

## A budapesti 4-es metróvonal létesítéséhez kapcsolódó felszín alatti vizeket megfigyelő monitoring és riasztási rendszer

KOVÁCS Botond<sup>1</sup>, CSICSÁK József<sup>1</sup>, SZÉL Tamás<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mecsekérc Zrt., 7633 Pécs, Esztergár Lajos u. 19.

<sup>2</sup> Mélyépterv Kultúrmérnöki Kft., 1054 Budapest, Zoltán u. 8.

---

### *Review of the groundwater monitoring and alarm system connected with the construction of the 'Metro 4' underground railway line in Budapest*

#### Abstract

This paper summarizes the mathematical and logical model of an operating groundwater monitoring and alarm system in connection with the construction 'Metro 4' underground railway line in Budapest. The monitoring system consists of numerous water level (i.e. potentiometric level), temperature and flow measure points. In this process automatic data loggers detect data and send them to a database where they are recorded as time series. The time series are applied to real time by a smart alarm monitoring system which was developed to detect and filter negative accidental artificial effects on the groundwater (these are in connection with the construction works).

Beside many other purposes, the system serves two main goals: one is to help preserve the condition of buildings near the line of Metro 4, the other is to protect the geothermal water system in Budapest. The protection of the geothermal water system has a high priority due to its high environmental and economic value.

The essence of the system is that, if a suspected artificial impact is detected, an alarm signal is initiated. The method of making an alarm signal depends on the time series observed so far in the relevant measure points.

The water level of the River Danube has an obvious direct influence on the groundwater in Budapest, moreover the flow of groundwater is in strong relation with the natural water fluctuation of the river. The river causes a large water level fluctuations at several measure points which may hide some non-desired artificial effects. To avoid a situation in which natural movements or events might cause alarm and interfere with the results of non-natural activities, some calculations and reference time series are needed to filter the data and provide new time series which are free from these usual natural changes. It is these calculated time series together with the raw measured data that are used to apply for detection. Different alarm levels can be initiated (e.g. primary, secondary, tertiary), depending on the magnitude and span of the changes.

*Keywords: groundwater, monitoring, alarm system, metro 4 construction, Budapest, Hungary*

---

#### Összefoglalás

A szerzők a budapesti 4-es metró építéséhez kapcsolódó működő felszín alatti vizeket megfigyelő monitoring- és riasztási rendszer matematikai és logikai modelljét mutatják be. A monitoringhálózat számos vízszint- (potenciometrikus szint), hőmérséklet- és áramlásmérési pontból áll, melyekben automata adatgyűjtők mérik és továbbítják egy adatbázis felé az adatokat, ahol azok idősoroként rögzülnek. Ezeket az idősorokat egy olyan automata monitoring riasztási rendszer kezeli valós időben, amely észleli és kiszűri az építési munkálatokhoz kapcsolódó esetleges mesterséges hatásokat.

Több más szándék mellett ez a rendszer két fő célt szolgál; az egyik, hogy segítsen megőrizni a metró vonalához közeli épületek állapotát, a másik, hogy budapesti termásvízrendszer érintetlen maradjon. A hévízrendszer megóvása különösen fontos, tekintettel annak magas környezeti és gazdasági értékére.

A riasztási rendszer lényege, hogy feltételezett mesterséges hatás észlelése során jelzést ad. A riasztási szisztéma az adott mérési pontok eddig megfigyelt idősoraitól függ. A budapesti felszín alatti vizekre a Duna vízállása (annak távolhatásán belül) jelentős befolyással bír, és a felszín alatti áramlások is szoros kapcsolatban vannak a folyó vízjárásával, jelentős vízszintingadozást okozva ezáltal több mérési pontnál, amely viszont elfedhet néhány, az építkezéssel összefüggésbe hozható eseményt. Azért, hogy elkerüljük azt, hogy természetes fluktuáció okozzon riasztást, illetve elfedje a mesterséges hatásokat, bizonyos számításokra, illetve referencia idősorokra van szükség. A

számítások új idősorokat hoznak létre, melyek mentesek ezektől az ismert természetes változásoktól és a mért adatok mellett az észlelések alapját képezik. A változások mértékétől és hosszától függően különböző riasztási szintek (első-, másod-, illetve harmadfokú) lépnek életbe.

**Kulcsszavak:** felszín alatti vizek, monitoring, riasztási rendszer, 4-es metró, Budapest

## Bevezetés

A budapesti 4. metróvonal I. szakaszának építésével kapcsolatos környezeti hatásokat figyelő „karszt-, talaj- és rétegvíz-megfigyelő monitoring rendszer” kialakítását a Vituki Kht. Hidrológiai Intézete a Mélyépterv Kultúrtermelő Kft.-vel készítette el. Összegyűjtötték a karsztvíz-termelő kutak és források, illetve üzemi és törzshálózati észlelőfúrások, valamint az egyéb észlelésbe vonható objektumok adatait, valamint megtervezték a monitoring-hálózatot (LORBERER et al. 2001). A karsztvíz, talaj- és rétegvíz-megfigyelő és riasztási rendszer (továbbiakban észlelő, vagy riasztási rendszer) e hálózat egyes mérési pontjainak folyamatosan mért adatait használja, illetve dolgozza föl.

A monitoring-hálózatot a Mélyépterv–Mecsekérc–Soldata, Konzorcium üzemelteti, melynek kiépítése során számos vízszint- és hőmérsékletmegfigyelő kút létesült, illetve már meglévő kutakat és forrásokat vontak be (1. ábra). A mérési pontok száma bővíthet. Ezek egy része a Budapest Gyógyfürdői és Hévízei Zrt. tulajdonát képezi és a gyógyfürdők vízhasználatában aktív szerepet játszik. A vízszintet, vagy potenciometrikus szintet (továbbiakban vízszintet) és hőmérsékletet megfigyelő kutakban, forrásokban (vagy

mérési pontokban) automata adatrögzítővel folyamatos és ekvidisztáns mérések történnek, mely adatok egy specializált adatbázisban rögzítődnek és interneten keresztül érhetőek el. Azokban a kutakban, ahol a vízfelhasználás rendszeres, automata áramlásmérőket is elhelyeztek.

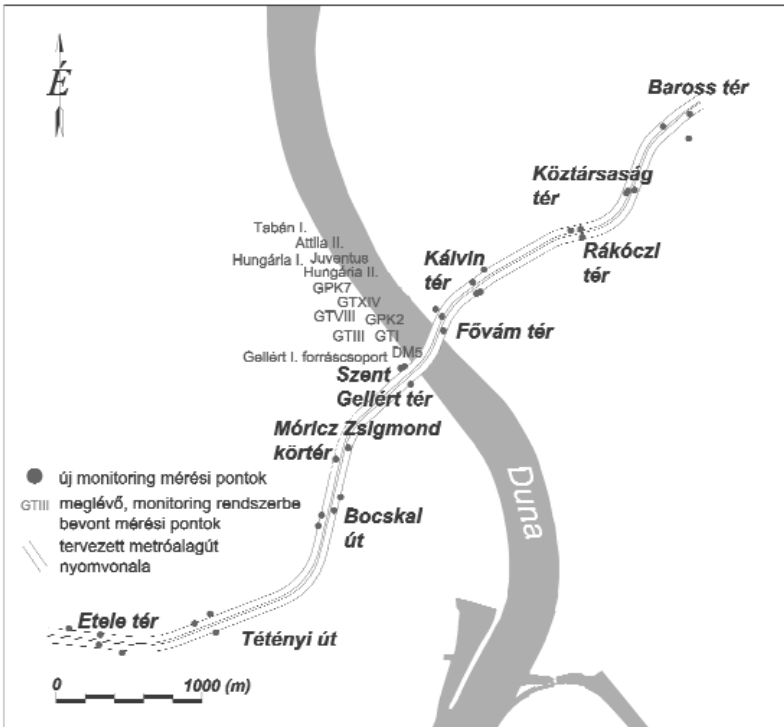
A monitoring célja olyan események észlelése, illetve a felszín alatti vizekben bekövetkező olyan jelentősebb változások megfelelő időben történő kimutatása, amelyek a mesterséges hatásokhoz (metróépítéshez) kapcsolódnak és a természeti környezetben tartós változást okoznak. Több más szándék mellett ez a rendszer a következő célokat szolgálja:

- rögzíti a felszín alatti vizek metróépítés előtti állapotát (alapállapot-felvétel),
- folyamatosan ellenőrzi a felszín alatti vizeket és az építés közben adatot szolgáltat a kivitelezők részére, segíti megőrizni a metró vonalához közeli épületek állapotát (építési monitoring),
- az építés utáni állapotot rögzíti még egy évig (utó-monitoring),
- kiszűrhetővé teszi a felszín alatti vizekre ható egyéb külső hatásokat.

A hévízrendszer megóvása különösen fontos, tekintettel annak magas környezeti és gazdasági értékére. A kialakítandó észlelőrendszernek a 4. metróvonal létesítésével kapcsolatos környezeti hatások közül a termálvíz-tároló rendszerben bekövetkező állapotváltozások észlelését is biztosítani kell. Az észlelési adatok kiértékelése során egyértelműen elkülönítendő a metróépítéssel kapcsolatos hatások következményei a tárolórendszerben fellépő egyéb hatások által indukált állapotváltozásoktól, amelyek a felszín alatti vízszint fluktuációját okozhatják (pl. Duna vízállása, hévízkitermelés, és egyéb hatások lásd FREEZE & CHERRY, 1979 p. 230). A 4. metróvonal által érintett épületek biztonsága érdekében az észlelőrendszernek a talajvíz esetleges nem tolerálható szintre való emelkedését és csökkenését is figyelnie kell. A tartós vízkivétel ugyanis a felszín megsüllyedését okozhatja TERZAGHI (1925).

Ezen túlmenően olyan egységes észlelési-adatáramlási és feldolgozási rendszert érdemes üzemeltetni, amely szükség esetén biztosítja a gyors beavatkozás lehetőségét.

A nagyszámú adat és észlelési pont miatt egy automata észlelőrendszer fejlesztésére volt szükség. Ez a rendszer szorosan kapcsolódik a mérési pontok adatait rögzítő adatbázishoz, a valós időben folyamatosan



1. ábra. A „karszt-, talaj- és rétegvíz-megfigyelő monitoringrendszer” újonnan létesített, valamint egyéb, a rendszerbe vont mérési pontjai

**Figure 1.** The newly designed and other measure points drawn into the "karstic, ground- and the deep warm geothermal waters monitoring system"

érkező adatok földolgozását és az előre beállított küszöb-, vagy határértékek bizonyos idejű meghaladását követően jelzést ad. A riasztási jelzések és a valós idejű feldolgozott eredmények internetes felületen szintén nyomon követhetők. A rendszer informatikailag két egységből áll: egy számítási egység, mely időszerelemzéseket végez az egyes vízszint- és hőmérséklet-adatsorokon és egy riasztási egység, mely a számítási egység részeredményeihez, illetve a mért értékekhez tartozó határértékek alapján a riasztási jelzéseket kezeli. A továbbiakban a monitoring hálózat területének rövid vízföldtani ismertetője után részletesen bemutatjuk az egyes mérési pontok, illetve csoportok számítási és riasztási modelljét.

### A vonatkozó képződmények vízföldtani adottságainak áttekintése

Budapest, illetve a 4. metróvonal földtani adottságai jól ismertek (SCHAFARZIK & VENDL 1929, WEIN 1977, ALFÖLDI et al. 1977, FODOR et al. 1994, RAINCSÁKNÉ 2000, HORVÁTH 2002 stb.), ezért itt csak a terület vízföldtani adottságait foglaljuk össze, vázolva azt a vízföldtani környezetet, amelyre a monitoring hálózat települt, illetve amelyben az észlelések történnek.

A felszín alatti vizek tekintetében el lehet különíteni egymástól a pesti és a budai oldalt, a karszt-, illetve hévizek esetében egy összefüggő rendszert lehet vázolni (budai termálkarsztrendszer).

