

## BUDAPEST GEOTERMIKUS KUTATÁSI PROGRAM

### JELENTÉS

A budapesti termálkarszt fenntartható hasznosítását megalapozó, döntéstámogatói célú földtani, geofizikai és vízföldtani kutatás eredményei

Falus György projektvezető

Maros Gyula földtani alprojektvezető

Bereczki László geofizikai alprojektvezető

Kun Éva vízföldtani alprojektvezető

Jóváhagyta:

Fancsik Tamás

igazgató

Földtani Szolgálat

Budapest, 2024.11.06.

## **Közreműködött**

Fancsik Tamás igazgató, Harangozó Patrik igazgatóhelyettes

### **Földtani Főosztály:**

Falus György (projektvezető), Csordás Krisztina

*Földtani és Laboratóriumi Osztály:* Maros Gyula (alprojektvezető), Héja Gábor, Palotai Márton, Kercksmár Zsolt, Lantos Zoltán, Majercsik Csaba, Nádor Annamária, Vilusz Lénárd, Szabadosné Sallay Enikő, Babinszki Edit

*Vízföldtani Osztály:* Kun Éva (alprojektvezető), Szócs Teodóra, Gál Nóra Edit, Szabó Zsóka, Tóth György, Rotárné Szalkai Ágnes, Jordánné Szűcs Andrea, Mekker Julianna, Vári Zoltán, Tihanyi Szép Eszter, Pálfi Éva, Kozocsay Lajos, Fehér Judit

### **Geofizikai Főosztály:**

Bereczki László (alprojektvezető), Bauer Márton, Zilahi-Sebess László, Csabafi Róbert, Cserkész-Nagy Ágnes, Kemény Márton, Kiss János, Kun Lajos, Lőrincz Katalin, Lukács Tamás, Markos Gábor, Méri Imre, Pál Lénárd, Szabó Tivadar, Szebenyi Renáta, Takács Ernő, Török István, Vályi Andrea

### **Geoinformatikai Főosztály:**

Fiedl Zoltán, Cégény András, Barczikayné Szeiler Rita, Vankó Zoltán, Hegyiné Rusznyák Éva, Mezőlaki Zsoltné

## Tartalomjegyzék

<b>BUDAPEST GEOTERMIKUS KUTATÁSI PROGRAM EREDMÉNYEINEK RÖVID ÖSSZEFOGLALÓJA.....</b>	<b>i</b>
1. Földtani és geofizikai eredmények.....	ii
2. Vízeokémiai és izotóphidrológiai eredmények.....	iv
3. A hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálat eredményei.....	v
4. Zónás védelmi javaslat.....	vii
<b>FÜGGELÉK.....</b>	<b>x</b>
1. Bevezetés.....	4
2. A budapesti termálkarszt területének földtani modellje.....	5
3. A budapesti termálkarszt régiójának hidrodinamikai, hőmérsékleti és vízkémiai viszonyainak értékelése.....	16
4. A budapesti termálkarszt hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálata.....	39
5. A budapesti termálkarszt fenntartható hasznosítását megalapozó, döntéstámogató rendszer kidolgozása.....	52
6. Tovább lépési lehetőségek.....	54
7. Irodalomjegyzék.....	57

## BUDAPEST GEOTERMIKUS KUTATÁSI PROGRAM EREDMÉNYEINEK RÖVID ÖSSZEFOGLALÓJA

A 2022. évtől előálló hazai és nemzetközi energiakrízis felértékelte a belföldi energiaforrások és ezen belül a geotermia jelentőségét az energiaszuverenitás növelése érdekében. Ennek következtében új kormányzati stratégia került kialakításra, amelynek egyik kulcsfontosságú eszköze a 2023. március 1-jén életbe lépett, a geotermikus energia hasznosítását érintő jogszabályváltozás (20/2022 (I.31) SZTFH rendelet) volt.

A rendeletmódosítás követően kiugróan magas számú kutatási engedélykérelem érkezett a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóságához. A beadott kérelmek jelentős része Budapestet és a budapesti agglomerációt célozza.

Fővárosunk évszázadok óta ismert, idegenforgalmi szempontból is komoly jelentőséggel bíró geotermikus és balneológiai adottságai nemzetgazdasági és országimázs szempontból is kiemelt értéket képviselnek. A régóta fennálló hasznosítás ellenére a fővárosi térség termálkarsztos rendszerének működéséről, érzékenységéről és terhelhetőségéről nem áll rendelkezésre elégséges információ. Ez az ismerethiány leginkább a történelmi jelentőségű termál- és gyógyfürdők védelmét, de a nagyszámú új potenciális hőhasznosító hatásának és fenntarthatóságának becslését is akadályozza.

Ennek a helyzetnek a megoldására 2023. szeptember 25-én az Energiaügyi Minisztérium (EM), az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) és a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH) találkozási pontján közös döntés született, mely értelmében az SZTFH szakmai vezetésével, a vízügyi igazgatási szervek és további, a geotermiában elismert szakértők bevonásával, a budapesti geotermikus rendszer részletes megismeréséhez egy összefoglaló tanulmányt kell készíteni, melynek legjelentősebb részét egy döntéstámogatói célú **3D regionális léptékű hidrodinamikai és hőtranszport modell** alkotja.

Az SZTFH ennek eleget téve *Budapest Geotermikus Kutatási Program* néven indított földtani, geofizikai és vízföldtani kutatást. A megvalósult modellvizsgálatok minden eddiginél pontosabb, naprakész és nagy felbontású földtani és geofizikai, valamint jelentős mennyiségű vízföldtani és vízgeokémiai adat feldolgozásán alapul, melyek szükséges ellenőrzése, korrigálása és rendszerekbe foglalása is megtörtént.

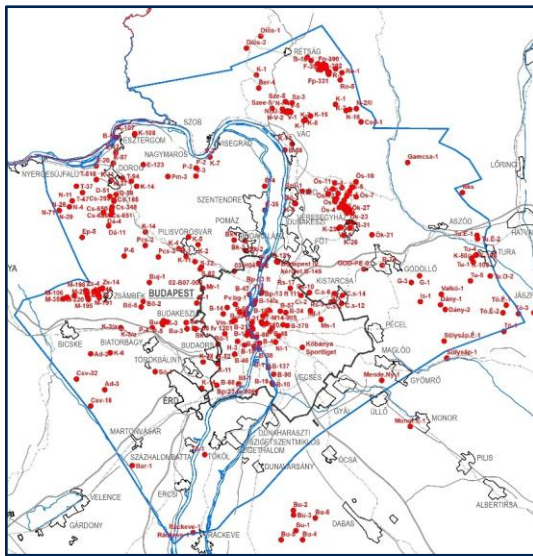


### A projekt munkamenete

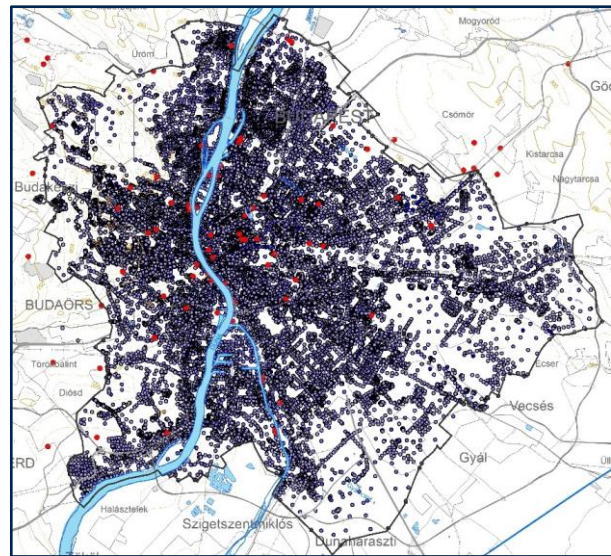
A nagy volumenű, interdiszciplináris kutatási program legjelentősebb eredményeinek kivonatát e fejezetben, részletesen ismertetve pedig a Függelékben foglaljuk össze.

## 1. Földtani és geofizikai eredmények

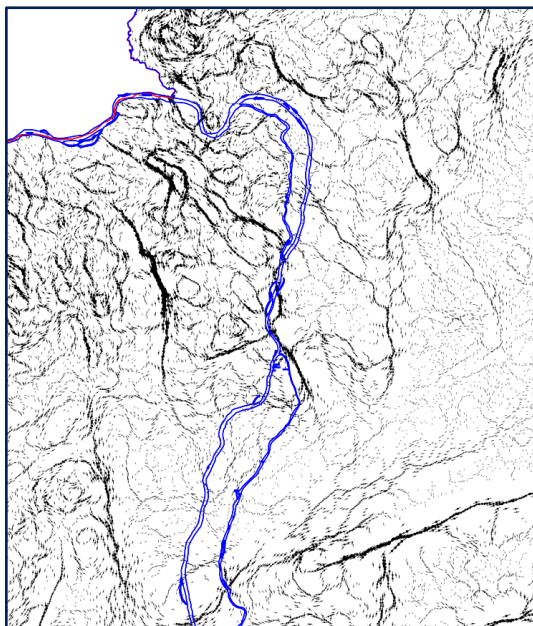
A Budapest Geotermikus Kutatási Programban végzett földtani-geofizikai munkarészekben döntően Budapest közigazgatási területén belül, a pesti oldalon eltemetett helyzetű karsztos tárolóra és tektonikára vonatkozóan növeltük a földtani modell megbízhatóságát nagy felbontású, 55 km 2D szeizmikus hálózat lemérésével és kiértékelésével. Adatértékelésekkel és földtani, valamint gravitációs szelvények, szinttérképek szerkesztésével levezetett 3D értelmezést hoztunk létre a 3D modell alapjaként.



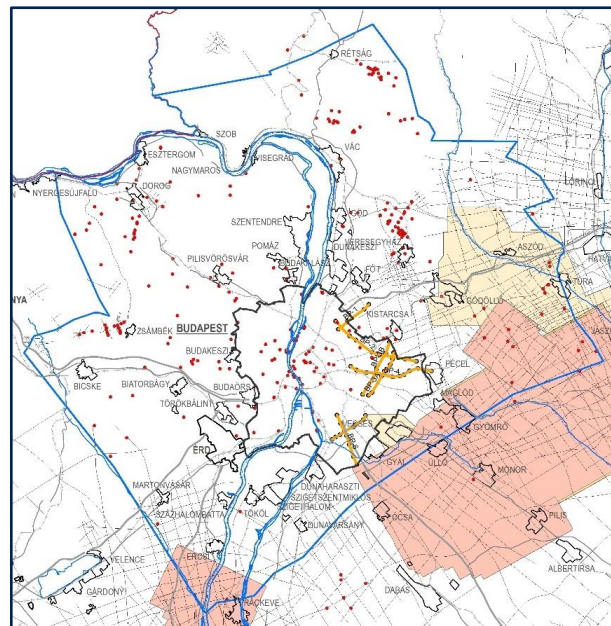
Átértékelt mélyfúrások >300 db



Átértékelt sekélyfúrások >31ezer db



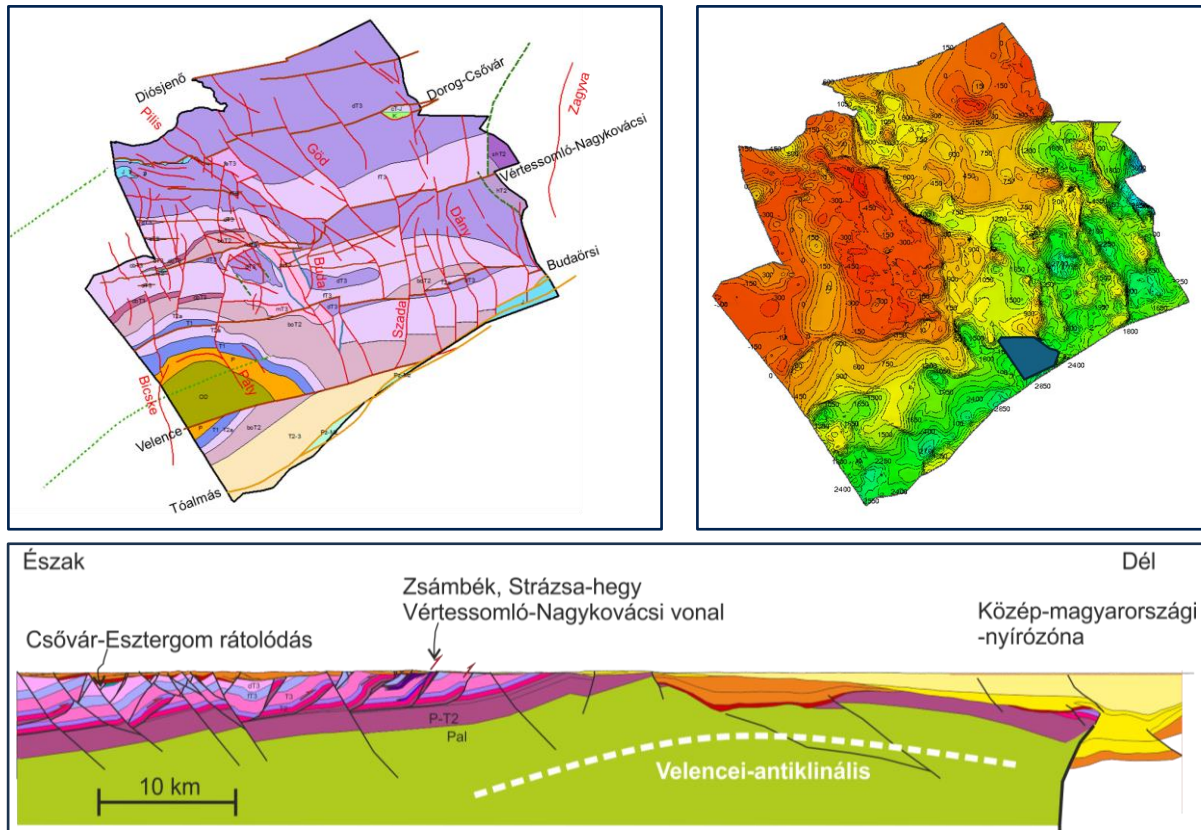
Reprocesszált gravitációs mérések (hatóperem térkép)



2D és 3D szeizmikus értelmezés Új szelvények (sárga vonal) mérése 55 km

A földtani modell megalkotásának folyamata meglévő szakirodalomra és fúrási, térképi adatbázisokra, korábbi mélyfúrás-geofizikai és szeizmikus projektekre, reprocesszált geofizikai téradatakra, új szeizmikus mérésekre épült. A terület paleokarszt fejlődésének összefoglaló értelmezése is hangsúlyos szerepet kapott.

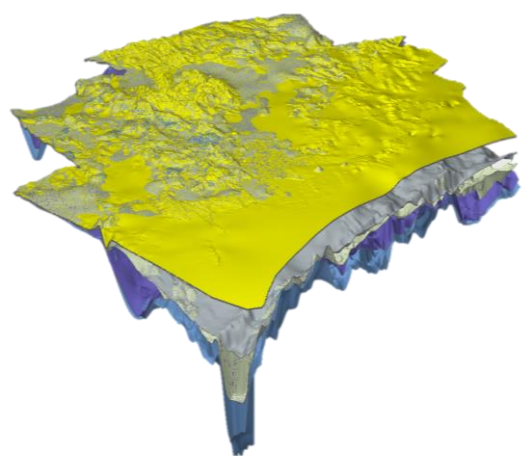
Az értéknövelt és új adatokból fő eredményként új, a földtani modellből levezetett földtani-tektonikai aljzattérképet és tengerszinhez viszonyított aljzatszintet szerkesztettünk, amely felbontásában és részletességében jelentősen felülmúlja a korábbi aljzattérképeket.



**A prekainozoos aljzat földtani elterjedése, szinttérképe és metszeti ábrázolása az Esztergom – Makád szelvény mentén**

A térkép koncepciója egységes, fő elemei a közel K-Ny-i kréta időszak rátalódási zónák, amelyek később (a paleogénben) főként jobbos ferde elmozdulásokként felújultak és a terület mezozoos képződményeinek pásztás eloszlási mintázatáért felelősek. Ezeket a szerkezeteket ÉNy-DK-i és É-D-i csapású fiatalabb (miocén) normálvetők írják felül, melyek felelősek a pásztás szerkezet közel harántirányú feldarabolódásáért és a mezozoos képződmények kelet felé történt mélybe zökkenéséért.

A teljes földtani modellter az értéknövelt téradatokon túlmenően összesen 6 szintre szerkesztett mélységszintből, szintén 6 formációra, illetve formációcsoportra szerkesztett elterjedési térképből és 7 földtani-geofizikai szelvényből áll.

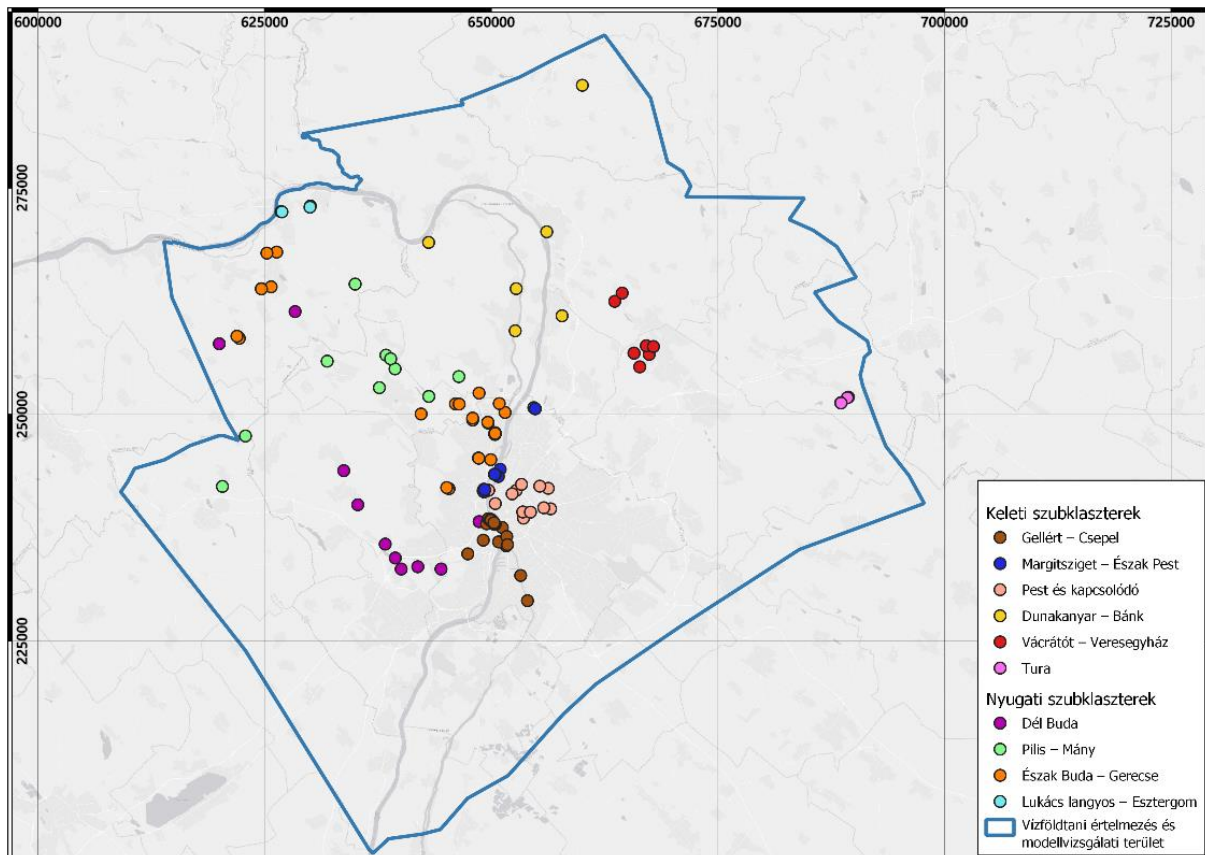


**Földtani modell 3D-s megjelenítése**

## 2. Vízgeokémiai és izotóphidrológiai eredmények

Jelen kutatás keretében a budapesti termálkarszt térségének jellemzéséhez a korábbi kutatásokhoz képest jóval nagyobb térrészre és szélesebb körű adatforrást felhasználva kialakítottunk egy – a hibák döntő részétől mentes – javított vízkémiai és izotóphidrológiai adatrendszert. A vízkémiai értelmezés a főkomponensek, a kifolyóvíz-hőmérséklet, és izotópadatok alapján történt.

A vízkémiai összetétel és hőmérséklet hasonlóságain alapuló csoportosítás (klaszteranalízis) keretében két főklasztert különítettünk el. A döntően a dunántúli terület objektumainak főklaszterét *Nyugati*, míg a jellemzően a Duna mentén és a pesti oldalon található objektumok csoportját *Keleti* főklaszternek neveztük.

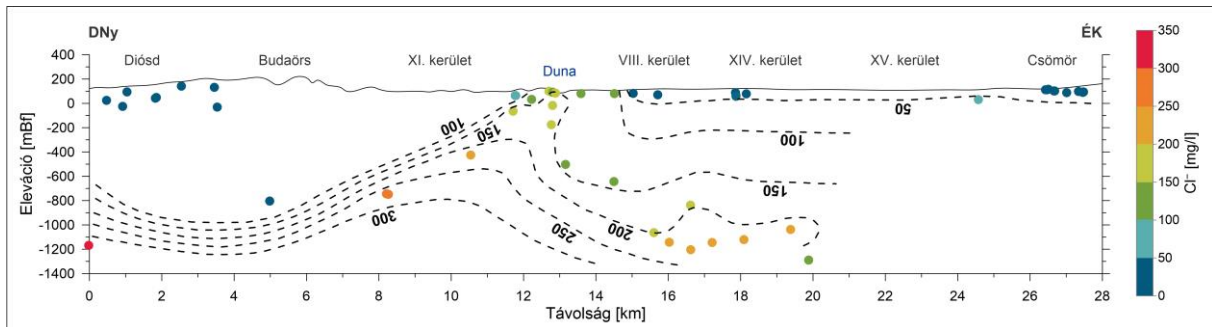


**A karszrendszer vízmintáinak klasztercsoportjai a főkomponensek és vízhőmérséklet alapján**

Az elemzések alapján a *Nyugati* főklasztert 4 szubklaszterre (alcsoportra) (*Pilis–Mány, Észak Buda–Gerecse, Lukács langyos–Esztergom, Észak Buda*), míg a *Keleti* főklasztert 6 szubklaszterre bontottuk (*Dunakanyar–Bánk, Margitsziget–Észak Pest, Gellért–Csepel, Pest és kapcsolódó régió, Vácrátót–Veresegyház*, valamint *Tura*). Mind az általános vízkémiai statisztikák, mind a klaszteranalízis alapján Tura élesen elkülönül a főkarszrendszer többi kútjától. Ha nem is ennyire élesen, de szintén határozottan elkülönülnek Vácrátót és Veresegyház kútjai. A turai, veresegyházi és vácrátóti kutak eltérő jellegét megerősíti stabil és radioaktív izotóp összetételek is.

A klaszteranalízis elősegítette az áramlási pályák jobb megértését, melyben szintén segítséget nyújtottak az elkészült klorid- és szulfátkoncentráció eloszlás térképek és szelvények. A kloridtartalom szelvény menti eloszlása például jól mutatja a budai oldalon

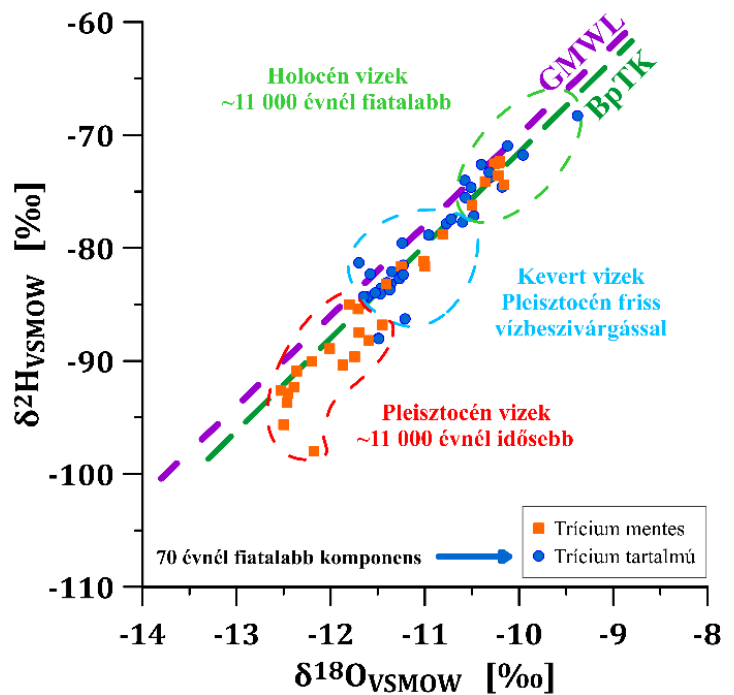
történő beszivárgást, tehát nagyobb mélységben is alacsonyabb értékek mérhetők, míg a Duna mentén a Pesti oldal felé magasabb értékek jelzik az intenzív feláramlást.



A kloridtartalom [mg/l] eloszlása az Érd – Csömör szelvény mentén

Az izotóphidrológiai vizsgálatok eredményeképpen az oxigén- és deutériumizotóp értékek alapján megállapítható, hogy a budapesti termálkarszt térségében a karsztvizek jellemzően csapadék eredetűek, de nem zárható ki nagyon kis mennyiségű brakk-, vagy tengervíz eredetű komponens jelenléte. Ehhez nyomelemvizsgálatok, valamint további izotópok vizsgálata adhat támpontot. Az áramlási rendszerben a karsztvíz tartózkodási ideje legalább 20 000 – 30 000 év. A stabil vizotópok „magassági hatása” alapján e karsztvizek nagy része 200–400 mBf magasságban szivárgott be.

A tríciumadatok alapján potenciálisan szennyezett friss víz hozzákeveredése mutatható ki a hideg karsztvizekben, valamint a Lukács- és Császár-fürdő, illetve a Gellérthegy környékén lévő karsztvizekben.



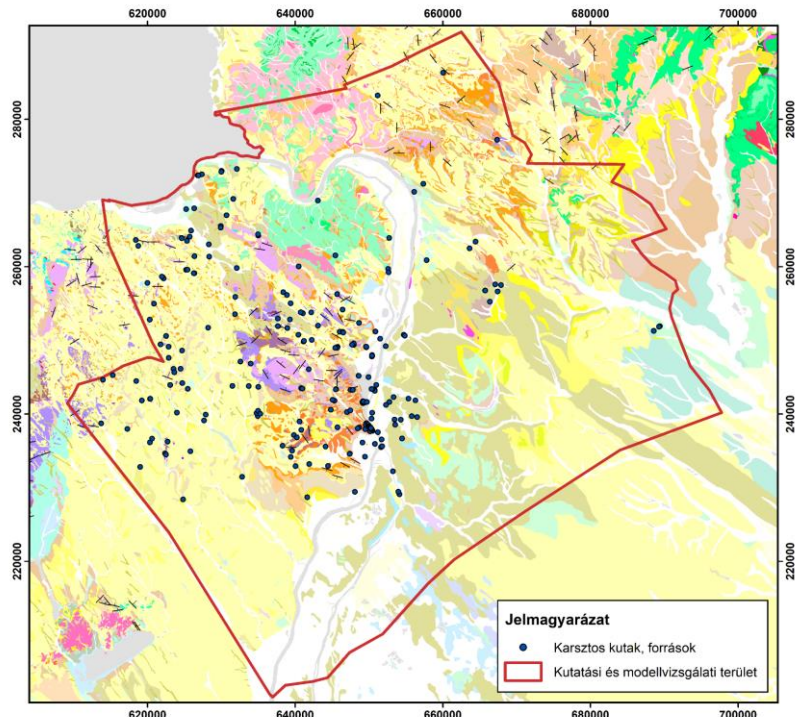
A karsztrendszert tápláló és megcsapoló vizek eredete a  $\delta^{18}\text{O}$  –  $\delta^2\text{H}$  kapcsolat alapján

### 3. A hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálat eredményei

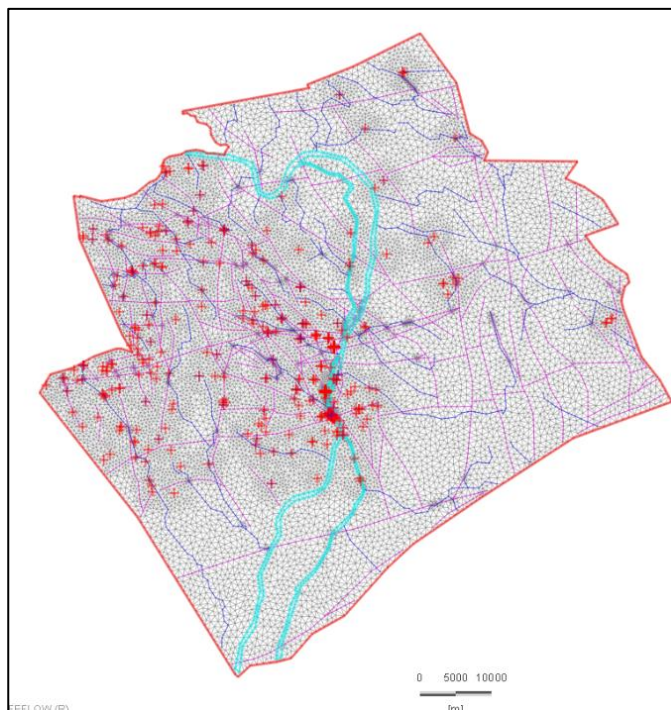
A budapesti termálkarszt vizsgálatára kétféle numerikus módszerű (véges elemes – FEFLOW, véges differencia – Visual Modflow), kereskedelmi forgalomban megvásárolható szoftverrel valósult meg. Az előbbi a hőtranszport folyamatot sűrűségfüggő módon is figyelembe veszi, nagy regionális léptékben; míg utóbbi kisebb területű, egyszerű, robusztus megközelítésű modell, mely gyors futtatásokat tesz lehetővé, döntéstámogatói céllal.

A robusztus léptékű, gyors futtatási potenciállal rendelkező hatásbecslési permanens modell előnye, hogy képes a főkarsztos zóna utánpótlódási területein bekövetkezett nyílt karszthoz leszivárgott hozamokat egyensúlyban kezelni a megcsapolási területeken távozó hozamokkal. A modell elsősorban a területen már meglévő termelések és visszatáplálások potenciálszintekre gyakorolt együttes hatását vizsgálja, majd ezt viszonyítja a termelések visszasajtolások nélküli, természetes (csak forrásos) helyzetéhez.

A modellvizsgálat bemeneti paramétereit szakirodalomból, adatbázis elemzésekből, határoztuk meg kiegészítve vízháztartási számításokkal (beszivárgás, megcsapolás), termálkutak egymásrahatás vizsgálatával, valamint mélyfúrás-geofizikai eredményekkel.



**Modellvizsgálati terület fedett földtani térképen ábrázolva**

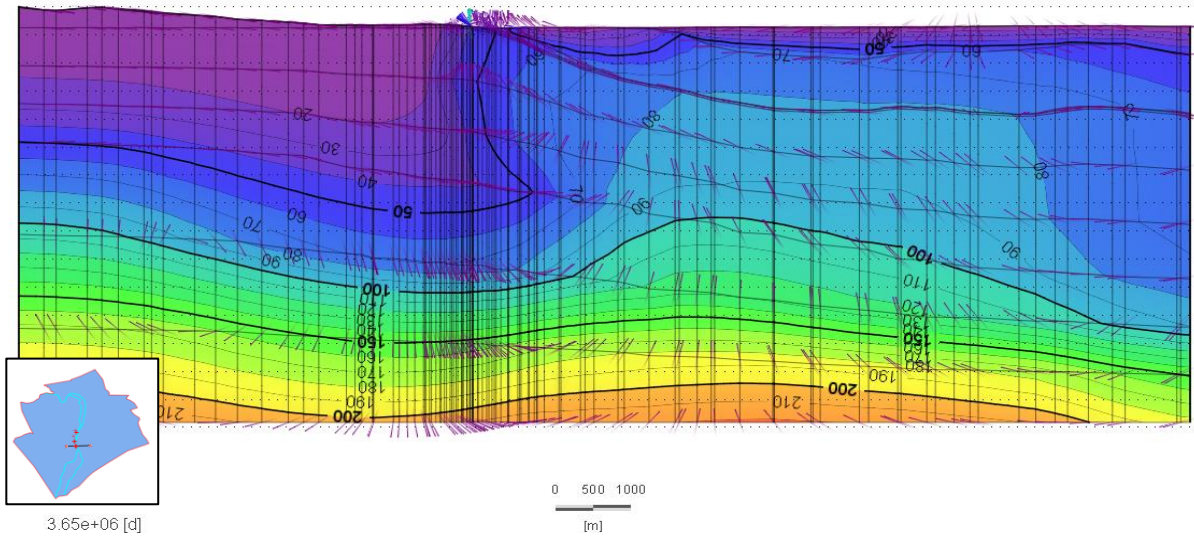


**A modell hálókiosztása**

A komplexebb megközelítésű véges elemes (FEFLOW) hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálat nagymértékben támaszkodott az elkészült földtani modellre, melyek elemei a fontosabb földtani felületek mélységtérképei, mélyföldtani térképek (elterjedés térkép), földtani szelvények és a deformáció történetből levezetett vetőtérkép.

A budapesti termálkarszt modellvizsgálatakor mind a konvektív, mind a konduktív hőtranszport folyamatokat szükséges szimulálni, ennek első lépése a hidrodinamikai modell. A FEFLOW végeselemes szoftverrel készített modell területe regionális léptékű,  $\sim 4477 \text{ km}^2$ , a források környezetében nagy arányú hálósűrítéssel.

A modell mérettartományával arányos mértékben elérte az elvárható pontosságot, alkalmas *what-if* típusú kérdések megválaszolására, mint pl. új termelő objektumok, meglévő kutak hozamváltozásának és a visszasajtott víz hőmérsékletmódosító hatásának becslésére. A modellvizsgálatba a sűrűségfüggő áramlás szimulálásával jól szemléltethető a belvárosi régióban a Duna mentén lezökkenő alaphegység okozta hőmérsékleti anomália.

