

IZOTÓP HIDROGEOLOGIAI VIZSGÁLATOK A VITUKI-BAN

Deák József¹

A természetben előforduló elemeknek több mint ezer stabil ill. radioaktív izotópját ismerjük, amelyeket – az emberi tevékenység során keletkezett és a Földön szétterjedt mesterséges izotópokkal együtt – *környezeti izotópoknak* nevezünk.

Az izotóp-hidrogeológiai kutatások célja a felszín alatti vízáramlási rendszerek és a felszíni eredetű szennyeződések kimutatása valamint a hidrogeológiai és hidraulikai modellezés eredményeinek verifikálása. A VITUKI-ban a hatvanas évek végén kezdődtek el a környezeti izotóp vizsgálatok, a trícium és radiokarbon (¹⁴C) laboratórium kifejlesztésével majd nemzetközi együttműködések keretében, amelyben partnereink voltak a koppenhágai, a heidelbergi, a cambridgei és a zürichi egyetemek, valamint a BVFA Arsenal, a TNO és a US Geological Survey kutatói. Az elmúlt harminc év alatt az ország sok területén alkalmaztunk izotóp-hidrogeológiai módszereket a felszín alatti vizek komplex kutatása keretében, többek között a budapesti, az Eger környéki és a hévízi termális karszt-áramlási rendszerek, a hideg karsztforrások, az Alföld intermedier és regionális rétegvíz áramlásai, a Fertő-tó felszínalatti víz utánpótlódása, a szigetközi rétegvizek eredete, a tervezett és a megvalósult nukleáris hulladék temetők környezete vizsgálatánál. A kutatások eredményeiről számos publikáció jelent meg, amelyek közül a legfontosabbakat a mellékelt publikáció-lista tartalmazza. Kutatásaink eredményeként sikerült az izotóp-hidrogeológiát Magyarországon meghonosítani, így ma már rutinszerűen használják a felszín alatti vízbázisok vizsgálatában, víz-kormeghatározásra és természetes nyomjelzőkként.

A környezeti izotópok hidrogeológiai alkalmazása

A vízkor meghatározásának ma már klasszikusnak számító módszere az 50-100 évnél fiatalabb, ill. az ilyen komponenst is tartalmazó felszín alatti vizekre a *trícium* (³H), az 1 000 – 50 000 év közötti korú vizek esetében pedig a *radiokarbon* (¹⁴C). A vízkor-adatok

¹ VITUKI Rt., Hidrokógiiai Intézete, 1095., Budapest, Kvassay Jenő út 1.
deak3@axcelero.hu

)paleoklíma alapján történő verifikálására, és a vízkeveredések kimutatására a stabil izotóp arányokat (δD , $\delta^{18}O$) használjuk fel.

Trícium-vizsgálatok

A *trícium* elemzési adatok a felszín alatti vízbázisok védettségének, a felszíni- és csapadékvizek elérési idejének vizsgálatára kiválóan alkalmasak. A trícium ugyanis a legideálisabb víz-nyomjelző; lévén maga is hidrogén, beépül a H_2O vízmolekulában az egyik hidrogén atom helyére (HTO) és abszorpció nélkül követi a felszín alatt áramló vizet, abból semmilyen módon nem szűrődik ki. A tríciumot, mint az élő szervezetekre teljesen veszélytelen, a víztől semmi módon el nem választható és ugyanakkor igen érzékenyen mérhető, tehát jól kimutatható nyomjelzőanyagot az 1950-es évektől kezdődően egyre szélesebb körben alkalmazzák vízföldtani problémák megoldására.

Vízföldtani vizsgálatoknál a beszivárgás körülményei és a diszperzió miatt elegendő az évi átlagos tríciumtartalom ismerete, amit a magyarországi csapadékvízre az [1. ábra](#) mutat be. Látható, hogy a trícium tartalom 1963-ban érte el a maximumát, közel 3000 TU évi átlaggal, majd exponenciálisan csökkent, mintegy 1, 2 éves felezési idővel, ami a légkörből történő trícium kiürülés sebességét jelzi. A jelenlegi 10-20 TU közötti értékek még mindig két-háromszorosai a kozmogén eredetű trícium szintnek. Az utóbbi tíz év stagnáló értékei jelzik, hogy beállt az új, az ipari eredetű trícium kibocsátás miatt kissé magasabb trícium szint a csapadékban. Az [1. ábrán](#) a 2000. évre lebomlott trícium tartalom időszora is látható, amit a 12,4 éves felezési idő alapján számítottunk a magyarországi csapadéokra.

A trícium legegyszerűbb hidrogeológiai alkalmazását az teszi lehetővé, hogy viszonylag nagy felezési ideje (12,4 év) miatt az 50 évnél fiatalabb csapadékból származó vizekben egyértelműen kimutatható, míg az 1952. előtti vizekben ma már gyakorlatilag nulla (<1 TU) az értéke. Trícium-méréssel tehát egyértelműen eldönthető, hogy a vizsgált felszín alatti víz 50 évnél fiatalabb, ill. hogy tartalmaz-e ilyen komponens

Gyakran előfordul, hogy idős (több ezer, sőt többtízezer éves) vizekhez egészen friss komponens is keveredik, aminek kimutatására a trícium-elemzés a legalkalmasabb.

Ha feltételezzük, hogy az idős komponens több mint 50 éves, így trícium tartalma

$T_i = 0$, és ismerjük a friss komponens trícium koncentrációját (T_f); a keverékvíz mért TU értékéből (T_k) az izotóp-hígítás elve alapján számítható a friss víz keveredési aránya (x_f):

$$x_f = 100 * (T_k/T_f) \text{ [%]}$$

Ez a módszer elsősorban olyan területeken alkalmazható, ahol az intenzív víztermelés megváltoztatja a természetes áramlási sebességeket. ÉK Magyarország területéről pl. az 1995-96-ban vizsgált 100 db, 20 és 300 m közötti mélységből származó rétegvíz minta több mint felében határérték feletti trícium tartalmat mértünk, elsősorban a nagy hozammal üzemelő vízmű kutak vizében. Amennyiben elfogadjuk az ország egyéb területeinek friss talajvizeire jellemző $T_f = 30$ TU átlagértéket, általában 5-10 % talajvíz hozzákeveredéssel számolhatunk, de Vaján és Kállósemjénben a 200 méternél nagyobb mélységű kutakban 30-60 % a friss talajvíz részaránya. Az ÉK Magyarország területéről rendelkezésre álló trícium adatok alátámasztják Halász Béla modellezésének eredményeit, amely szerint a legnagyobb depressziójú kutak közvetlen környezetében rendkívüli módon felgyorsul a talajvíz leáramlása, és akár 5 év alatt is leérhet a talajvíz akár 200-300 m mélységre is.

A folyóvizekhez keveredő idős (így trícium-mentes) rétegvíz kimutatása és hozamának számítása legpontosabban trícium vizsgálatokkal végezhető el. Erdélyi M. kiemelt fontosságot tulajdonított a Tisza rétegvíz-megcsapoló szerepének, mivel a Tisza az Alföld legmélyebb fekvésű területein folyik és medre sok helyen belevág a jó vízadó „kék homok” rétegbe, amely nagy horizontális kiterjedése miatt alkalmas a területen feláramló mélységi vizek összegyűjtésére.

A Tiszához keveredő rétegvíz arányát trícium-mérések alapján vizsgáltuk felhasználva, hogy a föláramló idős rétegvíz biztosan nem tartalmaz termonukleáris robbantásokból származó tríciumot, így hígítja a Tisza-víz trícium tartalmát. Székely F. korábbi hidraulikai vizsgálatokkal kimutatta, hogy a Tisza, Polgár alatti szakaszán (az általunk is vizsgált területen) a folyóhoz keveredő talajvíz mennyisége elhanyagolható, így a Tiszához keveredő mélységi víz hozama:

$$Q_a = Q_A * (T_A - T_B)/T_B + \square Q_i * (T_i - T_B)/T_B$$

ahol Q a vízhozam [m^3/s]

T a trícium koncentráció [TU]

A és B a vizsgált folyószelvény kezdeti ill. végpontja

m a feláramló mélységi víz

t a talajvíz (<20 m)

i a Tiszába ömlő mellékvízfolyások

A Tiszához keveredő rétegvíz és annak hozamát 1973 februárjában mutattuk ki, kihasználva az extrém alacsony vízhozamot (Polgárnál $110 \text{ m}^3/\text{s}$). A Polgár és Algyő közötti 300 km-es folyószakaszon $Q_a=17 \text{ m}^3/\text{s}$ értéket számoltunk, amely érték közel azonos az egész Alföld felszín alatti vízforgalmával, és a Tiszához keveredő rétegvíz hozamának felső határát adja,

Azokon a területeken, ahol a talaj- ill. karsztvíz trícium koncentrációja háttér körüli érték, így az utóbbi 50 év nagy trícium tartalmú csapadéka még a háromfázisú zónában található, legpontosabban a „trícium-csúcs” módszerrel határozható meg a háromfázisú zónán történő függőleges leszivárgás sebessége ill. a talajvíz-elérési idő. Különböző mélységből vett talajmintákból kinyert talajnedvesség trícium koncentrációjának mérésével ugyanis meghatározható az 1963. évi, kiugróan magas csapadék-trícium szint jelenlegi mélysége, amiből számítható a vízleáramlás vertikális sebessége, és a hatékony beszivárgás.

