



A kép illusztráció / Picture is for illustration only
Fotó/Photo: Tolokán Adrienn

Szabó S. András¹

Érkezett: 2017. május – Elfogadva: 2017. szeptember

Élelmiszerek stronciumtartalmának és a stroncium biológiai szerepének vizsgálata

Kulcsszavak: csonttritkulás, diszkriminációs tényező, esszencialitás, kalcium, ⁹⁰Sr radionuklid

1. Összefoglalás

Élettani szempontból a stroncium mikroelem, amelynek közös transzportrendszere van a kalciummal. A növényekben és talajokban a kalcium és a stroncium koncentrációi között többnyire két nagyságrend a különbség. Az állati és emberi szervezetben viszont akár három nagyságrend is lehet az eltérés. Ennek oka az erőteljes diszkrimináló képesség, amelynek révén a stroncium lényegesen kisebb mennyiségben szívódik fel a melegvérűek bélcsatornájából. Így az emberi szervezet Sr:Ca arányának értéke és radiostroncium szennyezettsége (⁹⁰Sr/Ca) jelentősen kisebb, mint az elfogyasztott ételekben mérhető mennyiségek. Köztudomású, hogy a stroncium részben helyettesítheti a kalciumot, ám a szervezetbe bevitt nagy mennyiségű stroncium toxikus. Ugyanakkor a stronciumot gyógyszerként is alkalmazzák csonttritkulás kezelésére.

A stroncium növény-, állat- és humánéletteni szerepének tisztázása, esetleges esszenciális szerepének bizonyítása további vizsgálatokat igényel. Mivel az esszenciális és a nem létfontosságú mikroelemek az egészséges szervezetben belüli koncentrációeloszlása jelentős eltérést mutat, ez az ismeret segítséget nyújt az adott mikroelem biológiai szerepének meghatározására az egészséges testszövetekben mérhető koncentrációeloszlások vizsgálatával, mert a szövetekben a létfontosságú elemek szűk koncentrációtartományban vannak jelen.

2. Bevezetés

Korábbi, az Élelmiszervizsgáló Közlemények hasábjain megjelent dolgozatban átfogó ismertetés olvasható a mikroelemek csoportosítási lehetőségeiről, az esszenciális és a nem-esszenciális jelleg valamint a koncentrációeloszlás közötti összefüggésről illetőleg a nyomelemek vizsgálatára alkalmazható analitikai mérés technikákról [1]. A dolgozatban a stroncium élettani szerepét tárgyaljuk. Ez a fém élelmiszerekben mérhető koncentrációját illetően tipikusan mikroelem. Megjegyezzük, hogy élettani szerepének több részlete további tisztázásra szorul.

A mikroelemekkel kapcsolatos kutatómunka mintegy 100 esztendő múltáig tekinthet vissza, és szoros összefüggésben van az analitikai módszerek teljesítőképességének, érzékenységének fejlődésével. Napjainkban az ilyen irányú vizsgálatokat szinte kizárólag

műszeres analitikai technikákkal, kémiai vagy fizikai módszereken alapuló mérés technikák felhasználásával végzik.

A stronciummal kapcsolatos mikroelem-kutatómunkának a XX. század ötvenes éveiben az adott nagy jelentőséget, hogy a bioszférában mérhető tartós radioaktív szennyezést okozó izotópok közül – a gyakori atomrobbantási kísérletek környezetszennyező hatása miatt – a stroncium két izotópjának, a ⁸⁹Sr és a ⁹⁰Sr radionuklidoknak volt meghatározó szerepe. A radiokémiai, radiobiológiai, radioökológiai kutatások a mikroelem élettani jelentőségének vizsgálatára is irányultak.

Ismeretes, hogy a természetben (ezáltal nyilvánvalóan az emberi szervezetben is) előforduló 92 természetes elemből (nem tekintve a mesterségesen előállított, ún. transzurán elemeket) 75 sorolható

¹ Élelmiszervizsgáló Közhasznú Alapítvány

a mikroelemek közé - ide tartozik a stroncium is -, amely a földkéregben 20. leggyakoribb elem. Nevét felfedezői, Crawford és Cruickshank adták 1790-ben (az elem neve a Skóciában található Strontian falu nevére utal [32].)

A stroncium kémiai alkáli földfém, a periódusos rendszer 2. főcsoportjában (oszlopában) található. Az 5. periódus eleme, a kalcium alatt és a bárium felett helyezkedik el a táblázatban. Kémiai és fizikai tulajdonságait tekintve is hasonló a kalciumhoz, előfordulási koncentrációja azonban a felszíni vizekben, talajokban és a növényekben általában 2 nagyságrenddel, az állati és emberi szöveteket tekintve viszont mintegy 3 nagyságrenddel kisebb a kalciuménál [23]. Az ivóvízben – néhány földrajzi helyen mérhető szélsőséges értékektől eltekintve – 1.0 mg/liter alatti, vagy jelentősen ezen érték alatti koncentrációban fordul elő. Lángfotometriás méréseink szerint a magyarországi un. indikátor- növények (sóska, spenót, saláta) és gabonafélék stronciumtartalma többnyire a kalciumtartalom mérőszámához képest 1-3%-ot tett ki. A mérhető kalciumtartalom a növény fajtájával és a talaj stronciumtartalmával volt összefüggésben. Zöldségfélék – borsó, paradicsom, retek, paprika – összetételének ICP-technikával történő vizsgálata során pedig azt tapasztaltuk, hogy a kalcium tartalom 100-200-szorosa volt a stroncium mennyiségének [2], [3], [4], [5].

Korábbi előadásokban és dolgozatokban [6], [1], [7], [8] már bemutattuk azokat a koncentrációeloszlási vizsgálatokat, amelyek eredményei alapján feltételezhető, hogy a növények számára a stroncium is létfontosságú mikroelem.

Az élelmiszerek nyomelemtartalma és annak eloszlás-vizsgálata segíthet a kérdéses mikroelemek biológiai szerepének tisztázásában [9]. E dolgozat célja a stroncium vélelmezett biológiai szerepének bemutatása. A kérdés tehát az, hogy a stroncium létfontosságúnak tekinthető mikroelem-e, vagy inkább a nem esszenciális mikroelemek közé sorolható. Az valószínűsíthető, hogy a stronciumnak nem csupán a növényéletben, hanem az állat- és humánéletben szempontjából is fontos biológiai szerepe van. Ez az alkáli földfém ugyanis minden bizonnyal meghatározó a csontok és a fogazat keménységének biztosításában, illetve szerepe lehet a csonttrikulálás kialakulásának gátlásában is.

3. Radioaktív stroncium izotópok

Fentebb említettük, hogy a stroncium élettani szerepének vizsgálata a XX. század 50-es és 60-as éveiben azért volt fontos, mert az atomrobbantási kísérletek tartós környezetszennyező hatását elsősorban a 90-es tömegszámú stronciumizotóp okozta. Ez az izotóp béta-sugárzó, fizikai felezési ideje 28 év. Ezért a radiostronciumtól származó környezeti radioaktivitás csak lassan csökken. S mivel a stroncium kémiai nagyon hasonló a kalciumhoz, szintén beépül

a csontozatba, ahol tartós sugárterhelést okozhat. A ^{90}Sr az egyik legjelentősebb hasadási termék, amelynek döntő szerepe van az érintett terület radioaktív szennyeződésének kialakulásában. Az uránmag hasadását (neutronok hatására bekövetkező fisszióját) követően a keletkezési és bomlási séma a következő:



Az egyes izotópok egymást követő negatív béta-bomlással alakulnak át azonos tömegszámú, de egyre nagyobb rendszámú elemekké. A bomlási sort végül a már nem radioaktív, 40-es rendszámú cirkónium zárja. A ^{90}Y viszonylag rövid felezési ideje miatt a ^{90}Sr és ^{90}Y izotópok egymással radioaktív egyensúlyban vannak.

A ^{90}Sr izotóp mellett a szintén béta-sugárzó izotóp, a ^{89}Sr is jól ismert a környezetszennyező radionuklidok közül. Bár az uránmag hasadását követően a ^{89}Sr izotóp is jelentős mennyiségben keletkezik, de mivel felezési ideje lényegesen rövidebb, mint a ^{90}Sr nuklidé – mindössze 50 nap – a tartós kontamináció fenntartásában nincs szerepe. A viszonylag gyors lebomlás következtében a biológiai láncban a szennyeződés első néhány hónapjában kell jelenlétével és sugárterhelő hatásával számolni.

