

A C-14 KORMEGHATÁROZÁS ALAPJAI ÉS PROBLÉMÁI

RADIOCARBON DATING: BASICS AND PROBLEMS

SVINGOR ÉVA

MTA ATOMKI, 4026 Debrecen, Bem tér 18/c

E-mail: svingor.eva@gmail.com

Abstract

Any material which is composed of carbon originated from the atmosphere may be dated. The radiocarbon age of a sample is obtained by measurement of the residual radioactivity. A radiocarbon age, termed a conventional radiocarbon age (or CRA) is obtained using a set of parameters. A time-independent level of ^{14}C activity for the past is assumed in the measurement of a CRA. The activity of this hypothetical level of ^{14}C activity is equal to the activity of the absolute international radiocarbon standard. A CRA embraces the following recommended conventions:

- *a half-life of 5568 years;*
- *the use of Oxalic acid I or II;*
- *correction for sample isotopic fractionation ($\delta^{13}\text{C}$) to a normalized or base value of -25.0‰*
- *the use of 1950 AD as 0 BP, i.e. all ^{14}C ages head back in time from 1950;*
- *the assumption that all ^{14}C reservoirs have remained constant through time.*

The CRA is accompanied by a standard error, based on the statistic error of the measurements of the sample, standard and background, the $\delta^{13}\text{C}$, the uncertainty of the equipment, partly the sample pretreatment. The statistical uncertainty of the age determination, i.e. the standard error of the CRA, is given as $\pm$ one sigma deviation. The atmospheric ^{14}C concentration is not constant in time and space, so the conventional ^{14}C ages have to be converted/transformed to a calibrated age range (on the historical timescale). The error in years BP (yr BP) on the estimated ^{14}C age (CRA) must be also transformed to give the corresponding error on the calendar year scale. The CRA can be estimated using a Gaussian model. After calibration the resulted stochastic model for the calibrated age is no longer Gaussian; it is often multimodal and asymmetric. The net effect is that often the calibrated result has a greater uncertainty and this uncertainty cannot be presented as a simple $\pm$ term; rather, the result must be quoted in the form of a range, from t_1 to t_2 within 1σ or 2σ confidential level.

Kivonat

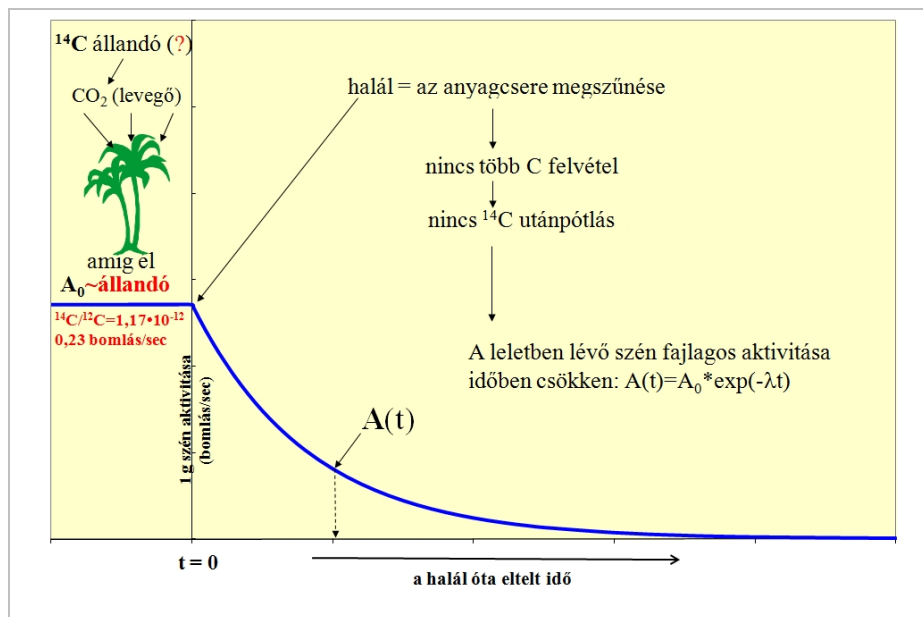
A radiokarbon módszer a kozmogén ^{14}C izotóppal nyomjelzett légköri eredetű szén tartalmazó, 60 ezer évnél nem idősebb anyagok korának megállapítására ad lehetőséget. Amit mérünk, az a minták aktivitása. A minta aktivitása a mintán mért beütésszám vagy $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ arány ($A \pm 1\sigma$) az NBS oxálsav sztenderdre, $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ -re és 1950-re korrigálva. A mérési adatokat leíró valószínűségi sűrűségfüggvény Gauss görbe (normál eloszlás), „A” a legvalószínűbb értéket, az 1σ a mérési bizonytalanságot (statisztikus hiba) jelenti, ami tartalmazza a minta, a sztenderd és a háttér mérésének statisztikus hibáját, az egyes műszerek és a $\delta^{13}\text{C}$ mérési bizonytalanságát. Nem tartalmazza a mintavételből, a minta inhomogenitásából, szennyeződésből, csak részben tartalmazza a minta-előkészítésből származó hibákat.

Konvencionális radiokarbon kor (BP): a mért ^{14}C aktivitás a bomlástörvény alapján évekre átszámítva (fix kezdeti aktivitás, felezési idő 5568 év). Kor: ($t \pm 1\sigma$) BP (1950). A valószínűségi sűrűségfüggvény szimmetrikus (normál eloszlás), t a legvalószínűbb érték, 1σ a mérés statisztikus hibája.

Naptári kor (cal BC/cal AD): a ^{14}C aktivitás a bomlástörvény alapján a legújabban elfogadott felezési idővel átszámítva évekre úgy, hogy a halál idején valós légköri ^{14}C aktivitást tekintjük kezdeti aktivitásnak. Bizonytalanság: mérés + kalibrációs görbe bizonytalansága. A kort leíró valószínűségi sűrűségfüggvény nem szimmetrikus, nincs legvalószínűbb értéke, a korok intervallumokkal, t_1 -től t_2 -ig adhatók meg 1σ (68.2%), ill. 2σ (95.4%) valószínűséggel.

KEYWORDS: RADIOCARBON DATING (BP), CALENDAR AGE (CAL AD, CAL BC, CAL BP), UNCERTAINTY, BAYESIAN METHOD

KULCSSZAVAK: RADIOKARBON KOR (BP), NAPTÁRI KOR (CAL AD, CAL BC, CAL BP), MÉRÉSI BIZONYTALANSÁG, BAYESIAN MÓDSZER



1. ábra: A radiokarbon kormeghatározás elve.
 A_0 : a minta aktivitása a halál idején,
 λ : bomlási állandó,
 $A(t)$: a t éve elpusztult minta aktivitása

Fig. 1.: Principle of radiocarbon dating.
 A_0 : activity of the sample at the time of death,
 λ : decay constant,
 $A(t)$: residual activity

