

Mérések fluoridion-szelektív elektróddal

(Csak a Zékány László vezette gyakorlatok számára.)

1. Bevezetés

A **potenciometria** olyan elektroanalitikai módszer, amely során egy elektrolitoldatba merülő két elektródból összeállított elektrokémiai cella elektródjai között fennálló potenciálkülönbséget mérjük. Az elektródok felületén kialakuló elektródpotenciálok közvetlenül nem határozhatók meg, csak a két potenciál különbségének a regisztrálására van lehetőségünk. Az elektródpotenciál (E) és az azt kialakító elektroaktív komponens koncentrációja (c) (pontosabban aktivitása (a)) közötti összefüggést a Nernst-egyenlet írja le:

$$E = E_o + \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_{ox}}{c_{red}}$$

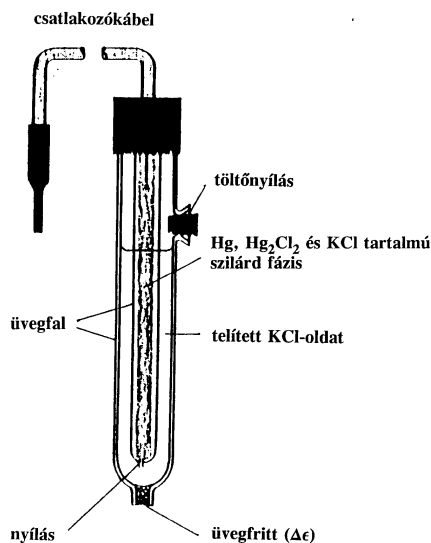
ahol E_o a standard elektródpotenciál, R az egyetemes gázállandó, T az abszolút hőmérséklet, z az oxidált és redukált formák oxidációszámának a különbsége, F a Faraday-féle szám, míg c_{ox} illetve c_{red} a komponens oxidált illetve redukált formáinak a koncentrációja, ugyanis híg vizes oldatok esetén $c \approx a$ a feltételezésével a koncentráció értékek használhatók. Egy elsőfajú fémelektrod esetén (M fém merül M^{n+} ionokat tartalmazó oldatba) $c_{red} = 1$. Megállapodás alapján a hidrogénelektrod potenciálját 0,000 V-nak tekintjük, így elvileg bármelyik elektród potenciálja számszerűsíthető a megfelelő elektródokból összeállított elektrokémiai cella feszültségének a mérésével.

Ha a mérés során az egyik elektród potenciálját állandó értéken tartjuk, és a másik elektród potenciálja a Nernst-egyenlet szerint függ a mérni kívánt komponens koncentrációjától, akkor az elektrokémiai cellán mért feszültség felhasználásával a keresett komponens koncentrációja meghatározható. Az állandó potenciálú elektródot referencia- (vonatkoztatási, viszonyító) elektródnak, míg a másikat indikátor- (mérő) elektródnak nevezzük.

Referenciaelektrodként gyakran használnak ún. másodfajú fémelektrodot, amely egy fémből áll, mely rosszul oldódó sóját és a só anionjának egy jól oldódó sóját tartalmazó oldatba merül. Ilyenek például az **ezüst/ezüst-klorid** vagy a **kalomel** elektród (1. ábra), amelyek az $Ag/AgCl/KCl$ illetve a $Hg/Hg_2Cl_2/KCl$ rendszereket tartalmazzák. Ezeknek a másodfajú elektródoknak a potenciálja állandó (ha $[Cl^-] = \text{állandó}$ és $T = \text{állandó}$).

A *külső referenciaelektrodként* használt **ezüst/ezüst-klorid** elektródoknál egy üvegcsőben ezüst huzal van elhelyezve, melyet $AgCl$ réteggel vontak be, és a huzal a csőben található KCl vagy $NaCl$ oldatba merül. Az üvegcső oldalán található üvegfritt biztosítja az érintkezést a mintaoldattal, amibe az üvegcövet behelyezzük. (A minta folyadékszintje természetesen az üvegfritt felett kell legyen.)

