

Tihanyi maar-tavak – kapcsolatban a felszín alatt?

TDK dolgozat



Havril Tímea, Geológus MSc
Tóth Ádám Zoltán, Geofizikus MSc

Témavezető: Mádlné Dr. Szőnyi Judit

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet
Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék
Budapest, 2011

Tartalom

1. Bevezetés és célkitűzések	3
2. A tavak és felszín alatti vizek kölcsönhatása	5
3. A hidrogeológiai környezet jellemzői a vizsgált területen	8
3.1. A Tihanyi-félsziget geológiai áttekintése	8
3.2. Domborzati viszonyok	10
3.3. Éghajlati jellemzők	11
4. Kutatási eredmények	12
4.1. Hidrogeológiai és geofizikai vizsgálatok.....	12
4.1.1. Módszerek, mintavétel, adatháttér	13
4.1.1.1. Szemcseösszetétel vizsgálatok.....	13
4.1.1.2. Hidraulikai számítások	13
4.1.1.3. Vízsztintváltozások vizsgálata	14
4.1.1.4. Vízkémiai vizsgálatok	15
4.1.1.5. Rádió-magnetotellurikus mérések.....	15
4.1.1.6. Mintavétel, helyszíni mérések és adatháttér	17
4.1.2. Elemzések, eredmények	18
4.1.2.1. Szemcseeloszlás vizsgálati elemzés	18
4.1.2.2. Hidraulikai elemzés.....	20
4.1.2.3. Vízsztintváltozások értékelése	24
4.1.2.4. Vízkémiai elemzés	27
4.1.2.5. RMT térképezés	32
4.1.3. Értékelés	38
4.2. Kétdimenziós áramkép szimuláció	40
4.2.1. A módszer ismertetése	40
4.2.2. A modellezés menete, az eredmények elemzése	41
4.2.2.1. Határfeltételek megállapítása.....	42
4.2.2.2. Hidrosztratigráfia	44
4.2.2.3. Futtatások különféle talajvízszint és alsó agyagréteg szcenáriókra	49
4.2.3. A szimuláció eredményeinek értékelése	53
5. Következtetések és diszkusszió.....	54
6. Összefoglalás és javaslatok.....	57

7. Köszönetnyilvánítás	59
8. Irodalomjegyzék.....	61
9. Ábrajegyzék	65
10. Táblázatjegyzék.....	68
11. Mellékletek.....	69

1. Bevezetés és célkitűzések

A Tihanyi-félsziget különleges színfoltja a Balaton-felvidéknek. Sajátos klímája, flórája, faunája már régóta vonzza a kutatókat. A félszigeten jelölték ki 1952-ben hazánk első tájvédelmi körzetét, 1997 óta pedig a Balaton-felvidéki Nemzeti Parkhoz tartozik, ezért a természetvédelem részéről is kiemelt figyelmet kap.

Számos olyan kutatás zajlott már, mely a félsziget tavait (Külső- és Belső-tó) volt hivatott megismerni, ennek ellenére a Belső-tóban még ma sincs vízmérce, vízszintváltozásairól tapasztalati megfigyelésekből és archív dokumentumokból, visszaemlékezésekből tudunk. A felszín alatti vizekről pedig még kevesebb ismeretünk van. LÓCZY kutatásai, SCHMIDT 1960-as felmérésén, majd az 1970-es építésföldtani térképezés (LÁNGNÉ, 1970) kapcsán végzett felméréseken kívül, nem sok munka foglalkozik a Tihanyi-félsziget felszín alatti vizeivel.

Dolgozatunkban a Tihanyi-félsziget komplex hidrogeológiájának egy szeletét, az időszakosan vízzel borított Rátai-csáva és a Külső-tó (1. ábra) közötti esetleges hidraulikai kapcsolatot vizsgáljuk. A tavak a térségben lezajlott freatomagmás vulkanizmus eredményeképp létrejött maar-szerkezetekben foglalnak helyet (NÉMETH et al., 2001). Utánpótlódásukat korábbi szerzők részben csapadékból, részben pedig a tavakat körülölelő magas talajvízből (BILIK, 1970) feltételezték. WINTER (1976 etc.) tanulmányai nyomán az ELTE Hidrogeológia és Geotermia Munkacsoportjában 2010-ben indult kutatás szakdolgozati előtanulmányai (PÉNTEK, 2011; TÓTH Á., 2011) arra mutattak rá, hogy a tavak felszín alatti hidraulikai kapcsolata nem zárható ki. Így a felszín alatti vizek akár utánpótló, akár megcsapoló módon is szerepet játszhatnak a tavak vízháztartásában. Dolgozatunk célja tehát két kiválasztott tó: a Rátai-csáva és a Külső-tó felszín alatti vízáramlási képbe helyezett hidraulikájának megértése. Továbbá magyarázatot szeretnénk találni a Rátai-csáva időszakos vízborítottságára, annak jellegére és hátterére.

Munkánk során archív adatfeldolgozást, a területen a kutatás érdekében létesített sekélyfúrások mintáiból szemcseeloszlás vizsgálatokat, a kiképzett ideiglenes potenciométerekben vízszint- és vízkémiai észleléseket végeztünk. Ezekből az adatokból hidraulikai számításokat, vízszintváltozásokra vonatkozó elemzéseket és vízkémiai értékelést készítettünk. A rádió-magnetotellurikus (RMT) méréseket a

hidrosztratigráfiai viszonyok tisztázására használtuk. A két tó közötti kapcsolatot 2D numerikus áramkép szimulációval is értékeltük.

A dolgozatban feltett kérdés megválaszolása a tavak vízmérlege és ökológiája szempontjából egyaránt lényeges, és befolyásolja természetvédelmi kezelésüket. Vizsgálataink további jelentőségét a maar-területen végzett hidrogeológiai kutatás újszerűsége adja. Mindezen túl a felszíni és felszín alatti vizek kapcsolatának elemzése napjaink égető feladata: a sekély tavak, vizes élőhelyek védelme a biodiverzitás megőrzése miatt kiemelt jelentőségű és az Európai Unió Víz Keretirányelv (2000) megvalósítása során is jelentős figyelmet kap.



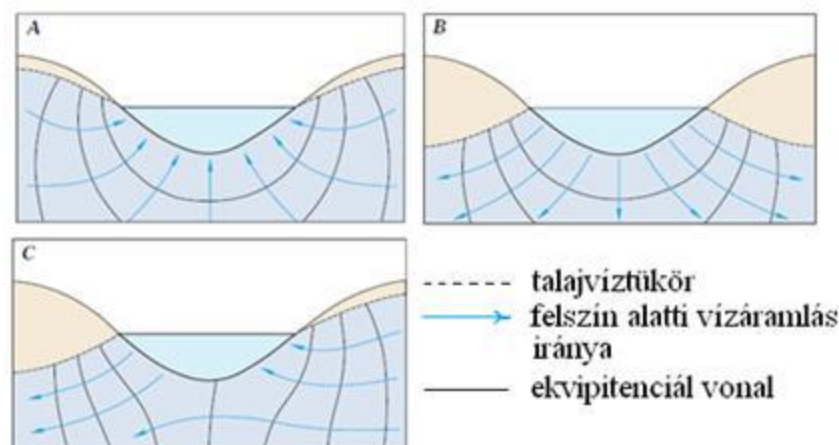
1. ábra: A Rátai-csáva és a Külső-tó elhelyezkedése a Tihanyi-félszigeten

2. A tavak és felszín alatti vizek kölcsönhatása

A vízkészlet-gazdálkodás a felszíni és felszín alatti vízbázisokat kezdetben különálló egységekként kezelte. A vízi erőforrások hasznosítása során azonban nyilvánvalóvá vált, hogy az egyikben bekövetkező változás hatással van a másik mennyiségi, minőségi tulajdonságaira. Így ma már az EU Víz Keretirányelve (2000) is e kölcsönhatás figyelembe vételében gondolkodik. Ahhoz, hogy megértsük ezt a komplex kölcsönhatást, a hidrogeológiai környezet alapos ismerete szükséges.

A tavakhoz a felszín alatt összetett vízáramlási rendszerek kapcsolódhatnak. Az, hogy a tó rátáplál-e a felszín alatti vízrendszerre, vagy megcsapolja azt, elsősorban a tó vízszintjének és a tavat körülölelő talajvíztükör domborzatának viszonya határozza meg.

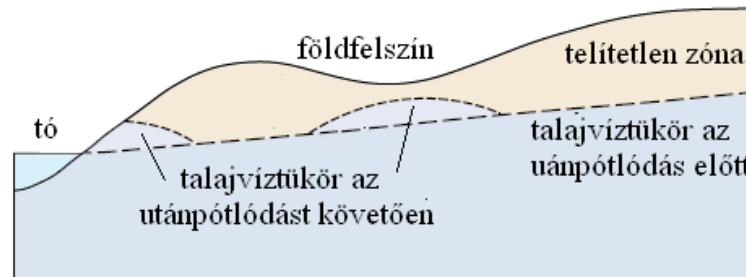
A felszín alatti vízáramlás mindig a nagyobb folyadékpotenciálú/vízszintű pont felől a kisebb potenciálú felé történik. Ezért a tó vízszintjénél magasabban elhelyezkedő talajvíztükör esetében a tó megcsapolja a felszín alatti vizet (2./A ábra). Ha a talajvíztükör potenciálértéke kisebb a tó vízszintje által reprezentált potenciálértéknél (vagyis a talajvíztükör alacsonyabban van, mint a tó vízszintje), a tó rátáplál a felszín alatti vízre (2./B ábra). Abban az esetben, ha a talajvíztükör a tó egyik partszakaszán magasabban van, a másikon alacsonyabban húzódik, mint a tó vízszintje, akkor az előző két eset kombinációja áll elő, vagyis a magasabb talajvíztükör szintű oldalon a felszín alatti víz megcsapódik, az ellentétes oldalon utánpótlódik (2. ábra).



2. ábra: A tó és felszín alatti víz kapcsolatának típusai (WINTER et al, 1998)

A: megcsapoló, B: rátápláló, C: átfolyó jellegű tó.

A talajvíztükör-domborzat a felszín alatti víz utánpótlódásával dinamikusan változik. A csapadék általi utánpótlódás kezdetben a vékonyabb telítetlen zónájú részekre összpontosul (WINTER, 1983) (3. ábra). A lokális talajvíztükör-dombok időszakosan (pl. intenzív esőzést, vagy hóolvadást követően) utánpótolhatják a tó vizét, főként olyan területeken, ahol a talajvíztükör a felszínhez közel húzódik (MEYBOOM, 1967; ANDERSON & MUNTER, 1981).

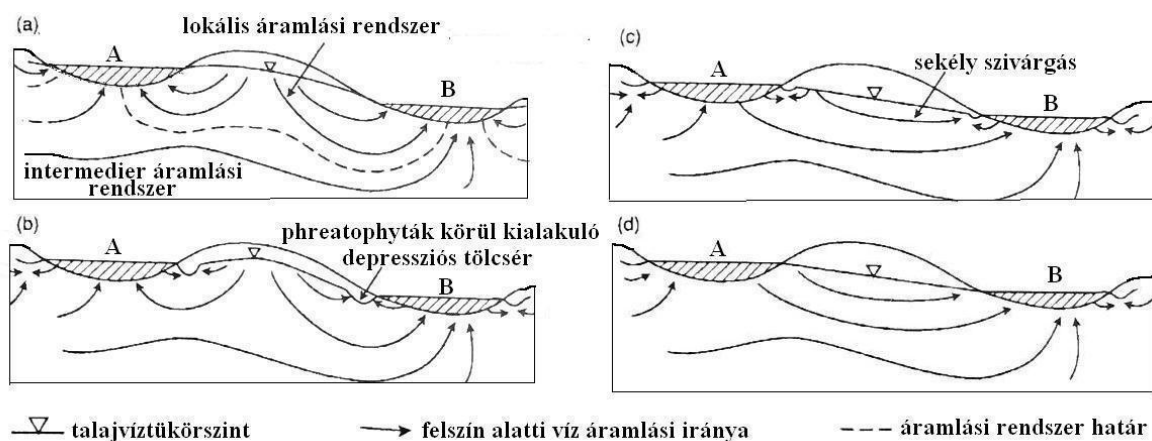


3. ábra: A csapadék hatása a talajvíztükör domborzatára (WINTER et al., 1998)

Hasonló eset áll fenn az időszakosan vízzel borított depressziók esetén is: csapadékosabb időszakokat követően a megemelkedett talajvíztükörszint metszi a topográfiát, és a depresszióban megjelenik a víz.

MEYBOOM (1967) halommorénák közötti állandó felszíni víztestek körül egy éven belül négy tipikus felszín alatti vízáramlási állapotot különített el (4. ábra). Tavasszal a tó megcsapolja a lokális és intermedier áramlási rendszereket (a). Nyáron a tavak körül élő phreatophyta¹ vegetáció vízfelvételével depressziós tölcserő okoz a tó körül, ezért a part menti zónában a tó vize megcsapolódik (b). Nyár végére a vízutánpótlás hiánya miatt a lokális áramlási rendszer „visszafejlődik”, és az „A” jelű tóból sekély szivárgás indul meg a „B” jelű tó felé (c). Az első fagy után a tó körüli vegetáció nyugalmi szakaszba kerül, megszűnik a növények vízfelvétele miatt kialakult depressziós tölcserő, ez a „normál” állapot jellemzi az őszi és téli időszakot (d).

¹ Mély gyökerű vízkedvelő növény, amely közvetlenül a felszín alatti vízből veszi fel a számára szükséges vízmennyiséget.



4. ábra: Felszín alatti vízáramlási rendszer két permanens tó körül tavasszal (a), nyáron (b, c), ősszel és télen (d). (MEYBOOM, 1967 alapján)

A Rátai-csáva és Külső-tó (ld. 1. ábra) közötti állapot megismeréséhez feltételezésünk alapján ez a modell alapot szolgáltathat azzal a különbséggel, hogy a magasabb topográfiai helyzetű Rátai-csáva nem permanens tó, hanem időszakosan vízzel borított terület, ahol a talajvíztükör csak csapadékos időszakban, ill. hóolvadás után kerül a felszín felé.

3. A hidrogeológiai környezet jellemzői a vizsgált területen

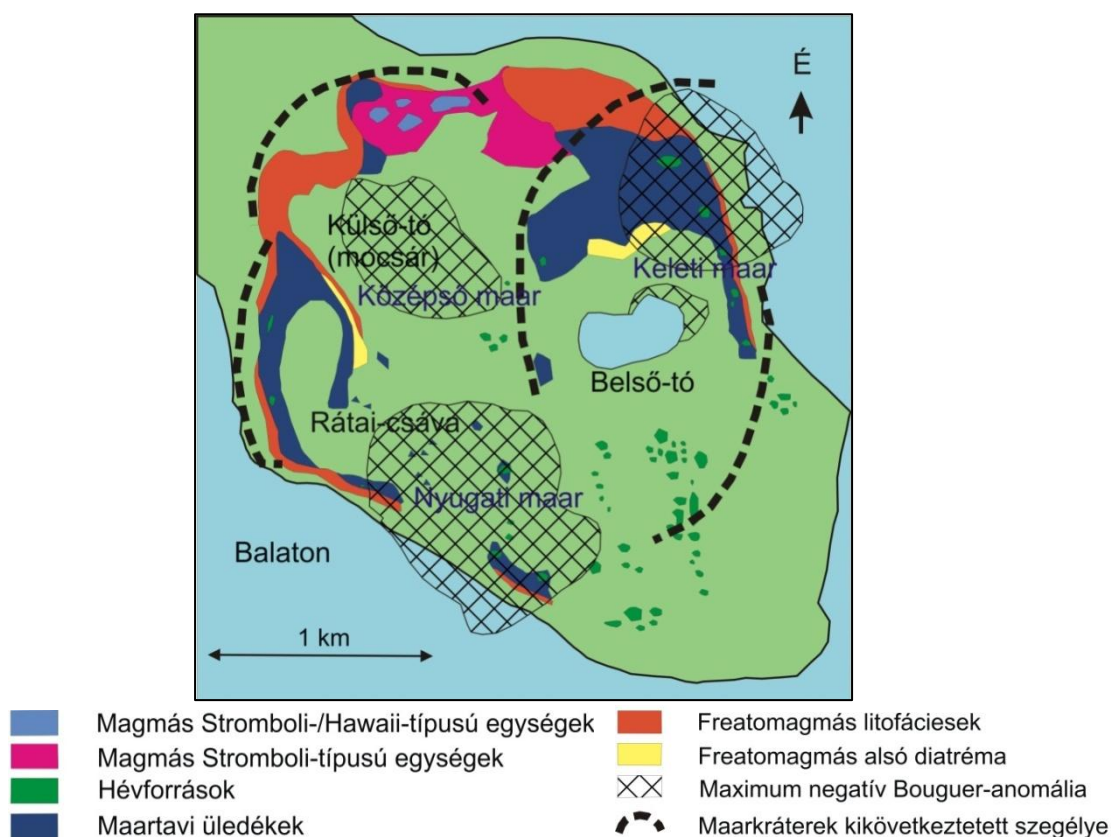
A felszín alatti víz áramlásának módját és törvényszerűségeit a hidrogeológiai környezet befolyásolja, amelynek három legfontosabb eleme a földtani felépítés, a domborzat és a klíma (TÓTH J., 1984). A következő alfejezetekben ezeket tárgyaljuk a vizsgált területre vonatkozóan.

3.1. A Tihanyi-félsziget geológiai áttekintése

A félsziget földtani szempontból a Balaton-felvidék délkeleti előteréhez tartozik, a Bakony-Balatonfelvidék Vulkáni Terület része. A félszigeten lezajlott vulkáni tevékenység a régió alkálibazalt vulkanizmusának első megnyilvánulása. A vulkáni képződmények K/Ar izotópokkal végzett kormeghatározás szerint $7,9 \pm 0,22$ millió évvel ezelőtt alakultak ki (BALOGH & NÉMETH, 2005).

A freatomagmás kitörések során a felfelé áramló forró alkálibazalt magma vízzel, illetve vízzel telt üledékekkel keveredett, melynek hatására a félszigeten három fő maar-szerkezet alakult ki (5. ábra): egy keleti, egy nyugati, és egy középső (NÉMETH & MARTIN, 1999a). Már VARRÓK 1957-es beszámolójában megjegyezte, hogy a Külső- és Belső-tó, valamint a Rátai-csáva az előbb említett maarok maradványaiban helyezkednek el.

A tihanyi felépítmény egy fedett maar-komplexum (NÉMETH, 2004). Erre a típusra jellemző, hogy a freatomagmás kitörések során a maarok és a tufagyűrűk körül torlóár, valamint a piroklasztaszórás üledékei halmozódtak fel. A kráter peremén a konszolidálatlan tufa könnyen mobilizálódott, és áthalmozódás után a maar-kráter alján rakódott le (NÉMETH & MARTIN, 2004).



**5. ábra: A vulkanikus tevékenység nyomai a Tihanyi-félszigeten
(készült NÉMETH et al. 2001 nyomán)**

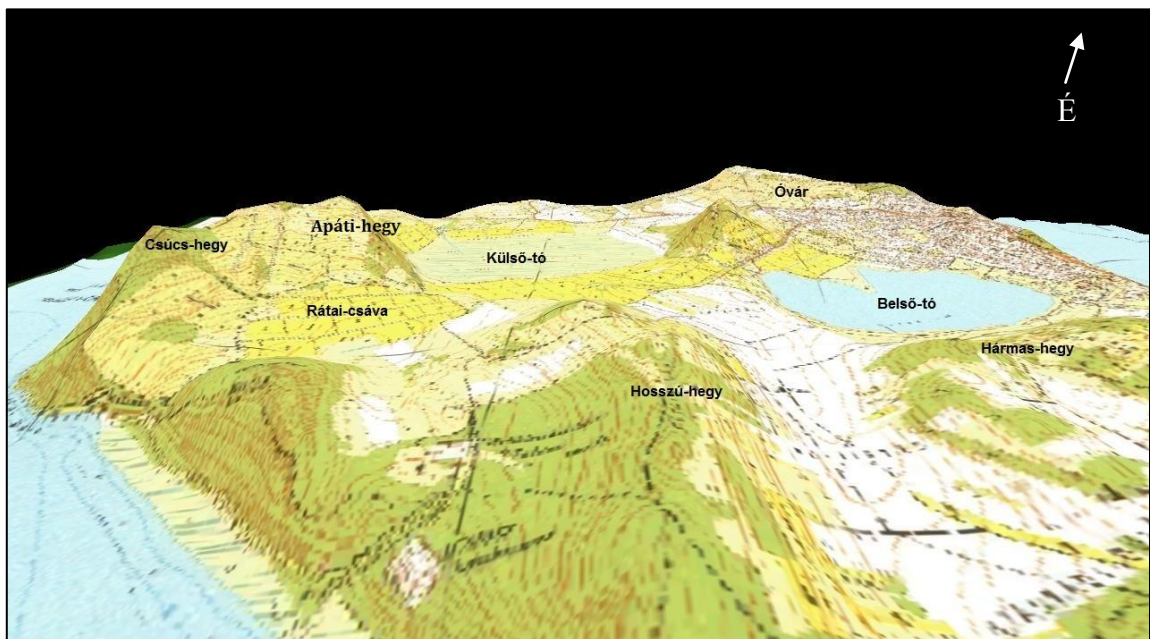
A vulkáni kőzetek alatt fekvő paleozóos képződményeket a szilur Lovasi Agyagpala és a permii vörös homokkő képviseli (CSÁSZÁR & LELKESNÉ-FELVÁRI, 1999). A szilur pala Tihany alatt megközelítőleg 800 méterrel a felszín alatt húzódik, vastagsága 400-600 méter. A felszín alatt körülbelül 300 méteren érjük el a permii vörös homokkő 400-600 méter vastagságú folyóvízi üledékes összletét. A mezozóos karbonátos kőzeteket viszonylag kis vastagságban (néhány tíz métertől néhány száz méterig) triász mészkő és dolomit képviseli (BUDAI & VÖRÖS 1992, BUDAI & HAAS 1997, HAAS & BUDAI 1999, HAAS et al. 1999). A szarmata kőzetegységek bioklasztos – ooidos mészkőből állnak, nagy porozitással bírnak, vagyis nagy a potenciális víztároló-képességük (NÉMETH & MARTIN, 2004). A pannóniai képződményeket a Tihanyi Formáció szárazulati képződményei képviselik, nagyrészt aleurolit és homokrétegek váltakozásából áll. A Tihanyi-félszigeten ezekre települnek a bazaltos piroklasztikumok, maar-képződmények, valamint édesvízi forrásmészkövek, amelyek helyenként erősen kovásodottak (gejziritek) (SACCHI et al. 1998, 1999; HORVÁTH et al., 2010). A kovásodást NÉMETH & MARTIN (2004) utóvulkáni működéshez kapcsolódó hévízfeltörésekkel magyarázták.

3.2. Domborzati viszonyok

A félsziget jellegzetes domborzatával önálló orográfiai egységet alkot, morfológiája igen változatos, köszönhetően a miocén vulkáni, majd posztvulkáni tevékenységeknek, melyek sajátos térszínalakulást és üledékképződést tettek lehetővé.

A félsziget partjait meredek dombsor alkotja. Legmagasabb csúcsai (Csúcshegy 235 m, Óvár 214 m, Hármas-hegy 212 m) 120-130 méternyire emelkednek a Balaton szintje fölé. Legalacsonyabban fekvő területe a Külső-tó (114,5 mBf).

Az általunk vizsgált területek, a Rátai-csáva és a Külső-tó a félsziget nyugati részén, dombokkal övezett, tál alakú, enyhe mélyedésben helyezkednek el (6. ábra). A Rátai-csávának nincs állandó vízborítása, a víz csak csapadékos időszakban jelenik meg néhány hétre, esetleg hónapra. A félsziget három tava közül ez a legmagasabb topográfiai helyzetű, a lokális depresszió legmélyebb pontja 126 mBf. A Külső-tó a tengerszint felett 114,5 méterrel fekszik, vízszintje 10 m-el van a Balaton vízszintje felett. A két terület közötti domborzati szintkülönbség 11,5 méter. A gravitációsan vezérelt vízáramlások hidraulikus hajtóerejét figyelembe véve, ez a vízoszlopmagasság-különbség a Rátai-csáva felől a Külső-tó felé gravitációs áramlást indukálhat.



6. ábra: A Külső-tó és Rátai-csáva környezetének domborzati viszonyai

3.3. Éghajlati jellemzők

A félsziget éghajlata szubmediterrán jelleget mutat a dél felől érkező meleg légtömegeknek köszönhetően. Ezt egészíti ki a Balaton víztömegének szélsőségeket kiegyenlítő hatása, amely lassítja a felmelegedést, illetve lehűlés folyamatát. Ennek köszönhetően később érkezik a tavaszi meleg, de kisebb a késői fagyok hatása. A nyár azonban forró és száraz. Az őszi évszak későn kezdődik, de sokáig tart, és többnyire csapadékos a szubmediterrán jellegnek megfelelően. Az évi középhőmérséklet $10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, a napsütéses órák száma 2010-2030 óra évente. Az évi átlagos csapadékösszeg alig haladja meg a 600 mm-t, melynek oka az orografikus tényezők és a légáramlás együttes hatásában keresendők: az uralkodó északias szél a Bakonytól ugyanis akadályba ütközik, a déli lejtőknél kialakuló légáramok lefelé szálló ágai pedig felhőoszlató hatásúak (PÉCZELY, 1970).

Mivel a félszigetet igen változatos domborzat jellemzi, helyi jellegzetességek is megmutatkoznak a klímában. A különböző felszínformák között igen jelentős hőmérsékletkülönbség alakul ki, elsősorban éjszaka. Amíg a napi hőingadozás a hegycsúcsokon és a parti sávban kiegyenlítettebb, addig a keskenyebb, tagoltabb, meredekebb délnyugati – nyugati partszakaszon, a Hosszú-hegy és Hármashatár-hegy között a félsziget belsejéből hideg légtömeg áramlik az alacsonyabb topográfiájú területek felé (ld. 6. ábra). Derült, szélcsendes éjszakákon a lefelé áramló hideg levegő hatására úgynevezett hideg légtavak jönnek létre. Ezekben az időszakokban ugyanis hiányoznak a talaj közeli légrétegekben a termikus függőleges keverőmozgások, amelyek nappal tompítják a helyi hőmérséklet-különbségeket, valamint érvényesül a földfelszín kisugárzása is. Ilyenkor az alacsony területeken, ahová ez a hideg légtömeg összegyűlik, szélsőségesen alacsony hőmérséklet alakulhat ki, a légtömeg felső határát pedig sűrű köd jellemzi. Ez a jelenség is közre játszhat a félsziget tavainak fennmaradásában, hiszen a hideg légtavak kialakulása csökkenti a párolgást (PÉCZELY, 1970).

4. Kutatási eredmények

Az ELTE Hidrogeológia és Geotermia Munkacsoportjában 2010-ben indult el a Tihanyi-félsziget tavainak felszín alatti kapcsolatára irányuló kutatás. Ennek első eredményeit a 2010 őszén megszervezett hidrogeológiai terepgyakorlat és két szakdolgozat (PÉNTEK, 2011; TÓTH Á., 2011) szolgáltatta. Később a vizsgálatok a 2011 őszi terepgyakorlaton folytatódtak, melynek mi is aktív résztvevői voltunk. A kutatásainkhoz szükséges adatokat nagyrészt a terepgyakorlat során végzett méréseink szolgáltatták.

4.1. Hidrogeológiai és geofizikai vizsgálatok

A vizsgált területeken kézi fúróval 2-5 m mélységű sekély fúrásokat mélyítettünk, melyeket potenciométerekké képeztünk ki. A potenciométerekben a helyszínen vízszintméréseket végeztünk, majd a vízmintákat vízkémiai vizsgálatoknak vetettük alá. A vízszintadatok idősorát összevetve a csapadékadatokkal, következtetéseket vonhatunk le a vízszint időbeli változásáról. A fúrási mintákon szemcseeloszlás vizsgálatokat végeztünk, melyből meghatároztuk a K-tényezőt. A szivárgási tényező ismeretében hidraulikai számításokat tudtunk végezni.

A hidrogeológiai vizsgálatok mellett a maar-szerkezet minél pontosabb megismerése érdekében geofizikai kutatásokat is végeztünk. A felszín közeli módszereket segítségül hívva térképezni tudtuk a terület alatti képződmények eltérő geofizikai paramétereit, valamint geometriáját. Az összegyűjtött információk alapján pedig a hidrosztratigráfiai viszonyokra próbáltunk következtetéseket levonni.