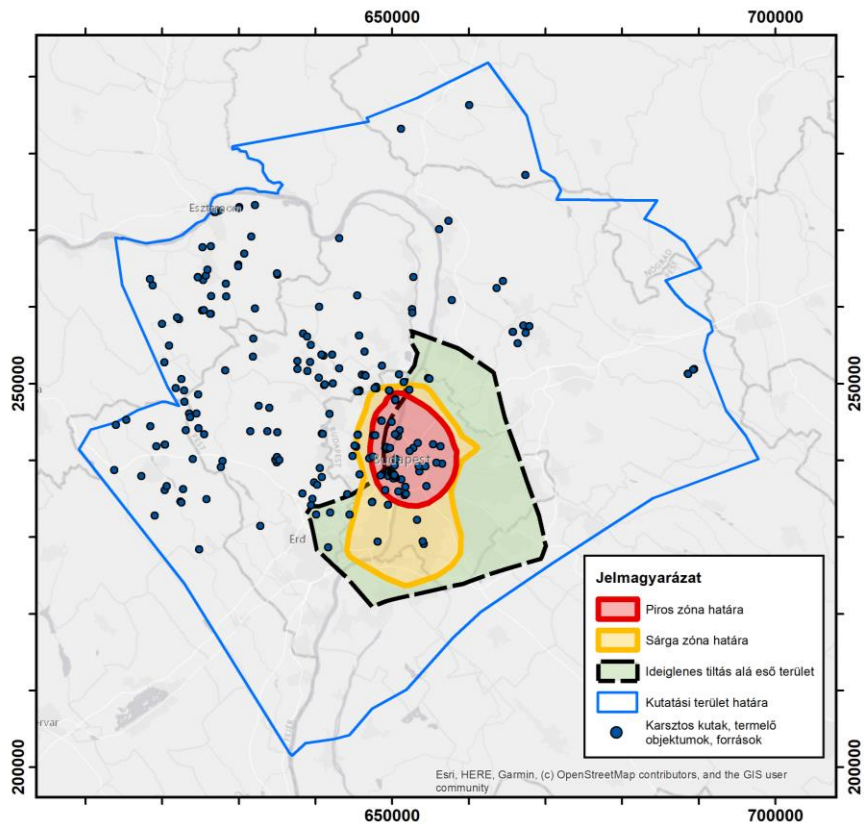


**Modellezett vertikális hőmérséklet-eloszlás a Dunára merőlegesen**

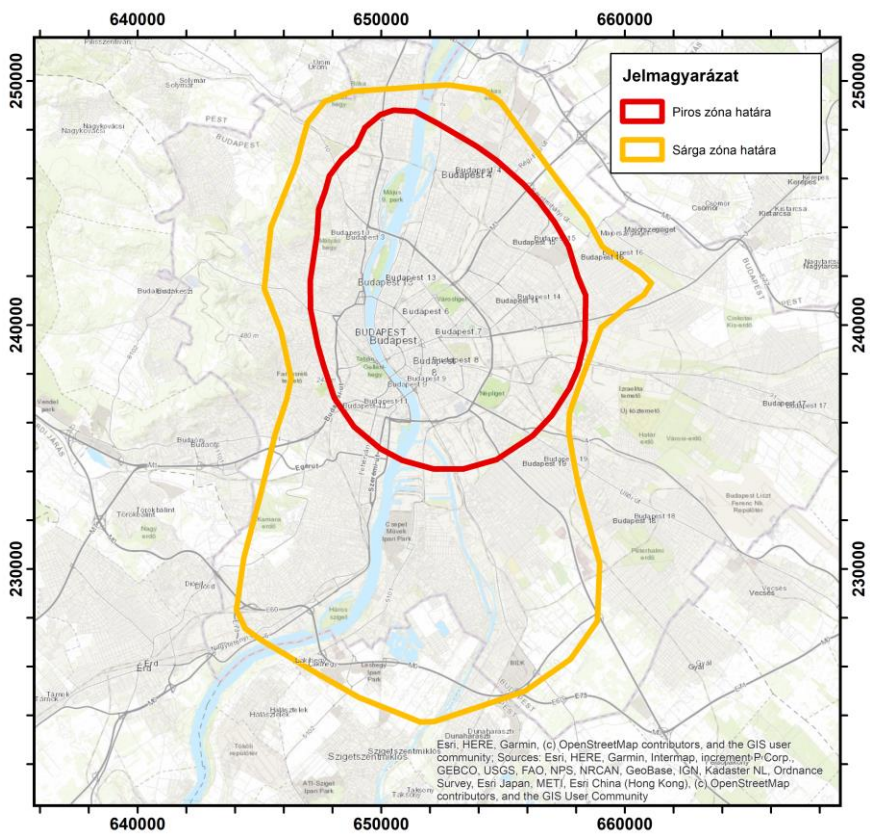
#### 4. Zónás védelmi javaslat

A rendelkezésre álló földtani, geofizikai és vízföldtani adatok elemzésén alapuló hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálat felhasználásával hatósági döntéstámogató rendszert dolgoztunk ki Budapest régiójára a geotermikus hasznosítások engedélyezési folyamatának segítésére.

A modellvizsgálat alapján a már meglévő termelő objektumok által okozott nyomás-, illetve vízszintcsökkenésre és a kutakból visszafelé indított 50 éves áramvonalképre alapozva született meg az alábbi zónás védelmi javaslat, amely a meglévő hasznosítókat – többek között a gyógyfürdőket – ellátó termálkarszt források és kutak működésének fenntartásához szükséges. A kockázati zónákat az alábbi ábrák szemléltetik.



A víztermelő objektumok védőzónájának kialakítása



A piros és a sárga zóna határa

### **Piros zóna**

- A piros zóna tiltott terület, ide visszasajtolással se javasolt engedélyt kiadni, illetve ne érintse újonnan kijelölendő védőidom sem.

### **Sárga zóna**

- A sárga zóna korlátozott terület. Az engedélyezés különös körülményt és további vizsgálatokat igényel.
- Ezen a területen számítani lehet arra, hogy nem adnak ki vízkivételi engedélyt, vagy csak kisebb kontingenssel kerül jóváhagyásra.
- A termelés nem engedélyezhető visszasajtolás nélkül.
- Javasolt ezen a területen kiterjesztett interferencia tesztek elvégzése.
- Javasolt az adott kérelem kutatási területét meghaladó méretű és a szomszédos használatokat figyelembe vevő, hidrodinamikai és hőtranszport modell készítése. Engedély abban az esetben adható ki, ha ez a modell igazoltan alátámasztja a meglévő hasznosítók védettségét.

### **Zöld zóna:**

- A piros és sárga zónákon kívüli területeken az engedélyek kiadása az ország többi területéhez hasonló módon történik.

A fentiek figyelembevételével, javasolt bizonyos időközönként, például a Vízyűjtő-gazdálkodási Terv (VGT) felülvizsgálataival összhangban, illetve negatív tendenciák (vízszint, vízhozam-, hőmérséklet-csökkenés, vízminőségváltozás) észlelése esetén a budapesti termálkarsztot hasznosítók védelme érdekében meghozott döntéseket átértékelni, felülbírálni.

*A feladat végrehajtás során számos szakmai és szakmapolitikai felismerés született, többek között a továbbkutatás irányaira, a termálkarsztvíz monitoring, valamint a jövőben elkészítendő üzemirányítási terv szükségességére vonatkozóan. Az **elkészült tanulmány részletes szakmai leírása a Függelékben található.***

# FÜGGELÉK

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés.....</b>	<b>4</b>
<b>2. A budapesti termálkarszt területének földtani modellje.....</b>	<b>5</b>
2.1. Alapadatok képzése és átértékelése.....	5
2.1.1. Mélyfúrások átértékelése .....	5
2.1.2. Sekélyfúrások átértékelése .....	6
2.1.3. Szeizmikus adatok .....	7
2.1.4. Gravitációs és mágneses adatok revíziója .....	8
2.1.5. Földtani és geofizikai adatok sűrűsége.....	9
2.2. Paleokarszt vizsgálatok .....	10
2.3. Földtani és geofizikai szelvények szerkesztése.....	11
2.4. Földtani térképek szerkesztése .....	13
2.4.1. Szinttérképek.....	13
2.4.2. Vastagság térképek.....	14
2.4.3. Elterjedés térképek.....	14
2.4.4. Prekainozoos aljzat térkép .....	15
2.5. Összefoglalás .....	15
<b>3. A budapesti termálkarszt régiójának hidrodinamikai, hőmérsékleti és vízkémiai viszonyainak értékelése .....</b>	<b>16</b>
3.1. Felhasznált információk, adatkörök .....	16
3.2. A budapesti termálkarszt régiójának hidrodinamikai képe az észlelőhálózati adatok alapján ...	17
3.3. Vízháztartási számítások, az áramlási tér objektumai.....	18
3.3.1. Beszivárgás .....	18
3.3.2. Megcsapolások.....	20
3.4. Termálkutak egymásrahatás vizsgálatának értékelése.....	23
3.5. Geotermikus modellezéshez szükséges paraméterek becslése mélyfúrás geofizikai mérések alapján .....	24
3.6. Vízkémiai és izotóphidrológiai értékelés .....	26
3.6.1. A vízgeokémiai és izotóphidrológiai értékelések célja és eszközei .....	26
3.6.2. Az értékelések során felhasznált kémiai- és izotópadatok.....	26
3.6.3. Vízgeokémiai eredmények és értelmezésük .....	28
3.6.4. Izotóphidrológiai eredmények és értelmezésük.....	34
3.6.5. A vízgeokémiai és izotóphidrológiai értékelések összegzése .....	38
<b>4. A budapesti termálkarszt hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálata.....</b>	<b>39</b>
4.1. A budapesti termálkarszt hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálata FEFLOW környezetben .....	39
4.1.1. Bevezetés.....	39
4.1.2. Hálókiosztás.....	39
4.1.3. Az áramlási tér geometriája.....	40
4.1.4. A modell paraméter igénye .....	41
4.1.5. Hidrodinamikai viszonyok.....	42
4.1.6. Vízháztartási viszonyok.....	43
4.1.7. Hőtranszport paraméterek .....	44
4.1.8. A modellvizsgálat menete.....	46
4.1.9. Eredmények.....	46
4.2. Döntéstámogatói célú, robusztus modellvizsgálat véges differencia módszert alkalmazó Visual MODFLOW környezetben.....	50
<b>5. A budapesti termálkarszt fenntartható hasznosítását megalapozó, döntéstámogató rendszer kidolgozása .....</b>	<b>52</b>
<b>6. Tovább lépési lehetőségek .....</b>	<b>54</b>
<b>7. Irodalomjegyzék .....</b>	<b>57</b>

## Ábrajegyzék

1. ábra: A budapesti termálkasztt projekt kutatási és modellvizsgálati területe a karsztos víztestek szemléltetésével .....	5
2. ábra: A projekt során átértékelt kulcsfúrások térképi megjelenítése .....	6
3. ábra: Az átértékelt sekélyfúrások térképe.....	7
4. ábra: A terület szeizmikus felmértsége a kulcsfúrásokkal.....	8
5. ábra: Gravitációs hatóperem térkép.....	9
6. ábra: A földtani-geofizikai adatok sűrűségét szemléltető térkép.....	10
7. ábra: Paleokarszt vizsgálatoknak alávetett fúrások és észlelt paleokarsztos jelenségek triász időszaki kőzetekben .....	11
8. ábra: A: Szelvénynyomvonalak és megnevezésük; B: Zsámbék–Tura földtani szelvény; C: Zsámbék–Tura gravitációs hatókijelölés és mélységinverzió földtani szelvényen; D: Zsámbék–Tura relatív sűrűség mélységmetszet .....	12
9. ábra: A Prekainozoos szint térképe az elkülöníthető morfológiai egységek nevével.....	13
10. ábra: A prekainozoos aljzatot fedő üledékek vastagsága.....	14
11. ábra: A terület prekainozoos földtani térképe .....	15
12. ábra: A különböző vízszint adatsor típusokat (csoportokat) reprezentáló megfigyelőkutak idősorai.....	17
13. ábra: A különböző vízszint adatsor típusok területi elterjedései .....	18
14. ábra: Beszivárgás számításához készített felszíni földtani képződmények kategóriái .....	19
15. ábra: Számított éves átlagos beszivárgás.....	20
16. ábra: Karsztos termál és langyos forráscsoportok Budapest belterületén (A Lukács-Császár forráscsoport részletezésével) .....	21
17. ábra: OVF vízmércék medián hozamadataiból számolt vízgyűjtőterületre normált megcsapolás .....	22
18. ábra: Kutatási területre eső karsztos víztermelések.....	23
19. ábra: Porozitás összetevők és számításuk karotázis vizsgálatokban .....	25
20. ábra: Mért hőmérsékleti profilok és azokra illesztett elvi hőmérséklet mélység menetek. 25	
21. ábra: A vizsgált kutakhoz tartozó adatkörök .....	27
22. ábra: A karsztrendszer vízmintáinak klasztercsoportjai a főkomponensek és vízhőmérséklet alapján.....	30
23. ábra: Klasztercsoportok Durov diagram szerinti ábrázolása.....	31
24. ábra: Klasztercsoportok Piper diagram szerinti ábrázolása.....	31
25. ábra: A klorid- és a szulfáttartalom eloszlása a főkarszthoz tartozó és az idősebb képződményekre (perm és alsó triász) szűrőzött, valamint a turai kutakra vonatkozóan .....	33
26. ábra: A klorid- és a szulfáttartalom változása az Érd–Csömör szelvény mentén.....	34
27. ábra: A karsztrendszer tápláló és megcsapoló vizek eredete a $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ kapcsolat alapján .....	35
28. ábra: A Lukács- és Császár-fürdő vizeinek főbb izotóp és látszólagos vízkorjellemzői....	36
29. ábra: A vízben oldott szulfát kénizotóparánya a szulfáttartalom függvényében, valamint a vízben oldott szulfát kénizotóp és oxigénizotóp arányok kapcsolata .....	37

30. ábra: A budapesti termálkarszt modelljének hálókiosztása a források és a kutak feltüntetésével .....	40
31. ábra: A modell rétegekiosztása a Zsámbék–Tura földtani szelvény mentén szemléltetve...	41
32. ábra: A hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálat paraméterigénye.....	41
33. ábra: Szivárgási tényező értékek 3D tömbszelvényen ábrázolva.....	43
34. ábra: A teljes és a karsztos utánpótlódású beszivárgás értékek a modell 1. felszínére.....	44
35. ábra: Porozitás értékek térbeli eloszlás 3D tömbszelvényen.....	45
36. ábra: Hővezetési tényező értékek térbeli eloszlás 3D tömbszelvényen .....	45
37. ábra: Az 1. modellrétegre szimulált „talajvízszint”-eloszlás.....	47
38. ábra: A 7. modellrétegre szimulált karsztvízszint-eloszlás a meglévő termálkutak hozamának figyelembevételével.....	47
39. ábra: A 7. modellrétegre szimulált hőmérséklet-eloszlás a meglévő termálkutak hozamának (alacsonyabb hőmérsékletű visszasajtolások) figyelembevételével .....	48
40. ábra: A Gellérthegyi forráscsoport szelvényén ábrázolt modellezett hőmérséklet és Darcy-fluxus .....	48
41. ábra: A Zsámbék–Tura szelvény mentén szimulált vízszint- és hőmérséklet-eloszlás .....	49
42. ábra: Budapest belterületén a termálkarsztos objektumok termelése által okozott modellezett vízszintcsökkenés .....	50
43. ábra: Visual MODFLOW szoftverrel modellezett vízszinteloszlás termelés nélküli és termeléses változatban .....	52
44. ábra: A budapesti víznyerő objektumok (különböző jogi státuszú) védőidom rendszere a 123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet alapján .....	53

## **Táblázatok jegyzéke**

1. táblázat: Egymásrahatás vizsgálatok összegző értékelése.....	24
2. táblázat: Az elkészült hálókiosztás paraméterei .....	40
3. táblázat: Alkalmazott szivárgási tényező értékek a modellben .....	42

## 1. Bevezetés

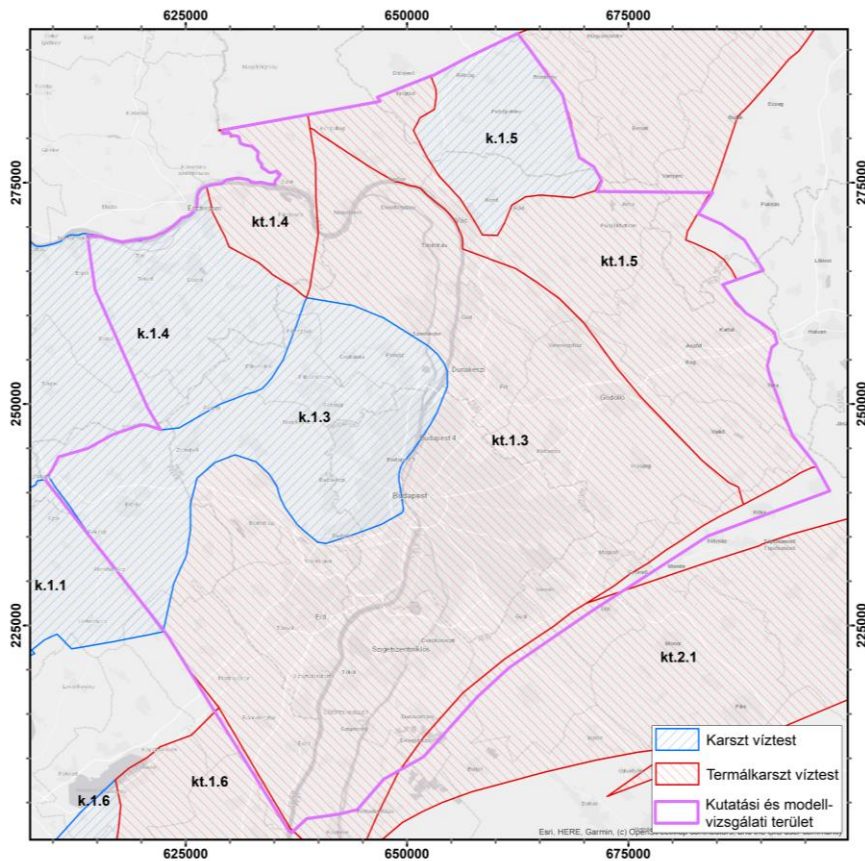
Az SZTFH Földtani Szolgálatának kiemelt feladata az ásványvagyon-gazdálkodást és bányászattal kapcsolatos szakhatósági feladatok ellátását támogató földtani, geofizikai és vízföldtani vizsgálatok végzése. E tevékenységek kiemelt jelentőségűek a nemzetgazdaság szempontjából stratégiai fontosságú nyersanyagok (szénhidrogének, geotermikus energia, ércek, kritikus elemek, építőipari nyersanyagok) előfordulásának, mennyiségének, minőségének és kitermelhetőségének előrejelzéséhez, az ezekkel történő fenntartható gazdálkodáshoz.

A geotermikus-energia hasznosításának kutatási engedélyezése kapcsán (1993. évi XLVIII. törvény a bányászatról; 20/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet) Budapest régiója, kiemelt hőpiaci jelentőségénél fogva, a fókuszba került. A belterületi gyógyfürdők víznyerő objektumainak védelme érdekében az SZTFH 2023 októberében – szakmai feladatának eleget téve – létrehozta a Budapest Geotermikus Kutatási Programot a földtani, geofizikai és vízföldtani osztály munkatársainak részvételével.

A projekt fő feladata, hogy a rendelkezésre álló földtani, geofizikai és vízföldtani adatok elemzésén alapuló hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálat felhasználásával hatósági döntés támogató rendszert dolgozzon ki Budapest régiójára.

A jelenlegi ismereteknek megfelelő, nagy volumenű munka szükségessé tette külsős szakemberek bevonását, szakanyagok, adatok beszerzését is. Az állami és fővárosi szervezetek közül bevonásra került a Közép-Dunavölgyi Vízügyi Igazgatóság, az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF), az Energiaügyi Minisztérium és a Budapest Gyógyfürdői és Hévízei Zrt. (BGYH). Továbbá Székvölgyi Katalin (Ineton Kft.), Csepregi András (Hydrosys Kft.), Deák József és Fórizs István (GWIS Kft.), Szabó Zsófia (Zábrák Kft.), Révi Géza és Davideszné Dömötör Katalin (Aquifer Kft.), Lorberer Árpád Ferenc (Földtudományi Tervező és Fejlesztő Kft.), valamint Budai Tamás, Kerékgyártó Tamás, Gáspár-Baranyai Emese, Mádlné Szőnyi Judit, Erőss Anita, Zentainé Czauner Brigitta, Galsa Attila, Szijártó Márk, Kovács Balázs és Mikita Viktóra egyéni szakértők is segítettek a munkánkat. A Geo-Log Kft. pedig kútvizsgálati – karotázs adatok és jelentések átadásával járult hozzá a projekthez. E szakemberi kör bevonásával konzultációs célú kerekasztal és egyes témakörökben ún. kiskörök is létrejöttek a modellvizsgálat nyomán követésére, korábbi tapasztalatok, modellvizsgálatok eredményeinek megosztására.

Ahhoz, hogy hidrogeológiai szempontból értékelni tudjuk a Budapest belterületi termálkarsztos vízadójának áramlási viszonyait, szükséges egy jóval nagyobb terület lehatárolni, mely tartalmazza mind az utánpótlási, mind a megcsapolási térrészt. Ezt a kutatási és modellvizsgálati területet az 1. ábra szemlélteti, feltüntetve az érintett karsztos víztesteket (hideg karsztos: k.1.3; k.1.4, k.1.5, k.1.1; termálkarsztos: kt.1.3, kt.1.4, kt.1.5, kt.2.1). Jelen tanulmányban az érintett régiót budapesti termálkarsztként említjük, mely fogalomba beleértjük Budapest tágabb környezetét is, ahol termálkarszt víznyerés történik, illetve adott rá a lehetőség.



1. ábra: A budapesti termálkarszt projekt kutatási és modellvizsgálati területe a karsztos víztestek szemléltetésével

## 2. A budapesti termálkarszt területének földtani modellje

A földtani modellt a vízföldtani modell megalapozásához készítettük el. Ennek keretében a területre eső földtani alapadatokat összegyűjtöttük, revideáltuk, szükség esetén átértékelünk. Anyagvizsgálatok elvégzésére nem volt lehetőség. A területre eső geofizikai mérési adatokat szintén összegyűjtöttük és újraértékelünk. Új 2D szeizmikus méréseket is végeztünk, amelynek egy részét a geofizikai feldolgozás után értékeltük és beépítettük a földtani modellbe. A továbbiakban a munka módszereinek, eredményeinek rövid, felsorolásszerű bemutatására szorítkozunk, ezért pl. a terület megismerésének szakirodalmát és eredményeink tudományos ismertetését nem taglaljuk.

### 2.1. Alapadatok képzése és átértékelése

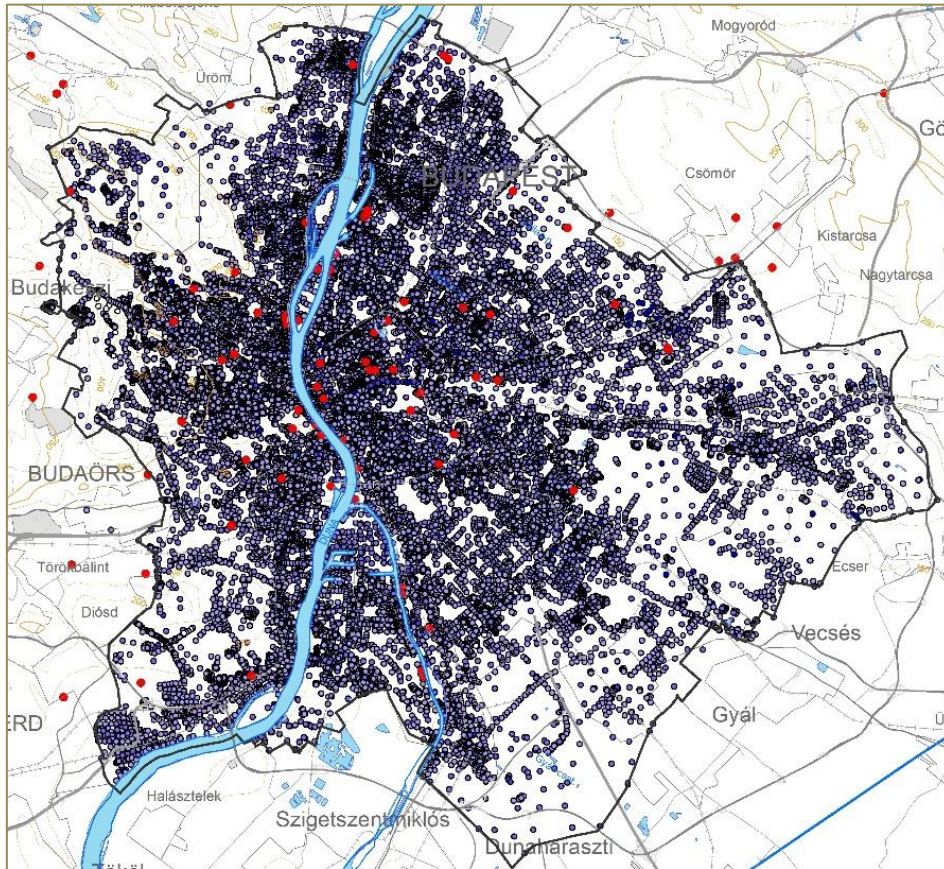
Az alapadatok összegyűjtése, validálása és átértékelése keretében alapvetően földtani és geofizikai adatokat gyűjtöttünk össze a következők szerint.

#### 2.1.1. Mélyfúrások átértékelése

A területre eső fúrások térbeli eloszlása nagyon heterogén, számos területrészen alig található mélyfúrások, másutt (pl. Zsámbék és Drog környéke) a korábbi bányaterületeken rendkívül sok van. Az egyes területrészeket megfelelően reprezentáló és az elérhető legegyszerűsebb területi eloszlást biztosító mélyfúrási válogatást hozunk létre, amelyeket kulcsfúrásoknak nevezünk el. Gondot fordítottunk arra, hogy a területen kívül eső, de a területhatárhoz közel eső fúrásokat is megjelenítsük, különösen, ha azok fontos szerkezeti információt hordoztak. A fúrásokat nagy részletességgel validáltuk, átértékelünk a legújabb földtani-szerkezetföldtani tudás alapján.



Az adatbázis teljes fúrásszáma 31 358 db (3. ábra), ebből 30 m-nél sekélyebb fúrás 30 531 db, 10 m-nél sekélyebb 25 549 db fúrás. A teljes rekordszám 142 159 db.



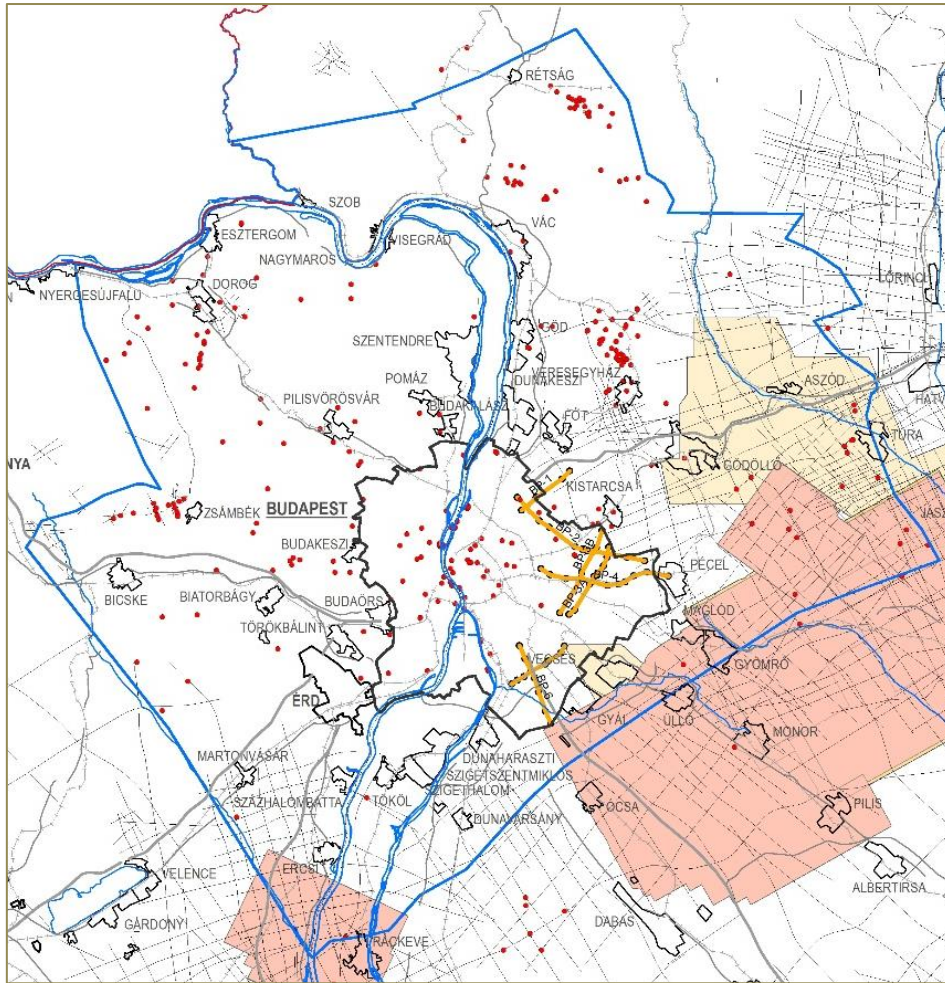
3. ábra: Az átértékelt sekélyfúrások térképe. A lila szín a 10-100 m-es mélységintervallumban a mélyebb tartomány felé mélyül. Pirossal a kivágatba eső kulcsfúrások láthatók

### 2.1.3. Szeizmikus adatok

A projekt keretében a területre eső **archív** 2D és 3D szeizmikus adatállomány (4. ábra) újraértelmezését elvégeztük. Ennek során a szabadon hozzáférhető szelvények és tömbök teljességét, a titkos 3D tömbök közül a Vecsés szeizmikus tömböt a MOL Nyrt. és az SZTFH között létrejött megállapodás alapján feldolgoztuk.

A projekt során új 2D szeizmikus szelvényeket is lemértünk, feldolgoztunk és értelmeztünk. A teljes budapesti mérési kampány során 6 db új 2D szeizmikus szelvény több mint 55 km összhosszában készült el (4. ábra).

A mérési kampány célja a prekainozoos aljzat mélységének, morfológiájának, az idősebb miocén és a paleogén képződmények vastagságának és települési helyzetének, valamint a területet érintő főbb tektonikai elemek leképezése volt. 2023. decemberében a Rákospatak menti Bp-4 vonal lemérésére került sor összesen 13 km hosszúságban, mely eredménye már áprilisra beépült a földtani modellbe. A mérési kampány a 2024-es mérései februárban folytatódtak majd a harmadik ütem áprilisban fejeződött be. Az eredményeik a feldolgozás és értelmezés után a jövőben beépülhetnek ezzel tovább pontosíthatják a modellt.

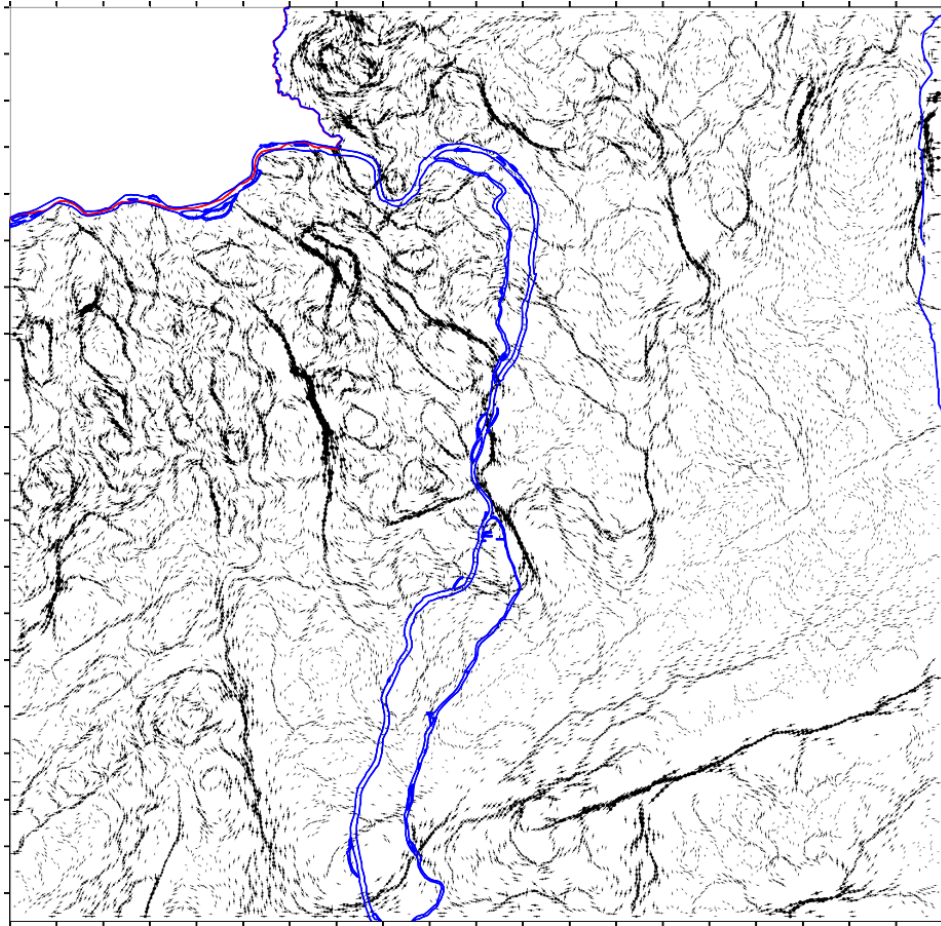


4. ábra: A terület szeizmikus felmérttsége a kulcsfűrészekkel. Vastag sárga vonallal a jelen projekt keretében mért 2D vonalak szerepelnek. Rózsaszínnel a felhasznált nyilvános, halványsárgával a titkos 3D tömbök láthatók.

#### 2.1.4. Gravitációs és mágneses adatok revíziója

Gravitációs geofizikai kutató módszer a tömegvonzás (nehézségi erőter) hatását mutatja az eltérő sűrűségű kőzettestekre, azaz az ez alapján jelentkező eltéréseket mutatja. A mérési pontok száma 67 299 db, a felmérttség 6,867 pont/km<sup>2</sup>-nek adódik. A munka során különböző módszerekkel szűrt és kiemelt térképi megjelenítéseket készítettünk.

A gravitációs hatóperem térkép (5. ábra) azokat a helyeket mutatja térképi nézetben, amely mentén vagy a sűrűségben és/vagy a mélységben jelentős változás áll be. A horizontális gradiens maximumok az erőter felületének inflexiók pontjait, azaz a terület legmeredekebb részeit és azok (dőlés)irányát határozzák meg, a közel függőleges képződményhatárok esetén ezek az eltérő sűrűségű képződmények peremét rajzolják ki és annak dőlésirányát határozzák meg. Ezek értelmezése földtani adatok alapján történik.

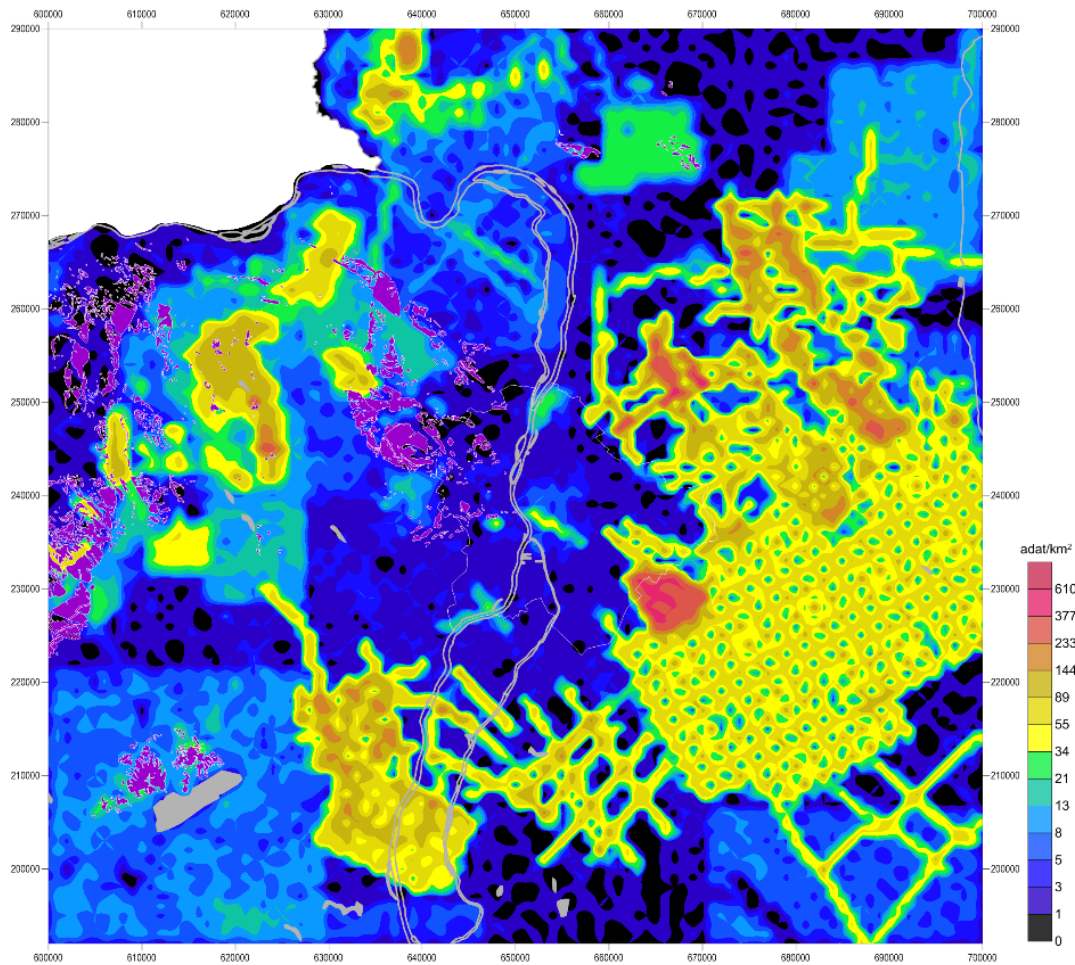


5. ábra: Gravitációs hatóperem térkép

A mágneses mérési adatok tekintetében a teljes területen 11 710 db adat van, de ezek zöme a Velencei-hegység sűrítő méréseiből adódik. Sajnos Budapest közigazgatási területén belül alig van mágneses mérési adat és a terület többi részén, az 1500 m nominális távolságú mágneses felmérés adatai állnak csak rendelkezésre. A mágneses adatokra is igaz, hogy az amplitúdó jelezheti a mágnesezettség erősségét, de jelezheti a mélységi helyzetet is. A mágneses adatokból pszeudogravitációs transzformáció után hatóperem kijelölést végeztünk.