Bevezetés

Nem sokkal a II. világháború után Willard F. Libby, a chicagói egyetem professzora a kozmikus sugárzás légkörre gyakorolt hatását vizsgálta. Ehhez olyan érzékeny berendezést épített, amivel a levegőben keletkező radioaktív atommagok nagyon gyenge sugárzását, a bomláskor kibocsátott kis energiájú töltött részecskéket mérni tudta. A radioaktív izotópokat a felezési idejük alapján azonosította. Ekkor figyelt fel a szén 14-es tömegszámú radioaktív izotópjára, amely a kozmikus sugárzás hatására a sztratoszférában folyamatosan, közelítőleg állandó mennyiségben keletkezik és felezési ideje 5730 ± 30 év. A keletkezett ^{14}C a légkörben oxidálódik, és a többi, stabil szén-dioxid molekulával együtt belép a földi szén ciklusba: 94,3%-a hidroszférába kerül, 3,8%-a fotoszintézissel beépül a növényekbe és a táplálékláncon keresztül az egész élővilág biológiai szénébe, 1,9%-a található az atmoszférában. Az anyagcsere-folyamatok során a radiokarbon is folyamatosan beépül és távozik az élő szervezetekből. Így, amíg élnek, az élőlények biológiai szénének fajlagos aktivitása folyamatosan követi az atmoszférikus szén fajlagos radiokarbon aktivitását, azaz értéke közel állandó. Az anyagcsere megszűnte (halál) után további ^{14}C beépítésére nincs lehetőség, ezért az elhalt élőlény

maradványaiban biológiai formában kötött ^{14}C -atomok száma a bomlástörvénynek megfelelően időben exponenciálisan csökken. Ha ismerjük az adott szervezet biológiai szénének fajlagos ^{14}C tartalmát a halála idején, akkor a lelet jelenlegi ^{14}C tartalmából kiszámítható az anyagcsere megszűnte óta eltelt idő (**1. ábra**). Ezt a lehetőséget látta meg Libby és 1960-ban megkapta a kémiai Nobel-díjat „módszeréért, amely a szén-14-et a régészetben, geológiában, geofizikában és más tudományágakban kormeghatározásra alkalmazza.”

A történetet idáig mindenki ismeri. Akár reklámszöveg is lehetne. Nem tudja hány éves a csontváza? Nem gond, csak a ^{14}C -tartalmát kell megmérni! A gyanútlan régész elhiszi, viszi a mintáját. Ha nincs szerencséje, akkor a laborban azt mondják, hogy nem tudjuk megmérni, mert rossz a csont, kevés a minta, stb. Ha szerencsés, megméri és kap egy ilyen papírt: (**1. táblázat**)

Ha ismeri a módszert, tudja, hogy mi mit jelent. Ha nem, jó esetben megkérdezi, hogy akkor most hány éves is a csontváz? Ami sokkal rosszabb, beteszi a fiókba az eredményt. Pedig nem az ő hibája, hogy nem tudja. Amikor a TV-ben gyógyszert reklámoznak, hozzáteszik, hogy „A kockázatokról és mellékhatásokról olvassa el a betegájékoztatót...”

1. táblázat: Mérési jegyzőkönyv

Table 1.: Measurement logbook

minta kód	minta név	$\delta^{13}\text{C(PDB)}$ $\pm 0,2 \text{ [‰]}$	konvencionális radiokarbon kor (BP)	kalibrált kor (BC) (1 σ)
kod-21000	Valahol II-4 obj.	-27,0	5980 ± 30	4950–4790

Ez az áttekintés ilyen tájékoztatónak készült. Adja ég, hogy a „kockázatokkal és mellékhatásokkal” ne elriasszon, hanem segítse az eredmények értelmezését.

A lelet radiokarbon tartalmának meghatározása

A radiokarbon módszer minden olyan anyagra alkalmazható, amely a légköri szénnel valaha szoros kapcsolatban volt, majd később ez a kapcsolat megszakadt. Ez az oka, hogy a régészetén kívül sok más tudományág is használja, pl. a hidrológia, oceanológia, légkörkutató, klímakutató, stb. Ennek következtében egyre nagyobb az igény a mérésekre, így a radiokarbon laboratóriumok gombamód szaporodnak. Jelenleg a világon közel 200 – ha nem több – működik. A laborok felszereltsége különböző, eltérő mérés technikát alkalmaznak, de szigorú mérési protokoll szerint dolgoznak (Long 1990), a mérési folyamat mindenütt ugyanazokból a lépésekből áll:

1. Minta kiválasztása

2. Minta előkezelése

- tisztítás (mechanikai)
- *szerves* minta: éghető komponens kivonása, beszáritása.
- *karbonátok*: mechanikai aprítás, porítás, homogenizálás.

3. Nagytisztaságú CO₂ gáz előállítás a minta széntartalmából (égetés vagy savas feltárás, gáztisztítás, AMS-hez ezt követően grafitizálás).

4. A minta radiokarbon tartalmának (fajlagos aktivitásának vagy a minta ¹²C/¹⁴C arányának) meghatározása.

Egyetlen labor sem kort mér, hanem a minta aktivitását, amiből – mint látni fogjuk – rögzös út vezet a naptári korhoz. A mérésnek határt szab a ¹⁴C felezési ideje. Egy radioaktív anyag mennyisége 10 felezési idő alatt kb. az ezredrészére csökken, ami a mérhetőség alsó határa. Tehát az 5730 éves felezési idejű radiokarbonnal az emberiség történetének utolsó 60 ezer éve vizsgálható. Ennél idősebb leletek esetén már más radioaktív izotópokat kell segítségül hívni.

A ¹⁴C mennyisége az összes szén mennyiségéhez viszonyítva nagyon kevés, a leggyakoribb, 12-es tömegű stabil szénizotóphoz hasonlítva egy ma élő szervezetben aránya mindössze ¹⁴C/¹²C = 1,17·10⁻¹².

Ez ~ 0,2 Bq/1gC aktivitáskonzentrációnak felel meg, ami azt jelenti, hogy az élő szervezetben található biológiai szén 1 grammjában kb. 5 másodpercenként bomlik el egy ¹⁴C-atom. A mérésre két lehetőség van. Az egyik, hogy a minta aktivitását mérjük, azaz a másodpercenkénti bomlásokat számoljuk. Ennek hátránya, hogy legalább 1 g szerves szén (nem minta!) szükséges a méréshez és még akkor is napok, nagyon idős mintáknál hetek telnek el, míg statisztikailag értékelhető számú esemény történik. A másik lehetőség a ¹⁴C/¹²C arány közvetlen mérése. Ez még az előzőnél is nehezebb feladat, hiszen a két izotóp gyakorisága között 12, idős mintáknál 13–14 nagyságrendi különbség van. A 70-es évek végére dolgozták ki az erre alkalmas AMS technikát (Accelerator Mass Spectrometry). Előnye a hagyományos számlálási technikákkal szemben, hogy akár egyetlen fogon vagy néhány virágporszemen elvégezhető a mérés, és nem napok vagy hetek, hanem 20–30 perc alatt.

Minta begyűjtése, dátumozható anyagok

A lelet radiokarbon tartalmának meghatározása a minta kiválasztásával kezdődik. Nagyon gondosan kell eljárni, hogy a minta valóban „minta”, azaz reprezentatív legyen. A kiválasztásnál elkövetett hibát semmilyen trükkel sem lehet utólag helyrehozni. Már ekkor fontolóra kell venni azt is, hogy a vizsgálatot milyen módszerrel szeretnénk elvégezni. A számlálós technikák hátránya, hogy anyag- és időigényesek, előnyük, hogy könnyebben biztosítható a homogenitásuk (reprezentativitás) és kevésbé érzékenyek a szennyeződésre (idegen szén jelenléte).

Radiokarbon kormeghatározásra alkalmas anyag a fa, faszén maradványok, mag, levél, vászon, tőzeg, humusz, csont, elefántcsont, szövet, szarv, haj, kagyló, csiga, karbonát üledék, cseppkő, talaj, vízben oldott szerves és szervetlen szén, jég. Általában nem dátumozható, mert nem ad reális kort pl. a vakolat, habarcs, kerámiában maradt szerves anyag. Különleges technikát igényel festmények, barlangrajzok, vaseszközökben lévő szén korának megállapítása. A szükséges mintamennyiséget a minta széntartalma, a szerves anyag állapota, a szennyezők mennyisége és az alkalmazott mérési technika határozza meg. A **2. táblázat**ban néhány gyakran használt anyagtípus jellemző anyagszükséglete látható.