Az **indikátorelektrod** fontos tulajdonsága, hogy gyorsan és reverzibilisen tudja változtatni a potenciálját a mérni kívánt ion koncentrációjának a változásával. Az indikátorelektrodok egyik fontos csoportját a membránelektrodok, egy másikat pedig az inert (nemes)fém elektródok alkotják.



1. ábra

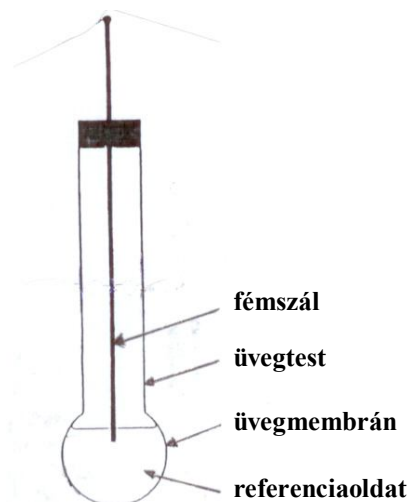
Kalomel elektród

A **membránelektrodok** ideális esetben csak egy adott ion vagy molekula mennyiségével arányos potenciált hoznak létre. Ez úgy alakul ki, hogy a membrán belső oldalán egy zárt térben referenciaoldat van, míg a membrán külső része a vizsgált oldattal érintkezik. A membrán belső és külső részén eltérő töltés alakul ki amely az ún. **membránpotenciált** eredményezi. A membránelektrod belső oldattere egyúttal egy másodfajú *belső referenciaelektrod* oldattere is, melynek fémszála biztosítja a fémes elektromos összeköttetést.

Például a **hidrogénion-szelektív üvegelektrod** (2. ábra) vékony üvegmembránt tartalmaz, amely belülről egy adott pH-jú referenciaoldattal érintkezik. Az elektródot eltérő hidrogénion koncentrációjú (pH-jú) oldatokba helyezve a membrán külső oldalán eltérő potenciálok alakulnak ki, így az elektród – mivel potenciálja megváltozik – felhasználható pH mérésre. A belső referencia egy Ag/AgCl elektród lehet.

Kristályos membránelektrodra példa a **fluoridion-szelektív membrán elektród**. Az érzékelő membrán egy plastikcső alján található LaF_3 egykristály, amely az elektromos vezetés növelése céljából nyomokban európium(II)-ionokat tartalmaz, és a cső belsejében lévő NaF-oldattal érintkezik. Az elektródot eltérő fluoridion koncentrációjú oldatokba helyezve a LaF_3 kristály külső oldalán eltérő potenciálok alakulnak ki, így az elektród $[\text{F}^-]$ mérésére lesz alkalmas. A csőben NaF és NaCl tartalmú oldat van, melybe egy AgCl-réteggel borított ezüstsál merül. Tehát a belső referencia-elektrod Ag/AgCl elektród. (A fluoridion-szelektív elektród érzékeny a H^+ és OH^- ionokra, ezért állandó pH-n kell használni.)

A membránelektrodok fenti, változó potenciálját úgy tehetjük mérhetővé, ha egy külső referencia elektród segítségével elektrokémiai cellát állítunk össze és meghatározzuk a két elektród potenciáljának a különbségét.



2. ábra

Hidrogénion-szelektív elektród

Az **inert fém-elektrodok** nemesfém-ből (Pt, Au) készülnek és nem vesznek részt redoxireakciókban. Így széleskörűen használhatók redoxirendszerek potenciáljának a mérésére vagy a potenciálváltozással járó redoxi titrálások végbemenetelének a detektálására. Ha például vas(II)iont (Fe^{2+}) és vas(III)iont (Fe^{3+}) tartalmazó vizes oldatba platinaelektrodot helyezünk, akkor az elektrod felületén kialakuló potenciál a Nernst-egyenletnek megfelelően a Fe^{2+} ($c_{red.}$) és Fe^{3+} ($c_{ox.}$) koncentrációjától fog függni. Ha a mintabeli Fe^{3+} -at ón(II) oldattal titrálva fokozatosan Fe^{2+} -vé redukáljuk, akkor a platinaelektrodon kialakuló potenciál megváltozik a változó $c_{red.}$ és $c_{ox.}$ miatt. A platinaelektrodon kialakuló potenciált úgy számszerűsíthetjük, ha egy referenciaelektrod segítségével elektrokémiai cellát állítunk össze és mérjük a két elektrod potenciáljának a különbségét.

