

# KÖRNYEZETSZENNYEZÉS: NYOMELEM — TOXICITÁS\*

CSEH EDIT és BUJTÁS KLÁRA

ELTE Növényélettani Tanszék és CHINOIN Mezőgazdasági Kutatási Főosztály,  
Budapest

Az ipari tevékenység, a közlekedés, az intenzív műtrágyázás és a vegyszeres növényvédelem nemkívánatos mennyiségben és arányban juttat nehézfémeket a talajra és a növényzetre egyaránt. Bizonyos nehézfémek meghatározott koncentrációjának esszencialitása (Fe, Mn, Zn, Mo, Cu), mások egyértelmű toxikussága (Cd, Pb) számos élettani, genetikai, ökológiai problémát vet fel. Bizonyos növények növekedni és fejlődni képesek emberre és állatokra veszélyt jelentő toxikus koncentrációjú nehézfémek jelenlétében is. A különféle nehézfémek mobilitása a talajban és a növényben eltérő. Növénytől függően — sejt és szerv szinten — eltérő a nehézfémek felhalmozódása is.

Az esszencialitás és a toxikusság kérdését sokoldalúan kell megközelíteni: az esszenciális elem is lehet toxikus, ha a hatékony koncentrációja a növényben felülmúlja a szükséges mennyiséget. Jelentős természetesökkenést okozhat a növényfajtól és fejlődési fázistól függő, genetikai szinten szabályozott elemarány szükséglet eltolódása is. Eltérő a táplálékláncban szereplő élőlények érzékenysége és elemarány igénye. Számos — emberi nézőpontból erősen toxikus — elemről állítják, hogy nagyon kis koncentrációban esszenciális, serkenti a növekedést, ill. termésfokozó hatású, pl. Se, As.

Esszencialitás és toxikusság szempontjából az elemek egész sorát megvizsgálták (Fe, B, Mn, Zn, Mo, Cu, Cd, Cr, Pb, Al, Co, Hg, Ni, V, Ag).

Közülük három elemről szólunk: az egyértelműen toxikus Cd-ről, amely vírusoktól az emberig valamennyi élőlényre károsító hatású, bár a toxikus külső koncentrációban rendkívül nagyok az eltérések; a Cu-ról, amely kis mennyiségben, de elengedhetetlenül szükséges az élők számára és a Fe-ről, amelynek felvételéről és transzlokációjáról tudjuk a legtöbbet. E három elem élettani hatásának ismertetése felveti mindazokat a problémákat, amelyek a nehézfémek kapcsán modern korunkban az intenzív mezőgazdasági művelés és az ipari tevékenység mellett felmerülnek.

Cd — a szokott szennyezőkön kívül — a foszfát műtrágyával is kikerülhet a talajba, ahol pH 5-ig eléggé mobilis (ANDERSSON 1976, 1977), lúgos talajokban immobilissá válik. A felvehető Cd mennyiségét befolyásolja a talaj

\* X. Membrán Transzport Konferencián 1980. május 13–16. között Sümegen elhangzott előadás.

kationcserélő kapacitása (C. E. C.), amely az agyagásványok mennyiségétől és minőségétől, valamint a talaj szervesanyag tartalmától függ. Minél nagyobb a C.E.C., annál kisebb a felvehető Cd mennyisége. A Cd-felvételt más kétértékű kationok, így Ca, Mn, Zn, csökkentik, feltehetően versengenek a gyökérfelületen a kicserélődési helyekért (JARVIS et al. 1976). A Cd mind a gyökéren, mind a levélen keresztül felvevődik és transzlokálódik a növényben, tehát valamennyi növényi részben (levélben, termésben) megtalálható, sőt fel is halmozódhat (BABICH és STOTZKY 1978).

Gazdasági növényeink  $Cd^{2+}$  érzékenysége nagyon különböző. A növekedés közelítőleg fordítottan arányos a felvétellel. A vizsgált növények közül viszonylag érzéketlen a zab, szenzitív viszont a paradicsom (PETTERSSON 1976). Áramló kultúrában nevelt növények gyökerében a következő Cd tartalmat mérték: gabonafélék 59–89  $\mu\text{g}$ , fűfélék 117–165  $\mu\text{g}$ , takarmányrépa és vízitorma 200  $\mu\text{g/g}$  szárazsúly. A gyökér/hajtás Cd aránya is egészen szélsőségesen eltérő lehet, bár a vizsgált növények többségében a felvett mennyiség 60–70%-a a gyökérben marad, kivétel a kelkáposzta (48%), saláta (43%) és a vízitorma (34%). A Cd transzport nagymértékben függ a tápoldat foszfát tartalmától (JARVIS et al. 1976).

Általános az a vélemény, hogy a  $Cd^{2+}$  felvétel nem anyagserefüggő folyamat, mivel a holt gyökér több Cd-ot vesz fel, mint az élő (FRIED és BROESHART 1967, JARVIS et al. 1976, CSEH et al. 1979, JARVIS és JONES 1978.).

A növényi alapanyagcsere folyamatok közül vizsgálták a fotoszintézisre, a légzésre, a transpirációra gyakorolt hatását. Cd jelenlétében a nettó fotoszintézis és a transpiráció azonos mértékben csökken (LAMOREAUX és CHANEY 1978). Cd meggátolta a sztómák mozgását (BAZZAZ et al. 1974, CARLSON et al. 1975, CARLSON és BAZZAZ 1977). Gátolja a karboanhidráz működését, nő a mezofilum sejtek és a sztómák ellenállása a  $\text{CO}_2$ , valamint a sztómák ellenállása a vízmozgással szemben (LAMOREAUX és CHANEY 1978), a sötét légzés jelentősen fokozódik (LEE et al. 1976, LAMOREAUX és CHANEY 1978). A Cd gátolja a fotoszintetikus elektrontranszportlánc működését (HAMPP et al. 1976, BAZZAZ és GOVINDJEE 1974, VAN DUIJVENDIJK-MATTEOLI és DESMET 1975), mégpedig a II. fotoszisztémánál a vízbontás és a 2-es reakciócentrum között, mivel a DPC (1,5-difenil-karbohidrazid) mesterséges elektrondonor jelenlétében a DCPIP (2,6-diklórfenol-indofenol) redukciója Cd jelenlétében alig csökken (BASZYNSKI et al. 1980). Cd hatására csökken a kloroplasztiszok granulos szerkezete is. Mind a fotofoszforilációt, mind a kloroplasztisz struktúráját Mn felesleggel helyre lehet állítani. Feltételezhető, hogy a vízbontásban szereplő Mn-proteinbe lép be a Cd.

