

# HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY



A MAGYAR HIDROLÓGIAI TÁRSASÁG LAPJA • 100. ÉVF. 4. SZÁM • 2020  
HUNGARIAN JOURNAL OF HYDROLOGY • VOL 100. NO 4. • 2020





## Hidrológiai Közlöny

A Magyar Hidrológiai Társaság lapja  
Megjelenik háromhavonként

### Főszerkesztő

Fehér János

### Szakszerkesztők

Ács Éva  
Konecsny Károly  
Nagy László

### Olvasószerkesztő

Szlávik Lajos

### Szerkesztőbizottság elnöke

Szöllősi-Nagy András

### Szerkesztőbizottság tagjai

Ács Éva, Bakonyi Péter, Baranyai Gábor, Baross Károly, Bíró Péter, Bíró Tibor, Bogárdi János, Bozán Csaba, Csörnyei Géza, Engi Zsuzsanna, Fehér János, Fejér László, Gayer József, Hajnal Géza, Honti Márk, Ijjas István, Józsa János, Kerekesné Steindl Zsuzsanna, Kling Zoltán, Konecsny Károly, Koris Kálmán, Kovács Sándor, Kuti László, Licskó István, Major Veronika, Melicz Zoltán, Nagy László, Rákosi Judit, Rátky István, Román Pál, Szilágyi Ferenc, Szlávik Lajos, Szűcs Péter, Tamás János, Ungvári Gábor

### Kiadó

Magyar Hidrológiai Társaság  
1091 Budapest, Üllői út 25. IV. em.  
Tel: +36-(1)-201-7655  
Fax: +36-(1)-202-7244  
Email: titkarsag@hidrologia.hu  
Honlap: www.hidrologia.hu  
A Kiadó képviselője: Szlávik Lajos, a Magyar Hidrológiai Társaság elnöke

### Hirdetés

Magyar Hidrológiai Társaság Titkarsága  
1091 Budapest, Üllői út 25. IV. em.  
Telefon: (1)-201-7655 Fax: (1)-202-7244  
Email: titkarsag@hidrologia.hu

### Indexelik

Appl. Mech.; Rew. Chem.; Abstr.  
Fluidex; Geotechn. Abstr.; Meteor /  
Geostrophys. Abstr. Sei.; Water Res.  
Abstr.

Index: 25374  
HU ISSN 0018-1323

## Tartalomjegyzék

Fehér János: Előszó .....	3
<b>SZAKCIKKEK</b>	
Szlávik Lajos: Víztisztítási kárelhárítási munkák a 2010. októberi vörösiszap-katasztrófa következményeinek elhárítására .....	5
Nagy László: A tarpai gátszakadások geotechnikai tapasztalatai .....	21
Kozák Péter: Gondolatok a síkvidéki vízgyűjtők összegyűjtéséről I. Belvízelvezetési elméletek fejlődése a gyakorlati tapasztalatok tükrében .....	31
Szabó Zsóka, Tahy Ágnes és Mádlné Szőnyi Judit: A célzott felszín alatti vízutánpótlás nemzetközi trendjei és hazai alkalmazási lehetőségei .....	40
Rácz Tibor: A mintavétel és az adatfeldolgozás szerepe a csapadékmaximum függvények megbízhatóságában és összehasonlíthatóságában .....	52
Fekete Árpád és Keve Gábor: A csapadékösszegek és az aszályos időszakok vizsgálata Markov-láncokkal .....	60
Rátky István: Egydimenziós nempermanens számítások szükséges minimális folyóhossz közelítő meghatározása 1. rész: A feladat és annak elméleti megoldási lehetősége ....	70
Tamás János, Harald Schönberger, Carsten Meyer, Peter Baumann, Werner Maier, Ányos József, Szabó Istvánné, Bakondi Patrik, Murányiné Krempels Gabriella, Magyar Tamás: A magyarországi és németországi kommunális szennyvíztisztító telepek energiahatékonyságának összehasonlítása .....	78
<b>NEKROLÓG</b>	
Dr. Rákóczi László – Baranya Sándor megemlékezése .....	85



## Hungarian Journal of Hydrology

Journal of the Hungarian Hydrological Society  
Published quarterly

### Editor-in-Chief

János FEHÉR

### Assistant Editors

Éva ÁCS

Károly KONECSNYI

László NAGY

### Copy Editor

Lajos SZLÁVIK

### Editorial Board Chairman

András SZÖLLŐSI-NAGY

### Editorial Board Members

Éva ÁCS, Péter BAKONYI, Gábor BARANYAI, Károly BAROSS, Péter BÍRÓ, Tibor BÍRÓ, János BOGÁRDI, Csaba BOZÁN, Géza CSÖRNYEI, Zsuzsanna ENGI, János FEHÉR, László FEJÉR, József GAYER, Géza HAJNAL, Márk HONTI, István IJJAS, János JÓZSA, Zsuzsanna KERESKÉSNÉ STEINDL, Zoltán KLING, Károly KONECSNYI, Kálmán KORIS, Sándor KOVÁCS, László KUTI, István LICSKÓ, Veronika MAJOR, Zoltán MELICZ, László NAGY, Judit RÁKOSI, István RÁTKY, Pál ROMÁN, Ferenc SZILÁGYI, Lajos SZLÁVIK, Péter SZÜCS, János TAMÁS, Gábor UNGVÁRI

### Publisher

Hungarian Hydrological Society

H-1091 Budapest, Üllői út 25., Hungary

Phone: +36-(1)-201-7655; Fax: +36-(1)-202-7244;

Email: titkarsag@hidrologia.hu

Web: www.hidrologia.hu

Represented by: Lajos SZLÁVIK, President of the Hungarian Hydrological Society

Email: titkarsag@hidrologia.hu

### Advertising

Secretariat of the Hungarian Hydrological Society

H-1091 Budapest, Üllői út 25., Hungary

Phone: +36-(1)-201-7655; Fax: +36-(1)-202-7244

Email: titkarsag@hidrologia.hu

### Indexed in

Appl. Mech.; Rew. Chem.; Abstr. Fluidex.; Geotechn. Abstr.; Meteor / Geostrophys. Abstr. Sei.; Water Res. Abstr.

Index: 25374

HU ISSN 0018-1323

## Contents

János FEHÉR: Foreword ..... 3

### SCIENTIFIC PAPERS

Lajos SZLÁVIK: Water quality remediation works to deal with the consequences of the October 2010 red mud disaster ..... 5

László NAGY: Geotechnical experience of the Tarpa dike failures... 12

Péter KOZÁK: Thoughts on run-off processes of lowland river basins I. - Development of excess surface water drainage theories in the light of practical experiences ..... 31

Zsóka SZABÓ, Ágnes TAHY, Judit MÁDLNÉ SZŐNYI: Managed Aquifer Recharge – State of the art, needs and possibilities in Hungary ..... 40

Tibor RÁCZ: Role of sampling and data processing methods in trustiness and inter-comparability ..... 52

Árpád FEKETE and Gábor KEVE: Markov chain analysis of rainfall sums and the periods of drought ..... 60

István RÁTKY: Approximate determination of the minimum river length required for one-dimensional unsteady flow calculation. Part 1: The problem and its theoretical possible solution ..... 70

János TAMÁS, Harald SCHÖNBERGER, Carsten MEYER, Peter BAUMANN, Werner MAIER, József ÁNYOS, Istvánné SZABÓ, Patrik BAKONDI, Gabriella MURÁNYINÉ KREMPELS, Tamás MAGYAR: Comparison of energy efficiency of municipal wastewater treatment plants in Hungary and Germany ..... 78

### OBITUARY

Dr. László RÁKÓCZI – Commemoration by Sándor BARANYA .. 85

## Előszó



A 2016 óta negyedévenként megjelenő *Hidrológiai Közöny* ez évi negyedik számával teljes lett a folyóirat első 100 éves története. Írom, hogy első, mert hiszem és bízom benne, hogy lesz további története a lapnak.

Az 1921. évi első évfolyam éves kötete óta – amely a tragikus Trianont követő társadalmi sokk és gazdasági nehézségek miatt csak 1928-ban jelent meg nyomtatásban, együtt az ugyancsak abban az évben megjelent további 5 év (1922-26) egy-egy éves kötetével – a *Hidrológiai Közöny* összesen 562 kiadványban jelent meg eddig.

A kiadványok 1921 és 1946 között éves kötetek formájában jelentek meg. Az ezt követő évtizedekben váltakozó gyakorisággal, eleinte négyhavonta, majd hosszabb-rövidebb ideig havonta, majd kéthavonta, illetve a legutolsó öt évben negyedévente jelentek meg a lapszámok. A mostani lapszám borítóján a 100 év alatt megjelent kiadványok jellegzetes megjelenési formáival is szemléltetjük a folyóirat egyes korszakait. Felbecsülhetetlen értéket képviselnek a 100 év alatt az 562 kiadványban megjelent szakmai és egyéb cikkek, amelyek ráadásul szabadon hozzáférhetők a lapot kiadó Magyar Hidrológiai Társaság internetes honlapján keresztül.

A lap szerkesztőbizottsága azt tervezte, hogy ez év őszén ünnepi konferencia keretében emlékezünk meg folyóiratunk 100 éves évfordulójáról. Sajnos az év elején ránk tört koronavírus járvány és annak visszaszorítására márciusban bevezetett korlátozások miatt idén nem kerülhetett sor az évfordulás megemlékezésére. Terveink szerint 2021-ben – a járványveszély elmúltát követően – megtartanánk e kiemelkedő évforduló megünneplését.

A mostani 4. számban nyolc szakmai cikket jelentetünk meg. A cikkek széles szakmai spektrumot ölelnek fel a vörösiszap tározók, illetve az árvédelmi töltések tönkremenetelének vizsgálatától a felszíni és felszínalatti vízkészletgazdálkodási kérdéseken, valamint hidrológiai és hidraulikai elemzéseken keresztül a szennyvíztisztítók energiahatékonysági összehasonlító elemzéséig.

Az első cikkben *Szlávik Lajos* részletesen bemutatja a 10 éve, 2010. október 4-én a MAL Zrt. kolontári vörösiszap zagyatározó gátja átszakadásának katasztrofális következményeit és a következmények elhárítására tett intézkedéseket. Sok fényképpel, ábrával, táblázattal illusztrálja, hogy a három területileg érintett környezetvédelmi és vízügyi igazgatóság az elrendelt III. fokú vízminőségvédelmi készülség során milyen sokrétű és sok esetben egyedi vízminőségvédelmi beavatkozásokat alkalmaztak, valamint a közvetlen veszély elmúltával milyen rehabilitálási munkákat végeztek el a szennyezéssel érintett területeken és a vízfolyásokon.

A közel 20 évvel ezelőtt a Felső-Tisza vidékét ért rendkívüli árhullám következtében történt tarpai gátszakadások geotechnikai tapasztalatait tárgyalja *Nagy László* a má-

sodik cikkben. Bár a gátszakadások két évtizede történtek, a cikk értéke, hogy az elmúlt időszak új tudományos eredményeinek tükrében elemzi a gátszakadásokat, és összegzi a tapasztalatokat annak a kérdésnek a megválaszolásához, hogy milyen mértékben bízhatunk meg az öreg árvízvédelmi gátak biztonságában.

Magyarország természeti adottságai miatt fontos a síkvidéki összegyülekezés folyamatának minél pontosabb ismerete. *Kozák Péter* kétrészesre tervezett cikkének első részében a belvízelvezetési megoldások elméleti fejlődését tekintti át a gyakorlati szakember tapasztalatain keresztül. Megállapítja, hogy a belvizek jövőbeni hatékony kezelésének érdekében nélkülözhetetlen, hogy a belvíz keletkezésének, mint a síkvidéki összegyülekezési folyamatok különleges fajtájának leíró elméleti háttere felülvizsgálat alá kerüljön és továbbfejlesztésének munkálatai elinduljanak.

A klímaváltozás hidrológiai folyamatokra gyakorolt hatása, valamint a társadalmi és természeti vízigények fenntartható kielégítése miatt a felszín alatti vízkészletekbe történő vízpótlás egyre fontosabb vízgazdálkodási feladat. *Szabó Zsóka és társai* cikkükben áttekintik a célzott felszín alatti vízpótlási módszercsalád elemeit, a módszerek nemzetközi trendjeit, és hazai alkalmazásaik lehetőségeit. A szakirodalmi áttekintésen alapuló elemző cikk következtetése, hogy „a célzott felszín alatti vízutánpótlás a víz kártékony hatásai ellen való védekezéshez, illetve a szezonális vízhiány csökkentéséhez egyaránt segítséget nyújthat”. A tanulmány megállapítja, hogy a hazai alkalmazás szélesebb elterjedéséhez „kormányzati megértésre, elfogadásra és támogatásra van szükség, továbbá elengedhetetlen a különböző szakterületek (hidrogeológia, mérnöki tervezés, ökológia, mikrobiológia, kémia, társadalom- és gazdaságtudományok) együttműködése, valamint az egyetemek, kutatóintézetek, vízügyi igazgatás, vízügyi cégek, kivitelezők közötti kapcsolatok erősítése”. Reméljük, hogy a cikk megjelentetésével elősegítjük a szükséges intézkedések megtételét és az együttműködési folyamat elindulását.

Rác Tibor cikkének alap gondolata: „A globális felmelegedés és a klímaváltozás kapcsán sokszor elhangzik, hogy a csapadékok intenzívebbé váltak már napjainkra is, és a helyzet további kedvezőtlen alakulása várható. A kijelentés csak akkor értelmezhető, ha a korábbi adatok alapján megbízható csapadékmaximum (Intensity-Duration-Frequency IDF) görbéket tudunk felmutatni, amelyekhez képest a változás szembeötlő, kimutatható.” A Szerző a cikkben részletesen tárgyalja a mintavétel és adatfeldolgozás szerepét a csapadékmaximum függvények megbízhatósága és összehasonlíthatósága tekintetében. Megállapítja: „Ahhoz, hogy a csapadékinintenzitások valós változása (vagy nem változása) kiderüljön, a korábbi csapadékatatok szisztematikus felülvizsgálata, és az azokon alapuló csapadékfüggvények, IDF görbék újra generálása szükséges. Enélkül a csapadékinintenzitások változásáról nincs mód határozott, tudományos megalapozottságú állítást tenni, és így csak vélelmekre alapozzuk a jövő vízgazdálkodási feladatait.”

Szintén a csapadékadatok vizsgálatával foglalkozik a *Fekete Árpád és Keve Gábor* szerzőpáros. Markov-láncok alkalmazásával vizsgálták a Baja térségében az utóbbi 30 évben leesett éves csapadékösszegeket, és a vegetációs időszakhoz tartozó hat hónap csapadékviszonyait SPI6 csapadékindex alapján. Az éves csapadékösszegek alapján kategorizálták az egyes éveket csapadékosság szempontjából, és meghatározták milyen valószínűséggel esnek az évek az egyes csapadékossági kategóriákba. A mezőgazdaság számára fontos a vegetációs időszakban hullott csapadék vizsgálata, ezért az SPI6 csapadékindex alapján is osztályokba sorolták az egyes éveket és becslést adtak az egyes kategóriák valószínűségeiről a jövőre vonatkozóan. Markov-láncok segítségével meghatározták, hogy hosszú távon a vegetációs időszakban mennyi a valószínűsége, hogy egy nap aszályos-e, és ezzel gyakorlati eszközt lehet adni a gazdálkodók részére a csapadékmentes napok száma, illetve az aszályos időszakba eső napok valószínűségének kiszámítására.

A szabadfelszínű, fokozatosan változó 1D nempermanens vízmozgás számítása során az alsó határfeltétel pontatlansága folyásirányba felfelé terjedve, egyre hosszabb folyószakaszon hibás számítási értékeket eredményezhet. *Rátky István* kétrészes cikket készített egydimenziós nempermanens számításához szükséges minimális folyóhossz közelítő meghatározására, a hiba minimalizálása érdekében. A most megjelent első részben a probléma elméleti megoldási lehetőségeit tárgyalja.

*Tamás János és társai* vizsgálatot végeztek három kiválasztott magyarországi kommunális szennyvíztisztító telep jelenlegi energetikai helyzetéről. Az energetikai ellenőrzésből számított mutatókat összehasonlították a németországi (Baden-Württemberg tartomány) szennyvíztisztító telepek referencia-értékeivel, amelynek során a telepek teljesítményét statisztikailag (alul- illetve felül- teljesítési gyakoriság) is értékelték. A vizsgálatokból származó elsődleges következtetés: „a kiválasztott három magyar szennyvíztisztító telep adatainak kiértékelése jól mutatja, hogy a debreceni- és a nyíregyházi szennyvíztisztító telep viszonylag csekély fajlagos villamosenergia-fogyasztással bír.”

Sajnos ismét eltávozott a magyar vízügyi szakma egy nemzetközi hírű kimagasló tudósa, tanára. Életének 92.

évében elhunyt *dr. Rákóczi László* okleveles mérnök (BME 1952), egyetemi doktor (ÉKME 1966), a műszaki tudomány kandidátusa (MTA 1981), címzetes egyetemi docens (ELTE 1989), címzetes egyetemi tanár (BME 2011). *Dr. Baranya Sándor* egyetemi docens, a BME Víz-építési és Vízgazdálkodási Tanszék vezetője írt személyes hangvételű megemlékezést Laci bácsiról – mert hosszú életének utolsó évtizedeiben szinte mindenki így szólította – bemutatva szakmai életútját, kiemelkedő szakmai eredményeit. Szakmai-tudományos eredményei a hazai és a nemzetközi hordalékkutatás területén meghatározók, egyúttal jövőbeli kutatások alapjául szolgálnak. Emlékét megőrizzük!

\* \* \*

A Hidrológiai Közlöny szerkesztősége nevében őszinte köszönetemet fejezem ki a 2016-2020-ban közölt, illetve közlésre benyújtott tanulmányok lektorainak, akik bírálati munkájukkal jelentősen hozzájárultak a lap szakmai színvonalához, segítették a szerzőket kézírataik javításában:

dr. Ács Éva, dr. Ákoshegyi György, dr. Bakonyi Péter, Balogh Péter, dr. Baranya Sándor, Baross Károly, dr. Bender Tamás, Berke Barnabás, dr. Bíró Péter, dr. Bíró Tibor, Bodor Petra, dr. Bogárdi János, Bozán Csaba, Budayné Bódi Erika, dr. Engi Zsuzsanna, Csörnyei Géza, dr. Fekete Balázs, Fleit Gábor, dr. Gáspár Csaba, dr. Gayer József, Göncz Benedek, dr. Hajnal Géza, Horkai András, Láng István, Ifj. Lorberer Árpád, dr. Ijjas István, dr. Istvánovics Vera, dr. Kerekesné Steindl Zsuzsanna, dr. Keve Gábor, Kisházi Péter, dr. Kiss Keve Tihamér, dr. Konecsny Károly, dr. Koris Kálmán, Kovács Péter, dr. Kovács Sándor, dr. Kuti László, dr. Licskó István, Lovas Attila, dr. Major Veronika, dr. Melicz Zoltán, dr. Nagy Attila, dr. Nagy László, Pataki Beáta, dr. Rákosi Judit, dr. Rajkai Kálmán, dr. Rátky István, dr. Riczu Péter, Ritvayné Szomolányi Mária, Román Pál, Simonffy Zoltán, Sólyom Péter, dr. Somlyódy László, Szabó János Adolf, dr. Székely Ferenc, dr. Szilágyi Ferenc, dr. Szlávik Lajos, dr. Szolgay János, dr. Szűcs Péter, dr. Tamás János, dr. Torma Péter, dr. Vekerdy Zoltán, dr. Völgyesi Lajos, Zsugyel Márton.

*Dr. Fehér János*  
címzetes egyetemi tanár  
a Hidrológiai Közlöny főszerkesztője

## Vízminőségi kárelhárítási munkák a 2010. októberi vörösiszap-katasztrófa következményeinek elhárítására

Szlávik Lajos

Professor Emeritus, egyetemi magántanár, a Magyar Hidrológiai Társaság elnöke

### Kivonat

2010. október 4-én 12:10-kor a Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Zrt. (MAL Zrt.) ajkai timföldgyárának kolontári X. vörösiszap-tározójánál átszakadt a gát. A vörösiszappal szennyezett víz azonnal elöntötte Kolontár települést, majd pedig az elöntés érintette Devecsert, Somlóvásárhelyt, Somlójenőt, Tüskevárt, Apácatornát és Kisberzsenyt. A Torna patakon levonuló vörösiszap-árhullám elérte és szennyezte a Marcalt, majd a továbbiakban a Rábát és a Mosoni-Dunát.

A szennyezéssel érintett három környezetvédelmi és vízügyi igazgatóság III. fokú vízminőségvédelmi készséget rendelt el. Ennek során sokrétű műszaki beavatkozásokra került sor. Széles körű megfigyeléseket, méréseket végeztek (vízállás észlelések, vízhozam és vízminőség mérések, üledék-mintavételek, iszapvizsgálatok történtek). Távjelző vízmércéket, valamint vízminőségi monitoring állomást létesítettek, telepítettek a Torna-patakon.

Egyedi vízminőségvédelmi beavatkozásokat alkalmaztak: fenékküszöbököt építettek a Torna-patakon és a Marcalon, mögöttük ülepítőtereket alakítottak ki, az erősen lúgos kémhatású vörösiszap-zagy semlegesítésére gipszet adagoltak és savazást alkalmaztak a levonuló árhullám pH értékének csökkentésére, valamint igénybe vettek vízsugaras levegőztető berendezéseket.

A szennyezéssel érintett területek és vízfolyások rehabilitálása érdekében elvégezték a vízfolyások medrének és hullámterének, valamint a csatornamedreknek és padkáknak a kotrását, lepelkotrását, a kikotort anyag, mint veszélyes hulladék elszállítását és szakszerű elhelyezését a MAL Zrt. üzemi területén.

A megsérült ajkai zagyotározó újabb gátszakadásából adódó következmények elkerülésére Kolontár településen keresztül ívelő védőgátat, majd pedig Kolontár, Devecser és Somlóvásárhely biztonsága érdekében egy völgyzáró gátat építettek. Vízügyi műszaki irányítással valósult meg a X. zagykazetta (a gátszakadás) végleges bezárása és az ahhoz kapcsolódó létesítmények megépítése.

### Kulcsszavak

Zagygát, gátszakadás, vörösiszap, vízminőségi kárelhárítás, vízminőségvédelmi beavatkozások, lúg kémiai közömbösítése, gipszezés, savazás, vízminőségvizsgálatok, üledék- és iszapvizsgálatok, halpusztulás, mederkotrás, lepelkotrás, gátszakadás helyreállítása.

## Water quality remediation works to deal with the consequences of the October 2010 red mud disaster

### Abstract

On 4<sup>th</sup> October 2010, at 12:10, the dam broke through the X. red mud reservoir of the alumina factory of the Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Zrt. (Hungarian Aluminum Producer and Trade Ltd.) (MAL Zrt.) in Kolontár. The water contaminated with red mud immediately flooded the settlement of Kolontár, and then the flood affected Devecser, Somlóvásárhely, Somlójenő, Tüskevár, Apácatorna and Kisberzseny. The red mud flood on the Torna stream reached and polluted the Marcal, then the Rába and the Mosoni-Danube Rivers.

The three directorates for environment and water affected by pollution ordered a III. degree water quality control preparedness. In the process, a variety of technical interventions took place. Extensive observations and measurements were made (water level observations, water flow and water quality measurements, sediment sampling, sludge tests). Remote-sensing water meters and a water quality monitoring station were established and installed on the Torna stream.

Specific water quality protection interventions were used: bottom sills were built on the Torna stream and the Marcal river, sedimentation areas were set up behind them, gypsum was added to neutralize the strongly alkaline red mud slurry, acidification was used to reduce the pH of the receding flood wave, and water jet aeration equipment was used.

In order to rehabilitate the areas and watercourses affected by the pollution, the beds and floodplains of the watercourses, as well as the canals and embankments were dredged, sheet dredged, the dredged material was removed as hazardous waste and professionally disposed of in the operational areas of the MAL Zrt.

In order to avoid the consequences of another dam failure of the damaged Ajka red mud reservoir, a protective dam curving through Kolontár settlement was built, and then a valley-closing dam was built for the safety of Kolontár, Devecser and Somlóvásárhely. The final closure of the X. sludge cassette (the dam failure) and the construction of the related facilities were implemented with the guidance of water management.

### Keyword

Sludge dam, dam failure, red mud, water quality damage remediation, water quality protection interventions, chemical neutralization of alkali, plastering, acidification, water quality tests, sediment and sludge tests, fish kill, dredging, sheet dredging, dam failure restoration.

### ELŐZMÉNYEK

2010. október 4-én 12 óra 10 perckor a Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Zrt. (MAL Zrt.) ajkai timföldgyárának kolontári X. vörösiszap-tározójánál ipari ka-

tasztrófa történt: a tározó kazettájának északi gátteste az észak-nyugati sarokpontjánál átszakadt, összeomlott (*I. kép*). A 26 m magas tározó falában 50-60 m hosszú nyílás keletkezett. A vörösiszappal szennyezett víz helyenként

1,5-2,5 m magasan hömpölyögve azonnal elöntötte Kolontár település lakott területének jelentős részét. Az iszaptározó átszakadt gátjának katasztrófája a Torna-patak völgyében további hat települést érintett közvetlenül, ezek: *Devecser, Somlóvásárhely, Somlójenő, Túskevár, Apácatorna, Kisberzsény*.



1. kép. A kolontári gátszakadás – 2010. október 4  
Photo 1. The dam failure in Kolontár – 4<sup>th</sup> October 2010

A gátszakadás következtében a *Torna-patak* és völgye súlyos – a későbbi szakértői becslés szerint – mintegy 1 650 000 m<sup>3</sup> mennyiségű 13,5 pH értékű lúgos vörösiszap terhelést kapott (*OGY vizsgálobizottság 2011*).

**pH:** *Pondus hydrogenii*, latinul *potentia hydrogeni*, hidrogénion-kitevő – dimenzió nélküli kémiai mennyiség, mely egy adott oldat kémhatását (savasságát vagy lúgosságát) jellemzi. A tiszta víz pH-értéke 7, ennél kisebb pH-érték savasságot, nagyobb pH-érték pedig lúgosságot jelez. pH=1 pl. az akkumulátorsavnál (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>); pH=13,5-14,0 pl. a marónátronnál (NaOH).

A kiömlött anyag mintegy kétharmada maró lúg volt. A vörösiszap-hullám levonulásával a szennyezés átterjedt a *Marcalra*, a *Rábára*, majd elérte a *Mosoni-Dunát* és a *Dunát* is.

### A KATASZTRÓFA KÖVETKEZMÉNYEI

A Kolontár külterületén lévő vörösiszap-tározó gátszakadásával Magyarország történelmének legsúlyosabb ipari katasztrófája következett be. A katasztrófa következtében 10 lakos életét veszítette, 286 fő szorult egészségügyi ellátásra és ezek közül 120 fő hosszabb kórházi, egészségügyi kezelésre. Az életveszélyessé vált, illetve a vörösiszappal szennyeződött lakásokból, Kolontárról, Devecserből és Somlóvásárhelyről 390 ember azonnal ki kellett menekíteni, és további 110 személy kitelepítéséről kellett haldéktalanul gondoskodni. 367 belterületi ingatlant ért károsodás, melyek döntő részét el kellett bontani, kisebb részét helyreállították. A lúgos iszap 1017 hektár mezőgazdasági területet árasztott el, megsemmisítve az ott található mezőgazdasági kultúrákat. A károsult mezőgazdálkodók száma 731 fő volt. A lúgos iszap felbecsülhetetlen humán, gazdasági és ökológiai károkat okozott a térségben.

### HOGYAN KELETKEZIK, MIT TARTALMAZ A VÖRÖSISZAP?

A vörösiszap a timföldgyártás mellékterméke. A timföldet bauxitból állítják elő. A bauxit alumíniumtartalmú ásványokból, valamint egyéb alkotókból, így vas- és szilíciumvegyületekből álló ásványi nyersanyag, amely a benne

lévő vastól vörös színű. A bauxitot porrá őrlik, majd nátrium-hidroxiddal (ez erős lúg) reagáltatnak 150–180°C-os hőmérsékleten és nagy nyomáson.

Karl Joseph Bayer 1892-ben szabadalmaztatta a bauxit nátronlúgos feltárását. Jelenleg a világ timföldtermelésének 90%-át a Bayer-eljárással állítják elő. Az eljárás lényege, hogy a bauxitércben lévő alumínium-oxid hidrátok oldhatósága lúgoldatokban a hőmérséklet és a lúgkoncentráció függvényében nagymértékben változik. Az eljárás részfolyamata a „feltárás”, melynek lényege, hogy a megőrölt bauxitból katalizátor jelenlétében, nátronlúggal, magas hőfokon kioldják annak alumíniumtartalmát. A lehűtött, ülepitett oldatból a „kikeverés” folyamatában alumínium-hidroxidot kristályosítanak, majd „bepárlással” marónátront nyernek vissza és azt újra felhasználják. A bauxitból kioldódott alumíniumvegyületekből készül a timföld, ebből elektrolízissel fémalumíniumot gyártanak. A bauxitércből visszamaradó egyéb ásványok elegye lúggal erősen szennyezett. A vasásványok közül a hematit és a goethit nem vesz részt a kémiai folyamatokban, és mint oldhatatlan anyag visszamarad. Mivel a vas-oxid (ferrioxid) vörösesbarna, erősen színező anyag, ezért nevezik a visszamaradó, vízben nem oldható zagyot vörösiszapnak, aminek az elhelyezése speciális tárolót igényel. Egy tonna timföld előállításakor 1,5-2 t vörösiszap keletkezik.

Magyarországon található vörösiszap-tározók: Ajka mellett (nyitott), Almásfüzitő (zárt, 85%-ban rekultivált), Neszmély (nyitott), Mosonmagyaróvár (zárt). Évtizedek alatt összesen 55 millió t vörösiszap halmozódott fel a zagy tározókban szerte az országban. Ez Magyarországon a legnagyobb tömegben előforduló veszélyes hulladék.

Ajkán 1942 óta folyik timföldgyártás. Ezen idő alatt mintegy 30 millió t vörösiszap halmozódott fel, amelyet tíz tározóban helyeztek el.

A vörösiszap a hatályos EU szabályozás (94/904/EC direktíva) szerint nem veszélyes anyag. Bár a magyar szabályozás 2002. január 1. előtt kizárólag veszélyes hulladékként kezelte a vörösiszapot, később – az alkalmazott technológia függvényében – lehetőség volt a „nem veszélyes hulladék” minősítésre is. (2010-ben Ajkán, a MAL Zrt-nél tárolt vörösiszap nem minősült veszélyes hulladéknak.)

A környezetbe kikerülő vörösiszap azonban potenciális veszélyforrás, amely mind a vele érintkező lakosságot, mind az élővilágot, mind a környezetet (levegő, víz, talaj) veszélyeztetheti. A vörösiszap elsősorban erősen lúgos jellege miatt veszélyezteti az élővilágot, valamint az épített és a természeti környezetet.

A vörösiszap átlagosan 24-45%-a vas-oxidot, és egyéb fémvegyületeket (15-28% alumínium-oxidot, 3-11% titán-dioxidot, 5-20% szilícium-dioxidot, 5-12% nátrium-oxidot és 1-3% kalcium-oxidot) is tartalmaz. 1% alatti mennyiségben gallium-, vanádium- és ritkaföldfém-oxidok is találhatóak benne. Az ajkai X. tározóból kiömlött vörösiszap az Országos Közegészségügyi Intézet (OKI) utólagos vizsgálati eredményei szerint kiugró fémszennyezettséget nem mutatott.

A nátrium-hidroxiddal (marónátronnal) ki nem oldott maradék szilárd anyag erősen lúgos marad; pH-ja általában 10–11 közötti, a 12-t ritkán éri el. A pH ennél nagyobb értéke (jellemzően 12-14 között) egyértelműen arra utal, hogy a vörösiszapot nem mosták át megfelelően a nátrium-hidroxid visszanyerése és hasznosítása érdekében. Eredeti nedvességtartalma 40–45%; ebben az állapotában még szivattyúzható; így locsolják ki a tározó részmedencéibe (az ún. kazettákba). Víztartalmát hosszú ideig nem veszíti el, emiatt a plasztikussági határ közeli vagy a feletti állapotban van, folyósódásra hajlamos, és a meggyengült gátszakaszokon csuszamlások vagy rogyások esetén az esővízzel feldúsított zagy akár nagyobb távolságra is kifolyhat a tárolótérből.

## A ZAGYGÁTAKRÓL

Mintegy ötezer éve épülnek gátak a Földön; számuk egyes becslések szerint megközelíti a félmilliót. A gátépítés tudománya folyamatos fejlődésének, az ismeretek bővülésének köszönhetően a nagygátak tönkremeneteli aránya napjainkra 0,2% alá csökkent, sőt az igazán nagy gátak tönkremenetele még ennél a törési aránynál is kisebb. A gátak „mostohagyermekai” a zagygátak, melyekre kisebb figyelem irányul, alapozásuk és magasításuk sokszor ad hoc döntések alapján készül, nemegyszer a gyakorlat jelöli ki az alkalmazott technológiát úgy, hogy ebbe a tervezőt nem is vonják be (Nagy 2011a, 2011b, 2012).

Magyarország 2000-ben szembesült a zagygátak problémájával, amikor – néhány hét különbséggel – két, Romániában lévő zagyártározó gátja is átszakadt. A 2000. január 30-i, Nagybánya melletti zagygát szakadása eredményezte az emlékezetes cianid szennyezést a Szamoson és a Tiszán. Ekkor még nem volt le senki olyan következtetést, mely feltételezte volna, hogy ezekhez hasonló eset hazánkban is előfordulhat. Tíz év telt el és a MAL Zrt. esete irányította rá a figyelmet a hazai zagygátakra.

A zagygátak tervezése, szakértése, állékonyságának számítása külön szakterület (hasonlóan a nagygátak tervezéséhez), mely speciális ismereteket igényel. A problémakör nagyságát a Nemzetközi Talajmechanikai és Geotechnikai Szövetség (ISSMGE) azzal is elismeri, hogy külön műszaki bizottság foglalkozik a zagyártározók geotechnikai problémájával.

A nemzetközi szakirodalmi adatok szerint 1960-2010 között a világon legalább 92 számottevő mértékű zagygátszakadás következett be, összesen 25 országban. A bányászott ércek közül 17 anyag volt érintett zagygátszakadással, legtöbbször szerepel a réz (24%), az arany (14%), valamint a foszfát és a szén (13-13%). A kiömlött zagy mennyiségét tekintve a kolontári katasztrófa a jelentősebbek közé tartozik.

A nagyobb zagygátak száma Magyarországon meghaladja a húszat. Ezek egy részének magassága akkora, hogy kiszorítja a völgyzárgátakat a tíz legmagasabb hazai gát listájából. A zagygátak lényegesen kisebb körülményekkel készültek, mint a nagygátak, azonban a gátszakadás súlyosabb is lehet, hiszen nemcsak a zagy és a víz mennyisége, de a minősége is veszélyforrás (Nagy 2011a, 2011b, 2012).

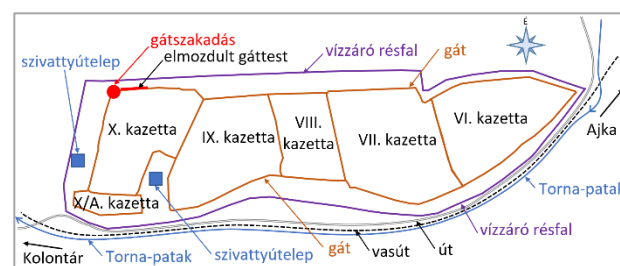
## AZ AJKAI ZAGYÁRTÁROZÓK ÉPÍTÉSÉNEK ÉS ÜZEMELTETÉSÉNEK TÖRTÉNETE

Az ajkai zagyártározók építésének és üzemeltetésének történetét a szakirodalmi források alapján ismertetjük (Farkas és társai 2013a, 2013b).

### Az ajkai zagyártározók építése

Az Ajkai Timföldgyár 1942-43-ban létesült, miután a közelben bauxit- és szénlelőhelyek egyaránt voltak. A timföldet a korábban ismertetett Bayer-eljárással állították elő: a bauxitot a gyártás során golyósmalmokban, lúggal összekeverve, nedvesen megőrölték a megfelelő szemcseméretre, és a technológia által megkövetelt koncentrációjú marónátronnal (NaOH) keverték. Az eljárás során keletkezett 300 – 350 g/l szilárdanyag tartalmú vörösiszapot 100 – 150 g/l szárazanyag tartalmú iszapra hígítva híg zagyként, hidraulikus szállítással, zárt csővezetékben juttatták ki egy zagyártározó kazettába (akár több kilométer távolságra). A kazettában a zagy szilárd és folyékony fázisa részben szétvált; a szilárd résszel a kazetta töltődött. A vörösiszap-zagy jelentős lúgtartalmú vizét részben visszanyomatták az üzem területére, részben pedig semlegesítés után a közeli Torna-patakba vezették.

A termelés növekedése miatt 1963-tól nagyobb alapterületű és térfogatú tározó kazettákra volt szükség, amelyeket a gyártól távolabb létesítettek. Az egyes kazetták határoló gátját a közeli hőerőmű salak-pernye zagyából építették, melyet szintén hidromechanizációval juttattak a gátépítés helyére. Mivel az erőművi salak-pernye hidraulikus kötőképesseggel rendelkezett, a szükséges gátépítési munka a töredékére csökkent, kisebb lehetett a körtöltés keresztmetszévénye, továbbá az egyik „maradék anyag” hasznosítható volt a másik tárolásához. A vörösiszap elhelyezésének ez a módszere az Ajkai Timföldgyárnál általános gyakorlattá vált. A későbbiekben így készültek a VI. – X. és X/A. kazetták védőgátjai (1. ábra).



1. ábra. A MAL Zrt. vörösiszap-kazettáinak helyszínrajza (Farkas és társai 2013a nyomán)

Figure 1. Site plan of the red mud cassettes of MAL Zrt. (following Farkas et al. 2013a)

Az 1990-es évektől 550 – 660 ezer m<sup>3</sup>/év vörösiszap elhelyezéséről kellett gondoskodni. A Hőerőműben pedig mintegy 250 ezer m<sup>3</sup>/év salakpernye keletkezett. Ennek kb. 80%-át használták fel a vörösiszap kazetták határoló töltéseinek az építésére. A gyár területén 1963 után a vörösiszap tárolására 6 db újabb kazettát építettek (VI. – X. és X/A kazetták), egyre magasabb gáttal. A VI. – IX. kazetták felületét 2010-re részben rekultiválták (1. táblázat).



1. táblázat. A MAL Zrt. vörösiszap-kazettáinak jellemzői (Farkas és társai 2013a nyomán)

Table 1. Characteristics of the red mud reservoir cassettes of MAL Zrt (following Farkas et al. 2013a)

Kazetta	Magassága	Koronaszint	Üzemelés
VI.	5-7 m	214 m Bf.	1967-1974
VII.	7-10 m	214 m Bf.	1963-1969
VIII.	14-20 m	218 m Bf.	1971-1995
IX.	18-23,5 m	218,5 m Bf.	1980-2004
X.	20,2-25,7 m	216,5-218,5 m Bf.	1998-2010
X/A.	13-15 m	211-212 m Bf.	üres volt

### A tönkrement X. kazetta története

A X. kazetta Torna-patak völgyében való megépítésének gondolata az 1970-es évek végén merült fel. A talajmechanikai feltárások többnyire 1980-ban történtek. A tervező 1980. decemberi és 1981. áprilisi keltezésű „Elvi vízjogi engedélyezési terveiben” 18 – 25 m magas, hidromechanizációs úton kiszállított, salak-pernye anyagú körtöltéssel létesített kazetta szerepel 212,8 m Bf., ill. 219,8 m Bf. magasságú koronaszintekkel.

A vörösiszap-tároló lehetséges altalaj szigetelési módszerei közül nyolc változatot vizsgáltak meg (például a helyszínen található sovány agyag bentonitos keverékből vízzáró fal kialakítását, vagy a kazetta fenékszintjén kialakított alumíniumbetétes, bitumenes lemez szigetelés megvalósítását). A kivitelezéskor végül nem készült alsó lezárás.

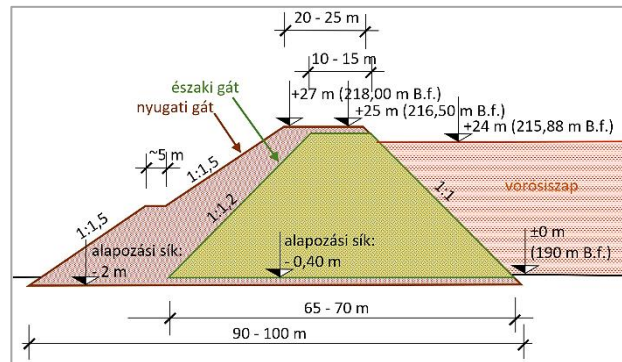
Egy 1985. júliusában készült tervben már úgy szerepelt, hogy „a X. kazettában mintegy 42 m magasan helyezkedik majd el a vörösiszap”! Az erőmű salakjából hidraulikus úton, folyamatosan épülő gátak magassága 41,5 – 43,5 m lett volna; vagyis a 10 m széles gátkorona max. szintje 235,5 m Bf. lett volna. A vörösiszap végső szintje 234,5 m Bf-re volt tervezve; ami 13 millió m<sup>3</sup> iszap tárolását tette volna lehetővé. A gátépítést két ütemben tervezték, első ütemben 216 m Bf. szintig (215,0 m Bf. szintű vörösiszap feltöltéssel) épült volna meg a határoló gát. Ugyanezek a túlzott gátméretek szerepelnek az 1988. májusi keltezésű részletes tervekben is.