A radiostroncium – a kalciumhoz hasonló, úgynevezett csontkereső tulajdonsága miatt – az állatokban és az emberben döntően a magas kalciumtartalmú csontozatban található. Amennyiben a kontaminációs szint (nukleáris robbantási kísérletek és atomreaktor balesetek szennyező hatása) magas, akkor a ^{90}Sr izotóp hosszú felezési ideje (ill. a biológiai és a fizikai felezési időből számítható un. effektív felezési ideje) miatt a sugárterhelő hatás akár csontrákokat is előidézhet. A hosszú biológiai felezési idő miatt a csontokra a legnagyobb veszélyt a sugárterhelés szempontjából a ^{90}Sr izotóp jelenti [10]. Magyarországon azonban a 60-as évek elején az atomrobbantási kísérletek majd 1986-ban a csernobili atomerőmű baleset szennyező hatása miatt nem volt számottevő a mérhető, a ^{90}Sr -tól származó sugárszennyezettségi szint [11], [3], [12], [13].

4. A diszkriminációs tényezők jelentősége

Az egyes szervezetek diszkrimináló (megkülönböztető) képességének lényege az, hogy az egyes elemek relatív (más elemhez viszonyított) koncentrációja a biológiai láncfolyamat elemei között egymástól jelentősen eltérhet.

A Sr esetében azért célszerű a stroncium értékeket a kalcium-tartalomra vonatkoztatni, mert a fizikai-kémiai-biológiai hasonlóságból adódóan a kalcium és a stroncium közös transzportrendszerrel képez. A kalcium/stroncium arányok számítása radiometriai mérések alapján is elvégezhető, amikor nem a stroncium, hanem a radiostroncium koncentrációkat (aktivitásokat) viszonyítjuk a kalcium-értékekhez. Úgy is

fogalmazhatunk tehát, hogy a kalcium a stroncium és radiostroncium inaktív hordozója.

Az állati vagy az emberi szervezetre vonatkozó diszkriminációs faktor a stroncium esetében a következőképpen számítható ki:

$$D_{\text{Sr}} = \frac{\frac{\text{Sr}}{\text{Ca}} \text{ a tejszövetben}}{\frac{\text{Sr}}{\text{Ca}} \text{ a takarmányban, élelmiszerben}}$$

A stroncium diszkriminációs faktorát a ^{90}Sr aktivitása alapján is kiszámolhatjuk:

$$D_{\text{Sr}} = \frac{\frac{^{90}\text{Sr}}{\text{Ca}} \text{ a tejszövetben}}{\frac{^{90}\text{Sr}}{\text{Ca}} \text{ a takarmányban, élelmiszerben}}$$

Az egyes szervezetek diszkriminációs képességét jelző diszkriminációs faktorok meghatározása természetesen más testszövetek (pl. csont, izom, tojás) vizsgálata alapján is történhet. Méréseink szerint [14] az azonos állatból, de különböző testtájokról származó csontok stroncium-tartalma között nem volt kimutatható különbség. Juhoknál az egyes csontok (pl. femur, metacarpus) között – 96-96 minta vizsgálata alapján – a szórások figyelembevételével nem volt szignifikáns eltérés, az átlagérték 0.70 mg/g hamu érték körül ingadozott, mintegy 20 %-os szórás mellett.

5. Anyag és módszer

Vizsgálataink során nagyszámú, biológiai eredetű minta (takarmány- és élelmiszernövények, étrendek, tehéntej, izom, tojás, csont) mérésére került sor. Az adott tehénészetből származó tej- és takarmányminták esetében mindig párhuzamos mintavételezés történt, azaz abból a takarmányból vettük a mintát, amit a tejelő állatok az időszaknak megfelelően fogyasztottak.

A stroncium- és kalciumtartalom meghatározását lángfotometriás módszerrel, illetve röntgen-fluoreszcenciás eljárással (XRF ill. REA) végeztük. A lángfotometriás méréseket a minták elhamvasztása után a hamuk sósavas oldatából 461 és 554 nm-en hajtottuk végre. A röntgen-fluoreszcenciás méréseknél ^{125}I izotóp forrást és Si(Li) detektort alkalmaztunk. Ez a technika főként a tíznél nagyobb rendszámú

elemek meghatározására alkalmas. Munkánk során ICP-AES-technika alkalmazásával is végeztünk vizsgálatokat Thermo Jarrell Ash 9000 típusú berendezést használtunk, amely az 550 °C-on elhamvasztott minták 0.1 n HNO₃ oldatából határozta meg az elemek összetételét. A radioaktivitás mérésére halogéntöltésű GM-csőket valamint szcintillációs detektorokat (plasztik és NaI) alkalmaztunk. A mérések során béta-aktivitást határoztunk meg, mérve az összes és az un. fémion-frakció aktivitást. Ez utóbbi utal a minta radioaktív stroncium izotópokkal való szennyezettségére.

6. Eredmények és értékelésük

Az **1. táblázat** a párhuzamosan vett tej- és takarmányminták kalciumtartalomra vonatkoztatott átlagos stroncium- és radiostroncium-tartalmáról tájékoztat. A diszkriminációs faktorok számítását a relatív, tehát a kalcium-tartalomra számított értékek alapján lehet elvégezni. Az **1. táblázat** adataiból kiolvasható, hogy a fajlagos stroncium- ill. radiostroncium- koncentrációk között egy nagyságrendnyi különbség van. A tejszövet mérhető szintek a takarmányban előforduló értékeknek csupán 10, illetve 13%-át képezik. Ez az arány az éveken át végzett, nagyszámú mérés adatai szerint 8 és 15% közötti értékek adódott az egyedi minták esetében. Ez arra utal, hogy a stroncium felszívódása jelentősen elmarad a kalciumétól, s ezáltal a tejszövetben – és más testszövetekben is – mérhető relatív stroncium- és a ^{90}Sr - tartalom jelentősen kisebb, mint a kalcium-tartalom.

A diszkrimináló képességet illetően a **2. táblázat** is hasonló eredményeket tartalmaz. A csontok vizsgálata alapján is jól érzékelhető az egy nagyságrendet kitevő koncentrációkülönbség. Közismert, hogy a takarmányok – esetünkben növényi eredetű takarmánynövények – stronciumtartalma a növényi fajtól és a talajtani jellemzőktől is függ. A radiostroncium-aktivitás pedig a külső eredetű szennyező hatásokkal van összefüggésben. Befolyásoló faktorok a földrajzi tényezők (pl. csapadék mennyisége) és az alkalmazott agrotechnikai eljárások is. Az állati szövetek stabil Sr- és ^{90}Sr -tartalma pedig a diszkrimináló képességen, valamint az adott takarmány kémiai összetételén túl az állat életkorának is függvénye. Méréseink szerint ugyanis a borjúcsontok radioaktivitása jelentősen elmaradt a növendékmarha-csontokétól.

1. táblázat. Diszkriminációs faktorok számítása stronciumra ill. ^{90}Sr -ra párhuzamosan vett tej- és takarmányminták vizsgálata alapján Győr-Moson-Sopron megyében (200-200 minta)

Table 1 Calculation of discrimination factors for strontium and ^{90}Sr , based on parallel milk and feed samples taken in Győr-Moson-Sopron county (200 samples each)

Minta / Sample	Átlagos $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ aktivitás (mBq/g Ca) Average $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ activity (mBq/g Ca)	Sr/Ca (%)
Tej / Milk	648	0.38
Takarmány / Feed	6290	2.9
Átlagos diszkriminációs faktor Average discrimination factor	0.103	0.13

Ez pedig azzal függ össze, hogy a borjak táplálásában az első 1-2 hónapban az anyaállattól szoptatás útján kapott tej a meghatározó, s ennek stroncium- és radiostroncium-tartalma nagyságrendileg kisebb, mint a növényi eredetű takarmányoké. A szervezetben a kicserélődés (beépülés, akkumuláció, elimináció) sebessége a Ca-Sr-rendszert tekintve elég lassú – a biológiai felezési idő függvénye – ez okozza a borjak, növendékmarhák és felnőtt szarvasmarhák szöveteinek számottevően eltérő stroncium- és radiostroncium- tartalmát [15], [16].

Itt kell megemlítenünk, hogy a radiostroncium-szenyezettséget illetően – részben az eltérő diszkriminációs képesség, másrészt a különböző táplálkozási-takarmányozási feltételek miatt – jelentős eltérést találtunk az egyes állatfajok között. Méréseink alapján stronciumtartalom tekintetében a következő növekvő sorrendet kaptuk: sertés, baromfi, szarvasmarha, juh, hal. A radiostroncium-szenyezettség a növényevő halaknál jelentősen meghaladta a ragadozó halak csontjaiban mérhető ⁹⁰Sr-koncentrációt. Ennek oka az, hogy a ragadozó halaknál lényegében kettős diszkriminációs hatás érvényesül a borjak táplálásánál említett tényezők miatt.

7. Kalcifikáció a csontozatban

A csontok és a fogazat ásványi anyag-tartalmának döntő részét a Ca₃(PO₄)₂ összetétellel jellemezhető kalcium-ortofoszfát teszi ki. A kationok között azonban a kalciumon kívül mindig kimutatható – a táplálkozástól is függő arányban – a magnézium, a stroncium, a bárium és a rádium jelenléte is. A magnézium létfontosságú makroelem. Ugyanakkor a bárium és a rádium valószínűleg nem esszenciális mikroelemek [17], [18], [19]. A stroncium szerepe vitatott a növényekre vonatkozóan, de a koncentráció-eloszlás vizsgálatok alapján valószínűsíthető az esszencialitás [5], [7]. A magasabb rendű állatok (gerincesek) és az ember esetében a stroncium biológiai szerepét egyelőre még nem tisztázták, így nem egyértelmű, hogy a stronciumot az esszenciális vagy a nem esszenciális mikroelemek közé kell sorolni.