A pesti oldalon az egykori Duna-ártéren az elmúlt századokban a Duna régi ágai s a beléjük ömlő kisebb vízfolyások kanyarogtak (HORVÁTH 2000). Ezek az eltemetett medrek jobb vízvezető képességükkel még ma is nagyban szabályozzák és irányítják a talajvíz áramlását. A talajvíz nagyobb része az infiltrációs csapadékvizekből, kisebb része a kainozoos fekvő konzekvens lejtésirányával egyező oldalirányú utánpótlásból és az élő vízfolyások (Szilas-patak, Rákos-patak) esetleges rátáplálásából származik. A terület erózióbázisa a Duna, amely általában megcsapoló vízföldtani elem, a folyóparti területeken ugyanakkor magas folyami vízállás esetén a felszín alatti vizekre rátáplál. Az urbanizáció hatásaként az utóbbi évtizedekben a közüzemi vízvezeték meghibásodása, illetve a közüzemi csatornahálózat nem teljes kiépítettsége is hozzájárult a talajvíz helyenkénti emelkedéséhez. A Fővám téri mélyállomástól keletre, a 4. metróvonal felső-oligocén, illetve alsó- és középső-miocén víztároló képződményeket is érint (HORVÁTH 2000).

A budai oldalon szoros értelemben vett talajvíz, nagyobb kiterjedésben és mennyiségben csak a holocén-korai-pleisztocén ártéren belüli területeken jelenik meg. A talajvíz a teljes budai oldalon nyílt tükrű. A rétegvíz jelenléte itt nem jellemző, vagy csak a kainozoos rétegek (felső-oligocén és középső-oligocén Kiscelli Agyag Formáció képződményei) felső részén, a tektonikai zónák környezetében jelenik meg, általában csekély fajlagos hozammal. Az egyik fő áramlási irány a Duna, mint erózióbázis felé

történő szivárgás (a Duna galériaként gyűjti magába a talajvizet). A felszín alatti vizek áramlásának másik fő iránya a Duna völgyére jellemzően É–D-i irányú. A Duna alatti szakaszon az eocén és oligocén rétegekbe repedések, törésvonalak mentén nyomás alatti karsztvíz jut.

A budai termálkarsztrendszer a Dunántúli-középhegység felszín alatti vízrendszerének része (ALFÖLDI et al., 1968, MÁDLNÉ 1997). Földtani-földrajzi és hidrológiai alapon történő lehatárolása részlegesen megtörtént, bizonyos földtani határok (K-i és DK-i) nem tisztázottak (MINDSZENTY et al. 1999). A budai termálkarsztrendszer lényegében alaphegység jellegű triász karbonátos kőzetekből épül föl (WEIN 1977), melyhez helyenként felső-eocén Szépvölgyi Mészke és a Budai Márga mészmárga jellegű része is kapcsolódik. A rétegsorban a kora-oligocénben képződött Tardi Agyag és a késő-oligocénben lerakódott Kiscelli Agyag alkot vízfogó, vagyis relatív impermeabilis összetét (ez utóbbi a pesti oldalon átlagosan 300–350 m vastagságú). A miocén üledékek közül a pecten homok (Budafoki Homokkő Formáció) és a szarmata kavics sorolhatók a permeabilis üledékek közé. A pannóniai kavics- és homokrétegek, valamint a kvarter áthalmazott lösz szintén jó vízvezetők (MINDSZENTY et al. 1999). A jelenlegi karsztszerkezet kialakulásában a paleokarsztosodás mellett a tektonikus preformációnak is jelentős szerepe volt, melyeket hidraulikai vizsgálatok támasztanak alá (SÁRVÁRY 1972).

A termálkarsztrendszer sematikus működési modellje ismert (SCHAFARZIK 1928, VENDEL & KISHÁZY 1964, ALFÖLDI 1979, 1981, KOVÁCS & MÜLLER 1980). A budai termálkarszt beszivárgási területét lehatárolták, az összes beszivárgására vonatkozó becslések ismertek (SÁRVÁRY 1995). A termálkarsztrendszer természetes megcsapolódása a Duna jobb partján az ún. Budai-forrásvonal. A természetes hévforrások különböző korú és jellegű képződményekből fakadnak (ALFÖLDI 1979). A hévforrások eredetéről már korábban megállapították, hogy a Dunántúli-középhegység karbonátos tömegének felszínén beszivárgó csapadékvíz a medenceüledékekkel fedett karbonátos kőzetekben áramolva fölmelegszik és hévizek formájában kerül a felszínre (SZABÓ 1857, ZSIGMONDY 1878). ALFÖLDI (1981) bevezette az ún. karéjos áramlás fogalmát, mely szerint az utánpótlódási területeken beszivárgó csapadékvíz a forrásvonalakat megkerülve karéjos áramlással jut vissza a felszínre. A vízmozgás a hegység részek szabadtükrű karsztvízszintje és a megcsapolódási terület szintje közötti potenciálkülönbség következménye. Ez részben a tengerszint feletti magasságkülönbségből, részben az eltérő hőmérsékletű vizek sűrűségkülönbségéből adódik. Ezért az áramlási rendszert hidrodinamikus (gravitációs) vezérlésű geotermikus áramlási rendszernek nevezzük (ALFÖLDI 1979, 1981). A budai termálkarsztrendszerben vadózus vízcirkuláció történik különböző behatolási mélységű és ennek megfelelően különböző mértékben felfűtött áramlási rendszerek mentén. A különböző hőmérsékletű szabadtükrű és a leszorított tükrű karsztvizek keveredési zónája a Duna bázisszintjén lévő forráskilépési helyek közelében

található (MINDSZENTY et al. 1999). A beszivárgó vizek a mélyben hőt vonnak el a környezetüktől, majd a feláramlási szakaszban ezt a hőt a felszínre hozzák hévizek formájában. Ez a hőelvonás-hőhozzáadás okozza a geotermikus gradiensekben észlelhető területi különbségeket. A tárolórendszer termodinamikai szempontból aszimmetrikus hőkonvekciós cellák sorozatának tekinthető, amelyeknek vízmozgási-szivárgási kényszerpályáit a szerkezetföldtani adottságok határozzák meg. (LORBERER 2002).

A Dunántúli-középhegység (és a Budai-hegység) karsztos repedezett tárolórendszere hidraulikailag összefüggő egységet képez, amelyen belül beszivárgási övezetekkel, tektonikai igénybevétellel és helyi erózióbázisokkal szabályozott, viszonylagos önállósággal rendelkező karsztvízrendszerek természetes körülmények között egymással dinamikus egyensúlyban vannak, de bármelyikben bekövetkező változás módosíthatja a szomszéd rendszer határfeltételeit. A budapesti karbonátos tárolóképződmény sajátossága a sekély és a mélykarszt, illetve a nyílt tükrű és a zárt tükrű mélységi víz közvetlen egymásmellettsége (ALFÖLDI et al. 1968). A mélykarszt olyan szerves összefüggésben, elválaszthatatlan kapcsolatban van a fedetlen szabadtükrű karsztvízzel, hogy a vízháztartás szétválasztása lehetetlen. A közöttük meglévő hidrodinamikai kölcsönhatást a tárolóképződményt sűrűn behálózó hasadék-repedésrendszer teszi lehetővé (ALFÖLDI et al. 1968; ALFÖLDI 1979).

A Duna menti termális források a Dunántúli-középhegység fő karsztvíztároló-rendszerének legérzékenyebb pontjai, ahol a mesterséges beavatkozások hatására igen sokféle környezeti állapotváltozás léphet fel (LORBERER 2002). JAMBRIK (1995) a bányavízemelés környezeti hatásait magyarországi és külföldi példán keresztül is bemutatta. Mesterséges behatások már korábban is érintették a termálvízrendszert. A termálvizet hasznosító mélyfúrások már a 19. sz. közepétől létesültek. Az 1950-es évek közepétől bányászati tevékenység során karsztvízkivétel kezdődött az utánpótlódási terület peremén, továbbá ivóvízművek is épültek. Ez a tevékenység mára alábbhagyott. A 4. metróvonal tervezésénél a tervezők kezdettől fogva törekedtek a gyógyhévíz-tároló triász-eocén kőzetek, illetve a szökevényforrások elkerülésére, illetve megfelelő védelmére.

### Mesterséges hatások észlelése, határértékek

Az előzetes igényeknek megfelelően három riasztási szintet határoztunk meg:

- Elsőfokú, ún. szakértői figyelmeztetés.
- Másodfokú riasztás (készültség).
- Harmadfokú riasztás (vészhívás).

A riasztások rendjét ennek megfelelően alakítottuk ki. A riasztási jelzések informatikai úton e-mailben, illetve sms-ben küldhetők. A szakértői figyelmeztetés adott szakértői kör figyelmét hívja fel bizonyos tendenciákra, változásokra

a megfelelő mérési pontoknál. A másodfokú riasztás felhívja az érintettek figyelmét arra, hogy az adott mérési pont(ok)on olyan eltérések regisztrálhatók, amelyek valamilyen mesterséges hatás eredményei lehetnek, s a megfelelő intézkedéseket, vizsgálatokat meg kell kezdeni. A harmadfokú riasztás, vészjelzés azonnali beavatkozást igényel, s értesíti a kivitelezőket az eseményekről. A másodfokú riasztást, amennyiben szakértői elutasítás/megerősítés nem érkezik és a riasztást kiváltó ok továbbra is fennáll, bizonyos idő elteltével automatikusan harmadfokú riasztás követi. Harmadfokú riasztás szakértői beavatkozásra is történhet. Az egyes riasztási szintekhez különböző határértékek, illetve időkorlátok tartoznak. Azokban az esetekben, ahol a határértékekhez csak elsőfokú riasztás kötődik, szakértői beavatkozás nélkül az elsőfokú jelzést adott idő elteltével másod-, illetve harmadfokú jelzés követi. A riasztási modell épülhet a mért adatoknak megfelelő gyakoriságú, illetve annál kisebb gyakoriságú adatok vizsgálatára. Utóbbi esetben a mért adatokat medián segítségével szűrjük. Így például egy órás medián érték 5 perces időközönként mért adatsor esetén 12 értéket helyettesít.

A határ-, vagy küszöbértékeket az egyes idősorokból, mért értékekből származó információk alapján, illetve bizonyos peremfeltételek, egyéb információk figyelembe vétele mellett határozzuk meg.

Az időkorlátok a küszöbértékek meghaladásának, illetve az adott szintű riasztás állapotának toleranciaidejét jelzik. Az időkorlátok ahhoz is szükségesek, hogy az egyes határértékek átlépését ne kövesse azonnali riasztás.

Az egyes küszöbértékek meghatározásához vizsgálhatjuk a mért értékek eloszlását. Feltételezhetjük, hogy több független részesemény hatásából tevődik össze a folyamat végeredménye, azaz a mért értékek normális eloszlásúnak tekinthetők, mely hipotézist, mint ismeretes,  $\chi^2$  próbával ellenőrizhetjük. Amennyiben a mért értékek normális eloszlásúak, úgy a következőképpen járunk el. Egy normál eloszlású minta átlagértékének és tapasztalati szórásának ismeretében becsülhető a folyamatot jellemző eloszlás várható értéke és szórása. Ezek segítségével meghatározható az elméleti sűrűségfüggvény, melynek területei arányosak az események bekövetkezési valószínűségével. A függvény ismeretében kellő pontossággal megadható azon esetek száma, melyek két adott határérték közé esnek (pl. a  $\pm$  egyszeres szórás által határolt tartományba az esetek hány %-a tartozik).

A nem normáloszlású sokaságok esetében ezek a százalékok a normális eloszlásától eltérő nagyságúak. A normálistól eltérő eloszlásoknál úgy határozhatjuk meg az alsó és felső küszöbértéket, hogy az adott értékek megfigyelt eloszlását és annak elméleti sűrűségfüggvényét ismerve megadjuk azokat a sávokat, amelyek közé megfelelő valószínűséggel esik az esetek túlnyomó többsége (pl. 95%).