A továbbiakban azonban elvetették az ilyen magasságú gátak létesítését, és a tervező 1990. januári tervben már „csak” 25 m-es gátmagasság szerepelt, 1:1-es rézsúhajlással az északi gátnál és a nyugati gát belső oldalán, valamint kicsit laposabb rézsúhajlással a nyugati gát külső oldalán.

A gátépítést még 1993-ban elkezdték a korábbi kazettáknál alkalmazott technológiával. Az első építési ütem 1995-ben fejeződött be a 205 m Bf. gátkorona szint elérésével.

A töltések talpszélessége a terepviszonyoktól és a rézsúhajlástól függően 65 – 70 m között változik (2. ábra). A tározó alapterülete kb. 18 – 19 ha, kapacitása az engedélyezett 216 m Bf. feltöltési szintig 4,2 – 4,5 millió m<sup>3</sup>. A gátkorona szintje: 216,5 – 218,5 m Bf. között változott, a gát magassága 20,2 – 25,7 m, a legmagasabb folyadékszint a gátszakadás napján 215,88 m Bf. volt.

Végül az északi és nyugati gát eltérő keresztmetszettel készült (2. ábra). Az északi gát alapozásának idején a műszaki szándék szerint az csak a kazettákat elválasztó gát lett volna, mert tőle északra új kazetta építését tervezték.



2. ábra. A kolontári X. vörösiszap-tároló északi és nyugati gátjának keresztmetszete (Farkas és társai 2013a nyomán)

Figure 2. Cross section of the northern and western dam of the X. red mud reservoir in Kolontár (following Farkas et al. 2013a)

A X. kazettába az 1:5 arányban vízzel hígított vörösiszap betöltése hidraulikus úton 1998-ban kezdődött.

1987 – 2001 között 7 szakaszban, mintegy 7400 m hosszban készült vízzáró fal a VI.-X. és a X/A. kazetták köré. A vízzáró fal és a gátláb között szivárgó árok gyűjtötte össze az átszivárgó vizeket és vezette el a nyugati gát mellett kialakított szivattyútelephez (1. ábra). A gát külső részének csapadékvizét és az átszivárgott vizet szivattyúk emelték fel a X. kazetta tetejére. Fontos megemlíteni, hogy az utólag épített vízzáró falaknak nem volt jelentős víz-visszaduzzasztó (pórusvíznyomás növelő) hatása.

2010 nyarán a kazetta vízszintjének emelkedésével nyilvánvalóvá vált, hogy az északi gát nyugati vége alacsonyabb, ezért mintegy 400 m hosszban rá kellett tölteni a meglévő gátra. A rátöltés vastagsága 0,3 – 1,4 m volt, annak érdekében, hogy az eredetileg tervezett magasságot elérjék. 2010. június 30. és augusztus 15. között 5 277 m<sup>3</sup> anyagot építettek a gát tetejére, gyakorlatilag a később elmozdult gátest szakaszán.

### A terület geotechnikai jellemzése

A X. kazetta helyszíne az építés előtt síkvidéki jellegű volt és mezőgazdasági művelés alatt állt. A terepszint 190,5 – 197,5 m Bf. között változott, 5–8 ‰-t nyugat felé lejtett. A X. kazetta területét a Torna-patak keresztezte, így a gát építése előtt a patakot át kellett helyezni.

Geotechnikai szempontból a terület altalajának felépítése nem bonyolult. A terület alapköze triász időszaki dolomit, amely 400-500 m mélységben található. Erre kréta korú üledék települt, ekkor keletkezett a bauxit és – az időszak vége felé – felette a barnaköszes üledéksor. A tektonikai hatások igen erősek voltak, északkelet-dél-nyugati csapásirányú törésvonalak szabdalják fel a régiót, ekkor alakult ki az ún. devocseri árok, amelyikben a Torna-patak is halad. A felszín közelében pannon rétegek vannak, ennek egyik masszívan megjelenő rétege az a kékeszürke (helyenként zöldesszürke) agyag, amelynek fontos szerepe volt a gátszakadás kialakulásában. Erre negyedidőszaki képződmények, többnyire vékony, fiatal, völgytalpi üledék települtek.

A mérnöki tevékenység szempontjából masszív réteggént, a felszíni régek fekéjként 0,4-9,4 m mélységek között jelentkező 30-50 cm-es vastagságú kékeszürke agyag

azonosítható. Az agyagréteg fölött a Torna-patak hordalékából származó holocén szemcsés, illetve gyengén kötött rétegek találhatók. Ezek rétegek a kékesszürke agyag felett a kazetta egész területén összefüggően mindenhol megtalálhatók a felszínen, *kivéve a gátszakadás helyén!* A gátszakadás helyénél csupán 30-50 cm volt a pannon agyag feletti üledék, amit gyakorlatilag el is távolítottak a gát alapozásakor, vagyis a gátszakadás helyén a gát közvetlenül a kékesszürke agyagra került!

A kékesszürke agyag a plasztikus indexe alapján közepes és kövér agyagnak minősíthető; felső része könnyen sodorható; mélyebben merev állapotú. Helyenként meszes, mészkőtörmelék, ritkán kavicsbetelepülést tartalmaz. A függőleges vízáramlás szempontjából vízárónak tekinthető. A nyírószilárdsági paraméterei és az összenyomódási modulusa is alacsony (Farkas és társai 2013a).

### A GÁTSZAKADÁS LEÍRÁSA ÉS OKAI

A X. kazettára összeállított vízmérleg szerint itt 2010. tavasza óta jelentős mennyiségű „többletvíz” tároltak; a tározóban a zagyszint, és a folyamatos üzem miatt a vörösiszap szintje is egyre emelkedett, úgyhogy előkészületeket tettek arra, hogy az üres X/A. kazetta vörösiszapot fogadhasson. A 2010. szeptember 30-i felmérés szerinti 4,4 m volt a vízoszlop átlagos vastagsága a vörösiszap felett.

A korábbi engedélyek szerint a X. kazetta engedélyezett maximális betöltési szintje 216,0 m Bf. volt, amit végül is a vízszint 12 cm-re közelített meg a gát átszakadásakor. Ez volt az addigi legnagyobb terhelés (vörösiszap+víznyomás) a gáton. Bár a gyár kárelhárítási tervében 300 000 m<sup>3</sup> kiömlhető víz szerepelt, a vörösiszap tetején lévő víz ennek mintegy háromszorosra volt és gátszakadásakor a víz még csaknem ugyanennyi híg iszapot vitt magával. A kiömlött anyagot mintegy 1 650 000 m<sup>3</sup>-re becsülték (OGY vizsgálobizottság 2011).

A gátszakadás folyamatáról valójában egyetlen szemtanú sem tudott hiteles leírást adni. A telefonhívásokból és a villanyoszlop kidőlése okozta áramszünet alapján a gátszakadás 2010. október 4-én déli 12 óra után 10 percre tehető. A kifolyt erősen lúgos folyadék és vörösiszap nagyobbik része kevesebb, mint 15 perc alatt távozott a kazettából, és mintegy 7-8 perc alatt érte el az első települést, Kolontárt.

A gát tönkremenetele statikus talajtörés volt, a gátszakadás csúszólap mentén ment végbe. Mivel a rideg anyagú salak-pernye töltés merev testként viselkedett csak minimális húzó igénybevétel felvételére volt képes, ezért a töltés több helyen eltört. A rideg anyag nem bírta ki a csavarási igénybevételt, az elmozdult gátest két végén repedések alakultak ki (Farkas és társai 2013a, 2013b) (2. kép).

Először csak repedésen át folyt ki a zagy, azonban a nagy sebességgel kiáramló folyadék megbontotta az igénybevételek hatására megrepesztett gátanyagot; majd

a folyás kezdete után pár perc múlva hirtelen erős morajlással robbanásszerűen átszakadt a töltés. Az északnyugati saroknál az inkább É-i irányba kirepülő hatalmas pernyetömbök egyike eltalálta, és eltörte az ott haladó villanyvezeték oszlopát. A vezetékek szikráztak, majd elszakadtak. (3. kép). A megnyílás szakaszosan nőtt, végül a szélessége elérte a 60 m-t.



2. kép. A kolontári X. kazetta megmozdult gátszakasza  
Photo 2. The moved dam section of the X. cassette in Kolontár



3. kép. A gátszakadás helyszíne az eltört villanyvezeték oszloppal  
Photo 3. The location of the dam failure with the broken power line pole

A gátszakadásról készített geotechnikai szakvéleményben (Farkas és társai 2013a, 2013b) megállapították, hogy a vörösiszap-szint és a lúgos folyadékszint folyamatos emelkedésével egyre romlott a gátak állékonysága; a kazetta és a gátak alatti talaj terhének növekedése a gát belső oldalán járulékos süllyedést okozott, a nyírési ellenállás felhasználását jelentette, a gát alatti átszivárgás erősödését okozta és a hidraulikus gradiensnek, az áramlási nyomásnak a növekedését okozta. Az „igénybevétel” végül elérte azt a határt, amelynél a gát alatti kúszást követő talajtörés beindult és a gátszakadás bekövetkezett.

A gátszakadás lassúbb vízszint+zagyszint emelkedés vagy kisebb terhelés esetén is bekövetkezett volna, csak egy későbbi időpontban. Az altalajban lejátszódó agyagszerkezeti átalakulások pedig olyan szerepet játszottak, ami előre hozta a gátszakadás időpontját.

A gátszakadást számos tényező, ok és ezek kedvezőtlen egyidejű összejártsága idézte elő. Ezek közül – a teljesség igénye nélkül – a legfontosabbak a következők:

- a nyírószilárdság szempontjából kedvezőtlen altalaj megléte, annak nem kellő ismerete, a gátméretezéshez, állékonysági vizsgálatokhoz, ellenőrzésekhez szükséges altalaj rétegződés és talajfizikai jellemzők hiánya;
- a talajviszonyoknak nem megfelelő gátszerkezet és alapozás;
- a tárolt zagymagassághoz viszonyított gyenge gátprofil;
- a gát alatti szivárgás, áramlási nyomás hatása;
- az üzemeltetés, az ellenőrzés, az engedélyezési eljárások, a monitoring rendszer hiányosságai;
- és a kazetta zagyszintjének a gátkoronát megközelítő megemelkedése.

Az Országgyűlés 120/2010. (XII. 7.) számú határozatával országgyűlési vizsgálóbizottságot állított fel a Kolontár melletti vörösiszap-tározó átszakadása miatt bekövetkezett környezeti katasztrófával kapcsolatos felelősség feltárására és a hasonló katasztrófák jövőbeni megakadályozására. A vizsgálóbizottság 2010. december 21-én alakult meg. Az ötpárti vizsgálóbizottság 10 tagja 2011. október 27-re végezte el munkáját és állította össze vizsgálatának eredményéről szóló jelentését (OGy vizsgálóbizottság 2011).

A Bizottság vizsgálódása során (meghallgatások, tárgyi bizonyítékok, szakértői jelentések alapján) a katasztrófa okait az alábbiakban határozta meg:

- tervezési okok,
- engedélyezési hiányosságok,
- üzemelési problémák.

## HIDROMETEOROLÓGIAI HELYZET

A Marcal vízgyűjtőjén a gátszakadást megelőző időszakban (augusztusban és szeptemberben) csapadékos időjárás volt, az ilyenkor megszokott mennyiség duplájánál is több esett mindkét hónapban. A csapadék hatására több kisebb árhullám vonult le a folyón.

Szeptember 19-től egy tartósabb árhullám alakult ki. A Torna-patak és a Marcal vízgyűjtőjén 2010. szeptember végén és október elején több heves árhullám vonult le. Az apácatornai csapadékmérő állomáson szeptember 24-én 34,5 mm csapadékot mértek. Ennek hatására a Torna-patak Karakónál 30 óra alatt csaknem 1 m-t áradt. Október elején így magasabb mederteltség, az ilyenkor szokásosnál nagyobb vízhozam volt jellemző a Marcalon. A vízgyűjtőn a felső 1 m-es talajrétegre számított telítési értékek 95% felettiak voltak, tehát a talaj telített, telítéshez közeli volt.

Október 4-én ismét csaknem 40 mm-es eső érte a Torna-patak vízgyűjtőjét, amely – rövid idővel a gátszakadást követően – heves árhullámot okozott és elősegítette a szennyezőanyag-hullám gyors levonulását és tovaterjedését. Október 4-én Karakónál az említett árhullám apadó ágán érte a Marcal folyót a Torna-patakon lezúduló szennyezőanyag-hullám. Ennek következtében hirtelen 40 cm-es vízszintemelkedés történt a Marcalon.

2010. október 4-december 14. között, a védekezés *intenzív szakaszában* időnként még a meteorológia elemekkel is küzdeni kellett. Hőmérsékleti szempontból a december eleji  $-10^{\circ}\text{C}$  körüli hajnali hőmérséklet, majd pár napon belül a gyors melegedés ( $+15^{\circ}\text{C}$  feletti maximumok) okozhattak gondot. Csapadék is nehezítette a védekezést, sokszor volt szeles az idő, a szél a lerakódott vörösiszap-port is szállította. A talaj a katasztrófa megtörténtekor is telített volt. A december közepéig terjedő időszakban az alsóbb talajrétegek (20-100 cm) nedvességtartalma lényegében nem változott, a felső 20 cm-es réteg a csapadékhullást követte, de 70% alá itt sem mentek a számított nedvességi értékek. Az átázott talaj gyakran nehezítette a munkálatoikat. A vízminőségi kárelhárítási munkák szempontjából a szél is jelentős szerepet játszott.

2010. december 15-2011. november 30. között, a védekezés *kárelhárítási szakaszában* hőmérsékleti szempontból előfordultak néhány nap alatti jelentős hőmérséklet-változások, melyekhez nehéz volt alkalmazkodni. December 18-án volt a leghidegebb, ekkor a napi középhőmérséklet is  $-7^{\circ}\text{C}$  alatt maradt, míg a nyári időszakban a kánikulai napok hátráltatták a védekezést. A legmelegebb augusztus 26-án volt, a napi középhőmérséklet  $27^{\circ}\text{C}$  felett alakult, a maximumok pedig  $36^{\circ}\text{C}$  körül. Csapadék az időszakban kevés hullott, nyáron zivataros időszakban rendkívüli mennyiségek (50 mm/nap) is előfordultak, de ezek többnyire lokálisak voltak. A szél inkább csak az időszak elején okozott gondot.

## VÍZMINŐSÉGI KÁRELHÁRÍTÁSI FELADATOK

A katasztrófával érintett Közép-dunántúli (KÖDÜ-KÖVIZIG), Nyugat-dunántúli (NYUDUKÖVIZIG) és Észak-dunántúli (ÉDUKÖVIZIG) Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság – a területileg illetékes környezetvédelmi, természetvédelmi és vízügyi felügyelőséggel egyeztetve – 2010. október 4-én 16:00 órától a teljes érintett területen III. fokú vízminőségvédelmi készültséget rendelt el. Ezzel egy időben a területen elkezdődtek a vízminőség mérések: mérték a víz hőmérsékletét, pH értékét és fajlagos vezetőképességét; folyamatosan rögzítették a vízállás adatokat.

A védekezés során az érintett környezetvédelmi és vízügyi igazgatóságok kárelhárítási és kármentesítési feladata volt a Dunának, mint nemzetközi folyamnak, valamint a területükön lévő vízbázisoknak a megvédése az erősen lúgos, maró anyagtól. További feladatuk volt a saját erőforrásokkal folytatott beavatkozások mellett a védekező szervezetek közötti kommunikáció megszervezése, tevékenységük összehangolása, valamint a tájékoztatás a felettes szervek és a nyilvánosság felé.

## A SZENNYEZÉSI HULLÁM LEVONULÁSA

A szennyezési hullám levonulása igen gyors volt, mivel egybeesett a Tornán és a Marcalon levonuló, csapadékból származó heves árhullámmal. A vízminőség mérési adatok, valamint a folyamatos helyszíni figyelőszolgálatról érkezett jelentések alapján az erősen lúgos szennyeződés 7 óra alatt elérte a Marcal-Torna torkolatot Karakónál, 28 óra alatt a Szergéni közúti hídnál volt és kb. 46 óra alatt Marcaltónél elérte az ÉDUKÖVIZIG működési területét (2. táblázat).

2. táblázat. A szennyezési hullám levonulása  
Table 2. Propagation of the pollution wave

Folyó	Szelvénytávolság	Helyszín	Időpont	Eltelt idő
Marcal	69+800 fkm	Torna-patak torkolata	2010.10.04. 19:00	7 óra
	64+815 fkm	Boba vasúti híd	2010.10.04. 23:30	11 óra 30 perc
	59+255 fkm	Kodó-patak torkolata	2010.10.05. 04:00	16 óra
	51+104 fkm	Mersevát közúti híd	2010.10.05. 10:50	22 óra 50 perc
	49+540 fkm	Cinca-patak torkolata	2010.10.05. 12:00	24 óra
	44+580 fkm	Szergény közúti híd	2010.10.05. 16:20	28 óra 20 perc
Duna	35+000 fkm	Marcaltő	2010.10.06. de.	kb.46 óra
	1766 fkm	Komárom	2010.10.08. 12:00	kb. 96 óra

A kiömlött anyag árhullámként vonult le a Torna, a Marcal és a Rába vízfolyások völgyében (4-5. kép). Az árhullám a Marcal völgybe jelentős mennyiségű iszapot, valamint az elöntött területekről származó uszadékot hozott és azt a Karakó (69+800 fkm) és Szergény (44+580 fkm) közötti szakaszon le is rakta.

**Torna** A Marcal jobb oldali mellékveze a Bakonyban és a Marcal-medencében. Hossza: 51 km, vízgyűjtő területe: 498 km<sup>2</sup>. Városlódtól É-ra ered, DNY-i irányban átfolyik Ajkán, majd NY-i irányba fordul, és Karakó közelében torkollik a Marcalba.

A Torna egy szláv víznév (*Trnava*) átvétele, etimológiailag azonos a Tarna névvel. Ennek a töve a szláv „*tüske, tövis, kökény*”. Számos szláv vízfolyást neveznek így szlovák, szlovén, szerb, ukrán stb. területeken. Az így hívott vizek partján a névadás idején sok lehetett a tüskés cserje, kökénybokor.

**Marcal** A Rába jobb oldali mellékfolyója a Kisalföldön. A Sümeg-Tapolcai háton ered, Sümegtől D-re. É-i irányban átfolyik a Marcal-medencén, majd a Rábával párhuzamosan haladva keresztezi a Csornai-síkot. Koronóc és Gyirmót között torkollik a Rábába. Hossza 100,4 km, vízgyűjtő területe 3076 km<sup>2</sup>.

**Mursella** római kori település volt a mai Árpás határában, a Rába és a Marcal között. Ez kicsinyítő képzős származéka az illír *murs* („*mo-csár*”) főnévnek. A magyar *Marcal* közvetlen előzménye szláv eredetű.

**Rába** A Mosoni-Duna jobb oldali mellékfolyója. A Fischbachi-Alpokban, Stájerországban, kb. 1200 m magasán ered, Arzbergig D felé folyik, majd egy mély szurdokon (Raabklamm) áttörve DK, K felé haladva Alsószőlőknél, 288 m-rel a tengerszint felett ér Magyarországra. Csákánydoroszlótól ÉK-re, a Kemeneshát és a Vas-Soproni-síkság között kanyarogva ér a Kisalföldre. Jelentősebb mellékvei: Lapincs/Lafnitz, Pinka, Sorok, Gyöngyös, Herpenyő, Marcal. Hossza: 283 km, vízgyűjtő területe: 10113 km<sup>2</sup> (ebből Magyarországon van 187,6 km, illetve 5564 km<sup>2</sup>).

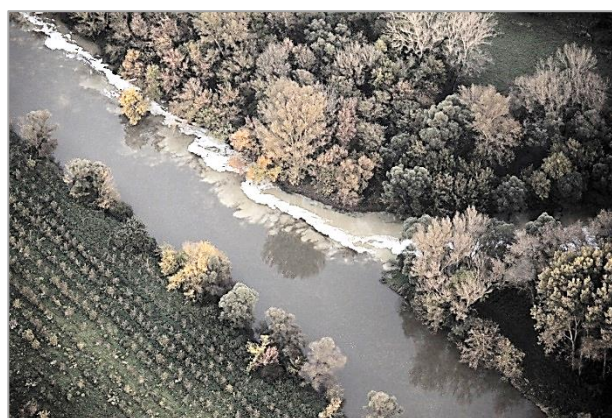
A folyó neve kelta, venét, esetleg illír eredetű. A szót az indogermán „sötétvöröses, barnás” kifejezést rejti. A római (latin) Ar(r)abo a szláv Raba közvetítésével kerülhetett a magyarba. Német neve: Raab.

További károk keletkeztek a Marcal mellékvízfolyásain is, ahová a levonuló ár visszaduzzasztott és a mellette elhelyezkedő mélyebben fekvő parti ingatlanokra kilépve azokon iszapelöntést okozott. A problémát súlyosbította, hogy a Marcal korábbi árhulláma csak részben húzódtott vissza a mederbe, így a szennyhullám arra rászaladva öntötte el a völgyet.

A szennyezés hatására a víz pH értéke a csúcsonál 13,5-13,7 között mozgott, a fajlagos vezetőképesség értéke pedig elérte a 24 000 feletti értéket. Ennek hatására a vízi életközösség javarészt elpusztult. A növényzetet a lúg hatása jól látszik, hogy a nád és sás kifehéredett, a fás szárú növényzet pedig lehullatta a levelét és száradásnak indult.



4. kép. A Torna Somlóvásárhelynél  
Photo 4. The Torna Creek at Somlóvásárhely



5. kép. A szennyezett víz elkeveredése a Marcal rábai torkolatánál

Photo 5. Mixing of polluted water at the mouth of Marcal River in Rába River

Az ÉDUKÖVIZIG működési területén a szennyezés vízben feloldott állapotban volt jelen, a víz színe enyhe vöröses barna árnyalatú volt, vörösiszap-lerakódás már nem volt észlelhető, mivel az a Tornán és a Marcal felső szakaszán már kiülepedett.

A szennyezés a felsőbb szakaszokon végzett azonnali operatív kárelhárítási beavatkozásoknak köszönhetően, a befolyó mellékágak hígító hatására egyre hígult, hatása a Duna komáromi szelvényénél (1766 fkm) a szennyezést követő 4. nap volt kimutatható, ekkor érte el a pH az előző 5 évben – ebben a szelvényben – mért maximum értéket, ami pH = 8,50 volt.

## MÉRÉSEK, VÍZMINŐSÉG- ÉS ISZAPVIZSGÁLATOK

### Vízrajzi mérések, megfigyelések

A három KÖVIZIG az Országos Műszaki Irányító Törzs (OMIT) által elrendeltek értelmében vízhozam-méréseket végzett a Torna-patakon, a torkolatnál, a Marcalon, a Torna-patak torkolata feletti és alatti szakaszán, a levonuló szennyezett vízhozam mérése érdekében szükséges helyeken; valamint a Marcalnak azokon a mellékvízfolyásain, amelyek Torna-patak torkolata alatt jelentős vizet szállítanak a befogadóba.

A KÖDÜKÖVIZIG a kolontári vészhelyzet során rendszeres vízhozam méréseket, talajkút megfigyeléseket, egyidejű vízmintavételezéseket, GPS rögzítéseket, térképi-térinformatikai feladatokat és területlehatárolásokat végzett a Torna patakon, a betorkolló vízfolyásokon és szennyezéssel érintett területeken. A 2010. október 4-2011. május 31. közötti időszak alatt 98 mérést és laborálást végeztek, 9 értékelő jelentést állítottak össze és számtalan egyedi adatot továbbítottak az OMIT felé.

A NYUDUKÖVIZIG október 4-től kezdődően vízhozam méréseket végzett a Tornán és a Marcalon (összesen 31 alkalommal).

### Vízminőségvizsgálatok

A Közép-dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség munkatársai az OMIT elrendelése alapján 2010. október 4-én 16:50-tól mérték folyamatosan a Torna-patak mentén a víz minőségét

Kolontár, Devecser, Somlóvásárhely, Tüskevár, Apácatorna, Karakó mintavételi pontokon. Állandó helyszíni tartózkodás mellett biztosították a folyamatos mintavételt, a pH, a fajlagos elektromos vezetőképesség és az oldott oxigén mérését. A felszíni vizek vizsgálata az általános vízkémia, a toxicitás és a fémek vizsgálatára is kiterjedt.

A vízminőségi vizsgálatokat 2010. október 4-13. időszakban párhuzamosan végezték a NYUDUKÖVIZIG, valamint a Nyugat-dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség munkatársai. 2010. október 13. követően a vízminőségi méréseket az OMIT utasítása alapján Felügyelőség végezte.

Az Országos Műszaki Irányító Törzs a Marcalon hat szelvényben rendelt el folyamatosan vízminőség vizsgálatokat. A Torna patak torkolatát nem lehetett megközelíteni, ezért vízminőség mérése a Bobai vasúti hídnál történt.

A Marcal mentén a 2010. október első felében átlag napi 29, a hónap második felében napi 21 mérés volt. A legtöbb vízminőség mérést, 50 db-ot, október 8-án végeztek. A mért legmagasabb pH érték 13,7 pH volt.

A mérések száma összesítve, havi bontásban:

Október 4-31. között: 685 db

November 1-30. között: 404 db

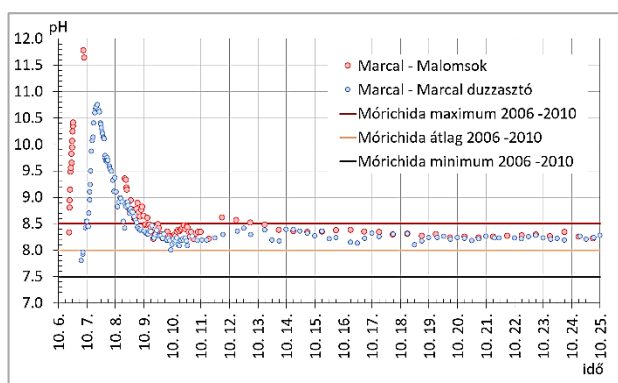
December 1-14. között: 103 db

Az ÉDÜKÖVIZIG szervezésében végzett vízminőség vizsgálatok során a víztetekben mért legmagasabb pH értékek a szennyezés előrehaladásával a 3. táblázatban találhatók.

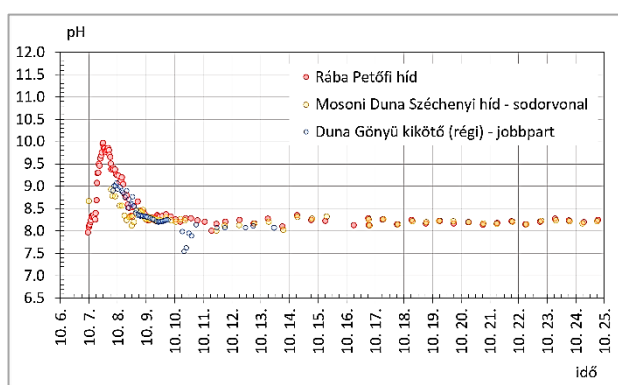
3. táblázat. A víztetekben mért legmagasabb pH értékek  
Table 3. The highest pH values measured in water bodies

Vízfolyás	pH mérési hely	Szelvény-szám (fkm)	Időpont	Mért max. pH érték
Marcal	Malomsok	26+342	2010.10.06. 21:15	11,78
Marcal	Rábaszentmiklós	15+256	2010.10.06. 15:45	11,57
Marcal	Koronc (Fövenyesi híd)	3+317	2010.10.07. 7:30	10,79
Marcal	Marcal duzzasztó	0+612	2010.10.07. 9:00	10,75
Rába	Győr Petőfi-híd	0+815	2010.10.07. 12:00	9,97
Mosoni-Duna	Győr – Széchenyi-híd	13+797	2010.10.07. 17:00	9,94
Mosoni-Duna	Gönyű Kikötő parti	0+500	2010.10.07. 17:00	9,62
Mosoni-Duna	Gönyű – torkolat előtt kb. 100 m-re (sodorvonal)	0+100	2010.10.07. 18:30	9,60
Duna	Gönyű – M-Duna torkolata után	1793+500	2010.10.07. 15:30	9,01
Duna	Gönyű Vízügyes kikötő – jobb part	1790+500	2010.10.07. 23:25	9,07
Duna	Koppánymonostor	1775+700	2010.10.08. 1:30	8,50
Duna	Komárom sodorvonal	1766+000	2010.10.08. 7:00	8,59

A vízminőség-vizsgálati eredmények idősorát a 3. és 4. ábra mutatja be.



3. ábra. A pH változása a Marcal alsó szakaszán  
Figure 3. PH change in the lower part of the Marcal



4. ábra. A pH változása a Rábán, a Mosoni-Dunán és a Dunán  
Figure 4. Changes in pH on the Rába, Mosoni-Danube and Danube

#### Mérőberendezések helyreállítása, létesítése, üzemeltetése

A katasztrófa következtében a Torna-patakon tönkrementek a KÖDUKÖVIZIG kolontári és karakói távjelző vízmércei, valamint a kolontári vízmérő műtárgy mérőhídja. Az igazgatóság helyreállította és 2010. november 3-án és 4-én üzembe helyezte ezeket a távjelző állomásokat. December 11-re helyreállították a vízmérő mérőhidat is. A MAL Zrt. – a KÖDUKÖVIZIG közreműködésével – Kolontáron automata távmérő vízminőségi monitoring állomást létesített, amely 2010. december 15-én a déli órától üzemelt. Adatai a KÖVIZIG távmérő rendszerébe is beérkeztek. A mérőállomás 3 paramétert mért: vízhőmérsékletet, kémhatást (pH), vezetőképességet.

#### Üledék- és iszapvizsgálatok

A Torna-patak kármentesítése és a vízfolyással kapcsolatos további teendők érdekében a KÖDUKÖVIZIG október 13-án elvégezte a szennyezéssel érintett szakasz medrének helyszíni iszapvizsgálatát. A mintavételi helyek kijelölése során a vízfolyás megközelítése fontos szempont volt, mert a patak medrének völgyében számos olyan területet is elöntött a vörösiszap, amelyek még terepjárával sem voltak járhatók. A kijelölt mintavételi helyek a következők voltak: Kolontár közúti híd, Deveser közúti híd, Somlóvásárhely közúti híd, Tüskevár közúti híd, Karakó 8. sz. főút közúti híd (6. kép).



6. kép. Iszap mintavétel csónakból  
Photo 6. Sludge sampling from boat

Az iszapminták vizsgálata, a helyszíni tapasztalatok, és a merések alapján összefoglalva megállapították, hogy a Torna-patak medre, ezen belül a kisvízi meder vörösiszap szennyeződése két részre osztható. Az egyik, a X. számú zagykazetta és Kolontár környezetében található (24+500–25+500 fkm), ahol jelentős terhelést kapott a meder, itt 12–14 cm vastag vörösiszap rakódott ki a meder fenekén, a rézsűkön az iszap vastagsága mindössze néhány cm volt.

A Kolontár alatti részen egészen a torkolatig (0+000–24+500 fkm), a jelentős fenékesés miatt a mederben nem tudott lerakódni az iszap, így ezeken a részeken csak néhány mm, esetleg 1,0–1,5 cm vastagságú volt a vörösiszap. A nagyvízi meder padka részét azonban – a lassúbb áramlás miatt – 5–7 cm, néhol 10 cm vastagságú iszapréteg borította.

A NYUDUKÖVIZIG a Marcalon 2010. október 15-én és november 2-án Kemenespálfánál és Kamondnál, november 2-án Kemeneshőgyésznel és Nemeskocsnál végzett üledékminta-vizsgálatot. Csónakból szondarúddal, illetve „kiszűrő” mintavevővel üledékmintákat vettek és elvégezték ezek vizsgálatát a vörösiszap- és a gipszréteg vastagságának meghatározására. A Marcal padkáján felmérésre került az iszapréteg vastagsága. A padkán kiülepedett iszap vastagsága Karakó és Boba térségében átlagosan 30–40 cm, lejjebb 15–20 cm volt.

Az iszapminták (vörösiszap+gipsz+természetes üledék) nehézfém-tartalma a Marcal folyásirányában csökkent. Ez a csökkenés két okból következett be. Egyrészt az adagolt gipsz lecsökkentette az iszapban a vörösiszap, így összességében a nehézfémek arányát is. Másrészt, a vörösiszap az áramlással természetesen nem azonos koncentrációban jutott tovább a folyómederben, azaz a folyásirányban gipszadagolás nélkül is eleve csökkenő koncentrációban jelent volna meg.

Az elöntött területen végzett talaj-mintavételek adatai szerint a vörösiszapban található nehézfémek a talajban nem jutottak 10 cm-nél mélyebbre. Ez azt jelenti, hogy a mélyebb talajrétegek és az első vízáadó réteg közvetlenül nem volt veszélyeztetett, illetve a talajban a szennyezettség a határértéket nem haladta meg (MTA-BM OKF 2015).

## VÉDEKEZÉS A VÍZFOLYÁSOKON

A vörösiszap szennyezéssel érintett három környezetvédelmi és vízügyi igazgatóság a vízminőségi kárelhárítási tevékenységük keretében a káreseményről való értesülés után, a szennyezőanyagoknak a működési területünkre érkezésekor, vagy azt megelőzően általában a következő kármegeelőző intézkedéseket tette:

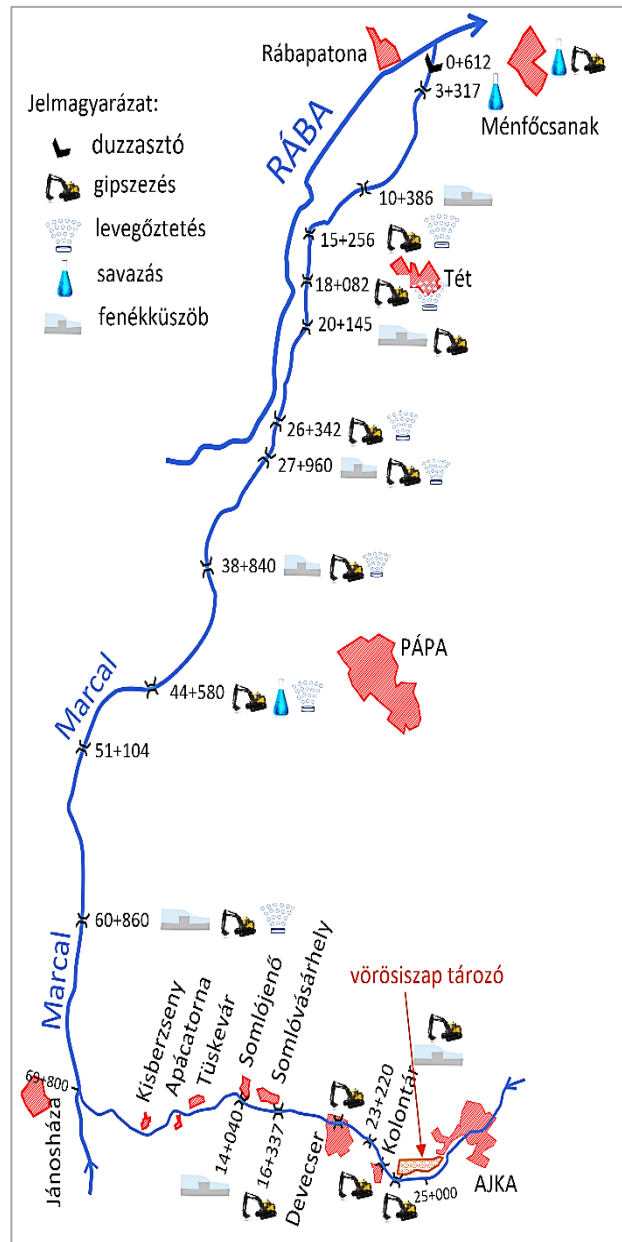
- vízminőségi kárelhárítási készültségi fokozatok elrendelése, tájékoztató, felderítés, kapcsolatfelvétel;
- információs és kommunikációs hálózat kialakítása (társigazgatóságokkal, környezetvédelmi, természetvédelmi és vízügyi felügyelőségekkel, érintett önkormányzatokkal, katasztrófavédelmi igazgatóságokkal, rendőri szervekkel, vízhasználók stb.);
- műszaki ügyelet megszervezése;
- figyelmeztető táblák kihelyezése a közúti hidakra;
- védelmi osztag felállása;
- bevezető zsilipek lezárása az indokolt helyeken;
- vízhasználók, önkormányzatok értesítése;
- halászatra jogosultak értesítése (halmentés);
- fokozott vízfigyelés;
- folyamatos pH, vezetőképesség mérések;
- tér-és vonalvilágítást telepítése az indokolt helyeken;
- az első gipsz-szállítmányok fogadása.

A három igazgatóság a vízminőségi kárelhárítási tevékenységük során általában a következő operatív intézkedéseket tette:

- gipsz beszórása vízfolyásokba;
- a szennyezett víz savazása;
- a szennyezett víz levegőztetése vízszugaras levegőztető berendezésekkel;
- mederduzzasztó kőgátak, fenékküszöbök építése;
- vízrajzi mérések folyamatos végzése;
- vízminőségi monitoring megszervezése (mérőhelyek kialakítása, mérőcsoport létrehozása, műszerbeszerzések, vízminőség mérés);
- haltetek összegyűjtése, elszállítása;
- a Marcalt és térségét veszélyeztető szennyezés hatásának vizsgálata a térségi vízművek, ivóvízbázisok, vízhasználatok tekintetében;
- a lakosság folyamatos tájékoztatása;
- a kárelhárítás folyamatos fotódokumentálása (légi felvételekkel is);
- az indokolt helyeken parti figyelőszolgálat működtetése.

A három KÖVIZIG a Torna-patakon és a Marcalon 17 ponton beavatkozási helyeket alakított ki (ezek részben egybeestek) (5. ábra és 4. táblázat):

- 14 gipsz adagoló és bekeverő helyet,
- 8 fenékküszöböt (mederduzzasztót),
- 3 ecetsav adagoló helyet,
- 7 szelvényben levegőztetést.



5. ábra. Vízminőségvédelmi beavatkozási helyek a Torna-patakon és a Marcalon

Figure 5. Water quality intervention sites on Torna Creek and Marcal River

A X. vörösiszap-kazetta október 4-i gátszakadását követően, a megnyílt gáttesten keresztül – változó mértékben –, de folyamatosan érte szennyezőanyag-terhelés a Torna-patakot, ezért a védekezési technológia megválasztásánál és végrehajtásánál erre figyelemmel kellett lenni. Folyamatosan fennállt Kolontár község veszélyeztetettsége is. Erre tekintettel a vízminőségvédelmi beavatkozásokat folyamatosan fenn kellett tartani, mindaddig, amíg a gátszakadás végleges bezárása nem készült el. Kolontár község és a Torna-völgy védelmére egyedi műszaki beavatkozásokat kellett végrehajtani, védőgátakat kellett építeni.

4. táblázat. Vízminőségvédelmi beavatkozási helyek a Torna-patakon és a Marcalon  
Table 4. Water quality intervention sites on Torna Creek and Marcal River

Vízfo-lyás	Szelvény	Fenék-küszöb	Gipsze-zés	Sava-zás	Levegőz-tetés
<b>Közép-dunántúli KÖVIZIG</b>					
Torna	Csótapuszta		+		
	Kolontári híd		+		
	23+220 Szentkúti híd	+	+		
	Devecser (Szent Imre utca)		+		
	16+337 Somlóvásárhelyi híd		+		
	14+040 Somlójenői híd	+			
<b>Nyugat-dunántúli KÖVIZIG</b>					
Marcal	60+860 Nemeskocs	+	+		+
	51+104 Mersevát közúti híd				
	44+580 Szergény közúti híd		+	+	+
	38+840 Kemeneshőgyész	+	+		+
	27+960 Marcaltó	+	+		+
<b>Észak-dunántúli KÖVIZIG</b>					
Marcal	26+242 Malomsok		+		+
	20+145 Szentei híd	+	+		
	18+082 Mórchida		+		+
	15+256 Rábaszentmiklós		+		+
	10+386 Majorházi híd	+			
	3+317 Koroncó (Fővenyesi híd)			+	
	0+612 Marcal duzzasztó	+	+	+	

#### Fenékküszöbök (mederduzzasztók, ülepítőterek) építése, kialakítása

Október 6-9. között összesen 8 helyen építettek ki kőszórásos fenékküszöböt (mederduzzasztót) a vízáramlás lelassítására és ezáltal a lebegő anyagok kiülepítésére. A kialakított műtárgyak egyben gipszadagolási pontként is szolgáltak. Az adagolás ezeken a helyeken gipsz depóniákból történt.

A **KÖZDUNÁNTÚLI KÖVIZIG** a Torna-patakon végzett vízminőségi kárelhárítás keretében november 6-án két helyszínen épített kőszórásos fenékküszöböt (ülepítőtereket), amelyek a duzzasztott szakaszokon a vízfolyás sodorvonalai felszíni sebességét 1,5 m/s-ról harmadára csökkentették:

- a Torna-patak 23+220 fkm szelvényében, Kolontár térségében
- a Torna-patak 14+040 fkm szelvényében, Somlóvásárhely (Somlójenő) térségében

Az első fenékküszöb felett a Csótapusztára vezető út melletti depónia közelében történt a gipszadagolás a Kolontár és Ajka közötti út hídjáról; a második fenékküszöb esetében a gipszadagolás helyszíne a somlóvásárhelyi híd szelvénye (16+337 km) melletti gipszdepónia volt. Savazást ezeken a helyeken nem végeztek.