Esszenciális elemek esetében az élettani szükséglet s annak optimuma, a hiánytűnet után telítési tartománynál található. E tartomány első szakasza a jó

ellátottságot, második szakasza a túlfogyasztást jelenti. Az optimális tartomány után a toxikussági küszöb illetve toxikussági tartomány következik. A nem esszenciális elemek esetében – a biológiai szükséglet és az ionok koncentrációját szabályozó mechanizmus hiányában az esetleges antagonistá hatáson kívül csupán a toxikussági küszöb értelmezhető. Vagyis a nem esszenciális elemekből a toxikussági küszöb értékeit meg nem haladó felvétel várhatóan nem jár számottevő biológiai hatással.

A stroncium egyes vegyületeit – pl. a ranelinsav stronciumsóját – gyógyszerként alkalmazzák az osteoporosis kezelésében, így a fém biológiai szerepe nem vitatható. A stroncium-ranelát adagolása elősegíti a csontképzést s növeli a csontok kalcium-tartalmát [20]. Kimutatták, hogy a menopausa időszakában lévő, osteoporosisban szenvedő nőknél a stroncium-ranelát (C₁₂H₁₀N₂O₈Sr) adagolása jelentősen csökkentette a törések előfordulását a csigolyák és a csípőcsont esetében, mérsékelte a csontreszorpciót s növelte a csont sűrűségét [30]. Ez utóbbi részben a csonttömeg tényleges növekedésében, részben pedig a kalciumnál nagyobb atomtömegű és sűrűségű stroncium fokozott beépülésében nyilvánult meg. Más stronciumvegyületeket – például a stroncium-citrátot – is alkalmaznak étrend-kiegészítő készítményekben [21].

A stroncium szerepet játszik a csont-metabolizmusban, a csontozatra anabolikus hatású (osteoblast és osteoclast). Feltételezhető, hogy az iontranszportban a passzív diffúziós és a Ca-hordozó szerepe a döntő. Hatása a Ca-érzékelő receptorokon keresztül érvényesül. A stroncium jelenléte gátolja a csontban a reszorpciót és stimulálja a csontképződést [22].

8. Stroncium az emberi szervezetben

A kalciumhoz, illetve a báriumhoz és rádiumhoz hasonlóan az emberi szervezetben található stroncium túlnyomó többsége a csontozatban és a fogazatban található. Irodalmi adatok [23], [24] szerint a stroncium az emberi testben mintegy 350-400 mg. A napi átlagos stronciumfelvétel 1,5-2,0 mg-nak becsülhető. A stroncium az emésztőrendszer nyálkahártyáján ionos formában viszonylag gyorsan jut át, és a vizelettel vagy az anyatejvel is kiválasztódik. A felvett

stroncium döntő része azonban a széklettel ürül. Mivel a placenta nem jelent akadályt, a stroncium az újszülöttek vérében is kimutatható. A legnagyobb tömegű abszorpció a duodenumban, a leghatékonyabb az ileumban figyelhető meg.

A stroncium felszívódásának aránya azonban jelentősen elmarad a kalciumétól – tehát az anya szervezete az anyatejvel védi a csecsemőt a stronciumtól, illetve a radiostroncium sugárterhelő hatásától, mivel a Sr-Ca rendszerben a humánéletlen mérések szerint a dikszkriminációs faktor mintegy 0,25 értékűnek tekinthető. Persze úgy is fogalmazhatunk, hogy a kalcium jelentősen dúsul az emberi szervezetben a stronciumhoz képest [10].

Saját, számos élelmiszerre kiterjedő méréseink szerint egyébként a napi 2 mg körüli stroncium-bevitel csupán akkor valósul meg, ha a táplálék jelentős mennyisége állati eredetű, ahol már érvényesül a stronciumnak a kalciumhoz viszonyított koncentrációját erőteljesen csökkentő diszkriminatív hatás. Ha a táplálék főleg növényi eredetű és a fogyasztott növényeknek magas a kalcium-tartalma is (pl. paraj, sóska, diófélék) akkor akár napi 10 mg stronciumot meghaladó mennyiség is inkorporálódhat. A szervezetbe kerülő stroncium mennyisége tehát elsődlegesen attól függ, hogy milyen táplálkozást folytatunk. Pais [25] közlése szerint az emberi szervezet stroncium-tartalma az életkor előrehaladtával nő.

Az emberi testbe főleg a táplálékkal és kisebb mértékben az ivóvízzel bekerülő stroncium nagy része a széklettel távozik. Takács [18] közlése szerint egy 8 napon keresztül folytatott vizsgálatban megállapították, hogy naponta átlagosan 0,39 mg stroncium a vizelettel, 1,58 mg pedig a széklettel távozott el a szervezetből. Anke és munkatársai [26] vizsgálatai szerint a felnőtt emberi szervezetbe bejutó stronciumnak mintegy 86%-a széklettel, és csupán 14%-a ürül a vizelettel. Németországból származó adatok szerint az emberi szervezetbe jutó stroncium 32%-a tejből és tejtermékekből, 22%-a zöldségfélékből, 18%-a gyümölcsökből és 17%-a kenyérből és tésztából származott. A húsból és húskészítményekből a szervezetbe kerülő stroncium mennyisége lényegesen elhanyagolható volt [26].

A stroncium hiányától még állati eredetű termékek fogyasztása esetén sem kell tartani akkor sem, ha esszenciális elemnek bizonyul. Földünk egyes területein – Kelet-Szibériában, Észak-Kínában, Tibetben, Észak-Koreában – a talajban és a növényzetben olyan magas koncentrációban fordul elő, hogy az állati és emberi anyagcserét megzavarhatja, illetve relatív kalcium-hiányt előidézve csontképződési rendellenességeket, izületi elváltozásokat okozhat [27], [28]. Ez a több mint 150 éve ismert Urovi betegség vagy Kashin-Beck féle betegség (KBD). A több millió embert – főleg az 5 és 15 év közötti korosztályt – veszélyeztető megbetegedés oka valószínűleg ösz-



A kép illusztráció / Picture is for illustration only
Fotó/Photo: Pixabay

2. táblázat. Diszkriminációs faktor számítása stronciumra ill. radiostronciumra párhuzamosan vett növendékmarha metacarpus- és takarmányminták vizsgálata alapján (96-96 minta)

Table 2 Calculation of discrimination factors for strontium and radiostrontium, based on parallel young cow metacarpus and feed samples (96 samples each)

Minta / Sample	Átlagos ⁹⁰ Sr/Ca aktivitás (mBq/g Ca) Average ⁹⁰ Sr/Ca activity (mBq/g Ca)	Sr/Ca (%)
Metacarpus	1030	0.42
Takarmány / Feed	7900	3.0
Átlagos diszkriminációs faktor Average discrimination factor	0.13	0.14

szetett: a nagymennyiségű stroncium felvétele mellett más mikroelemek hiánya, a táplálékban lévő mikotoxinok előfordulása, illetve az ivóvíz fenolos vegyületekkel való szennyezettsége is szerepet játszhat.

A híres svájci orvos-kémikus-botanikus, Paracelsus (Philippus Theophrastus Aureolus Bombastus von Hohenheim, 1493-1541) nyomán, azaz 5 évszázada tudjuk, hogy egy bizonyos koncentráció ill. dózis felett minden mikroelem toxikus hatású. Paracelsus a következőket írta: „*Alle Ding' sind Gift und nichts ohn' Gift; allein die Dosis macht, das ein Ding kein Gift ist*” (Minden dolog mérge, ha önmagában nem is az; csupán a mennyiség teszi, hogy egy anyag nem mérge) [31].

A stroncium gyengén toxikusnak tekinthető, hiszen a táplálékban a toxikussági szint 150 mg/kg körüli érték.

9. Esszenciális mikroelem a stroncium?

Számos vizsgálati eredmény utal arra, hogy a magasabb rendű növények számára a stroncium esszenciális elem lehet. A kalcium és a stroncium növényen belüli iontranszportja közös. A stroncium biokémiai jelentőségére utal az is, hogy kalciumhiány esetében stronciumadagolással kivédhető a főlegben lévő magnézium hatása. Ugyanakkor állat- és humánélet-tani szempontból a közös transzportrendszer elmélete csak bizonyos megszorításokkal érvényes, hiszen a felszívódás aránya a stroncium esetében messze elmarad a kalciumétól, és a stroncium esetében az un. diszkriminációs faktorok (relatív Sr/Ca arány az anyagcsere-folyamat két egymást követő két szegmensében) értéke takarmány és tej között mintegy 0.10, élelmiszer és anyatej között pedig kb. 0,25. Azaz az állati és emberi testszövetekben az elfogyasztott takarmány, illetve élelmiszer Sr/Ca arányához viszonyítva jelentősen csökken a Sr/Ca arány.

