



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

A BUDAI VÁRBARLANG VÍZMÉRNÖKI VIZSGÁLATA

TDK Dolgozat

2024

KÉSZÍTETTE:

GAZDA FANNI

VI. éves építőmérnök hallgató

Konzulensek:

Dr. Farkas Dávid

Dr. Hajnal Géza

Dr. Szieberth Dénes

Négyesi Klaudia

TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevezetés.....	1
2.	Célkitűzések	2
3.	Irodalmi áttekintés.....	3
3.1.	Vizsgált terület ismertetése	3
3.2.	Geológia.....	4
3.2.1.	Hidrogeológia.....	7
3.3.	Korábbi vizsgálatok	7
3.3.1.	Kutak	7
3.3.2.	Beszivárgás, csepegővizek	8
3.3.3.	Barlangi mérések saját készítésű billenőedényes mérőműszerrel	9
3.3.4.	Numerikus modellek	9
4.	Módszertan.....	11
4.1.	Kútvízszint mérések és próbaszivattyúzás	11
4.2.	Csepegővíz mérések.....	13
4.2.1.	Billenőedényes csepegésmérő műszer.....	13
4.2.2.	Ad hoc helyszíni mérések.....	19
4.3.	Csapadék adatok	21
4.4.	Korrelációvizsgálat	21
4.5.	Vízkémiai vizsgálatok.....	21
4.6.	Numerikus modell.....	22
5.	Eredmények.....	27
5.1.	Barlangi Kutak vizsgálati eredményei	27
5.1.1.	Vízszintek.....	27
5.1.2.	Próbaszivattyúzás	28
5.2.	Csepegővíz mérések eredményei	29
5.2.1.	Billenőedényes mérőeszközzel mért adatok.....	29
5.2.2.	Ad hoc mérések eredményei	31
5.3.	Korreláció analízis	32
5.4.	Vízkémiai vizsgálatok.....	34
5.5.	Numerikus modell.....	35
5.5.1.	„A” modell	35
5.5.2.	„B” modell.....	37
6.	Eredmények kiértékelése.....	39
6.1.	Kútvízszint mérések.....	39
6.2.	Csapadékkal való kapcsolat	42
6.3.	Ad hoc csepegővíz mérések.....	42
6.4.	Vízkémiai vizsgálatok.....	44
6.5.	Numerikus modell.....	46
7.	Összefoglalás.....	50
	Felhasznált irodalom	53

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat A billenőedényes mérőműszer kalibrációs mérései	17
2. táblázat A numerikus modellbe bevitt kúttadatok	25
3. táblázat A három megfigyelt kút legmagasabb és legalacsonyabb vízszintjei	27
4. táblázat A Hadik és a Mamutfogas kutak próbaszivattyúzásának eredményei	28
5. táblázat Az ad hoc mérésekből származó csepegéshozamok	32
6. táblázat A korrelációs együttható maximális értékei a kútvízszintek és csapadéokra.....	33
7. táblázat A korrelációs együttható maximális értékei csepegés intenzitásra és a csapadékra	33
8. táblázat A mért vízkémiai paraméterek.....	34
9. táblázat Az éves csepegővíz mennyiség kiszámítása az ad hoc mérésekből.....	43
10. táblázat A számított éves csepegéshozamok összehasonlítása korábbi vizsgálatokkal.....	44

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra A vizsgált terület elhelyezkedése	3
2. ábra A budai Várhegy rétegsora (Horusitzky, 1938 és Török, 1998 nyomán, Hajnal, 2003)	5
3. ábra A szivárgási tényező eloszlása a C modellben Farkas (2013) korábbi munkájában	10
4. ábra Mérési helyszínek a Nagy Labirintusban (az alaptérkép a BURKEN cég munkája (2011), melyet a Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóságtól kaptunk).....	11
5. ábra Modellszerkezet a Visual MODFLOW Flexben	24
6. ábra A DATAQUA érzékelőkkel végzett vízszintmérések eredményei	27
7. ábra A próbaszivattyúzás során mért kútvízszint idősorok	28
8. ábra A Várbarlangban lévő két billenőedényes mérőműszer csepegővíz intenzitás adatai.....	30
9. ábra A jósvafői Vass Imre-barlang három billenőedényes mérőműszerének csepegővíz intenzitás adatai	31
10. ábra Az ad hoc mérésekből számított csepegéshozamok mérési helyek szerint csoportosítva	31
11. ábra Az “A” modell felépítése.....	35
12. ábra Az “A” modellváltozat permanens futtatásának eredményeként kapott vízszintek egy hossz-szelvényen	36
13. ábra Az “A” modellváltozat tranziens futtatásának eredménye	36
14. ábra A “B” modell felépítése.....	37
15. ábra A “B” modellváltozat permanens futtatásának eredményeként kapott vízszintek egy hossz-szelvényen	38
16. ábra A “B” modellváltozat tranziens futtatásának eredménye	38
17. ábra Barlangos kút: jelenlegi vízszintmérések összehasonlítása korábbi vizsgálatokkal.....	39
18. ábra Hadik kút: jelenlegi vízszintmérések összehasonlítása korábbi vizsgálatokkal	40
19. ábra Mamutfogas kút: jelenlegi vízszintmérések összehasonlítása korábbi vizsgálatokkal.....	41
20. ábra Kloridion-koncentráció a korábbi kutatásokkal összevetve	44
21. ábra Nitrátion-koncentráció a korábbi kutatásokkal összevetve	45
22. ábra A fajlagos hozam értékek érzékenységvizsgálata az “A” modellváltozatban	47

23. ábra A "B" modellváltozat tranziens futtatása csak a Mamutfogas kút szivattyúzásával	48
24. ábra A "B" modellváltozat tranziens futtatása csak a Hadik kút szivattyúzásával.....	48
25. ábra "C" modellváltozat, Farkas (2013) munkája	49

KÉPJEGYZÉK

1. kép A Mamutfogas kút környéke, 2024. okt. 8.	1
2. kép Pergés a Várbarlang főtéjéről, 2023. dec. 18.....	1
3. kép DATAQUA szenzor a Mamutfogas kútban.....	12
4. kép A Hadik kút szivattyúzása, 2024. febr. 26.	13
5. kép Az egyoldali üres NYÁK vágás, csiszolás és tisztítás után	15
6. kép A nyomtatott átvitele.....	15
7. kép A NYÁK a nyomtatott átvitele után	15
8. kép Lyukak fúrása a modulok lábaihoz.....	15
9. kép Elkészült alaplap, készen a forrasztásra.....	15
10. kép A modulok lábainak forrasztása	15
11. kép A Vass Imre-barlang kész mérőeszközeinek hardware részei.....	16
12. kép A billenőedényes mérőeszköz kalibrálása	16
13. kép Az 1. számú mérési hely a Vass Imre-barlangban, Jósavafőn.....	18
14. kép A 3. számú mérési hely a Vass Imre-barlangban, Jósavafőn	18
15. kép A „Szalmacseppköves” mérési hely a budai Várbarlangban.....	18
16. kép A „Rácsos kút” mérési hely a budai Várbarlangban.....	18
17. kép Az 1. számú gyűjtőedény a budai Várbarlangban	20
18. kép A Fontana szökőkút az 1. számú mérési hely felett.....	20
19. kép Az 5. számú gyűjtőedény a budai Várbarlangban	20
20. kép A Szentháromság tér egy része az 5. számú mérési hely felett	20

1. BEVEZETÉS

A Várbarlang természetes mészkőképződmények és mesterséges pincerendszerek összessége, mely a budai Várhegy alatt helyezkedik el. A Várhegy az ország egyik legfontosabb szimbolikus tere, melynek látképe az UNESCO világörökség része. A Várbarlang feletti terület közigazgatási, gazdasági, kulturális és turisztikai szempontból is kiemelt jelentőségű, ahol szobrok, múzeumok, műemlékek és középkori épületek sora helyezkedik el. Az elmúlt években is számos beruházás zajlott a területen, például a kormányzati negyed fejlesztése – melynek része többek közt a pénzügyminisztérium épületének felújítása, melynek értéke meghaladja a 60 milliárd Ft-ot - mely még inkább indokoltá teszi a felszíni állagmegóváshoz kiemelten fontos felszín alatti területek vizsgálatát. A pincebarlangok állékonysági és vizesedési problémáira a századfordulótól napjainkig számos irodalmi forrás hivatkozik, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem kutatói már 40 éve aktívan kutatják a budai Várbarlangot. A Nagy Labirintus területén a barlangba szivárgó víz látszólag soha nem tapasztalt mennyiséget ért el. A beszivárgó víz mállást és pergéseket okoz, főként a barlang főtétjéről. Ez a jelenség az utóbbi időben egyre gyakoribbá vált. Ha a beszivárgó víz intenzitása nem csökken, állékonysági problémák is felléphetnek a barlangban, ami nemcsak a felszín alatt, hanem a felszínen is veszélyes lehet. Néhány friss kép látható a vizesedésről és a pergésekről az 1. és 2. képeken. A kutatás fő motivációja a Várbarlang állagának megőrzése volt, mely cél eléréséhez szükséges a barlang vízviszonyainak részletes vizsgálata is.



1. kép A Mamufogas kút környéke, 2024. okt. 8.



2. kép Pergés a Várbarlang főtétjéről, 2023. dec. 18

2. CÉLKITŰZÉSEK

Mivel a fő cél az állagmegóvás, a víz eredetének meghatározása érdekében meg kellett vizsgálni a beszivárgó és a barlangba áramló vizek mennyiségét és minőségét. A mennyiségi és minőségi értékeléshez mérések kellenek. Jelen dolgozatban hat célt határoztunk meg.

- 1) Irodalomkutatót kell végezni, hogy a múltbeli adatok alapján megállapítható legyen, milyen változások következtek be a beszivárgó víz mennyiségében és minőségében a korábbi vizsgálatok óta eltelt időszakban.
- 2) A barlangi vizek vizsgálata két fő csoportból áll, ebből ez egyik a barlangi kutak vízszintjének mérése. Ahhoz, hogy további statisztikai vagy hidraulikai elemzésekre alkalmas nagy felbontású kútvízszint adatsorokat tudjunk előállítani, szükség volt a – korábbi vizsgálati módszerekkel ellentétben – automata vízszintmérő műszerek elhelyezésére. A monitoring rendszert ennek megfelelően alakítottuk ki. Próbaszivattyúzásokat is szükséges volt végezni ahhoz, hogy megfigyelhessük, hogy a visszatöltődés jellegében történt-e változás.
- 3) A barlangi vizek vizsgálatának másik tárgya a csepegővizek voltak. Ehhez olyan műszerre volt szükség, ami kis energiaigényű és a kutakhoz hasonlóan nagy felbontású adatsor előállítására képes. E célból egy jelenleg is fejlesztés alatt álló csepegésmérő műszert állítottunk elő, melyet a barlang körülményeihez igazítottunk. Mivel a barlangot rendszeresen turistacsoportok látogatják, kiterjedt, állandó üzemelésű csepegésmérő monitoring hálózat működtetése nem volt lehetséges. Ezért ad hoc méréseket hajtottunk végre, hogy a barlang nagyobb területéről kapjunk információt a csepegés intenzitás értékéről és a teljes vizsgálat területre megállapítható legyen a csepegővíz mennyisége.
- 4) A barlangi vizek eredetének feltárásához vízkémiai vizsgálatokra is szükség volt. Ebből a célból néhány kútból és csepegővízből rendszeres vízmintavételezés történt.
- 5) További célom volt az új monitoring rendszerrel előállított idősorok összevetése csapadékidősorokkal, hogy a kút és csepegővizek felszíni csapadékkal való kapcsolatát, megvizsgáljam. Ezt korrelációvizsgálattal végeztem el.
- 6) Végül a céljaim közt szerepelt a kútvízszintmérések és a próbaszivattyúzások eredményeinek felhasználásával egy numerikus modell készítése a barlang egy – geológiai és szivárgáshidraulikai szempontból legérdekesebb – szegmenséről. A numerikus modell permanens és nem permanens kalibrálásának elkészültével információkat tudtunk szerezni azon közet szivárgáshidraulikai paramétereiről, melyben a kutak elhelyezkednek.

3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

E fejezetben először a barlangrendszert (3.1. fejezet) és a vizsgált terület geológiáját (3.2. fejezet) ismertetem. A továbbiakban bemutatom a Várhegy korábbi hidrológiai tanulmányait (3.3.1. és 3.3.2. fejezet) és az egyik műszer, a költséghatékony és saját készítésű billenőedényes mérőeszköz korábbi alkalmazásait (3.3.3. fejezet). Végül egy korábbi numerikus modell kerül bemutatásra (3.3.4. fejezet).

3.1. VIZSGÁLT TERÜLET ISMERTETÉSE

A mésztufa barlangok eredetileg szabálytalan, alacsony képződmények voltak, melyeket az emberek a történelem során igyekeztek a saját hasznukra alakítani. Ha a mészkő kemény volt, akkor alul mélyítették, ha pedig faragható volt, akkor a főté és az oldalfalak felé bővítették. Az utóbbiakat gyakran befalazták, a főtét pedig oszlopokkal támasztották alá (Kadič, 1942). Az üregekbe beszivárgó víz összegyűjtésére kutakat ástak, gyakran a főtétől a felszínig vezető légaknákkal. Természetes eredetű barlangok jelenlegi ismereteink szerint csak a Polgárváros alatt találhatók. Az összefüggő barlangpincék teljes alapterülete mintegy 18 000 m², az egyes barlangok összterülete pedig mintegy 4 000 m² (Hajnal, 2003). Az összefüggő pincerendszer egy részét Nagy Labirintusnak nevezik. A Nagy Labirintus három részre osztható az üzemeltető alapján. A déli részt egy vállalkozó bérli, az északi részt a Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság (DINPI) üzemelteti, a harmadik részt pedig a Sziklakórház alkotja. Jelen dolgozat a Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatósággal együttműködve a Nagy Labirintus északi részén készült (1. ábra).



1. ábra A vizsgált terület elhelyezkedése

3.2. GEOLÓGIA

Geomorfológia, kialakulás

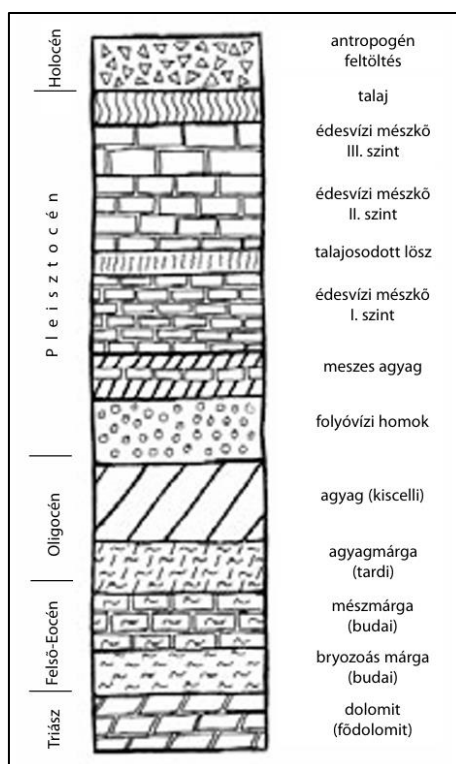
A Várhegy platójának becsült területe mintegy 405 000 m². Oldalainak és lejtőinek teljes területe körülbelül 750 000 m². A fennsík hossz tengelye 1 500 m, a hegy teljes hossza 2 000 m. A fennsík szélessége 450 m és 120 m között változik. A csúszással és lepusztulással átalakult eróziós terasz-sziget átlagos magassága 154-159 m B.f., legnagyobb magassága 169 m B.f. A fennsík magassága dél felé haladva fokozatosan csökken, 149, 144-134, 119-114 m B.f. magassággal (Scheuer, 1986).

A középső pleisztocénben a budai Várhegy környéke egy tömbökre tagolt, völgyekkel szabdaltnak hegyesgelőteri térszín volt. Legfontosabb vízfolyása az Ördögárok-patak volt (Krolopp és mtsai., 1976). A Máriaremetétől Rózsadombig tartó patak völgyben jelentős mésztartalmú (CaCO₃) meleg vizű források törtek fel, amelyek a Várhegy helyén édesvízi mészkőlerakódásokat képeztek. A mindel-korszak végén bekövetkezett szerkezeti mozgások következtében a terület jelentősen megemelkedett, a törésvonalak mentén új völgyek alakultak ki. A Duna bevágódása az Ördögárokot is mélyebbre vágta. Ez a Várhegy területén jelentős erózióhoz vezetett, amely a harmadidőszaki és negyedidőszaki üledékek vastag rétegeit erodálta. A hegység északi részén az Ördögárok átlagosan egy méter vastag üledéket rakott le, mintegy 149 m B.f. magasságban (Kadič, 1942).

A Várhegy egy tipikus folyami terasz-sziget. Keleti és délkeleti részét a Duna meredek völgyoldala, míg nyugati, délnyugati és déli oldalát az Ördögárok határolja. Ez a völgy választja el a Várhegyet a szomszédos Budai-hegység fiatal üledékkel borított tömbjeitől (Rózsadomb, Martinovics-hegy, Nap-hegy, Sas-hegy) és a sasbércszerű Gellért-hegytől is (Krolopp és mtsai., 1976; Scheuer, 1986).

Triász

A Várkert termálkutató (Horusitzky, 1938) 1938-ban létesítették a Várhegy délkeleti oldalán. A mai napig ez szolgáltatja a legtöbb információt a hegy rétegtani és geológiai felépítéséről (2. ábra). A 261 m mély fúrás 238 m mélységben érte el a felső-triász dolomitot, amely a közeli Gellért-hegy fő tömegét alkotja (Scheuer, 1986).



2. ábra A budai Várhegy rétegsora (Horusitzky, 1938 és Török, 1998 nyomán, Hajnal, 2003)

Eocén

A triász képződményekre vékony (8-9 m), erősen kovás, szürkés színű képződmények rakódtak le, amelyeket középső-eocén tufaként azonosítottak (Horusitzky, 1938; Kordos, 1969). A Várhegy fő kőzetét, a felső-eocén budai márgát a 2,0 m vastagságú feltöltés alatt 208,7 m mélységig tárták fel a Várkert fúrásban (Szontagh, 1908). A képződmény alsó részét 211 m-től 238 m-ig tárták fel. Ez a képződmény bryozoában (bryozoás márga) gazdag, és az alsó rész erősen mállott. (Scheuer, 1986).

A budai márga a Várhegy lejtőinek felszínén is jelen van, és a keleti oldalon a Szalag utcáig, a nyugati oldalon pedig a Korlát utcáig megtalálható (Scheuer, 1986). A hegy fennsíkján és a Nagy Labirintusban is több különálló üregben fellelhető, főként a nyugati oldalon (Hajnal, 2003). Korábbi feltárások a Dísz téren, a Szentháromság téren, az Országház utcában és az Úri utcában is felfedték ezt a képződményt. A budai márga mindhárom litológiai változatának formája megjelenik a Várhegyen. A képződmény alsó része magas mésztartalmú, felső-eocén mészkőből fejlődött ki, ezért alkalmas karsztosodásra és üregképződésre. A középső szakasz jól rétegzett, pados kifejlődésű és kötött. A szelvény felső részén a magas agyagtartalom átmenetet képez az úgynevezett Tardi Agyag Formációba. (Scheuer, 1986). A geotechnikai nevezéktan szerint plaszticitási indexe miatt agyagnak kellene nevezni, de magas CaCO_3 -tartalma miatt agyagmárgának nevezik (Farkas, 2013).

Oligocén

A következő geológiai egység az oligocén Tardi Agyag Formáció, amelyet a rétegtani sorrendben a Kiscelli Agyag Formáció követ. Ez szintén oligocén korú, amit fauna vizsgálatok is megerősítettek (Scheuer, 1986). Mindkét agyagtípus a hegység északi és északkeleti részén található (Hajnal, 2003).

A negyedidőszakot megelőző intenzív szerkezeti mozgások különböző korú képződmények egymás mellé kerülését eredményezték, így a kiscelli agyag a budai márgával egy észak-északkelet, dél-délnyugati irányú tektonikai sík mentén szomszédos, amely a Szalag utca - Mátyás templom - Kapisztrán tér - Anjou-bástya mentén kimutatható (Scheuer, 1986). A Várhegy északi részén közvetlenül a negyedidőszaki képződmények alatt alsó-oligocén vízzáró agyagképződmények is előfordulnak. Az oligocén agyagrétegek vastagsága nem egyenletes, a lejtőkön akár 10 m, a fennsíkon 5-10 m is lehet (Horusitzky, 1938).

Negyedidőszaki képződmények

Hosszú szárazulati és eróziós időszak után a pleisztocénben kezdődött a következő üledékképződési folyamat, amely meghatározta a mai állapot kialakulását. (Scheuer, 1986).

A Polgár város területén (a Dísz tértől északra, a Várfalon belül) a harmadidőszaki üledéket folyóvízi allúvium borítja, amely összefüggő kavicsos, homokos kavicsos és agyagos kavicsos üledékek, mintegy 0,5-1,5 m vastagságban (Krolopp és mtsai., 1976; Scheuer, 1986). Az Ördögárok-patak hordalékát számos pincében és fúrásban, valamint a Nagy Labirintus több részén is megtalálták. Az Ördögárok üledéke azonban csak a Szentháromság tértől északra jelenik meg, ami a kutak vízáradóképessége szempontjából nagyon fontos (Hajnal, 2003).