Mielőtt az egyes változók küszöbértékeit ily módon meghatároznánk, meg kell győződni arról, hogy azok nem tükröznek-e trendjellegű változást, vagy periodicitást. Amennyiben igen, úgy az adott idősort a később ismertetett módon mentesíteni szükséges ezektől a komponensektől, és

a küszöbértékeket, vagy a küszöbértéksávok nagyságát statisztikai úton a mentesített ún. maradék idősor értékeire határozzuk meg.

A mérési adatokból származó statisztikai információk mellett a határérték definiálásához következőket vesszük figyelembe, illetve használjuk fel:

— A monitoring rendszerbe tartozó észlelési pontok eddig megfigyelt (lehetőleg több éves) természetes vízjárása, hőmérséklete, ingadozási sávja.

— A környezetben már meglévő kutak idősorának, természetes vízjárásának a vizsgálata.

— A Duna többéves vízjárása, annak mértéke, ingadozási sávja.

— A kutak környezetében lévő épületek pinceszintje, alapozási síkja.

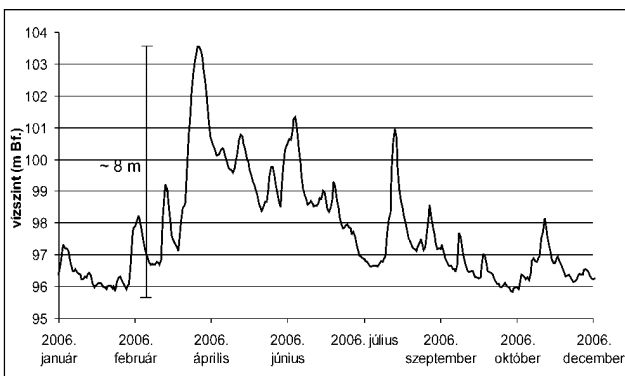
— Kútszerkezeti adottságok, kútkiképzés.

— A termálvíz hőmérsékleti kritériumai.

— Egyes észlelési pontok esetében a Duna vízszintjénél mindig magasabb potenciálszint figyelembe vétele.

— Rendszeres vízkivétel mértéke bizonyos kutak esetében.

A 2. ábrán láthatóan a Duna vízállása egy éven belül akár 8 métert is ingadozhat, hasonló mértékű fluktuációt okozva a partközeli talajvíz mérési pontokban, és egyre



2. ábra. A Duna vízszintingadozása a 2006. évben

Figure 2. Water level fluctuation of the river Danube in the year of 2006

kisebb amplitúdójú, de még mindig méteres ingadozást kelt a távolabbi észlelési pontok vízszintjében. Ez az ún. toleranciasáv nagyságának meghatározásakor fontos szerepet játszik, ugyanis az ilyen észlelési pontoknál tág abszolút vízszint toleranciasávot érdemes meghatározni, hogy riasztás pusztán a Duna vízjárásának érvényesülése során ne történjék. Ezeknél a kutaknál elsősorban a később részletezendő statisztikai elemzési módszerek hivatottak kiszűrni az esetleges mesterséges hatásokat.

Az egyes peremfeltételek (pl. épületek alapozási síkja) a statisztikailag meghatározott határértékeket felülírhatják. A kutak környezetében lévő épületek alapozási síkja, pinceszintje a nyílt tükrű talajvízszint megfigyelő mérési pontok felső határértékeinek (m Bf.) meghatározásánál fontos szerepet játszik.

A hőmérsékleti határértékek az egyes kutak eddig megfigyelt hőmérsékletértékei, illetve a területre, forrásra jel-

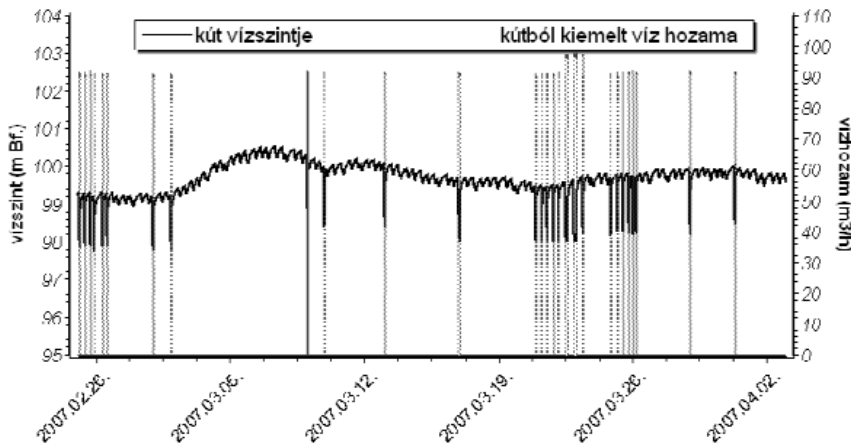
lemző hőmérsékletek alapján határozhatók meg. A hévízkutaknál az alsó határérték meghatározásánál érdemes figyelembe venni azt, hogy hévíznek a 30,00 °C feletti hőmérsékletű víz minősül. A tartós hőmérsékletemelkedésből következtetni lehet az esetlegesen megváltozott, vagy megváltozni készülő hő- és vízáramlási viszonyokra.

A rendszeres vízkivételek mellett a helyi erózióbázison kialakuló depresszió 1996-ig minden alkalommal magasabb potenciálszintű hévizet eredményezett — a hőmérsékletkülönbség figyelembevételével is — a Duna aktuális vízállásánál (l. később a 4. ábrát). A Gellért-hegy menti Duna-szakaszon a triász rétegekben kialakult vetők a Duna-meder fenekéig érnek, melyet a közelmúltban a metróépítéshez kapcsolódó geofizikai mérésekkel is bizonyítottak (PRÓNAY et al. 2000). Így a termálvizet csak akkor lehet a Duna-víztől biztonságosan megóvni, ha ezt a pozitív nyomástöbbletet minden Duna-vízállásnál megtartjuk. Szerencsére természetes körülmények között a természet önszabályozása biztosította ezt. A Duna vízállása a szökevényforrásokra gyakorolt víznyomáshatásának következtében megnövekedett termálkomponens miatt elsősorban a langyos karsztvíz komponenst duzzasztotta vissza. Így akár a Duna tíz méteres vízállás ingadozása esetén is a folyó maradt a karsztvíz erózióbázisa és a vízállás bármilyen gyorsan emelkedett is (többször előfordult két-három nap alatt 3-4 méteres emelkedés) nem nyomult be a Duna vize a hévízjáratokba (HORVÁTH 2002). Ezáltal, ha bizonyos kutak trendmentes értékei egy előre, kutanként meghatározott küszöbértéken tartósan kívül kerülnek, úgy az a gyógyvizek veszélyeztettségének indikátora, hiszen ha a potenciálszintek közötti különbség megfordul, úgy a hideg talajvízkomponens hévízhez való hozzákeveredésének veszélye fennáll, amely a hévizek felhígulását eredményezi.

Azoknál a mérési pontoknál, ahol rendszeres vízkivétel történik, áramlásmérők üzemelnek. A riasztási modell ezek mért értékeit figyelembe veszi. Ha ugyanis vízkivétel történik — mely az áramlásmérő által mért hozamértékeken látszik — úgy az adott kút vízszintje is lecsökken, bizonyos esetekben a természetes vízjáráshoz és a szokásos vízkivételek mértékéhez igazított határértékeket is átlépve. Ezért azt a megoldást választottuk, hogy abban az időszakban, amikor az áramlásmérő által mért hozam egy bizonyos értéket (m<sup>3</sup>/h) átlép, ugyanahhoz a mérési ponthoz tartozó vízszinthez nem kötődik riasztási indikáció. Az, hogy mekkora m<sup>3</sup>/h vízkivétel számít szokásosnak, illetve mekkora legyen az a határérték, amely kapcsolja a riasztási jelzéseket, mérési pontok szerint eltérő lehet (3. ábra).

Az utóbbi években a 30 °C-nál melegebb összhévíz-felhasználás 14–15 m<sup>3</sup>/perc volt, míg a hasznosított hideglangyos karsztvizek hozama 4–7 m<sup>3</sup>/perc között ingadozott (HORVÁTH 2002).

Az alkalmazott riasztási struktúra az adott idősor tulajdonságaitól függ. Az egyes riasztási határértékek a következőkben bemutatott számítások részeredményeihez, illetve az eredeti mért adatokhoz kapcsolódnak.



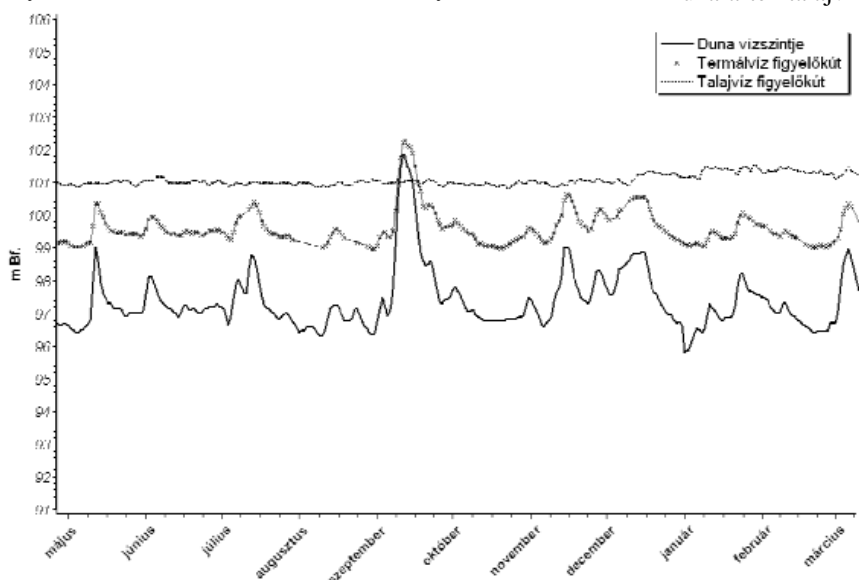
3. ábra. A rendszeres vízkivétellel érintett kutakból kiemelt vízmennyiséget áramlásmérők rögzítik. Látható, hogy a vízszintsökkenések egybeesnek a vízkivételekkel. Az ábrán bemutatott időszoron megfigyelhető rendszeres napi ütemű vízszintingadozást terepi méréseink alapján egy másik kútból történő rendszeres vízkivétel okozza

Figure 3. The quantity of water taken out from the well affected by usual pumping is detected by flowmeters. It can be seen, that the water level decreases coincide with the pumping events. According to our field measurements, the regular order of water fluctuation is caused by another well being pumped

A határértékeket az újonnan beérkező, természetes körülményeket reprezentáló adatokkal kiegészítve bizonyos időszakonként érdemes felülvizsgálni.