2. táblázat: Radiokarbon kormeghatározásra alkalmas minták széntartalma és a szükséges mintamennyiségek**Table 2.:** Carbon content and necessary amount of commonly radiocarbon dated materials

típus	széntartalom %	átlagos mennyiség (β számlálásos technika)	minimális mennyiség (AMS)
faszén, tőzeg, mag	50–90	3–6 g	1–50 mg
szövet, vászon	10–50	6–50 g	2–25 mg
fa, tőzeg (nedves)	2–10	30–150 g	10–125 mg
üledék, talaj	0,2–5	50–1500 g	20 mg–1 g
csont, fog	1–5	60–300 g	20–300 mg
karbonát, korall, cseppkő	10	10–30 g	25 mg
talajvíz, rétegvíz	0,01	50–500 liter	50–200 ml

A táblázatban megadott mintamennyiségeket akár többszöröse is meg kell növelni, ha a minta a kormeghatározás szempontjából használhatatlan anyagot tartalmaz. Ugyanez érvényes, ha a minta eredeti fizikai, kémiai összetétele jelentősen változott (pl. tőzeg oxidációja, kagylóhéj mállása). Ilyen esetben a használhatatlan mintarész az összes minta tömegének 98%-át is kiteheti, ezért a mintavételnél általános szabály:

A szükséges mennyiséget mindig be kell gyűjteni, de feleslegesen nem kell növelni a minta tömegét.

Ha nem vagyunk biztosak a minta állapotában, jobb több mintát venni, mint keveset.

A mintatárolás során meg kell akadályozni, hogy a tárolásra használt mintatartóból szén keveredjen a minta anyagához. Idegen szén jelenléte a minta hamis (látszólagos) korát eredményezi. A tényleges kor és a látszólagos kor közötti különbség függ a szennyezettség mértékétől és a szennyező anyag radiokarbon tartalmától. Ha a szennyező anyag fosszilis szenet tartalmaz, a látszólagos kor nagyobb, mint a tényleges kor. A kor hibája ekkor független a minta ^{14}C korától. 1% fosszilis szénszennyező 80 évvel növeli a radiokarbon kort.

Ha a szennyező nagyobb koncentrációban tartalmaz radiokarbont (aktívabb), mint a minta, akkor a látszólagos kor kisebb, mint a tényleges kor. 1% modern szén hozzákeveredése 10, 200 ill. 7000 évvel fiatalítja meg az 1000, 10000 ill. 40000 éves mintát.

Könnyen belátható, hogy az AMS módszernél, ahol milligrammnyi mintákon is elvégezhető a mérés, sokkal nagyobb veszélyt jelent a szennyezés, mint a nagy mintaigényű aktivitásmérés esetén.

A minták kiválasztásáról és az optimális mintatárolásról részletes, fotókkal illusztrált leírás

található az új *Régészeti kézikönyvben* (Molnár & Svingor 2011).

A $\delta^{13}\text{C}$ fogalma és szerepe

Ennek az áttekintésnek nem célja a minta-előkészítések és mérés technikák ismertetése, ezekről részletes leírás található Hertelendi (1998), valamint ebben a kötetben (Molnár et al. 2012).

A minták aktivitását megmértük, az atmoszféra ^{14}C tartalmát ismerjük. Elvileg már kiszámíthatnánk a kort. Kérdés, hogy az élőlényekben ugyanaz-e a $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ arány, mint a levegőben?

A könnyű elemek izotópjai nagy relatív tömegkülönbségük [$\Delta m_{2,1} = (m_2 - m_1)/m_1$] miatt a fizikai, kémiai és biológiai folyamatokban eltérően viselkednek, ezért a kiindulási anyagban és a reakciótermékben eltér az izotópok relatív gyakorisága, azaz aránya (izotópfractionálás).

Az eltérés ezrelékben mérhető, ezért az izotóparányokat (R) egy referenciához viszonyítjuk:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{(\text{minta})} - R_{(\text{referencia})}}{R_{(\text{referencia})}} * 1000$$

Referencia C-re: Belemnite americana from the Pee Dee formation (CaCO_3), PDB

Az légköri szén-dioxid jellemző $\delta^{13}\text{C}$ értéke -7 – -9‰. Már a fotoszintézis során komoly frakcionálás lép fel, amely még a fotoszintézis típusától is függ (C3 vagy C4). A növényekbe beépült szénben a $\delta^{13}\text{C} = -12 - -27\text{‰}$, azaz a nehezebb izotóp nehezebben épül be. Az anyagcsere folyamatok során további frakcionálás történik. A ^{13}C és ^{12}C izotópok relatív tömegkülönbsége: $\Delta m_{13} = (13-12)/12 = 1/12$.

Ez a ^{14}C -re kétszeres érték:

$$\Delta m_{14} = (14-12)/12 = 1/6.$$

A kétszeres relatív tömegkülönbség pedig kétszeres eltolódást okoz. Ez pedig azt jelenti, hogy a biológiai szén fajlagos aktivitása ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ aránya) sem azonos a légköri szén-dioxidéval. A leggyakrabban használt anyagok jellemző delta-értékeit táblázatokból kikereshetjük (pl. Calib 2005).

Izotópfractionálás nemcsak az anyagcsere során lehet, hanem a lelőhelyen eltöltött idő alatt, a minta előkészítése és – AMS mérés esetén – a mérés alatt is. Tehát a minta aktivitásán kívül mérni kell a $\delta^{13}\text{C}$ arányt is és ez alapján korrigálni az aktivitást.

Naptári korok számítása

Konvencionális radiokarbon kor, BP (Before Present)

A fentiekből kiderült, hogy a radiokarbon mérések során a minta *jelenlegi* ^{14}C tartalmát határozzuk meg (A_{minta}). Ebből a radioaktív bomlás törvénye alapján kiszámítható az az idő (t), ami azóta telt el, amikor a minta kilépett a szén-ciklusból:

$$t(\text{év}) = (T_{1/2}/\ln 2) * \ln(A_{\text{kezd}}/A_{\text{minta}})$$

A képlet látszólag egyetlen ismeretlent tartalmaz, az A_{minta} aktivitást, ami mérhető. A valóság az, hogy több paraméter is kérdéses:

- A ^{14}C felezési idejét ($T_{1/2}$) Libby 5568 évnek mérte, később a fejlettebb mérési technikákkal 5730 ± 30 évnek adódott, és nem zárható ki, hogy a technika fejlődésével ez is módosulhat.

- a légkör ^{14}C tartalma nem állandó.

- a minta aktivitása az anyagcsere folyamatok megszűnésekor (A_{kezd}) nem csak a légkör akkori aktivitásától függ, hanem az anyagcsere típusától is, ami befolyásolja a ^{14}C beépülését az élőlénybe (izotópfractionálás). Ezt a mintában lévő szén $\delta^{13}\text{C}$ értéke alapján korrekcióba kell venni.

- a kezdeti aktivitást befolyásolja az élőlény környezete, ahonnan a szén beépítette.

- a minta jelenlegi aktivitása függ a mérés évtől: ugyanaz a minta 2010-ben mérve 50 évvel „idősebb”, mint 1960-ban volt. Tehát ha két különböző laborban, különböző időben mért radiokarbon kort össze akarunk hasonlítani, akkor ki kell deríteni, hogy mikor történt a mérés (ami egész biztosan nem azonos a publikáció megjelenésének idejével).