4.1.1. Módszerek, mintavétel, adatháttér

4.1.1.1. Szemcseösszetétel vizsgálatok

A hidraulikai számítások elvégzéséhez ismernünk kell az adott közeg szivárgási tényezőjét $\left(K \left[\frac{m}{s}\right]\right)$. Ennek meghatározására fúrásokból vett mintákon laboratóriumban szemcseeloszlás vizsgálatot végeztünk. A homok – kavics frakciót standard Wentworth skála szerint összeállított szitasoron átszitáltuk, az agyag – aleurit frakció arányát hidrometrálással határoztuk meg. A szivárgási tényező kiszámítását az erre a célra készített számítógép-program segítségével, a Zamarin-féle képlet alkalmazásával végeztük el:

$$K = 2 * \left(\frac{1}{\sum A * \frac{G_i}{100}} \right)^2 * \frac{1}{864}$$

$K \left[\frac{m}{s}\right]$ a hidraulikus vezetőképesség, „A” az egyes frakció-tartományok szemcseméretétől függő súlyozási tényezője, „G_i” az egyes frakció-tartományok %-os összetétele.

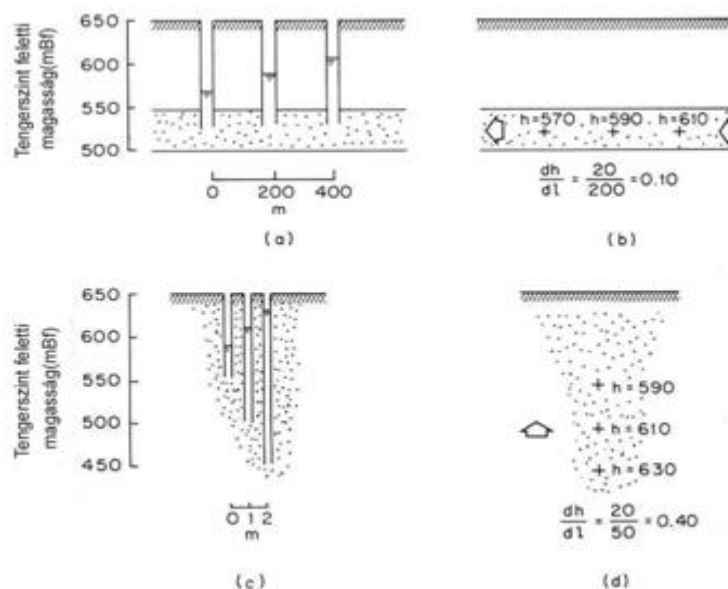
4.1.1.2. Hidraulikai számítások

A hidraulikai számítások célja a felszín alatti vízáramlás irányának és intenzitásának meghatározása. A számítások elvégzéséhez a potenciométerekben mért nyugalmi vízszintadatokat és az adott közegre jellemző hidraulikus vezetőképesség értéket használjuk fel.

Amennyiben azonos mélységbe szűrőzünk legalább három potenciométert, a háromszögmódszer segítségével meghatározhatjuk az áramlás horizontális gradiensét. Együtt mellé telepített, különböző mélységbe szűrőzött potenciométerek hidraulikus emelkedési magasság adataiból megadható az áramlás függőleges irányú komponense. A számítás során a $grad(h) = \frac{dh}{dl}$ képletet használjuk, ahol grad(h) a hidraulikus gradiens, dimenzió nélküli mennyiség; dh [m] a hidraulikus emelkedési magasság

horizontális, vagy vertikális irányú változása; dl [m] a vizsgált pontok közötti távolság (7. ábra).

Amennyiben ismerjük a potenciométerek szűrőzött szakaszára vonatkozó hidraulikus vezetőképességet, a Darcy-törvény alkalmazásával megbecsülhető a vertikális és horizontális szivárgás fluxusa. A számítás elvégzéséhez a $q = -K \frac{dh}{dl}$ képletet használjuk, ahol $q \left[\frac{m}{s} \right]$ az áramlási intenzitás, $K \left[\frac{m}{s} \right]$ a hidraulikus vezetőképesség, $\frac{dh}{dl}$ [0] a hidraulikus gradiens.



7. ábra: A hidraulikus gradiens szerepe az áramlásokban (FREEZE & CHERRY, 1979)

Ugyanolyan mélységű mérési pontok esetében a hidraulikus emelkedési magasságok viszonya az áramlás vízszintes (a és b eset), míg különböző mélységbe szűrőzött kutak esetében a függőleges komponensét (c és d eset) adja meg.

4.1.1.3. Vízszintváltozások vizsgálata

A potenciométerek egy éves periódusra vonatkozó vízszintváltozásait összevetve a területre vonatkozó csapadékadatokkal, megfigyeléseket tehetünk a száraz és csapadékos időszakok közötti vízszint-fluktuáció mértékéről. A talajvízszint-változás mértékéből következtethetünk az adott terület hidraulikai rezsimjellegerre: beáramlási területek ugyanis érzékenyebben reagálnak a csapadék-utánpótlás hiányára, ezzel

szemben a kiáramlási területek alatt a száraz időszakokban is csak viszonylag kis vízszintcsökkenés tapasztalható.

4.1.1.4. Vízkémiai vizsgálatok

A terepen EC , T és pH vizsgálatokat végeztünk és mintát vettünk, melyeket az ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék kémiai analitikai laboratóriumában vízkémiai elemzésnek vetettük alá.

A vízkémiai elemzés célja a minták főelem-összetételének (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- és H_2SiO_3 tartalmának) kvantitatív meghatározása volt. A kationok közül a kalcium és magnézium tartalmát térfogatós módszerrel, titrálással határoztuk meg. A kálium és nátrium meghatározását lángfotométerrel, FLAMOM készülékkel végeztük. Az anionok közül a hidrogén-karbonátot és kloridot térfogatós meghatározással, a szulfátot, nitrátot és H_2SiO_3 -ot pedig vizuális fotometriával, Spektromom 195D fotométerrel vizsgáltuk.

A hidrogeológiai rendszerben megjelenő vizes oldatok meghatározó kémiai jellegét a vízkémiai fáciesek adják meg, amelyek egy adott régió felszín alatti vízáramlási képéből és litológiájából következnek, tehát alkalmasak a felszín alatti hidrogeológiai rendszeren belüli helyzet és eredet tisztázására. A hidrogeokémiai fáciesek meghatározásához RockWorks program segítségével Piper-diagramon ábráztuk az eredményeket.

4.1.1.5. Rádió-magnetotellurikus mérések

A rádió-magnetotellurika (RMT) segítségével meghatározhatjuk az elektromosan vezető közegek rétegsorban elfoglalt helyzetét, illetve megmérhetjük a rétegek, kőzetek fajlagos ellenállását.

A műszer az alacsonyfrekvenciájú jeleket detektálja, amelyeket katonai, navigációs és óraállító rádióadók szolgáltatják a 3-30 kHz-es tartományban. A módszer alkalmazása során egyszerre érzékeljük és mérjük az elektromos és a mágneses teret (OSKOOI & PEDERSEN, 2005): a mágneses teret az adó irányára merőleges állású tekercssel, az

elektromos mezőt pedig a tekercsel párhuzamosan a földbe szúrt két elektróda közti potenciálkülönbséggel határozzuk meg. A műszer ezek alapján számolja ki a látszólagos fajlagos elektromos ellenállást és a két tér közötti fáziseltolást (STIEFELHAGEN & MÜLLER, 1997).

A látszólagos értékeket a FISCHER és társai (1981) által kifejlesztett FITVLF2 program segítségével egy egyszerű inverziós eljárással tudjuk valódi ellenállás értékekké alakítani. A program a valós fajlagos ellenállásokon kívül az adott réteg vastagságát is megadja.

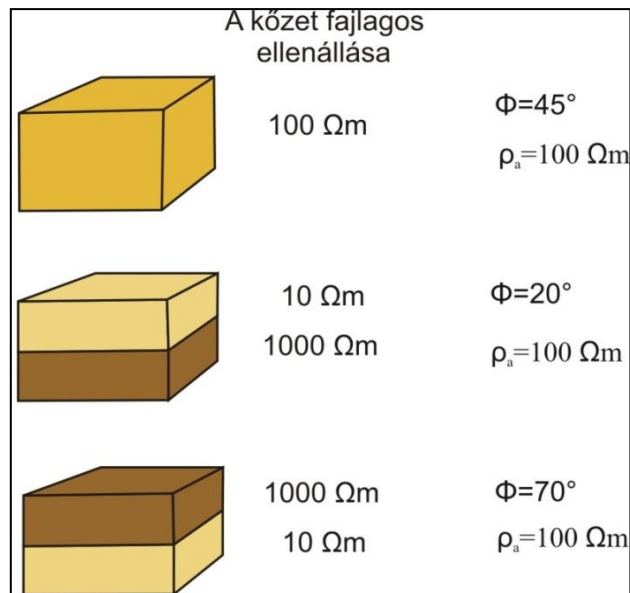
Az eljárás effektív mélysége egy levezetett formulából könnyen megadható.

$$\delta = 503 * \sqrt{\frac{\rho_a}{f}}$$

δ [m] a behatolási mélység, ρ_a [Ωm] a látszólagos fajlagos elektromos ellenállás, f [Hz] a jel frekvenciája (TURBERG et al., 1994). A gyakorlat szerint a felső három méterrel vigyáznunk kell, hiszen ebben a tartományban nem megbízható a műszer a romlott felbontóképesség miatt.

Miután a program segítségével meghatároztuk a valódi ellenállásokat, a rendelkezésre álló apriori közetinformációkkal kell összevetnünk az eredményeket. Sokszor ütközünk abba a problémába, hogy a mért értékek vagy egyik kategóriába se, vagy többbe is besorolhatók. Ebben az esetben egymáshoz viszonyítva, illetve leginkább a kőzetekről/rétegsorról rendelkezésre álló ismeretek szerint próbáljuk megfeleltetni azokat az egyes kőzeteknek.

A mérés során a helyszínen is adhatunk gyors kvalitatív értelmezést. Ha a mért fázis 45° , akkor az adott pontban egyetlen réteg található a behatolási mélységig. Ha a fázis értéke kisebb 45° -nál, akkor a felső réteg fajlagos elektromos ellenállása kisebb, míg az alatta lévőé nagyobb, vagyis felül egy jobban vezető zóna helyezkedik el. Fordított helyzet esetén a fázis nagyobb lesz 45° -nál (8. ábra).



8. ábra: Az RMT mérés értelmezése egy és két réteg esetére, amennyiben a mért ellenállás értéke 100 Ωm (készült MÜLLER nyomán)

4.1.1.6. Mintavétel, helyszíni mérések és adatháttér

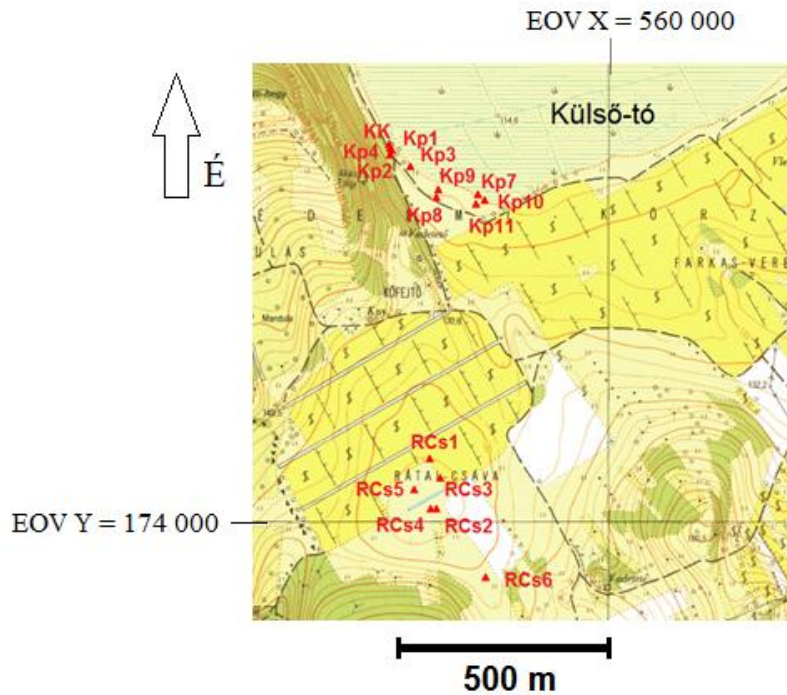
A 2010 során kiképzett, majd a 2011 őszén bővülő számú potenciométerekben 2010 októbertől és 2011 novembere között végeztünk nyugalmi vízszintméréseket.

A vízmintavétel előtt – a kémiai értékelés miatt – kivettük a potenciométerben lévő vízoszlop térfogatának háromszorosát, melyhez a $V = 3(r^2 * \pi * h)$ képletet használtuk, ahol $V [dm^3]$ az eltávolítandó víz térfogata, $r [dm]$ a cső átmérője, $h [dm]$ a potenciométerben lévő vízoszlop magassága. A meghatározott vízmennyiséget egy bailer segítségével vettük ki, és a vízmintákat 1,5 literes PET palackokba töltöttük.

A Külső-tó partján létesített potenciométerek közül a 2011 szeptemberi mintavételezés idejében kettő száraz volt (Kp2 és Kp8), így összesen öt potenciométer (Kp1, Kp3, Kp4, Kp7 és Kp11) vizében tudtunk vízszintméréseket és kémiai elemzést végezni. A tóparton található egy ásott kút is (KK), ennek és a tó vizének mintázását is elvégeztük (9. ábra).

A Rátai-csáva területén található öt potenciométer közül három a 2011 szeptemberi mintázás idején száraz volt (Rcs1, RCs2 és RCs3), így csak két kútból (RCs4 és RCs5) tudtunk vízmintát venni (9. ábra).

A kialakított potenciométerek csőperemeinek GNSS-RTK vevővel történő szintezésével megkaptuk azok tengerszintfeletti magasságát, így a kutakban végzett vízszintmérések eredményeit tényleges Balti-tenger szintje feletti magasságértékekkel adtuk meg. A potenciométerek EOY koordinátáit az 1. számú melléklet, a vizsgált időszakra vonatkozó vízszintmérési eredményeket az 2. számú melléklet összefoglaló táblázata tartalmazza.



9. ábra: A vizsgált területeken létesített potenciométerek

4.1.2. Elemzések, eredmények

4.1.2.1. Szemcseeloszlás vizsgálati elemzés

A Külső-tó és a Rátai-csáva partján kialakított potenciométerek (9. ábra) fúrési rétegsorából vett minták szemcseeloszlási vizsgálatának eredményeit az 1. és 2. táblázatban foglaljuk össze. Az egyes elkülöníthető rétegeket a potenciométer jele mellett 1-től sorszámoztuk és „minta” néven tüntetjük fel a táblázatokban.

A Külső-tónál vett mintákra (1. táblázat) a kapott szivárgási tényező (K) értékei 10^{-8} és 10^{-6} m/s nagyságrend közé esnek, amelyek a makroszkópos leírással összhangban agyagos – kőzetlisztes – homokos képződményekre utalnak. A legnagyobb értéket (Kp1/2. réteg, a táblázatban piros színnel kiemelve) a legnagyobb mértékadó szemcseátmérőjű mintára kaptuk. A szemcseeloszlási görbéről (4. számú melléklet) leolvashatjuk, hogy ebben az esetben a szemcsék 50%-át homok és kavics frakció alkotja. A legkisebb szivárgási tényezővel (Kp11/2. réteg, a táblázatban kék színnel kiemelve) a legkisebb mértékadó szemcseátmérőjű minta rendelkezik, amelyben az agyag frakció aránya 45% (5. számú melléklet).

1. táblázat: A fúrási mintákból meghatározott szivárgási tényezők, Külső-tó

Minta	Mintavétel mélysége	Mértékadó szemcseátmérő (d)	Szivárgási tényező (K)
Kp1/1. réteg	0,2 m	0,0174 mm	$7,043 \cdot 10^{-7}$ m/s
Kp1/2. réteg	0,8 m	0,0366 mm	$3,099 \cdot 10^{-6}$ m/s
Kp1/3. réteg	1,35 m	0,0205 mm	$9,74 \cdot 10^{-7}$ m/s
Kp8/1. réteg	0,3 m	0,0084 mm	$1,646 \cdot 10^{-7}$ m/s
Kp8/2. réteg	0,4 m	0,0106 mm	$2,595 \cdot 10^{-7}$ m/s
Kp10/2. réteg	0,85 m	0,0064 mm	$9,413 \cdot 10^{-8}$ m/s
Kp11/2. réteg	0,75 m	0,0038 mm	$3,424 \cdot 10^{-8}$ m/s

A Rátai-csávában létesített sekély fúrások mintáinak szemcseeloszlási vizsgálati eredményeit a 2. táblázat szemlélteti.

Látható, a kapott szivárgási értékek nagyságrendjüket tekintve lényegében megegyeznek a Külső-tó mintái esetében kapott értékekkel. A Rátai-csáva fúrási mintái közül a legnagyobb hidraulikus vezetőképességgel rendelkező (RCs3/2. réteg) minta 35%-ban finom – közép szemcsés homok frakcióból áll (6. számú melléklet), míg a legalacsonyabb értéket mutató minta (RCs4/2. réteg) 60%-a agyag és kőzetliszt (7. számú melléklet).

2. táblázat: A fúrási mintákból meghatározott szivárgási tényezők, Rátai-csáva

Minta	Mintavétel mélysége	Mértékadó szemcseátmérő (d)	Szivárgási tényező (K)
RCs2/5. réteg	1,8 m	0,0072 mm	$1,21 \cdot 10^{-7}$ m/s
RCs2/6. réteg	2 m	0,0120 mm	$3,312 \cdot 10^{-7}$ m/s
RCs3/1. réteg	0,4 m	0,0069 mm	$1,111 \cdot 10^{-7}$ m/s
RCs3/2. réteg	1 m	0,05969 mm	$7,49 \cdot 10^{-6}$ m/s
RCs3/3. réteg	1,2 m	0,0168 mm	$6,547 \cdot 10^{-7}$ m/s
RCs4/1. réteg	0,1 m	0,0067 mm	$1,029 \cdot 10^{-7}$ m/s
RCs4/2. réteg	1 m	0,0052 mm	$6,18 \cdot 10^{-8}$ m/s
RCs4/3. réteg	1,35 m	0,0111 mm	$2,866 \cdot 10^{-7}$ m/s
RCs4/4. réteg	2,5 m	0,117 mm	$3,153 \cdot 10^{-7}$ m/s

4.1.2.2. Hidraulikai elemzés

A hidraulikai elemzésnél a 2011 szeptemberében létesített új potenciométerek adatait is felhasználtuk (ld. 2. számú melléklet). A hidraulikai számításokat a 2011. november 19-i, legutóbbi észlelés adatai alapján végeztük el (3. számú melléklet). A Rátai-csávában ekkor mindössze két potenciométerben (RCs4 és RCs5) tudtunk vízszintet regisztrálni, a többi kút száraz volt. Mivel a két potenciométer szűrőzött szakasza azonos tengerszint feletti magasságon van, a mért vízszint adatokat felhasználva a két kút között horizontális gradiens számítható.

$$\text{grad}(h) = \frac{dh}{dl} = \frac{0,237 \text{ m}}{55,66 \text{ m}} = 4,3 \cdot 10^{-3}$$

A gradiens vektor a magasabb h értékkel rendelkező RCs4 potenciométer felé mutat (10. ábra).

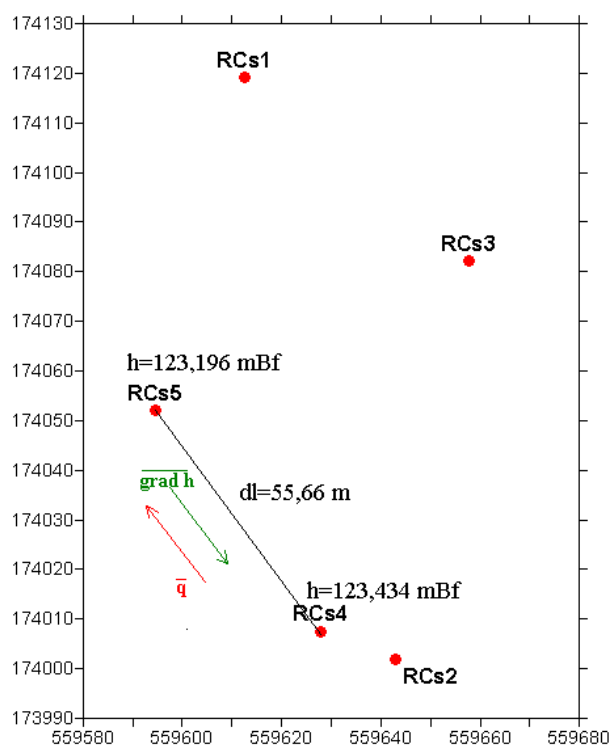
A potenciométerek szűrőzött szakaszára vonatkozó hidraulikus vezetőképességét laboratóriumi szemcseeloszlás vizsgálat során meghatároztuk (ld. 2. táblázat, RCs4/4. réteg).

$$K = 3,153 \cdot 10^{-7} \frac{m}{s}$$

Ezen adatok felhasználásával kiszámítottuk a két kút közötti áramlási intenzitást.

$$q = -K \frac{dh}{dl} = -3,153 \cdot 10^{-7} \frac{m}{s} \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} = -1,34 \cdot 10^{-9} \frac{m}{s}$$

Az áramlás a gradiens vektorral ellentétes, vagyis a fluxus vektor az RCs5 potenciométer felé mutat.



10. ábra: A Rátai-csáva területén végzett hidraulikai számítás 2011. november 19-én mért vízszintek alapján

A Külső-tó délnyugati partján, az ásott kút közelében lévő három potenciométer (Kp2, Kp3, Kp4) vízszintadatából a háromszögeljárás segítségével tudtunk hidraulikus gradienst, majd fluxust számítani (11. ábra).

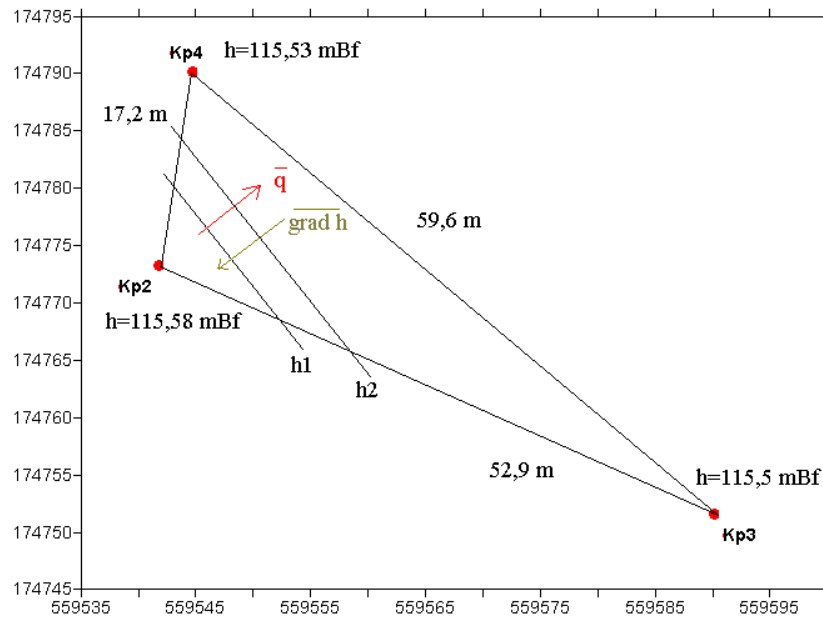
$$grad(h) = \frac{dh}{dl} = \frac{115,56 \text{ m} - 115,55 \text{ m}}{3,44 \text{ m}} = \frac{0,01 \text{ m}}{3,44 \text{ m}} = 2,9 \cdot 10^{-3}$$

A potenciométerek szűrőzött szakaszára vonatkozó hidraulikus vezetőképesség a szemcseeloszlás vizsgálatból ismert.

$$K = 3,312 * 10^{-7} \frac{m}{s}$$

Ezek alapján kiszámítottuk az áramlási intenzitást.

$$q = -K \frac{dh}{dl} = -3,312 * 10^{-7} \frac{m}{s} * 2,9 * 10^{-3} = -9,6 * 10^{-10} \frac{m}{s}$$



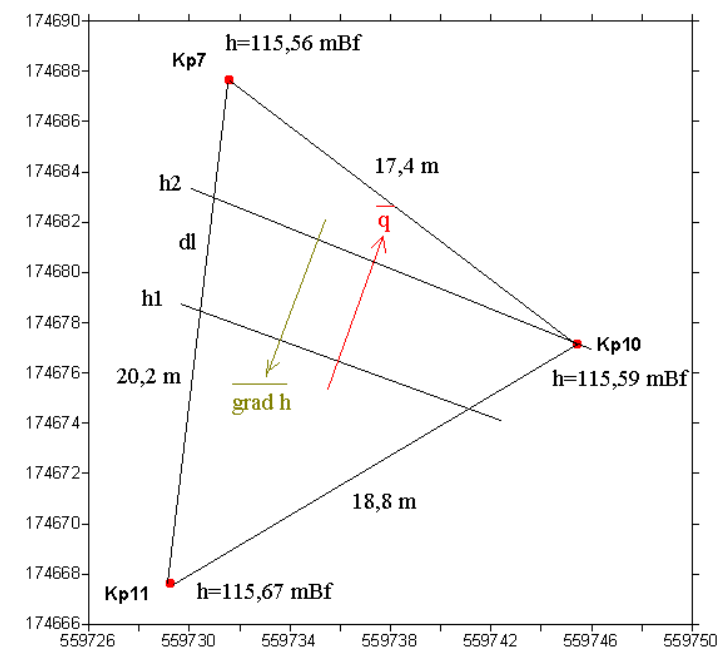
11. ábra: Háromszögmódszer alkalmazása a Külső-tó partján létesített potenciométerekre (2011. november 19-én mért vízszintek alapján)

A Külső-tó Rátai-csávéhoz legközelebb eső partszakaszán telepített Kp7, Kp10 és Kp11 jelű potenciométerek nyugalmi vízszint adatait felhasználva, az előzőhöz hasonlóan, háromszögeljárással határoztuk meg a hidraulikus gradienst és a fluxust (12. ábra).

$$grad(h) = \frac{dh}{dl} = \frac{115,61 m - 115,59 m}{3,7 m} = \frac{0,02 m}{3,7 m} = 5,4 * 10^{-3}$$

$$K = 9,41 * 10^{-8} \frac{m}{s}$$

$$q = -K \frac{dh}{dl} = -9,41 * 10^{-8} \frac{m}{s} * 5,4 * 10^{-3} = -5,08 * 10^{-10} \frac{m}{s}$$



12. ábra: Háromszögmódszer alkalmazása a Külső-tó partján létesített potenciométerekre (2011. november 19-én mért vízszintek alapján)

Ezen hidraulikai számításokkal a tavak közelében zajló vízáramlás irányát, illetve az áramlás intenzitását határoztuk meg. A tavak között zajló vízáramlás meghatározásához kiterjesztettük a hidraulikai számításokat, következő lépésként tehát meghatároztuk a Rátai-csáva és a Külső-tó közötti hidraulikus gradienst mind alacsony, mind magas vízszintekre vonatkozóan.

