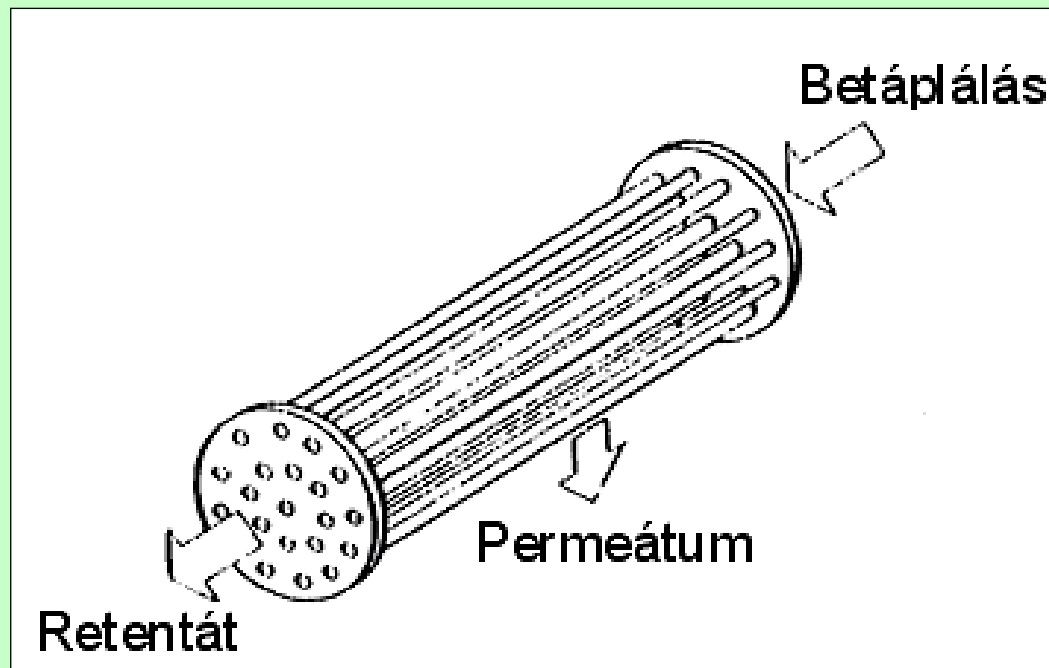
Membránmodulok

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



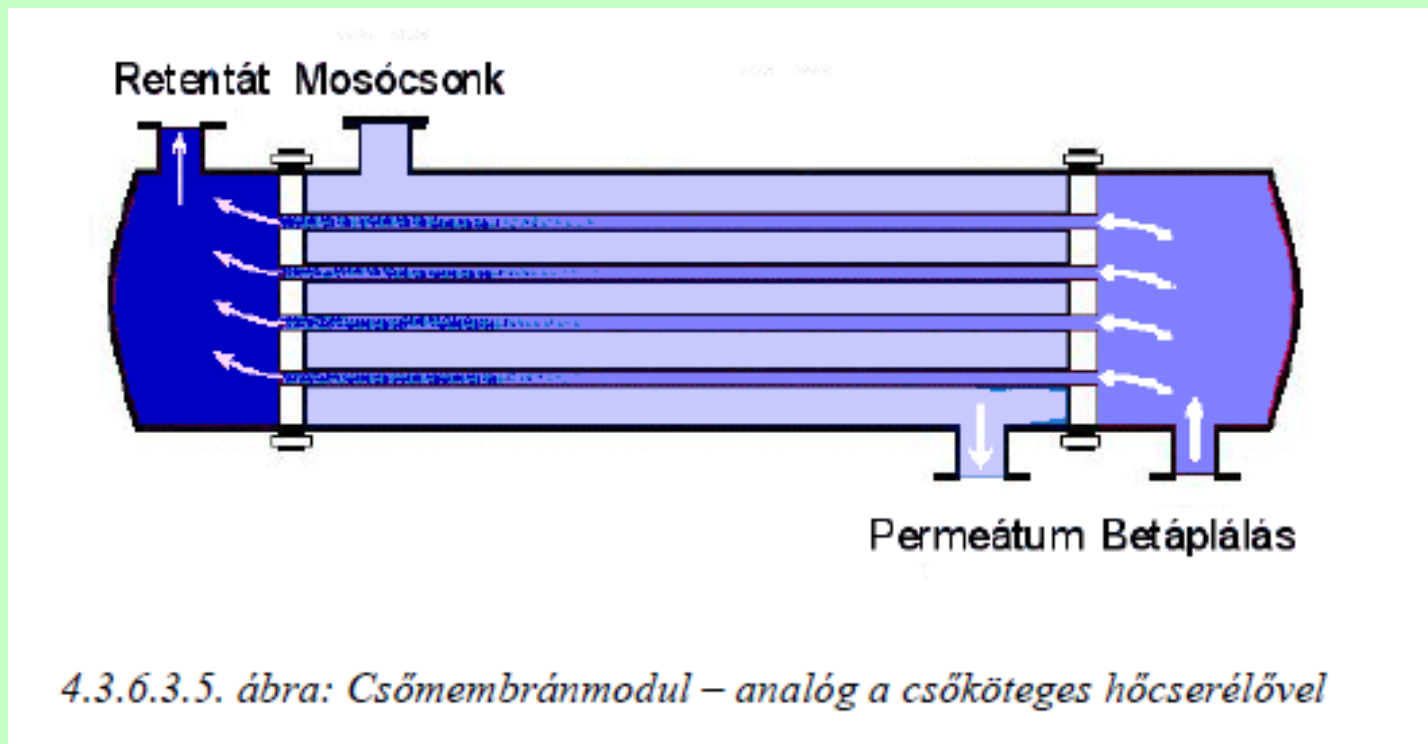
Csőmembrán modulok