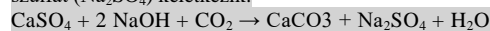
A **NYUGATDUNÁNTÚLI KÖVIZIG** az operatív védekezés első szakaszában a víz pH értékének csökkentésére és a vizuálisan tapasztalható erős elszíneződés megszüntetésére törekedett. A védekezési tevékenység során, a vízminőségi kárelhárítás érdekében október 7-9. között a Marcalon, három helyen épített kisvízi mederelzárásokat, kőszórásos mederduzzasztó műtárgyakat a vízáramlás lelassítására és ezáltal a lebegő anyagok kiülepítésére. A kialakított műtárgyak egyben gipsz adagolási pontként is szolgáltak. Az adagolás gipsz depóniákból történt.

Az **ÉDÜKÖVIZIG** működési területén október 6-7-én 3 helyen alakított ki mederduzzasztókat. Az **ÉDÜKÖVIZIG** a szennyezőanyag-hullám hígítási feltételeinek javítására a Mosoni-Duna vízhozamát (15 m<sup>3</sup>/s-ról 40 m<sup>3</sup>/s-ra) emelte.

#### Gipszezés, savazás, levegőztetés

*Miért alkalmas a gipsz az erősen lúgos vörösiszap semlegesítésére?*

A gipsz (CaSO<sub>4</sub>) és a levegő széndioxid (CO<sub>2</sub>) tartalma semlegesíti a lúgos oldatot. A reakcióban kalcium-karbonát (CaCO<sub>3</sub>) és nátrium-szulfát (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) keletkezik.



A Mátrai Erőmű Zrt. a füstgázkéntelenítő-rendszerének működése során melléktermékként gipsz képződik. A Mátrai Erőmű Zrt. térítésmentesen 23 500 tonna gipszet biztosított a védekezési munkákhoz.

A gipsz adagolását a Tornába és a Marcalba a KÖVIZIG-ek a vízfolyásokat keresztező közúti hidakról, a vízfolyások partjáról és az ideiglenesen kiépített kőszórásos mederduzzasztó műtárgyaknál végeztek, általában kotrógépek alkalmazásával, részben saját, részben idegen munkagépekkel (7. kép).



7. kép. Gipsz bejuttatása a Marcalba Malomsoknál  
Photo 7. Delivery of gypsum to Marcal River at Malomsok



Ehhez szükség volt a beavatkozási és a deponálási helyek munkagépekkel történő kialakítására. A gipsz jobb elkeveredése érdekében több helyen levegőztetést végeztek nagy teljesítményű szivattyúk, kompresszorok, nagynyomású tűzoltó fecskendők és motorcsónakok segítségével. A gipszezés 14 ponton történt. Október 5-december 1. között összesen 23 500 tonna gipszet használtak fel. Október 5-10. között a gipsz felhasználása átlagban 1700 t/nap, csúcserőben 2800 t/nap volt. Felhasználtak továbbá 1800 m<sup>3</sup> 10%-os koncentrációjú ecetsavat is a lúg közömbösítésére, amelyet 3 helyen keverték a Marcalba. A tartálykoszikkal szállított tömény ecetsavat helyi vízszolgáltatóktól igénybe vett hígító vízzel keverték.

A **KÖDÜKÖVIZIG** a vízminőségi kárelhárítási munkákat, beavatkozásokat a Torna-patak 0+000-25+000 szelvényei között végezte. Gipsz adagolása a Torna-patakba 5 helyen történt (4. táblázat, 5. ábra), összesen 3 651 t mennyiségben. A települések belterületére kiszórt gipsz mennyisége 2 274 t volt. Az igazgatóság 3 helyen további 445 t gipszet helyszíni készletben tárolt.

A **NYUDÜKÖVIZIG** a vízminőségi kárelhárítási munkákat, beavatkozásokat a Marcal mentén végezte a Karakó-Szergény közötti szakaszon (71+110-22+200 fkm). A pH csökkentés érdekében gipsz adagolása 4 helyen, ecetsav bekeverése egy ponton történt (4. táblázat, 5. ábra). A gipsz elkeveredését az adagolás megkezdésekor nagynyomású tűzoltó fecskendőkkel és levegőztető berendezésekkel segítették. A kijuttatott gipsz mennyisége 10 317 t volt.

Az **ÉDÜKÖVIZIG** a lúgos szennyezés közömbösítése érdekében a gipszezését öt, a savazást két szelvényben végezte. A felhasznált gipsz mennyisége az ÉDÜKÖVIZIG működési területén 6 648 t volt, ennek csaknem 80%-át 3 nap alatt (október 6-8-án) juttatták a Marcalba. A Marcal Mersevátai közúti és vasúti híd közötti szakaszon a gipsz repülőgépes kiszórását is végezték. HM pápai repülőbázisáról egy felszállással 0,5 t volt a kiszórt gipsz mennyisége. Összesen 78 t gipsz került így a Marcalba. A gipsz jobb elkeveredésének érdekében 3 helyen levegőztetést végeztek. Az ÉDÜKÖVIZIG a Marcalon két helyen végzett savazást a lúgosság csökkentésére (4. táblázat, 5. ábra., 8-9. kép).



8. kép. A gipsz elkeveredése a Mosoni-Duna és a Rába összefolyásánál

Photo 8. Mixing of gypsum at the confluence of the Mosoni-Danube and the Rába Rivers



9. kép. Ecetsav bekeverése a Marcal duzzasztónál  
Photo 9. Mixing acetic acid at the Marcal dam

#### A vörösiszap-szennyezés következményei

A vörösiszap-szennyezésnek az érintett területen, a vízforlyások mentén sokrétű következményei voltak, amelyek – a teljesség igénye nélkül – a következőkben foglalhatók össze:

- a vízminőségi állapot romlása (az érintett veszélyeztetett felszíni víztestek hossza a Tornán, a Marcalon, a Rábán, a Mosoni-Dunán és a Dunán a komáromi közúti hídig) mintegy 160 km-en;
- vízi élőhelyek, életközösségek pusztulása;
- halpusztulás;
- védett területek degradálódása;
- part menti sávok degradációja;
- halászati jog korlátozása;
- vízhasználatok korlátozása;
- az alkalmazott vegyszerek károkozása a védművekben, egyéb műtárgyakban;
- a kárelhárítás során a töltésekben, beavatkozási helyszíneken, azok környékén, valamint az úthálózatban kialakult károsodás;
- a lúgos szennyezés közömbösítésére beadagolt gipsz mederben való lerakódása.

Kedvező körülmény volt, hogy a térség ivóvízbázisai nem szennyeződtek, az ivóvíz a települési vízellátó rendszerekben mindvégig fogyasztható maradt (BM OKF 2011).



10. kép. A Rábában elpusztult halak  
Photo 10. The fish that perished in Rába River

### Halpusztulás

Az ÉDUKÖVIZIG már a vörösiszap-szennyezést követő napon megszervezte a haltetek összegyűjtését a Marcalban, majd a Rábában is (10. kép). A halászatra jogosult Győri Előre Halászati Termelő Szövetkezet – a halászati felügyelő ellenőrzése mellett – elektromos halászgéppel terelte a még élő halakat a Marcalból a biztonságosabb Rábába. Az érintett folyószakaszokról (Marcal, Rába, Mosoni-Duna) a halteteket az ÉDUKÖVIZIG Védelmi Osztaga gyűjtötte össze és ártalmatlanításra átadta az ATEV Fehérjefeldolgozó Zrt-nek.

Az ÉDUKÖVIZIG koordinációjában az MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet hal és bentosz munkacsoportja 2010. október 19-én végezte el a Marcal folyó halállományának felmérését. A felmérés célja a gyors helyzetkép megállapítása volt a Marcal halfaunájáról a katasztrófát követően. A folyó halállományát öt mintavételi ponton vizsgálták (Megyer, Boba, Mersevát, Malomsok és Koroncó községek közelében). Felméréseiket csónakból, elektromos kutató halászgéppel végezték. A felmérések eredménye igazolta, hogy a Marcal halfaunáját nagyon súlyos kár érte. A Torna patakon át a Marcalba jutó vörösiszap szennyezés gyakorlatilag kipusztította a teljes halállományt az érintett szakaszon. A szennyezéssel a halak fő táplálékát jelentő vízi makroszkópikus gerinctelen szervezetek is kipusztultak, melyek regenerálódása alapvető feltétel a korábbi sűrűségű halállomány tartós fennmaradásához.

### A KIÜLEPEDETT VÖRÖSISZAP ELTÁVOLÍTÁSA, ELSZÁLLÍTÁSA, A KOTRÁSI ANYAG ELHELYEZÉSE

A KÖDUKÖVIZIG működési területén a Torna-patak kotrási munkáit a Mecsekérc Zrt. irányította. A kotrási munkák 2011. július 5-én kezdődtek és 2011. november végéig tartottak. Ez idő alatt 51 496 m<sup>3</sup> vörösiszap és iszappal szennyezett föld került elszállításra Ajkára, a MAL Zrt. területére.

A NYUDUKÖVIZIG működési területéhez a Marcal vízfolyás 22+200 – 78+090 fkm szelvények közötti szakasza (Malomsok-Rigács) tartozik. A vörös-iszap szennyezéssel koncentrált mértékben érintett szakasz a vízfolyás 27+960 – 71+110 fkm (Szergény-Karakó) közötti szakasza. A Marcalt a Szergény alatti szakaszán is érte szennyezés, de a kiülepedése itt már a kisvízi mederben történt.

A NYUDUKÖVIZIG működési területén a folyó jellemzően összetett mederszelvényű. A kisvízi meder a normál vízhozamok levezetésére szolgál, míg a padkás szelvényrész a nagyvizek levezetésében vesz részt. A padka jellemzően nád- és sással, a 44+580 – 60+860 fkm szelvények között bokrokkal, cserjékkel és fákkal benőtt. A parti ingatlanokat a medertől egy változó szélességű és magasságú depónia választja el, mely jellemzően gyepművelésű és jól járható. Mersevát környékén, a vasúti híd feletti szakaszon viszont a szomszédos erdőktől becserjésedetett.

Az érintett szakaszon a vörös-iszap szennyeződés az egyéb vízfolyások, valamint a meliorációs lecsapoló árkok betorkolló szakaszain eltérő mértékben bekerült a vízfolyásokba, árkokba, kikerült mezőgazdasági területekre. A szennyeződés kis része az árhullám levonulásával távozott a területről, nagyobb része azonban a Marcal padkáján, illetve medrében kiülepedett.

A kármentesítés célja a kis-, illetve a nagyvízi mederben kirakódott vörösiszap, illetve a védekezés során beadagolt és kiülepedett gipsz kikotrása volt, és ezzel a meder megtisztítása a káros szennyező anyagoktól, valamint a kirakódott szennyezett uszadéktól (11-12. kép).

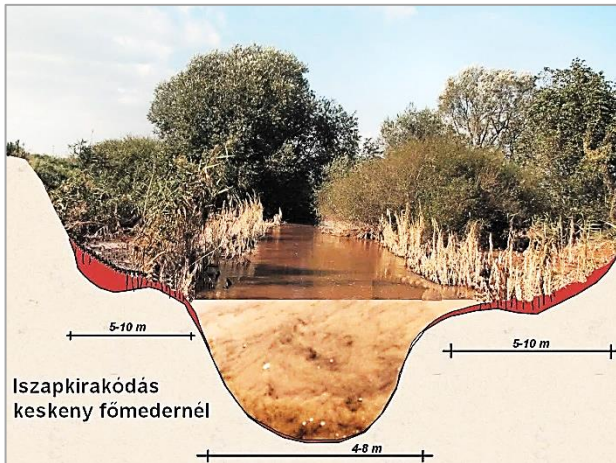


11. kép. Szennyezett terület mentesítése markolóval  
Photo 11. Clearing contaminated area with a grapple

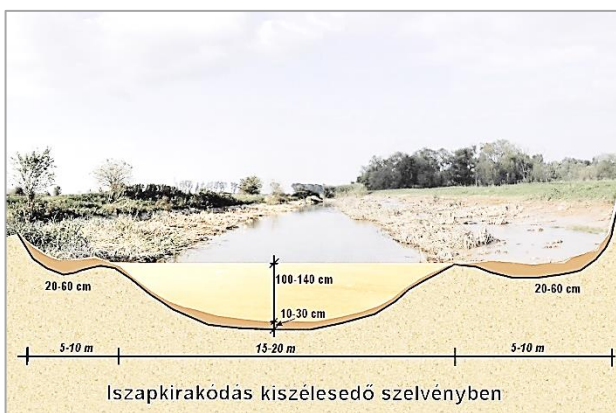


12. kép. Megkötött előtér és rézsű  
Photo 12. Excavated foreground and slope

A keresztmetszvény jellegétől függően (keskeny főmeder vagy kiszélesedő szelvény, illetve fenékküszöbök szelvénye) eltérőek voltak az eltávolítandó iszapvastagságok (6-8. ábra). A helyszíni bejárások és mérések alapján jelentős mennyiségű vörösiszap, gipsz, valamint a nagyvízi padkán uszadék rakódott ki. A mellékvízfolyásokon és a parti ingatlanokon kiterült és kiülepedett vörös iszap mennyiségére nem volt adat.



6. ábra. Iszapkirkodás keskeny főmedernél a Marcalon  
Figure 6. Sludge deposition at a narrow main bed of the Marcal River



7. ábra. Iszapkirkodás kiszélesedő szelvényben a Marcalon  
Figure 7. Sludge deposition in a widening section of the Marcal River



8. ábra. Iszapkirkodás a fenékküszöb szelvényében a Marcalon  
Figure 8. Sludge deposition in the bottom sill section of the Marcal River

A helyszínen több ponton történt mintavétel a padkára kirkodott vörösiszapból. Az iszap víztartalma két hét száradást követően mintegy 20% volt. Próbakotrást végeztek, amelynek eredménye szerint az anyag jól kotorható, nem folyós, kocsira felrakodható halmazállapotú volt. A kémiai analízis végett vett mintákat bevizsgálták. A vizsgálati eredmények alapján a kiotort iszap csak az Ajkán kijelölt központi lerakóhelyen volt elhelyezhető.

A folyó medre a nagyvízi szelvényben fás szárú növényzettel erősen benőtt volt, ezért a kotrást csak a növényzet irtási munkái után lehetett megkezdeni. Az irtás során kikerülő növényzet vagy teljes terjedelmében, vagy részben érintkezett a vörösiszappal, ezért azt a kikotrásra kerülő anyaggal együtt kellett kezelni. Az iszappal nem érintkezett növényzet egyéb felhasználásának nem volt akadálya, erről a NYUDUKÖVIZIG rendelkezett.

A kiotort anyag szállításának megszervezése jelentős logisztikai feladat volt. A kotrási anyag csak a Marcal két partján húzódó depóniakon keresztül volt kiszállítható a közúti. Ezen a szakaszon csak nehéz terepre alkalmas tehergépkocsikkal lehetett megoldani a szállítást. A tehergépkocsi elhaladása után a depónia tetejét folyamatosan kellett rendezni, erre a célra a gépláncba dózert is kellett alkalmazni. A kotrási munka elvégzésénél ez adta a géplánc működési kapacitásának legkisebb keresztmetszetét. A depóniak útvonalán áttereszeket kellett elhelyezni, mederátjárókat, gépkocsi kitérőket, fordulókat kellett kialakítani. A kitermelt anyagot a tehergépkocsi a kotrás helyéről azonnal az Ajkán kijelölt lerakóba szállították.

A Marcalon a lerakódott vörösiszap és uszadék eltávolítása, a kárelhárítási tevékenység két szakaszban történt. A kármentesítés első szakaszában, 2010. december 14–2011. június 17. között a szombathelyi Meliorációs és Rekultivációs Kft. végezte a kiviteli munkákat. A padkakotrás munkálatokhoz kapcsolódóan el kellett végezni a Marcal padkáin és rézsűjén fa- és cserjeirtási munkákat, a vízfolyás mindkét oldalán szállítási útvonalak kialakítását, a betorkolló vízfolyásokon, árkokon szükséges áttereszek kiépítését, ideiglenes átrakók kialakítását, valamint a közúton történő szállítási útvonalakon a hidak megerősítését. Az 1. ütemben, a területről, a Marcal nagyvízi medréből 2011. június 17-ig 59 616 m<sup>3</sup> vörösiszap és iszappal szennyezett föld került elszállításra Ajkára, a MAL Zrt. területére.

A kármentesítés második szakaszában, 2011. június 22-től – a Vidékfejlesztési Minisztérium (VM) megbízásából – a pécsi Mecsekérc Zrt. dolgozott a területen. A teljes szakaszon a kisvízi meder kotrását és a Torna patak torkolata és a Bobai vasúti híd közötti szakaszon a padka és a rézsű kotrását, valamint a befejező munkálatokat (nádsávok kotrása, füvesítés, fásítás, halványak kialakítása, műtárgy helyreállítások) kellett elvégezni. A kárelhárítási munkák 2011. november 23-án fejeződtek be. A kotrásból származó szennyezett anyag mennyisége a 2. ütemben 91 362 m<sup>3</sup> volt. A teljes területre tervezett fásítási munkák a 2012. évi tavaszi vegetációs időszakban készültek el.

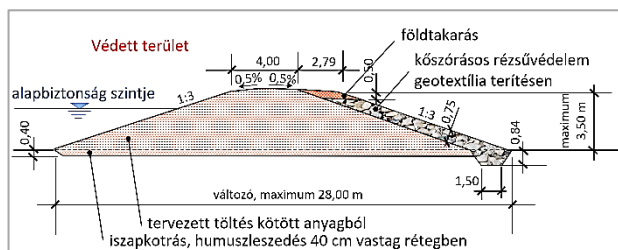
A Marcal 22+200 fkm szelvény alatti szakaszának kezelője az ÉDUKÖVIZIG. Az ÉDUKÖVIZIG működési területén vörösiszap-lerakódás már nem volt észlelhető, mivel az a Tornán és a Marcal felső szakaszán már kiülepedett.

## ÚJ VÉDELMI MŰVEK ÉPÍTÉSE

### Kolontári védőgát

A megsérült ajkai zagyártározó újabb gátszakadásának elkerülésére Kolontár településen keresztül ívelő védőgát építését – a KÖDUKÖVIZIG és a NYUDUKÖVIZIG

szakembereinek műszaki irányítása mellett – a helyi vállalkozók 2010. október 10-én a kezdték meg. A védmű 620 m hosszú, 6,8 m koronaszélességű földgát, a vízdalon geotextília terítésén kő rézsűvédelemmel. A gát legnagyobb magassága 2,5 m, maximális talpszélessége 28 m. Építéséhez 25 000 m<sup>3</sup> földet és 3 500 m<sup>3</sup> követhasználtak fel. (9. ábra). A védőgát 2010. október 24-re teljes egészében elkészült.



9. ábra. Kolontár 1. védőgátjának mintakeresztmetszelvénye  
Figure 9. Sample cross section of the Kolontár 1 protective levee

## 2. számú biztonsági gát

Kolontár, Devecser és Somlóvásárhely biztonsága érdekében 2011. január 10-én megkezdtek egy 1290 m hosszú völgyzáró gát építését. A gát maximális magassága 4,8 m, átlagos magassága 3,5 m. A szivárgó csatorna hossza 770 m. Építéséhez 99 000 m<sup>3</sup> szemcsés, 20 000 m<sup>3</sup> kötött talajt és 6 000 m<sup>3</sup> dolomitot használtak fel. A 2. számú biztonsági gát 2011. február 28-ára készült el. A vízzáró technológiával megépült 2. biztonsági gát a teljes Torna-völgy védelmét biztosítja, megvédi a településeket, összefogja, és szabályozott mederben engedi ki a semlegesített csurgalékvizeket. A védőgát 2011. február végére készült el teljes egészében. A védműhöz – kiegészítő létesítményként – 180 m<sup>3</sup>/s kapacitású vasbeton zsilipes műtárgyat és automata semlegesítő rendszert is építettek.

## A GÁTSZAKADÁS HELYREÁLLÍTÁSA

2010. október 4-től november 30-ig a KÖDUKÖVIZIG irányította és koordinálta a Torna-patak mentén végzett vízminőségi kárelhárítási tevékenység mellett a MAL Zrt. művelési területén lévő összes védművel kapcsolatos munkát. 2010. november 30-tól 2011. június 30-ig a vízügyi igazgatóság vezetője dr. Csonki István, mint a kormánybiztosság állami felügyelője irányította a MAL Zrt. művelési területén belül folyó összes vízelvezetési és gátépítési munkát.

A X. vörösiszap-kazetta október 4-i gátszakadását követően, a megnyílt gáttesten keresztül folyamatosan – változó mértékben – érte szennyezőanyag-terhelés a Torna-patakot, ezért a vízminőségvédelmi beavatkozásokat kellett végezni, mindaddig, amíg a gátszakadás végleges bezárása nem készült el. A vízminőségvédelmi munkák tervezését és kivitelezését a MAL Zrt. rendelte meg, az állami felügyelet kontrolja és a védelmi bizottság jóváhagyása mellett. 2011. január-július között zárták be a gátszakadás nyílását, illetve új védelmi létesítményeket építettek, telepítettek:

- X. zagykazetta (a gátszakadás) folyamatos, majd végleges bezárása
- X. zagykazetta északi falának megtámasztása
- IX. zagykazetta DNY-i sarkának megerősítése

- X/A zagykazetta talpszivárgó és monitoring rendszer kiépítése
- Új 1. és 2. sz. semlegesítő kialakítása.

A X. zagykazetta (a gátszakadás) végleges bezárásánál eltávolítottak 120 000 m<sup>3</sup> humuszt, feltöltést, törmeléket, iszapot; 190 000 m<sup>3</sup> anyagot építettek be töltéstartóba. Elkészült 1 500 m<sup>2</sup> 0,8 m vastag vasbeton résfal. 5 db talajvízfigyelő kutat telepítettek a mentett oldali töltéstartóba. A víztelenítéshez elhelyeztek 2 db Flygt 5150 típusú zagyiszivattyút. A X. zagykazetta végleges bezárását 2010. decemberében kezdték el és 2011. március 28-án fejezték be. A X. zagykazetta északi falának megtámasztására 41 000 m<sup>3</sup> anyagot építettek be, csurgalékvíz árkokat, szivárgó bordákat alakítottak ki.

## ÖSSZEFOGLALÁS

2010. október 4-én bekövetkezett ipari katasztrófa következményeinek elhárítása hatalmas feladat elé állította a vízügyi szolgálatot. Az OMIT irányításával, a három érintett környezetvédelmi és vízügyi igazgatóság olyan méretű, összetettségi és időtartamú munkát végzett 2010. október 4-től 2011. decemberig, amely példátlan a hazai vízminőségi kárelhárítások történetében.

A védekezés során az alapvető célkitűzés az volt, hogy a Dunát, mint nemzetközi folyamat, valamint a szennyezéssel érintett területen lévő ivóvízbázisokat megvédjék az erősen lúgos, maró anyag hatásától, a szennyezés következményeitől. Biztosítani kellett a szennyezett medrek, hullámterek, területek megtisztítását, a sérült vízügyi létesítmények helyreállítását.

A vízügyi szervezetek és vezetőik feladata volt a teljes kárelhárítás műszaki műveleteinek az irányítása, koordinációja, beleértve a szennyező üzem, a MAL Zrt. művelési területén lévő összes vízelvezetési és gátépítési munkát is.

További feladat volt a saját erőforrásokkal folytatott beavatkozások mellett a védekező szervezetek közötti kommunikáció megszervezése, tevékenységük összehangolása, tájékoztatás a felelős szervek és a nyilvánosság felé.

Ilyen nagyságrendű kémiai vízminőségvédelmi beavatkozásra Magyarországon, élővíz esetén még nem volt példa. Az érintett KÖVIZIG-eknek a kémiai közömbösítésen alapuló vízminőségi kárelhárításban nem, vagy alig volt tapasztalata. A vegyszerszállítmányok (gipsz és ecetsav) fogadása és deponálása után a vegyszer vízbejutását a helyi körülmények, a kárelhárításhoz megfelelő felszereléssel rendelkező társ szervezetek (katasztrófavédelem) közreműködése és a rendelkezésre álló gépi eszközök határozták meg. A beavatkozási pontokon – a fentiek figyelembevételével – az igazgatóságok alakították ki a vízminőségvédelmi beavatkozások operatív technológiáját. Munkavédelmi szempontból is fel kellett készülni a maró szennyeződés ellen, illetve a közömbösítő sav és gipsz adagolásánál fokozottan ügyelni kellett a védekező személyzet biztonságára. A védekezés időtartamát alapvetően a hidrometeorológiai viszonyok és a vízminőségi adatok határozták meg.

A vízminőségi kárelhárítás során az együttműködő szervezetek, ill. más szervezetek (egyetemek, tanintézetek, laboratóriumok, vállalkozások stb.), valamint a beavatkozási pontok közelében lévő települések civil lakossága maximális segítséget nyújtott a védekezésben, ill. külön felajánlásokat tettek. A segítségnyújtás és együttműködőkészség több területen is megnyilvánult: műszer-, gép-, eszköz kölcsönzés, mérési feladatok elvégzése, szállítási feladatok átvállalása, útvonal-biztosítás stb. terén.

Az elhúzódó védekezés során a szennyezés nyomon követéséhez, a beavatkozások hatásának ellenőrzéséhez műszerbeszerzések voltak szükségesek, amelyek – mobil jellegűknél fogva – a továbbiakban is felhasználhatóak egy bárhol előforduló vízminőségi kárelhárításnál, vagy egy vízminőség-romlás helyszíni ellenőrzésére.

## IRODALOMJEGYZÉK

*BM OKF* (2011). Vörösiszap. Magyarország. Budapest.

*Farkas József, Nagy László, Dudás Zsuzsanna* (2013a). A kolontári vörösiszap katasztrófa geotechnikai tanulságai. In: Nagy László, Takács Attila (szerk.). 3. Kézdi Konferencia Budapest, BME Geotechnikai Tanszék pp. 27-38.

*Farkas József, Nagy László, Dudás Zsuzsanna* (2013b). A kolontári vörösiszap katasztrófa geotechnikai tanulságai. Hidrológiai Közlöny 93. évf. 3 szám. pp. 60-70

*MTA-BM OKF* (2015). Vörösiszap konferencia. 2015. október 5.

*Nagy László* (2011a). Zagygátak biztonsága. El ne öntsön a méreg. Mérnök Újság, 2011. január. pp. 16-17.

*Nagy László* (2011b). Zagygátszakadás statisztika, MHT XXIX. Vándorgyűlés, Eger, 2011. július 6-8.

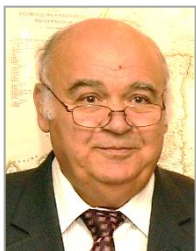
*Nagy László* (2012). Történelmi zagygátszakadások, Hidrológiai Közlöny, 92. évf. 2. szám. pp. 70.-72.

*OGY vizsgálóbizottság* (2011). Jelentés a Kolontár melletti vörösiszap-tározó átszakadása miatt bekövetkezett környezeti katasztrófával kapcsolatos felelősség feltárását és a hasonló katasztrófák jövőbeni megakadályozását célzó országgyűlési vizsgálóbizottsága vizsgálatának eredményéről (Budapest, 2011. október 27.)

*Szlávik Lajos (szerk.)* (2014). Kisvizek nagy vizei. Budapest, OVF.

*VM* (2011). A reménytelenségtől a megújulásig. Küzdelem a vörösiszappal. (Szerk.: Harhainé Györki Erika).

## A SZERZŐ



**SZLÁVIK LAJOS** okleveles mérnök-hidrológus, építőmérnök (1970), vízkészlet-gazdálkodási és hidrológiai szakmérnök (1978). 1982-ben egyetemi doktori fokozatot, 1997-ben PhD fokozatot szerzett. Európa-mérnök (1999). 1970-1991. között vízügyi igazgatóságoknál, majd 2004-ig az OVF-ben, a VITUKI-ban és KvVM-ben dolgozott vezető beosztásokban. 27 éven át, 1993-tól 2000-ig tanított Baján főiskolai docensként, főiskolai tanárként. 2013-ban Professor Emeritus címet kapott. 2017-től a Nemzeti Közszolgálati Egyetem egyetemi magántanára. 2014-től az OVF Vízügyi Tudományos Tanács tagja. 2016-tól a Magyar Mérnöki Kamara tiszteletbeli tagja. Fontosabb kitüntetései: Magyar Köztársaság Lovagkeresztje (2008), Vásárhelyi Pál-Díj (2010), Reitter Ferenc-Díj (2017), Magyar Érdemrend Tisztikeresztje (2019). Mintegy 300 publikációt jegyez (részben társszerzőkkel), amelyből 25 könyv, illetve könyvrészlet, könyvfejezet a hidrológia, árvízvédelem, vízgazdálkodás, vízügytörténet témaköreiből. Négyyszer kapta meg az MHT Vitális Sándor szakirodalmi díját. 1970

óta tagja az MHT-nak. Két ciklusban az MHT alelnöke (1996–2003), majd főtitkára (2007–2011), 2011-től a Társaság elnöke. MHT kitüntetései: Pro Aqua emlékérem (1977), Schafarzik Ferenc-díj (1992), Bogdánfy Ödön-díj (1999). Kutatási területei: műszaki hidrológia; magyarországi folyók árviceinek kialakulása, hidrológiája; az árvek elleni védekezés módszerei, technológiái; ármentesítés, árvízvédelem; a síkvidéki árvíz tározás alkalmazása; az árvízszintek emelkedésének okai; vízkárelhárítási védekezés-irányítás informatikai módszerei; a hazai árvízvédekezés, árvízvédelem története; vízkészlet-gazdálkodás; vízügytörténet.

## A tarpai gátszakadások geotechnikai tapasztalatai

Nagy László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnikai és Mérnökgeológiai Tanszék (e-mail: nagy.laszlo@epito.bme.hu)

### Kivonat

Most, amikor már eltelt 20 év a 2001. évi árvíz óta, szakmai szempontból még most sem lehetnek érdektelenek az árvíz során kialakult geotechnikai háttér kérdései. A gát „ismerte a fizikát”, a hasonló építési elvekkel készült töltés gyakorlatilag ugyanazon vízmagasságra, ugyanazt a tönkremeneteli mechanizmust mutatta. Kétségtelen tény, hogy a kialakult gátszakadásoknak új helyzetet kellett volna teremteniük a vízügyi beruházás, tervezés, kivitelezés rendjében, hiszen alapvetően geotechnikai kérdésekre volt visszavezethető a gátszakadás oka. Jelen közlemény legfontosabb üzenete annak a kérdésnek a megválaszolásához nyújt segítséget, hogy milyen mértékben bízhatunk meg az öreg árvízvédelmi gátakban.

### Kulcsszavak

Gátszakadás, Tisza, 2001, geotechnika, rézsúállékonyság, árvíz.

## Geotechnical experience of the Tarpa dike failures

### Abstract

Now, when 20 years have passed since the 2001 flood, the issues of the geotechnical background formed during the flood are still interesting from a professional point of view. The dam “knows the physics,” an embankment made with similar building process to virtually the same water level, showing the same failure mechanism. It is an undoubted fact that the formed dam ruptures should have created a new situation in the order of water investment, planning and construction, as the cause of the dam rupture could be traced back to geotechnical issues. The key message of this article is to help answer the question of the extent to which we can trust old flood defenses.

### Keywords

Dike failure, Tisa River, 2001, geotechnics, slope failure, flood.

### HIDRO-METEOROLÓGIAI ELŐZMÉNYEK

A rendkívüli árvíz kiváltó csapadék három hullámban érkezett. Először a március 2-án kezdődő ciklontevékenység hatására március 2-án 3 mm, majd március 3-án délutántól március 4-én 5 óráig területi átlagban 57,0 mm eső esett, amit március 4-én 11 óra és 21 óra között egy újabb 46,0 mm, majd március 5-én 5 és 13 óra között egy következő 29 mm csapadék követett. A tivadari vízgyűjtő feletti területre vetítve így összesen 135 mm eső hullott.

Ugyanakkor ebben az időszakban a hőmérséklet 10 °C fölé emelkedett, s a Kárpátok 1000 m feletti magasságában lévő átlagosan mintegy 40 cm vastagságú és 70 mm hóvíz egyenértékű hó is elolvadt, ami további csapadékterhelést jelentett.

A csapadéktevékenység kezdetekor a vízgyűjtő talajai a megelőző december-február közötti időszakban a sokéves átlagot kissé meghaladó csapadék hatására középestől jobban telítettek voltak, így a rendkívüli csapadék gyorsan összegyülekezve érte el a Tisza medrét, rendkívül heves vízszint emelkedést idézve elő a folyó külföldi és magyarországi szakaszán.

A Tisza vízgyűjtőjén belül a nagyobb csapadékterhelés, az 1998. novemberi rendkívüli árvízhez hasonlóan ismét a jobboldali mellékfolyókon jelentkezett, ahol 3 nap alatt területi átlagban 219 mm eső esett. (A bal parton 89 mm.) A három csapadékhullám hatására kialakult három

árhullám Rahón még jól elkülöníthető, de Técsőtől kezdve az árhullámok egymásra futottak, s egyre magasabb szinten jelentkeztek.

Tivadarban az LNV növekedése az 1998. novemberi árvíz előtti időszakhoz képest összesen 149 cm volt. Ezek a vízszintek Tiszabecsnél 19 cm-rel, Tivadarnál 84 cm-rel voltak magasabbak a mértékadó vízszinteknél.

Az áradás intenzitására jellemző, hogy Tiszabecsen 40 óra alatt 8,5 m-t, Tivadarban két nap alatt 12,0 m vízszint-emelkedés volt.

A Kormány a rendkívüli készültséget 2001. március 6-án 12 órakor rendelte el a Tisza Záhony-Tiszabecs közötti szakaszára, a Tisza visszaduzzasztása által érintett Szamos, Kraszna folyók torkolati szakaszaira, valamint később visszamenőlegesen a Túr folyóra. A rendkívüli készültség összesen 280,55 m töltést érintett.

Március 5-én hajnaltól kezdve elsősorban a Tisza Vásárosnamény-Tiszabecs közötti szakaszán - ahol a vízszintek leginkább meghaladták az eddigi LNV-t és a mértékadó vízszintet, s ahol a töltések kiépítése a leggyengébb, a magassági hiányok a legnagyobbak - rendkívüli intenzitású és nagy erőfeszítést követelő védekezési munkák folytak, aminek eredményeképpen sikerült nyúlgátak építésével lépést tartani a vízszint emelkedésével és megakadályozni azt, hogy a víz a töltésen, illetve a nyúlgátakon átömöljön.

A március 6-án 13.30 órakor bekövetkezett gátszakadásig 30 km hosszú nyúlgát épült alig több mint egy nap alatt.

## A TIVADARI ÉS A TARPAI GÁTSZAKADÁSOK

A Tisza jobb parti töltésének szakadása Tivadar és Tarpa között 2001. március 6-án kora délután következett be. A gátszakadást először az 54+650 tkm-ben, majd az 55+350 tkm szelvényében jelezték március 6-án 13 órakor, majd 14:30 órakor, aminek helye a szakadás utáni pontos felmérések alapján az 54+235-54+345 tkm (tivadari szakadás), illetve 55+340-55+485 tkm (tarpai szakadás) közötti szelvénytávokra módosult. Így az első szakadás szélessége 110 m, a másodiké 145 m volt.

„A töltésszakadás miatt következett be, hogy a mértékadó vízszintet 84 cm-el és a koronaszintet 40-50 cm-el meghaladó rendkívüli vízterhelést a nem megfelelő magasságú és szelvénymeretű - 3,0 m koronaszélességű 1:2 mentett oldali és 1:2 víz felőli oldali rézsűhajlású -, a korábbi napok esőzéseitől és a nyúlgátak alatt és felett átfolyó víztől átázott töltések nem bírták. A gátszakadás helyén, de az egész 2 700 m hosszú nyúlgáttal védett töltés szakaszon sem az 1998. novemberi, sem az ezt megelőző árvizek idején nem voltak árvízi jelenségek, a töltéstest anyaga jó minőségű, egységesen kötött agyag volt.” (Fazekas 2001).

A gátszakadással is érintett töltésszakaszon a tarpai töltésfejlesztés vége és Tivadar között 2700 m hosszban a vízszintemelkedéssel lépést tartva kiépült a nyúlgát, ami végül 40-50 cm-es vizet tartott. A nyúlgátak alatt és helyenként felette is kismértékű vízfolyások voltak, s az ebből származó víz áztatta a töltéskoronát és a rézsút is, ami a rézsű csúszások kialakulásában szerepet játszhatott. A töltésszakadások környezetében az első megcsúszások március 6-án 5-8 óra között jelentkeztek, majd 11 órától gyors egymásutánban 2,5 óra alatt 16 töltéssuvadás keletkezett, s a második töltésszakadás térségében egy 200 m hosszú szakaszon egy óra alatt 5 db suvadás alakult ki. A helyszínen lévő védelmi erők azonnal megkezdték a suvadások megfogását a csúszólapon alsó élének megtámasztásával, de a közel függőleges oldalfalak bordás megtámasztására már nem volt idő, mert bekövetkezett a gátszakadás. A gátszakadásokkal érintett szakaszon ekkor három VIZIG összesen 180 fős védelmi osztaga, a Dombrádi PV Komplex Alegysége 50 fővel és 170 fő közterő, összesen 400 fő dolgozott (Fazekas 2001).

Az 54+650 tkm-nél egy 25 m széles, a töltéskorona mentett oldali koronaéléből induló, a töltéslábba tartó suvadásnál a töltés hirtelen 5,0 m szélességben 1,5 m mélységben megroskadt és átszakadt. A kiszakadt nyílást a víz gyorsan mélyítette és szélesítette, elzárására esély sem volt. Az 55+350 tkm szelvényben két egymástól 15 m-re lévő suvadásnál egyszerre következett be a töltéstest teljes állékonyságvesztése, s a víz először két egyenként 5,0-6,0 m széles nyíláson áramlott ki, ami rövid idő alatt egygyé teljeseedett (Fazekas 2001).

Március 6-án este a szakadások szélessége 60-70 m volt, ami később 110 m, illetve 145 m-re növekedett. A két szakadás maximum 800 m<sup>3</sup>/s, összesen 140 millió m<sup>3</sup> víz áramlott ki.

A gátszakadásokon kiömlő víz gyorsan elérte a lokalizációs terv által meghatározott első lokalizációs vonalat, a Tivadar-Tarpa közötti műutat. Az út a kiömlő vizet kb. 3 óráig tartotta fel. Az utat meghágvá a víz a terep esésével megegyezően a legmélyebb vonulatokon haladt végig a legalacsonyabb pontok felé, követve a Makócsa, Szipa, Csaronda csatornák nyomvonalát Tiszakerecseny, Lónya és Ukrajna térségében. A területen a víz tározására meglévő holt-medrek, mélyfekvésű területek állnak rendelkezésre, tározási lehetőség nincs.

A gátszakadásokon kiömlő víz március 7-én reggel érte el a második lokalizációs vonalat, a 41. sz. főutat, s az út alatt lévő hidakon, átereszekon folyamatosan folyt át. Ezek a nyílások a felülről érkező nagy víztömeget nem voltak képesek áteresztetni, s a felduzzadt víz március 7-én délutántól hosszú szakaszokon ömlött át az út tetején, annak ellenére, hogy a belvíz átvezetésére 3 db híd és 5 db átereszt van beépítve, összesen kb. 100 m<sup>2</sup> átfolyási szelvényrel. Az úton történő víz-átömlés után a 41-es út vízvisszatartó, tározó szerepét betöltötte – összesen kb. 70 millió m<sup>3</sup> víz tározódott az út felett – s annak érdekében, hogy a víz továbbvezetése szabályozottan, a legmélyebb vonulatokat követve történjen meg, s a környező települések ne kerüljenek a szabadon átfolyó víz útjába, előbb március 8-án 1.00 órakor a Csaroda felőli oldalon, majd 2.30-kor Tákos térségében megtörtént az út átvágása egyenként 15 m szélességben a legmélyebb helyeken. Ezzel sikerült megakadályozni azt is, hogy az átfolyó víz az utat sok helyen megrongálja, vagy a töltését átszakítsa. Ha nem történik meg az út átvágása, a víz akkor is levonult volna a terepesés mentén, legfeljebb egy napos késéssel, de hasonló előntéseket okozva. A 41-es út összesen 29 óráig tartotta vissza a vizet.

A tivadari és a tarpai gátszakadásokból származó víz magyar területen maximálisan 26000 ha-t, az ukrán oldalon 6000 ha-t öntött el. A Beregi öblöt 20 településéből előntés alá került nyolc (Csaroda, Gelénes, Gulács, Hetefejércse, Jánd, Tarpa, Tákos, Vámosatya) és Gergelyugornya egy része. Négy települést ideiglenes védmű védett, amelyet a víz elért (Márokpapi, Tiszaadony, Tiszakerecseny és Gergelyugornya egy része). Öt települést (Mátyus, Tiszaszalka, Tiszavid, Barabás, Lónya) ideiglenes védmű védett, amelyet a víz nem ért el. Három települést (Beregdaróc, Beregsurány, Tivadar) az előntés nem veszélyeztetett (Fazekas 2011).