A potenciometriás méréseknek két területe ismert. **Direkt potenciometria** során a mérendő feszültség pontos értékére vagyunk kíváncsiak (amelyből a Nernst-egyenlet alapján a keresett mintabeli komponens koncentrációja közvetlenül meghatározható; pl. egy minta pH-jának közvetlen mérése). **Potenciometrius titrálás** során a keresett komponenst ismert koncentrációjú reagenssel visszük kémiai reakcióba, és a titrálás során a mért feszültség értékeit a titrálószer térfogatának a függvényében ábrázolva titrálási görbét veszünk fel.

Direkt potenciometriánál fontos a mérőrendszer **kalibrációja**, ami általában kalibrációs egyenes felvételét jelenti a mérendő komponens koncentrációjának meghatározása előtt. pH közvetlen mérésekor ($[\text{H}^+]$ meghatározása) ezt ismert pH-jú pufferoldatokkal végezzük. A potenciometrius titrálások esetén az ekvivalenciaponthoz tartozó mérőoldat térfogatot keressük (a titrálási görbe inflexiós pontja), amelynek helyzete azonban nem függ a kalibrációtól, így itt a mérőrendszer külön hitelesítése nem szükséges. A mérések során gyakran adunk nagy feleslegben erős elektrolitot (pl. KCl, NaCl) a mérendő oldatokhoz. Ezzel a kalibráció, titrálás, mérések során állandóvá tesszük az ionerősséget, minek következtében a koncentrációk és aktivitások közötti arányosságot biztosítjuk. Másrészt ez gyakran csökkenti a diffúziós potenciálokat is.

2. A gyakorlat leírása

A gyakorlat során Zymafluor vagy Dentocar tableta hatóanyagtartalmát (NaF -tartalmát) fogjuk meghatározni direkt potenciometriás és standard addíciós módszerrel. A méréshez egy fluoridion-szelektív elektrodból (indikátorelektrod) és egy Ag/AgCl-típusú referenciaelektrodból álló galváncellát állítunk össze, és a két elektrod potenciáljának a különbségét mérjük egy feszültségmérő műszer segítségével. A mért érték állandó hőmérsékleten és pH-n csak a mintabeli fluoridion-koncentrációtól függ. Ismert fluoridion-koncentrációjú oldatokban megmérve a potenciálkülönbséget, majd azt a fluoridion-koncentráció függvényében ábrázolva egy kalibrációs egyenest kapunk, melynek felhasználásával a tablettákból készített szuszpenziók ismeretlen hatóanyagtartalma ($[\text{F}^-]$), közvetlenül meghatározható. Ez a mérési módszer annak ellenére kiváló eredményt szolgáltat, hogy a tableta bizonyos segédanyagai vízben nem oldódnak, így egy zavaros mintaoldatot kell vizsgálnunk.

A feladat második részében a hatóanyagtartalmat standard addíciós módszerrel határozzuk meg. Ennek lényege, hogy a tablettából készített szuszpenzióban a kezdeti, ismeretlen fluoridion-koncentrációt ismert mennyiségű fluoridion hozzáadásával három lépésben megnöveljük és azt vizsgáljuk, hogy ez mekkora feszültségváltozást okoz.

Az első módszer során a kalibrációs egyenes felvételét tiszta fluorid-oldatban, míg az ismeretlen meghatározását egy reális mintában, a szuszpenzióban végezzük. Ugyanakkor a második módszer során a mintamátrixot (vagyis a fluoridionok mellett a szuszpenzióban jelenlevő egyéb azon komponenseket, amelyek befolyásolhatják a mérőműszer jelét) csak kismértékben változtatjuk, hiszen az addíció során a hozzáadott tiszta fluorid-oldat térfogata igen kicsi az eredeti mintatérfogathoz képest. Ílymódon a kétféle módszerrel kapott eredmények összehasonlítása arra is választ adhat, hogy ebben az esetben az egyszerű és gyors direkt módszer vagy a kissé több mérést igénylő standard addíciós módszer ad-e megbízhatóbb eredményt.