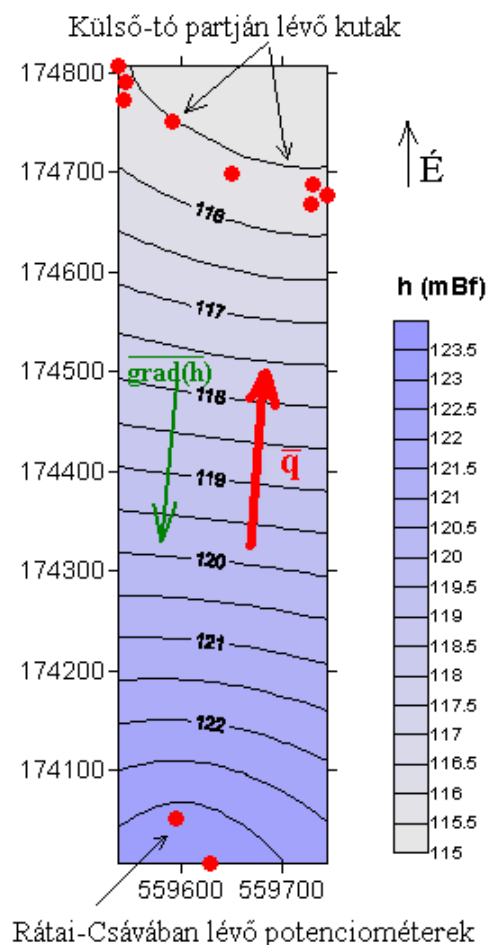
Száraz időszakban a Rátai-csáva alatti talajvíztükör tengerszint feletti magassága a kutakban mért vízszintek alapján 123 mBf, a Külső-tó esetében 115 mBf, a két terület távolsága megközelítőleg 750 méter.

$$grad(h) = \frac{dh}{dl} = \frac{123 \text{ m} - 115 \text{ m}}{750 \text{ m}} = \frac{8 \text{ m}}{750 \text{ m}} = 1,06 \cdot 10^{-2}$$

Csapadékosabb időszakokat követően a megnövekedett vízszintek miatt a Rátai-csávában 127 mBf, a Külső-tó esetében 116 mBf értékkel kalkulálhatunk.

$$grad(h) = \frac{dh}{dl} = \frac{127 \text{ m} - 116 \text{ m}}{750 \text{ m}} = \frac{11 \text{ m}}{750 \text{ m}} = 1,46 \cdot 10^{-2}$$

Végül Surfer 8.0 szoftver segítségével krigeléses interpolációs eljárással elkészítettük a Rátai-csáva és a Külső-tó közötti terület ekvipotenciál-térképét (13. ábra), amelyből látszik, hogy a fluxus vektor a Rátai-csáva felől a Külső-tó felé mutat.

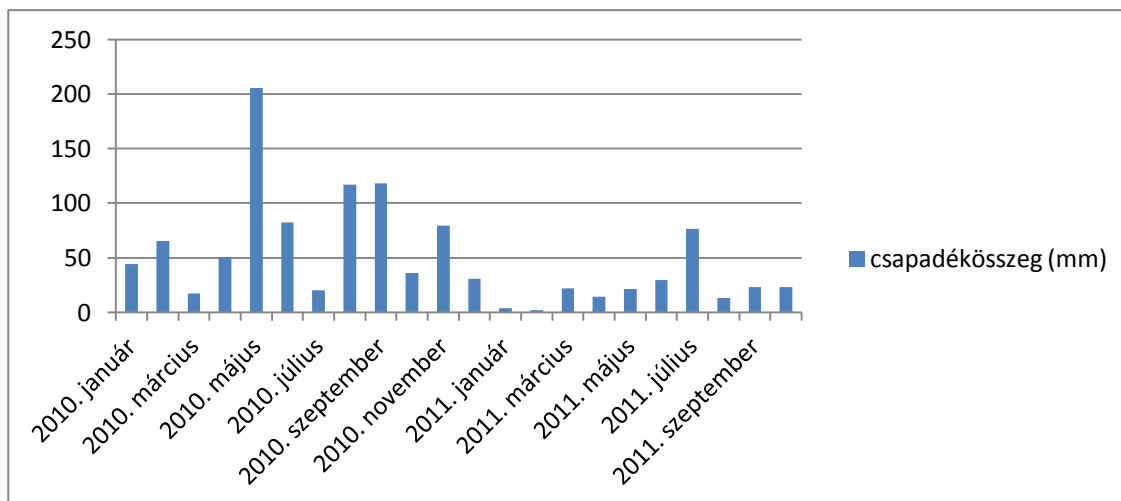


13. ábra: A Külső-tó és a Rátai-csáva közötti terület ekvipotenciál-térképe száraz időszakra vonatkoztatva

4.1.2.3. Vízsztváltozások értékelése

Az egy éves periódusra vonatkozó vízszintváltozások értékeléshez természetesen csak a 2010 óta havonta észlelt potenciométerek adatait tudtuk felhasználni. A nyugalmi vízszintekről – a téli időszakot leszámítva – havonta mért adatok állnak rendelkezésünkre (ld. 2. számú melléklet).

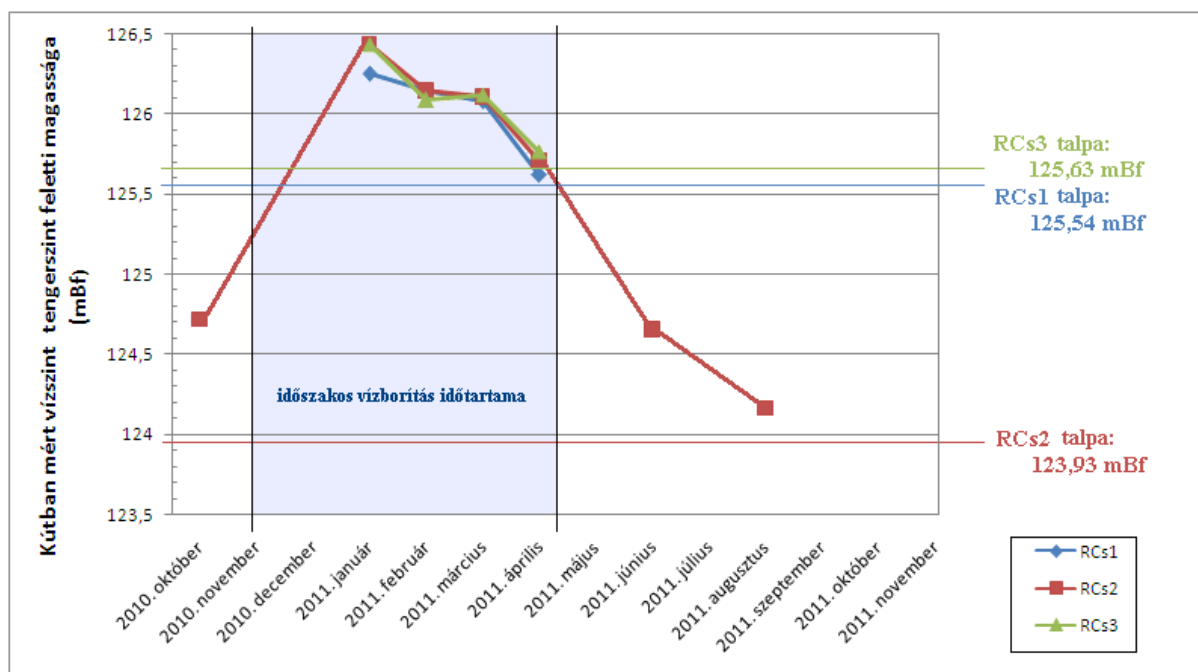
A potenciométerekben mért vízszintek időbeli változásának kiértékeléséhez szükséges a vizsgált periódusban hullott csapadék mennyiségének ismerete. A következő diagram (14. ábra) a 2010 január és 2011 október között mért havi csapadékatokat szemlélteti.



14. ábra: Havi csapadékadatok 2010 januártól 2011 októberig. (Siófoki meteorológiai állomás csapadékadatai, forrás: VITUKI)

A 2010-es év az átlagosnál csapadékosabb volt: 886,6 mm csapadék hullott (a területre jellemző évi átlagos csapadékmennyiség 600 mm). Három csapadékmaximumot különíthetünk el: egy tavasz végi – nyár eleji, egy nyár végi – ősz eleji, és egy téli maximumot. Ezzel szemben a 2011-es év igen száraz: az októberig lehullott csapadék összege mindössze 229,7 mm. Ezek alapján a potenciométerek nyugalmi vízszintadatait tekintve a 2010 és 2011-es mérési adatok között jelentős eltéréseket vártunk.

A Rátai-csáva potenciométereinek (9. ábra) vízszintgörbájén (15. ábra) látható, hogy az őszi csapadékmaximum után a talajvíztükör szintje csak januárra emelkedett olyan szintre, hogy a kutakban egyáltalán észlelhetővé vált. Ekkorra tehető, hogy a lokális domborzati depresszió aljában is megjelent a víz (16. ábra). Ezt követően a januártól kezdődő csapadékszegény időszakban a vízmélység kvázi stagnáló, majd erősen csökkenő szinteket eredményezett, így az időszakos vízborítás a tavasz elején megszűnt (17. ábra). 2011 augusztusától már a potenciométerekben sem tudtunk vízszintet mérni, a kutak szárazak voltak. A vizsgált területen mért legmagasabb és a legalacsonyabb vízszintek között így több méteres különbséget tapasztaltunk.



15. ábra: A Ráti-csáva potenciométereiben mért vízszintváltozások

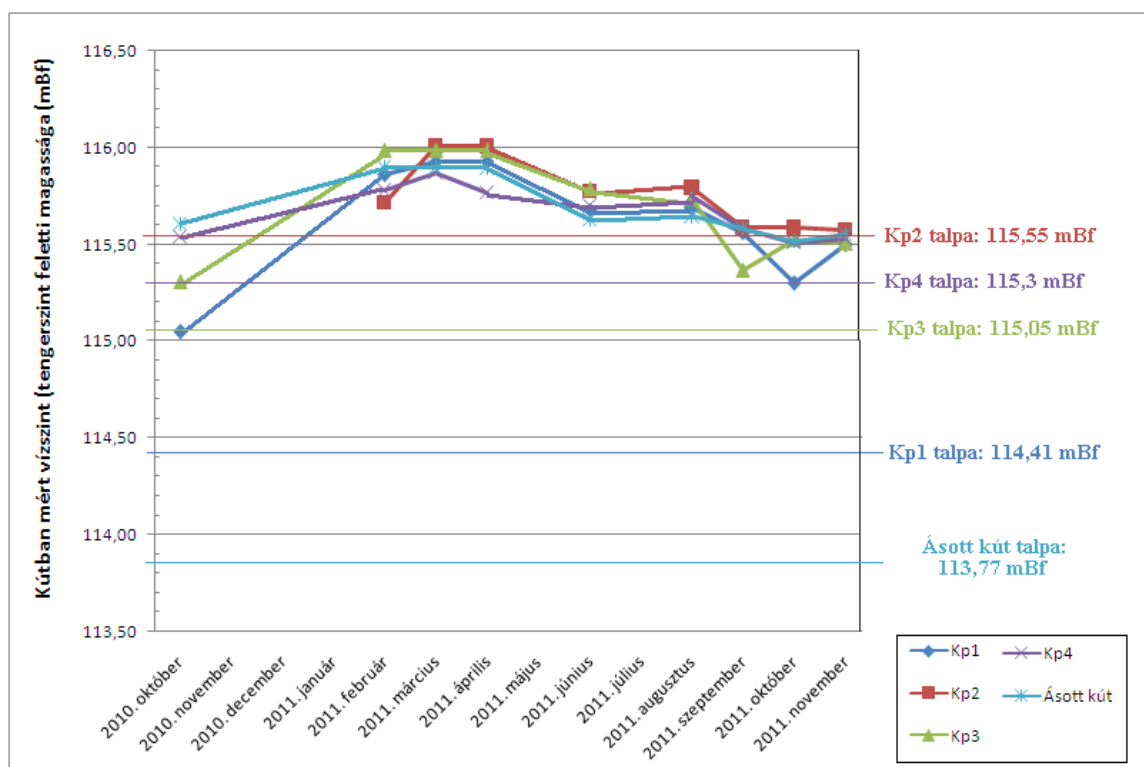


16. ábra: A Ráti-csáva 2011 januárjában (Fotó: PÉNTEK)



17. ábra: A Ráti-csáva 2011 szeptemberében (Fotó: FÜLÖP)

A Külső-tó menti potenciométerek (9. ábra) nyugalmi vízszintjei az őszi csapadékmaximum után februárra stabilizálódtak, majd áprilistól kezdve csökkenő tendenciát mutattak (18. ábra). Látható, hogy a téli magasabb vízállás után a talajvízszint lassan, több hónap után kezdett csökkenni. A legmagasabb nyugalmi vízszintet minden esetben a tóhoz legközelebbi Kp3-as potenciométerben lehetett megfigyelni, a parttól való távolság függvényében alacsonyabb vízszinteket tapasztaltunk. Ezt a jelenséget a tó körül kialakult lokális talajvíztükrö-dombnak tulajdonítjuk, amely „visszaduzzasztotta” a partközeli kutakban a vízszintet. Megfigyeltük, hogy a száraz időszakban a potenciométerekben mért nyugalmi vízszintek mindössze 60-70 centimétert csökkentek, szemben a Rátai-csávában tapasztalt több méteres vízszintcsökkenéssel.



18. ábra: A Külső-tó potenciométereiben mért vízszintváltozások

4.1.2.4. Vízkémiai elemzés

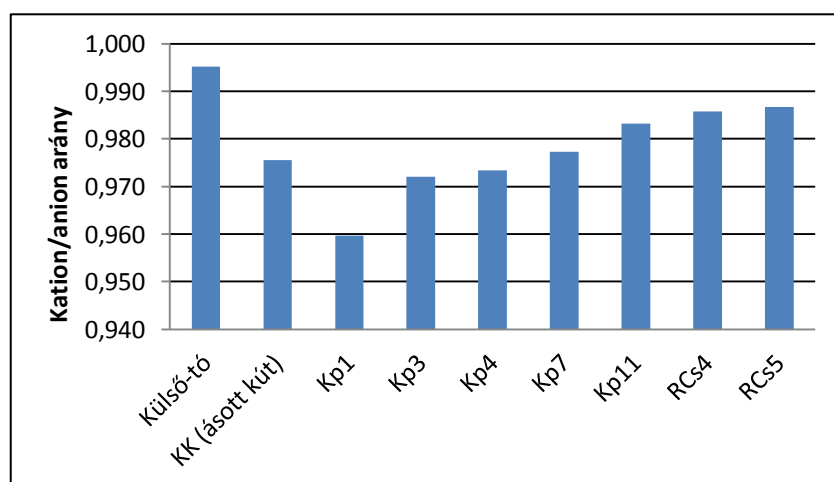
A vízkémiai elemzéshez a 2011 szeptemberi mintavételezés eredményeit használtuk fel. A vízmintákon a terepen végzett hőmérséklet- és vezetőképesség-mérések eredményeiből megbecsülhetjük a TDS-t (Total Dissolved Solids, összes oldott

iontartalom), ami tapasztalati úton a 25°C-ra vonatkoztatott konduktivitás 0,75-szerese. A kapott érték összevethető a laborban végzett mérések során meghatározott összes oldott iontartalommal. A helyszínen mért paramétereket, valamint a becsült és laboratóriumban meghatározott összes oldott anyagtartalmat az 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat: A vízkémiai elemzés összesítő eredményei (2011 szeptemberi vízminták)

Minta azonosítója	Víz hőmérséklete (°C)	Terepen mért vezetőképesség (μS/cm)	pH	25°C-ra átszámított vezetőképesség (μS/cm)	Becsült TDS (mg/l)	Laborban meghatározott összes iontartalom (mg/l)
Külső-tó	19,2	1100	7,45	1374,91	1031,18	1106,74
KK	14,8	960	7,54	1199,92	899,94	989,47
Kp1	18,5	1370	7,4	1712,39	1284,29	1427,75
Kp3	17,5	1090	7,43	1362,41	1021,81	1136,04
Kp4	16,5	1100	7,43	1374,91	1031,18	1155,16
Kp7	18,3	1022	7,4	1277,42	958,06	1015,98
Kp11	16,8	980	7,6	1224,92	918,69	972,47
RCs4	15,4	850	7,4	1183,34	887,50	968,19
RCs5	14,3	725	7,34	1031,24	773,43	852,56

A vízkémiai eredmények elemzésének első lépéseként meghatároztuk az anionok és kationok arányát az analízis helyességének, pontosságának ellenőrzése céljából. Az arány minden esetben 0,95 és 1,05 közötti, vagyis az analitikai eredmények megfelelőek (19. ábra).



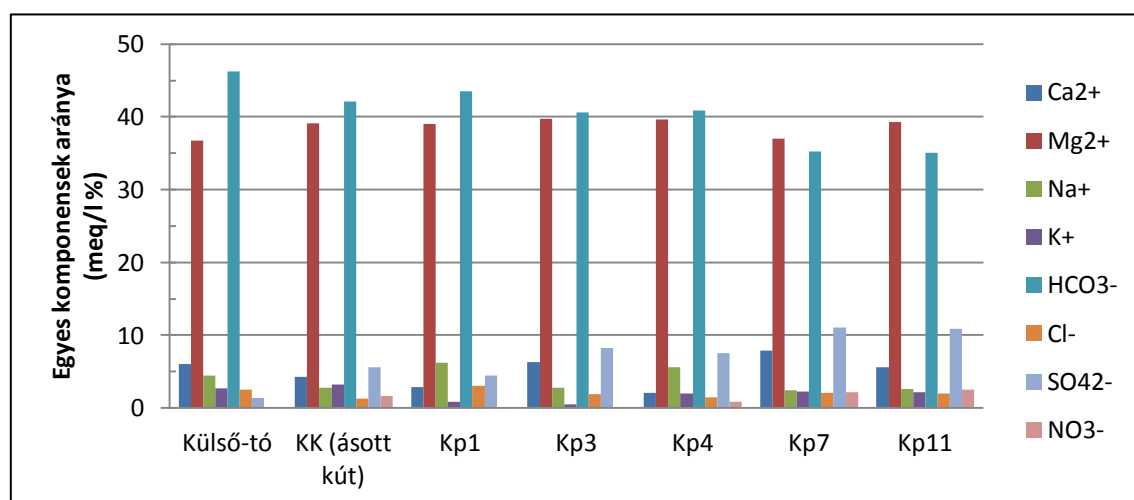
19. ábra: A kationok és anionok aránya a vizsgált vízmintákban

A terepen vett vízminták laboratóriumi vízkémiai vizsgálati eredményeit a Külső-tó környezetéből vett vízmintákra vonatkozóan a következő összesítő táblázat tartalmazza (4. táblázat). A megjelenítés és jobb összehasonlíthatóság érdekében az eredményeket átszámítottuk milliekvivalens értékekre, és az egyes komponensek százalékos arányát (meq/l %) diagramon ábrázoltuk (20. ábra).

4. táblázat: A vízkémiai elemzés eredményei (Külső-tó)

Minta neve	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	H ₂ SiO ₃ (mg/l)
Külső-tó	35,5	131,7	31,50	30,0	832,4	26,6	19,0	0,0	36,7
KK (ásott kút)	22,4	126,0	33,75	16,8	679,9	12,1	71,0	27,5	37,4
Kp1	22,4	183,9	12,80	55,0	1029,4	42,0	82,0	0,2	16,1
Kp3	39,3	151,0	6,10	20,3	775,2	21,0	123,0	0,2	27,7
Kp4	13,1	151,0	24,00	40,5	781,6	16,0	113,0	16,0	31,6
Kp7	44,0	125,4	24,20	15,3	600,5	20,6	148,0	38,0	41,2
Kp11	29,9	128,3	22,60	16,0	575,1	19,1	140,0	41,5	42,4

A Külső-tó melletti potenciométerek vízmintái esetében a domináns ionok a HCO₃⁻ és a Mg²⁺. Ezek mellett magából a Külső-tóból származó vízmintát leszámítva, viszonylag magas szulfát értékeket mértünk. Három esetben (ásott kút, Kp7 és Kp11) figyeltünk meg magas nitrát koncentrációt (a szennyezettségi határérték ivóvízben 50 mg/l), amit a felszíni területhasználattal hozunk összefüggésbe.



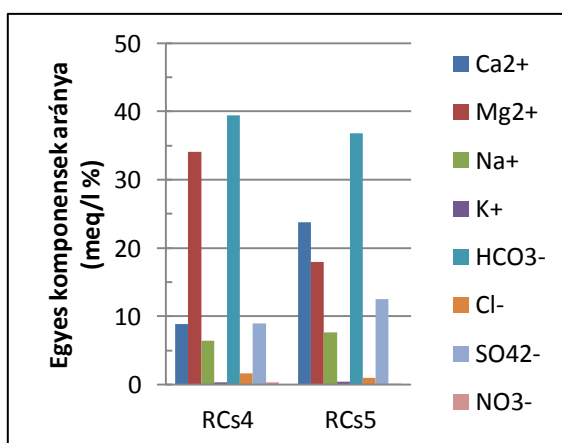
20. ábra: A Külső-tó partján létesített potenciométerek vízmintáinak kémiai összetétele

A Rátai-csáva vízmintái anionok tekintetében hidrogén-karbonátban gazdagok, emellett viszonylag magas a szulfáttartalom is (5. táblázat, 21. ábra).

5. táblázat: A vízkémiai elemzés eredményei (Rátai-csáva)

Minta neve	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	H ₂ SiO ₃ (mg/l)
RCs4	46,8	109,5	2,84	39,0	635,4	15,2	114,0	5,4	18,2
RCs5	107,6	49,4	3,56	39,5	508,3	7,6	136,0	0,6	20,7

Az anionokat tekintve szembetűnő, hogy az RCs5 vízminta a többitől jelentősen alacsonyabb magnézium tartalommal és magasabb kalcium tartalommal rendelkezik. Az összes általunk elemzett vízminta esetében 100 mg/l feletti magnézium koncentrációt mértünk, ez alól csupán a Rátai-csávából származó RCs5 jelű minta jelent kivételt. A jelenséget a Piper-diagram (22. ábra) is mutatja: a diagram kationokat ábrázoló harmadában (bal alsó háromszög) az RCs5 a viszonylag egy helyen csoportosuló szimbólumoktól távol helyezkedik el. A nagy eltérés miatt felmerült a laboratóriumi mérés során vétett hiba, ezért a vízmintát ismételt vízkémiai elemzésnek vetettük alá. Mivel az első méréssel megegyező koncentráció értékeket kaptunk, az analitika eredményét elfogadtuk.



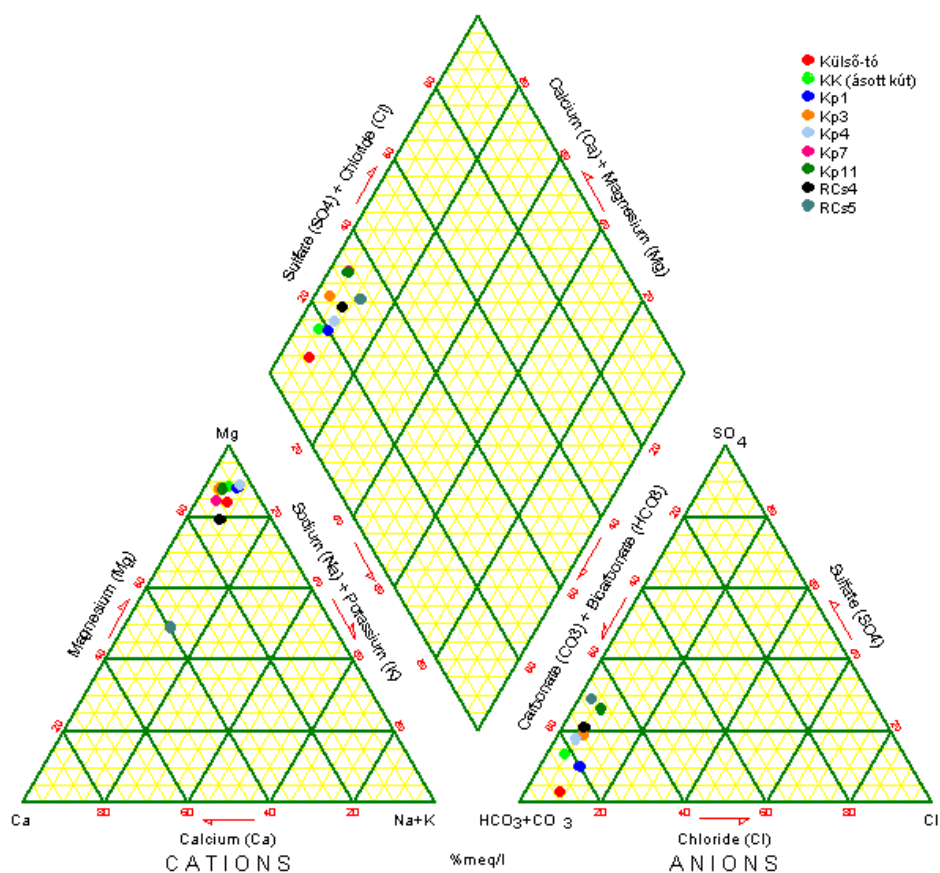
21. ábra: A Rátai-csávában létesített potenciométerek vízmintáinak kémiai összetétele

A minták összes oldott iontartalmát tekintve (6. táblázat) megfigyelhetjük, hogy a Külső-tó partján létesített kutakból származó vízminták oldott iontartalma körülbelül 100 mg/l-rel meghaladja a Rátai-csáva vízmintáinak TDS-ét.

A vízminták koncentrációinak milliekvivalens értékre való átváltása és Piper-diagramon való megjelenítése után (22. ábra) meg tudtuk határozni a minták hidrogeokémiai fáciesét.

6. táblázat: A vízminták összes oldott iontartalma

Minta neve	összes oldott ion tartalom (mg/l)
Külső-tó	1106,7
KK (ásott kút)	989,5
Kp1	1427,7
Kp3	1136,0
Kp4	1155,2
Kp7	1015,9
Kp11	972,5
RCs4	968,2
RCs5	852,6



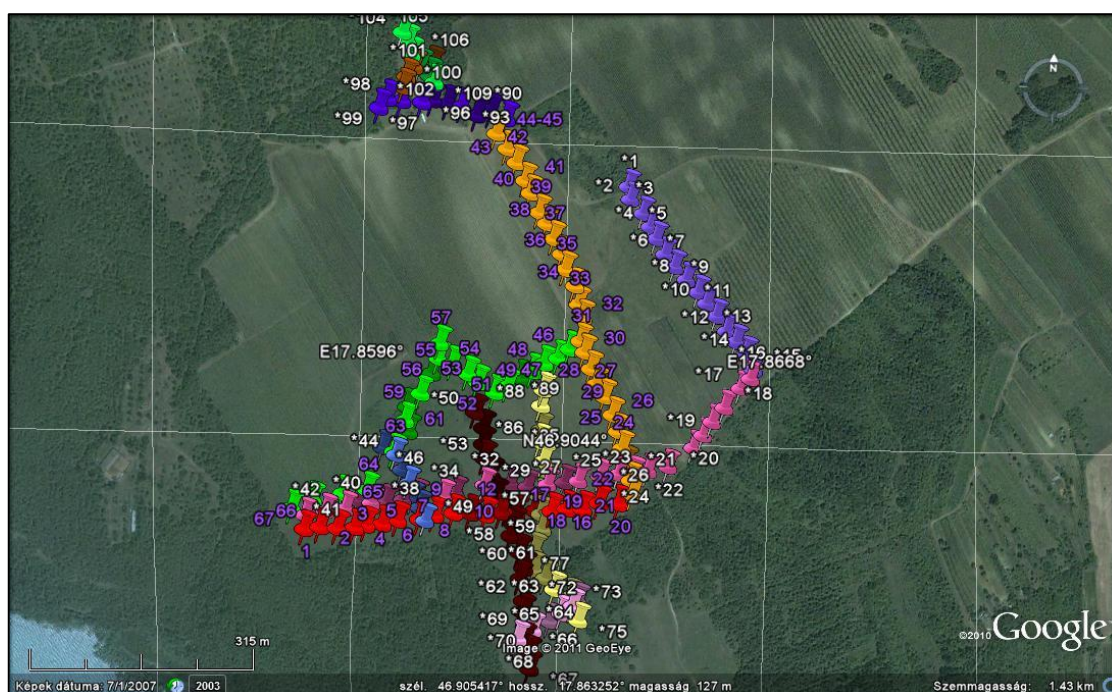
22. ábra: A vízminták kémiai összetételének ábrázolása Piper-diagramon

A kationokat tekintve a vizsgált vízminták két csoportba sorolhatók: a Kp3, Kp7 és Kp11-es potenciométerek vízmintái több mint 90%-ban Ca^{2+} és Mg^{2+} ionokat tartalmaznak, vagyis kalcium – magnézium fáciesűek. A többi minta (Külső-tó vize, Külső-tó ásott kút, Kp1, Kp3 és a Rátai-csávából származó vízminták) esetében az előbb említett ionok mellett több mint 10%-os arányban Na^+ és K^+ ion is szerepel, így ezek a vízminták összetételüket tekintve kalcium – nátrium kationfáciesbe sorolhatók.

Anionok tekintetében domináns a hidrogénkarbonát – klorid – szulfát fácies: a meghatározó anion a HCO_3^- (50-90%), ami mellett több mint 10%-ban Cl^- és SO_4^{2-} ion is jelen van. Mindössze a Külső-tó vize tér el ettől, amelyben a HCO_3^- aránya meghaladja a 90%-ot, ami a hidrogénkarbonát anionfáciesnek felel meg.