Ilyen vizsgálatokat a püspökszilágyi radioaktív hulladékártároló, valamint a tervezett ófalui és bátaapáti „atomtemető” környezetében végeztünk, és mindhárom helyen nagyon lassú, 100-300 mm/év függőleges irányú leszivárgási sebességet kaptunk a talajvíz feletti háromfázisú zónában.

Ahol homok vagy kavics a fedőréteg, a csapadék rövid idő alatt lejut a talajvízig, így az 1963. évi trícium csúcs már a talajvízben található. Talajvíz trícium profil felvételére 1999-ben nyílt lehetőség a Duna-Tisza közén, három olyan területen (Méntelek, Fischerbócsa és Kéleshalom), amelyek a korábbi vizsgálatok alapján regionális leszivárgási területek. A trícium-profil felvétel célja az 1963. évi, még ma is kiugróan magas trícium tartalmú csapadékból történt beszivárgás jelenlegi mélységének (h_{63}), valamint a trícium eltűnési mélységének (h_{52}) felmérése. Ezek ismeretében ugyanis meghatározható az 1963 ill. 1952 és a mintavétel között eltelt időszak alatti vertikális talajvíz elmozdulás, amiből számítani tudjuk az átlagos évi effektív beszivárgást (B) és a vertikális szivárgási tényezőt (k_z):

$$v_z = h_{63} / \Delta t_1 \quad v_z^* = h_{52} / \Delta t_2$$

$$B = n_0 * v_z$$

$$k_z = n_0 * v_z / I_z$$

ahol Δt_1 az 1963 és a mintavétel között eltelt idő [év]

Δt_2 az 1952 és a mintavétel között eltelt idő [év]

v_z ill. v_z^* a vertikális sebesség [mm/év]

B az effektív beszivárgás [mm/év]

n_0 a hatékony porozitás

k_z a vertikális szivárgási tényező [m/nap]

I_z a vertikális hidraulikus gradiens [m/m]

A ménteleki fúrás során felvett trícium-profil a [2. ábra](#), a számítások eredményeit az [1.](#) és [2. táblázat](#) mutatja be:

A tríciumcsúcs jelenlegi mélysége alapján Fischerbócsánál 200 mm/év, míg Ménteleknél 250 mm/év a talajvíz átlagos leáramlási sebessége 1963 és 1999 között.

A kéleshalmi fúrásnál a tríciumcsúcs a talajvízszint közelében található, ami rendkívül lassú (mindössze 47 mm/év) leáramlási sebességet jelent.

A tríciumcsúcs-módszert rétegirányú áramlási sebesség számítására is alkalmaztuk a Szigetközben, ahol extrém nagy vízvezető képességű rétegek találhatóak. A Szigetköz többszáz méter vastag kavicsrétegében 500 m/év rétegirányú sebességet számítottunk a Dunából kiinduló fő áramlási szelvény mentén, ahol az 1963. évi Duna-víz tríciumcsúcs („bomb-peak”) a 90-es évek közepére Mosonmagyaróvár környékéig jutott el ([3. ábra](#)). Ezt az áramlási sebesség értéket alátámasztotta a lényegesen pontosabb trícium/³He módszerrel számított 530 m/év érték. A trícium bomlásakor ugyanis ³He keletkezik, ezért a trícium bomlásából származó ³He és a trícium koncentrációjának egyidejű mérése alapján pontos kormeghatározás végezhető a száz évnél fiatalabb felszín alatti vizekben.

A ³H/³He módszerrel a diszperziót is számítottuk a Szigetközben. A Dunakiliti-Mosonmagyaróvár-Öttevény fő áramlási szelvény mentén, 530 m/év áramlási sebesség mellett, 100 m és 500 m közötti (átlagosan 300 m) hosszirányú diszperziós hossz(α_L), és $D_L = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ átlagos diszperziós tényező értékeket kaptunk.

)Radiokarbon (¹⁴C) víz-kormeghatározás

A ^{14}C vízkorok alapján tudjuk egyértelműen bizonyítani a regionális felszín alatti áramlási rendszerek meglétét és becsülni az áthaladási időt (transit time). A felszín alatti vizek ^{14}C kormeghatározásának alapja a radioaktív bomlás egyenlete:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

ahol A a vízmintában mért ^{14}C koncentráció [pmC]
 A_0 a kiindulási ^{14}C koncentráció [pmC]
 λ a ^{14}C bomlási állandója; $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ [év]}^{-1}$
 t a beszivárgás óta eltelt idő [év]

A kormeghatározás alapegyenlete:

$$t = 19\,010 \cdot \lg \frac{A_0}{A} \text{ (év)}$$

A képletben szereplő A értéket mérjük, míg A_0 -t különböző elméleti megfontolások alapján számítjuk.

Eddigi hazai vizsgálataink során a felszín alatti tartózkodási idő széles intervallumban változott. A szigetközi ^{14}C vizsgálatok során, pl. teljesen friss vizet találtunk a kavics összletben, ami alapján néhány száz éves áthaladási idő volt becsülhető, amit a trícium adatok is bizonyítottak. Ugyanakkor az Alföld felső-pannóniai termálvizes összletében többszázezer év a rétegvíz körforgalmának ideje, amit a hélium-elemzések is igazoltak.

)Stabil víz-izotópok

A deutérium és az ^{18}O hidrológiai alkalmazását az teszi lehetővé, hogy mindketten a víz alkotóelemei, így koncentrációjukat nem befolyásolják az utólagos kémiai és biológiai folyamatok, amelyek a vízben oldott alkotórészeket jelentősen megváltoztathatják. A magyarországi csapadék esetében a sokévi súlyozott átlag (ami jól egyezik a frissen beszivárgott felszín alatti vizek átlagával) :

$$\begin{aligned} \delta\text{D} &= -65 - 68 \text{ ‰} \\ \delta^{18}\text{O} &= -9,3 - 9,8 \text{ ‰} \end{aligned}$$

Ettől negatív irányban eltérő értékeket a tízezer évnél idősebb, a jégkorszakban hullott csapadékból származó felszín alatti vizeknél tapasztaltunk. A legnegatívabb δD és $\delta^{18}\text{O}$ értékeket a 18-20 ezer éves ^{14}C korú vizeknél mértük (4. ábra), ami jól egybevághat a paleontológiai adatokból ugyanekkorra datált utolsó (Würm-III) eljegesedési hideg

csúccsal. Ez egyúttal a ^{14}C vízkorok ellenőrzésére és a paleoklíma rekonstruálására is lehetőséget ad. Amennyiben egy területen (pl. a Pannon-medencében) megváltozik a klíma, az un. „hőmérsékleti hatás” miatt a csapadékvíz és az abból beszivárgó felszín alatti vizek stabilizotóp összetétele is követi ezt a változást. Mivel a stabilizotóp összetétel az áramlás során változatlan marad, a felszín alatti vízmintákban mért $\delta^{18}\text{O}$ ill. δD alapján következtetni lehet a vizsgált víz beszivárgásakor uralkodott átlag hőmérsékletre.