A felső-pliocénben a Budai-hegységben meleg vizű források törtek fel, és sok helyen, köztük a Várhegyen is édesvízi mészkő rakódott le, mely az egész fennsíkon megtalálható (Török, 1998). Legnagyobb magasságát a Szentháromság tér környékén éri el, ahonnan észak és dél felé egyaránt mintegy 10 m-t süllyed. A kőzetfelszín rendkívül egyenetlen, néhány négyzetméteren belül több méteres eltérésekkel, például a Tárnok utcai iskola alatt (Dénes, 1975). A mészkövet esetenként lösz borítja, de leggyakrabban antropogén feltöltés fedi, amelynek vastagsága nagymértékben változik (Hajnal, 2003).

3.2.1. HIDROGEOLÓGIA

A klasszikus hidrogeológiai besorolás szerint a Várhegy fennsíkján nincs összefüggő talajvíz. Az antropogén feltöltés alatti forrásvízi mészkőben a karsztvíz a repedéseken keresztül áramlik. Mivel ez a réteg átlagosan 5-8 m vastag, ez a klasszikus értelemben nem karsztvíz, e vizek legjobb meghatározása inkább a hasadékvíz. A mészkő változatossága és eltérő szerkezeti megjelenése miatt a víz változó mennyiségben lehet jelen, például kapilláris hálózatokban, de néhány köbméteres üregekben is. Utánpótlódása a csapadék és a közművekből származó veszteségek révén történik. A mészkő alatti egy-két méter vastagságú folyóvízi hordalék rétegekbe lefolyó víz szintén nem képez összefüggő víztestet. Korábbi tanulmányok kimutatták, hogy a labirintusban lévő kutakat különálló, kis vízgyűjtő zsompok táplálják. A kutak között minimális az átszivárgás és a szivattyúzás nem okoz áramlást. A víz túlnyomórészt a Várhegy lejtői felé folyik, főként a budai márga repedésein keresztül. Ennek bizonyítékai a Várhegyen található álforrások. Ezek többsége a nyugati lejtőn található, a kőzetrétegek délnyugati dőlése miatt (Hajnal, 2003).

3.3. KORÁBBI VIZSGÁLATOK

A Várbarlang hidrológiáját először az 1970-es években Kessler (1971) tanulmányozta. A vizsgálatok az 1990-es években folytatódtak, majd a Várhegy hidrogeológiájának átfogó vizsgálatát Hajnal (2003) végezte el. Munkájában azt tanácsolta, hogy hozzanak létre egy monitoring rendszert a Várbarlang területén, beleértve a kutak vízszintjének folyamatos észlelését, mely hosszú távú adatokat szolgáltat a terület tervezési munkáihoz és a károk megelőzéséhez (Hajnal, 2003). A legutóbbi méréseket 2008 és 2010 között végezték. Ekkor a kutak vízszintjét mérték, próbaszivattyúzásokat végeztek, és vízminőségi paramétereket vizsgáltak. (Hajnal & Farkas, 2011). Azóta a mérések szünetelnek.

3.3.1. KUTAK

A fellelhető és beazonosítható kutak száma az idők során folyamatosan csökkent. A 17. század fordulóján 75 db kutat jegyeztek fel. (Zolnai, 1961). 1908-ban 28 db kútról számoltak be (Szontagh, 1908), míg 1938-ban csak 13 db kutat vizsgáltak (Horusitzky, 1938). Egy 1951-es térkép 26 db kutat tartalmazott. Az 1990-es években összesen 20 db kutat azonosítottak. A Kessler Hubert által 1971-ben felfedezett kutak közül több már nem volt azonosítható. Kessler vizsgálatai idején a kutakat beszíntezték, de az adatok elvesztek (Hajnal, 2003). Az újabb

felmérések során a kutak számozását feladták, mivel az idők során legalább öt számozási sémát vezettek be (Debreceni Búvárklub, 1994, 1996; Hajnal, 1995; Horusitzky, 1938; Kessler, 1971).

A barlangi kutak vízszintjét három időszakon keresztül mérték viszonylag rendszeresen. Az első időszak 1970 szeptemberétől 1971 májusáig tartott. (Kessler, 1971). E kilenc hónap alatt 12 db kutat mérték heti rendszerességgel. A második időszakban 1998 júniusától 2000 januárjáig mérték a vízszinteket. Havonta körülbelül egy vízszintmérést végeztek, tíz kútban (Hajnal, 2003). A harmadik mérési időszak 2008 októberétől 2010 júniusáig tartott. Ezen időszakon belül csak később, 2009 szeptemberében nyílt lehetőség arra, hogy a Várbarlang északi részén (a jelenleg vizsgált területen) megkezdődjenek a vizsgálatok. (Farkas, 2013).

A fenti három időszak (1970-1971, 1998-2000, 2009-2010) eredményei mind alkalmasak arra, hogy összehasonlítsuk az ezen dolgozathoz végzett új mérésekkel, mivel a jelenleg megfigyelt három kút (Barlangos, Hadik, Mamutfogas) is szerepelt ezekben a korábbi mérésekben. A vízszintmérések mellett 2009-ben és 2010-ben mindhárom kútban próbaszivattyúzást is végeztek. A mért visszatöltődési görbék alapján két módszerrel meghatározták a kutak vízhozamát (Farkas, 2013).

3.3.2. BESZIVÁRGÁS, CSEPEGŐVIZEK

Korábbi tanulmányok kimutatták, hogy az édesvízi mészkőben akkor is előfordulhat szivárgás, ha hosszú ideig nem esett csapadék. Ennek oka a közművekből származó vízveszteség, amely főként a vízellátó hálózat hibái miatt következik be. A csepegés adatok időben és térben erősen szórtak, így kevés következtetés vonható le belőlük. (Hajnal, 2003). Az 1885-ös vizsgálatok idején csak a csepegési helyeket határozták meg, más méréseket nem végeztek (Rétiné, 1994). A csepegőhelyek azonosítása meglehetősen nehéz feladat volt a korábbi leírások alapján, mivel az utcanevek és a házszámozás több mint 100 év alatt többször is változott, és a szövegekben több pontatlanságot is észleltek (Hajnal, 2001). Az alagút vízelvezetésével foglalkozó tanulmány több csepegési helyet is azonosított (Szontagh, 1908). Alapos, részletesebb vizsgálatot csak 1971-ben végeztek. (Kessler, 1971). Hat mérési pontot jelöltek ki, de ezek közül csak ötöt lehet egyértelműen azonosítani, mivel az I. pont helye csak feltételezés (Hajnal, 2001). A csepegési pontok alá 1 m² felületű műanyag lapot helyeztek, és 1971 februárjától májusig hetente egyszer megmérték a lap közepén lévő nyíláson keresztül történő csepegés vízhozamát. A mért értékek vizsgálatával megállapították, hogy az egyes mérőhelyek csapadékviszonyokra adott válasza eltérő volt. (Kessler, 1971).

3.3.3. BARLANGI MÉRÉSEK SAJÁT KÉSZÍTÉSŰ BILLENŐEDÉNYES MÉRŐMŰSZERREL

Nagy (2021) a Molnár János-barlang hidrológiájával kapcsolatos kutatásokat végzett, mely során olyan eszközök kidolgozásában is részt vett, melyek az adatok hiányából adódó nehézségek leküzdésére szolgáltak. Ahogy a diplomamunkájában említette, egy komplex barlangrendszerben célszerű lenne egy meglehetősen nagy sűrűségű monitoring rendszer kiépítése, de a rendelkezésre álló források korlátozottak. E probléma megoldására különböző típusú műszerek fejlesztésébe kezdett, amelyek lehetővé teszik egy megfelelő sűrűségű és pontosságú hálózat megvalósítását alacsony költséggel. Az Arduino integrált fejlesztőkörnyezet (IDE) lehetővé tette a célnak megfelelő műszerek kifejlesztését viszonylag alacsony anyagi befektetéssel. Nagy (2021) diplomamunkájában bemutatta, hogyan lehet prototípust tervezni, majd nyomtatott áramkörrel (PCB) felgyorsítani ezt a folyamatot és rövidebb idő alatt reprodukálni a műszert. Ez lehetővé teszi, hogy a műszerek egyszerre több mérési ponton is elhelyezhetők legyenek, így olyan folyamatok válnak érzékelhetővé, amelyek korábban nem voltak lehetségesek. Ezen túlmenően a módszer megkönnyíti egy új paraméter megfigyelését és egy folyamatos adatsor létrehozását is (Nagy, 2021).

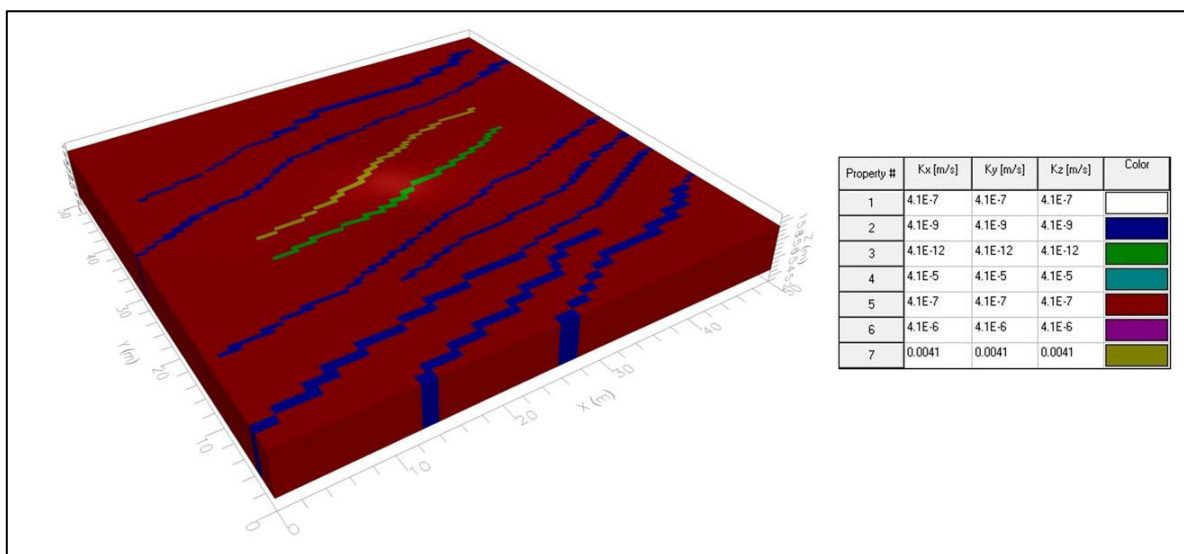
3.3.4. NUMERIKUS MODELLEK

A Várbarlangban 2008 és 2010 között végzett vizsgálatok alapján a Visual MODFLOW 2.8.2 programban hidrodinamikai modellt készítettek. Egy kisebb „kétkutas” és egy nagyobb területű „nyolckutas” modell 3 db, illetve 4 db különböző változatát vizsgálták. A „kétkutas” modellben, ahogy a neve is tükrözi, két kút vizsgált a modellben lehatárolt területen. A Hadik és a Mamutfogas kutakat több okból választották ki. A kutak közötti kapcsolatot már többször vizsgálták korábban. Bár a két kút közötti távolság mindössze 5-6 m, a korábbi vizsgálatoknál, valamint a 2009-2010-es próbaszivattyúzások során nem észleltek kapcsolatot a két víztest között. (Farkas, 2013).

Farkas (2013) célja egy olyan modell megalkotása volt, amely a lehető legközelebb áll a megfigyelésekhez. Munkájában a modell kalibrálására törekedett permanens állapotra, feltételezve, hogy ezt az állapotot a próbaszivattyúzás előtt megfigyelték. A modell permanens állapotra történő kalibrálása után tranziens szimulációt futtatott a modellben a Mamutfogas-kúton végzett próbaszivattyúzás adataival meghajtva. Különböző szivárgási tényező eloszlásokkal és peremfeltételekkel kísérletezett három modellváltozatban. Az „A” modellt a számított peremfeltételekkel futtatta. A modellben a két kút közé vízzáró réteget helyezett, hogy modellezni lehessen, hogy a két kút között nincs kimutatható kapcsolat. Ettől eltekintve a

szivárgási tényező eloszlását trial-and-error alapon módosította, amíg elfogadható hibahatáron belüli megoldást nem talált. A „B” változatban a peremfeltételeket és a szivárgási tényező eloszlást módosította. Ez a változat is tartalmazta a kutak közötti szinte vízzáró sávot is. Ezenkívül egy nagy áteresztőképességű sávot is hozzáadott, amely a kőzetben lévő repedezett zónát jelképezte, amelyen keresztül nagy mennyiségű víz juthat be a Mamutfogas-kútba. A „C” változat szintén tartalmazta a vízzáró és a nagy áteresztőképességű sávot. Ebben a változatban azonban a modellterület többi része homogén kőzet volt, amelyet kevésbé áteresztő zónák szakítottak meg repedések formájában (3. ábra) (Farkas, 2013).

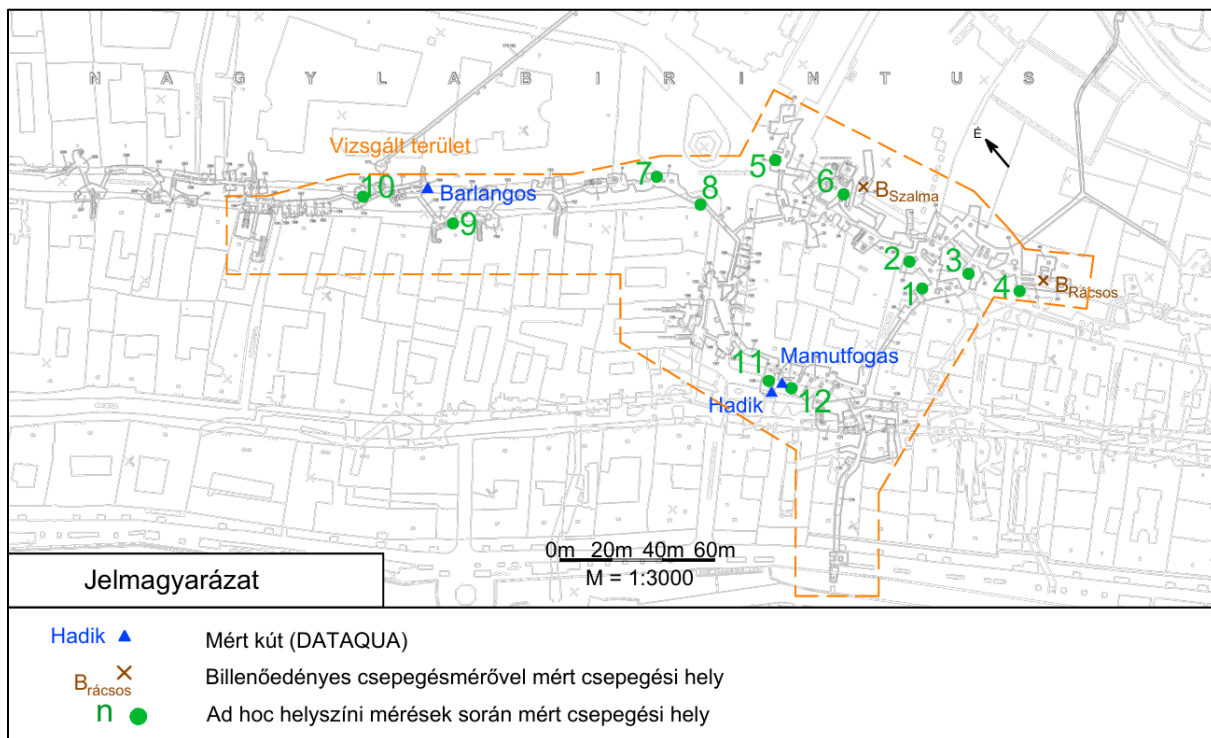
A modellek tranziens futtatásakor a három modell közül csak a „B” és a „C” modellek voltak azok, amelyek részben képesek voltak reprodukálni a megfigyelt adatokat. A „B” változatban a Mamutfogas kút leszívása közelebb állt a megfigyelésekhez, de a kút visszatöltődése túl gyors volt. A „C” modell esetében a visszatöltődési idő megfelelő volt, de a leszívás kisebb volt a mért értékeknél. A szivattyúzási sebességet is csökkenteni kellett a mért értékhez képest, hogy a tranziens futtatásban elérjék a kívánt értékeket (Farkas, 2013). A jelenlegi dolgozatban a „C” modellhez hasonló modellt építettem.



3. ábra A szivárgási tényező eloszlása a C modellben Farkas (2013) korábbi munkájában

4. MÓDSZERTAN

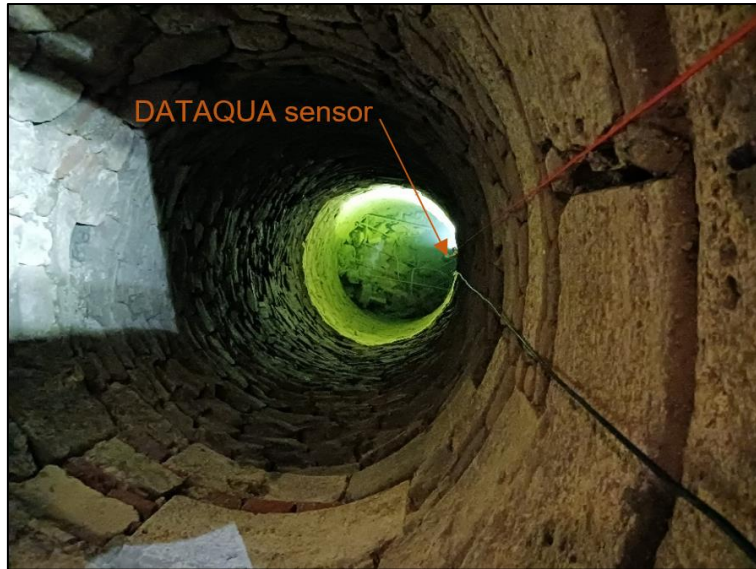
A mérési helyszíneket a 4. ábrán látható térkép jelzi. Ez a térkép a BURKEN cég lézerszkenneres felmérése alapján készült, és a Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóságtól kaptuk. A mért kutakat a ▲ háromszögek jelölik, a billenőedényes csepegővíz mérési helyeket az × jelek, az ad hoc méréseket pedig a ● körök. A mérések módszertanát a következő fejezetekben ismertetem.



4. ábra Mérési helyszínek a Nagy Labirintusban (az alaptérkép a BURKEN cég munkája (2011), melyet a Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóságtól kaptunk)

4.1. KÚTVÍZSZINT MÉRÉSEK ÉS PRÓBASZIVATTYÚZÁS

A vízszinteket DATAQUA szenzorokkal mértük három kútban. A Barlangos kútban lévő érzékelő tárolja a vízszint-, a hőmérséklet- és a vezetőképesség adatokat is, míg a Hadik és a Mamutfogas kútban lévő érzékelők a vízszintet és a hőmérsékletet regisztrálják. A mérések időbeli felbontása 10 perc, amelyet a próbaszivattyúzás idejére 30 másodpercre növeltünk. A mérések 2023. október 26-án kezdődtek, és azóta egy-két havonta olvastuk ki a mérési adatokat. Minden egyes kiolvasás során az adatokat az érzékelőről kigyűjtöttük, majd a vízszintet kézzel, vízmélységmérővel megmértük. A következő mérések ezt vették kiinduló értéknek. Ez megakadályozta, hogy az idősorokban folyamatos hibák keletkezzenek. Az egyik DATAQUA érzékelő a 3. képen látható a Mamutfogas kútban.



3. kép DATAQUA szenzor a Mamutfogas kútban

Az adatok feldolgozásához egy MATLAB kódot készítettem, amely kiolvassa az adatokat egy Excel táblázatból, és korrigálja a mért értékeket az érzékelővel és a vízmélységmérővel végzett mérések különbsége alapján. Ez a kód segít viszonylag gyorsan kiértékelni az új méréseket. A kódban a vízszintek a kiolvasáskor az érzékelő és a vízszintmérő által mért értékek közötti különbség alapján kerülnek korrigálásra. Ezt a különbséget egy mérési intervallum (általában egy vagy két hónap) mentén lineárisan osztottam el, az előző mérés kezdetén lévő értéket nem korrigáltam, és az aktuális kiolvasás előtti értéket pedig a teljes különbségértékkel javítottam. Az adatok elemzése érdekében a hiányzó értékeket interpoláltam, és 10 perces időléptékkel idősort készítettem.

A kutak vízadóképességének meghatározása érdekében 2024. február 26-án próbaszivattyúzást végeztünk a Hadik és a Mamutfogas kutakon. A vízhozamot köbözéssel, a vízszintet pedig a próbaszivattyúzás előtt és után vízmélységmérővel mértük. A próbaszivattyúzás következtében a vízszintek a DATAQUA érzékelők szintje alá csökkentek, ami hiányt okozott az adatsorokban. A Hadik kútnál az alacsony vízszintek miatt 2024. február 26-án 11:35-től 2024. március 4-én 9:39-ig, a Mamutfogas kútnál pedig 2024. február 26-án 11:04-től 16:30-ig nincsenek DATAQUA szenzor adatok. A Hadik kút szivattyúzása a 4. képen látható.



4. kép A Hadik kút szivattyúzása, 2024. febr. 26.