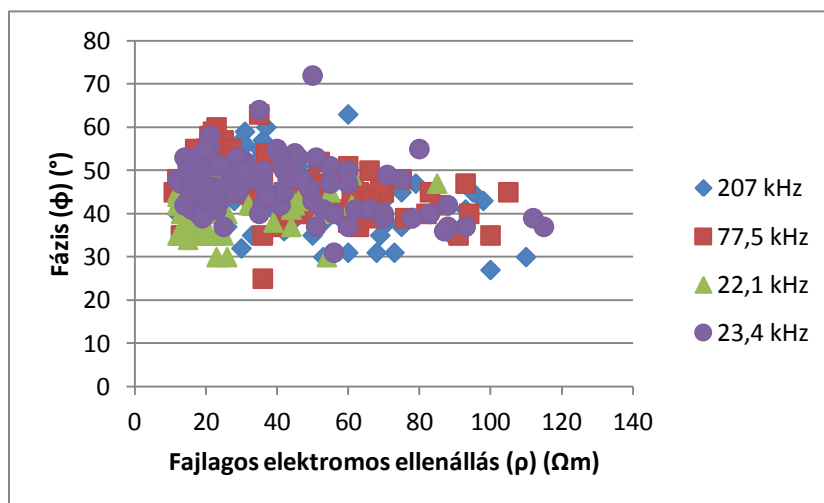
4.1.2.5. RMT térképezés

A mérési pontokat körülbelül 20 méteres közzel vettük fel a Rátai-csávában úgy, hogy a terület peremrészei és a tómeder felépítéséről is információt kaphassunk (23. ábra). A felvett pontok koordinátáit a 8. és 9. számú mellékletek tartalmazzák.

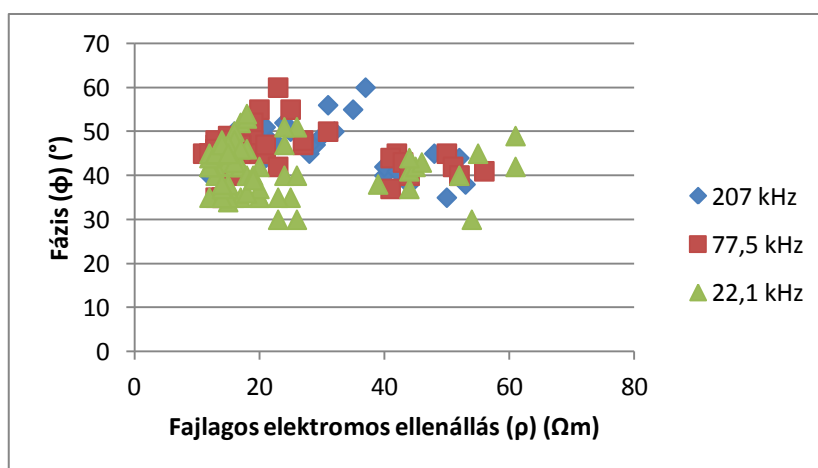


23. ábra: A mérési pontok helye a Rátai-csávában – az eltérő színek az egyes szelvényeket jelölik (Google Earth)

Az adatok kiértékelésekor az egyes kategóriák meghatározásához a TURBERG (1994) által alkalmazott módszert használtuk, ennek megfelelően az ellenállás-fázis pontok által alkotott halmazokat feleltettünk meg egy-egy kategóriának. Az összes mérési eredményt ábrázolva (24. ábra) a tartományok elkülönítése nem volt egyértelmű, ezért a 2010-ben mért értékeket külön felvittük egy diagramra (25. ábra).



24. ábra: Az ellenállás-fázis pontok által alkotott értéktartományok a 2010 és 2011-es mérési eredmények felhasználásával



25. ábra: Az ellenállás-fázis pontok által alkotott értéktartományok a 2010-es mérési eredmények felhasználásával

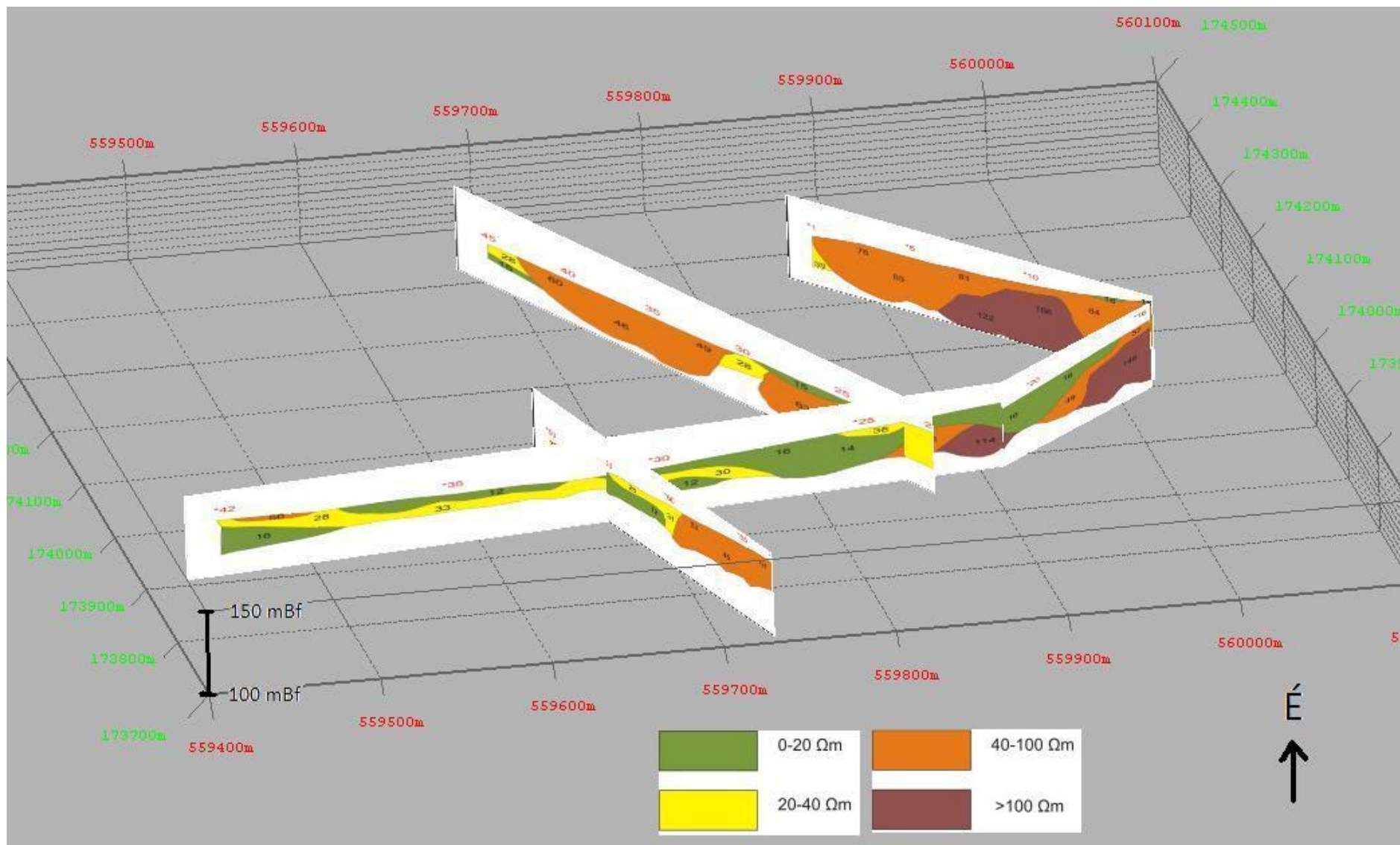
20 Ωm körül viszonylag jól elkülönülnek az értékek: lehatárolhatjuk az annál kisebb ellenállású képződményeket. A következő tartomány voltaképp csak egy átmenet: a 25. ábrán látható, hogy 20 – 40 Ωm közé csak néhány pont esik, azonban a 40 Ωm –nél jelentkező éles határ miatt vezettük be ezt a kategóriát. A 24. ábra mutatja, hogy

40 – 100 Ωm között egyenletesen helyezkednek el értékek, viszont a 100 Ωm fölöttiektől elkülönülnek, ezért ezek alkotják a harmadik, illetve a negyedik csoportot.

A fenti megfontolások alapján elkülönített kategóriák felhasználásával a kapott eredményekből egy tömbszelvényt szerkesztettünk (26. ábra). A 2010. és 2011. évi mérési eredményeiből csak 4 szelvényt használtunk fel a háromdimenziós megjelenítéshez az átláthatóbb és informatívabb ábrázolás érdekében. A többi RMT szelvényt a 10. és 11. számú melléklet tartalmazza.

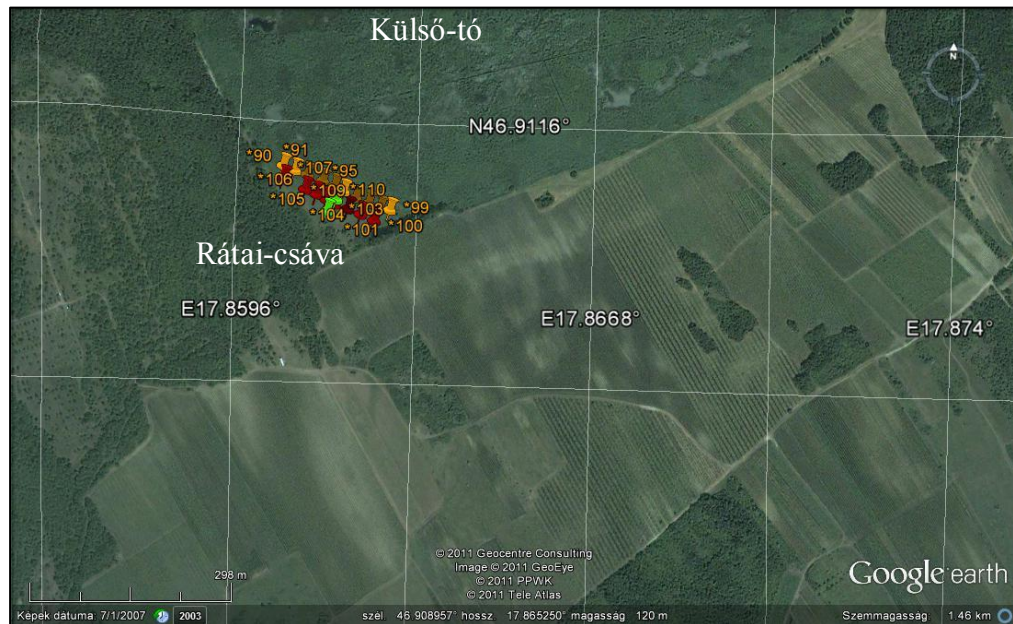
A kiértékelés során próbáltuk figyelembe venni a környező mérési pontok adatait, vagyis úgy választottuk meg a kategóriákat a szelvényhatárra eső értékek esetén, hogy illeszkedjenek a lokális trendbe, illetve igyekeztünk úgy megrajzolni az egyes képződményeket, hogy azok valóságszerű módon jelenjenek meg (pl. kerültük a szabályos mértani formák alkalmazását).

A 3D vizualizáció segítségével láthatóvá válnak az egyes ellenállás-kategóriák térbeli kiterjedése. A Rátai-csáva középső részén – a tómeder és környezete – alacsony ellenállású képződmények borítják a felszínt. Radiális irányban távolodva a tómedertől fokozatosan jelennek meg a közepes értékek, végül körülbelül 200 – 300 m –rel a lokális depresszió legmélyebb pontjától a nagy ellenállású kőzetek is a felszínre bukkannak (26. ábra).



26. ábra: Az RMT mérések eredményeiből készített tömbszelvény (EOV koordinátarendszerben, 4 szelvényt felhasználva)

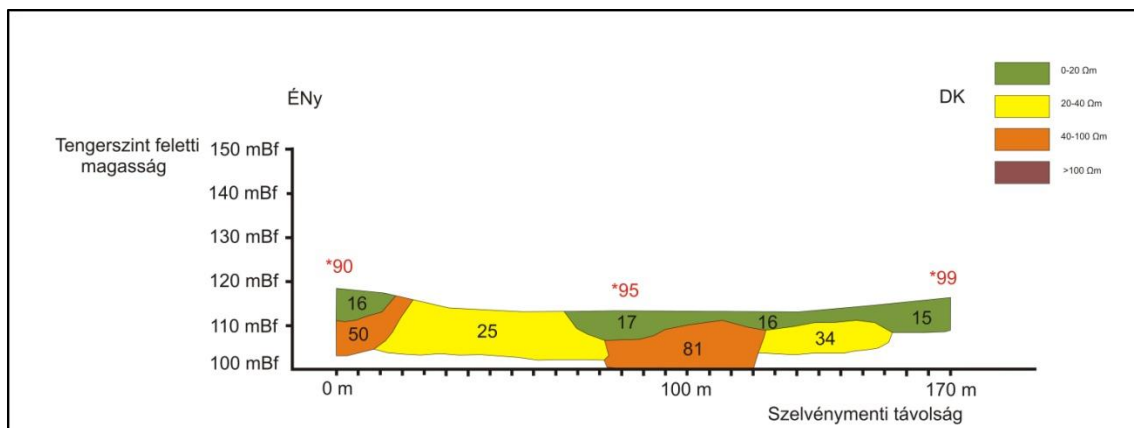
A két maar-tó közötti felszín alatti kapcsolat megismerése érdekében a Külső-tó délnyugati partvonalán is végeztünk RMT méréseket (27. ábra), ezek eredményeit a 28-30. ábrák szemléltetik.



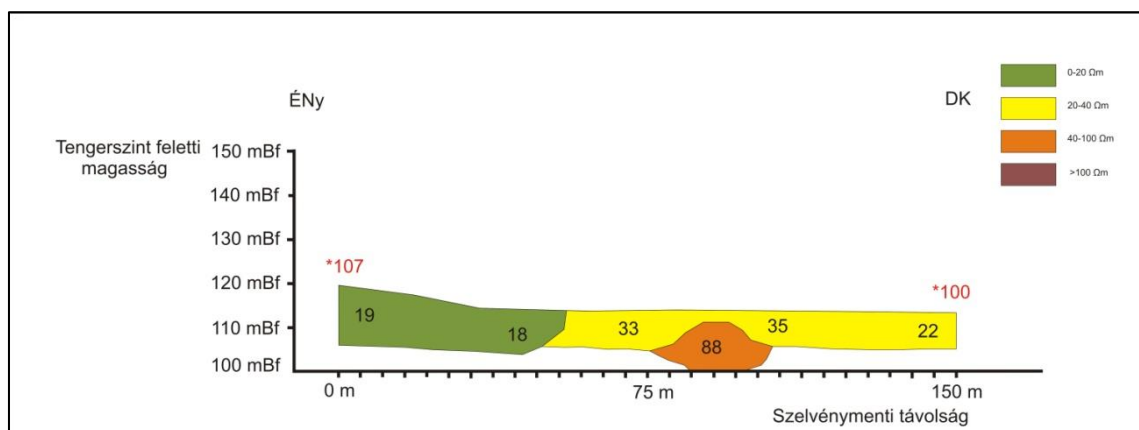
27. ábra: A Külső-tó délnyugati oldalán felvett mérési pontok helye [Google Earth]

A Külső-tó partjához közelebb eső szelvényen (28. ábra) látható, hogy a felszínen inkább a kis ellenállású összetekintések jelentkeznek, míg a parttól távolabbi profilon (29. ábra) a közepes ellenállás-értékek válnak uralkodóvá. A keresztzelvényen (30. ábra) pedig megfigyelhető, hogy a tótól távolodva délnyugati irányban egyre nagyobb ellenállásokat mértünk az egészen $17 \Omega m$ -tól a $60 \Omega m$ -es értékekig.

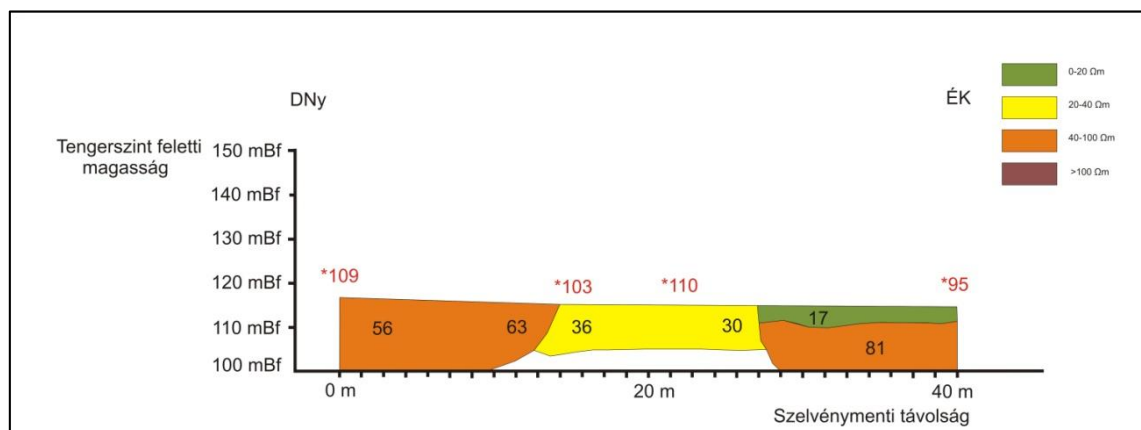
A Rátai-csáva és a Külső-tó közötti területen való mérésnek a terepi viszonyok szabtak határt (itt ugyanis erdő, illetve szőlőültetvény húzódik).



28. ábra: A Külső-tó partján végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés ~0,8x-os túlmagasítással. A piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik



29. ábra: A Külső-tó partján végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés túlmagasítás nélkül. A piros számok a mérési pontokat, a feketék az ellenállásértékeket jelölik.



30. ábra: A Külső-tó partján végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés ~3,6x-es túlmagasítással. A piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik.

4.1.3. Értékelés

Az általunk vizsgált, maar-szerkezetekben helyet foglaló Külső-tó és Rátai-csáva sekély (2-5 méter mélységig terjedő) geológiai felépítéséről a területen mélyített fúrások rétegsorainak vizsgálatával szereztünk információt. Ezek alapján megállapítottuk, hogy mindkét területen főleg agyagos-közetlisztes, helyenként finomhomokos felszín közeli képződmények találhatók. Ezt a laboratóriumi szemcseeloszlás vizsgálatok is alátámasztották: a minták hidraulikus vezetőképesség értékei 10^{-6} és $10^{-8} \frac{m}{s}$ közé esnek.

A fúrásokból kiképzett potenciométerek vízszintváltozásait vizsgálva, figyelembe véve a csapadékadatokat is, megfigyeltük, hogy a Külső-tó partján száraz időszakban a potenciométerekben mért nyugalmi vízszintek mindössze 60-70 centimétert csökkentek, szemben a Rátai-csávában tapasztalt 2,5 méteres vízszintcsökkenéssel. Feltételezésünk szerint ez abból adódik, hogy a Rátai-csáva beáramlási területen található víztest, amely érzékenyebben reagál a csapadékmennyiségre, míg a Külső-tó partján észlelt viszonylag kis vízszintingadozás kiáramlási területet jelez. A vízkémiai vizsgálatok eredményei segítettek alátámasztani hipotézisünket.

A Rátai-csáva potenciométereiben mért alacsony összes oldott iontartalom beáramlási területre jellemző, ahol a víz a felszíni talajrétegen átszivároghatva viszonylag kevés jól oldódó komponenssel kerül kapcsolatba. A beáramlási rezsimjellegű területek domináns ionjai a Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} és SO_4^{2-} . Az általunk vizsgált vízminták összetétele ennek megfelelő. Az RCs5 jelű kútból származó víz többi vízmintához viszonyított alacsonyabb magnézium-, és magasabb kalciumkoncentrációja összefüggésben lehet azzal, hogy ez a potenciométer a Rátai-csáva legmélyebb pontján helyezkedik el, így csapadékosabb időszakokat, illetve hóolvadást követően időszakosan vízzel borított.

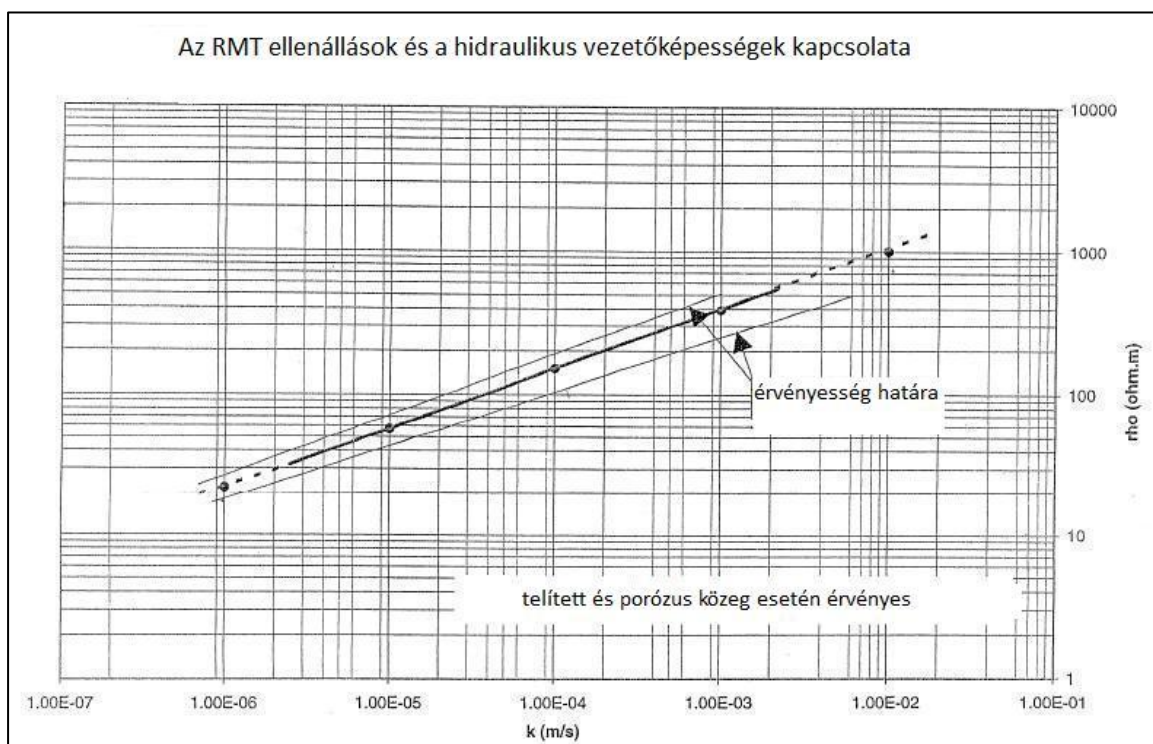
A Külső-tó esetében a hidrogén-karbonát és magnézium ionok túlsúlya és a némileg magasabb összes oldott anyagtartalom lokális kiáramlási rendszerre enged következtetni.

A vizek viszonylag magas Mg^{2+} ion koncentrációját a víz felszín alatti áramlása során a bazaltos kőzeteket felépítő Mg-tartalmú ásványokkal való kölcsönhatásnak tulajdonítjuk.

Az RMT mérések segítségével különböző fajlagos ellenállású felszín közeli képződményeket tudtunk elkülöníteni. Az adatok eloszlása alapján a kráterperemi, maar-tavi üledékek és a diatrémaszerkezetet kitöltő anyagok elkülönülése tapasztalható az ellenállás-értékeket tekintve.

Az alacsony értékekkel rendelkező képződményeket ($\sim 10 - 20 \Omega m$) – az ismert felépítés alapján – a maar-tavi üledékeknek feleltethetjük meg. Ezek átlagos vastagsága 7-8 m. Az átmeneti kategória ($20 - 40 \Omega m$) a vulkanizmus során keletkezett piroklasztitokat és vulkáni törmelékeket reprezentálhatja, míg a magasabb térszíneken megjelenő, nagy ellenállású ($> 40 \Omega m$) összletek a bazaltos maar-peremet képviselik.

A mérések során kapott ellenállás-értékeket (ρ) egy egyszerű lineáris összefüggés alapján megfeleltethetjük hidraulikus vezetőképességeknek (K) (31. ábra).



31. ábra: Az RMT mérésekből meghatározott fajlagos elektromos ellenállások és a hidraulikus vezetőképesség közötti közelítő összefüggés (Müller et al., 2008)

A MÜLLER et al. (2008) munkája nyomán készült kalibrációt felhasználva az alábbi hidraulikus vezetőképességeket kaptuk a térségben előforduló képződményekre.

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1. kategória: $\rho < 20 \Omega m$ | $K = 10^{-7} - 10^{-8} m/s$ |
| 2. kategória: $\rho = 20 - 40 \Omega m$ | $K = 5 * 10^{-6} - 10^{-6} m/s$ |
| 3. kategória: $\rho = 40 - 100 \Omega m$ | $K = 5 * 10^{-5} - 5 * 10^{-6} m/s$ |
| 4. kategória: $\rho > 100 \Omega m$ | $K = 6 * 10^{-5} - 5 * 10^{-5} m/s$ |

140 Ωm -től nagyobb értékeket nem kaptunk, így az ennek megfelelő $6 * 10^{-5} m/s$ hidraulikus vezetőképesség adódott a legnagyobb szivárgási értéknek.

A becsült hidraulikus vezetőképességekből látszik, hogy a felszín közeli összletek kis értékekkel rendelkeznek – bár FREEZE & CHERRY (1979) besorolása alapján ezek még viszonylag jó szivárgási tényezőknek minősülnek. A nagy ellenállású képződmények nagyobb K-tényezővel rendelkeznek: $10^{-5} m/s$ -os nagyságrendben változnak, ez a repedezettségnek is köszönhető.

4.2. Kétdimenziós áramkép szimuláció

Ahhoz, hogy a tavak felszín alatti vízzel való kapcsolatát minél pontosabban meghatározzuk, az adott közeg vízáramlási rendszerének alapos ismerete szükséges. Mivel ez terepi adatok segítségével nem mindig jellemezhető, egyszerűbb megoldás a numerikus modellek alkalmazása. Esetünkben egy első kísérletről volt szó, amelynek célja a Rátai-csáva és a Külső-tó közötti szelvényre vonatkozóan kétdimenziós stacioner áramkép szimuláció.

4.2.1. A módszer ismertetése

A tavak felszín alatti vízzel való kapcsolatának megértésére a terepi mérések mellett WINTER munkássága nyomán kezdett terjedni a numerikus modellek alkalmazása. A módszer lényege, hogy meghatározott peremfeltételek alapján és a köztváz ismeretében szimuláljuk az áramlási rendszerek és a tavak kapcsolatát.

WINTER a kétdimenziós numerikus modellezés során egy homogén, anizotróp félmedencében elhelyezkedő tavat, illetve tórendszert vizsgált. Mivel stacioner áramlást feltételezett (q =állandó és $h(t)$ =állandó), ezért az áramlást a Darcy- és a folytonossági egyenlet összekapcsolásával írta le.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(x, z) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(x, z) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = 0$$

$K(x, z)$ a vizsgált közeg hidraulikus vezetőképessége, $\frac{\partial h}{\partial x}$ és $\frac{\partial h}{\partial z}$ a hidraulikus gradiens az horizontális „ x ”, illetve a vertikális „ z ” koordinátatengely mentén.

A hidrodinamikai modellezés során az alapadatok (rétegvastagság, szivárgási tényező, hidraulikus emelkedési magasság, porozitás stb.) mennyisége és minősége korlátozza a feladat matematikailag korrekt megoldását, ezért olyan prekonceptióra, előzetes munkahipotézisre van szükségünk, amellyel a hiányzó adatokat pótolni lehet. Mivel az adataink sem egzaktak, és sokszor hiányoznak, a számítás eredménye is bizonytalansággal terhelt. Az eredmények egyezését továbbá meghatározza a földtani és vízföldtani ismereteken alapuló modell minősége. A szimuláció kalibrálásához ezért nélkülözhetetlenek a megfelelő számú és megfelelő mélységbe telepített kutak vízszintadatai. Így a kapott eredmények helyessége ellenőrizhető.

4.2.2. A modellezés menete, az eredmények elemzése

A hidrodinamikai modellezés során a FLOWNET (VAN ELBURG et al., 1992) szoftver 5.12 verzióját használtuk. A FLOWNET egy interaktív program, melynek segítségével felszín alatti stacioner vízáramlásokat modellezhetünk két dimenzióban heterogén, anizotróp közegben. Az általunk vizsgált szelvény mentén a terület négyszögletes egységekre bontva véges differenciák módszerével vizsgálhatjuk a felszín alatti potenciál-eloszlást. A program a modellezés során – az előző fejezetben leírtak szerint – a szivárgás alapegyenletét oldja meg. Az egyenlet megoldásához matematikailag definiálnunk kell a vizsgált terület peremfeltételeit.