Az [5. ábra](#) bemutatja a (friss) talajvíz , a holocénkori (tízezer évnél fiatalabb) és a jégkorszaki (tízezer évnél idősebb) rétegvizek stabil oxigén izotóp tartalmának eloszlását. Látható, hogy az Alföldön a felszín alatti vizek stabil izotóp összetétele ($\delta^{18}\text{O}$ vagy δD) alapján elkülöníthetők a holocénban ill. a pleisztocénban beszivárgott vizek. $\delta^{18}\text{O}$ esetében – 10 ‰-et, mígdeutériumnál $\delta\text{D} = -70$ ‰-et tekinthetjük határnak; az ennél negatívabb értékek jégkorszaki, a pozitívabbak holocénkori beszivárgásra utalnak. Nemzetközi összehasonlításban ([6. ábra](#)) is elfogadott eredményeink alapján egy olcsó és egyszerű módszerrel – a vizek $\delta^{18}\text{O}$ és δD tartalmának mérésével – kiválaszthatók az idős, így védett felszín alatti vizek.

Ez az összefüggés csak azokra a felszín alatti vizeinkre vonatkozik, amelyek a Kárpát medencében hullott csapadékból szivárogtak be. Partiszűrésű kútjainkból folyóvizet termelnek, ami más vízgyűjtőről származik, így eltérő lehet az izotóp összetétele. A Duna vízének nagy része az Alpok magas területeiről ered, ezért a Duna-víz és emiatt a Fővárosi Vízművek partiszűrésű vízkészlete is $-10,5 - -12$ ‰ $\delta^{18}\text{O}$ tartalmú, annak ellenére, hogy a felszín alatti tartózkodás ideje néhány hét. Hasonló a helyzet a Szigetköz több száz méter vastag kavicsrétegében található talaj- és rétegvízzel is, amelynek ^{14}C kora egy-két ezer évnél kisebb, mégis a jégkorszaki eredetű vizekre jellemző stabil izotóp összetételű. Ismerve a Duna-víz stabil izotóp összetételét a -11 ‰-nél negatívabb $\delta^{18}\text{O}$ értékek azt jelzik, hogy a vizsgált talaj- ill. rétegvíz a Dunából származik ([7. ábra](#)).

)A quarter rétegösszlet regionális áramlási rendszerei az Alföldön

Tóth József elméleti eredményeire alapozva **Erdélyi Mihály** elkészítette az Alföld regionális és intermedier áramlásának vízföldtani modelljét, eredeti nyugalmi vízszint- és hidrogeológiai adatok alapján. Az áramlási modellt néhány kémiai komponens eloszlásával is alátámasztotta, és kiemelte az akkor még kezdeti stádiumban lévő izotóp-hidrogeológiai vizsgálatok fontosságát. **Erdélyi** véleménye szerint az áramlási régiók jellegét a következők jelzik:

- nyomásviszonyok
- a víz vegyi összetétele
- geotermális viszonyok
- természetes izotópok

A negyedkori rétegösszleten belül az Alföld nagy részén az alsó-pleisztocén rétegek a legjobb vízvezetők, a víztermelő kutak nagy része is ezekre a rétegekre települt. Az alsó-pleisztocén rétegvizek ^{14}C vízkor-térképén ([8. ábra](#)) látható, hogy a vízföldtani alapon kijelölt leáramlási területeken (Duna-Tisza közti hátság, Nyírség és a hegységperemek) található a legfiatalabb (<10 000 év) rétegvizek. A vízkor fokozatosan nő a megcsapolódási területek felé haladva, ami egyértelműen bizonyítja a folyamatos, több tízezer éve tartó vízáramlást. A legidősebb rétegvíz (>35 000 év) az Alföld legmélyebben fekvő, központi részein található.

A ^{14}C vízkorok szerint a leáramlási területeken holocén beszivárgású (10-12 ezer évnél fiatalabb), míg a feláramlási területeken ennél idősebb, a jégkorszakban beszivárgott rétegvíz helyezkedik el. Ezt a megállapítást teljes mértékben igazolja a $\delta^{18}\text{O}$ adatok alapján szerkesztett térkép ([9. ábra](#)), ahol a beszivárgási területek alsó-pleisztocén rétegvizeinek -9 - -10 ‰-es $\delta^{18}\text{O}$ értékei a jelenlegivel megegyező klímában (tehát a holocénban) beszivárgott vizet jeleznek. Ugyanakkor az Alföld területének nagy részén a jégkorszakban, tehát több mint 12 ezer évvel ezelőtt beszivárgott rétegvíz található, amit a -10 - -14 ‰ közötti $\delta^{18}\text{O}$ is bizonyít. Ezek a rétegvizek a maénál $1-10$ °C-kal hidegebb klímában szivárogtak be az utánpótlódási területeken, és több mint tízezer évig tartó felszín alatti áramlás során jutottak el jelenlegi helyükre.

Az Alföld rétegvíz áramlási rendszerében áramlási pályák mentén vizsgáltuk az ^{222}Rn - ^{226}Ra - ^{222}Rn vízkorokat”, és az áramlási pályák kezdetén jó egyezést találtunk a ^{14}C vízkorokkal. Mintegy 10-20 km-re az utánpótlódási területtől ugrásszerűen megnőtt az áramló rétegvíz He koncentrációja, a mélyebb rétegekben keletkezett ill. a Föld-köpenyből származó hélium migrációja és hozzákeveredése miatt.

A mélyebb rétegvizek nagy hélium tartalma alapján több, mint egymillió éves tartózkodási időt számoltunk az Alföld felső-pannon rétegvizeire.

Rétegirányú és vertikális szivárgási sebesség és k tényező számítása vízkor-adatokból

Az effektív beszivárgás és a függőleges- illetve rétegirányú szivárgási tényező ismerete alapvető a felszín alatti vízáramlási rendszerek kvantitatív vizsgálatában.

Meghatározásuk hidrogeológiai módszerekkel nagyon bizonytalan, de a természetes nyomjelzés és a ^{14}C vízkorok alapján lényegesen pontosabban elvégezhető. A több száz méter vastag réteg összlet vertikális és rétegirányú (gyakorlatilag horizontális) szivárgási tényezőjét ^{14}C vízkorok felhasználásával számoltuk az Alföld rétegvízáramlási rendszereiben. A víz sebességét a

$$v = \Delta s / \Delta t$$

képlettel számítjuk a két, azonos áramlási pályán fekvő kút távolsága (Δs) és vizének korkülönbsége (Δt) alapján. A Darcy törvény felhasználásával a regionális szivárgási tényező is számítható a

$$k = n_0 \cdot v / l$$

képlet alapján, a sebesség ($v = \Delta s / \Delta t$) és a hidraulikus gradiens ($I = \Delta h / \Delta s$) összefüggés behelyettesítésével :

$$k = n_0 \cdot (\Delta s)^2 / \Delta h \cdot \Delta t$$

ahol n_0 a hatékony porozitás

Δs a két kút távolsága

Δh a piezometrikus szintek különbsége.

Δt a vízkorok különbsége

A függőleges irányú vízmozgás sebessége olyan területeken számítható, ahol a hidroizohipszák közel párhuzamosak a felszínnel, azaz a vízmozgás vízszintes összetevője elhanyagolható. A leáramlás sebességét a regionális rétegvízáramlási rendszer utánpótlódási területén, a Duna-Tisza közti homokhátságon számoltuk, míg a feláramlást a Tisza völgyben, a regionális feláramlási területen.

A Duna-Tisza közti hátság területén a ^{14}C vízkor nő a mélységgel ([10. ábra](#)), ami a hosszú ideje tartó leszivárgást bizonyítja. A növekedés mértéke ($\Delta h / \Delta t$) az utóbbi 5-10 ezer évre jellemző, átlagos rétegvíz leáramlási sebesség, ami 30-50 mm/év közötti, átlagosan 35

mm/év a Duna-Tisza közti hátságán. Ez a sebesség egy kismértékű, mintegy 7-10 mm/év rétegvíz-leáramlási hozamot jelent.

A Duna-Tisza közti hátság területén a több száz méter vastag rétegekre érvényes vertikális hidraulikus szivárgási tényező a vízkorok alapján, $n_o = 0,2$ porozitást feltételezve, átlagosan $k_z = 6 \cdot 10^{-4}$ m/d ($7 \cdot 10^{-9}$ m/s). Ez közel egy nagyságrenddel kisebb a modellezésben használt vertikális k tényezőnél.

A rétegirányú vízáramlási sebességet a fő vízadó alsó-pleisztocén réteg összletre számoltuk, a ^{14}C vízkorok izovonalas térképe (8. ábra) alapján. A térképen ábrázolt ^{14}C izokrón vonalakra merőleges irányban leolvasható a $\Delta s/\Delta t$ érték vagyis a rétegirányú áramlási sebesség. Az értékek 1 és 6 m/év között szórnak, az átlag $v_h = 2,5$ m/év.