## SUVADÁSOK KIALAKULÁSA

A gyorsan növekvő vízszint először elérte a gátkorona magasságát, majd a csaknem egy napja épülő nyúlgát magasságát. A víz elkezdett átfolyni a nyúlgát felett. Az árvízvédekezést nehezítette a védekezési anyag hiánya, amit egyrészt a hosszú anyagszállítási útvonal, másrészt a szállítási útvonal minőségi lehetetlensége okozott. Mind Tarpa, mind Tivadar felől hosszú szállítási útvonal volt. Egyirányú forgalmat kellett biztosítani. A töltés koronája járhatatlan volt, mert a nyúlgát a töltés tengelyébe került, de ha nem ott van, akkor sem biztos, hogy a homokzsákot szállító járművek tudták volna használni a korona átázottsága miatt. Így a szállítójárművek lekényszerültek a töltés lábához, ami szintén át volt ázva (lehet, hogy még jobban, mint a töltés korona), és csak nagy nehézségek árán lehetett közlekedni. Az 1. és 2. képen a töltés lábánál víz borítja azt a sávot, melyen a gátszakadást megelőzően a védelmi anyag szállítása folyt.



1. és 2. kép. A mentett oldali koronaélből lesuvadt talaj a mentett oldali töltéslábnál legyező alakban szétterült  
 Photo 1 and 2. The slide soil from the protected side of crown has spread in a fan shape at the protected side ground surface

Ilyen mostoha körülmények között nem csak a nyúlgát nem tudott tovább magasodni, de a suvadásoknál megtámasztás készítésére sem volt lehetőség. Lehet, hogy módszert kellett volna változtatni a nyúlgát építésével kapcsolatban. A védelmi anyag hiánya kihatott tehát a meghágás el-

leni védekezésre. A nyúlgáton átfolyó víz áztatta a mentett oldali rézsút (3. és 4. kép). A laza töltés telítődött vízzel, elnehezült és bekövetkezett a rézsúcsúzás (rézsúcsúzás, amikor a csúszólap nem lép ki a rézsúból, sem a csúszólap felső, sem az alsó kimetsződésénél) (1.A ábra).

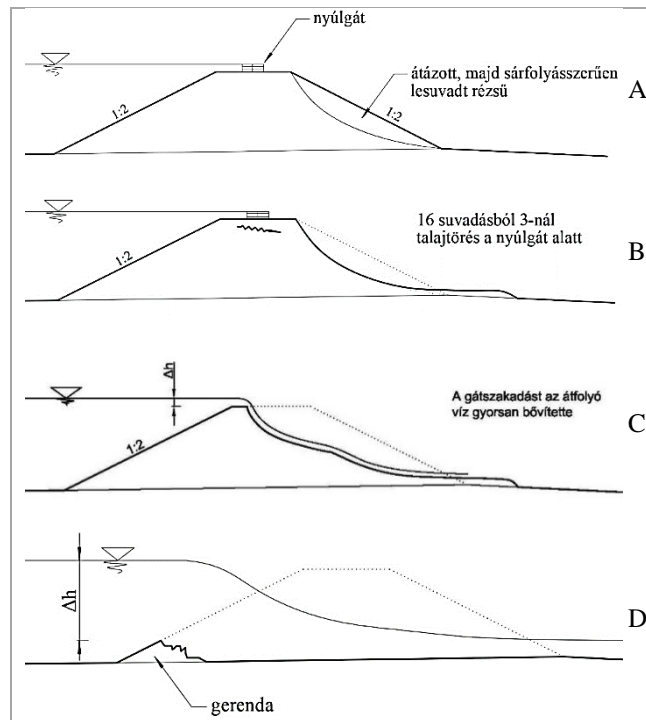


3. és 4. kép. Helyenként a nyúlgáton folyt át a víz, ez elősegítette a mentett oldal eláztatását  
 Photo 3 and 4. Water flowed over the emergency heightening, which helped to soak the protected side

Az árvízvédekezési helyzeten csak rontott, hogy az ideiglenes védmű nem a vízdali koronaélbe, hanem a töltés tengelyébe került. Ezt is részben meg lehet érteni, hiszen kevés homokzsák állt rendelkezésre, és a korona tengelyben volt a töltés a legmagasabb, így akartak magasságot nyerni. Valószínűleg bíztak a töltésben, és nem készültek arra, hogy az árvízvédekezésnek káros kimenetele lehet. Ugyanakkor, mint tapasztalt árvízvédekezők erre a nehezen megközelíthető területre nem homokzsákokat, hanem csak zsákokat kellett volna kérni és szállítani, a nyúlgátat helyi anyagból (a töltés mentett oldali koronaéléből) kellett volna megépíteni. Ez nem jelentette volna a töltés tönkretételét, hiszen már el volt döntve, hogy 2001. évben a Tarpa-Tivadar között töltés erősítésére kerül sor. Másik probléma lehetett, hogy a helyszínen lévő ÁBKSZ és VIZIG osztag rendelkezett-e ásóval, lapáttal.

Meghágás következtében általában egy eróziós folyamat a tönkremeneteli mechanizmus, ami a gát mentett oldali elmosását, erózióját eredményezi. Itt azonban egy másik folyamat játszódtott le. A mentett oldali laza, telített talaj, mint egy sárfolyam csúszott le és terült szét a mentett oldali töltéslábnál. A csúzás esetenként kevesebb, mint 1-2 perc alatt játszódott le. Ha rendelkeznek megfelelő védelmi anyaggal, akkor sem lehet ilyen gyors tönkremenetelre még reagálni sem, nemhogy egy adott helyre árvízvédekezőket átirányítani, annak ellenére, hogy volt a helyszínen árvízvédekezésben jártas egység. Rövid idő alatt 16 ilyen suvadás alakult (5. és 6. kép), amiből három gátszakadás lett (a három gátszakadásból kettő összemetsződött a megnyílás szélességének növekedésével, így a történelem két gátszakadást tart nyilván).





1. ábra A gátszakadás kialakulásának folyamata  
Figure 1. The process of the dike failure



5. kép Suvadások, melyekből nem lett gátszakadás: a suvadások különleges alakja két nappal a gátszakadás után.  
(Megjegyzés: A mentett oldali koronaélből függőlegesen lesvadt talaj, mint egy sárfolyás, a töltés lábánál legyező alakban szétterült.  
Ld. még 1. és 2. képet.)

Photo 5. Slope slides that did not become a dike failure: the special shape of the slides is two days after the failure of the dike  
(Note: The soil, which had fallen vertically from the protected crown edge, spread like a mudflow in a fan shape at the foot of the embankment.  
See also Photo 1 and 2.)



6. kép. A tivadari megnyílás helye néhány órával a gátszakadás előtt  
Photo 6. The location of the breaching in Tivadar a few hours before the dike failure

Lehetett volna több is, azonban az egyre bővülő megnyíláson a kiömlő víz lokálisan annyit csökkenthetett a vízszinten, hogy újabb gátszakadás már nem játszódott le. Csak néhány centiméteres apadás a vízszintben is elégséges lehet a terhelés ilyen csökkenéséhez. A meggyengült töltés valószínűleg hidraulikus talajtöréssel átszakadt a nyúlgát alatti talajban (*I.B ábra*). Tehát egy összetett tönkremeneteli mechanizmus játszódott le. A történelmi tönkremeneteli mechanizmusok (*Nagy 2017*) között csak egyfajta megnevezés szerepelt, úgymint meghágás, buzgár, műtárgy, erőszakos átvágás stb. Ezek a gyűjtőszavak jelen ismereteink szerint több tönkremeneteli mechanizmust is jelentettek, amelyeket vagy a szakmai ismeret, vagy a helyszíni jelenlét hiánya miatt nem tudtak megnevezni. Nem ismerték az egy időben jelentkező, vagy az egymást erősítő, vagy az egymásra épülő tönkremeneteli mechanizmusokat. Ezekkel csak az utóbbi időkben a szofisztikáltabb ismeretek alapján foglalkozhatunk a hazai árvízvédelmi gátnál is (ld. pl. Teton gát – Idaho, USA – tönkremenetele).

A suvadásoknál keletkezett csúszólapok felületén sok olyan gyökér, fa maradvány látszott, aminek elméletileg nem kellett volna ott lennie. Ugyanez volt tapasztalható a gátszakadások megnyílásában is a víz levonulása után.

A gátszakadás pillanata sajnos nincs megörökítve, a legkorábbi felvétel a *7. kép*, melyen a megnyílás szélessége 5-6 méterre tehető. A megnyílás szélessége eleinte gyorsan nőtt (*I.C ábra*), úgy tűnt, hogy a hullámtéri erdőnek nem volt szerepe a kifolyó víz korlátozásában.



7. kép A tarpai gátszakadás emblemikus fényképe  
Photo 7. An emblematic photograph of the Tarpa dike failure

A kifolyó víz átbukott a gerendán (*I.D ábra*), legnagyobb vízhozama elérte a 800 m<sup>3</sup>/s értéket, ami már jelentős árapasztás a Felső-Tiszán. A megnyílás szélessége gyakorlatilag 24 órával a gátszakadás után már nem változott.

A rendkívül rövid felkészülési idő ellenére az árvízvédekezés naturáliában kifejezett adatai imponálóak: 2 580 000 db beépített homokzsák, 35 100 m<sup>3</sup> felhasznált homok, 100 000 m<sup>2</sup> geotextília, 30 000 m<sup>2</sup> geomembrán, 200 000 db fáklya, 6 000 db árvízvédelmi karó, 4 000 db konténer zsák, 85 000 t kő és kavics. Ezek felhasználásával 42 000 m nyúlgát, 2 430 m bordás megtámasztás, 50 km lokalizációs töltés és 4 500 m hullámverés elleni védelem épült.

Az árhullám még le sem vonult, amikor megkezdődött a geotechnikai feltárás, az izotópos helyszíni anyagvizsgálat a gátszakadás okainak feltárására (*Kisházi 2001a és 2001b*).

### A TÖLTÉS ÉPÍTÉSE ÉS GEOMETRIÁJA

A mai Beregi-öblözet töltése 2001-ig két ütemben alakult ki. Összefüggő töltés építése a nagy Tisza-szabályozási munkáknál kezdődött. Korábban is voltak apróbb gátak a mélyebb részeken a Tisza jobb partján, azonban ezek csak bizonyos magasságig védtek, csak annyit jelentettek, hogy a túlpartot gyakrabban öntötte el a víz (*Borovszky 1905*). A nagy vízszabályozással Bereg vármegyében is megkezdődött a töltésépítés a Vízsabályozó Társulat alakulásának évében 1846-ban, de nemsokára megtorpant a kezdeti építési kedv. 1854-ig a Vári-Halábor-Badaló-Tarpa töltés készült el összesen 5098 méter hosszban (29 800 korabeli forint értékben - vagyis 1 fm töltés építése mintegy 5,8 forintba került (1854-es áron) és ez a korabeli viszonyok mellett magas költségnak bizonyult) (*Kész 2011*). Az 1855. évi árvíz azonban mindent elvitt Bereg vármegyében, általános tapasztalat a töltésépítés folytatása volt. A Tarpa és Tivadar közötti töltés 1856-1860 között épült meg, 4 688 méter hosszban. Figyelembe véve a beépített földtömeg 21 233 m<sup>3</sup>-es mennyiségét – a töltés átlagosan 4,5 köbméter volt folyóméterenként – ami arra enged következtetni, hogy a töltés átlagos magassága kevéssel volt csak egy méter felett, de mindenképpen 1,5 méter alatt volt (*Ullrich és társai 1896*).

Az új töltés első próbatétele 1860-ban történt: a Tisza j. Bereg megyei töltések átszakadtak és a Tisza vize a Latorcába folyt a Bodrogi Társulat leírása szerint. A Latorca fenékszintje ugyanis méterekkel a Tisza fenékszintje alatt van. Amikor még nem volt a Tisza jobb partja töltészeve, minden nagyvíz átcsapott a 6-7 km-re lévő Latorcába, olyannyira, hogy volt olyan XIX. századi térkép, amelyen a két folyó között mederkapcsolatot ábrázoltak. Kétségtelen, hogy a társulat leírása nem tartalmazta a gátszakadás helyét, de valószínűleg az öblözet alsó részén történhetett, mert a Tivadar-Csap közötti töltés ekkor még csak épülőben volt (1863-ra készült el), és erről az árvízről a folyásirány szerinti alsó társulat, a Bodrogi számolt be.

Az elkészült védvonal első árvízét 1867-ben kapta, amikor is az öblözet északi részén, a csapi és a zurki határszélen történt gátszakadás.

1869-ben a jelenlegi szelvényezés szerinti 39 és 40 tkm-nél, átömlés volt, majd Jánd és Gulács között is összesen 8 km hosszban. Az öblözet 11 települése és 8200 ha lett előntve *Zawadowski (1891)* szerint (míg *Kvassay* szerint 15 230 ha), 4 lakóház dőlt össze. Tönkrement termény értékét 30 200 akkori Ft-ra becsülték a Beregi Társulat területén. A védőtöltések még nem voltak szabvány szerint kiépítve. A két gátszakadás hossza 60 m volt (25+35 m) az árvízvédelmi nyilvántartási terv, valamint *Zawadowski (1891)* és *Kvassay (1900)* szerint.

Valószínűleg ez az árvíz játszott közre, hogy a badalói, a tivadari és a tiszaszalkai határban, ahol a töltés túlságosan közel lett helyezve a szakadó parthoz már 1870-ben „beljebb lett téve”. (Meg kell jegyezni, hogy 1999-ben Tivadar felett a buzgár környékén (*Nagy 2003*) a víz oldalon még azonosítható volt a felhagyott töltés.)

Az 1867. és 1869. évi árvizek tapasztalata az volt, ahogy azt a folyammérnökség is jelentette, hogy a töltések nagy része színel az addig tapasztalt legmagasabb vízállással, és csak kevés olyan pont maradt, amely e magasságon felül emelkedve szélességi méreteivel is megnyugtató lett volna. Sőt, a gátak ezen hiányosságából származó veszélyeket az is növelte, hogy több helyen fordultak elő repe-dések, amiket mielőbb be kellett tölteni. Így 1871 és 1876 között Zsurk-Eszeny-Gulács és Tarpa határaitban történt töltés emelés (Kész 2011). Ez utóbbi mondatból azonban nem derül ki, hogy csak a településeknél erősítették a töltést, vagy az egész szakaszon. Minden esetre a kifizetett 6 500 forint csak rövidebb munkák elvégzését, vagy csak a hibás szakaszok erősítését valószínűsíti.

1870-ben is volt gátszakadás a Tisza jobb parton, bár ezek Tarpa és Tivadar térségétől távol estek. Az Eszényi határban a zsilíptól 600 méterre lefelé a korabeli szelvényezés szerinti 87 km-nél, a mederáttöltésnél, Beregmegyei Társulat területén, de az előntésre került 70 km<sup>2</sup> terület nagy része már a Bodrogi társulatnál jelentkezett. 10 község volt érintett. (Kovács szerk. 1978, Zawadowski 1891, Kvassay 1900) A gátszakadás hossza Kvassay szerint 72 m volt (Zawadowski szerint 50 m). Az előntött terület 7 331 ha. A következő évben is ugyanezen a részen volt gátszakadás Ásvány és Eszény között január ötödikén. A 39 méteres megnyílást eleinte a tükörjég miatt nem lehetett megközelíteni (OL-K 184-1889 24 cs.).

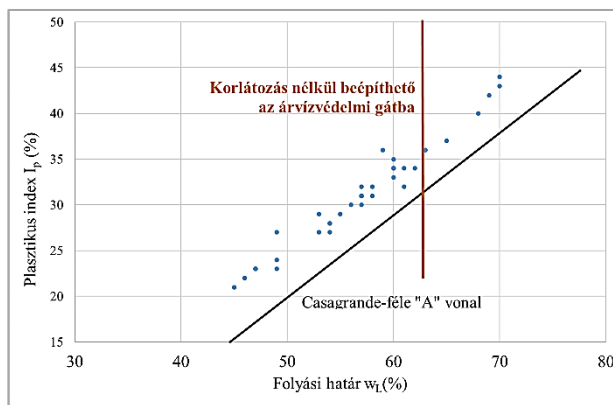
Az országosan nagyméretű, 303 gátszakadással járó 1876. évi árvízből úgy tűnik, hogy a Beregmegyei Társulat területe kiesett, nem szólnak gátszakadásokról a területről (Záhony felett csak a Nagyágról és a Talaborról) (Nagy 2019). A további munkálatokra 1881. január 3-án állami előlegként 40 ezer forint kölcsönt kapott a társulat. De 1881-ben jött a következő erőpróba, az öblözet északi részén történt gátszakadás (Kész 2011). Az 1881. évi rendkívüli árvíz után elodázhatatlannak tűnt a védgátak felemelése. A társulat erről az egész év folyamán azonban nem gondoskodott. Ezt követően rendelte el a kormány a gátaknak az 1881. évi vízszint felett 0,50 méterrel való magasztását. Ennek kivételét a vásárosnaményi Királyi Folyammérnöki Hivatalra bízták, és e célra a társulat terhére hivatal rendelkezésére kiutaltak 20 000 forintot. Aggodalomra adott okot az is, hogy miként az 1830. évi vízmagasságot felülmúlta az 1855. évi, majd az 1869. évi, ezt pedig az 1881-es, úgy nem volt kizárva, hogy a jövőben ezt ismét egy ennél is magasabb árvíz fogja követni, különösen az öblözet alsó szakaszán.

1888. március 26-án a Csap-Tarpa között, a Beregmegyei Társulat területén 8 km hosszban elmosta a víz a gátat, 4500 ha került előntésre. (Kovács 1978) Ekkor indult be a nagy volumenű töltéscsúszás Beregmegyei társulat területén, oly annyira, hogy a felvett hitelekkel a századfordulón még 2 700 000 Ft-t törlesztése volt a társulatnak. Az ún. Tiszai-törvény értelmében a töltés három méter széles koronával és kétoldali 1:2 rézsúhajlással került megerősítésre, ahogy abban az időben mondták, kiépítésre. A magassági biztonság 1,0 méter volt a legnagyobb korábbi, azaz az 1888. évi vízszint felett. Ez a mintegy 110 éves, laza építésű, előregedett töltés próbált ellenállni 2001-ben az árvíz nyomásának.

A Beregi öblözet töltésére ezek után nyugodt, de nem árvízmentes évtizedek (1895, 1933) következtek, a következő gátszakadás csaknem hatvan évvel később volt, 1947-ben Tivadaránál az 52+500 tkm szelvényben. Az előntött terület 32000 ha-ra rúgott, Tivadar, Gulács, Jánd, Gergelyi, Tákos károsodott. Összedőlt 423 lakóház, 11 híd, sérült 277 ház. Az összes kár 70 millió Ft volt, amiből a mezőgazdasági kár 40 mFt. Vízügyi szervezés miatti átvágás 34+150 szelvényben Tiszaköröd felett történt. (Szlávik 2003) A víz lefolyása nagyon hasonlított a 2001. évihez. Meg kell jegyezni, hogy két helyen Tivadar felett az 53+770 és az 54+310 szelvényekben úgy alakult ki átömlés, hogy gátszakadás nem következett be.

## A TÖLTÉS ANYAGA

A vizsgált kereszt-szelvényekben mind a töltés anyaga, mind a felszín közeli altalaj anyaga erősen kötött talaj volt, 64 %-ban kővér agyag, a maradék közepes agyag. Szemeloszlási vizsgálat végzésére nem volt igény. A kötött talajokat a Casagrande-féle képlékenységi grafikonban ábrázoltuk, feltüntetve a korábbi előírt határértékeit a töltésbe építhető agyagokra (2. ábra). A mai előírások szerint (MSz 15290 Vízépítési földművek tömörségi előírásai) csak a beépített föld 2/3-a, ami korlátozás nélkül beépíthető a töltésbe. De az 1888. évi árvíz után, amikor a töltés a profilját elnyerte, ilyen előírás nem volt. Mint ahogy arra sem volt előírás, hogyan kell a töltést építeni.



2. ábra. A feltárt talajok helye a Casagrande-féle képlékenységi grafikonban

Figure 2. Location of investigated soils in the Casagrande plasticity diagram

A töltés anyagából két Proctor-vizsgálat készült (1. táblázat). Megállapítható, hogy a töltés anyaga valóban jó minőségű az osztályozó jellemzők alapján, azonban nagyobb probléma a gátszakadások szempontjából a töltés anyagának állapotával volt.

1. táblázat. A töltés anyagából készült Proctor-vizsgálatok  
Table 1. Proctor tests from the dike material

No.	Megnevezés	I <sub>p</sub> (%)	w <sub>opt</sub> (%)	ρ <sub>dmax</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
1	Közepes agyag	29,4	18,5	1,73
2	Közepes agyag	22,3	14,6	1,81

A töltéscsúszás technológiájának szabályozására csak a XX. század közepén készültek az első előírások, amik azóta tökéletesednek. De hogyan is épültek a töltések a XIX. században? Mind a nyomvonalazással, mind az építés technológiájával kapcsolatban több olyan gyakorlat volt, melyet a kivitelezés fejlődése megváltoztatott. Azonban a töltések már ott álltak 2001-ben, adottságnak kellett tekinteni. Az töltéscsúszás technológia legfontosabb eleme a kézi

földmunka volt. Ennek következtében helyi anyagot kellett használni, ami sokszor azt jelentette, hogy túlságosan nedves talaj került beépítésre a gátba. Rendszerint az anyagnyerőhely méretének csökkentése érdekében a talajvízszintig (esetleg az alá is) mentek az ásással. Több más tényező mellett a másik legfontosabb hibaforrás a beépített anyag tömörítésének elmaradása volt. A tömörítés (a korabeli szóhasználat szerint a furkózás) 10 %-al növelte a köbméterenkénti töltéscélségi költségeket, aminek következtében sok helyen elmaradt. Így azután, mint látjuk a továbbiakban numerikusan is bemutatva, a töltés anyagának állapota kívánni valót hagyott maga után.

## A TÖLTÉS ANYAGÁNAK ÁLLAPOTA

A töltés geometriája alapján megállapítható, hogy kis keresztmetszetű, magasság hiányos töltés szakadt át. A szakadás után azonnal megkezdett talajmechanikai vizsgálatok alapján számszerűsíteni lehetett a töltést alkotó talajok állapotát. A töltés még nem tudott újra kiszáradni, tehát azt lehet mondani, hogy még telített, de legalábbis kvázi telített volt a mentett oldal talaja.

A vizsgálatok szempontjából a felső 1,1-1,5 méter vastag réteget (mint felszín közeli helyeket) és az alatta levő töltésanyagot önkényesen kettéválasztva vizsgáltuk (2.-4. táblázatok).

2. táblázat. A víztartalom meghatározása statisztikai elvek alapján az altalajban, valamint a felszín közeli és a mélyebb töltés rétegekben

Table 2. Determination of water content based on statistical principles in subsoil and near-surface and deeper embankment layers

	Felszín közel	Mélyebben	Altalaj
Minták száma	108	102	58
Legnagyobb adat	38,0	35,8	33,5
Legkisebb adat	23,5	22,1	20,0
Átlag	30,72	29,24	25,16
Szórás	2,64	3,14	3,20
Variációs tényező	0,09	0,11	0,13

3. táblázat. A száraz sűrűség meghatározása statisztikai elvek alapján az altalajban, valamint a felszín közeli és a mélyebb töltés rétegekben

Table 3. Determination of dry density based on statistical principles in subsoil and near-surface and deeper embankment layers

	Felszín közel	Mélyebben	Altalaj
Minták száma	108	102	58
Legkisebb adat	1,23	1,30	1,35
Legnagyobb adat	1,55	1,60	1,74
Átlag	1,41	1,46	1,56
Szórás	0,063	0,073	0,094
Variációs tényező	0,045	0,050	0,060

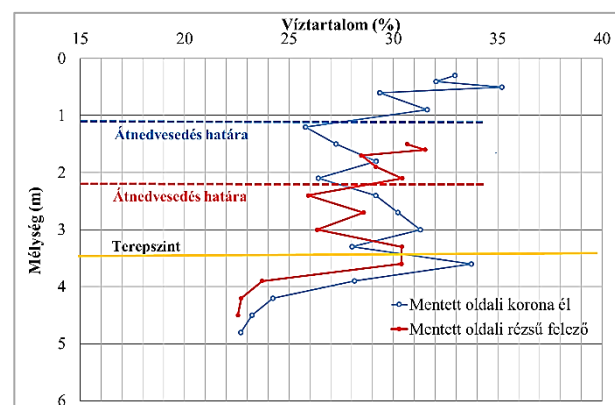
Ugyancsak elkülönítve kezeltük az altalajt. A töltés anyagának állapotjellemezésére több, mint megfelelő az izotópos szondázás, mely különböző izotópok alkalmazásával a talajról a lassú neutronok és a gamma sugárzás visszaverődését mutatja. Ezekből kalibrációval a talaj víztartalma és nedves sűrűsége meghatározható. Egy-egy keresztmetszvényben két szondázási függély volt, egy a mentett oldali koronaélben, és egy pedig a mentett oldali rézsűfelezőben. Az izotópos szondázás segítségével nagy pontossággal meghatározható a talaj víztartalma és a száraz

sűrűsége. Tekintettel arra, hogy ezen adatokból a talaj összes állapotjellemezője (telített sűrűség, hézagterefogat, fázisos összetétel, hézagtenyező stb.) már meghatározható, ezáltal azok már nem képeznek külön független ismeretlent. Ezért csak a víztartalom és a száraz sűrűség változásával foglalkozunk jelen közleményben a mondanivaló alátámasztására.

4. táblázat. A tömörségi fok meghatározása statisztikai elvek alapján az altalajban, valamint a felszín közeli és a mélyebb töltés rétegekben

Table 4. Determination of the degree of compaction based on statistical principles in the subsoil and near-surface and deeper embankment layers

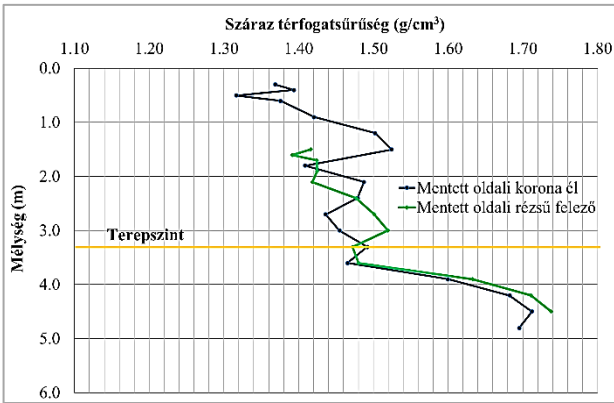
	Felszín közel	Mélyebben	Altalaj
Minták száma	108	102	58
Legkisebb adat	0,67	0,70	0,74
Legnagyobb adat	0,85	0,88	0,95
Átlag	0,77	0,80	0,86
Szórás	0,034	0,040	0,051
Variációs tény.	0,045	0,050	0,060



3. ábra. A víztartalom változása és az átmedvesedés határa 54+353 tkm szelvényben a mentett oldali koronaélben és a mentett oldali rézsűfelezőben készült izotópos vizsgálatok alapján (Megjegyzés: Az altalajba érve a víztartalom változása tendenciósus.) Figure 3. Changes in water content and wetting limit in the 54 + 353 km section based on isotopic measures at the protected side crown edge and the protected side slope bisector (Note: Reaching the subsoil, the change in water content is tendentious.)

Egy keresztmetszvényben, két függélyben a víztartalom változását a 3. ábra mutatja. A tendenciát követve az mondható el, hogy a terepszinten jelentkező víztartalom a töltésben lefelé haladva csökken, és a töltés talpánál van egy újabb növekedés. Ezekből arra lehet következtetni, hogy valós a földmű felső részének a lazulása és átalakulása az atmoszférikus hatásokra. Az is valószínűsíthető, hogy a töltés alsóbb részénél azért alacsonyabb a víztartalom, mert például az önkonzolidáció is szerephez jutott.

Bizonyosan a talpszivárgásra – és ennek következtében kialakuló átmedvesedésre – utal a terepszint közelében kialakult víztartalom növekedés. Ez alatt a víztartalom az altalaj várható értékére csökken, még hozzá mindkét függélyben hasonlóan. A 3. ábra jól reprezentálja a függőlegesen kialakuló víztartalmi változásokat, azonban a gát egyes részeinek jellemzésére a statisztikai feldolgozás még pontosabb képet nyújt (5. ábra és 1. táblázat).



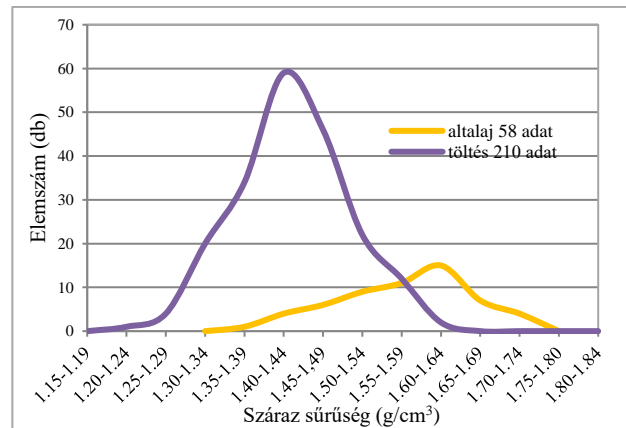
4. ábra. A száraz térfogatsűrűség változása a Tisza j.p. 54+353 tkm szelvényben a mentett oldali koronaélben és a mentett oldali rézsűfelezőben készült izotópos vizsgálatok alapján  
Figure 4. The change in dry bulk density in the Tisza right side 54 + 353 km section based on isotopic measures in the protected side crown edge and protected side slope bisector

A feltárásakor azonosított víztartalmi értékek lényegesen alacsonyabbak, mint a talaj folyási határa, ami önmagában nem is csoda, hiszen a méréseket olyan helyről vették, ami nem suvadt le. Mindenképpen valószínűsíthető, hogy a lesuvadt részen még magasabb lehetett a víztartalom. Az a folyamat, hogy a rézsűn lévő talaj lefolyt, és sárszerűen leegyző alakban szétterült a ténnyel párosul, hogy ez alacsonyabb víztartalomnál következett be, mint az ott lévő agyag folyási határa. Meg kell jegyezni, hogy ráadásul a folyási határnál dinamikusan is „rágástünk” a folyás kialakulására. Mindkét esetben egy közel hasonló sarazási folyamat játszódik le. Ez alapján azonban kétes megállapítás lehet kijelenteni, hogy a lefolyt rézsű anyagának víztartalma elérhette volna, vagy akár nagyon megközelítette volna a folyási határ víztartalmi értékét. Ugyanakkor az is megállapítható, hogy a le nem suvadt részen a telítettség mindenhol 90 % felett volt, vagyis a telítettséghez 3-5 % vizet tudott volna még felvenni a talaj. Ha megnézzük a víztartalom sűrűség görbét (6. ábra) megállapítható, hogy a talajminták víztartalma  $w=20-38\%$  között változott, és egy 35-36 %-os víztartalmú talajnál is csak mintegy  $w=40\%$ -ra adódik a telítettségi víztartalom. Tekintettel arra, hogy a 2. ábra szerint a feltárt talajminták folyási víztartalma  $w_L=45-70\%$  között változott. Vagyis telített állapotban is ez a víztartalmi érték a csak a folyási határ víztartalmának mintegy 60-70 %-a volt. Tehát valószínűsíthető, hogy a rézsű állékonyságvesztése idején a víztartalom nem hozható közvetlen közelébe a folyási határ víztartalmával. De hangsúlyozni kell, hogy jelen gondolatmenet, ez a számítás a helyben maradt rétegek vizsgálata alapján készült, hiszen a lesuvadt talajt már nem lehetett vizsgálni.

Ugyanabban a keresztmetszvényben lévő két függvényben a száraz térfogatsűrűség értékének változását is nyomon követhetjük a mélység függvényében (4. ábra). A felszín közeli alacsony sűrűségek, a  $\rho_d < 1,4 \text{ g/cm}^3$  értékek többnyire a felszín alatti 1 méteres mélységben fordulnak elő. Ugyanakkor a töltés altalajában a száraz sűrűség határozott növekedést mutat.

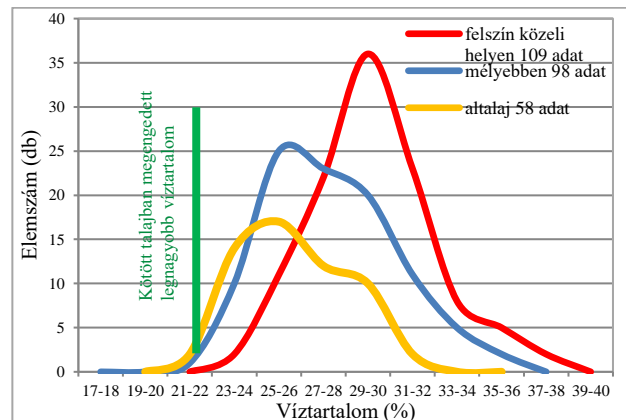
A korabeli töltés keresztzállítással épült, vagyis a töltésbe az előtérből vett talaj került bedolgozásra. Ha összehasonlítjuk a töltés és az altalaj száraz sűrűségét, megállapítható, hogy az töltésbe került anyag  $\Delta\rho = 0,10 - 0,24 \text{ g/cm}^3$  értékkel (átlagosan  $0,13 \text{ g/cm}^3$ -el) lett lazább a tömörítés elmaradásának következtében (5. ábra), 110 évvel

a töltés építése után. A 7-9 %-os lazulás már elég nagy érték a talajmechanikában, hogy lényeges talajfizikai jellemző változást okozzon.



5. ábra. A töltés és az altalaj száraz sűrűségének összehasonlítása  
Figure 5. Comparison of dry density of embankment and subsoil

A beépítéskori lazulás következtében a több pórus könnyebben tud vízzel telítődni, a nagyobb hézagteret elősegíti a talaj telített állapotának a gyorsabb kialakulását. A nagyobb hézagteretű telített állapotban nagyobb víztartalom is tartozik. A víztartalom értékének statisztikai feldolgozása alapján megrajzolható az altalaj, valamint a felszín közeli és a mélyebb töltés rétegek empirikus sűrűség görbéje (6. ábra).



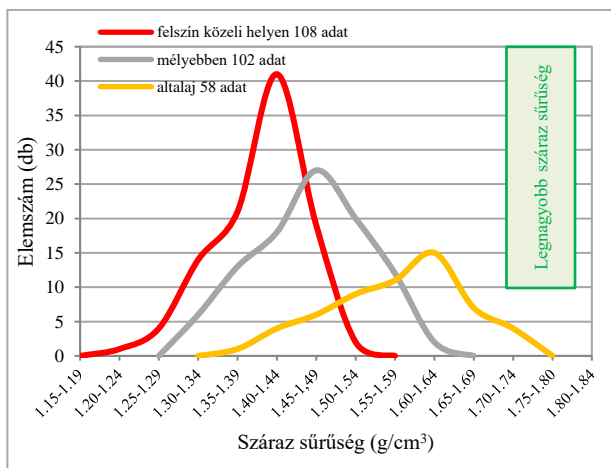
6. ábra. A víztartalom empirikus sűrűség görbéje az altalajban, valamint a felszín közeli és a mélyebb töltés rétegekben  
Figure 6. Empirical density curve of water content in subsoil; near-surface and deeper embankment layers

A töltés külső burka, a felszín közeli mérési helyek víztartalma volt a legmagasabb és az altalajé a legalacsonyabb. Már az itt tapasztalt különbségek is számottevőek és mutatják a gát különböző részei közötti eltéréseket. Az egymáshoz való viszony egyértelmű a 6. ábra és a hozzá tartozó 2. táblázat alapján. A 2. táblázatban és a további táblázatokban a szórás és a variációs tényező értékét óvatos becslésnek kell tekinteni, ugyanis a talajjellemzők nem normális eloszlásúak.

A 6. ábrán feltüntettük az MSz 15290 által kötött talajokra megengedett maximális víztartalmat, melyet árvízvédelmi gátba lehet beépíteni. A víztartalmi érték korlátozását kötött talajok esetén több szempont is indokolja, a tömöríthetőség, a zsugorodás duzzadás, a töltésrepedések

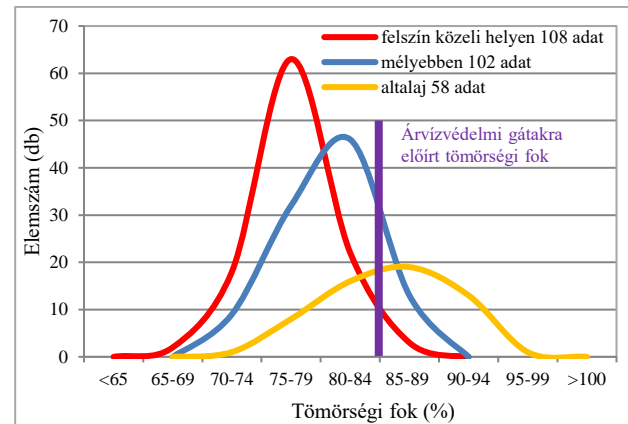
megjelenése elleni küzdelem. A  $w = 22\%$  víztartalomra csökkentése a beépíthető anyagnak nem túl erőszakos jogszabályi háttér, azonban betartása a mai kor távzállítással történő építésénél több beruházásnál is jelentős anyagválogatási problémát jelent. Ugyanakkor, ha az árvízvédelemben csapadék mentes évek következnek, - és az egykori beépítési víztartalom meghaladta a  $22\%$ -os értéket - a kötött talajú töltéseknél, különösen az erősen kötött talajú töltéseknél – mint amilyen a közlembényben vizsgált Tarpa-Tivadari gát is (2. ábra) - repedések megjelenését valószínűsíti. A 6. ábra alapján mindhárom vizsgált gátrész esetén lényegesen túlhaladja a szabvány készítése idején konszenzussal meghatározott víztartalmi értéket. De hangsúlyozni kell, hogy az 1888. évi árvíz után épült töltésnél nem kérhetünk számon egy 1999. évi szabványt, másrészt előírászerűen maximum huszonek százalékos víztartalommal az árvízvédelmi töltésbe beépített talaj sem telített, valamennyi erősen korlátozott mennyiségű vizet még fel tud venni egy lassú kapilláris úton történő nedvesítés hatására. Tudni kell azonban, hogy a kötött talajok nyírószilárdsága jelentősen változik a víztartalom hatására. Ezért fontos a töltésben azonosított víztartalom, olyannyira, hogy a töltés agyag mintái között gyakorlatilag nem is volt olyan, amelyiknek a víztartalma  $w < 22\%$  lett volna (6. ábra).

A száraz sűrűség azért jó jellemzője a talaj állapotának, mert nem függ a víztartalomtól. A gát három részénél a száraz sűrűség empirikus görbéje (7. ábra) azt mutatja, hogy az altalaj a legmagasabb, és a töltés külső héja a legalacsonyabb száraz sűrűség értékkel rendelkezik. Ez fogalmazódik meg numerikusan a 3. táblázatban is.



7. ábra. A száraz sűrűség empirikus görbéje az altalajban, valamint a felszín közeli és a mélyebb töltés rétegekben (Megjegyzés: A legnagyobb száraz sűrűség az 1. táblázat szerinti.)  
Figure 7. Empirical curve of dry density in subsoil and near-surface and deeper dike layers  
(Note: The maximum dry density is shown in Table 1.)

A tömörség értékek segítenek a sűrűség értékek megértésében, ugyanis a tömörség értékek jobban átmentek a műszaki köztudatba, vagyis a száraz sűrűség kevésbé ismert értékei helyett jól alkalmazható a szemléltetésre a tömörségi fok nagysága. A tömörségi fok nem más, mint a beépítési száraz sűrűségnek, a Proctor-vizsgálatból meghatározott maximális száraz sűrűséggel történő redukciója. Ez alapján a görbék menete (8. ábra) hasonló a 7. ábra görbéjéhez.



8. ábra. A tömörségi fok eloszlása az altalajban, valamint a felszín közeli és a mélyebb töltés rétegekben  
Figure 8. Distribution of the degree of compaction in the subsoil and in the near-surface and deeper embankment layers

Az árvízvédelmi gátaknál kötött talajokra meghatározott legalacsonyabb Proctor tömörségi fok  $T_{rp} = 85\%$  mentett oldali beépítés esetén. Ezt az értéket a töltés felszín közeli részének  $3\%$ -a, a mélyebben lévő résznek  $13\%$ -a elégti ki! Ha az altalaj is épített szerkezet volna, csak a  $40\%$ -a nem elégtene ki az előírást.

A talaj állapotjellemzőket összefoglalva, azt lehet mondani, hogy egy túlságosan magas víztartalmú, a nagyon lazánál is kisebb sűrűségű töltéstől nem is lehetett másfajta viselkedést várni túlterhelés esetén.

## ÖSSZEFOGLALÁS, MEGÁLLAPÍTÁSOK

A tönkremenetelhez meglévő adottságok és közvetlenül kiváltó tényezők adhatók meg. A meglévő adottságok között ki kell emelni a töltés laza szerkezetét (amit alacsony sűrűséggel, ennek következtében alacsony tömörségi fokkal jellemezhetünk). A laza szerkezet következménye a nagy hézagtényező, és ennek eredménye telített (vagy kvázi telített állapotban) a hézagokat kitöltő víz mennyiségének magas értéke, a magas víztartalom. A töltés (és különösen a külső kérgének) víztartalma megnőtt a gátszakadásokat megelőző napok intenzív esőzése miatt, a laza agyag telítődött. A koronán, illetve a nyúlgacon átbukó víz csak tovább nedvesítette a mentett oldali rézsút. Ez az átömlés adható meg a gátszakadásnál bemutatott tönkremeneteli mechanizmust közvetlenül kiváltó tényezőként.

A XIX. századi töltésépítési technológia következtében a Tarpa és Tivadar közötti töltés talajának állapotjellemzői egy nagyon laza, könnyen átázó, rossz minőségű földmunka képét mutatta a talajmechanikai vizsgálatok alapján. A két legfontosabb tényezőt – a magas víztartalommal történő laza beépítést és a tömörítés elmaradását - kiemelve fel kell hívni a figyelmet arra, amit sokszor manapság is elfelejtene, hogy a földmű tömörítése javítja a talajfizikai jellemzőket, a rézsű nem folyt volna le, mint egy kupac sár.

