

Kalydi György

Egy nagy magyar gyógyszervegyész Kabai János (1896. Búdszentmihály – 1936. Budapest)

A 2006-os esztendőben kettős évfordulót ünnepelnek a vegyészek és a gyógyszerészek, ugyanis 110 éve született és 70 éve halt meg az a magyar gyógyszerész, aki először Magyarországon, majd szabadalmaival az egész világon bevezette az ipari méretekben történő morfingyártást.

Ki is volt ez a fiatalon -40 évesen- elhunyt vegyész?

Kabai János 1896. december 27-én született a Szabolcs megyei Búdszentmihályon (ma Tiszavasvári). Apja Kabai József a falu megbecsült és köztiszteletben álló jegyzője, anyja Deák Piroska, egy tehetséges orvoscsalád leszármazottja volt. Kabai János tehát jómódú családba született öt testvérével együtt.

A kis János már fiatalon érdeklődött a természet iránt, szorgalmasan kutatta az ismeretlent, a megmagyarázhatatlan dolgokat. Erre talán az az eset a legjobb példa, amikor a majd 7 éves kisfiú az iskola végzetével nem haza vette az útirányt, hanem a falu végére sétált. Arra a kérdésre, hogy mit keresett ott, egyszerűen azt felelte: az éppen kialakult szivárvány végét kereste.

Az általános iskolát helyben, a középiskolát Hajdúnánáson, Nyíregyházán, Nagykálóban végezte, majd 1915-ben érettségizett Hajdúnánáson. A természet és a reáltudományok iránt érdeklődő fiú beiratkozott a Műszaki Egyetemre, de a háború félbeszakította ezt a jól induló pályát és bevonult katonának. A mindig sovány, gyenge fizikumú, vézna testalkatú újoncot nem vitték a harctérre, inkább a hátszágban végzett oktató munkát egy laktanyában.

A háború befejeztével beiratkozott gyógyszerésznek, és 1923-ban lediplomázott. Első munkahelye a Gyógynövény Kísérleti Állomás volt, ahol főnöke Augusztin Béla professzor lett. Az ismeretség már korábban eredt, hiszen Kabait már az egyetemen is tanította a botanika rejtelmére. A tanár-diák kapcsolat először kollegálissá, majd később barátivá fonódott. A Gyógynövény Kísérleti Állomás nem csak tudományos és szakmai szempontból volt gyümölcsöző hely számára. Itt ismerkedett meg későbbi

feleségével, állandó munkatársával, segítőjével, Kelp Ilonával, aki vegyész végzettséggel rendelkezett.

Kabai új munkahelyén sem tétlenkedett, nekiállt annak a munkának, ami már régóta foglalkoztatta, mégpedig hogy hogyan lehet a mákból morfiomot kinyerni úgy, hogy a kábító hatású ópiumot elkerülje.

1924 szeptembere és 1925 májusa között Kabai feleségével kidolgozta az úgynevezett zöld eljárást, amely során zöld máknövényből sikerült ipari méretekben morfiomot előállítani.

Az eljárás röviden így nézett ki: a mákot (papaver somniferum) virágzás után lekaszálták, apróra zúzták, majd egy présen átnyomták és a levét hordókban gyűjtötték össze. Mivel a teljes növényi test tartalmazza a kivonandó alkaloidákat, ezért a növény minden egyes részét (levelét, szárát...) fel lehetett használni. Megfelelő fizikai és kémiai műveletek sorozatával kinyerték a morfiomot. (A történeti hűséghez hozzátartozik, hogy már jóval Kabai előtt Sertürner felfedezte a morfiomot, amelyet Morpheusról az alvás istenéről nevezett el. Kabai az ipari eljárást dolgozta ki.) Kabai tudta, hogy a laboratóriumban kikísérletezett folyamatok nem biztos, hogy úgy mennek végbe a valóságban, ipari méretek között ahogy tervezte, ezért ezt is ki akarta próbálni. Szülőfalujában Búdszentmihályon felépített egy gyárat, amelyet családi vállalkozásként indítottak el. Neve Alkaloida Vegyészeti Gyár Részvénytársaság lett. (Ma ICN Magyarország)

Nemhiába tartott Kabai a nagyüzemi gyártástól, sorra elő is jöttek a problémák. Ezek a negatív tapasztalatok nem törték le a lelkesedését, sőt még inkább munkára ösztönözték.