### Számítási modell, idősor elemzési módszerek

Az észlelt adatokat az alábbiakban ismertetett modell dolgozza fel. Az észlelések a saját adatbázisunkra és a monitoring mérési pontjaira vonatkoznak. A modell az egyes mérési pontok idősorait elemzi, valamint mentesíti azokat olyan természetes hatásoktól, amelyek elfednék a



4. ábra. A Duna befolyása a Gellért-hegy lábánál lévő termálvíz figyelőkútban jelentős, míg egy távolabbi talajvíz figyelőkútban ez a hatás nem észlelhető (a bemutatott időtartam néhány éves idősor része)

Figure 4. Although the impact of Danube is remarkable in the geothermal well at the foot of Gellért Hill, it has no obvious effect on a distant groundwater observing well (the represented timespan is a part of a several-year-long time series)

metróépítéshez köthető esetleges mesterséges behatásokat. A vizsgálati módszer tekintetében a mérési pontokat három fő csoportra lehet osztani. Az első csoportba tartoznak azok, amelyek természetes vízjárása egyedi, vagyis nem mozog együtt más mérési pontokéval, valamint a Duna vízszintingadozása sem, vagy számottevően nem gyakorol hatást a vízjárásukra. Ide soroltuk az összes hőmérsékleti mérési pontot is, melyeknél észleléseink alapján némely esetben van megfigyelhető összefüggés a hőmérséklet alakulása és a Duna vízszintmozgása között, azonban ezt nem szükséges összetettebb számításokkal kezelni. A második csoportba soroltuk azokat a kutakat, amelyek természetes vízjárása szoros együttmozgást mutat más mérési pontokéval, viszont a Duna vízállásának hatása nagy fluktuációt nem okoz bennük. A harmadik csoportba tartoznak azok a mérési pontok, amelyek vízjárására a Duna vízállása közvetlen és jelentős befolyással bír, nagyfokú természetes ingadozást okozva. Az azonos vízjárást mutató talajvíz mérési pontok esetében az egyes vízszinteket egy kiválasztott referenciakút vízszintjéhez hasonlítjuk, illetve vizsgáljuk az attól történő esetleges eltéréseket. Így járunk el azoknál a mérési pontoknál is, ahol a Duna vízállásának hatása számottevő, azonban ez esetben az eljárás összetettebb. A források hozamalakulásával kapcsolatosan MÁDAI (1927) bizonyította a már néhány évszázaddal korábban felismert kapcsolatot a Duna vízállásával. Ennek jelentős hatása van a Duna-ártéri talajvízre, illetve a szökevényforrások szomszédságában lévő észlelési pontokra, többek között a Gellért-hegy forrásainál. A távolabb lévő források és fúrások vize kisebb amplitúdóval és nagyobb késleltetéssel reagál. A források hozama (így fakadási szintje is) a Duna vízállásának függvényében tág határok közt változik, de nem a folyóvíz bekeveredése, hanem a forrásjártokra gyakorolt hidrodinamikai nyomásváltozás hatására. A folyó magas vízállásakor a forrásokra ható nagyobb hidrosztatikus nyomás miatt kevesebb karsztvíz szökik a folyóba és a karsztvízszint a természetes utánpótlás következtében emelkedik (ALFÖLDI et al. 1968). Egy ilyen nagyfokú ingadozás miatt a határértékeknel tág elfogadási intervallumot lehetne csak meghatározni, amely viszont csak nagyon jelentős mesterséges behatások esetén tenné

lehetővé a riasztást, szűkebb intervallum esetén pedig a természetes vízjárás módosulása során is riasztást jelezne, ezáltal ezeknek a mérési pontoknak az idősorait érdemes mentesíteni a Duna hatásától (4. ábra).

Hangsúlyozzuk, hogy az egyes csoportokba talaj-, réteg- és karsztvízmegfigyelő kutak egyaránt tartozhatnak. Az egyik fő felszín alatti áramlási irány a Duna, mint erózióbázis, illetve megcsapolási szint felé történő szivárgás, a másik a Duna völgyére jellemzően É–D-i irányú.

A jó vízvezető képességű zónákon keresztül érvényesülő Duna-hatás, illetve É–D-i felszín alatti áramlás következtében, elsősorban a pesti oldalon meglévő földtani adottságok miatt, a legtöbb talajvízkútból azonos lefutású természetes vízjárás figyelhető meg, azonban ennek a természetes ingadozásnak a mértéke a meglévő idősoraink alapján nem számottevő, így nincs szükség arra, hogy ezekből az idősorokból kiszűrjük ezt a hatást (5. ábra).

Az egyes természetes behatásokra — a kőzettől, karsztosodottság mértékétől és a karsztvízszint mélységétől függően — a karsztvíz a legérzékenyebb. A nyílt tükrű karsztvíz a meteorológiai viszonyokra, a csapadékra elvileg nagyobb mértékben reagál, de olyan másodrendű tényezőkre is érzékenyebb, mint a légnyomás és a lunaszoláris hatás. A lunaszoláris hatásokra jelentkező kéregdeformáció okozta apály-dagály jelenség statisztikusan 6 órás periódusa miatt a vízszint adott mértékű lüktetést mutat. MAUCHA (1967) az aggteleki karsztterületen ~10 cm nagyságrendű napi ingadozást mért. Hasonló ritmus a monitoring egyes mérési pontjainál szintén megfigyelhető. A számítási modellt alkalmazó program beállítható úgy, hogy a lunaszoláris hatás okozta napi periodicitást kiszűrje.

A csapadék hatásának, pontosabban az időjárás és beszivárgási ritmus kiszűrésére az eddig megfigyelt idősorok alapján nincs szükség.

A fentiek szerint három eltérő riasztási módszert dol-

goztunk ki az egyes mérési pontokra, amelyek között a fő különbség azok vízjárásának kezelésében; a Duna vízállás, mint legjelentősebb természetes befolyásoló tényező hatásának kiszűrésében van.

A termelt hévízkutakban mért áramlásmérési eredményeket a számítási nem, csak a riasztási modell dolgozza fel, illetve vizsgálja azoknak mértékét a már ismertetett módon. Az alábbiakban a három fő csoportra alkalmazott számítási módszert és a hozzájuk tartozó riasztási struktúrát részletezzük.

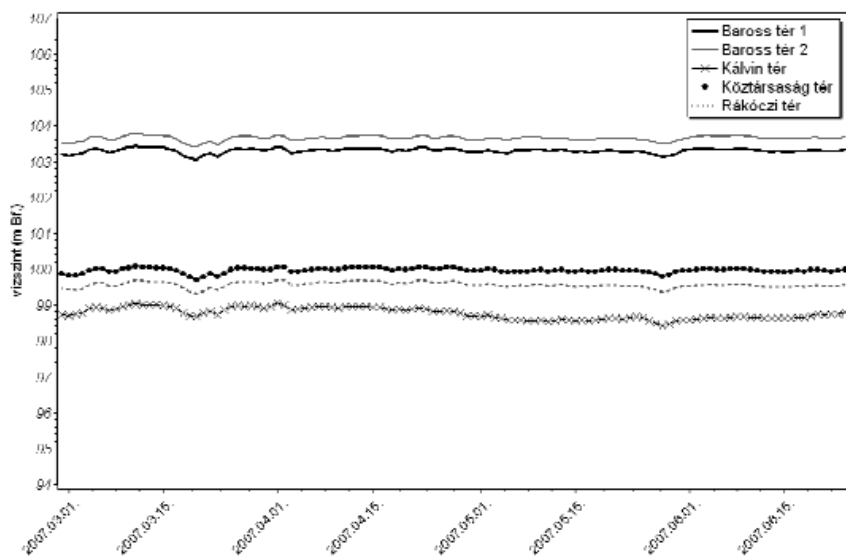
## Egyedi mérési pontok

Az ebbe a csoportba tartozó észlelési pontok idősora esetében nem figyelhető meg olyan vízszint, ill. vízhőmérséklet-ingadozás, amely egy másikéval szoros együttmozgást mutatna. Ezeket a mérési pontokat a riasztási rendszer önmagában vizsgálja. A Duna, illetve a hozzá köthető É–D-i irányú intenzív felszín alatti áramlás vagy nem érvényesül egyáltalán (távoli mélyebb rétegvíz), vagy érvényesül ugyan, de ez nem okoz jelentős vízszint, ill. vízhőmérséklet-ingadozást. A hőmérsékleti méréseknél néhány esetben összefüggés figyelhető meg a Duna vízállása és a víz hőmérséklete között, főleg a Duna kavicssteraszában lévő termálforrások hőmérséklete esetén (MÁDAI 1927). Hőmérsékletmérés elsősorban termálvíz-megfigyelő kutakban van, hiszen a termálvizek esetében szükséges a hőmérséklet nem kívánatos mesterséges hatáshoz köthető alakulását időben észlelni.

A nyílt karsztvíz esetében a víz hőmérsékletingása a külső hőmérséklettel, illetve a vízutánpótlás mértékével is arányba hozható. Egy-egy területen a hideg és a mélyből, a tektonikai vonalak mentén feltörő forró, vagy meleg vizek keveredve jelennek meg. Amennyiben a karsztvizet termelik, úgy a hő-

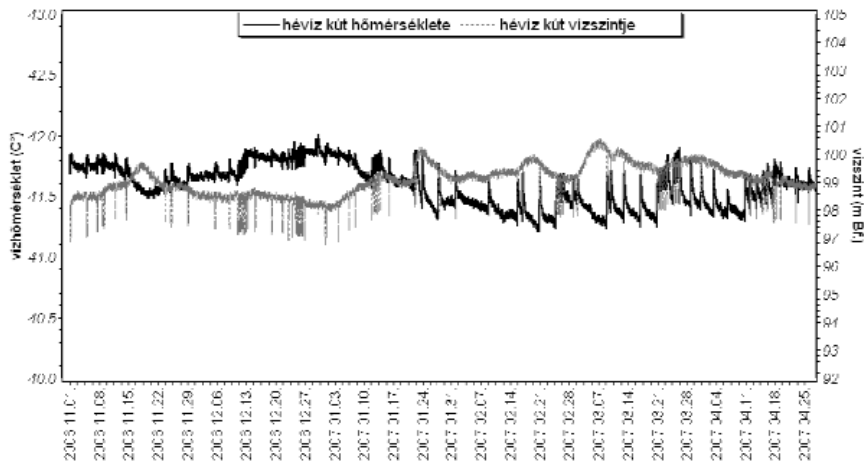
mérséklete az utánpótlódó víz hőmérséklete által befolyásolt. A vízutánpótlás mértéke függ a víztermeléstől (6. ábra), valamint függhet a Duna vízállásától is (a talajvízben közvetlen hozzákeveredéssel, a források esetében közvetett hidrodinamikai hatás alapján), ami viszont egyes kutakban meghatározhatja a hőmérséklet alakulását. Ezek a hatások láthatóak egyes hévíz mérési pontok hőmérsékleti idősorain (7. ábra).

Ha adott hőmérsékletű vizet intenzívebben termelnek, úgy az megváltoztathatja a hőmérsékleteloszlását, a vízutánpótlódás útját, így a konvekciós áramlásokat, amely a hőmérsékletekre és a vízszintekre áttételesen is hatással lehet. A szokásosnál nagyobb arányú vízkivétel okozhatja a hőmérséklet és ezáltal a



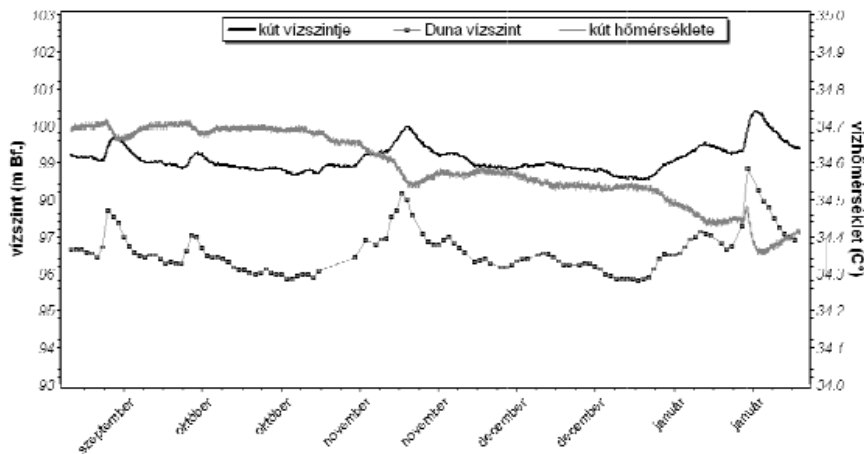
5. ábra. A pesti oldalon lévő talajvíz kutakban megfigyelhető természetes vízjárás (az idősorok regisztrált kutakhoz tartoznak, itt csak a helyszínt tüntettük fel)

Figure 5. The observable natural water level fluctuation at the groundwater measure points on the Pest side (the time series belong to registered wells, here we signed the locations only)



6. ábra. Termeltetés hatása a hőmérsékletre egy hévízkútban. A vizsgált vízszintváltozás irányát a hőmérséklet jól láthatóan ellentétes irányú változása követi

Figure 6. The effect of pumping on the temperature in a given thermal well. The fluctuation of water level is followed by opposite direction temperature changes



7. ábra. A Duna vízállásának hatása a hőmérsékletre egy termálvizfigyelő kútban

Figure 7. The influence of water level fluctuations of the river Danube on the temperature in a given thermal well

hidraulikus emelkedési magasságok, valamint a konvekciós áramlások valamekkora mértékű változását, melyet az abszolút vízszint- és hőmérsékletértékekre szabott határértékekkel lehet nyomon követni.