- 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)



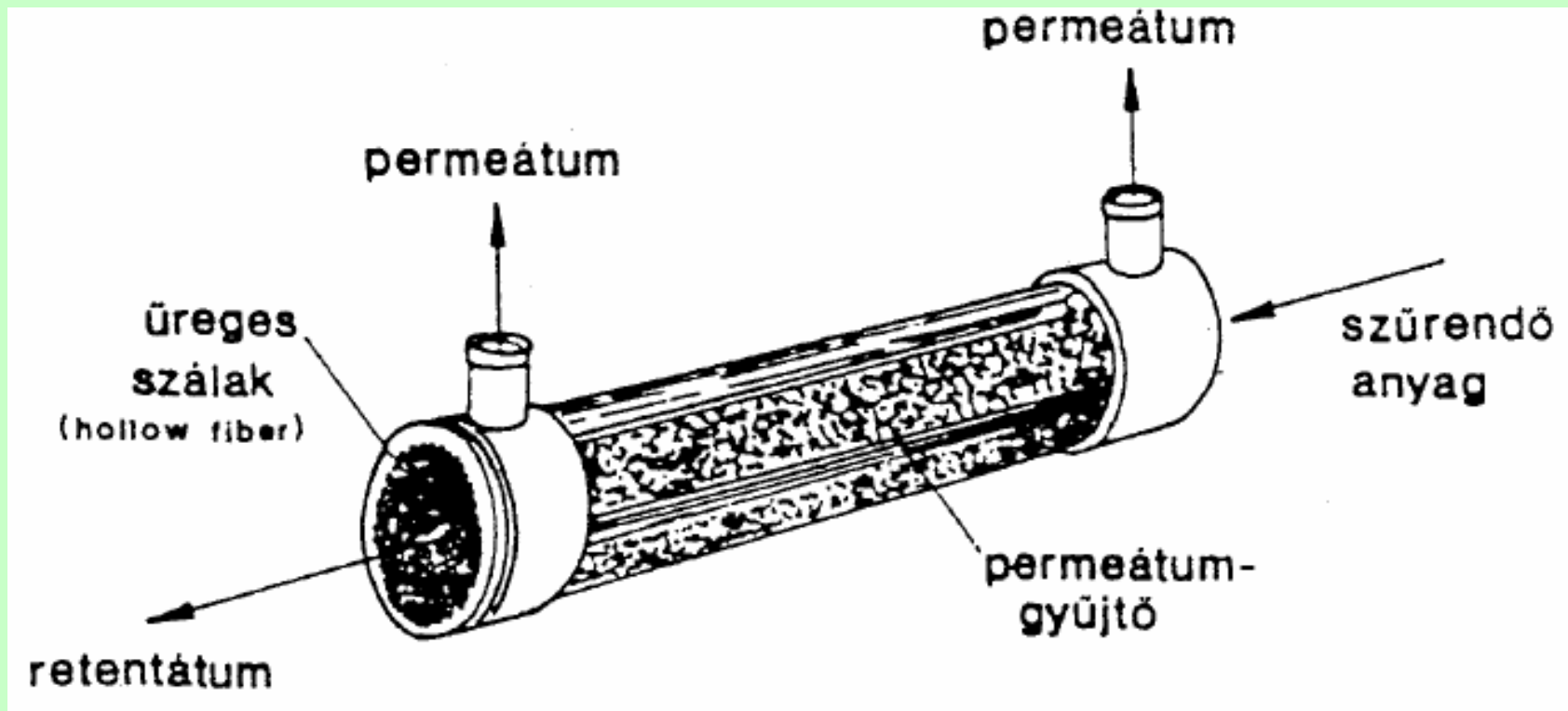
Csőmembrán modulok

- 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.