3. Gyakorlati feladatok

3.1 A pH/mV mérő és az elektródok előkészítése a méréshez

A gyakorlaton használt két mérőrendszer közül kapcsolja be azt a pH/mV mérőt, amivel dolgozni fog. A **Radelkis** gyártmányú mérőműszer melegezési ideje 20 perc, míg a **Metrohm** készüléké 5 perc.

Radelkis berendezés: Az elektródok mosását, tisztítását, előkészítését a műszer **STANDBY** állapotában végezze! Az indikátorelektrodot, amely egy fluoridion-szelektív elektród, bő desztillált vizes mosással tisztítsa, ezt követően a víz nyomait szűrőpapír csíkkal itassa le. Az elektródot használat után 10^{-3} M-os NaF oldatban tároljuk.

A mérőcella összeállításakor speciális referencia elektrodot használunk. Az üvegfritt és az oldat közé egy KCl-oldatot tartalmazó külső oldatteret iktatunk, amely csupán üvegcsiszolaton keresztül érintkezik a mintával, fenntartva az elektromos kapcsolatot. Ez a sóhíd azt a célt is szolgálja, hogy megóvja az üvegfrittet a zagyos minta általi eltömődéstől.

A referenciaelektrodot, amely egy Ag/AgCl elektród, bő desztillált vizes mosással tisztítsa, majd az elektródot szűrőpapír csíkkal törölje szárazra. A csiszolatban végződő csövet alul ujjával befogva 1 mol/dm^3 -es KCl oldattal néhányszor öblítse át, majd töltsse fel, és (gumigyűrű segítségével) csatlakoztassa az elektródra. Ügyeljen arra, hogy a külső oldatterben a folyadékszint felette legyen az elektródtest frittellátott nyílásának. Az elektródot használat után szétszedve, tisztán tároljuk. Az referenciaelektrod törékeny, ezért a *szét- és összeszerelést igen óvatosan végezze!*

Metrohm berendezés: Az indikátorelektrodot, amely egy fluoridion-szelektív elektród, bő desztillált vizes mosással tisztítsa, ezt követően a víz nyomait szűrőpapír csíkkal itassa le. Az elektródot használat után 10^{-3} M-os NaF oldatban tároljuk.

A referenciaelektrodot, amely egy Ag/AgCl elektród, bő desztillált vizes mosással tisztítsa, majd az elektródot szűrőpapír csíkkal törölje szárazra.

3.2 A fluoridion-szelektív elektród kalibrálása

Általános figyelmeztetés a laboratóriumi munkához: **Sose nyúljon bele pipettával a törzsoldatokba (vagy a desztillált vizes palackba)! Egy főzőpoharat öblítsen át a törzsoldattal, megfelelő mennyiséget öntsön ki bele, majd ebből pipetázzon!**

Egy szűkebb keresztmetszetű 150 cm³-es főzőpohárba készítse el a következő alapoldatot:

- 50 cm³ desztillált víz
- 50 cm³ TISAB oldat
- 0,1 cm³ F⁻-ra **4000** ppm-es NaF törzsoldat.

A TISAB (Total Ionic Strength Adjustment Buffer = teljes ionerősséget állító puffer) oldat összetétele 1 M NaCl-ra; 0,001 M Na-citrátra; 0,75 M Na-acetátra és 0,25 M ecetsavra. Szerepe az, hogy a mintákban azonosra állítsa az ionerősséget (a NaCl) és a pH-t (az acetát-puffer), valamint kiszorítsa a Fe(III) és Al(III) komplexekben esetleg kötött fluorid ionokat (a citrát).