A Duna jobb partján egy szűk sávban a talajvizet a megcsapolódó hidegebb és melegebb karsztvizek, illetve a Duna rátápláló vízállása esetén a folyóból kiáramló (utánpótlódó) víz alkotja. A karszt hideg ágából kapja az utánpótlás zömét a folyó közepes, vagy nagyobb vízállása esetén és csak keveset a meleg karsztvízből. Alacsony vízálláskor valamivel megnő az alááramlásból származó meleg karsztvíz aránya (HORUSITZKY 1938).

A hévízforrások esetében a Duna hidrodinamikai hatása közvetve befolyásolja a hőmérsékleteket is. Magas vízálláskor a szökevényforrásokra ható nagyobb hidrosztatikus nyomás miatt kevesebb karsztvíz szökik a folyóba, ezért a többi forrás vízutánpótlása változik, így azok hőmérséklete is változhat. A riasztandók körébe azokat a hőmérséklet-mérési pontokat választottuk, amelyeknél az eddigi mérési

tapasztalataink alapján a Duna víz-állásváltozása nem (az adott kútban a mérési mélység változtatásával sem) okoz akkora hőmérsékletváltozást (7. ábra), hogy a Duna hatását érdemes legyen kiszűrni (vagyis jobb indikátorai a termálvíz rendszer esetleges változásainak).

E csoportba tartozó mérési pontok esetében alkalmazhatjuk az egymást követő értékek közötti változás nagyságának mérését, mint a riasztások alapját. Az előzetes koncepcióknak megfelelően riasztások a vízszint-, illetve hőmérsékletváltozások mértéke és abszolút nagysága alapján is szükséges, hogy történjenek, amennyiben azok az előre meghatározott mértéket, határértéket átlélik. Ennek megoldására kézenfekvő, hogy az idősor „görbe” meredekségét (m) kell mérni, melynek matematikai megoldását folytonos görbe esetén deriválással kaphatjuk meg, azaz a görbe idő szerinti elsőrendű differenciálhányadosát kell vennünk (1). Ezzel a módszerrel ugyanis megállapíthatjuk a görbe egy-egy szakaszában az emelkedés, ill. csökkenés mértékét.

$$m = \frac{dy}{dt}, \quad (1)$$

ahol  $y$  a mért érték.

A differenciálás megmutatja, hogy az abszcissa  $dt$  (idő) növekményére mekkora  $dy$  növekmény jut. Az emelkedés mértékszámát az adott szakaszhoz tartozó húr irányhatározója (BEKE 1967). Mivel azonban esetünkben nem folytonos görbéről, hanem diszkrét adatpontokból álló idősróról van szó, ezt a számítást leegyszerűsíthetjük a két egymást követő mért érték között a (2) számú arány számítására és alkalmazására.

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (2)$$

Ha a deriválás módszeréhez folyamodnánk, diszkrét adatsor esetén is, akkor először regresszióval görbét kellene előállítanunk, mely változó nagyságú hibával lenne képes követni a mért értékek alakulását, továbbá ennek végrehajtása a modellt alkalmazó informatikai rendszer számításgépi igényét is megnövelné. Felhasználva azt a tényt, hogy ekvidisztáns idősorunk van, vagyis minden újabb mérés között eltelt idő ugyanakkora, azaz egységnyi, a (3) egyenlőséghez jutunk.



$$\Delta t = 1 \text{ és } m = \Delta y \quad (3)$$

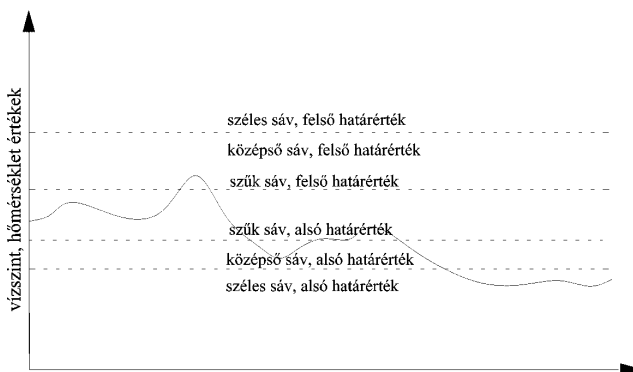
Vagyis így a két egymást követő mért érték közötti különbség számításához jutottunk. A különbség megengedett mértékét egy előre megadott határérték szabhatja meg amelynek túllépése elsőfokú riasztást generálhat. Mivel ez egyszeri pillanatszerű természetes hatások, hirtelen külső terhelésváltozások esetén is jelezne, ezért a gyakorlatban csak kiegészítő funkcióként, bizonyos esetekben érdemes alkalmazni.

A folyamatos és egyenletes ütemű mozgásokat szűkebb és tágabb alsó és felső abszolút vízszint (vagy hőmérséklet)-határértékek által meghatározott sávok használatával szűrhetjük ki. Amennyiben a mért értékek folyamatosan egy meghatározott időn túl az adott sávon kívül tartózkodnak, úgy első-, illetve másodfokú riasztás léphet érvénybe.

A 8. ábrán láthatóan a határértékek a következő sávokat jelölik ki:

- szűk sáv, meghatározott időn túli átlépése elsőfokú riasztást generál,
- középső sáv, meghatározott időn túli átlépése elsőfokú riasztást generál,
- széles sáv, meghatározott időn túli átlépése másodfokú riasztást generál.

A riasztások időkorlátai szükség esetén változtathatók. Mivel a széles sáv átlépése másodfokú riasztást generál, ahhoz, hogy az elsőfokú riasztás minden esetben



8. ábra. Az egyes határértékek által kijelölt sávok

Figure 8. The lanes appointed by certain end values

megelőzze a másodfokút, a középső és a széles sáv időkorlátainak meg kell egyeznie. Abban az esetben, amikor gyors hirtelen változás merőleges a sávokra — legtöbbször mérési hiba generálhat ilyen — az időkorlátok egyezése folytán az első és másodfokú riasztások egybeesnek. Mindazonáltal a szűk sáv időkorlátait érdemes tágabbra venni, mivel ezt a sávot akár a természetes vízjárás/hőmérsékletmozgás során is meghaladhatják a mért értékek. Ezáltal tendenciózus, kismértékű, viszonylag egyenletes ütemű egyirányú, mesterséges behatás által indukált módosulások is kimutathatók. Amennyiben a mért értékek a szűk sávon kívülre esnek, megkezdődik a sávon kívüli tartózkodás idejének számlálása. Ha például a mért értékek nagyobbak

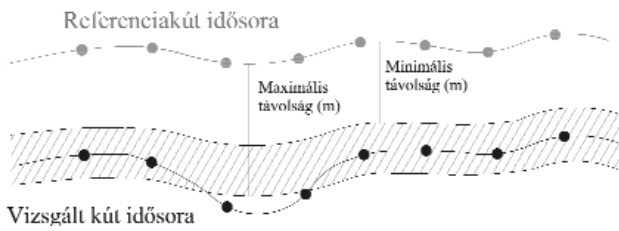
a szűk sáv felső határértékénél 13 órán keresztül, majd ezután a középső sáv felső határértékét is meghaladják 5 órán keresztül, ez azt jelenti, hogy a szűk sávon már 18 órája kívül esnek.

A periodicitást a periódusidő megfelelő meghatározásával szükség esetén az egyedi mérési pontok idősorából kiszűrhetjük. Ez szűkebb, így a mesterséges hatásokra érzékenyebb határértéksávok meghatározását teszi lehetővé. Ennek módszerét részletesen az idősorok felbontásának logikai sorrendje miatt egy későbbi, a Duna hatásának, trendjének kiszűrését bemutató fejezetben ismertetjük.

### Referenciacsoportba sorolható mérési pontok

A vízszint mérési pontok közül több esetben megfigyelhető a Duna hidrodinamikai, illetve a hozzá köthető É-D-i felszín alatti vízáramlás hatása. Vannak olyan kutak — elsősorban a pesti oldalon — amelyek természetes vízjárását egyértelműen ez a felszín alatti áramlás határozza meg, de ez a mozgás nem olyan nagymértékű, azaz az idősorokban nem figyelhető meg a Duna vízállásának egyértelmű hatása, mint a Duna-partmenti talaj- és karsztvíz megfigyelő kutak esetében (lásd 5. ábra). Az idősorok egymással szoros együttmozgást mutat, illetve referencia csoport(ok) különíthető(k) el. Az elkülönítés történhet statisztikai módszerekkel is. Ezeknél a mérési pontoknál az egyes vízszinteket egy előre kiválasztott referenciakút szintjéhez viszonyítjuk, illetve észleljük az attól való eltéréseket. A referenciakút és az egyes kutak abszolút vízszint értékei között — az együttmozgás miatt — nagyjából azonos a vertikális távolság. Meghatározunk egy minimális és egy maximális megengedett vertikális távolságot, amelyen belül a referenciakút és az adott mérési pont vízszintjei közötti távolság (különbség) változhat (9. ábra). Amennyiben ez a különbség egy bizonyos időkorláton túl meghaladja a megállapított minimum és maximum értékeket, úgy riasztás történik. A vertikális távolság mérésénél ekvidisztáns idősorokat vizsgálunk. Fontos megjegyezni, hogy az ilyen referencia kúthoz sorolható és azonos vízjárású kutak nem szükségszerűen egymás közelében helyezkednek el, hanem a pesti (és néhány a budai) oldalon, a 4-es metró vonalán található több állomásnál található, így vízjárásuk egy távoli referenciakúttal mutat szoros rokonságot, ezért megfelelően észlelhetjük a természetes vízjárástól eltérő mesterséges hatásokat. Szűkebb területen lévő mérési pontokat azért sem érdemes kizárólag egymáshoz viszonyítani, mivel egy esetleges mesterséges hatás ezek mindegyikét érintheti.

Túl azon, hogy egyszerű különbségszámítást végzünk egy adott mérési pont és egy referencia kút abszolút vízszintje között, amely bizonyos értéksáv tartós átlépése után szakértői riasztást generál, alsó és felső abszolút vízszint határértékeket is meghatározunk ezekre a mérési pontokra, lehetőleg azok egy évnél hosszabb idősora alapján, melyek esetükben is definiálhatunk szűkebb és tágabb sávokat (8. ábra).



9. ábra. A két kút közötti vízszintkülönbségek elfogadási tartománya (sávozott tartomány)

Figure 9. The acceptable range of the differences between two measure points (chased range)

Mivel a távolságsávokkal történő folyamatos észlelés megbízhatóan képes tájékoztatást adni az esetleges mesterséges hatásokról, így a gyakorlatban a periodicitás kiszűrését ennél a csoportnál nem alkalmazzuk.

### Mérési pontok, ahol a Duna hatását kiszűrjük

Ide tartoznak azoknak azoknak az észlelési pontoknak az idősorai, amelyekre a Duna vízállása jelentős befolyással bír, az idősoroknak elsőrendű trendjét ez határozza meg. Talaj- és termálvíz megfigyelő észlelési pontok (kutak, források) találhatóak ebben a csoportban. A mesterséges hatások észleléséhez esetükben is referencia mérési pontokat alkalmazunk, azonban végrehajtunk egy trendmentesítést is. A Duna hatásán kívüli vízjárás megfigyelése, a rendszeres vízkivétel vízszintre való közvetlen hatásának kimutatása miatt, valamint annak érdekében, hogy további számításokat tudjunk végezni, ennél a csoportnál folyamatos trendlevélt alkalmazunk.