4.2. CSEPEGŐVÍZ MÉRÉSEK

A Várbarlang csepegővizeit két helyen folyamatosan mértük billenőedényes mérőműszerekkel, de emellett ad hoc méréseket is végeztünk. A következő 4.2.1. fejezetben a billenőedényes mérőműszerek működését, felépítését és elhelyezését mutatom be, a 4.2.2. fejezetben pedig az ad hoc mérések módszertanát ismertetem.

4.2.1. BILLENŐEDÉNYES CSEPEGÉSMÉRŐ MŰSZER

Mivel a barlangba való bejutás előzetes egyeztetést igényelt és csak havonta volt lehetséges (az eszközöket a kiolvasások közötti időintervallumban felügyelet nélkül hagytuk), olyan műszert kellett használnunk, amely alacsony energiafogyasztású. Nagy (2021) munkája során hasonló kihívással nézett szembe, neki is egy kellően pontos, alacsony fogyasztású és költséghatékony mérőeszközt kellett létrehoznia. Egy ilyen, korábban két diplomamunkában (Nagy, 2021; Tóth, 2016) tervezett, a csepegővizek mérésére szolgáló mérőeszköz (billenőedényes csepegésmérő) fejlesztésébe kapcsolódtam be, Dr. Szieberth Dénes a BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar egyetemi docensének és kollégáinak segítségével. Miután a Várbarlangba két billenőedényes mérőműszert összeszereltünk, a jósvafői Vass Imre-barlang megfigyelésére további három mérőeszközt készítettem, különböző elkészítési módszerekkel kísérletezve. A következőkben a mérőeszközök elkészítését, kalibrálását és elhelyezését mutatom be.

A műszereket két helyszínen teszteltük és használtuk terepi mérésekhez. Az eredeti terv az volt, hogy e két helyszínen, egy erősen urbanizált és egy természetes környezetben lévő

barlangban mérjük a csepegővizet és a mérések eredményét összehasonlítottuk volna. Sajnos a Vass Imre-barlangban a mérési nehézségek és az csekély csepegésmennyiség, valamint a földrajzi korlátok miatt ez nem valósulhatott meg.

4.2.1.1. A MŰSZEREK MŰKÖDÉSI ELVE ÉS A KÉSZÍTÉS FOLYAMATA

A készített mérőeszköz egy billenőedényes csapadékmérőn alapul, amely egy tölcsérből, egy kétkarú billenőedényből és egy Reed-reléből áll. A tölcsér a csapadékot a billenőedény egyik felébe irányítja, és amikor ez a billenőedény megtelik, az edény átbillen, kiürül és az áramkör pillanatnyilag bezárul. A hardver egy Arduino Pro Mini mikrokontrollerből, egy DS3232 óra modulból és egy SD kártyaolvasó modulból áll, amely az alaplapon található. Az áramellátást egy 18650-es 1600 mAh lítium-vasfoszfát akkumulátor biztosítja (11. kép).

A műszer alapértelmezés szerint alvó üzemmódban van. Amikor az áramkör zár (billenés történik), az Arduino mikrokontroller megszakítást (interruptot) érzékel az egyik lábon, felébred és növeli a billenésszámot. Ha az előző rögzítés óta több mint 10 perc telt el, akkor a számot az SD-kártyára írja, majd nullára állítja a számlálót és visszatér alvó üzemmódba.

A hardver felépítése három különböző módon történt. Az első egy próbapanelen (ún. breadboard-on) volt, és a vezetékek forrasztását kézzel végeztem minden egyes lábnál. Ez sok időt igényelt, de szinte semmilyen előzetes előkészítésre nem volt szükség. A másodiknál a Fritzing szoftver segítségével terveztem meg a vezetékeztést, és lézernyomatással kísérleteztem különböző papírtípusokra. Az alaplapot egy egyoldalas üres NYÁK-ból készítettem el, megfelelő méretűre vágva. Nagyon finom csiszolópapírral lecsiszoltam, majd megtisztítottam (5. kép). A nyomtatott alaplapra való átvitelét vasalással végeztük (6. kép). Az eredmény a 7. képen látható. A maratás vas-kloridba áztatással történt. Ezután a mikrokontroller lábainak, az SD-kártyaolvasónak, az óra modulnak és a billenőedényes műszerhez való csatlakozásnak lyukakat fúrtam (8. kép). Ezen kívül olyan lyukakra is szükség volt, ahol nem lehetett a lábakat a nyomtatott áramkörben úgy összekötni, hogy ne keresztezzék egymást, ezért néhány vezetéket a nyomtatott áramkör „fölött” kellett átvezetni. A kész lap a 9. képen látható. A lábakat ezután az alaplapra forrasztottam (10. kép). Ez egy olcsó megoldás volt, amely forrasztása kevesebb időt igényelt, mivel a huzalok nagy részét nem kellett forrasztani. Ez egy kevésbé gyakran használt módszer, mivel meglehetősen problémás lehet. Az általam tapasztalt hátulütője az volt, hogy a „minta” átvitele a papírról a lemezre csak egy bizonyos típusú papírral működött, azonban még ezzel sem mindig sikerült a kívánt eredményt elérni. Néha, ha nem volt elég erősen lenyomva, vagy a papír elmozdult, a papírról átvitt nyomtatott elmosódott volt, vagy hiányzott néhány rész. Ez azt eredményezte, hogy meg kellett ismételni a csiszolás, tisztítás és

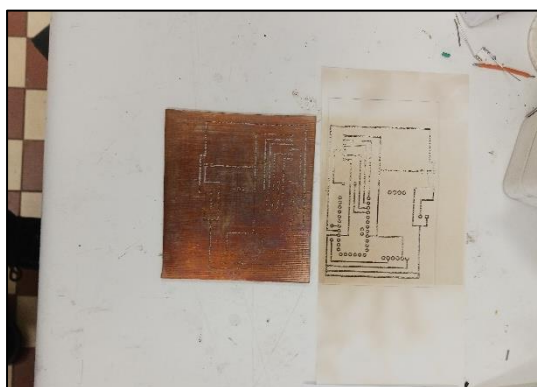
vasalás folyamatát. A harmadik módszer a professzionális NYÁK maratási technológia alkalmazása volt, ami a leggyorsabb, de legdrágább megoldás volt. Emellett lehetővé tette, hogy némi helyet szabadítsunk fel, mivel a maratás pontosabb volt, és a vezetékek között kevesebb helyre volt szükség. A lábak forrasztását azonban itt is el kellett végezni.



5. kép Az egyoldali üres NYÁK vágás, csiszolás és tisztítás után



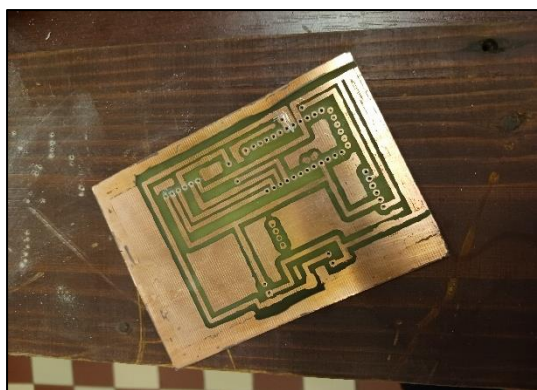
6. kép A nyomat átvitele



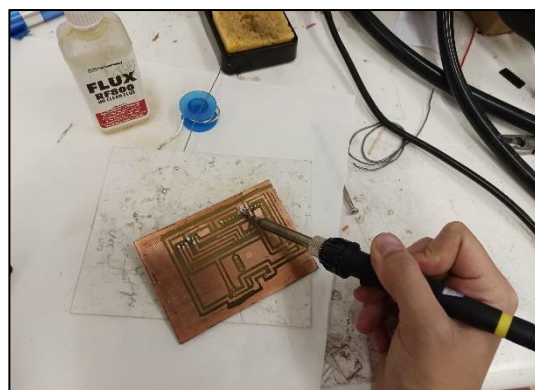
7. kép A NYÁK a nyomat átvitele után



8. kép Lyukak fúrása a modulok lábaihoz



9. kép Elkészült alaplap, készen a forrasztásra



10. kép A modulok lábainak forrasztása

Az elkészült eszköz hardware részek (a fedlap ráhelyezés előtt) a 11. képen láthatók, jobbra a breadboard alapú, középen a vasalt, balra pedig a szakszerűen maratott.



11. kép A Vass Imre-barlang kész mérőeszközeinek hardware részei

4.2.1.2. A MŰSZEREK KALIBRÁCIÓJA

A műszer kalibrációja a 12. képen látható módon történt. A tölcsér fölé egy teljesen megtöltött bürettát helyeztem. A műszert egy vödörbe tettem, hogy összegyűjtsem a folyadékot, amely a műszer alján keresztül a billenés után kifolyik. Kezdetben a billenőedény üres volt. A mérés megkezdéséhez megnyitottam a csapot, és elindítottam a stopperórát. Amikor a büretta kezdett kifogyni, a következő billenésnél elzártam a csapot, és leolvastam a felhasznált vízmennyiséget.



12. kép A billenőedényes mérőeszköz kalibrálása

A billenőedények térfogatát a felhasznált vízmennyiségnek és a billenések számának hányadosaként számítottam ki. A térfogatot öt mérésből határoztam meg. A méréseket az 1. táblázat tartalmazza.

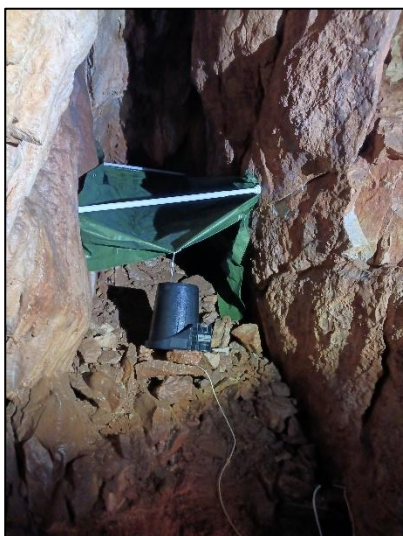
1. táblázat A billenőedényes mérőműszer kalibrációs mérései

Felhasznált vízmennyiség [cm ³]	Billenésszám	Billenőedény térfogata [cm ³]
44,0	9	4,9
43,3	9	4,8
39,9	9	4,4
40,0	9	4,4
38,5	9	4,3

A billenőedény átlagos térfogata 4,6 cm³ lett, de a mérések tartomány viszonylag nagy volt, 4,3 és 4,9 cm³ közötti értékeket mértem. Ennek feltételezhetőleg az az oka, hogy az utolsó billenés után néhány vízcsepp maradhatott a billenőedényekben, melyet Nagy (2021). is említett. Ezen feltételezés alapján elfogadtam a kalibrált értéket, mivel ez a műszerrel is megtörténhet az elhelyezés után.

4.2.1.3. MŰSZEREK ELHELYEZÉSE

A műszereket a Várbarlangban és a Vass Imre-barlangban a helyszín szemrevételezése és a csepegő víz intenzitásának felmérése után helyeztük el. A mérési helyek kiválasztásánál figyelembe vettük a korábbi mérési helyszíneket és a zavartalan működés biztosítását is (a Várbarlangban ez olyan helyeket jelent, ahol nem gyakran járnak a turisták, Jósuvafőn pedig az útvonaltól távolabb). A helyszínek kiválasztása után a billenőedényes mérőműszerek tölcseire fölé ponyvát helyeztünk, amely nagyobb területről gyűjtötte a vizet a műszerekbe. A mérőműszerek közül kettőt 2024. január 8-án a budai Várbarlangban, további hármat pedig 2024. július 1-jén a Környezetkultúra és örökségvédelem építőmérnököknek tantárgy terepbejárása során a Vass Imre-barlangban helyeztünk el. Néhány mérési helyszín látható a 13-16. képeken.



13. kép Az 1. számú mérési hely a Vass Imre-barlangban, Jósvafőn



14. kép A 3. számú mérési hely a Vass Imre-barlangban, Jósvafőn



15. kép A „Szalmacseppköves” mérési hely a budai Várbarlangban



16. kép A „Rácsos kút” mérési hely a budai Várbarlangban

4.2.1.4. A BILLENŐEDÉNYES MŰSZEREKKEL MÉRT ADATOK FELDOLGOZÁSA

A nyers adatokat MATLAB-ban dolgoztam fel. Egy kódot készítettem az adatok kiolvasására és kiértékelésére, a kútmérésekhez hasonló módon. Ez a számítás összetettebb volt, mivel az időbeli felbontás általában nem tíz perc volt, hiszen néha egy óra is eltelt a billenés bekövetkezéséig. Ezt úgy oldottam meg, hogy először a mérési időket a legközelebbi kerek percre kerekítettem, és a billenésszámot a kalibrált térfogattal való szorzással és a ponyva területével való osztással számoltam át vízmennyiségre. Utána az (n-1)-edik méréstől az n-edik mérésig eltelt időt kiszámítottam, és a térfogatot elosztottam az eltelt idővel (percben). Az így kapott értéket az (n-1)-edik és az n-edik mérés közötti minden egyes perchez hozzárendeltem. Ezt a módszert az 1. egyenlet fejezi ki.

$$i_{t_{n-1}+1} = i_{t_{n-1}+2} = \dots = i_{t_n} = \frac{V_{t_n}}{(t_n - t_{n-1}) \cdot A} \quad (1)$$

Ahol:

- $i_{t_{n-1}+1} \left[\frac{ml}{s \cdot m^2} \right]$ – a csepegés intenzitás értéke (fajlagos csepegéshozam) egy perccel az (n-1)-edik mérés időpontja után,
- $V_{t_n} [cm^3]$ – a mért vízmennyiség, $V_{t_n} = c_{t_n} \cdot V_{cal}$, ahol $c_{t_n} [-]$ a billenésszám az n-edik mérésnél és $V_{cal} [cm^3]$ a billenőedény kalibrációval meghatározott térfogata,
- $t_n [s]$ – idő az n-edik mérésnél,
- $A [cm^2]$ – a ponyva területe.

Miután az intenzitásokat ilyen módon kiszámítottam minden percre, az óránkénti értékeket is meghatároztam belőlük.

4.2.2. AD HOC HELYSZÍNI MÉRÉSEK

Az ad hoc helyszíni méréseket 2024 szeptemberében végeztük. Az első alkalommal, szeptember 18-án megfigyeltük a barlang főtejéről a csepegést, és megjelöltük a nagy intenzitású pontokat, ahová gyűjtőedényeket helyeztünk el. A mérési helyek a 4. ábrán körrel vannak jelölve, és 1-12-ig számokkal vannak ellátva.

A terepi mérések során a gyűjtőedények elhelyezése után feljegyeztük az időt. A következő helyszíni vizsgálatkor megmértük a gyűjtőedényekben összegyűlt vízmennyiséget, és feljegyeztük az eltelt időt. A csepegéshozam értékét a vízmennyiség és az idő hányadosaként számoltam ki (2. egyenlet).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

Ahol:

- $Q \left[\frac{ml}{h} \right]$ – a csepegéshozam,
- $V [cm^3]$ – a gyűjtőedényben összegyűlt víz,
- $t [h]$ – a két mérés között eltelt idő.

A méréseket először másfél-két órán keresztül végeztük, majd a következő három alkalommal a mérés egy hétig tartott. Ennek oka, hogy nem volt egyszerű úgy ütemezni a méréseket, hogy egyben elvégezhessük őket, mivel az több órát igényelt. Emellett a heti mérések lehetővé tették, hogy az időbeli átlagot mérjük. Mivel a gyűjtőedények egy hét alatt sok helyen túlcsoordultak, 2024. október 8-án újabb rövid, körülbelül egy órás mérést végeztünk. Összességében így mérési helyenként öt csepegéshozam értéket kaptunk.

Ahogy a méréseket végezve a barlangot körbejártuk, szemrevételeztük a nedves, illetve csepegő főtéjű helyeket és lehatároltuk a mérési helyekhez tartozó csepegés szempontjából hasonló területeket. A csepegőhelyeket egy bejárás során a felszínen is azonosítottuk, néhány példa látható a 17-20 képeken.



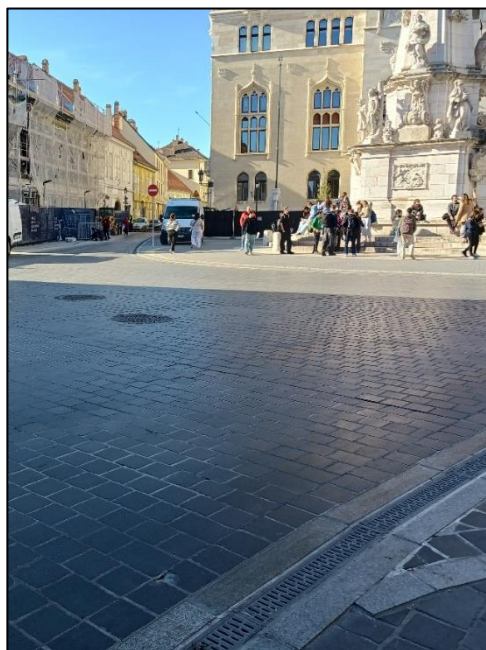
17. kép Az 1. számú gyűjtőedény a budai Várbarlangban



19. kép Az 5. számú gyűjtőedény a budai Várbarlangban



18. kép A Fontana szökőkút az 1. számú mérési hely felett



20. kép A Szentháromság tér egy része az 5. számú mérési hely felett

4.3. CSAPADÉK ADATOK

Ahhoz, hogy a vízszint és a csepegővíz idősorokat össze tudjam hasonlítani a terület csapadékmennyiségével, a HungaroMet Nonprofit Zrt. Meteorológiai Adattárából (HungaroMet, 2024) jutottam hozzá a 10 perces automata meteorológiai állomások adataihoz. A 44121-es számú állomás Budapest II. kerületében található, a Várbarlanghoz közel. Hajnal (2001) megállapította, hogy a Várhegyen lehullott csapadék jól korrelál ennek az állomásnak a méréseivel, így azok felhasználhatók a jelen tanulmányban. Letöltöttem a jósvalői automata meteorológiai állomás 10 perces adatait is (51705-ös állomásszám), amely mindössze kb. 300 m-re van a Vass Imre-barlangtól. Ezeket az adatokat szintén MATLAB-ban dolgoztam fel.

4.4. KORRELÁCIÓVIZSGÁLAT

A dolgozatom egyik célja volt, hogy a barlangi vizek eredetét vizsgáljam oly módon, hogy a csapadékadatok és a mért idősorok közötti összefüggések keresek. Ezért a csapadék, vízszint és csepegés intenzitás idősorok közötti kapcsolatot lineáris korreláció segítségével vizsgáltam. Az időbeli felbontást csökkentettem, mivel a nagy időbeli felbontású adatsorok közötti kapcsolat feltárása nehezebb lehet, és nagyobb torzítások és hibák is terhelhetik őket. Ezért a vizsgálatot a napi csapadékösszegekre, valamint a napi átlagos vízszintekre és csepegés intenzitásra végeztem el. A csapadék adatokat $1, 2, \dots, n$ nappal eltoltam, és az idősorok közti korrelációs együtthatókat lineáris regresszióval határoztam meg. A maximális eltolás öt hónap volt. Ezt a vizsgálatot MATLAB-ban (a *corrcoef* függvény segítségével) végeztem el. A vízszint idősorokat két részre osztottam, mivel a próbaszivattyúzás és az utána való visszatöltődés időtartamát eltávolítottam az adatokból, így a szivattyúzás előtti és a visszatöltődés utáni idősorokat vizsgáltam.

4.5. VÍZKÉMIAI VIZSGÁLATOK

A vízkémiai paraméterek mérése januárban kezdődött, és körülbelül havonta történt vízmintavétel, melyet Dr. Szieberth Dénes végzett el, a minták kiértékelésével együtt. A mintavételezés elsősorban a DATAQUA szenzorral mért Barlangos, Hadik és Mamutfogas kutakból és a „Rácsos kút” és „Szalmacseppköves” csepegő helyekről történt, amelyeken mennyiségi méréseket is végeztünk. A vizsgált paraméterek a klorid-, nitrát-, magnézium- és kalciumion-koncentrációk voltak.

4.6. NUMERIKUS MODELL

A Hadik és Mamutfogas kutak területének vizsgálatára numerikus modellt készítettem. Először a modell permanens állapotra való kalibrációját végeztem el, majd tranziens szimulációt futtattam a próbaszivattyúzás reprodukálása céljából. Ebben a fejezetben a modell főbb jellemzőit, felépítését ismertetem. A kalibrált modelleket az Eredmények 5.5. fejezetében mutatom be.

A Visual MODFLOW Flex szoftver

A dolgozatomban a Visual MODFLOW Flex 10.0 programot használtam a vizsgált terület modelljének elkészítéséhez. A MODFLOW egy felszín alatti víz áramlását modellező program, amelyet az Egyesült Államok Geológiai Szolgálat (USGS) készített, és amely lehetővé teszi egy vizsgált terület hidrogeológiai környezetének numerikus modellezését. A program a véges differenciák módszerét használja a felszín alatti áramlási modell tartományának sorokra, oszlopokra és rétegekre történő felosztására. A modelltartományon belül meghatározza az egyedi ráctömbök (modellcellák) rendszerét, melyen ábrázolhatók a hidrogeológiai tulajdonságok eloszlása és a peremfeltételek. A modell felépítése során tulajdonságok és mellékfeltételek (kezdeti vagy peremfeltételek) rendelhetők ezekhez a modellcellákhoz, és a MODFLOW a cellaméreteket, a tulajdonságok értékeiket és a mellékfeltételeket használja fel a véges differencia egyenletek felírásához. Ezután megoldja az egyenleteket, és kiszámítja a hidraulikus nyomásmagasságot az egyes modellcellák középpontjában (Waterloo Hydrogeologic, 2012).