#### 2.1.5. Földtani és geofizikai adatok sűrűsége

A földtani modell megbízhatóságát befolyásolja az alapadatok sűrűsége; ennek szemléltetésére megszerkesztettük a prekainozoos aljzatra vonatkozóan a forrásadat sűrűség térképet (6. ábra). A felszíni feltárások jelenlétét nehéz számszerűsíteni, ezeket egy plusz fedvényként adtuk meg. Mivel a kutatási területen nagy a beépítettség és a főváros területe önmagában nagy területet ölel fel, ezért az elérhető és a potenciálisan telepíthető kutatólétesítmények, mérési pontok száma limitált.



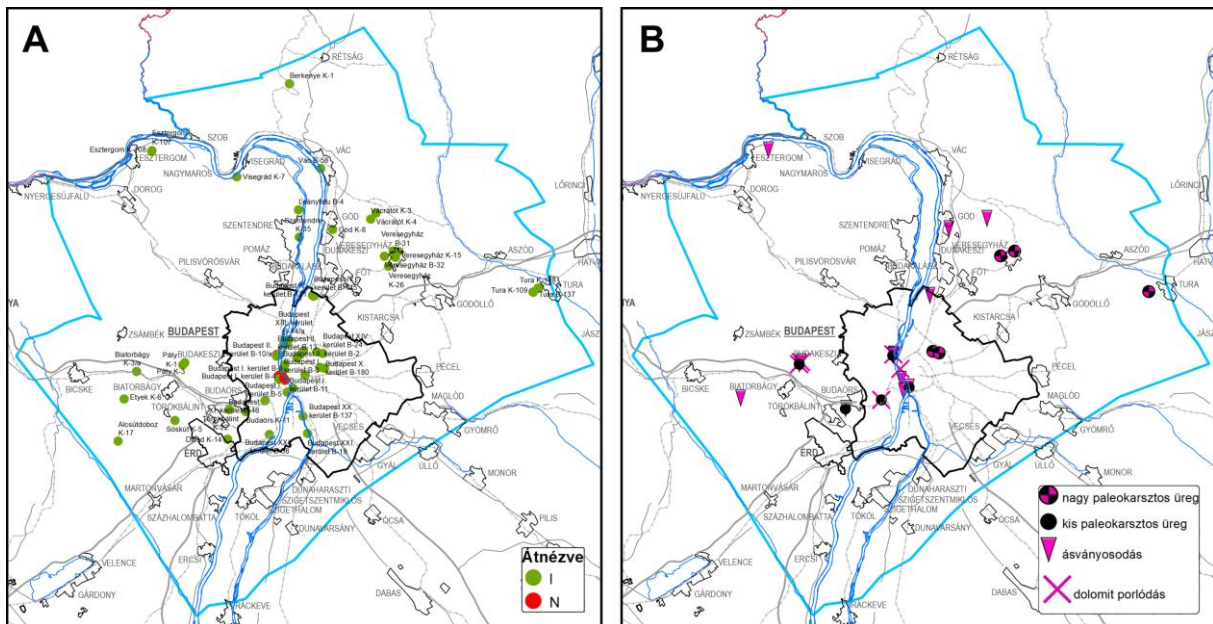
6. ábra: A földtani-geofizikai adatok sűrűségét szemléltető térkép, lila színnel jelölt fedvényként az prekainozoos aljzati képződmények kibúvásaival

## 2.2. Paleokarszt vizsgálatok

Az eddigi kutatásokat összegző, szintetizáló jellegű kutatást végeztünk a paleokarszt jelenségek keletkezési mechanizmusai, litológiai meghatározottságuk és térbeli elterjedésük tekintetében. A kutatás fő célja annak megállapítása volt, hogy lehatárolhatók-e olyan zónák, területek elsősorban a vizsgált terület pesti oldalán, amelyek a paleokarsztos üreg-, hasadék- és megnövekedett porozitás-képződés szempontjából a vízföldtani modell számára hasznosak. Vizsgáltuk a kréta szárazulati telogenetikus, az oligocén mezogenetikus és a pliocén–pleisztocén telogenetikus karsztfejlődés fázisait, amelynek során keveredési korróziós hidrotermás barlangképződés zajlott a mindenkori erózióbázison.

A jelenségek területi lehatárolása céljával fúrások, kutak vízföldtani naplóját néztük át és tipizáltuk, majd kigyűjtöttük a dokumentált paleokarszt jelenségeket. A vízföldtani naplóból tételesen 64-et dolgoztunk fel (7. ábra). A leírásokban „nagy üreg”, „kis üreg”, ásványkiválás, dolomitporlás jelenségeket gyűjtöttünk adatbázisba. A térbeli vizsgált több esetben potenciális kapcsolatot tárt fel paleokarszt jelenségek és törésvonalak között, de általános paleokarsztos üregrendszerrel nagyobb sűrűségben érintett területek lehatárolására a kevés adat és fúrás miatt nem volt lehetőség. A paleokarsztos jelenségek litológiától való függése azt mutatta, hogy a triász Dachsteini mészkőben általában nagyobb üregek jönnek létre, míg a Mátyáshegyi mészkőben ez kevésbé jellemző. A dolomitos formációkban repedezettség és porlás volt a leggyakoribb. Több jelenség volt megfigyelhető azokban az esetekben, amikor a triász kőzetek felszínére eocén meszes üledékek települtek. A hipogén karsztos nyomok (kovás zóna, porlás,

ásványosodások, oldásos üregek) térbeli rendszerének lehatárolására a Pesti síkság alatt továbbra sincs elegendő ismeret.



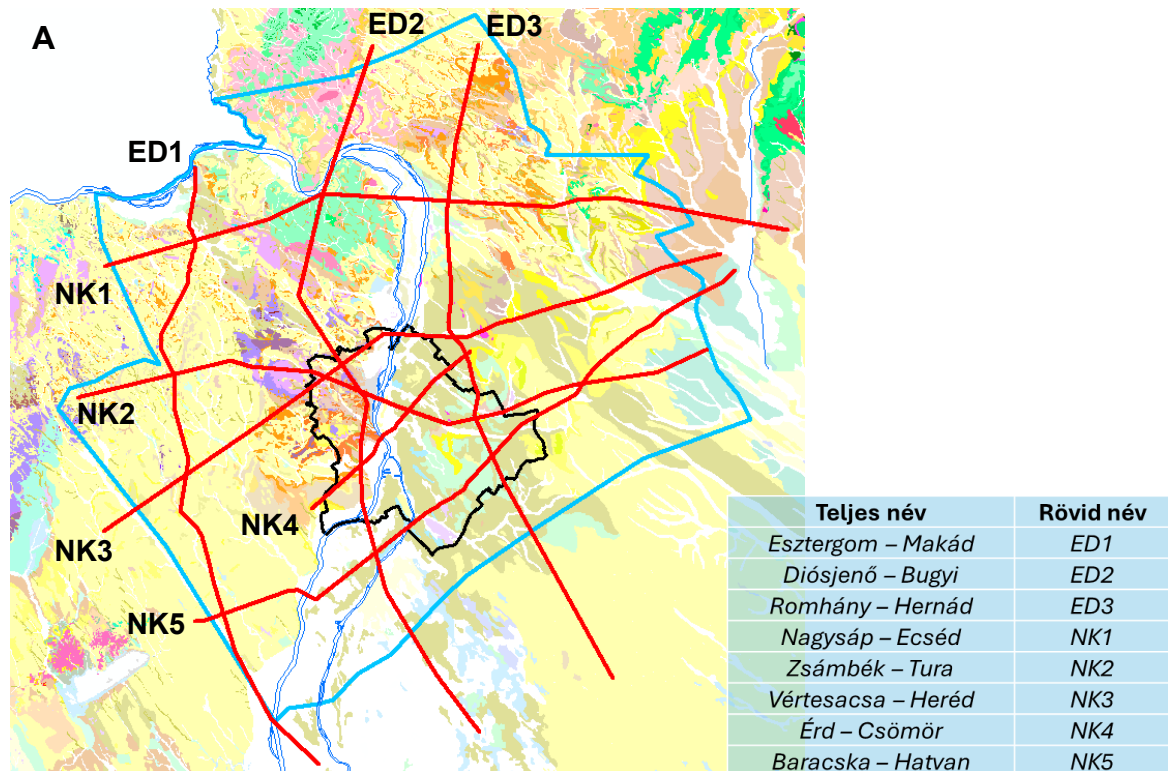
7. ábra: Paleokarszt vizsgálatoknak alávetett fúrások (A) és észlelt paleokarsztos jelenségek triász időszaki kőzetekben (B)

### 2.3. Földtani és geofizikai szelvények szerkesztése

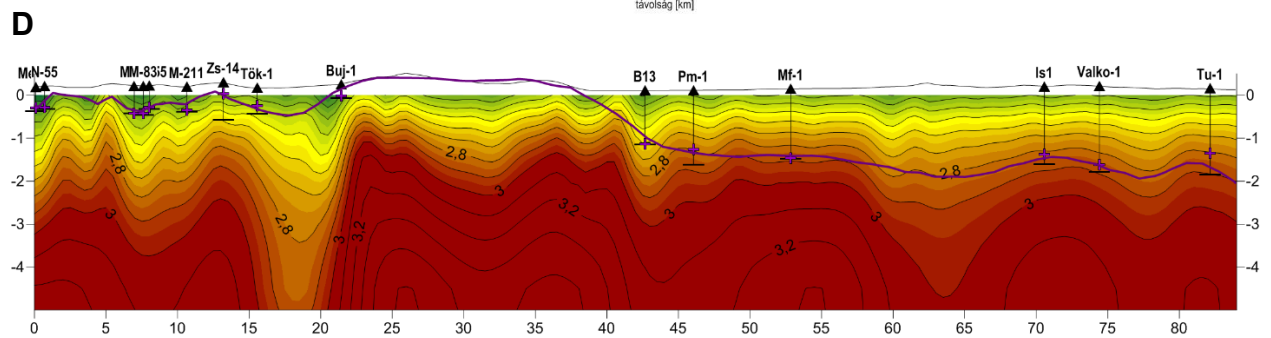
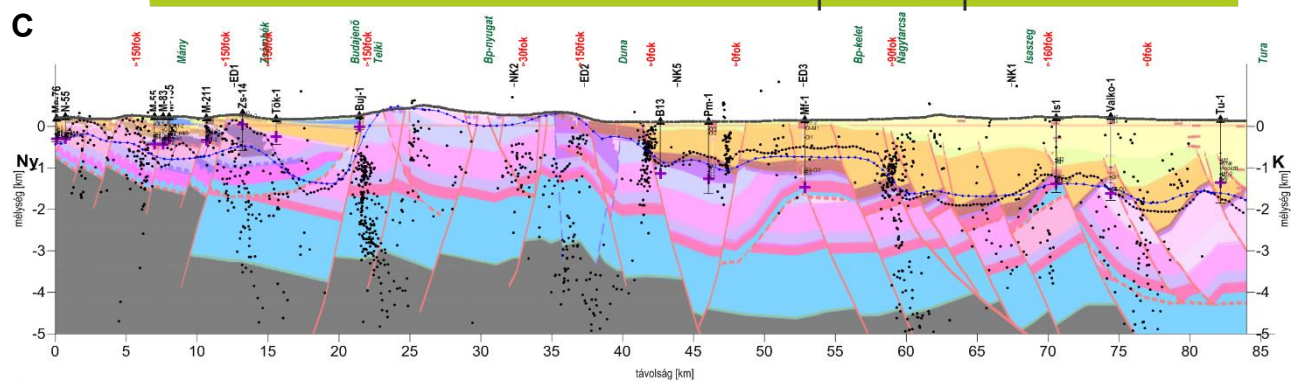
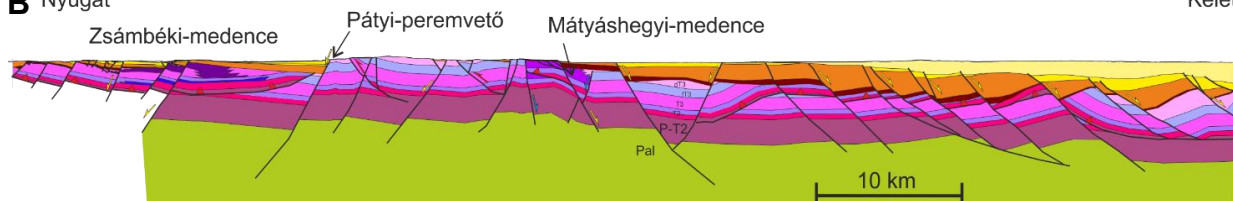
A földtani szelvényt szerkesztéshez felhasználtunk a felszíni földtani térkép kibúvásainak elterjedését, rétegdőlés adatait, a kulcsfúrások, az átértékelt fúrások és az aljzatot ért fúrások adatait, és a 2D és 3D szeizmikus szelvények és tömbök értelmezései alapján kapott vetőket és szinttérkép felületeket. Figyelembe vettük a korábban publikált eredményeket, például földtani térképeket (pl. WEIN 1972, GYALOG et al. (szerk.) 2016b), a metró alagutak földtani dokumentációját (pl. GYALOG et al. 2016a), valamint a terület földtani és szerkezetföldtani szakirodalmát (FODOR et al. 1994, BADA et al. 1996, BUDAI et al. 2018, HÉJA et al. 2022). Nyolc szelvényt szerkesztettünk, amelyek nyomvonalait a vízföldtani modell igényeinek figyelembevételével jelöltük ki és törekedtünk arra, hogy szelvények lehetőleg merőlegesen fussanak a főbb térképi léptékű szerkezetek (vetők, gyűrődések) csapására (8. ábra). Így a K-Ny és ÉK-DNy csapású szelvényeken elsősorban a miocén normálvetők, míg az É-D csapású szelvények a kréta kompressziós és paleogén eltolódásos szerkezetek bemutatását hangsúlyoztuk.

Ugyanezekben a nyomvonalakon, a földtani tartalom fedvényeként geofizikai szelvényeket is szerkesztettünk (8. ábra), amelyek mentén kigyűjtöttük a gravitációs, mágneses geofizikai adatokat.

*Abramagyarázat: Szelvénymenti automatikus feldolgozási eljárások („Werner”, „Multisource Werner”) segítségével a Bouguer-anomália görbe alapján a lemez-, kontaktus modellre jellemző helyeket (fekete pontthalmazok által leképezett vetők, sasbércek) és kétréteges inverziós modellt alkalmazva („Cordell és Henderson” eljárás) a medencealjzat felszínének lefutását is robusztusan leképeztük (lila pontvonal).*



**B** Nyugat Kelet



8. ábra: A: Szelvénynyomvonalak és megnevezésük; B: Zsámbék–Tura földtani szelvény; C: Zsámbék–Tura gravitációs hatókijelölés és mélységinverzió földtani szelvényen; D: Zsámbék–Tura relatív sűrűség mélységmetszet

## 2.4. Földtani térképek szerkesztése

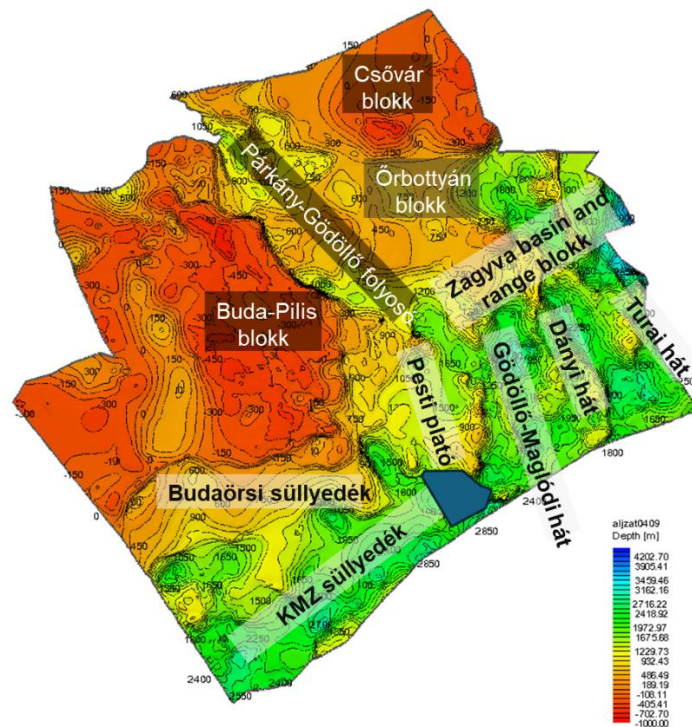
A projekt keretében rendszeres földtani térképezést nem, néhány terepbejárás során lokálisan, reambulációs tevékenységet végeztünk. Felszíni földtani térképként a Budapest Geokalauz kötethez megjelent 1:50 000 méretarányú térképet (GYALOG et al. (szerk.) 2016b), ennek határa és a terület határa közötti részeken a Magyarország 1:100 000-es méretarányú földtani térképszelvényeit (GYALOG és SIKHEGYI 2005) vettük figyelembe.

### 2.4.1. Szinttérképek

A felszíni földtani térképek, a fúrások, a szeizmikus értelmezés adatai és a gravitációs adatok figyelembevételével, kiválasztott földtani szintekre morfológiai szinttérképeket szerkesztettünk (9. ábra). Ez azt jelenti, hogy az adott felületen a kiválasztott földtani időszint tengerszint feletti mélységtérképe rajzolódik ki. A szinttérképek meredekségéből lehet következtetni a törések, vetők jelenlétére, a szintek 3D vetőpoligonokkal történő elmetszésére nem volt lehetőség. A következő szintekre készültek mélységtérképek BABINSZKI et al. (szerk. 2023a, b) alapján (a projektben használt elnevezésekkel):

- Pre-kvarter
- Pre-pannóniai
- Pre-szinrift
- Pre-Kiscelli és Tardi Formáció
- Prekainozoos aljzat
- Iszkahegyi Mészke tető

*Ezek közül a Pre-szinrift szint kíván némi magyarázatot, ezt a Zagyvapálfalvai és Somlóvásárhelyi Formációk, mint cikluskezdő üledékek talpán húztuk meg, amely területünkön közel egységesen ottmangi korúnak tekinthető. A Pre-Kiscelli és Tardi Formáció szint sem szokványos földtani modellszint, de területünkön szintén fontos szerepet kap, ezt a szintet a Budai Márga Formáció tetejéhez rögzítettük. Az Iszkahegyi Mészke Formáció tetejére szerkesztett szint a szelvények szerkesztésében játszott szerepet és a vastag aljzati képződménysor tagolhatóságát szolgálta.*

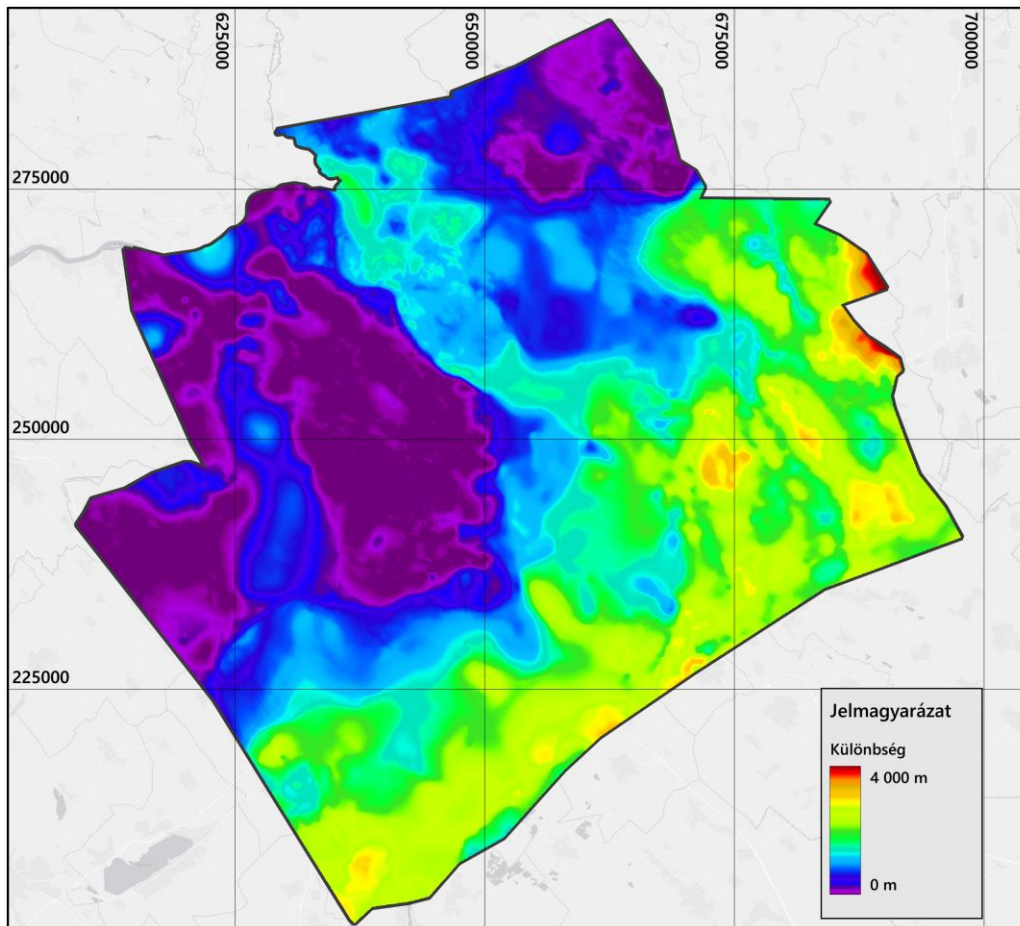


9. ábra: A Prekainozoos szint térképe az elkülöníthető morfológiai egységek nevével. A Vecsés 3D területe a MOL–SZTFH szerződés értelmében kitakarva.

A földtani felületek elkészítéséhez az adatpontok kiterjesztését interpolációs módszerrel (*convergent interpolant*) végeztük el. Ennek eredményeként 50×50 méteres felbontású egyedi horizontszinteket (grideket) hoztunk létre. Az így létrejövő, egymást metsző horizontok még pontatlan földtani képet alkotnak, mivel a rétegrend ebben a fázisban még nem pontos, emiatt egyes idősebb képződmények a fiatalabbak fölé kerülhetnek. Ezt a felületek egymáshoz történt manuális illesztésével, metszésével oldottuk meg. Ezen szintek már megfelelő alapot nyújtottak a későbbi vízföldtani modellezéshez.

#### 2.4.2. Vastagság térképek

A szinttérképek egymásból történt kivonásával vastagság térképeket képeztünk. A *Pre-kvarter* és *Pre-pannóniai* szintek a pannóniai képződmények, a *Pre-pannóniai* és a *Pre-szinrift* szintek az alsó- és középső miocén képződmények, a *Pre-szinrift* és a *Pre-Kiscelli és Tardi Formáció* szintek az oligo-miocén, a *Pre-Kiscelli és Tardi Formáció* és a *Prekainozoos aljzat* szintek az eocén képződmények vastagságát adják meg. A prekainozoos aljzatot fedő üledékek összvastagságát a 10. ábra mutatja be (a terepszint és a prekainozoos aljzat szintjének különbsége).



10. ábra: A prekainozoos aljzatot fedő üledékek vastagsága

#### 2.4.3. Elterjedés térképek

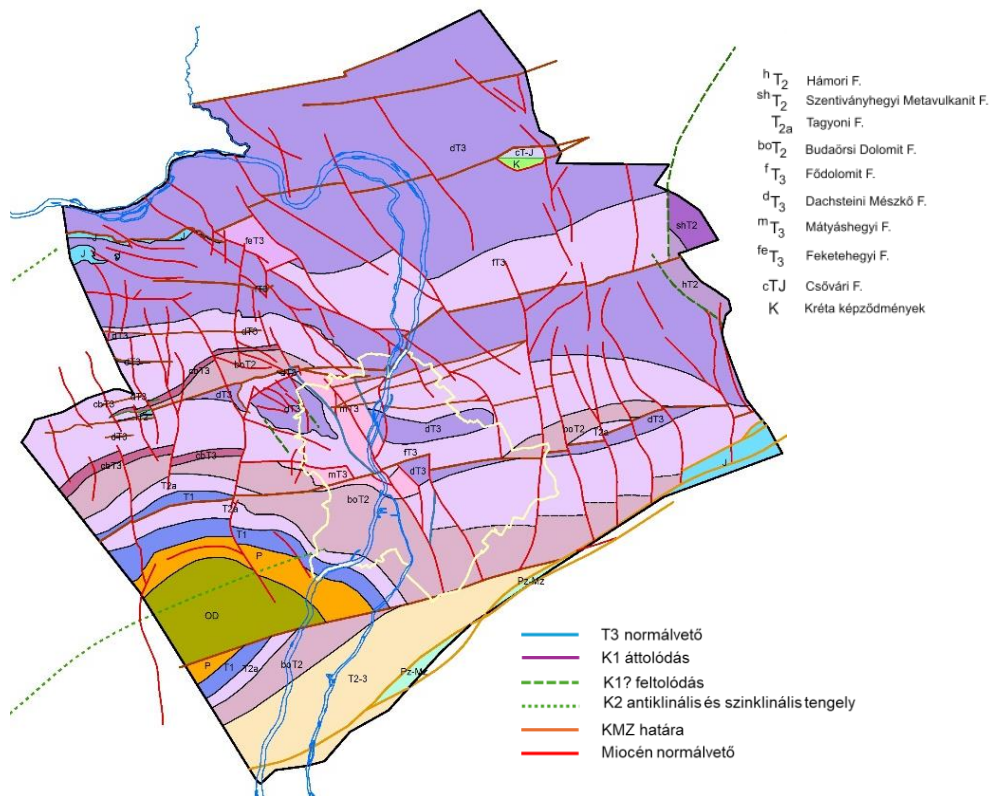
A vízföldtani modell igényei szerint a felszíni földtani térképek, az átértékelt fúrások, szeizmikus értelmezések és szelvények alapján elterjedés térképeket szerkesztettünk. Az elterjedés határát a természetes képződés határa, az utólagos lepusztulás határa vagy a nagyobb, lehatároló szerkezeti vonalak felületének a felszínnel történő metszete adja.

A megszerkesztett elterjedés térképek a következők voltak:

- Pannóniai formációk elterjedése összességében
- Kiscelli és Tardi Formáció elterjedése
- Budai Márga Formáció elterjedése
- Szépvölgyi Formáció elterjedése
- Kosdi Formáció elterjedése
- Prekainozoos aljzati képződmények elterjedése (részletezése a következő fejezetben)

#### 2.4.4. Prekainozoos aljzat térkép

A vízföldtani modell szempontjából az egyik legfontosabb földtani termék az aljzati képződmények elterjedését és a főbb szerkezeti zónákat ábrázoló prekainozoos földtani térkép (11. ábra), amihez morfológiai szinttérkép is tartozik. Ez a szint biztosítja a legjelentősebb karsztos tárolókat, megvalósítja az áramlás legnagyobb részét, az ebben futó törészónák szigetelhetik vagy éppen elősegíthetik bizonyos irányokban az áramlásokat és befolyásolhatják a hőmérséklet eloszlását. A térképet a HAAS et al. (2010a, b) prekainozoos térkép felújításával, átszerkesztésével valósítottuk meg. A térképhez figyelembe vett fúrások, szeizmikus adattömeg a 2010-es térkép készítésekor alkalmazottnak többszöröse volt, ezen kívül a 8 db szelvény ellentmondásmentes megszerkesztése is alapvetően határozta meg a térkép koncepcióját.



11. ábra: A terület prekainozoos földtani térképe

## 2.5. Összefoglalás

A modell megalkotásához az elérhető legnagyobb számban felhasználtunk pontszerű, szelvénymenti és 3D adatrendszereket. Ezeket a kutatásra fordítható idő függvényében átvértékeljük, ellenőriztük, újra értelmeztük. Megadtuk, és térképen ábrázoltuk az aljzatra

vonatközön az adatsűrűségből fakadó bizonytalanságokat is (6. ábra, földtani-geofizikai adatok sűrűsége [adat/km<sup>2</sup>]).

Döntően Budapest közigazgatási területén belül, a pesti oldalon eltemetett helyzetű karsztos tárolóra és tektonikára vonatkozóan növeltük a modell megbízhatóságát nagy felbontású, 55 km 2D szeizmikus hálózat lemérésével és kiértékelésével.

Adatértékelésekkel és földtani, valamint gravitációs szelvények szerkesztésével levezetett 2D értelmezést és koherens koncepciójú földtani szelvényhálót generáltunk a 3D modell alapjaként.

Számos rétegtani és szerkezeti részeredmény mellett fő termékként új, modellből levezetett prekainozoos földtani-tektonikai aljzattérképet és tengerszinthez viszonyított, aljzatszintet szerkesztettünk, amely felbontásában és részletességében jelentősen felülmúlja a korábbi aljzattérképeket. A térkép koncepciója egységes, fő elemei a közel K-Ny-i kréta rátolódási zónák, amelyek a paleogénben főként jobbos ferde elmozdulásokként felújultak és a terület mezozoos képződményeinek pásztás eloszlási mintázatáért felelősek. Ezeket a szerkezeteket ÉNy-DK-i és É-D-i csapású miocén normálvetők írják felül, melyek felelősek a pásztás szerkezet közel harántirányú feldarabolódásáért és a mezozoos képződmények kelet felé történt mélybe zökkenéséért.

Új koncepcionális modellt alakítottunk ki a mezozoos képződmények szerkezeti képiének kialakulására, amely új paleo-geográfiai megfontolásokon és a Budai-hegység új alpi fejlődéstörténeti megközelítésén alapszik. Ezek szerint a Dunántúli-középhegység északkeleti régiójának triász–alsó-kréta rétegcsoportja déli irányba történt mozgással, kis behatolású, lapos síkok mentén, rátolódásos deformációt szenvedett. Ez a deformáció elkülönül a Dunántúli-középhegység fő tömegére érvényes és eddig annak fő szerkezetalakító eseményének tekintett középső-kréta orogén deformációtól, amely mélyebb behatolású síkok mentén, a perm vagy idősebb képződményeket is érintve gyűrt-pikkelyes szerkezeteket hozott létre. Ez a szerkezeti megközelítés a Dunántúli-középhegység fejlődéstörténetére nézve új eredmény.

### **3. A budapesti termálkarszt régiójának hidrodinamikai, hőmérsékleti és vízkémiai viszonyainak értékelése**

#### **3.1. Felhasznált információk, adatkörök**

A budapesti termálkarszt hidrodinamikai viszonyainak tanulmányozása sok-sok évtizede tart. Az ismereteink leginkább a karsztot ért hideg és termálvizet szolgáltató kutak révén bővült, a forráscsoportok hasznosítása és tanulmányozása pedig történelmi időkre nyúlik vissza.

A modellezési munkához az OVF nyilvántartásából egy ~400 objektumból álló törzstábla került leszűkítésre, amit további ellenőrzési és javítási procedúrának vetettünk alá. A vízkémiai adatbázis egy része saját fejlesztett adatokon, valamint a BGYH-tól kapott információkon alapult. További fontos információk származnak a BGYH-tól kapott üzemelési információk.

A vizsgálatok fókuszában elsősorban az ún. főkarsztvíztárolót szűrőzött kutak, illetve az azt megcsapoló források álltak. A főkarsztvíztárolóhoz sorolhatók szűkebb értelemben a Dunántúli-középhegység területéről is jól ismert felső triász mészkövek (pl. Dachsteini Mészkő Fm.), dolomitok (pl. Fődolomit Fm.), valamint tágabb értelemben véve ide tartoznak az ezekkel szoros hidraulikai kapcsolatban álló fiatalabb (eocén-oligocén) karsztosodott képződmények (pl. Kosdi Fm., Szépvölgyi Mészkő Fm., Budai Márga Fm.). E fogalomba nem értjük bele az alsó triász és perm aljzati képződményeket, amelyek hidraulikai és vízkémiai tulajdonságaikban is gyakran jelentősen eltérnek a főkarszttól.

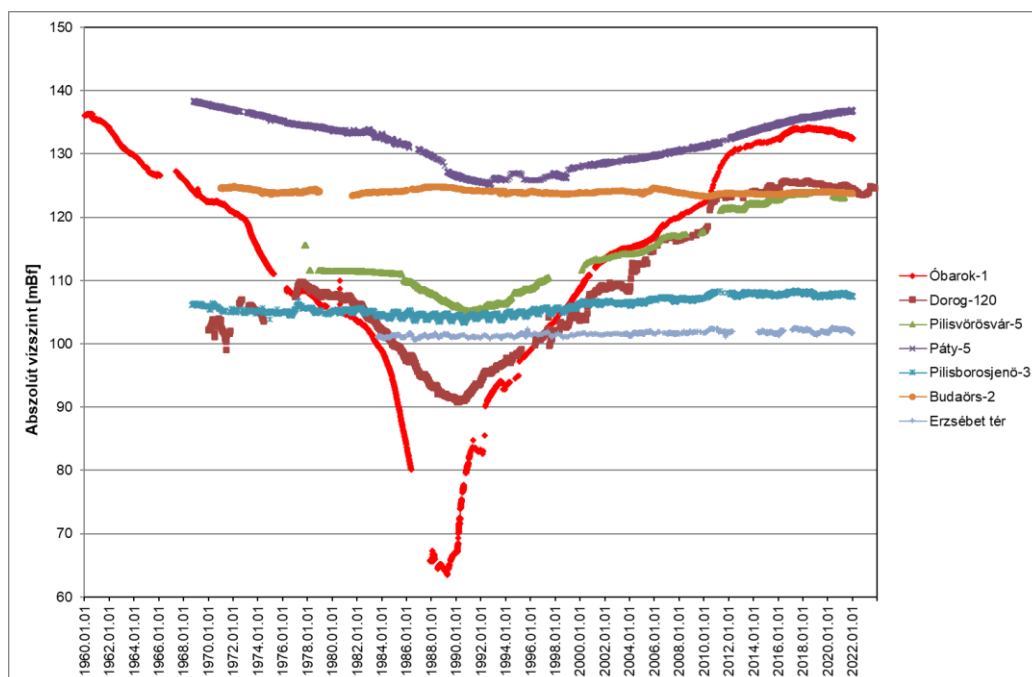
Modellvizsgálati szempontból a Hydrosys Kft.-től a Dunántúli-középhegység modellvizsgálata kapcsán további fontos információkat osztott meg.