Mivel a Duna vízállására az egyes források, kutak eltérő érzékenységgel reagálnak, így referenciacsoportok meghatározása és elkülönítése szükséges. A referencia mérési pontok megválasztásánál figyelembe kell venni, hogy az illető észlelési pont jól tükrözze a Duna vízállásának alakulását, nagy tározási képességű, lehetőleg jó vízáradó vízföldtani környezetben legyen, hogy az esetleges mesterséges hatások kevésbé, vagy csak rövid ideig befolyásolhassák a vízszintjét, valamint relatív távol essen a metróépítés mindenkor frontjától. Egyes talajvízkutak jól reprezentálják a Duna vízjárását, vízszintjük jóformán egy az egyben attól függ. Olyan referencia csoportokat, kútpárokat szükséges meghatározni, amelyek nagyjából azonos érzékenységgel reagálnak a Duna vízszintmozgásaira, illetve a köztük lévő nyomáskülönbség nagyjából állandó (ha az adott kútpár, kútcsoport referenciatagjának idősorát mégis befolyásolná mesterséges hatás, úgy az a hozzá tartozó kúthoz/kutakhoz kötődő riasztási jelzés(ek) során szintén idejében észlelhető lenne).

Figyelembe érdemes venni továbbá azt, hogy a különböző vízhőmérsékletű kutak nyugalmi vízszintje közvetlenül nem hasonlítható össze, a közel azonos vízhőmérsékletű kutaké azonban már igen (ALFÖLDI 1979), így lehetőség szerint törekedni kell arra, hogy nagyjából azonos hőmérséklettartományba eső észlelési pontok kerüljenek

egy referenciacsoportba. A vízszintidősorok Duna hatásától való mentesítésének elve a következő: regresszióval görbét illesztünk a referencia mérési pont idősorára adott hosszúságú, a legfrissebb értékek érkezéssel folyamatosan előrehaladó időablakokon belül, ezt az illesztett görbét rátoljuk (illesztjük) a hozzá tartozó észlelési pontok idősorára, melyből az illesztett görbét (adatsort) kivonjuk. Így megkapjuk az ún. trendmentes idősort, melynek értéke zérus, amennyiben az adott mérési pont időszora teljes mértékben a referencia mérési pont (illetve a Duna) vízmozgását követi. Általános esetben a trendmentes értékek zérus érték körül ingadoznak, pozitív és negatív előjelet nagyjából azonos mértékben vesznek föl. A referenciakút és egy adott mérési pont közötti statisztikai kapcsolatot az esetleges mesterséges és a természetes hatások eltérő mértékben, egymástól nehezen elkülöníthető módon befolyásolhatják, ezért grafikus illesztési módot választottunk.

A trendlevétel a következő elvet követi. A hidrológiai idősorok elemi idősorkomponensekből tehető össze. Ezen komponensek két nagy csoportja a determinisztikus és sztochasztikus rész. Determinisztikusnak szokás nevezni a trend és a periodikus összetevőt, míg a sztochasztikus összetevőt az autoregresszív és a véletlen tag, melyeket az alábbi általános alakban írhatunk fel (KONTUR et al. 1993, p. 144):

$$Y(t) = T(t) + P(t) + A(t) + V(t) \quad (4)$$

ahol  $Y(t)$  folytonos hidrológiai idősor,

$T(t)$  a trend,

$P(t)$  a periodikus,

$A(t)$  az autoregresszív,

$V(t)$  a véletlen összetevő.

A számítási rendszer a determinisztikus rész felbontásával foglalkozik. A periodikus rész több rendű lehet (éves szezonális hatás, lunaszoláris hatás), melyekkel a számítás szükség esetén kiegészíthető az adott észlelési pontra érvényes periódusidők megfelelő megválasztásával. A trend összetevő valós idejű kezelése a rendszer alapfunkciója.

A gyakorlati esetekben  $\Delta t$  mintavételezési idővel vett mintákkal dolgozunk, így például 5 perces mért, vagy órás medián értékekkel. A folytonos  $Y(t)$  idősorral szemben az  $Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_n$  sorozatot diszkrét idősoroknak nevezzük. A diszkrét idősor felbontása a következőképpen történhet (KONTUR et al. 1993, p. 144):

$$Y_i = T_i + P_i + A_i + V_i \quad (5)$$

ahol is  $T_i, P_i, A_i, V_i$  rendre a diszkrét idősorkomponensek: trend, periodikus, autoregresszív és véletlen összetevők.

Magasabbrendű, nemlineáris trendet alkalmazunk, hogy a Duna adott időablakokon belüli vízjárását megfelelően le tudjuk képezni. A polinomiális trendfüggvény rendje szükség szerint választható (akár hetedik fokú is lehet), tapasztalat azt mutatja, hogy egy napos időablakot választva ötödik fokú polinomiális függvény már a legtöbb esetben megfelelő pontosságú. Az illeszkedések jóságát a reziduális szórással, illetve a relatív hibával ellenőrizhetjük. Általában

10% alatti relatív hiba esetén jónak fogadjuk el a regressziós függvény illeszkedését.

Magasabbrendű nemlineáris trendek általános alakjai:

$$\left. \begin{aligned} T_i &= d_0 + d_1 i + d_2 i^2 \\ T_i &= d_0 + d_1 i + d_2 i^2 + d_3 i^3 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ahol  $d_0, d_1, d_2$  stb. a trendegyenletek paraméterei.

A trend komponens leválasztása az  $Y_i$  sorozatról (diszkrét idősről) a következő:

$$y_i = Y_i - T_i \quad (7)$$

Az így nyert  $y_i$  sorozatot trendmentes idősről nevezük, és az általános felírásnak megfelelően az  $y_i$  sorozat tartalmazza a periodikus, az autoregresszív és a véletlen részt is.

A periodikus összetevő a trigonometrikus függvények alapján a Fourier-sorfejtésnek megfelelően különböző  $\tau_j$  periódusidejű cosinus és sinus függvények összegeként állítható elő:

$$P_i = a_0 + \sum_{j=1}^n \left( a_j \cos \frac{2\pi}{\tau_j} i + b_j \sin \frac{2\pi}{\tau_j} i \right) \quad (8)$$

ahol  $\tau_j$  a jellemző periódusidők  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ , ami lehet éves (365), napon belüli (pl. 12) etc.

Az  $a_j$  és  $b_j$  együtthatók a Fourier-együtthatók ismert számítási képlete alapján adhatók meg:

$$\left. \begin{aligned} a_j &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N a_i \cos \frac{2\pi}{\tau_j} i \\ b_j &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y_i \sin \frac{2\pi}{\tau_j} i \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

A periodikus összetevőt is leválasztva kapjuk az idősről trend- és periódusmentes maradék tagját ( $p_i$ -t) (KONTUR et al. 1993, pp. 144–145):

$$p_i = Y_i - T_i - P_i \quad (10)$$

A trendkomponens — és szükség esetén a periodikus összetevő — leválasztásával a Duna vízmozgásától eltérést okozó mesterséges hatások ezáltal egyszerűen kiszűrhetők. A periodikus összetevőt a trendkomponens leválasztásának folyamata után vehetjük ki a maradék  $y_i$  idősről.

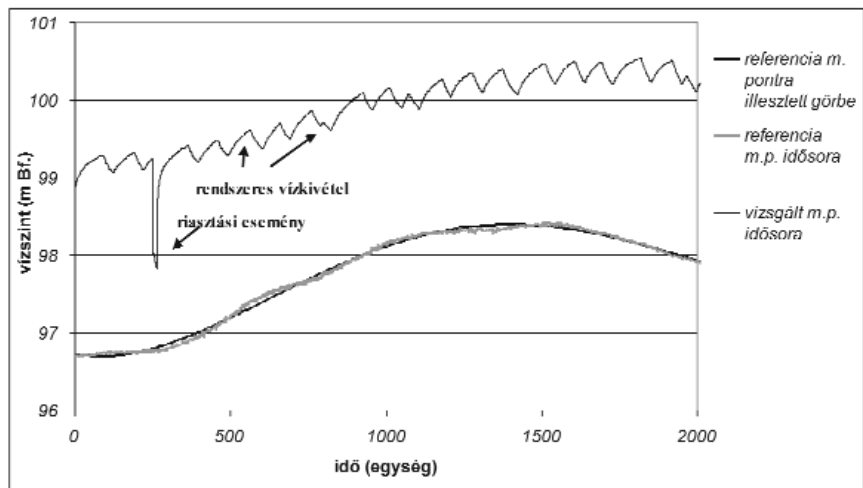
A trendlevétel folyamata több lépésből áll.

Az idősorok trendmentesítésének lépései a következők (időben folyamatosan előrehaladó adott időablakokon belül):

1. Polinomiális regresszióval illesztünk görbét az adott referencia mérési pont (m.p.) idősorára, vagyis állítunk elő regresszióval új „Duna-idősört” (10. ábra).

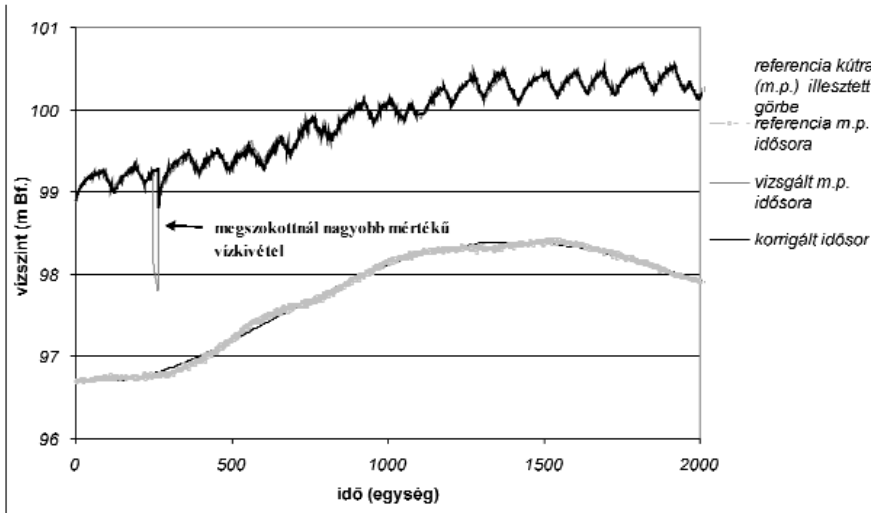
2. Számoljuk ki a referencia m.p. idősorára illesztett kontinuos görbéről megfelelő időpontokban leolvasott és a vizsgált kút (mérési pont) egyes vízszintértékei közötti vertikális különbségeket akkor, ha a különbség egy bizonyos előre meghatározott intervallumon belül marad, azért, hogy az esetleges mesterséges hatások ne maradhassanak benne, de például egyes kutakból történő rendszeres vízkivétel benne maradjon. A rendszeres vízkivételek között megjelenő ritkább és nagyobb mérvű vízkivételek az adott kútban lévő áramlásmérők mért értékeivel kiszűrhetők, ezért a sáv meghatározásánál mértéküket nem kell figyelembe venni (3. ábra). Megadunk tehát egy minimális és egy maximális megengedett vertikális távolságot a kutak vízszintértékei (az illesztett görbe adatai és mért értékek) közti különbségekre (a 9. ábrán bemutatotthoz hasonlóan). Ha egy adott különbség kívül esik a maximális és minimális távolságok által meghatározott intervallumon, akkor vegyük az ezt megelőző különbséget (amennyiben a különbségek tartósan kívül esnek az intervallumon, úgy arra az időszakra konstans idősort kapunk). Az intervallum alkalmazása a referenciacsoporton belüli kisebb késleltetéseket megfelelően tudja kezelni.

3. A referenciakút (mérési pont) polinomiális regresszióval előállított idősorának egyes értékeihez adjuk hozzá (vagy vonjuk le, megfelelő előjellel) az előbbi lépésben számolt megengedett különbségeket. Ezzel előállítottuk az adott mérési pont korrigált idősorát (11. ábra).



