

ÉDESVÍZI KAGYLÓK GEOKÉMIAI-PALEOKLIMATOLÓGIAI ELEMZÉSE

OTKA K 68343 sz. projekt

Zárójelentés

Készítette: Demény Attila témavezető

A kutatómunka célja annak feltárása volt, hogy az édesvízi kagylóhéjak geokémiai elemzéséből nyert adatok mennyiben használhatóak fel a Kárpát-medence klímaváltozásainak vizsgálatára, hogyan és milyen mértékben tükrözik a fennálló klímaviszonyokra jellemző hőmérséklet és csapadékmennyiség paramétereit. Ennek érdekében a Balaton és a Tisza vidékén végeztük el egyrészt a jelenleg élő kagylók és az élőhelyüket jelentő víz vizsgálatát, valamint ugyanezen területeken régészeti és üledékföldtani szelvényekből gyűjtött kagylók elemzésével a pleisztocén végén és a holocénben fennállt klímakörülményeket vizsgáltuk. A munka alapja az előfordulások, feltárások és szelvények üledék- és környezetföldtani leírása. Tekintettel arra, hogy ezt a munkát a Szegedi Tudományegyetem kutatói végezték a projekten belül, ezért a jelentés ennek munkának az eredményeivel kezdődik. Ezt a geokémiai vizsgálatok leírása, az egyes projekt egységek végrehajtásában elért eredmények bemutatása követi. Végezetül a projekt egyik fontos célkitűzéséként a korábban – más OTKA projekt keretében – végzett vizsgálatok eredményeivel történő összevetés és az eredmények rövid összefoglalása zárja a jelentést.

TARTALOM

A. Üledékföldtani és -környezeti vizsgálatok

B. Geokémiai vizsgálatok

I. Vizsgálatok a Balaton területén

- 1. A Balaton vizének stabilizotóp-összetétele**
- 2. Modern balatoni kagylók**
- 3. Nagy léptékű klimatikus változások kimutatása**
 - a. A Balatonederics I. fúrás szelvény kagyló- és csigahéjainak geokémiai elemzése*
 - b. A Sárkeszi I. fúrás csigahéj maradványainak stabilizotóp-összetétele*
- 4. A Balatonkeresztúr-Réti dűlő lelőhely rézkori telepei**
- 5. Az Ordacsehi lelőhely bronzkori telepei**

II. Vizsgálatok a Tisza vízgyűjtő területén

- 1. A Tisza vizének és modern kagylóinak elemzése**
- 2. Tiszapüspöki (Kartsú ér) szelvény**
- 3. Kőrösladány, téglagyári szelvény**

C. Egyéb klímarekordokkal történő összehasonlítás

D. Összefoglalás

A. Üledéköldtani és -környezeti vizsgálatok

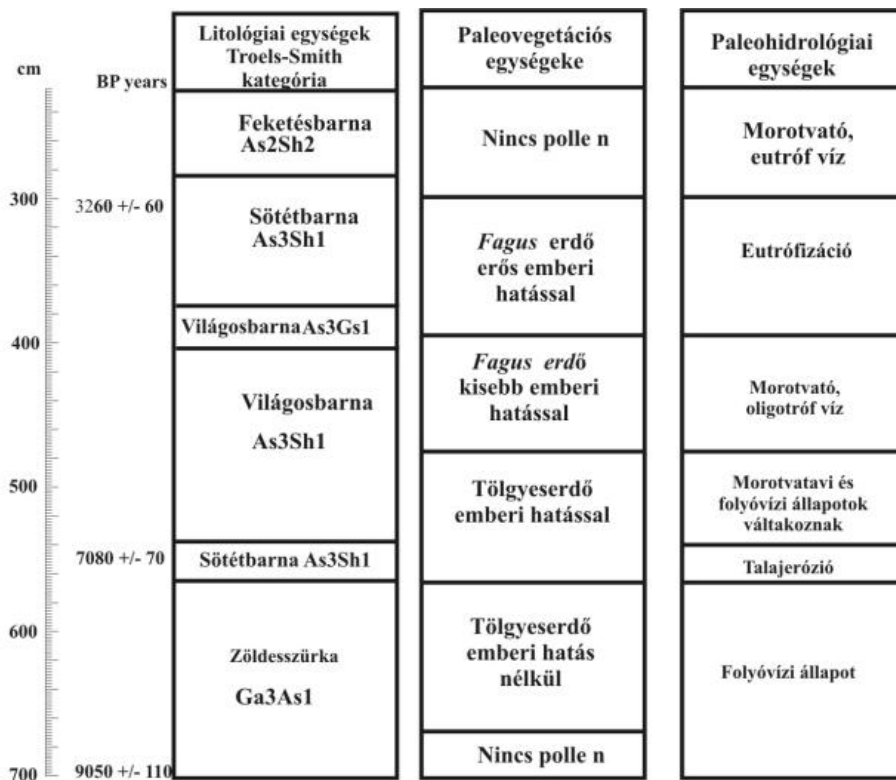
Az alábbiakban a Szegedi Tudományegyetem által tisztázott üledékképződési és környezetalakulási folyamatok leírását adjuk. Az eredmények részben a projektet megelőzően végzett vizsgálatokból származnak, részben a projekt során kialakult elképzeléseket tartalmazzák. A kettőt nem különítjük el, mivel egyrészt a projekt sikeres végrehajtásához alapvető háttérrel nyújtottak, másrészt a projektben elért új eredmények megértéséhez is szükséges az itt következő leírás.

Tiszapüspöki szelvény

A Tiszapüspök község határában, a futballpálya végén elhelyezkedő Kartsú-érben egy viszonylag kisebb méretű vízszabályozó árkot alakítottak ki, így a meder fejlődésének kezdetéről és a holocén vegetáció fejlődéséről itt sikerült a Karancsparthoz, a régészeti ásatás során feltárt Kőrös lelőhelyhez legközelebb üledéköldtani, pollenanalitikai és radiokarbon adatokat nyernünk (1. ábra). A Kartsú meder kevésbé bolygatott felszínéből elindulva 7 méter mély zavartalan magfúrást sikerült lemélyítenünk. A mélyebb szintről a homokos üledékréteg beomlása és visszatöltődése következtében nem sikerült fúrómagot kiemelni, de a meder morfológiai paramétereinek alapján valószínűsíthető, hogy a meder fekszingintje ennél mélyebben helyezkedik el.

A bemosott faszenek radiokarbon elemzése alapján a meder a holocén kezdetén még aktív folyómederként működött, majd megközelítőleg 7000 BP évvel ezelőtt fűződött le és alakult ki a mederben egy dinamikus morotvatavi állapot. A pollenanyag alapján ebben a fejlődési állapotban tölgy dominanciájú (*Quercetum*) keményfás ligeterdő vette körül a vizsgált medret és emberi hatások még nem mutathatók ki a pollenanyagban.

A szedimentológiai arra utalnak, hogy erőteljes üledékbemosódás, terrigén üledék felhalmozódás kezdődhetett el 7000 – 6000 BP évek között. Ezek a változások egybeesnek a folyómeder morotvatóvá alakulásával, de kialakulhattak emberi hatásra is, mert a pollenanyagban – bár továbbra is a zárt keményfás ligeterdei környezet jellemző – megjelennek az állattartásra, növénytermesztésre utaló növények pollenjei (gabonafélék, taposott, legelt területre jellemző gyomok).

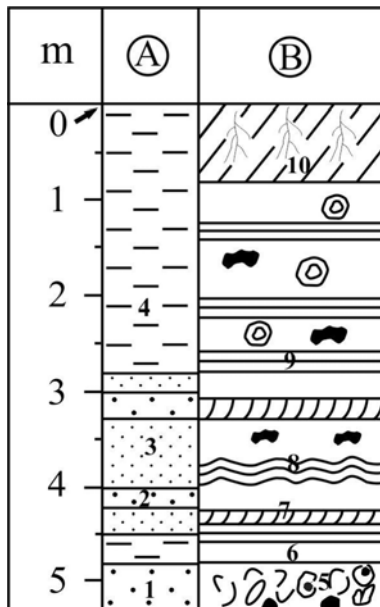


1. ábra. A tiszapüspöki Kartsú ér környezettörténeti vizsgálatának eredményei

A kalibrált radiokarbon adat (cc. 5600 – 5700 CAL BC kor) alapján ez a változás egybeesik az első termelő emberi közösségeknek, a neolitik, Körös kultúrának a megtelepedésével a területen. Kezdetben, kb. 7000 – 4000 BP évek között a kialakult morotvató időszakos folyóvízi elöntéseket kapott és vize tiszta, jól átvilágított, oligotrof - mezotróf jellegű volt, majd a feltöltődés és a fokozatos emberi hatás (erődirtás, legeltetés, talajerózió növekedés) következtében eutróftavi állapot alakult ki a bronzkor végétől. Ekkor már a tavat egy bükk dominanciájú erdő vehette körül. A bükkfa beáramlása vagy a bükkpollen beszállítódása a vizsgált területre kb. 5000 – 5100 BP évnél kezdődött el, de a bükkpollen domináns tényezővé megközelítőleg 4500 BP évtől vált csak. Az emberi hatások a pollenanalitikailag értékelhető szelvénytáblákban a késő-bronzkorban érték el a maximumot. Ettől a periódustól kezdve a pollenanyagot az utólagos kiszáradás (folyószabályozás!) és megsemmisülés miatt már nem lehetett értékelni. A mederben az agyagtartalom növekedése az erőteljesebb talajeróziót és feltöltődésnek a felgyorsulását, a tavi rendszer eutrófizációját jelzik. A meder további fejlődéstörténete a később bekövetkezett (középkori?, újkori) emberi hatások (árokásás, felszíni vízelvezetés) következtében fellépő talajerózió, rétegkeveredés, üledékborotgatás hatására már nem követhető.

Kőrösladányi szelvény

Az 5,2 méteres szelvény egy jégkor végén kialakult és az elmúlt 15-20 ezer év során feltöltődött övzátony csatornában, a kőrösladányi téglagyár falában alakítottuk ki. A szelvény faunáját 25 cm lehetett begyűjteni és megvizsgálni. Az övzátony csatorna feltöltődésére jellemző, hogy jelentős ülepitő energián felhalmozódott, keresztarétegzett folyóvízi homokos összlet, középhomokos apróhomok réteg alkotja a feküképződményt (2. ábra). A fauna összetétele jelentős mértékben hasonlít a holocén második felében a Körös folyóból kimutatható malakofaunára, viszont még jelen vannak a jégkor végén visszaszoruló hidegtűrő alakok. Ez az átmeneti faunaállapot a mainál hűvösebb, csapadékosabb éghajlatra enged következtetni.