A felszín alatti víz áramlásának egyenlete

A víz áramlása a Darcy-törvény és a folytonossági egyenlet alapján írható le, amely a folyadék tömegmegmaradását írja le a porózus közegben történő áramlás során. Permanens állapotú telített áramlás esetén a folytonossági egyenlet a 3. egyenletben látható parciális differenciálegyenletként írható fel egy elemi ellenőrző térfogatra. Felhasználva azt a tényt, hogy kimutatható, hogy a $\rho \cdot \partial v_x / \partial x$ kifejezések sokkal nagyobbak, mint a $v_x \cdot \partial \rho / \partial x$ tagok, a 4. egyenlethez jutunk. A Darcy-törvényt alkalmazva pedig az 5. egyenletet kapjuk (Freeze & Cherry, 1979).

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

Nempermanens (tranzien) telített áramlás esetén a tömegmegmaradás törvénye kimondja, hogy „egy ellenőrző térfogatba áramló folyadékmennyiségek eredője egyenlő kell legyen a elemen belüli folyadékmennyiség megváltozásával” (Freeze & Cherry, 1979). Az egyenlet bal oldala megegyezik a 3 - 5. egyenletével, de a jobb oldal a folyadékmennyiség megváltozását fejezi ki, $\rho S_s \partial h / \partial t$ formában, ahol S_s a fajlagos tárolási tényező. Ez is egyszerűsíthető, felhasználva azt, hogy a $v_x \partial \rho / \partial x$ elhanyagolható a $\rho \partial v_x / \partial x$ -hez képest. Így kapjuk a 6. egyenletet (Freeze & Cherry, 1979).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

Az S_s fajlagos tárolási tényezőt a zárt (telített) víztartó rétegekben használják, a nyílt víztartó rétegek tározódását az S_y fajlagos hozammal lehet kifejezni. A S_y általában 0,01 és 0,30 között mozog (Freeze & Cherry, 1979). A Visual MODFLOW Flex felhasználói kézikönyvében a S_y fajlagos hozamot a következőképpen határozzák meg: „az a vízmennyiség, amely egy nyílt víztartó rétegben egységnyi felületen és a talajvízszint egységnyi csökkenésének hatására felszabadul” (Waterloo Hydrogeologic, 2024).

Modellszerkezet

A szoftverben a modell egy vagy több koncepcionális modellből és több numerikus modellből áll, melyeket a koncepcionális modellek átalakításával (konvertálásával) lehet kapni. Egy koncepcionális modellhez tetszőleges számú numerikus modell tartozhat. A numerikus modellek tulajdonságai egyedileg beállíthatók. Az értékek megváltoztathatók a koncepcionális modellben szereplő értékekhez képest, de a modell geometriája nem módosítható. Ebben a dolgozatban egy koncepcionális modellt használtam, és több mint 50 db numerikus modellel való kísérletezés után a két legjobbat kalibráltam permanens állapotra. A következőkben bemutatom a koncepcionális modellt, amely a numerikus modellek alapjául szolgált.

Geometria

A koncepcionális modell létrehozásának első lépése az adatfájlok importálása volt különböző forrásokból, például jelen esetben shapefile-okból, pontokból (dxf vagy txt formátumból) valamint (a kutak helyeit) Excel táblázatból importáltam. Az ezt követő lépés a

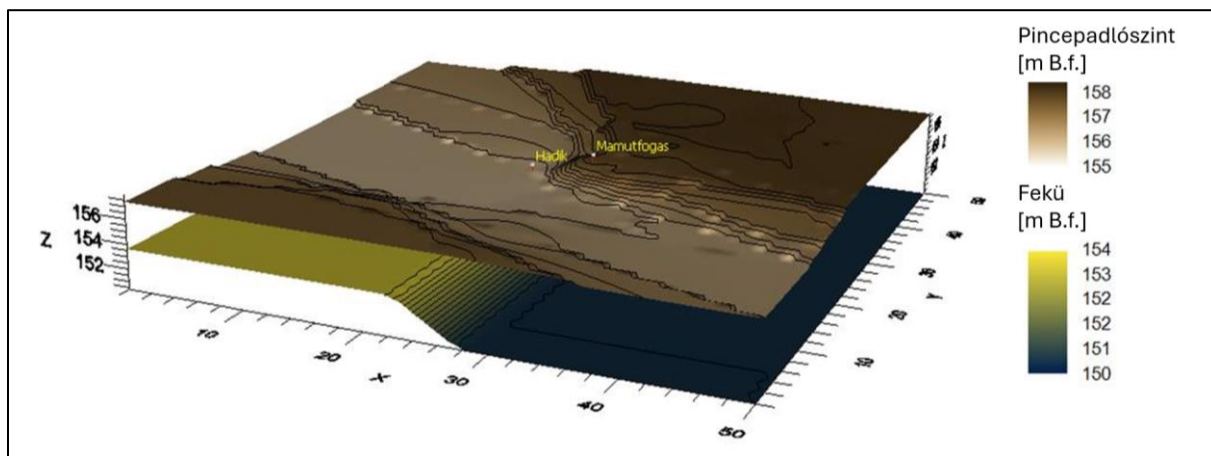
felületek létrehozása és a koncepcionális modell területének lehatárolása volt (Waterloo Hydrogeologic, 2014).

Az általam létrehozott koncepcionális modell két felületet tartalmazott, amelyeket a modell szinteknek (horizon) nevez, ezek a réteghatárok. A felső szint a barlang padlójának felülete, míg az alsó a kutak fenékszintjén van. Feltételeztem, hogy a kutak vízszintjét ezen két felület által határolt zónából a kutakba áramló víz határozza meg.

A modell geometriája a BURKEN cég 2011-es felmérésein alapult. A DINPI-től pdf formátumban kapott térképet importáltam az AutoCAD szoftverbe. A modell területét ($50 \times 50 \text{ m}^2$) úgy határoltam le, hogy egyik oldala párhuzamos volt a Hadik és a Mamutfogas kutakat összekötő vonallal (a valóságban ÉÉNY-DKK irány), így határoztam meg a modell szélső peremeit.

A felső réteghatár (pincepadló) létrehozásához a felmérésből ismert magasságú helyeken pontokat illesztettem be, és hozzájuk rendeltem a tengerszint feletti magasságukat. Ezután ezeket a pontokat egy txt fájlba exportáltam, és a fájlt importáltam a modellbe. Egy dm pontosságú felületet hoztam létre (500 X és 500 Y intervallummal) az Inverse Distance módszerrel, a használt szomszédok számának értékét 3-ra állítva. Ettől a végső verziótól eltekintve más paraméterekkel és más beépített módszerekkel is kísérleteztem, azonban ez reprodukálta a legjobban a barlang padlójának valós geometriáját.

Az alsó szintet a kutak fenékszintje alapján hoztam létre, feltételezve, hogy két párhuzamos sík kapcsolódik egymáshoz, a két kút között meredek lejtéssel. Ezt a felületet a Natural Neighbours módszerrel hoztam létre, mivel a többi módszer (Inverse Distance, Kringing) hajlamos volt túlbonyolítani a felületet, még akkor is, ha 45 db pontot adtam meg bemenetként ezen az elképzelt felületen (koordinátaikat egy txt fájlban készítettem el). A modell felépítése az 5. ábrán látható.



5. ábra Modellszerkezet a Visual MODFLOW Flexben

A két kutat a 2. táblázatban leírt adatokkal importáltam a modellbe.

2. táblázat A numerikus modellbe bevitt kútadatok

Kút neve	Hadik	Mamutfogas
Barlangpadló [m B.f.]	155,95	157,56
Kútfenék [m B.f.]	153,62	150,37
Kútkáva [m B.f.]	156,35	157,96

A kutakat két típusban adtam hozzá. Először megfigyelő kutak formájában, óránkénti adatokkal, amelyeket a feldolgozott DATAQUA érzékelő méréseiből nyertem ki. Másodszor, szivattyúzott kútként is hozzáadtam a kutakat, hogy később a tranziens szimulációkban is felhasználhatók legyenek.

Hidraulikai tulajdonságok

A modellben a hidraulikai jellemzők zónákhoz vagy poligonokhoz rendelhetők. A két réteghatár közötti homogén zónához egy tulajdonságot (Property Zone-t) rendeltem (PZ1), a kutak közötti zónához pedig egy másikat (PZ2), mivel korábbi vizsgálatokból tudjuk, hogy a kutak között nincs jelentős kapcsolat. A PZ1 szivárgási tényezőjét $k_{PZ1} = 4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ értékre, a kutak közötti zónáét pedig $k_{PZ2} = 4.1 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$ értékre vettem fel. Ezeket az értékeket Farkas (2013) „C” modellváltozata alapján választottam ki, melyet a 3.3.4. fejezetben mutattam be. Ezt a kezdeti beállítást a kalibrált numerikus modellekben kissé módosítottam.

Peremfeltételek

A koncepcionális modell utolsó elemei a peremfeltételek, amelyeket a modell ellentétes szélein, a két kutat összekötő vonalra merőlegesen definiáltam. Feltételezhető, hogy az áramlás iránya a Hadik kútból a Mamutfogas kút felé mutat, mivel a Hadikban magasabb a nyugalmi vízszint. A peremfeltételek General Head típusúak voltak. A peremfeltételek számítása kezdetben a Farkas (2013) által leírtakhoz hasonlóan történt. A kutak statikus vízszintjeiből egy meredekséget számítottam, és a vízszinteket e meredekség harmadával extrapoláltam a modell határait. Különböző meredekség értékekkel is kísérleteztem, $\frac{1}{2}$ -del és $\frac{1}{4}$ -del, de a harmad bizonyult a legmegfelelőbbnek. Bár az alapvető módszer ugyanaz maradt, a peremfeltételek változtak a két numerikus modell esetében (melyeket részletesen az 5.5. fejezetben mutatok be).

Rácsáló

A numerikus rács létrehozásához a rács méretét 1 méterre vettem fel, és a rétegek típusát deformáltra állítottam be. Ezután finomítottam a rácsot a vizsgált terület körül, a 10-40. sor és 10-40. oszlopok közt. A cellákat ebben a tartományban elfeleztem, ami 0,5 m rácsméretet eredményezett. Miután a numerikus rácsot definiáltam, a konceptuális modell objektumokból (tulajdonságzónák és peremfeltételek) numerikus modellt lehetett generálni. Ez automatikusan történt egy konverziós eljárással (Waterloo Hydrogeologic, 2014).

Numerikus modellé való átalakítás

A konvertálás után lehetőség van a tulajdonságok és a peremfeltételek módosítására, valamint megfigyelések hozzáadására. A tulajdonságokon a rácshálón is lehet még igazítani, amire néha szükség volt, mivel az objektumok a koncepcionális modellben alakzatokhoz lettek hozzárendelve, nem pedig ráscellákhoz. A modell a változtatások után automatikusan újra generálja a tulajdonságokat és a peremfeltételeket. A fordítási beállítások ellenőrzése után a modell lefordítható és futtatható (Waterloo Hydrogeologic, 2014).

Ebben a dolgozatban a MODFLOW-NWT csomagot használtam, amely a MODFLOW egy olyan változata, amely a szabad felszínű talajvíz áramlás egyenletében a kiszáradás és a újra nedvesedés nemlinearitását tartalmazó problémák megoldására fejlesztett funkciókkal rendelkezik (Niswonger és mtsai., 2011). Mivel az első szimuláció során néhány cella kiszáradt az alsó réteghatár két kút közötti meredek változása miatt, a MODFLOW-NWT választása az alapértelmezett MODFLOW-2005 helyett megakadályozta a cellák kiszáradását és segített a modell-konvergenciát elérni. (Az újra nedvesítés opciót nem használtuk.) Ezen a változtatáson kívül többnyire az alapértelmezett beállításokat használtam, szükség esetén az iterációs számot növeltem a modell konvergenciájának elérése érdekében.

Kalibráció

Az permanens állapot kalibrálásakor először a szivárgási tényező eloszlását módosítottam és szükség esetén a peremfeltételeken is változtattam, hogy a számított és a megfigyelt értékek között jobb egyezést érjek el.

A tranziens futtatást a fajlagos hozam (S_y) értékeinek segítségével kalibráltam, egyetlen homogén zónaként.

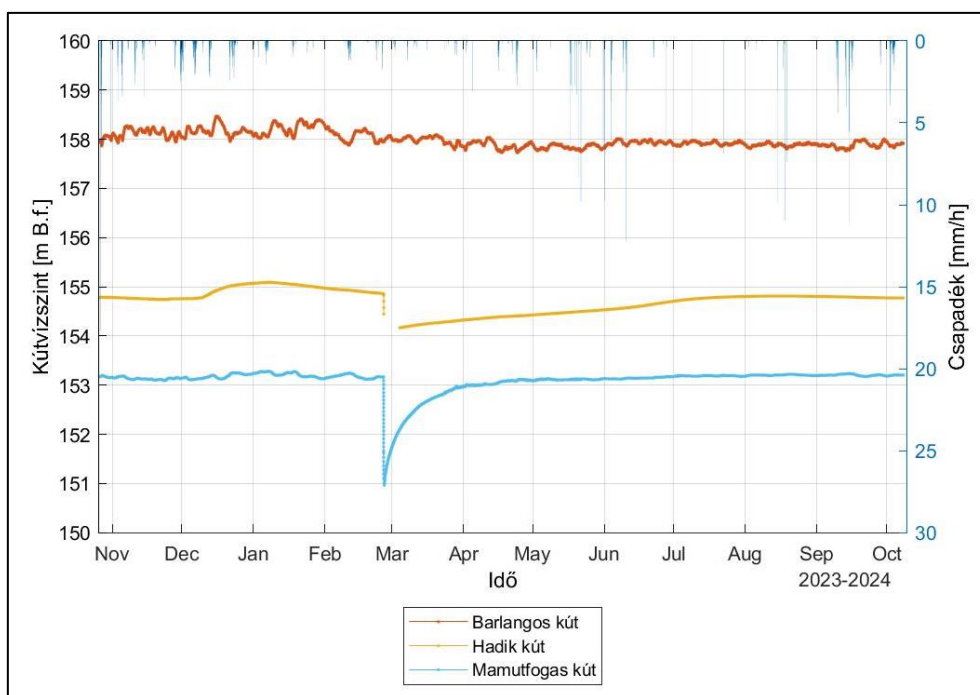
5. EREDMÉNYEK

A következő fejezetekben a kút (vízszintek és próbaszivattyúzás) és a csepegővíz (billenőedényes mérőeszköz és ad hoc) mérések eredményeit mutatom be, melyet a vízkémiai vizsgálatok és a numerikus modellezés eredményei követnek.

5.1. BARLANGI KUTAK VIZSGÁLATI EREDMÉNYEI

5.1.1. VÍZSZINTEK

A DATAQUA szenzorok mérései a 6. ábrán láthatók, a MATLAB-ban való feldolgozás után. Az ábrán a mért időintervallumra a csapadék idősor is látható. A kútmérések időbeli felbontása tíz perc, míg a csapadékadatoké egy óra.



6. ábra A DATAQUA érzékelőkkel végzett vízszintmérések eredményei

A minimális és maximális vízszintértékek a 3. táblázatban találhatók. Ezeket az értékeket a próbaszivattyúzás időtartamát figyelmen kívül hagyva határoztam meg, így csak a leszívás előtti és a visszatöltődés utáni idősorokat vettem figyelembe.

3. táblázat A három megfigyelt kút legmagasabb és legalacsonyabb vízszintjei

Kút	Barlangos	Hadik	Mamutfogas
Min. vízszint [m B.f.]	157,72	154,74	153,09
Max. vízszint [m B.f.]	158,47	155,09	153,28
Átlagos vízszint [m B.f.]	157,99	154,85	153,19

Megfigyelhető, hogy a Mamutfogas kútnál a legkisebb a vízszintingadozás, körülbelül 20 cm, ezt követi a Hadik kút, ahol a legmagasabb és a legalacsonyabb vízszint között 35 cm a különbség. A 6. ábrán is látható, hogy a Barlangos kút vízszintingadozása a legnagyobb (75 cm), a többi kútnál lényegesen több, és ezek a változások rövidebb idő alatt is következnek be. Ez vezetett a csapadékkal való lehetséges kapcsolat vizsgálatához, amelyet az 5.3. fejezetben mutatok be.

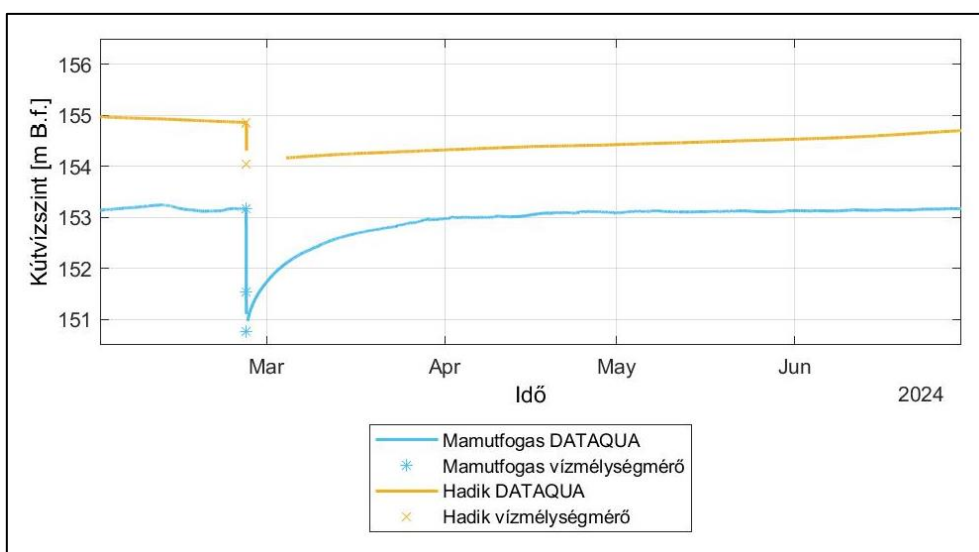
5.1.2. PRÓBASZIVATTYÚZÁS

A próbaszivattyúzások eredményei a 4. táblázatban láthatók. Ezeket a mért adatokat használtam a numerikus modell tranziens futtatásának bemeneti adataként. A Mamutfogas kút szivattyúzása körülbelül 30 percig tartott, és 2,41 m-es leszívást értünk el. A Hadik kutat 6,3 percig szivattyúztuk, ami a kút vízszintjének 0,81 m-es csökkenését eredményezte.

4. táblázat A Hadik és a Mamutfogas kutak próbaszivattyúzásának eredményei

Kút	Hadik	Mamutfogas
Szivattyúzás időtartama [min]	6,28	29,68
Szivattyúzás hozama [m ³ /nap]	220,7	208,4
Leszívás [m]	0,81	2,41
Vízszint próbaszivattyúzás előtt [m B.f.]	154,86	153,17
Vízszint próbaszivattyúzás után [m B.f.]	154,05	150,76
Visszatöltődési idő [nap]	137	125
80%-os visszatöltődés [nap]	124	18

A két kút vízszintje a próbaszivattyúzás előtt és után a 7. ábrán látható.



7. ábra A próbaszivattyúzás során mért kútvízszint idősorok

Meghatároztam a két kút visszatöltődési idejét, mely a numerikus modellben a tranziens futtatás időtartamához volt szükséges. Megvizsgáltam, hogy mennyi idő telt el a leszívás után, amíg a vízszintek helyreálltak és ismét egy adott értéket meghaladtak. Ez az érték a próbaszivattyúzás előtti (a Hadik-kútban az adatokban szereplő „inflexiós pont” előtti) vízszintek átlaga volt. Ha ez az érték közvetlenül a szivattyúzás előtti vízszint lenne (vagy a szivattyúzás előtti összes vízszint átlaga), akkor a visszatöltődési idő túl hosszú adódna, mivel a Hadik-kút a leszívás óta (2024. október 8-ig, az utolsó kiolvasásig) nem érte el a 154,86 m B.f. leszívás előtti értéket. E számítási módszer szerint a Hadik-kút 2024. július 12-én (137 nap után), a Mamutfogas-kút pedig 2024. június 30-án (125 nap után) töltődött vissza. Amint azonban a 7. ábrán látható, a Mamutfogas-kút visszatöltődési folyamata gyorsabb volt, mint a Hadik-kúté. Például leszívás 80%-a (1,93 m) március 15-re (18 nap alatt) már visszatöltődött, ehhez képest a Hadik kútban ez csak június 29-én (124 nap alatt) következett be (itt a leszívás 80%-a mindössze 0,65 m volt).