Ezután tegye a főzőpoharat a mágneses keverő lapjára, helyezze bele a lemosott és szárazra törölt keverőt és elektródokat, majd indítsa el a keverést. Kapcsolja a **Radelkis műszert + mV, a Metrohm műszert mV állásba**, és a potenciál stabilizálódása után (3-4 perc) olvassa le a feszültség értékét. (A Metrohm műszernél a stabilitást a „*drifting* ...” felirat eltűnése is jelzi.)

Keverés közben adja az oldathoz a **4000 ppm-es** fluorid oldat további kilenc részletét: 0,1 – 0,1 – 0,1 – 0,6 – 1,0 – 1,0 – 1,0 – 1,0 – 10,0 cm³-t. (A kis mennyiségeket automata pipettával, az utolsót hasas pipettával.) Minden oldatrészlet hozzáadása után várjon 3 percet, aztán olvassa le a műszeren megjelenő potenciál értékét.

A 10 mérés eredményét foglalja 10 soros táblázatba (nem feledve a legelső mérést sem).

	4000 ppm F ⁻ -oldat cm ³	E mV
1.	0,1	
...		
10.	10,0	

Ismerve a fluor atomtömegét (18,998 g/mol), kiszámolható a fluoridra 4000 ppm-es NaF törzsoldat, és az egyes mérési pontokhoz tartozó oldatok fluorid koncentrációja mol/dm³-ben ([F⁻]), majd annak negatív logaritmusaként a pF. Az x-tengelyen ezeket, az y-tengelyen a mért mV-értékeket ábrázolva, és a kapott

pontokra egyenest illesztve kaphatja meg a kalibrációs egyenest. Ezt azonban most egy Excel programmal számoltathatja ki.

Csak a közvetlenül mért **cm³ – mV** adatpárokat írja felül a megfelelő Excel állományban. A rendelkezésre álló számítógépes program (Excel) elvégzi az egyenes-illesztést, kirajzolja a **kalibrációs egyenest (E_{mv} a pF függvényében)**, és kiírja a számolt paramétereket. Ha az egyenes meredeksége lényegesen eltér az elméletileg várható 59 mV értéktől, akkor vagy a számítások, vagy a mérések során lényeges hibát vétett. Ilyenkor forduljon a gyakorlatvezetőhöz!

A kalibrációs pontok szóródásának mértékéből egyszerű becslés adható a kalibrációs egyenessel történő fluorid-koncentráció meghatározás bizonytalanságára. Ha az elektród-potenciál mérésének bizonytalansága mV-

ban σ_E nagyságrendű, akkor az elméleti meredekséggel számolva az abból becsült pF bizonytalansága $\sigma_{pF} \approx \frac{\sigma_E}{59,1}$ nagyságrendű. A tízes alapú logaritmusfüggvény deriváltjának segítségével becsülve a $pF = -\lg([F^-])$ és $[F^-]$ bizonytalanságának arányát: $\frac{\sigma_{pF}}{\sigma_F} \approx \frac{1}{2,303 \cdot [F^-]}$ adódik. Tehát a koncentráció-meghatározás relatív bizonytalansága $\frac{\sigma_F}{[F^-]} \cdot 100\% \approx \frac{2,303}{59,1} \cdot \sigma_E \cdot 100\% \approx \sigma_E \cdot 3,9\%$. Így például 0,5 mV bizonytalanságú kalibrációs görbe használata kb. 2% bizonytalanságot eredményez a fluorid meghatározásban.

3.3 A tablettá NaF-tartalmának meghatározása direkt potenciometriával

25 cm³-es tiszta, száraz főzőpoharat mérjen le analitikai pontossággal. Helyezzen bele egy Zymafluor tablettát, mérje le ismét, és számítsa ki a tablettá tömegét négytizedes pontossággal. (Tárázáshoz a főzőpohár helyett kis darab papírt is használhat.)