Ilyen volt például, hogy a mák egyszerre érett be minden gazdánál, így a gyár nem volt képes a nagy mennyiségű anyag feldolgozására. Ezt a következő évben úgy oldotta meg, hogy a mákot a gazdákkal folyamatosan kisebb-nagyobb időeltolódással vettette el, így a növény folyamatosan érett be.

Másrészt a felaprított növény a meleg nyári napon elkezdett erjedni, így sok alapanyag tönkrement. Ezt is megoldotta, hiszen konstruált egy gépet, amely képes volt az aratás színhelyén kipréselni a szükséges nedvet, amit ott helyben be is sűrítettek. Így nem erjedt meg az anyag. Ezek a kellemetlen tapasztalatok arra ösztönözték, hogy más eljárást keressen.

A szorgos munkának meg is lett az eredménye, ugyanis 1932-re kész lett a „száraz eljárás” kikísérletezésével. Rájött ugyanis arra, hogy a száraz mákszalmból, gubóból miként lehetne kivonni az alkaloidokat. Ez

azonban abban az időben „eretnek” elképzelés volt, hiszen minden „valamire való” tudós úgy gondolta, hogy a mák elszáradásával a benne lévő alkaloid is tönkremegy. A száraz mák kicséptelt szalmáját savval kezelte, majd az oldatot bepárolta. Ekkor morfin tartalmú szirupszerű anyagot kapott, amit tovább feldolgozva megkapta a morfiomot.

Ezzel a szabadalmi eljárással megoldotta a zöld eljárásnál felmerülő problémákat, másrészt a korábban értéktelen mákszalmából értékes morfiomot állított elő. Ugyanakkor az sem mellékes, hogy a mák termése megmaradt, ami hazánkban mindig fontos élelmiszeripari alapanyag volt. Végül a módszer során nem keletkezett az a veszélyes ópium, amit egyes kábítószer-élvezők előszeretettel fogyasztottak.

Az új eljárással egyre többet termelt a gyár. A termelési adatok magukért beszélnek 1930-ban 5 kg morfin, 1933-ban 192 kg, míg 1936-ban már 724 kg. Napjainkban pedig már 30 tonnát termelnek évente.

Nem csodálkozhatunk azon, hogy rövid időn belül 10 ország is átvette a szabadalmat.

Varsóban is létesült egy fióküzem, ahova Kabay is elutazott, hogy szakértelmével segítsen az ottani mérnököknek a gyár létrehozásában. Itt azonban a folyamatos megterhelés következtében gyermekkori sérve kizáródott. A lengyel orvosok tünetileg kezelték a problémát, de operációt javasoltak. Magyarországon elvégezték a szükséges műtétet, de szövödmények merültek fel, aminek következtében 1936. január 29-én meghalt.

Most pedig vizsgáljuk meg egy kicsit részletesebben az ópiumot, illetve a morfiomot!

Ha az éretlen mákgubót mélyen bemetsszük, akkor egy tejszerű nedv folyik ki belőle, ez az ópium. A szó görög eredetű, nedvet jelent. Ez egy fehér színű, sűrűn folyó folyadék, de a levegőn hamar megbarnul.

Ma már lehetetlen megmondani ki, hol és mikor vette észre, hogy ennek az érdekes növénynek a tejnedve bármire is felhasználható. Az azonban biztos, hogy a sumérok már 5000 évvel ezelőtt használták az ópiumot. Ennek az anyagnak az emberi szervezetre gyakorolt hatását már az ókorban felismerték. Használták gyógyszerként, de pontosan leírták azt is, hogy a mértéktelen fogyasztása hozzászokáshoz vezet, amelynek a végén függőség alakul ki.

Galenus észrevette, hogy sok esetben adják a mákfőzetet a gyerekeknek, ha azoknak a fájdalmát igyekeznek csökkenteni (A népi gyógyászat Magyarországon még a XX. században is alkalmazta ezt az eljárást.)

A mákot kultúrnövényként keleten ópiumszerzés céljából, míg Európában olajos magjáért termesztették. A mag ledarálva tésztatöltetet, kisajtolva pedig olajat eredményezett. Sokan úgy vélik, a kipréselt olaj vetekszik az olívaolajjal. Hideg sajtolással étolajat, meleg eljárással pedig festékolajat állítottak elő.