A kérdés tehát: létfontosságú mikroelem a stroncium vagy nem? Takács [18] úgy fogalmaz: arról, hogy a stroncium esszenciális lenne, nincsenek minden kétséget kizáró adatok. Megemlíti, hogy kísérletek utalnak arra, hogy stronciumhiányos táplálás esetén növekedésgátlás, csontosodási zavarok és növekvő caries-incidencia alakul ki. Iyengar és mtsai [29] ada-

tokat közöltek a különböző emberi szövetekben mért stroncium koncentrációkról. A mért maximális és minimális értékek arányát a **3. táblázat** mutatja.

Egy korábban megjelent dolgozatban [1] már szó volt arról, hogy a nem esszenciális elemekre vonatkozóan van egy jellemző tulajdonság, amely jelentősen eltér a jellegzetesen létfontosságú elemekre vonatkozótól. Ez a jellemző a koncentrációeloszlás. Egészséges egyedek esetében ugyanis a tipikusan esszenciális elemekre vonatkozóan az adott testszövetben (pl. vérplazmában) vagy szervben (pl. szívben) egy kérdéses makro- és mikroelem-eloszlása általában normál eloszlást mutat, és koncentrációja viszonylag szűk tartományba esik [9], [6], [1]. Eltérő külső körülmények esetében is – éppen a szabályozó mechanizmusoknak köszönhetően – a kérdéses mikroelem mért koncentrációi viszonylag kis eltéréseket mutatnak, és a mért értékek túlnyomó többsége az aritmetikai átlagértékhez számított, $f=1.58$ (azaz $\log f=0,2$) faktorttal jellemezhető szűk tartományon belül marad. Az f paraméter az adatok szórására utaló, a tartományt az átlagérték szorzásával és osztásával kapott szélső értékekkel jellemző faktor. Ennek következtében a számtani és a mértani átlagértékek ill. a medián között nincs nagy különbség, a koncentráció-tartomány nem-széles. A **3. táblázat** adatai utalnak arra, hogy a mért legnagyobb és legkisebb stroncium-koncentrációk között legfeljebb 2-3-szoros az eltérés, ami azt jelzi, hogy a koncentráció-tartomány elég szűk. Amint azt fentebb említettük, a szűk koncentráció-tartomány a létfontosságú mikroelemek jellemzője.

A koncentrációeloszlás vizsgálata természetesen az esszencialitást illetően csak akkor tekinthető döntőnek, ha nagyszámú minta analíziséről van szó, a vizsgálatban résztvevő egészséges egyének meglehetősen eltérő földrajzi körülmények között élnek, és táplálkozási szokásaik jelentősen eltérnek egymástól. Annak bizonyítása, hogy a stroncium esszenciális mikroelem volna az emberi szervezet számára, további kutatómunkát igényel, hiszen az esszenciális mikroelemekre az is jellemző, hogy a biokémiai folyamatokban meghatározó szerepet játszó enzimek alkotórészei vagy azok aktivátorai. Ennek alapján igazolni kell a stronciummal együttműködő enzimek létezését.

3. táblázat. Az emberi szövetekben mért kalcium- és stronciumtartalmak maximális és minimális értékének aránya.
Table 3 Maximum and minimum values of calcium and strontium contents measured in human tissues

Testszövet / Body tissue	Arány / Ratio
Vérplazma / Blood plasma	1.6
Vérszérum / Blood serum	2.3
Csont / Bone	1.9
Fog / Tooth	1.6
Vese / Kidney	2.5
Máj / Liver	3.4
Tüdő / Lungs	1.6

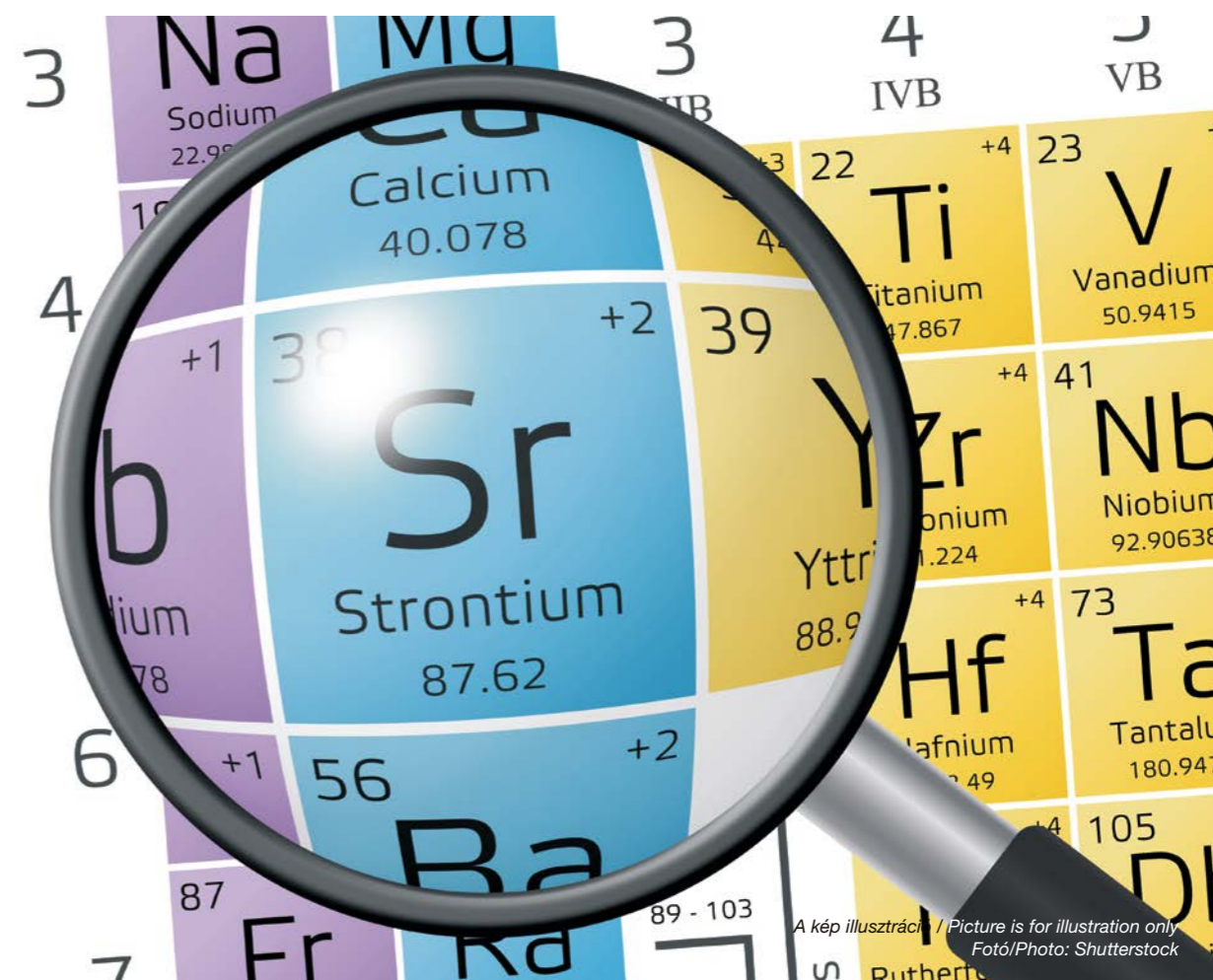
10. Következtetések

A stroncium a víz-talaj-növény-állat-ember biológiai rendszerben jelentős koncentrációban előforduló mikroelem, amelynek transzportrendszere kalciummal közös. A növényekben és talajokban a Ca/Sr arány mintegy 100:1 körüli érték, tehát az előfordulási koncentrációk között 2 nagyságrend a különbség. Az állati és emberi szervezetben viszont a kalcium és a stroncium viszonya mintegy 1000:1 arányt mutat, így az eltérés 3 nagyságrend. Ennek oka az erőteljes diszkrimináló képesség, vagyis a stroncium bélcsatornából jóval kisebb mennyiségben szívódik fel, mint a kalcium. Vizsgálatainkkal kimutattuk az is, hogy az emberi szervezet Sr/Ca-arány értéke, valamint a radiostroncium-szennyezettsége ($^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$) jóval kisebb, mint az elfogyasztott ételekben mérhető értékek.

A stroncium részben helyettesítheti a kalciumot, de a túl sok bevitt stroncium toxikus, a szervezetet megbetegítő hatású. Ahhoz azonban, hogy a stroncium állat-és humánélet-tani szerepéről véleményt alkothassunk, esetleges esszenciális jellegét bizonyíthassuk, további vizsgálatok szükségesek. Ugyanakkor a stroncium esszenciális jellege növényélet-tani szempontból valószínűsíthető. Úgy véljük, hogy a humánélet-tani szerep tisztázásához segítséget nyújthat az egészséges emberi testszövetek koncentráció-eloszlásának vizsgálata, jelentősen eltérő táplálkozási szokások esetében is.