Az alföldi alsó-pleisztocén rétegösszletre 1 és 10 m/nap közötti, átlagosan $k_h = 4$ m/nap rétegirányú (vízszintes) szivárgási tényező (k_h) értékeket kaptunk a ^{14}C vízkorok alapján.

A vízszintes és a függőleges szivárgási tényezők hányadosa megadja a negyedkori rétegek átlagos anizotrópiáját:

$$\lambda = k_h / k_z = 6,7 \cdot 10^3$$

Összefoglalva: a kormeghatározás alapján a teljes negyedkori rétegösszletre számított átlagos hidraulikai adatok a következők:

)További feladatok az izotóp-hidrogeológia alkalmazásában

Az elmúlt harminc év kutatásainak köszönhetően Magyarország úttörő szerepet játszott az izotóp-hidrogeológia gyakorlati alkalmazásában, így hazánk (főleg az Alföld és a Szigetköz) a világ egyik legjobban feltárt területévé vált. Legfontosabb feladatunk az eddigi eredmények megismertetése hidrogeológus kollegáinkkal, és az izotópos módszerek népszerűsítése révén rutin módszerré tenni azokat. Erre úgy tűnik, hogy lehetőség adódik a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) és az IHP 2002-ben megindított közös programja (Joint International Isotope Hydrology Program = JIIHP) keretében. A JIIHP egyik pontjaként sikerült elfogadtatni, hogy Kelet-Európa hidrogeológus szakemberei részére Budapesten kerül sor egy izotóp hidrogeológiai kurzusra, várhatóan sok magyar hallgató részvételével.

A dolgozatban csak a legfontosabb hazai eredményeket sikerült bemutatni, ezért egy részletesebb publikációs jegyzéket mellékelünk, illetve készen állunk a személyes konzultációkra is.

A VITUKI-ban végzett izotóp hidrogeológiai kutatások legfontosabb publikációi

- Ballentine, C.J., - O'Nions, R.K. - Oxburgh, .R. - Horváth, F. - Deák, J. (1991):
Rare gas constraints on hydrocarbon accumulation, crustal degassing and groundwater flow in the Pannonian Basin - *Earth and Planetary Science Letters* 105. pp. 229 - 246
- Berecz T. – Fórizs I. – Deák J. (2001):
Felszín alatti vizek környezeti izotópos és kémiai vizsgálata a Duna-Tisza köze déli részén - *Hidrologiai Közlöny, Vol. 81. No 2. pp. 118-124.*
- Bérci, K. - Deák, J. - Friedrich, V. - Házi, E. - Juhász, J. - Maleczki, E. - Mojzes, A. (1988):
Safety assesment and investigations for a shallow land disposal facility in Hungary.- *International Symposium on Management of Low- and Intermadiate-level Radioactive Wastes Stockholm, 16-20 May, 1988. IAEA-SM-303/14.5*
- Boroviczeny, F. - Deák, J. - Liebe, P. - Mahler, H. - Neppel, F. - Papesch, W. Pinczés, J.-
Rajner, V. - Rank, D. - Reitinger, J. - Schmalfuss, R. - Takáts, T. (1992): .
Wasserhaushaltstudie für den Neusiedlersee mit Hilfe der Geophysik und Geochemie 1980 – 1990. - *Technische Universitat Wien, Forschungsbericht 16.*
- Deák J. (1973):
Természetes radioizotópok alkalmazása a felszínalatti vizek kutatásában. - *Magyar Geofizika, XIV. 5-6. pp. 200-211*
- Deák J. (1974):
Izotóptechnikai módszerek alkalmazása a Tiszántúlon, a talaj-, a mélységi- és a felszíni víz kapcsolatának vizsgálatára. - *Beszámoló a VITUKI 1972. évi munkájáról, 3.7, pp. 317-334.*
- Deák, J. (1975):
Use of environmental isotopes to investigate the connection between surface and subsurface waters in the Nagyunság region, Hungary. - *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, pp. 157-167. IAEA, Vienna.*
- Deák, J. (1976):
Study of the recharge of deep ground waters and their connection with shallow groundwaters using environmental isotopes in the Nagyunság region, Hungary. - *Hydrogeology of Great Sedimentary Basins, IAHS Conf., Budapest pp. 733-744.*
- Deák, J. (1979):
Environmental isotopes and water chemical studies for groundwater research in Hungary. - *Isotope Hydrology 1978. pp. 221-249., IAEA, Vienna.*
- Deák, J. (1980):
Radiocarbon dating of the thermal waters in the Budapest area. - *Zentralinstitut für Isotopen, Mitteilungen Nr. 30., pp. 257-266, Leipzig.*
- Deák, J. (1980):
Investigation of the supplying and draining process of a regional groundwater flow system, using environmental isotopes. - *Hydrology of areas of low precipitation IAHS. AISH Publ. No. 128. pp. 287-296, Canberra.*

Deák J. (1982):

Az Eger környéki termális karsztvizek korának meghatározása. - *Egyszerű termálvizek komplex hasznosításának kérdései. MHT kiadvány, Eger, pp. 70-81.*

Deák, J. - Stute, M. - Rudolph, J. - Sonntag, C. (1987):

Determination of the flow regime of Quaternary and Pliocene layers in the Great Hungarian Plain Hungary), by D, ¹⁸O, ¹⁴C and noble gas measurements. - *Isotope Techniques in Water Resources Development, IAEA, Vienna.*

Deák, J. – Horváth, F. - Martel, D.J. - O'Nions, R.K. - Oxburgh, E.R. - Stegena, L. (1988): Helium Isotopes in Geothermal Waters from North-West Hungary The Pannonian Basin. - *A study in basin evolution, AAPG Memoir 45. Tulsa Okl. - Budapest pp. 293-296.*

Deák, J. (1989):

Dating the karst thermal waters in the Eger area.. - *Xth International Congr. of Speleology, Budapest*

Deák J., (1989): Környezeti izotóp vizsgálatok eredményei a Maros hordalékkúpon.- *Vízutatási, feltárási és vízbázisképzési munkák eredményei a Maros hordalékkúpon. VGI-MHT kiadvány Békéscsaba, pp. 64-77.*

Deák, J. - Fórizs, I. - Deseő, É. - Hertelendi, E. (1992):

The origin of groundwater and dissolved ammonium in SE-Hungary by environmental isotope data. - *Tracers in Hydrology. IAHS Publ. No. 215. pp. 117-124.*

Deák J. - Hertelendi E. - Süveges M. - Barkóczy Zs. (1992):

Partiszurésú kutak vizének eredete trícium koncentrációjuk és oxigén izotóparányaik felhasználásával. - *Hidrológiai Közöny Vol. 72. No 4. pp. 204 – 21.0*

Deák, J. - Deseő, É. Böhlke, JK. - Révész, K. (1996):

Isotope hydrology studies in the Szigetköz region, Northwest Hungary. - *Isotopes in Water Resources Management IAEA, Vienna, pp. 419-432.*

Deák, J. - Deseő, É. - Davidesz, K. (1996):

Verification of MODFLOW modeling in SE Hungary using environmental isotope and ground water quality data. - *Hydroinformatics, Balkema Zürich, pp. 607-612.*

Deák, J. – Liebe, P. (2000):

Study of shallow groundwater depletion in the area between the Rivers Danube and Tisza. - *Proceedings, „Drought: monitoring, mitigation, effects” Cagliari-Villasimius Symposium.*

Dénes Gy. – Deák J. (1981):

Felszín alatti vizek környezeti izotóp vizsgálata. - *VITUKI témajelentés, 721/1/22.*

Fehér, J. – van Genuchten, M.Th. – Deák, J. (1992):

Estimating long-term water flow rates in the vadose zone using tritium measurements. - *Scientific colloquium on „Porous or fractured unsaturated media: transport and behavior” Monte Verita, Ascona, Switzerland..*

Fórizs, I. – Deák, J. (1998):

Origin of bank filtered groundwater resources covering the drinking water demand of Budapest, Hungary. - *Application of isotope techniques to investigate groundwater pollution, IAEA TECDOC-1046, pp 133-165.*

Fórizs, I. – Berecz, T. – Deák, J. (1999):

Origin and quality of bank filtered groundwater near Budapest, an evaluation of isotope data. - *Isotope Techniques in Water Resources Development and Management, IAEA pp. 27-34.*

Horváth, I. - Deák, J. - Hertelendi, E. - Szóts, T. (1997):