Az alapjaiban rossz minőségű töltésnél a töltés öregedésével kapcsolatos, a földmunkában kialakult változások eredményét mutattuk be numerikusan. Közismert tény az árvízvédelemben, hogy a kötött talajú töltés felső  $0,6-0,8$  méter vastag rétege előregszik, az atmoszférikus hatásokra lazább lesz. A tarpai és tivadari gátszakadások környezetének vizsgálata jó lehetőséget biztosított arra, hogy a

lazább szerkezetet számszerűsítünk. Úgy véljük, hogy a több, mint 260 mérési adat elegendő számosságú az altalajnál, és a töltés két részénél a talaj állapotjellemzőinek a számszerűsítésénél használt statisztikai módszerek alkalmazásához. Numerikusan jellemeztük az altalaj és a töltés részeinek a tulajdonságát és annak várható hatását a talaj viselkedésére.

A töltés öregedését elősegítő atmoszférikus hatások közül a legfontosabbak a következők (talán fontossági sorrendben): száradás-nedvesedés (zsugorodás-duzzadás), fagy hatása, anyagnyerőhelytől eltérő talaj szerkezet, a növényzet – a növények gyökereinek - hatása, a csapadéknak és a folyóvíznek az anyagnyerőhely talajvizétől eltérő kémiai összetétele, hőmérséklet ingadozás, a terhelés nagysága stb. Mindezek együttesen a töltés felső 60-80 cm vastag rétegének a mélységgel csökkenő mértékű átalakulásához vezetett. Ezen változások a talaj állapotjelzőin keresztül jelen közleményben nyomon követhetőek. A felszín közeli nagyobb víztartalom a feltételezett telítettség mellett nagyobb hézagterefogatot és hézagtéynyezet mutatja. Hasonló mondható el a száraz sűrűség értékéről is.

Jól elkülöníthető az atmoszférikus hatásoknak kitett töltésrész talaj állapotjellemzőinek eltérése a töltés maradék részétől. Bár a számszerűsítés alapján ez a hatás kisebbnek tűnik, mint a talaj helytelen beépítése miatti hatás. A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a 110 éve épült töltés semmilyen részlete nem felelt meg a mai töltésképzési előírásoknak.

A földmű suvadása rendszerint merev testként elmozduló földtestek közötti csúszólap kialakulásával megy végbe. Ilyenkor az elmozduló földtest rendszerint valamilyen megtámasztást még nyújt a megmaradt töltés testnek. Nem így volt ez a Tarpa és Tivadar között lezajlott suvadásoknál, ahol a mentett oldali részsűnek egy új tönkrementeli mechanizmusát ismertük meg. A mentett oldali koronaélelől függőleges fallal sárszerű anyagként pillanatok alatt csúszott le a mentett oldali részsű, és az a mentett oldali terepszinten legyező alakban szétterült (1. és 2. kép).

## IRODALOM

*Borovszky S.* (1905). Magyarország vármegyéi és városai, Zemplén Vármegye, Vízszabályozás. Írta: gróf Mailáth József: Folyószabályozás, ármentesítés, belvízrendezés.

## A SZERZŐ



**NAGY LÁSZLÓ** 1956-ban született Nyíregyházán, iskoláit Debrecenben végezte. Első diplomáját 1980-ban szerezte a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán. Ugyanott 1984-ben szakmérnöki államvizsgát tett. Munkahelyei a vízügyi szakterülethez kapcsolódtak: Vízügyi Tervező Vállalat, Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Központ, Árvízvédelmi és Belvízvédelmi Központi Szervezet, Országos Vízügyi Főigazgatóság. 2003 óta a Műegyetemen oktat, kutat. 2006-ban megvédte PhD disszertációját, kilenc évvel később habilitált. 2015-ben a geotechnika és az árvízvédelem határterületén végzett munkásságáért a Magyar Köztársaság Érdemrend Lovagkereszt kitüntetését kapta. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja. 2016 májusától a Hidrológiai Közlemények egyik szakszerkesztője.

*Fazekas L.* (2001). Összefoglaló jelentés. A 2001. évi rendkívüli márciusi árvíz a FETIVIZIG területén. Nyíregyháza.

*Kész P.* (2011). Folyószabályozás Bereg vármegyében, (1846–1914). Szabolcs-Szatmár-beregi levéltári évkönyv, 19. szám, pp. 137-158. ISSN 2064-5732.

*Kisházi P.* (2001a). Felső-Tisza j.o. 54+353 tkm - 55+585 tkm szakasz talajmechanikai feltárása. 1. sz. tömörségmérési jegyzőkönyv. KÖVIZIG, Gyula. Mérnöki Iroda. 2001.03.27.

*Kisházi P.* (2001b). Felső-Tisza j.o. 54+828 tkm - 55+120 tkm szakasz talajmechanikai feltárása. Vizsgálati jegyzőkönyv. KÖVIZIG, Gyula. Mérnöki Iroda. 2001.03.27.

*Kovács D. (szerk.)* (1978). Árvízvédelem, folyó- és tószabályozás, vízi utak Magyarországon. Országos Vízügyi Hivatal, Budapest. p. 734, ISBN 963 602 149 X.

*Kvassay J.* (1900). A Duna- és Tisza-völgyi ármentesítő társulatokra vonatkozó statisztikai adatok. Pátria irodalmi vállalat és nyomdai részvénytársaság, Budapest.

*Nagy L.* (2003). A mentett oldali részsű csúszása Tarpa mellett. Vízügyi Közlemények külön szám. 1. kötet, pp. 193-205.

*Nagy L.* (2017). Gátszakadások a Kárpát-medencében, Gátszakadások kialakulásának körülményei, Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest, p. 412, ISBN 978-615-5825-00-2.

*Nagy L.* (2019). Gátszakadások a Kárpát-medencében, Gátszakadások következményei, Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest, p. 565, ISBN 978-615-5825-01-9.

OL-K 184-1889 24 cs. Országos Levéltár, K 184 fond, 24. csomag.

*Szlávik L.* (2003). Az elmúlt másfél évszázad jelentősebb Tisza völgyi árvizei és az árvízvédelem szakaszos fejlesztése. Vízügyi Közlemények. 1998-2001. évi árvízi külön füzetek. IV. kötet.

*Ullrich V., Révy G.V., Kiss K. és Geöcze S.* (1896). A Bodrogi Tiszaszabályozó Társulat monographiája 1846-1896. Szerkesztő: gróf Mailáth József, Kiadó: Gróf Mailáth József - Légrády Testvérek, Budapest, p.155.

*Zawadowski, A.* (1891). Magyarország vizeinek statisztikája I.-II., M. Kir. Statisztikai Hivatal, Budapest.

## Gondolatok a síkvidéki vízgyűjtők összegyülekezési folyamatairól I. - Belvízelvezetési elméletek fejlődése a gyakorlati tapasztalatok tükrében

Kozák Péter

Alsó-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság igazgatója, a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Karának adjunktusa. (kozakp@ativizig.hu)

### Kivonat

Magyarország területének mintegy 50%-a síkvidéki vízgyűjtő. A síkvidéki vízgyűjtők jellemzője, hogy a természetes összegyülekezési folyamatok speciális körülmények között valósulnak meg. A vízgyűjtő természeti adottságai révén az összegyülekezés folyamata általában zavart, hiszen a csekély terepesés által biztosított helyzeti energia különbség, már a lokális terepegyenetlenségek révén felémésztődik. Az összegyülekezést továbbá nehezítik olyan hatások, melyek egyrészt a vízgyűjtő átalakításával kapcsolatos emberi beavatkozások eredménye, másrészt akár a vízelvezető rendszer működése következtében állnak elő és akadályozzák a vizek elvonulását. Hazánk kiváló vízügyi mérnökei átfogóan közelítették meg a kérdéskört és adtak javaslatok a síkvidéki összegyülekezés vizsgálati eljárásaira. Ezen eljárások megalkotása óta, azonban a síkvidéki vízgyűjtők jelentős mértékben megváltoztak. A változások következtében egyrészt megváltozott a területhasználat jellege, másrészt a számos jelentős antropogén hatás következtében új terhelések léptek fel az összegyülekezés folyamatában. Elérkezett az idő, hogy a korábbi összegyülekezési elméletek felülvizsgálat alá kerüljenek a síkvidéki összegyülekezési tapasztalatok, a síkvidéki belvizek tükrében. A vizsgálat aktualitását támasztja alá, hogy a belvízi előntések (mint terhelések) megszűnésében, a gyakorlati tapasztalatok alapján az antropogén hatásoknál (pl.: elvezető rendszer működtetése) általában nagyobb mértékűek a természeti tényezők (pl.: párolgás, beszivárgás) hatásai. Ezek a jelenség leírásával foglalkozó korábbi elméletekben és a tervezési irányelvekben nem voltak hangsúlyosak. A belvízi tapasztalatok, mintegy 30 éves időtávlatra visszatekintően nem támasztották alá az elvezető rendszer hatékonyságát. A belvíz jövőbeni hatékony kezelésének érdekében nélkülözhetetlen, hogy belvíz keletkezésének, mint a síkvidéki összegyülekezési folyamatok különleges fajtájának leíró elméleti háttere felülvizsgálat alá kerüljön. Jelen dolgozat keretein belül a vízelvezetési elméletek áttekintésére és a belvízi eseményekre alapuló felülvizsgálatára nyílik lehetőség.

### Kulcsszavak

Síkvidéki összegyülekezés, belvízképződés, vízelvezető rendszer, vízelvezetési potenciál, gátolt összegyülekezés.

## Thoughts on run-off processes of lowland river basins I. - Development of excess surface water drainage theories in the light of practical experiences

### Abstract

Almost 50% of Hungary's territory is flatland river basin. The characteristic of flatland river basins is that the natural accumulation processes take place under special conditions. Due to the natural qualities of the river basin, the process of accumulation is usually disturbed, as the difference in potential energy provided by the low gradient is consumed by local terrain irregularities. Accumulation is further aggravated by impacts that, on the one hand, are the results of human interventions related to the transformation of the river basin, and on the other hand, occur during the operation of the drainage system and hamper the drainage of waters. The excellent water engineers of our country comprehensively approached the issues and gave suggestions on the examination procedures of flatland accumulation. However, flatland river basins changed significantly since the preparation of these procedures. As a result of the changes, the character of land use changed and, due to a number of significant anthropogenic impacts, new impulses occurred in the process of accumulation. The time has come for previous accumulation theories to be reviewed in light of flatland accumulation experience and flatland inland excess waters. The actuality of the examination is supported by the fact that, based on practical experience, the effects of natural factors (e.g. evaporation, infiltration) are generally greater than anthropogenic effects (e.g. operation of drainage systems) in the termination of inland excess inundation (as impulses). These were not emphasized in previous theories describing the phenomenon, and in the design guidelines. Inland excess water experiences, over a period of about 30 years, did not support the effectiveness of the drainage system. In order to ensure the effective management of inland excess water in the future, it is essential that the theoretical background describing the formation of inland excess water as a special type of lowland accumulation process be reviewed. Within the framework of this publication, it becomes possible to review drainage theories and review them based on inland excess water events.

### Keywords

Flatland accumulation, inland excess water formation, drainage system, drainage potential, inhibited accumulation.

### BEVEZETÉS

A belvizek komplex folyamatok eredményeként keletkeznek a síkvidéki vízgyűjtőkön. A szakirodalmi megközelítés és a vízügyi gyakorlat a jelenséget a síkvidéki vízgyűjtőkkel kapcsolja össze, azonban a "vízbő" időszakok, a "főlös vizek" a dombvidéki vízgyűjtők esetében is jelentős gondokat okozhatnak. Ezen területeken jellemzően azonban a lefolyási szempontból kedvezőbb felszíni lejtések

következtében az összegyülekezett vízmennyiségek gyorsabban levonulnak, mint a kisebb esésekkel rendelkező területeken. Az összegyülekezés következtében a dombvidéki vízgyűjtőkön nem tartózkodik hosszabb ideig az összegyülekezett vízmennyiség. Fontos megjegyezni, hogy ilyen adottságú területeken épp a kialakuló nagy levonulási sebességek és az azok következtében a befogadóba bekövetkező intenzív vízszintemelkedések okoznak problémákat.



A síkvidéki vízgyűjtőkön a felszíni összegyűlekezés vizsgálata és annak leírása, valamint a síkvidéki vízvezető rendszerek tervezése jelentős szakirodalmi háttérrel rendelkezik (*Salamin 1956, Kienitz 1969, 1974, Pálfi 1986*). A vízgyűjtőkön összegyűlekezett víztömegeket a kifejlesztett számítási módszerekkel meg kellett határozni. A különböző módszerek alkalmazásával kerültek meghatározásra a vízgyűjtőkön összegyűlekezett vízmennyiségek, melyet a vízgyűjtőn megépített elvezető rendszerrel károkázások nélkül el kell vezetni. A síkvidéki összegyűlekezés meghatározó állapota a belvizek kialakulása. A belvizekre, mint a vízgyűjtők szélsőséges üzemállapotára megkülönböztetett figyelem irányul, hiszen ekkor az összegyűlekezés folyamata egy olyan szélső helyzetet teremt, amely jelentős károkat eredményez.

Jelen dolgozat keretein belül a *síkvidéki vízrendszerek összegyűlekezési és belvízelvezetési elméletei kerülnek áttekintésre*, ütköztetve a napjaink elvezetési gyakorlatának tapasztalataival. Az elméleti háttér és a gyakorlati tapasztalatok alapján már *Oroszlány István 1976*-ban megjelent tanulmányában közölte (*Oroszlány 1976*): "A vizsgálati adatok igazolják, hogy a képződött felszíni vizeknek a növények tűrési ideje alatt való elvezetése teljesíthetetlen feladat. Különösen igaz ez a tény a vegetációs időszakban, kiemelten pedig az öntözött területeken". A síkvidéki vízrendezési feladatok több évtizedes üzemeltetési tapasztalati alapján megállapítható, hogy ezen ellentét az eltelt 44 év alatt, napjainkig sem került feloldásra. Ahhoz, hogy az ellentmondást fel lehessen oldani, fontos, hogy a síkvidéki összegyűlekezés jelenségét leíró fontosabb elméletek elemzésre kerüljenek, a belvíz képződésének szempontjából.

## A BELVÍZ ELVEZETÉSÉVEL KAPCSOLATOS PROBLÉMÁK

A belvíz jelenségének megítélése már az alkalmazott definíciók sokféleségében is tetten érhető. Habár ugyanazon jelenség leírására törekednek, mégis az 50-et is meghaladja a szakirodalomban alkalmazott definíciók száma (*Pálfi 2001*).

Az árvízhez hasonlóan a belvíz is –jellemzően– csapadékból (hóléból vagy esőből) képződik, de a beszívargás után fennmaradó vízmennyiség nem folyik le rögtön, hanem a csekély esésű térszín kisebb-nagyobb terepmélyedéseiben összegyűlik, ott átmenetileg tározódik, azaz belvízi elöntéseket okoz. *Belvíznek nevezzük a sík területeken elöntéseket okozó, vagy a felszíni talajrétegeket telítő, természetes úton el nem távozó vizeket* (*Kozák 2006*).

A belvizek több genetikai típusát különböztetjük meg. A belvizek létrejöttének vizsgálata során a belvizek kialakulásának „útvonalai” vertikális és a horizontális útvonalakat jelenthetnek.

Az összegyűlekezési elméletek szolgálnak alapul a keletkező belvizek mennyiségének meghatározásának alapjául.

A belvíz összegyűlekezési szemléletű megközelítése alapvetően olyan állapotot jelent, amikor az összegyűlekezés következtében nagyobb víztömeg ( $q_{\text{évk}}$ ) jelenik meg, mint amely az elvezetés ( $q_{\text{táv}}$ ) során távozik az adott területről,  $q_{\text{évk}} > q_{\text{táv}}$ . A belvízképződés gyakorlati tapasztalati

azt támasztják alá, hogy a belvízképződés folyamatát alapvetően az összegyűlekezés és az elvezetés kölcsönhatásának dinamikája határozza meg, melyet az érkező és távozó víztömegek pillanatnyi értékei befolyásolnak. A belvizek képződését meghatározó irányok alapján megkülönböztethető összegyűlekezési típusú, felszívargó és az elvezetés által generált belvizeket. A valós terepviszonyok között a különböző belvíztípusok komplex módon is előfordulhatnak.

*Összegyűlekezési típusú belvizek* esetében a lokális felszíni mélyedésben a megjelenő vizek mennyisége meghaladja az onnan elfolyó, beszívargó, elpárolgó víz mennyiségét (*Rakonczai 2001*). Sík területeken számottevő felszíni lefolyás nincs, így jellemzően a talajadottságok és azok pillanatnyi állapota, valamint a relatív domborzati adottságok határozzák meg a belvízképződés menetét.

A *felszívargó belvizek* esetében a talajvíz szintjének megemelkedése eredményezi telített felszín közeli rétegekből a terepszint fölé kerülésével a felszíni elöntések kialakulását (*Zsemle és társai 2000*). A talajvizek ilyen jellegű mozgása bekövetkezhet, ha a talajvíz kapcsolatban áll magasabban elhelyezkedő területek talajvízeivel, vagy akár horizontális talajvízáramlások következtében is.

Az *elvezetések következtében létrejött belvizek* a belvíz elvezető rendszerek működési sajátosságai következtében alakulnak ki. Az elvezető rendszerek az érkező vízhozamokat nem tudják a keletkezés ütemében elvezetni (tekintettel a beépített elvezetési kapacitások korlátosságára) ezért azokat az aktuálisan rendelkezésre álló elvezetési potenciál ( $q_{\text{pot}}$ ) függvényében transzformálják. Eközben az elvezetési potenciált meghaladó vízhozamok tározódnak "kényszerülnek", mégpedig a  $q_{\text{pot}}$  helyétől kezdődően a folyásiránnyal ellentétesen kialakuló elöntések formájában (*Vágás 1989, Kozák 2006*).

A belvízképződés attól a ponttól indul meg, ahonnan az elvezetési potenciált ( $q_{\text{pot}}$ ) meghaladja az összegyűlekezés, vagyis  $q_{\text{évk}} > q_{\text{pot}}$ .

A belvízképződés szempontjából kiemelt figyelmet kell fordítani azon területekre, ahol semmilyen elvezetési lehetőség-irány nem áll rendelkezésre (lefolyástalan területek). Ezen területeknél a növénytermesztési területhasználat szempontjából fölös vizek elvezetése csak műszaki eszközökkel biztosítható (pl: drénezés). Itt az antropogén beavatkozás egyértelműen belvízcsökkentő hatású.

A műszaki gyakorlatban a belvíz kezelése során a szabadfelszíni (vagy talajcsövezett területeken megjelenő telített talajokból) elöntéseket (S) deriváljuk egy előzetesen meghatározott (rendelkezésre álló vagy feltételezett) hártárfeltétel ( $Q_M$ ) alapján elvezetendő vízhozammá (*Kozák 2016*). Az elvezetés ezen megközelítés alapján addig tart, amíg az elöntések (S) teljes mértékben meg nem szűnnek. A fenti ideális állapot csak elméleti körülmények között tekinthető relevánsnak, a gyakorlatban ennél sokkal komplexebb módon, több tényező hatásainak egyidejű érvényesülése mellett valósul meg a belvizek megjelenése és az elöntések megszűnése. A tapasztalatok alapján az elvezető rendszer működésének hatása a belvízi elöntésekben tározott víztömegek változásához csekélyebb mértékű,

mint ahogyan azt a gyakorlat kezeli (Kozák 2011, Kozma 2013). Ahhoz, hogy a rendelkezésre álló elvezetési kapacitások (pl.: szivattyútelepek, elvezető csatornák) igénybevétele, a lehető legnagyobb hatékonysággal segítse a belvízi elöntések által megjelenő kockázatok mérséklését fontos, hogy a belvíz jelenség megszűnését előidéző tényezők hatásai értékelésre kerüljenek.

A belvizek megszűnését és keletkezését ugyanazon természeti és antropogén hatások összessége határozza meg. A belvízi jelenség kialakulását befolyásoló természeti tényezők az alábbiak [A.]:

- Meteorológiai tényezők: hőmérséklet, csapadék, párolgás
- Domborzat: tengerszint feletti magasság, a terület tagoltsága, konvexitás,
- Talaj: vízáteresztő képesség, szerkezet, tározóképesség, fizikai féleség,
- Hidrogeológia: a talajvíz mélysége, vertikális és horizontális irányú mozgása,
- Földtani adottságok: talajképző kőzet, vízzáró réteg előfordulása.

A jelenség kialakulását befolyásoló antropogén tényezők az alábbiak [B.]:

- vízrendezés: belvíz-csatornázottság, melioráltság, a vízvezető hálózat pillanatnyi elvezetési potenciálja,
- földművelés: öntözés, termesztett növény típusa, talajművelés,
- belterületek növekedése, beépítettség változása, talajfelszín fedettségének növekedése.

Az, hogy a belvízi elöntések kialakulását, illetve megszűnését mely tényező, illetve mely tényezők egymásra hatása határozza meg mindig a helyi adottságok függvényében alakul ki. A belvízi elöntések az összegyülekezési folyamat eredményeként alakulnak ki. Az összegyülekezési folyamatok leképezésére szolgáló elméletek gyakorlati alkalmazhatóságát meghatározzák, hogy azok milyen mértékben igazodnak az természeti jelenség fizikai megvalósulásához. *Fontos megjegyezni, hogy az összegyülekezés és annak speciális megnyilvánulása (belvízképződés) sohasem statikus módon valósul meg.* Minden időpillanatban változik az összegyülekezés/belvízi elöntés kialakulását meghatározó tényezők szerepe, illetve minden esetben komplex módon fejtik ki hatásukat a természeti és antropogén tényezők. A belvizek keletkezését és megszűnését nem lehetséges statikus megközelítéssel vizsgálni, mert akkor épp a jelenség lényegét jelentő dinamikus hatások figyelembevételére nem lesz lehetőség. A dinamikus hatások figyelembe vételéhez megfelelő részletezettségű előntési adatsor, illetve annak feldolgozását biztosító számítás-

technikai eszközpark szükséges. Az összegyülekezési elméletek és belvizet leíró kezdeti tanulmányok készítőinek ezen háttér nem állt rendelkezésre, így kényszerűen alkalmazták a statikus leírást.

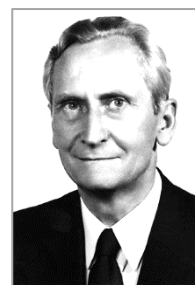
## A BELVÍZELVEZETÉS MEGHATÁROZÓ ELMÉLETEINEK ELEMZÉSE

Jelen dolgozat keretein belül csak a legmarkánsabb szakirodalmi munkák feldolgozására nyílik lehetőség. A feldolgozás a kiválasztott összegyülekezési elméletek vonatkozásában két kérdéskör vizsgálatát tűzte ki:

- A gyakorlati tapasztalatok alapján igazolhatók az összegyülekezési elméletekben megfogalmazott feltevések?
- Milyen mértékben alkalmazhatók általános érvényben a közölt megállapítások?

A jelenség komplex leírását számos szerző elemezte, azonban ezek közül négy „iskola-teremtő” szerző ilyen irányú munkásságát elemzi jelen tanulmány.

*Salamin Pál (1. kép)* a vízrendezési munkálatok végrehajtásának legnagyobb volumenének megvalósítását követően (az 1941 és 1942. évi belvízkatasztrófák tapasztalatai alapján) összegezte meghatározó tanulmányában a belvízrendezés gyakorlatának tapasztalatait az akkoriban kialakult - és napjainkban is mértékadó nagyságúnak tekinthető - belvízi elöntések kialakulása kapcsán. Tanulmányában (*Salamin 1942*) számos napjainkban is meghatározó jelentőségű megállapítást tett, de jelen tanulmány tárgyához kapcsolódóan a *"vízgazdálkodási egyenlet"* publikálása illeszkedik. Ezért annak gyakorlati alkalmazása kerül említésre. Vízgazdálkodási egyenlete megadta „valamely vízgazdálkodási szempontból kiragadott területen, meghatározott T idő alatt a fellépő vízkészlet változást az érkező és távozó vizek különbségeként”.



1. kép. Dr. Salamin Pál (1913-1984) (Forrás: [www.hidrologia.hu](http://www.hidrologia.hu))  
Photo 1. Dr. Pál Salamin (1913-1984)  
(Source: [www.hidrologia.hu](http://www.hidrologia.hu))

A jelenség kialakulásával kapcsolatosan kidolgozott egyenlete vízháztartási alapon közelítette meg a belvizek kialakulását, a hatótényezők széles körének figyelembevételével az alábbi formátumban:

$$C_1 + C_2 + H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 = E_1 + E_2 + E_3 + P_1 + P_2 + P_3 + K + \frac{dT1h}{dT1k} + \frac{dT2}{dT3} + \frac{dT4h}{dT4k} \quad (1)$$

ahol

$C_1$  – csapadék

$C_2$  – nem mérhető csapadék

$H_1, E_1$  – hozzáfolyás, elfolyás nyílt vízfolyásban

$H_2, E_2$  – hozzáfolyás, elfolyás felületi vízként

$H_3, E_3$  – hozzáfolyás, elfolyás földalatti vízként

$H_4$  – hozzáfolyás karsztvizekből

$H_5$  – hozzáfolyás mélyből feltörő vizekből

$P_1$  – párolgás szabad vízfelületekről

$P_2$  – párolgás talajról

$P_3$  – párolgás növényekről

$dT$  – tározott vízkészletek változása

$dT_1$  – tározott vízkészletek változása talajvízben  
 $dT_2$  – tározott vízkészletek változása termőtalaj hézagaiban  
 $dT_3$  – tározott vízkészletek változása talaj felszínén  
 $dT_4$  – tározott vízkészletek nyílt vizekben  
 $dT_k$  – káros tározódás  
 $dT_h$  – hasznos tározódás  
 $K$  – kémiai kötések.

Tanulmányában *Salamin* részletesen ismertette a belvizek keletkezésének egyes "üzemállapotait" a vízgazdálkodási egyenlet hatótényezői alapján:

- "csapadék jellegű belvizek",
- "felületi jellegű belvizek",
- "földalatti jellegű belvizek",
- "karsztos jellegű belvizek".

A *Salamin* által közölt egyenlet teljeskörűen írta le az összegyülekezés elméleti folyamatát. Az egyenletben valamennyi belvízgenetikai szempontból releváns természeti tényező hatása szerepelt a hatótényezők között. Az egyenlet gyakorlati alkalmazásához azonban egyszerűsítések alkalmazására volt szükség. Példaként kiemelhető, hogy az (1) egyenletben szerepelt a felszín alatti vizekkel kapcsolatos kölcsönhatás eredményeként jelentkező víztömeg ( $H_3$ ,  $H_4$ ,  $E_3$ ), azonban az ezen egyenletből származtatott – és a későbbiekben bemutatásra kerülő – méretezési eljárásokban csak közvetett, illetve semmilyen formában sem

$$C_1 + C_2 + H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 + H_7 + H_8 = E_1 + E_2 + E_3 + P_1 + P_2 + P_3 + K + \frac{dT_{1h}}{dT_{1k}} + \frac{dT_2}{dT_3} + \frac{dT_{4h}}{dT_{4k}} \quad (2)$$

ahol

$H_6$  – hozzáfolyás a vízelvezetési potenciál függvényében  
 $H_7$  – hozzáfolyás a földművelési potenciál függvényében  
 $H_8$  – hozzáfolyás a beépítettségi potenciál függvényében.

Az egyenlet kibővítésébe bevont tagok tartalmi kifejtése:

- $H_6$  – hozzáfolyás a vízelvezetési potenciál függvényében. A tag reprezentálja a vízrendezési infrastruktúra hatását az összegyülekezési viszonyokra. A gyakorlati tapasztalatok alapján a vízelvezető hálózat működésének következtében az elvezetés intenzitása lecsökkenhet, az elvezetés pillanatnyi potenciális értékét a terület vízrendezési műveinek sűrűsége, illetve a vízelvezető rendszerek pillanatnyi elvezetési viszonyai határozzák meg.
- $H_7$  – hozzáfolyás a földművelési potenciál függvényében. A tag reprezentálja az érintett vízgazdálkodási fennálló öntözési tevékenység, agrotechnológiai gyakorlat és beavatkozások hatásait, melyek a termesztett növénykultúrától és annak fenológiai státuszától függően változik. Az agrotechnológiai beavatkozások jelentősen befolyásolhatják az összegyülekezési folyamatokat. Jellemzően a növénytermesztés számára kedvezőbb viszonyok biztosítása a céljuk, azonban a gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy a nem kellő körültekintéssel végrehajtott beavatkozások (pl: mélyszántás elmaradása következtében keletkező „eketalp” stb.) nemhogy elősegítik, hanem kifejezetten hátráltatják kedvező vízgazdálkodási helyzet kialakulását.

lett figyelembe véve. Hasonló megállapítás tehető a párolgás ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ) értékével kapcsolatban is.

A síkvidéki vízgyűjtők esetében a felszíni összegyülekezési folyamatok – a csekély felszínesések következtében – csak a csatornától mért kis távolságra kiterjedően valósulnak meg, így a  $H_2$ ,  $E_2$  tagok nem tekinthetők relevánsnak.

A Szerző által közölt vízháztartási egyenlet széleskörű alkalmazására nyílt lehetőség, amely alapján méretezési segédletek, irányelvek készültek el. A belvizek keletkezésének és kezelésének későbbi gyakorlati tapasztalatai azonban ráirányították a figyelmet, hogy annak (1) egyenlete két szempontból kiegészítése indokolt:

1. Az egyenletben felsorolt tényezők skaláris értéke mellett azok iránya is fontos a belvizek keletkezése szempontjából. A tanulmány nem említi, hogy az egyes hatótényezők nem csak skalár értékükkel, hanem "előjelükkel" is figyelembe veendőek.
2. A levezetés további pontosításra szorul azzal kapcsolatban, hogy a terepi viszonyok között nem csak a természeti tényezők okozhatnak elöntéseket, hanem antropogén hatások is. Az antropogén hatások nem kerültek beemelésre az egyenlet tagjai közé, azonban a belvizek szempontjából hatásuk fontos.

A fentiek alapján a egyenlet kiegészítésre kerül a  $H_6$ ,  $H_7$  és  $H_8$  tagokkal:

- $H_8$  – hozzáfolyás dinamikája a beépítettség függvényében. Az összegyülekezés folyamatát a statikus és a dinamikus hatások összessége határozza meg. Azonban a vízgazdálkodáson végrehajtott antropogén beavatkozások az összegyülekezés dinamikáját jelentősen befolyásolták. Ezen hatások legmarkánsabban a belterületeken végrehajtott, a burkolt felületek növekedését megvalósító beavatkozások kapcsán jelenik meg. A burkolt felületek növekedése következtében az összegyülekezés sokkal gyorsabbá válik. A gyorsabb belterületi összegyülekezés a külterületi rendszerek irányába impulzus szerűen továbbítja a belterületekről érkező terhelést, melynek következtében a terhelést befogadó vízrendszerekben elvezetési problémák, elöntések keletkeznek.

Habár *Salamin* munkáját 1942-ben publikálta, azonban számos olyan – sajnálatosan napjainkban is helytálló – kérdést érintett, amelyekkel napjaink vízrendező mérnöke is, mint vádakkal kénytelen megküzdeni. Kiemelte például azon helytelen közvélekedés káros voltát, amely a belvíz levezető csatornahálózatot teszi felelőssé az Alföld "elsivatagosodásáért".

*Kienitz Gábor* (2. kép) munkássága többek között a belvíz keletkezés és az elvezetés rendkívül alapos vizsgálatát ölelte fel. Elméleti megközelítését (*Kienitz 1968*) fizikai alapon dolgozta ki.

$$x = \frac{ds}{dt} + q_1 + q_p + q_{sz} \quad (3)$$

ahol

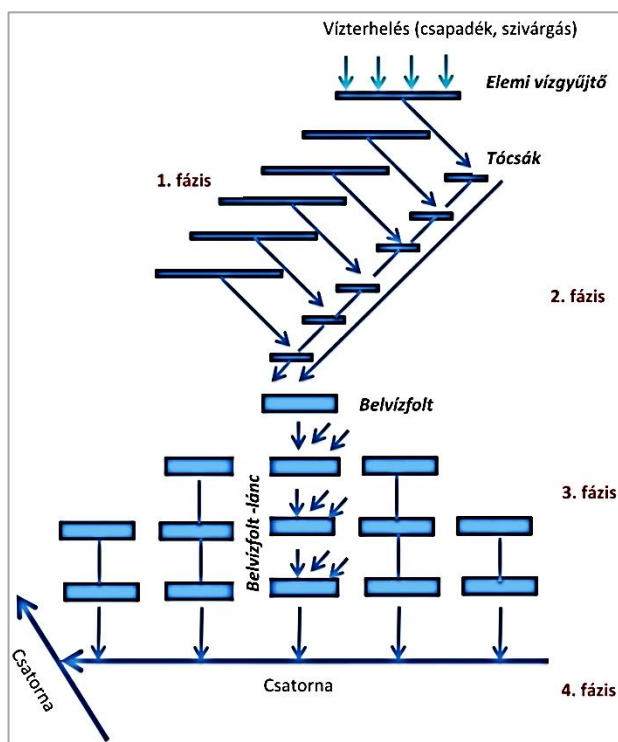
S – belvíz mennyiség  
 $q_l$  – lefolyás,  
 $q_p$  – párolgás,  
 $q_{sz}$  – beszivárgás.



2. kép. Dr. Kienitz Gábor (1930-2010) (Forrás: www.hidrologia.hu)  
 Photo 2. Dr. Gábor Kienitz (1930-2010) (Source: www.hidrologia.hu)

Kienitz munkájában a belvíz általános alapegyenletének megoldásához a belvízrendszer fizikai modelljét definiálja, melyeket a belvíz kiürülésének folyamataihoz rendelt négy fázisra bontva az alábbiak (1. ábra):

1. a lefolyástalan mikrodomborzati területeken megjelenik a víz,
2. ezen elöntött területekről megindul a víz a terep lejtésének megfelelő irányban és a legalacsonyabb területrészekben megjelenik a belvíz folt,
3. a belvíz foltokból láncolatok alakulnak ki, amelyek végén elvezető csatorna, vagy lefolyástalan terület van,
4. csatornahálózatbeli összegyülekezés.



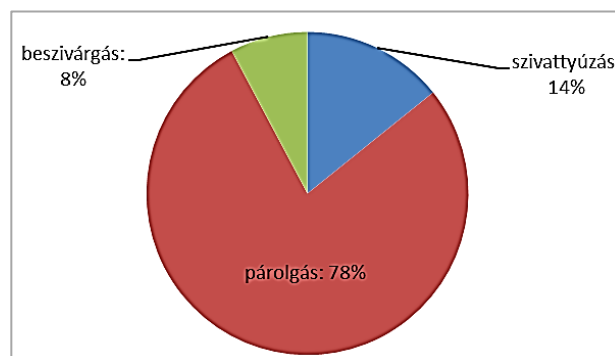
1. ábra. Belvíz összegyülekezés elmélete (Forrás: Kienitz 1974)  
 Figure 1. Theory of inland excess water accumulation (Source: Kienitz 1974)

Amennyiben az összegyülekezés gyakorlati megvalósulásának tükrében (Bíró és társai 2000, Lénárt és társai 1997) vizsgáljuk a Kienitz-féle összegyülekezési részfolyamatokat megállapíthatjuk, hogy az összegyülekezés fázisainak időtartama eltérő, amíg a terület egyes részein még csak a kisebb kiterjedésű tócsák tapasztalhatóak, ad-

dig a vízgyűjtő más részein már összefüggő belvízfolt-láncok alakulnak ki. Hagyományos értelemben csak a 2. fázistól beszélünk belvízről. Munkájában Kienitz részletesen elemezte az alapegyenlet egyes fázisokhoz tartozó megoldásait. Nagy figyelmet fordított az elemi vízgyűjtők vizsgálatára, azonban a párolgás és a beszivárgás (mint a belvizet megcsapoló legnagyobb természeti hatások) nem kaptak kellő hangsúlyt az alábbi megfontolásai szerint. Az 1. és a 2. fázisban szerepelteti a párolgás ( $q_p$ ) és a beszivárgás ( $q_{sz}$ ) belvízcsökkentő hatását, azonban a 3. fázisban már a két tényezőt összevonva szerepelteti ( $q_v$ ) időben állandó értékkel.

A levezetés elméleti helyességének megerősítése mellett meg kell állapítani, hogy a levezetésben található egyszerűsítések túlzottan korlátozzák a párolgás és a beszivárgás hatását a belvizekkel elöntött területek kialakulására, illetve csökkenésére.

A jelenlegi területhasználati adottságokat alapozottan a 2010-2011 között áthúzódó belvízi időszakra vonatkozóan állnak rendelkezésre vízháztartási elemeket is tartalmazó adatbázisok. Az adatbázis elemzése alapján megállapítható, hogy a belvizek megszűnésében nagyobb szerepet játszottak a természeti tényezők, mint az antropogén hatások (2. ábra), így azok hatásainak mérséklését feltételező –mérézési eljárásokban szereplő– egyszerűsítések korlátozzák a valós belvíz elvezetési állapotokhoz való közelítést.



2. ábra. A 2011. évi belvíztömeg (88 millió m<sup>3</sup>) megszűnésének megoszlása az Alsó-Tisza belvízrendszereiben (Forrás: ATIVIZIG)

Figure 2. Distribution of the cessation of the 2011 excess surface water (88 million m<sup>3</sup>) in the inland water systems of the Lower Tisza (Source: ATIVIZIG)

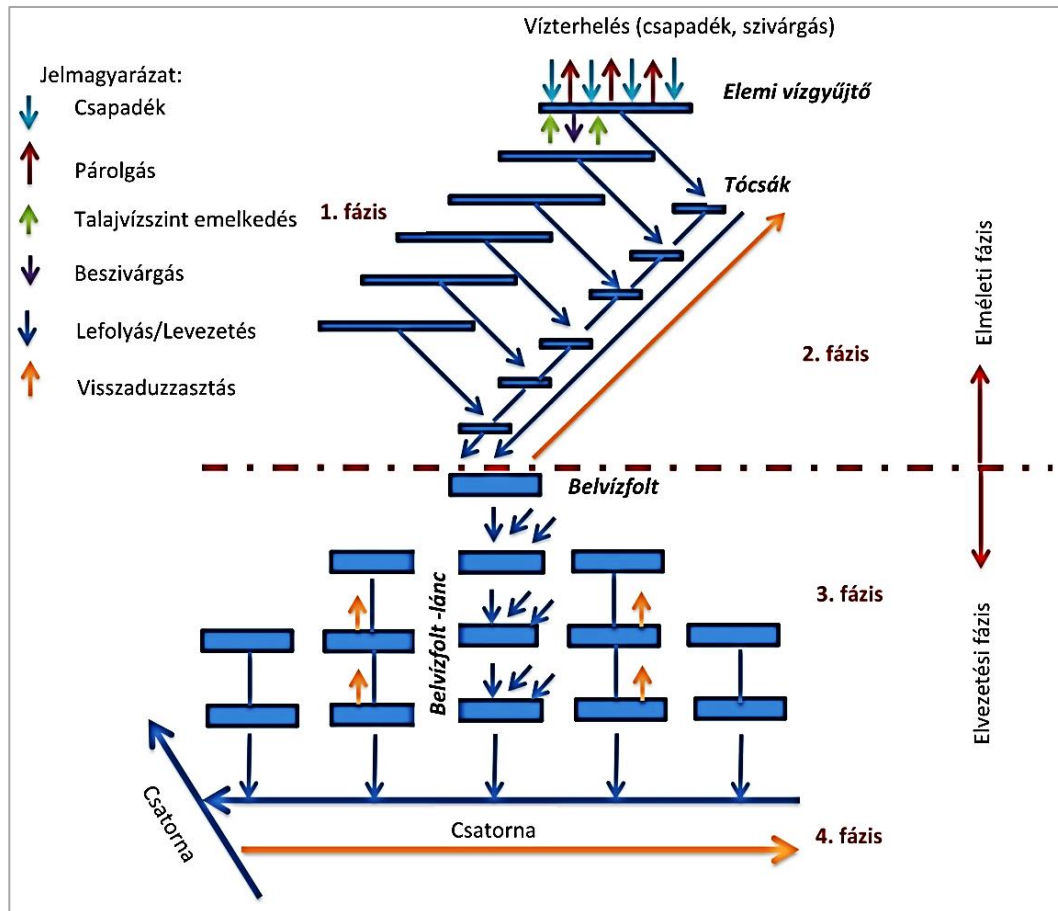
A (3) egyenlet a belvízi elöntéssel közvetlen kapcsolatban lévő impulzust tartalmazza, azonban a gyakorlati tapasztalatok alapján a belvizek képződése során ezek előjele megváltozhat és a belvizek kialakulásának döntő többségében ezen tényezők nem csökkentik, hanem növelik a belvízzel elöntött területek nagyságát.

Gyakorlatilag a [3.] egyenlet  $q_l$  – lefolyás,  $q_{sz}$  – beszivárgás elemei a terepi körülmények között a nemcsak belvízcsökkentő hatást, hanem belvíznövelő hatást is képesek kifejteni.