11. Irodalom

- [1] Szabó S.A.: Mikroelemek esszencialitása és az élelmiszervizsgálat. Élelmiszervizsg. Közl., 59(3), 95-105, 2013.
- [2a] Szabó S.A.: A radiostroncium és radiocézium biológiai felezési idejének számítása különböző állatfajokra a Ca és a K anyagcsere alapján. Állattenyésztés és Takarmányozás, 30(6), 559-563, 1981.
- [2b] A.S. Szabó: Theoretische Methode zur Bestimmung der biologischen Halbwertzeiten von Cs und Sr auf der Basis des K und Ca Stoffwechsels. Kernenergie, 24(4), 145-148, 1981.
- [3] A.S. Szabo: Radioecology and environmental protection. Ellis Horwood, New York-London, 1993.
- [4] Szabó S.A.: Élelmiszerek ásványi anyag tartalma. XXIV. Stroncium az élelmiszerekben. Élelmészeti Ipar, 61(8), 248-250, 2007.
- [5] Szabó S. A., Tolnay P.: A stroncium humánélet-tani szerepe. Metabolizmus, XIII(3), 239-244, 2015. július.
- [6] A.S. Szabo: Determination of essential or non-essential character of some hardly known trace elements. Proc. 7. Int. Symp. „New perspectives in the research of hardly



A kép illusztráció / Picture is for illustration only
Fotó/Photo: Shutterstock

- known trace elements. ed.: I.Pais, Univ. Hort. Food Ind., Budapest, 1996, p. 39-46.
- [7] A.S.Szabo: Investigation of essential and non-essential character of some hardly known trace elements for plants. *J. Life Sciences*, 9(2), 47-50, 2015.
- [8] Szabó S.A., Tolnay P.: Egyes mikroelemek esszencialitásának vizsgálata. *Metabolizmus*, 12(5), 385-389, 2014.
- [9] K. Heydorn: Neutron activation analysis for clinical trace element research. CRC Press, Florida, 1984.
- [10] R.H. Wasserman: Strontium as a tracer for calcium in biological and clinical research. *Clinical Chemistry*, 44(3), 437-439, 1998, March.
- [11] Kiss B., Szabó S.A.: A hazai élelmiszerek radioaktív szennyezettsége a Csernobilt követő években. *KÉE Élelmiszerfiz. Közl.*, 67-76, 1990(2).
- [12] Kanyár B., Béres Cs., Somlai J., Szabó S.A.: Radioökológia és környezeti sugárvédelem. Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2004.
- [13] A.S. Szabo: Quater of century has passed away after the Chernobyl disaster. *J. Food Physics*, XXIV-XXV, 3-5, 2011/2012.
- [14] A.S. Szabó, B. Kiss, M. Liszonyi-Gacsályi: Investigation of Sr-content of biological samples. *Proc. Int. Symp. „New results in the research of hardly known trace elements”*, Budapest, 1984, ed.: I. Pais, p. 194-196, 1985.
- [15] Szabó S.A.: Biológiai anyagok bór, stroncium és cézium tartalma és eloszlása, valamint a koncentrációt befolyásoló tényezők. Budapest, 1981, p. 119. kandidátusi értekezés (megvédve:1982, MTA)
- [16] Szabó S.A.: Állati testszövetek radioaktív szennyezettsége s ennek összefüggése a radionuklidok biológiai felezési idejével. *Állattenyésztés és Takarmányozás*, 32(4), 381-384, 1983.
- [17] A.S. Szabo, V. Kovacs, S. Tarjan: Transfer factors for some hardly known trace elements in the milk-fodder system. 6. Int. Symp. „New perspectives in the research of hardly known trace elements”, Budapest, Hungary, June 1994, *Proc. ed.: I Pais, Univ. Hort. Food Ind.*, Budapest, 1994.
- [18] Takács S.: A nyomelemek nyomában. *Strontium*, 213-215, Medicina Könyvkiadó Rt, Budapest, 2001.
- [19a] Szabó S.A.: Élelmiszerek ásványi anyag tartalma. XXXV. Bárium az élelmiszerekben. *Élelmezési Ipar*, 62(7), 216-218, 2008.
- [19b] Szabó S.A.: Élelmiszerek ásványi anyag tartalma. XXXVI. Rádium az élelmiszerekben. *Élelmezési Ipar*, 62(8), 253-254, 2008.
- [20] P.Nielsen: The biological role of strontium. *Bone*, 35(3), 583-588, 2004, Sept.
- [21] www.metadocs.com/pdf/pp_strontium. (Hozzáférés: 2017.03.12)
- [22] M. Dermience: Kashin-Beck disease, evaluation of mineral intake in young tibetan children from endemic areas. *Université de Liège, Année Académique*, 2009-2010, p. 128.
- [23] H.J.M. Bowen: Environmental chemistry. Vol.2. Royal Society of Chemistry, Burlington House, London, 1982.
- [24] www.webmd.com/osteoporosis (Hozzáférés: 2017.03.12)
- [25] Pais I.: A mikroelemek jelentősége a mezőgazdasági termelésben, kutatásuk helyzete a világban. *Kertészeti Egyetem Kiadványai, Strontium*, 171-173, 1984.
- [26] M. Anke, M. Seifert, M. Jaritz, S. Holzinger, S. Anke, E. Hartmann, E. Lösch: Strontium transfer in the food chain of humans. 8th Int. Trace Element Symp., „New perspectives in the research of hardly known trace elements.” Budapest, 1998, ed. I. Pais, Univ. Hort. Food Science, 9-32, 1999.
- [27] Szabó S.A., Győri D., Regiusné Mócsényi Á.: Mikroelemek a mezőgazdaságban. II. Stimulatív hatású mikroelemek. *Strontium*, 77-85, Akadémiai Kiadó, Bp., 1993.
- [28] Xiong, G.: Diagnostic, clinical and radiological characteristics of Kashin-Beck disease in Shaanxi Province, PR China. *Int Orthop*, 25, 147-150, 2001.
- [29] G.V. Iyengar, W.E. Kollmer, H.J.M. Bowen: The elemental composition of human tissues and body fluids. Verlag Chemie, Weinheim-New York, 1978.
- [30] P. J. Meunier, Chr. Roux, E. Seeman, S. Ortolani, J. E. Badurski, T. D. Spector, J. Cannata, A. Balogh, E.-M. Lemmel, S. Pors-Nielsen, R. Rizzoli, H. K. Genant, J.-Y. Reginster: The effects of strontium ranelate on the risk of vertebral fracture in women with postmenopausal osteoporosis. *New England Journal of Medicine*, 350, 459-468, 2004, January.
- [31] www.rubicon.hu/magyar/oldalak/1493_november_11_paracelsus_szuletese/ (Hozzáférés: 2017.03.12)
- [32] www.wikipedia.org/wiki/strontium (Hozzáférés: 2017.03.12)



ÚJ
BC TEMPO BC
 Bacillus cereus csoport
 megszámlálására 22 órán belül
AOAC és ISO 16140
 validált

tempoTM
 THE 1ST AUTOMATED QUALITY INDICATOR SOLUTION

Minden körülmények között megbízható minőségellenőrzésre van szüksége?

TEMPO® biztosítja

- a személyzet irányításának optimalizálását
- a munkaterhelés változékonyságának kezelését
- a pontos és időszerű eredményt
- |||| a nyomon követhetőséget

TEMPO az innovatív megoldás minőségi mutatók meghatározására élelmiszerekben és környezeti mintákban

bioMérieux Hungária Kft.
 1138 Budapest, Váci út 175.

Tel.: (36) 1 231-3050
 Fax.: (36) 1 231-3059
 email: info.hu@biomerieux.com
www.biomerieux.com

BIOMÉRIEUX
 INDUSTRY
 PIONEERING DIAGNOSTICS

András S. Szabó¹

Received: 2017. May – Accepted: 2017. September

Investigation of the strontium content of foods and the biological role of strontium

Keywords: osteoporosis, discrimination factor, essentiality, calcium, ⁹⁰Sr radionuclide

1. Summary

From a physiological point of view, strontium is a microelement, having a common transport system with calcium. In plants and soils, there is usually a difference of two orders of magnitude between the concentrations of calcium and strontium. However, in the case of humans and animals, the difference can be as high as three orders of magnitude. The reason for this is the strong ability to discriminate, as a result of which strontium is absorbed from the alimentary canal of warm-blooded creatures in significantly lower amounts. Thus, the Sr:Ca ratio in the human body, as well as its radiostrontium contamination (⁹⁰Sr/Ca) is significantly lower than the values that can be measured in the foods consumed. It is well known that calcium can be partially replaced by strontium, but large amounts of strontium are toxic to the body. At the same time, strontium is used in medicine to treat osteoporosis.