Hydrogeochemical investigations in the Tolna Hills area. - *Annual Report of the Geological Institute of Hungary, 1996/2 (1997), pp. 271-284.*

Martel, D.J. - Deák, J. - Dövényyi, P. - Horváth, F. - O'Nions, R.K. - Oxburgh, E.R. - Segena, L. - Stute, M. (1989):

Leakage of helium from the Pannonian Basin. *Nature, Vol. 342. pp. 908-912.*

Stute, M. - Deák, J. (1989):

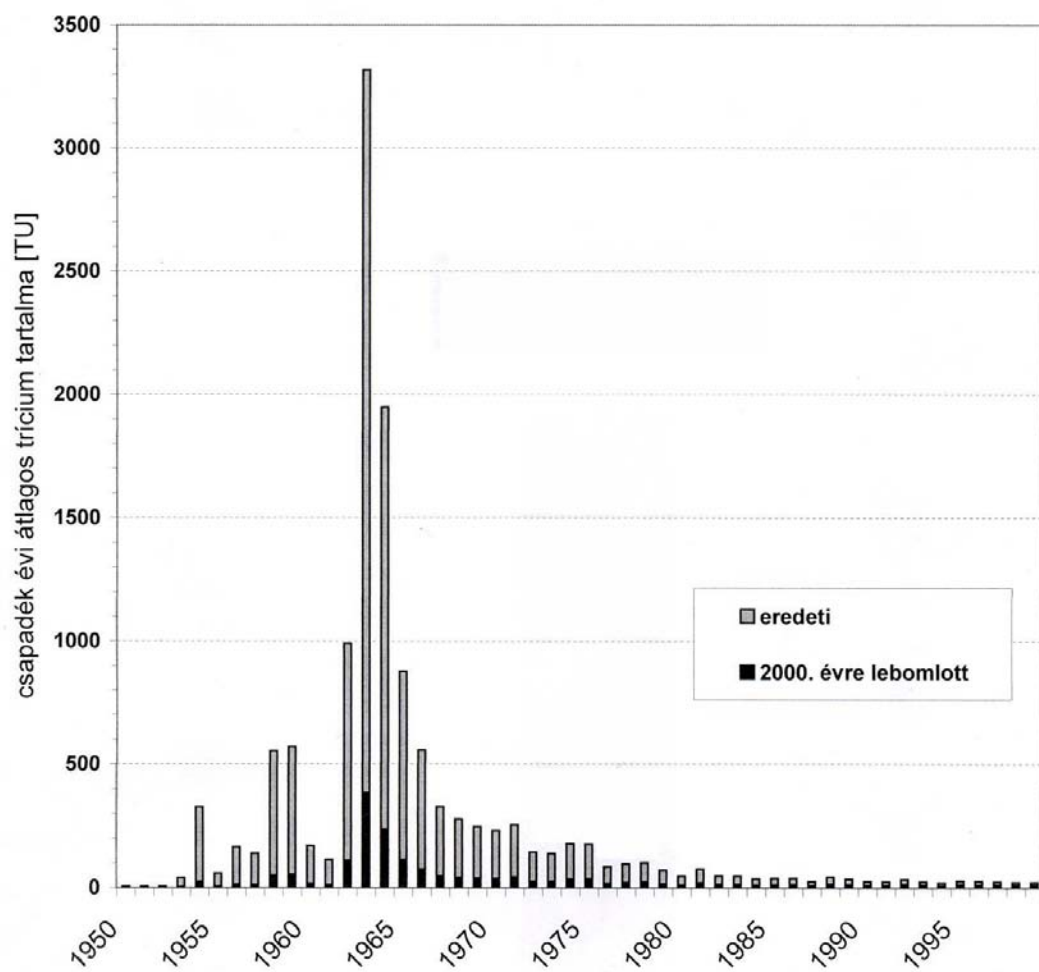
Environmental isotope study (^{14}C , ^{13}C , ^{18}O , D, noble gases) on deep groundwater circulation systems in Hungary with reference to paleoclimate. - *Radiocarbon, Vol. 31., No. 3, pp: 902-918.*

Stute, M. - Sonntag, C. - Deák, J. - Schlosser, P. (1992):

Helium in Deep Circulating Groundwater in the Great Hungarian Plain: Flow Dynamics and Crustal and Mantle He Fluxes. - *Geochemica et Cosmochemica Acta, Vol. 56., pp. 2051-2067.*

Stute, M. - Deák, J. - Révész, K. - Böhlke, J.K. - Deseő, É. - Weppernig, R. - Schlosser, P. (1997):

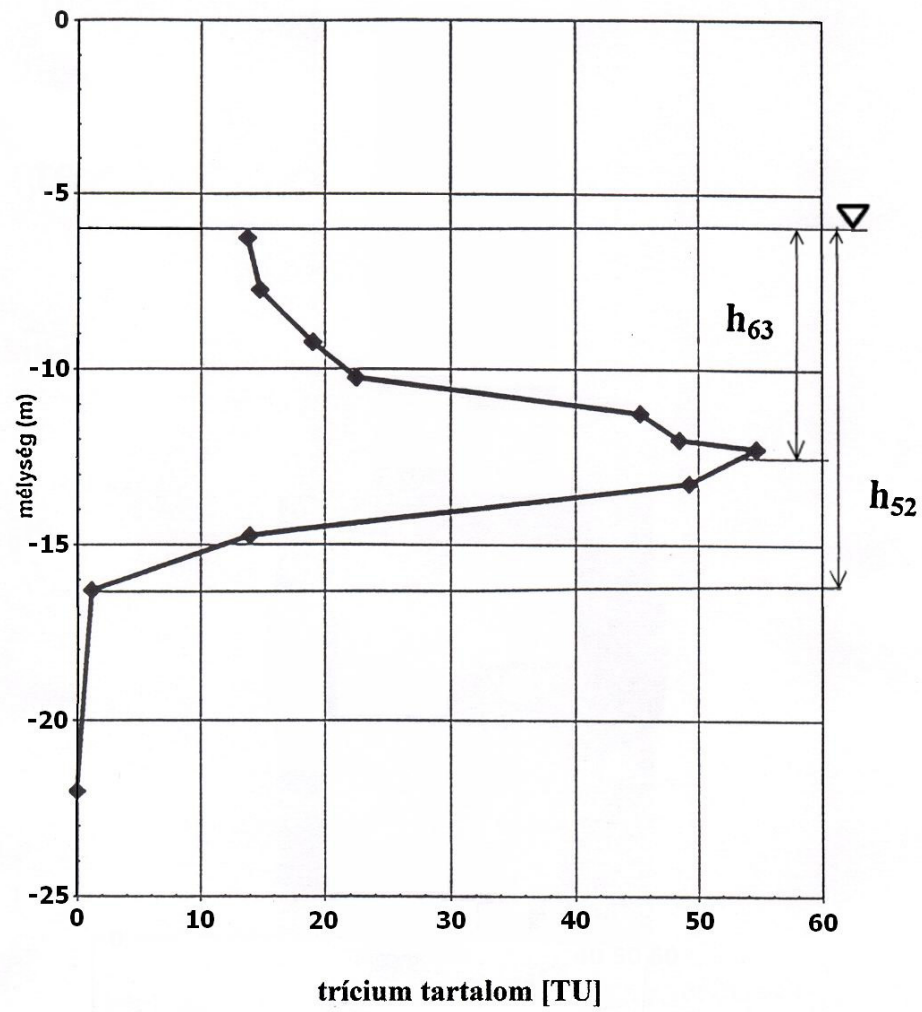
Tritium/ ^3H Dating of River Infiltration: An Example from the Danube in the Szigetköz Area, Hungary. - *Ground Water, Vol. 35, No. 5, Sept.-Oct. 1997, pp. 905-911.*