A főzőpohárban lévő tablettát nedvesítse meg néhány tized cm³ desztillált vízzel, majd lapított végű üvegbottal dörzsölje szét. 4-5 cm³ desztillált vizet töltsön a szuszpenzióhoz úgy, hogy közben az üvegbottot is öblítse le. A főzőpohár tartalmát öntse egy 10 cm³-es mérőlombikba, falát mossa körbe desztillált vízzel legalább kétszer, majd töltsé jelig. *Vigyázzon, hogy a víz térfogata ne haladja meg a 10 cm³-t az előkészítő műveletek során!*

Ezután a mérőlombik tartalmát öntse vissza a 25 cm³-es főzőpohárba, és adjon hozzá 10 cm³ TISAB oldatot pipettával. A főzőpoharat tegye a keverő lapjára, helyezze bele a száraz mágneses keverőt és a két elektródát, majd indítsa be a keverést! 3 perc várakozás után olvassa le a mért mV-értéket.

A mérés adataiból kiszámolható a tablettá fluorid- vagy NaF-tartalma mg-ban, majd a tablettá NaF-tartalma tömegszázalékban. (A fluor atomtömege 18,998 g/mol, a NaF moláris tömege 41,988 g/mol.)

3.4 A tablettá NaF-tartalmának meghatározása standard addícióval

Az előző mérést folytatva adjon három alkalommal az oldathoz 0,20 – 0,20 – 0,20 cm³ (összesen tehát 0,60 cm³) **1000 ppm-es** fluorid oldatot, és mindegyik esetben 3 perc várakozás után olvassa le a potenciál értékeket.

Ezzel a mérést befejezte, állítsa le a mágneses keverőt, kapcsolja ki a mérőműszert, szedje szét az összehasonlító elektródot (Radelkis műszer). Az elektródokat alaposan mossa le desztillált vízzel, majd mindegyiket helyezze a megfelelő tároló oldatba. Minden üvegeszközt desztillált vízzel is gondosan mosson el, és helyezze azokat és a palackokat az eredeti helyükre.

A direkt potenciometriás és standard addíciós (összesen tehát 4) cm³ – mV értékpárt is írja le a jegyzőkönyvbe, majd a számítógépes adatállományba. A számítógépes program kiszámolja az eredményeket. A jegyzőkönyv táblázatába másolja át a 4 mérés eredményeként kapott hatóanyagtartalmat (NaF-tartalmat) mg-ban és tömegszázalékban is, majd átlagolja a standard addíciós eredményeket.

A diszkusszióban hasonlítsa össze a direkt potenciometriás eredményt a hárompontos standard addíciós eredmény átlagával. Indokolja, hogy melyik eredmény elfogadását javasolja.

	1000 ppm F ⁻ -oldat cm ³	E mV	NaF-tartalom mg-ban	NaF-tartalom tömeg%-ban
1.	0,0	...	(direkt pot.)	(direkt pot.)
2.	0,2
3.	0,2
4.	0,2
Addíció mérések átlaga:			(st. add.)	(direkt pot.)
A két eredmény %-os eltérése:			(eltérés %)	

4. A jegyzőkönyv vezetése

A jegyzőkönyvet kézírással kell elkészíteni füzetbe vagy összekapcsolt lapokra. Előzetesen kb. 2-3 oldalnyi ismertetést írjon a jegyzőkönyvbe, demonstrálandó hogy felkészült a gyakorlatra. Egy vízszintes vonallal jelezze az otthon írt szöveg végét!

Ezt a szöveget a laboratóriumi munka során készített jegyzőkönyv, az Excel táblázat nyomtatott példánya és a diszkusszió követi. A jegyzőkönyvben röviden vázolni kell a ténylegesen elvégzett tevékenységet, de teljes pontossággal és szabatosan le kell írni az oldatkészítést, mintaelőkészítést és a leolvasott, mért adatokat. Különösen fontos a szám adatok (törzsoldatok koncentrációja, mennyisége, tabletták tömege, leolvasott mV értékek, és a végeredmények) világosan áttekinthető szerepeltetése. A szám adatokat tilos átírással javítani, hanem át kell húzni, és mellé írni a javított értéket.

A jegyzőkönyv célja, hogy később is pontosan rekonstruálható legyen az elvégzett tevékenység, megállapítható legyen az esetleges hiba, szükséges esetén újraszámolható legyen minden rész- és végeredmény. Ha tehát valamelyik elsődleges szám adat (térfogat, tömeg, mV), vagy a **végeredmények** egyike hiányzik vagy olvashatatlan, az lerontja a gyakorlatra adott érdemjegyet.