Más nehézfémekhez hasonlóan ( $\text{Ag} = \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$ ) a Cd is gátolja a  $\text{K}^+$  felvételét (árpa: OBERLÄNDER és ROTH 1978, zab: KECK 1978, búza, kukorica: CSEH et al. 1979) gyökereknél. Mivel a sztómamozgásban is elsődleges szerepe van a  $\text{K}^+$ -felvételnek, a Cd sztómamozgást gátló hatása visszavezet-



hető a  $K^+$ -felvétel gátlására. Más kísérleti eredményekkel összevetve —  $La^{3+}$  hatás (LEONARD et al. 1975), vanádium hatás (COCUCCI et al. 1980) — el lehet fogadni azt a feltételezést (KECK 1978, CSEH et al. 1979), hogy a Cd primér hatását a plazmalemma  $K^+ \rightleftharpoons H^+$  transzportáló ATPáz gátlásán keresztül fejti ki.

A Cu, bár egyértelműen esszenciális elem, csak nagyon szűk koncentráció-sávban optimális, pl. *Lemna minor*  $6 \cdot 10^{-8}$  M  $CuSO_4$  mellett szépen fejlődik,  $3 \cdot 10^{-7}$  M-t még eltűri, látható károsodás nincs, de  $6 \cdot 10^{-7}$  M-ban a Cu-gátlás már 50%-os. A búzagyökér növekedését  $10^{-6}$  M-ban még serkenti,  $3 \cdot 10^{-6}$  M-ban közel 60%-ban gátolja (CSEH és BUJTÁS 1980). Káposzta  $5 \cdot 10^{-5}$  M réz jelenlétében gyakorlatilag nem nő (HARA és SONODA 1979). Az uborka növekedését nagymértékben, az Ag-tel azonosan gátolja (PETTERSSON 1976).

A Cu felvétel mechanizmusa kérdésében a kapott eredményeket teljesen ellentmondóan értelmezik, sőt az elvégzett kísérletek is hiányos ismeretekre utalnak.

Az utóbbi években a Cu aktív felvételéről jelennek meg dolgozatok, a Nissen iskola értékelése szerint. HARRISON et al. (1978) árpa gyökerek réz felvételét multifázisosnak tekintik — 0,6 mM-787 mM külső koncentráció mellett, 30'-es  $CaCl_2$ -os mosás után. További vizsgálataikban (HARRISON et al. 1979) a Cu lecserélődést Ca, Cd, Co, Mg, Ni és  $Pb/NO_{3/2}$ -tal vizsgálták ugyanacsak ebben a magas koncentrációban.

MARQUENIE-VAN DER WERFF és ERNST (1979) *Elodea* vízi növény  $Cu^{2+}$  felvételét és a sejtrészekben való megoszlását vizsgálták pH 8,0-on 50  $\mu M$  külső koncentráció mellett. Ugyanakkor megállapítják, hogy a sejtek életképessége ezen az értéken már mérhetően csökken (20 és 70%). Képtelen dolog a felhasznált magas koncentrációk és  $Pb/NO_{3/2}$ -tal történő mosás után a  $Cu^{2+}$  felvételi mechanizmusára következtetni.

BRAMS és FISKELL (1971), GOREN és WANNER (1971), SMITH (1953) a réz-felvételt passzív folyamatnak tekintik. COOMBES et al. (1977, 1978) különös gondot fordítanak a Cu-formák felvételének vizsgálatára: a töltéskülönbségre (pozitív, neutrális, negatív) és a kötéstabilitás eltéréseire. A  $[Cu^{II} \cdot EDTA]^{2-}$  alig vevődik fel, a  $[Cu^{II}(OH_2)_6]^{2+}$  és a biszetiléndiamino  $\cdot CuSO_4$  —  $[Cu^{II}(en_2)]^{2+}$  felvétele nem lineáris az idővel, ami feltehetően a  $2^+$  töltéssel rendelkező formák változó struktúrájával magyarázható. A különböző komplexekből felvett Cu eltérő mértékben mosható le a gyökérről  $CaCl_2$  (0,05 mM) oldattal. Az anorganikus Cu  $[Cu^{II}(OH_2)_6]^{2+}$  50%-a 60 perc alatt lemosható, a  $[Cu^{II}(en_2)]^{2+}$  alig, a neutrális bisglicinato  $\cdot Cu$  nem cserélhető le. COOMBES et al. (1978) feltételezik, hogy a szeretlen Cu a szabad helyeken kötődik meg, míg a komplexek esetleg bejutottak a szimplasztba is.

Több mint 20 éves következetes munka eredménye a Fe felvételéről és transzlokációjáról kialakított mozaikkép. A vas mezo-elem, hiányában csökken a termés. A hiánytünet a fiatal leveleken jelentkezik: először az erek között

sárgul a levél, majd az ereket körülvevő sejtek klorofil tartalma is csökken, a levél egészen kivilágosodik, majd kiszárad, megbarnul és az egész friss hajtásrész elpusztul.