Milyen kapcsolat van az ópium és morfiom között? A választ először a már említett Sertürner német vegyész, gyógyszerész adta meg. Valójában egy gyakorlati problémát akart megoldani (a tudományok történetében nem először). Ő mint gyógyszerész sokszor szembesült azzal a problémával, hogy a betegeknek felírt ópium annak ellenére, hogy azonos mennyiségű volt, a pácienseknél más és más hatást váltott ki. Nem is beszélve az ópium kellemetlen mellékhatásairól. Visszavonult hát laboratóriumába és vegyész ismereteit kiaknázva elkezdett kísérletezni. Felfedezett egy új anyagot, amit ópiumsavnak nevezett majd hosszú, évekig tartó kísérletek sorozatával bebizonyított, hogy ez az ópium legfontosabb hatóanyaga, amelyet morfiomnak keresztelt.

Úgy gondolom mindenki számára ismert, hogy korunk egyik legnagyobb problémája az óriási mértékben terjedő kábítószer élvezet. Egyre fiatalabb korban nyúlnak a „szer” után és egyre „keményebb” drogokat fogyasztanak. Ez azonban nem csak ennek a századnak a problémája. Olyannyira nem, hogy már háború is tört már ki a kábítószer miatt.

Anglia, mint a világ egyik vezető hatalma a XVI. század végén abból a célból hozta létre a Kelet-indiai Társaságot, hogy a Távol-Keleten lebonyolítsa az anyaország kereskedelmét. A Társaság Indiából kiindulva Kínával is üzletelt, ahonnan selymet, teát és sok értékes cikket vásárolt. A Társaság vezetői úgy gondolták, hogy ezekért az árukért ópiummal fizetnek, amely Indiában nagy mennyiségben állt rendelkezésükre. Az üzletet természetesen feketén végezték, amely jól is működött mindaddig, míg a kínai kormány meg nem elégte, hogy a dolgozók nagy része rászokott a kábítószerre és ezáltal erkölcsileg, szellemileg és testileg is roncsokká váltak. (Hozzá kell tenni, hogy a kormányt valójában nem humánus szempontok vezérelték, hanem inkább az, hogy nem állt rendelkezésükre megfelelő számú munkaerő.) Ekkor erősen fellépett az ópiumkereskedőkkel szemben és halállal büntetett minden vele kapcsolatos cselekményt. Az angol kormányt érzékenyen érintette a piac elvesztése és háborút indított Kína ellen. A harc egyenlőtlen volt és a kínaiak kevésbé képzett hadserege sorra vesztette a csatákat, majd az egész háborút. Az angolok pedig ismét folytathatták az ópium árusítását.

A kábítószer szó hallatán sokakban kettős érzés támad. Egyesek lelki szemei előtt megjelennek azok a testi és lelki roncs emberek, akik néhány év alatt tették tönkre magukat ezzel a gyilkos szerrel. Mások viszont arra gondolnak, hogy ismernek olyan személyt, személyeket, akiknek a mérhetetlen fájdalmán az orvosok a morfium nevű gyógyszerrel könnyítettek.

Valóban mindkét tábornak igaza van, hogy melyik csoporthoz tartozik az csak attól függ, milyen személyes „élményei vannak a morfiummal kapcsolatban.

Nekünk kémia tanároknak mindkét lehetőségre fel kell hívnunk a diákok figyelmét. Amikor ezt tesszük, ne felejtjük el megemlíteni, hogy volt egy tehetséges, nagy munkabírású de szerencsétlen sorsú magyar feltaláló, aki ezen a területen tevékenykedett, és ért el világhírnevet.

Felhasznált irodalom:

John J. Kabay: Kabay János magyar feltaláló élete. Tiszavasvári 1992.

Bayer István: A kábítószer Budapest 1989.

Kepler Kurt: A gyógyszerek története Budapest 1964.