4.2.2.1. Határfeltételek megállapítása

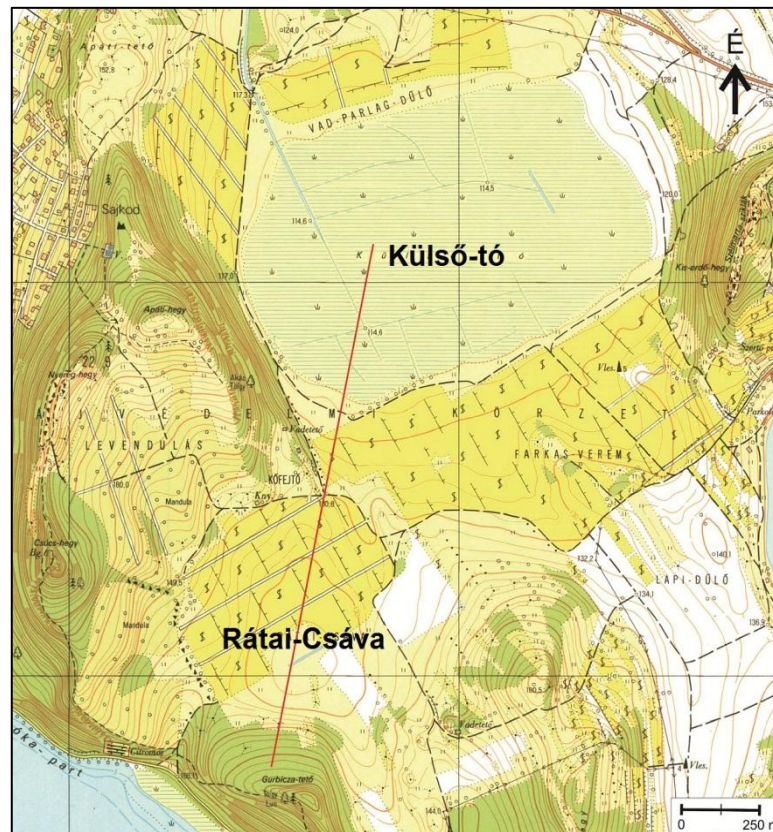
A vizsgált területek között húzódó, a modell alapját képező szelvény nyomvonalát úgy választottuk meg, hogy a numerikus modell peremfeltételeit szem előtt tartva a szelvény két szélső határa között a lehető legnagyobb topográfiai szintkülönbség legyen (32. ábra). Így az egyik határon magas topográfiai helyzetű vízválasztó foglal helyet, melynek lokális depressziójában helyezkedik el a Rátai-csáva; a másik határnak az alacsonyabban fekvő Külső-tó medencéjét adtuk meg. Ennek a geometriának köszönhetően a szelvény függőleges határait impermeábilisnek tekintjük, ahol $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$.

A modell felső határa a talajvíztükör, vagyis $h = h(x)$. A Rátai-csávéban és a Külső-tó partján rendelkezünk mért vízszintadatokkal, a két terület között a domborzat változásának megfelelően definiáltuk a hidraulikus emelkedési magasság értékeit az egyes rácokban.

Az alsó határfeltétel kijelöléséhez rendelkezésünkre állt egy, a félsziget keleti partján létesített építésföldtani fúrás rétegsora (7. táblázat), amely 15 mBf szinten tömött, kemény, helyenként kovásodott szarmata mészkövet harántolt. Ennek a képződménynek a fizikai paramétereit figyelembe véve, és FREEZE & CHERRY (1979) egyes képződmények K-tényezőire vonatkozó adatai alapján $10^{-9} - 10^{-6}$ m/s nagyságrendű hidraulikus vezetőképesség értéket adtunk meg. Meg kell jegyeznünk, hogy a modellezés során az alsó határfeltételnek – a szoftver korlátozott lehetőségei miatt – csak zárt határt tudtunk megadni, ahol $\frac{\partial h}{\partial z} = 0$. Ezért a szarmata mészkő esetében a lehető legalacsonyabb hidraulikus vezetőképességgel kalkuláltunk, mivel ebben az esetben a többi képződmény szivárgási tényezőjétől több nagyságrenddel kisebb K-tényezőt kapunk, ezért a modell alsó határa közelít a megadott peremfeltételhez. Ez természetesen azt is jelzi, hogy az áramtér lefelé nem zárt, azaz a vízrészecskék bizonyos hányadának mélybe jutása nem zárható ki.

7. táblázat: A Th.36 építésföldtani fúrás rétegsora

Fúrás neve	Mélység (m)	Harántolt képződmények
Th.36	0-0,7	humuszos agyag
	0,7-90,5	agyagmárga, meszes agyag, homok, márgás kőzetliszt, kőzetlisztes agyagmárga, agyag
	90,5-96	tömött, kemény mészkő, kovás mészkő, bentonit



32. ábra: A modellezés alapját képező szelvény nyomvonala

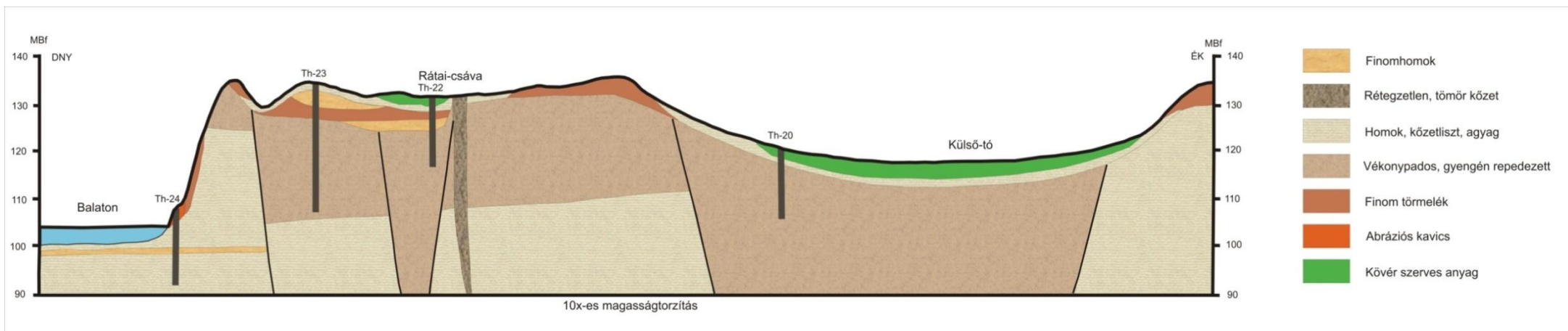
4.2.2.2. Hidrosztratigráfia

A vizsgált területek közötti hidraulikus kapcsolat numerikus modellezéséhez megvizsgáltuk a Rátai-csáva és a Külső-tó között felvett szelvény menti képződmények hidrogeológiai paramétereit (szivárgási tényező, porozitás).

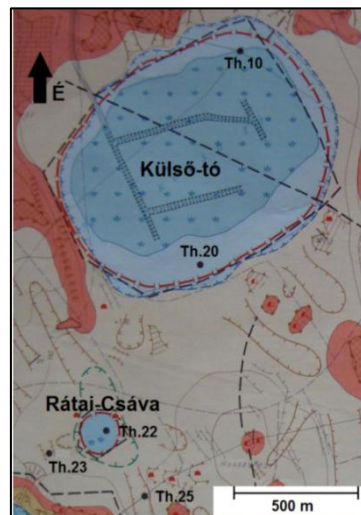
A képződmények hidrosztratigráfiai elkülönítéséhez az 1970-es tihanyi építésföldtani térkép szelvényét (33. ábra) és térképmagyarázóját (LÁNG & FODOR, 1970) vettük alapul. Az 1900-as évek második felében számos fúrás létesült a Tihanyi-félszigeten építésföldtani vizsgálatok céljából. A szelvényünk nyomvonala három, 1970-ben mélyített építésföldtani fúráson halad keresztül (Th.20, Th.22, Th.23), illetve a Külső-tó partján és a Rátai-csávéban további két fúrás rétegsora (Th.10 és Th.25) állt rendelkezésünkre. Ezek egymáshoz viszonyított helyzetét az alábbi térképkivágat (34. ábra) szemlélteti. A fúrások által harántolt képződmények leírását a 8. táblázat foglalja össze.

Az építésföldtani fúrási rétegsorokat vizsgálva megállapítható, hogy a legfelső 3-7 méter vastagságú tartományban főként kvarter agyagos-közetlisztes képződmények találhatók, helyenként növekvő homoktartalommal, melyet az általunk létesített sekély fúrások rétegsorai is igazoltak. A magmintákon végzett laboratóriumi vizsgálatainknak megfelelően (ld. 4.1.2.1. fejezet), a képződményekhez $K=10^{-7}$ m/s-os hidraulikus vezetőképesség értéket rendeltünk.

Az elméleti hidrosztratigráfiai szelvény megszerkesztésénél szem előtt tartottuk az RMT mérések eredményeit is, hiszen mint azt a 4.1.3. fejezetben bemutattuk, a kráterperem, a maar-tavi üledékek és a diatrémaszerkezetet kitöltő képződmények jól elkülönülnek egymástól az ellenállás-értékeiket és így hidraulikus vezetőképességeiket tekintve. A vulkáni képződmények vizsgálata során továbbá segítségünkre voltak a NÉMETH et al. (2001) által felállított litofacies csoportok is, melyekhez hozzá tudtuk rendelni az RMT mérések segítségével elkülönített egységeket, és megbecsültük a jellemző horizontális szivárgási tényezőket.



33. ábra: A Balaton környéke 1:10 000 építésföldtani térképsorozat szelvénye (Magyar Állami Földtani Intézet, 1969 után módosítva)



34. ábra: A vizsgált területen mélyített építésföldtani fúrások (LÁNG, 1970 után módosítva)

8. táblázat: A területen mélyített építésföldtani fúrások rétegsorai

	Fúrás neve	Mélység (m)	Harántolt képződmények
Külső-tó	Th.10	0-3,5	agyag, meszes agyag, agyagmárga, agyagos homok
		3,5-15	bazalttufa, bazalt-agglomerátum
	Th.20	0-7,2	humuszos, agyagos homok, homokos agyag, bazalttufa
		7,2-15	bazalttufa
Rátai-csáva	Th.22	0-7,8	agyag, kőzetlisztes agyag, meszes agyag, homokos kőzetliszt, agyagos aleurit
		7,8-15	bazalt-agglomerátum, bazalttufa
	Th.23	0-7	humuszos homok, homokos agyag, mállott agyagos tufit
		7-26	bontott bazalttufa, bazalttufa, márgás aleurit, márgás tufit, meszes aleurit, bontott bazalttufa betelepüléssel
	Th.25	0-4,9	agyag, mállott bazalttufa-törmelék, homok (mészkőkavicsos)
		4,9-15	bazalttufa, bazalt agglomerátum

Ezek alapján a felszín közeli alacsony ellenállású képződményeket az agyagos – kőzetlisztes maar-tavi üledékeknek feleltettük meg, szivárgási tényezőjük $10^{-7} - 10^{-8}$ m/s. A vulkanizmus során keletkezett bazaltos piroklasztitok és vulkáni törmelékek közepes ellenállású összleteket reprezentálnak, melyeket az RMT mérések alapján 10^{-6} m/s nagyságrendű hidraulikus vezetőképesség jellemez, míg a magas ellenállású összleteket a vulkáni képződmények között a legnagyobb, $5 \cdot 10^{-6}$ m/s-os szivárgási tényezővel rendelkező bazaltos maar-peremi képződmények képviselik. A szoftver leírásában a képződmények vertikális hidraulikus vezetőképességét a horizontális szivárgási tényező tizedének adják meg, így mi is ezt alkalmaztuk.

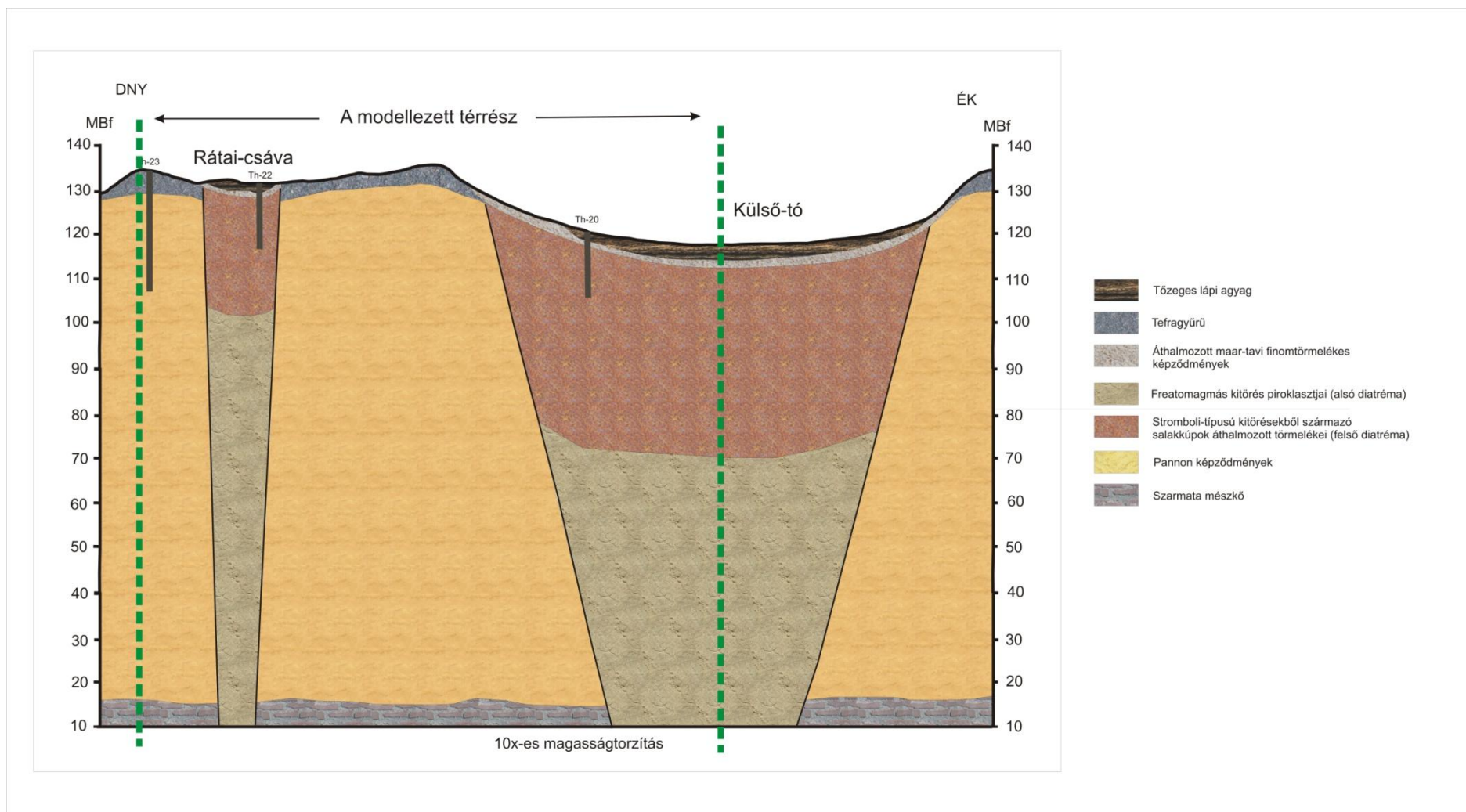
A porozitás értékekre FREEZE & CHERRY (1979) könyvére támaszkodva tettünk becslést, meg kell azonban jegyeznünk, hogy ez a legpontosabban meghatározható paraméter.

Mindezeket szem előtt tartva, elkészítettük a vizsgált területek közötti elméleti szelvényünket (35. ábra), majd egy táblázatban összegeztük az egyes képződmények

hidrogeológiai paramétereit (9. táblázat), amelyeket a numerikus szimuláció során felhasználtunk. Mivel a modellezés során törekedni kell arra, hogy a lehető legegyszerűbb módon írjuk le az áramlási teret (KOVÁCS, 2004), ezért a hidraulikus vezetőképesség szempontjából hasonló képződményeket a modellezés során összevontuk, hiszen ezek a vízáramlás szempontjából megközelítőleg azonos módon viselkednek. Hasonló módon jártunk el a pannóniai képződmények esetében is: az 5-10 méterenként megjelenő agyagos betelepülésektől mint lokális heterogenitásoktól az áramtér modellezésénél eltekintettünk, mivel ezek a trend szempontjából nem lényegesek, jelentőségük lokálisan van.

9. táblázat: Az egyes képződményekhez rendelt hidrogeológiai paraméterek

Képződmény		Horizontális hidraulikus vezetőképesség (K_h)	Vertikális hidraulikus vezetőképesség (K_v)	Porozitás (n)
Maar-tavi üledékek	Tőzeges lápi agyag	10^{-7} m/s	10^{-8} m/s	0,35
	Áthalmozott maar-tavi finomtörmelékes képződmények			
Maar-peremi képződmények	Tefragyűrű	$5 \cdot 10^{-6}$ m/s	$5 \cdot 10^{-7}$ m/s	0,25
Maar-szerkezetet kitöltő képződmények	Stromboli-típusú kitörésekből származó salakkúpok áthalmozott törmelékei (felső-diatréma)	10^{-6} m/s	10^{-7} m/s	0,15
	Freatomagmás kitörés piroklasztjai (alsó-diatréma)			
Vulkanizmus előtt kialakult képződmény	Pannóniai s.l. üledékes kőzetek	10^{-5} m/s	10^{-6} m/s	0,25



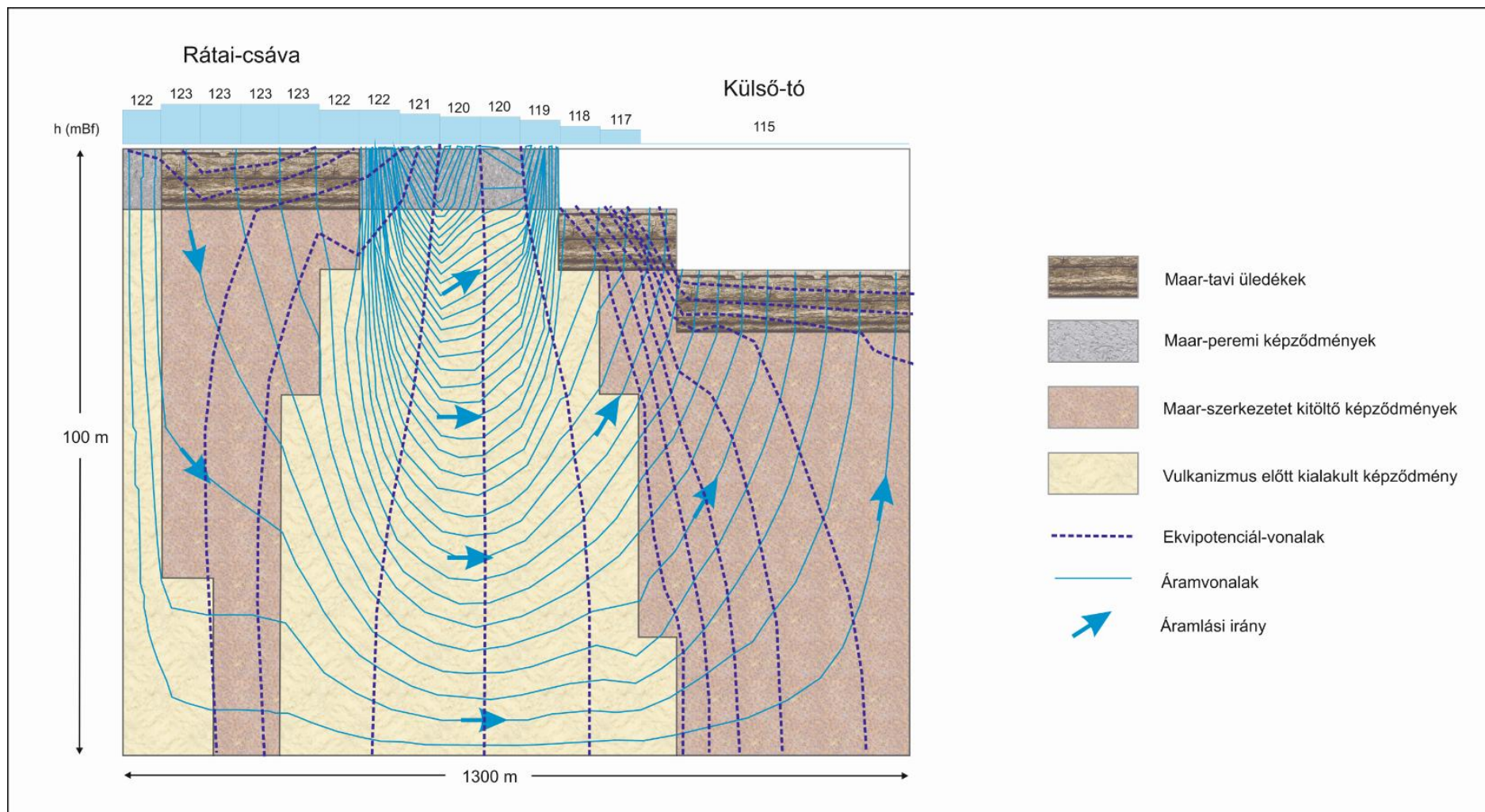
35. ábra: A Rátai-csáva és a Külső-tó között felvett szelvény, amely a numerikus modell alapját képezte

4.2.2.3. Futtatások különféle talajvízszint és alsó agyagréteg scenáriókra

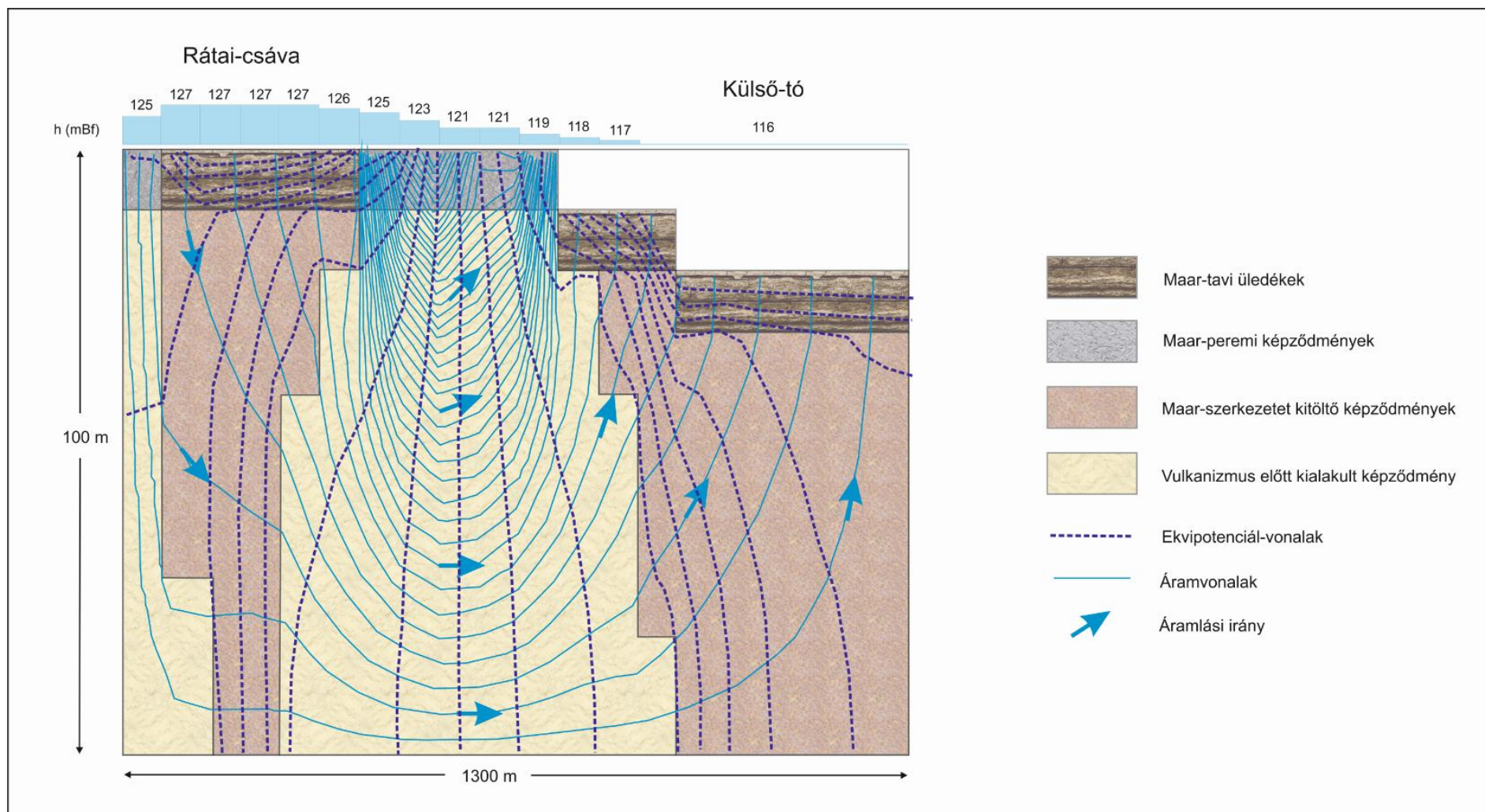
A Külső-tó és a Rátai-csáva közötti felszín alatti hidraulikus kapcsolat szemléltetésére a kétdimenziós numerikus modellezést két különböző talajvízszint scenárióra végeztük el. Első lépésként a térség aktuális (2011 novemberében mért) vízszintadataival dolgoztunk. Ennek megfelelően a Rátai-csáva alatt 123 mBf-ben határoztuk meg a talajvíztükör magasságát, a Külső-tó vízszintjét 115 mBf-nek vettük. Mivel a talajvíztükör többé-kevésbé követi a felszíni domborzatot (HUBBERT, 1940), ezért a két vizsgált tó között a hidraulikus emelkedési magasság értékeket ennek megfelelően definiáltuk. A szimuláció elvégzése után a kapott eredményt a 36. ábra szemlélteti. A várakozásoknak megfelelően a Rátai-csáva környezetében beszivárgó víz a Külső-tóban csapolódik meg. Az egyes képződmények eltérő hidraulikus vezetőképességei miatt az áramvonalak a képződményhatárokon megtörnek. Az összletek közül a tefragyűrű rendelkezik a legnagyobb szivárgási tényezővel, ezért az áramvonalakat besűrűsíti. A legkisebb K-tényezővel a maar-szerkezeteket kitöltő képződmények rendelkeznek, ezért a vízáramlás intenzitása a legkisebb, amit a ritkább áramvonalak is jeleznek.

A következő modellhez a potenciométerekben megfigyelt legmagasabb vízszintadatokat használtuk fel. Az őszi csapadékmaximumot követően a Rátai-csávéban a talajvíztükör közel 4 métert emelkedett: ennek következtében a lokális depresszió 2011 januárjában időszakosan vízzel borítottá vált. Ezzel egy időben, a Külső-tó potenciométereiben kevesebb mint 1 méter vízszintemelkedést figyeltünk meg. A második modellünket erre az időszakra vonatkoztatva készítettük el. Az előző állapothoz képest nem mutatkozott jelentős eltérés az áramképben, azonban a megnövekedett hidraulikus gradiens miatt az ekvipotenciál-vonalak besűrűsödtek, vagyis a két tó között intenzívebbé vált a felszín alatti vízáramlás (37. ábra).