A fenti problémák kiküszöbölésére az alábbi megállapodás született (Stuiver & Polach 1977):

- a felezési idő 5568 év (a Libby által meghatározott érték)

- az atmoszféra ^{14}C tartalma állandó (A_{kezd} időben állandó)

- sztenderdként az NBS oxálsav használata (A_{kezd})

- a minta aktivitását $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ -re normáljuk

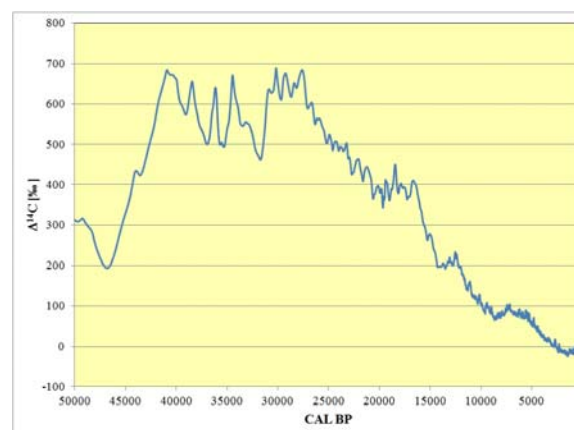
- a mért aktivitást korrigáljuk 1950-re (mennyi volt az aktivitása 1950-ben)

Az így kiszámított „korok” csak a mért aktivitástól függenek, a mérés típusától, idejétől, a légköri ^{14}C aktivitás változásától, az elhalt élőlény anyagcsere folyamataitól függetlenek, tehát összehasonlíthatók. Mivel megállapodáson, konvenciókon alapul, a neve *konvencionális radiokarbon kor*, jelölése BP (*Before Present*). A „Present” 1950-et jelent, azaz $1950 = 0$ BP. A konvencionális radiokarbon jelentése: a minta 1950 előtt ennyi évvel került ki a szén-ciklusból. A feltételek többsége és az elfogadott felezési idő a módszer kidolgozójától, W. F. Libbytől származik, ezért a konvencionális radiokarbon kort szokás Libby-kornak is nevezni.

A légköri ^{14}C koncentráció változása

Ha a fenti kritériumok maradéktalanul teljesülnének, akkor a konvencionális radiokarbon korok egyszerűen átválthatók lennének naptári korokká: naptári kor = $1950 - \text{BP}$. Ha $\text{BP} < 1950$, akkor i.sz. (AD), ha $\text{BP} > 1950$, akkor i.e. (BC). Ez, sajnos, nem így van.

Azt már láttuk az előző fejezetben, hogy a ^{14}C felezési ideje nem 5568, hanem (mai tudásunk szerint) 5730 ± 30 év. A másik fontos körülmény nem sokkal a módszer kidolgozása után vált ismertté: a légkör ^{14}C tartalma sem időben, sem térben nem teljesen állandó (**2. ábra**).



2. ábra: Az atmoszféra ^{14}C tartalmának változása az NBS oxálsav sztenderdhez képest, ‰-ben kifejezve. (Reimer et al. 2009 nyomán)

Fig. 2.: Temporal fluctuations in ^{14}C concentration relative to the NBS Oxalic acid standard. IntCal09, Reimer et al. 2009.

A globális ingadozásokat okozhatja:

(1) a Földet elérő kozmikus részecskék, ezáltal a keletkező ^{14}C atomok számának változása.

Mai ismereteink szerint ennek okai lehetnek:

- a Föld mágneses dipólmomentumának változása,

- heliomágneses moduláció (a Nap-szél okozta mágneses térerő változás),

- napfolttevékenység, szupernóva robbanás,

(2) változás az atmoszféra szén-dioxid tartalmában:

- az óceánok mélyéről feláramló inaktív CO_2 ,

- változás a szén-ciklusban (klímaváltozás).

(3) emberi tevékenység:

- Suess-effektus (a fosszilis tüzelőanyagok elégetése során ^{14}C -mentes CO_2 kerül a légkörbe),

- légköri nukleáris fegyverkísérletek,

- nukleáris energiatermelés.

A globális ingadozások mellett felléphetnek az adott élő környezetre jellemző helyi hatások is (reservoir effektus).

Az emberi tevékenységnek köszönhető ^{14}C szint változás az ipari forradalom előtt képződött leletek kormeghatározását nem befolyásolja. A földművelés kialakulásához kapcsolódó erdőégetések során légkörbe került CO_2 élő, azaz az akkori atmoszférával egyensúlyban lévő szén tartalmazott, így a légköri ^{14}C koncentrációt lényegesen nem módosította.

Kalibráció

A naptári korok számítására a következő megoldást választották:

Készüljön egy, az új felezési időt és az atmoszféra ^{14}C aktivitásának változását magában foglaló „kalibrációs görbe” (adatbázis), amelynek segítségével a konvencionális radiokarbon korok átszámolhatók naptári korrá.

Továbbra is meg kell tartani és a közleményekben megadni a (Libby-féle felezési idővel számolt!) konvencionális radiokarbon kort is (BP), mert így a régi és új mérések összehasonlíthatók, az újabb és újabb kalibrációs adatbázisok alapján újra kalibrálhatók.

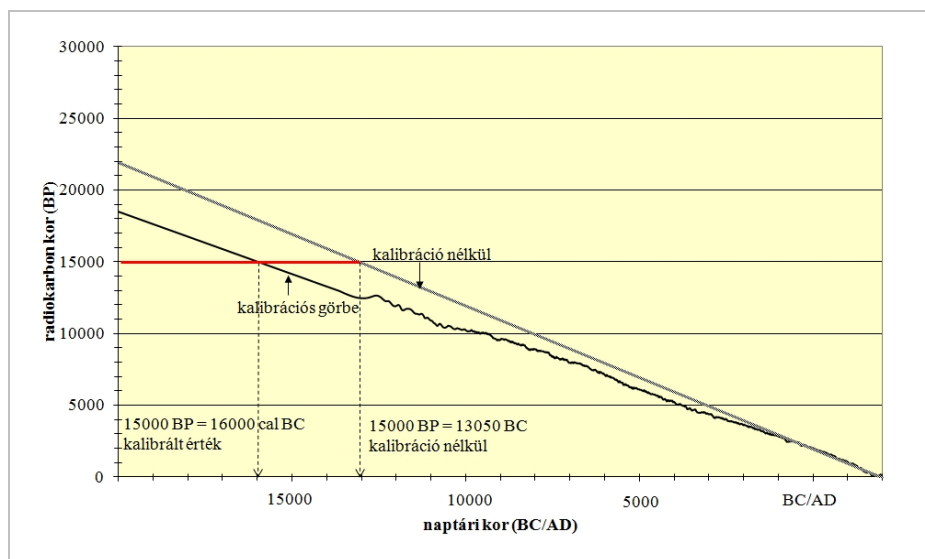
A kalibrált radiokarbon korok naptári korokat jelentenek, jelölésük: cal BC, ill. cal AD.

Használható a cal BP is, erre igaz, hogy cal BC (cal AD) = 1950 – cal BP.

A kalibráció azt jelenti, hogy a mérések alapján számított radiokarbon korokat korrigálni kell úgy, hogy a vizsgált minta *kezdeti* aktivitását az 1950-es érték helyett az atmoszféra múltbeli ^{14}C aktivitásának megfelelő értékével helyettesítjük. Az atmoszféra múltbeli radiokarbon koncentrációjának változását számos laboratóriumban mérték és mérik jelenleg is. Kezdetben ismert korú vagy dendrokronológiailag dátumozott faévgűrűk ^{14}C tartalmát mérték és kiszámították a minták konvencionális radiokarbon korát. A minták valódi és mért kora közötti eltérésből megadható a légkör ^{14}C aktivitása a minta keletkezésének idején. Ezek alapján sikerült a légkör radiokarbon tartalmát rekonstruálni i.e. 10900-ig (10900 cal BC vagy 11850 cal BP). Mérésre alkalmas fák ennél régebből már nem kerültek elő, így a munkát U/Th módszerrel dátumozott korallak és cseppkövek ^{14}C tartalmának mérésével folytatták. A **2. ábrán** bemutatott görbe 2009-ben készült el, csaknem 60 éves munka eredményeként. Az általánosan elfogadott mérősorozatok eredményeit táblázatokban foglalták össze. A táblázatok tartalmazzák az ismert kort (naptári kor) és a mért radiokarbon kort. Ha ezeket egy olyan koordináta-rendszerben ábrázoljuk, amelynek az x tengelyén a naptári korokat, y tengelyén a hozzájuk tartozó mért radiokarbon korokat tüntetjük fel, megkapjuk az ún. kalibrációs görbét. Egy ismeretlen korú minta konvencionális radiokarbon korát megmérve a diagramról leolvasható a hozzá tartozó naptári kor.