2. ábra. A kőrösladányi szelvény rétegsora

A = üledékes komponensek, 1 = apróhomokos középhomok, 2 = középhomokos apróhomok, 3 = apróhomokos finomhomok, 4 = kőzetlisztben gazdag üledékes réteg,

B = üledék szerkezet, 5 = keresztarétegzett üledék, 6 = egyenesen laminált rétegek, 7 = ferdén rétegzett üledékes réteg, 8 = hullámosan rétegzett üledékes összlet, 9 = helyenként egyenesen laminált, karbonátos, vasas kiválásokat tartalmazó réteg, 10 = biogalériákat tartalmazó réteg

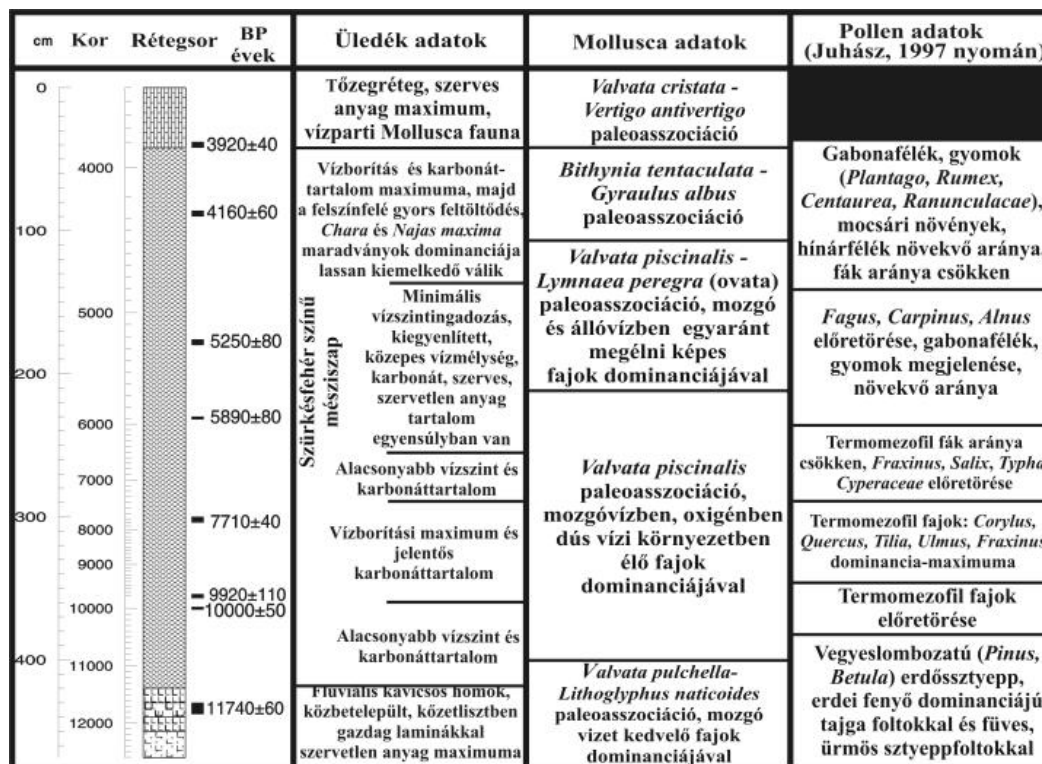
A jégkori folyóvíz keresztarétegzett üledék lerakódását követően, csökkent mozgási energián felhalmozódott, enyhén laminált, de még döntően a mozgóvíz, folyóvíz által szállított üledék akkumulálódott. A fauna összetétele alapján ezzel a változással párhuzamba

hozható a fauna átalakulása is, mert a termofil, délkelet-európai elterjedési centrummal jellemezhető fajok visszaszorultak ebben a szintben és a hidegtűrő fajok aránya lett a szelvényen belül a meghatározó. Valószínűsíthető, hogy az éghajlati változás, a vízgyűjtő területen lecsökkent csapadék bevétele is szerepet játszhatott a szelvényen belül a 4,5 – 2,5 méter közötti szakaszának kifejlődésében, az enyhén laminált, kőzetlisztes sávokkal megszakított egyenesen laminált folyóvízi homokréteg kialakulásában. A változások nyomán a vizsgált terület magasabb ártérre, folyótól távolabbi ártéri régióvá alakult a holocén kezdetén. A jégkori elemek fokozatosan kiszorultak a faunából és a termofil, délkelet európai faunaelemek (*Cepaea vindobonensis*, *Chondrula tridens*, *Granaria frumentum*) váltak domináns taxonokká a csiga- és kagylófaunában.

Sárkeszi szelvény

Az üledékföldtani, őslénytani és radiokarbon elemzések alapján a sárkeszi szelvényben egy a késő-glaciális során elkezdődött és holocén folyamán kiteljesedő folyóvízi – tavi – lápi feltöltődési sorozatot lehetett kimutatni (3. ábra). Ehhez a litofácies sorhoz jellegzetes biofácies változások kapcsolódtak a Mollusca fauna elemzése alapján, kezdetben a mozgó vízben élő fajok, majd a jól átvilágított, tavi környezetben élő fauna elemek, végül pedig a vízparti és eutróf vizekben, lápokban és mocsarakban élő fajok aránya volt a domináns. A Sárkeszi szelvény esetében a tavi környezet szinte az egész holocén során fennállt és csak a Krisztus előtti III. évezred második felében alakult ki az aktív tőzegképző környezet. A tőzegréteg felszínközeli része talajosodott, láp földdé alakult, szerves anyag tartalma lecsökkent, szerves anyag tartalma másodlagos, talajképző folyamatok hatására emelkedett meg.

A malakológiai alapon felállított paleoasszociációk szukcesszió sorozatot alkottak a sárkeszi szelvény esetében is. Ennek a sorozatnak az első fázisa a fluviális faunaközösség a Krisztus előtti 13.000 - 11.000 évek között fejlődött ki. Ez a fauna együttes valószínűleg a sárréti neotektonikus süllyedés kialakulását követően létrejött, a reliefkülönbségek következtében kifejlődött folyóvízi (patak) rendszerhez kötődött a *Lithoglyphus naticoides*, *Valvata piscinalis*, *Unio crassus* megjelenése is. A hidrokarbonátban gazdag, jól átvilágított, igen jelentős Mollusca faunát tartalmazó tavi környezet a Krisztus előtti XI. évezredben fejlődött ki és a fekvő, laminált, közbetelepült kőzetlisztben gazdag rétegeket tartalmazó kavicsos homok rétegre szinte átmenet nélkül, éles réteghatárral települt a fedő mészszipa réteg.



3. ábra. A sárkeszi fúrás környezettörténeti vizsgálatának eredményei

Úgy tűnik, hogy a tavi környezet kialakulásának a kezdetén még a tavi környezet fekvésintje igen jó oxigén ellátású lehetett, így ez a rheofil faunaelem túlélhette ezt a jelentős élettérváltozást. A fauna mellett a terület vegetációja is jelentős mértékben megváltozott, mert a neotektonikus süllyedékben kialakult fluviális rendszert még egy nyitott, ligetszerű, vegyes lombozatú, erdei fenyő, nyír, fű- és ürömfélék dominanciájával jellemezhető sztyeppés tajga vette körül. Majd a süllyedék mintegy 11.000 évvel ezelőtt vízzel feltöltődött és legmélyebb pontjain 3 méter mély, bentonikusan eutrofizálódott, jól átvilágított tó alakult ki a vizsgált területen. Ezzel egy időben a süllyedéket övező vegetáció is megváltozott és fokozatosan termomezofil dominanciájú lombos erdő alakult ki a holocén kezdetén kifejlődött tó körül.

A tavi környezet kialakulásával párhuzamosan meszes üledék halmozódott fel az üledékgyűjtő medencében, amelynek karbonáttartalma a tavi üledékképződés kezdetén 30-50 % volt mindkét fúrásaszelvényben, de a sárkeszi fúrás esetében egy igen széles sávban 30 % és 80 % között mozgott a karbonáttartalma a mészsizap rétegnek. Az eddigi adatok alapján a karbonáttartalom növekedése a csapadékosabb éghajlaton kialakult magasabb vízállás kialakulását követően jöhetett létre, amikor az erózió, bemosódás és bentonikus eutrofizáció folyamata felgyorsult és a tófenéken kifejlődött csillárcamoszat (*Chara*) vegetáció sűrűbbé vált. A szervesetlen anyag tartalom többször is erőteljesen megváltozott és ennek nyomán az erózió és üledékakkumuláció, a tavi környezet megváltozását rekonstruáltuk.