Clarification of the plant, animal and human physiological role of strontium, and proving of its possible essential role requires further investigation. Since the concentration distribution of essential and non-essential microelements shows significant differences within a healthy organism, this knowledge will be of great help in the determination of the biological role of the given microelement by examining the concentration distributions in healthy body tissues, because essential elements are present in the tissues in a narrow concentration range.

2. Introduction

In an earlier paper, published in the Journal of Food Investigations, there is a comprehensive overview of the grouping possibilities of microelements, of the relationship between the essential and non-essential nature and the concentration distribution, and of the analytical measurement techniques that can be applied for the analysis of trace elements [1]. In this paper, the physiological role of strontium is discussed. With regard to its concentration in foods, this metal is typically a microelement. It should be noted that several details of its physiological role need further clarification.

Research on microelements has a history of roughly 100 years, and it is closely related to the development of the performance and sensitivity of analytical methods. Nowadays, such analyses are performed almost exclusively using instrumental analytical techniques,

by the application of measurement techniques based on chemical or physical methods.

In the 1950s, the great importance of strontium-related microelement research was due to the fact that, among the isotopes causing long-term radioactive contamination of the biosphere, because of the environmental impact of frequent nuclear weapons tests, the two isotopes of strontium, radionuclides ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr played a major role. Radiochemical, radiobiological and radioecological research focused on the physiological significance of the microelement as well.

It is known that, of the 92 elements that occur in nature (and, obviously, in the human body), not considering the so-called transuranium elements produced artificially, 75 can be classified as microelements, including strontium, which is the 20th most common element in the Earth's crust. It was named by its discoverers,

Crawford and Cruickshank in 1790 (the name of the element refers to the village of Strontian in Scotland [32].)

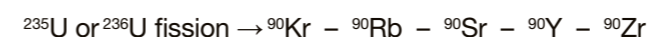
Chemically, strontium is an alkaline earth metal, found in group 2 of the periodic table. It is in period 5, located in the table below calcium and above barium. Regarding its chemical and physical properties, it is similar to calcium, however, its concentration in surface waters, soils and plants is usually 2 orders of magnitude, and in animal and human tissues 3 orders of magnitude lower than that of calcium [23]. In drinking water, apart from extreme values at certain geographic locations, its typical values are below or well below 1.0 mg/liter. According to our flame photometric measurements, the strontium contents of the so-called indicator plants (sorrel, spinach, lettuce) and cereals in Hungary was typically 1 to 3% of the calcium contents. The measurable calcium content was related to the plant type and the strontium content of the soil. During the ICP analysis of the composition of vegetables (peas, tomatoes, radish and peppers) it was found that the calcium content was 100 to 200 times higher than the amount of strontium [2], [3], [4], [5].

Concentration distribution studies, based on the results of which it can be assumed that strontium is an essential microelement for plants have already been presented in previous lectures and papers [6], [1], [7], [8].

The study of trace element contents and their distributions in foods can help to clarify the biological role of the microelements in question [9]. The objective of this paper is to present the presumed biological role of strontium. The question is whether strontium can be considered an essential microelement or should be classified as a non-essential microelement. It is likely that strontium plays an important biological role not only in plant physiology, but also in animal and human physiology. In all likelihood, this alkaline earth metal is a determining factor in ensuring the hardness of bones and teeth, and it may also have a role in preventing the development of osteoporosis.

3. Radioactive strontium isotopes

It was mentioned above that the study of the physiological role of strontium was important in the 1950s and 1960s because long-term environmental contamination of nuclear weapons tests was mainly due to the strontium isotope with a mass number of 90. This isotope undergoes beta decay, with a physical half-life of 28 years. This means that environmental radioactivity due to ⁹⁰Sr decreases only very slowly. In addition, since strontium is very similar to calcium, ⁹⁰Sr is also deposited in bones, where it causes long-term radiation exposure. ⁹⁰Sr is one of the most significant fission products, playing a major role in the development of the radioactive contamination of the affected area. The generation and decay scheme after the fission of the uranium nucleus, due to neutrons, is as follows:



The individual isotopes are transformed to elements of the same mass number, but having increasing atomic numbers, by successive beta decays. The decay chain is concluded by the no longer radioactive zirconium with an atomic number of 40. Due to the relatively short half-life of ⁹⁰Y, ⁹⁰Sr and ⁹⁰Y isotopes are in radioactive equilibrium with each other.

In addition to the ⁹⁰Sr isotope, the also beta-decaying isotope ⁸⁹Sr is well-known among polluting radionuclides. Although the ⁸⁹Sr isotope is also formed in significant amounts following the fission of the uranium nucleus, but because its half-life is significantly shorter than that of the ⁹⁰Sr nuclide, only 50 days, it does not play a role in long-term contaminations. Due to its relatively rapid decay, its presence and radiation exposure effect have to be taken into consideration in the biological chain in the first few months of the contamination.

In animals and humans, because of its so-called bone seeking property, similar to that of calcium, radiostrontium is primarily found in the high calcium content skeleton. If the contamination level (the contamination effect of nuclear weapons tests or nuclear reactor accidents) is high, then bone cancer can be caused by the radiation exposure due to the long half-life of the ⁹⁰Sr isotope (or to its so-called effective half-life calculated from the biological and physical half-lives). Due to the long biological half-life, the biggest threat to bones, in terms of radiation exposure, is the ⁹⁰Sr isotope [10]. However, in Hungary, the measurable ⁹⁰Sr contamination level was not significant in the early 1960s due to nuclear weapons tests and then in 1986 because of the Chernobyl nuclear power plant accident [11], [3], [12], [13].

4. Importance of the discrimination factors

The essence of the discriminating ability of the individual organisms is that the relative concentrations (compared to other elements) of certain elements can differ significantly between the elements of the biological chain process.

In the case of Sr, it is advisable to express the strontium value on a calcium content basis, because calcium and strontium form a common transport system, due to their physical, chemical and biological similarities. Calculation of the calcium/strontium ratios can also be carried out on the basis of radiometric measurements, when not strontium, but radiostrontium concentrations (activities) are compared to the calcium values. It can be stated that calcium is the inactive carrier of strontium and radiostrontium.

The discrimination factor for strontium, in the case of the animal or human body, can be calculated as follows:

$$D_{\text{Sr}} = \frac{\frac{\text{Sr}}{\text{Ca}} \text{ a tejben}}{\frac{\text{Sr}}{\text{Ca}} \text{ a takarmányban, élelmiszerben}}$$

¹ Public Benefit Foundation of Food Physics

The discrimination factor of strontium can also be calculated based on the activity of ^{90}Sr :

$$D_{\text{Sr}} = \frac{\frac{^{90}\text{Sr}}{\text{Ca}} \text{ a tejben}}{\frac{^{90}\text{Sr}}{\text{Ca}} \text{ a takarmányban, élelmiszerben}}$$

Of course, the determination of the discrimination factors, indicating the discriminating abilities of the different organisms, can also be based on the analysis of other body tissues (e.g., bone, muscle, egg). According to our measurements [14], no difference could be detected between the strontium contents of bones coming from the same animal, but from different areas of the body. In the case of sheep, there was no significant difference between the different bones (e.g., femur, metacarpus), based on the analysis of 96 samples each and taking into consideration the standard deviations, the average value was around 0.70 mg/g ash, with a standard deviation of roughly 20%.

5. Materials and methods

In our studies, a large number of sample of biological origin (feed and food crops, diets, cow's milk, muscle, egg, bone) were measured. In the case of milk and feed samples coming from a given dairy farm, parallel sampling was always carried out, i.e., the feed consumed by the dairy animals according to the period was sampled.

Determination of the strontium and calcium content was carried out using a flame photometric method, or an X-ray fluorescence procedure (XRF or REA). Flame photometric measurements were performed on the hydrochloric acid solution of ashes after ashing of the samples at 461 and 554 nm. For X-ray fluorescence measurements, an ^{125}I ion source and a Si(Li) detector were used. This technique is mainly suitable for the determination of elements with atomic numbers larger than ten. In the course of our work, analyses were also performed using the ICP-AES technique, with a Thermo Jarrell Ash 9000 instrument, determining the elemental composition of a 0.1 n HNO_3 solution of samples ashed at 550°C. For the measurement of radioactivity, halogen-filled GM tubes and scintillation detectors (plastic and NaI) were used. During the measurements, beta activity was determined, measuring the total activity and the activity of the so-called metal ion fraction. The latter indicates the contamination of the sample with radioactive strontium isotopes.

6. Results and evaluation

Table 1 shows the average strontium and radiostrontium content of parallel milk and feed samples on a calcium content basis. Calculation of the discrimination factors can be performed on the basis of the relative values, calculated on calcium content. The data in **Table 1** show that there is an order of magnitude difference between the specific strontium and radiostrontium concentrations. Levels that can be measured in milk constitute only 10 and 13% of the values in feed, respectively. This ratio proved to be somewhere

between 8 and 15% for the individual samples, based on the data of a large number of measurements over the years. This suggests that the absorption of strontium is significantly lower than that of calcium and, therefore, the relative stable strontium and ^{90}Sr contents in milk, and other body tissues, are significantly lower than the calcium content.