A kalibráció fontosságát a **3. ábra** szemlélteti. Az ábrán a kalibrációs görbe 0–22000 cal BP közötti szakasza látható. Példaként egy 15000 „éves” (BP) mintát mutatunk: kalibrálás nélkül a minta keletkezési idejét i.e. 13050-re tennénk, holott csaknem 3000 évvel régebbi, valójában i.e. 16000-ból származik.

A konvencionális radiokarbon kort ezek után is minden esetben meg kell adni, mint tisztán a műszeres fizikai mérést tartalmazó eredményt, ezt bármikor kalibrálni lehet a legújabb, ingyenesen hozzáférhető (www.radiocarbon.org) kalibrációs adatbázisokkal, szoftverekkel és ennek eredményeként a konvencionális radiokarbon korból előáll a naptári kor.



3. ábra: Kalibráció.
A naptári kor $\neq$ 1950 –
radiocarbon kor.

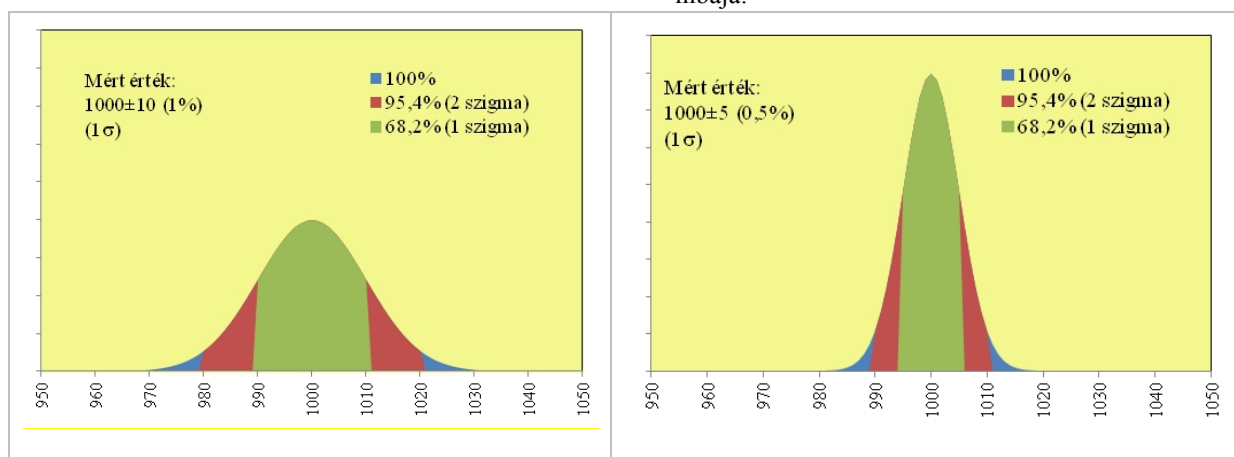
Fig. 3.: Calibration.
Calendar age $\neq$ 1950 –
radiocarbon age

A radiokarbon korok hibája

A mérések statisztikus hibája (mérési bizonytalanság)

Minden műszer pontossága korlátozott, ezért abszolút pontos mérés nincs. Az ismételt mérések eredménye kicsit eltérő, de nagyszámú mérés esetén egyes értékek többször ismétlődnek, mint mások. Ha az egyes értékek ismétlődésének számát (gyakoriság) ábrázoljuk az értékek függvényében, akkor elég nagyszámú mérés esetén egy szabályos harang-görbét (normál vagy Gauss eloszlást) kapunk (4. ábra). A „biztos” (100%) az, hogy a keresett érték valahol ez alatt a görbe alatt van. A legvalószínűbb értéket a görbe csúcsa mutatja. Az 1σ konfidencia szint a görbe alatti terület 68,2%-át, a 2σ a 95,4%-át, azaz azt jelenti, hogy 68,2%, ill. 95,4% a valószínűsége annak, hogy a valódi érték a

megadott hibahatáron belül van. Az intervallumok szélességét a mérés hibája szabja meg. Ez két tényezőtől függ: (1) a műszer pontosságától, azaz attól, hogy az ismételt mérések eredményei mennyire térnek el egymástól (mennyire „szórnak”); (2) a mérések számától. A legvalószínűbb értéket az eredmények átlaga adja, a mérés hibáját, azaz a szórás az egyes eredmények átlagtól való eltéréseiből és a mérések számából számítjuk. Mivel az eloszlási görbénk szimmetrikus, az eredményt így adhatjuk meg: átlag $\pm$ szórás. A 4. ábrán bemutatott két eloszlási függvény legvalószínűbb értéke azonos (1000), de a szórás a bal oldalon ± 10 (1%), a jobb oldalon ± 5 (0,5%). Előbbinél a keresett (valódi) érték 68,2% valószínűséggel 990 és 1010, utóbbinál 995 és 1005 között van. Ez a mérés eredménye. A mérési adat nem egyetlen szám, hanem kettő: az érték és a hibája.



4. ábra: Mérések statisztikus hibája. A mért érték: a mérések átlaga $\pm$ szórás (1σ). A szórás határozza meg az eloszlási függvény szélességét. Jelentése: a keresett érték 68,2% valószínűséggel az (átlag $\pm$ szórás), 95,4% valószínűséggel az (átlag $\pm 2 \times$ szórás) intervallumban van.

Fig. 4.: Measurement uncertainty. Measured value: mean $\pm$ spread (1σ). It means: the interval around the mean of the measured data that contains the true value with 68,2% (1σ) or 95,4% (2σ) probability

A konvencionális radiokarbon korok hibája

Az előzőkből következik, hogy a radiokarbon kor sem egyetlen szám, hanem a legvalószínűbb érték és a hibája. A mérés és az abból számított konvencionális radiokarbon kor statisztikus hibáját leíró függvény egy szabályos haranggörbe, így a terület 68.2%-a a görbe közepén, a csúcsra szimmetrikusan helyezkedik el. A csúcs mutatja a legvalószínűbb értéket, és a hibahatárt megadhatjuk $\pm$ értékben. A megadott $\pm x$ év az 1σ konfidencia szintet jelöli. Természetesen itt is megadható a 2σ érték is, ami egyszerűen az előbbi kétszerese. A konvencionális radiokarbon kort kerekítve adjuk meg, kerekítésének mértékét a standard hiba nagysága határozza meg (Stuiver & Polach 1977). A standard hiba megadásánál a két első számjegyet kell megtartani, a többi pedig kerekíteni. Például 8234 ± 256 és 42786 ± 2322 esetén a kerekítés helyesen 8230 ± 260 és 42800 ± 2300 . Ha a standard hiba kisebb 100 évnél, akkor 50 és 100 év között tízre, 50 év alatt 5-re kerekítünk.

A mérési bizonytalanság, azaz a szórás vagy standard hiba tartalmazza a minta, a sztenderd és a háttér mérésének statisztikus hibáját, az egyes műszerek és a $\delta^{13}\text{C}$ mérési bizonytalanságát. Ezekből számítjuk a hibaterjedési függvény segítségével a kor hibáját. Nem tartalmazza a mintavételből, a minta inhomogenitásából, szennyeződésből, csak részben tartalmazza a minta-előkészítésből származó hibákat (Scott et al. 2007).