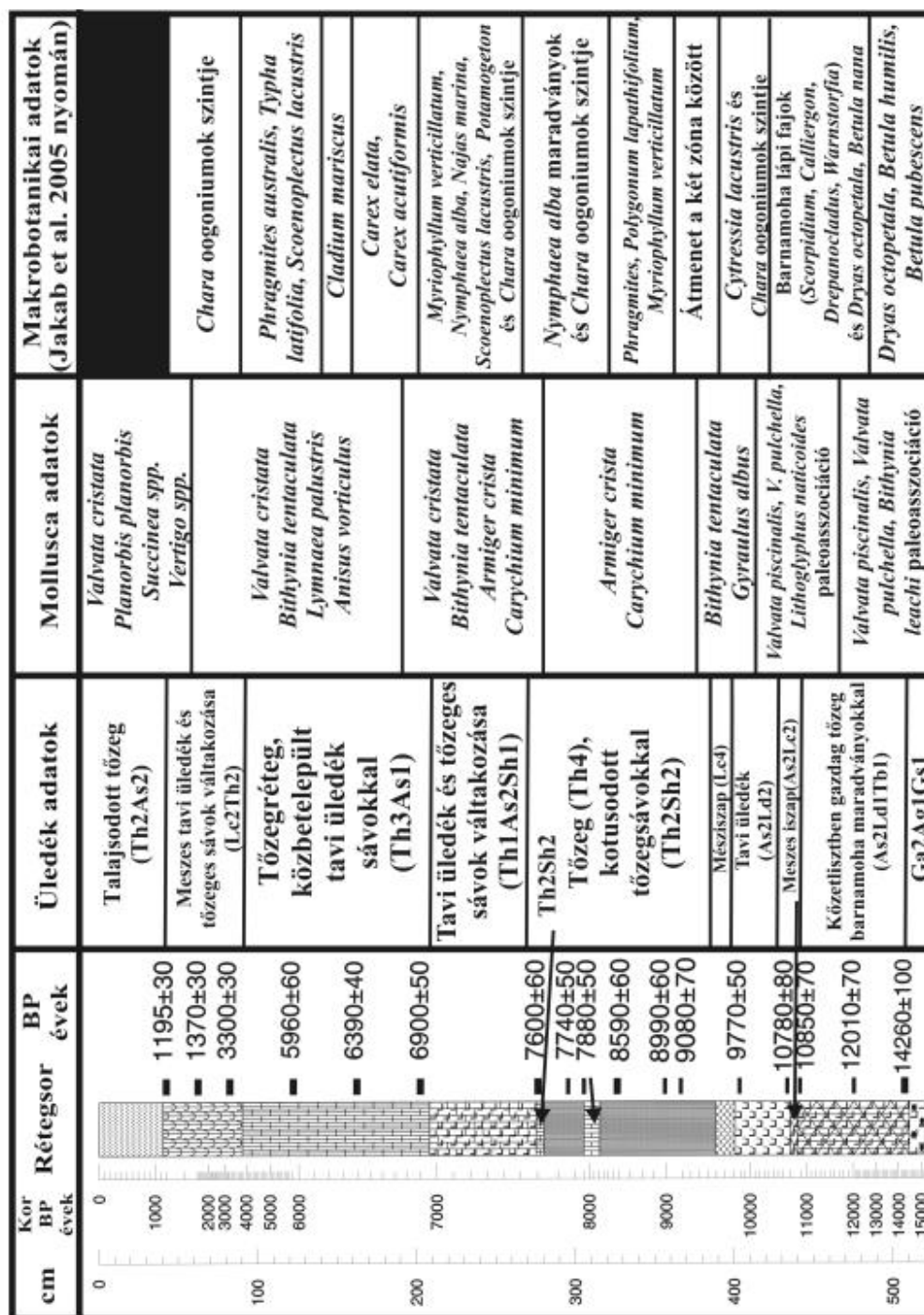
Az üledékfelhalmozódás sebességében bekövetkezett változások okai a neotektonikus folyamatokban, a medence süllyedésének intenzívebbé válásában és ezzel párhuzamosan a feltöltődés sebességének felgyorsulásában keresendők, illetve a tó vízszintjének változásai, valamint a termelő gazdálkodást folytató emberi közösségeknek a tó környékén kifejtett, eróziót és így a feltöltődést gyorsító tevékenységeivel (megtelepedés, földművelés, állattenyésztés) hozhatók összefüggésbe.

Balatonedericsi szelvény

Az üledékföldtani paraméterek és a Mollusca fajok arányváltozásai, jelenléte, vagy hiánya alapján, valamint a korábban már közölt makrobotanikai anyag fejlődése nyomán a következő fejlődéstörténeti szakaszokat lehetett elkülöníteni a Szigligeti-öbölben mélyített Balatonederics I. fúrászelvény feldolgozása nyomán (4. ábra). Az üledék felhalmozódása a vizsgált területen a radiokarbon kormeghatározás alapján 16790-16390 cal BP évek között indult meg. Az üledéksor a késő-glaciális és kora-holocén rétegekben is hiánytalan és folyamatos, ami eddig egyedülálló a Balaton ezen részéről. Egy neotektonikus medence kialakulása Krisztus előtti 16.000 BP év környékén, majd a kialakuló durva, kavicsos homokkal fedett medencealjzaton a késő-glaciális kezdetén egy arkto-alpin elterjedésű elemekkel jellemezhető barnamoha lápon, fokozatosan növekvő vízborítás mellett hidegtűrő, hidegkedvelő faunaasszociáció jelent meg egy jellegzetes felső-würm kor végére, a késő-glaciális kor kezdetére tehető hideghullámban, a medencében mikroklimatikusan kifejlődött hidegzugban. Erre a szintre a késő-glaciális második felében egy vegyeslombozatú tajgaelemekkel, fenyőfélékkel fedett barnamohaláp települt (4. ábra). A késő-glaciális korban a legalacsonyabb vízszint Krisztus előtti 12.000 évnél, a legmagasabb 10.500 – 11.000 évek között fejlődött ki. Adataink nyomán úgy tűnik, hogy a hidegebb szakaszokban (stadiális szintekben) a kialakuló tó vízszintje magasabb volt, mint az enyhébb éghajlati (interstadiális) szakaszokban. A holocén kezdetén, a Krisztus előtti 9.500-9.000 évek között a medencében a legjelentősebb, több méteres vízborítás fejlődött ki.

Ez a változás a megnövekedett csapadék mellett esetleg egy intenzívebb süllyedéssel, neotektonikus süllyedés erőteljesebbé válásával is összefüggésbe hozható. A maximális vízborítást követően a tómedence feltöltődése felgyorsult és ugyan a holocén során több ciklusban vízborítási változások alakultak ki. A holocénben a legalacsonyabb vízszintek a Krisztus előtti 8.000 és 7.900, 6.600 - 6.500 évek, illetve 5.800 - 5.600 évek között alakultak ki az üledékföldtani és a malakofaunisztikai adatok alapján. A balatonedericsi szelvény vízborítási adatait, tófejlődési szakaszait összehasonlítva más európai területeken nyert

vízborítási elemzésekkel egyértelműen kitűnik, hogy Balaton a késő-glaciálisban a balkáni területekre jellemző, míg a holocén folyamán az észak-európai tavakra jellemző vízszintváltozásokat követi. Az üledései ráta alapján az üledékföldtani minták 100-140 év felbontást, a malakológiai minták 140-250 év felbontást tettek lehetővé, így az általunk rekonstruált vízszintingadozások és éghajlati változások, mintegy 500-1500 naptári évet fogtak át.



4. ábra. A balatonedericsi fúrás környezettörténeti vizsgálatának eredményei

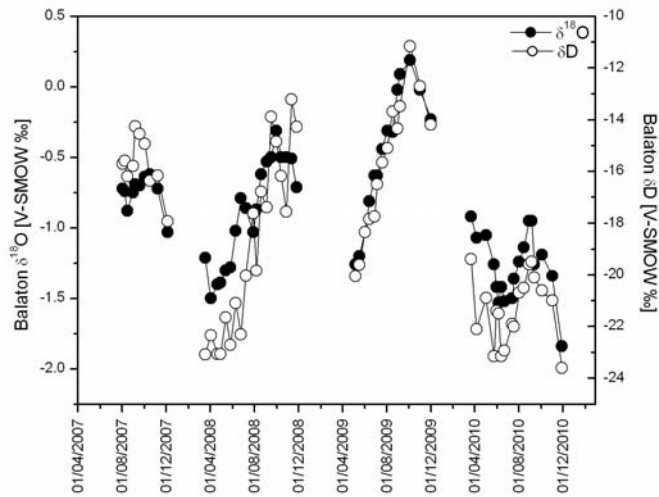
B. Geokémiai vizsgálatok

I. Vizsgálatok a Balaton területén

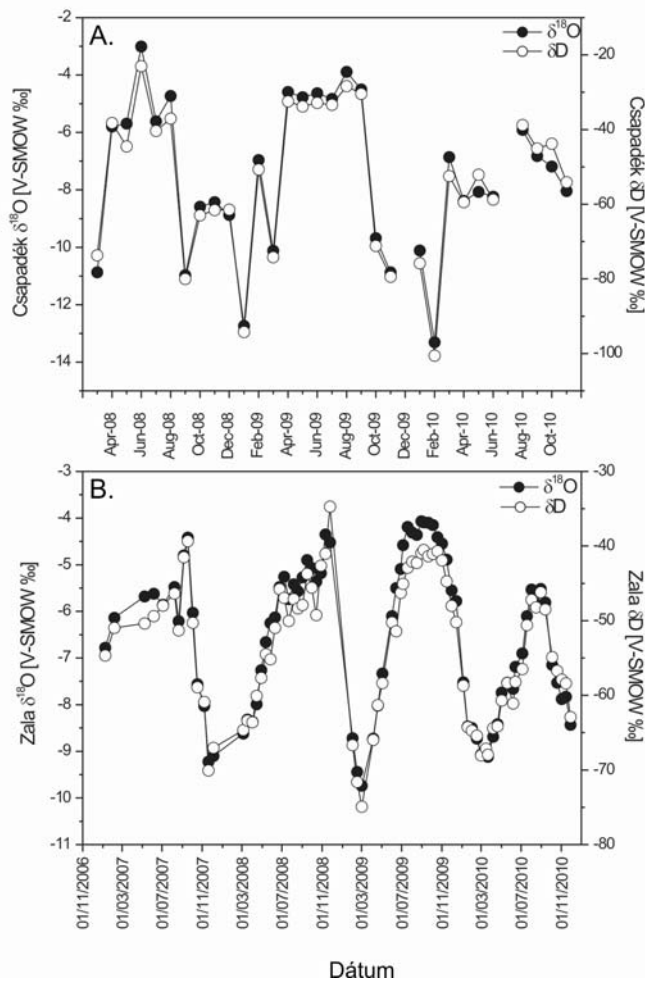
1. A Balaton vizének stabilizotóp-összetétele

Mivel a kagylóhéjak oxigénizotóp-összetétele a hőmérséklet mellett a környezetüket alkotó víz izotópösszetételétől is függ, ezért a kutatási terv részeként a Balatonból származó kagylóhéjak mellett a tó vizének stabilizotópos viselkedését is vizsgáltuk. Ezt Siófoknál történt kéthetenkénti mintázásával és a vízminták stabil oxigén- és hidrogénizotóp összetételének mérésével valósítottuk meg (5. ábra). A tó izotóp-összetételének vizsgálatát kiegészítettük a vízgyűjtő területre hulló csapadék és hozzáfolyás (a tó vízháztartását leginkább befolyásoló hidrológiai tényezők) mintázásával és izotóp-összetételének mérésével. Közel egy éven keresztül (2008-ban) a csapadékmintavétel párhuzamosan két helyről történt (Keszthely és Balatonszemes), melynek célja a lehetséges fronthatások okozta izotóp-összetétel különbségek vizsgálata volt a Balaton két pontján. Mivel a két helyről vett minták izotóp-összetételében számottevő különbség nem volt kimutatható, ezért a további években (2009-2010) csak egy helyről (Keszthely) gyűjtöttünk és mértünk csapadékmintákat (6. ábra). A tó legnagyobb hozzáfolyásának, a Zalának vizsgálata kétheti mintavétellel valósult meg, melynek köszönhetően három és fél éves $\delta^{18}\text{O}$ és δD -adatsor áll rendelkezésünkre (6. ábra). A tó négy részmedencéjében azonos időintervallumokban (2009. május-november; 2010. március-november) történt mintavételezés eredményeképpen a tó hossz tengelye mentén fennálló izotóp-különbséget mutattunk ki, mely a Zala hozzáfolyásától távolodva a párolgás hatását jelzi. Bár a víz izotópösszetétel mérésének elsődleges célja, hogy alapul szolgál a kagylóhéjak izotóp-összetételének értelmezéséhez, a mintegy 320 szisztematikus mintavétel eredménye alkalmas arra, hogy a tó izotóp-hidrológiai viselkedését is feltérképezzük, mind időbeli, mind térbeli változásokat nyomonkövetve.