A Fe-hasznosítás eltérései alapján izolálta WEISS (1943) a magasabbrendű növények közül az első transzport single-gén mutánst. A vas felvételének annak oldatban tartása a feltétele, amit az alacsony pH és a komplexképzők tesznek lehetővé. A Fe-hiánynak nemcsak a felvétel, hanem a transzlokációs képesség hiánya is lehet az oka, ill. a vas átalakulása nem hasznosítható formába magában a növényben. A vastartalom és a vasellátottság éppen ezért nem mindig van korrelációban egymással: a klorózisra hajlamos növények gyökere több vasat tartalmaz (BROWN és CHANEY 1971), mint a Fe-t jól hasznosító növényeké. A növény csak kétértékű vasat képes felvenni. Bebizonyították, hogy a vas redukciója a külső oldatban történik meg (BROWN és CHANEY 1971, CHANEY et al. 1972). A vas-efficiens és a vas-inefficiens növények az ún. redukzív kapacitásukban különböznek. Keverék kultúrákban a napraforgó megszünteti a kukorica klorózisát (VENKAT RAJU et al. 1972, KASHIRAD és MARSCHER 1974). Ennek egyik oka, hogy az efficiens növények Fe-hiányra gyorsuló proton leadással reagálnak. Inefficiens növényeknél a Fe-hiány nem indukál  $H^+$  exkréciót. A Fe-felvételt a talajoldat összetétele is befolyásolja, gátolja a magas Ca, bikarbonát és a  $PO_4$  tartalom, de befolyásolja a nitrogén táplálás módja is. A nitrát táplálás  $OH^-$  leadással jár. A növények abban is eltérnek egymástól, hogy Fe-hiányra  $NO_3^-$  jelenlétében  $H^+$  extrúzióval reagálnak, vagy  $OH^-$  ionokat adnak le a rhizoszférába és csak a nitrát eltűnése után adnak le  $H^+$ -t (VAN EGMOND és AKTAS 1977; AKTAS és VAN EGMOND 1979). Régóta feltételezték, hogy a redukzív kapacitás nemcsak a proton kiválasztását, hanem redukáló anyag leadását is jelenti. Japán kutatóknak sikerült izolálniok zab és rizs gyökérből (TAKAGI 1976) és azonosítaniok (TAKEMOTO et al. 1978) az árpagyökérből leadódó természetes kelátort, ami szerkezeti képlete alapján egy új aminosavnak bizonyult: mugineinsav.

E vegyülethez hasonló szerkezetű aminosavakat, amelyek lehetnek a Fe-kelátor előanyagai is, több növény leveléből is kimutattak.

A vas felvételével még nem oldódik meg a Fe-ellátás kérdése, mivel transzlokációjához ismét kelálódnia kell. A vas a legkülönbözőbb növényekben (szója, dohány, napraforgó, tök, paradicsom) vas-citrát formájában transzlokálódik (BROWN 1966, SCHMID és GERLOFF 1961, TIFFIN 1966 a, b). A könnyezési nedv Fe-tartalmával együtt nő a citrát tartalma is, de a Fe/citrát arány nem állandó. A citrát általában feleslegben van a xilém nedvben. Mind a Fe-hiány, mind pedig a foszfáthiány növeli a gyökér citrát tartalmát. A foszfát mennyiség növekedése a tápoldatban gátolja a szerves savak képződését a gyökérben (BROWN 1966, 1968, TIFFIN 1966 a, 1970).

A vasfelvétel és transzlokáció eredményei ráirányították a figyelmet más kétértékű kationok szállítási módjaira is. Az elemek egy része ionos formában



transzlokálódik, de a kétértékűek nagy részéről bebizonyosodott, hogy csak kötött formában tudnak transzlokálódni. Rendkívül érdekes, hogy az ún. hiperakkumulátor növények kitérnek magas szerves sav tartalmukkal, különösen a citromsav az, ami pl. a Ni akkumulációval szignifikáns korrelációt mutat (LEE et al. 1978). Zn rezisztens növények magas almasav tartalmúak (MATHYS 1977). Szerves savakon kívül kelátorok lehetnek aminosavak és peptidok is. Mn ionok kismolekulasúlyú, aminosav tartalmú anyagokhoz kötődve transzlokálódnak kukorica xilémében (EBEID és KUTÁČEK 1979).

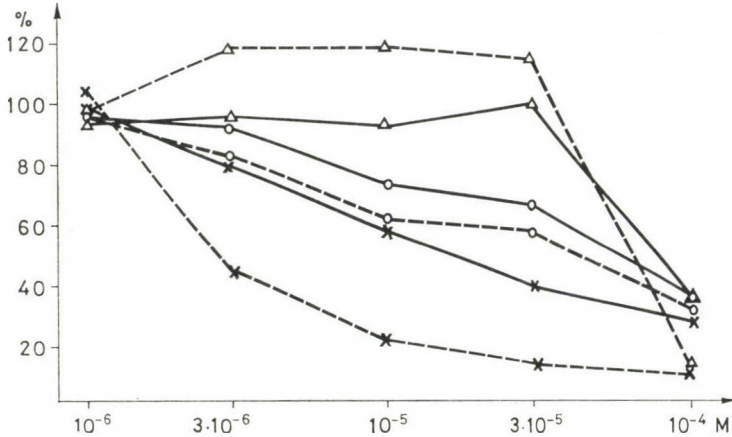
A környezetszennyezés és a nyomelemszükséglet antagonizmusa, amint a fenti eredményekből is látszik, ráirányította a figyelmet a természetes és a mesterséges komplexképzők tanulmányozására. Komplexképzőkkel szeretnénk bejuttatni a növénybe a szükséges anyagokat és komplexképzőkkel szeretnénk távoltartani más anyagokat. A komplexek stabilitása ion- és pH-függő. A talaj és a növény pH-ja nem azonos, mivel a növényi sejtek regulálják a pH-jukat, amely általában a savas tartományba esik. Kérdés, hogy a stabil komplex bejut-e a növénybe és transzlokálódhat-e a hajtásba? Az elem kötve marad-e a kémiai komplexhez, vagy a növény újra komplexálja a kérdéses elemet? Az irodalmi adatok ellentmondóak, feltehetően ez is növény-, komplexképző-, pH- és koncentráció-függő folyamat. A komplexképzők a hatásukat mint „oldószer”, mint transzporter fejtik-e ki, vagy a felvételben a növényi transzportrendszer a szabályozó tényező? A legutolsó kérdés megválaszolására tudnunk kellene, hogy lehet-e a kétértékű kationok carrierjéről beszélni a szó szokott értelmében vagy sem?