### 3.2. A budapesti termálkarszt régiójának hidrodinamikai képe az észlelőhálózati adatok alapján

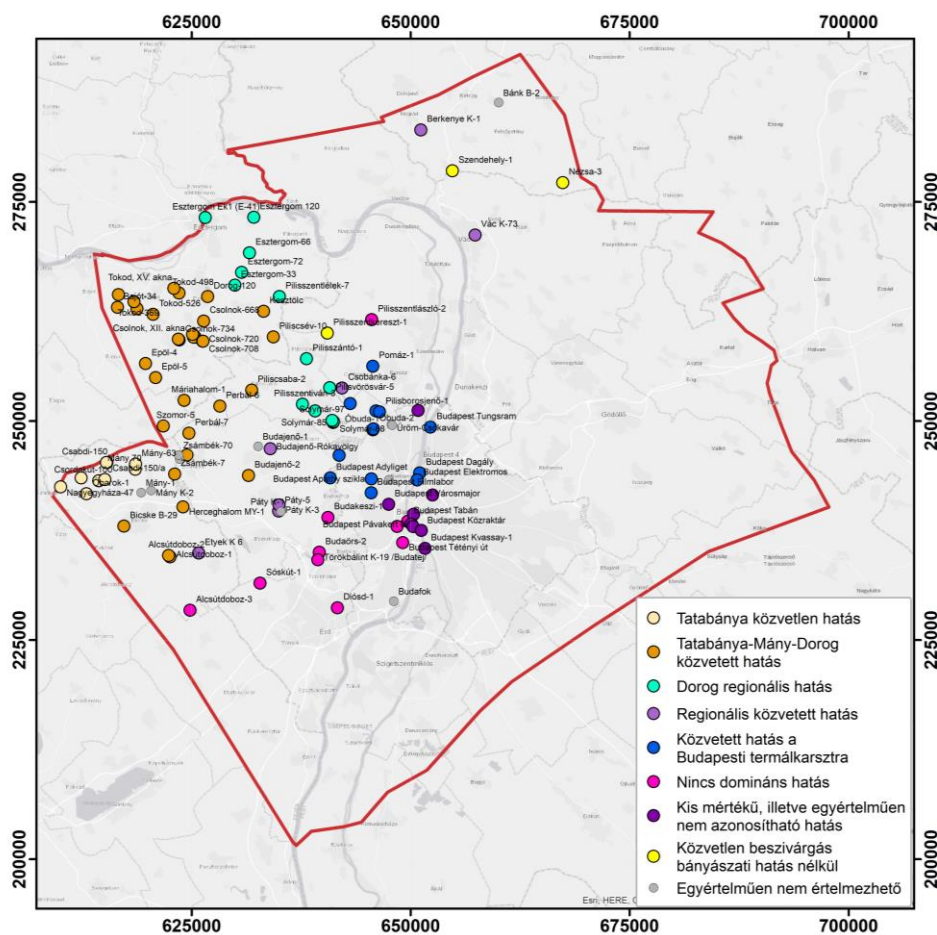
A térségi észlelőhálózat adatainak részletes elemzése nagy mértékben segítette a koncepcionális modellvizsgálatot. A projekt keretében vizsgáltuk a vízföldtani modellezés tágabb területére eső vízügyi törzshálózat (OVF által átadott adatsorok), valamint az SZTFH által üzemeltetett karsztvízszint-megfigyelőkutak mérési idősorait, összesen 108 kútra vonatkozóan.

A vizuális elemzés során egyértelműen azonosítottuk a bányászati vízelések hatására a 60-as évektől bekövetkezett regionális karsztvízszint csökkenést, illetve a bányabezárásokat követően a 90-es években megkezdődött karsztvízszint visszatöltődést. A bányászati vízelés depressziós hatása regionális léptékű volt, több hideg- (k.1.3; k.1.4, k.1.5) és termálkarsztos víztestre (kt.1.3 és kt.1.4) is kiterjedt. Ez utóbbi jól nyomon követhető a Budapest északi részén elhelyezkedő termálkarsztos megfigyelőkutak adatsoraiban is (Dagály, Óbuda-1 és -2, Tunggram, Elektromos). Fontos megemlíteni, hogy a bányászati vízelés hatása közvetetten a karsztvíz felszín alatti vízválasztón is túlterjedt.

A bekövetkezett vízszintváltozás térségenként különböző mértékben (1–86 m) jelentkezett (12. ábra). Az idősorok jellege alapján csoportosítottuk az adatsorokat, amelyek jellegzetes területi eloszlást mutatnak (13. ábra). Szignifikánsan elkülöníthetők azok a területrészek, amelyben hasonló vízszintesökkenési, illetve emelkedési trendek tapasztalhatók. Az említett különbségek földtani-, vízföldtani adottságokra vezethetők vissza.



12. ábra: A különböző vízszint adatsor típusokat (csoportokat) reprezentáló megfigyelőkutak idősorai



13. ábra: A különböző vízszint adatsor típusok területi elterjedései

Az eredmények támogatták a vízföldtani koncepcionális modell kialakítását, a földtani szerkezetek hidrogeológiai szerepének megértését.

Az elkülönített csoportokon belül a vízszintváltozás alapján jellemző időszakokat különítettünk el. Megállapítottuk, hogy 2010. évre szinte valamennyi térségben már a jelenlegi vízkivételek, valamint a természetes folyamatok által befolyásolt vízszintváltozások a dominánsak. Ennek megfelelően a vízföldtani modell kalibrálásához a 2013-2022 közötti időszak átlagos karsztvízszint értékeit vettük figyelembe.

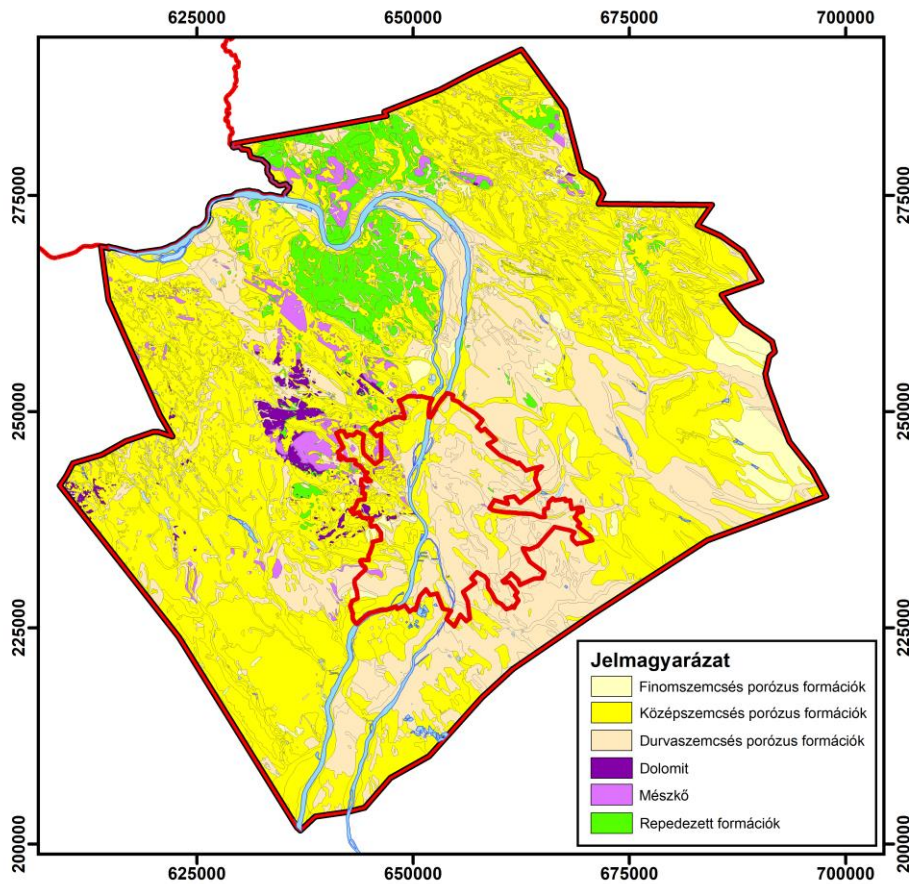
### 3.3. Vízháztartási számítások, az áramlási tér objektumai

A vízháztartás mérlegének számításához figyelembe kell venni a mérleg két oldalán megjelenő hozzáadott, illetve elvett vízmennyiségeket. Hozzáadott vízmennyiség származhat természetes (csapadék, beszivárgás) illetve mesterséges (visszasajtolás) forrásból is. Ehhez hasonlóan a vízkivétel is történhet természetes (vízfolyások, források), illetve mesterséges (vízkivételek) útján is. Ezek mennyiségének meghatározása kulcs fontosságú egy területre készített hidrogeológiai modell kalibrálásához.

#### 3.3.1. Beszivárgás

A felszín alá beszivárgó víz mennyisége nagyban függ a felszínre érkező csapadékmennyiségtől, annak párolgásától, a felszíni lefolyás mennyiségétől és a felszíni földtani képződmények jellegétől. A felszínen található fedőképződmények jellegük alapján csoportosíthatóak porózus (pl.: homok), karsztos (pl.: mészkő) vagy repedezett (pl.: vulkanit) kategóriába (14. ábra). A porózus kategóriát szemcseméret alapján három alkategóriába

soroltuk: finom-, közép-, és durvaszemcsés. A repedezett, dolomit és mészkő típusú formációkat földtani besoroláskor külön kategóriaként kezeltük; későbbiekben a dolomit és mészkő karsztos csoportba került összevonásra.

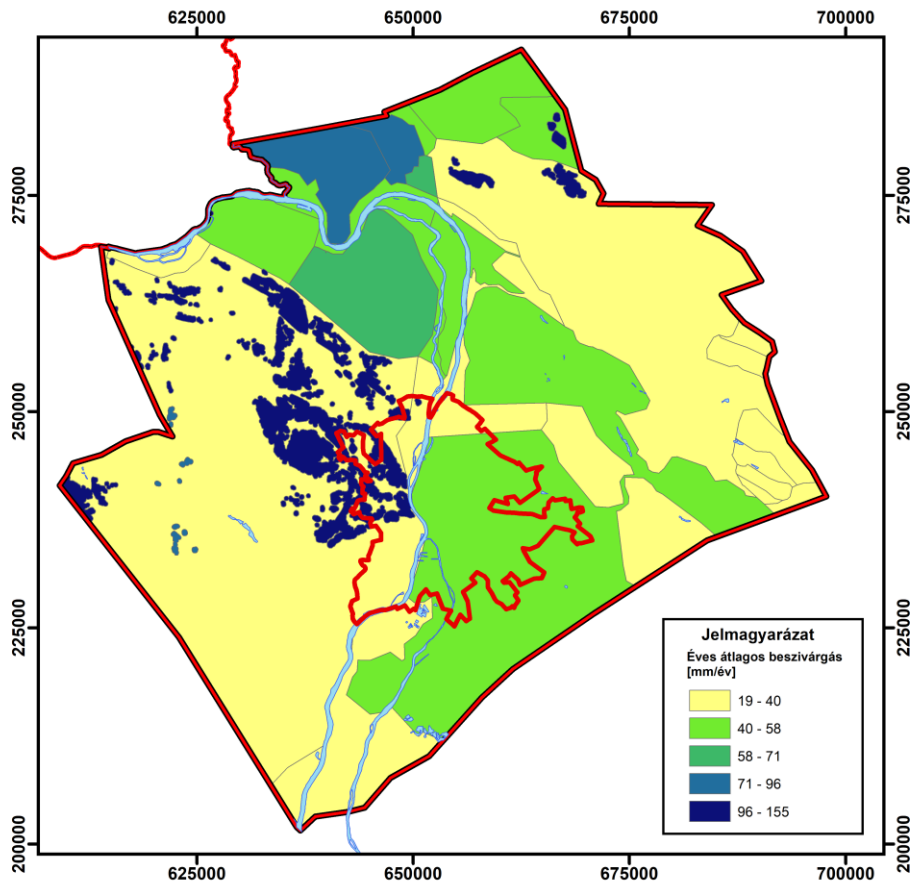


14. ábra: Beszivárgás számításhoz készített felszíni földtani képződmények kategóriái

A porózus, illetve repedezett kategóriájú képződményekre a korábbi, NATÉR2 projekt<sup>1</sup> során készített beszivárgás értékeket vettük alapul (1961-2010). Ezek a UnSat Suite Plus HELP kétdimenziós hidrológiai modellező programmal<sup>2</sup> készültek a csapadék, a felszíni lefolyás és a beszivárgás paramétereinek számításai alapján. A karsztos területekre Csepregi A. (Hydrosys Kft.) által a Morton-féle (MORTON 1983) módszerrel számolt beszivárgás értékeket vettük át két időszakra (1991-2023 és 2014-2023). A porózus, a repedezett, illetve a karsztos beszivárgási értékek együttes térképi ábrázolását a 15. ábra szemlélteti.

<sup>1</sup> <https://map.mbfisz.gov.hu/nater/>

<sup>2</sup> <https://www.epa.gov/land-research/hydrologic-evaluation-landfill-performance-help-model>



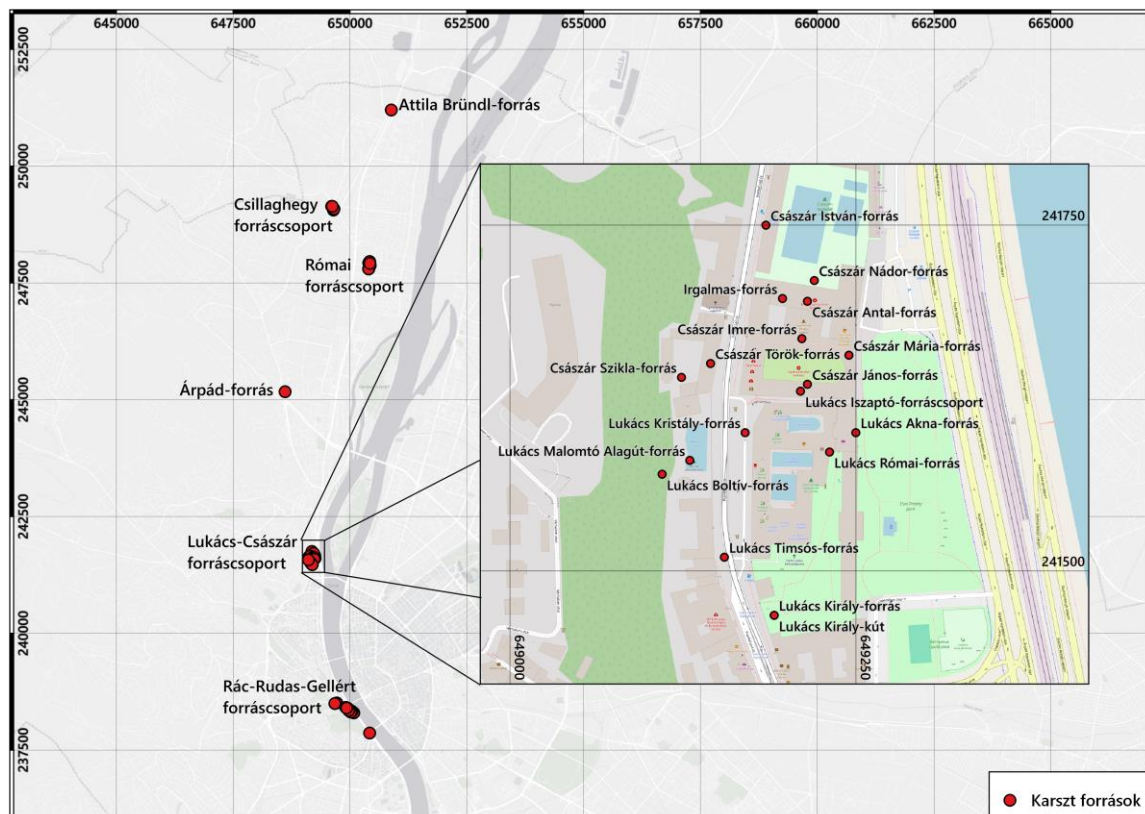
15. ábra: Számított éves átlagos beszivárgás [mm/év]

### 3.3.2. Megcsapolások

A beérkező vizek megcsapolása tartja egyensúlyban a vízmérleg két oldalát. Vízkilépések lehetnek természetesek (pl. párolgás, lefolyás, forrásfakadás), valamint mesterséges vízkivételek.

#### *Források*

A karsztrendszer természetes megcsapolódásaként jelennek meg a karsztforrások. A Budapest belvárosában fakadó források történelmi, kulturális és turisztikai jelentősége kiemelkedő (16. ábra), már évszázadok óta tart a fürdési és gyógyászati célú hasznosításuk (MINDSZENTY (szerk.) 2013). A források egy részét jelenleg a BGYH üzemelteti aknakutas, kutas foglalással. A források vízhozamával, illetve az ehhez tartozó fakadási szinttel lehet a hidrogeológiai modellt megfelelően kalibrálni. Vízhozam idősorokkal csak néhány forrás rendelkezik, ezek adatait az OVF rendelkezésünkre bocsátotta. A területre eső kisebb, hegyvidéki forrásokról csak alkalmoszerű mérési adat van.

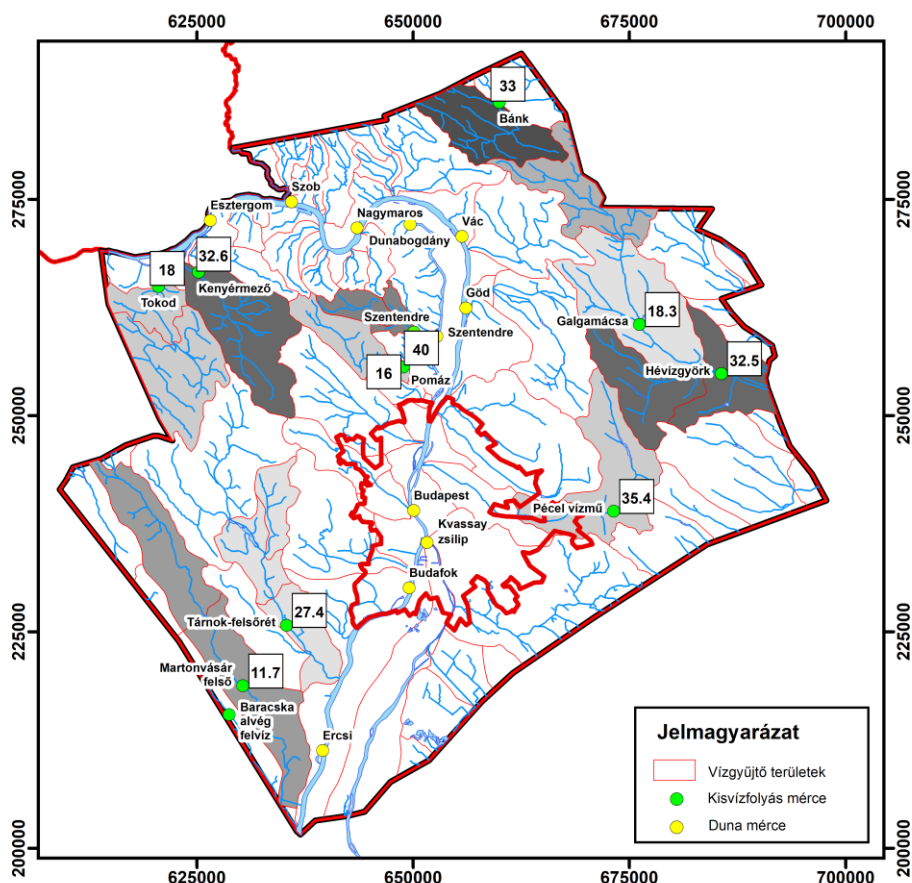


16. ábra: Karsztos termál és langyos forráscsoportok Budapest belterületén (A Lukács-Császár forráscsoport részletezésével)

### Vízfolyások

A vízháztartás egyik legfontosabb elemei a vízfolyások, amik egy adott területről gyűjtik össze a vizet, így a folyókban mért vízhozamot minden esetben a vízgyűjtő területek méretének függvényében vizsgálni.

Az OVF felel a felszíni vizek mennyiségi és minőségi állapotváltozásainak monitorozásáért. A területre eső vízgyűjtőjű kisvízfolyásokra telepített vízszintállomásokról (17. ábra) kapott hosszú idősorok feldolgozása történt meg. A medián értékek alapján, a vízgyűjtők területére normalva, a megcsapolás 11-71 mm/év között mozgott.



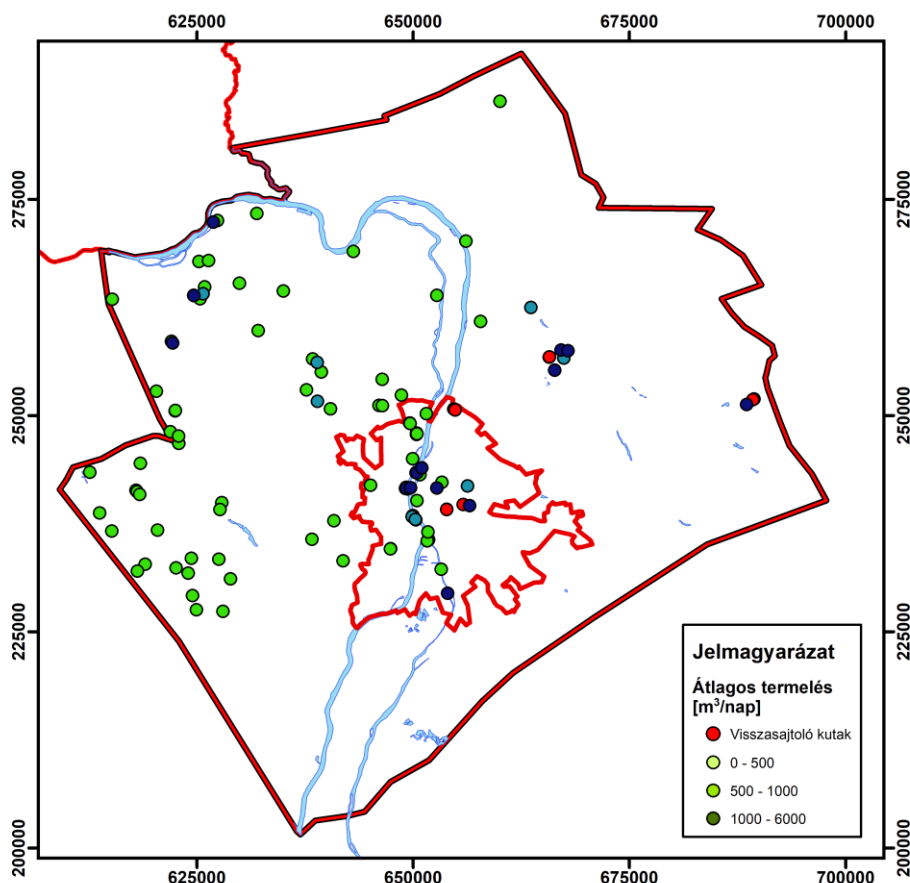
17. ábra: OVF vízmércék medián hozamadataiból számolt vízgyűjtőterületre normált megcsapolás [mm/év]

Első számításaink alapján anomálishan kiugró értéket mutatott a terület keleti részén található Rákos-patak értéke, amelyet a Pécel vízmű állomáson mérnek. A Rákos-patak ezen szakaszán a hozamot gyarapítja Gödöllő, Pécel és Isaszeg települések tisztított szennyvize. A Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv (VGT) második felülvizsgálatában (VGT3 – OVF 2022) publikált 2018-as szennyvízbevezetési adatokkal végzett korrekcióval a módosított medián érték 35,38 mm/év-re csökkent, ami így már jó egyezést mutat a többi értékkel.

### Víztermelések

Az ivóvíz, ipari, mezőgazdasági, balneológiai stb. célú mesterséges vízkivételek a régióban található víztestek zömét jelentősen érinti, a vízháztartás számításnál legjelentősebb vízkilépést a természetesen megcsapolódó források mellett a víztermelések jelentik.

Karsztos víztesteket érintő termelésre vonatkozó adatokat több forrásból (Hydrosys Kft., OVF: VGT3 és OSAP bevallások) kaptunk közel 100 helyszínrre (18. ábra). Ezen adatokat rendezve, összehangolva majd az általunk készített karsztos törzs objektumokhoz illesztve készített adatbázis alapján a karsztos víztestekből kb. 22 millió m<sup>3</sup>/év vízmennyiség kerül kitermelésre a 2013-2022-es időszakban.



18. ábra: Kutatási területre eső karsztos víztermelések [ $m^3/nap$ ]

### 3.4. Termálkutak egymásrahatás vizsgálatának értékelése

A felszín alatti térrész áramlási tulajdonságainak megismeréséhez jó eszköz a kutak egymásrahatás vizsgálata. Az egymásrahatás értékelése során fontos megkülönböztetni a szivattyúzás hatására kialakult vízszintváltozásokat, az egyéb természetes, vagy mesterséges külső hatások által okozott vízszintváltozásoktól. A legjelentősebb természetes hatások, melyek a kutakban mért vízszinteket befolyásolják, a beszivárgás, folyók közelsége esetén a folyó vízállás változása, bizonyos földtani környezetben a légnyomás változás és a földi árapály hatás.

A budapesti termálkarsztos területeken az észlelésbe bevonható kutak több száz, vagy ezer méterre helyezkednek el egymástól így a vízkivétel/visszasajtolás által okozott hatással megegyező nagyságrendű változást okozhatnak a külső hatások. A beszivárgás hatására történő vízszintváltozás a nyílt karsztos területeken több méter nagyságrendű. A beszivárgási területektől távolodva a hatás egyre kisebb mértékű, így a budapesti termálrendszerben is késleltetve és tompítottan jelentkeznek.

A Duna vízállás változásának a felszín alatti vizekre, ezen belül a termálkarsztvízre gyakorolt hatása közismert (ALFÖLDI et al. 1968). Az egymásrahatás vizsgálatok végzése során fontos a külső hatások (árapály, légnyomásváltozás, Duna) korrekciója. A korrekció történhet egy kút észlelt idősorával, melyek vízszintjére a külső hatások ugyanolyan mértékben hatottak, mint a vizsgált kutak, azonban a termelés/visszasajtolás hatása nem mérhető, vagy az egyes külső hatások mértékének külön-külön történő modellezésével.

SÁRVÁRY (1972) tanulmányában feldolgozta a korábbi egymásrahatás vizsgálatok eredményeit (1. táblázat).

1. táblázat: Egymásrahatás vizsgálatok összegző értékelése (SÁRVÁRY 1972)

Vizsgálat éve	Szivattyúzott kutak	Vízhozam változtatás mértéke [l/p]	Vizsgálat tartama	Távolság [km]	Megfigyelt hatás	A hatás kezdete
1944	Dagály fürdő (új kút fúrása)	0 – 3 500	–	1,2	Margit I.-nél 89 cm-es vízszintsüllyedés	néhány perc múlva
1951	Margit I-III. Dagály-kút Elektromos kút	0 – 23 000	14 óra	0,8 – 1,0	Többirányú kapcsolat dm-rendű vízszintsüllyedés	néhány perc múlva
1954	Margit I-III. Margit II. Dagály-kút	Fokozatosan növelve: 0 – 23 300	14 óra	0,8 – 1,0 5,0 – 5,8	Az Elektromos kútnál 56 cm süllyedés néhány óra alatt A Csillaghegyi kutaknál cm-rendű süllyedés néhány óra alatt	percek múlva 1 óra után
1960 1961	Római fürdő Csillaghegy	Fokozatosan növelt szivattyúzás	órák	1,8	Kétirányú kapcsolat m-rendű süllyedés	
1966	Zugló: Paskál-malmi fúrás	0 – 1 800	14 nap	3,6 4,0 5,6 6,5	Városliget II. dm-rendű szintsüllyedés Városliget I. dm-rendű szintsüllyedés Dagály-kút dm-rendű szintsüllyedés Margit II. dm-rendű szintsüllyedés	percek múlva 2 óra után 3 óra után 4 óra után

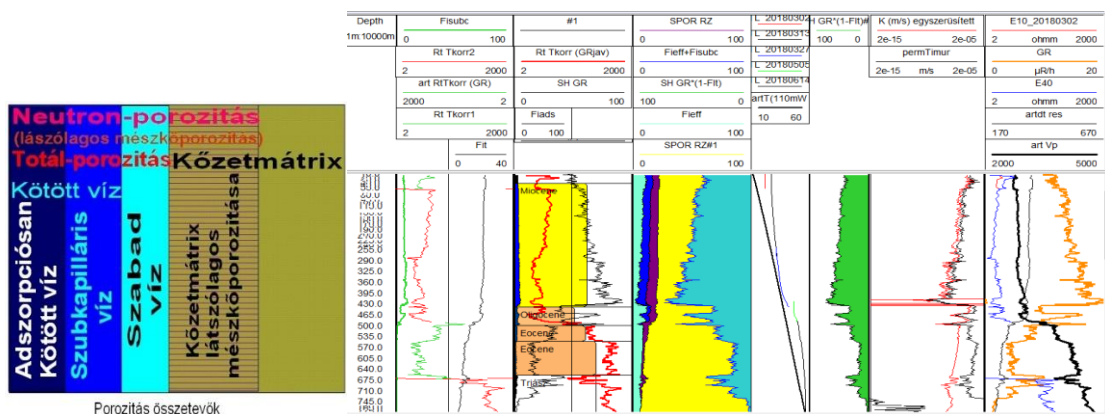
Az azóta eltelt időben történtek további egymásrahatás vizsgálatok, melyek megerősítik a korábbi mérések eredményét, miszerint a pesti oldal belterületén egy igen nagy transzmisszibilitású hidraulikailag összefüggő karsztosodott összlet található, tehát „*a budapesti hévizek nagyrésze kapcsolatban áll egymással*” és az akkori szakértők is „*egységes védőterület előírását szorgalmazták*” (SÁRVÁRY 1972).

A területen bővülő számú karsztra szűrőzött termáلكutak bevonásával nagyon időszerű egy új egymásrahatás vizsgálat megtervezése és kivitelezése a vízföldtani bizonytalanság csökkentése és a terhelhetőség megállapításának érdekében. Ez a mérésorozat a továbbkutatás egyik fő elemét jelentheti.

### 3.5. Geotermikus modellezéshez szükséges paraméterek becslése mélyfúrás geofizikai mérések alapján

A karotázsvizsgálat és a póruster modell elemei a hidrodinamikai és hőtranszport modell egyes paramétereinek: az effektív porozitás, a szivárgási tényező, a hővezetőképesség és a hőáram meghatározásához szükségesek (19. ábra). A Geo-Log Kft. átadott mérési eredményei alapján a hidrogeológiai modellezéshez szükséges bemenő paramétereket határoztunk meg.

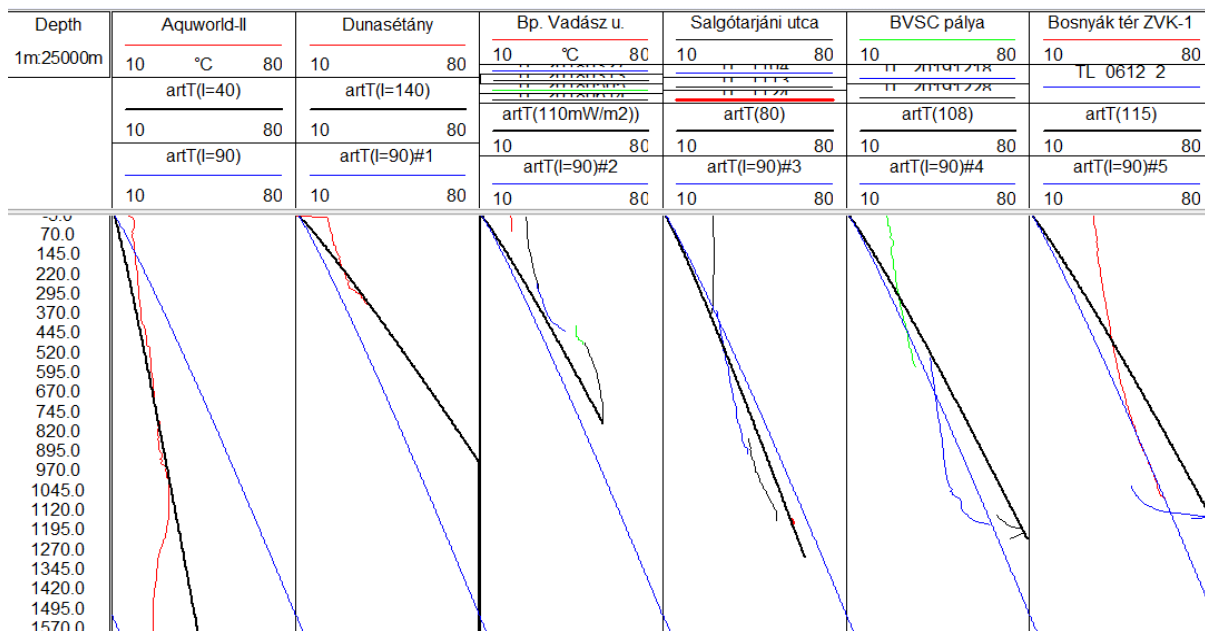
A szivárgási tényező becslés a porozitás és agyagtartalom meghatározáson alapul. Az agyagtartalom meghatározása többféle geofizikai módszerrel is lehetséges (természetes gamma [GR], ellenállás, akusztikus, sűrűség és neutronporozitás kombináció). A konkrét esetben a bemenő adatok az elektromos ellenállás, természetes gamma és a hőmérséklet voltak. A repedezett alaphegységi karbonátoknak más a hézagterefogat geometriája, ezért viszonylag kis hézagterefogathoz is nagy folyadék áteresztőképesség tartozik. Ezek becslése csak a kútközeli térrészre ad eredményt, távolabb már nagyszerkezeti okok, tektonikai zónák miatt a korreláció eredményessége kérdéses.



19. ábra: Porozitás összetevők és számításuk karotázs vizsgálatokban

A hőáramnak a hűtőutánpótlás szempontjából elhanyagolható a szerepe, viszont a területre jellemző átlagos hőáramtól való eltérésnek a fel- illetve leáramlások megítélésénél van jelentősége. A hőáram meghatározásához a zavartalan elvi hőmérséklet mélység menetet kell meghatározni a termelés nélküli fúrásban. Ehhez a talphőmérsékletet vesszük alapul, ami elvileg a legjobban közelíti a természetes állapotot. Az elvi hőmérséklet-mélység menet (artT) paramétere a hőáram.

Adott fúrás esetében azt az elvi hőmérséklet görbét fogadjuk el az adott fúráspontra jellemző hőáramnak, ami a legjobban illeszkedik a mért hőmérsékletgörbéhez főleg a talphőmérsékletre (20. ábra). Az ábrán minden fúrásnál a mért hőmérsékletgörbék és a mért hőmérsékletre legjobban illeszkedő görbék mellett fel van tüntetve a  $90 \text{ mW/m}^2$  hőáramhoz tartozó átlagosnak tekintett elvi hőmérséklet görbe is.



20. ábra: Mért hőmérsékleti profilok és azokra illesztett elvi hőmérséklet mélység menetek

A vizgálatsorozat eredményeképpen az eredő hővezetőképesség (azaz a hővezetési tényező) átlagos értéke a különböző földtani szintekre a következő<sup>3</sup>:

- Pannóniai medencekitöltő üledékek:
  - kb. 500 m-es vastagságig:  $1,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (1,2-1,8) *30% totál porozitásnál*
  - kb. 2000 m-es (teljes) vastagságig:  $1,75 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (1,35-2,05) *15% totál porozitásnál*
- Miocén képződmények általában:  $1,65 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (1,3-2) *20% totál porozitásnál*
- Oligocén képződmények:  $1,75 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (1,4 - 2,2) *10 % totál porozitásnál*
- Eocén képződmények:  $1,95 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (1,45-2,4) *5% totál porozitásnál*
- Mezozoos képződmények:  $1,97 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (1,48-2,45) *2% totál porozitásnál*

### 3.6. Vízkémiai és izotóphidrológiai értékelés

#### 3.6.1. A vízgeokémiai és izotóphidrológiai értékelések célja és eszközei

A budapesti termálkarszt régiójának vízgeokémiai és izotóphidrológiai jellemzésén túlmenően, az értékelések célja a hidrodinamikai és hőtranszport modellezés támogatása a modellezéstől független eszköztárral. A vízkémiai- és izotópadatok alapján kialakítható vízáramlási kép, valamint a becsült relatív- és abszolút vízkorok jó támpontokat nyújtanak a modellvizsgálati eredmények ellenőrzéséhez. A kutatási program jelen fázisában nem volt lehetőség új vízmintavételekre, értékeléseinket a rendelkezésre álló adatok alapján végeztük. Az adatköröket, adatforrásokat a 3.6.2. fejezetben ismertetjük.

Jelen fejezet a főkarsztrendszer jellemzésére fókuszált értékelések rövid összegzését ismerteti, ugyanakkor vizsgálataink részben kitértek a felső triásznál idősebb, valamint a fedő képződmények vízkémia és izotóphidrológiai jellemzőire is. Az értékelésekhez általános statisztikai vizsgálatokat, általános vízkémiai és víztípus jellemzést, területi és szelvény menti paramétereloszlást, klaszteranalízist, stabil- és radioaktív izotópok értelmezését alkalmaztuk. Megvizsgáltuk néhány reprezentatív, több évtizedes vízhőmérséklet és kémiai idősorral rendelkező kút és forrás adatsorát, melynek célja a referencia állapot, illetve a különböző hatásokra már esetlegesen megjelenő időbeli változások feltárása volt. A rendelkezésre álló adatsorok jellemzően nem egyenkezőek, több esetben hiányosak, illetve mérési hibákat is tartalmaznak. Az idősorok részletes értékelését a kutatás következő fázisában végezzük el új mintavételek eredményeinek felhasználásával.