Regarding discriminating ability, **Table 2** contains similar results. Based on the results of bone analyses, the concentration difference of one order of magnitude can be seen easily also. It is well known that the strontium content of feeds, in this case, feed crops of plant origin, depends on the plant species and soil characteristics. Radiostrontium activity, on the other hand, is related to external contamination effects. Influencing factors include geographic characteristics (e.g., precipitation volume) and the agrotechnical processes applied. The Sr and ^{90}Sr contents of animal tissues are a function of the discriminating ability and the chemical composition of the given feed, as well as the age of the animal. According to our measurements, the radioactivity of calf bones was significantly lower than that of young cow bones. This is related to the fact that, in the diet of the calves, the mother's milk is a major factor in the first 1 or 2 months, and its strontium and radiostrontium contents are orders of magnitude lower than those of feeds of plant origin. The rate of substitution (incorporation, accumulation, elimination) for the Ca-Sr system is quite low, it is a function of the biological half-life, and this is the cause of the significantly different strontium and radiostrontium contents of the tissues of calves, young and adult cows [15], [16].

It should be noted here that there are significant differences between the different animal species regarding radiostrontium contamination, partly because of the different discriminating abilities and partly because of the different nutrition and feeding conditions. Based on our measurements, the following ascending order was obtained regarding the strontium content: pigs, poultry, cattle, sheep, fish. In the case of herbivorous fish, the radiostrontium contamination exceeded significantly the ^{90}Sr concentration that could be measured in the bones of predatory fish. The reason for this is that, in the case of predatory fish, basically there is a double discrimination effect due to the same factors mentioned in the case of calf feeding.

7. Calcification in the skeleton

Most of the mineral content of bones and teeth consists of calcium orthophosphate, characterized by the composition $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. However, in addition to calcium and in a ratio that depends on the diet, the presence of magnesium, strontium, barium and radium can always be detected among the cations. Magnesium is an essential macroelement. However, barium and radium are probably non-essential microelements [17], [18], [19]. For plants, the role of strontium is controversial, but based on concentration distribution studies, its essentiality is probable [5], [7]. In the case of higher

animals (vertebrates) and humans, the biological role of strontium has not yet been clarified, so it is not clear whether strontium should be classified as an essential or a non-essential microelement.

For essential elements, the physiological need and its optimum can be found at the saturation range, over the deficiency symptoms. The first section of this range means an adequate supply, while the second section means overconsumption. After the optimal range, there is a toxicity threshold and a toxicity range. For non-essential elements, in the absence of a biological need and a mechanism regulating the concentrations of the ions, in addition to possible antagonistic effects, only the toxicity threshold is meaningful. In other words, in the case of non-essential elements, an intake not exceeding the toxicity threshold value is not expected to have a significant biological effect.

Certain compounds of strontium, e.g., the strontium salt of ranelic acid, are used as drugs in the treatment of osteoporosis, so the biological role of the metal cannot be disputed. Administration of strontium ranelate promotes bone formation and increases the calcium content of the bones [20]. It was demonstrated that the administration of strontium ranelate ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_8\text{Sr}$) reduced significantly the occurrence of fractures in the vertebrae and the hip bone in menopausal women suffering from osteoporosis, it reduced bone resorption and increased bone density [30]. The latter manifested partly in the actual increase in bone mass, and partly in the increased incorporation of strontium, with a higher atomic number and density than those of calcium. Other strontium compounds, for example, strontium citrate, are also used in dietary supplements [21].

Strontium plays a role in bone metabolism, and has an anabolic effect on the skeleton (osteoblast and osteoclast). It can be assumed that its passive diffusion and Ca carrier roles are decisive in ion transport. Its effects manifest through Ca-sensing receptors. The presence of strontium inhibits resorption in the bone and stimulates bone formation [22].

8. Strontium in the human body

Like calcium, barium and radium, the vast majority of strontium in the human body is found in the bones and teeth. According to literature data [23], [24], the total amount of strontium in the human body is about 350 to 400 mg. The average daily strontium intake is estimated at 1.5 to 2.0 mg. Strontium passes through the mucous membrane of the digestive tract in an ionic form relatively rapidly, and is excreted in urine or even breast milk. However, most of the strontium taken up is excreted in the faeces. Since the placenta is not an obstacle, strontium can also be detected in the blood of newborns. The largest absorption occurs in the duodenum, while it is most effective in the ileum.

However, the rate of absorption of strontium is significantly lower than that of calcium, so the mother's body protects the infant from strontium and the radia-

tion exposure of radiostrontium with breast milk, since the discrimination factor in the Sr-Ca system can be considered roughly 0.25, according to human physiological measurements. Of course, we can also say that calcium is enriched significantly in the human body compared to strontium [10].

According to our own measurements involving many foods, a daily strontium intake of around 2 mg can only be achieved if a significant part of the food is of animal origin, where the discriminating effect strongly reducing the concentration of strontium relative to calcium prevails. If the food is mainly of plant origin and the plants consumed have a high calcium content (e.g., spinach, sorrel, nuts), then daily strontium amounts exceeding even 10 mg can be incorporated. Thus, the amount of strontium entering the body depends primarily on our diet. According to Pais [25], the strontium content of the human body increases with age.

Most of the strontium entering the human body with food and, to a lesser extent, drinking water, is excreted with the faeces. Takács [18] reported that, in an eight-day study, it was determined that the average daily amount of strontium excreted with urine was 0.39 mg, while the amount in faeces was 1.58. According to the studies of Anke et al. [26], roughly 86% of the strontium entering the adult human body is excreted with the faeces, and only 14% is excreted with the urine. According to data from Germany, 32% of the strontium entering the human body came from milk and dairy products, 22% from vegetables, 18% from fruits and 17% from bread and pasta. The amount of strontium entering the body with meats and meat products was essentially negligible [26].

One should not be vary of the absence of strontium even when consuming products of animal origin, even if it proves to be an essential element. In some areas of our planet, in East Siberia, North China, Tibet or North Korea, it occurs in the soil and plants at such high concentrations that it can interfere with human and animal metabolism or, by inducing a relative shortage of calcium, it can cause bone formation disorders and joint disorders [27], [28]. This is the so-called Urov disease or Kashin-Beck disease (KBD), which has been known for more than 150 years. The cause of the disease, affecting several millions of people, especially those between the ages of 5 and 15, is probably complex: in addition to the intake of large amounts of strontium, the absence of other microelements, the occurrence of mycotoxins in the food, and the contamination of drinking water with phenolic compounds may all play a role.

It has been known since the famous Swiss physician-chemist-botanist Paracelsus (Philippus Theophrastus Aureolus Bombastus von Hohenheim, 1493-1541), i.e., for five centuries, that all microelements are toxic above a certain concentration or dose. Paracelsus wrote: „*Alle Ding' sind Gift und nichts ohn' Gift; allein die Dosis macht, das ein Ding kein Gift ist*“ (All things are poison and nothing is without poison; only the dose makes that a thing is no poison) [31].

Strontium is considered weakly toxic, since its toxicity level in the diet is around 150 mg/kg.

9. Is strontium an essential microelement?

Numerous test results indicate that for higher plants strontium could be an essential element. Calcium and strontium have a common ion transport in plants. The biochemical significance of strontium is also suggested by the fact that, in the case of a calcium deficiency, the effect of excess magnesium can be prevented by the administration of strontium. At the same time, from the point of view of animal and human physiology, the theory of a common transport system is only valid with certain limitations, since the rate of absorption in the case of strontium is far lower than in the case of calcium, and in the case of strontium, the values of the so-called discrimination factors (the relative Sr/Ca ratio in two successive segments of the metabolic process) is roughly 0.10 between feed and milk and approximately 0.25 between food and breast milk. Compared to the Sr/Ca ratio in the food or feed consumed, the Sr/Ca ratio is reduced significantly in human and animal body tissues.

The time has come to ask the question: is strontium an essential microelement or not? Takács says [18]: there are no incontrovertible data that strontium is an essential element. He notes that experiments suggest that, in the case of a strontium-deficient diet, growth inhibition, bone forming disorders and an increasing incidence of caries occurs. Iyengar et al. [29] reported data on strontium concentrations measured in different human tissues. Ratios of the maximum and minimum values measured are shown in **Table 3**.