A jegyzőkönyvet a gyakorlat végén kell beadni.

5. Dolgozatírás

A gyakorlatot a D404-ben dolgozatírással kezdik. Ehhez hozzon magával tollat és zsebszámológépet!

Néhány elméleti kérdés is lesz, de a hangsúly a mérések előkészítéséhez és kiértékeléséhez szükséges számításokon lesz. Ugyanis 3-4 fős csoportban együtt dolgoznak, és számítógépes program értékeli ki a tényleges mérési eredményeket. Így az egyes hallgatók teljesítményének értékelésében döntő szerepet játszik az önállóan írt dolgozat. A példák típusai:

— Elméleti kérdések.

— Mennyi a fluorid ion koncentrációja ($[F^-]$) **mol**/dm³-ben (**gmol**/dm³ !) egy vizes NaF-oldatnak, amelynek a koncentrációja a fluorid ionra vonatkozóan 1500 ppm ? (A fluorid ion moláris tömege (a fluor atomtömege) 18,998 g/mol. **1 ppm** azt jelenti, hogy az oldat tömegének milliomod (10^{-6}) része a kérdéses hatóanyag, de a híg vizes oldat sűrűségét 1 **kg**/dm³-nek véve 1 ppm tulajdonképpen 1 **mg**/dm³ koncentrációnak felel meg.)

— Mennyi a fluorid ion koncentrációja ($[F^-]$) mol/dm³-ben annak az oldatnak, amely 100 cm³ víz és 2 cm³ 3500 ppm-es fluorid oldat összeöntésével készült?

— Mennyi az utóbbi oldatban a $pF = -\lg([F^-])$ számértéke?

— Megadom az $E = a + m \cdot pF = a + m \cdot (-\lg C)$ kalibrációs egyenes tengelymetszetét és meredekségét (pl. $a = -38,27$ és $m = +55,71$). Ha egy tablettából készült $V_0 = 20$ cm³-es oldatban pl. $E_0 = 143,4$ mV-ot mértünk, akkor

a) Mennyi az oldatban a fluorid-ion C_0 koncentrációja mol/dm³-ben?

b) Hány mg NaF-ot tartalmaz a tabletta?

c) Hány tömegszázalékos volt a tabletta NaF-tartalma, ha a tabletta tömege 40,3 mg volt?

— Válaszolja meg az a)-b)-c) kérdéseket a standard addíció esetén is, ha az előző oldathoz pl. $V_{add} = 0,6$ cm³ 1000 ppm-es fluorid oldatot (C_{add} mol/dm³-ben kell a képletben!) adva a mért cellafeszültség $E_{add} = 119,9$ mV-ra változott. (A C_0 koncentráció kiszámolásához szükséges képlet a feladat mellett ki lesz nyomtatva.)

$$E_0 = a + m \cdot (-\lg C_0) \quad \text{és} \quad E_{add} = a + m \cdot \left(-\lg \frac{C_0 \cdot V_0 + C_{add} \cdot V_{add}}{V_0 + V_{add}} \right)$$

$$E_0 - E_{add} = m \cdot (pF_0 - pF_{add}) = m \cdot (-\lg C_0 + \lg C_{add}) = m \cdot \lg \frac{C_{add}}{C_0} = m \cdot \lg \left(\frac{1}{C_0} \cdot \frac{V_0 \cdot C_0 + V_{add} \cdot C_{add}}{V_0 + V_{add}} \right); \text{ és ebből :}$$

$$C_0 = \frac{C_{add} \cdot V_{add}}{(V_0 + V_{add}) \cdot 10^{\frac{E_0 - E_{add}}{m}} - V_0} \quad \text{vagy} \quad C_0 = C_{add} \cdot \frac{\frac{V_{add}}{V_0 + V_{add}}}{10^{\frac{E_0 - E_{add}}{m}} - \frac{V_0}{V_0 + V_{add}}}$$