Amennyiben az elvezető rendszerben visszaduzzasztások alakulnak ki, úgy a  $q_l$  tag elvezetés helyett belvízi elöntéseket fog generálni. A beszivárgás  $q_{sz}$  hatása is két irányban értelmezhető. A beszivárgás iránya egyrészt a talajba történő függőleges mozgást jelenti, azonban a belvízkép-

zódése szempontjából speciális szivárgási irány is megjelenik, mint belvízképző hatás. A területi talajvízviszonyok, illetve a regionális talajvízszint változási dinamizmusok következtében megemelkedő talajvízszintek is okozhatnak

telített állapotokat a felszín közeli talajrétegekben, vagy akár konkrét felszíni elöntéseket is. A fenti megállapítások alapján a Kienitz-féle belvízképződési modell kiegészítése indokoltá válik az alábbiak szerint (3. ábra).



3. ábra. A kiegészített Kienitz-féle belvízképződési modell  
Figure 3. The supplemented Kienitz-type excess surface water formation model

A fentiek alapján a belvízi elöntéseket meghatározó tényezők, mint vektormennyiségek figyelembevételének szükségessége fogalmazódik meg. Ez alapján belátható, hogy a belvíz általános alapegyenletének alábbi kiegészítése segíti annak gyakorlati alkalmazhatóságát (4. egyenlet).

$$x = \frac{ds}{dt} + \bar{q}l + \bar{q}p + \bar{q}sz \quad (4)$$

A belvíz jelenségének vizsgálata kapcsán a Kienitz-féle modell felülvizsgálata alapján megállapítható, hogy a korábbi skaláris megközelítés helyett – a jelenség természeti körülmények közötti megjelenéséhez igazodóan – a belvizet meghatározó elemek vektorként való leírása javasolható. Ennek eredményeként dinamikus megközelítéssel írható le a belvizek képződése/megszűnése.

Vágás István (3. kép) szakirodalmi publikációban a belvizekkel kapcsolatos kutatásait elődeihez hasonlóan jelentős belvízi szituációk kialakulásához kapcsolódóan kezdte meg. Számára az 1966.évi Alsó-tiszai belvíz biztosította a belvízi hidrológiai vizsgálatok megkezdésének lehetőségét.



3. kép. Prof. Dr. Vágás István (1930-2018)  
(Forrás: www.ativizig.hu)  
Photo 3. Prof. Dr. István Vágás (1930-2018)  
(Source: www.ativizig.hu)

Tanulmányában (Vágás 1967) a hagyományos belvízi hidrológiai megközelítés módosítását tartotta szükségesnek, felismerve annak fontosságát, hogy a vízháztartási egyenleteket a vízgyűjtő természeti adottságaihoz kell igazítani, és az így előálló tájegységi specifikumok alapján kell az elemzéseket elvégezni. Felismerte annak fontosságát, hogy a vízgyűjtők belvíz alatti "viselkedését" nem hatékony összevetni egymással, az értékeléseket az adott belvízrendszer korábbi adatai alapján szabad csak elvégezni. Ezen gondolat menti tájspecifikus belvízi vizsgálatok ráirányították a szakmai figyelmet egy új típusú belvíz ana-

lízis fontosságára. Vizsgálatai alapján megállapította (*Válasz 2003*), hogy a belvív elvezetésében meghatározó szerepe van a tározásnak, hiszen a belvízi lefolyás hullámok formájában jelenik, azonban az elvezető rendszert "csak" egy elméleti elvezetési érték biztosítására méretezték. A terhelés és az elvezetési kapacitás különbségét képező vízmennyiséget tározni szükséges. Az elvezető rendszer véges kapacitása miatti tározási kényszer kielégítése azonban tudatos "vízgyűjtő-gazda" szemlélettel kell(ene) meghatározni, azok "ott tározódjanak, ahol a mérnök akarja, és ne ott, ahol azt a maga szétterülő belvív akarja". Természetesen ezen megközelítés a mindenkori természeti és antropogén adottságok függvényében értendő.

Rámutatott azon ellentmondásra, hogy a belvízelvezetéssel kapcsolatos szabványok túlzottan merevek és teljesíthetetlen követelményeket támasztanak, hiszen az azokban rögzített elvezetési idők nem teljesíthetők azokban a belvízi helyzetekben amikor több hullámban érkező belvízi hullámok futnak össze.

### A BELVÍZHozAM MEGHATÁROZÁSÁRA SZOLGÁLÓ GYAKORLATI ELJÁRÁSOK

Ahhoz, hogy a belvízképződési elméletek gyakorlatba történő átmenéséről képet lehessen alkotni át kell tekinteni a belvízhozamok számítására vonatkozó eljárásokat is. A fenti elméleti megközelítések alapján számos méretezési eljárás került kifejlesztésre, amelyek felhasználásával az elvezető rendszerek hidrológiai és az azokhoz kapcsolódó hidraulikai vizsgálatok elvégezhetők. A méretezési eljárások megalkotásával számos szakmai műhely foglalkozott. Az 1990-es évektől Pálfai Imre által irányított szakértői csoport végezte a belvízi jelenségekkel összefüggő méretezésekkel kapcsolatos kutatásokat.

A tanulmány további részeiben ezen módszerek kerülnek ismertetésre (*Pálfai 1986*). A mértékadó vagy elvezetendő belvízhozam meghatározására az alábbi eljárások használatosak:

- Összegyűlekezési elmélet (1932, 1942, 1955, 1956)
- Becsléses módszer (1954)
- Tapasztalati módszer (1971)
- Gazdaságossági módszer (1960)
- Vízháztartási módszer (1966-1970)
- Mintaöblözetek mért adatain alapuló módszer (1984)
- Belvízi tájegységek mért adatain alapuló módszer (1966).

Az *összegyűlekezési elmélet* alapján a fajlagos vízhozamot az összegyűlekezési idővel azonos időtartamú csapadékból számítjuk. A lefolyó víz azonban nincs folyamatos mozgásban hanem tározódik, ezért a csapadéknak nem az elméleti összegyűlekezési idő alatti levezetését irányozzák elő, hanem a tūrési idővel növelt időt veszik alapul. A lefolyásra kerülő fajlagos vízhozam:

$$q = q_c + q_s + q_r \quad (5)$$

ahol:

$q_c$  - csapadékból lefolyásra kerülő vízhozam

$$q_c = 11,57a \cdot h / T + t \quad (l/s/km^2)$$

ahol:

$a$ : lefolyási tényező, és  $= a_1$  (domborzati)  $+ a_2$  (növényborítottsági)  $+ a_3$  (talajtól) függő állandók (táblázatokból)

$h$ : adott előfordulási valószínűségű, az összegyűlekezési idővel azonos idejű csapadék (mm),

$T$ : összegyűlekezési idő (d),

$t$ : tározódási, tūrési idő (d)

$q_s$  - talajvízből és fakadóvízből lefolyásra kerülő vízhozam, mely nomogramok alapján határozható meg.

$q_r$  - egyéb felszín alatti hozzáfolyásokból keletkező terhelések, melyek értékeit tapasztalati úton kidolgozott segédletekből állíthatók elő.

Síkvidéken a módszer csak módosításokkal alkalmazható, mert az összegyűlekezés nem zavartalanul, hanem elsősorban antropogén beavatkozások következtében megváltozik.

A *becsléses módszer* a vízgyűjtő téli félévének csapadék összege, a felszíni vízgyűjtő terület nagysága és alakja, talajadottságai, felszínjellemzői, illetve a talajvízszint általános helyzete alapján, határoz meg fajlagos lefolyási értékeket. Az eljárás 600 mm-nél kevesebb csapadékösszeggel rendelkező területek esetében közvetlenül, míg ennél nagyobb csapadékösszeggel rendelkező vízgyűjtők esetében közvetve alkalmazható.

A *tapasztalati módszer* Magyarország valamennyi belvízrendszerére határozta meg a fejlesztések szükséges mértékét, a kiépítendő fajlagos vízszállítást. A kiépítési értékek meghatározása során az elméleti eljárásokkal meghatározott értékeket helyi gyakorlati szakemberek tapasztalatai alapján szükség szerint korrigálták. Az eljárás kidolgozása óta (1971) a síkvidéki vízgyűjtők egészére kiterjedő országos vizsgálat nem készült.

A *gazdaságossági módszer* (1960) a belvív okozta terméskiesések és különféle kiépítésű rendszerek beruházási és működtetési költségeinek összehasonlításával határozta meg az optimális fajlagos vízhozamot. Az eredmények felhasználásával grafikus segédlet került összeállításra, amelyről a gazdaságosnak tekintett fajlagos kiépítés – 50 km<sup>2</sup>-nél nagyobb vízgyűjtő esetében – egyetlen paraméter, az ún. talajkötöttségi mutató függvényében meghatározható. Kisebb vízgyűjtők esetében korrekció alkalmazása szükséges.

A *belvízi tájegységek* mért adatain alapuló módszer a mértékadó belvízhozamot a lefolyásban és az elöntésben tározódott víz összegéből határozta meg. A méretezés alapja a vízgyűjtő legnagyobb napi mért lefolyás értékéből indult ki, melyet megnövelt a prognosztizált fejlesztések miatt lefolyás növekménnyel. Ezen éves értékek adatsorából határozta meg a tervezés számára mértékadó valószínűségű vízhozamot. Amennyiben nem álltak rendelkezésre vízgyűjtő szintű adatok, úgy a belvízi tájegységi adatokból kerültek –korrekciós tényezők alkalmazásával– leképezésre a vízgyűjtő lefolyási adatai.

A *mintaöblözetek mért adatain alapuló módszer* (1984) a kondorosvölgyi minta vízgyűjtő adatai alapján meghatározott értékek alapján határozta meg a lefolyás fajlagos értékét a vízgyűjtő talajadottságai függvényében.

A szakmai gyakorlat számára az *MI-10-451-1988* műszaki irányelv összefoglalja a síkvidéki vízgyűjtők fajlagos hozamának meghatározására szolgáló eljárások közül a becslés módszer, az összegyülekezési elmélet, illetve a tapasztalati módszer számítási részleteit. Az Irányelv megjelenése (1988) óta számos változás következett be a vízgyűjtők lefolyási viszonyaiban (pl: földhasználati változások, nyomvonalas létesítmények építése, stb –) azonban ennek *felülvizsgálata* és szükség szerinti korszerűsítése *nem történt meg az utóbbi 32 évben*. Tekintettel arra, hogy nincs jogszabályi előírás az alkalmazandó méretezési eljárásokra, így a szakmai gyakorlat a fent említett műszaki irányelvet alkalmazza.

A gyakorlati számítási eljárások áttekintése alapján megállapítható, hogy habár az elméleti eljárások részletesen foglalkoznak a belvíz képződése szempontjából meghatározó elemekkel, a gyakorlati számítási eljárások nem vagy csak igen korlátozottan fedik le a belvizek kialakulása szempontjából vízháztartási elemeket (pl: párolgás, talajvíztükör elhelyezkedése). Az eljárások kidolgozása során az alkalmazhatóság érdekében kerültek egyszerűsítésre a belvizek hatótényezői.

Összefoglalóan azonban megállapítható, hogy a belvízképződési elméletekben beazonosított hatótényezők, csak korlátozottan jelennek meg az egyes számítási eljárásokban. Jellemzően a talajvíz, vagy akár a párolgás hatása csak leegyszerűsítve (jellemzően a hatás dinamikus jellegének figyelembevétele nélkül), vagy egyáltalán nem kerül figyelembevétele. Habár ezen eljárások jellemzően a biztonság javára tartalmazzák ezen egyszerűsítéseket, de akár a párolgás mértékében, vagy a talajvíz elhelyezkedésében tapasztalható dinamika jelentősen megnövelheti/csökkentheti a keletkező belvízi tömeget. Fel kell ismerni, hogy *jellemzően statikus vízszállítási állapotok kerülnek leképezésre a számítási eljárásokban, azonban a belvíz jelenségének dinamikája következtében az egyes hatótényezők kölcsönhatása folyamatosan megváltozhat* (pl.: talajvízszintek változásával, párolgás napi mennyiségének változásával stb.). Így sokszor a *mértékadó üzemiállapotok nem kerülnek beazonosításra*, azok vizsgálatának elmaradásával az így méretezett rendszerek hatékonysága jelentősen lecsökken.

A méretezési eljárásokkal kapcsolatban átfogóan kijelenthető, hogy csak a természeti tényezőkkel kapcsolatos elemeket tartalmaznak annak ellenére, hogy a jelenség kialakulása szempontjából a gyakorlati tapasztalatok alapján az antropogén hatások szerepe is jelentős lehet. Habár az antropogén tényezők szerepe nehezen számszerűsíthető – főleg a dinamikus méretezési eljárások során – de amennyiben a számítási eljárásokba nem kerülnek figyelembevétele, úgy a belvízképződés/elvezetés leképezése nem fog illeszkedni a jelenség valós lefolyásához.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A belvíz képződésével kapcsolatban kidolgozott elméletek megalkotói törekedtek a folyamatot befolyásoló tényezők teljes körű figyelembevétele. Azonban a rendelkezé-

sükre álló számítási eljárások szűkítették ezen tényezők figyelembevétele és a rendelkezésre álló számítástechnikai háttér, illetve a hozzáférhető adatháttér függvényében határozták meg a méretezési elveket. Ezen *elméleti és méretezési megközelítésnek rendkívül fontos jellemzője volt a folyamat statikus megközelítése, azonban a belvíz valós területi megjelenésének meghatározó sajátossága a dinamizmus*, amely kiterjed a meteorológiai tényezőkre (mint rövid távú változékonyság), illetve a vízgyűjtőn tapasztalt változásokra pl: területhasználat, talajszerkezet (mint hosszú távú változékonyság), illetve a vízelvezető hálózat működésére is.

Fentiek alapján belátható, hogy az elméleti háttér és a méretezési gyakorlat sem követte a belvíz képződést befolyásoló dinamikus folyamatokat. Számos területi példa támasztja alá (*Kozák 2016*), hogy a vízgyűjtő területhasználatában, vagy a talajok szerkezetében olyan változások következtek be (pl.: területhasználati változások, beépítettség változása, talajvíz rezsimek megváltozása stb.) amelyek jelentősen megváltoztatták a vízgyűjtőkön a belvízképződés folyamatát. Ezen változások miatt a korábbi statikus elvek/eljárások alapján meghatározott belvízi terhelések megváltoztak, illetve dinamikusan változnak. Ez jelentősen lecsökkenti az elvezető rendszer működésének hatékonyságát és megnöveli vízgyűjtő belvízi kitettségét.

Nem elégséges, hogy a vízrendszer torkolati kapacitátsai megfelelően legyenek meghatározva, hanem a vízelvezetési útvonal egészének kell megfelelő pillanatnyi elvezetési potenciállal rendelkeznie (*Kozák 2016*). Mivel a vízrendszerek jellemzően egymással sorba kötött elemek összességékként kerültek megtervezésre és kerülnek üzemeltetésre, így amennyiben az elvezetési útvonal bármely elemében kapacitás hiány áll fenn, úgy a vízrendszer azonnaltól hibásan fog működni: vagyis azon pontig összegyűjti a vizeket, de azok továbbításra nem kerülnek, hanem elöntés felszíni formájában tározásra kényszerülnek.

A belvízi terhelések kezelésével kapcsolatban megfogalmazható feladat a vízepítő szakma irányába, hogy ezen víztömegek a lehető legrövidebb idő alatt kerüljenek a felszínről elvezetésre, illetve a talajtelítettséget csökkentsék a kívánt mértékben. Ehhez egyrészt megfelelő kiépítési kapacitással rendelkező csatornahálózat nélkülözhetetlen, másrészt pedig az elvezetési kapacitás adott időpillanatban történő rendelkezésre állása szükséges. Ez gyakorlatilag gazdaságtalan méretű művek megvalósítását és azok folyamatos karbantartási feladatainak elvégzéséhez szükséges jelentős pénzügyi forrásokat igényelnek.

Napjaink korszerű numerikus modellezési eszközei biztosítják a lehetőséget, hogy a meglévő/tervezett rendszerek részletes hidrológiai-hidraulikai vizsgálat alá kerülhessenek. Az ilyen jellegű vizsgálatok biztosíthatnak kellő háttérrel ahhoz, hogy a belvízi elöntések által reprezentált terhelés kezelésére a területhasználati igényekhez illeszkedő, de a hidraulikai sajátosságoknak megfelelően működő elvezető rendszer valósuljon meg.

**IRODALOMJEGYZÉK**

*Bíró T., Thyll Sz., Tamás J., Lénárt Cs.* (2000). Térinformatikai módszerek alkalmazása a belvív-veszélyeztettség térképezésében. In: Borsosné, Pallagi Nóra (szerk.). A Magyar Hidrológiai Társaság XVIII. Országos Vándorgyűlése Tanulmánykötet II., Veszprém. pp.754-760.

*Kienitz G.* (1968). Vízgyűjtők rendszervizsgálata és a belvív jelenség. *Vízügyi Közlemények*. 1968. év 2. füzet, pp. 219-244.

*Kienitz G.* (1969). A síkvidéki vízgyűjtő hidrológiai vizsgálata. *Hidrológiai Közöny*. 49. évf., 9. szám. p. 412-417.

*Kienitz G.* (1974). Rendszer-hidrológiai módszerek bevezetése a magyar vízügyi gyakorlatba. *Hidrológiai Közöny*, 54. évf. 6. szám, pp. 265-272.

*KJT* (2017). Nemzeti Vízstratégia (Kvassay Jenő Terv), [https://www.kormany.hu/download/6/55/01000/Nemzeti Vízstratégia.pdf](https://www.kormany.hu/download/6/55/01000/Nemzeti_Vizstrategia.pdf)

*Kozák P.* (2006). A belvízjárás összefüggéseinek vizsgálata az Alföld délkeleti részén, a vízgazdálkodás európai elvárásainak tükrében. PhD értekezés. Földtudományi Doktori Iskola, Szegedi Tudományegyetem. <http://doktori.bibl.u-szeged.hu/1679/3/Disszert%C3%A1ci%C3%B3.pdf>

*Kozák P.* (2011). Belvízi jelenségek az Alsó-tiszai vízgyűjtőkön az 1955-2010 közötti időszakban. In: Rakonczai, J. (szerk.). Környezeti változások és az Alföld. A Nagyalföldi Alapítvány kötetei 7., pp. 127-136.

*Kozák P.* (2016). A területi vízgazdálkodás időszerű kérdései. Magyar Hidrológiai Társaság XXXIV. Vándorgyűlése. Debrecen.

*Kozma Zs.* (2013). Belvízi szélsőségek kockázatalapú értékelésének és modellezési módszertanának fejlesztése.

PhD értekezés. Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. <https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/5576/ertekezés.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

*Lénárt Cs., Thyll Sz., Bíró T.* (1997). Digitális Terepmodellek (DTM-ek) használata a vízgazdálkodásban. In: Bezdán Mária (szerk.). A Magyar Hidrológiai Társaság XV. Országos Vándorgyűlése Budapest: Magyar Hidrológiai Társaság (MHT), pp.880-892.

*MI – 10 451* (1988). Síkvidéki vízgyűjtők mértékadó fajlagos hozamának meghatározása. Országos Vízügyi Főigazgatóság.

*Pálfai I.* (1986). Újabb módszerek a mértékadó belvízhozam meghatározására. *Hidrológiai Tájékoztató*. 1986. október, pp. 20-22.

*Pálfai I.* (2001). A belvív definíciói. *Vízügyi Közlemények*. 83. évf. 3. füzet, pp. 376-392.

*Oroszlány I.* (1976). Üzemi belvizek keletkezésének dinamikája. *Hidrológiai Közöny*. 56. évf. 3. szám, pp. 101-108.

*Salamin P.* (1942). Tanulmány a hazai belvízrendezésről. *Hidrológiai Közöny*. 22. évf. 1-6. szám, pp. 76-122.

*Salamin P.* (1956). A belvízrendszerek tervezésének néhány kérdése. *Hidrológiai Közöny*. 36. évf., 5. szám, pp. 342-350.

*Salamin P.* (1969). Síkvidéki vízgyűjtők hidrológiai kérdései. *Hidrológiai Közöny* 1969. 9. szám, 406-407 p.

*Vágás I.* (1989). A belvív elvezetése. *Hidrológiai Közöny*. 69. évf. 2. szám, pp. 77-82.

*Zsemle F., Mádlné Szőnyi J., Angelus B.* (2000). Felszíni hidraulikai rezsímmelleg térképezése az Izsáki Kolontó környezetében. *Hidrológiai Közöny*, 80. évf. 2. szám, pp. 110-119.

**A SZERZŐ**

**KOZÁK PÉTER** okleveles vízépítőmérnök. Tudományos fokozatát belvízgenetikai elemzésekhez kapcsolódóan készítette el a Szegedi Tudományegyetem Földtudományi doktori iskolájában. Tudományos tevékenysége az ár- és belvízi kockázatok kezelésével és mérséklésével kapcsolatos területi vízgazdálkodásra irányul. 1994-től az Alsó-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság munkatársa, 2010-től igazgatója. 2007-től az Eötvös József Főiskola, illetve 2017-től a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Karának főiskolai docense, 2020-tól egyetemi adjunktusa.



## A célzott felszín alatti vízutánpótlás nemzetközi trendjei és hazai alkalmazási lehetőségei

Szabó Zsóka\*, Tahy Ágnes\*\*, Mádlné Szőnyi Judit\*

\*Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (szazsoka@caesar.elte.hu)

\*\*Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest

### Kivonat

A vízpótlás régóta használt eljárás a vízgazdálkodásban Magyarországon és nemzetközi szinten egyaránt. Ugyanakkor, a célzott felszín alatti vízutánpótlás (Managed Aquifer Recharge – MAR) mint fogalom, viszonylag fiatal. Definíció szerint a víztartók tudatos vízutánpótlását jelenti, későbbi vízkivétel vagy környezeti haszon elérése céljából. MAR rendszerek létrehozása több előnnyel is jár, vízmennyiségi, vízminőségi és környezeti szempontból egyaránt. Alkalmazásuk többek között elősegítheti a vízellátás hosszútávú biztonságát, növelheti a víztartalékokat, csökkentheti az árvizek káros hatásait és a lefolyási vízvesztéset, továbbá javíthatja a víz minőségét. A MAR-ok között tartják számon a parti szűrésű rendszereket is, melyek tekintetében hazánk élen jár a 150 éves üzemeltetési tapasztalatoknak köszönhetően. A MAR rendszerekhez sorolható továbbá a talajvízdúsítás és rétegvízidúsítás, melyek évtizedek óta ismertek Magyarországon, azonban nem terjedtek el széles körben. Magyarországon felszíni vizek tekintetében tranzitország, így egyre növekszik az igény a vizek helyben tartására és hasznosítására, elsődlegesen mezőgazdasági és öntözési célból. A második Országos Vízügyi-gazdálkodási Terv (2015) számos intézkedése is ebbe az irányba mutat. A célzott felszín alatti vízutánpótlás megoldási lehetőséget nyújthat a klímaváltozáshoz való alkalmazkodáshoz és ezzel a stabilabb vízellátás biztosításához. A szerzők célja, hogy bemutassák a MAR módszerek nemzetközi trendjeit és a kapcsolódó tudományos eredményeket, ezzel is hozzájárulva a MAR rendszerek széleskörű hazai elterjedéséhez, mely elősegítheti a vízgazdálkodás optimalizálását és a vízigények kielégítését.

### Kulcsszavak

vízvisszatartás, vízutánpótlás, talajvízdúsítás, rétegvízidúsítás, parti szűrés, MAR, vízgazdálkodás.

## Managed Aquifer Recharge – State of the art, needs and possibilities in Hungary

### Abstract

Water replenishment has long been a used method in water management in Hungary and internationally as well. However, Managed Aquifer Recharge (MAR) as a concept is relatively young. By definition, it is the intentional recharge of water to suitable aquifers for subsequent recovery or to achieve environmental benefits. There are several benefits of creating MAR systems, in terms of water quantity, water quality and the environment. Their application can, among others, promote long-term security of water supply, increase water reserves, reduce the adverse effects of floods and runoff, and improve water quality. These methods include induced bank filtration, for which Hungary is at the forefront thanks to its 150 years of operating experience. MAR systems also include surface spreading and well injection methods, which are also known in Hungary, but are not widespread. Hungary is a transit country in terms of surface waters, so there is a growing demand for water retention and local utilization, primarily for agricultural and irrigation purposes. Several measures of the Hungarian River Basin Management Plan (2015) also point in this direction. Managed Aquifer Recharge can provide a solution to adapt to climate change thus ensure a more stable water supply. The aim of the authors is to present the current state of the art and the international trends regarding MAR methods to promote the more widespread application in Hungary, which can help to optimize water management and meet water needs.

### Key words

Managed Aquifer Recharge, water management, induced bank filtration, water replenishment.

### BEVEZETÉS

A célzott felszín alatti vízutánpótlás (Managed Aquifer Recharge – MAR) egy olyan természet-ihlette vízgazdálkodási módszercsalád, melynek alkalmazása hosszú időkre nyúlik vissza, de mint fogalom viszonylag fiatal (Dillon és társai 2018). A korábbi szakirodalmakban mesterséges vízutánpótlásként található meg, de a „mesterséges” szó használata félrevezető lehet. Azt sugallhatja, hogy ez egy nem természetes, vagy egyenesen természetellenes folyamat, ami nagyban ronthatja a módszer társadalmi megítélését (Dillon 2005). A célzott felszín alatti vízutánpótlás definíció szerint a víztartók tudatos vízutánpótlását jelenti, későbbi vízkivétel céljából vagy környezeti haszon elérése érdekében (NRMMC, EPHC és NHMRC 2009). Olyan széles skálán mozgó eszközökre, módszerekre és intézkedésekre használható fogalom, melyek elősegítik az aktív felszín alatti vízgazdálkodást, lokális és medence léptékben egyaránt, valamint

hozzájárulnak a felszíni és felszín alatti vizekkel való együttes gazdálkodáshoz, alkalmazkodva a növekvő éghajlati szélsőségekhez (Evans és Dillon 2018, Dillon és társai 2018). A kontrollált körülmények segítenek a megfelelő vízmennyiség és vízminőség elérésében, illetve megtartásában, védve az emberi egészséget és a környezetet (Dillon és társai 2009).

Fontos elkülöníteni a célzott felszín alatti vízutánpótlást a nem szándékos és nem irányított vízutánpótlási módoktól. Tehát nem tekinthetők MAR módszernek a nem szándékos, beszivárgást növelő tevékenységek, mint például a szántóföldi művelés, a mélygyökérzetű növények eltávolítása, az árasztásos öntözés, az öntözésből származó beszivárgás vagy a víz- és szennyvízvezetékek szivárgása. Szintén nem nevezhető MAR módszernek, mikor a vízutánpótlás a fölösleges többletvíztől való megszabadulás eredményeként jön létre (pl. szennyvízagnak, bányászati

és ipari vizek, esővízlevezető árkok, gödrök stb.). (Dillon és társai 2009). A célzott felszín alatti vízutánpótlás kialakítása során szükség van a környezeti hatások előzetes felmérésére, illetve folyamatos megfigyelésre és ellenőrzésre (monitoring), hogy a kockázatok csökkenthetők legyenek és ezáltal megfelelő hatást lehessen elérni.

MAR rendszerek létrehozása több előnnyel is jár, vízmennyiségi, vízminőségi és környezeti szempontból egyaránt. Alkalmazásuk elősegítheti a vízellátás hosszútávú biztonságát, növelheti a víztartalékokat, csökkentheti az evaporációs vízvesztéseket, az árvizek káros hatásait és a lefolyási vízvesztéseket, javíthatja a vízminőséget, csökkentheti a víztartók sótartalmát, fenntarthat felszín alatti víztől függő ökoszisztémákat (FAVÖKO), továbbá növelheti a terület (turisztikai) értékét, a környezet sokszínűségét, valamint a biodiverzitást is (Dillon és társai 2009). Egyik fő jellemzője, hogy szemben a hagyományos felszíni tározási módszerekkel, felszín alatti víztározást biztosít, mely nem csak környezeti előnnyel bír, hanem gazdasági és társadalmi szempontból is kedvező. Az újonnan épülő gáttakkal és felszíni tározókkal szemben, kisebb területre van szükség, akár városokon belül is létesíthető, síkvidéki területeken is alkalmazható, általában alacsonyabb kutatási és kivitelezési költséggel jár és akár kisebb léptékben is gazdaságos lehet (Dillon 2005, Dillon és társai 2009).

A célzott felszín alatti vízutánpótlás gyakorlata nem ismeretlen hazánkban sem, a parti szűrősű rendszerek alkalmazása tekintetében több, mint 150 éves múltra tekint vissza (Kontur 1993). A hagyományos értelemben vett talajvízdúsítás, illetve rétegvízvízdúsítás szintén a MAR módszerek közé sorolhatók. Érdemes megjegyezni, hogy nem szerencsés külön talajvíz-, illetve rétegvízvízdúsításról beszélni, hiszen a sekély felszín alatti rétegek vízutánpótlása kihat a mélyebb rétegekre is, így rendszerekben érdemes gondolkodni, hogy a módszer pozitív és negatív hatásait megfelelőképpen tudjuk értelmezni. Számos szerző foglalkozott a témával Magyarországon, elsősorban az 1960-80-as években, felhívva a figyelmet a talajvízdúsítás alkalmazásának lehetőségeire, külföldi példák bemutatásával egyaránt (Páris 1961, Csobok 1962, Fázold 1968, Öllös 1970, Déri 1972, Bauer 1973, Déri 1975, Karácsonyi és Öllös 1980). Déri József 1972-ben megjelent *Talajvízdúsítás* c. könyve részletesen foglalkozik a módszer előnyeivel és hátrányaival, típusaival, kutatási és vizsgálati módszereivel, valamint a vízutánpótlás közben lejátszódó fizikai, kémiai és biológiai folyamatokkal egyaránt, és sok szempontból máig megállja a helyét. A vízpótlásra való igény mai napig jelen van, ehhez kapcsolódóan az elsődleges feladat az igények, lehetőségek és az alkalmas területek felmérése lenne (Páris 2006, Pálfai 2007, Somlyódy 2011, Nemzeti Vízstratégia 2017). Páris Emil következő sorai (Páris 2006) remekül összefoglalják ezt az igényt: „Célszerűnek tartanám a felszíni és felszínalatti vízkészletek komplex hasznosítási lehetőségeinek szervezett vizsgálatát. (...) Célszerű lenne például feltárni azokat a helyeket, ahol a belvizek egy része a felszínközeli talajvízrétegekben tározható lenne, azokat a helyeket, ahol az ivóvízellátás céljából kiemelt vizeket vagy tisztított szennyvizeket esetlegesen a terület alatt található mélyebben fekvő, vagy más

rétegekben, öntözés céljára, biztonságosan lehetne elhelyezni. Javaslom az egyes felszíni vízgyűjtő területek alatt fekvő vízáadó rétegek szervezett feltárását, a bennük található vízkészletek mennyiségének meghatározását, valamint azoknak a felszíni vízkészletekkel összhangban való hasznosítását. A felszín alatti rétegekben való vízelhelyezés következményeinek, a rétegekben elérhető tisztítási folyamatoknak jobb megismerését. Fontosnak tartom a felszínalatti vízáadó rétegekkel kapcsolatos, környezetbarát, természeti eszközökkel való műszaki megoldások, mint például a talajvízdúsítás, kialakítását.”

Előrelépést jelenthet, hogy a felülvizsgált Vízyűjtő-gazdálkodási Terv intézkedési programja (OVGT2 2015) több intézkedést is tartalmaz, mely felszín alatti vízutánpótlással megvalósítható vagy ahhoz szorosan kapcsolódik:

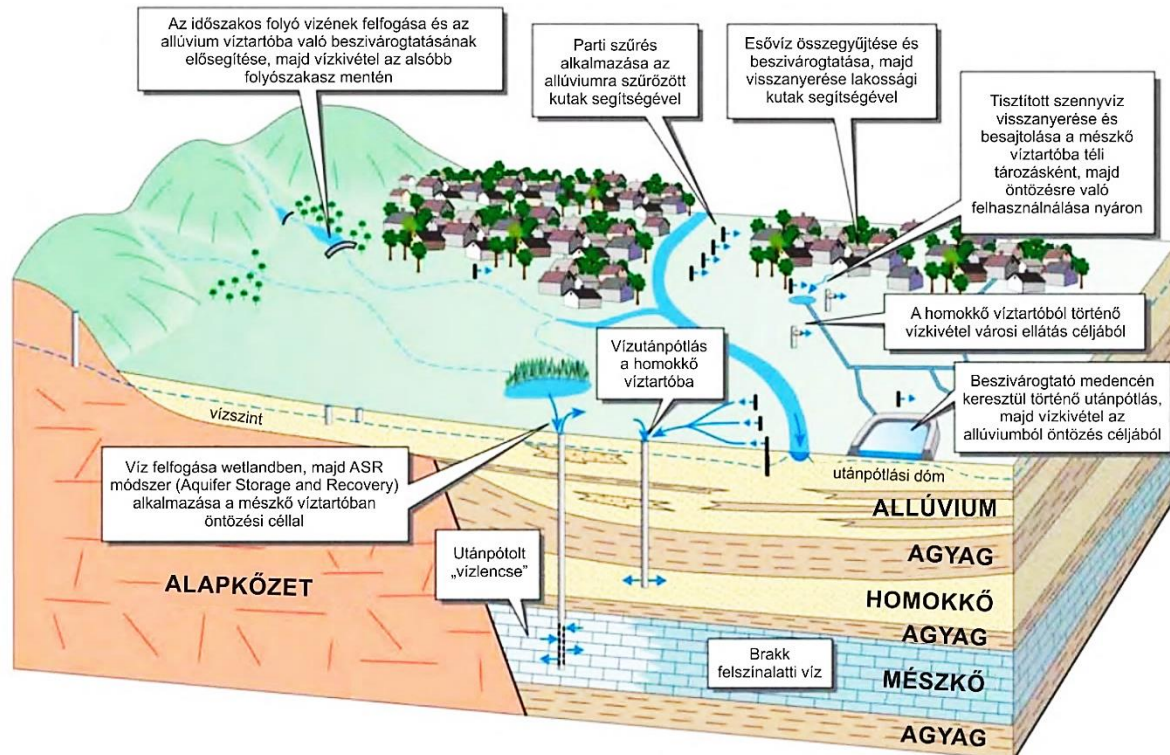
- 7.1 intézkedés: Belvízelvezető rendszer módosítása,
- 23.1 intézkedés: Belterületi vízvisszatartási lehetőségek,
- 23.2 intézkedés: Csapadékgazdálkodás, táblaszintű vízvisszatartás a beszivárgás növelése és a lefolyás csökkentése érdekében,
- 23.3 intézkedés: Vízvisszatartás tározással dombvidéki területeken, kisvízfolyásokon záportározókban, esetleg állandó tározókban,
- 23.4 intézkedés: Vízvisszatartás tározással síkvidéken belvíztározókban, illetve medertározás öböl-szerűen kiszélesített szakaszokon,
- 31.1 intézkedés: Talajvízdúsítás vízvédelmi szabályozása,
- 32.2 intézkedés: Folyók eltereléséből, bevágódásából származó alacsony folyó vízszint miatt bekövetkezett talajvízszint-süllyedés kompenzációja vízpótlással, mederbeli fenékgátas duzzasztással,
- 33. intézkedés csoport: Károsodott vízi, vizes és szárazföldi élőhelyek védelme a vízjárást befolyásoló hatásokkal szemben, az egyéb intézkedéseken felül.

A tanulmány szerzőinek célja, hogy átfogóan vázolják a célzott felszín alatti vízutánpótlás nemzetközi gyakorlatát és trendjeit, ezáltal továbblépési lehetőséget nyújtsanak a kiterjedtebb hazai alkalmazás eléréséhez, melynek lehetőségei jelenleg még kiaknázatlanok. A klímaváltozáshoz való alkalmazkodás jegyében a célzott felszín alatti vízutánpótlás témaköre nemzetközi szinten egész virágzó tudományterületté nőtte ki magát, ahol elengedhetetlen a különböző szakterületek közötti szoros együttműködés (természettudományos megalapozottság, mérnöki tervezés, ökológiai-, társadalmi- és gazdasági vonatkozások). Jelentőségét mutatja továbbá, hogy az International Association of Hydrogeologists (IAH) és az UNESCO is kiemelten foglalkozik ezzel a kérdéskörrel (Gale 2005, van Steenbergén és Tuinhof 2009, IAH 2019, IAH-MAR Commission), valamint két évente megrendezik a „Biennial Symposium on Managed Aquifer Recharge (BSMAR)”, három évente pedig az „International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR) konferenciát”.

## A MAR RENDSZEREK TÍPUSAI ÉS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEIK

Számos módszer tartozik a célzott felszín alatti vízutánpótláshoz, melyek alkalmazási lehetőségei jelentősen függenek az adott terület földtani felépítésétől, topográfiai viszonyaitól, az éghajlati adottságoktól, a hidrogeológiai viszonyoktól, valamint az épített környezet és a kitermelt víz

felhasználási módjától (1. ábra, Dillon és társai 2009). A különböző szakirodalmak más-más módon csoportosítják a MAR típusokat (Bouwer 2002, Gale 2005, Dillon 2005, IGRAC 2007, Dillon és társai 2009, Sprenger és társai 2017, Stefan és Ansems 2017a stb.), melynek oka, hogy gyakran átfedések és hasonlóságok tapasztalhatók a módszerek között, valamint gyakran kombináltan alkalmazzák őket.



1. ábra. Különböző MAR módszerek a víz felszín alatti tározására és kezelésére, a helyi környezeti adottságok és lehetőségek (vízforrások, víztartók, vízhasználók) függvényében (Dillon és társai 2009 alapján)

Figure 1. Variety of recharge methods and water sources making use of several different aquifers for storage and treatment with recovery for a variety of uses, adapted to local situations (based on Dillon et al. 2009)

Jelen esetben a nemzetközi MAR adatbázis (*Global MAR Inventory, Stefan és Ansems 2017a*), valamint az INOWAS kutatócsoport (Drezdai Műszaki Egyetem, Németország) által alkalmazott csoportosítást mutatjuk be az INOWAS weboldalán található egyszerű magyarázó ábrák felhasználásával. Az elsődleges cél a specifikus MAR típusok alkalmazásának és a közöttük lévő különbségek bemutatása. A fő MAR típusokat két csoportra lehet bontani attól függően, hogy a módszer alkalmazása a víz intenzív beszivárogtatására vagy a víz felfogására és összegyűjtésére irányul (1. táblázat). Az előbbi csoportba tartoznak a felszíni beszivárogtató módszerek, a parti szűrés, és a kúton, aknán vagy fúrólukon keresztül történő utánpótlás. Az utóbbiba sorolható a medermorfológia-módosítás, valamint az esővíz és felszíni lefolyás összegyűjtésére és felszín alá juttatására irányuló módszerek. A továbbiakban ennek a két fő csoportnak a specifikus típusait mutatjuk be részletesebben, továbbá minden esetben megadjuk a módszer angol nevét is, a könnyebb beazonosíthatóság érdekében.

### Felszíni beszivárogtató módszerek

#### Árkok és barázdák

A csatornák, árkok és barázdák pontszerű vagy vonalas vízelélesítmények, amelyek lehetővé teszik az utánpótlásra

használt víz beszivargását a felszín alatti vízbe. Ezek rendszerint sekélyek, lapos aljzatúak és szorosan egymás mellett helyezkednek el. Ez a felszíni beszivárogtatási módszer elsősorban változatos domborzatú területen történik, ahol a víz gyűjtésére és elosztására szolgál. Ezen túl alkalmazható abban az esetben is, amikor a felső talajprofilban vízforgó réteg van jelen, amit ezzel eltávolítanak.

#### Altalajöntözés

Az altalajöntözés alkalmazása során a vizet perforált talajcső hálózat segítségével juttatják a felszín alá, ahonnan a víz a talajba szivárog. Ezt a módszert ott használják, ahol a földterület drága, ugyanis ez a módszer elhanyagolható hatással van a felszíni földhasználatra (IGRAC 2007).

#### Többletöntözés

A többletöntözés MAR módszerként olyan egyébként is öntözött mezőgazdasági területeken alkalmazható, ahol többlet víz áll rendelkezésre, és ez a területen művelési vagy öntözési időszakokon kívül elöntözhető, így biztosítva a víztartó feltöltését. A többletöntözés előnyös lehet más hagyományos MAR módszerekkel szemben, azokon a rendelkezésre álló öntözött mezőgazdasági területeken, amelyek már rendelkeznek a szükséges infrastruktúrával, és ha többlet öntözővíz is rendelkezésre áll (más forrásból),

akkor annak víztartóba juttatása megoldható. Kedvező, használatokkal és az öntözés kedvezőtlen hatására csökkenő hogy ez esetben a MAR rendszer nem versenyez más föld- talajvízszintek is kiegyenlíthetők e módszer alkalmazásával.