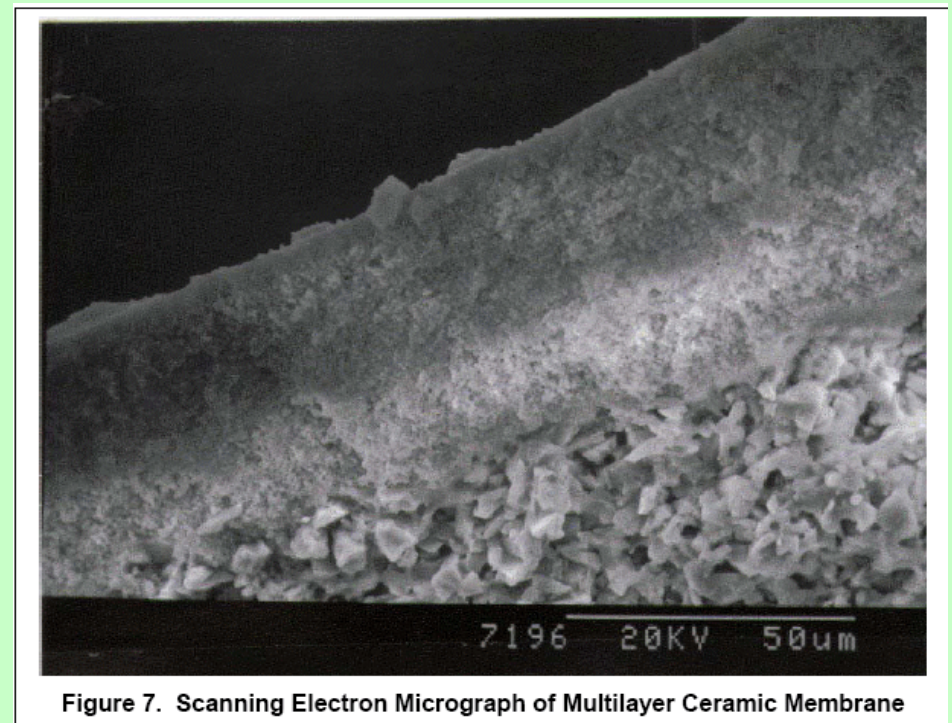
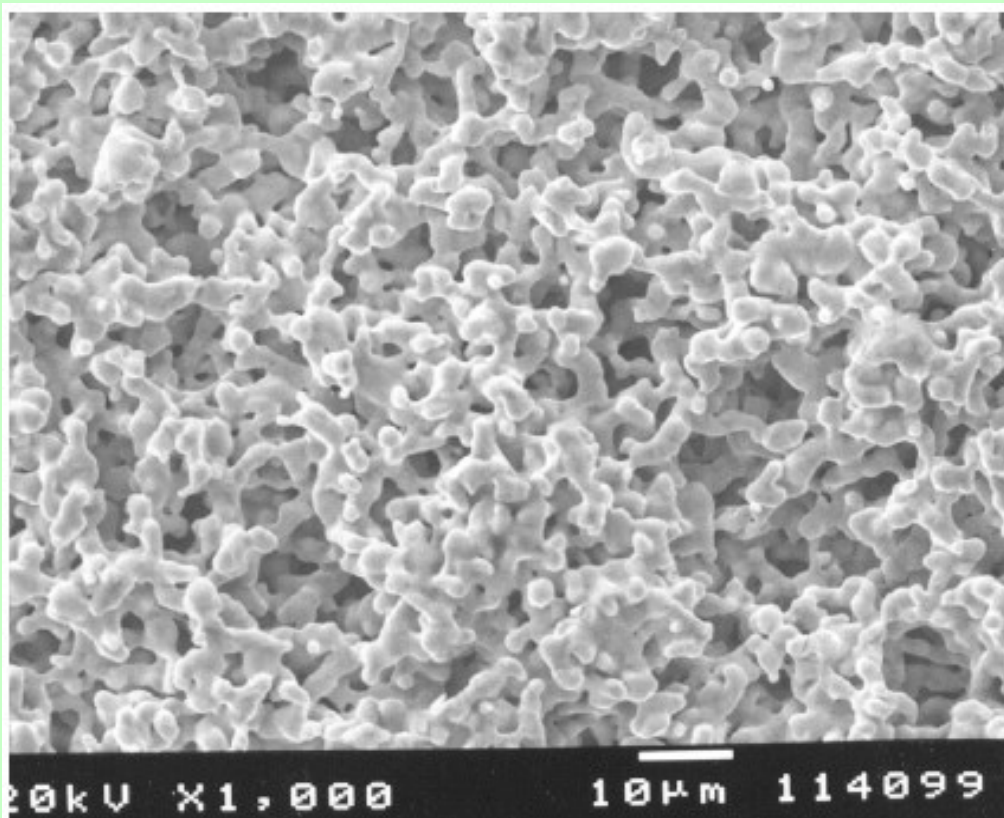