In a paper published earlier [1] it was already discussed that there is a characteristic of non-essential elements that is significantly different from those typical of essential elements. This characteristic is the concentration distribution. For healthy individuals and typical essential elements, the distribution of a certain macro- or microelement in a given body tissue (e.g., blood plasma) or organ (e.g., the heart) shows a normal distribution, and its concentration falls within a relatively narrow range [9], [6], [1]. Under different external conditions, due to the control mechanisms, measured concentrations of the microelement in question show relatively small differences, and the vast majority of the measured values will remain within the narrow range calculated for the arithmetic average and characterized by the $f=1.58$ (i.e., $\log f=0.2$) factor. Parameter f is a factor indicating the standard deviation of the data, characterizing the range by the extreme values obtained by multiplying and dividing the average value. As a result, there is no big difference between the arithmetic and geometric mean values and the median, the concentration range is not wide. Data in **Table 3** indicate that there is only a 2 to 3-fold difference between the highest and lowest measured strontium concentrations, suggesting the the concentration range is quite narrow. As mentioned above, a narrow concentration range is characteristic of essential microelements.

Naturally, the analysis of concentration distribution can only be regarded as decisive when it comes to essentiality, if a large number of samples are analyzed, the healthy individuals participating in the study live in quite different geographic conditions, and their dietary habits differ significantly. To prove that strontium is an essential microelement for the human body, further research is needed, since it is also characteristic of essential microelements that they are components or activators of enzymes that play a decisive role in biochemical processes. Based on this, the existence of enzymes cooperating with strontium has to be verified.

10. Conclusions

Strontium is a microelement that is present in the water-soil-plant-animal-human biological system in significant concentrations, having a common transport system with calcium. In plants and soils, the Ca/Sr ratio is around 100:1, so there is a difference in occurrence concentration of two orders of magnitude. However, the ratio of calcium to strontium in animal and human bodies is roughly 1000:1, so the difference is three orders of magnitude. The reason for this is a strong discriminating ability, meaning that strontium is absorbed from the intestinal tract in much smaller amounts than calcium. Our analyses demonstrated that the value of the Sr/Ca ratio in the human body and its radiostrontium contamination ($^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$) are much lower than the values that can be measured in the foods consumed.

Strontium may partially replace calcium, but too much strontium is toxic and causes diseases in the body. However, in order to form an opinion on the role of strontium in animal and human physiology, and to prove its possible essential nature, further studies are needed. At the same time, the essential nature of strontium in plant physiology is quite likely. We believe that to clarify its role in human physiology, the analysis of the concentration distribution of healthy human tissues could be helpful, even in the case of significantly different dietary habits.

11. References

- [1] Szabó S.A.: Mikroelemek esszencialitása és az élelmiszervizsgálat. *Élelmiszervizsg. Közl.*, 59(3), 95-105, 2013.
- [2a] Szabó S.A.: A radiostroncium és radiocézium biológiai felezési idejének számítása különböző állatfajokra a Ca és a K anyagcsere alapján. *Állattenyésztés és Takarmányozás*, 30(6), 559-563, 1981.
- [2b] A.S. Szabó: Theoretische Methode zur Bestimmung der biologischen Halbwertszeiten von Cs und Sr auf der Basis des K und Ca Stoffwechsels. *Kernenergie*, 24(4), 145-148, 1981.
- [3] A.S. Szabo: Radioecology and environmental protection. Ellis Horwood, New York-London, 1993.

- [4] Szabó S.A.: Élelmiszerek ásványi anyag tartalma. XXIV. Stroncium az élelmiszerekben. *Élelmészeti Ipar*, 61(8), 248-250, 2007.
- [5] Szabó S. A., Tolnay P.: A stroncium humánélettani szerepe. *Metabolizmus*, XIII(3), 239-244, 2015. július.
- [6] A.S. Szabo: Determination of essential or non-essential character of some hardly known trace elements. *Proc. 7. Int. Symp. „New perspectives in the research of hardly known trace elements. ed.: I.Pais, Univ. Hort. Food Ind., Budapest, 1996, p. 39-46.*
- [7] A.S.Szabo: Investigation of essential and non-essential character of some hardly known trace elements for plants. *J. Life Sciences*, 9(2), 47-50, 2015.
- [8] Szabó S.A., Tolnay P.: Egyes mikroelemek esszencialitásának vizsgálata. *Metabolizmus*, 12(5), 385-389, 2014.
- [9] K. Heydorn: Neutron activation analysis for clinical trace element research. CRC Press, Florida, 1984.
- [10] R.H. Wasserman: Strontium as a tracer for calcium in biological and clinical research. *Clinical Chemistry*, 44(3), 437-439, 1998, March.
- [11] Kiss B., Szabó S.A.: A hazai élelmiszerek radioaktív szennyezettsége a Csernobilt követő években. *KÉE Élelmiszerviz. Közl.*, 67-76, 1990(2).
- [12] Kanyár B., Béres Cs., Somlai J., Szabó S.A.: Radioökológia és környezeti sugárvédelem. Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2004.
- [13] A.S. Szabo: Quarter of century has passed away after the Chernobyl disaster. *J. Food Physics*, XXIV-XXV, 3-5, 2011/2012.
- [14] A.S. Szabó, B. Kiss, M. Liszónyi-Gacsályi: Investigation of Sr-content of biological samples. *Proc. Int. Symp. „New results in the research of hardly known trace elements”, Budapest, 1984, ed.: I. Pais, p. 194-196, 1985.*
- [15] Szabó S.A.: Biológiai anyagok bór, stroncium és cézium tartalma és eloszlása, valamint a koncentrációt befolyásoló tényezők. Budapest, 1981, p. 119. kandidátusi értekezés (megvédve:1982, MTA)
- [16] Szabó S.A.: Állati testszövetek radioaktív szennyezettsége s ennek összefüggése a radionuklidok biológiai felezési idejével. *Állattenyésztés és Takarmányozás*, 32(4), 381-384, 1983.
- [17] A.S. Szabo, V. Kovacs, S. Tarjan: Transfer factors for some hardly known trace elements in the milk-fodder system. *6. Int. Symp. „New perspectives in the research of hardly known trace elements”, Budapest, Hungary, June 1994, Proc. ed.: I Pais, Univ. Hort. Food Ind., Budapest, 1994.*
- [18] Takács S.: A nyomelemek nyomában. Stroncium, 213-215, Medicina Könyvkiadó Rt, Budapest, 2001.
- [19a] Szabó S.A.: Élelmiszerek ásványi anyag tartalma. XXXV. Bárium az élelmiszerekben. *Élelmészeti Ipar*, 62(7), 216-218, 2008.
- [19b] Szabó S.A.: Élelmiszerek ásványi anyag tartalma. XXXVI. Rádium az élelmiszerekben. *Élelmészeti Ipar*, 62(8), 253-254, 2008.
- [20] P.Nielsen: The biological role of strontium. *Bone*, 35(3), 583-588, 2004, Sept.
- [21] www.metadocs.com/pdf/pp_strontium. (Acquired: 03.12.2017.)
- [22] M. Dermience: Kashin-Beck disease, evaluation of mineral intake in young tibetian children from endemic areas. *Université de Liège, Année Academique*, 2009-2010, p. 128.
- [23] H.J.M. Bowen: Environmental chemistry. Vol.2. Royal Society of Chemistry, Burlington House, London, 1982.
- [24] www.webmd.com/osteoporosis (Acquired: 03.12.2017.)
- [25] Pais I.: A mikroelemek jelentősége a mezőgazdasági termelésben, kutatásuk helyzete a világban. *Kertészeti Egyetem Kiadványai, Stroncium*, 171-173, 1984.
- [26] M. Anke, M. Seifert, M. Jaritz, S. Holzinger, S. Anke, E. Hartmann, E. Lössch: Strontium transfer in the food chain of humans. *8th Int. Trace Element Symp., „New perspectives in the research of hardly known trace elements.” Budapest, 1998, ed. I. Pais, Univ. Hort. Food Science*, 9-32, 1999.
- [27] Szabó S.A., Győri D., Regiusné Mócsényi Á.: Mikroelemek a mezőgazdaságban. II. Stimulatív hatású mikroelemek. *Stroncium*, 77-85, Akadémiai Kiadó, Bp., 1993.
- [28] Xiong, G.: Diagnostic, clinical and radiological characteristics of Kashin-Beck disease in Shaanxi Province, PR China. *Int Orthop*, 25, 147-150, 2001.
- [29] G.V. Iyengar, W.E. Kollmer, H.J.M. Bowen: The elemental composition of human tissues and body fluids. *Verlag Chemie, Weinheim-New York*, 1978s8.
- [30] P. J. Meunier, Chr. Roux, E. Seeman, S. Ortolani, J. E. Badurski, T. D. Spector, J. Cannata, A. Balogh, E.-M. Lemmel, S. Pors-Nielsen, R. Rizzoli, H. K. Genant, J.-Y. Reginster: The effects of strontium ranelate on the risk of vertebral fracture in women with postmenopausal osteoporosis. *New England Journal of Medicine*, 350, 459-468, 2004, January.
- [31] www.rubicon.hu/magyar/oldalak/1493_november_11_paracelsus_szuletese/ (Acquired: 03.12.2017.)
- [32] www.wikipedia.org/wiki/strontium (Acquired: 03.12.2017.)