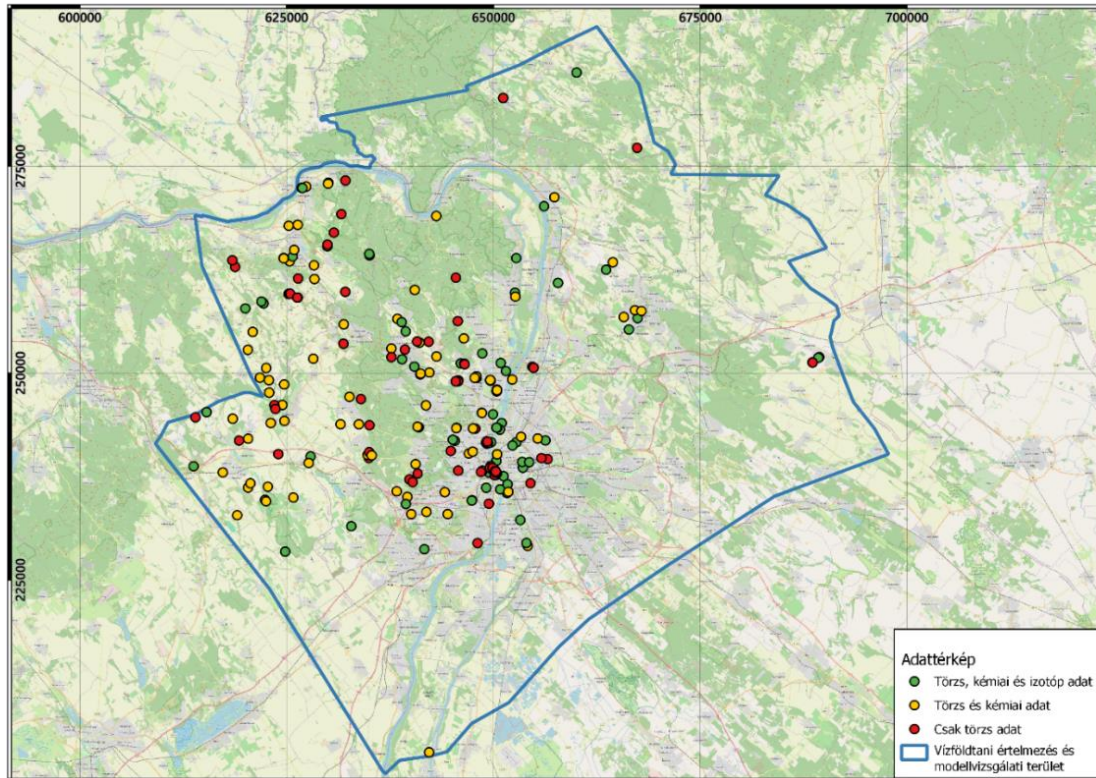
#### 3.6.2. Az értékelések során felhasznált kémiai- és izotópadatok

A vízkémiai adatrendszert a törzsadattábla objektumai alapján alakítottuk ki elsősorban az OVF és a BGYH által szolgáltatott adatsorokra alapozva, amelyet kiegészítettünk az SZTFH saját vízkémiai adatbázisából, valamint az adatbázisokban még nem szereplő legfrissebb Vízföldtani naplók adataival. A különböző forrásból származó kémiai adatsorokat egységesítettük, rendeztük, az adatok minőségének megfelelőségét különböző hibaszűrés eljárásokkal (pl. kation-anion arány, kiugró értékek) ellenőriztük. Az adatállomány 1880-tól napjainkig gyűjtött minták méréseit tartalmazza, az adott időszak és a különböző laboratóriumok eltérő mérési pontosságával, valamint a mért paraméterek szintén eltérő spektrumával. Az értékelést a különböző időpontokból származó teljes vagy részleges adatsorok mediánértékeivel végeztük. Azokat az adatsorokat, amelyek egyértelműen szennyeződésre utaltak az értékelések során kiszűrtük. Bár a törzsállományban a

---

<sup>3</sup> Zárójelben a két szélsőérték: hővezető képességek (100 % agyagosság – 0% agyagosság), agyag esetében az adszorpciós víz nem tartozik bele

főkarsztrendszerhez kapcsolódó felső triásznál idősebb és fedő medenceüledékeket megcsapoló kutak, illetve miocén karsztos objektumok is szerepelnek, a vízgeokémiai kutatás a főkarszt jellemzésére fókuszál. A rendelkezésre álló törzsadatokat, a főkarsztot és a felső triásznál idősebb képződményeket szűrőző objektumokat, valamint az ezekhez elérhető vízkémiai és izotóp adatokat a 21. ábra szemlélteti.



21. ábra: A vizsgált kutakhoz tartozó adatkörök

Munkánk során összegyűjtöttük a vizsgálati terület felszín alatti vizeiben korábban mért stabil ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , oldott szulfát  $\delta^{34}\text{S}$  és  $\delta^{18}\text{O}$ ) és radioaktív izotóp adatait ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ). Ezen adatok elsősorban DEÁK (1979) és FÓRIZS et al. (2019) munkáiból származnak, amelyeket néhány BGYH-tól és OVF-től kapott adattal, és további, újabb SZTFH adatokkal bővítettünk. A korábbi vízkémiai és izotóp-geokémiai feldolgozások közül kiemelendők az alábbi, a budapesti termálkarsztra vonatkozó tanulmányok (ALFÖLDI et al. 1968, LORBERER 2003, ERŐSS 2010, POYANMEHR 2016, MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018, MÁDLNÉ SZŐNYI 2020), melyek eredményeit szintén felhasználtuk. A budapesti termálkarszt vizsgálatát több OTKA kutatás is célul tűzte, melyek adatait és eredményeit szintén felhasználtunk (OTKA K60921, OTKA NK101356). A radionuklidok ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ) fontos információt szolgáltatnak a különböző rendű felszín alatti vízáramlási rendszerekre, illetve megcsapolási viszonyokra, melyekre jelen tanulmányunkban a korábbi kutatások (ERŐSS 2010, KOVÁCSNÉ BODOR 2020) eredményeire hivatkozva térünk ki.

Az összeállított adatok alapján a trícium,  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  adatok száma 150–170, míg a  $\delta^{13}\text{C}$  és  $^{14}\text{C}$  adatok száma 110–130 körüli. A karsztrendszerre vonatkozóan az adatok száma 80–100 közötti, a  $^{14}\text{C}$  adat 70–80 darab. Mindösszesen 12 darab  $^{36}\text{Cl}$  adattal, valamint 10–20 darab  $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SO}_4)}$  és 20–30 darab  $\delta^{34}\text{S}$  adattal rendelkezünk a területen, melyek többsége a karsztrendszerhez kapcsolódik.

Az izotópadatokat a korrekciós számítások céljából az adott objektum vízösszetételére jellemző kémiai adatokkal egészítettük ki adatbázisunk alapján. Mivel sok objektum esetében több, különböző időben és különböző céllal végzett mérési kampány adatait kellett összevonni, az adatok közül szakértői mérlegelés alapján a legjellemzőbb értéket vettük figyelembe. Ez a választás különösen nagy kihívást jelentett a tríciumadatok esetében, ahol a trícium gyors – 12,32 év – felezési idejéből adódóan, a mindenkor beszivárgáskori tríciumértékek nagymértékben eltérnek a jelenlegi és az 1963-ra tehető tríciumcsúcs ideje között.

A vízkémiai értelmezés a főkomponensek ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ( $\text{Na}^++\text{K}^+$ ),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), továbbá a kifolyóvíz-hőmérséklet, és az izotópadatok alapján történt. Nyomelemek mérése ritkán történt, eseti jelleggel, mely korlátozza a felhasználhatóságukat, így a főkomponensekre fókuszáltunk.

Az adatok statisztikai feldolgozásához a JASP 0.18.3-as verzióját, az általános kémiai jellemzéshez, a szelvény menti elemkoncentráció változás, valamint a hőmérséklet, kémiai és izotópadatok közötti kapcsolatok vizsgálatához a Grapher (22), míg a térképi megjelenítésekhez Surfer (22), QGIS (3.28), és ArcGIS (10.7.1) programokat alkalmaztunk.

### 3.6.3. Vízeokémiai eredmények és értelmezésük

Az általános kémiai, vízhőmérsékleti jellemzőket több kutatás is vizsgálta (pl. ALFÖLDI et al. 1968, ERŐSS 2010, POYANMEHR 2016, MÁDLNÉ SZÖNYI 2020). E jelentés keretében néhány főbb elemét emeljük ki ezeknek.

Az „Északi rendszerként” elnevezett Lukács- és Császár-források langyos és meleg vizeiben, valamint a pesti oldal mély termálkarszt kútjainak vizeiben szoros lineáris kapcsolat figyelhető meg az összes oldottanyag-tartalom (TDS) és a kifolyóvíz hőmérséklete között, míg a „Déli rendszerként” nevezett Gellért-hegy környéki karsztvizek és Budapest déli részének mély kútjaiban a vízhőmérséklet és összes oldottanyag-tartalom szűk tartományban változik (ERŐSS 2010). Utóbbiak TDS értéke nagyobb, mint az Északi rendszer kútjaiban mértek. Az Északi és Déli rendszer elkülönülését ALFÖLDI et al. (1968) és ERŐSS (2010) is tektonikailag kontrollálnak tartja, ugyanakkor mindketten megállapítják, hogy hidrodinamikai kapcsolat van a kettő között. A Rózsadomb térségében néhány melegvízű kút kifolyóvíz-hőmérséklete és TDS értéke kisebb, mint amit a források eredetileg szolgáltatottak (ERŐSS 2010), amelyet saját előzetes vizsgálataink is alátámasztanak.

A  $\text{Na}^+$  és a  $\text{Cl}^-$  közötti szoros korreláció ( $R=0,95$ ) arra utal, hogy eredetük azonos, miközben a  $\text{Cl}^-$ -tartalomhoz képest több  $\text{Na}^+$  van jelen a karsztvízben (POYANMEHR 2016). Numerikus modellezés és vízeokémiai értékelés szerint a Széchenyi-fürdő irányából az idős, nagyobb  $\text{Cl}^-$ -tartalmú vizek – a Margitsziget II. kút térségén keresztül áramolva – a Lukács-fürdő forrásai környezetében keverednek a nyugat-északnyugati beszivárgási területek fiatalabb vizeivel.

A jelen munka keretében a kémiai adatok térbeni eloszlásának és időbeni változásának vizsgálatát többféle adatelemzési módszer együttes alkalmazásával végeztük el. A feldolgozott adatok nagy száma a klasszikus vízeokémiai feldolgozások mellett lehetővé tette az egydimenziós és többdimenziós statisztikai adatelemzési módszerek alkalmazását, területi eloszlásuk, valamint vertikális, szelvénymenti változásuk vizsgálatát is, amelyeket az alábbiakban ismertetünk.

#### *Alapstatisztika és feltáró adatelemzés, víztípusok*

Az alapstatisztikai és a feltáró adatelemzést (*Exploratory Data Analysis – EDA*) a fő földtani egységek (főkarsztrendszer, felső triászidősebb és miocén képződmények) és a klasztercsoportok szerint is elvégeztük, a hőmérséklet, az összes oldottanyag-tartalom és a főkomponensek adatai alapján. A főkarsztrendszert ~170 objektum adatai alapján jellemezzük, a 10%, illetve 90% percentilis értékek figyelembevételével. A vizek összes oldottanyag-

tartalma jellemzően 658–1477 mg/l (medián 1013 mg/l), a  $\text{Cl}^-$ -tartalom 10–174 mg/l (medián 55 mg/l), míg a  $\text{HCO}_3^-$ -tartalom 396–630 mg/l között változik (medián 488 mg/l). A főkarsztrendszer vizei alapvetően  $(\text{CaMg})\text{HCO}_3$  típusúak, alárendeltebben  $(\text{CaMgNa})\text{HCO}_3$ ,  $(\text{CaMg})\text{HCO}_3\text{SO}_4$  és  $(\text{CaMgNa})\text{HCO}_3\text{SO}_4$  víztípusúak, a Budai-hegység déli részén a  $\text{SO}_4^{2-}$  aránya megnövekszik, míg a pesti oldalon a  $\text{Cl}^-$ -tartalom is jelentős lehet.

A főkarsztrendszert alkotó képződményeknél idősebb víztartókat (perm, alsó triász) 15 objektum alapján jellemezhetjük. A TDS jellemzően 496–1454 mg/l (medián 711 mg/l), a  $\text{Cl}^-$ -tartalom 4–118 mg/l (medián 9 mg/l körül), míg a  $\text{HCO}_3^-$ -tartalom 301–408 mg/l között változik (335 mg/l a medián). Az idősebb képződmények vizei jellemzően  $(\text{CaMg})\text{HCO}_3$  típusúak, alárendeltebben  $(\text{CaMgNa})\text{HCO}_3$ ,  $(\text{CaMg})\text{HCO}_3\text{SO}_4$ , illetve  $(\text{CaNa})\text{HCO}_3\text{SO}_4$  víztípus is előfordul.

A miocén karbonátos képződményeket 8 objektum alapján ismertetjük. A vizek összes oldottanyag-tartalma széles tartományban változik 558–4466 mg/l (medián 793 mg/l), akárcsak a  $\text{Cl}^-$ -tartalom 10–2343 mg/l (medián 31 mg/l), míg a  $\text{HCO}_3^-$ -tartalomra szűk intervallum jellemző 246–433 mg/l, 386 mg/l medián értékkel. A vizek kémiai jellege változatos, a  $(\text{CaMg})\text{HCO}_3$  típus mellett  $(\text{CaMg})\text{HCO}_3\text{SO}_4$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3\text{SO}_4$  és  $\text{NaCl}$  jelleg is megjelenik.

### ***Klaszteranalízis***

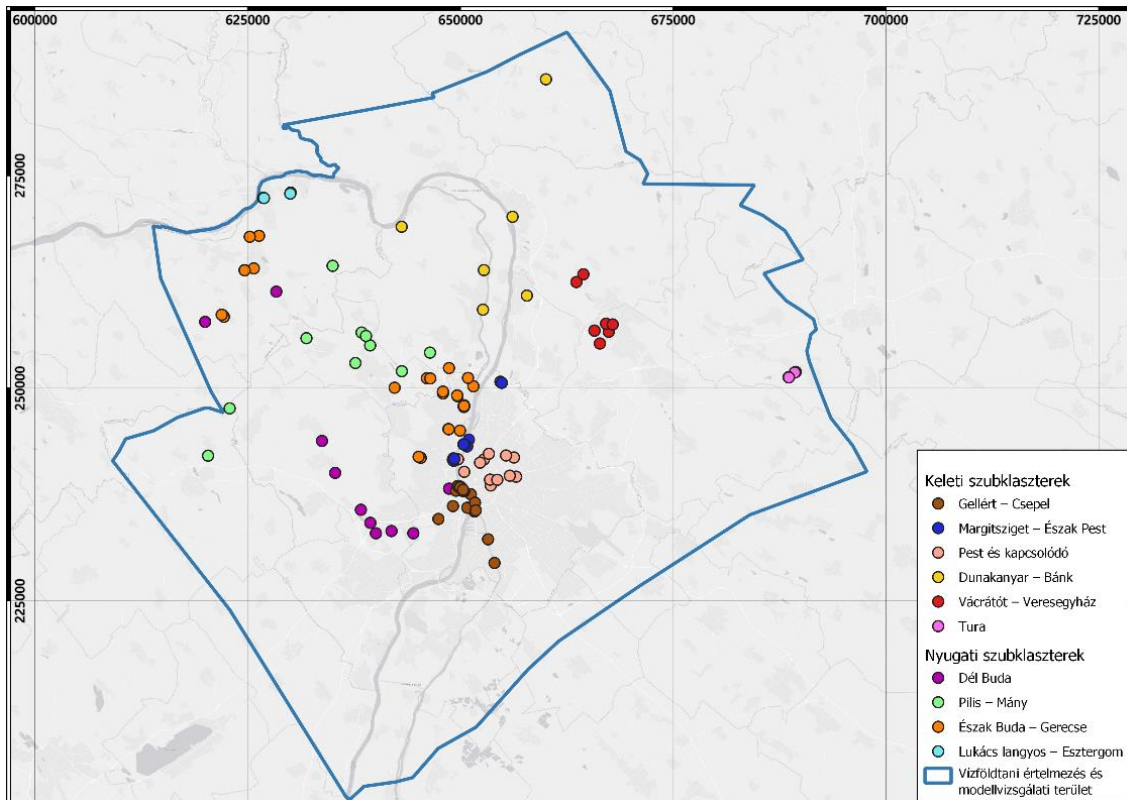
A hierarchikus klaszteranalízis Ward-módszert alkalmazva, a minták hasonlóságához euklidészi távolságot nézve történt. A klaszterek számát a dendogram vizuális elemzésével és Silhouette pont, illetve BIC (Bayesian Information Criterion) eljárást használva határoztuk meg. A klaszterek megfelelő elkülönülését t-SNE diagram és a klaszterek statisztikai értékelésével ellenőriztük (GÜLER et al. 2002, CLOUTIER et al. 2008, QIAN et al. 2016, ZHANG et al. 2018).

A paraméterek értékeinek természetes alapú logaritmusát véve elvégeztük a Z-érték standardizálást, mely által az adatok jobban megfeleltek a klaszteranalízishez szükséges normalitás feltételének, továbbá így kiküszöbölhető az adatok eltérő nagyságrendjének hatása. Az analízisben csak a teljes adatsorokat vettük figyelembe ( $\text{Na}^+$ + $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , víz hőmérséklet), ezért a standardizálás előtt a hiányos adatsorokat eltávolítottuk.

A **klaszteranalízis eredményeit** több módszerrel együttesen értékeltük grafikus (pl. Piper-, kiegészített Durov-, box-whiskers- és interval diagramok), statisztikai és térinformatikai módszereket alkalmazva, majd a klasztereket térképen ábrázoltuk (22. ábra).

A területen két főklaszter (főcsoport) különül el dendogram és Silhouette pont alapján. A módszer a paraméterek hasonlósága alapján csoportosítja a mintákat, az így kapott csoportokon belül nem szükségszerűen áll fenn hidrodinamikai kapcsolat is. A döntően a dunántúli terület csoportját *Nyugati*, míg a jellemzően a Duna mentén és a pesti oldalon található objektumok csoportját *Keleti* főklaszternek neveztük. Az elemzések alapján a *Nyugati* csoportot 4 szubklaszterre (alcsoportra) (*Pilis–Mány*, *Észak Buda–Gerecse*, *Lukács langyos–Esztergom*, *Észak Buda*), míg a *Keleti* csoportot 6 szubklaszterre bontottuk (*Dunakanyar–Bánk*, *Margitsziget–Észak Pest*, *Gellért–Csepel*, *Pest és kapcsolódó régió*, *Vácrátót–Veresegyház*, valamint *Tura*). A szubklaszterek területi elhelyezkedését a 22. ábra ismerteti. A csoportok részletes statisztikai elemzését nem ismertetjük e jelentésben, csak a szignifikáns jellemzőkre hívjuk fel a figyelmet. E jelentés céljából és terjedelmi korlátaiból adódóan a korábbi klasztervizsgálatok (pl. ALFÖLDI et al. 1968, ERŐSS 2010, DÉRI-TAKÁCS et al. 2015, POYANMEHR 2016, KOVÁCS és ERŐSS 2017) eredményeire nem térünk ki, ugyanakkor megállapítható, hogy az eltérő csoportszámok és a lényegesen több általunk vizsgált kút mellett

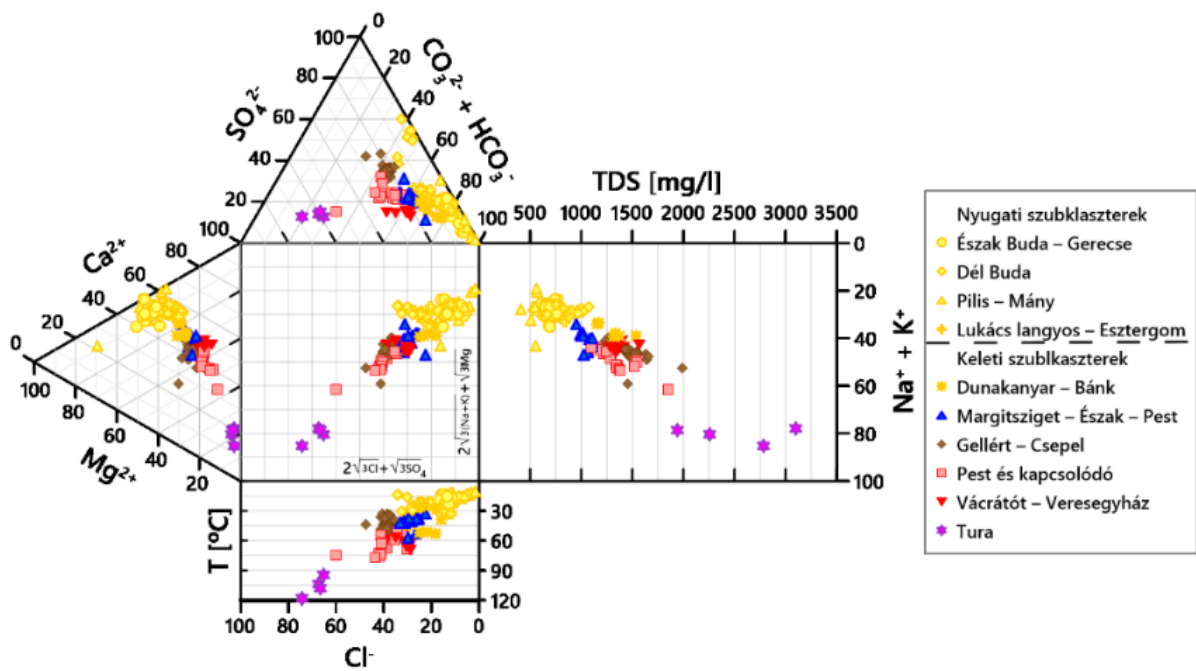
is – néhány objektumtól eltekintve – megfeleltethető a legtöbb csoport egymásnak, és jól beleillenek a kutak az egyes klaszterekbe.



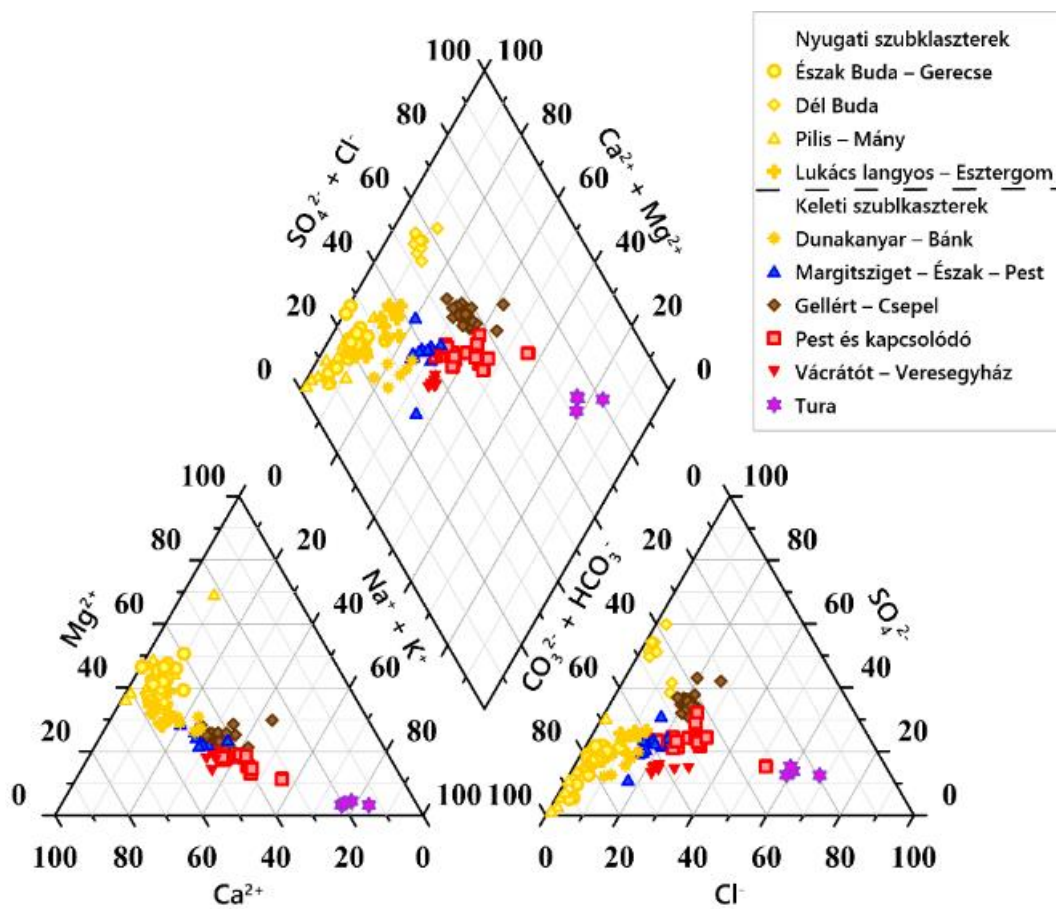
22. ábra: A karsztrendszer vízmintáinak klasztercsoportjai a főkomponensek és vízhőmérséklet alapján

A *Nyugati* terület szubklaszterei esetén a domináns ionok a  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  és a  $\text{HCO}_3^-$ , míg a vízhőmérséklet, és a  $\text{SO}_4^{2-}$ -tartalom árnyalja a különbséget a 4 szubklaszter között. A *Pilis–Mány* szubklasztert alkotó kutakra alacsony 14 °C mediánérték körüli vízhőmérséklet, kis (~4 mg/l medián értékű) klorid és kis (~560 mg/l) oldottanyag-tartalom, valamint  $\text{CaMgHCO}_3$  víztípus jellemző, amely a beszivárgó vizeket, a lokális áramlási rendszert tükrözi. A legtöbb kutat és forrást magába foglaló *Észak Buda–Gerecse* csoport szintén kis oldottanyag-tartalmú, 22 °C mediánérték körüli hőmérsékletű vizekkel jellemezhető, és szintén  $\text{CaMgHCO}_3$ -os jellegű, azonban a kismértékben nagyobb vízhőmérséklet, valamint kicsi, de az előzőekhez képest közel 30%-kal nagyobb  $\text{Na}^+$  és  $\text{Cl}^-$  koncentrációk már kissé hosszabb áramlási pályát jeleznek. Ide tartoznak például Óbuda langyos forrásai is. A *Lukács langyos–Esztergom* szubklaszter hőmérséklete elérheti, sőt kissé meghaladhatja a 30 °C-ot, és a  $\text{CaMgHCO}_3$  jelleget magasabb  $\text{SO}_4^{2-}$ -tartalom árnyalja. Az idetartozó kutak, források vizének magasabb oldottanyag-tartalma is hosszabb áramlási pályára, vagy esetleg kevertvízre utal. A *Dél Buda* csoporthoz tartozó kutak vízhőmérséklete széles értékek között (13,6 – 46 °C) változik, kémiai jellegük  $\text{CaMgSO}_4\text{HCO}_3$ -os, változó  $\text{Na}^+$ , illetve  $\text{Cl}^-$ -tartalom mellett. Ez a magasabb szulfáttartalommal jellemzett csoport, a déli területekre jellemző, ahol a vízadó jellemzően Budaörsi Dolomit.

A Durov (23. ábra) és a Piper (24. ábra) diagramon követhető a klaszterek kémiai jellege.



23. ábra: Klasztercsoportok Durov diagram szerinti ábrázolása



24. ábra: Klasztercsoportok Piper diagram szerinti ábrázolása

Bár 30 °C körüli, vagy a fölötti vízhőmérséklet a *Nyugati* szubklaszterek esetén is előfordul, a *Keleti* szubklaszterekre jellemző a magas hőmérséklet, a nagyobb oldottanyag-tartalom, valamint a Na<sup>+</sup>- és a Cl<sup>-</sup>-tartalom megjelenése a víztípusban, amelyek hosszabb regionális vízáramlási pályákra utalnak.

A *Dunakanyar–Bánk* szubklaszter vizei egységesen (CaMg)HCO<sub>3</sub>-os jellegűek, összes oldottanyag-tartalmuk szűk tartományon belül (1150–1550 mg/l), míg vízhőmérsékletük tág értékek között (25–54 °C) változik.

A *Margitsziget–Észak Pest* szubklaszter 30–57 °C közötti vízhőmérsékletével és kis (~1000 mg/l) oldottanyag-tartalmával különül el a többi *Keleti* szubklasztertől. E vizek kémiai jellege (CaNaMg)HCO<sub>3</sub>-os, míg az oligocén képződményt feltáró Budapest XIII. kerület 16/A kút esetén 25% fölötti szulfáttartalom jelentkezik.

A *Pest és kapcsolódó* területek csoportját magas vízhőmérséklet (46–77 °C), és 1100–1850 mg/l között változó oldottanyag-tartalom jellemzi. E vizek jellege (CaNa)HCO<sub>3</sub>-os, de Cl<sup>-</sup> és SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ionok is megjelenhetnek nagyobb arányban. A Paskál kútjától eltekintve, e szubklaszteren belül a keleti térrész kútjainak Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> és oldottanyag-tartalma nagyobb, mint a Lukács- és Császár-fürdő e csoportba tartozó kútjainak, ami ez utóbbinál a különböző áramlási pályák mentén történő keveredés hígító hatását tükrözheti. A Budapest X. kerület B-179 kataszteri kút vízösszetétele eltér a csoport többi tagjától magas Na<sup>+</sup> és Cl<sup>-</sup> tartalma miatt, melynek oka, hogy a felső triász képződmények alsó oligocén képződményekkel is összeszűrődtek.

A *Vácrátót–Veresegyház* szubklaszter jellemzően CaNaHCO<sub>3</sub> jellegű vizeinek hőmérséklete magas, mely szűk (57-70 °C) tartományban mozog. Az összes oldottanyag-tartalom 1280 és 1570 mg/l közötti, helyenként nagyobb kloridkoncentrációval, amely a víztípusban is jelentkezik.

A *Gellért–Csepel* szubklasztert 30-50 °C közötti, (CaNa)HCO<sub>3</sub>SO<sub>4</sub>, esetenként (CaNa)HCO<sub>3</sub>Cl-os víztípusú kutak és források alkotják, melyek vizének oldottanyag-tartalma 1200-2000 mg/l közötti. A többi csoporttól a víz-közet kölcsönhatások eredményeként megjelenő magasabb Mg<sup>2+</sup>- és SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-tartalom különíti el.

A *Tura* szubklaszter a legmagasabb hőmérsékletű alcsoport, a *Keleti* főklaszter többi csoportjánál kisebb Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, míg a többi paraméter esetén nagyobb koncentrációkkal jellemezhetőek. Vizei ennek megfelelően NaClHCO<sub>3</sub>, vagy NaCl jellegűek, amely az intenzív áramlástól elzártabb helyzetre utal.

A Lukács–Császár-fürdők környezetében lévő források, kutak vizei hőmérsékletük és fő kémiai összetételük alapján három szubklaszterbe – egy a *Nyugati* és kettő a *Keleti* főklaszterbe – tartoznak, jól reprezentálva, hogy e zónában különböző áramlási pályák találkoznak, illetve csapolódnak meg egymáshoz közel. A *Nyugati* főklaszteren belül a *Lukács langyos–Esztergom* (21–34 °C; CaMgHCO<sub>3</sub>, CaMgHCO<sub>3</sub>SO<sub>4</sub>), míg a *Keleti* főklaszterben a *Margitsziget – Észak Pest* (30–53 °C, CaNaHCO<sub>3</sub>) valamint a *Pest és kapcsolódó* területei (46–55 °C; CaNaHCO<sub>3</sub>) szubklaszterekbe tartoznak.

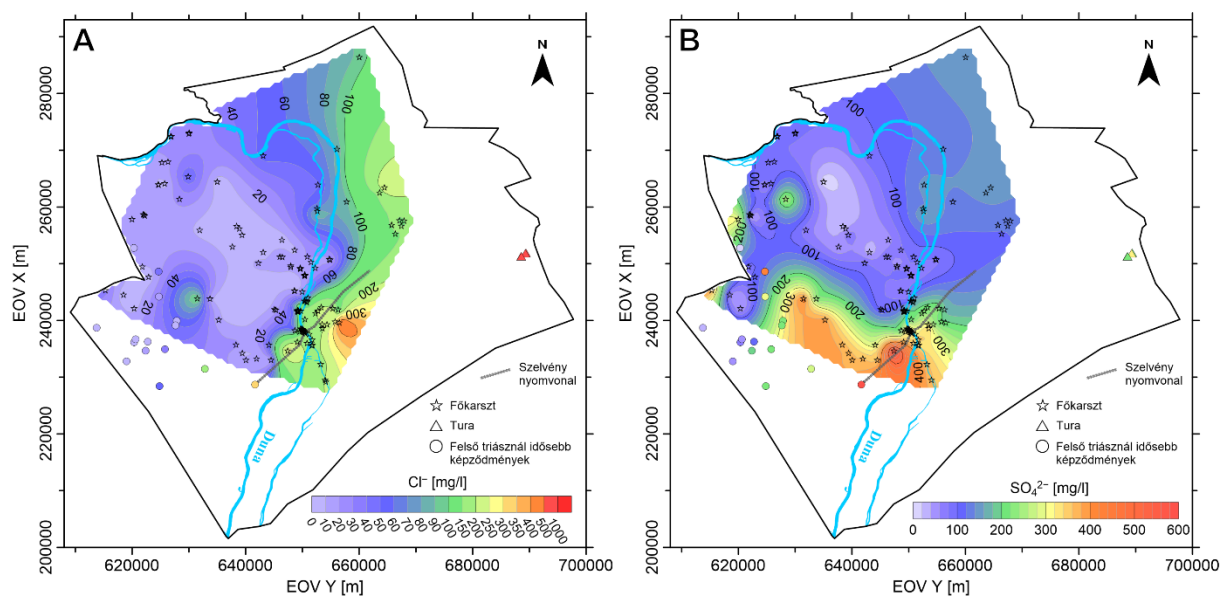
### ***A klorid- és a szulfátkoncentrációk horizontális, valamint vertikális, szelvénymenti eloszlása***

A klorid a felszín alatti vízbe, a csapadékkal történő beszivárgást követően, természetes folyamatokat tekintve, csillámok és agyagásványok mállásával kerülhet. A klorid konzervatív elemként viselkedik, a vízáramlás során oldatban marad, így koncentrációjának térbeli eloszlása segít a vízáramlási pályák azonosításában (HEM 1985). Mivel a szulfátkoncentráció potenciális korróziós hatása miatt meghatározó lehet a kútkiképzéseknél, valamint jellemző komponense a budapesti termálkarszt vizeinek, ezért fontos volt térbeli eloszlásának vizsgálata

is. Mint megfigyelhettük a szulfáttartalom jelentősen befolyásolta a különböző klasztercsoportok elkülönülését is (lásd előző fejezet).

A 25. ábra a főkarszthoz tartozó kutak klorid- és szulfátkoncentráció adatai alapján szerkesztett kontúrtérképeket mutatja be, kiegészítve a felső triásznál idősebb képződmények (kör) és a turai kutak (háromszög) adataival. A legalacsonyabb értékek (<20 mg/l) a fő beszivárgási területet mutatják, melyek a Pilis és a Budai-hegység területére jellemzőek. Ennél nagyobb értékek jellemnek meg a Duna vonalában, mind Esztergom, mind Budapest térségében. A budai oldalon alapvetően alacsonyabb kloridtartalom jellemző, míg a Pesti-síkság felé haladva az értéke egyre növekszik. Ez jó összhangban van a nyugatról keletre tartó fő intermedier vízáramlási iránnyal (MÁDLNÉ SZÖNYI 2020), valamint a modellvizsgálati eredményeinkkel (4.1.9. fejezet; valamint pl. POYANMEHR 2016), amely szerint a Duna mentén megfigyelhető a különböző rendű felszín alatti vízáramlási rendszerek megcsapolási zónája. A turai karsztkutak esetén a kloridtartalom lényegesen nagyobb (>600 mg/l), elkülönül a főkarszt többi kútjától. A felső triásznál idősebb képződmények kútjainak kloridtartalma közel hasonló képet mutat, mint a főkarsztra szűrőzött kutak.