1. táblázat. A MAR típusok lehetséges csoportosítása a nemzetközi MAR adatbázis és az INOWAS tagolása alapján  
Table 1. Classification of MAR techniques based on the Global MAR Inventory and INOWAS platform

	Fő MAR típusok	Specifikus MAR típusok
Elsősorban a víz beszivárogatására, pótlására irányuló módszerek	Felszíni beszivárogató módszerek	Árkok és barázdák
		Altalajöntözés
		Többletöntözés
		Árasztás
	Parti szűrés (s.l.)	Beszivárogató tavak és medencék
		Parti szűrés (s.s., folyó vagy tó partján)
	Kúton, aknán vagy fúrólukon keresztül történő vízutánpótlás	Dűne szűrés
Víztartó rétegbeli tározás (szállítás) és kitermelés		
Elsősorban a víz fel fogására, összegyűjtésére, majd beszivárogatására irányuló módszerek	Medermorfológia-módosítás	Sekély/ásott kúton, aknán keresztül történő vízutánpótlás
		Meder horizontális kiterjesztése
		Utánpótlódást segítő gát
		Homok kitöltésű tározó gáttal
	Esővíz és felszíni lefolyás összegyűjtése és felhasználása	Felszín alatti gát
		Gátak és töltések
		Esővíz összegyűjtése háztetőkről és felszín alá juttatása
		Árkok a felszíni lefolyás összegyűjtésére

### Árasztás

Árasztás (2a. ábra) MAR módszerként való alkalmazása akkor történik, amikor nagyvízi időszakban többlet víz áll rendelkezésre, vagy amikor árvízi eseményt kell kezelni. A rendszer passzív beszivárgást biztosít, amely áthatol a telítetlen talajzónán és az alatta lévő víztartóba kerül. Ezek a rendszerek számos előnnyel rendelkeznek, például az árvízvédelem, a szárazságra való felkészülés, a víztartó és az ökoszisztéma helyreállítása szempontjából. Azonban a módszer alkalmazásához nagy földterületekre van szükség, melyeket készenlétben kell tartani, hogy lehetővé tegye az időszakos árasztást. Így kompenzációs rendszereket kell bevezetni a földtulajdonosok számára.

### Beszivárogató tavak és medencék

A felszíni beszivárogató módszerek és azon belül is a beszivárogató tavak, medencék (2b. ábra) a leggyakrabban alkalmazott MAR módszerek közé tartoznak. Ezek alapja a víz megtartása és szétterítése többnyire sík területen, a beszivárgás fokozása érdekében. A fedetlen víztartóba való beszivárgás mértékét növelhetik árkok, gátak, üregek létrehozásával is. A felszíni beszivárogató módszerek akkor alkalmazhatók, ha a területen fedetlen víztartó található, jó felszínközeli vezetőképességgel. E

típus egyik válfaja a talajrétegen keresztül történő víz-tisztítás (Soil Aquifer Treatment – SAT), melynek elsődleges célja a víz minőségének javítása, kihasználva a beszivárgás alatt lejátszódó fizikai-, kémiai- és biológiai folyamatokat. E módszernél elsősorban tisztított szennyvizet, illetve felszíni lefolyásból származó vizet használnak, mely a talajrétegen, valamint a fedetlen víztartón keresztül beszivárogva tisztul meg. A megfelelő hatások elérése érdekében gyakran váltakozva alkalmaznak nedves és száraz ciklusokat (2c. ábra).

### Parti szűrés

#### Parti szűrés, folyó vagy tó partján

Folyókhoz vagy tavakhoz kapcsolódó parti szűrésű rendszerek (2d. ábra) működése során a vízforrással párhuzamosan elhelyezett kútsor vagy galéria szivattyúzása beindítja a folyó vagy a tó vizének az objektum felé történő áramlását. A szivattyúzás lecsökkenti a talajvízszintet a folyó/tó környezetében, ami előidézi vizük víztartóba való beszivárgását. E folyamat elsődleges célja a felszíni vizek minőségének javítása a kútba jutásig, majd ezt követő hasznosítása. A víz folyó- vagy tómedren, illetve víztartón történő áthaladása során fizikai-, kémiai- és biológiai folyamatok játszódnak le, melyek eltávolítják az oldott és lebegtetett szennyezőket és patogéneket.

### Dűne szűrés

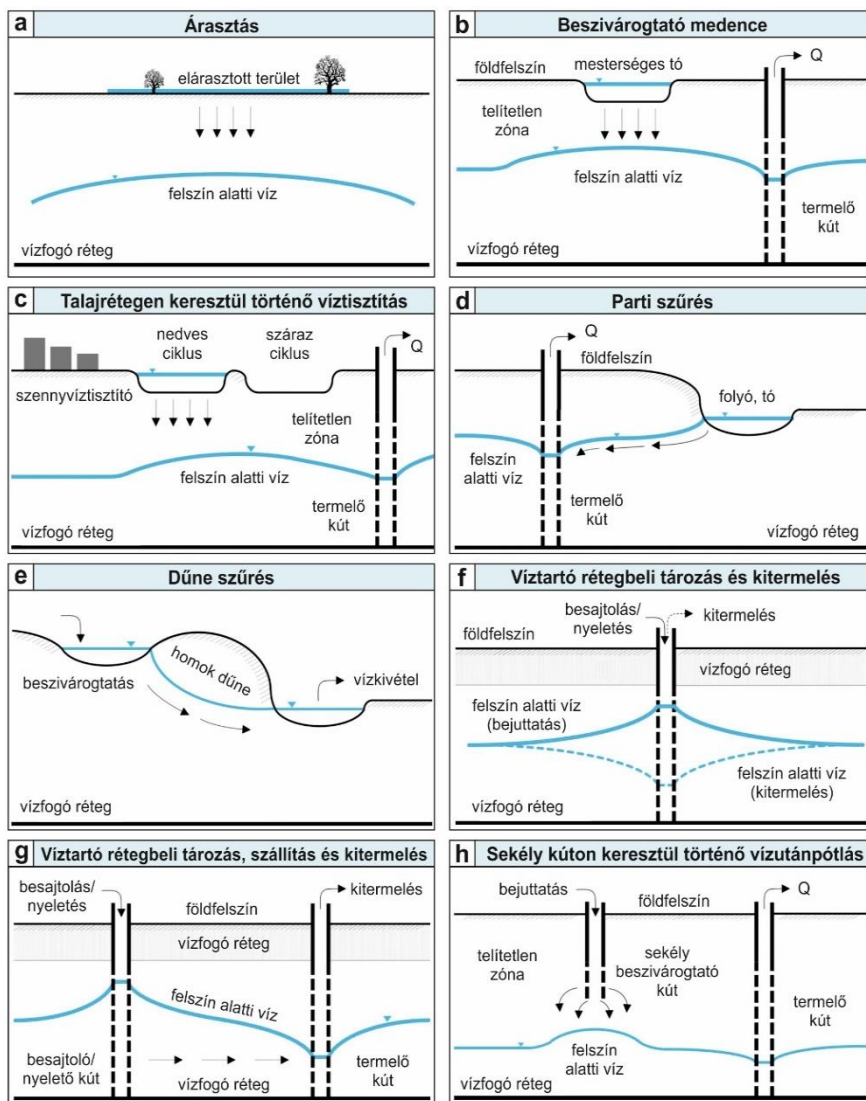
A dűne szűrés (2e. ábra) hasonló alapokon nyugszik, mint a szűkebb értelemben vett parti szűrés. Ebben az esetben a dűnék között tavakat hoznak létre, úgy, hogy a vízük a lejtés irányában átszivárognon a dűnerendszeren (szabadon vagy külső kényszer hatására). Ezáltal a vízből eltávolíthatók a szuszpendált szennyező anyagok és a kórokozók. Miután átesett a felszín alatti szűrésen, a vizet a dűnerendszer mélyebb fekvésű részein kialakuló tavakból vagy felszín alatti galériákból termelik ki.

### Kúton, aknán vagy fúrólukon keresztül történő vízutánpótlás

#### Vízartó rétegbeli tározás és kitermelés

A vízartó rétegbeli tározás és kitermelés (Aquifer Storage and Recovery – ASR) esetén egy mélyebb kutat

fúrnak, melyet a célzott víztartóra szűrőznek és a pótlásra használt víz nyeletésére vagy besajtolására, valamint vízkivételre egyaránt használnak (2f. ábra). Ezt a MAR módszert ott alkalmazzák elsősorban, ahol nagy vastagságú és alacsony permeabilitású réteg van jelen az utánpótlni kívánt víztartó felett. A nemzetközi tapasztalatok tükrében a legtöbb jelenleg működő ASR rendszer célja a víz tárolása a víztartóban a nagyobb vízigényű időszakban történő vízkivétel céljából. Azaz a vízhiányos és víztöbblettel rendelkező időszakok közötti különbség enyhítése. A kúton keresztül besajtoló módszerek megfelelő vízminőséget igényelnek, mivel közvetlenül juttatják a vizet a víztartóba. Előnye, hogy a felszínközeli képződmények itt nem játszanak szerepet, illetve relatíve kis területet igényel, így akár beépített területeken is alkalmazható.



2. ábra. Elsősorban a víz beszivárogatására, pótlására irányuló MAR módszerek

(Megjegyzés: a: árasztás, b: beszivárogató tavak és medencék, c: talajrétegen keresztül történő víztisztítás, d: parti szűrés, e: dűne szűrés, f: vízartó rétegbeli tározás és kitermelés, g: vízartó rétegbeli tározás, szállítás és kitermelés, h: sekély kúton keresztül történő vízutánpótlás)

Figure 2. MAR techniques referring primarily to getting water infiltrated

(Notes: a: Flooding, b: Infiltration Ponds and Basins, c: SAT (Soil Aquifer Treatment), d: Induced Bank Filtration, e: Dune filtration, f: ASR (Aquifer Storage and Recovery), g: ASTR (Aquifer Storage, Transfer and Recovery), h: Shallow well infiltration)

#### Vízartó rétegbeli tározás, szállítás és kitermelés

A vízartó rétegbeli tározás, szállítás és kitermelés (Aquifer Storage and Recovery – ASTR) esetén a

vizet egy kúton keresztül injektálják a víztartóba, és egy másik, tőle távolabb található kútból nyerik ki (2g. ábra). A felszín alatt megtett áramlási útja során fizikai és kémiai folya-

matok játszódnak le, amelyek javítják a bejuttatott víz minőségét. A bejuttatott vízre vonatkozó minőségi kritériumok e módszer esetén is fennállnak.

#### *Sekély/ásott kúton, aknán keresztül történő vízutánpótlás*

A sekély kutakon (2h. ábra), aknákon vagy gödrökön keresztül történő utánpótlást rendszerint olyan területeken használják, ahol a felszíni beszivárogató módszerek nem alkalmazhatók, pl. felszín közelében található alacsony permeabilitású rétegek jelenléte, nagymértékű evapotranspiráció vagy beépítettség miatt. Gyakran felhagyott kutakat vagy gödröket használnak, amelyek korábban szárazak voltak. A beszivárogató létesítménybe táplált víz lassan utánpótolja a víztartó réteg vizét. Ez egy meglehetősen költséghatékony módszer, mert az utánpótlást csak a gravitáció szabályozza.

#### **Medermorfológia-módosítás a beszivárogatás elősegítésére**

##### *Meder horizontális kiterjesztése*

Ez a módszer a rátápláló folyók medrének horizontális kiterjesztését jelenti, mely révén a vízelvezető csatorna vagy folyó medrének nedvesített felületét mesterségesen megnövelik, fokozva ezzel a víztartóba történő beszivárgást. A csatorna kiszélesíthető, kiegyenlíthető, bordázható vagy kotorható. A vízáramlás iránya is módosítható L-alakú gátak segítségével (3a. ábra). A beszivárgási felület növelésével és az áramlási sebesség csökkentésével az utánpótlódás mértéke növelhető.

##### *Utánpótlódást segítő gát*

Az utánpótlódást segítő gátak olyan alacsony permeabilitású szerkezetek, melyeket rátápláló folyók medrébe építenek, így felszíni rezervoárok létrehozásával a folyóvízi és felszíni lefolyás vize nem vész el, tárolható. A beszivárogatás kétféleképpen történhet. Az egyik lehetőség, hogy elgátolással lehetővé teszik az utánpótlódást segítő gát mögötti rezervoárból történő beszivárgást (3b. ábra). A vízkivétel a gát alatt történik a felszín alatti víztartóból. A másik lehetőség, hogy szabályozottan átengedik a vizet a gáton, így a víz az alvízi oldalon a folyómedren keresztül fog beszivárogni.

##### *Homok kitöltésű tározó gáttal*

Ezek a gátak olyan felszínen kialakított szerkezetek, melyeket időszakos folyók medrébe építenek. Esőzések során a felszíni lefolyás homokot és kavicsot halmoz fel a gát szerkezet mögött, így létrehoz egy víztartót, ami képes tárolni a heves esőzések utáni felszíni lefolyás vizét (3c. ábra). A víztartó akár mesterségesen is létrehozható. Az esőzések során a rezervoár megtelik vízzel, tárolja a vizet, ahelyett, hogy engedné tovább haladni a vízgyűjtő mélyebb részei felé. Ez a MAR módszer növelheti a víz elérhetőségét száraz évszakok alatt, csökkentve a víz párolgását, megvédve a szennyeződésektől. Gyakran alkalmazzák Afrika Szaharától délre fekvő területein, továbbá a vidéki közösségek számára is életképes technológiát nyújthat, mivel a megépítéséhez szükséges anyagok akár helyben is megtalálhatók.

##### *Felszín alatti gát*

A felszín alatti gátak olyan alacsony áteresztőképességű akadályok (szádfalak), amelyeket a felszín alá helyeznek el (3d. ábra). Ezek a szerkezetek részlegesen gátolják a felszín alatti víz oldalirányú áramlását és így a víz

szintjének megemelésével a felszín alatti vizet tárolják. A felszín alatti gátak megépítéséhez egy patakon vagy völgyön keresztül árkot mélyítenek, amíg el nem érik az alapkőzetet vagy egy agyagréteget. Az árkokban szádfalat építenek, majd az árkot visszatemetik a kiasott anyaggal.

#### **Esővíz és felszíni lefolyás összegyűjtése és felhasználása (Rainwater and run-off harvesting)**

##### *Gátak és töltések*

Az akadályok, gátak, töltések építésének célja, hogy akadályozzák a gyors felszíni lefolyást a vízgyűjtőkről, összegyűjtésük a csapadékvizet, elősegítve ezzel a nagyobb mértékű beszivárgást (3e. ábra). Ezek a szerkezetek könnyen megépíthetők, karbantarthatók és árkokkal együtt is használhatók.

##### *Esővíz összegyűjtése háztetőkről és felszín alá juttatása*

A városi területeken egyre gyakrabban alkalmazzák a háztetőkről történő esővíz összegyűjtést (3f. ábra). A felhasználások sokrétűek és magukba foglalják a víz felszíni tárolását tartályokban, valamint öntözésre és a felszín alatti víz utánpótlására való felhasználását. Az összegyűjtött esővíz beszivárogató árkok, altalajöntözés (dréncsövek) vagy bármely más, kis területigényű MAR módszer segítségével. Mivel a városi területeket burkolt felületek jellemzik, a víz összegyűjtése és felszín alá juttatása segít a vízszint fenntartásában. Segítenek továbbá csökkenteni a heves esőzések során a felszíni lefolyást és az elszennyeződést.

##### *Árkok a felszíni lefolyás összegyűjtésére*

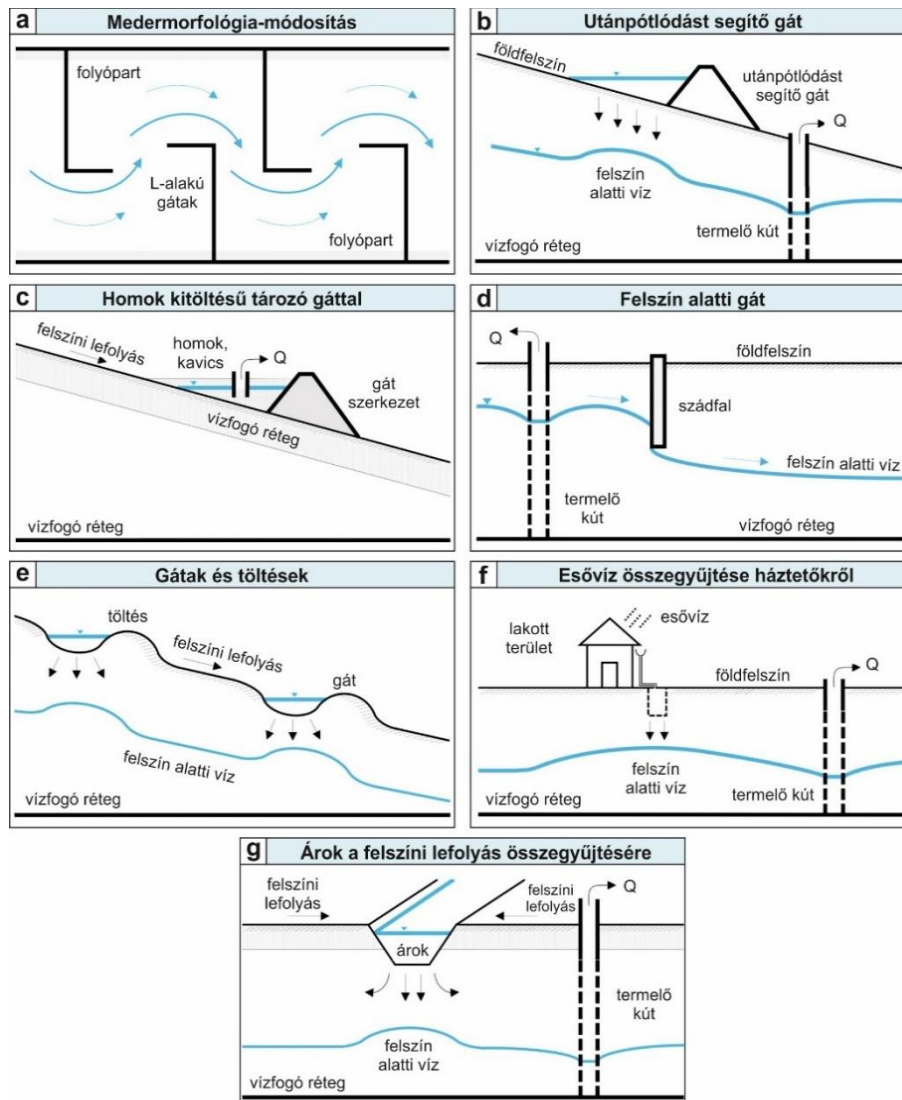
Az árkok létrehozásának célja, hogy akadályozzák a felszíni lefolyást a vízgyűjtőkről és koncentráltan szivárogtassák be a vizet. Az összegyűjtött esővíz beszivárogató árkokon (3g. ábra), aknákon és gödrökön keresztül. Ezek a szerkezetek könnyen megépíthetők, karbantarthatók, és hozzájárulhatnak a vízpótláshoz, ha azokat jó vízáteresztő képződményeken alakítják ki.

#### **MAR MÓDSZEREK ALKALMAZÁSÁNAK FELTÉTELEI ÉS MEGTERVEZÉSÉNEK LÉPÉSEI**

A célzott felszín alatti vízutánpótlás további lehetőséget nyújt a területi vízgazdálkodásnak, de csak bizonyos feltételek teljesülése esetén alkalmazható (Dillon és társai 2009):

1. van-e igény további víz kitermelésére, használható-e a területen;
2. van-e megfelelő forrása az utánpótlásra használt víznek;
3. van-e megfelelő víztartó, melyben a víz tárolható és abból ki is termelhető;
4. van-e megfelelő terület a létesítmények számára;
5. van-e megfelelő tudás a kivitelezéshez és a fenntartható működéshez.

Az első és legfontosabb szempont a MAR rendszerek tervezése során a vízpótlás céljának, illetve az elérni kívánt hatásnak a meghatározása, a kitermelni kívánt víz mennyisége és minősége szempontjából (4. ábra). A beszivárogatásra alkalmas, megfelelő minőségű víz megléte szintén elengedhetetlen tényező. A víz forrása lehet esővíz, folyóvíz, tóvíz, felszín alatti víz, brakkvíz és tisztított szennyvíz, a helyi adottságoktól, illetve a MAR rendszer céljaitól függően (Dillon és társai 2009).



3. ábra. Elsősorban a víz felfogására, összegyűjtésére, majd beszivárgtatására irányuló MAR módszerek (Megjegyzés: a: medermorfológia-módosítása L-alakú gátak segítségével, b: utánpótlódást segítő gát, c: homok kitöltésű tározó gáttal, d: felszín alatti gát, e: gátak és töltések, f: esővíz összegyűjtése háztetőkről, g: árok a felszíni lefolyás összegyűjtésére)

Figure 3. MAR techniques referring primarily to intercepting the water

(Notes: a: Channel spreading with "L" shaped levees, b: Recharge Dam, c: Sand Storage Dam, e: Barriers and Bunds, f: Roof-top Rainwater Harvesting, g: Trench)



4. ábra. A MAR rendszerek megtervezésének lépései (Salameh és társai 2019 alapján)

Figure 4. Workflow for planning MAR systems (based on Salameh et al. 2019)

A következő lépés az alkalmas területek felmérése, melyek feltárására gyakran MAR alkalmassági térképezést végeznek (Sallwey és társai 2018). Mérvadó szempont a terület geológiai felépítése, a domborzat, az éghajlat, a hidrogeológiai viszonyok stb., de az alkalmazni kívánt módszertől és a helyi viszonyoktól függően a vizsgálati paraméterek változhatnak. Az alkalmassági térképezés segít MAR létesítésére alkalmas helyek kiválasztásában és így nagyobb eséllyel jöhet létre sikeres MAR rendszer. Az előzetes helykiválasztást követően, annak megállapításához, hogy az adott helyszínen megvalósítható-e a vízpótlás, helyszíni vizsgálatokat kell végezni. Kiemelten fontos többek között a víztartó típusa, mely alapvetően megszabja, hogy felszíni beszivárogtató módszerek vagy kúton át történő vízutánpótlás alkalmazható a területen. Az előbbi esetén fedetlen víztartóra van szükség, míg az utóbbinál a fedett víztartó megfelelőbb. MAR módszerek szempontjából a legjobb víztartók nagyobb vertikális kiterjedéssel rendelkeznek, nagy mennyiségű víz tárolására és szállítására képesek, hidraulikai paraméterek szempontjából többnyire homogének, továbbá tározás szempontjából előnyt jelent, ha a vízáramlás sebessége alacsony. Ezzel szemben nem érdemes MAR módszereket alkalmazni, pl. ha a víztartó túl vékony, vagy finomszemcsés konszolidálatlan üledék alkotja, ha vezető vetők vannak jelen, ha gyenge minőségű vizet tartalmaz, ha a vízszint a felszínhez közeli, vagy ha nagyon nagy a vízáramlás horizontális komponense (Dillon és társai 2009). A legtöbb esetben porózus közegbe történik a vízpótlás, de a módszer alkalmazható karsztos, illetve repedéses víztartók esetén is (Gale 2005, Daher és társai 2011, Xanke és társai 2015).

A kitűzött célt, valamint a helyi lehetőségeket figyelembe véve, meg kell határozni az alkalmazni kívánt MAR módszert, valamint a víz kitermelésének módját. Ezt követően fel kell mérni a vízpótlás lehetséges hatásait, a fizikai és kémiai terhelés mértékét, a víztartóban előreláthatóan lejátszódó folyamatokat, majd ez alapján kockázat elemzést végezni. A MAR rendszer megtervezésénél törekedni kell, az egyre növekvő információ mennyiség birtokában, a kockázatok folyamatos csökkentésére (Dillon és társai 2009), melyhez a numerikus modellezési szcenáriók is nagyban hozzájárulhatnak (Ringleb és társai 2016).

Abban az esetben, ha a rendszer nem működik megfelelően, különböző problémák léphetnek fel, pl. a pórusok eltömődése, alacsony kinyerési kapacitás (jelentős vízvesztés), a vízminőség romlása, szennyezések, túlzott vízszint emelkedés, vízelöntés és műszaki földtani problémák (Gale 2005, Dillon és társai 2009). A hidrogeológusok szerepe kiemelten fontos egy ilyen projekt megtervezésében, hiszen a terület földtani, hidrológiai, hidrogeológiai viszonyainak (Dillon 2005), valamint a tágabb terület áramlási rendszereinek ismerete elengedhetetlen a megfelelő kivitelezéshez. Ezzel együtt bizonyos esetekben a hidrogeológus feladata az, hogy egy adott probléma megoldása kapcsán a MAR módszerek alkalmazása ellen érveljen, amennyiben az túl nagy kockázattal járna (Dillon 2005).

## NEMZETKÖZI MAR ADATBÁZIS ÉS JELENTŐSÉGE

A témakör fokozódó nemzetközi jelentősége, valamint a technológiai megoldások bővülése következtében mára elkészült egy MAR helyszíneket összefogó nemzetközi adatbázis (*Global MAR Inventory*), amely ma már több, mint 1 200 MAR helyszínt és a hozzájuk kapcsolódó alapadatokat, működtetési paramétereket, hidrogeológiai tulajdonságokat, illetve egyes esetekben vízkémiai paramétereket, sőt gazdasági információkat, valamint a kapcsolódó cikkek hivatkozásait is tartalmazza (Stefan és Ansems 2017a). Az adatbázis létrehozásának egyik fő célja, hogy a benne található MAR helyszínek ismerete alapján, azok előnyeiből és hátrányaiból tanulva, új MAR helyszínek létesülhessenek (Stefan és Ansems 2017a). A már korábban létrehozott projektek tanulságait felhasználva kevesebb befektetést igényelve és kisebb kockázattal létesíthetők új rendszerek (Dillon és társai 2009). Mivel az egyes MAR módszerek alkalmazhatósága jelentősen függ többek között domborzati, éghajlati, földtani, valamint az épített környezet adottságaitól, így az egyes MAR helyszínek is különböznek egymástól. Az éghajlat befolyásoló hatására jó példa, hogy míg Európában a MAR-ok alkalmazásának elsődleges célja a vízminőség javítása, addig Ausztráliában a környezeti hasznot, illetve a természetes tározás maximalizálását tartják elsődleges célnak. Ennek megfelelően Európában a legelterjedtebb módszer a parti szűrés, valamint a felszíni beszivárogtatás, Ausztráliában viszont gyakran alkalmaznak medermorfológia-módosítást vagy kúton át történő injektálást (Stefan és Ansems 2017b). Ennek ellenére a korábban bemutatott MAR módszerek és az ezekből kifejleszthető egyedi megoldások számos lokális vízgazdálkodási, vízminőségi, műszaki földtani probléma megoldására alkalmazhatók, a helyi adottságok függvényében.

Európából több, mint 200 működő MAR helyszínt tartalmaz az adatbázis, a legtöbb Németországban, Hollandiában és Franciaországban található (Sprenger és társai 2017). Itt szintén megfigyelhetők területi különbségek, elsősorban északról dél felé haladva. Észak-Európában az elsődleges cél, hogy felszíni beszivárogtató módszerekkel növeljék a felszín alatti víz elérhetőséget, ezen túl néhány tóhoz kapcsolódó parti szűrészű rendszer is előfordul. Közép-Európában a Rajna, Elba és Duna mentén számos parti szűrészű rendszer található. Ezzel szemben Dél-Európában elsősorban felszíni beszivárogtató módszereket használnak és sok esetben úgy, hogy nem termelik ki a vizet, az elsődleges cél a víztartók vizének utánpótlása (Sprenger és társai 2017).

A nemzetközi MAR adatbázis mindössze 6 magyarországi helyszínt tartalmaz, 5 parti szűrészű rendszert (Nagybajcs-Szögye, Koppánymonostor, Esztergom, Szentendrei-sziget és Csepel-sziget), valamint egy beszivárogtató medencét (Borsodszirák). Sajnos több helyen a meglévő adatok is hibásak. Ezért kiemelten fontos a magyarországi tapasztalatok beépítése a nemzetközi adatbázisba, hogy ezzel a nemzetközi viszonylatban is jelentős mennyiségű hazai rendszerünk (elsősorban parti szűrés) még jobban bekerüljön a köztudatba és a nemzetközi ismeretanyagba.



## VÍZGAZDÁLKODÁSI PROBLÉMÁK MAGYARORSZÁGON ÉS LEHETSÉGES MEGOLDÁSAIK A MAR MÓDSZEREK ALKALMAZÁSÁVAL

Magyarországon a vizek visszatartásának és a felszín alatti víz utánpótlásának egyre nagyobb szerepe lesz a klímaváltozáshoz való alkalmazkodásban, különös tekintettel arra, hogy Magyarország felszíni vizek tekintetében tranzitország. Az országból kifolyó vizek 95%-a külföldről érkezik és mindössze 5%-a származik helyi felszíni lefolyásból. Ezekhez mérten az ország területén leesett csapadék mennyiségét gyakran elhanyagolhatónak tekintik, pedig visszatartásával jelentős víztartalékokat lehetne felhalmozni (Somlyódy 2011). Továbbá a Kárpát-medencére jellemzőek az éghajlati szélsőségek és ehhez kapcsolódóan az árvizes, belvizes és aszályos időszakok váltakozása, melyek gyakran egy hidrológiai éven belül is előfordulhatnak (pl. 2000-ben, ld. Pálfai 2013) és ez komoly problémákat okoz elsődlegesen a mezőgazdaságban. Ezen túlmenően az Alföldön a felszín alatti vízkészletek kihasználtsága 70% körüli, mely a jövőben várhatóan tovább fog növekedni az éghajlatváltozás által előidézett beszivárgáscsökkenés következtében (Somlyódy 2011). A leginkább érintett területek elsősorban a folyóktól távolabbi, helyi viszonylatban magasabban fekvő területek (pl. a Duna-Tisza köze, a Nyírség és a Maros-hordalékkúp), ahol már jelentkeznek vízgazdálkodási problémák, több helyen a talajvízszint jelentős süllyedése figyelhető meg (VGT3 JVK vitaanyag 2020). Ezek azok a területek, melyek vízellátási problémáin segíthetne a MAR rendszerek elterjedése.

Korábban megfogalmazódott (Páris 2006), de mára egyre inkább növekszik az igény a belvizek és az árvizek (Derts és Koncos 2012, Dobó és társai 2020), valamint a csapadékvizek (Bíró 2019, Gayer 2019) visszatartására, továbbá a szennyvizek újrahasznosítására (Vermes 2017, Tóth 2018). Ezek a többletvízforrások alkalmazhatóak lehetnének a csökkenő felszín alatti vízszintek megállítására (Pálfai 1995, Szalai 2011, Rakonczai és Fehér 2015), az aszálykori vízhiány csökkentésére (Pálfai 2004, Tamás 2017), a növekvő öntözési vízigény kielégítésére (Ligetvári 2017), valamint a felszín alatti víztől függő ökoszisztémák (FAVÖKO) helyreállításához és fenntartásához (Nagy és társai 2016) is hozzájárulna, melyek szintén jelentős vízgazdálkodási kihívások Magyarországon. A célzott felszín alatti vízutánpótlás, mint módszer megoldási lehetőséget kínál a vízbőség és a vízhiány kiegyenlítéséhez, a stabilabb vízellátás biztosításához és a klímaváltozáshoz való alkalmazkodáshoz (5. ábra). Ennek megvalósulásához elengedhetetlen a magyarországi helyzet ismerete mellett a nemzetközileg alkalmazott módszerek ismerete, továbbá a lehetőségek felmérése, stratégiák kidolgozása, valamint a jogi keretek megteremtése.

A célzott felszín alatti vízpótlás Magyarországon eddig még nem zárkózott fel a jelenlegi nemzetközi szinten ismert lehetőségekhez. Azonban most, a vízgazdálkodás, a vidékfejlesztés, a mezőgazdaság, az öntözés, az erdőtelepítés, a klímaváltozáshoz való alkalmazkodás, valamint az ezekhez kötődő stratégiai programok egyre hatékonyabb összehangolása miatt felértékelődött és fontosabbá vált Magyarország számára. E téma további jelentőségét

adja, hogy a mezőgazdasági, öntözési célú vízhasználatok (felszíni és felszín alatti) intenzívebbé válása, nemzetközi példák alapján, hosszú távon a talajvízszint csökkenését idézte elő a világ számos országában (Konikow és Kedy 2005, Döll és társai 2014). Azaz az öntözés és az erdőtelepítés, nem csak a felszínközeli talajnedvesség vagy háromfázisú zónát érinti, mely az agrár szakemberek figyelmének középpontjában áll, hanem a talajvízszint alatti telített zónát is. A MAR megoldás ezt a problémát előzi meg és biztonságosabbá teszi a víz tartós rendelkezésre állását a telített és telítetlen zónában egyaránt. Tehát érdemes lenne megfontolni a MAR módszerek alkalmazását és beépítését az öntözési tervekbe. Ennek jelentőségét a klímaváltozás érzékelhető hatásai még inkább hangsúlyozzák.



5. ábra. MAR rendszerek alkalmazási lehetőségei a hazánkban jelenlévő vízgazdálkodási problémák megoldásának elősegítésére  
Figure 5. MAR systems as possible solutions to numerous water management problems in Hungary

A megfelelő MAR megoldások megtalálása kutatásban dolgozó és a gyakorlati szakemberek együttműködését igényli. Szükség van természettudományos megalapozottságra a megfelelő hely kijelöléséhez, mérnöki tervezésre a MAR rendszer kialakításához, továbbá ökológiai, mikrobiológiai, kémiai szempontok értékelésére, gazdaságossági és társadalmi vonatkozások bevonására. Ezen túl valamennyi országban a MAR projektek a vízgazdálkodási és vízügyi hálózat, minisztériumok, hatóságok, egyetemek, kutatóintézetek, kivitelezők és üzemeltetők közötti kapcsolatok hatékony erősítését igényli.

Az ELTE ENeRAG H2020 projektje „Excellency Network Building for Comprehensive Research and Assessment of Geofluids” kiemelt témaként foglalkozik a MAR rendszerek hatékonyabb elterjesztésével. A projekt többek között az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) is támogatja partnerként. A projekt keretében létrejött egy kapcsolat a Milánói Egyetem (UMIL), a Finn Földtani Intézet (GTK) és az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra munkatársai között. Ez lehetővé teszi többek között, a célzott felszín alatti vízutánpótlással kapcsolatos tudáscserét és ezáltal a megszerzett ismeretek itthoni alkalmazását. Ezen túl a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálattal (MBFSZ) is kialakult egy partneri együttműködés, ahol elindult a DEEPWATER-CE projekt. A projekt célja, hogy a célzott felszín alatti vízutánpótlás közép-európai alkalmazhatóságát vizsgálja, különös tekintettel a klímaváltozás jövőbeli hatásaira. Ennek keretében

négy mintaterületre megvalósíthatósági tanulmány is készült, melyek közül az egyik, a Maros-hordalékkúp. Mindkét projekt további célja egy európai uniós iránymutatásokkal összhangban álló útmutató kidolgozása, mely lehetőséget biztosít majd a témában való előrelépéshez és a célzott felszín alatti vízutánpótlás hazai stratégiákba való beépítéséhez.

### ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt évtizedekben a célzott felszín alatti vízutánpótlás önálló tudományterületté nőtte ki magát, jelentős mennyiségű nemzetközi szakirodalommal, mind a rendszerek megtervezése, mind a működés során lejátszódo folyamatok kapcsán. Ez a felhalmozott ismeretanyag nagyban segíti az új projektek létrehozását. A tanulmány ebből az ismeretanyagból ad egy rövid szakirodalmi összefoglalót.

Magyarországon, a parti szűrésű rendszereken túl, az egyéb vízpótlási módszerekre való igény évtizedek óta jelen van. A klímaváltozáshoz való alkalmazkodás kapcsán egyre sürgetőbbé válik a korábbi kizárólag felszíni tározásban és elvezetésben gondolkodó gyakorlat újragondolása, valamint a felszíni és felszín alatti vizekkel való komplex gazdálkodás hatékonyságának növelése. A célzott felszín alatti vízutánpótlás a víz kártékony hatásai ellen való védekezéshez, illetve a szezonális vízhiány csökkentéséhez egyaránt segítséget nyújthat, mely megoldási lehetőségként szolgálhat a területi vízgazdálkodási problémákra. Ehhez kormányzati megértésre, elfogadásra és támogatásra van szükség, továbbá elengedhetetlen a különböző szakterületek (hidrogeológia, mérnöki tervezés, ökológia, mikrobiológia, kémia, társadalom- és gazdaságtudományok) együttműködése, valamint az egyetemek, kutatóintézetek, vízügyi igazgatás, vízügyi cégek, kivitelezők közötti kapcsolatok erősítése.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány az ENeRAG projekt keretein belül készült, melyet az Európai Unió Horizont 2020 kutatási és innovációs programja támogatott, a 810980 azonosító számú támogatási megállapodás alapján és melyben az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) intézményi támogató.

### IRODALOMJEGYZÉK

Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10(1), pp. 121-142.

Csobok V. (1962). Talajvízdúsítás. *Hidrológiai Tájékoztató*, 2(1), pp. 34-35.

Bauer M. (1973). A talajvízdúsítás Hollandiában alkalmazott módszere, erősen szennyezett felszíni vizek tisztítására. *Hidrológiai Közlemények*, 53. évf. 8. szám, pp. 364-369.

Biró T. (szerk.). (2019). Országos Települési Csapadékvíz-gazdálkodási Konferencia Tanulmányok. *Dialóg Campus Kiadó*, Budapest, 306 p.

Daher, W., Pistre, S., Kneppers, A., Bakalowicz, M., Najem, W. (2011). Karst and artificial recharge: Theoretical and practical problems: A preliminary approach to artificial recharge assessment. *Journal of Hydrology*, 408(3-4), pp. 189-202.

DEEPWATER-CE projekt magyar weboldala: <https://mbfsz.gov.hu/futo-palyazatok/deepwater-ce> (Hozzáférés dátuma: 2020.04.07.)

Derts Zs., Koncsos L. (2012). Flood Risk Mitigation in the Tisza Valley by Deep Floodplain Reservoirs: The Effect on the Land Use. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 1(1B), pp. 34-40.

Déri J. (1972). Talajvízdúsítás. *Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató, Vízügyi Dokumentációs és Tájékoztató Iroda*, Budapest, 162 p.

Déri J. (1975). Talajvízdúsítás a vízmérnöki gyakorlatban. *Vízügyi Közlemények*, 57. évf. 3. szám, pp. 355-380.

Dillon, P. (2005). Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 13(1), pp. 313-316.

Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., Ward, J. (2009). Managed aquifer recharge. *An introduction waterlines report series 13*, 86 p.

Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., Shamruk, M., Pavelic, P., Murray, E., Ross, A., Bonilla Valverde, J. P., Palma Nava, A., Ansems, N., Posavec, K., Ha, K., Martin, R., Sapiano, M. (2018). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27(1), pp. 1-30.

Dobó K., Göncz B., Iványi K. (2020). Az árvíz- és belvízvédelem országos helyzetképe. *Hidrológiai Közlemények*, 100. évf. 1. szám, pp. 5-19.

Döll, P., Müller Schmied, H., Schuh, C., Portmann, F. T., Eicker, A. (2014). Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modelling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 50(7), pp. 5698-5720.

ENeRAG projekt weboldala: <http://enerag.elte.hu/> (Hozzáférés dátuma: 2020.06.12.)

Evans, R. S., Dillon, P. (2018). Linking groundwater and surface water: conjunctive water management. In: *Advances in Groundwater Governance*, Villholth, K. G., López-Gunn, E., Conti, K. I., Garrido, A., van der Gun, J. (eds.), CRC Press, London, pp. 329-351.

Fázold Á. (1968). Felszínivíz tisztítás talajvízdúsítással. *Hidrológiai Közlemények*, 48. évf. 6. szám, pp. 264-271.

Gale, I. (2005). Strategies for managed aquifer recharge in semi-arid areas. *UNESCO-IHP Publications*, 30 p.

Gayer J. (2019). Gondolatok a települési csapadékvízről. *Hidrológiai Közlemények*, 99. évf. 3. szám, pp. 77-79.

Global MAR Inventory (IGRAC): <https://apps.geodan.nl/igrac/ggis-viewer/viewer/globalmar/public/default> (Hozzáférés dátuma: 2020.06.12.)