### *Saját kísérleteink eredményei*

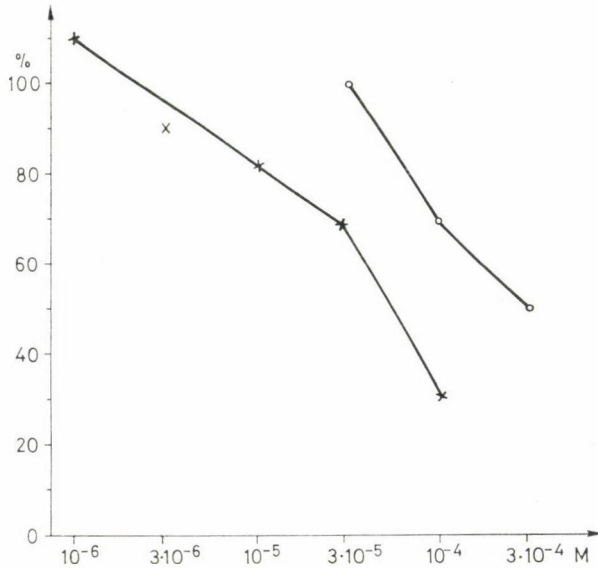
A nehézfémek — a  $Cd^{2+}$  és a  $Cu^{2+}$  — hatásának vizsgálatához részben előző, Lemna-tenyésztési kísérleteink eredményei, részben elméleti megfontolások vezettek. Megállapítottuk, hogy a  $Cu^{2+}$  és a  $Cd^{2+}$  a vízkultúrában nevelt gabonafélék növekedését gátolja. Eltérő azonban mind a  $Cu^{2+}$ , illetve  $Cd^{2+}$  hatásának jellege, mind az egyes gabonafélék érzékenysége. A  $Cu^{2+}$  jobban gátolja a gyökér növekedését, a  $Cd^{2+}$  a gyökérre és hajtásra egyforma mértékben hat (1. ábra). Ez a különbség kifejezésre jut transzlokációjukban is. A hajtásba transzlokált  $Cu^{2+}$ , illetve  $Cd^{2+}$  abszolút mennyisége igen különböző. Ráadásul a két gabonafajban iononként változó mértékben eltérő a transzlokáció. Így a zab kevésbé károsodik és több  $Cd^{2+}$ -ot, de kevesebb  $Cu^{2+}$ -et halmoz fel hajtásában, mint a búza.

A tápoldathoz a nehézfémionokkal egyidejűleg adott CH-I. kísérleti komplexképző kivédte a búza növekedésének gátlását (1. ábra), és mindkét vizsgált gabonafajnál — különösen a magas koncentrációkon — jelentős mértékben csökkentette a  $Cu^{2+}$  transzlokációját a hajtásba.

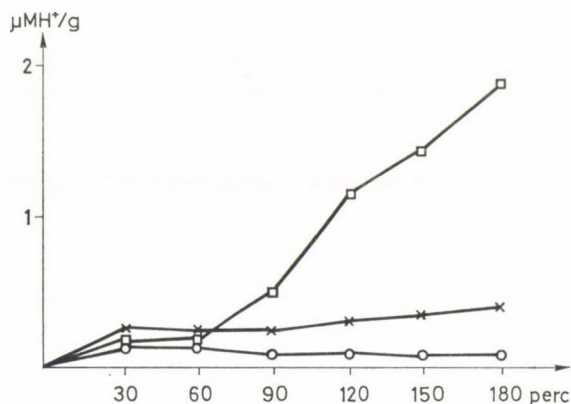
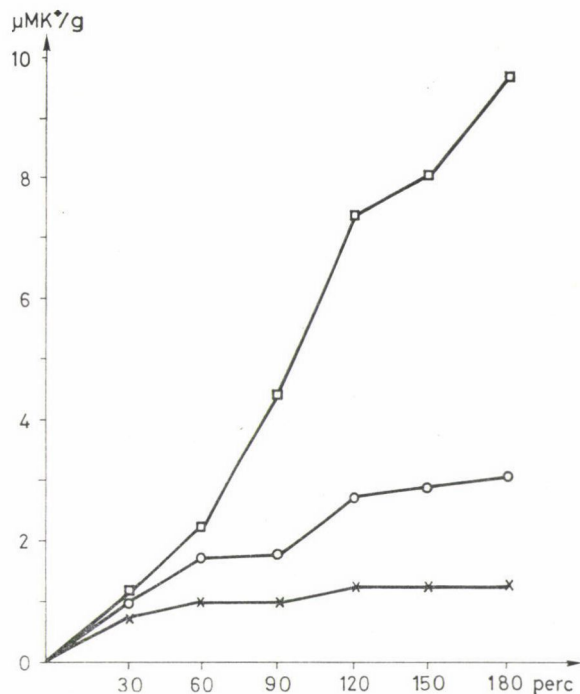
Amint a bevezetőben leírtuk, az irodalmi adatok alapján elfogadtuk azt a nézetet, hogy a  $\text{Cd}^{2+}$  priméren a plazmalemma felületén hat, gátolva a  $\text{K}^+$ -felvételt. Logikusan következett ebből az a feltételezés, hogy a  $\text{Cu}^{2+}$ , amely sokkal erősebben kapcsolódik a szerves anyagokhoz, komplex-stabilitása nagy, gátló hatását ugyancsak a plazmalemmán fejtí ki.