A tó izotópösszetételét tekintve erőteljes szezonális hatás figyelhető meg. Ennek oka, hogy a tó vízháztartását és izotópösszetételét befolyásoló klimatikus tényezők (csapadék, hozzáfolyás és párolgás) hatása időben eltér. Míg tavasszal a csapadék és hozzáfolyás hatása a kiemelkedő, amely negatív $\delta^{18}\text{O}$ és δD értékű víz hozzáadódásával (6. ábra), negatív irányba tolja el a tóvíz δ értékét (5. ábra), addig a nyári időszakban a párolgás hatása dominál.



5. ábra. A Balaton víz izotópösszetétele ($\delta^{18}\text{O}$ és δD értéke) Siófoknál 2007. augusztus és 2010. decembere között.



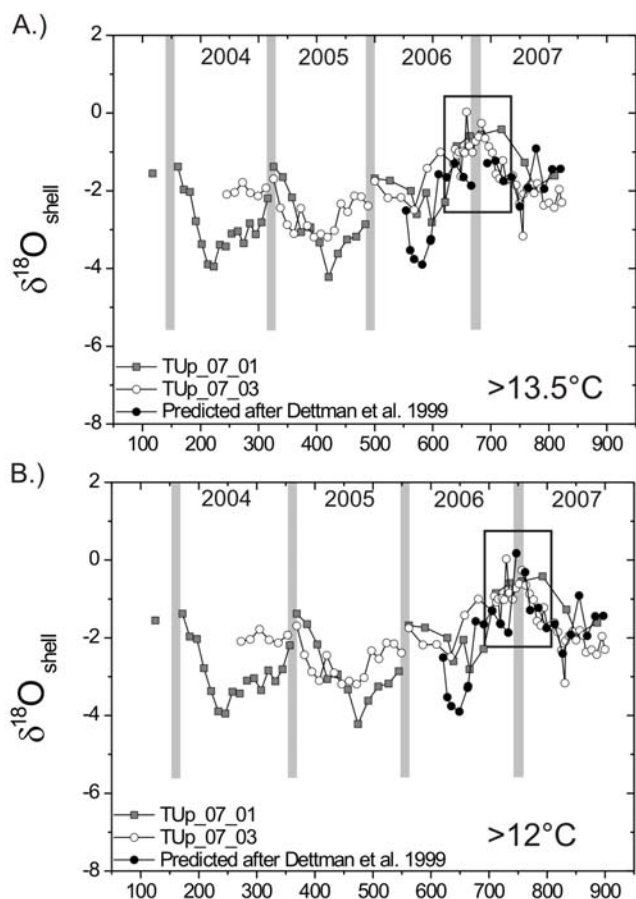
6. ábra. A tóra hullott havi csapadék izotópösszetétele ($\delta^{18}\text{O}$ és δD értéke) Keszthelynél 2008. március és 2010. november között (A). A tó legjelentősebb hozzáfolyásának, a Zalának izotóp-összetétele (B).

A vízfelszínről távozó pára összetételét nem lehet megmérni, kiszámítására a Craig-Gordon modell alkalmazható. A számítások alapján a vízfelszínről eltávozó pára havi átlag $\delta^{18}\text{O}$ értéke a Balaton esetében $-7,9 \pm 5,8 \%$, összetétele jellemzően a könnyű izotópok nagymértékű arányát mutatja. A pára oxigénizotóp-összetétele szezonális változást mutat, maximum értékeit a tavasz/nyári hónapokban, minimum értékeit a téli hónapokban éri el. Ismert összetételű tóvíz és a tóra ható klimatikus paraméterek (csapadék, hozzáfolyás, párolgás) izotópos hatása lehetővé teszi az izotóp-egyensúlyi modell alkalmazását a Balatonra. A modell alkalmazásával a fennálló klimatikus paraméterek (csapadék, párolgás és hozzáfolyások) hatása a víz és a kagylóhéj oxigénizotóp-összetételére számszerűsíthetővé vált.

A vizsgált időszakban (2007-2010) alkalmunk nyílt szélsőséges év hatásának megfigyelésére. A 2010-es rendkívül csapadékos klíma jelei mind a víz $\delta^{18}\text{O}$ -adatsorban, mind az időszakot lefedő kagylóhéj $\delta^{18}\text{O}$ -adatsorában kimutathatóak. A megnövekedett csapadékmennyiség (évi) erőteljes negatív irányú eltolódást okozott a víz és a kagylóhéj $\delta^{18}\text{O}$ értékében is. Az OTKA projekt keretein belül vizsgált időszakot kiterjesztettük előzetes vizsgálatok során feldolgozott évek eredményeivel, így tíz év (2001-2010) kagyló és víz izotópösszetételét vizsgálhattuk hidrológiai szempontból eltérő (sokszor szélsőséges időjárású) években. A víz és a kagylóhéjainak oxigénizotóp-összetétele és a klimatikus tényezők hatását jelző meteorológiai mérőszámok (csapadékmennyiség, természetes vízkészletváltozás etc.) között erős kapcsolat mutatható ki.

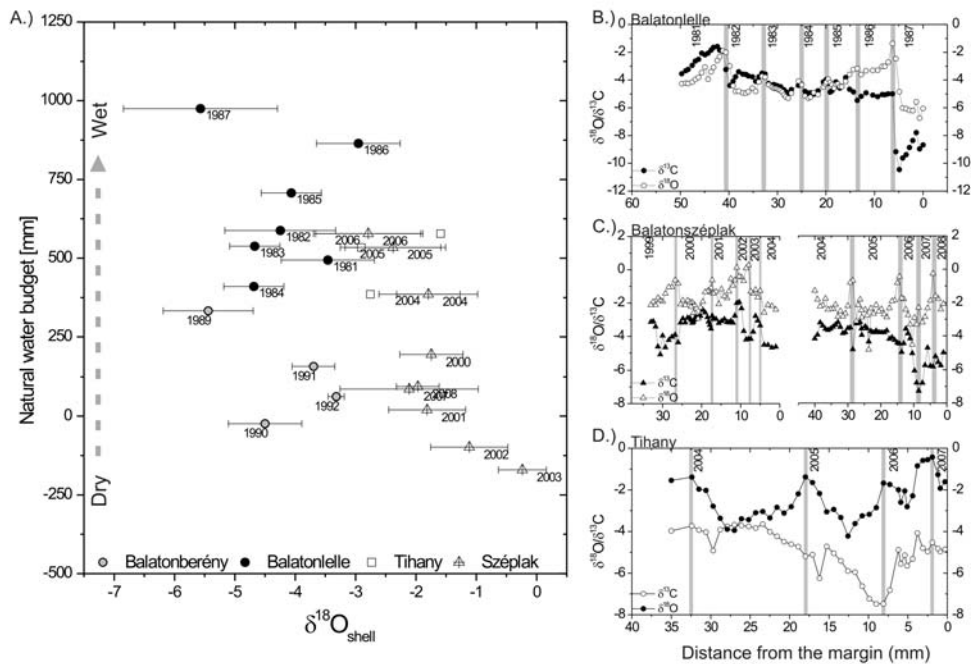
2. Modern balatoni kagylók

Élő *Unio* kagylókat Tihany, Széplak, Balatonlelle és Balatonberény mellett kb. 3 méteres vízmélységből gyűjtöttünk. A növekedési vonalakat polírozott felszíni csiszolaton és/vagy vékonycsiszolaton vizsgáltuk, a téli növekedési leállásokat ennek alapján határoztuk meg. Ezt követően a téli sávok között (kb. áprilistól októberig) egyenletesen osztottuk fel a kagylóhéjat és a mérési pontoknak ez alapján adtunk feltételezett dátumot. A Tihanynál vett minta esetében a vízmonitoring adatokkal, a többi lelőhely esetében a tó vízháztartási adataival vetettük össze a kagylók izotópösszetételeit. A monitoringból származó hőmérséklet-és vízösszetételei adatok, valamint Dettman et al. (1999) frakcionációs összefüggésének felhasználásával kiszámítottuk a vízzel egyensúlyban levő aragonit oxigénizotóp-összetételét, majd ezt összevetettük a kagylókon mért adatokkal (7. Ábra).



7. ábra. 12 és 13.5 °C-os kagylónövekedési limit esetében vízösszetételből és hőmérsékletből számított, valamint a héjakon mért oxigénizotóp-összetételek.

Másik lehetséges megközelítés a monitoring adatok hiányában az egyes évekre jellemző kagylóösszetétel és a tó vízháztartásának összevetése. Mint az 8. ábrán látható, a kagylók $\delta^{18}\text{O}$ értékei jó összefüggést mutatnak a vízháztartási adatokkal. A két vizsgálat eredménye azt jelzi, hogy a balatoni kagylók stabilizotóp-összetételei jól használhatóak a környezeti paraméterekben beállt változások kimutatására és alkalmazhatóak a múltbeli változások elemzésére.