A mintavételből származó hiba kivételével AMS mérések esetén ezek a hibák is számíthatók a teljes folyamat (előkészítés, feltárás, grafítizálás, mérés) ismétlésével. Ebben az esetben hibaként már nem a szórást, hanem az *ismételhetőséget*, azaz *precizitást* adjuk meg. Minta- és időigényességük miatt a számlálós technikák alkalmazásával ez korlátozottan végezhető el.

Jó ismételhetőség mellett is előfordulhat, hogy a teljes folyamatban van egy állandó hiba, amit nem tudunk észlelni. Ha a fenti ismétlést egy másik laboratórium végzi el, akkor a független mérések összehasonlításából a mérések *reprodukálhatóságáról* kapunk információt. Ez már magában foglalja az állandó rendszerhibákat is.

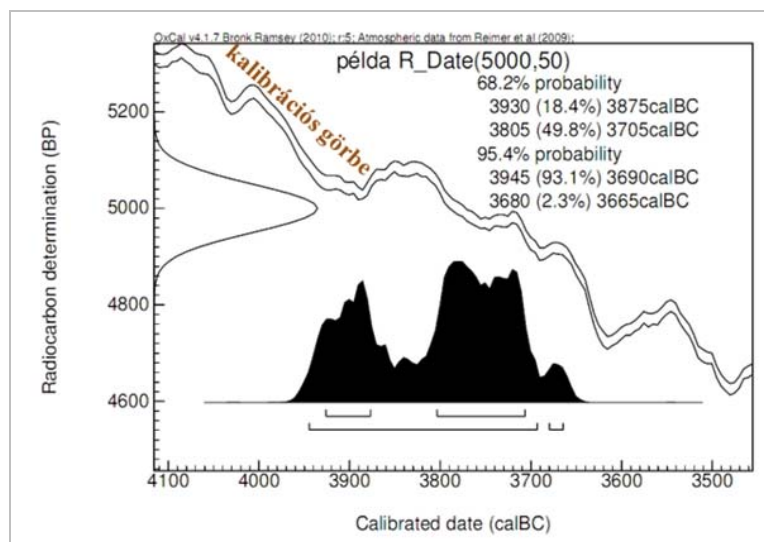
Ismeretlen korú mintákon végzett összehasonlító méréseknél az egyezés mindkét labor eredményét megerősíti. Szisztematikus eltérésnél nem lehet eldönteni, hogy melyik sorozat a helyes. Ezért hasznosak a rendszeresen szervezett nemzetközi

összemérések, amiken minden résztvevő labor ellenőrizheti saját teljesítményét. Az összemérésekre a laborok a mintatípusok és korok széles skáláját képviselő, de azonos mintákból származó, jó minőségű mintákat kapnak (Cook et al. 1990). Az eredményeket a szervezők kiértékelik, majd közlik a mérési eredményeket, a konszenzus értékeket (pl. Scott 2009) és a tapasztalatokat (pl. Scott et al. 2010a; 2010b). A nyilvánosságra hozott eredményekben az egyes laborok csak egy azonosító számmal szerepelnek. Ez alapján minden labor kiértékelheti a saját eredményeit, meghatározhatja mérései *pontosságát*, de a hiányosságait is.

Nagyon fontos: nem biztos, hogy a kisebb hibával megadott mérési eredmény a pontosabb (Scott et al. 2007). Egy példa: a mohácsi vészben elpusztult emberek csontvázaival végez mérést két labor. Az egyik szerint a leletek kora 1465 – 1495 cal AD, a másik szerint 1510 – 1580 cal AD. Az első ugyan *precíz* (a megadott intervallum, azaz az 1σ konfidencia intervallum mindössze 30 év), de nem tartalmazza a valódi kort (amit ebben az esetben szerencsére ismerünk). A második labor esetében az 1σ intervallum ugyan 70 év, de a keresett dátumot tartalmazza, ezért ez a *pontos*. Ismeretlen korú minták esetében ezt nem tudjuk eldönteni, hajlamosak vagyunk arra, hogy a kisebb mérési hibával megadott értéket tekintsük a pontosabbnak, holott sok esetben a hiba alulbecsléséről van szó. A mérési pontosságot a laborok házon belül nemzetközi sztenderdek rendszeres mérésével ellenőrzik (Long 1990), ami viszont a minta előkezelésénél fellépő hibákat nem tartalmazza.

A kalibrált radiokarbon korok hibája

A naptári korokat (kalibrált kor, cal BC vagy cal AD, illetve lehet cal BP is) úgy kapjuk, hogy a kalibrációs görbéről leolvassuk a konvencionális radiokarbon kort leíró valószínűségi függvény minden pontjának naptári korát (év $\pm$ hiba). Így egy másik valószínűségi eloszlást kapunk, ami már nem szimmetrikus, tehát csak a határokat tudjuk megadni, vagyis azt, hogy 68,2%, vagy 95,4% valószínűséggel milyen időintervallum(ok)ba esik a minta naptári kora (**5. ábra**). A naptári korok bizonytalansága nagyobb, mint a konvencionális koroké, mert tartalmazza a minta mérési hibáján kívül a kalibrációs görbe hibáját is.



5. ábra: Függőleges tengelyen ábrázolva: konvencionális radiokarbon kor: 5000 ± 50 BP. Szimmetrikus haranggörbe, a hiba csak a mérési bizonytalanságot tartalmazza. Középen: a kalibrációs görbe 1σ sávja. A kalibrációs görbét mérési pontok (érték $\pm 1\sigma$) alkotják, a két görbe az (érték $+1\sigma$) és (érték -1σ) pontoknak felel meg. Vízszintes tengelyen: a kalibrált (naptári) kor valószínűségi eloszlása. Nem szimmetrikus, a hiba tartalmazza a radiokarbon mérés és a kalibrációs görbe hibáját is. A 68,2% és 95,4% valószínűség gyakran több intervallumból adódik össze.

Fig. 5.: Vertical axis: radiocarbon age: 5000 ± 50 BP. Probability density distribution is symmetrical bell shaped around the mean of the data. Uncertainty: analytical error. Middle: $+1\sigma$ and -1σ range of the calibration curve. Horizontal axis: Probability density distribution of the calibrated date. Asymmetric, the uncertainty cannot be presented in $\pm$ term. The result must be quoted in the form of 1σ or 2σ range.

Az eredmények kiértékelése

Kalibrációs szoftverek

Az előző fejezetből látható, hogy a kalibráció bonyolult művelet. A módszer kidolgozásának kezdetén még kevés adatra illesztett görbe alkotta a kalibrációs görbét, a kalibráció valóban milliméterpapíron történt: egyenként olvasták le a mért és a hozzárendelt $+1$ és -1 és 2σ értékekhez rendelhető naptári korokat. A számítógépek megjelenése, gyors fejlődése lehetővé, az adatok növekvő száma pedig szükségessé tette a számítógépes kiértékelést. Ma számos kalibrációs program létezik, amelyek ingyenesen letölthetők a www.radiocarbon.org honlapról, a kalibráció bármelyikkel elvégezhető.

A programok ugyanazt, illetve ugyanazokat a kalibrációs görbéket alkalmazzák. A szárazföldi és tengeri élőlények más környezetben élnek, amelyben más a beépíthető szén izotóp-összetétele is (reservoir effektus). Emiatt külön kalibrációs görbe készült a szárazföldi és tengeri eredetű leletek kalibrálására. Az is bebizonyosodott, hogy az északi és déli féltekén sem teljesen azonos a rendelkezésre álló szén izotóp-összetétele, így itt is számolni kell a reservoir effektussal (SHCal04, McCormac et al. 2004; Zimmerman et al. 2010). A görbék pontosításán folyamatosan dolgoznak, a legújabbak az IntCal09 és Marine09 (Reimer et al.