1. ábra. Búza (GK Szeged) csíranövények növekedése  $\text{Cu}^{2+}$ - és  $\text{Cd}^{2+}$ -ionok, valamint  $\text{Cu}^{2+} + \text{CH-I}$  ( $10^{-4}$  M) jelenlétében. A kapott eredményeket a kontroll friss súly %-ban fejeztük ki. A növények 10 napig 1/4-es Hoagland oldatban nőttek. ---- gyökér, — hajtás. ×---×, ○---○ =  $\text{Cu}^{2+}$ ; △---△, △---△ =  $\text{Cu}^{2+} + \text{CH-I}$ ; ○---○, ○---○ =  $\text{Cd}^{2+}$



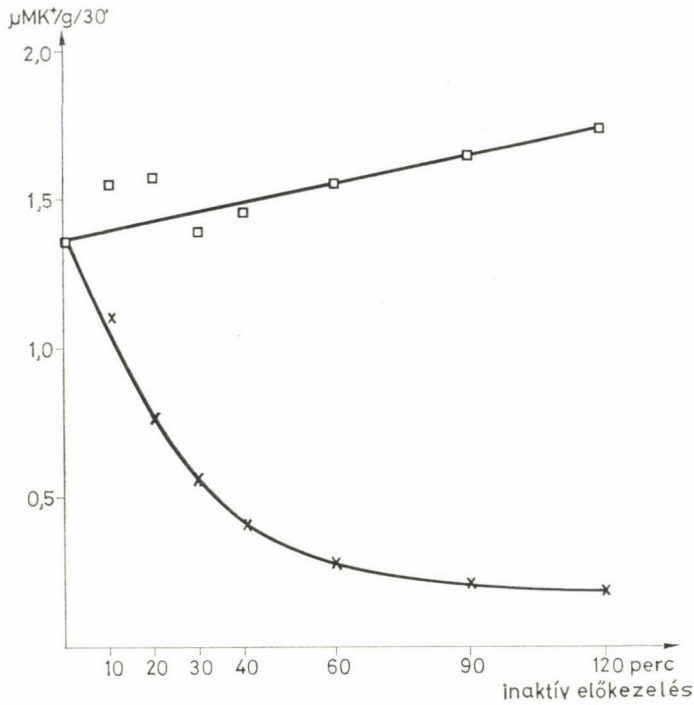
2. ábra.  $\text{K}^+$ -felvétel  $\text{Cu}^{2+}$  (×---×) és  $\text{Cd}^{2+}$  (○---○) gátlásának koncentráció függése. Az excizált búza (GK Szeged) gyökerek  $\text{K}^+$  felvételét a kontroll %-ban fejeztük ki. A külső oldat KCl koncentrációja  $10^{-4}$  M volt, az oldat  $5 \cdot 10^{-4}$  M  $\text{CaSO}_4$ -ot tartalmazott



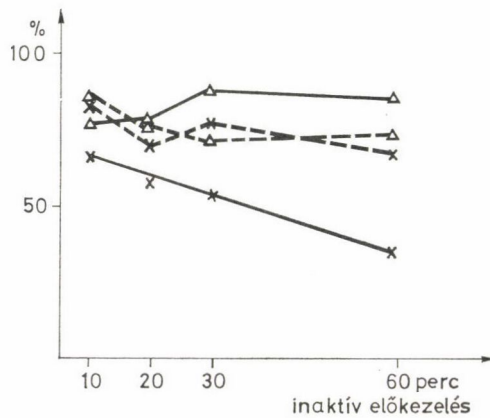
3. ábra. Excizált búza (GK Szeged) gyökerek  $K^+$  felvételének (3. a) és  $H^+$  leadásának (3. b) időfüggése g friss súlyra számolva. A külső oldat  $10^{-4}$  M KCl-ot és  $5 \cdot 10^{-4}$  M  $CaSO_4$ -ot tartalmazott □—□ kontroll, ○—○  $Cd^{2+}$  ( $3 \cdot 10^{-4}$  M)<sub>1</sub> és ×—×  $Cu^{2+}$  ( $10^{-4}$  M) ionok jelenlétében

A  $Cu^{2+}$  már  $3 \times 10^{-6}$  M-ban gátolja excizált búzagyökérben a  $K^+$  ( $^{86}Rb^+$ ) influxot.  $3 \times 10^{-5}$  M-ban az 50%-os gátlás rövid idő alatt elérhető,  $10^{-4}$  M-ban totálisan gátol.  $Cd^{2+}$ -ra a  $K^+$ -felvételi rendszer sokkal érzéketlenebb (2. ábra).

A  $Cd^{2+}$  és a  $Cu^{2+}$  az aktív  $K^+$ -influxot gátolják. Elölt gyökereknél és 0 °C-on nincs gátlás, az elektrolit effluxot alig befolyásolják.



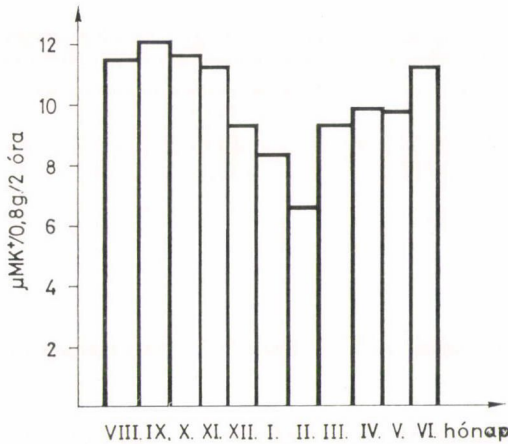
4. ábra. Különböző időtartalmú  $\text{CuSO}_4$  előkezelés hatása a búza (GK Szeged) excizált gyökereinek  $\text{K}^+$  felvételére g friss súlyra számolva.  $\square$ — $\square$  kontroll,  $\times$ — $\times$   $10^{-4}$  M  $\text{CuSO}_4$ -tal kezelt