8. ábra. Modern kagylók oxigénizotóp-összetételei és azoknak a Balaton természetes vízháztartásával való összefüggés.

3. Nagy léptékű klimatikus változások kimutatása

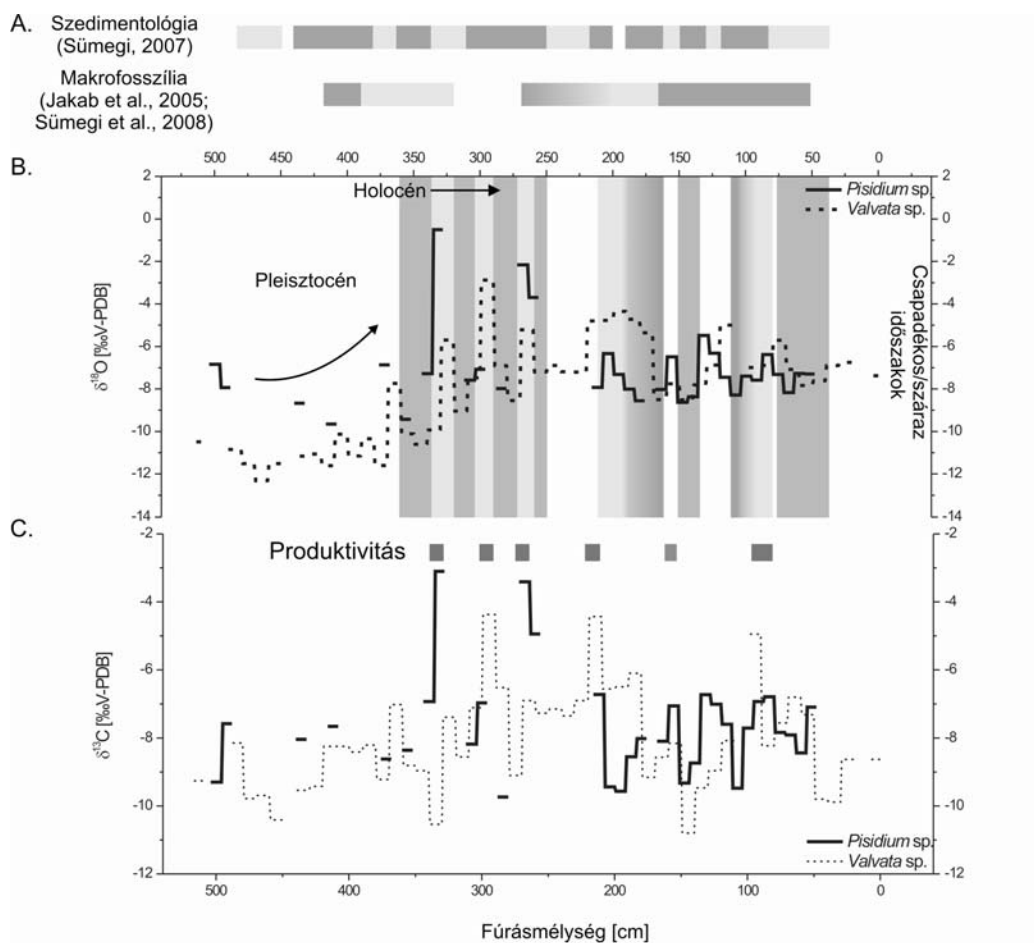
A szedimentológia, makrofossziliák és pollenek vizsgálatán alapuló tavi környezetváltozás, csapadék okozta vízszint rekonstrukciók kiegészítésére a Balaton környékéről két olyan fúrás volt alkalmas, melynek kagyló- és csigahéjain végzett szén és oxigénizotóp-összetételek elemzésével nagy felbontású (akár 100-200 éves), de ugyanakkor szélesebb időskálán (17000 BP-től 2500 BP-ig) történő klíma- és környezet-rekonstrukció vizsgálata valósítható meg.

a. A Balatonederics I. fúrásaszelvény kagyló- és csigahéjainak geokémiai elemzése

A Balatonedericsnél lemélyített mintegy 520 cm hosszú magfúrás 33 szintjéből 52 *Pisidium* sp. kagyló és 47 szintjéből 47 *Valvata* sp. csigahéj oxigén- és szénizotóp-elemzését végeztük.

A modern kagylóhéjak vizsgálata alapján a héjak $\delta^{18}\text{O}$ értékek pozitív irányú eltolódásait a párolgás hatásának tulajdoníthatjuk, míg negatív irányú eltolódása a csapadék és a hozzáfolyások megnövekedett arányát jelzi. Ennek megfelelően a fúrásból mért héjak összetételének megváltozása alapján csapadékos és száraz időszakok különíthetők el. A fúrás legidősebb szakaszából vett héjak a késő Pleisztocén időszakát reprezentálja. A teljes adatsorral összevetve - bár a *Pisidium* adatsor hiányos - a mért *Valvata* csigahéjak

negatív $\delta^{18}\text{O}$ értékei figyelhetők meg, amely a csapadék hatását feltételezi. A csapadék mennyiségének megnövekedése mellett, a Pleisztocén időszakára jellemző alacsonyabb hőmérséklet következtében negatív irányba eltolódott csapadék $\delta^{18}\text{O}$ érték (Dansgaard, 1953) közvetve okozza a héj $\delta^{18}\text{O}$ értékének negatív irányú eltolódását. Az egész időszakra vetített abszolút minimum $\delta^{18}\text{O}$ értékét (-12,3 ‰) 470-465 cm-nél éri el (az interpolált koradatok alapján ~14000 BP) (9. ábra). Az izotóp-adatok alapján a pleisztocén/holocén határ az oxigénizotóp-összetétel fokozatos pozitív irányú eltolódásában mutatkozik egészen 360 cm-ig (~10200 BP), ahol az összetétel az eddigihez képest erőteljes dúsulást mutat a nehezebb izotópban (^{18}O), ami a párolgás hatását jelzi csökkenő csapadékmennyiség és növekvő hőmérséklet mellett (9. ábra).

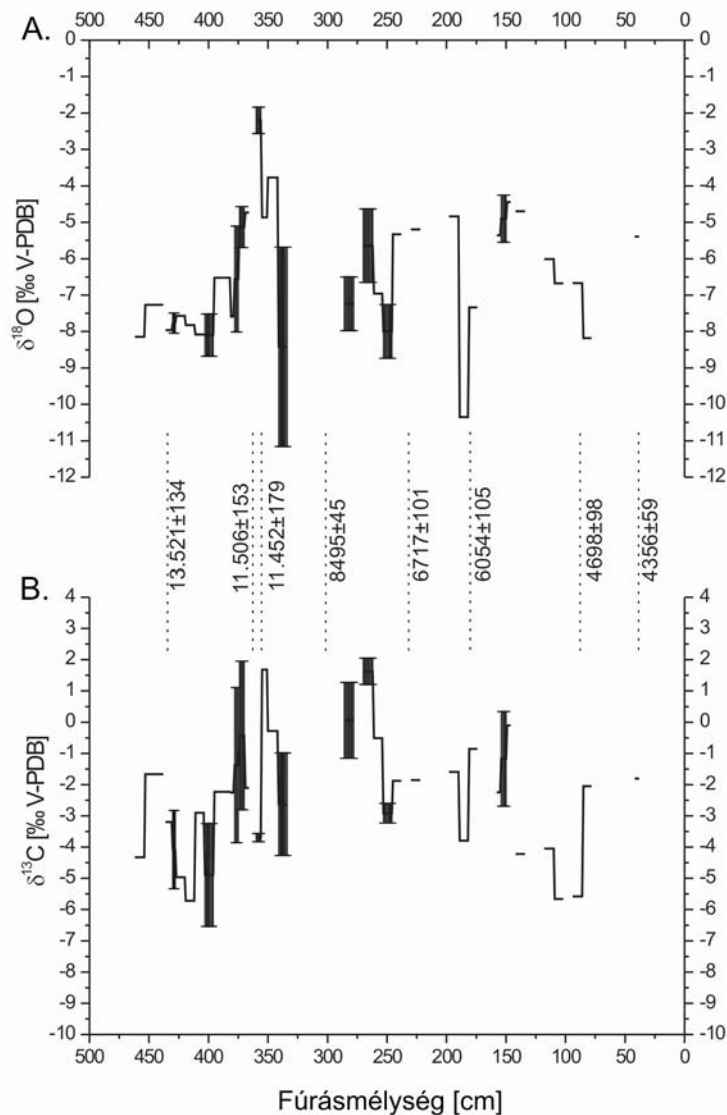


9. ábra. A Balatonederics I. fúráson végzett szedimentológiai (Sümegei, 2007) és makrobotanikai (Jakab et al., 2005; Sümegei et al., 2008) vizsgálatok eredményei (A). A fúrásból származó héjak stabil oxigénizotóp-összetétele és a csapadék mennyiség kapcsolata (B). A sötétszürke sávok a csapadékos időszakokat, a világosszürke sávok az aszályos időszakokat jelzik. A héjak stabil szénizotóp-összetétele és a feltételezett megnövekedett produktivitással jellemezhető periódusok (a szürke négyzetek) (C).

A kora Holocén időszakára a kagyló és csigahéjak stabilizotóp eredményei alapján (360-250 cm, ~10200-8200 BP) száraz és csapadékos időszakok ciklikus változása mutatható ki, ami a tó erőteljes vízszintingadozásával hozható összefüggésbe. Erőteljesebb csapadékhatalás ~7140-6890 BP közötti (151-136 cm) és ~ 5834-5300 BP (111-104 cm) közötti időszakokra mutatható ki, utóbbi párhuzamba hozható a Balatonkeresztúr Réti dűlő régészeti feltárás kagylóanyagának izotópösszetétele alapján feltételezett csapadékos időszakokkal.

b. A Sárkeszi I. fúrás csigahéj maradványainak stabilizotóp-összetétele

A mintegy 4,7 m hosszú Sárkeszi I.-es zavartalan magfúrásból, 33 szintből származó 41 ép *Valvata piscinalis* csigahéjakat vizsgáltunk.



10. ábra. A Sárkeszi I. fúrás csigahéjainak $\delta^{18}\text{O}$ (A) és $\delta^{13}\text{C}$ (B) értékei. Az ábrán a kalibrált radiokarbon BP korok (Sümei, 2007, Szántó és Sümei, 2007) is fel vannak tüntetve.