A szulfáttartalom szintén a Pilis tömbjénél a legalacsonyabb; ugyanakkor mind keleti, mind déli irányban növekedést mutat. A legnagyobb értékek délen találhatóak, feltehetően evaporitokhoz köthető víz-kőzet kölcsönhatás következményeként. A kontúrtérképen túli területeken csak pontszerű adatokkal jellemezhető az adott térrész, pl. délen a vízkémiai összetételt az idősebb triász és perm korú kőzetek összetétele határozza meg (FÓRIZS et al. 2019).



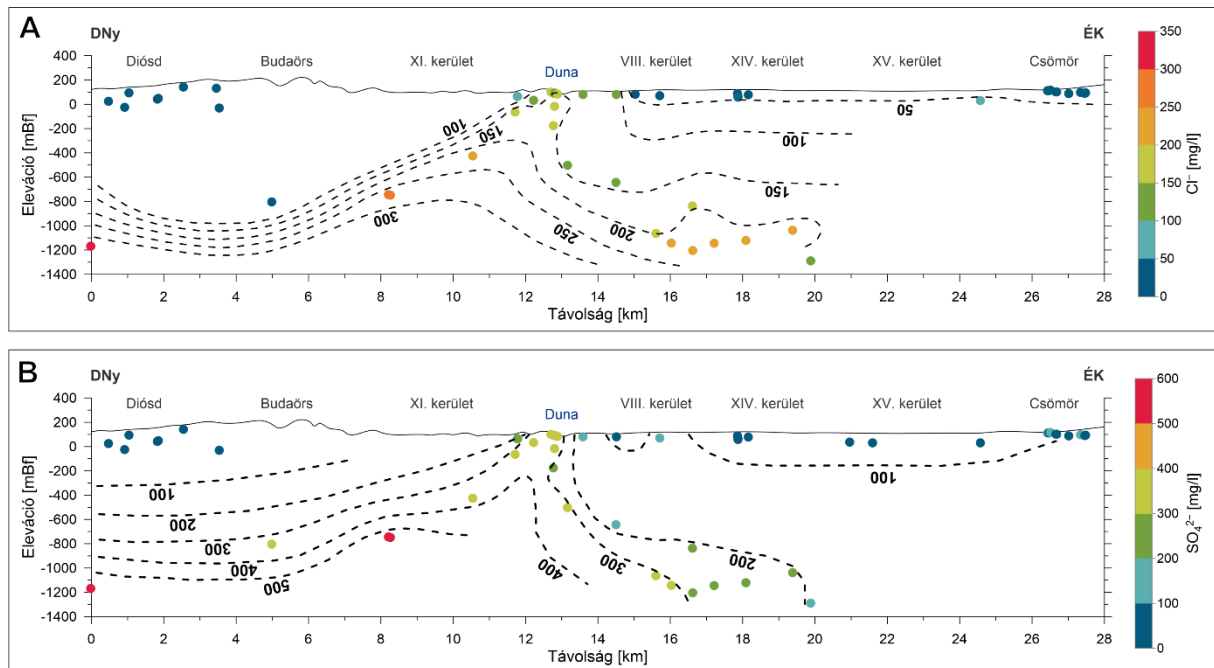
25. ábra: A klorid- (A) és a szulfáttartalom (B) eloszlása a főkarszthoz tartozó és az idősebb képződményekre (perm és alsó triász) szűrőzött, valamint a turai kutakra vonatkozóan. Az utóbbiak esetén a körök és a háromszögek követik a kontúrtérkép színskáláját.

A klorid-, valamint a szulfáttartalom vertikális eloszlását az Érd-Csömör földtani szelvény mentén ábrázoltuk, a szelvénynyomvonalától max. 2,5-3 km távolságra eső kutak szelvényre történő merőleges vetítésével (26. ábra). Az eloszlás értelmezéséhez a többi vízgeokémiai vizsgálattal ellentétben további sekély kutak kémiai összetételét is felhasználtuk a térbeli változások jobb megismerésének érdekében.

A budai oldalon a kloridtartalom 100 mg/l alatt marad a sekélyebb régióban, míg a Duna mentén egy jelentős koncentráció növekedés tapasztalható (150–200 mg/l). A pesti oldalon

található mély (800 m-nél mélyebb) termálkútak 200–250 mg/l kloridtartalommal jellemezhetőek.

Hasonló tendencia figyelhető meg a szulfáttartalom tekintetében is. A budai oldal sekély kútjaiban a koncentráció jellemzően 100 mg/l alatt marad, míg a mély kutak esetén akár 500 mg/l feletti értékek is előfordulnak. A Duna vonalában, sekély mélységben (sekély kutak és források) anomálishan magas koncentrációk (300–400 mg/l) figyelhetők meg, míg a legtöbb pesti oldali mély termálkút 200–300 mg/l szulfátkoncentrációval jellemezhető.



26. ábra: A klorid- (A) és a szulfáttartalom (B) változása az Erd–Csömör szelvény mentén. A szelvény nyomvonalát a 25. ábra mutatja.

### 3.6.4. Izotóphidrológiai eredmények és értelmezésük

Az egységesítéssel előállított izotóp adattábla alapján becsültük a karsztvizek látszólagos vízkorát, vizsgáltuk a Lukács- és Császárfürdő megcsapolási zónáját, valamint a víz-közet kölcsönhatások lehetséges hatásait a szulfáttartalomra vonatkozóan.

#### *A karsztrendszer tápláló és megcsapoló vizek eredete*

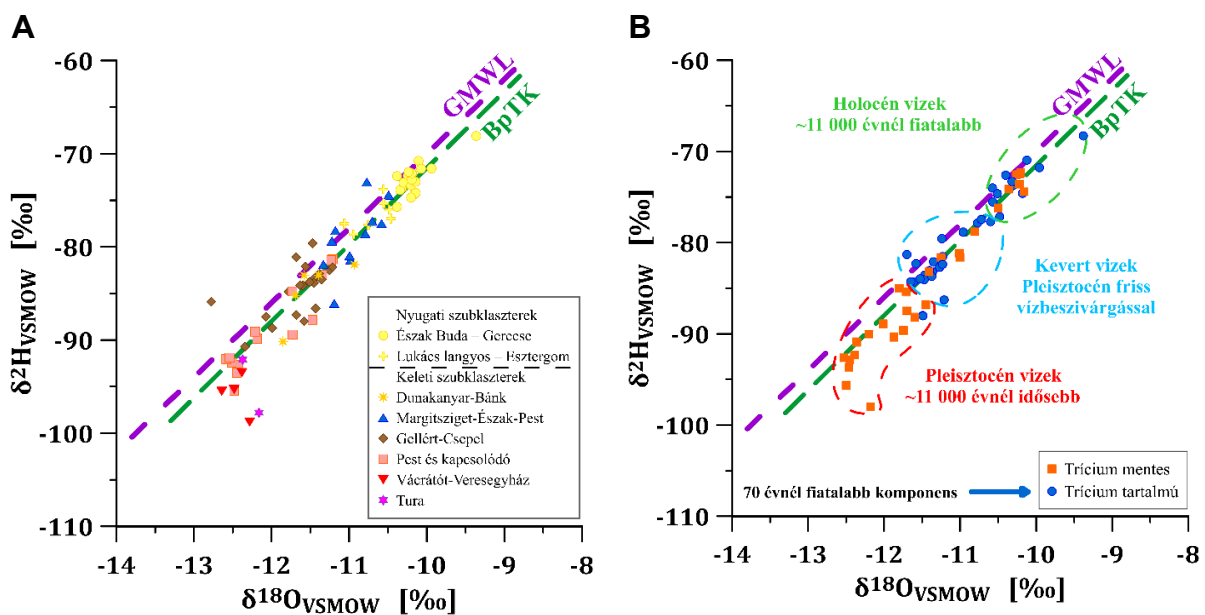
A trícium vizsgálatok célja a friss (körülbelül 70 évnél fiatalabb), az intenzív emberi tevékenység által potenciálisan szennyezett komponens kimutatása volt. A trícium adatok alapján, annak ellenére, hogy különböző időpontokban történtek a mérések, egzakt módon meg lehet állapítani, hogy a vizsgált víz tartalmaz-e körülbelül 70 évnél fiatalabb komponenst, amely előfordul a jégkorszaki beszivárgású termál karsztvizek esetében is.

A budai oldal karsztvizeiben jellemzően kimutatható tríciumkoncentrációk vannak, míg a pesti oldal regionális áramlási rendszereit megcsapoló kutak vizében (a korábban alkalmazott 0,5 TU) kimutatási határ alatti a trícium. Utóbbiak – megfelelő kútkiképzés mellett – védettnek tekinthetőek az esetleges modern antropogén szennyezésekkel szemben. A nagyon idős vizű kutak nagy részénél nem áll rendelkezésre trícium adat, mivel a vízföldtani védettség miatt nem tartották szükségesnek a trícium mérését.

Ugyan csak 12 darab  $^{36}\text{Cl}$  izotópelemzési adat állt rendelkezésünkre a térségre, jól alátámasztják a trícium vizsgálatok eredményét. A  $^{36}\text{Cl}$  – annak ellenére, hogy 300 000 éves felezési ideje alapján a nagyon idős vizek kormeghatározására alkalmas – kiválóan használható

a friss komponens kimutatására is. Az 1940-50-es években végzett mélytengeri hasadó bomba (atombomba) kísérletek miatt a csapadékvíz (így a beszivárgó felszín alatti vizek)  $^{36}\text{Cl}$  tartalma ugrásszerűen megnőtt. A budapesti termálkarsztvizek egy részében a trícium és a  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}^-$  arányegyettes növekedése bizonyítja a friss komponens jelenlétét, mivel mindkét komponens az utóbbi 70-80 évben beszivárgott vizet jelzi.

A budapesti termálkarszt térségének vizei, amint a 27. ábra is szemlélteti, jellemzően meteorikus eredetűek. Az adatok a Globális Csapadékvonal (GMWL), a  $\delta^2\text{H}=8*\delta^{18}\text{O}+10$  egyenlettel leírható regressziós egyenes mentén helyezkednek el, míg a budapesti termálkarsztot – a jól elkülönülő turai, valamint Vácrátót-Veresegyház szubklasztterektől eltekintve – a  $\delta^2\text{H}=8,2*\delta^{18}\text{O}+10,7$  ( $R^2=0,91$ ) egyenlet írja le. A turai, valamint a vácrátóti, veresegyházi minták eltérnek (nagyobb távolságra esnek a globális csapadékvonal alá), ezáltal vélhetően hosszabb tartózkodási időt és szignifikáns víz-közet-hő kölcsönhatást tükröznek. A legnegatívabb ( $-12,7$  és  $-11,2\text{‰}$  közötti) értékek a Vácrátót-Veresegyház, valamint a Pest és kapcsolódó térségének szubklasztterében figyelhetőek meg, melyek jégkorszaki (pleisztocén) beszivárgást tükröznek. Az Észak Buda – Gerecse, valamint a Lukács-fürdő langyos forrásainak vize holocén beszivárgású. Látható, hogy egyrészt vagy teljesen vagy részben 70 évnél fiatalabb csapadékot is tartalmaz. A Keleti szubklasztterek gyakran kevert vizűek, azaz a pleisztocén vizekhez friss beszivárgású víz is keveredik. Ez különösen jellemző a megcsapolási térségekben, ahol több típusú (lokális és regionális) áramlási pálya találkozik.



27. ábra: A karsztrendszer tápláló és megcsapoló vizek eredete a  $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$  kapcsolat alapján (A: szubklasztterek alapján ábrázolva, B: tríciumtartalom alapján ábrázolva)

A budapesti termálkarszt térségében még a leghidegebb vizek  $\delta^2\text{H}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  értékei is negatívabbak az alföldi talajvizekéénél, amit a „magassági hatás” okoz, mivel a csapadékvíz – így az abból beszivárgó felszín alatti vizek – stabil izotóp összetétele függ a beszivárgási terület tengerszint feletti magasságától. A magassági hatásra  $\delta^{18}\text{O} = -0,54\text{‰}/100\text{m}$ , illetve  $\delta^2\text{H} = -3,0\text{‰}/100\text{m}$  értéket kaptunk.

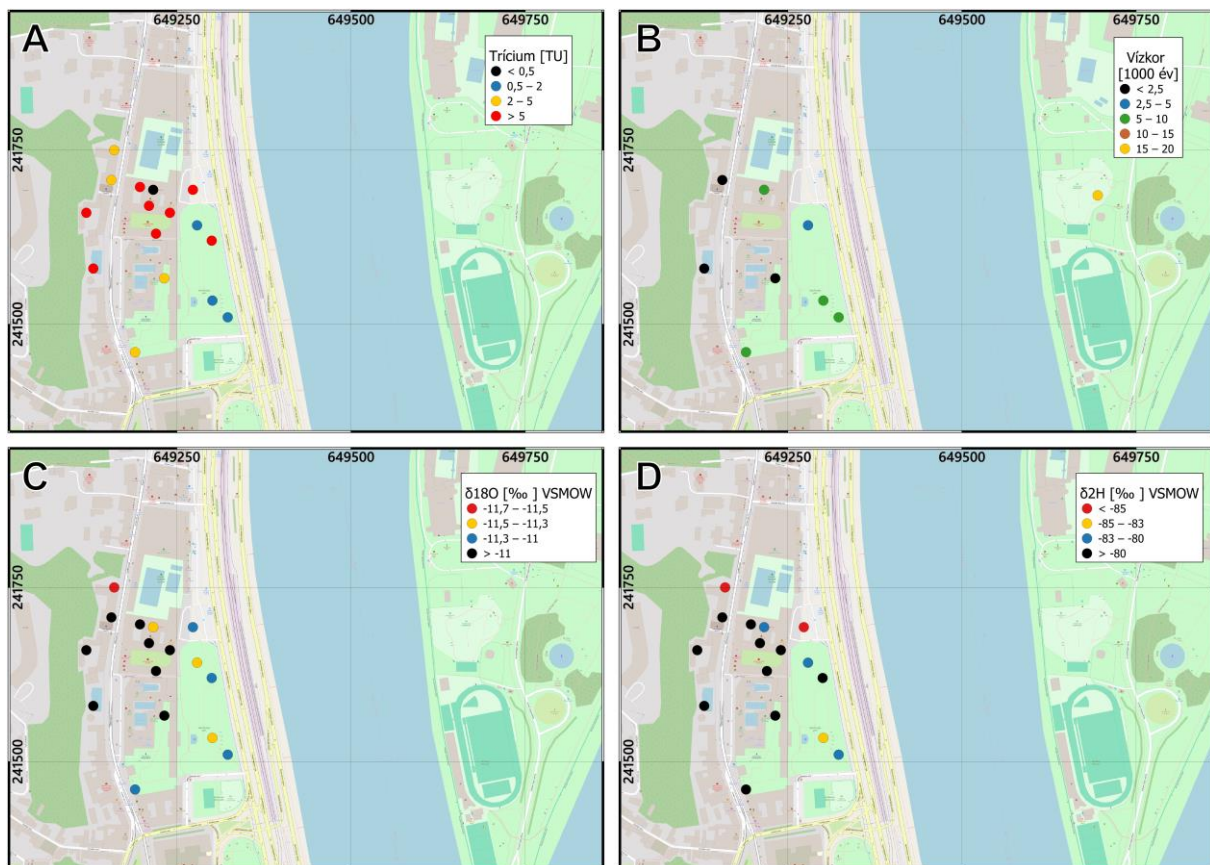
### Vízkorszámítás és kihívásai

A budapesti termálkarszt térségében a karsztvizek radiokarbon víz-korszámítást, a karbonátok oldódásából a karsztvizekbe kerülő többlet oldott szerveszén (hidrogénkarbonát és  $\text{CO}_2$ ) hatásának figyelembevétele érdekében, stabil szénizotóp ( $\delta^{13}\text{C}$ ) korrekcióval végeztük. Megállapítható, hogy Vácrátót, Veresegyház és Tura kivételével,

amelyek az alsó mérési határ közeli  $^{14}\text{C}$  értékekkel rendelkeznek, és akár mintavételi/mérési hibát is tartalmazhatnak, a *Keleti* szubklaszterek vizei jellemzően 10 000–27 000 év közötti látszólagos vízkorokat mutatnak. Az e szubklaszterekhez tartozó Lukács-források környezetében a különböző áramlási pályák találkozásából adódóan a vizek keverednek és 4500–5500 éves látszólagos vízkorok mutatkoznak. Vácrátót és Veresegyház, illetve Tura esetében is akár a 40 000 évnél idősebb pleisztocén korú beszivárgás sem zárható ki, a radiokarbon alapján számolt vízkor alapján is jól elkülönülve a budapesti termálkarszt többi objektumától.

A számított radiokarbon vízkorok és a kifolyóvíz hőmérséklet trendszerű kapcsolata alapján a Budapest területén lévő karsztvizekben  $2,8\text{ }^\circ\text{C}/\text{ezer év}$  ( $R^2 = 0,95$ ), míg a Budapest környékiekben  $2,1\text{ }^\circ\text{C}/\text{ezer év}$  ( $R^2 = 0,87$ ) hőmérsékletnövekedés figyelhető meg. A trendek számításánál kihagytuk a keverék-vizeket és a Gellérthegy környéki kutakat.

Annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, hogy a korábbi irodalmakban is jelzett (pl. ERŐSS 2010, MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018) Lukács- és Császár-források környéki megcsapolások mennyire követhetőek a rendelkezésünkre álló izotópadatok alapján, együttesen vizsgáltuk azok területi eloszlását. Megállapítható, hogy a  $^3\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  és radiokarbon vízkor adatok is alátámasztják (28. ábra) a lokális, intermedier és regionális áramlási pályák szűk térrészben történő felszínre vagy felszín közelbe jutását.



28. ábra: A Lukács- és Császár-fürdő vizeinek főbb izotóp és látszólagos vízkorjellemzői (A: trícium, B: radiokarbon vízkor, C:  $\delta^{18}\text{O}$ , D:  $\delta^2\text{H}$ )

A  $^{14}\text{C}$  vízkor vs.  $\delta^{18}\text{O}$ , illetve  $\delta^2\text{H}$  összefüggés alapján a Gellérthegy (Gellért, Rudas, Rác) forrásokban és kutakban a vízkorok 11 200 és 13 400 év közöttiek, és a friss víz nem okoz nagy eltérést a paleoklíma által elvárt stabil izotóp összetételhez képest.

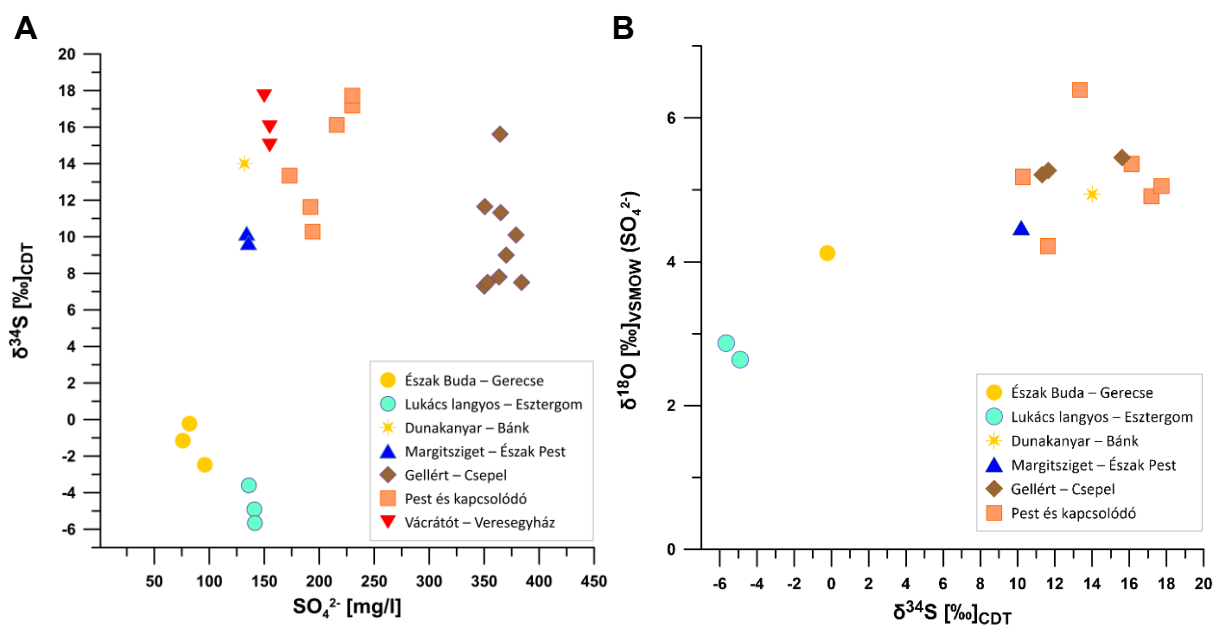
Mindezek összhangban vannak a korábbi kutatásokkal, beleértve a radionuklid adatok interpretációjával (Eröss 2010), amely szintén hatékony eszközök a különböző rendű áramlási rendszerek keveredésének nyomon követésére.

#### *A vízben oldott szulfát koncentrációjának kén- és oxigénizotópösszetételének vizsgálata*

Az adatok feldolgozása alapján a területen a főkarsztrendszerben a szulfátkoncentráció mediánja 150 mg/l körüli, ugyanakkor a szulfátkoncentráció viszonylagosan nagy területi változékonysággal jellemezhető. A 10 és 90 percentilisek alapján a szulfáttartalom 50–370 mg/l értékek közötti, míg a terület déli részén a koncentráció eléri akár a 600 mg/l-t is.

Az **oldott szulfát  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparányára** több adattal is rendelkezünk a területen, melyet a 29. ábra alapján mutatunk be. A minták többségénél a  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparánya pozitív, +6 és +18 ‰ között változik. Ezek a kutak és források, melyek a *Keleti főklaszter* tagjai (*Dunakanyar–Bánk*, *Margitsziget–Észak Pest*, *Gellért–Csepel*, *Pest és kapcsolódó*, valamint *Vácrátót–Veresegyház* szubklaszterei) kevert-meleg vagy melegvizűek.

A minták másik csoportjára, a *Nyugati főklaszteren* belül (*Észak Buda – Gerecse*, *Lukács langyos – Esztergom* szubklasztereire) negatív (0 – -6‰)  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparány jellemző (29. ábra).



29. ábra: A vízben oldott szulfát kénizotóparánya a szulfáttartalom függvényében (A), valamint a vízben oldott szulfát kénizotóp és oxigénizotóp arányok kapcsolata (B)

Az **oldott szulfát  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparány és a szulfáttartalom** kapcsolatát vizsgálva (29. ábra, A) három csoport látszik elkülönülni. Az egyik, a *Margitsziget–Észak Pest és Pest és kapcsolódó* szubklaszter csoportjai 150–250 mg/l szulfáttartalmúak, amelyekben a szulfáttartalom növekszik a  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparánnyal. A kissé nagyobb szulfáttartalom – Lukácsforrás IV. és V. kútjai – az áramlási pályák menti keveredés hatásából adódhat. A *Vácrátót–Veresegyház*, valamint a *Dunakanyar–Bánk* szubklaszterek vizei elkülönülnek a csoporton belül, amelyek  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparánya 14 és 18‰ között változik ~150 mg/l szulfáttartalom mellett.

A másik csoportba (*Gellért–Csepel* szubklaszter) a nagyobb szulfáttartalommal jellemezhető (350–400 mg/l) kutak és források tartoznak, melyek kizárólag a terület déli részén, a Gellérthegy közelében és a dél-pesti területrészen található. A csoporton belül a mintapontok nagyobb része, egységes magas szulfáttartalommal jellemezhető, mely nem változik együtt a  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparánnyal. A mintapontok kisebb csoportjában (*Gellért Rkp. XIV*, *Rudas-fürdő*

Török-, Mátyás-, Diana források, Rác-fürdő Nagy-, Kis-források)  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparány nem változik, +7‰. A fenti csoportoknál a  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparánya pozitív, +6 és +18 ‰ között változik. A harmadik csoportba tartozó pontoknál negatív  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparány (-3 – -6‰) mutatkozik, ezek a Lukács-fürdő langyos kevert vizei (Török-, Boltív- és Római-források) valamint az *Észak Buda–Gerecse* szubklaszter hideg vizei (0 – -3‰). A szulfáttartalom a legalacsonyabb ennél a csoportnál

A szulfát  $\delta^{18}\text{O}$  izotóparánya (29. ábra, B) +2 és +7‰ között változik a vizsgálati területen. A meleg vizekben +4 és +7‰ közötti értékek, míg az *Észak Buda–Gerecse* szubklaszter beszivárgási területen található hideg és a Lukács-fürdőnél megcsapolódó, kevert vizekben (Boltív-forrás és Római-forrás) az  $\delta^{18}\text{O}$  izotóparány +2 és +4‰ közötti.

Az oldott szulfát eredetének vizsgálata már korán felmerült kérdésként (ALFÖLDI 1979). Hatékony segítséget azonban a  $\delta^{34}\text{S}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  izotóp adatok vizsgálata jelentett a lehetséges folyamatok elkülönítésére, a hipotézisek igazolására (MÁDLNÉ SZÖNYI et al. 2018, FÓRIZS et al. 2019).

Irodalmi adatok alapján ezek a  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparány értékek egy része tengeri eredetre utal, mivel a felső-perm és kisebb mértékben alsó-triász evaporitok kénizotóp arányának értékéhez hasonlók (9–18 ‰). A kevert és a hideg karsztvizekben a negatív  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparány arra utal, hogy a vizek oldott szulfáttartalma az oligocén korú agyagos formációk (Kiscelli és Tardi Agyag Formáció) pirittartalmának oxidációja eredményeképpen kerül a karsztvízbe.

A területen többfelé találkozunk a hipogén karsztosodás nyomaival, oldódási üregekkel, ásványkiválásokkal (pl. barit, gipsz) a repedésrendszerek kitöltéseként, illetve a barlangok falán. Hasonló ásványkiválásokat fűrómag leírások is dokumentálják. Az ásványkiválások részletes mineralógiai, geokémiai és izotópgeokémiai, valamint mikrotermometriás zárványvizsgálatai az ásványfázisok mélyebb medence eredetű fluidumokból való származására utalnak (MÁDLNÉ SZÖNYI et al. 2018).

### 3.6.5. A vízgeokémiai és izotóphidrológiai értékelések összessége

A kutatás keretében végzett értékelések fontosabb eredményeinek, konklúzióinak összessége:

- Jelen kutatás keretében a budapesti termálkarszt térségének jellemzéséhez a korábbi kutatásokhoz képest jóval nagyobb térrészre és szélesebb körű adatforrást felhasználva kialakítottunk egy – a hibák döntő részétől mentes – javított vízkémiai és izotóphidrológiai adatrendszer.
- Klaszteranalízis keretében két főklasztert különítettünk el. A döntően a dunántúli terület objektumainak főklaszterét *Nyugati*, míg a jellemzően a Duna mentén és a pesti oldalon található objektumok csoportját *Keleti* főklaszternek neveztük. Az elemzések alapján a *Nyugati* főklasztert 4 szubklaszterre (alcsoportra) (*Pilis–Mány*, *Észak Buda–Gerecse*, *Lukács langyos–Esztergom*, *Észak Buda*), míg a *Keleti* főklasztert 6 szubklaszterre bontottuk (*Dunakanyar–Bánk*, *Margitsziget–Észak Pest*, *Gellért–Csepel*, *Pest és kapcsolódó régió*, *Vácrátót–Veresegyház*, valamint *Tura*).
- Az oxigén- és deutériumizotóp adatok alapján megállapítható, hogy a budapesti termálkarszt térségében a karsztvizek jellemzően csapadék eredetűek, de nem zárható ki nagyon kis mennyiségű brakk-, vagy tengervíz eredetű komponens jelenléte. Ehhez nyomelemvizsgálatok, valamint további izotópok vizsgálata adhat támpontot. Az áramlási rendszerben a karsztvíz tartózkodási ideje legalább 20 000 – 30 000 év. A stabil vízizotópok „magassági hatása” alapján e karsztvizek nagy része 200–400 mBf magasságban szivárgott be.

- A  $^{14}\text{C}$  adatok – trícium-, oxigén- és deutériumizotóp adatok figyelembevételével értelmezve – és  $\delta^{13}\text{C}$  korrekcióval együtt alkalmazva, alkalmasak radiokarbon vízkor számítására, azaz a beszivárgás óta eltelt (látszólagos) tartózkodási idő becslésére.
- A karsztvizek termális komponense jégkorszaki, a hideg komponens holocén beszivárgású, míg a langyos vizek nagy része e kettőnek a keveréke.
- A tríciumadatok alapján potenciálisan szennyezett friss víz hozzákeveredése mutatható ki a hideg karsztvizekben, valamint a Lukács- és Császár-fürdő, illetve a Gellérthegy környékén lévő karsztvizekben.
- Úgy az általános vízkémiai jellemzők, mint a klaszterelemzés alapján Tura élesen elkülönül a főkarsztrendszer többi kútjától. Ha nem is ennyire élesen, de szintén határozottan elkülönülnek Vácrátót és Veresegyház kútjai. A turai, veresegyházi és vácrátóti kutak eltérő jellegét megerősíti stabil és radioaktív izotóp összetétele is.
- A karsztvízben oldott szulfátból mért  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparány értékek egy része – Dél Buda, valamint a Gellért-fürdő és Csepel térségében – tengeri eredetre utal, mivel a felső-perm és kisebb mértékben alsó-triász evaporitok kénizotóp arányának értékéhez hasonlóak. A kevert és a hideg karsztvizekben a negatív  $\delta^{34}\text{S}$  izotóparány arra utal, hogy a vizek oldott szulfáttartalma az oligocén korú agyagos formációk (Kiscelli és Tardi Agyag Formáció) pirittartalmának oxidációja eredményeként kerül a karsztvízbe. A területen megfigyelt hipogén karsztosodás nyomai, ásványkiválásai, valamint a fűrómag leírásokban is dokumentált (pl. barit, gipsz) ásványok vizsgálatai mélyebb medence eredetű fluidumokból való származásra utalhatnak.

#### **4. A budapesti termálkarszt hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálata**

A budapesti termálkarszt vizsgálatára mind véges elemes (FEFLOW), mind véges differencia (Visual MODFLOW) szoftver alkalmazásra került. Az előbbi a hőtranszport folyamatot sűrűségfüggő módon is figyelembe veszi, nagy regionális léptékben, meglehetősen komplex matematikai háttérrel; míg az utóbbi kisebb területű, egyszerű, robosztus megközelítésű modell, mely gyors futtatásokat tesz lehetővé, döntéstámogatói céllal.

##### **4.1. A budapesti termálkarszt hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálata FEFLOW környezetben**

###### **4.1.1. Bevezetés**

Jelen fejezet a budapesti termálkarszt véges elemes hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálatához (FEFLOW® 7.5) nyújt háttérinformációkat. A modellvizsgálat célja a meghatározó áramlási és hőtranszport folyamatok leképzése Budapest tágabb környezetében, figyelembe véve a már meglévő és a közeljövőben tervezett termálvíz-hasznosításokat is.

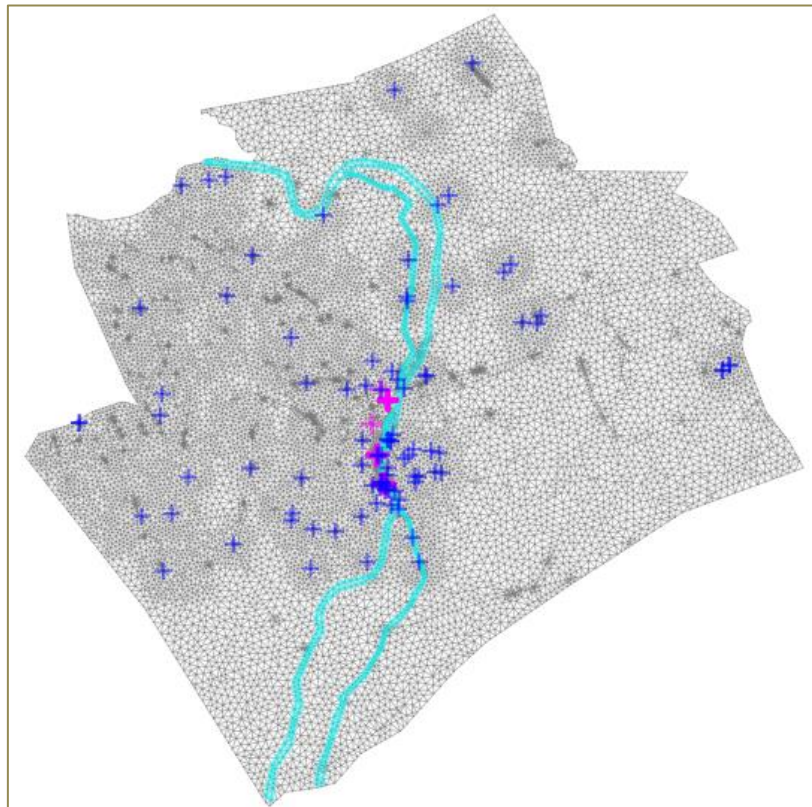
###### **4.1.2. Hálókiosztás**

A budapesti termálkarszt hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálata a véges elemes módszert alkalmazó FEFLOW® 7.5 szoftverrel (Copyright© 1979–2009, DHI-WASY GmbH, DIERSCH 2005) készült, mely esetében a térbeli diszkretizációnak (hálógenerálásnak) hangsúlyos szerep jut.

A fontosabb térelemek inputként megadhatók a hálógenerálás előtt, esetünkben ezek a Duna, a kisebb vízfolyások, a karsztos termelő (kutak, foglalt források, aknakutak stb.), észlelő objektumok és szerkezetföldtani vonalak (vetők, képződményhatárok) voltak. A modellhatár kijelölésekor szempont volt, hogy a budapesti termálkarszt minden jelentős megcsapolása (források, kutak) kerüljön bele, lehetőleg a peremeken lényeges hozam be és kiáramlás nélkül.

Kivétel ez alól a nyugati perem melynek beáramló hozamát Csepregi A. Dunántúli-középhegységre készített modelljéből szolgáltatta.

A véges elem módszer lehetővé teszi a modellezett tér tetszőleges csomópontú felosztását, ezáltal a fontos térrészeket (pl. a forrástérségek [Lukács, Gellért, Római stb.], illetve a termelőkutak körzetei) nagy, míg a kevésbé lényeges területeket kis hálósűrűséggel fedhetjük le. Az elkészült modellháló ábráján (30. ábra) jól láthatóak az eltérő hálósűrűségű területek. Az elkészült hálókiosztás paramétereit a 2. táblázat szemlélteti.