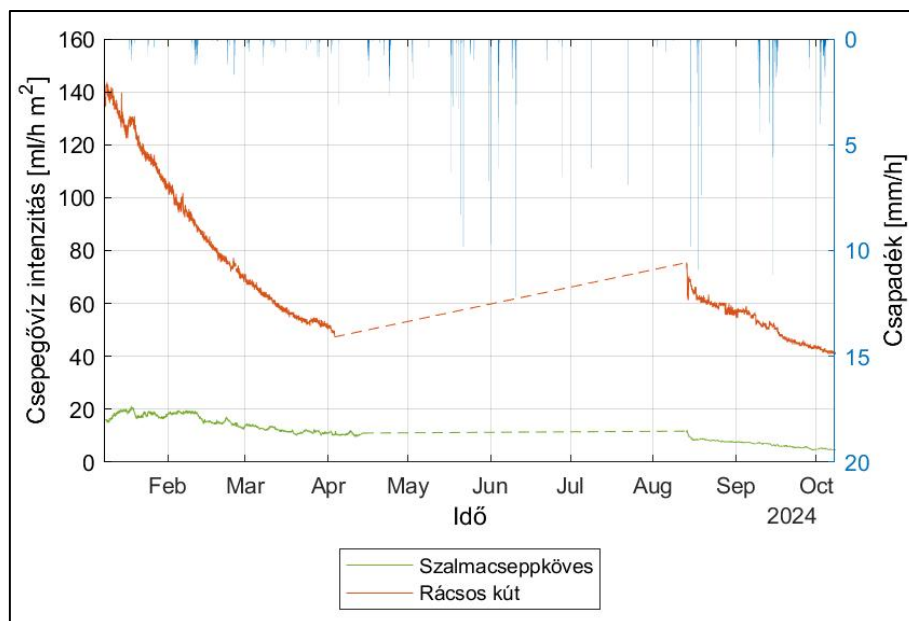
5.2. CSEPEGŐVÍZ MÉRÉSEK EREDMÉNYEI

5.2.1. BILLENŐEDÉNYES MÉRŐESZKÖZZEL MÉRT ADATOK

A 8. ábrán látható a billenőedényes mérésének eredménye. A szaggatott vonal azt jelzi, hogy ekkor nincsenek mért adatok. Sajnos a készülékek áprilisban leálltak, és csak augusztusban tudtuk megjavítani őket.

A „Rácsos kút” csepegőhelyen a mérések kezdetén, 2024 januárjában a fajlagos csepegéshozam $140 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$ körül volt, de március végére $50 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$ -re csökkent. Augusztus közepén $70 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$ körül volt a csepegés intenzitás, és azóta is csökkent, bár kisebb meredekséggel, mint az év eleji időszak. A legutóbbi kiolvasáskor kb. $40 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$ volt.

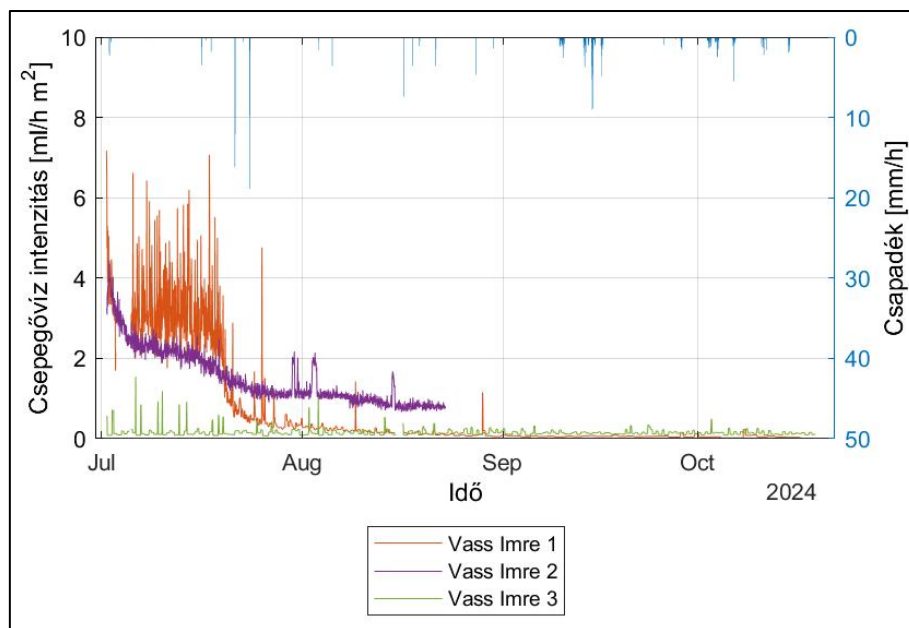
A „Szalmacseppköves” mérési helyen januárban a fajlagos csepegéshozam ennél kisebb volt, $40 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$, mely mintegy 1/8-a a „Rácsos kút”-nál tapasztaltaknak. Októberben már csak $4,7 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$ -t mértünk. Észrevehető, hogy a két helyszínen a csepegővíz intenzitások „együtt mozognak”, hasonló tendenciát követve.



8. ábra A Várbarlangban lévő két billenőedényes mérőműszer csepegővíz intenzitás adatai

A jósvafői Vass Imre-barlangban végzett csepegővíz méréseket is kiértékeltem, ezek a 9. ábrán láthatók. A Vass Imre-barlangban a 2. számú mérőhelyen volt a legintenzívebb a csepegés, $3,5 - 4 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$ július elején, a mérések megkezdésekor, de az intenzitás azóta csökkent. Az 1-es számú mérési ponton szintén nagyon intenzív volt a csepegés, átlagosan $3 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$ július 5. és július 19. között (július 2. és július 5. között a mérésekben volt egy kisebb szünet). Ezt az intervallumot követően a csepegővíz mennyisége csökkent, és az elmúlt hónapokban nagyon kis mértékű volt a csepegés. A szeptemberi és októberi átlagos intenzitás mindössze $0,06 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$ volt. A 3. mérési helyen közel állandó volt a csepegő víz intenzitása, átlagosan $0,15 \text{ ml/h} \cdot \text{m}^2$.

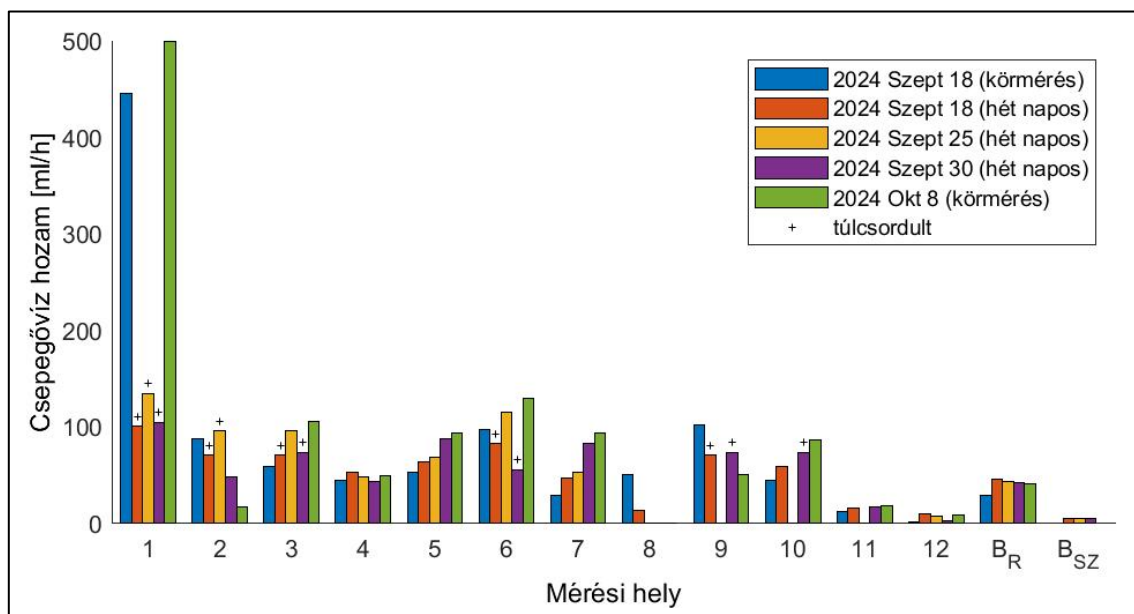
Megállapítható, hogy a Vass Imre-barlangban még a legmagasabb intenzitásértékek is alacsonyabbak voltak, mint a várbarlangi minimumok.



9. ábra A jósvafői Vass Imre-barlang három billenőedényes mérőműszerének csepegővíz intenzitás adatai

5.2.2. AD HOC MÉRÉSEK EREDMÉNYEI

Az egyes mérési pontokra számított csepegéshozamok értékeit 10. ábrán ábrázoltam, itt az egymást követő oszlopokban az értékek időbeli változása is megfigyelhető.



10. ábra Az ad hoc mérésekből számított csepegéshozamok mérési helyek szerint csoportosítva

A számszerű értékeket az 5. táblázat tartalmazza. A táblázatban „+” jelöléssel jelöltem azokat az értékeket, amikor a gyűjtőedény túlsordult, ezek az ábrán is „+” jellel vannak ellátva. Ez azt jelenti, hogy a mérés időtartama alatt ezeknél az értékeknél nagyobb hozam volt, de arról nincs információnk, hogy a csepegéshozam pontosan mekkora volt. A táblázatban piros színnel jelöltem azokat az értékeket, amikor a mérés időtartama során a gyűjtőedény valamikor

elmozdulhatott, mivel a mérés végén nem az eredeti helyén volt. A „túlsordult” vagy „elmozdult” értékeket nem vettem figyelembe a 6.3. fejezetben bemutatásra kerülő számításoknál. A többi mért értéket a táblázatban zöld színnel emeltem ki. (A 10. ábrán látható oszlopdiagramon azonban a gyűjtőedény túlsordulásakor mért értékeket is ábrázoltam, mivel ezek minimális csepegéshozam-értékként hasznos információval szolgáltak egyes helyeken.)

5. táblázat Az ad hoc mérésekből származó csepegéshozamok

Mérési hely	Csepegővíz hozam $\left[\frac{ml}{h}\right]$					
	09.18. (kör)	09.18. (heti)	09.25. (heti)	09.30. (heti)	10.08. (kör)	Átlag
1	446	101+	135+	105+	500	473
2	88	71+	96+	48	18	51
3	59	71+	96	74+	106	65
4	44	54	48	43	49	48
5	53	64	68	88	94	74
6	97	83+	116	56+	130	114
7	29	47	54	83	94	61
8	51	14	0	0	0	13
9	102	71+	0,5	74+	50	51
10	45	59	18,5	74+	86	52
11	13	17	5,6	18	18	14
12	2,3	10	8,2	2,7	8,6	6
B_rácsos	29,5	45,8	44,0	42,3	41,5	40,6
B_szalma	-	5,82	5,24	4,95	-	5,34
Csapadék [mm]	0	0	4,1	35,3	0	-

5.3. KORRELÁCIÓ ANALÍZIS

A 4.4. fejezetben említett céllal összefüggést kerestem a csapadék és a vízszintek, valamint a csepegővíz intenzitások között. A korreláció analízist a 6. ábrán bemutatott kútvízszintekre és csapadék idősorokra, valamint a 8. és 9. ábrán látható csepegővíz intenzitásokra és csapadék idősorokra végeztem el. Az így kapott maximális korrelációs együtthatókat és a hozzájuk tartozó n eltolt nap értékeket a 6. és 7. táblázat tartalmazza.

6. táblázat A korrelációs együttható maximális értékei a kútvízszintek és csapadéokra

Kút	Mamutfogas próbasziv. előtt	Mamutfogas visszatöltődés után	Barlangos	Hadik próbasziv. előtt	Hadik visszatöltődés után
Korrelációs együttható [-]	0,34	(0,44) 0,36	0,24	0,41	0,29
Eltolás [nap]	68	(1) 116	52	83	77

A korrelációs együtthatók (R) 0,24 és 0,44 között mozogtak. Bár a Mamutfogas kútnál a visszatöltődést követően a csapadékmennyiség mindössze egy napos eltolása esetén $R=0,44$ adódott, a második legmagasabb R-értéket is feltüntettem. Ez a szoros kapcsolat az előző napi csapadékmennyiséggel azt jelentené, hogy a Mamutfogas-kút felett egy nagyon nagy áteresztőképességű zóna van (ami hasonló az 5.5. fejezetben bemutatott „B” numerikus modellben a drén peremfeltétel alkalmazásához). Azonban a Mamutfogas kút próbaszivattyúzás előtti idősorának korrelációs együtthatója az egy nappal eltolt csapadékkal nulla körül volt, ezért ezt az értéket zárójelbe tettem. A legnagyobb korrelációs együttható a Hadik kútnál adódott, a próbaszivattyúzás előtt időszakra. A Hadik kútnál a próbaszivattyúzás előtti és a visszatöltődés utáni időszakra a maximális korrelációs együtthatóhoz tartozó eltolás értékek nagyon közel állnak egymáshoz. Ez azt jelentheti, hogy van összefüggés a körülbelül három hónappal korábbi csapadékkal. A leggyengébb korreláció a csapadékkal Barlangos kútnál volt.

7. táblázat A korrelációs együttható maximális értékei csepegés intenzitásra és a csapadéokra

Csepegő hely	Szalmacs. áprilisig	Szalmacs. aug.-tól	Rácsos áprilisig	Rácsos aug.-tól	Vass Imre 1.hely	Vass Imre 2.hely	Vass Imre 3.hely
Korr. egy.h. [-]	0,34	0,35	0,40	0,36	0,31	0,38	0,23
Eltolás [nap]	48	88	41	88	38	9	107

A „Szalmacseppköves” és a „Rácsos kút” csepegő helyeknél a Várbarlangban nagyon hasonló eltolás értékekhez közel azonos korrelációs együttható értékek tartoztak mindkét időszakra. Ezzel szemben a Vass Imre-barlangban lévő mérési helyek nagyon eltérő eltolás értékeket mutatnak. Itt az egyes helyek csapadékkal való kapcsolata jobban különbözik.

Bár a korreláció analízissel erős összefüggést nem fedeztem fel a napi csapadék és a napi átlagos vízszintek és csepegésintenzitások között, néhány következtetés mégis levonható volt.

5.4. VÍZKÉMIAI VIZSGÁLATOK

A mért ionkoncentrációkat a 8. táblázat tartalmazza. A nitrátion-koncentrációk az egyes mérési helyeken többnyire hasonlóak és mindegyik mért érték meghaladja az ivóvízre előírt határértéket (50 mg/l). A kloridion-koncentráció néhány helyen (Barlangos és Hadik kút) erősen változó, de megállapítható, hogy a csepegővizek a Rácsos-kút kivételével jóval több kloridot tartalmaznak, mint a kútvezek (kb. háromszorosát). A Rácsos kútban volt a legmagasabb a Mg^{2+} és a Ca^{2+} koncentráció is. A Hadik-kút kivételével minden mérési helyen volt legalább egy, az ivóvíz határértéket (250 mg/l) meghaladó kloridion-koncentráció érték.

8. táblázat A mért vízkémiai paraméterek

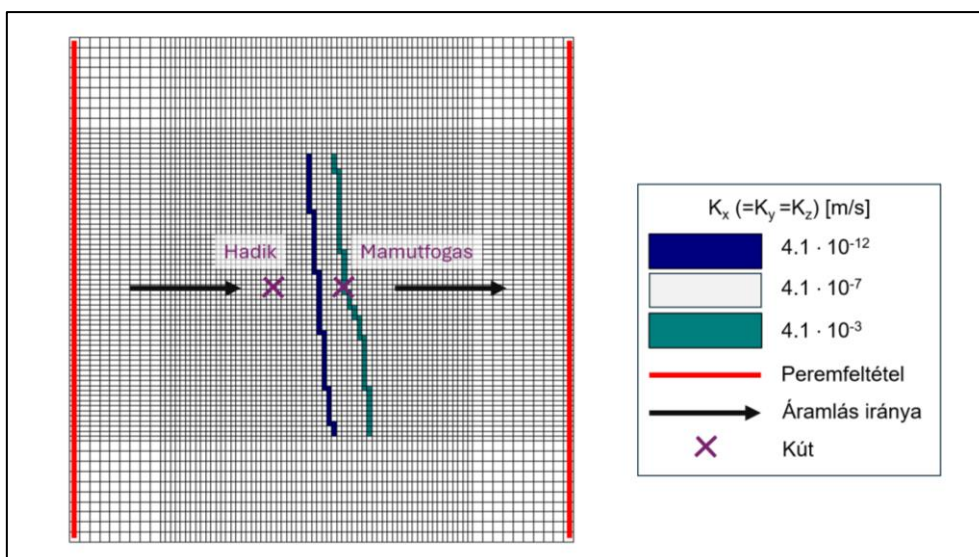
Mérési hely	Idő	NO_3^- [mg/l]	Cl^- [mg/l]	Mg^{2+} [mg/l]	Ca^{2+} [mg/l]
Barlangos kút	2024-01-22	86	83	21	125
	2024-07-29	78	394	6	-
Hadik kút	2024-01-22	70	36	2	48
	2024-02-26	67	139	5	30
	2024-03-25	71	146	0	32
	2024-04-29	73	-	0	-
	2024-07-29	67	128	2	23
	2024-09-18	68	123	-	-
Mamutfogas kút	2024-02-26	108	206	12	50
	2024-03-25	125	275	27	87
	2024-04-29	128	275	20	100
	2024-07-29	120	229	19	79
	2024-09-18	128	251	-	-
Rácsos kút	2024-07-29	117	1377	33	274
	2024-09-18	162	1449	-	-
„Szalmacseppköves” csepegő	2024-01-22	89	-	-	-
	2024-02-26	65	993	-	-
	2024-03-25	82	-	0	32
	2024-04-29	65	-	-	-
	2024-08-02	55	737	1	22
	2024-08-13	53	770	0	21
	2024-09-18	57	781	-	-
„Rácsos kút” csepegő	2024-01-22	126	-	-	-
	2024-02-26	68	999	9	15
	2024-03-25	77	1075	4	26
	2024-04-29	92	1271	-	26
	2024-08-02	71	831	2	18
	2024-08-13	69	869	2	16
	2024-09-18	67	848	-	-

5.5. NUMERIKUS MODELL

Két változatot kalibráltam permanens állapotra. Ahogy a 4.6 fejezetben ismertettem, a modell geometriája változatlan maradt, így ebben a fejezetben a megváltoztatott tulajdonságokat (szivárgási tényező eloszlásokat) és peremfeltételeket mutatom be.

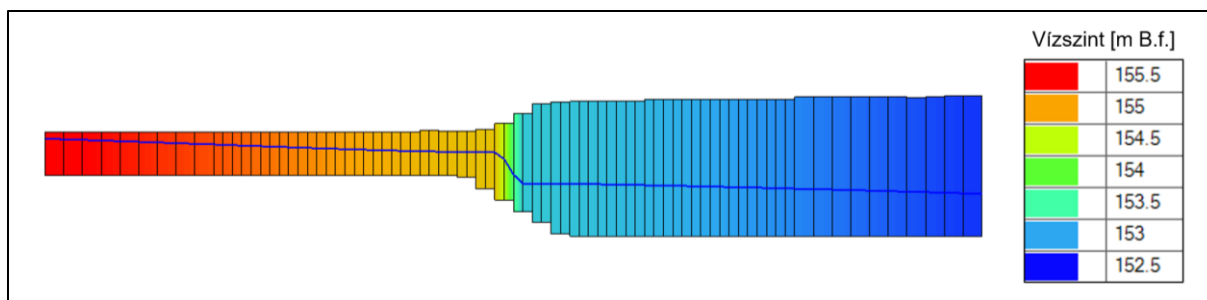
5.5.1. „A” MODELL

Ebben a változatban három különböző szivárgási tényező értéket használtam. Az első a két réteghatár közötti homogén zóna (PZ1) volt $k_{PZ1} = 4.1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ értékkel. A második zónát a kutak közé helyeztem el (PZ2), $k_{PZ2} = 4.1 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$ értékkel, szélessége 0,5 m volt (ennek a zónának a szükségességét a 3.3.4. fejezetben ismertettem – a kutak között nincs kimutatható kapcsolat). A harmadik zóna a Mamutfogas kúton áthaladó nagy áteresztőképességű sáv volt, amely a kőzetben egy erősen repedezett zónát reprezentál, $k_{PZ3} = 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ értékkel, hasonlóan Farkas (2013) „C” modelljéhez. A szivárgási tényező eloszlása és a modell felépítése a 11. ábrán látható. Ebben a modellváltozatban az eredeti peremfeltételeket 9 cm-rel emeltem, hogy a megfigyeléseket reprodukálni tudjam. Így a kalibrált modell alsó peremfeltételének 152,62 m B.f. magasságot, felső peremfeltételként pedig 155,59 m B.f. értéket adtam meg.