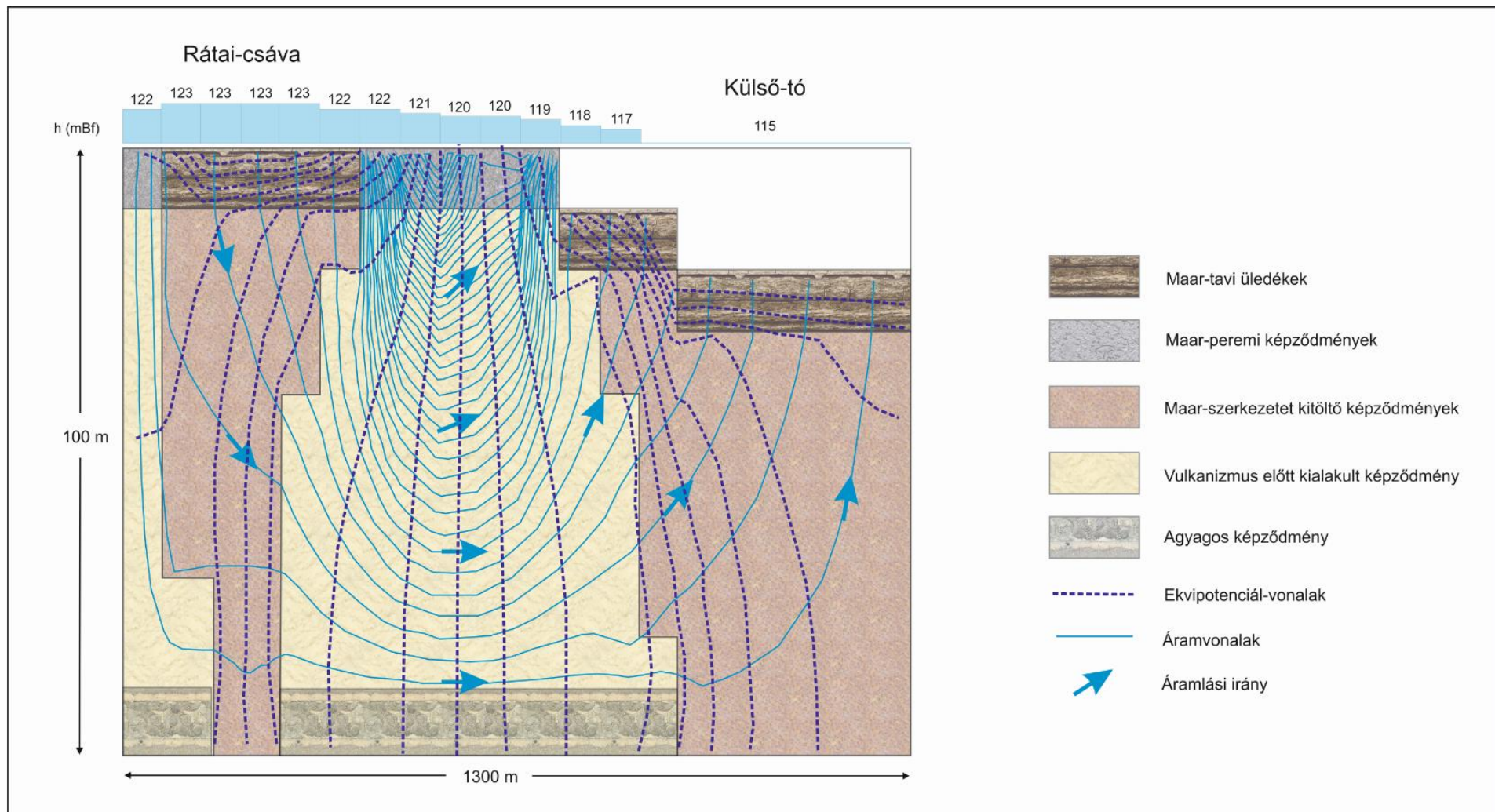
A harmadik esetben azt vizsgáltuk meg, hogy ha a pannóniai képződmények alján egy összefüggő agyagos réteget feltételezünk, az hogyan módosítja az áramképet. Az agyagréteg hidraulikus tulajdonságait FREEZE & CHERRY (1979) alapján határoztuk meg: $K_h = 10^{-8}$ m/s, $K_v = 10^{-9}$ m/s, $n=0,3$. Ilyen feltételek mellett azt tapasztaltuk, hogy a modellbe helyezett agyagos réteg vízrekesztőként viselkedik, és korlátozza a vízáramlásra alkalmas terület nagyságát (38. ábra).



36. ábra: Az első, száraz időszakra lefuttatott modell eredménye



37. ábra: A második, magas talajvíztükör állapotra lefuttatott modell eredménye



38. ábra: A harmadik lefuttatott modell eredménye

4.2.3. A szimuláció eredményeinek értékelése

A kétdimenziós szimuláció általunk megadott paraméterekkel való futtatása során hipotézisünk, miszerint a két maar-szerkezetben elhelyezkedő tó között felszín alatti összeköttetés lehetséges, beigazolódott.

A Rátai-csáva környezete mint beáramlási terület alatt a vízáramlás fluxus vektorának vertikális komponense lefelé mutat, a Külső-tóban megcsapolódó felszín alatti vizet a fluxus vektor felfelé mutató komponense jelzi. A hidraulikus kapcsolatot a két területet összekötő áramvonalak bizonyítják.

Az eltérő talajvíz scenáriók esetén futtatott modellek között nem tapasztaltunk jelentős eltérést, azt azonban megfigyelhetjük, hogy a két terület csapadékos időszakot követő, eltérő talajvíztükör emelkedésének következtében megnövekvő hidraulikus gradienst a modellünk is jól szemlélteti a besűrűsödő ekvipotenciál-vonalakkal.

Az alsó agyagréteggel elvégzett szimuláció egy, a mélység irányában korlátozott kapcsolattal rendelkező áramteret jelez. Ez azonban hipotetikus, a szarmata mészkő jelenléte a modellezett térrész alatt valószínűsíti a mélységi kapcsolatot.

5. Következtetések és diszkusszió

A korábbi munkák megmutatták, hogy a Rátai-csáva, valamint a Külső-tó, az egykori kitörési központok által létrehozott szerkezetben foglalnak helyet (NÉMETH et al., 2001). A vizsgált területeken létesített fúrások mintáinak szemcseeloszlás vizsgálatából meghatározott hidraulikus vezetőképesség értékei ($K=10^{-8}$ és 10^{-6} m/s) arra utalnak, hogy a felszín közeli képződmények domináns frakciói az agyag, kőzetliszt és alárendelten finomhomok.

A maar-szerkezetek különféle fáciesű részei geofizikai módszerek alkalmazása révén váltak térképezhetővé. Az RMT mérésekkel az ellenállás-értékeket figyelembe véve a kráterperemet alkotó képződmények, a maar-tavi üledékek és a diatréma-szerkezetet kitöltő képződmények elkülöníthetők. Ezek hidraulikus vezetőképességét – konkrét irodalmi adatok hiányában – egy, a területre specifikusan levezetett lineáris összefüggés segítségével az ellenállás-értékekből számítottuk ki. Az eredmények hozzájárultak a hidrosztratigráfiai viszonyok tisztázásához és akár egyéb maar-területeken is analógiaként használhatók.

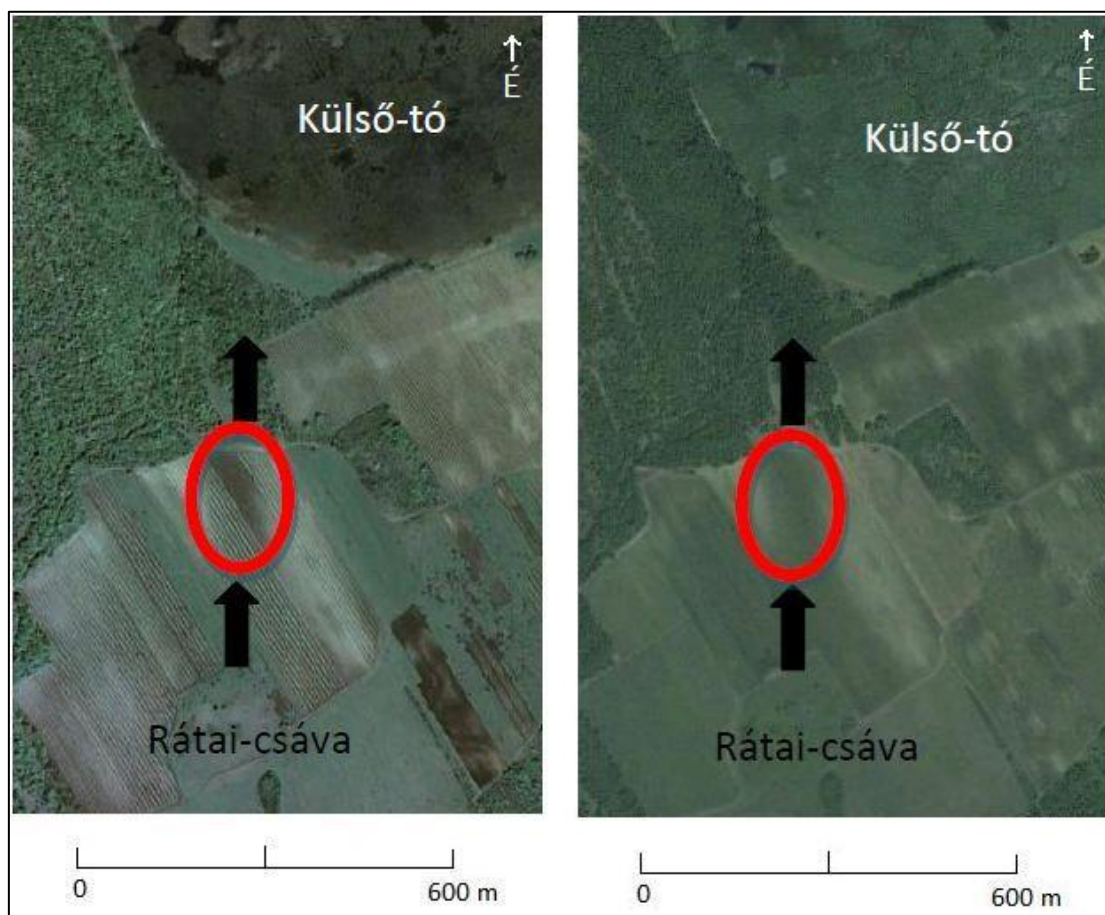
A kialakított potenciométerekben 2010 óta rendszeresen mért vízszintváltozások mértékét összevetve a területre vonatkozó csapadékadatokkal, megállapítottuk, hogy a magasabban fekvő Rátai-csáva környezete beáramlási terület, ennek megfelelően érzékenyebben reagál a csapadékmennyiség változására: a legmagasabb és a legalacsonyabb vízszintek között körülbelül 4 méter különbséget tapasztaltunk.

A mélyebb fekvésű Külső-tó, egyértelműen kiáramlási területnek felel meg mind a hidraulikai adatok, mind a környező vegetáció (PÉNTÉK, 2011) szempontjából. Vízkémiai vizsgálataink a bazaltvulkáni környezetre jellemző Mg^{2+} dúsulást és kalcium – magnézium illetve kalcium – nátrium kationfáciest mutattak. Az anionokat tekintve hidrogénkarbonát – klorid – szulfát fácies dominált.

Mivel a két terület közötti magasságkülönbség gravitációs áramlást indukálhat, a potenciométerek vízszintadatait felhasználva, és a képződményeket a megfelelő hidraulikus vezetőképesség és porozitás értékekkel ellátva, a peremfeltételek tisztázását követően kétdimenziós numerikus áramkép szimuláló szoftver segítségével igazoltuk feltevésünket, mely szerint a két terület hidraulikus kapcsolatban áll egymással. A kapott elméleti eredményeink helyességét a terepen megfigyelt bélyegekkel, folyamatokkal hitelesítettük.

A szimulált vízáramlási képben feltűnő a maar-peremi képződmények áramvonalakkal sűrűn átjárt térrésze: ezek az összletek jó vízvezető zónát alkotnak, amely körülbelül 10 méter mélységig lehatoló sekély áramlásokat okoz a Rátai-csáva északi területeitől egészen a Külső-tóig.

Űrfelvételeket vizsgálva megfigyeltük, hogy Rátai-csáva és a Külső-tó között megjelenik egy sötétebb zóna a növényzetben (39. ábra).

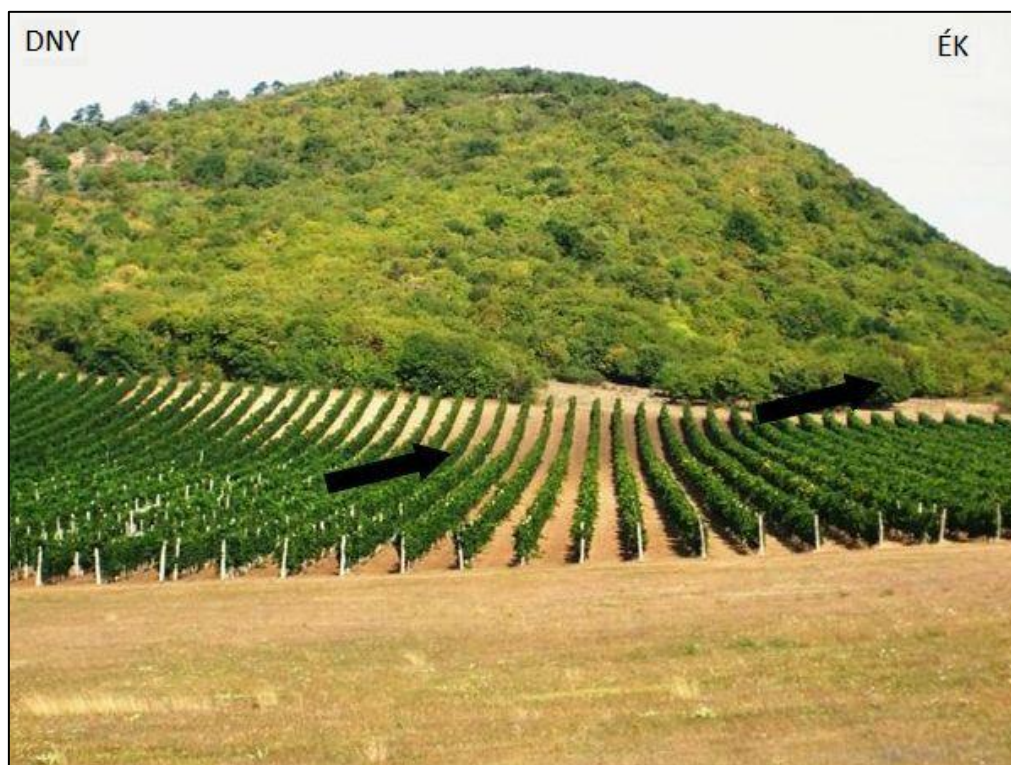


**39. ábra: A vízvezető csatornaként értelmezhető zóna űrfelvételeken
2007. április 16. és 2007. július 1.
[Google Earth]**

A felszín alatti víz környezeti hatótényező (TÓTH J., 1999), ezért felszínre gyakorolt hatásai vegetációs és talajtani viszonyokban is nyomozhatók. Feltételezésünk szerint a felvételeken megjelenő nedvesebb zóna a magas hidraulikus vezetőképességi értékekkel jellemzett maar-peremi képződményeknek köszönhető, amely elvezetheti a Rátai-csáva vizét a tőle északra elterülő Külső-tóba (TÓTH Á., 2011).

Ezt valószínűsíti, hogy a Csáva a félsziget legmagasabb topográfiai helyzetű területének lokális depressziójában helyezkedik el, így gravitáció hatására vízáramlás indukálódik a mélyebben fekvő Külső-tó irányába. A közöttük elhelyezkedő magas szivárgási tényezőjű összlet a vízáramlás egy részét a felszín közelébe koncentrálna. Ezen jelenség nyomait nemcsak a 2007-es űrfelvételeken láthatjuk, hanem a területen terepi méréseink során is megfigyeltük (40. ábra).

A Külső-tó területén megcsapolódó felszín alatti vízre további bizonyítékkal szolgálhat az, hogy a 2011 szeptemberi hidrogeológiai terepgyakorlat során a Külső-tó délnyugati, Rátai-csáva felőli partvonalán mélyített Kp7 jelű fúrásban az agyagos képződményből a fúrás során vízfeltörést tapasztaltunk. Ezt a kiáramlási területek alatt megnövekedett nyomás gradienssel magyarázhatjuk.



40. ábra: A vízvezető zóna felszínre gyakorolt hatása a Rátai-csávában (Fotó: TÓTH Á.)

6. Összefoglalás és javaslatok

A Tihanyi-félsziget maar-tavainak vizsgálata során archív adatfeldolgozást, hidraulikai, vízkémiai, geofizikai méréseket, hidrogeológiai térképezést és 2D numerikus modellezési módszert alkalmaztunk. A területen a kutatás érdekében létesített sekélyfúrások mintáiból szemcseeloszlás vizsgálatokat végeztünk és a kiképzett ideiglenes potenciométerekben vízszint, vízkémiai észleléseket végeztünk. Ezekből az adatokból hidraulikai számításokat, vízszintváltozásokra vonatkozó elemzéseket és vízkémiai értékelést készítettünk. A rádió-magnetotellurikus (RMT) méréseket a hidrosztratigráfiai viszonyok tisztázására használtuk. Végezetül a két tó közötti kapcsolatot 2D numerikus áramkép szimulációval értékeltük. A kapott eredményeket alapján a dolgozat kapcsán megválaszolandó kérdéseinkre a következő hidrogeológiai modell állítható fel.

A félsziget legmagasabb topográfiai helyzetű területének depressziójában helyet foglaló Rátai-csáva, a félsziget szempontjából regionális beáramlási terület lokális kiáramlási területe. Csapadékhányos időszakban a talajvízszint e beáramlási területen mélyen fekvő, még a lokális depresszióban is több mint 3 m mélységű. Ugyanakkor a Csáva térségében a felszín alá szivárgó és a talajvízszintet elérő víz a 11,5 méteres topográfiai szintkülönbség által indukált hidraulikus gradiensnek – amely száraz időszakban $1,06 \cdot 10^{-2}$, csapadékos időszakban $1,46 \cdot 10^{-6}$ értéknek adódott – köszönhetően gravitációs felszín alatti áramlás során eljut a Külső-tó mélyebben fekvő medencéjéig. A két tó között a topográfiai lejtést tompítottan követő talajvízszint feltételezhető. Csapadékosabb időszakokat követően (a vizsgált időszakban: 2010 ősze és tele, 2011 év első fele) a Rátai-csáva mint lokális kiáramlási terület alatt a talajvíztükör olyannyira megemelkedik, hogy a depresszió legmélyebb része időszakosan vízzel borítottá válik, azaz időszakos tóként funkcionál. A Külső-tó ugyanakkor a Csávához képest egy mélyebb fekvésű medencében található depresszió. E kiáramlási területen a tó állandó fennmaradása a felszín alatti víz-hozzááramlás révén folyamatosan biztosított, hiszen a tó környezetében a talajvízszint gyakorlatilag a tó szintjének megfelelő. Ez az oka annak, hogy ez a tó kevésbé reagál a nedvességi viszonyok változásaira. A Rátai-csávnál csapadékosabb időben megnövekedő talajvízszint a hidraulikus gradiens növekedését eredményezi, és ez által a Külső-tóba intenzívebb felszín alatti vízbeáramlást okoz. A Külső-tó Rátai-csáva felőli partján telepített potenciométerben észlelt

vízfeltörés mellett a modellezett áramképeken is látszik az intenzív áramlást jelző gradiens növekedés.

A kémiai eredmények összevetése során megfigyeltük továbbá, hogy a Rátai-csávéban és a Külső-tó Rátai-csáva felőli potenciométereiben vizsgált vízminták összes oldott iontartalma eltér egymástól: a Külső-tó partján mintázott vizek összes oldott anyagtartalma körülbelül 100 mg/l-rel meghaladja a Rátai-csávéban mért értékeket, ami hosszabb felszín alatti tartózkodásra utal.

Dolgozatunk eredményei a tanszéki kutatások első fázisát jelentik. Ugyanakkor számos tekintetben hoztak új eredményeket: (1) a maar-vulkanizmushoz köthető vulkanoszedimentek hidrosztratigráfiai értékelése; (2) a kutatások bizonyítják a két tó viszonylatában a felszín alatti hidraulikai kapcsolatot; (3) ebből következik, hogy a tavakra vonatkozó vízmérleg számításoknál a felszín alatti vízhozzájárulást kvantitatív módon figyelembe kell venni. A terület természetvédelmi kezelésénél a tavak megőrzését ezen új hidrogeológiai modell figyelembe vételével érdemes végezni.

A dolgozat kapcsán felmerült a félsziget felszín alatti vizeinek és a Balaton kapcsolatának, valamint a félsziget belsejében helyet foglaló tavak és a Balaton közötti kapcsolat megértésének fontossága. Ezen az úton haladva a további kutatások erre is választ adhatnak.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani témavezetőnknek, MÁDLNÉ DR. SZŐNYI JUDITnak a téma felvetéséért, a hidrogeológiai terepgyakorlati háttér biztosításáért, a terepi kutatás lehetőségéért, a dolgozat megírása szempontjából fontos útmutatásaiért, tanácsaiért és a konzultációkért.

DR. SZTANÓ ORSOLYÁnak, az Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék docensének a hasznos tanácsaiért, javaslataiért mondunk köszönetet.

Köszönettel tartozunk PROF. DR. MÜLLER IMRÉnek a terepi mérések kivitelezésében való közreműködéséért, a kiértékelő programok hozzáférhetőségéért, az értelmezés során adott tanácsaiért, ötleteiért.

VARGA ANDRÁSnak, az Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék vegyésztechnikusának a vízkémiai és a szemcseeloszlás vizsgálatok során nyújtott segítségéért vagyunk hálásak.

DR. KOVÁCS BÉLÁnak, a Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék adjunktusának a potenciométerek szintezéséért tartozunk köszönettel.

PALOTAI MÁRTONnak, az Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék tanársegédjének a geofizikai mérések eredményeit szemléltető háromdimenziós tömbszelvény elkészítését szeretnénk megköszönni.

A háromdimenziós topográfiai terepmodell nem jöhetett volna létre KIRÁLY ÁGNES geofizikus MSc hallgató segítségével nélkül.

Köszönettel tartozunk DR. HARANGI SZABOLCSNAK, a Közettani és Geokémiai Tanszék vezetőjének és ZACHÁRY DÓRA PhD hallgatónak, hogy rendelkezésünkre bocsátották a témához szükséges vulkanológiai szakirodalmat.

Köszönjük VERS JÓZSEFnek, a Balaton-felvidéki Nemzeti Park Igazgatóság munkatársának, hogy az építésföldtani fúrások rétegsorait rendelkezésünkre bocsátotta.

Végül szeretnénk megköszönni 2. éves geológus MSc hallgatótársainknak, továbbá ZSEMLE FERENC, Dr. ERŐSS ANITA és PULAY ESZTER oktatóknak, hogy a hidrogeológiai

terepgyakorlati munkájukkal hozzájárultak kutatásaink terepi adatháttéréhez. PÉNTEK CSILLÁnak külön köszönjük a fotókat, és az archív vízszintadatokat.

8. Irodalomjegyzék

- ANDERSON, M. P. & MUNTER, J. A. 1981: Seasonal Reversals of Groundwater Flow Around Lakes and the Relevance to Stagnation Points and Lake Budgets. *Water Resources Research*, 17, pp. 1139-1150.
- BALOGH, K. & NÉMETH, K. 2005: Evidences of the Neogene small-volume intracontinental volcanism in Western Hungary: K/Ar geochronology of the Tihany Maar Volcanic Complex. — *Geologica Carpathica* 56 (1), pp. 91-99.
- BUDAI, T. & VÖRÖS, A. 1992: Middle Triassic history of the Balaton Highland: extensional tectonics and basin evolution. — *Acta Geologica Hungarica* 35 (3), pp. 237–250.
- BUDAI, T. & HAAS, J. 1997: Triassic sequence stratigraphy of the Balaton Highland, Hungary. — *Acta Geologica Hungarica, Budapest* 40 (3), pp. 307–335.
- CSÁSZÁR, G. & LELKESNÉ-FELVÁRI, G. 1999: Balatoni Fillit Formációcsoport (Balaton Phyllite Formation group). — In: BUDAI, T. & CSILLAG, G. (Eds): *A Balaton-felvidék földtana (Geology of the Balaton Highland)[in Hungarian and English]*, Geological Institute of Hungary, Budapest, pp. 15–21.
- FISCHER G., SCHNEGG P. A., PEGUIRON M. & LEQUANG B. V. 1981: An analytic one-dimensional magnetotelluric inversion scheme – *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 67, pp. 257-278.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979: *Groundwater*. Prentice Hall, Engwood Cliffs, New Jersey, 604 p.
- HAAS, J. & BUDAI, T. 1999: Triassic sequence stratigraphy of the Transdanubian Range (Hungary). — *Geologica Carpathica* 50 (6), pp. 459–475.
- HAAS, J., HÁMOR, G. & KÖRPÁS, L. 1999: Geological setting and tectonic evolution of Hungary. — *Geologica Hungarica series, Geologica* 24, pp. 179–196.
- HORVÁTH, F., SACCHI, M. & DOMBRÁDI, E. 2010: A Pannon-medence üledékeinek szeizmikus sztratiográfiai és tektonikai vizsgálata a Dél-Dunántúl és a Balaton területén. – *Földtani Közlöny* 140/4, pp. 391-418.

- HUBBERT, M. K. 1940: The theory of groundwater motion. *Journal of Geol.*, 48., pp. 785-944.
- KOVÁCS B. 2004: Hidrodinamikai és transzportmodellezés Processing MODFLOW környezetben I., Miskolci Egyetem – Szegedi Tudományegyetem –GÁMAGEO, 160 p.
- LÁNG G. & FODOR T. 1970: A Tihanyi félsziget földtani felépítése. – in BILIK I. (szerk.): Tihany – Magyarázó a Balaton és környéke 1:10 000 építésföldtani térképsorozathoz. - *Magyar Állami Földtani Intézet*, Budapest, pp. 15-36.
- LÁNGNÉ B. E. 1970: Vízföldtan és vízkémia. – in BILIK I. (szerk.): Tihany – Magyarázó a Balaton és környéke 1:10 000 építésföldtani térképsorozathoz. - *Magyar Állami Földtani Intézet*, Budapest, pp. 47-62.
- MEYBOOM, P. 1967: Mass transfer studies to determine groundwater regime of permanent lakes in hummocky moraine of western Canada. *Journal of Hydrology*, 5, pp. 117-142.
- MÜLLER I., SZÖNYI J. & ERŐSS A. 2008: Local scale EM geophysical survey to estimate hydrogeological parameters related to environmental problems. *Georgikon for Agriculture*, vol. 16 no.1. pp. 39-49.
- NÉMETH, K. & MARTIN, U. 1999A: Large hydrovolcanic field in the Pannonian Basin: general characteristics of the Bakony – Balaton Highland Volcanic Field, Hungary.— *Acta Vulcanologica* 11/2, pp. 271–282.
- NÉMETH, K., MARTIN, U. & HARANGI, SZ. 2001: Miocene phreatomagmatic volcanism at Tihany (Pannonian Basin, Hungary). – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 111 (1-4), pp. 111-135.
- NÉMETH, K. & MARTIN, U. 2004: Phreatomagmatic volcanic fields in a Mio/Pliocene fluvio-lacustrine basin, western Pannonian Basin, Hungary: a review. *Geologica Hungarica series, Geologica* 26, pp. 12–56.
- OSKOOI, B. & PEDERSEN, L. B. 2005: Comparison between VLF and RMT methods. A combined tool for mapping conductivity changes in the sedimentary cover – *Journal of Applied Geophysics* 57, pp. 227-241.

- PÉCZELY, GY. 1970: A Tihanyi-félsziget éghajlata. – in BILIK I. (szerk.): Tihany – Magyarázó a Balaton és környéke 1:10 000 építésföldtani térképsorozathoz, *Magyar Állami Földtani Intézet*, Budapest, pp. 42-46.
- PÉNTÉK Cs. 2011: A Tihanyi-félsziget vízviszonyainak és vegetációs mintázatának változásai a 18. századtól napjainkig. MSc szakdolgozat, ELTE TTK Környezettudományi Centrum. 79 p.
- SACCHI, M., CSERNY, T., DÖVÉNYI, P., HORVÁTH, F., MAGYARI, O., MCGEE, T.M., MIRABILE, L. & TONIELLI, R. 1998: Seismic stratigraphy of the Late Miocene sequence beneath Lake Balaton, Pannonian basin, Hungary. – *Acta Geol. Hung.*, 41 (1), pp. 63-88.
- SACCHI, M., HORVÁTH, F., & MAGYARI, O. 1999: Role of unconformity-bounded units in the stratigraphy of the continental record: a case study from the Late Miocene of the western Pannonian basin, Hungary. In: DURAND, B., JOLIVET, L., HORVÁTH, F. & SÉRANNE, M. (eds): *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*. – Geological Society, London, Special Publications, 156, pp. 357-390.
- SCHMIDT, E. (szerk.) 1960: Magyarország vízföldtani atlasza. – SELYEM A. & REGENYE J. 2002: Az évezredek óta lakott Tihany. – in FUTÓ J. (szerk.): *A Tihanyi-félsziget. - A Balaton-felvidék természeti értékei III., BFNPI Igazgatóság, Veszprém, 2002*, pp. 99-108.
- STIEFELHAGEN, W. & MÜLLER, I. 1997: Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM) – extended VLF applied to hydrogeology. – 59th EAGE Conference & Technical Exhibition, Geneva, Switzerland, May 26–30, 1997. Extended abstract, F-46.
- TÓTH, Á. 2011: RMT-mérések a tihanyi-félszigeti Rátai-csávéban. BSc Szakdolgozat, ELTE TTK Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 65 p.
- TÓTH, J. 1984: The Role of Regional Gravity Flow in the Chemical and Thermal Evolution of Ground Water. First Canadian/American Conference on Hydrogeology, Practical Applications of Ground Water Geochemistry, pp. 3-39.
- TÓTH, J. 1999: Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7/1, pp. 1-14.