30. ábra: A budapesti termálkarszt modelljének hálókiosztása a források (lila kereszt) és a kutak (kék kereszt) feltüntetésével

2. táblázat: Az elkészült hálókiosztás paramétereit

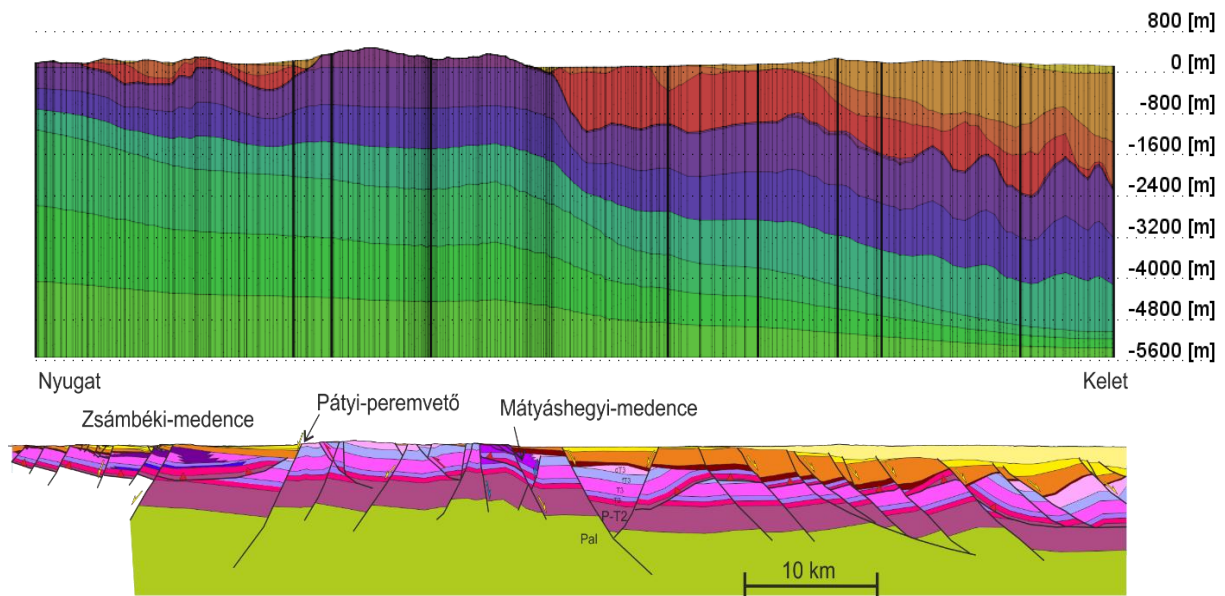
Dimenzió száma	3
Csomópontok száma elemenként	6
Elemtípus	háromszög alapú hasáb
Hálóelemek száma rétegenként	33772
Összes hálóelem	439036
Csomópontok száma	239680
Felületek / rétegek száma	14 / 13

#### 4.1.3. Az áramlási tér geometriája

A földtani fejezetben leírtak alapján készült el a modellezett térrész vertikális felbontása. Modellrétegeként alkalmazott földtani szintek és segédrétegek az alábbiak voltak:

- Terep - DDM50
- Pre-kvarter
- Pre-pannóniai
- Pre-szinrift
- Pre-Kiscelli és Tardi Formáció
- Prekainozoos aljzat
- Iszkahegyi Mészke tető
- segédrétegek
- -5500 mBf (modell alja)

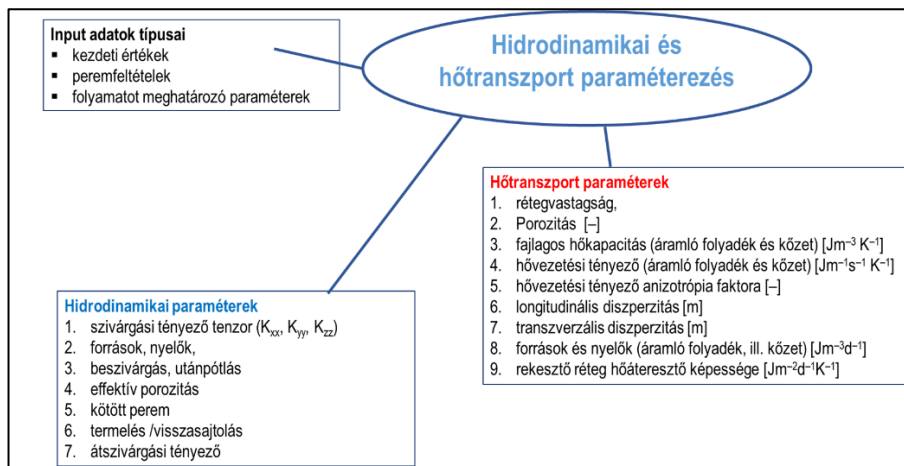
A rétegekiosztást a Zsámbék–Tura szelvényen keresztül szemléltetjük (31. ábra).



31. ábra: A modell rétegekiosztása a Zsámbék–Tura földtani szelvény (8. ábra) mentén szemléltetve, ahol a különböző színek a különböző modellrétegeket jelölik

#### 4.1.4. A modell paraméter igénye

A 32. ábra a hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálat paramétereit szemlélteti (KUN 2022).



32. ábra: A hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálat paraméterigénye

A felszín alatti vizek mozgását a gravitáció és az áramló fluidum sűrűségkülönbsége határozza meg. A budapesti termálkarszt modellvizsgálatakor mind a konvektív, mind a konduktív hőtranszport folyamatokat szükséges szimulálni, ennek első lépése a hidrodinamikai modell.

A hidrodinamikai potenciálra számos mélységfüggő és hőmérsékletfüggő, valamint fizikai paraméter hat. Amennyiben a számítás során változik a modell hőmérséklete, az visszacsatolásként hat az áramlási viszonyokra. A hőmérsékletfüggő fizikai paraméterek megadása MAGRI (2009) *plug-in*-ként alkalmazott kiegészítő program segítségével valósult meg.

#### 4.1.5. Hidrodinamikai viszonyok

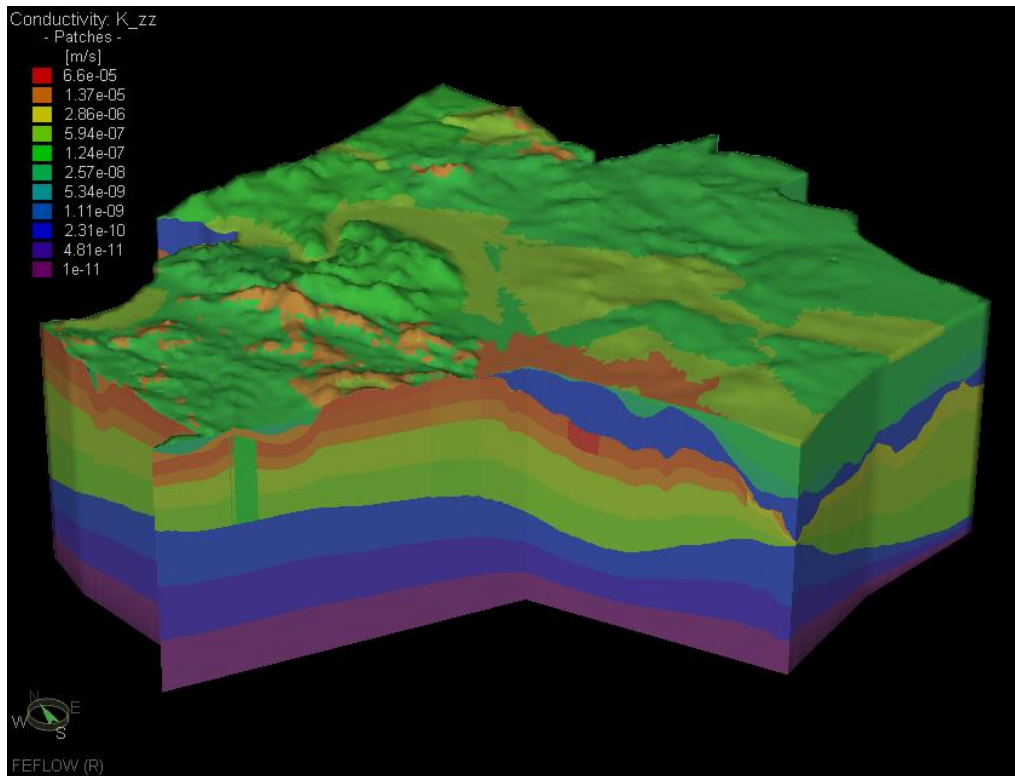
Hidrogeológiai és hévíztermelési szempontból célszerű külön választani a hegységi, és a medence aljzatát adó repedezett, karsztosodott kőzeteket a medencét kitöltő nagy áramlási rendszerrel jellemezhető üledékösszletektől.

A hidrodinamikai peremfeltételek mért (származtatott) és szakirodalmi értékeken alapulnak, bár ezek mérési körülményei sok esetben nem teljesen ismertek. A kiugró értékek miatt sok esetben modellezési szempontból lekövethetetlen változatosságot kellett volna visszaadni. A vizsgált térrészt felépítő összletek szivárgási tényező értékei széles skálán, kb. 5 nagyságrend tartományban mozognak. Míg az üledékes összletekben a kavicsos, durva törmelékes kifejlődések, addig az alaphegységi kőzetekben a nagy repedezettségű és/vagy karsztosodott térrészek alkotják a maximumot. A porózus üledékek szivárgási tényező minimumát a regionális vízzárónak tekinthető Kiscelli/Tardi Agyag testesíti meg (3. táblázat, 33. ábra).

Az üledékes kőzetekben jelentős anizotrópia került alkalmazásra (1-2 nagyságrend), míg a karsztosodott összletek izotrópok.

3. táblázat: Alkalmazott szivárgási tényező értékek a modellben ( $K_{xx}=K_{yy} / K_{zz}$  [m/s])

Rétegek						
1	Karszt	Vulkanit	Finomszemcsés porózus	Középszemcsés porózus	Durvaszemcsés porózus	Kavicsterasz
1	1.00E-05	1.27E-07	7.50E-07/7.50E-08	8.00E-07/8.00E-08	8.60E-06/8.60E-07	2.00E-05
2	Karszt	Vulkanit	Fiatalliocén	Pannóniai		
2	1.00E-05	8.33E-08	4.00E-07/2.00E-08	5.00E-06/5.00E-08		
3	Karszt	Vulkanit	Fiatalliocén			
3	1.00E-05	8.33E-8/2.083E-8	4.00E-07/2.00E-08			
4	Karszt	Kiscelli/Tardi				
4	1.00E-05	5.00E-8/5.00E-9				
5	Kiváló	Közepes	Gyenge	Rossz	Eocén	
5	1.32E-05	1.08E-05	1.20E-07	1.20E-08	9.60E-06	
6	Kiváló	Közepes	Gyenge	Rossz		
6	6.60E-5-2.64E-6	2.16E-05	1.00E-07	1.00E-08		
7	Kiváló	Közepes	Gyenge	Rossz		
7	5.50E-5-2.20E-6	1.80E-05	1.00E-07	1.00E-08		
8	Kiváló	Közepes	Gyenge	Rossz		
8	1.10E-5-1.10E-6	9.00E-06	1.00E-07	1.00E-08		
9	Kiváló	Közepes	Gyenge	Rossz		
9	1.10E-06	9.00E-07	1.00E-07	1.00E-08		
10	Kiváló	Közepes	Gyenge	Rossz		
10	1.10E-6/5.50E-7	9.00E-7/4.50E-7	1.00E-07	1.00E-08		
11	aljzat					
11	5.00E-9/5.00E-10					
12	aljzat					
12	1.00E-9/1.00E-10					
13	aljzat					
13	1.00E-10/1.00E-11					



33. ábra: Szivargási tényező értékek 3D tömbszelvényen ábrázolva ( $K_{zz}$  [m/s])

#### 4.1.6. Vízháztartási viszonyok

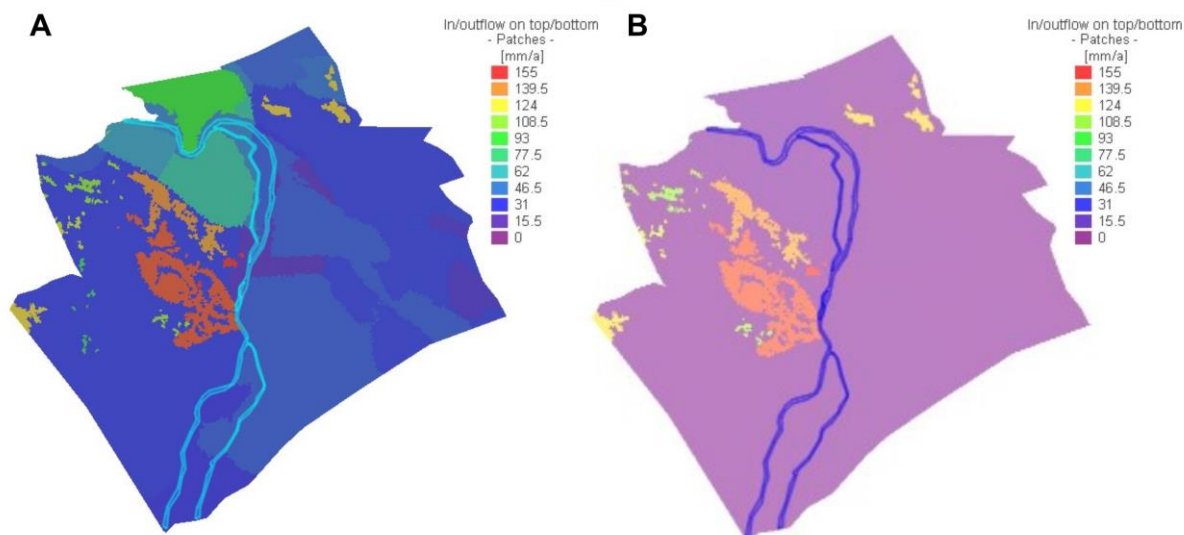
A modellvizsgálat szerves része a beszivárgás számszerűsítése, amely egyben kalibrálási faktor is. Számításainkban két változatot különítettünk el: egyrészt a teljes beszivárgást (karsztos, repedezett, és porózus) és másrészt kimondottan csak a karsztot érintő beszivárgást (34. ábra).

Ez utóbbi változatban is van minimális beszivárgás a fedő üledékekre. A fedőre számolt beszivárgási értékek (NATÉR2<sup>4</sup> alapján) jó egyezést mutattak a kisvízfolyások vízmércéin mért hozamadataiból (forrás: OVF) a vízgyűjtőre normált megcsapolási értékekkel.

A teljes térrész, így a fedő vízháztartásának leképzése kifeszítette ennek a modellvizsgálatnak a lehetőségeit (memória, fedő komplexitása), így a végleges változatban csak a második verziót (csak a karsztos utánpótlódást gyarapító beszivárgást) vettük figyelembe.

---

<sup>4</sup> <https://map.mbfisz.gov.hu/nater/>



34. ábra: A teljes (A) és a karsztos (B) utánpótlódású beszivárgás értékek a modell 1. felszínére [mm/év]

#### 4.1.7. Hőtranszport paraméterek

A hőtranszport szimuláció további paraméterek definiálását igényli. Ahhoz, hogy modell hőeloszlása közelítsen a valós szituációhoz, a földi hőáramot és a felszín közeli rétegek hőmérsékleti viszonyait definiálni kell, amit peremfeltételekként adhatunk meg. A FEFLOW® szoftver, más modellező programoktól eltérően, külön inputként igényli a száraz kőzet és az áramló fluidum hőtranszport paramétereit, mert azokat a porozitás függvényében módosítja. A hővezető képesség értékek meghatározásakor nagyobbrészt irodalmi adatokra lehet támaszkodni, értéke szűk skálán mozog, így ez számottevően nem befolyásolta a szimuláció eredményét.

**Kötött hőmérsékleti perem** (Állandó hőmérsékletű perem [DIRICHLET]: adott cellába [csomópontba] mindig annyi hő áramlik be, vagy ki, hogy a hőmérséklet egy előre definiált értéket vegyen föl. Például a felszín közeli állandó hőmérsékletű zóna hőmérsékletét lehet így megadni.):

- felszín: 11 °C (megegyezik az évi átlagos középhőmérséklettel)
- 13. felszín: -9072 J/m<sup>2</sup>/d (Neumann BC) 105 mW/m<sup>2</sup>

**Porozitás** (35. ábra):

- 0,0075 – 0,15 [-]

**Hővezetési tényező** (36. ábra):

- mátrix: 1,1 – 2,5 J/m/s/K [W/mK]
- áramló fluidum: 0,65 J/m/s/K [W/mK]

**Fajlagos hőkapacitás:**

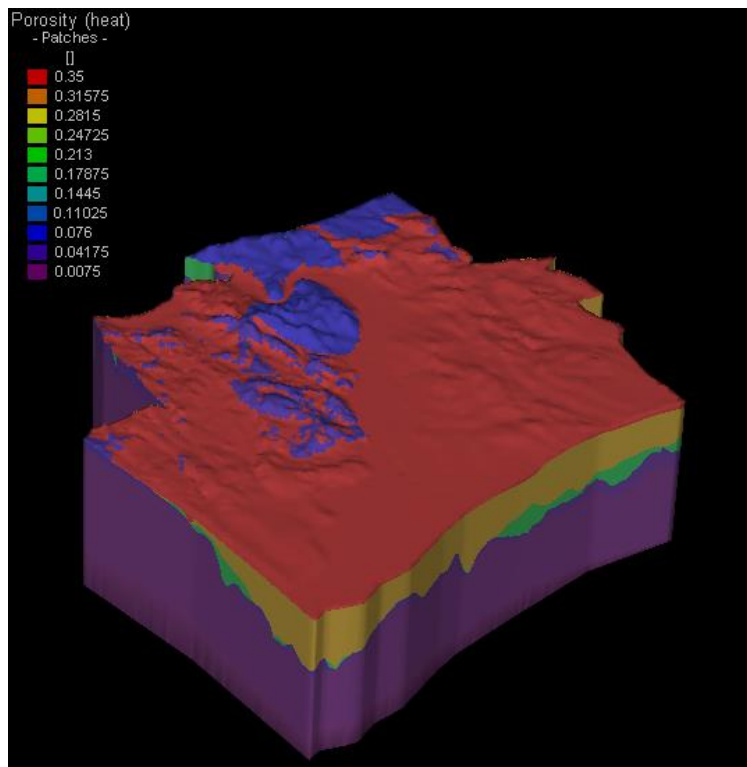
- mátrix: 1,8 – 2,88 MJ/m<sup>3</sup>/K
- áramló fluidum: 4,2 MJ/m<sup>3</sup>/K

**Longitudinális/transzverzális diszperzivitás:**

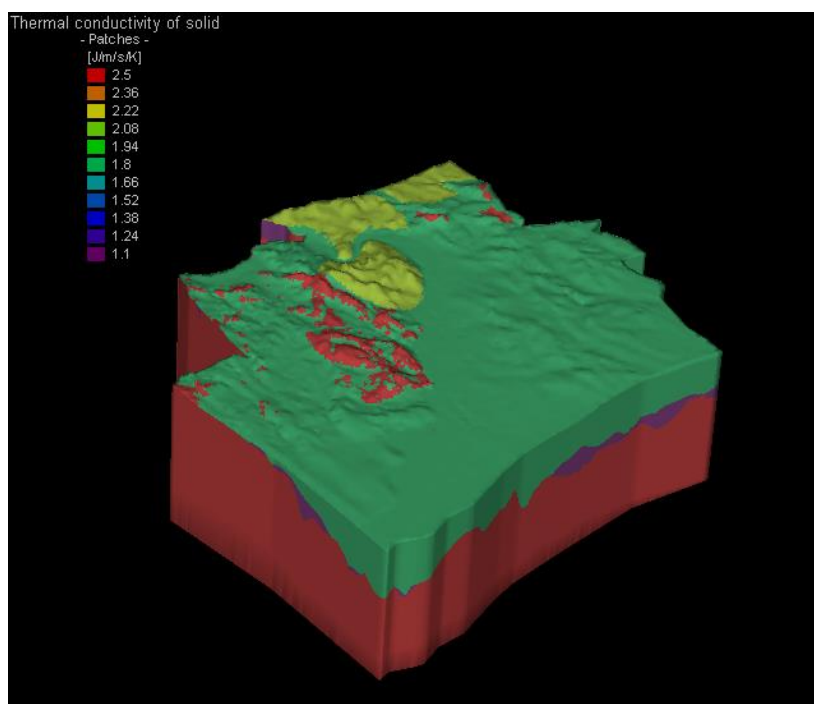
- 50 / 5 [m]

**Kezdeti hőmérséklet eloszlás** (geotermikus gradiens alapján [A fedőtől a prekainozoos felszínig 4,5 °C/100m, a prekainozoos felszíntől a modell aljáig 3,0 °C/100m]):

- 11 – 247 °C



35. ábra: Porozitás értékek térbeli eloszlás 3D tömbszelvényen



36. ábra: Hővezetési tényező értékek térbeli eloszlás 3D tömbszelvényen

#### 4.1.8. A modellvizsgálat menete

Az előzetes modellvizsgálatkor – még sűrűségfüggés nélkül – robusztus megközelítéssel csak a főbb áramlási irányok meglétét, a megcsapolódó termálforrások nagyságrendjét ellenőriztük, kis mértékű hőmérséklet és vízszint kalibrációval. Ezt követően a MAGRI (2009) *Beta-Gamma* illesztő szoftver (*plug-in*) algoritmusának segítségével egy külső ciklussal meghatározásra került időlépcsőnként, a modellezett hőmérsékleteloszlást alapul véve, a hőtágulási együttható értéke [1/K]. A *plug-in* 0 °C referencia hőmérsékletre számol, alkalmazhatósági tartománya:

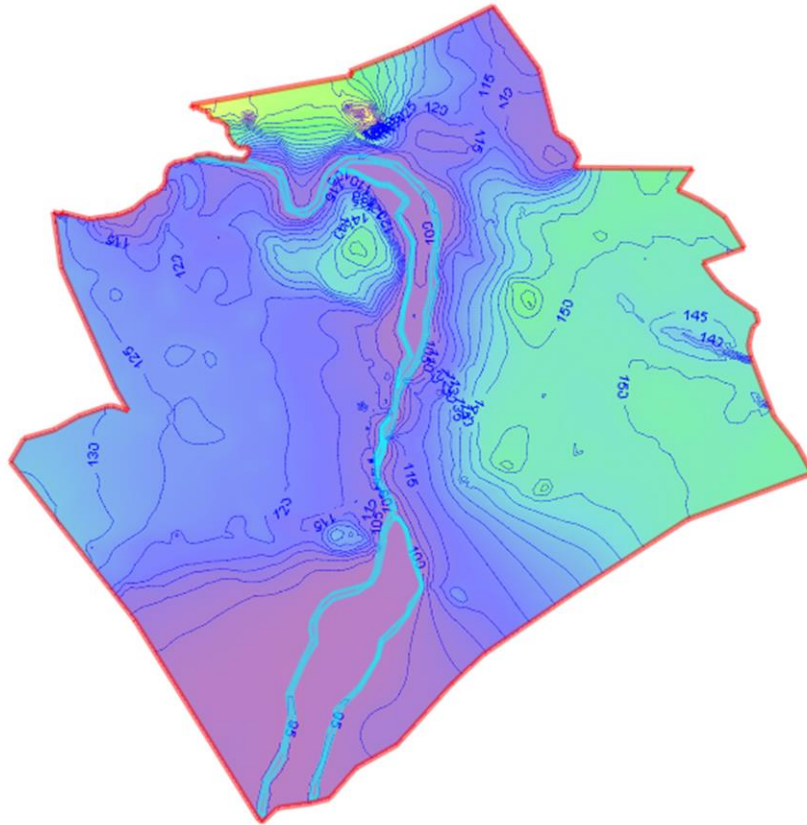
- hőmérséklet: 0 – 350 °C
- nyomás: 0 – 100 MPa

Ezen hosszúidejű futtatások alatt ( $1,825 \times 10^6$  –  $1,825 \times 10^8$  nap) a hidrodinamikai modell permanens, míg a hőtranszport tranziens módon futott, de természetesen a sűrűségkülönbség által indukált áramlás a vízszintekben is változást okozott. A lefuttatott verziók eredményeképpen az általunk megfelelőnek ítélt hőmérséklet és vízszint (fakadó hozam) eloszlások birtokában készültek el a termelési változatok. A vízszint kalibráció a területen található észlelőkutak 2012-2013 (10 év) átlagára történt.

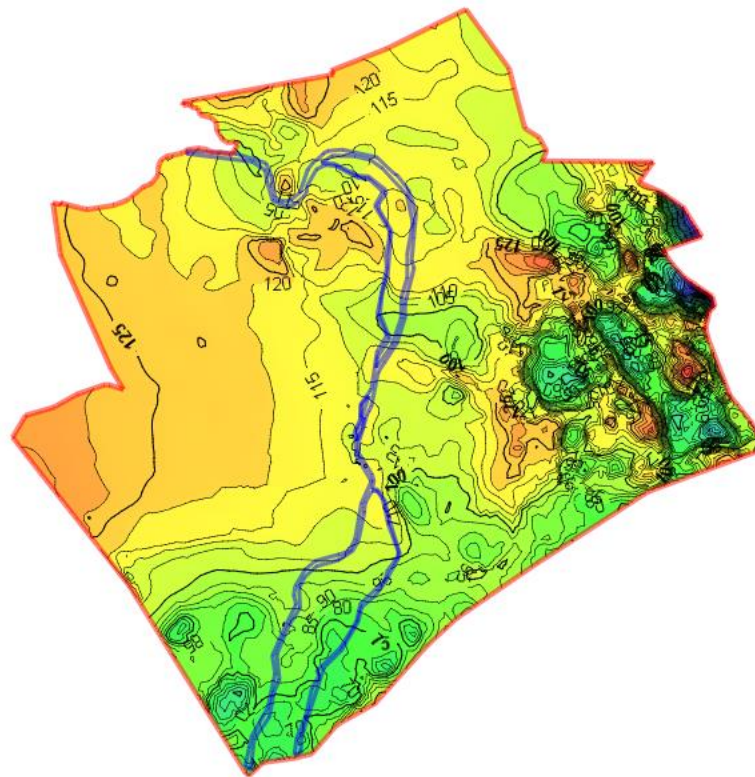
#### 4.1.9. Eredmények

A modell a méretarányához viszonyítva, nagyszámú, *trial-and-error* módszerű futtatás eredményeképp, a tőle elvárható pontosságot elérte. Leginkább a források hozamadatai és az észlelőkutak vízszint adatai, továbbá a talphő mérések jelentették a kalibráció alapját. A szimulált áramlási irányok helyességének megítéléséhez nyújtott támpontot a kutak vízkémiai komponensek alapján történő klaszterezése és a vízkor eredmények.

A 37. ábra és 38. ábra szemlélteti a szimulált vízszint-eloszlást (mindkét esetben a 0 °C referencia hőmérsékletre vonatkoztatva, de ez leginkább a termálvizes régióban jelent nagy különbséget) az 1. rétegre ("talajvízszint") és karsztosodott alaphegységi célréteg felsőbb régióját reprezentáló 7. modellrétegre ("karsztvízszint"). Előbbin jól láthatók a Duna és kisvízfolyások megcsapoló hatása és a vulkanikus hegységek magassági (pozitív) anomáliája, utóbbin pedig a jól elkülöníthető a beszivárgási (leáramlási) és a megcsapolási térrészek, valamint és a termelőkutak környezetének karakterisztikája.

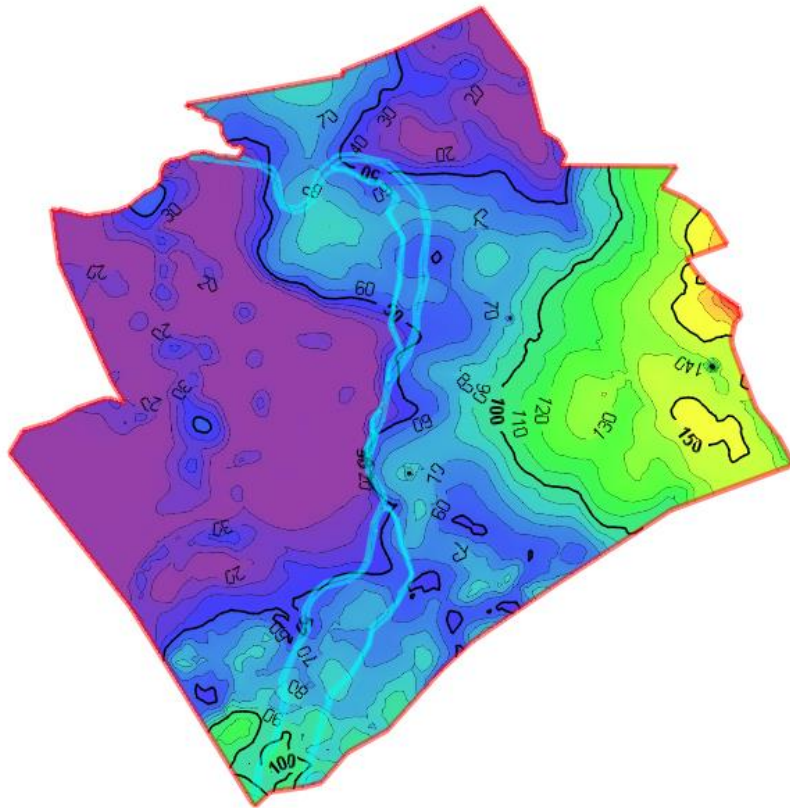


37. ábra: Az 1. modellrétegre szimulált „talajvízszint”-eloszlás [mBf]



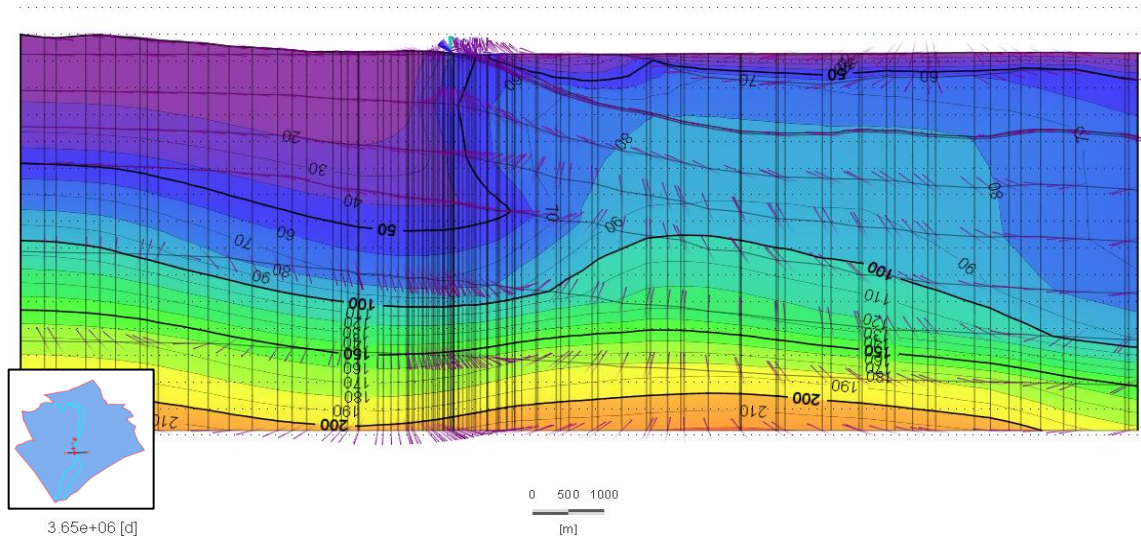
38. ábra: A 7. modellrétegre szimulált karsztvízszint-eloszlás [mBf – 0 °C-ra vonatkoztatva] a meglévő termálkutak hozamának figyelembevételével

A hosszú idejű sűrűségfüggést tartalmazó modellfuttatás eredményeként kialakult a kalibrált hőmérséklet-eloszlás (39. ábra), továbbá megmutatkoztak az erőteljesebb fel- és leáramlási zónák, esetenként konvekciós cellák.



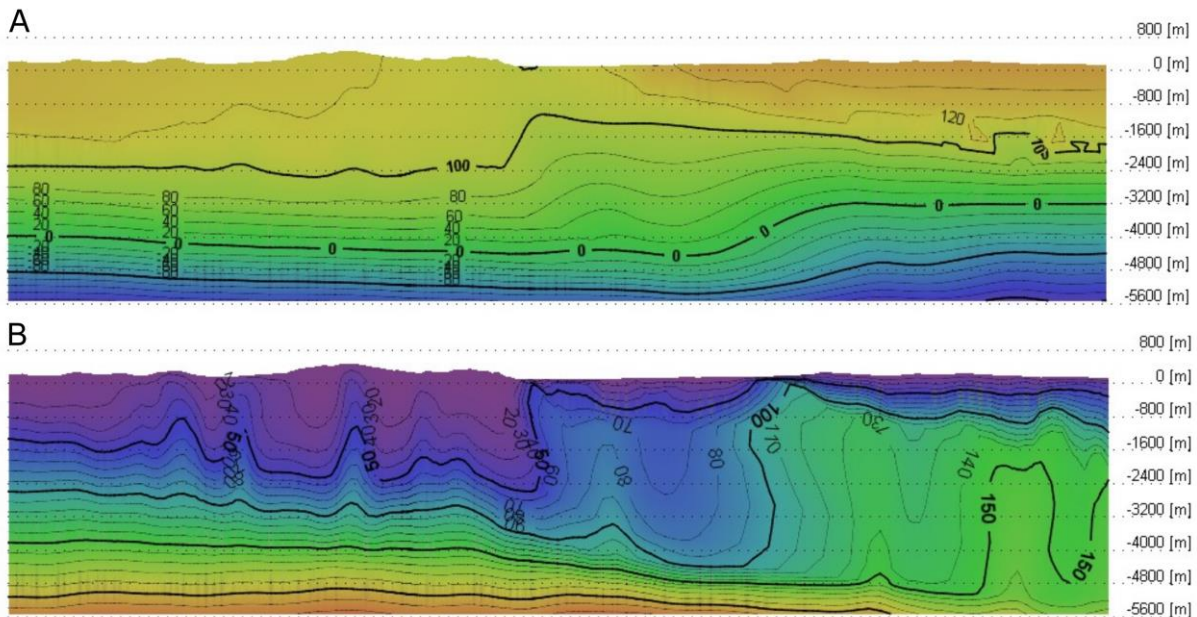
39. ábra: A 7. modellrétegre szimulált hőmérséklet-eloszlás [ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] a meglévő termálkutak hozamának (alacsonyabb hőmérsékletű visszasajtolások) figyelembevételével

A 40. ábra a keresztmetszéken ábrázolt hőmérséklet-eloszlást és a Darcy áramlás fluxusvektorát szemlélteti. A szelvény nyomvonalát az indexkép mutatja; a bal oldalon a beáramlási, hideg hőmérsékletű (Budai-hegység); a jobb oldalon a Pesti-síkság fedett karbonátos aljzatának izotermái láthatók. Jól kivehető a Duna vonalában megjelenő megcsapolási régió keveredési zónája.



40. ábra: A Gellérthegyi forrascsoport szelvényén ábrázolt modellezett hőmérséklet és Darcy-fluxus

A Zsámbék–Tura korábban bemutatott földtani szelvény nyomvonalában látható egy hosszú idejű futtatás eredményeképp létrejött vízszint (0 °C referencia hőmérsékletre), illetve hőmérséklet-eloszlása (41. ábra).



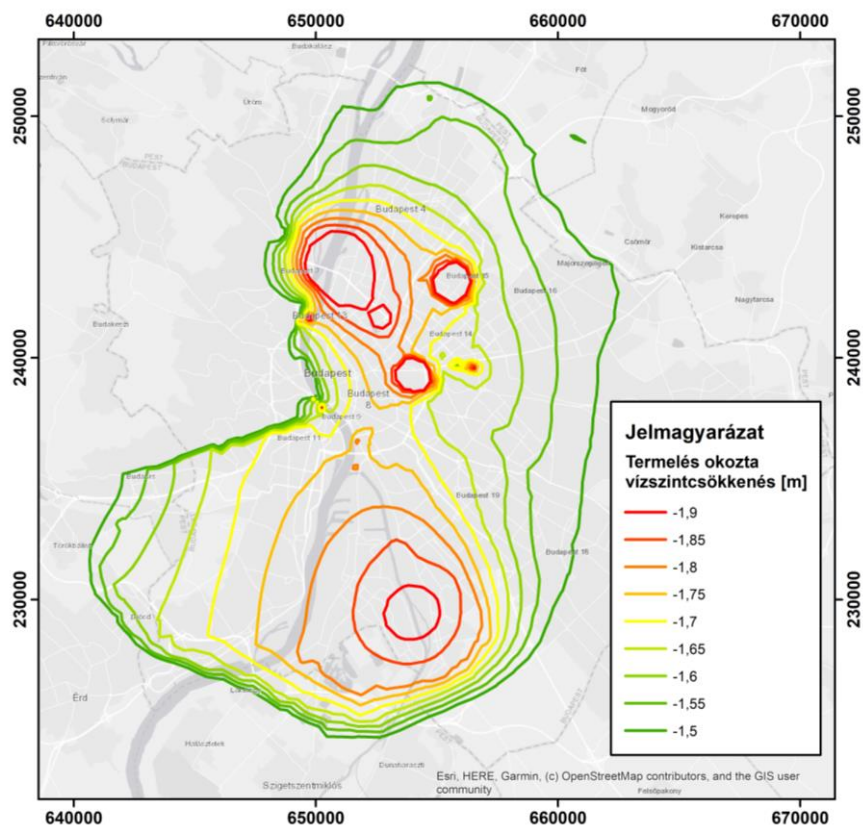
41. ábra: A Zsámbék–Tura szelvény (8. ábra) mentén szimulált vízszint- (A) és hőmérséklet-eloszlás (B)

A kalibrált modellváltozat (forráshozam, vízszint, hőmérséklet) birtokában különböző termelési változatok lefuttatása is lehetővé válik. Ahhoz, hogy a jelenlegi termelés okozta hatásokat szimuláljuk Budapest belterületére, az alábbi modellvizsgálati sorozatot futtattuk le egymás után:

1. Természetes, azaz termelés nélküli változat futtatása permanens hidrodinamikai és tranziens hőtranszport feltételek mentén;
2. Hideg vizes és külterületi termálvizes kivételek megadása 50 éves futtatási idővel;
3. Belterületi termálvizes termelésekkel való futtatás 50 évre

A modellezés input paraméterenként megadandó kezdeti hőmérséklet és vízszint eloszlást mindig az előző futtatás outputja alapján adjuk meg, az elsónél pedig mért adatokból számítottuk (geotermikus gradiens, mért vízszintek alapján).