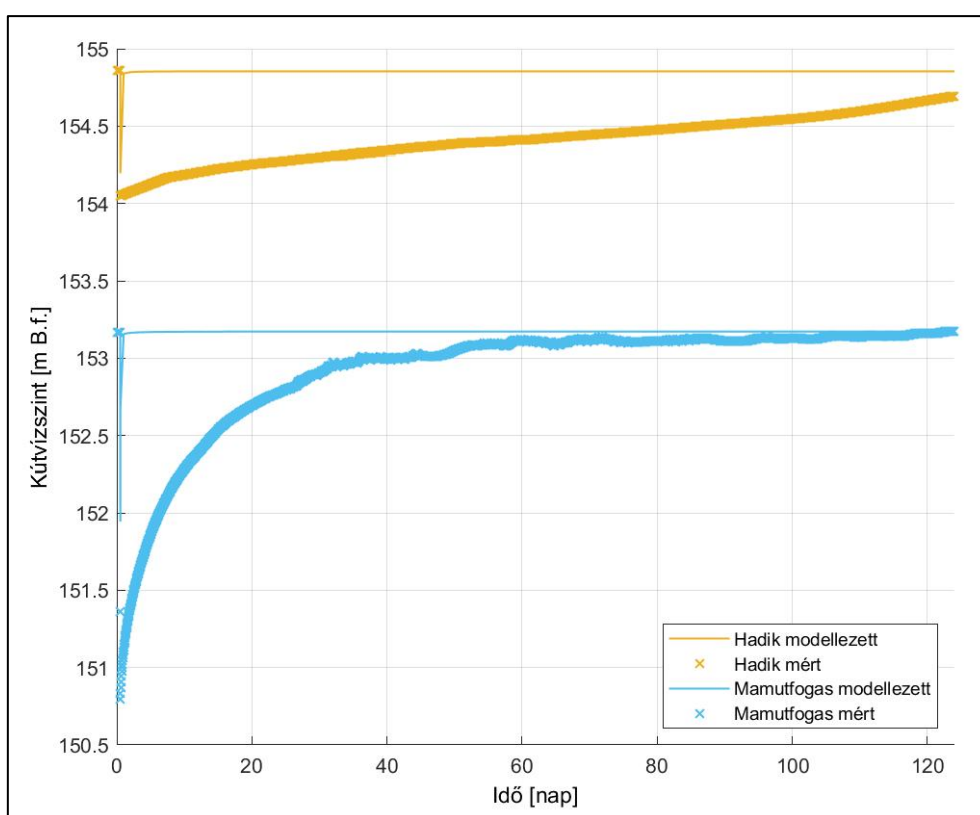
11. ábra Az „A” modell felépítése

Az „A” modellváltozat permanens állapotú szimulációja a 12. ábrán látható nyomásmagasságokat és vízszinteket (kék vonal) eredményezte. A kalibráció után maradó hiba mindkét kút esetében 1 cm körül volt.



12. ábra Az "A" modellváltozat permanens futtatásának eredményeként kapott vízszintek egy hossz-szelvényen

A fajlagos hozam kalibrált értéke az ajánlott intervallum maximuma, $S_y = 0,3$ volt. A tranziens futtatás eredményei a 13. ábrán tekinthetők meg.

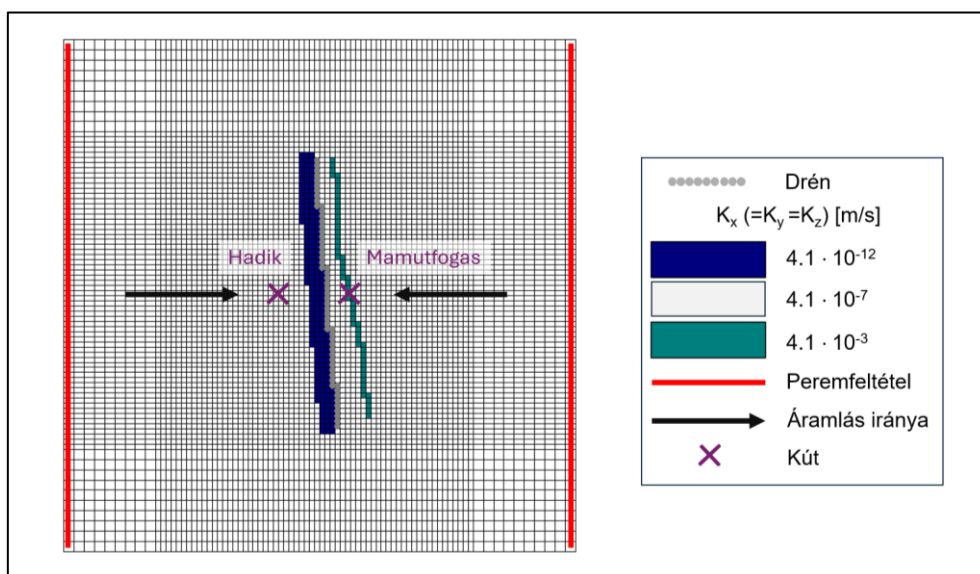


13. ábra Az "A" modellváltozat tranziens futtatásának eredménye

Ezzel a modellváltozattal a Hadik-kútban 0,67 m-es leszívást tudtam elérni, ami a megfigyelt leszívás 83 %-a. A Mamutfogas kút vízszintje a modellben a szivattyúzás hatására csak 1,23 m-rel csökkent, ami a megfigyelt leszívás 51 %-ának felel meg. Mindkét kút 10 nap alatt visszatöltődött, ami sokkal gyorsabb volt, mint a megfigyelt visszatöltődési idő.

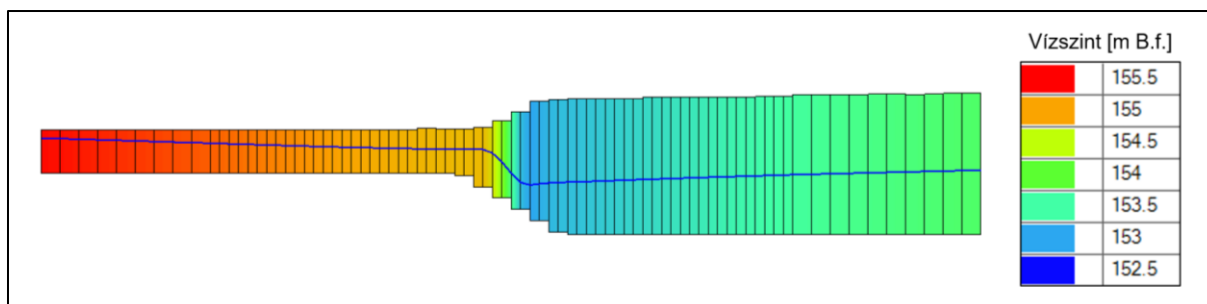
5.5.2. „B” MODELL

A „B” változatban szintén három különböző szivárgási tényező zóna volt. A második zóna szélességét azonban 1,5 m-re növeltem, és egy drén peremfeltételt is hozzáadtam (14. ábra). A drén egy repedezett zónát szimbolizált, amely lehetővé teszi a víznek a repedéseken keresztül történő távozását. A két kút szintje közötti nagy különbségre ilyen rövid távolságon belül egy lehetséges magyarázat, hogy a repedezett zóna elvezeti a vizet, így a Mamutfogas-kút nyugalmi vízszintje alacsonyabb marad. Az alsó peremfeltételt 153,81 m B.f.-re változtattam, a felső peremfeltétel nem változott (155,59 m B.f.). Az alsó peremfeltétel és a Mamutfogas-kút vízszintje közötti magasságkülönbség abszolútértéke ugyanannyi volt, mint az „A” változatban. (Az „A” változatban az alsó peremfeltétel 153,17 - 0,64 m B.f. volt, a „B”-ben pedig 153,17 + 0,64 m B.f.) A drén magasságát 152,50 m B.f.-re állítottam és minden egyes drén cellának $1.25 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ volt a szivárgási tényezője (*leakance*). Ez a szivárgási tényező itt egy összevont paramétert jelent, amelyet általában a kalibrálás során állítanak be.



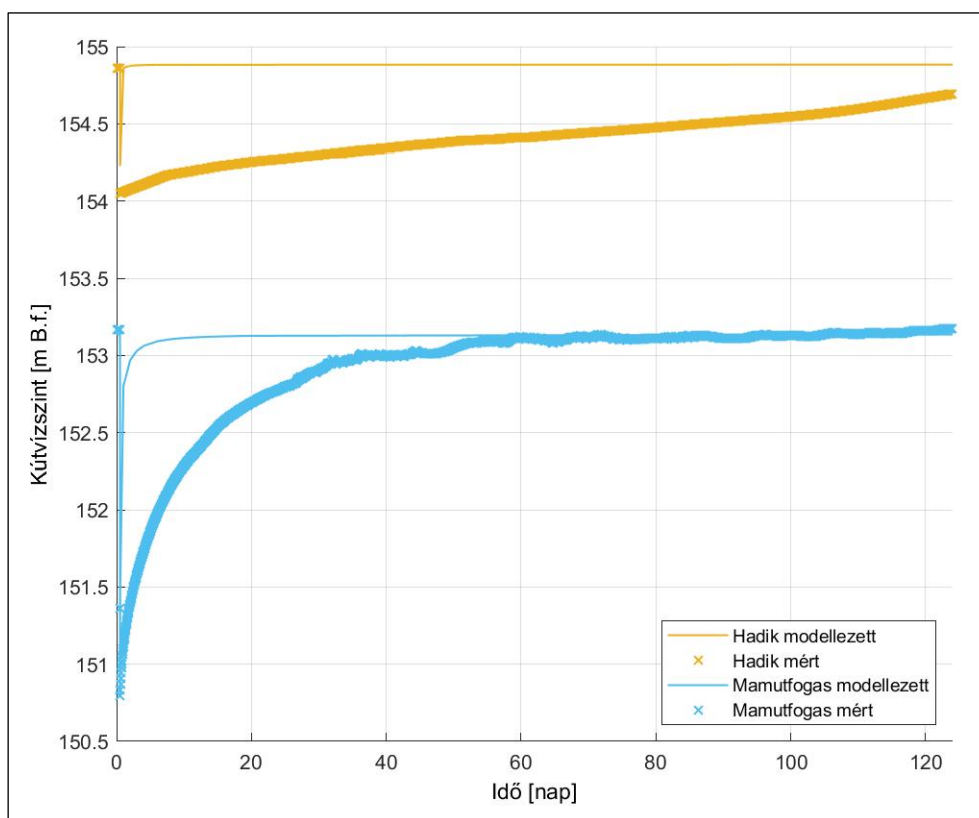
14. ábra A „B” modell felépítése

A „B” modellváltozat permanens futtatásának eredményeként kapott nyomásmagasságok és vízszintek (kék vonal) a 15. ábrán láthatók. A Hadik kútban a fennmaradó hiba 3 cm volt, míg a Mamutfogas kútban ez az érték 2 cm.



15. ábra A "B" modellváltozat permanens futtatásának eredményeként kapott vízszintek egy hossz-szelvényen

A tranziens futtatásban a fajlagos hozam kalibrált értéke $S_y = 0,011$ volt (homogén a teljes modellben). Az így kapott idősorok a 16. ábrán láthatók. A Hadik-kút vízszintje 0,66 cm-rel csökkent (mely a megfigyelt leszívás 81%-a). A Mamutfogas kútban a leszívás 2,38 m volt (a megfigyelt 99%-a), ami mindössze 3 cm-rel kevesebb a mértnél. Ezzel szemben a modellezett visszatöltődési idők továbbra is sokkal rövidebbek voltak a mértnél, a Hadik kútban körülbelül 3 nap, a Mamutfogas kútban pedig 20 nap, ami még mindig kevés a mért 137 és 125 naphoz képest.



16. ábra A "B" modellváltozat tranziens futtatásának eredménye

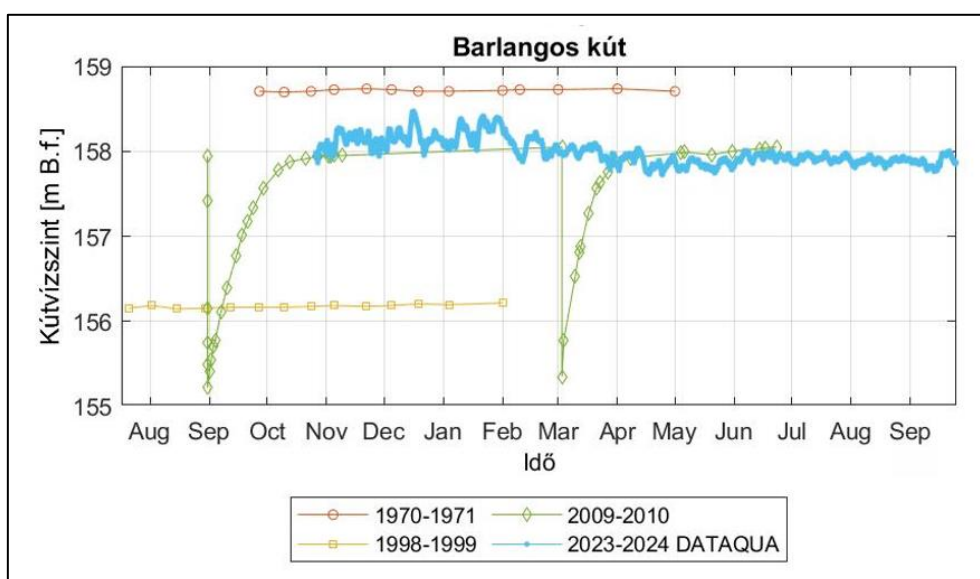
6. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

6.1. KÚTVÍZSZINT MÉRÉSEK

A jelenlegi mérési eredményeket összehasonlítottam a 3.3.1. fejezetben bemutatott 1970-1971-es, 1998-2000-es és 2009-2010-es korábbi mérésekkel (Farkas, 2013; Hajnal, 2003).

Barlangos kút

A jelenlegi vízszintek a 2009-2010-es mérésnél magasabbak voltak, egészen 2024 márciusáig (bár volt szünet a korábbi mérésekben) (17. ábra). A márciusig végzett méréseink átlaga 158,14 m B.f., ami közel 15 cm-rel magasabb a 2009-2010-es mérések átlagánál, amely 157,98 m B.f.. A teljes 2023-2024-es mérési időszakban mért vízszintek átlaga azonban 158,99 m B.f., ami azt jelenti, hogy az elmúlt évtizedben nem történt jelentős változás. Ez az átlagos vízszint 1,81 m-rel magasabb az 1990-es évek 156,18 m B.f. átlagánál, és 0,73 m-rel alacsonyabb az 1970-es évek 158,72 m B.f. átlagánál.



17. ábra Barlangos kút: jelenlegi vízszintmérések összehasonlítása korábbi vizsgálatokkal

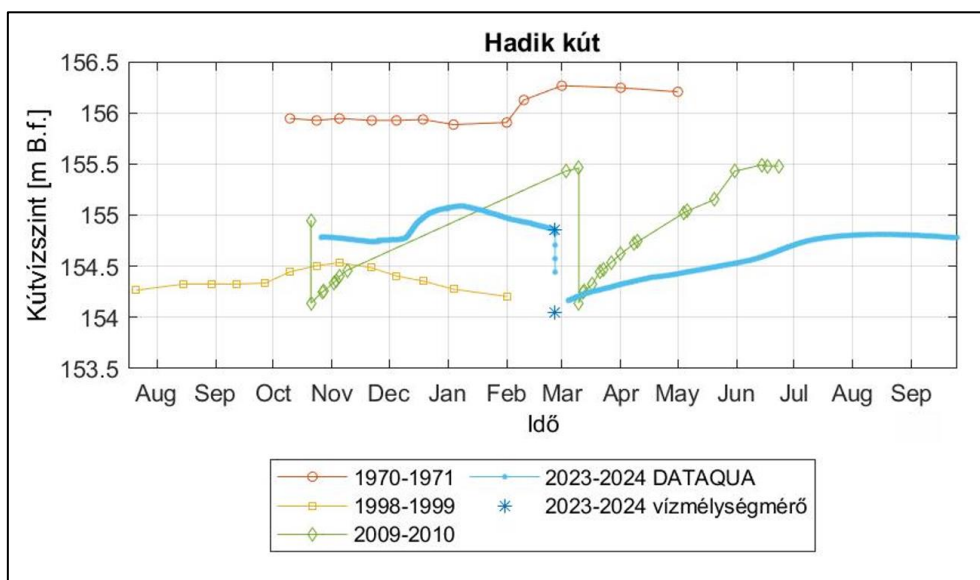
Ez az első alkalom azonban, hogy a Barlangos-kút vízszintjének ingadozása megfigyelésre került.

Hadik kút

A Hadik-kút átlagos vízszintje a szivattyúzás előtt 157,76 m B.f. volt, a visszatöltődés után pedig 157,79 m B.f. Bár az 5.1. fejezetben meghatároztam a visszatöltődési időt, már ott is említésre került, hogy a kút a legutóbbi mérések szerint még mindig nem érte el pontosan a

szivattyúzás előtti vízszintet. Látható azonban, hogy a vízszint július közepe óta viszonylag állandó, és augusztusban stagnálni kezdett 154,81 m körül. Így elfogadtam a számított visszatöltődési időt, és a további elemzésekben felhasználtam a többi adatot.

A Hadik-kút átlagos vízszintje 2009-2010 óta 60 cm-t csökkent, és jelenleg 40 cm-rel magasabb, mint 1998-1999-ben volt, és 1,24 m-rel alacsonyabb, mint 1970-1971-ben (18. ábra).



18. ábra Hadik kút: jelenlegi vízszintmérések összehasonlítása korábbi vizsgálatokkal

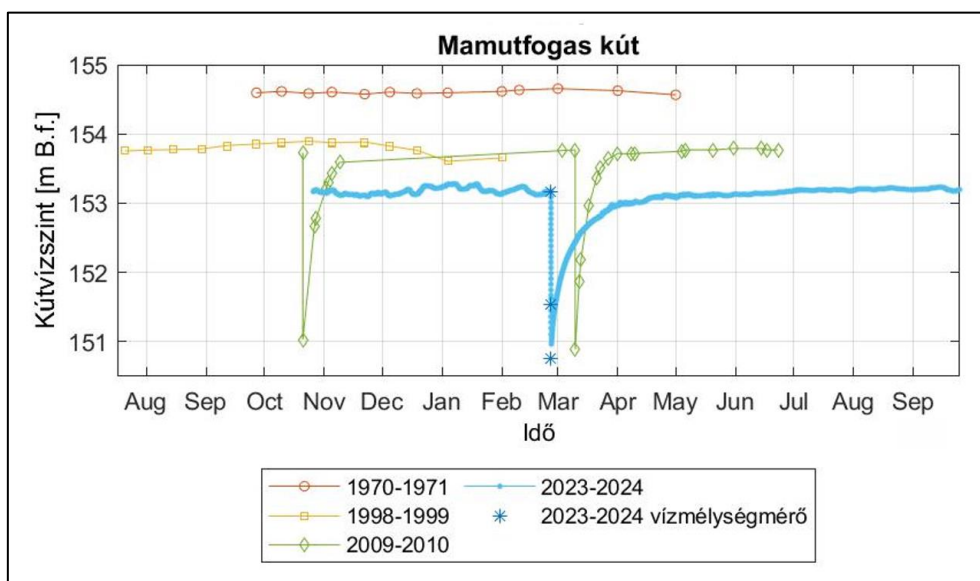
Az ezen a kúton végzett próbaszivattyúzás összehasonlítható Farkas (2013) vizsgálataival. A visszatöltődési görbe alakja többnyire lineáris, nem logaritmikus, hasonlóan a 2009-es és 2010-es mérésekhez. Annak ellenére, hogy 2010-ben 0,5 m-rel nagyobb volt a leszívás (1,32 m), a visszatöltődési idő csak körülbelül feleannyi volt. A 2009-es próbaszivattyúzáskor a mostani 81 cm-rel azonos leszívás volt, de szintén gyorsabb helyreállt a vízszint (legalábbis kezdetben, a mérés idején). A 2009-es próbaszivattyúzás előtti kezdeti vízszint csak 0,2 m-rel volt magasabb, mint most. Ez azt jelzi, hogy a 2010-es gyorsabb visszatöltődés nem a magasabb vízszintnek volt köszönhető. Megállapítható tehát, hogy a Hadik-kút visszatöltődése lelassult.

A Hadik-kút vízszintje a „legnyugodtabb”, rövid távon alig ingadozik. Az általában „nyugodt” vízszinthez képest 2023. december 5. és 2024. január 8. között 33 cm-t emelkedett. Nagyon hasonló jelenséget, egy 37 cm-es vízszintemelkedést észleltek 1970 február-márciusában, és egy kevésbé meredek, 20 cm-es változás is történt 1998-ban szeptember végétől november elejéig. Hajnal (2003) is említette ezt munkájában, és megállapította, hogy ennek a tendenciának az okai ismeretlenek, és nem hozható összefüggésbe a csapadékkal. A

jelenlegi mérések alapján sem valószínűsíthető, hogy ez a jelenség a csapadékkal lenne kapcsolatban. Ennek megállapításához további vizsgálatokra lenne szükség, figyelembe véve az antropogén hatásokat is.

Mamutfogas kút

A Mamutfogas kút vízszintje enyhe ingadozást mutat, amit korábban még sosem figyeltek meg. A próbaszivattyúzástól eltekintve az átlagos vízszint a mérések során 153,19 m B.f. volt, ami 1,02 m-rel alacsonyabb, mint a 2009-2010. évi átlagos vízszint, 0,98 m-rel alacsonyabb, mint az 1998-1999. évi átlagos vízszint és 0,18 m-rel alacsonyabb, mint az 1970-1971. évi átlagos vízszint (19. ábra). Látható, hogy ennek a kútnak a visszatöltődése is lelassult, de a visszatöltődési görbe alakja hasonló a 2009-es és 2010-es görbéhez (szintén logaritmikus). A korábbi méréseknél is megfigyelhető volt, a Mamutfogas-kút gyorsabban regenerálódott, mint a Hadik-kút.