A fúrás legidősebb szintjeiből származó héjak izotópösszetételére az átlagnál negatívabb δ értékek jellemzőek a szén- és az oxigénizotóp tekintetében (10. ábra), ami a folyóvízi környezet sajátossága alátámasztva ezzel a szedimentológiai vizsgálatok által jelzett fluviális rendszert a neotektonikus süllyedékben.

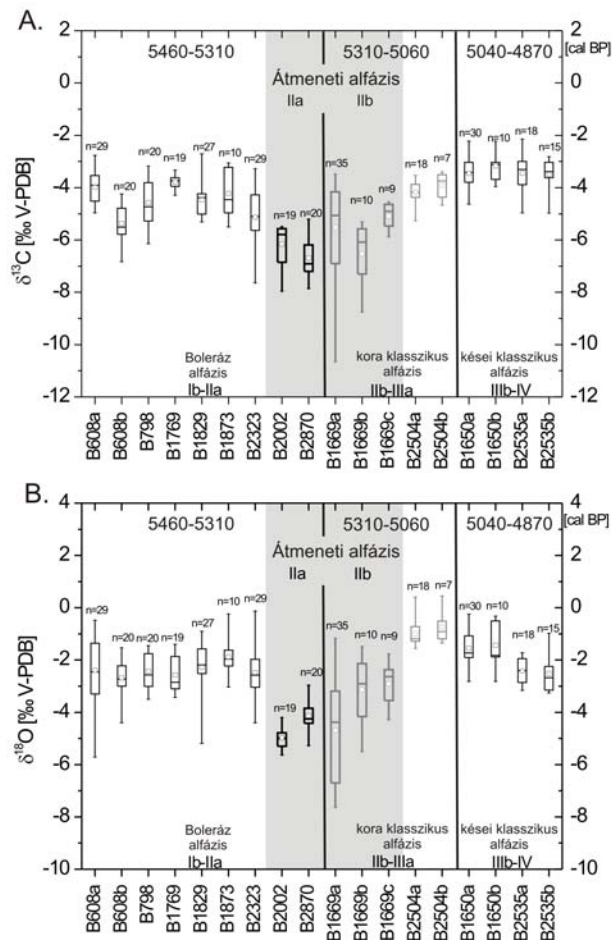
A tavi környezet kialakulása során a folyóvízi hatás fokozatos megszűnésével a párolgás folyamata kerül előtérbe, amit a $\delta^{18}\text{O}$ értékek fokozatos pozitív irányú eltolódása jelez. A tavi környezet kialakulását követően a héjak stabilizotóp-összetételét elsődlegesen a klíma határozta meg. Csapadékos időszakok mutathatók ki ~10600-10200 BP (341-334 cm) és ~6190-6080 BP (190-182 cm) időszakokban, ugyanakkor száraz klíma feltételezhető ~7056-6611 BP között (245-222 cm). Ezekre az időszakokra a Balatonedericsi I. fúrás anyaga is hasonló változást jelez, ami alátámasztja a klíma elsődleges hatását. A vizsgált időszakban ugyanakkor megfigyelhető, hogy a Sárkeszi I. fúrás csigahéjainak izotópösszetétele alapján feltételezett klíma ellentmond a Balatonedericsi I. fúrás eredményei alapján feltételezettnek (5800 BP-t követően), ennek oka, hogy a Sárkeszi területen a klimatikus hatás mellett más hatások is befolyásolták a csigahéjak izotópösszetételét. Bár a szedimentológiai vizsgálatok a tavi állapotot a bronzkorig kimutatták, az időszak során a változó üledékakkumuláció és a talajerózió (pl a termelő gazdálkodást folytató népcsoportok megtelepedése következtében) megváltoztatták a tó hidrológiai állapotát.

4. A Balatonkeresztúr-Réti dűlő lelőhely rézkori telepei

A lelőhelyről származó leletanyagok kormeghatározása a kerámiaanyag tipokronológiai elemzéssel, majd a tipológiai vizsgálatokat alátámasztó abszolút kronológia felállításával (AMS mérések) történtek (Fábián és Serlegi, 2009). A tipokronológia alapján a vizsgált időszak 5 késő rézkori fázisa/alfázisa különíthető el: bolerázi fázis Baden Ib-IIa alfázisokkal (5460-5310 cal. BP), klasszikus Baden, ami tovább tagolható egy korai klasszikus (IIb - IIIa) badeni (5310-5060 cal. BP) és egy kései klasszikus (IIIb-IV) badeni (5040-4870 cal. BP) időszakra (Fábián és Serlegi, 2009). A fázisokon túl néhány zárt kontextusú objektum esetében mindkét - Boleráz és kora klasszikus Baden - időszakra jellemző leletanyag előkerült, ezért ezeket a csoportokat külön kezelték ún. átmeneti fázisként (IIa-IIb) (~5310 cal. BP) (Fábián és Serlegi, 2009). A geokémiai vizsgálatot megelőzően a geomorfológiai és archeozoológiai vizsgálatok történtek (Fábián és Serlegi, 2009), melynek eredményeként mind a telepszerkezet, mind az állattartási szokások megváltozása arra utaltak, hogy a vizsgált időszak két fázisának (bolerázi és klasszikus Baden) határán (~5310 cal. BP) egy markáns

klimatikus változás játszódhatott le (Fábián és Serlegi, 2009). A régészeti vizsgálatok alapján felmerült környezeti változást a régészetileg elkülöníthető fázisok és alfázisok objektumaiból származó *Unio* kagylóhéjak stabilizotóp-vizsgálatával támasztottuk alá.

A stabilizotóp mérések során a fent említett 5 elkülöníthető fázisból/alfázisból származó 18 *Unio* kagylóhéj 345 mintájának elemzése történt meg.



11. ábra. A Balatonkeresztúr-Réti dűlő lelőhelyről származó kagylóhéjak stabil szén- (A) és oxigénizotóp-összetételének (B) ábrázolása boxplot módszerrel. A minimum és maximum értékek a lefele és felfele irányuló függőleges vonallal kapcsolódnak a központi doboz ábrához, melynek keretét az alsó és felső kvartilisek alkotják, középen vízszintes vonalként a medián értéke, kocka formájában az átlagérték szerepel. Az x tengely a vizsgálatba bevont kagylók (objektumszámmal megegyező) azonosítóját jelzi. Az ábra a héjanként lemért mintaszámokat (n) is tartalmazza.

A vizsgált kagylóhéjak szén- és oxigénizotóp-összetételében jelentős változás mutatható ki, ami a Baden kultúra Boleráz és a korai klasszikus alfázisa közötti átmeneti IIA-IIB időszakhoz köthető (11. ábra). A $\delta^{18}\text{O}$ értékek negatív irányú eltolódása a területen

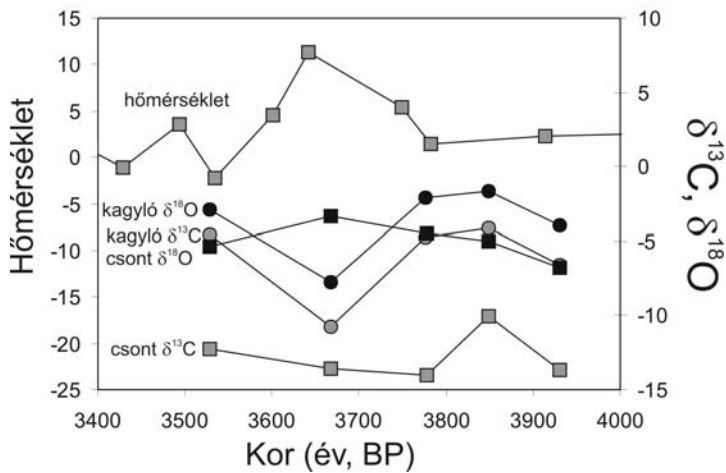
vizsgált modern kagylóhéjak összetétel változásával analóg módon a csapadék megnövekedett arányát jelzi. Az IIA-IIb átmeneti időszakokra jellemző negatív $\delta^{18}\text{O}$ értékek jelezte csapadékos klíma alátámasztja a régészeti megfigyelések alapján feltételezett klímaváltozást. A telep közösségei alkalmazkodtak a csapadék hatására megváltozott körülményekhez (telepszerkezet és állattartás megváltozása).

A korai klasszikus Baden alfázist reprezentáló kagylóhéjak átlag $\delta^{18}\text{O}$ értékeinek pozitív irányú eltolódása a párolgás megnövekedett hatását jelzi a csapadék mennyiségének feltételezhető csökkenése mellett. A klasszikus Baden korai alfázis idejére a kagyló oxigénizotóp-összetétele alapján feltételezhető csapadékszegény időszak a régészeti megfigyelésekben nem jelentkezik, ami alapján felmerül az, hogy drasztikus klímaromlásra a közösség gyors alkalmazkodással reagál, míg kisebb fokú klímahatás nem feltétlenül jár drasztikus változással a telepszerkezetben illetve az állattartásban.