- TURBERG, P. 1994: Apport de la cartographie radiomagnetotellurique à l'hydrogéologie des milieux fracturés. Tese de Doutoramento, Université de Neuchâtel, Neuchâtel, p. 132.
- VAN ELBURG, H., ENGELEN G. B. & HEMKER, C. J. 1992: FLOWNET version 5.12 User's manual: microcomputer modeling of two-dimensional steady state groundwater flow in a rectangular heterogeneous anisotropic section of the subsoil. 31 p.
- VARRÓK, K. 1957: Jelentés az 1957. évben a Tihanyi-félszigeten végzett munkáról. Kézirat, Magyar Állami Földtani Intézet, Adattár, pp. 3-12.
- WINTER, T. C. 1976: Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and groundwater. U.S. Geol. Surv. Professional Paper, 1001, p. 45.
- WINTER, T. C. 1983: The interaction of lakes with variably saturated porous media. Water Resources Research, 19, pp. 1203-1218.
- WINTER, T. C., HARVEY, J. W., LEHN FRANK, O. & ALLEY, W. M., 1998: Ground Water and Surface Water – A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139.

9. Ábrajegyzék

1. ábra: A Rátai-csáva és a Külső-tó elhelyezkedése a Tihanyi-félszigeten
2. ábra: A tó és felszín alatti víz kapcsolatának típusai (WINTER et al, 1998)
A: megcsapoló, B: rátápláló, C: átfolyó jellegű tó.
3. ábra: A csapadék hatása a talajvíztükör domborzatára (WINTER et al., 1998)
4. ábra: Felszín alatti vízáramlási rendszer két permanens tó körül tavasszal (a), nyáron (b, c), ősszel és télen (d). (MEYBOOM, 1967 alapján)
5. ábra: A vulkanikus tevékenység nyomai a Tihanyi-félszigeten (készült NÉMETH et al. 2001 nyomán)
6. ábra: A Külső-tó és Rátai-csáva környezetének domborzati viszonyai
7. ábra: A hidraulikus gradiens szerepe az áramlásokban (FREEZE & CHERRY, 1979)
Ugyanolyan mélységű mérési pontok esetében a hidraulikus emelkedési magasságok viszonya az áramlás vízszintes (a és b eset), míg különböző mélységbe szűrőzött kutak esetében a függőleges komponensét (c és d eset) adja meg.
8. ábra: Az RMT mérés értelmezése egy és két réteg esetére, amennyiben a mért ellenállás értéke $100 \Omega m$ (készült MÜLLER nyomán)
9. ábra: A vizsgált területeken létesített potenciométerek
10. ábra: A Rátai-csáva területén végzett hidraulikai számítás 2011. november 19-én mért vízszintek alapján
11. ábra: Háromszögmódszer alkalmazása a Külső-tó partján létesített potenciométerekre (2011. november 19-én mért vízszintek alapján)
12. ábra: Háromszög módszer alkalmazása a Külső-tó partján létesített potenciométerekre (2011. november 19-én mért vízszintek alapján)
13. ábra: A Külső-tó és a Rátai-csáva közötti terület ekvipotenciál-térképe száraz időszakra vonatkoztatva

14. ábra: Havi csapadékadatok 2010 januártól 2011 októberig. (Siófoki meteorológiai állomás csapadékadatai, forrás: VITUKI)

15. ábra: A Rátai-csáva potenciométereiben mért vízszintváltozások

16. ábra: A Rátai-csáva 2011 januárjában (Fotó: PÉNTEK)

17. ábra: A Rátai-csáva 2011 szeptemberében (Fotó: FÜLÖP)

18. ábra: A Külső-tó potenciométereiben mért vízszintváltozások

19. ábra: A kationok és anionok aránya a vizsgált vízmintákban

20. ábra: A Külső-tó partján létesített potenciométerek vízmintáinak kémiai összetétele

21. ábra: A Rátai-csávában létesített potenciométerek vízmintáinak kémiai összetétele

22. ábra: A vízminták kémiai összetételének ábrázolása Piper-diagramon

23. ábra: A mérési pontok helye a Rátai-csávában – az eltérő színek az egyes szelvényeket jelölik (Google Earth)

24. ábra: Az ellenállás-fázis pontok által alkotott értéktartományok a 2010 és 2011-es mérési eredmények felhasználásával

25. ábra: Az ellenállás-fázis pontok által alkotott értéktartományok a 2010-es mérési eredmények felhasználásával

26. ábra: Az RMT mérések eredményeiből készített tömbszelvény (EOV koordinátarendszerben, 4 szelvényt felhasználva)

27. ábra: A Külső-tó délnyugati oldalán felvett mérési pontok helye [Google Earth]

28. ábra: A Külső-tó partján végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés ~0,8x-os túlmagasítással. A piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik

29. ábra: A Külső-tó partján végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés túlmagasítás nélkül. A piros számok a mérési pontokat, a feketék az ellenállásértékeket jelölik.

30. ábra: A Külső-tó partján végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés ~3,6x-es túlmagasítással. A piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik.

31. ábra: Az RMT mérésekből meghatározott fajlagos elektromos ellenállások és a hidraulikus vezetőképesség közötti közelítő összefüggés (Müller et al., 2008)

32. ábra: A modellezés alapját képező szelvény nyomvonala

33. ábra: A Balaton környéke 1:10 000 építésföldtani térképsorozat szelvénye (Magyar Állami Földtani Intézet, 1969 után módosítva)

34. ábra: A vizsgált területen mélyített építésföldtani fúrások (LÁNG, 1970 után módosítva)

35. ábra: A Rátai-csáva és a Külső-tó között felvett szelvény, amely a numerikus modell alapját képezte

36. ábra: Az első, száraz időszakra lefuttatott modell eredménye

37. ábra: A második, magas talajvíztükör állapotra lefuttatott modell eredménye

38. ábra: A harmadik lefuttatott modell eredménye

39. ábra: A vízelvezető csatornaként értelmezhető zóna űrfelvételeken 2007. április 16. és 2007. július 1. [Google Earth]

40. ábra: A vízelvezető zóna felszínre gyakorolt hatása a Rátai-csávéban (Fotó: TÓTH Á.)

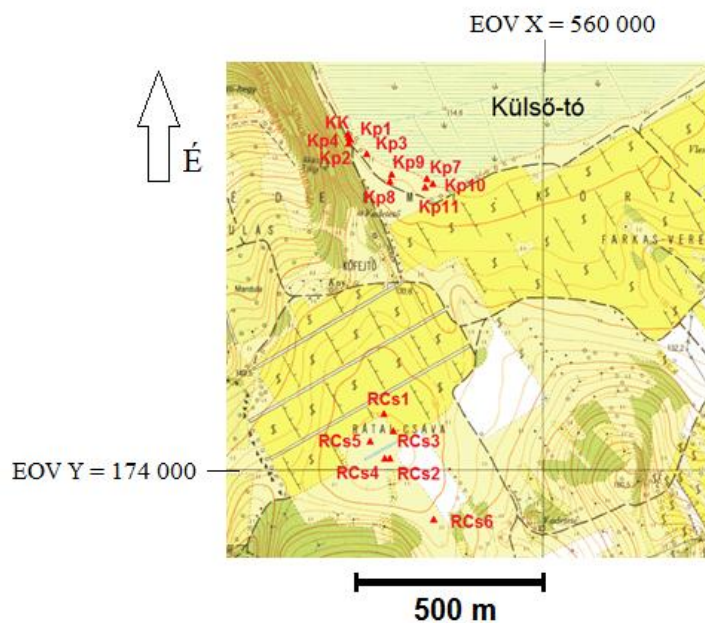
10. Táblázatjegyzék

1. táblázat: A fúrési mintákból meghatározott szivárgási tényezők, Külső-tó
2. táblázat: A fúrési mintákból meghatározott szivárgási tényezők, Rátai-csáva
3. táblázat: A vízkémiai elemzés összesítő eredményei (2011 szeptemberi vízminták)
4. táblázat: A vízkémiai elemzés eredményei (Külső-tó)
5. táblázat: A vízkémiai elemzés eredményei (Rátai-csáva)
6. táblázat: A vízminták összes oldott iontartalma
7. táblázat: A Th.36 építésföldtani fúrás rétegsora
8. táblázat: A területen mélyített építésföldtani fúrások rétegsorai
9. táblázat: Az egyes képződményekhez rendelt hidrogeológiai paraméterek

11. Mellékletek

1. számú melléklet – A Rátai-csávában és a Külső-tó partján létesített potenciométerek EOY koordinátái

Kút azonosítója	EOV X koordináta	EOV Y koordináta	Csóperem tengerszint feletti magassága (mBf)	Kiállás (m)	Talpmélység terepszinttől (m)	Talp tengerszint feletti magassága (mBf)
RCs1	559612,57	174119,09	126,75	0,31	0,90	125,54
RCs2	559642,87	174001,96	127,00	0,47	2,60	123,93
RCs3	559657,63	174082,24	127,23	0,40	1,20	125,63
RCs4	559627,89	174007,56	126,75	0,49	4,57	121,69
RCs5	559594,54	174052,12	126,35	0,45	4,59	121,31
KK	559536,79	174806,17	116,72	0,88	2,07	113,77
Kp1	559544,71	174790,35	116,51	0,45	1,63	114,43
Kp2	559541,83	174773,23	117,63	0,77	1,31	115,55
Kp3	559590,15	174751,60	116,41	0,78	0,58	115,05
Kp4	559544,73	174790,13	117,02	0,90	0,82	115,30
Kp7	559731,55	174687,68	117,53	1,37	1,97	114,19
Kp8	559641,63	174683,64	117,57	0,24	0,73	116,60
Kp9	559649,71	174699,27	117,33	0,51	1,55	115,27
Kp10	559745,42	174677,14	117,26	0,75	1,31	115,20
Kp11	559729,21	174667,63	117,57	0,67	2,03	114,88



2. számú melléklet – A potenciométerekben végzett vízszintmérések adatai

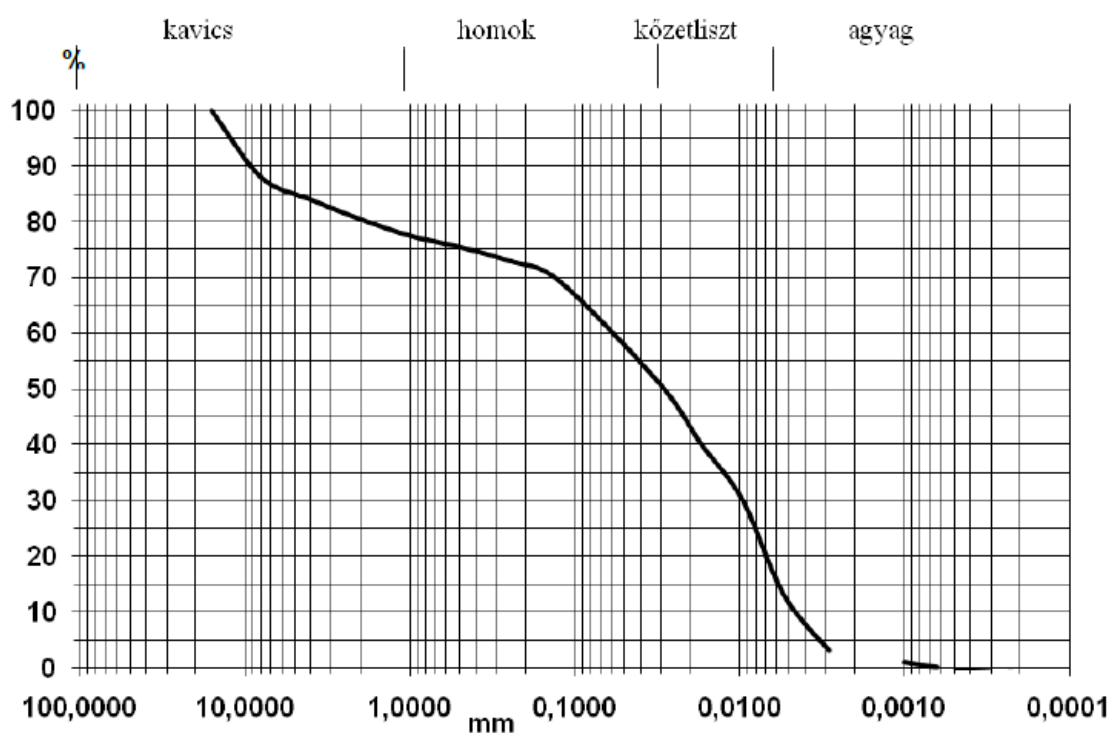
Dátum	Mért paraméter (m)	RCs1	RCs2	RCs3	RCs4	RCs5	KK	Kp1	Kp2	Kp3	Kp4	Kp7	Kp8	Kp9	Kp10	Kp11
		2010-ben telepített kutak			2011-ben telepítve	ásott kút	2010-ben telepített kutak					2011-ben telepített kutak				
2010.10.20.	nyugalmi vsz. terepszinttől	száraz	1,82	száraz			0,24	1,01	száraz	0,33	0,58					
	talpmélység terepszinttől	0,96	2,92	1,29			2,12	1,64		0,47	1,17					
	kiállás	0,34	0,43	0,41			0,85	0,43	0,77	0,73	0,90					
2011.01.17.	nyugalmi vsz. terepszinttől	0,19	0,10	0,39			nem mért									
	talpmélység terepszinttől															
	kiállás		eltört cső													
2011.02.08.	nyugalmi vsz. terepszinttől	0,29	0,39	0,74			vízben áll	0,20	1,15	vízben áll	0,34					
	talpmélység terepszinttől															
	kiállás															
2011.03.19.	nyugalmi vsz. terepszinttől	0,36	0,43	0,71			vízben áll	0,13	0,86	vízben áll	0,25					
	talpmélység terepszinttől															
	kiállás															
2011.04.17.	nyugalmi vsz. terepszinttől	0,82	0,83	1,06			vízben áll	0,13	0,86	vízben áll	0,35					
	talpmélység terepszinttől	0,97	2,75	1,25				1,62	1,29		1,19					
	kiállás	0,3	0	0,36				0,47	0,79		0,9					
2011.06.22.	nyugalmi vsz. terepszinttől	száraz	1,88	száraz			0,22	0,38	1,09	vízben áll	0,42					
	talpmélység terepszinttől	0,88	2,58	1,23			2,03	1,62	1,10		0,79					
	kiállás	0,22	0	0,25			0,68	0,39	0,74		0,76					
2011.08.10.	nyugalmi vsz. terepszinttől	száraz	2,37	száraz			0,20	0,37	1,08	nem mért	0,37					
	talpmélység terepszinttől	0,88		1,21												
	kiállás	0,32	0	0,39			0,80	0,48	0,85		0,95					

Dátum	Mért paraméter (m)	RCs1	RCs2	RCs3	RCs4	RCs5	KK	Kp1	Kp2	Kp3	Kp4	Kp7	Kp8	Kp9	Kp10	Kp11
		2010-ben telepített kutak			2011-ben telepítve		ásott kút	2010-ben telepített kutak				2011-ben telepített kutak				
2011.09.15.	nyugalmi vsz. terepszinttől	száraz	száraz	száraz	2,6	2,77	0,26	0,5	száraz	0,27	0,54	0,7	Talp nedves	1,3	0,9	1,15
	talpmélység terepszinttől	0,87	2,67	1,2	4,53	4,56	2,07	1,65	0,65	0,53	0,84	1,96	0,62	1,57	1,19	1,85
	kiállítás	0,31	0,41	0,37	0,5	0,46	0,88	0,45	0,77	0,67	0,88	1,3	0,24	0,4	0,75	0,75
2011.10.15.	nyugalmi vsz. terepszinttől	száraz	száraz	száraz	2,81	2,705	0,33	0,76	1,29	0,11	0,61	0,62	Talp nedves	1,21	0,93	1,26
	talpmélység terepszinttől	0,9	2,6	1,2	4,57	4,59	2,07	1,65	1,31	0,58	0,84	1,97	0,73	1,54	1,31	2,04
	kiállítás	0,31	0,47	0,4	0,49	0,45	0,88	0,45	0,77	0,78	0,88	1,37	0,24	0,52	0,75	0,65
2011.11.19.	nyugalmi vsz. terepszinttől	száraz	száraz	száraz	2,825	2,7	0,29	0,56	1,29	0,13	0,59	0,60	Talp nedves	1,22	0,92	1,24
	talpmélység terepszinttől	0,9	2,6	1,2	4,57	4,59	2,07	1,63	1,31	0,58	0,82	1,97	0,73	1,55	1,31	2,03
	kiállítás	0,31	0,47	0,4	0,49	0,45	0,88	0,45	0,77	0,78	0,90	1,37	0,24	0,51	0,75	0,67

**3. számú melléklet – A hidraulikai számításokhoz felhasznált 2011.
november 19-i vízszintmérési eredmények**

Potenciométer azonosítója	Nyugalmi vízszint terepszinttől mérve (m)	Nyugalmi vízszint tengerszint feletti magassága (mBf)
RCs4	2,83	123,434
RCs5	2,7	123,196
Kp2	1,29	115,580
Kp3	0,13	115,500
Kp4	0,59	115,530
Kp7	0,6	115,560
Kp10	0,92	115,590
Kp11	1,24	115,670

4. számú melléklet – A Kp1/2 fúrási magminta szemcseeloszlási görbéje



Szítási adatok

<i>d mm</i>	>32	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
%			100,0	88,0	84,0	80,5	77,5	75,5	73,0	69,5	62,0

Hidrometrálási adatok

<i>idő</i>	0,5 <i>perc</i>	2 <i>perc</i>	8 <i>perc</i>	30 <i>perc</i>	2 óra	8 óra
<i>d mm</i>		0,031	0,017	0,010	0,0054	0,0028
%		51,0	40,0	30,0	13,0	3,0

Mértékadó szemcseátmérő

(Zamarin):

0,0366 mm

Számított szivárgási tényező:

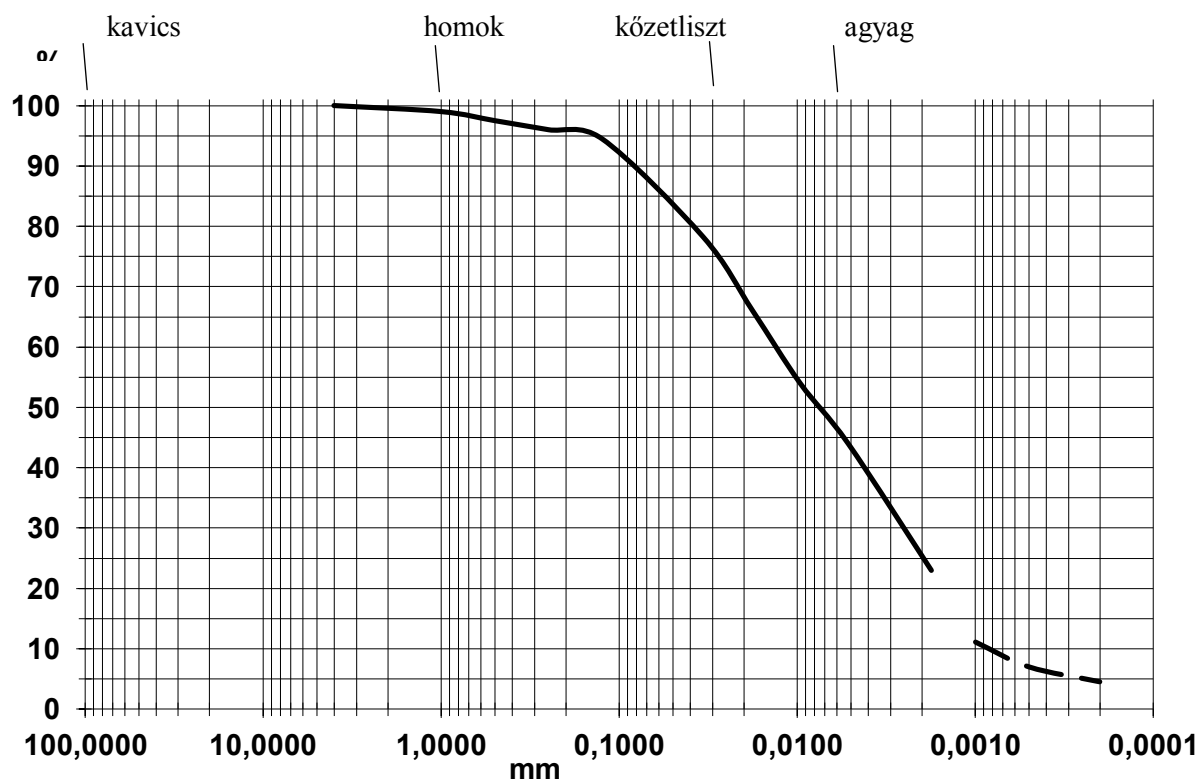
3,099E-06

m/s

0,2678

m/nap

5. számú melléklet – A Kp11/2 fúrási magminta szemcseeloszlási görbéje



Szítási adatok

<i>d mm</i>	>32	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
%					100,0	100,0	99,0	97,5	96,0	94,5	

Hidrometrálási adatok

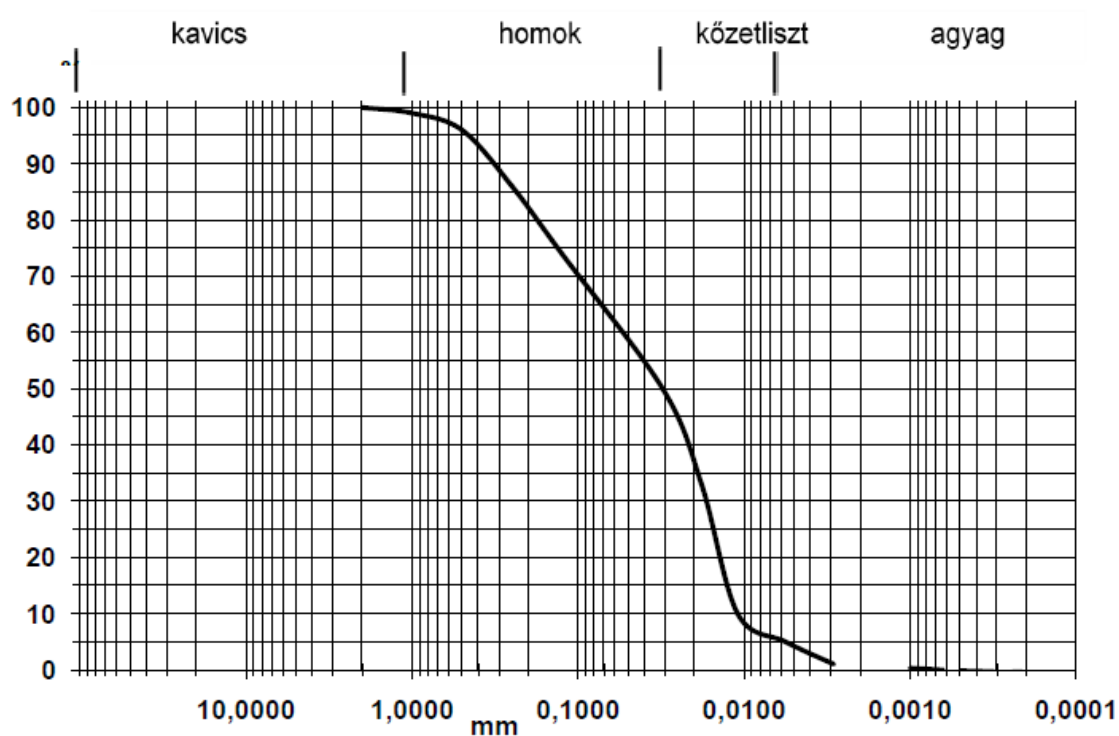
<i>idő</i>	0.5 <i>perc</i>	2 <i>perc</i>	8 <i>perc</i>	30 <i>perc</i>	2 óra	1
<i>d mm</i>		0,035	0,018	0,010	0,0052	0,0018
%		78,3	66,0	54,0	44,0	23,0

Mértékadó szemcseátmérő
(Zamarin):

0,0038 mm

Számított szivárgási tényező: 3,424E-08 m/s 0,0030 m/nap

6. számú melléklet – Az RCs3/2 fúrési magminta szemcseeloszlási görbéje



Mértékadó szemcseátmérő

(Zamarin):

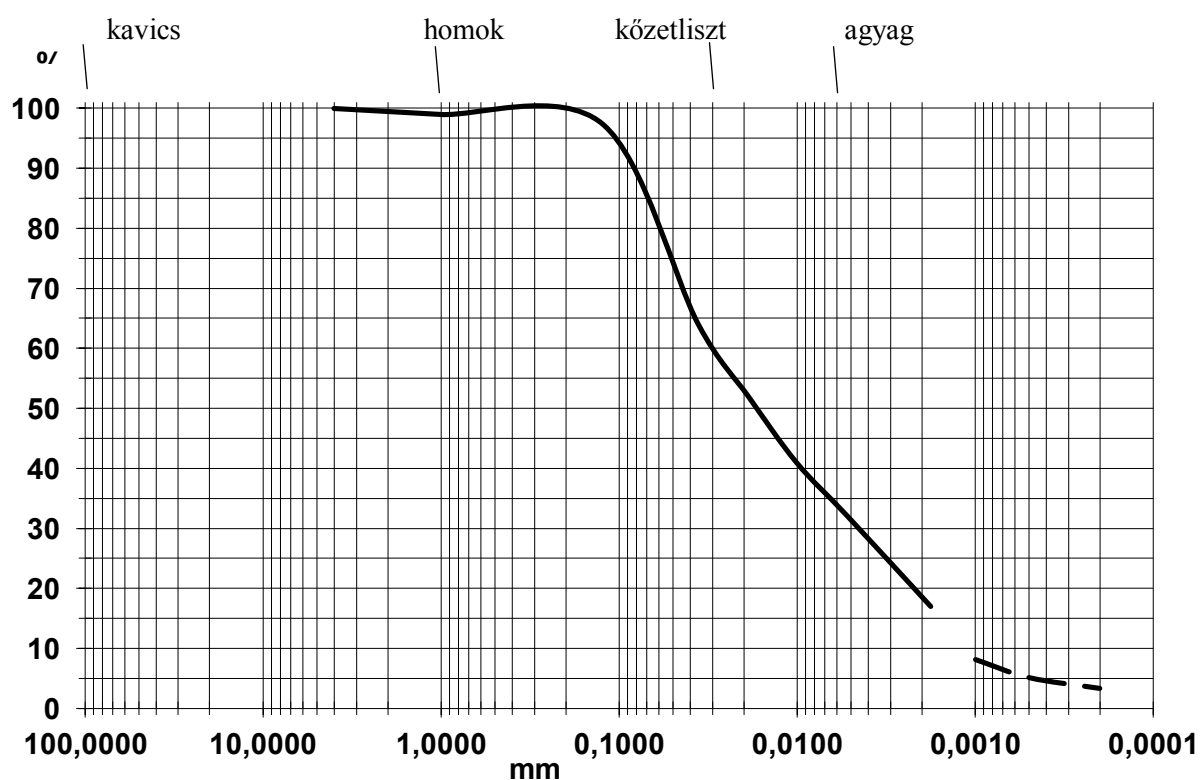
0,0569 mm

Számított szivárgási tényező:

7,490E-06 m/s

0,6471 m/nap

7. számú melléklet – Az RCs4/2 fúrési magminta szemcseeloszlási görbéje



Szítási adatok

<i>d mm</i>	>32	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
%					100,0	99,5	99,0	99,0	99,0	97,5	