A 3. pontban lefuttatott termelési modellváltozat kezdeti és végállapot közötti vízszintkülönbségét szemléltetjük a következő ábrán (42. ábra). Az izovonalak lefutásának értelmezésekor fontos felhívni a figyelmet a Duna-menti forráskörzetek (Gellért, Rudas, Rác, Lukács stb.) pufferként működő módosító hatására. Itt ugyanis a többletermelés következtében nem a vízszint csökken, hanem a forráshozam.



42. ábra: Budapest belterületén a termálkarsztos objektumok termelése által okozott modellezett vízszintcsökkenés [m]

#### 4.2. Döntéstámogatói célú, robusztus modellvizsgálat véges differencia módszert alkalmazó Visual MODFLOW környezetben

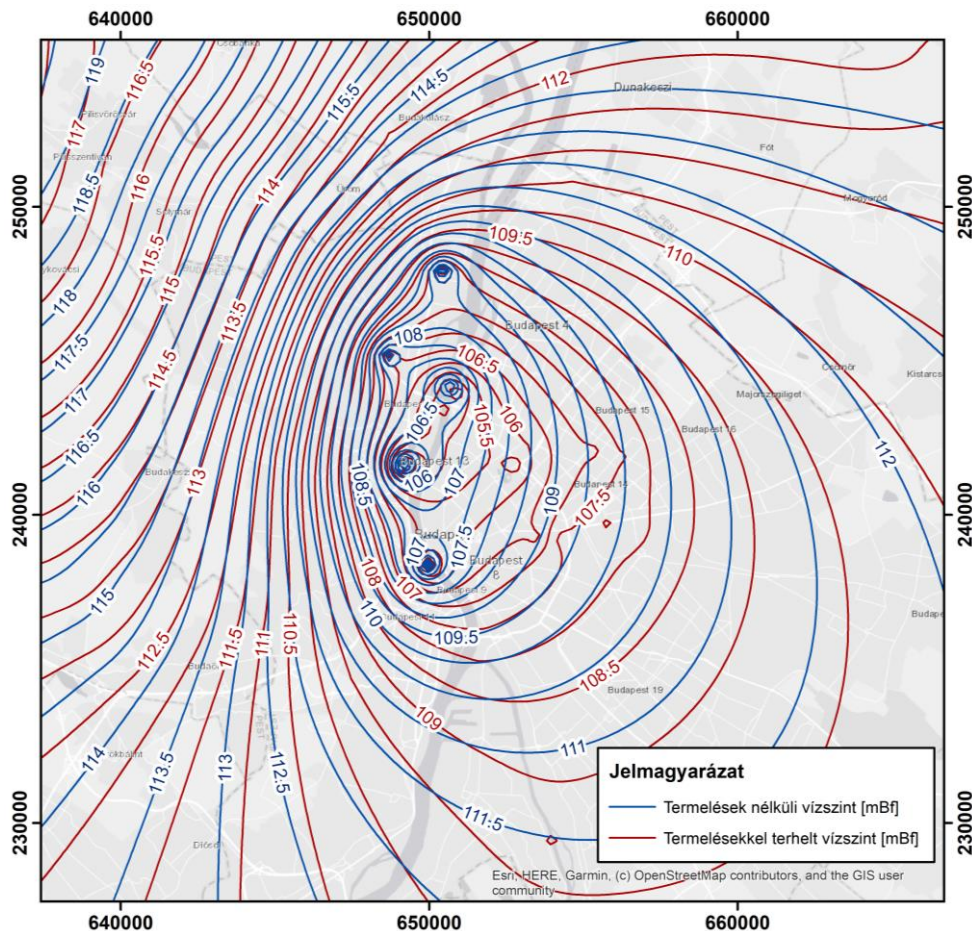
A véges differencia módszert használó MODFLOW programmal készített robusztus modellvizsgálat célja hozzájárulni a Budapesten és környékén megjelenő geotermikus és hévíz-hasznosításokkal terhelt regionális termálkarsztrendszer terhelhetőségi vizsgálatához. Ezen modellvizsgálatok kialakításának célja annak a zónának a lehatárolása, ahol Budapest térségében lévő termálvíz hasznosítások együttes hatása jelentőssé válik. További cél egy olyan módszer kidolgozása, mely segítségével gyors tájékoztatást adhatunk a döntéshozók részére egy tervezett újabb hasznosítás, meglévő hasznosítás fejlesztésével vagy módosításával kapcsolatban, annak várható hatásairól, valamint input adatokkal szolgálni a végeselemes módszerű, sűrűségfüggést is alkalmazó FEFLOW szoftverrel készített modellezéshez.

A robusztus léptékű, gyors futtatási potenciállal rendelkező hatásbecslési permanens modell előnye, hogy képes a főkarsztos zóna utánpótlódási területein bekövetkezett nyílt karszthoz leszivárgott hozamokat egyensúlyban kezelni a megcsapolási területeken távozó hozamokkal. A modell elsősorban a területen már meglévő termelések és visszatáplálások potenciálszintekre gyakorolt együttes hatását vizsgálja, majd ezt viszonyítja a termelések visszasajtolások nélküli, természetes (csak forrásos) helyzetéhez. A modell beszivárgási moduljában elkülönítettük a főkarszt csapadék eredetű utánpótlási térrészeit és a nyílt karsztos kibúvásokat is tartalmazó területeket. A szakirodalomban ismertetett nyílt karsztot elérő diffúz csapadékeredetű utánpótlást egységesen 60 mm-re vettük, hogy a legjobban megközelítsük a termelések előtti főkarsztos forráshozam értékeit. A későbbiekben ezen értékeket a klimatikus előrejelzések alapján tovább lehet vizsgálni, melynek be-, pontosabban leszivárgást növelő, vagy csökkentő hatásai is tanulmányozhatóak ily módon.

A megcsapolódásoknál feltételeztük, hogy a Budai-hegység, a Pilis és Duna-balparti rögök területén beszivárgó csapadékvizek teljes egészében a karsztforrásokon (ideértve a dunai szökevényforrásokat is), valamint a főkarsztot megcsapoló kutakon keresztül távoznak. A régebben fennálló főkarsztos kutak esetében a 2012. január 1. és a 2022. december 31. közötti termelések átlagával számoltunk. Azon esetekben, ahol a későbbiekben létesültek geotermikus kútpárok, ott az adott időre vonatkozó termeléseket és visszatáplálásokat vettük figyelembe. A modellek között így létrejövő különbség becslést ad az eddigi beavatkozások következtében kialakult összesített depresszióra, leszívásra (43. ábra). A termelések, visszasajtolások hatására jelentkező pozitív vagy negatív vízszintváltozások szuperpozíció elve alapján a modellben számíthatók.

A Budapest hévizei kötetben (ALFÖLDI et al. 1968) Böcker T. által bemutatott Paskál kúti termelés hatására jelentkező vízszintváltozásokat egészen a Magda-kútig (Margitsziget II.) meg lehetett figyelni, néhány órás késéssel (3.4. fejezet, 1. táblázat). Ez az itteni főkarszt-vízadó rendszer magas nyomás-vezetőképességével magyarázható. Magas regionális transzmisszivitás (T) érték mellett alacsony tárolási tényező (S) a jellemző, így a nyomásvezetőképesség (T/S) is igencsak magas. Az egységesen 100 m effektív vastagságúra felvett főkarsztos vízadóra különböző transzmisszivitás értékeket adtunk meg, természetesen a reális tartományon belül. Minden termeléses modellváltozat esetében ki lehetett jelölni olyan potenciálszintvonalat, mely a termelési helyeket körbefogta, ezáltal egyértelműen kijelölte azt a határt, melynél a regionális áramlási pályák a megcsapolási objektumok felé irányulnak. A számított potenciálszintek tekintetében a legjobb eredményt az 1250 és 2500 m<sup>2</sup>/nap transzmisszivitás értékekkel paraméterezett modellváltozat adta (43. ábra).

A budapesti karsztvízszint észlelő kutakban az 1980-as évek közepén jelentkező szezonális vízszintsüllyedések és -emelkedések egyértelműen a fürdőszézon júniusi beindulásával és szeptember eleji, közepi leállításával esik egybe (3.2. fejezet, 12. ábra). E jellegzetes vízszintingadozás az Erzsébet téri figyelőkútban éppúgy jelentkezett, mint a Pilisborosjenői észlelőkútban, jelezve, hogy ezek az interferenciás jelek is nagy területen rövid időn belül kimutathatók voltak. Ezzel a két példával erősíthetjük meg a robusztus hatásbecslési célú modellünkben alkalmazott permanens megközelítés létjogosultságát.

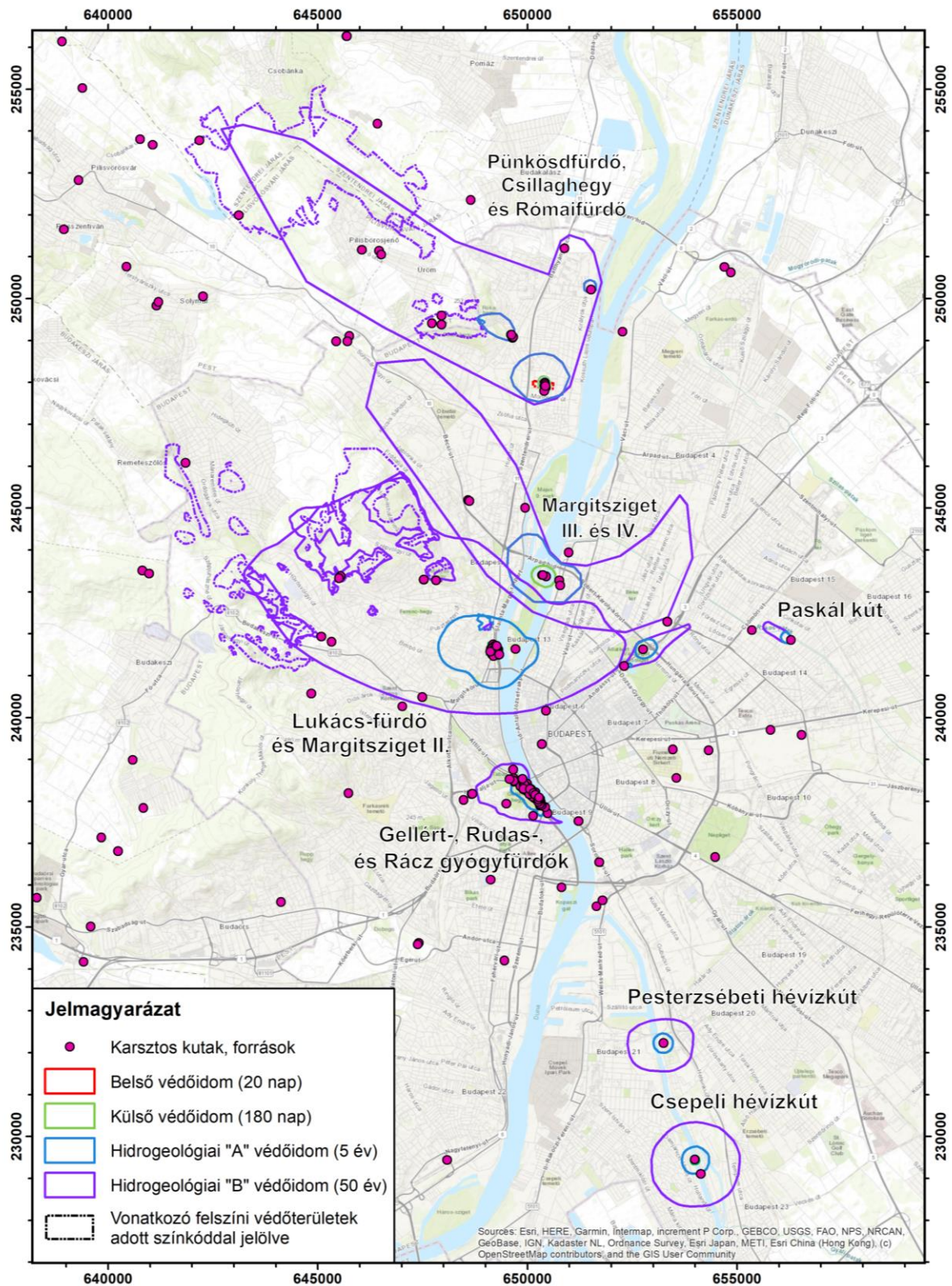


43. ábra: Visual MODFLOW szoftverrel modellezett vízszinteloszlás [mBf] termelés nélküli és termeléses változatban ( $2500 \text{ m}^3/\text{nap}$  transzmisszivitás érték mellett)

A szimulált eredmények segítséget nyújthatnak a vagyonkezelői vélemények kialakítására, akár a létesítések előtt, akár meglévő létesítmények üzemeltetésének megváltoztatása előtt. A kapott modellkimenetek támpontot nyújtanak azon részterületek kijelöléséhez, ahol térben részletesebb, időben változó vizsgálatokat érdemes készíteni, felhasználva a robusztus modellvizsgálat budapesti szubregionális részére vonatkozó tapasztalatait is, akár azon belüli „child” modell kialakításával. Részletes vizsgálatkor érdemes kétfajta (téli és nyári) üzem permanens változatának összehasonlítását is elvégezni, ezzel is segítve egy majdani üzemirányítási rend kialakítását.

## 5. A budapesti termálkarszt fenntartható hasznosítását megalapozó, döntéstámogató rendszer kidolgozása

A budapesti termálkarsztra települt fürdők térségi védelme és körültekintő vízgazdálkodása kiemelt jelentőségű, miközben a mélységi geotermikus energia felhasználása növekvő tendenciát mutat országosan és a régióban is. A vízbázisvédelmi és geotermikus védőidom kialakításának gyakorlata (elérési időközön alapuló áramvonalképek által kirajzolt zónásság, a 123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet alapján (44. ábra), valamint a Bányatörvény hőmérséklet- ( $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) és nyomásváltozás ( $\Delta p = 0,2 \text{ bar}$  hidrosztatikus nyomású tároló esetében) alapú megközelítése közvetlenül nem alkalmazható jövőbeli ismeretlen lokációjú termálkutak káros hatásait megelőző térségi védelemként. Erre megoldás lehet a jelen kutatás eredményeire épülő hidrodinamikai modell család, amely tervezett új hasznosítások esetén alkalmas a meglévő hasznosítókra gyakorolt hatás nagypontosságú előrejelzésére.



44. ábra: A budapesti víznyerő objektumok (különböző jogi státuszú) védőidom rendszere a 123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet alapján

A budapesti termálkarsztot megcsapoló gyógyfürdőhelyek forrásainak, valamint a meglévő geotermikus hőhasznosítók víztermelő objektumainak védelme érdekében, az új geotermikus hasznosítások engedélyezésekor mindenképpen javasolt figyelembe venni az alábbiakat:

- Már most tapasztalható vízszintcsökkenés a természetes viszonyokhoz képest (42. ábra és 43. ábra).
- A védelemnek mind mennyiségi, mind minőségi és hőmérsékleti szempontból eleget kell tenni, a gyógyhatást meg kell őrizni. A vízszintek további számottevő csökkenése befolyásolhatja a jelenlegi áramlási pályákat és ezáltal megváltozhat a vízkémiai összetétel és hőmérséklet is.
- A termálkarszt fő megcsapolódási területének (a Dunában és a Duna mentén fakadó források környezetének) védelme szükséges a gyógyfürdők megfelelő vízellátásnak biztosításához. Kiemelendő, hogy a Dunában található, bizonytalan helyzetű és hozamú források fenntartásához szükséges többletnyomás megszűnése esetén a szennyezett, más kemizmusú Duna-víz a rendszerbe juthat.
- A korábbi egymásrahatás (interferencia) tesztek (1. táblázat) alapján Budapest belterületén a kutak rövid idő alatt hatnak egymás vízszintjére, azaz összefüggő rendszert alkotnak.
- Budapest déli régiójában (Dél-Pest, Csepel) kevés az ismeret, így nagyobb a földtani és vízföldtani kockázat. Továbbá a Gellért-, Rudas-, és Rác-fürdők közelsége is fokozott kockázatot jelent, mert az áramlási irányok és a vízkémiai összetétel alapján is van összefüggés e régió és a fürdő forrásai között.

A fentiek figyelembevételével, javasolt bizonyos időközönként, például a VGT-k felülvizsgálatával összhangban, illetve negatív tendenciák (vízszint, vízhozam-, hőmérséklet-csökkenés, vízminőségváltozás) észlelése esetén a budapesti termálkarsztot hasznosítók védelme érdekében meghozott döntéseket ártértékelní, felülbírálni. Továbbá a közeli víztermelő objektumokra közös üzemirányítási rend kidolgozása is célszerű lehet.

## 6. Továbblépési lehetőségek

A Budapest Geotermikus Kutatási Program folytatása és ezáltal a jelenlegi ismeretek bővítése lehetővé tenné a bizonytalanság és ezzel a kockázatok csökkentését. Ez egyszerre szolgálná a jelenlegi hasznosítók védelmét és az új geotermikus beruházások kisebb kockázat mellett történő megvalósulását.

**A földtani modell továbbfejlesztésének lehetséges irányait az alábbiakban felsorolásszerűen vázoljuk:**

- Felszíni földtani térképezés és anyagvizsgálatok fókuszterületeken
- Fúrásátértékelés elérhető maganyagok anyagvizsgálatával (különösen a Pesti-síkság É-i részén)
- Mikro-, és makro-biosztratigráfiai (NP) és kemosztratigráfiai (oxigén izotóp, FT, K/Ar) vizsgálatok üledékes kőzetekben
- A Gellért-Rudas-Rác forráscsoportokat összekötő alagút részletes szerkezeti felvétele, korvizsgálatok
- A középső és a felső eocén rétegsorok elkülönítése, a kora paleogén medencefejlődés megismerése és tisztázása
- Korvizsgálatok főként szerkezeti zónákban, tufakőzetekben
- Az új szeizmikus szelvények beépítése
- Hatóperemek tektonikai validálása földtani szelvényeken
- Törésvonalak felületmodellezése

- A felületmodellek kombinálása a törésvonalak felületeivel
- Kísérleti módszerfejlesztés a beépített területek passzív szeizmikus vizsgálatára
- Földtani szelvények kiegyenlítése, a deformációk mértékének számszerűsítése
- A kutatási engedélyes cégek szeizmikus és fúrásos kutatási eredményeinek beépítése

#### **Mélyfúrásgeofizikai mérésekkel kapcsolatos javaslatok:**

A jövőben ismeretbővítési célból javasolt a csővezetett fúrásokban akusztikus cementpalást vizsgálatok végzése akusztikus hullámképméréssel, hőimpulzusos áramlásmérés (HPF) álló kútban, valamint akusztikus lyukfal televíziós mérés a kúthibák kimutatására (alaphegységi kőzetekben nyitott fúrásban is ajánlott).

Az újonnan létesített nyitott (csővezetetlen) fúrásokban egy-két esetben javasolt:

- az összes porozitás követő módszer együttes alkalmazása (akusztikus, neutron-porozitás, gamma-gamma sűrűség lemerés 3 elektródás (LL3) elektromos ellenállással);
- továbbá konvencionális elektromos ellenállás mérések és esetenként spektrális természetes gamma mérések (az agyagos repedéskitöltések és az egyéb eredetű radioaktív anomáliák elkülönítése);
- többször ismételt hőmérsékletmérés a beáramlások, illetve a hővezetőképesség pontosabb meghatározására.

A budapesti régióban nagyívű terv lehet egy hőáram etalonnak tekinthető fúrás létesítése. Ez lehet egy régóta álló nagy mélységig járható meddő fúrás is, amely mentes a természetes eredetű fel- és leáramlásoktól.

#### **A hidrodinamikai és hőtranszport modell továbbfejlesztési lehetőségei:**

- A hőtranszport modellben az alulról hővezetéssel átadódó hőmennyiség megadása történhet hőmérséklettel, vagy hőárammal. Azonban mind hőmérséklet, mind számított hőáram adatokkal csak a karsztvíztartó felső részére vonatkozóan rendelkezünk, mely adatok erősen befolyásoltak a konvektív áramlással. Célszerű lenne nagyobb területre **több kondultív modell futtatását elvégezni** annak érdekében, hogy az alaphegység mélyebb szintjében a hőáram eloszlásra adatokat kapjunk.
- A kitermelő és visszasajtoló kutak számának növekedésével emelkedni fog a **ferde kutak** száma. Ezeknél fontos, hogy ne csak a ferde fúrás menti távolság, hanem a **fontos szakaszok koordinátája** és tengerszint feletti magassága is meg legyen adva. Adatbázis fejlesztés szükséges, ezen kutak adatainak megadásához.
- A megnövekedett objektumszám okán, még a rendszeres, üzemszerű termelésük megkezdése előtt érdemes egy **széleskörű egymásrahatás vizsgálatot** elvégezni, és a kiértékelése során korrigálni a külső hatásokat (árapály, légnyomásváltozás, Duna).
- A kútfejen mért vízszinteket erősen befolyásolja, hogy azokat a kút felmelegedett állapotában, geotermikusra lehűlt állapotban, vagy köztes állapotban mérték. Célszerű lenne a kútfejen mért vízszintek mellé mindig **hőmérsékletet** is társítani, és ilyen hatások által nem befolyásolt **mélységi nyomásmérések** számát növelni. Az értékeléseket nagyban segítené a megbízható **talphőmérséklet** és **nyomásértékek** rendelkezésre állása. Középtávú célként javasolt kitérni ezek **mérésének előírását**, valamint az újonnan létesítendő kutakban már a létesítési engedély feltételének részét kellene képezze.

**Javaslatok a továbblépéshez a geotermikus hasznosítási lehetőségek minél megalapozottabb vizsgálata érdekében, vízkémiai szempontból:**

- A vízkémiai és izotóphidrológiai értékelések több évtizedre kiterjedő, különböző időpontokban, és különböző laboratóriumok eltérő módszerekkel és kimutatási határokkal végzett mérések archív – gyakran több paraméterre is hiányos – adataira alapultak, ezért fontos egy **új, közel egyidejű, teljeskörű vízkémiai-, izotóp- és nemesgáz mintavétel** elvégzése.
- Az új vízmintavételeken és vízelemzéseken túlmenően, fontos lenne néhány **magfúrás vagy furadék kémiai, ásványösszetélteli** és néhány **izotópos vizsgálata** is az áramlási pályák menti víz-kőzet kölcsönhatások, valamint a fedő medenceüledékekben tárolt vizek lehetséges hatásának vizsgálata érdekében. Ehhez célszerű felmérni az SZTFH magraktárainak anyagait, valamint javasolt mag vagy legalább rétegváltásonkénti furadékanyag szolgáltatása az SZTFH részére az új geotermikus kutatások keretében mélyítésre kerülő kutak esetében.
- Az új mintavételek, és a **nyomelemekre**, valamint **szélesebb spektrumú elemzésekre** kiterjedő értelmezéssel tovább finomítható a különböző rendű felszín alatti vízáramlási rendszerek helyzete, a fedőben megjelenő nagy oldottanyagtartalmú vizek lehetséges hatása, a látszólagos vízkörök, keveredési és megcsapolási térrészek, mely segíti a hidrodinamikai és transzportmodellezés ellenőrzését a későbbi felülvizsgálatok során.
- Az antropogén hatások felmérése érdekében, szintén vizsgálandó a **vízkémiai** paraméterek és a **hőmérséklet**, illetve azon néhány helyen, ahol rendelkezésre állnak **izotópadatok**, azok **időbeli változása**. Az idősorvizsgálatok a termálkarsztrendszer egyes térrészeinek érzékenységére is rávilágíthat, mely a meglévő termálvízhasznosítások fenntarthatósága, illetve a jövőbeli engedélyezések elbírálása szempontjából is lényeges lehet.

A budapesti termálkarsztrendszer hosszútávú fenntartható hasznosítása érdekében javasolt egy, a tágabb térségre is kiterjedő, regionális **monitoring terv kidolgozása** és **valós idejű monitoringrendszer** kialakítása. Az ajánlott mérések magukba foglalják a hidrometeorológiai paramétereket, kiválasztott felszíni vízfolyások vízállás és vízhozam értékeit, források vízhozam és hőmérséklet adatait, felszín alatti vizek vízszintméréseit és vízkémiai vizsgálatait. Az egységes monitoringrendszer üzemeltetése a jelenleg üzemelő megfigyelőpontok felhasználásával, az érintett üzemeltető intézmények bevonásával, valamint új monitoringpontok kialakításával valósítható meg. Az új mérőhelyek a folyamatosan megújuló vízföldtani modell eredményének figyelembevételével jelölhetők ki. Szükséges a mérések időszakonkénti, valamint a megfigyelések során esetlegesen észlelt, vagy a hasznosításokban bekövetkezett változások esetén történő kiértékelése és integrált értelmezése.

## 7. Irodalomjegyzék

- ALFÖLDI, L., BÉLTEKY, L., BÖCKER, T., HORVÁTH, J., KORIM, K., LIEBE, P., RÉMI, R.-NÉ (szerk.), 1968: Budapest hévizei. Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet, Budapest, 365 p.
- ALFÖLDI, L. 1979. Budapesti hévizek. VITUKI Közlemények 20, Budapest, 102 p.
- BABINSZKI, E., PIROS, O., BUDAI, T., GYALOG, L., HALÁSZ, A., KIRÁLY, E., KOROKNAI, B., LUKÁCS, R., M. TÓTH, T. (szerk.), 2023a: Magyarország litosztratigráfiai egységeinek leírása I. Prekainozoos képződmények. Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Budapest, 275 p. [https://sztfh.hu/downloads/foldtan/prekainozoos\\_online.pdf](https://sztfh.hu/downloads/foldtan/prekainozoos_online.pdf)
- BABINSZKI, E., PIROS, O., CSILLAG, G., FODOR, L., GYALOG, L., KERCSMÁR, ZS., LESS, GY., LUKÁCS, R., SEBE, K., SELMECZI, I., SZEPESI, J., SZTANÓ, O. (szerk.), 2023b: Magyarország litosztratigráfiai egységeinek leírása II. Kainozoos képződmények. Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Budapest, 179 p. [https://sztfh.hu/downloads/foldtan/kainozoos\\_online.pdf](https://sztfh.hu/downloads/foldtan/kainozoos_online.pdf)
- BADA, G., FODOR, L., SZÉKELY, B., TIMÁR, G., 1996: Tertiary brittle faulting and stress field evolution in the Gerecse Mountains, northern Hungary. *Tectonophysics*, 255, 269–290. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00141-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00141-7)
- BUDAI, T. (szerk.), FODOR, L., SZTANÓ, O., KERCSMÁR, ZS., CSÁSZÁR, G., CSILLAG, G., GÁL, N., KELE, S., KISZELY, M., SELMECZI, I., BABINSZKI, E., THAMÓNÉ BOZSÓ, E., LANTOS, Z., 2018: A Gerecse hegység földtana. Magyarázó a Gerecse hegység földtani térképéhez (1:50 000). Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Budapest, 490 p.
- CLOUTIER, V., LEFEBVRE, R., THERRIEN, R., SAVARD, M. M., 2008: Multivariate Statistical Analysis of Geochemical Data as Indicative of the Hydrogeochemical Evolution of Groundwater in a Sedimentary Rock Aquifer System. *Journal of Hydrology*, 353 (3–4), 294–313. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015>
- DEÁK, J., 1979: Environmental isotopes and water chemical studies for groundwater research in Hungary. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, 221–247.
- DÉRI-TAKÁCS, J., ERŐSS, A., KOVÁCS, J., 2015: The chemical characterization of the thermal waters in Budapest, Hungary by using multivariate exploratory techniques. *Environmental Earth Sciences*, 74, 7475–7486. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3904-3>
- DIERSCH, H.-J. G., 2005: FEFLOW Software—Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System—Reference Manual. WASY GmbH, Berlin. <https://www.springer.com/gp/book/9783642387388>
- ERŐSS, A., 2010: Characterization of fluids and evaluation of their effects on karst development at the Rózsadomb and Gellért Hill, Buda Thermal Karst, Hungary. PhD dissertation, Eötvös Loránd University, Budapest, 171 p.
- FODOR, L.; MAGYARI, A.; FOGARASI, A.; PALOTÁS, K., 1994: Tertiary tectonics and Late Palaeogene sedimentation in the Buda Hills, Hungary. A new interpretation of the Buda Line. *Földtani Közlöny*, 124, 129–305.
- FÓRIZS, I., SZABÓ, V. R., DEÁK, J., HALAS, S., PELC, A., TREMBACZOWSKI, A., LORBERER, Á., 2019. The origin of dissolved sulphate in the thermal waters of Budapest inferred from stable S and O Isotopes. *Geosciences*, 9(10), 433. <https://doi.org/10.3390/geosciences9100433>
- GÜLER, C.; THYNE, G. D.; MCCRAY, J. E.; TURNER, K. A., 2002. Evaluation of Graphical and Multivariate Statistical Methods for Classification of Water Chemistry Data. *Hydrogeology Journal* 10(4), 455–474. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>
- GYALOG, L., SÍKHEGYI, F. (szerk.), 2005: Magyarország földtani térképe, M=1:100 000. Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- GYALOG, L., MAROS, GY., PELIKÁN, P. (szerk.), 2016a: Budapest Geoguide — Geological and Geophysical Institute of Hungary, Budapest, 315 p.

- GYALOG, L., MAROS, GY., PELIKÁN, P. (szerk.), ALBERT, G., BUDAI, T., BUDAI, ZS., GÁL, N., KERCSMÁR, ZS., MAGYARI, Á., PALOTÁS, K., SELMECZI, I., TÓTH, GY., 2016b: Budapest Geokalauz (Budapest Geoguide). — Magyarország tájegységi földtani térképei, Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, Budapest, 314 p., ISBN 978-963-671-304-1
- HAAS, J., BUDAI, T., CSONTOS L., FODOR L., KONRÁD, GY., 2010a: Magyarország pre-kainozoos földtani térképe, 1:500 000. Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- HAAS, J., BUDAI, T., TULLNER, T., 2010b: Magyarország új medencealjzat térképe. Szerkesztési elvek, alkalmazási lehetőségek. – In Pál-Molnár E. (szerk.): Medencefejlődés és geológiai erőforrások. Magyarhoni Földtani Társulat Vándorgyűlése, Szeged, GeoLitera Kiadó, 15–18.
- HÉJA, G., KERCSMÁR, ZS., KÖVÉR, SZ., BUDAI, T., NOUI, M. Y., FODOR, L., 2022: The role of rheology and fault geometry on fault reactivation: a case-study from the Zsámbék–Mány Basin, Central Hungary. *Geosciences*, 12, 433. <https://doi.org/10.3390/geosciences12120433>
- Hem, J. D., 1985: Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. USGS Water-Supply Paper 2254. Dallas 264 p.
- KOVÁCS, J., ERŐSS, A., 2017: Statistically optimal grouping using combined cluster and discriminant analysis (CCDA) on a geochemical database of thermal karst waters in Budapest, *Applied Geochemistry*, 84, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.05.009>
- KOVÁCSNÉ BODOR, P., 2020: Termásvíz megcsapolódáshoz köthető vízkémiai és kiválási folyamatok kísérleti tanulmányozása. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 173 p.
- KUN, É., 2022: A Battonya–Pusztaföldvári-hát hidrodinamikai és hőtranszport modellvizsgálata az energia- és póruster-hasznosítás tükrében. Doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 116 p. <https://doktori.bibl.u-szeged.hu/id/eprint/11019/>
- LORBERER, Á., 2003: Termásvíz hasznosítási lehetőségek a fővárosi távhő-ellátás fejlesztésénél. Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Rt., Budapest, 30 p.
- MAGRI, F., 2009: Derivation of the Coefficients of Thermal Expansion and Compressibility for Use in FEFLOW (implementation Code in C++). White Paper III: WASY GmbH Institute for Water Resource Planning and System Research, Berlin, 13–23.
- MÁDLNÉ SZÖNYI, J., 2020: Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerekben, a Budai-termálkarszt tágabb környezetének példáján. MTA doktori értekezés, 131 p. <https://real-d.mtak.hu/1317/>
- MÁDLNÉ SZÖNYI, J., ERŐSS, A., HAVRIL, T., POROS, ZS., GYŐRI, O., TÓTH, Á., CSOMA, A., RONCHI, P., MINDSZENTY, A., 2018: Fluidumok, áramlási rendszerek és ásványtani lenyomataik összefüggései a Budai-termálkarszton. *Földtani Közlöny*, 148(1), 75–96. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2018.148.1.75>
- MINDSZENTY, A. (szerk.), 2013: Budapest – Földtani értékek és az ember. Eötvös Kiadó, Budapest.
- MORTON, F. I., 1983: Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology*, 66(1–4), 1–76. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90177-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90177-4)
- OTKA K60921: A víz és a széndioxid eredete a Budapest környéki termális karsztvizekben. 2006-2011. Témavezető: Fórizs István. <http://nyilvanos.otka-palyazat.hu/index.php?menuid=930&num=60921>
- OTKA NK101356: Hipogén karsztosodási folyamatok tanulmányozása különös tekintettel a mikrobák szerepére. 2012-2017. Témavezető: Mádlné Szőnyi Judit. <http://nyilvanos.otka-palyazat.hu/index.php?menuid=930&lang=HU&num=101356>
- OVF, 2022: Magyarország Vízyűjtő-Gazdálkodási Tervének Második Felülvizsgálata. VGT3. Magyarország Vízyűjtő-Gazdálkodási Terve – 2021. Országos Vízügyi Főigazgatóság. <https://vizeink.hu/vizgyujto-gazdalkodasi-terv-2019-2021/vgt3-elfogadott/#up01>

- POYANMEHR, Z., 2016: Budai karsztrendszer utánpótlódási viszonyainak hidrodinamikai vizsgálata vízgeokémiai adatok figyelembevételével. Doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 120 p.
- QIAN, J., WANG, L., MA, L., LU, Y., ZHAO, W., ZHANG, Y, 2016: Multivariate Statistical Analysis of Water Chemistry in Evaluating Groundwater Geochemical Evolution and Aquifer Connectivity near a Large Coal Mine, Anhui, China. Environmental Earth Sciences, 75(9), 747. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5541-5>
- SÁRVÁRY, I., 1972: A budapesti hévizek védőterületéről. Vízügyi Közlemények, 54(3), 269–280.
- WEIN, G., 1976: Budai-hegység fedetlen földtani térkép, M=1:25000. Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.
- Zhang, Y., Xu, M., Li, X., Qi, J., Zhang, Q., Guo, J., Yu, L., Zhao, R., 2018: Hydrochemical Characteristics and Multivariate Statistical Analysis of Natural Water System: A Case Study in Kangding County, Southwestern China. Water, 10(1), 80. <https://doi.org/10.3390/w10010080>

***Internetes hivatkozások:***

- 1) <https://map.mbfisz.gov.hu/nater/>
- 2) <https://www.epa.gov/land-research/hydrologic-evaluation-landfill-performance-help-model>