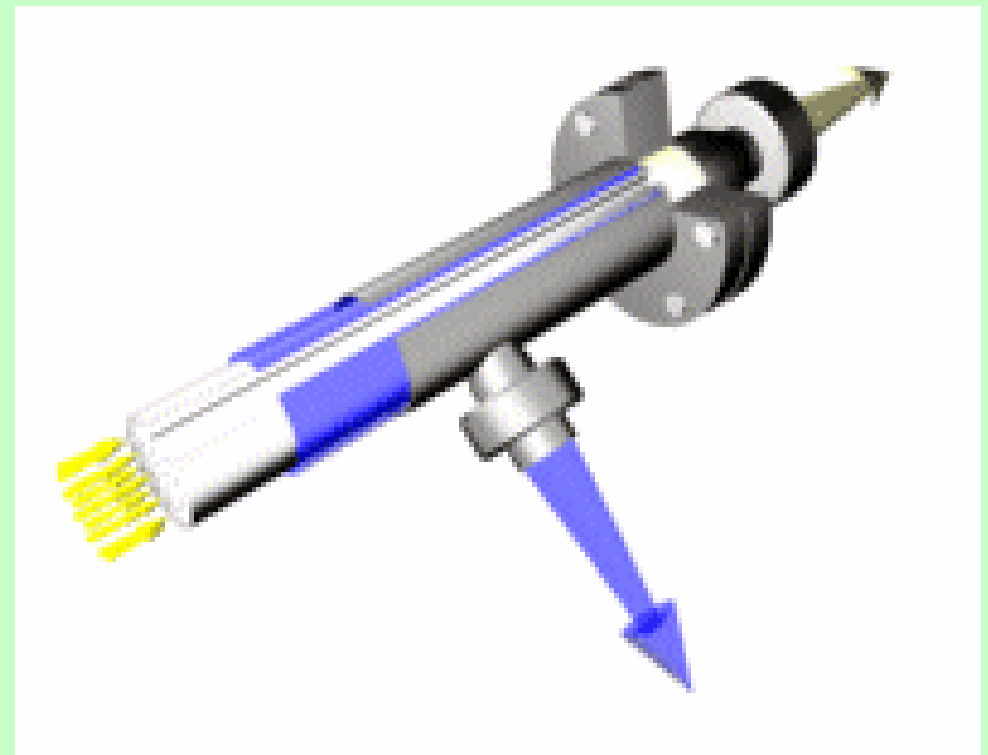
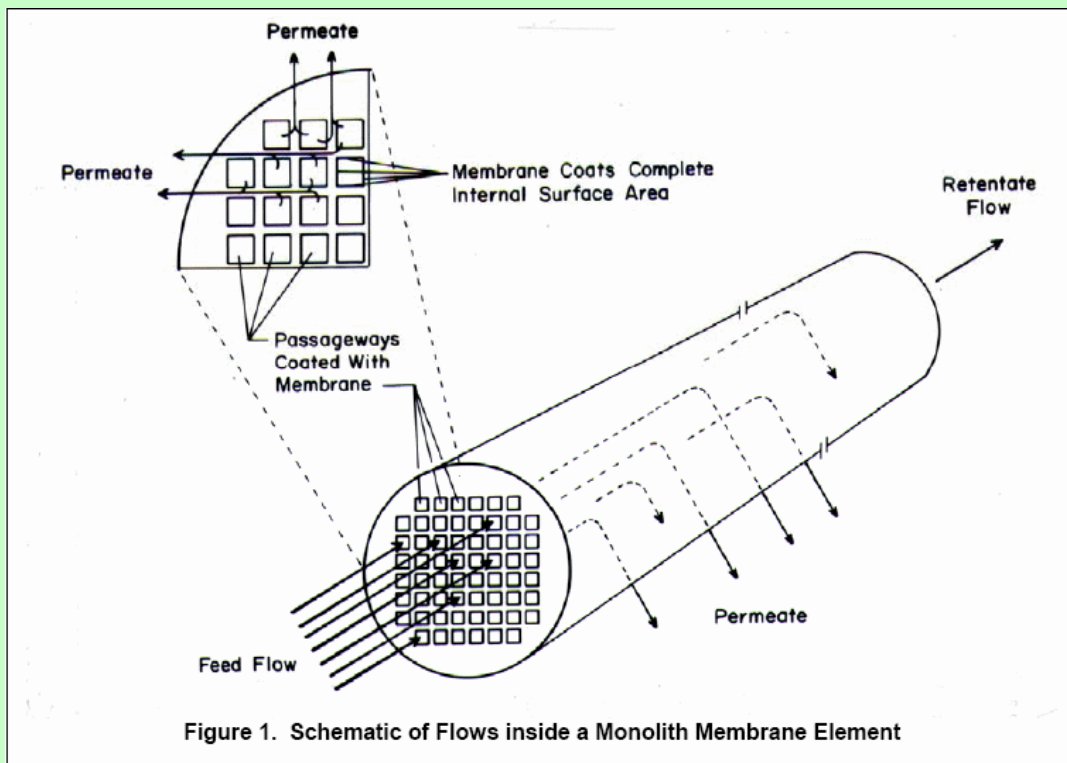