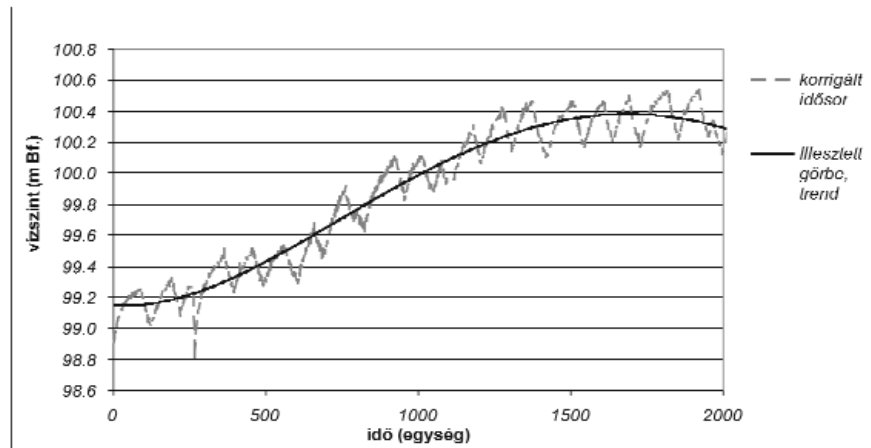
10. ábra. Első lépés: görbeillesztés a referencia m.p. idősorára polinomiális regresszióval (adott időablakban). A vizsgált m.p. idősorán látszik a rendszeres vízkivétel, melynek mértékét a trendlevételnél figyelembe vettünk. Az ábra csak illusztráció, itt egy ritkább és nagyobb mérvű vízkivételre keresztül mutatjuk be a módszer alkalmazhatóságát

Figure 10. First step: curve fitting on the time series of reference measure point with the help of polynomial regression (in a given time window). A usual pumping can be seen at the time series of the examined m.p., whose scale has been taken into account at trend-distraction. The figure is only an illustration, here we present the applicability of the method through a rare and high-scale pumping event



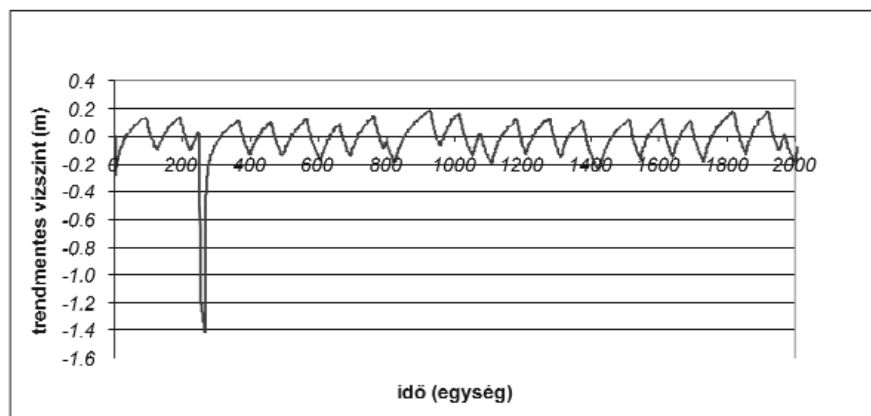
11. ábra. A vizsgált m.p. eredeti és korrigált időszora, melyet a referencia kút időszora ismeretében állíthatunk elő. Jól látható, hogy a mesterséges hatás a korrigált időszorban már nem szerepel

Figure 11. The original and corrected time series of the given m.p., which can be produced in the sight of the time series of a reference well. It can be seen that the artificial effect does not occur in the corrected time series



12. ábra. Negyedik lépés: A korrigált időszorra illesztett görbe, amely a vizsgált kútnak a Duna vízszintmozgását tükröző trendje. Amennyiben a rendszeres vízkivételnél nagyobb mérvű változás figyelhető meg, úgy a korrigált görbe az eredeti vízszintgörbétől eltér

Figure 12. Fourth step: fitted curve on the corrected time series, which is the trend representing the water fluctuations of River Danube. When there is a change of a higher scale than the usual pumping, the corrected curve diverges from the original one



13. ábra. A vizsgált mérési pont trendmentes vízszintértékei

Figure 13. Trend-free data of the given measure point

4. Mivel a korrigált időszor lefutása mesterséges hatások esetén meglehetősen „szaggatott” lehet, illetve a kontinuos görbe informatikailag egyszerűbben kezelhető, polinomiális regresszióval az első lépéshez hasonlóan állítsuk elő a vizsgált kút időszorának trendidőszorát (12. ábra).

5. Vonjuk ki az előző lépésben kapott trendidőszort a vizsgált mérési pont mért értékeiből (7. egyenlet). Ezzel előállítottuk a trendmentes időszort (13. ábra). Így minden egyes időablakra megkapjuk a legfrissebb mért adatokhoz tartozó trendmentes értéket, vagyis ezek sorozatából egy új időszort.

Ezt követően a trendmentes adatsor esetén a periódusidő megfelelő megválasztásával kiszűrhetünk megfigyelt periodicitás(oka)t, illetve tovább vizsgálhatjuk az egymást követő értékek közötti különbségeket.

A trendmentes (és szükség esetén periódusmentes) időszorok esetében kiszámolhatjuk az egyes értékek által alkotott görbe alatti területet százalékos arányát. Mivel a trendmentes értékek az eredeti értékek reziduuma, az  $x$  tengelyt több esetben metszik. A görbe alatti területek számítása (adott időablakon belül) esetén az integrálás módszerét hívhatjuk segítségül. Mivel azonban diszkrét adatsor rendelkezésünkre áll, így a görbe alatti terület számítása egyszerűsödik. Számoljuk ki minden  $n$ -dik és  $n-1$ -dik érték által meghatározott szakasz alatti területet, az alábbi esetekben:

Ha  $n \geq 0$  és  $n-1 \geq 0$ , vagy  $n \leq 0$  és  $n-1 \leq 0$ . Ellentétes előjelű, egymást követő értékek esetén terület nem számolható, ezért azt zérusnak vesszük.

Ha  $n(n-1)$  zérus és a  $n-1$  ( $n$ ) érték nagyobb, vagy kisebb, mint zérus, akkor háromszög területét kell kiszámolni. Ha mindkettő vagy pozitív, vagy negatív, akkor trapéz területet lehet számolni (14. ábra). Mind a háromszög, mind a

trapéz esetén a magasság egységnyi, az ekvidisztáns mérési idősor miatt.

$$\text{Trapéz területe: } \frac{(a + c) * m}{2}, \tag{11}$$

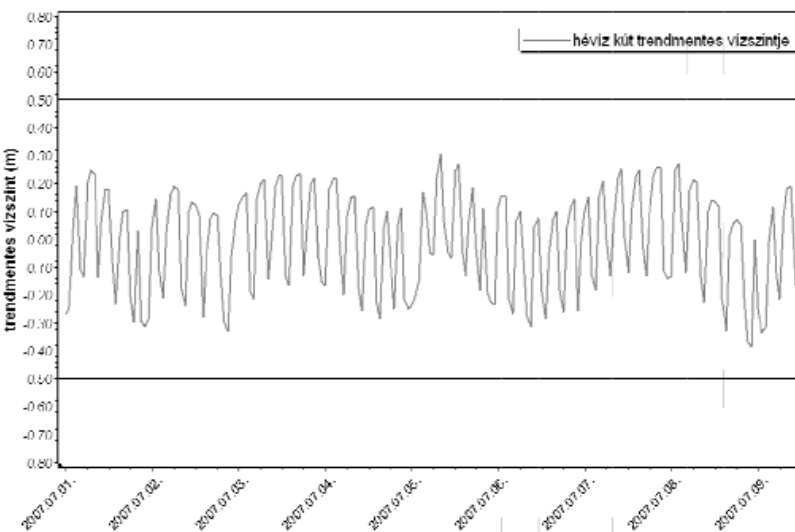
$$\text{háromszög területe: } \frac{a * m}{2},$$

ahol  $m = 1$ ,  $a$  és  $c$  az egymást követő  $n$ -dik és  $n-1$ -dik trendmentes értékek. Amennyiben mindkét érték zérus, úgy a terület is zérus.

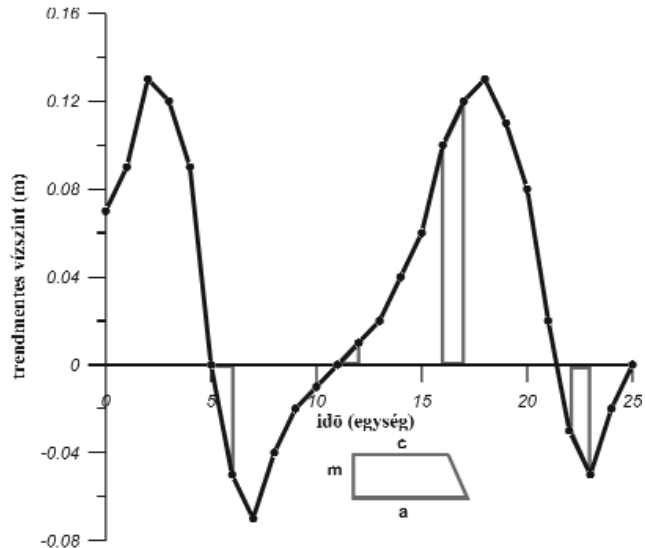
Ezután a pozitív és negatív kumulált területeket külön-külön összegezzük és vesszük az időablakon belüli összes területhez viszonyított arányukat, melyből megkapjuk, hogy egy adott időintervallumon belül — mondjuk 24 óra alatt — mekkora volt a pozitív területek, vagyis a vízszint-növekedés százalékos aránya csökkenéséhez képest.

Az az időablak, amelyben ezt a százalékos arányt számoljuk, újabb mérési adat érkezévével egy időegységnyit tolódik tovább, azaz 24 órás időablak esetén mindig a legfrissebb mérési adathoz képest visszafelé 24 órás időintervallumban kumuláljuk a különböző előjelű területeket és végezzük a százalékszámítást.

Fontos megjegyezni, hogy a százalékos arányok kiszámításával nem az egyenletes ütemben, folyamatosan végbenemő változásokat célnünk kimutatni. A százalékos arány alakulása képes a gyors lefutású, vagy változó ütemű mozgásokat is kiszűrni, azonban akkor ad kiegészítő jelzést, amikor trendmentes vízszint tartósan, illetve az esetek többségében a zérus érték alatt/fölött található, viszont a küszöbértékeket még nem haladta meg. Ez vagy a trendmentesítés (illetve a görbeillesztés) folyamatának beállítási, vagy a határértéksáv meghatározásának hibájára utal, de jelentheti a két mérési pont vízjárása között bekövetkezett tényleges, kismértékű módosulást is. Előre rögzített százalékos arányértéknek való nem megfelelés tehát elsőfokú riasztást generálhat.



15. ábra. Kijelölt elfogadási tartomány a trendmentes értékekre  
 Figure 15. Assigned acceptable range for trend-free values



14. ábra. Trapézok és háromszögek, melyek területét a diszkrét adatpontok határozzák meg

Figure 14. Trapezoids and triangles, whose area are defined by discrete data points