1. ábra

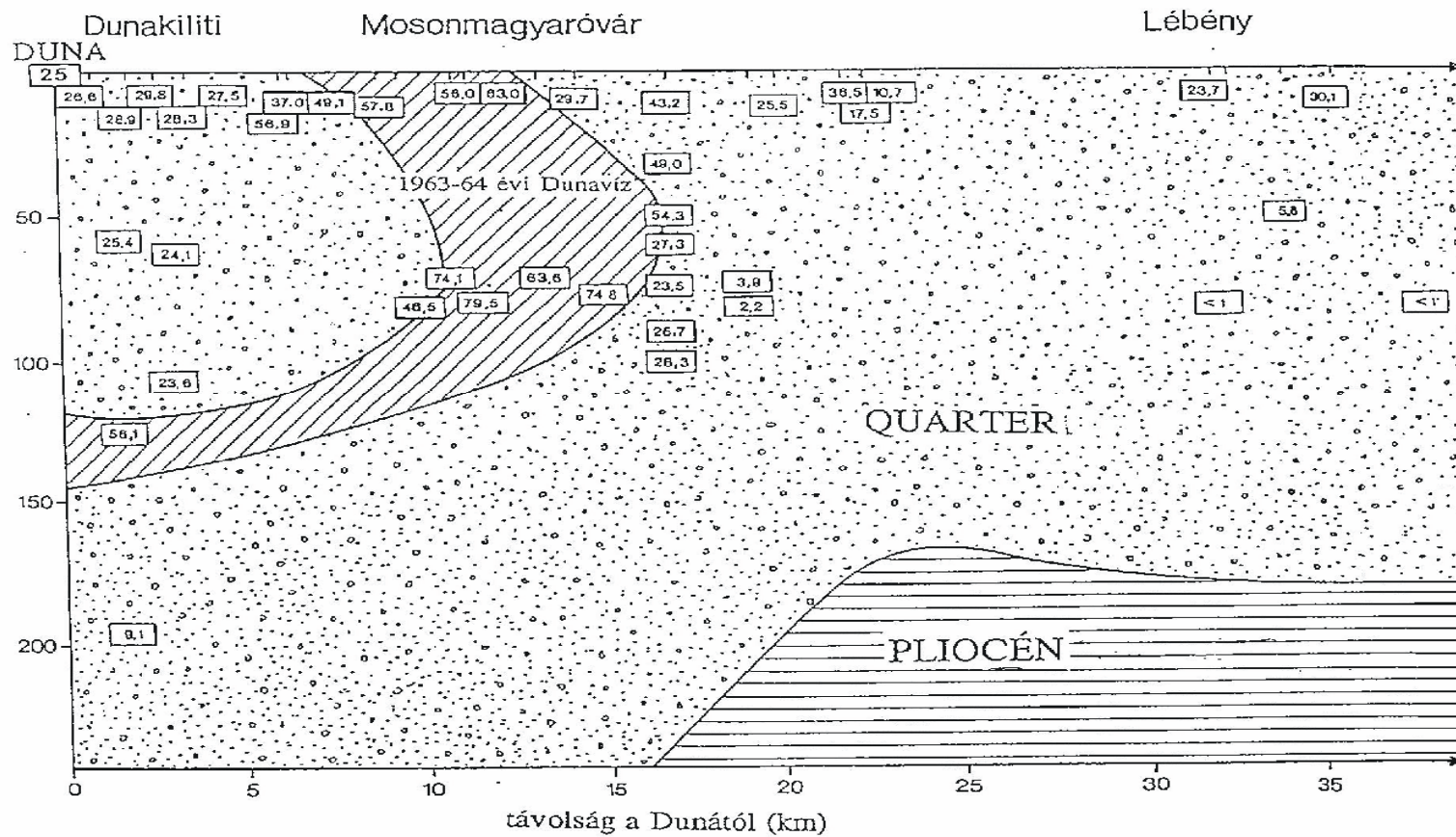
A magyarországi csapadék éves trícium időszora és a 2000. évre lebomlott trícium koncentráció