2009). Az IntCal04 (Reimer et al. 2004) kb. 1500, az IntCal09 több mint 3500 mérési adatot tartalmaz. A Radiocarbon honlapon található szoftvereket frissítik, valamennyi a legújabb, legrészletesebb adatbázissal dolgozik.

A szoftverek nemcsak egy-egy radiokarbon kor kalibrálására alkalmasak, hanem adatsorok statisztikus kiértékelésére is. Itt már jelentős eltérések vannak köztük, különböző statisztikai módszerekkel dolgoznak, illetve egy részük speciális kérdések vizsgálatára készült, mások komplex modellek kidolgozására is alkalmasak. Ez utóbbiak az ún. Bayesian módszert alkalmazzák.

Bayesian módszer

A Bayesian-elv szerint két vagy több statisztikus hibával rendelkező adat együttes kiértékelésénél az eredmény hibáját a klasszikus statisztikus módszer általában felülbecsüli. A hiba csökkenthető, ha az adatokra vonatkozó, más forrásokból származó ismereteinket, az ún. priorokat a statisztikus kiértékelésnél figyelembe vesszük. A Bayesian módszer egy adathalmaz kiértékelésére szolgáló statisztikus módszer, amely a statisztikus hibával terhelt mérési adatokat és az adatokra vonatkozó egyéb ismereteinket együttesen értékeli. Az eredményül kapott értékek (poszteriorok) hibája kisebb lesz, mint a hagyományosan számított bizonytalanság, azaz – ha ismereteink helytállóak –

az eredmény pontosabb lesz. A módszer széles körben elterjedt, bár sokan elutasítják, mivel szubjektív elemeket tartalmaz: az eredményt befolyásolják a modellbe beépített plusz információk.

Esetünkben a kalibráció során két statisztikus hibával terhelt adatot, a mérési eredményt és a szintén statisztikus hibával rendelkező kalibrációs görbe pontjait kell együttesen értékelni. A kalibrált korok (eloszlások) mindkét hibát tartalmazzák. Amennyiben nem egyetlen mérési adatunk, hanem egy mérési sorozatunk van, a Bayesian-elv alapján az egyes adatok bizonytalansága, azaz a hibahatárok csökkenthetők, ha a mérési adatokat a mintákra vonatkozó további információkkal kiegészítjük.

Modellek

Az 1990-es évek elején jelentek meg az első közlemények, amelyek felvetették a Bayesian-elv használatát a radiokarbon korok kiértékelésére és szinte ezzel egyidőben megjelentek az adathalmazok komplex elemzésére is alkalmas kalibrációs szoftverek (pl. Buck et al. 1991; Buck et al. 1992; Buck et al. 1994; Bronk Ramsey 1994). Ezek közül jelenleg talán a legelterjedtebb a Christopher Bronk Ramsey által kifejlesztett (Bronk Ramsey 1994) – és folyamatosan továbbfejlesztett (Bronk Ramsey 1995; 1998; 2000; 2001; 2008; 2009a; 2009b; Bronk Ramsey et al. 2001; 2004; 2006) – OxCal kalibrációs program, amely a radiokarbon korok egyszerű kalibrációján túl alkalmas kronológiai vagy üledékképződési modellek kidolgozására, évgűrű (fa, cseppkö) sorozatok kiértékelésére. Segítségével kronológiai modellek állíthatók fel úgy, hogy a radiokarbon mérések mellett a vizsgált leletanyagra vonatkozó minden rendelkezésre álló történelmi, relatív kronológiai vagy természettudományos vizsgálatból (dendrokronológia, U/Th módszer, TL, archeomágnes mérések, stb.) származó ismeretünket beépítjük (Bayesian módszer). A modell az általunk megadott kezdeti-, illetve határfeltételeket (*priorok*, pl. a leletek időbeli sorrendje ismert/nem ismert, egyidejűek, egy fázisba tartoznak/nem tartoznak, a fázisok átfedhetik/nem fedhetik egymást, nem tudjuk, valami után/előtt, stb.) figyelembe véve újra kalibrálja a korokat és becslést ad határookra (poszteriorok). A jelenleg elérhető OxCal 4.1.7 verzió szinte bármilyen modell felállítását lehetővé teszi, a kapott eredmények természetesen ebben az esetben is modellfüggőek. Ugyanakkor segítségünkre van abban, hogy a lehetséges értelmezések közül a legvalószínűbbet kiválaszthassuk. Ha a modell paramétereit helyesen

adtuk meg, akkor a számítás eredményeként kapott naptári korok eloszlásai egybeesnek a kalibrációval kapott eloszlásokkal, sőt a modell-korok statisztikus bizonytalansága kisebb lesz, mint a külön-külön kalibrált koroké. Az OxCal 4.1.7 program minden egyes adatra vizsgálja az egyezést (*agreement index*). Ez az érték teljes átfedés esetén 100%. Ha a kalibrált és számított kor (eloszlás) nem egyezik, az egyezés mértékét %-ban adja meg. Ha ez 60%-nál kisebb, akkor vagy a mérési adat, vagy a modell (esetleg valamelyik kezdeti feltétel) hibás. Az index lehet 100%-nál nagyobb: ekkor az eredeti kalibrált görbe teljes egészében magában foglalja a modellel számított görbét (poszterior), és ez utóbbi kisebb bizonytalansággal terhelt (szűkebbek a határok), mint az eredeti. A modell annál jobb, minél nagyobb az egész modell helyességét jellemző A_{modell} értéke (Hua et al 2012).

Összegzés

Mint láttuk, a radiokarbon laborok nem a leletek korát mérik, hanem a minták megmaradt ^{14}C tartalmát. A konvencionális radiokarbon kor egy modell kor, amit úgy kapunk, hogy a mért aktivitást ($A \pm 1\sigma$) a „konvenciók” elfogadásával átszámítunk évekre ($t \pm 1\sigma$). A konvenciókat speciális prioroknak tekinthetjük, amik nem valószínűségi változók, hanem konstansok. Ahogy az ismereteink és a mérések halmaza nőtt, kiderült, hogy a modell nem helyes, és a konstansnak tekintett kezdeti aktivitás valójában egy változó, ami ráadásul nem írható le normál eloszlással. A radiokarbon kort kalibrálni kell, hogy a naptári kort megkapjuk. A naptári kor tehát ismét modell kor ($t_1 - t_2, 1\sigma$), ami már két valószínűségi változó kombinálásával számítható. A kalibrációs görbe pontosítása a naptári korok megbízhatóbb becslését, de egyúttal változását is eredményezi. Nem véletlen tehát, hogy a közleményekben meg kell adni a nem változó radiokarbon korokat (BP) is, a naptári korok (cal AD/cal BC vagy cal BP) mellé pedig az alkalmazott kalibrációs adatbázist, illetve kalibrációs szoftvert. Egy mérési adathalmaz kronológiai értelmezésénél több radiokarbon adatot vizsgálunk egyszerre, és az eddigi két változó mellé belépnek is az adatok kapcsolatára vonatkozó feltételek is, amik szintén valószínűségi eloszlásokkal írhatók le. Nyilvánvaló, hogy az általunk megadott feltételek alapvetően befolyásolják a számítás eredményét. Épp ezért célszerű többféle lehetséges modellt vizsgálni, és az eredményeket részletesen összehasonlítani, elemezni. Nem szabad elfelejteni, hogy véges számú mérési adatunk van, és ismereteink is korlátozottak. Új adatok és információk szükségessé tehetik a modell újragondolását (Weninger et al. 2011).