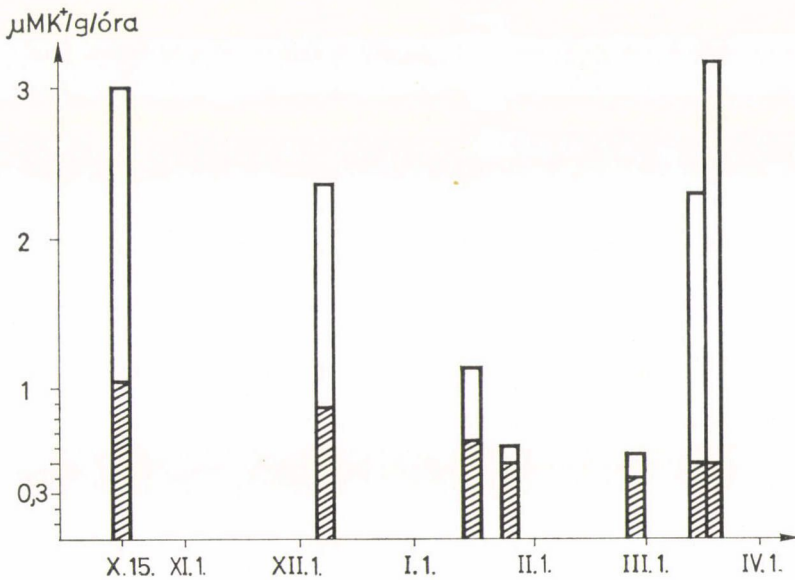
5. ábra. Komplexképzők hatása búza (GK Szeged) excizált gyökereinek  $\text{K}^+$  felvételére. A  $\text{Cu}^{2+}$  gátlás feloldása komplexképzőkkel. A felvételi periódus 30'. Az eredményeket a kontroll %-ában fejeztük ki.  $\times$ — $\times$   $3 \cdot 10^{-5}$  M  $\text{CuSO}_4$ ;  $\triangle$ — $\triangle$   $10^{-4}$  M CH-I;  $\triangle$ — $\triangle$   $3 \cdot 10^{-5}$  M  $\text{CuSO}_4$  +  $10^{-4}$  M CH-I;  $\times$ — $\times$   $3 \cdot 10^{-5}$  M  $\text{CuSO}_4$  +  $10^{-4}$  M  $\text{Na}_2\text{EDTA}$



Megerősítik a plazmalemmán működő  $K^+ \rightleftharpoons H^+$  pumpáról az utóbbi időben kialakult nézetet a  $Cd^{2+}$  és  $Cu^{2+}$ -hatás időgörbéi. A  $K^+$ -felvétel és a  $H^+$ -leadás kontroll görbéi teljesen azonos jellegűek, bár a sztöchiometriai arány nem volt 1:1. Ezekben a kísérletekben a  $Cd^{2+}$  és  $Cu^{2+}$  a felvételi oldatban volt jelen. Kb. 60 perc alatt mind a  $K^+$ -felvételt, mind a  $H^+$ -leadást meggátolták. A  $Cd^{2+}$  nem gátolja teljesen a  $K^+$ -felvételt. Feltűnő, hogy a  $H^+$ -leadást mégis a  $Cd^{2+}$  gátolja jobban (3. ábra). Sajnos azt a kézenfekvő feltételezést,



6. ábra. F<sub>481</sub> őszi búza excizált gyökereinek K<sup>+</sup> felvétele az év különböző hónapjaiban



7. ábra. GK Szeged őszi búza K<sup>+</sup> felvétele (egész oszlop) és a K<sup>+</sup> felvétel Cu<sup>2+</sup> gátlása ( $3 \cdot 10^{-5}M$ ) csíkozott oszlop) az év különböző hónapjaiban

hogy ez alatt az idő alatt a szimplasztba is bejut, nem támasztják alá a  $^{115}\text{Cd}$ -mal végzett vizsgálataink, mivel 2 órás kísérleteinkben az élő gyökér némileg kevesebb  $\text{Cd}^{2+}$ -ot kötött meg, mint az elölt gyökér.

A  $\text{Cu}^{2+}$ -hatás további tanulmányozása során olyan időgörbékét vettünk fel, ahol az excizált gyökereket különböző ideig  $10^{-4}$  M  $\text{CuSO}_4$  jelenlétében rázattuk, majd a gyökerek öblítése után  $^{86}\text{Rb}^{+}$ -mal jelölve mértük a  $\text{K}^{+}$ -felvételt. A KCl koncentrációja az inaktív és az aktív oldatban, az öblítő és a mosó folyadékokban is  $10^{-4}$  M volt,  $5 \times 10^{-4}$  M  $\text{CaSO}_4$  mellett. A kontroll kezelésnél a 30 perces felvételben gyenge izolálási hatás mutatható ki (4. ábra). A  $\text{Cu}^{2+}$  előkezelés is jelentősen gátol. 60 perces előkezelés után a gátlás totálisnak tekinthető, mivel a felvétel a 0 C°-on mért érték szintjére csökken.

Komplekképzőkkel a  $\text{Cu}^{2+}$  gátlást meg lehet akadályozni. Ha egy kereskedelmi forgalomban még nem levő komplekképzőt (CH-I.), illetve  $\text{Na}_2\text{EDTA}$ -t adtunk a  $\text{CuSO}_4$ -tal együtt az inaktív előkezelő oldathoz, akkor a  $\text{Cu}^{2+}$  gátló hatása minimálisra csökkenthető, vagy megszűnik. A fennmaradó gátlás a komplekképzők számlájára írható (5. ábra).

Utójára hagytuk a legérdekesebb kísérleti eredményt. Az 1978-ban tartott VIII. Membrán Transzport Konferencián poszterünkön bemutattuk, hogy az F481 őszi búza  $\text{K}^{+}$ -felvétele februárban minimumon megy át (6. ábra). A kísérleteinkben azóta használt GK Szeged fajta  $\text{K}^{+}$ -felvételében szintén megfigyelhető februári minimum érték, bár a felvétel abszolút értéke alacsonyabb ( $0,5-3 \mu\text{M g}^{-1} \text{óra}^{-1}$ ), mint az F481 fajtáé ( $4-7,5 \mu\text{M g}^{-1} \text{óra}^{-1}$ ). A görbe menete is hasonló: fokozatosan csökken a minimumig, majd hirtelen (7-10 nap alatt) ugrik fel a márciusi értékre. A  $\text{Cu}^{2+}$ -zel gátolt felvétel abszolút értéke viszont alig változik. Ebből következik, hogy a felvételi minimumok idején a  $\text{Cu}^{2+}$ -gátlás szinte megszűnik, a márciusi maximális felvételnél pedig a közvetített  $\text{K}^{+}$ -influx totálisan gátlódik (7. ábra).