19. ábra Mamutfogas kút: jelenlegi vízszintmérések összehasonlítása korábbi vizsgálatokkal

A kutak vízszintje 1970-ben volt a legmagasabb. Annak ellenére, hogy jelenleg a barlang nagyon vizes és a barlang főtéjétől számos pergést figyeltünk meg, ez nem tükröződik a kutak vízszintjében és visszatöltődésük sebességében. Ahhoz, hogy több következtetést tudjunk levonni például a Hadik-kút vízszintjének hirtelen emelkedéséről, és hogy elemezni tudjuk a kutakra gyakorolt hatásokat, elengedhetetlen a mérések folytatása a jövőben is.

6.2. CSAPADÉKKAL VALÓ KAPCSOLAT

A korreláció analízissel gyenge kapcsolatokat sikerült kimutatnom. Feltételezhető, hogy a vízszintek vagy csepegővizek és a csapadék között nincs erős lineáris összefüggés. Karsztos területeken ez szokványos, mivel a csapadék és a beszivárgás közötti kapcsolat nem lineáris, sokkal összetettebb, még a nem urbanizált területeken is. Azonban a Várbarlangban a karsztos területeken általában alkalmazott módszerek a terület urbanizáltsága miatt nem relevánsak.

További vizsgálatokat lehetne végezni más, a nemlineáris összefüggések feltárására alkalmas módszerekkel (például neurális hálózatokkal MATLAB-ban), amire e dolgozat keretein belül nem volt lehetőség.

A dolgozatban a kútvízszintek periodicitás vizsgálatát is elvégeztem, hogy kiderítsem, van-e fellelhető periódus az adatokban, de nem találtam fizikai jelenségnek megfelelő periódust.

6.3. AD HOC CSEPEGŐVÍZ MÉRÉSEK

Mivel a mért csepegés hozamok közt több nagyságrendnyi eltérés volt, és a csepegővizek térbeli változatossága is jelentős, egy minimum és maximum becslést számítottam a teljes vizsgált terület (3700 m²) csepegővíz hozamára.

A minimális értéket közvetlenül az ad hoc mérésekből kapott csepegővíz hozamból (Q_n [ml/h]) becsültem. Feltételeztem, hogy a gyűjtőedények összegyűjtötték egy 1 m² -es területen közel az összes csepegővizet, így a számításban a mért értékeket, az 1 m² -es területegységre meghatározott fajlagos csepegővízhozamnak tekintettem.

A maximum becslés szintén a fajlagos csepegővízhozamokon alapult, de ezeknek a mért csepegővízhozamokból való számításához minden mérési helyszínre más-más empirikus arányszámot (r_{emp} [–]) használtam. Ezeket az arányszámokat a nedves területek szemrevételezése alapján és az egyes gyűjtőedények körüli csepegések térbeli eloszlását figyelembe véve határoztuk meg. Mivel egy mérővödör területe 0,07 m² volt, ami körülbelül 1/14-ed része az 1 m²-nek, ezek az empirikus arányok 1 és 14 között voltak.

A minimális és maximális fajlagos csepegővízhozamokat megszoroztam az egyes mérési helyekhez rendelt területtel (A_n [m²]), és kiszámítottam az éves csepegővíz mennyiségét. Ezt a kiértékelési módszert a 7. és 8. egyenletben foglaltam össze.

$$V_{min,éves} = \sum_{n=1}^{n=13} Q_n \cdot 10^{-6} \cdot 365 \cdot 24 \cdot A_n \quad (7)$$

$$V_{max, \acute{e}ves} = \sum_{n=1}^{n=13} Q_n \cdot r_{emp} \cdot 10^{-6} \cdot 365 \cdot 24 \cdot A_n \quad (8)$$

A számítás a 9. táblázatban követhető végig.

9. táblázat Az éves csepegővíz mennyiség kiszámítása az ad hoc mérésekből

Mérési hely	A [m ²]	q_{min} [ml/h · m ²]	r_{emp} [–]	q_{max} [ml/h · m ²]	$V_{min, \acute{e}ves}$ [m ³ /év]	$V_{max, \acute{e}ves}$ [m ³ /év]
1	103	473	3	1419	427	1280
2	256	51	5	257	115	575
3	283	65	1	65	162	162
4	161	48	1	48	67	67
5	45	74	2	147	29	58
6	66	114	4	457	66	264
7	111	61	1	61	60	60
8	40	13	1	13	5	5
9	157	51	1	51	70	70
10	45	52	2	104	21	41
11	63	14	1	14	8	8
12	360	6	7	45	20	143
13. (bejárat)	31	6	1	6	2	2
Σ nedves ter.	1721			Σ	1051	2735

A számítás alapján ez tehát 1051 m³/év minimális és 2735 m³/év maximális csepegővíz hozamot jelent a Nagy Labirintus vizsgált 3700 m² -es területére. Így a csepegő víz mennyisége becslésünk szerint nagyobb, mint 1051 m³/év, és kisebb, mint 2735 m³/év.

Ez összevethető Kessler (1971) és Hajnal (2003) számításaival, mivel ők is kiszámították a Nagy Labirintusba beszivárgó víz mennyiségét. Kessler 1971-es csepegővízmérések alapján számolt, Hajnal (2003) 1971-2000 között több intervallumra vízmérleg-számítások alapján határozta meg a beszivárgást, területarányosan. Az ő számításaiból az időszakok átlagát használtam. Ahhoz, hogy az értékeket össze lehessen hasonlítani, Kessler (1971) és Hajnal (2003) eredményeit az aktuális mérések összterületével arányosan osztottam, így kaptam a $V_{\acute{e}ves, vizsgált\ részre}$ értékeket. Mivel mindketten a Nagy Labirintus mind a 18 000 m² -ét vizsgálták, az általuk egy évre számított csepegővízmennyiséget 18000/3700 = 4,86-tal osztottam, mivel a jelenleg mért terület az általuk vizsgált területnek kb. 1/5-ét teszi ki. Az összehasonlítás a 10. táblázatban található.

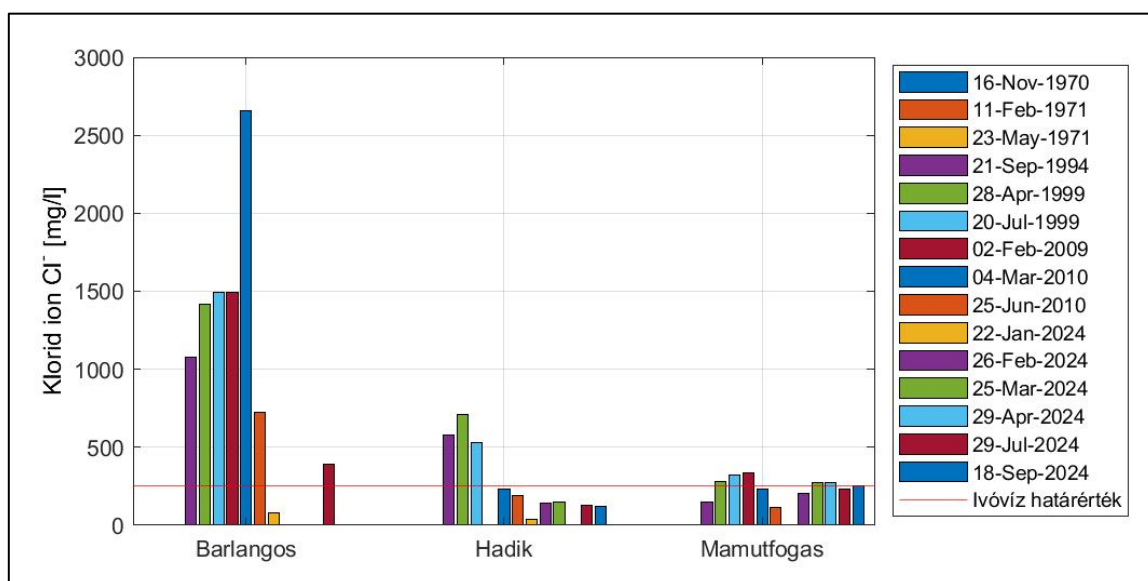
10. táblázat A számított éves csepegéshozamok összehasonlítása korábbi vizsgálatokkal

Kutatás	Vizsgált időszak	$A [m^2]$	$V_{\text{éves, teljes}} [m^3/\text{year}]$	$V_{\text{éves, vizsgált részre}} [m^3/\text{year}]$
Kessler (1971)	1971	18000	7300	1504
Hajnal (2003)	1971-2000	18000	7382	1517
Jelenlegi Min.	2024	3700	1051	1051
Jelenlegi Max.	2024	3700	2735	2735

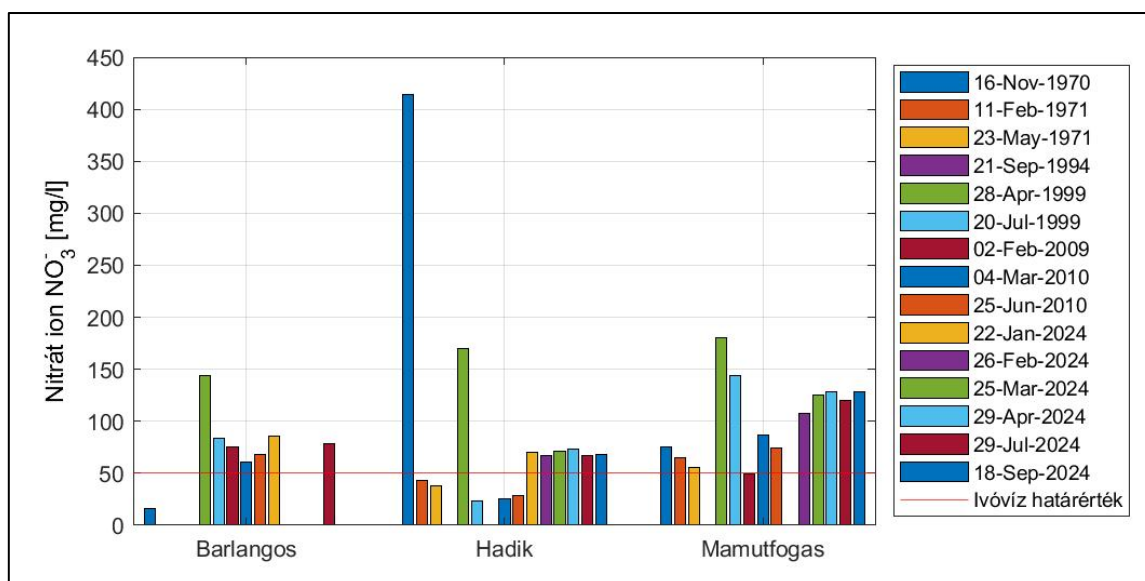
A korábbi kutatások számított értékei a jelenlegi minimális és maximális becslések között vannak. Mivel azonban közelebb esnek a minimális becsléshez, az egy évre vonatkozó csepegővíz hozam valószínűleg nőtt.

6.4. VÍZKÉMIAI VIZSGÁLATOK

A kutakban mért kloridion- és nitrátion-koncentrációkat Hajnal (2003) és Farkas (2013) munkája alapján összehasonlítottam a korábbi vízkémiai vizsgálatok eredményeivel. Az összehasonlítást a 20. és 21. ábra mutatja be. Az ezen ionok koncentrációjára vonatkozó ivóvíz határértéket vízszintes vonal jelzi mindkét ábrán.



20. ábra Kloridion-koncentráció a korábbi kutatásokkal összevetve



21. ábra Nitrátion-koncentráció a korábbi kutatásokkal összevetve

A vízkémiai eredmények kiértékeléséhez konzultáltunk Musa Ildikóval az Vízi közmű és Környezetmérnöki Tanszékről és Dr. Szieberth Dénessel a Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszékéről. A konzultáció alapján a következő következtetésekre jutottunk.

A kutakban mért értékek jó összhangban vannak a korábbi mérésekkel. Ezeket a 130-140 mg/l-es kloridion-koncentrációkat a kőzetből történő oldalirányú szivárgás és ez által bekövetkező kioldódás okozhatja.

A klorid értékek a csepegővizekben azonban kiugróan magasak, de nem térnek el az elmúlt 20 évben kapott értékektől. Mivel az elmúlt két évtizedben legalább háromszor volt ilyen irányú vizsgálat más személyek/intézmények által, ahol a nagyságrend megegyező, mérési hiba nem valószínű. A magas klorid-ion értékek magyarázata tehát újabb vizsgálatokat igényel.

A vezetékes ivóvízben 25 mg/l a megengedett klorid-ion koncentráció (illetve általában a megszokott 20 mg/l körüli), a szennyvizekben nagyságrendekkel kisebb. Ráadásul egyesített rendszerű a csatorna, ami felhígítja a szennyvizet. Emellett ilyen magas koncentrációt a szennyvíztisztítótelepeken se mérnek az érkező szennyvízben. Így nem valószínű, hogy a magas koncentrációk a vízellátás vagy a szennyvízvezetékek veszteségeinek tudhatók be. Amennyiben történik sózás az utakon, az sokkal kisebb nagyságrendű, így az sem lehet a magyarázat. Egy lehetséges ok, hogy a klorid hosszú időn át bemosódott, megállt a kőzetben és onnan oldódik ki folyamatosan.

A Budai-hegység más barlangjaival összehasonlítva a csepegővizekben található klorid-ion értéke továbbra is magasnak számít. A Szemlő-hegyi barlangban a csepegő vizek klorid-ion koncentrációja 20-180 mg/l közötti. A Pálvölgyi-barlangban nagyrészt 200 mg/l alatti,

azonban két mérési ponton a beszivárgó vizekben 850 és 1580 mg/l körüli koncentrációt mértek (Kiss, 2010). Ez utóbbi kimagasló érték mérési helye a Mátyás-hegyi barlanghoz és a Szépvölgyi úthoz legközelebbi, töredezett zónában elhelyezkedő, legsekélyebb ponton helyezkedik el. A Mátyás-hegyi barlang csepegővizeinek klorid-ion koncentrációja 100-1000 ml/l közt mozog a legtöbb helyen, azonban egy 2375 mg/l mért érték is előfordult (Kiss, 2010). Ebben a barlangban a mért helyek szinte kizárólag a Szépvölgyi út alatt vannak. A Molnár János-barlang csepegővizeinek klorid-ion tartalma 2011-es mérések szerint 67-241 mg/l, 2014-es mérések szerint 175-269 mg/l közötti, míg a forrásvizek klorid-ion koncentrációja 39-67, illetve 39-62 mg/l volt ezen mérések során (Farkas és mtsai., 2015; Leél-Össy és mtsai., 2011). Egy 2022-es tanulmányban átlagosan kb. 25 mg/l koncentrációt mértek, a maximum nem haladta meg a 200 mg/l-t (Menoncin és mtsai., 2022). Ezek alapján a várbarlangi 1000 mg/l körüli értékek magasak. Ilyen magas értékeket csak a Mátyás-hegyi- és a Pálvölgyi-barlangban mértek forgalmas utak alatt, de ezeken a helyeken egy év alatt nem volt jelentős változás.

Kiss (2010) a magas klorid-ion értékekre következő magyarázatot adta: “a kloridtartalom folyamatos emelkedése a karsztos rendszerbe kerülő szennyezőanyagok mennyiségének növekedése mellett annak is köszönhető, hogy a barlangjáratok feletti márgás szűrőréteg a szennyezőanyagokat egyre kisebb mértékben képes megkötni”. A kloridion-koncentráció éven belüli ingadozását nem sikerült kimutatnia. Ennek lehetséges okaiként két feltételezést említ: 1) a téli útszázások alkalmával kiszórt klorid nem egyszerre, hanem az év során fokozatosan folyik le a felszínen és szivárog be a karsztba; 2) a klorid, bár mobilis ion, nagy mérete miatt a márga pórusvizeiben visszamarad és fokozatosan ürül ki a felsőbb rétegekből (Hem, 1985).

A következőkben így tehát azt kell vizsgálni, hogy a kőzetekből kioldódhat-e ilyen nagyságrendben klorid-ion. Mind a mészkőben, mind a márgában van olyan alkotóásvány, ami só jellegű és tartalmaz klórt. Azonban azt, hogy ilyen nagyságrendben kioldódhat-e a klorid-ion a kőzetekből, még nem vizsgálták. Ehhez a jövőben kőzetmintát kellene venni, szétporlasztani, vízben állni hagyni és a kioldódás folyamatát kellene vizsgálni.

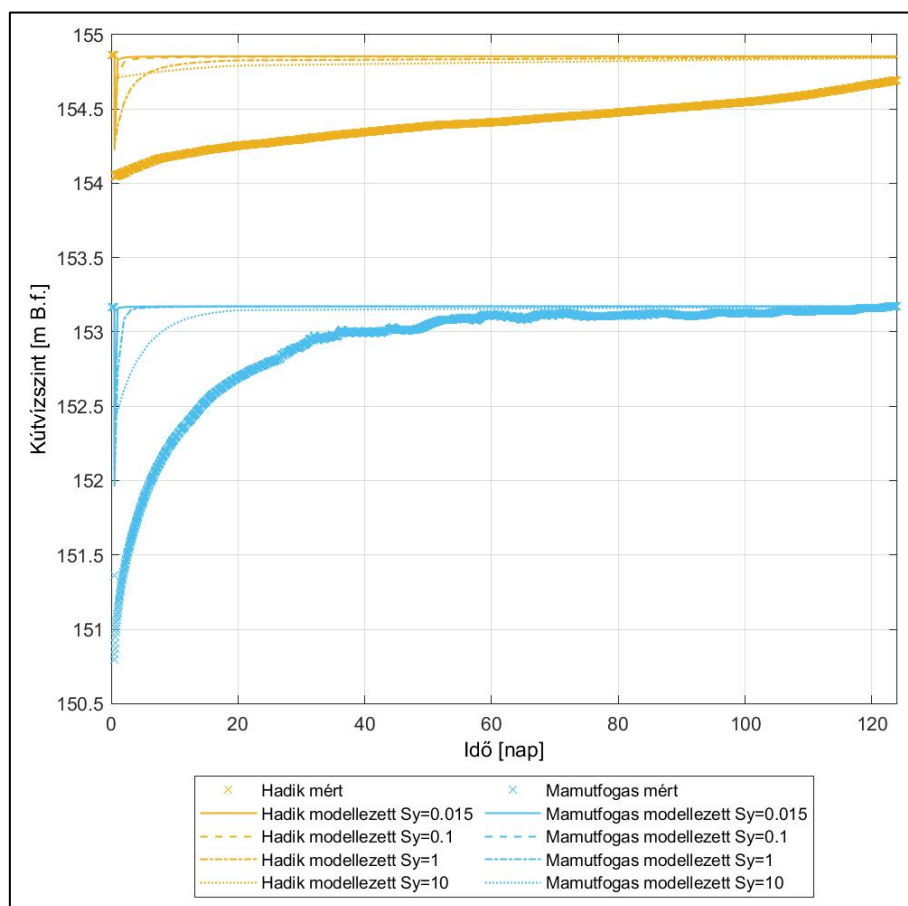
6.5. NUMERIKUS MODELL

Az „A” modellváltozat pontosabb eredményeket adott a kalibrált permanens állapot futtatására, de a tranziens futtatás során rosszul teljesített. Bár a „B” modellváltozat permanens állapotának kalibrációja mindkét kútban kb. 3 cm-es hibával terhelt, ezek még elfogadható értékek, hiszen a modell felépítéskor alkalmazott közelítések ennél nagyobbak voltak. Ezzel a

modellkonstrukcióval a Mamutfogas-kútban a megfigyelt és a modellezett leszívás értékek jó egyezést mutattak.

A fajlagos hozam érzékenységvizsgálata

Az „A” modellváltozatban különböző fajlagos hozam értékekkel kísérleteztem, miközben megpróbáltam elérni a számított és a megfigyelt értékek jó egyezését. A tranziens futtatásban érzékenységvizsgálatot végeztem különböző S_y -értékekre. Az így kapott modellezett vízszintek időbeli alakulása a 22. ábrán látható.



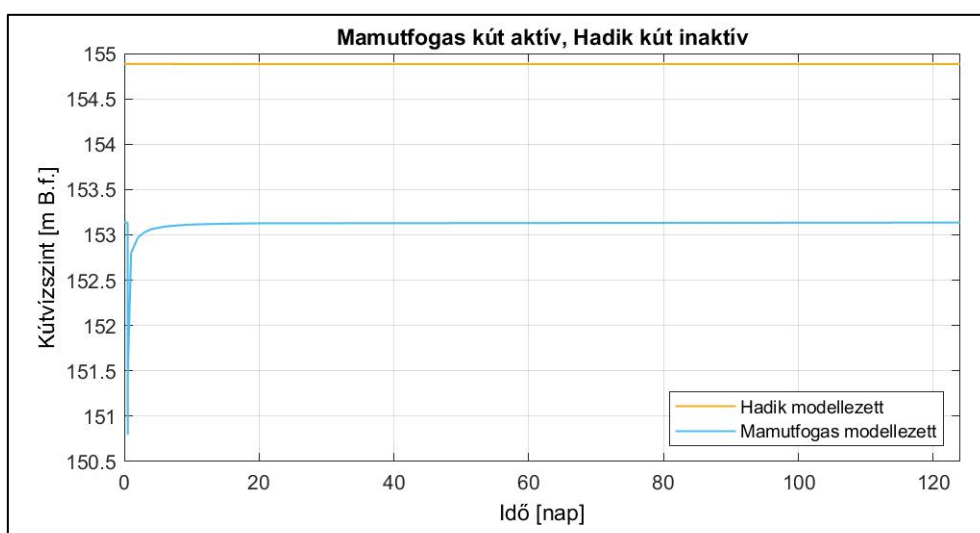
22. ábra A fajlagos hozam értékek érzékenységvizsgálata az „A” modellváltozatban

Ahogy a 4.6. fejezetben említettem, a fajlagos hozamnak 0,01-0,3 között kell lennie Freeze & Cherry (1979) szerint. A fajlagos hozam definíciója szerint $S_y = 1$ azt jelentené, hogy 1 m³ víz áramlik át 1 m²-es felületen, ha a vízszintcsökkenés 1 m. Ezen értelmezés szerint a fajlagos hozam értéke nem lehet egy fölött, mivel fizikailag nehezen értelmezhető, hiszen már $S_y = 1$ azt jelentené, hogy 1 m² keresztmetszeti területen csak víz van. A konvergenciát azonban nem sikerült elérni a 0,015-nél kisebb S_y értékkel a modellben, és e minimum és a vizsgált 0,03-as maximum közötti különbség nem volt jelentős. Ezért kipróbáltam az 1 és 10-

es értékeket is, amelyek ugyan fizikailag lehetetlenek, de segítségükkel elemezni tudtam a fajlagos hozam hatását a tranziens futtatás eredményeire.