Figure 7. Scanning Electron Micrograph of Multilayer Ceramic Membrane



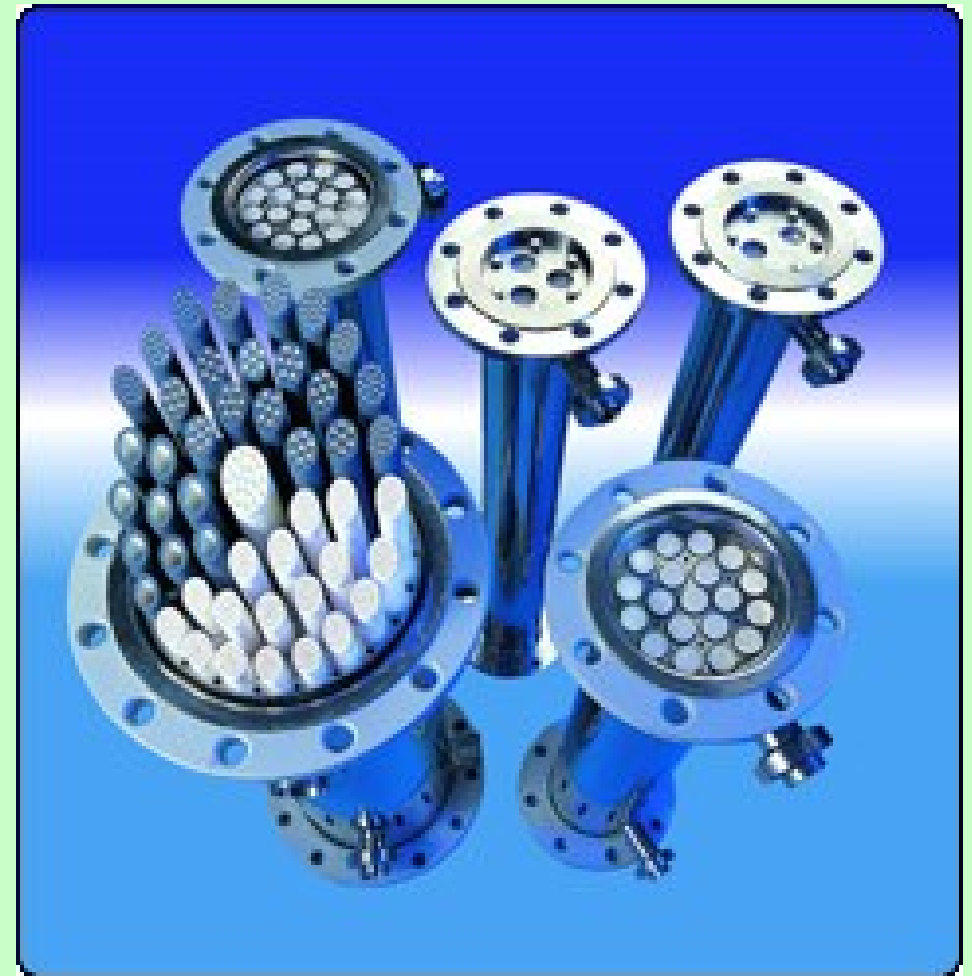
Szinterelt membránok

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