### Összefoglalás

Az utóbbi évtizedek intenzív iparosodása és a mezőgazdaság erőteljes kemizálása, a terméshozamok növelésének fontossága ismételten a nehézfém-sók hatásának tanulmányozására fordította a figyelmet. A  $10^{-6}$  M alatti külső koncentrációkban hasznos nehézfém-sók felvételi mechanizmusa tisztázatlan, részben a rendkívül alacsony koncentrációkon való mérés metodikai nehézségei miatt, részben komplekképző tulajdonságaik bonyolult pH-függése, kölcsönhatásaik és az anyagerére gyakorolt másodlagos hatásaik miatt. Ez utóbbi különösen a relatíve nagyobb koncentrációknál jelentkezik. Különös figyelmet érdemel az, hogy a *hatékony* és a növényben *jelenlevő* nehézfém mennyisége nem mindig van korrelációban egymással.

Kísérleteink során a gátló koncentrációban jelenlevő  $\text{Cu}^{2+}$  és  $\text{Cd}^{2+}$  hatását tanulmányoztuk.



Eredményeink alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a nehéz-fémek primér hatásukat nem az anyagcsere folyamatokra (légzés, fotoszintézis), hanem a határfelületeken fejtik ki. Gátolják az aktív  $K^+$  influxot és a  $H^+$  leadáást. Feltételezésünk szerint a  $K^+ \rightleftharpoons H^+$  ATPáz-ra hatnak.

## IRODALOM

- ANDERSSON, A.: On the influence of manure and fertilizers on the distribution and amounts of plant-available Cd in soils. Swedish J. agric. Res. **6**, 27—36 (1976).
- ANDERSSON, A.: The distribution of heavy metals in soils and soil material as influenced by the ionic radius. Swedish J. agric. Res. **7**, 79—83 (1977).
- AKTAS, M. és VAN EGMOND, F.: Effect of nitrate nutrition on iron utilization by an Fe-efficient and an Fe-inefficient soybean cultivar. Plant and Soil **51**, 257—274 (1979).
- BABICH, H. és STOTZKY, G.: Effects of cadmium on the biota. Adv. Applied Microbiol. **23**, 55—117 (1978).
- BASZYŃSKI, T.—WAJDA, L.—KRÓL, M.—WOLIŃSKA, D.—KRUPA, Z. és TUKENDORF, A.: Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants. Physiol. Plant. **48**, 365—370 (1980).
- BAZZAZ, M. B. és GOVINDJEE: Effect of cadmium nitrate on spectral characteristics and light reactions of chloroplasts. Environ. Letters **6**, 1—12 (1974).
- BAZZAZ, F. A.—ROLFE, G. L. és CARLSON, R. W.: Effect of cadmium on photosynthesis and transpiration of excised leaves of corn and sunflower. Physiol. Plant. **32**, 373—376 (1974).
- BRAMS, E. A. és FISKELL, G. A.: Copper accumulation in citrus roots and desorption with acid. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. **35**, 772—775 (1971).
- BROWN, J. C.: Fe and Ca uptake as related to root-sap and stem exudate citrate in soybeans. Physiol. Plant. **19**, 968—976 (1966).
- BROWN, J. C.: Iron chlorosis in soybeans as related to the genotype of rootstock: 5. Differential distribution of photosynthetic C14 as affected by phosphate and iron. Soil. Sci. **105**, 159—165 (1968).
- BROWN, J. C. és CHANEY, R. L.: Effect of iron on the transport of citrate into the xylem of soybeans and tomatoes. Plant Physiol. **47**, 836—840 (1971).
- CARLSON, R. W. és BAZZAZ, F. A.: Growth reduction in American sycamore (*Platanus occidentalis* L.) caused by Pb-Cd interaction. Environ. Pollut. **12**, 243—253 (1977).
- CARLSON, R. W.—BAZZAZ, F. A. és ROLFE, G. L.: The effect of heavy metals on plants: Part II. Net photosynthesis and transpiration of whole corn and sunflower plants treated with Pb, Cd, Ni, and Tl. Environ. Res. **10**, 113—120 (1975).
- CHANEY, R. L.—BROWN, J. C. és TIFFIN, L. O.: Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. Plant Physiol. **50**, 208—213 (1972).
- COCUCCI, M.—BALLARIN-DENTI, A. és MARRÉ, M. T.: Effects of orthovanadate on  $H^+$  secretion,  $K^+$  uptake, electric potential difference and membrane ATPase activities of higher plant tissues. Plant Sci. Letters **17**, 391—400 (1980).
- COOMBS, A. J.—LEPP, N. W. és PHIPPS, D. A.: Desorption of copper from excised roots of barley (*Hordeum vulgare* L. c. v. Zephyr), as related to chemical form of the applied copper. Z. Pflanzenphysiol. **87**, 279—283 (1978).
- COOMBS, A. J.—PHIPPS, D. A. és LEPP, N. W.: Uptake pattern of free and complexed copper ions in excised roots of barley (*Hordeum vulgare* L. c. v. Zephyr). Z. Pflanzenphysiol. **82**, 435—439 (1977).
- CSEH, E. és BUJTÁS, C.: Effect of heavy metals on growth and  $K^+$  absorption of wheat. Proc. 20<sup>th</sup> Hung. Ann. Meet. Biochem. Siófok (1980).
- CSEH, E.—BUJTÁS, C. és SZABADOS, M.: Preliminary notes about the effects of heavy metals on plant nutrition. Proc. First Inter. Symp. on Plant Nutrition, Varna Bulgaria, Vol. II. pp. 315—319 (1979).
- EBEID, M. M. és KUTÁČEK, M.: Effect of EDTA on transport forms of manganese in maize xylem exudate. Biol. Plant. **21**, 178—182 (1979).
- FRIED, M. és BROESHART, H.: The Soil-Plant System in Relation to Inorganic Nutrition. Academic Press, London (1967).
- GOREN, A. és WANNER, H.: Die Absorption von Blei unter Kupfer durch Wurzeln von *Hordeum vulgare*. Ber. Schweiz. Bot. Ges. **80**, 334—340 (1971).
- HAMPP, R.—BEULICH, K. és ZIEGLER, H.: Effects of zinc and cadmium on photosynthetic  $CO_2$ -fixation and Hill activity of isolated spinach chloroplasts. Z. Pflanzenphysiol. **77**, 336—344 (1976).