Méntelek



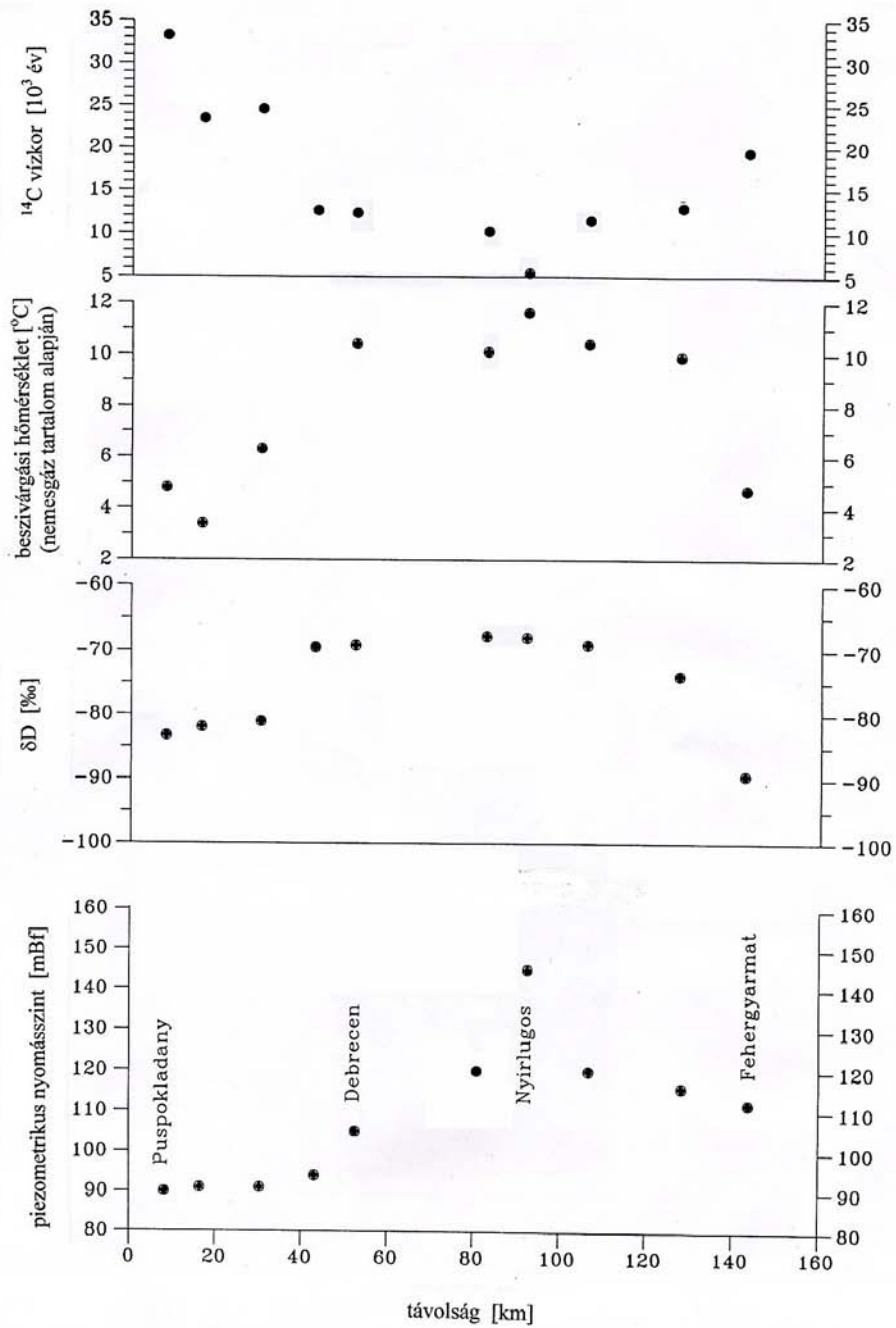
2. ábra

A méntelki fúrás trícium szelvénye



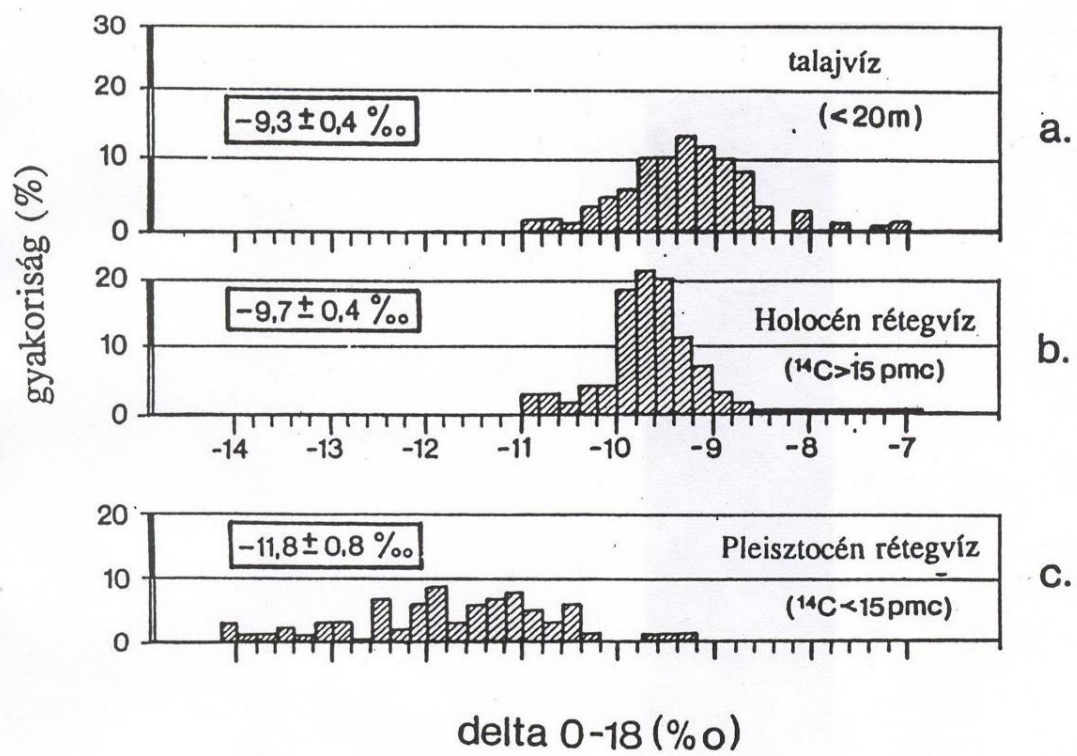
3. ábra

A talaj- és rétegvizek tríciumtartalma a Dunakiliti-Mosonmagyaróvár-Lébény szelvény mentén



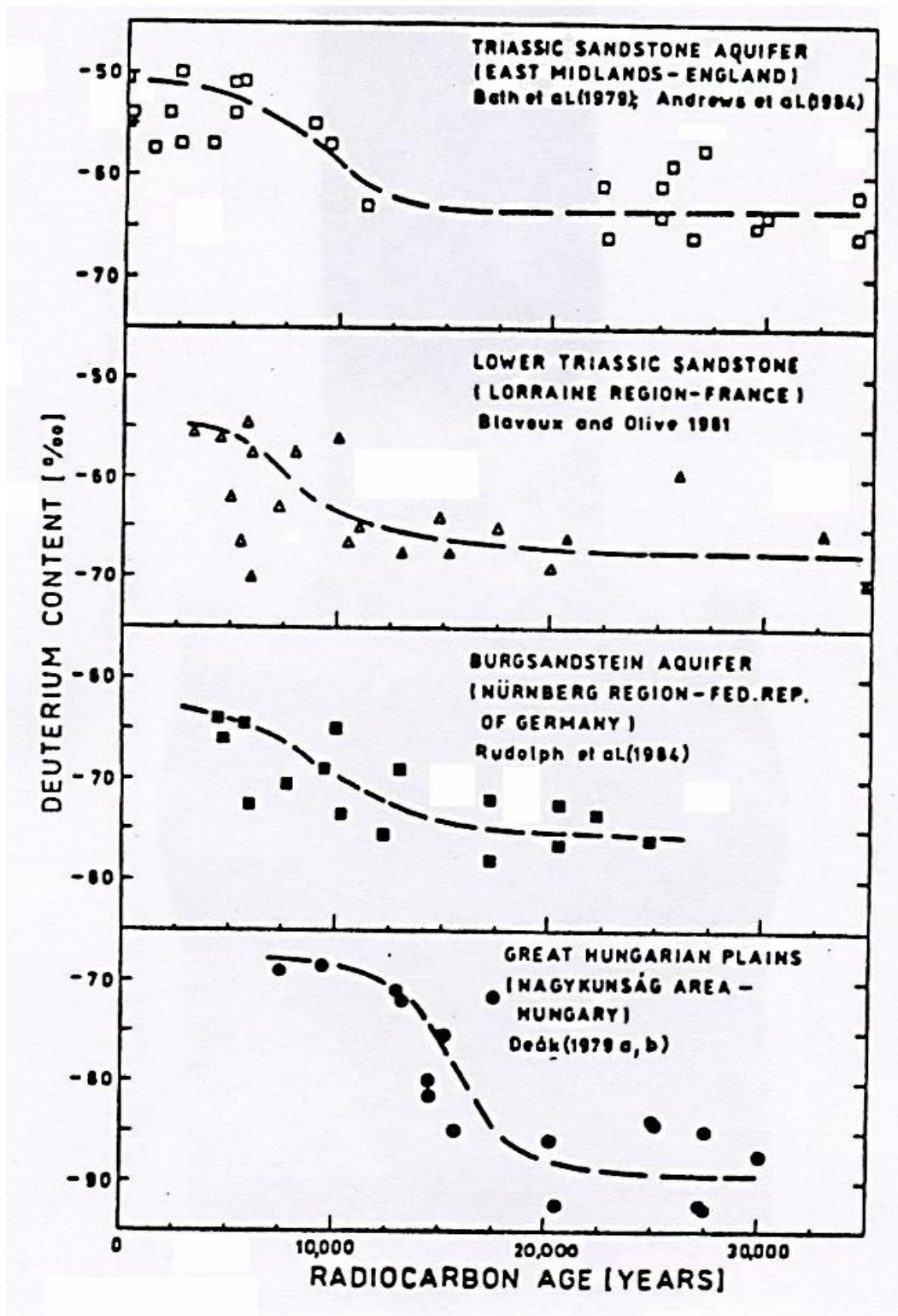
4. ábra

Az alsó-pleisztocén rétegvizek kora és beszivárgáskori hőmérséklete a Fehérgyarmat-Debrecen-Püspökladány szelvény mentén



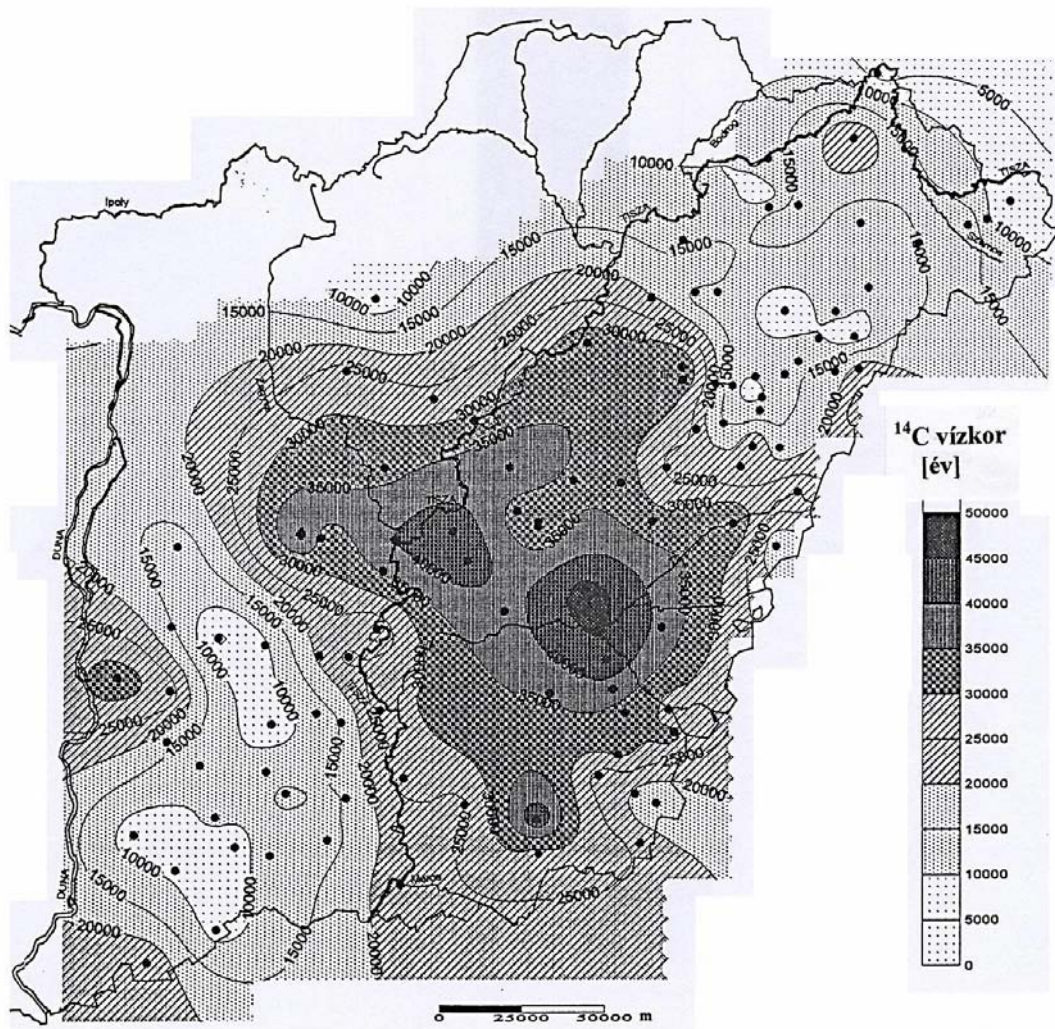
5. ábra

Az alsó-pleisztocén rétegvizek kora és beszivárgáskori hőmérséklete a Fehérgyarmat-Debrecen-Püspökladány szelvény mentén