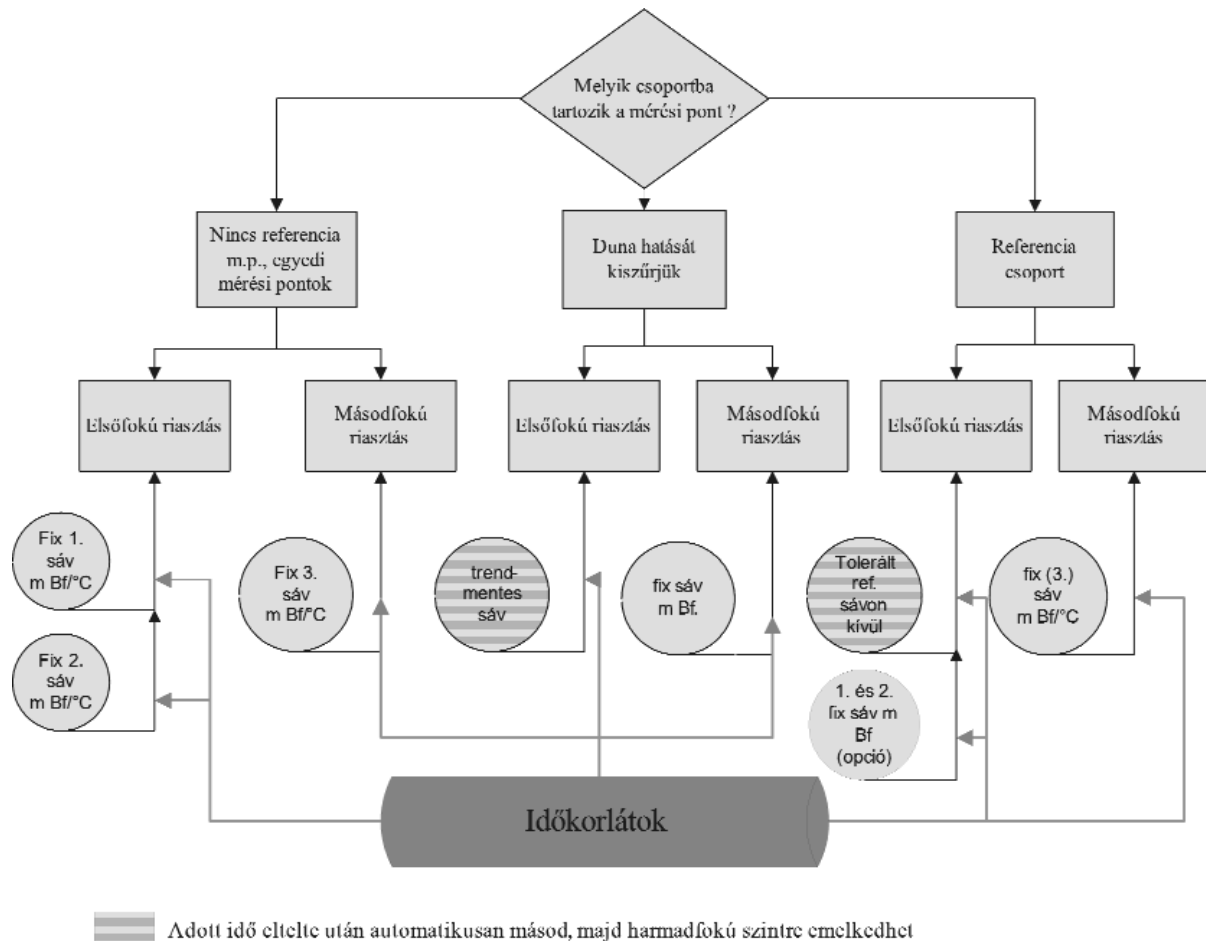
A trendlevétellel érintett kutak idősoraira ugyanakkor meghatároztunk abszolút vízszint (m Bf.) határértékeket, azonban a természetes vízjárás jelentősebb ingadozása folytán szűkebb határértékek csak időlegesen volnának megadhatóak, azokat sűrűn változtatni kellene, követvén az aktuális vízjárást, amely viszont nem tenné lehetővé a rendszer gördülékeny automatikus működését. Ezért az alsó és felső határértékek egy széles elfogadási sávot képeznek, amely meghatározott időn túli átlépése másodfokú riasztást generál.

Az egyes valós időben történő számítások eredményével létrejött trendmentes (és esetenként periódusmentes) idősorokra szintén egy alsó és felső határérték jelöl ki egy jóval szűkebb elfogadási sávot, amelynek bizonyos idejű átlépése először szakértői figyelmeztetéshez vezet (15. ábra), hogy a rendellenes viselkedésre felhívja az adott szakértői kör figyelmét. Az automatikus működés szükség esetén beállítható úgy, hogy elsőfokú jelzés után megfelelő idő elteltével magasabb riasztási szintre emelje az észlelt eseményt (amennyiben az észlelt változások azt kívánják, ez manuálisan is megtehető).

A folyamatosan frissülő időablakban számított pozitív és negatív területek százalékos arányának számítása kiegészítő funkció, amely tetszés szerint állítható be az egyes mérési pontoknál.

### Következtetések

Bemutattuk a riasztási modellt, illetve annak rendszertervét, amelyet a Mélyépterv–Mecsekérc–Soldata Konzorcium által üzemeltetett. A riasztási rendszer célja a vízföldtani környezetben tartós állapotváltozást okozó, esetleges



**16. ábra.** A riasztási szintek és a mért adatok, ill. számítási részeredmények kapcsolata, mely szükség esetén további kiegészítő jelzésekkel bővíthető. A harmadfokú riasztást szakértő adja ki, illetve az első-, majd másodfokú riasztási események további tartós fennállása esetén a rendszer automatikusan jelzi

**Figure 16.** The connection of alarm levels and measured values/calculated results, which can be extended with further accessory signals in case of need. The tertiary alarm signal can be given out manually by an expert, or can also be automatically initiated by the system whenever the timespan of events raised on primary and secondary level is non-tolerably permanent

mesterséges hatások megfelelő időben történő észlelése. Az automata adatgyűjtők által regisztrált újonnan érkező adatok egy adatbázisba kerülnek, melyhez a modellen alapuló programmodulok kapcsolódnak. A számítási egység folyamatosan és automatikusan dolgozza fel a legfrissebb adatokat. A számítási modell a mérési pontokat három csoportban kezeli, aszerint, hogy referencia csoportba sorolható-e az adott mérési pont, vagy szükséges-e kiszűrni a Duna hatását.

Az észlelési rendszer a riasztási modell alapján előre meghatározott és időszakonként felülvizsgált határértékek és időkorlátok túllépése esetén riasztásokat generál. A 16. ábrán látható, hogy különböző riasztási szintek kapcsolódnak az egyes részeredményekhez, illetve közvetlenül a mért adatok vizsgálatához. Az egyes riasztási szintek esetén az értesítendő kör és az intézkedési folyamat eltérő.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk PAP Zsuzsannának és JUHÁSZ Zsanettnek, a projektet koordináló Eurometro Projektvezetési és Tanácsadó Kft., illetve DBR Metró Projektigazgatóság munkatársainak, hogy hozzájárultak a tanulmány megjelentetéséhez. Köszönet illeti meg Stéphane SLUSAREKET, a Soldata SA. programozóját és fejlesztőmérnökét, aki a rendszer programozását végezte, illetve a Soldata Pannónia Kft. munkatársait az együttműködésért.

Köszönettel tartozunk BERTA Zsoltnak és ADAMIS Géának, hogy lehetővé tették a módszer kidolgozását és fejlesztését, valamint ERŐSS Anitának a hasznos észrevételekért.

A 3., 4., 5., 6., 7. és 15. ábrák a Geoscope Web internetes felületen (Soldata ©) készültek

## Irodalom — References

- ALFÖLDI L., BÉLTEKY L., BÖCKER T., HORVÁTH J., KESSLER H., KORIM K., ORAVECZ J. & SZALONTAY G. 1968: *Budapest hévizei*. – Vituki, Budapest, 365 p.
- ALFÖLDI L., ORAVECZ J., ORSOVAI I., MENSÁROS P. & HIDASI J. 1977: Földtani szakvélemény a budapesti METRO tervezett Dél-Buda-Rákospalota szakaszáról. – Kézirat, Magyar Állami Földtani, Bányászati és Geofizikai Adattár, Budapest.
- ALFÖLDI L. 1979: Budapesti hévizek. – *VITUKI Közlemények* **20**, 102 p.
- ALFÖLDI L. 1981: A budapesti geotermikus áramlási rendszer modellje. – *Hidrológiai Közöny* **1981/9**, 397–403.
- BEKE M. 1967: *Bevezetés a differenciál- és integrálszámításba*. – Gondolat Kiadó, Budapest, negyedik, átdolgozott kiadás, 214 p.
- FODOR L., MAGYARI Á., FOGARASI A. & PALOTÁS K. 1994: Tercier szerkezetfejlődés és késő paleogén üledékképződés a Budai-hegységben. A Budai-vonal új értelmezése. – *Földtani Közöny* **124/2**, 130–305.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979: *Groundwater*. – Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp. 230., 507–515., 602.
- HORUSITZKY H. 1938: Budapest Duna-jobbparti részének (Budának) hidrogeológiája. – *Hidrológiai Közöny* **18**, 1–404.
- HORVÁTH T. 2000: Budapest 4. sz. metróvonal I. szakasz, Összefoglaló geotechnikai, mérnökgeológiai és hidrogeológiai jelentés (Össz. hidr. jel.). – Geovil Kft., Budapest.
- HORVÁTH T. 2002: *Dél-Buda-Rákospalota 4 metróvonal I. szakasz, Előzetes környezeti hatástanulmány, 7. szakági melléklet*. – Mélyépterv Kultúrmérnöki Kft., Budapest.
- JAMBRİK, R. J. 1995: Analysis of Water Level and Land Subsidence Data from Thorez Open-Pit Mine, Hungary. – *Mine Water Environ, Wollongong* **14/1–4**, pp.13–22.
- KONTUR I., KORIS K. & WINTER J. 1993: *Hidrológiai számítások*. – Akadémiai Kiadó, Budapest, 144–169., 567 p.
- KOVÁCS J. & MÜLLER P. 1980: A Budai-hegység hévizes tevékenységének kialakulása és nyomai. – *Karszt és Barlang* **1980/II.**, 6 p.
- LORBERER Á. et al. 2001: *Közreműködés a DBR Metró I. szakasz karsztvíz-monitoring rendszerének megtervezésében*. – VITUKI Kht. Hidrológiai Intézet kutatási jelentése, 11 p.
- LORBERER Á. 2002: Budapest hévizei mérnökgeológiai szemmel. – „Alagút- és Mélyépítési Napok”, Eger, konferencia-kiadvány, 8 p.
- MAUCHA L. 1967: A karsztvízszint árapály jelenségének a kimutatása. – *Bányászati Kutató Intézet Közleményei*, **11/1–2**, 87–92.
- MÁDAI L. 1927: *A Császár fürdő monográfiája*. – Budapest, Pátria Kiadó, 92 p.
- MÁDLNÉ SZŐNYI J. 1997: Vízartó rendszerek sérülékenységi vizsgálata a dunántúli-középhegységi főkarsztvíz tároló rendszer (DNY-i rész) példáján. – *Földtani Közöny* **127/1–2**, 19–83.
- MINDSZENTY A. & MÁDLNÉ SZŐNYI J. 1999: *A rózsadombi termálkarszt monitoring működtetése, Zárójelentés I–II. rész*. – ELTE TTK Alkalmazott és Környezetföldtani Tanszék, Budapest.
- PRÓNAY Zs., TÖRÖS E. & HERMANN L. 2000: Szeizmikus mérések a tervezett 4. sz. metróvonal Duna alatti átvezetéséhez. – *Földtani Kutatás* **37/2**, pp. 19–24.
- RAINCSÁKNÉ KOSÁRY Zs. 2000: A budapesti 4.sz. metróvonal és környezetének földtani viszonyai. – *Földtani Kutatás* **37/2**, 4–19.
- SÁRVÁRY I. 1972: A budapesti hévizek védőterületéről. – *Vízügyi Közlemények* **1972/3**, 9 p.
- SÁRVÁRY I. 1995: A budapesti termálkarszt kitermelhető vízkészleteinek felülvizsgálata. – *Hidrológiai Közöny* **1995/2**, 5 p.
- SCHAFARZIK F. 1928: Budapest székesfőváros ásványvízforrásainak geológiai jellemzése és grafikus feltüntetése. – *Hidrológiai Közöny* **4–6.** kötet.
- SCHAFARZIK F. & VENDL A. 1929: *Geológiai kirándulások Budapest környékén*. – Stadium, Budapest, 341 p.
- SZABÓ J. 1857: A Budai meleg források földtani viszonyairól. – *Term. Tud. Társ. Évkönyvei III. kötet.*, Budapest.
- TERZAGHI K. 1925: Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage [Geological engineering based on soil-mechanical principles] – Franz Deuticke, Vienna.
- VENDEL M. & KISHÁZI P. 1964: Összefüggések melegforrások és karsztvizek között a Dunántúli-középhegységben megfigyelt viszonyok alapján. – *MTA Műszaki Tudományok Közleményei* **32/1–4**, 393–417. és **33/1–4**, 205–233.
- WEIN Gy. 1977: *A Budai-hegység tektonikája*. – MÁFI Alk. Kiadvány, Budapest, 76 p.
- ZSIGMONDY V. 1878: *A városligeti artézi kút Budapesten*. – A szerző kiadása, Budapest, 86 p.

Kézirat beérkezett: 2007. 10. 24.