5. Az Ordacsehi lelőhely bronzkori telepei

Ordacsehi mellett két fő régészeti feltárási területen (Bugaszeg és Kistöltés) történt kagylóhéjak gyűjtése. Az *Unio* kagylóhéjak mellett szarvasmarha-, szarvas- és sertéscsontok vizsgálata történt meg. A csontok kollagéntartalmából a Scottish Universities Environmental Research Centre-ben történtek AMS ^{14}C korvizsgálatok. Ennek alapján a feltárásokban régészeti kerámiatipológiai módszerekkel elkülönített öt kultúra (Somogyvár-Vinkovci, Kisapostag, Késő-Kisapostag – Kora Mészbetétes, Mészbetétes és Halomsíros) pontos korbesorolása is megtörtént. A kagylók mellett az AMS-korolt csontokban megőrződött eredeti karbonáttartalom C és O izotópelemzését is elvégeztük. Tekintettel arra, hogy melegvérű állatokról van szó, a csontok karbonáttartalma állandó hőmérsékleten jött létre, így oxigénizotóp-összetétele elsősorban a csapadékvíz összetételét tükrözi. A csapadékvíz $\delta^{18}\text{O}$ értéke viszont a léghőmérséklettől függ, így a csontok $\delta^{18}\text{O}$ értékei a környezeti hőmérséklet változását jelzik. A csontok karbonátjának stabszénizotóp-összetétele ezzel szemben a táplálkozástól és az elfogyasztott növényi anyag összetételétől függ. Általánosságban elmondható, hogy csapadékos klíma esetén az ún. C3, száraz klíma esetén a C4 növények kerülnek túlsúlyba, ami a $\delta^{13}\text{C}$ adatokban is megjelenik. Mivel a kagylók $\delta^{13}\text{C}$ és $\delta^{18}\text{O}$ értékei a tó vízháztartását, így a csapadékmennyiséget jelzik, a két adatsor együttesen a hőmérsékletre és a csapadékosagra is információt nyújt. Az 12. ábrán láthatóak a csontok és kagylók izotópösszetételei mellett a Trió barlang egyik cseppkőéből készített elemzések alapján számított képződési hőmérsékletek is. Ennek alapján feltételezhető, hogy kb. 3700

évvel ezelőtt viszonylag meleg és csapadékos klíma uralkodott, amit relatíve hűvös és száraz klíma előzött meg és követett. Regionális klímarekordokkal összevetve az adatsorokat kimutatható volt az Atlantikum hatása. A klímaviszonyok változása feltételezhetően az ún. Észak-Atlanti Oszcillációban beállt évszázados léptékű dominanciaváltozáshoz kapcsolódik.



12. ábra. Az Ordacsehi régészeti lelőhelyről származó csontok és kagylók stabilizotóp-összetételei, valamint a mecseki Trió barlang Búboskemence nevű cseppkőéből készített δD elemzések alapján számított képződési hőmérsékletek.

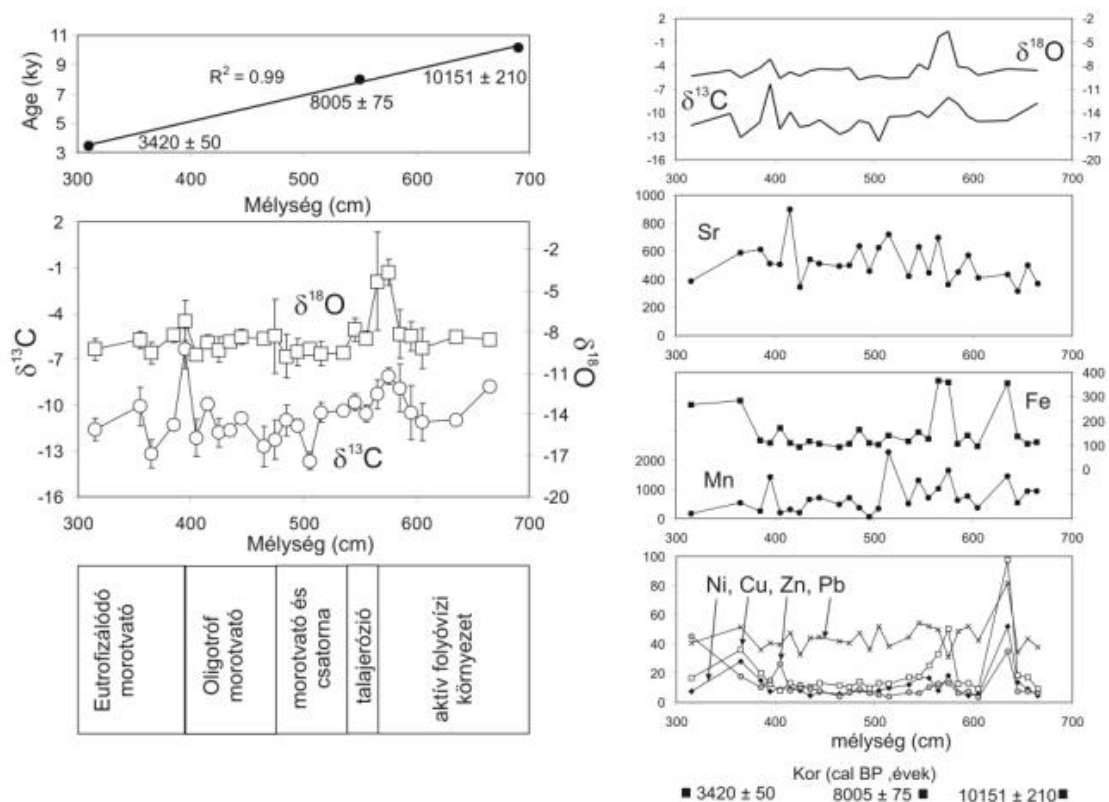
II. Vizsgálatok a Tisza vízgyűjtő területén

1. A Tisza vizének és modern kagylóinak elemzése

2001-ben kezdődött egy mintavételi munka, amelynek során gyűjtött mintákat a jelen projektben elemeztünk, illetve aminek az eredményeit felhasználtuk. Összesen 50 vízminta és 23 *Unio* kagylóminta elemzését végeztük el. A vízmintavételezés Szolnoknál történt, a kagylókat a Tisza folyása mentén öt lelőhelyen gyűjtöttük be. Ezzel a mintavételi stratégiával egyrészt a víz oxigénizotóp-összetételének szezonális változását, másrészt a folyásirány mentén lezajló összetételváltozásá mértékét határoztuk meg. Tekintettel arra, hogy az *Unio* kagylók kb. 12 °C alatt nem növekednek, az április és október közötti időszak átlagos vízösszetételét használtuk fel a kagylóadatokkal történő összehasonlításra. A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a tiszai kagylók – a balatoni *Unio* kagylókhöz hasonlóan jól tükrözik a környezetváltozást, a hőmérsékletváltozás és a párolgás mértéke megjelenik a stabilizotóp-összetételekben.

2. Tiszapüspöki (Kartsú-ér) szelvény

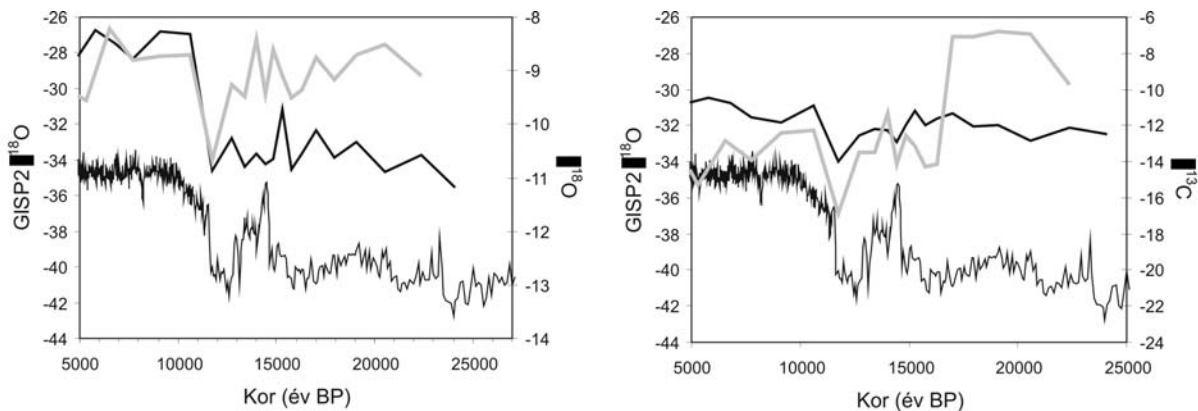
A Kartsú-ér területén egy 7 méter mély szelvényben 21 kagylóminta vizsgálatát végeztük el. A kagylóhéjak mindegyikéből legalább öt stabilizotóp-elemzés, valamint a héjakról átlagos XRF nyomelemzés készült, amivel a Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr és Pb koncentrációját határoztuk meg. A 13. ábrán látható, hogy az üledékföldtani jellegzetességekkel a geokémiai adatok jó összefüggést mutatnak. A szelvény alján megfigyelt nyílt folyóvízi környezet megjelenik a nyomelemösszetételekben is, emelt mennyiségű detritális anyagot jelezve. A világszerte jól ismert 8200 éves lehülési esemény a szelvényben is érzékelhető hirtelen megnövekedett törmelékbehordódás formájában. Ezt követően kb. 5,5 és 8 ezer év között csapadékosabb éghajlat valószínűsíthető, ami negatívabb stabilizotóp-összetételekben és kisebb nyomelemkoncentrációkban jelenik meg. A kb. 3000 évvel ezelőtti időszakban a vizsgált nyomelemek koncentrációjának növekedése az emberi tevékenység hatásának tulajdonítható, amit a pollenvizsgálatok eredményei is alátámasztanak. Az eredményeket egyelőre kéziratban foglaltuk össze, a folyóirathoz történő beküldés a társszerzőkkel való egyeztetést követően 1-2 hónapon belül várható.



13. ábra. A tiszapüspöki szelvényből gyűjtött kagylók stabilizotóp- és nyomelemösszetételei.

3. Kőrösladány, téglagyári szelvény

A kőrösladányi téglagyár kb. 5,2 méteres szelvényéből teljes üledékmintákon végeztünk XRF fő- és nyomelemvizsgálatokat, valamint *Unio crassus* és *Sphaerium rivicola* hájak stabilizotóp-összetételét határoztuk meg. A szelvény mélység-kor összefüggésének pontos meghatározásához összesen 10 AMS ^{14}C kormeghatározást végeztünk kagylóhéjakon. Ennek alapján a szelvény a kb. 24 és 4 ezer év közötti időszakot fedi le, ami tartalmazza a pleisztocén legvégének klímaváltozási eseményeit (Bolling-Allerod és Fialal Driász), valamint a pleisztocén-holocén átmenetet. Az XRF és a stabilizotópos elemzések kombinált értelmezése alapján el tudtuk különíteni egy törmelékes és egy feltételezhetően autigén karbonátfázist, sőt az eloszlásokból az autigén fázis összetételét is számítani tudtuk. A számított autigén karbonátösszetétel összefüggést mutat a kagylóhéjak C és O izotópösszetételével. A $\delta^{13}\text{C}$ és $\delta^{18}\text{O}$ változások jó egyezést mutatnak a grönlandi jégfúrások $\delta^{18}\text{O}$ adatsoraival (14. ábra), ami a kormodell érvényességét bizonyítja. Az összetételváltozások mértékéből arra következtethetünk, hogy a késő-pleisztocén felmelegedési események során is jelentős volt a Kárpátok hótakarójának csökkenése, ami megközelíthette a holocénra jellemző viszonyokat. Az eredményeket egyelőre kéziratban foglaltuk össze, a folyóirathoz történő beküldés a társszerzőkkel való egyeztetést követően 1-2 hónapon belül várható.