Dr. Róka András

ÉSZBONTÓ olvasmányok érdeklődőknek

A TÁVOLSÁGI ELEKTRONÁTRENDEZŐDÉS

Az elektronok átrendeződése nemcsak molekuláris méretben, hanem makroszkopikus távolságban is lejátszódhat, csak alkalmas vezető kell hozzá. Ilyenek például a delokalizált elektronszerkezettel rendelkező fémek. Az elektronok és az atommagok elektrosztatikus kölcsönhatásában rejlő kémiai energia ilyenkor nem hővé vagy azon keresztül mechanikai munkává, hanem elektromos energiává alakul. A kémiai energia elektromos energián keresztül történő hasznosítása történik például a zseblámpákban, az elemes játékok elektromotorjaiban, a gépkocsik önindítómotorjában, a walkman-ekben, discman-ekben, MP-3 lejátszóknál, vagy a mobiltelefonokban.

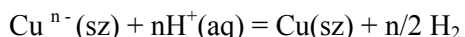
Annak ellenére, hogy az elektronátrendeződés egyúttal mindig töltésvándorlást jelent, a molekuláris folyamatokban az elektromos töltés ritkán jelenik meg „termékként”. Hiszen az esetek többségében elektromosan semleges anyagokból, semleges termékek keletkeznek. A rész- vagy teljes töltés a közbenső lépésekben, a reakciók mechanizmusában játszik szerepet (ld. polarizáció, dipol-dipol kölcsönhatás, elektrofil-, nukleofil, valamint sav-bázis reakciók). Az elektrokémiai folyamatokban viszont egyenesen a töltések a főszereplők (többlettöltést hordozó elektródok, az elektrolit-oldatok vándorló pozitív és negatív töltésű ionjai). Az elektromos kölcsönhatás természetesen mindenütt megjelenik, hiszen az atomokban, ionokban, molekulákban, kristályokban az elektronok helyzeti energiáját (részben) ez határozza meg. Az elektronátrendeződés nyomán kialakuló töltésfeleslegek azonban jelentősen módosítják az elektronok helyzeti energiáját a semleges állapothoz képest. Ezért az elektrokémiai folyamatokban az elektromos kölcsönhatás dominánssá válik.

Az elektrokémiai folyamatokból – ideális esetben – kimarad a termikus kölcsönhatás. Hiszen a kezdeti és végállapot kémiai energiájának különbsége nem szabadul fel hőként. Ezért az energia egy része „nem vész el”. A hővezetés, hőszigetelés révén nem oszlik el szükségszerűen a környezetben, hanem (szinte) teljes egészében elektromos energiává alakítható. A (szinte) megmaradó jellegű energia-átalakítás nyomán a határfok még a legjobban tervezett motorokénál is nagyobb! A mindennapi életben a kémiai energia a hordozható készülékeket üzemeltető, egyszer használatos galvánelemekben, tölthető akku-elemekben, a járművek kénsavas ólom-akkumulátoraiban alakul át „megmaradóan” elektromos energiává. De ugyancsak az elektrokémiai energia hasznosul a bioelektromos jelenségekben, az elektromos halak „kisülése”, az érzékelés, az ingerületvezetés, az idegi szabályozás vagy a gondolkodás során.

Már az ókorban ismerték, hogy az anyagok dörzsölve „delejjessé” válnak. A megdörzsölt műanyag vonalzó, ebonit rúd magához vonzza a papírszeletkéket, eltéríti a vékony vízsugarat. Dörzs elektromosan választja szét a töltéseket az influenciagép Jedlik Ányos világhírű „villámfeszítőjéhez”, vagy a még nagyobb feszültségre képes van de Graaff-féle generátor is. A töltések szétválása azonban pusztán az érintkezés során is bekövetkezhet! Az érintkező felületek között ébredő vonzóerő, amit röviden tapadásként ismerünk, a felületek mentén

kialakuló töltésmintázat következménye. A tapadási súrlódás, az adszorpció, az adhéziós vagy kohéziós erők a parányi elektrosztatikus erők összeadódásából származik.

Az elemek atomjaihoz hasonlóan a különböző anyagokban az elektronok energiaszintje különböző. Az elektronok energiaszint-különbségéből fakadó töltésszétválás a fémek esetében mutatható ki a legkönnyebben. Helyezzünk egy cink- és egy rézlemez reagens sósavba! A cinklemezen azonnal beindul a hidrogénfejlődés, míg a rézlemezen nem történik semmi. Viszont ha a cinklemez egy csipesz segítségével a rézlemezhez szorítjuk, meglepő módon a rézlemezen is buborékok jelennek meg. Hidrogén fejlődik a rézen! Megváltozott a réz kémiai tulajdonsága? Nem! Hiszen a réz nem megy oldatba, a réz(II)-ionok a szín „erősödésével”, mélyülésével járó, ammóniás komplexképződéssel sem mutathatók ki. Következésképpen a sósavban a hidratált hidrogénionok (oxóniumionok) nem a rézlemez elektronjait veszik fel, hanem a cinkét.