Hidrometrálási adatok

<i>idő</i>	0,5 perc	2 perc	8 perc	30 perc	2 óra	1
<i>d mm</i>		0,036	0,019	0,010	0,0052	0,0018
%		64,0	52,0	41,0	32,0	17,0

Mértékadó szemcseátmérő
(Zamarin):

Számított szivárgási tényező: 0,0052 mm
6,158E-08 m/s 0,0053 m/nap

8. számú melléklet – Az RMT mérési pontok koordinátái (2010)

A mérési pont sorszáma	WGS84 koordináták (szélesség – hosszúság)	A mérési pont sorszáma	WGS84 koordináták (szélesség – hosszúság)
1	46°54'11.05"É 17°51'30.98"K	37	46°54'23.94"É 17°51'46.38"K
2	46°54'11.15"É 17°51'31.98"K	38	46°54'24.60"É 17°51'45.90"K
3	46°54'11.12"É 17°51'33.10"K	39	46°54'25.08"É 17°51'45.42"K
4	46°54'11.16"É 17°51'34.20"K	40	46°54'25.92"É 17°51'44.82"K
5	46°54'11.28"É 17°51'34.92"K	41	46°54'26.46"É 17°51'44.46"K
6	46°54'11.34"É 17°51'35.94"K	42	46°54'27.24"É 17°51'43.86"K
7	46°54'11.52"É 17°51'36.90"K	43	46°54'27.84"É 17°51'43.26"K
8	46°54'11.58"É 17°51'38.28"K	44	46°54'28.50"É 17°51'42.54"K
9	46°54'11.76"É 17°51'39.24"K	45	46°54'28.50"É 17°51'42.54"K
10	46°54'11.88"É 17°51'40.44"K	46	46°54'19.14"É 17°51'47.58"K
11	46°54'11.88"É 17°51'41.52"K	47	46°54'18.72"É 17°51'46.86"K
12	46°54'11.82"É 17°51'42.48"K	48	46°54'18.48"É 17°51'45.96"K
13	46°54'11.94"É 17°51'43.44"K	49	46°54'18.12"É 17°51'45.24"K
14	46°54'11.94"É 17°51'44.40"K	50	46°54'17.82"É 17°51'44.52"K
15	46°54'12.06"É 17°51'45.60"K	51	46°54'17.46"É 17°51'43.68"K
16	46°54'12.06"É 17°51'46.68"K	52	46°54'17.16"É 17°51'42.84"K
17	46°54'12.18"É 17°51'47.64"K	53	46°54'17.58"É 17°51'41.76"K
18	46°54'12.18"É 17°51'48.66"K	54	46°54'17.94"É 17°51'41.10"K
19	46°54'12.48"É 17°51'49.68"K	55	46°54'18.36"É 17°51'40.08"K
20	46°54'12.48"É 17°51'50.94"K	56	46°54'18.60"É 17°51'39.18"K
21	46°54'12.90"É 17°51'51.78"K	57	46°54'19.26"É 17°51'39.24"K
22	46°54'13.50"É 17°51'51.66"K	58	46°54'17.94"É 17°51'38.76"K
23	46°54'14.22"É 17°51'51.30"K	59	46°54'17.04"É 17°51'38.10"K
24	46°54'14.88"É 17°51'51.06"K	60	46°54'16.44"É 17°51'37.26"K
25	46°54'15.60"É 17°51'50.76"K	61	46°54'15.84"É 17°51'37.14"K
26	46°54'16.32"É 17°51'50.40"K	62	46°54'15.36"É 17°51'37.38"K
27	46°54'17.10"É 17°51'49.86"K	63	46°54'14.46"É 17°51'36.48"K
28	46°54'17.64"É 17°51'49.32"K	64	46°54'12.78"É 17°51'34.86"K
29	46°54'18.30"É 17°51'48.96"K	65	46°54'12.60"É 17°51'33.30"K
30	46°54'19.02"É 17°51'48.54"K	66	46°54'12.30"É 17°51'31.44"K
31	46°54'19.50"É 17°51'48.24"K	67	46°54'11.94"É 17°51'30.12"K
32	46°54'20.52"É 17°51'48.36"K	68	46°54'12.00"É 17°51'27.12"K
33	46°54'21.12"É 17°51'48.06"K	69	46°54'11.04"É 17°51'25.62"K
34	46°54'21.90"É 17°51'47.82"K	70	46°54'09.36"É 17°51'24.66"K
35	46°54'22.62"É 17°51'47.16"K	71	46°54'07.86"É 17°51'24.12"K
36	46°54'23.28"É 17°51'46.92"K	72	46°54'06.18"É 17°51'24.24"K

9. számú melléklet – Az RMT mérési pontok koordinátái (2011)

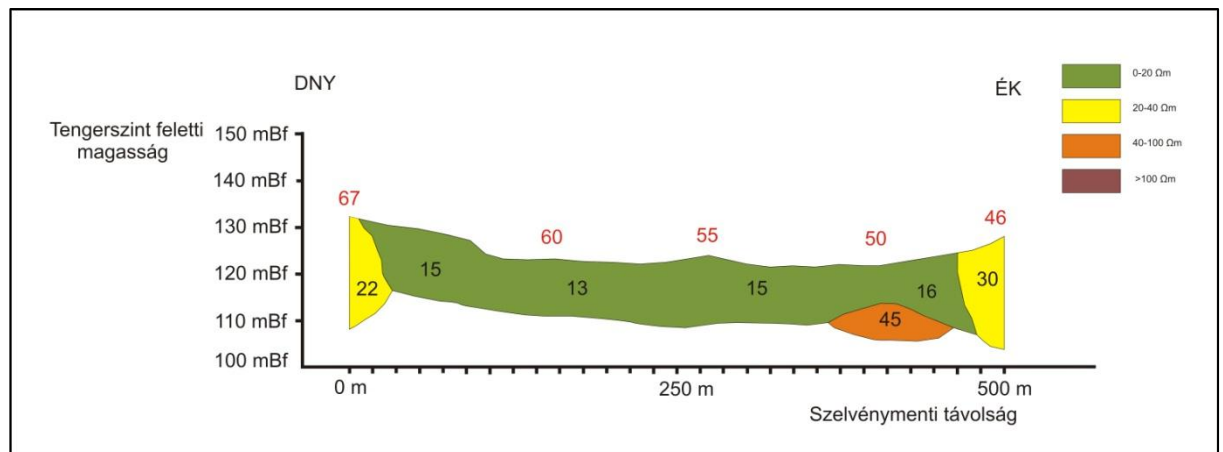
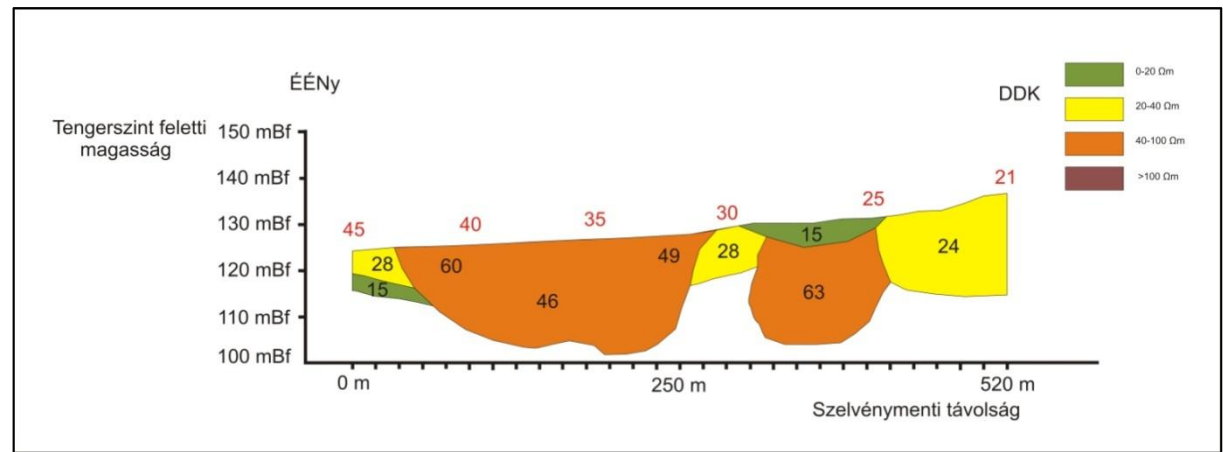
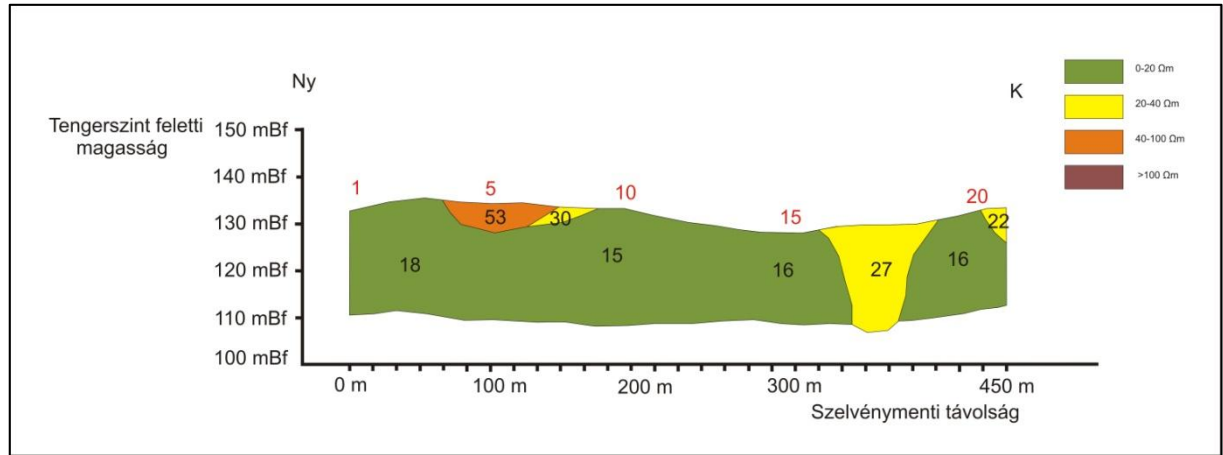
mérési pont	EOV koordináta	
	K	É
*1	559858	174357
*2	559861	174340
*3	559878	174321
*4	559888	174303
*5	559896	174287
*6	559908	174266
*7	559921	174249
*8	559937	174232
*9	559953	174215
*10	559964	174200
*11	559977	174183
*12	559991	174163
*13	560003	174149
*14	560016	174133
*15	560026	174112
*16	560022	174100
*17	560009	174087
*18	559988	174061
*19	559972	174042
*20	559960	174024
*21	559947	174007
*22	559914	173981
*23	559887	173975
*24	559868	173971
*25	559837	173965
*26	559832	173972
*27	559794	173960
*28	559770	173946
*29	559766	173954
*30	559725	173951
*31	559702	173955
*32	559660	173986
*33	559628	173942
*34	559612	173937
*35	559576	173937

mérési pont	EOV koordináta	
	K	É
*36	559557	173932
*37	559535	173929
*38	559515	173928
*39	559496	173931
*40	559480	173920
*41	559435	173911
*42	559426	173911
*43	559528	174002
*44	559546	173992
*45	559555	173972
*46	559564	173954
*47	559570	173934
*48	559580	173922
*49	559588	173905
*50	559654	174051
*51	559665	174030
*52	559665	174008
*53	559667	173989
*54	559671	173965
*55	559683	173939
*56	559712	173913
*57	559708	173901
*58	559704	173886
*59	559716	173864
*60	559722	173843
*61	559717	173829
*62	559722	173800
*63	559722	173785
*64	559725	173766
*65	559723	173748
*66	559738	173720
*67	559731	173711
*68	559715	173750
*69	559724	173757
*70	559735	173762

mérési pont	EOV koordináta	
	K	É
*71	559757	173773
*72	559773	173783
*73	559788	173793
*74	559795	173800
*75	559796	173774
*76	559785	173806
*77	559763	173815
*78	559751	173830
*79	559736	173841
*80	559736	173866
*81	559746	173895
*82	559744	173915
*83	559743	173938
*84	559755	173963
*85	559747	173986
*86	559742	174012
*87	559743	174028
*88	559743	174061
*89	559746	174082
*90	559692	174448

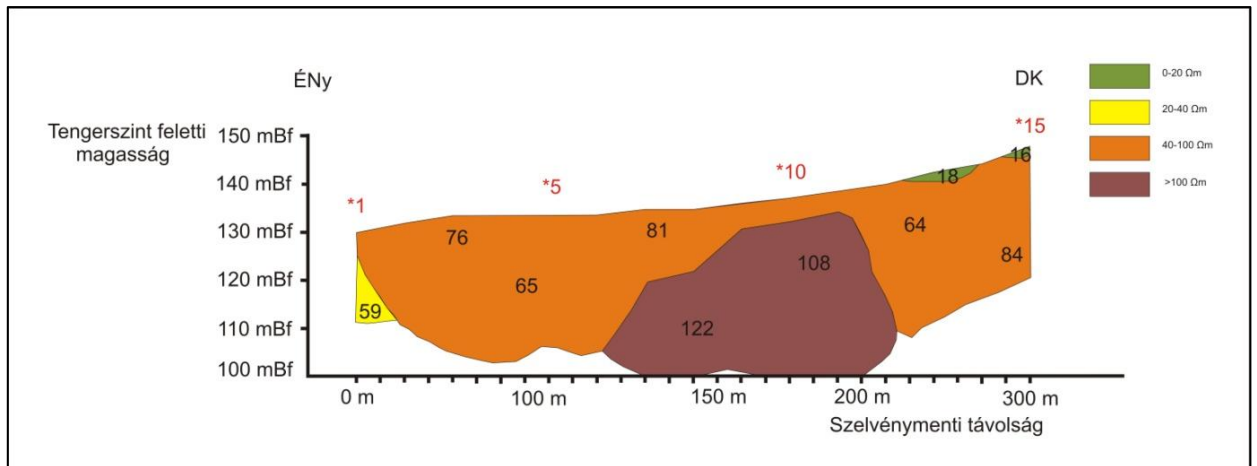
mérési pont	EOV koordináta	
	K	É
*91	559671	174458
*92	559652	174453
*93	559632	174464
*94	559613	174467
*95	559593	174471
*96	559579	174468
*97	559552	174469
*98	559533	174471
*99	559522	174459
*100	559554	174487
*101	559558	174501
*102	559568	174515
*103	559592	174519
*104	559552	174561
*105	559559	174548
*106	559561	174539
*107	559576	174516
*108	559589	174504
*109	559595	174495

10. számú melléklet – RMT szelvények a Rátai-csávában (2010)

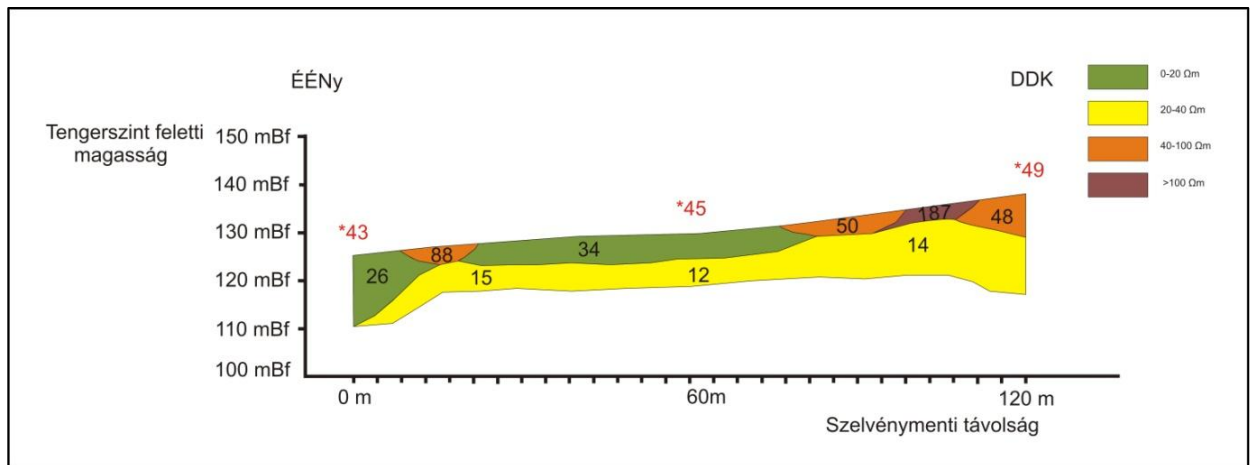


A Rátai-csávában végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés
- a piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik
~0,3x-os túlmagásítással

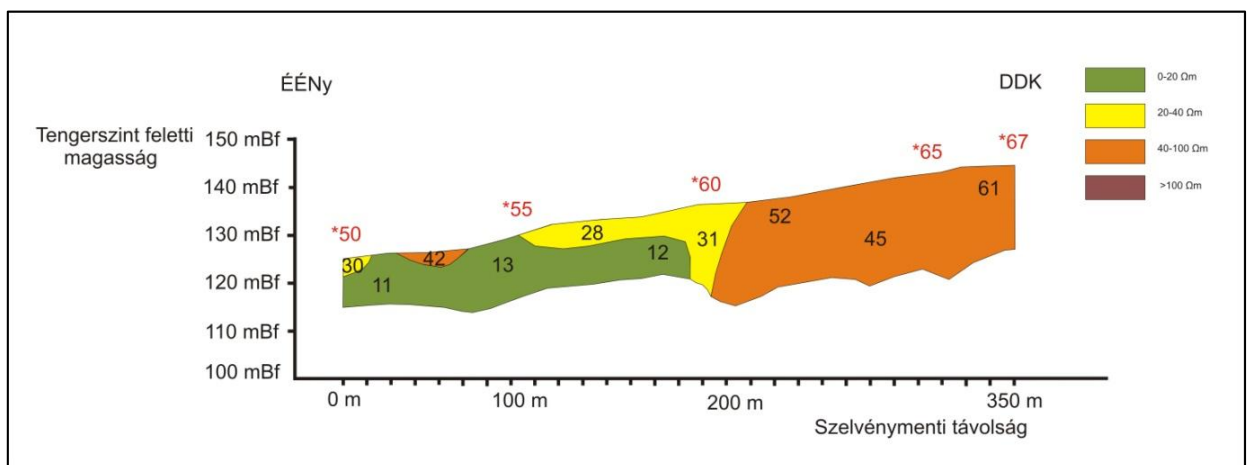
11. számú melléklet – RMT szelvények a Rátai-csávában (2011)



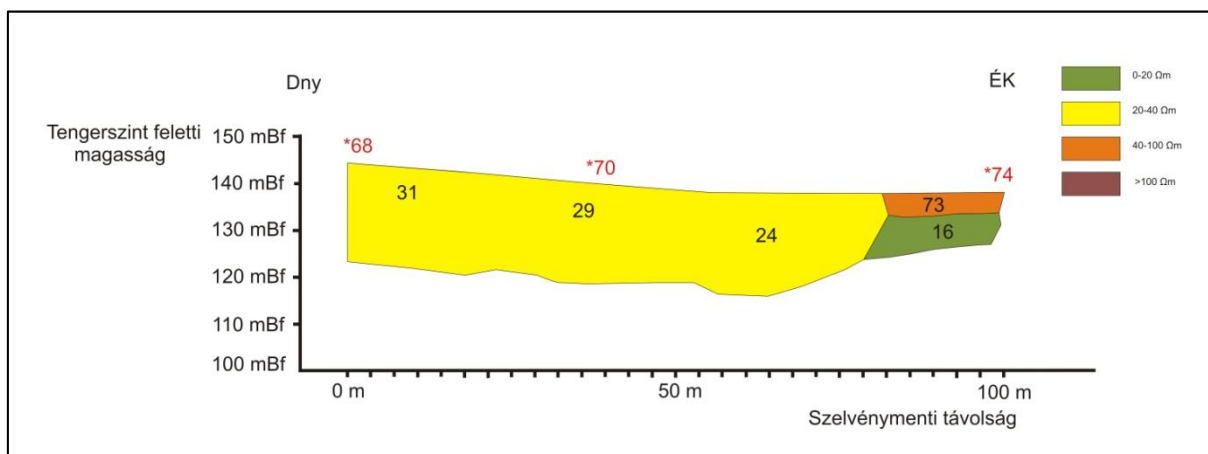
A Rátai-csávában végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés
- a piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik
~0,5x-os túlmagasítással



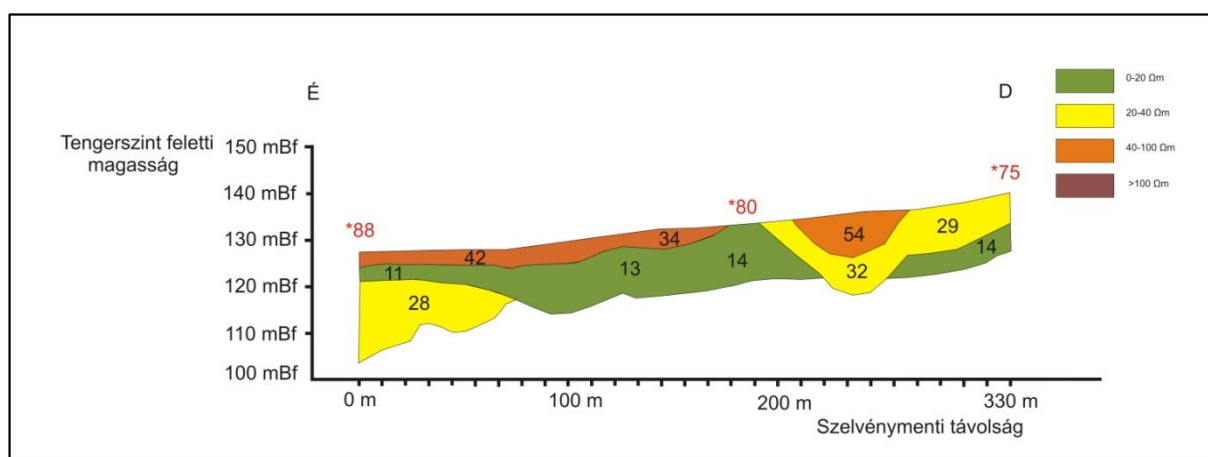
~1,2x-os túlmagasítással



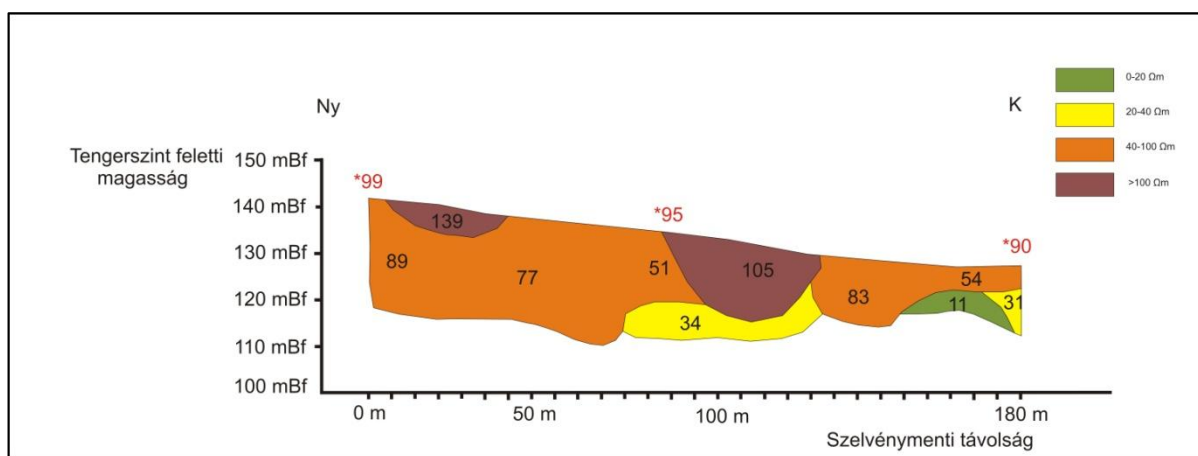
~0,4x-os túlmagasítással



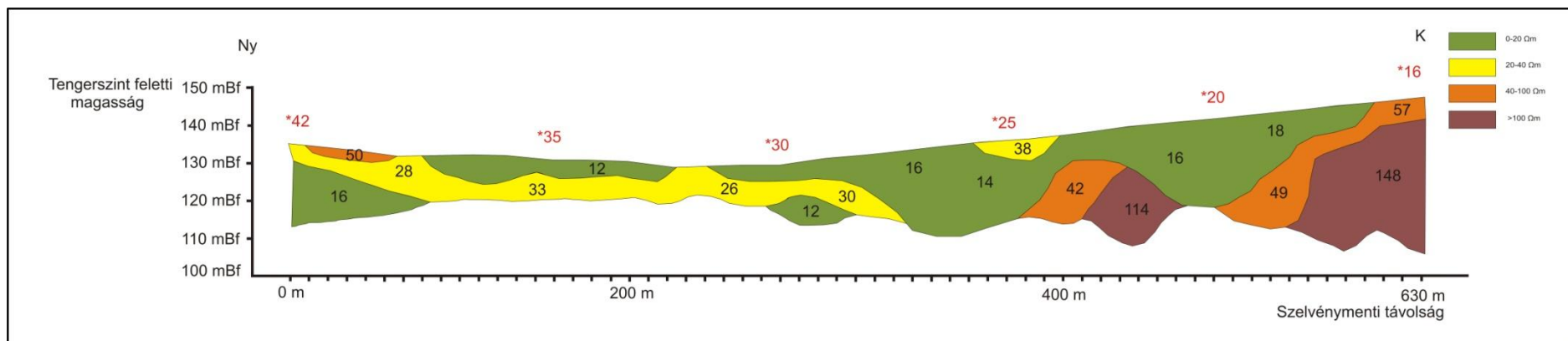
A Rátaí-csávában végzett RMT mérések alapján modellezett földtani felépítés
 - a piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik
 ~1,5x-os túlmagasítással



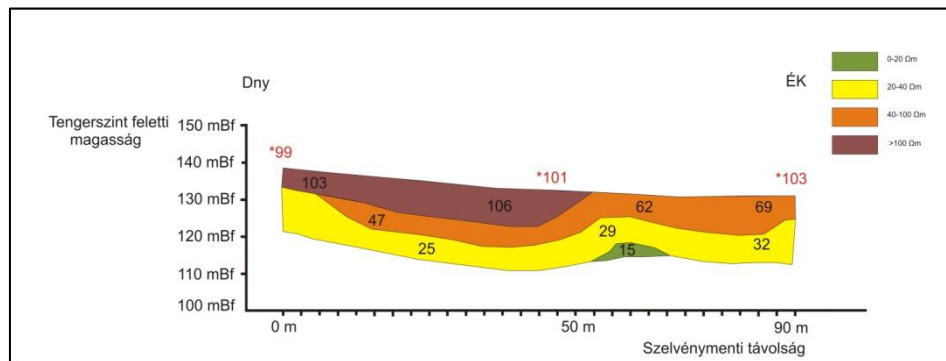
~0,4x-os túlmagasítással



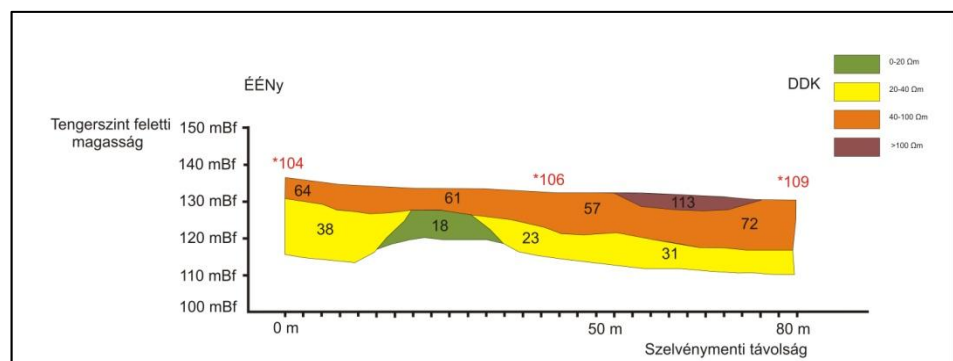
~0,8x-os túlmagasítással



A Rátai-csávában végzettRMT mérések alapján modellezett földtani felépítés – a piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik ~0,3x-os túlmagasítással



A Rátai-csávában végzettRMT mérések alapján modellezett földtani felépítés
- a piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik
~1,6x-os túlmagasítással



A Rátai-csávában végzettRMT mérések alapján modellezett földtani felépítés
- a piros számok a mérési pontokat, a feketék pedig az ellenállásértékeket jelölik
~1,8x-os túlmagasítással