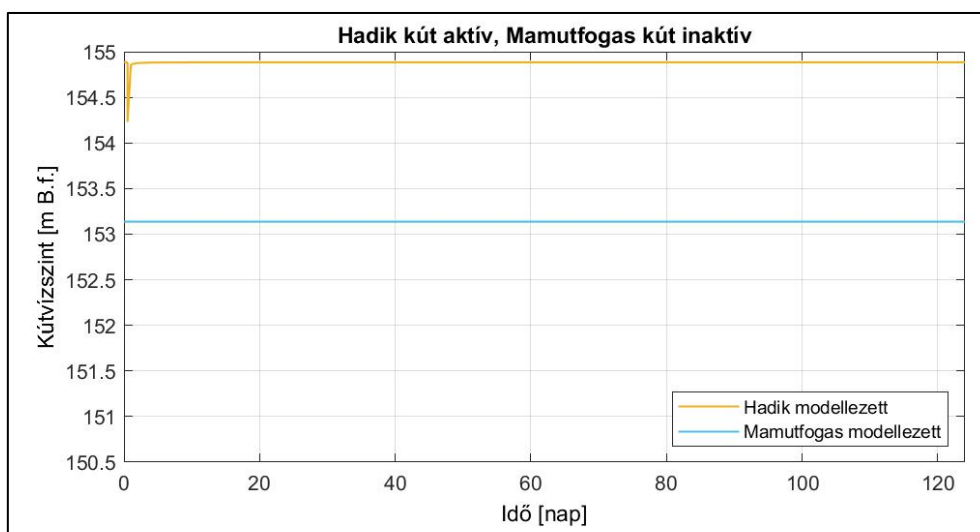
A fajlagos hozam növekedésével a leszívás csökkent, de a visszatöltődési idő nőtt. A megfigyelt visszatöltődési görbék alakja nagyon hasonló a modellezett visszatöltődési görbékhez $S_y = 10$ esetén mind a Hadik, mind a Mamutfogas kút esetében.

Mivel mindkét kútnál hozzáadtam a tranziens futtatásban peremfeltételként a próbaszivattyúzást a modellben, így meg tudtam vizsgálni, hogy csak az egyik kút a szivattyúzása milyen hatással van a másik kútra. Először a Hadik kútban kikapcsoltam a szivattyúzás peremfeltételt, és megfigyeltem a modellezett vízszinteket. Ez a 23. ábrán látható.



23. ábra A "B" modellváltozat tranziens futtatása csak a Mamutfogas kút szivattyúzásával

A Hadik kút szivattyúzását is külön szimuláltam, ez a 24. ábrán látható.

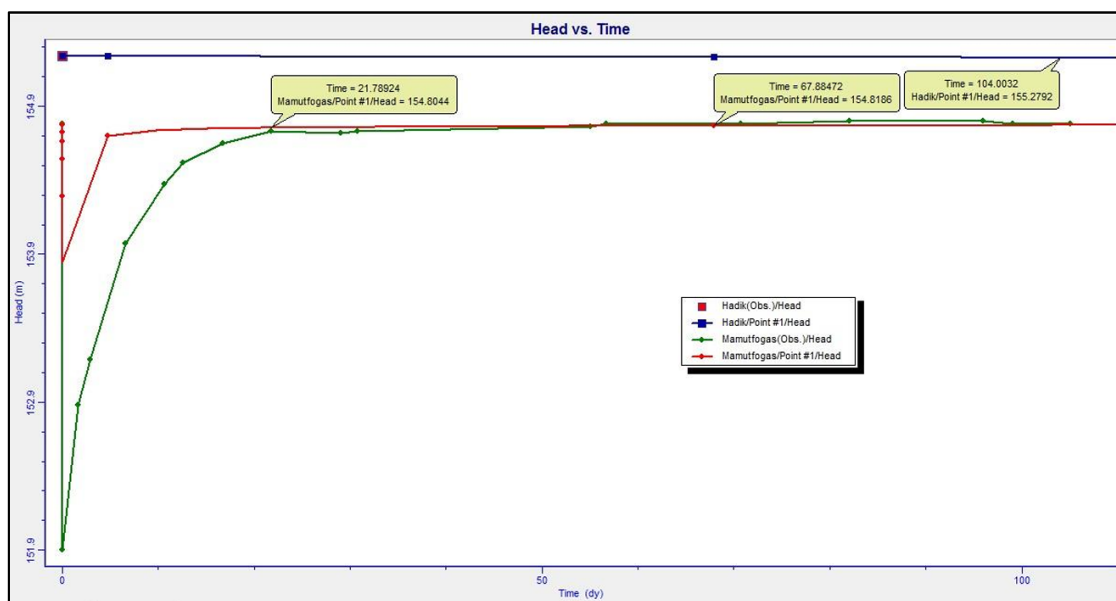


24. ábra A "B" modellváltozat tranziens futtatása csak a Hadik kút szivattyúzásával

Megfigyelhető, hogy csak az egyik kút szivattyúzása nem volt jelentős hatással a másik kút vízszintjére. A Mamutfogas kút szivattyúzásakor a Hadik kút vízszintje 2 mm-t változott. A Hadik kút szivattyúzásakor a Mamutfogas kút vízszintje pedig csak 0,5 mm-t süllyedt. Ezek az értékek elhanyagolhatóak az permanens állapot kalibrációja után maradt hibákhoz képest. Tehát megállapítható, hogy sikerült olyan modellkonstrukciót létrehoznom, ahol az egyik kút szivattyúzása nincs hatással a másik kút vízszintjére, ami a korábbi vizsgálatokban megfigyelhető volt.

Korábbi numerikus modellel való összehasonlítás

Két modellváltozatot kalibráltam permanens állapotra, melyek összehasonlíthatók Farkas (2013) munkájával. A jelenlegi modellgeometria új felméréseken alapult, és sokkal részletesebb volt, mint az előző modell. A kalibrált modellváltozatok ebben a dolgozatban homogénebb szivárgási tényező eloszlással kerültek kialakításra. A szivattyúzás hozamát csökkentették a korábbi tanulmányban, a jelenlegi dolgozatban azonban valós mért értékeket használtam az új numerikus modellváltozatok kalibrálásához. Emellett sikerült jobban reprodukálnom a leszívás értékét, mint Farkas (2013) tanulmányában (25. ábra).



25. ábra "C" modellváltozat, Farkas (2013) munkája

A tranziens futtatás kalibrálása (pontosabb visszatöltődési görbék, a visszatöltődési idő jó becslésével) a jövőben javítható lenne a fajlagos hozam (S_y) eloszlásának változtatásával, mivel a jelenlegi modellváltozatokban ez homogén volt. Ha a fajlagos hozamok változtatásával nem lehet elérni a kívánt eredményeket, akkor egy új permanens modell kalibrálását kell elvégezni, mely egy hosszadalmas folyamat.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a dolgozatban a Várbarlang vízviszonyainak felmérését végeztem el a felette található budai Várnegyed felbecsülhetetlen értékű történelmi és kulturális értékeinek megőrzése érdekében. Számos vizsgálatot végeztünk, többek között vízszintméréseket és próbaszivattyúzásokat a barlangi kutakban, csepegővíz méréseket billenőedényes mérőeszközzel és ad hoc helyszíni mérésekkel, vízkémiai vizsgálatokat a barlangi vizekre, illetve a feldolgozás után statisztikai elemzéseket és numerikus modellt készítettem a mért adatokkal.

A kutakban mért vízszinteket összehasonlítottam a korábbi mérésekkel. A Barlangos-kút vízszintje nem változott, míg a Hadik és a Mamutfogas kút vízszintje csökkent a legutóbbi, 2009-2010-es mérések óta (Farkas, 2013). A Barlangos-kút vízszintjének erős ingadozását most először sikerült megfigyelni és megmérni. A Mamutfogas kútban is enyhe ingadozás figyelhető meg. A kutak csapadékkal való korreláció analízise csak gyenge kapcsolatot mutatott ki a vízszintek és a napi csapadékmennyiség között, így más – feltehetően antropogén – hatások is jelen lehetnek.

A Hadik és a Mamutfogas kutak próbaszivattyúzásai azt mutatták, hogy bár a visszatöltődési görbék alakja hasonló a 2009-es és 2010-es próbaszivattyúzásokhoz, a kutak visszatöltődése lelassult. A Mamutfogas kútban a leszívás 2,41 m volt, és 125 nap alatt állt helyre. A Hadik kút vízszintje szivattyúzaskor 0,81 m-rel csökkent, és 137 nap alatt töltődött vissza. Mivel a kutak vízszintje többségében csökkent a legutolsó mérések óta és a visszatöltődésük is lelassult, a kutakba áramló víz feltételezhetőleg csökkent.

Csepegővíz méréseket végeztünk saját készítésű, költséghatékony és kis energiaigényű billenőedényes mérőműszerekkel. Ezek közül kettőt a Várbarlangban, három készüléket pedig a jósvafői Vass Imre-barlangban helyeztünk el. A méréseinkből kiszámítottam a csepegővíz intenzitásokat, mely a Várbarlangban 4,7 és 140 $ml/h \cdot m^2$ között, a Vass Imre-barlangban pedig 0,06 and 4 $ml/h \cdot m^2$ között volt.

Az ad hoc terepi mérések során jelentősen eltérő csepegővíz hozamokat mértünk, és a területi eloszlás is változó volt. Így az éves csepegővíz mennyiségekre számítottam minimális és maximális becslésket. A vizsgált területen a csepegővíz mennyisége legalább 1051 $m^3/év$, de akár 2735 $m^3/év$ is lehet. Hajnal (2003) és Kessler (1971) korábbi számításait az éves csepegővíz mennyiségekre arányosan kiszámítottam a Nagy Labirintus vizsgált részére, és ezek az értékek szintén ebbe a tartományba estek, 1517 and 1504 $m^3/év$ értékekkel. Összehasonlítva a jelenleg mérttel, feltételezhető, hogy a csepegővízhozam nőtt.

A vízkémiai vizsgálatok során magas klorid-koncentrációt mutattunk ki a csepegő vizekben és az egyik kútban. Miután ezeket az értékeket összehasonlítottuk a korábbi mérésekkel, arra a következtetésre jutottunk, hogy ennek sem a vízellátás, sem a csatornahálózat és nem is a téli útsózás az oka. Lehetséges kiváltó a klorid hosszú időn keresztül való beszivárgása a kőzetbe, felhalmozódása, és onnan történő folyamatosan kioldódás. Mivel korábban még nem vizsgálták, hogy a kloridionok ilyen mértékben kioldódhatnak-e a kőzetből, ezért a jövőben egy összetettebb, roncsolásos kőzetminta vizsgálatra lehet szükség ahhoz, hogy ezt a következtetést le lehessen vonni. A csepegő vizek kloridion-koncentrációjának értékeit összehasonlítottam a Budai-hegység más barlangjaival is, ami megerősítette, hogy a Várbarlangban az 1000 mg/l körüli értékek magasnak számítanak.

Numerikus modellváltozatokat készítettem Visual MODFLOW Flex programban a Hadik és Mamutfogas kutak területének vizsgálatára, melyet korábban Farkas (2013) is tanulmányozott. A modellváltozatok közül kettőt kalibráltam permanens állapotra. Az „A” változat három különböző szivárgási tényező zónát tartalmazott, a „B” változat hasonló volt, de egy drén peremfeltételt is hozzáadtam. Az „A” modellváltozat kalibrációja 1 cm pontosságú volt, a „B” modellváltozaté 2-3 cm. A modellek tranziens futtatását is elvégeztem a próbaszivattyúzás adatok felhasználásával. Mindkét változat alulbecsülte a kutak visszatöltődési idejét, de a „B” modellváltozattal sikerült a Mamutfogas kút 2,4 m-es leszívását mindössze 3 cm hibával reprodukálnom. A „B” változatot használva elemeztem, hogy milyen hatással van az egyik kút szivattyúzása a másik kútra. A kutak vízsztintváltozásainak vizsgálata után arra a következtetésre jutottam, hogy sikerült olyan modellkonstrukciót létrehoznom, ahol az egyik kút szivattyúzása nincs hatással a másik kút vízsztintjére, ami a korábbi megfigyeléseknek megfelel.

Mivel ez a TDK dolgozat az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program keretében végzett kutatásom része, a jövőben további vizsgálatok elvégzésével tervezem folytatni a munkát. A továbbiakban hosszabb mérési adatokkal lehetne elemezni a csepegővizeket és a kútvízsztinteket befolyásoló tényezőket, így biztosabb következtetéseket lehetne levonni a vizek eredetére vonatkozóan. E célból a csepegési helyeknek a közműtérképekkel való összevetését is érdemes lenne elvégezni. A csepegővizek mennyiségének pontosabb meghatározását szolgálnák a nagyobb területre kiterjedő, gyakoribb, ad hoc terepi mérések is. További kutatásra lenne szükség annak megállapítására is, hogy a kőzetből kioldódhat-e ilyen mennyiségű kloridion-koncentráció. Mivel a numerikus modell tranziens futtatása nem tudta reprodukálni a mért visszatöltődési időket, különböző fajlagos hozam zónák létrehozása és kalibrálása, illetve új permanens modellek kalibrálása is ajánlott.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék hálás köszönetet mondani Dr. Farkas Dávidnak az útmutatásáért, értékes tanácsaiért és támogatásáért a kutatás során, valamint azért, hogy az EKÖP kutatásomban is vállalta a témavezetőm szerepét. Tudása és támogatása nélkülözhetetlen volt a dolgozat elkészítéséhez.

Hálásan köszönöm Dr. Hajnal Gézának a segítségét, melyet a dolgozat elkészítése során nyújtott. Szakmai szaktudása és a budai Várhegy és Várbarlanggal kapcsolatos ismeretei és tudása elengedhetetlen volt. Nagyon hálás vagyok, hogy a mérések megszervezésével lehetővé tette a dolgozat elkészülését, és hogy lehetőséget adott a kutatásban részt venni.

Köszönetet szeretnék mondani Dr. Szieberth Dénesnek a műszerfejlesztés folyamatával való megismertetésért, a mérőeszközök elkészítésében nyújtott hatalmas segítségéért, valamint a terepi mérésekben való részvételéért és a vízminták kiértékeléséért. Köszönöm továbbá kollégáinak, a hallgatóknak, akik szintén segítettek a műszerfejlesztésben.

Sok-sok köszönet Négyesi Klaudiának, aki konzulensemként hozzájárult a dolgozat elkészítéséhez, különösen a dolgozat alapos átnézésével és az adatelemzés korszerű módszereivel kapcsolatos tanácsaival.

Szeretném megköszönni Rehák Andrásnak a mérésekben nyújtott segítségét mind a Várbarlangban, mind a Vass Imre-barlangban.

Szeretnék köszönetet mondani Borzsák Saroltának, a Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság barlangi referensének a Várbarlangban végzett mérésekhez nyújtott segítségéért.

Köszönöm továbbá a Kulturális és Innovációs Minisztériumnak, hogy az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programon keresztül támogatta ezt a kutatást.

Köszönöm a HungaroMet Nonprofit Zrt. segítségét az adatszolgáltatásban.

TÁMOGATÁS

A kutatás az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program keretében (EKÖP-24-1-BME-161 azonosítószámú pályázattal) valósult meg, amelyet a Kulturális és Innovációs Minisztérium a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapon keresztül támogatott.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Debreceni Búvárklub. (1994). Összefoglaló jelentés a budai Várbarlang 1993. máj. 29. és 1994. jan. 28. között vizsgált és tisztított kútjainak hidrogeológiai megfigyeléseiről (kézirat).
- Debreceni Búvárklub. (1996). Jelentés a budai Várnegyed 8 kútjának és 2 forrásának vizsgálatáról, melynek célja a vizek hálózati részarányának meghatározása (kézirat).
- Dénes, G. (1975). A budai Várhegy forrásmészke takarójának kiterjedése déli irányban (MKBT előadás, kézirat).
- Farkas D. (2013). A budavári barlangok hidrogeológiai vizsgálata (MSc diplomamunka). Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Farkas, D., Hajnal, G., & Szieberth, D. (2015). Vízkémiai vizsgálatok a Molnár János-barlangban. MAGYAR ÉPÍTŐIPAR, 65, 57–62.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). Chapter 2: Physical Properties and Principles. In Groundwater. <https://fc79.gw-project.org/english/chapter-2/>
- Hajnal, G. (1995). A budai Várbarlangok hidrológiája. Karszt- és barlangkutató, 10, 211–233.
- Hajnal, G. (2001). A budai Várhegy hidrogeológija (PhD értekezés).
- Hajnal, G. (2003). A budai Várhegy hidrogeológija. Akadémiai Kiadó.
- Hajnal, G., & Farkas, D. (2011). Hydrogeologische Untersuchungen des Höhlensystems der Budaer Burg. Beiträge zur Hydrogeologie, 58, 27–52.
- Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (3rd edition). U. S. Geological Survey.
- Horusitzky, H. (1938). Budapest dunajobbparti részének geológiai viszonyai. Hidrológiai Közlöny, 18, 404.
- HungaroMet. (2024). Meteorológiai Adattár. <https://odp.met.hu/>
- Kadič, O. (1942). A budavári barlangpincék, a várhegyi barlang és a Barlangtani Gyűjtemény ismertetése. BARLANGVILÁG, XII.(3–4), 49–75.
- Kessler, H. (1971). A budai Várbarlangban végzett hidrológiai mérések értékelése [FŐMTERV 30.891].
- Kiss, K. (2010). Beszivárgó vizek vizsgálata a Budai-hegység néhány barlangjában (BSc szakdolgozat). Szegedi Tudományegyetem.
- Kordos, L. (1969). A budai Várhegy és a Várbarlang földtani viszonyai. Karszt és barlang, 2, 47–50.
- Krolopp, E., Schweizer, F., Scheuer, G., & Dénes, G. (1976). A budai Várhegy negyedkori képződményei. Földtani Közlöny/Bull. of the Hungarian Geol. Soc., 106(3), 193–228.

- Leél-Össy, Sz., Bergmann, Cs., Fehér, K., & Fórizs, I. (2011). Vízvizsgálatok a Molnár János barlangban. *Karsztfejlődés* XVI., 223–245.
- Menoncin, M., Murai, M., Szombathy, P., & Szieberth, D. (2022). Assessment of Water Quality in the Molnár János Cave – Budapest, Hungary. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(2), Article 2. <https://doi.org/10.3311/PPch.18969>
- Nagy J. B. (2021). Hidrológiai vizsgálatok a Molnár János-barlangban (BSc diplomamunka). Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Niswonger, R. G., Panday, S., & Ibaraki, M. (2011). MODFLOW-NWT, a Newton formulation for MODFLOW-2005 (USGS Numbered Series 6-A37; Techniques and Methods, o. 44). U.S. Geological Survey. <http://pubsdata.usgs.gov/pubs/tm/tm6a37/index.html>
- Rétiné, Z. J. (1994). Pince veszélyelhárítás a budai Várban az 1880-1890-es években (kézirat)
- Scheuer G. (1986). A budai Vár-barlang geológiai vizsgálata, geológiai állapotfelmérés.
- Szontagh, T. (1908). A budai várhegyi Alagút hidrogeológiai viszonyai—Jelentés a Várhegyi Alagút vizesedésének okairól, Bp., p.23.
- Tóth, D. (2016). A Molnár János-barlang térségének hidrológiai vizsgálata (MSc diplomamunka). Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Török, Á. (1998). A Gerecse és a Budai-hegység édesvízi mészkő összeleteinek komplex földtani vizsgálata. Ifjúsági OTKA jelentés.
- Waterloo Hydrogeologic. (2012). What is MODFLOW? - Waterloo Hydrogeologic. <https://www.waterloohydrogeologic.com/2012/06/22/what-is-modflow/>
- Waterloo Hydrogeologic. (2014). A Comparison of Groundwater Modeling Approaches. <https://www.waterloohydrogeologic.com/2014/01/24/comparing-approaches-groundwater-modeling-approaches-conceptual-vs-numerical/>
- Waterloo Hydrogeologic. (2024). User's Manual. Visual MODFLOW Flex 10.0 Integrated Conceptual and Numerical Groundwater Modelling Software.
- Zolnai, L. (1961). Buda középkori vízművei. *Történelmi Szemle*, 4, 16–55.