A rézlemeznek csak a távvezetés, az elektronok közvetítése a szerepe. Ez a jelenség egyszerű bizonyítéka az elektronok fémről-fémre történő átlépésének, ami a tapasztalat szerint aktiválás nélkül, önként játszódik le. Haladjunk azonban egy kicsit lassabban!

A fémekre jellemző delokalizáció miatt az elektronok akkor is vándorolhatnak, amikor a két fém nem merül a sósavba. Annak ellenére, hogy a réz és a cink egymás mellett helyezkedik el a periódusos rendszerben, nagyon eltérő a kémiai tulajdonságuk. Az eltérő viselkedés már nem értelmezhető pusztán az atomok elektronszerkezetével. Az okok feltárásához a fémes rács szerkezetét is figyelembe kell venni. Bár a fémekben a delokalizált elektronok nagyon sok, egymáshoz nagyon közeli energiájú állapotot foglalnak el, az atomokhoz hasonlóan elegendő a „legkülső”, vagyis a legnagyobb energiájú állapotra koncentrálnunk. (Az úgynevezett legfelső betöltött állapotot a fizikusok Fermi tiszteletére Fermi-nívónak nevezik.) A fémlemezek esetében ezeket tekinthetjük a reakciókban szerepet játszó „vegyértékelektronoknak”.

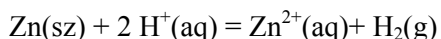
A kísérlet tapasztalataihoz igazodva a cinklemez legnagyobb energiájú delokalizált (vagy „fémes vegyérték”) elektronjai nagyobb energiájúak, mint a rézben, különben nem lenne kedvező az elektronátmenet. Az önként beinduló folyamat hajtóereje a két fém elektronenergiaszint-

különbsége. Csakhogy az elektronátlépés egyúttal **töltésszétválást** is okoz. A változatlan számú atommagra (pontosabban atomtörzsrre) a cinklemezben kevesebb, a rézben több elektron jut. Az elektronhiányos **cinklemez pozitív**, a többlet elektront hordozó **rézlemez negatív** töltésűvé válik. A töltésszétválással tehát színre lép az elektromos kölcsönhatás. A folyamat azonban előbb-utóbb leáll, mert az egyre pozitívabbá váló cinklemez egyre kevésbé engedi átlépni az elektronokat. A fémeken megjelenő töltések **helyzeti energiával** jellemezhetők. Ezt a **kölcsönhatási energiát** idegen szóval **potenciális energiának**, az elektromosságtan nyelvén **elektromos potenciálnak**, röviden **potenciálnak** nevezik. Az elektromos töltések megjelenésével a fémek között **potenciálkülönbség**, rövidebben **feszültség** jelenik meg. A két fém között kialakuló **érintkezési feszültség** pedig éppen ellentétes irányba hajtja az elektronokat, mint a kezdeti elektronenergiaszint-különbség. Ezért az önként beinduló folyamat önként is áll le. Az elektronátadás-átvétel addig tart, amíg az egymással vetélkedő hajtóerők és az általuk ellentétes irányba hajtott áramok végül **dinamikus egyensúlyt alakítanak ki**.