- HARA, T. és SONODA, Y.: Comparison of the toxicity of heavy metals to cabbage growth. *Plant and Soil* **51**, 127–133 (1979).
- HARRISON, S. J.—LEPP, N. W. és PHIPPS, D. A.: Uptake of copper by excised roots. I. A modified experimental technique for measuring ion uptake by excised roots, and its application in determining uptake characteristics of “free” copper ions in excised *Hordeum* roots. *Z. Pflanzenphysiol.* **90**, 443–450 (1978).
- HARRISON, S. J.—LEPP, N. W. és PHIPPS, D. A.: Uptake of copper by excised roots. II. Copper desorption from the free space. *Z. Pflanzenphysiol.* **94**, 27–34 (1979).
- JARVIS, S. C.—JONES, L. H. P. és HOPPER, M. J.: Cadmium uptake from solution by plants and its transport from roots to shoots. *Plant and Soil* **44**, 179–191 (1976).
- JARVIS, S. C. és JONES, L. H. P.: Uptake and transport of cadmium by perennial ryegrass from flowing solution culture with a constant concentration of cadmium. *Plant and Soil* **49**, 333–342 (1978).
- KASHIRAD, A. és MARSCHNER, H.: Iron nutrition of sunflower and corn plants in mono and mixed culture. *Plant and Soil* **41**, 91–101 (1974).
- KECK, R. W.: Cadmium alteration of root physiology and potassium ion fluxes. *Plant Physiol.* **62**, 94–96 (1978).
- LAMOREAUX, R. J. és CHANEY, W. R.: The effect of cadmium on net photosynthesis, transpiration, and dark respiration of excised silver maple leaves. *Physiol. Plant.* **43**, 321–326 (1978).
- LEE, K. C.—CUNNINGHAM, B. A.—PAULSON, G. M.,—LIANG, G. H. és MOORE, R. B.: Effects of cadmium on respiration rate and activities of several enzymes in soybean seedlings. *Physiol. Plant.* **36**, 4–6 (1976).
- LEE, J.—REEVES, R. D.—BROOKS, R. R. és JAFFRÉ, T.: The relation between nickel and citric acid in some nickel-accumulating plants. *Phytochemistry* **17**, 1033–1035 (1978).
- LEONARD, R. T.—NAGAHASHI, G. és THOMSON, W. W.: Effect of lanthanum on ion absorption in corn roots. *Plant Physiol.* **55**, 542–546 (1975).
- MARQUENIE—VAN DER WERFF, M. és ERNST, W. H. O.: Kinetics of copper and zinc uptake by leaves and roots of an aquatic plant, *Elodea nuttallii*. *Z. Pflanzenphysiol.* **92**, 1–10 (1979).
- MATHYS, W.: The role of malate, oxalate, and mustard oil glucosides in the evolution of zinc resistance in herbage plants. *Physiol. Plant.* **40**, 130–136 (1977).
- OBERLÄNDER, H. E. és ROTH, K.: Die Wirkung der Schwermetalle Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium, Quecksilber und Blei auf die Aufnahme und Verlagerung von Kalium und Phosphat bei jungen Gerstenpflanzen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* **141**, 107–116 (1978).
- PETTERSSON, O.: Heavy-metal ion uptake by plants from nutrient solution with metal ion, plant species and growth period variations. *Plant and Soil* **45**, 445–459 (1976).
- SCHMID, W. E. és GERLOFF, C. C.: A naturally occurring chelate of iron in xylem exudate. *Plant Physiol.* **36**, 226–231 (1961).
- SMITH, P. F.: Heavy metal accumulation by citrus roots. *Bot. Gaz.* **114**, 426–436 (1953).
- TAKAGI, S.: Naturally occurring iron-chelating compounds in oat- and rice-root washings. I. Activity measurement and preliminary characterization. *Soil Sci. Plant Nutr.* **22**, 423–433 (1976).
- TAKEMOTO, T.—NOMOTO, K.—FUSHIYA, S.—OUCHI, R.—KUSANO, G.—HIKINO, H.—TAKAGI, S.—MATSUURA, Y. és KAKUDO, M.: Structure of mugineic acid, a new amino acid possessing an iron-chelating activity from roots washings of water-cultured *Hordeum vulgare* L. *Proc. Japan. Acad. Ser. B.* **54**, 469–473 (1978).
- TIFFIN, L. O.: Iron translocation I. Plant culture, exudate sampling, iron-citrate analysis. *Plant Physiol.* **41**, 510–514 (1966a).
- TIFFIN, L. O.: Iron translocation II. Citrate/iron ratios in plant stem exudates. *Plant Physiol.* **41**, 514–518 (1966b).
- TIFFIN, L. O.: Translocation of iron citrate and phosphorus in xylem exudate of soybean. *Plant Physiol.* **45**, 280–283 (1970).
- VAN DUJ JVENDIJK—MATTEOLI, M. A. és DESMET, G. M.: On the inhibitory action of cadmium on the donor side of photosystem II in isolated chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta* **408**, 164–169 (1975).
- VAN EGMOND, F. és AKTAS, M.: Iron-nutritional aspects of the ionic balance of plants. *Plant and Soil* **48**, 685–703 (1977).
- VENKAT RAJU, K.—MARSCHNER, H. és RÖMHELD, V.: Effect of iron nutritional status on ion uptake, substrate pH and production and release of organic acids and riboflavin by sunflower plants. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* **132**, 183–189 (1972).
- WEISS, M. G.: Inheritance and physiology of efficiency in iron utilization in soybean. *Genetics* **28**, 263–268 (1943).