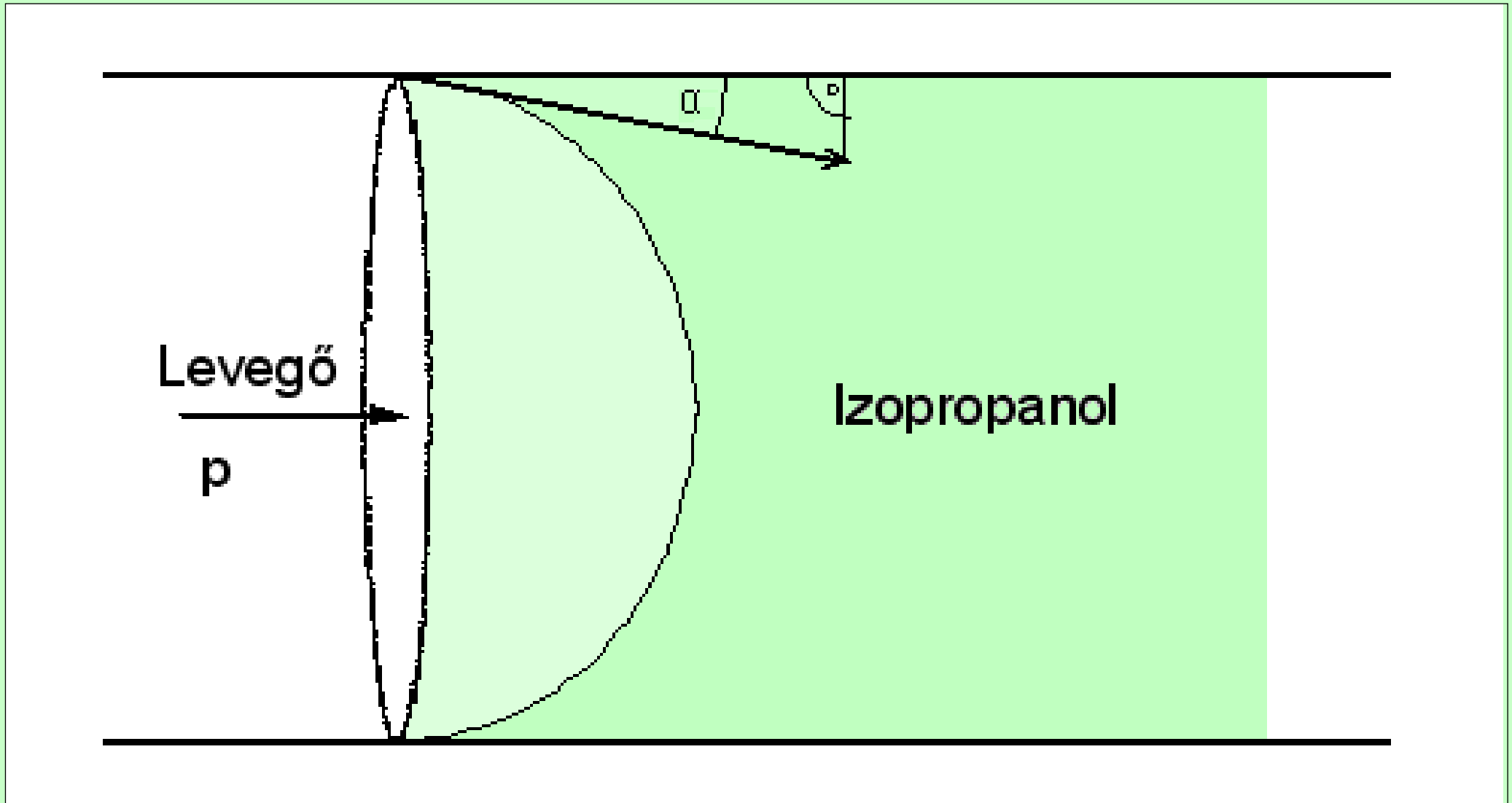
Integritásvizsgálat: buborékpont meghatározás

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