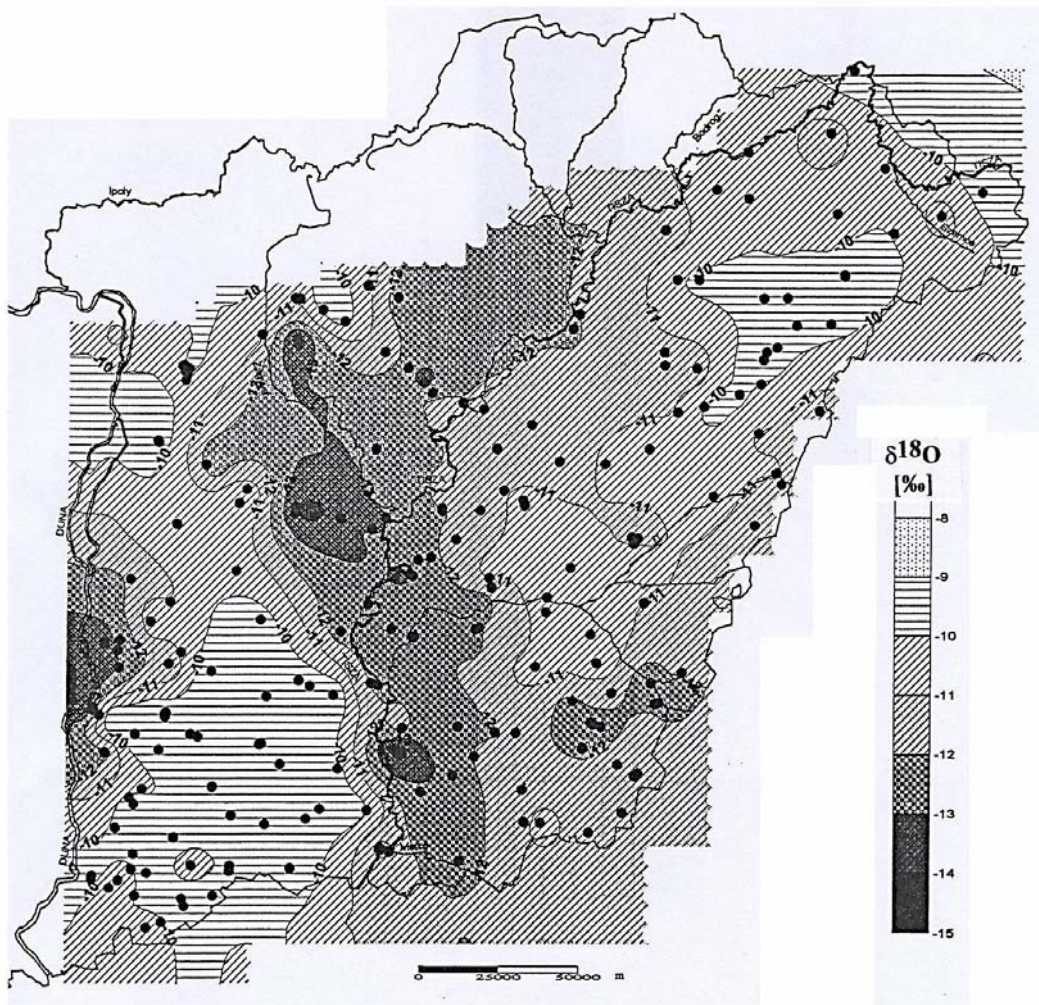
6. ábra

A felszín alatti vizek deutérium tartalmának változása a paleoklimával különböző európai területeken



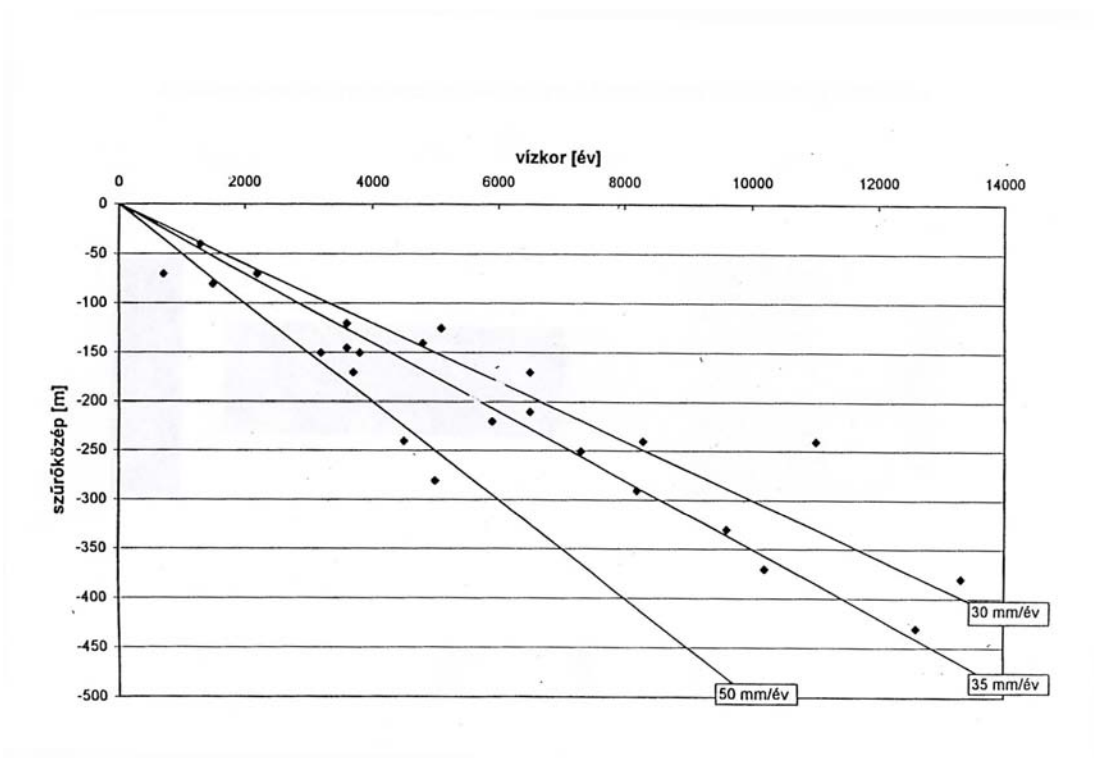
8. ábra

Az alföldi alsó-pleisztocén rétegvizek ^{14}C korának területi eloszlása



9. ábra

Az alföldi alsó-pleisztocén rétegvizek stabil oxigén izotóp összetételének területi eloszlása



10. ábra

A rétegvizek korának változása a szűrőzési mélységgel a Duna-Tisza közti hátság területén

		Méntelek	Fischerbócsa	Kéleshalom
h₆₃	[m]	7	9	1,7
$\square t_1$	[év]	36	36	36
v_z	[mm/év]	190	250	47
B	[mm/év]	38	50	9
h₅₂	[m]	10	-	-
$\square t_2$	[év]	48		
v_z*	[mm/év]	210		
B*	[mm/év]	42		

1.táblázat

Vertikális szivárgási sebesség és beszivárgás ($n_0=0,2$) számítása a trícium profil alapján

		Méntelek		Fischerbócsa	
$\square h$	[mm]	350		150	
$\square s$	[m]	12,8		12,7	
I	[m/m]	$2,8 \cdot 10^{-2}$		$1,2 \cdot 10^{-2}$	
v_z	[mm/év]	200		250	
		$n_0=0,2$	$n_0=0,3$	$n_0=0,2$	$n_0=0,3$
B	[mm/év]	38	57	50	75
k_z	[m/nap]	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
k_z	[m/s]	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$

2. táblázat

A felszín közeli rétegek vertikális szivárgási tényezőjének számítása