Köszönetnyilvánítás

Magyarországon az első ^{14}C mérésére alkalmas számlálót és alacsony háttérű mérőhelyet Csongor Éva építette. A 9 számlálóból álló, ma is üzemelő alacsony háttérű mérőhely, a szintén ma is használt mintafeltáró, égető és gáztisztító berendezések, valamint az izotópfractionálódás mérésére alkalmas tömegspektrométer Hertelendi Ede műve. Ők teremtették meg a debreceni labort, de mai nemzetközi elismertsége elsősorban szellemi hagyatékuknak köszönhető.

Irodalom

- BRONK RAMSEY, C. (1994): Analysis of Chronological Information and Radiocarbon Calibration: The Program OxCal. *Archaeological Computing Newsletter* **41**:11–16.
- BRONK RAMSEY, C. (1995): Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal program. *Radiocarbon* **37**/2:425–430.
- BRONK RAMSEY, C. (1998): Probability and dating. *Radiocarbon* **40**/1:461–474.
- BRONK RAMSEY, C. (2000): Comment on 'The Use of Bayesian Statistics for ^{14}C dates of chronologically ordered samples: a critical analysis'. *Radiocarbon* **42**/2:199–202.
- BRONK RAMSEY, C. (2001): Development of the radiocarbon calibration program OxCal. *Radiocarbon* **43**/2A:355–363.
- BRONK RAMSEY, C. (2008): Deposition models for chronological records. *Quaternary Science Reviews* **27**/1–2:42–60.
- BRONK RAMSEY, C. (2009a): Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* **51**/1:337–360.
- BRONK RAMSEY, C. (2009b): Dealing with outliers and offsets in radiocarbon dating. *Radiocarbon* **51**/3:1023–1045.
- BRONK RAMSEY, C., BUCK, C. E., MANNING, S. W., REIMER, P. & VAN DER PLICHT, H. (2006): Developments in radiocarbon calibration for archaeology. *Antiquity* **80**/310:783–798.
- BRONK RAMSEY, C., MANNING, S. W. & GALIMBERTI, M. (2004): Dating the volcanic eruption at Thera. *Radiocarbon* **46**/1:325–344.
- BRONK RAMSEY, C., VAN DER PLICHT, J. & WENINGER, B. (2001): 'Wiggle matching' radiocarbon dates. *Radiocarbon* **43**/2A:381–389.
- BUCK, C.E., KENWORTHY, J.B., LITTON, C.D. & SMITH, A.F.M. (1991): Combining Archaeological and Radiocarbon Information – a Bayesian-Approach to Calibration. *Antiquity* **65**/249:808–821.
- BUCK, C.E., LITTON, C.D. & SCOTT, E. M. (1994): Making the most of radiocarbon dating – some statistical considerations. *Antiquity* **68**/259:252–263.
- BUCK, C.E., LITTON, C.D. & SMITH, A.F.M. (1992): Calibration of radiocarbon results pertaining to related archaeological events. *Journal of Archaeological Science* **19**/5:497–512.
- CALIB (2005): Isotopic fractionation. CALIB Manual - Chapter 5. <http://calib.qub.ac.uk/calib/manual/chapter5.html>
- COOK, G.T., HARKNESS, D.D., MILLER, B.F., SCOTT, E.M., BAXTER, M.S. & AITCHISON T.C. (1990): International collaborative study; structuring and sample preparation. *Radiocarbon* **32**/3: 267–270.
- HERTELENDI, E. (1998): Radiokarbon kormeghatározás. In: ILON, G. (szerk.) A régésztechnikus kézikönyve I. *Panniculus, Ser. B. 3* Szombathely. 311–335.
- HUA, Q., McDONALD, J., REDWOOD, D., DRYSDALE, R., LEE, Sh., FALLON, S. and HELLSTROM, J. (2012): Robust chronological reconstruction for young speleothems using radiocarbon, *Quaternary Geochronology*, doi:10.1016/j.quageo.2012.04.017.
- LONG, A. (1990): A quality assurance protocol for radiocarbon laboratories. *Radiocarbon* **32**/3: 393–397.
- McCORMAC, F.G., HOGG, A.G., BLACKWELL, P.G., BUCK, C.E., HIGHAM, T.F.G. & REIMER, P.J. (2004): SHCal04 Southern Hemisphere calibration, 0–11.0 cal kyr BP. *Radiocarbon* **46**/3:1087–1092.
- MOLNÁR, M., RINYU, L., JANOVICS, R., MAJOR I. & VERES M. (2012): Az új debreceni AMS laboratórium bemutatása. *Archeometriai Műhely* **IX**/3 147–160.
- MOLNÁR M. & SVINGOR É. (2011): Radiokarbon kormeghatározás. In: MÜLLER, R. (főszerk), *Régészeti kézikönyv* (CD). Magyar Régész Szövetség, Budapest 2011. 532–545.
- REIMER, P.J., BAILLIE, M.G.L., BARD, E., BAYLISS, A., BECK, J.W., BERTRAND, C.J.H., BLACKWELL, P.G., BUCK, C.E., BURR, G.S., CUTLER, K.B., DAMON, P.E., EDWARDS, R.L., FAIRBANKS, R.G., FRIEDRICH, M., GUILDERSON, T.P., HOGG, A.G., HUGHEN, K.A., KROMER, B., McCORMAC, F.G., MANNING, S.W., BRONK RAMSEY, C., REIMER, R.W., REMMELE, S., SOUTHON, J.R., STUIVER, M., TALAMO, S., TAYLOR, F.W., VAN DER PLICHT, J. & WEYHENMEYER, C.E. (2004): IntCal04 terrestrial radiocarbon age

calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon* **46/3**:1029–1058.

REIMER, P.J., BAILLIE, M.G.L., BARD, E., BAYLISS, A., BECK, J.W., BLACKWELL, P.G., BRONK RAMSEY, C., BUCK, C.E., BURR, G.S., EDWARDS, R.L., FRIEDRICH, M., GROOTES, P.M., GUILDERTSON, T.P., HAJDAS, I., HEATON, T.J., HOGG, A.G., HUGHEN, K.A., KAISER, K.F., KROMER, B., McCORMAC, F.G., MANNING, S.W., REIMER, R.W., RICHARDS, D.A., SOUTHON, J.R., TALAMO, S., TURNEY, C.S.M., VAN DER PLICHT, J. & WEYHENMEYER, C.E. (2009): IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon* **51/4**:1111–50.

SCOTT, E.M. (2009): VIRI Consensus values. <http://www.radiocarbon.org/>

SCOTT, E.M., COOK, G.T. & NAYSMITH, P. (2007): Error and uncertainty in radiocarbon measurements. *Radiocarbon* **49/2**:427–440.

SCOTT, E.M., COOK, G.T. & NAYSMITH, P. (2010a): The Fifth International Radiocarbon Intercomparison (VIRI): An Assessment of Laboratory Performance in Stage 3. *Radiocarbon* **52/3**: 859–865.

SCOTT, E.M., COOK, G.T. & NAYSMITH, P. (2010b): A Report on Phase 2 of the Fifth International Radiocarbon Intercomparison (VIRI). *Radiocarbon* **52/3**: 846–858.

STUIVER, M. & POLACH, H. (1977): Discussion: reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon* **19/3**:355–363.

WENINGER, B., EDINBOROUGH, K., CLARE, L. and JÖRIS, O. (2011): Concepts of probability in radiocarbon analysis. *Documenta Praehistorica XXXVIII*. DOI: 10.4312\dp.38.2

ZIMMERMAN, S., GUILDERTSON, T., BUCKLEY, B. & COOK, E. (2010): Extension of the Southern Hemisphere atmospheric radiocarbon curve, 2120-850 years BP: Results from Tasmanian Huon Pine. *Radiocarbon* **52/3**:887–894.