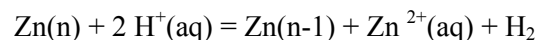
Megváltozik a helyzet, ha a fémek egyúttal a sósavval is érintkeznek. Mint korábban már elemeztük, az elektronátlépés után a változatlan számú atomtörzsrre a rézlemezben több elektron jut. A töltésfelesleg ugyan az egész lemezen eloszlik, a változatlan számú atomtörzs vonzóerején azonban mégis több elektron osztozik. Következésképpen az elektronok helyzeti energiája (az elektromosan semleges állapothoz képest) növekszik. A tapasztalat szerint a negatív töltésű rézlemezen már akkorára nő a „fémes vegyértékelektronok” kölcsönhatási energiája, hogy kedvezővé válik a hidratált hidrogénionokra (oxóniumionokra) történő átlépés. Ettől a pillanattól kezdve azonban megbomlik a dinamikus egyensúly! Az egymással vetélkedő folyamatok a sósav jelenlétében egymást követő folyamatokká válnak. A hidratált hidrogénionok folyamatosan átveszik a rézlemeztől a töltésfelesleget, ezáltal újra megnyílik a lehetőség az elektronoknak a cinkről a rézlemezre történő átlépése előtt. A hidrogén kibuborékolásával az egymást követő lépések láncá pedig már visszafordíthatatlan (irreverzibilis) folyamattá válik. A fémek között jelentkező **érintkezési- vagy Galvani-feszültség** ugyan nem mérhető, a savas közegben lejátszódó reakcióval az elektronátmenet mégis kimutatható. A cinklemez egyedüli oldódásához képest csak annyi a változás, hogy a „távolsági” töltésvándorlással **az egytérídejű redoxi-**

folyamat a térben (részben) **különvált**: Bár a cinklemezen továbbra is fejlődik valamennyi hidrogén, a cink valamelyest mégis tehermentesítődik, hiszen a rézlemezen csak hidrogénfejlődés, vagyis a redukció játszódik le.

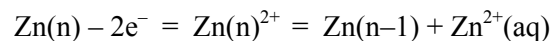
Az előbbieken megszerzett ismeretek a cink-sósav reakció értelmezésére is kiterjeszthetjük! A cink hidegen nem bontja a vizet. Úgy is mondhatjuk, hogy a víz öndisszociációjából származó egyensúlyi hidrogénion- (oxóniumion-) koncentrációnál a delokalizált elektronoknak még nem kedvező a hidratált hidrogénionokra történő átlépése. Savas közegben – vagyis a hidrogénion-koncentráció növelésével – azonban beindul a hidrogénfejlődés. Amikor a cinklemez a sósavval érintkezik a felületen hidratált ionok kötődnek meg (ionok adszorpciója). Az oldat ugyan nem elektronvezető, de a felülettel közvetlen érintkező hidratált hidrogénionokra a mozgékony „fémess” elektronok még átléphetnek. A hidratált ionok az átvett elektronokkal („*hogy, hogy nem*”) elemi hidrogén és víz formájában stabilizálódnak.



Az érintkezés során bekövetkező töltésátlépés tehát ebben az esetben redoxi-reakcióvá fajul. A cink – térben és időben is „egy helyen” – elektronokat ad át a hidratált hidrogénionoknak. A folyamat önként játszódik le, még aktiválni sem kell. A rövidtávú áram (reakció) hajtóereje tehát ebben az esetben is az elektronok energianyeresége. Hiszen a cink-atomtörzsek helyzete lényegében változatlan. A kezdeti és a végállapotban egyaránt negatív töltésekkel vannak körül véve. Amíg a fémbe a delokalizált elektronokkal, az oldatban a vízmolekulák és a kloridionok nemkötő elektronpárjaival hatnak kölcsön. A cinklemez **delokalizált elektronjai** azonban a „megszámlálhatatlan” cink-atomtörzsek környezetéből két proton erőterére **lokalizálódnak**, amikor a hidrogénmolekula képződik. Mivel a reakció önként játszódik le, az elektronok számára ez a kisebb energiájú, kedvezőbb állapot. A vegyületi arányt az egyidejűleg átadott-átvett elektronok száma határozza meg. A (bruttó) reakcióegyenlet azonban még a fázisok feltüntetése mellett sem érzékeltetheti kellő részletgazdagsággal a valóságot. Mert nem atomokkal, hanem egy fémdarabbal játszódik le a reakció. Ezért az elemi lépések bemutatása érdekében jelölhetnénk azt is, hogy a cinklemez n darab atomból áll:

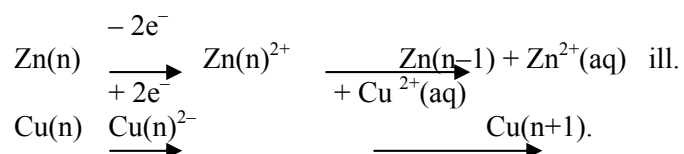


ill. az oxidációs elemi lépésre:



Ezzel azt is feltüntettük, hogy egy elemi lépés lejátsszódása után egy kisebb, de lényegében változatlan fém darab marad vissza. A két delokalizált elektron hiánya miatt a cinklemezen taszítani kezdik egymást az atomtörzsek, gyengül a fémess kötés. A cinklemez a kristály rendjét bomlasztó töltésfeleslegtől egy cinkion leválásával szabadul meg, ami a vizes közegben hidratálódva klorid ionok környezetébe jut. Végül egy kisebb, de újra semleges fém darab keletkezik. Ez az elemi lépés a reakció fennmaradása szempontjából fontos. Hiszen az elektronok átlépésével egyre pozitívabbá váló fémről további elektron átadása egyre nagyobb aktiválási energiát igényelne. Ha a fém – ionjai oldatba menetelével – nem semlegesítődne újra meg újra, a folyamat automatikusan leállna! Ez az egyszerű jelenség is jól érzékelteti, hogy mennyire fontos a töltések „egyensúlyának” fennmaradása, az ellentétes töltések számának időről-időre történő kiegyenlítődése.

A cink és a réz közötti töltésátlépés akkor is lejátsszódik, ha az elektronokat a lemezek méreténél is hosszabb távon vezetjük, vagyis ha a cink- és rézlemezeket fémess vezetővel kötjük össze. A jelenség folyamatossá tétele érdekében azonban az összekötött lemezeket most ne sósavba, hanem külön-külön, saját ionjaikat tartalmazó oldatba merítsük. Ezáltal egy cink- és egy réz**elektrodához** jutunk. A cinklemez a cinkionok oldatba menetelével, a rézlemez pedig a rézionok oldatból történő kiválásával szabadul meg a töltésfeleslegtől:



Ebben az esetben a rézlemezen a hidrogénionok helyett a saját ionok redukálódnak. Csakhogy most meg az oldatokban borul fel az ellentétes töltésű ionok egyenlősége. A cink-szulfát-oldatban a kationok, a réz-szulfát-oldatban pedig az anionok száma kerül feleslegbe. A pozitívvá

váló oldat gátolja a cinkionok további beoldódását, a szulfácion-felesleg pedig visszatartja a rézionokat. Ezért megint nem folyhat tartós áram. Csak a töltés kiegyenlítődésével, például az anion felesleg átvezetésével válhat folyamatos a reakció. A külső (elektron-) áram hajtóereje ugyan az elektronenergiaszint-különbség, de áram fennmaradásának feltétele az ionvezetés lehetőségének biztosítása. Erre szolgál a „sóhid” vagy más néven „**áramkulcs**”. Ez nem más, mint egy elektrolit-oldattal átitatott szűrőpapír, vagy kálium-kloridos gélt tartalmazó U-alakú cső, de lehet egy porózus térelválasztó is, amin az ionok átjutnak, de az oldatok elkeveredését megakadályozza. Amikor az áramkulcs az áramkört zárja, az elemi lépések sorozata is **körfolyamattá zárul**, ezzel működésbe jön a Daniell-elem. Csakhogy az elektrolit oldatok sokkal rosszabbul vezetnek az elektromos áramot, mint a fémek. Az egymást követő elemi lépések közül pedig mindig a leglassúbb határozza meg a reakció sebességét. Ezért minél nagyobb a külső áramkör ellenállása, vagyis minél kisebb áram folyik a fémes vezetőben, annál kevésbé érvényesül az elektrolit gyengébb vezetése. A két elektród között akkor mérhető a legnagyobb feszültség, az **elektromotoros erő**, amikor az ionok lassú vándorlása nem gátolja a töltések újrendeződését. A pici (milliamperes) áramok alkalmasak a sejtek közötti információátvitelre. A technikai eszközök működtetése azonban nagyobb áramerősséget igényel. Ilyenkor viszont már meg nyilvánul a fémek és az elektrolitok vezetése között tapasztalható ezer-, tízezerszeres különbség. Ezért a fogyasztóra kapcsolt galvánelemek úgynevezett **kapocsfeszültsége** mindig kisebb az elektromotoros erőnél. A legnagyobb áram a „**rövidzárlat**” esetében folyik. Ilyenkor a diffúzió ugyan fékezi a folyamatot, de az elektronátrendeződés a mindennapi lemerülés idejéhez képest mégis pillanatszerű.