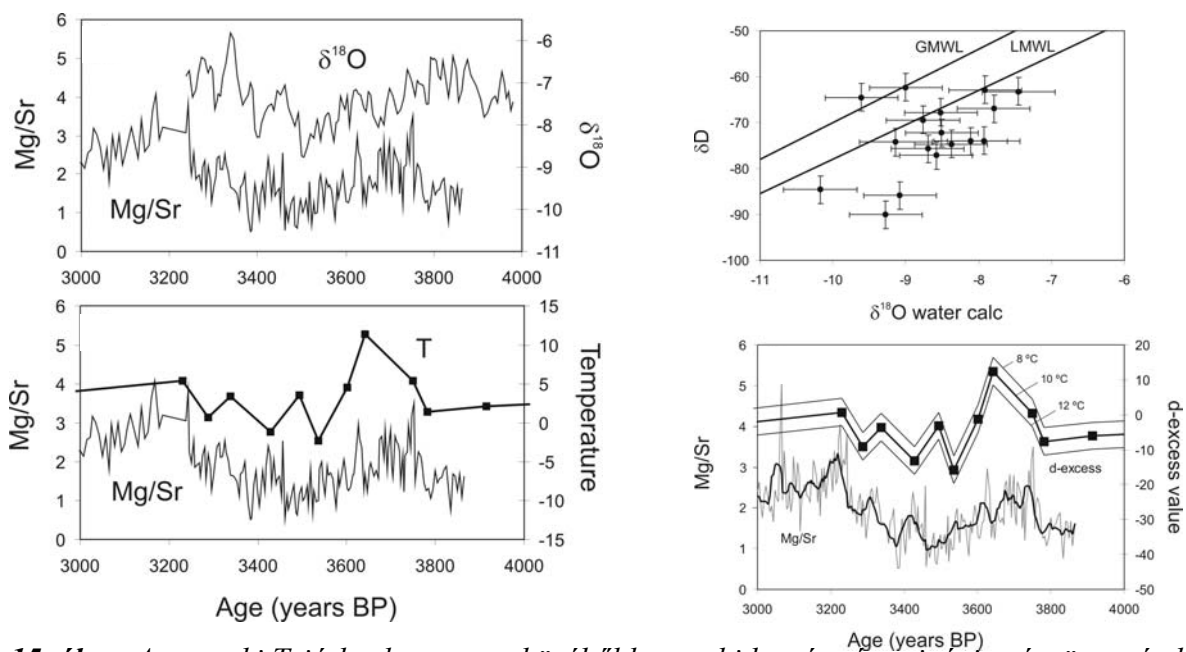


14. ábra. A kőrösladányi szelvény autigén karbonátjának (szürke vonal), *Unio* kagylóhéjainak (vastag fekete vonal) izotópösszetételei és a GISP2 jégfúrás $\delta^{18}\text{O}$ adatsora.

C. Egyéb klímarekordokkal történő összehasonlítás

A projekt egyik fontos célkitűzése volt a korábbi OTKA projektben cseppkövek vizsgálatából kapott eredményekkel történő összevetés. Az időbeli átfedés figyelembe vételével a jelen projekt végrehajtása során az Ordacsehi bronzkori telepből és a tiszapüspöki Kartsú-ér szelvényéből gyűjtött kagylók esetében tudunk ilyen összehasonlító értékelést végezni.

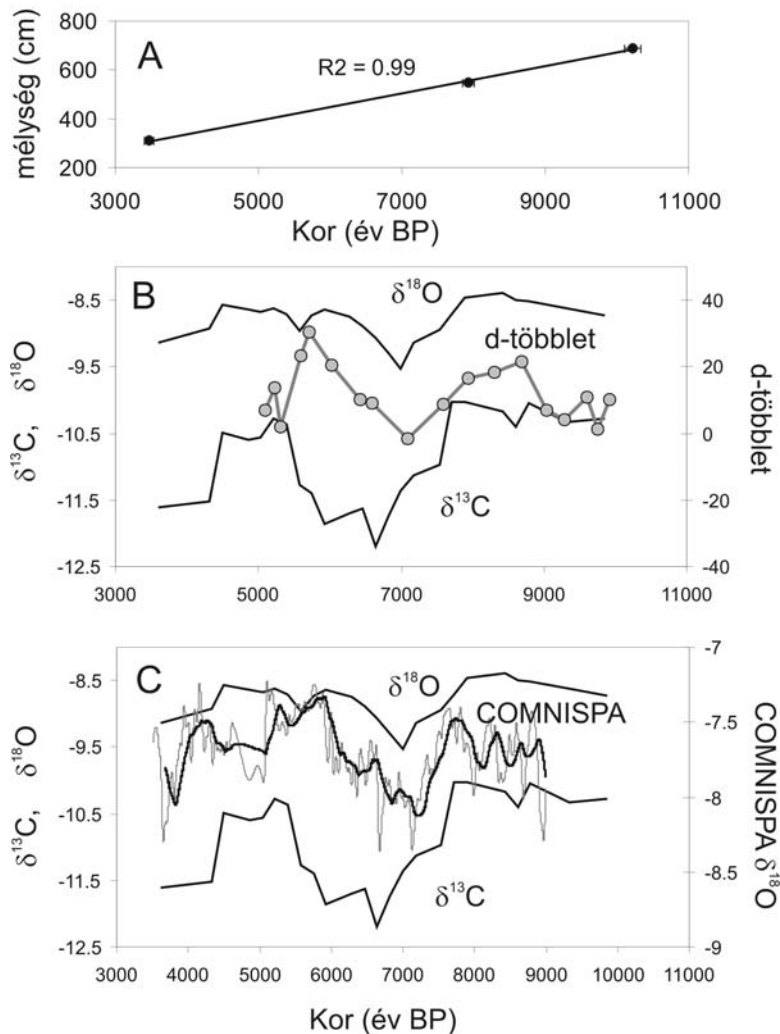
A bronzkori klímaváltozási esemény pontosabb megértéséhez a mecseki Trió barlang cseppkőéből végeztünk a cseppkőbe zárt fluidumzárványok vizéből kiegészítő hidrogénizotópos elemzéseket. Emellett a korábban publikált nyomelemzések eredményeiből számítottuk a hőmérsékletjelzésre is alkalmas Mg/Sr arányokat. A hidrogénizotóp-összetételekből szintén képződési hőmérsékletet számoltunk, illetve meghatároztuk a csapadékszarmazásra utaló deutérium-többlet értékeket (lásd 15. ábra). Ezeket az adatokat összevetve a régészeti feltárásokból származó kagyló- és csontadatokkal a hőmérséklet és a csapadékmennyiség változásának pontosabb meghatározása vált lehetővé (lásd az Ordacsehi lelőhelyből kapott eredmények leírását). Az eredményekből készített kéziratot a *Geochimica et Cosmochimica Acta* folyóirathoz küldtük be, jelenleg elbírálás alatt áll.



15. ábra. A mecseki Trió-barlang cseppkőéből kapott hidrogén- és oxigénizotóp-összetételek, Mg/Sr arányok, valamint az ezekből számított hőmérsékleti adatok, vízösszetételek és deutérium-többlet értékek.

A tiszapüspöki szelvény kagylóadatait a Leány-barlang és a Pálvölgyi-barlang egy-egy cseppkőéből nyert stabilizotóp-összetételekkel, valamint a regionális referenciaként tekintett COMNISPA rekorddal vetettük össze (lásd 16. ábra). A komplex értelmezés alapján a Kárpát-

medence területén a 8-9 ezer évvel és 5,5-6 ezer évvel ezelőtti időszakokban erőteljes lehűlés, a kb. 6-7 ezer évvel ezelőtti időszakban felmelegedés játszódott le. A hidrogénizotóp-összetételekből számolt deutérium-többlet értékek alapján a lehűlés a mediterráneumból származó csapadék dominanciájával járt, míg a felmelegedés erőteljes atlanti hatáshoz kötődött. Az eredményekből készített kéziratot a Quaternary International folyóirathoz küldtük be, jelenleg elbírálás alatt áll.



16. ábra. A tiszapüspöki szelvény kagylóinak stabilizotóp-összetételei, a Leány-barlang cseppkőéből kapott deutérium-többlet értékek és a COMNISPA rekord adatsora.

A sárkeszi és edercsi szelvényekből kapott kagylóösszetételek az előzetes értékelés alapján szintén jó összefüggést mutatnak a korábban publikált cseppkőadatokkal, ezen adatok komplex értelmezése még folyamatban van.

D. Összefoglalás

A projekt legfontosabb eredménye annak bizonyítása volt, hogy a Kárpát-medence édesvízi kagylóinak stabilizotóp-összetételei jól használhatóak a fennálló klímaviszonyok meghatározására. A Balaton kagylóinak összetétele a hőmérséklet mellett elsősorban a csapadékmennyiségtől és a párolgás mértékétől függ. Ugyanakkor a hőmérsékleti hatás miatt egyéb, a hőmérsékletet jelző paraméterekkel való összevetés szükséges a pontos értelmezéshez. A cseppkövekből korábban nyert adatok erre a célra megfelelnek, a komplex értelmezés a hőmérsékleti és csapadékviszonyok együttes meghatározását teszi lehetővé.

A fentiek mellett további fontos eredmény a csapadék származásának meghatározása, az atlanti, a mediterrán és a kontinentális hatás mértékében beálló változások kimutatása. A kora-középső holocénen (kb. 3-9 ezer év BP) belül az eddigi vizsgálatok alapján jelentős változások következtek be az atlanti hatás mértékében. Annak a vizsgálat, hogy ez mennyiben hatott a mediterráneumból szállított csapadék mennyiségére még további tanulmányokat kíván. Erre a Berni Egyetem kutatóival közös projekt indult, egyelőre informális kutatói együttműködés keretében. A jelen projekt eredményei alapvetően hozzájárultak a csapadékszarmazás kérdésének felvetéséhez és az együttműködések kiszélesítéséhez.