- IAH (2019). Climate-Change Adaptation and Groundwater. *Strategic Overview Series of International Association of Hydrogeologists*, 6 p. [https://iah.org/wp-content/uploads/2019/07/IAH\\_Climate-ChangeAdaptationGdwtr.pdf](https://iah.org/wp-content/uploads/2019/07/IAH_Climate-ChangeAdaptationGdwtr.pdf) (Hozzáférés dátuma: 2020.06.12.)
- IAH-MAR Commission weboldala: <https://recharge.iah.org/> (Hozzáférés dátuma: 2020.06.12.)
- IGRAC (2007). Artificial Recharge of Groundwater in the World. *International Groundwater Resources Assessment Centre*, 92 p.
- INOWAS (Drezdai Műszaki Egyetem, Németország) kutatócsoport weboldala: <https://inowas.hydro.tu-dresden.de/managed-aquifer-recharge/> (Hozzáférés dátuma: 2020.06.12.)
- Karácsonyi S., Öllős G. (1980). A talajvízdúsítás időszerű kérdései. *Hidrológiai Közlöny*, 60. évf. 10. szám, pp. 436-450.
- Konikow, L. F., Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13(1), pp. 317-320.
- Kontur Á. (1993). Partiszűrésű vízbeszerzés a Fővárosi Vízműveknél. *Hidrológiai Közlöny*, 73. évf. 3. szám, pp. 139-141.
- Ligetvári F. (2017). Az öntözés szerepe. *Hidrológiai Közlöny*, 97. évf. 2., pp. 59-67.
- Nagy, I., Tombác, E., László, T., Magyar, E., Mészáros, Sz., Puskás, E., Scheer, M. (2016). Vízviasszatartási mintaprojektek a Homokhátságon: "Nyugati és Keleti" mintaterületek. *Hidrológiai Közlöny*, 96. évf. 4. szám, pp. 42-60.
- Nemzeti Vízstratégia (2017). Kvassay Jenő Terv – Nemzeti Vízstratégia. *Országos Vízügyi Főigazgatóság*, 140 p.
- NRMMC, EPHC, NHMRC (2009). Australian Guidelines for water recycling, managing health and environmental risks (Phase 2): Managed aquifer recharge. *Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, National Health and Medical Research Council*, 237 p. [http://www.nepc.gov.au/system/files/resources/5fe5174a-bdec-a194-79ad-86586fd19601/files/wq-agwr-gl-managed-aquifer-recharge-final-200907\\_1.pdf](http://www.nepc.gov.au/system/files/resources/5fe5174a-bdec-a194-79ad-86586fd19601/files/wq-agwr-gl-managed-aquifer-recharge-final-200907_1.pdf)
- OVGT2 (2015). Magyarország második országos Vízyűjtő-gazdálkodási Terve. *Országos Vízügyi Főigazgatóság*, 676 p.
- Öllős G. (1970). Talajvízdúsítás fokozódó szerepe. *Vízügyi Közlemények*, 52. évf. 1. szám, pp. 3-40.
- Pálfai I. (1995). A Duna-Tisza közti hátság vízgazdálkodási problémái és megoldásuk lehetséges útjai. *Vízügyi Közlemények*, 77. évf. 2. szám, pp. 144-165.
- Pálfai I. (2004). Belvizek és aszályok Magyarországon. *Hidrológiai tanulmányok. Közlekedési Dokumentációs Kft.* Budapest, 492 p.
- Pálfai I. (2007). Magyarország vízkészletei és hasznosításuk a mezőgazdaságban és a vidékfejlesztésben. *Hidrológiai Közlöny*, 87. évf. 4. szám, pp. 38-40.
- Pálfai I. (2013). Vízháztartási szélsőségek a Kárpát-medencében. *Hidrológiai Közlöny*, 93. évf. 2. szám, pp. 9-12.
- Páris E. (1961). A talajvízdúsítás néhány külföldi példája. *Vízügyi Közlemények*, 43. évf. 1. szám, pp. 74-91.
- Páris E. (2006). Felszín alatti vízáadó rétegek komplex hasznosítása. *A Magyar Hidrológiai Társaság XXIV. Országos Vándorgyűlése II. kötet*, pp. 716-728.
- Rakonczai J., Fehér Zs. (2015). A klímaváltozás szerepe az Alföld talajvízkészleteinek időbeli változásaiban. *Hidrológiai Közlöny*, 95. évf. 1. szám, pp. 1-15.
- Ringleb, J., Sallwey, J., Stefan, C. (2016). Assessment of managed aquifer recharge through modeling—a review. *Water*, 8(12), 579.
- Salameh, E., Abdallat, G., van der Valk, M. (2019). Planning considerations of managed aquifer recharge (MAR) projects in Jordan. *Water*, 11(2), 182 p.
- Sallwey, J., Bonilla Valverde, J. P., Vásquez López, F., Junghanns, R., Stefan, C. (2019). Suitability maps for managed aquifer recharge: a review of multi-criteria decision analysis studies. *Environmental Reviews*, 27(2), pp. 138-150.
- Somlyódy L. (szerk.) (2011). Magyarország vízgazdálkodása: helyzetkép és stratégiai feladatok. *Magyar Tudományos Akadémia*, Budapest, 332 p.
- Stefan, C., Ansems, N. (2017a). Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. *Sustainable Water Resources Management*, 4(2), pp. 153-162.
- Stefan C., Ansems N. (2017b). Working group: Global MAR Inventory. *44th IAH Conference, Dubrovnik* <https://recharge.iah.org/files/2016/08/Presentation-Global-Inventory-WG-Stefan-IAH-MAR-Plenary-Dubrovnik-25-Sept-2017.pdf> (Hozzáférés dátuma: 2020. 06. 12.)
- Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmaier, G., Scheibler, F., Hannappel, S. (2017). Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeology Journal*, 25(6), pp. 1909-1922.
- Szalai J. (2011). Talajvízszint-változások az Alföldön. In: *Környezeti változások és az Alföld*, Rakonczai J. (szerk.), Nagyalföld Alapítvány Kötetei 7., Békéscsaba, pp. 97-110.
- Tamás J. (2017). Az aszály. *Magyar Tudomány*, 178(10), pp. 1228-1237.
- Tóth T. (2018). Vízminőségi követelmények vizsgálata a víz újrahasonosítási projektek elősegítése érdekében. *Műszaki Katonai Közlöny*, 28(4), pp. 33-46.
- van Steenbergen, F. V., Tuinhof A. (2009). Managing the water buffer for development and climate change adaptation: groundwater recharge, retention, reuse and rainwater storage. *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Co-operative Programme on Water and Climate (CPWC) and Netherlands National Committee IHP-HWRP*, Wageningen, The Netherlands, 92 p.
- Vermees L. (2017). Vízgazdálkodásunk mostoha gyermeke – a szennyvízöntözés. *Hidrológiai Közlöny*, 97. évf. 1. szám, pp. 66-75.

VGT3 JVK *vitaanyag* (2020). Magyarország 2022–2027 időszakra vonatkozó, harmadik Vízyűjtő-gazdálkodási Tervének Jelentős Vízgazdálkodási Kérdéseinek *vitaanyaga*: <http://vizeink.hu/vizgyujto-gazdalkodasi-terv-2019-2021/jelentos-vizgazdalkodasi-kerdesek-jvk/> (Hozzáférés dátuma: 2020.05.18.)

Xanke, J., Goepfert, N., Sawarieh, A., Liesch, T., Kinger, J., Ali, W., Hötzl H., Hadidi K., Goldscheider, N. (2015). Impact of managed aquifer recharge on the chemical and isotopic composition of a karst aquifer, Wala reservoir, Jordan. *Hydrogeology Journal*, 23(5), pp. 1027-1040.

## A SZERZŐK



**SZABÓ ZSÓKA** 2016-ban végezte el az ELTE Földtudományi BSc képzését, majd 2018-ban kiegészítő Geológus MSc diplomát szerzett Hidrogeológia-Szénhidrogénföldtan-Környezetföldtan szakirányon. 2018-ban kezdte meg doktori tanulmányait az ELTE Környezettudományi Doktori Iskolájában. Kutatási témája a célzott felszín alatti vízutánpótlás hazai lehetőségeinek vizsgálata, a felszín alatti vízáramlások figyelembevételével. Doktori kutatása keretében elsősorban a Duna-Tisza közének vízgazdálkodási problémáival és azok megoldási lehetőségeivel foglalkozik. A Magyar Hidrológiai Társaságnak 2019 óta tagja.

**TAHY ÁGNES** az ELTE-n szerzett geológus diplomát 1990-ben, majd 1993-ban nemzetközi környezetvédelmi mérnök továbbképzésen szerzett végzettséget. Az Országos Vízügyi Főigazgatóság Vízzajzi és Vízyűjtő-gazdálkodási Főosztályán vízkészlet-gazdálkodási, vízbázis-védelemi, monitoring tevékenységek koordinációs, valamint a 2000/60/EK Vízzeljárásról szóló Irányelvnek megfelelő vízyűjtő-gazdálkodási tervezési feladatokat lát el. A Hidrogeológusok Nemzetközi Szövetsége (IAH) Magyar Nemzeti Tagozatának elnöke, a Magyar Hidrológiai Társaság tagja, amely 2020-ban Pro Aqua emlékéremmel tüntette ki.

**MÁDLNÉ SZÓNYI JUDIT** az ELTE-n szerzett geológus diplomát 1986-ban és 1997-ben hidrogeológia témában PhD fokozatot. Az ELTE Földrajz és Földtudományi Intézet, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékén működő Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra vezetője. 2012-től a Hidrogeológusok Nemzetközi Szövetsége (IAH) Regionális felszín alatti vízáramlási Bizottsága, 2018-tól pedig az MTA Hidrogeológiai Albizottság elnöke. Kutatási területe a regionális vízáramlási rendszerek hidrodinamikai viselkedése, a vízáramlások környezeti és földtani következményeinek megértése, karsztosulási folyamatok és az utóbbi években a célzott felszín alatti vízpótlás.



*Illusztráció a cikkhez. Parti szűrősű kutak a Szentendrei-szigeten (Fotó: Bajomi Bálint)*

## A mintavétel és az adatfeldolgozás szerepe a csapadékmaximum függvények megbízhatóságában és összehasonlíthatóságában

Rácz Tibor

A Szent István Egyetem Környezettudományi Doktori Iskolájának hallgatója (E-mail: raczt167@gmail.com)

### Kivonat

A globális felmelegedés és a klímaváltozás kapcsán sokszor elhangzik, hogy a csapadékok intenzívebbé váltak már napjainkra is, és a helyzet további kedvezőtlen alakulása várható. A kijelentés csak akkor értelmezhető, ha a korábbi adatok alapján megbízható csapadékmaximum (Intensity-Duration-Frequency IDF) görbéket tudunk felmutatni, amelyekhez képest a változás szembeötlő, kimutatható. A kérdés az összemérhetőség, van-e mihez képest változásról beszélni. A dolgozatban a megbízható csapadékatok kérdése kerül vizsgálat alá, mennyiben tekinthetők a korábbi adatok megbízhatónak, és ennek következményeképp mennyire megbízhatók a korábbi csapadékmaximum függvények (IDF görbék). A dolgozat rávilágít a mérési pontosság kérdésre, valamint az adatfeldolgozásban rejlő bizonytalanságokra, amelyek a mérési eljárásból szükségszerűen fakadnak. A dolgozat konklúziója az, hogy a felvetett kérdésekre megfelelő választ kell találni. Az összehasonlíthatóság érdekében a régi adatokon a megfelelő javításokat kell végezni, és utólag elő kell állítani a mai elveknek jobban megfelelő (pontosabb) IDF görbéket. Ez a kérdés lényeges a klímaváltozás jobb megismerése szempontjából, de semmiképp sem vetheti el a csapadékvíz elvezető rendszerek fejlesztéséhez a jelen adatokon nyugvó (a megfelelő adatminőségi elvek betartásával készített) IDF görbék előállítását és az alkalmazásba történő mihamarabbi bevezetését, továbbá az évtizedes lemaradás felszámolását a csapadékvíz elvezetés területén.

### Kulcsszavak

IDF görbék, archív csapadékintenzitás adatok, mintavétel, adatfeldolgozás, összehasonlíthatóság, klímaváltozás.

## Role of sampling and data processing methods in trustiness and inter-comparability

### Abstract

With regard to global warming and climate change, it is often said that rainfalls have become more intense to our days, the frequency of very intensive or even extreme rainfall is higher, and this trend would continue. The interpretability of the statement can be ensured by presenting reliable Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves, based on rainfall data of the past periods, against which the change can be recognised. The question is comparability, is there any change to a reference period or not. The paper examines the question of reliable precipitation data, the extent to which previous data can be considered reliable, and, consequently, the reliability of previous IDF curves. The paper highlights the issue of measurement accuracy, as well as the uncertainties inherent in data processing, which necessarily arise from the measurement procedure. The conclusion of the paper is that archive data were not analysed from point of view of data collection method and data processing, so the conclusion of the paper is that the above-mentioned questions should be answered in an appropriate way to have an acceptable base for the comparison of IDF curves. For the sake of comparability, appropriate corrections must be made to the old data, and even to the IDF curves to make them more adequate (more accurate) to the presently accepted data collection and processing principles. This issue is important for a better understanding of climate change, but it should in no way preclude the production and implementation of IDF curves based on the present data (prepared in accordance with appropriate data quality principles) for the elimination of decades long backlog in development of rainwater drainage systems.

### Keywords

IDF curves, archive rainfall intensity data, data sampling, data processing, comparability, climate change.

### BEVEZETÉS

Az elmúlt években közkeletű véleményé, axiómává vált az, hogy a vízelvezető rendszerek méretezéséhez használt csapadékmaximum függvények elavultak, mivel a klímaváltozás egyik hatásaként a csapadékoság megváltozott, és a csapadékok intenzívebbé váltak. Jellemzően visszatérő projekció, hogy a hazai nagycsapadékok legnagyobb intenzitásai is nőnek az előttünk álló évtizedekben (NATÉR 2016, Láng 2019, IPCC 2014). De tényleg nőnek a hazai nagycsapadékok intenzitásai? És ha nőnek, mihez képest nőnek? Ahhoz, hogy az állítás igazolható legyen, a régebbi időszakok csapadékatadatainak intenzitásáról kell megfelelő adatokkal rendelkezni, azokat kell az aktuális adatokkal összehasonlítani. Az összehasonlítás alapvető feltétele az összehasonlíthatóság. Ahhoz, hogy egyes adatokat összehasonlíthassunk az összehasonlíthatóságukról, annak határaitól meg kell győződjünk. Első körben tehát a csapadékintenzitás mérését és az adatok rögzítését kell

vizsgálat tárgyává tgyük. Bár Magyarországon csapadékintenzitás mérése lassan másfél évszázadra nyúlik vissza, a mérési adatok feldolgozása a 70-es években a Budapesti Műszaki Egyetemen Winter János vezetésével folytatott munkát leszámítva elmaradt, az adatok korlátozottan, vagy egyáltalán nem hozzáférhetők. Kérdéseket vet fel a mérési technika változása, amely miatt kétségek merülhetnek fel a korábbi időszakok csapadékatadatai vonatkozásában, így az összehasonlíthatóság vonatkozásában is. Márpedig, ha nincs mihez hasonlítani a csapadékintenzitás adatokat, akkor azt sem állíthatjuk, hogy változik az egyedi csapadékok intenzitása. A kérdés tisztázása és a helyzet rendezése az IDF görbéekkel kapcsolatos tennivalók meghatározását megelőzően is alapvető fontosságú feladat. A tárggyal foglalkoztak már kutatók a korábbiakban is, (World Meteorological Organization 1982, Habib és társai 2001, Duchon 2010, Lanza és társai 2010). A jelen írás célja az, hogy bemutassa, önmagában az adatok beszerzésének és

feldolgozásának módja milyen jelentős mértékben befolyásolja, illetve befolyásolhatja a csapadékmaximum adatok és függvények megbízhatóságát, különösen a régebbi mérések vonatkozásában, valamint mennyiben bonyolítja az adatok összehasonlíthatóságát.

### A CSAPADÉKINTENZITÁS MEGHATÁROZÁSÁNAK ELJÁRÁSAI

A csapadékintenzitás meghatározásának lehetősége alapvetően függ össze a mérés technikai lehetőségekkel. A csapadék mérésének máig legegyszerűbb, és minden hibaforrása ellenére a leginkább megbízható módja a földfelszíni észlelés csapadékmérő berendezések révén. A leginkább elterjedt gyűjtőedényes csapadékmérő berendezések működési elve egyszerű: a mérőedénybe hulló csapadék térfogatát (egyes mérők esetében tömegét, súlyát) valamilyen időszakra vonatkozóan leolvashatóvá teszi, esetleg rögzíti, sőt továbbítja. A módszerből érezhető, hogy a legegyszerűbb, mm-ben megadott csapadékmagasság is lényegében időegységre értelmezendő, napi, havi, vagy éves csapadékösszegben. A műszaki hidrológiai gyakorlatban ugyanakkor az egy csapadékeseményre, vagy annak valamely részintervallumára vonatkoztatott intenzitást, időegységre vonatkoztatott térfogatváltozást tartunk csapadékintenzitásnak, jellemzően a vízrendezési feladatok adatigényének megfelelően. Vannak egyéb csapadékmérő eszközök, mint például a cseppspektrum mérő (diszdrometer), e készülékek a gyakorlatban ugyanakkor még nem általános. A mérnöki gyakorlatban kevéssé ismert cseppspektrum mérő egy jeladó és vevőfej között áteső csapadék csepp - vagy szilárd fázisú pehely, dara, jég - méreteloszlását és sebességeloszlását képes mérni a jel megszakítás karakterisztikája alapján (Mészáros 2013).

A csapadékintenzitás mérésére alkalmas eszközök pontossága között lényeges különbség van. Az átfolyós készülékek, így az úszós, avagy szintmérős csapadékírók (ombrográfok) az igen heves csapadékhullás esetén a leürülés időszakában „hagyhatnak méretlenül” csapadékot (Szentes 2018), vagy a billenőkanalas megoldások éppen az intenzív időszakban válnak pontatlanná a kanalakból kiverődő víz, vagy a nagy intenzitás miatt „kiakadó” kanál miatt. Leginkább megbízhatónak az akár egész évi csapadék befogadására alkalmas tömegmérésre alapuló eszközök tekinthetők. Ilyen mérők operatív használatban csak az utóbbi néhány évtizedben kezdenek teret hódítani. A leginkább jellemző intenzitásmérő eszközök a több évtizede üzemelő mérő billenőkanalas, míg a korábbi időszakban a szintmérős csapadékírók voltak.

A csapadék intenzitásának mérése feltételezi a térfogat vagy a tömeg valamilyen időegységenként történő mérését. Valamely csapadékesemény során egy viszonylag sűrű közvetlen emberi észlelésen alapuló időegységenkénti mérés nem életszerű, valamilyen automata alkalmazását igényli. Erre a fejlesztésre az óraművek és vonalrajzoló adatrögzítők fejlődésével a XIX. század első felétől volt lehetőség, amikor megjelentek az első megfelelő kialakítású mérőeszközök. A mérőeszközök elterjedésének sebessége ugyanakkor nem lehetett túlzottan gyors. Ezt mutatja az például, hogy a racionális módszert kifejlesztő ír Mulvany az 1851-es munkájában (Mulvany 1851, Dooge

1974) még napi adatok felhasználására szorítkozhatott, holt az elmélet (a mai formájában egyértelműen) nem nélkülözheti a rövid csapadékokra vonatkozó adatokat. Mivel nem volt mód folyamatosan mérgetni például egy heves zivatar idején a csapadékhullás intenzitásának változását, a részletek ebben az időszakban feltáratlanok maradtak, és egy csapadék jellemzően egy adatként jelentkezett a kialakuló adatbázisban.

A csapadékmérés technikai fejlődése (Kurytka 1953) kapcsán az 1880-as évektől állt rendelkezésre nagyobb számban csapadékírókból származó adat, ezek feldolgozására az Egyesült Államokban és a például a Német Császárságban, Poroszországban az 1800-as évek legvégétől találhatunk példákat. A porosz adatokra vezethető vissza egyébként a csapadékmaximum függvények első hazai ábrázolása, amelyet Réthly Antal adott közre a Vízügyi Közleményekben, 1916-ban (Réthly 1916). A csapadékírók adatai szalagokon jelentek meg, amelyeken a csapadékvíz mennyiségével változó szinten elhelyezkedő úszó helyzetét rögzítették egy mechanizmus közbeiktatásával, az idővel egyenletesen mozgó szalagokon. Az ilyen adatok levétele körülményes feladat. Az intenzitás mérése közvetlenül történhet a szalagon megjelenő görbe meredekségének mérésével, de megtörténhet oly módon is, hogy a valamely időszakokra vonatkozó csapadékmennyiségek különbsége és az eltelt idő alapján határozzák meg az intenzitás értékét, utóbbi esetben jellemző időközönkénti adatlevétellel (10, 20 stb. perc). A görbéről vett közvetlen intenzitás leolvasás hátulütője lehet a pontatlanság: mennél meredekebb a görbe, annál bizonytalanabb a leolvasás. Az adat rögzítése papír alapon történhetett, így feldolgozásuk jelentős időigénnyel járt, sok esetben el is maradt és a szalagok az archívumokban maradtak, és remélhetőleg megmaradtak. Kézi adatfeldolgozásra erre a speciális területen – úgy tűnik – az utóbbi évtizedekben már nem volt megfelelő kapacitás.

Lényegi változást a mérések digitalizálása hozott, ennek révén az adatok elérése és feldolgozásra való előkészítése lényegesen egyszerűbbé válhatott, napjainkban pedig kifejezetten jól kezelhetők a gyűjtött adatok a nagyteljesítményű számítógépes adatfeldolgozás révén. Ez ugyanakkor nem segíthet a régebbi adatok feldolgozásán, hacsak nem sikerül külön erőforrást biztosítani erre a feladatra. Ez kijelenthető annak ellenére is, hogy ma már van mód az ombrográf szalagok digitalizálására és digitális feldolgozására is.

A digitális adatfelvételezés, mérés és adatrögzítés kezdetei a 70-es évekre nyúlnak vissza, forradalmuk ugyanakkor a 90-es években kezdődött, ekkor terjedtek el széles körben a csapadékmérő automaták. Az első időben az automaták adatainak időbeli részletezettsége meglehetősen alacsony volt, így például 10 percenként egy adatot rögzítettek. Később, leginkább a 2000-es években – az adatrögzítés, tárolás és továbbítás fejlődésének köszönhetően – az időbeli felbontás megnövekedhetett, így 5 perces, vagy éppen 1 perces adatrögzítésre is sor kerülhetett.

A nagy részletezettségű csapadékadatok feldolgozása a rendelkezésre álló időlépcső függvényében, az időlépcső

egészszerű többszörösét kitevő időtartamokra adhat intenzitás értékeket. Az időbeni felbontás értelmes alsó határa várhatóan az 1 perc, ennél részletesebb mintázás érdemi különbséget várhatóan nem mutat, ráadásul a lefolyás (összegyülekezés), amelyre a vízmérnök voltaképp kíváncsi, a csapadékhullásnál legalább egy nagyságrenddel lassabb folyamat, további finomítás tehát nem szükséges.

Az időbeli felbontás növelésével az elérhető adatok száma jelentősen növekszik, különösen, ha tekintetbe vesszük a lehetséges mozgóablakos feldolgozási lehetőségeket is. Egy 30 perces eső tekintetében az egyperces felbontású adatból 465, ötpercesből 15, tízpercesből 6 adat részintervallum (vagy mozgóablakos adat) nyerhető ki, amint az az 1. táblázatból is látható.

1. táblázat. Eltérő mintázási frekvenciával nyerhető adatok száma; 30 perces csapadék, 1, 5, 10 perces mintavétellel  
Table 1. Number of data that can be obtained with different sampling frequency; 30 minute precipitation with 1, 5, 10 minute sampling

30 perces csapadék					
mintázási frekvencia					
1 perces		5 perces		10 perces	
előállítható mozgóátlag	db	előállítható mozgóátlag	db	előállítható mozgóátlag	db
1 perces	30	5 perces	6	10 perces	3
2 perces	29	10 perces	5	20 perces	2
3 perces	28	15 perces	4	30 perces	1
4 perces	17	20 perces	3	---	---
---	---	25 perces	2	---	---
29 perces	2	30 perces	1	---	---
30 perces	1	---	---	---	---
vizsgálható adat összesen	465	vizsgálható adat összesen	21	vizsgálható adat összesen	6

Az időbeli felbontás tehát lényeges kérdés, hiszen a nagyobb részletesség ugrásszerűen növeli a kinyerhető adatok számát, és többet árul el a csapadékhullás jellegéről is. Hogy ez milyen lényeges kérdés is az igazán intenzív csapadékok vizsgálata szempontjából, az a következőkben kerül bemutatásra. Összefoglalva, négyféle eljárás létezik, időben akár átfedéssel is:

- a) a teljes csapadékra vonatkozó átlagintenzitás mérése,
- b) a csapadékmérők szalagjainak visszamérése a legintenzívebb időszakok adatainak kinyerésére,
- c) a fix (jellemzően 10) perc hosszúságú intervallumokban történő mérés, illetve adatlevétel szalagokról,
- d) az időben nagy felbontással (jellemzően 1 perc frekvenciával) végrehajtott mérés.

A c.) és d.) eljárás elvét tekintve nem különbözik, csak az időbeli felbontása eltérő. Mivel a különbség az eredmények tekintetében lényeges különbségre vezet, a külön pontban említése indokolt. A továbbiakban a négy mintavételi eljárás eredményeit, illetve lehetséges eredményeit, ennek alapján a pontosságát vizsgáljuk meg, de előbb a mérők pontosságát szükséges körüljárni.

#### A CSAPADÉKMÉRŐK PONTOSSÁGI KÉRDÉSEI

A csapadékmérés, mint minden mérés, bizonyos mérési pontossággal jellemezhető. A csapadékinintenzitás mérése az egyszerű csapadékmérők további kiegészítésével további elemek beépítésével történik (a billenőkanalas,

szintmérős és tömegmérős megoldások esetében), így az egyszerű csapadékmérők ismert mérési hibái felerősödhetnek, vagy e hibákhoz az intenzitás méréssel további speciális hibaforrások kerülhetnek képbe.

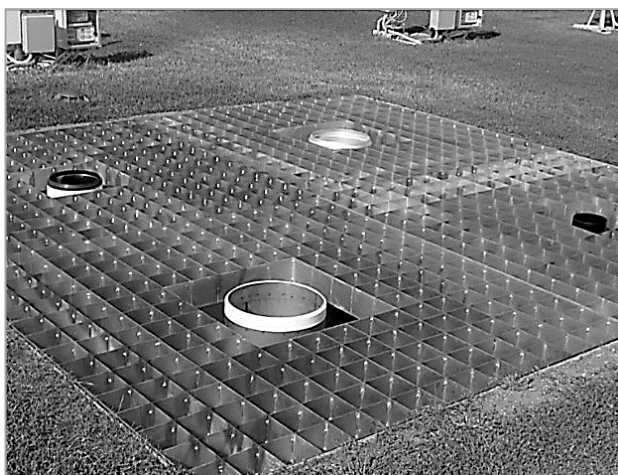
A csapadék és a csapadékinintenzitás hibái a gyűjtési és számlálási hibák csoportjába oszthatók (Lanza és Stagi 2008).

A gyűjtési hibák a csapadékmérés pillanatnyi meteorológiai helyzetétől függenek, mint a hőmérséklet, a szélsebesség, a légnedvesség stb. Az ebből fakadó hibák (nagyságrendjükkel) a következők. a szél és csapadék mikrostruktúrájából fakadó hiba (2-10% folyékony csapadék esetén), a mérő belső felületeinek benedvesítésére „elhasználódó”, nem mért mennyiségből adódó hiba (2-10%), a készülék belsejében, a mérés előtt történő párolgásból eredő hiba (0-4%) (bár ez kifejezetten a totalizátor jellegű mérésekre igaz), és végül a fröcskölődésből származó hiba (1-2%) (World Meteorological Organization 1982). Ezek a hatások nyilvánvalóan csapadékeseményről csapadékeseményre változhatnak, a csapadékinintenzitás, szélsebesség, hőmérséklet stb. függvényében. Kiszűrőkre a csapadékméréssel párhuzamosan észlelt további meteorológiai paraméterek ismerete szükséges. Ez még a jelenkori mérések sem adott az esetek legnagyobb részében, az archív adatok esetében pedig végképp meghatározhatatlan. Korrekciós képletek rendelkezésre állnak, ha alkalmazásuk biztosítható a kiegészítő paraméterek mérési adatai révén.

A számlálási hibák csoportjába körébe a mérők típusától és gyártmányától, illetve egyedi tulajdonságaitól függő hibák sorolhatók. Ezzel kapcsolatban már a meteorológiai mérések megindulása óta folynak összehasonlító vizsgálatok. A 2004-2009 évek során a Meteorológiai Világszervezet (WMO) a harmadik esőmérésre vonatkozó összehasonlító mérési kampányt folytatta le egyes berendezés gyártmányok összehasonlítása érdekében, laboratóriumi és terepi mérésekkel (World Meteorological Organization 2009). A terepi kampányt a csapadékinintenzitás mérési módjainak és műszereinek összehasonlítására a Genovai Egyetem Vigna di Valle melletti mérőtelepén 26 csapadékinintenzitás mérő műszer bevonásával folytatták le. A referenciamérést a szél és fröcskölődési minimalizáló csapadékmérő adatai jelentették. A zavaró hatások kiküszöbölésére a mérést egy tényszerű alatti aknában elhelyezett, a terepszinttel színélő peremű műszer biztosítja, amelyet körül egy rostélyrács biztosítja a védelmet a szél hatásától, egyszersmind a hulló csapadék fröcskölődését is kiküszöböli (1. kép).

A vizsgálat konklúziója az volt, hogy bár a WMO ajánlásai jó alapot szolgáltatnak a csapadékadatok megfelelő gyűjtésére, önmagukban a műszerek ilyen adatokat nem képesek szolgáltatni megfelelő, a készülékbe épített, vagy utólagos szoftveres korrekció nélkül. A WMO ajánlásának megfelelő minőségű, a valós csapadékot nagy pontossággal leíró csapadékadat csak a számolási hiba korrekciójával biztosítható. Egyes műszerek már rendelkeznek korrekciót biztosító megoldással; némelyek automatikus korrekcióra képesek, másoknál szoftveres korrekcióra van lehetőség (World Meteorological Organization 2009). A

műszeres korrekció lényege az, hogy a mérés során az észlelt intenzitás függvényében korrekciós többlet impulzust generál a mérő, és ezzel a műszer intenzitásfüggő hibáját kijavítja. A szoftveres korrekció ugyanezt az eredményt a mért adatok javításával végzi el, a mért intenzitás függvényében. A korrekció nélküli billenőkanalas mérőeszközök esetében számos alkalommal jelentős alulmérés volt tapasztalható a magas egyperces intenzitások esetén, ez a 10-27% tartományba esett a 220 mm/h (612 l/(s·ha)) intenzitásnál. Az alulmérés tehát épp abban a tartományban kifejezett, amely alapján az IDF görbék előállítását történik. Érdekesség, hogy a nem gyűjtőedényes, cseppszámológ (disdrometer) ebben a tartományban kismértékben felülmérésre voltak hajlamosak a referencia mérőhöz képest (Lanza és társai 2010). A vizsgálat eredménye tehát biztató, mert az e dátum utáni adatok kapcsán fel lehet tételni a megfelelő korrekciók biztosítását akár a méréskor, akár az adatfeldolgozás során. Ennek a ténynek a mérési körülményeket leíró metaadatokban természetesen fellelhetőnek kell lennie. A régebbi adatokkal kapcsolatban ez a fejlemény ugyanakkor aggasztó. A visszamenőleges korrekció alkalmazása napon belüli csapadékadatok korrekciójára külön kutatás tárgya lehetne.



1. kép. Szélhatás mentes referéncia mérőhely kialakítása, Vigna di Valle (Forrás: Lanza és társai 2010)

Photo 1. Reference gauge to eliminate the wind perturbation effect, Vigna di Valle) (Source: Lanza et al. 2010)

A billenőkanalas műszer és súlymérős műszer eredményeinek összehasonlítása során a billenőkanalas műszer alulmérését 50 mm/h (139 l/(s·ha)) intenzitás felett találta jelentősnek Duchon és Biddle (Duchon és Biddle 2010). Ennek mértéke a 25 mm/h-t, illetve 70 l/(s·ha) értéket is elérheti, A szélesebbesség tekintetében az 5 m/s feletti (2 m magasan mért) szelet találta küszöbértéknek, amely felett a korrekció szükséges (Duchon és Biddle 2010).

Ezek a hibák bár régebb óta ismertek, mégis feltáratlanok voltak (Lanza és Stagi 2008). A finom felbontású csapadékintenzitás mérések esetében, és különösen az archív adatok értelmezése során ez a kérdés megkerülhetetlen. Az, hogy az archív adatok további felhasználása során ezek a hatások milyen hibaterjedést eredményezhettek, ugyancsak feltáratlan terület.

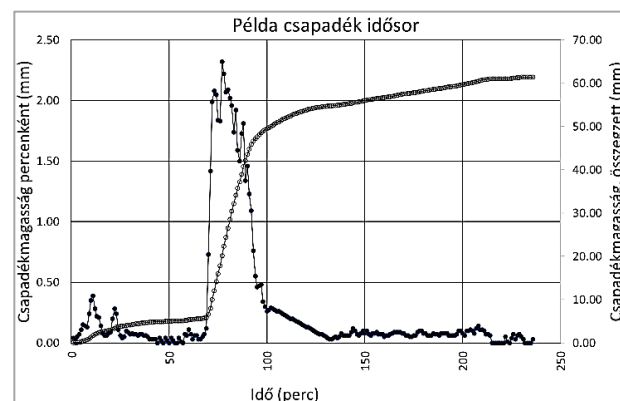
Ez a helyzet a régi csapadékintenzitás adatok és az ezekből megfelelő korrekció nélkül levezetett csapadékmaximum függvények megbízhatóságát megkérdőjelezi. Amennyiben nem tudjuk azt, hogy mi is volt a megfelelő pontosságú referenciaérték, az is kérdéses, hogy mihez hasonlítjuk a jelen állapotban, akár megfelelő adatminőség mellett gyűjtött és feldolgozott csapadékintenzitás adatainkat.

## A CSAPADÉKINTENZITÁS PONTOSSÁGI KÉRDÉSEI A MINTÁZÁSI ÉS ADATFELDOLGOZÁSI MÓDSZER FÜGGVÉNYÉBEN

A digitális adatrögzítővel szerelt csapadékmérők adatainak feldolgozása során felmerül a kérdés, hogy mennyiben mérhető össze valamely csapadék 1-5-10-15 perces időközönkénti mintázásából származtatott csapadék adatai, illetve az ebből származtatott intenzitás adatok, valamint ezek miképpen hasonlíthatók össze a csapadékirók szalagjairól levett adatokkal. E kérdést vizsgálta Pécs-Pogány csapadékmérőire Szentes László Olivér (Szentes 2018). A vizsgálata során sok egyéb kérdés mellett foglalkozott egy csapadékiró, egy 10 perces mintavétellel működő automata mérő, valamint egy perces mintavétellel működő automata mérő eredményeinek összehasonlításával. A dolgozatában követett munkamódszer egyes elemeit a továbbiakban alkalmaztuk.

Vizsgálatunkban egy eleve nagy felbontású, egyperces mintázású adatsor feldolgozását végzetük el egy csapadékeméni esetére. Ebben a helyzetben csapadékiró nem állt rendelkezésre, viszont lehetőség nyílt annak szimulálására, hogy a mérés során a „csapadék kezdete”, mint a mintázás kezdete, mekkora jelentőséggel bír.

A pontossági kérdés vizsgálata érdekében vettünk egy perces felbontású csapadék idősort, esetünkben egy németországi csapadékmérőn 2018. június 11-én észlelt zivatar adatait (Abtsgmünd-Untergröningen, Deutsche Wetterdienst – Német Meteorológiai Szolgálat internetes adatbázisa, ld. irodalomjegyzék). A zivatar 16:00 és 19:55 között zajlott le, 236 percen át zajlott, változó intenzitással. A csapadék idősort az 1. ábra mutatja be. Az ábrán látható a csapadék idősor, valamint az összegzett csapadékmagasság (a jobb oldali skála szerint) mm-ben.

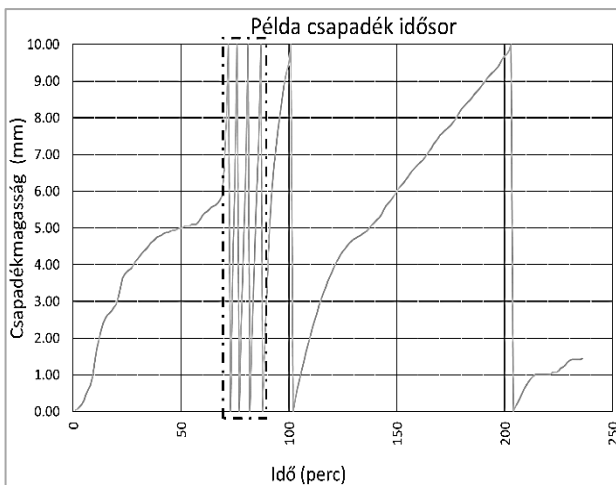


1. ábra. Perces időbeni felbontású csapadék idősor (Példa: 2018. 06. 11. Abtsgmünd-Untergröningen)

Figure 1. 1 minute temporal resolution rainfall time series (Example: 11. 06. 2018. Abtsgmünd-Untergröningen)



A csapadék intenzitását több megközelítésben is kereshetjük. A legegyszerűbb módszer a teljes csapadék időtartamra vetített átlagos intenzitás. Világos, hogy a csapadék intenzív időszakában ennél sokkalta intenzívebb csapadékhullás történt. Néhány rövidebb időszakra a grafikonból is megkísérelhetjük a leolvasást, de a legmeredekebb szakasz kiválasztása nehézkes; különösen, ha a csapadékíró 10 mm-ként megtörténő leürülése mellett kell megtalálni a csapadék összeggörbe legmeredekebb szakaszát. A feladat illusztrálására a 2. ábrán a csapadékatatok olyan módon lettek ábrázolva, ahogy egy csapadékíró szalagján került volna rögzítésre. Kétségtelen, hogy hosszú időn át kézi leméréssel vagy meredekségméréssel lehetett a csapadékintenzitás adatokhoz hozzájutni. A csapadékatatok kézi legyűjtésének módjáról a dolgozat későbbi részében bővebb leírás található.

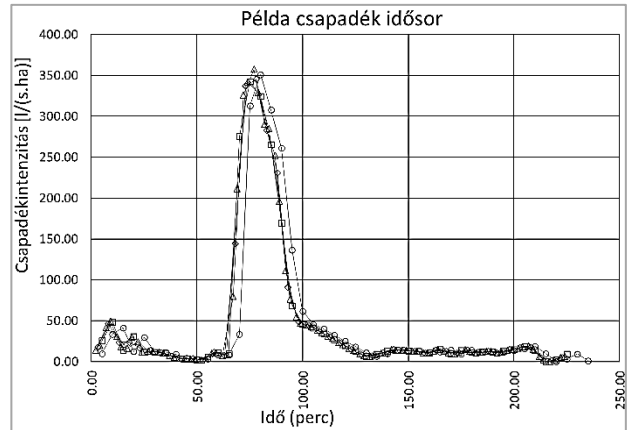


2. ábra. A példa idősor bemutatása ombrográf szalag formátumban

Figure 2. Sample time series in water level registering rainfall record style

Amennyiben csak ombrográf szalagunk állna rendelkezésre erről a csapadékról, akkor ehhez hasonló módon lehetne az intenzitás adatot kinyerni. Az ombrográf szalagon az intenzitás leolvasása bizonytalanabb, és ebből adódóan hibával terhelt. Ez vonatkozik különösen az intenzív szakasznál hosszabb időszakok legnagyobb intenzitásának esetére, hiszen ekkor nem érintőt kellett vizsgálni, hanem hűrt, amelynek kiválasztásához nyilván rutin és „jó szem” kellett. A „jó szem”, „jó érzék” statisztikai megközelítésben, az adatfeldolgozás pontossága szempontjából egyértelműen hibaforrásként értelmezhető.

Amennyiben automata adattörzítő révén mérnénk ezt a csapadékot, a feldolgozás lehetőségei kedvezőbbek. Fix ötperces mérési időintervallumok esetében öt percenként meghatározható a csapadékintenzitás. Ugyanakkor nem mindegy, hogy a csapadék kezdetéhez képest a fix mérési idő mikorra is esik, mivel öt különböző ötperces intenzitás idősor készíthető a fix mérési időpont egy-egy perces eltolása révén (a perces mérési intervallum diszkretizálásra vonatkoztatva a vizsgált ötperces mintavételezést). Az öt intenzitás idősort a 3. ábra mutatja be.



3. ábra. Ötperces intenzitás idősorok perces eltolással (Példa: 2018. 06. 11. Abtsgmünd-Untergröningen)

Figure 3. Five-minute intensity time series with minute offsets (Example: 11. 06. 2018. Abtsgmünd-Untergröningen)

A képen látható, hogy a legnagyobb intenzításra ötféle értéket ad az öt görbe. Ezek értékei:

Maximum jele	Maximum értéke	
	mm/h	(s·ha)
I.	126.36	351.00
II.	128.64	357.33
III.	124.32	345.33
IV.	123.12	342.00
V.	123.36	342.67

A legnagyobb érték 357,33, a legkisebb 342,00 l/(s·ha). Természetesen hasonló a helyzet a 10-20-40-60 perces fix intenzitásokkal is. A további részletek elhagyásával csak a szélsőértékeket és azok %-os eltérése kerül bemutatásra az alábbi táblázatban (2. táblázat).

2. táblázat. Az 5-10-20-40-60 perces fix időablakok legnagyobb és legkisebb értékei

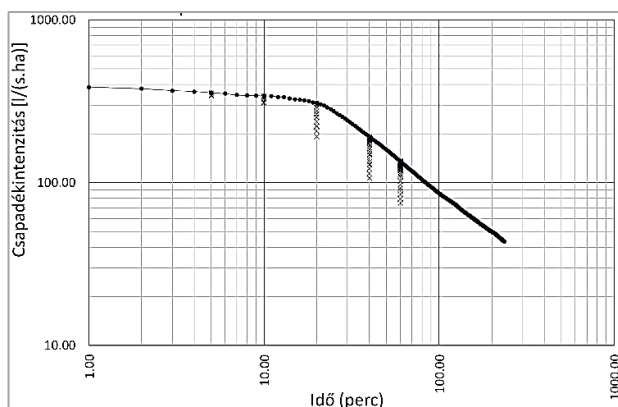
Table 2. Minimum and maximum values for the 5-10-20-40-60 minute fix time windows

Fix időablak hossza	MAX [l/(s·ha)]	MIN [l/(s·ha)]	MIN/MAX
5 perces intenzitások	357.3	342.0	96%
10 perces intenzitások	341.8	307.2	90%
20 perces intenzitások	308.2	191.8	62%
40 perces intenzitások	191.7	105.9	55%
60 perces intenzitások	135.7	74.2	55%

Összefoglalva: a fix időpontokban folytatott mérések esetében az eredményül kapott csapadékintenzitás a legnagyobb lehetséges (a valóságban létező) értéktől eltérően, az öt és tízperces időköz esetében 4-10%-os sávon belül, a húsz perces időablak felett 38-45%-os sávon található. Ez azt jelenti, hogy amennyiben ilyen típusú adatokból indult ki valaha egy IDF függvény előállítás, akkor ilyen nagyságrendű hibák kerülhettek a számításba, véletlenszerűen. Nyilván több csapadék esetén bizonyosan volt olyan csapadék is, amely a maximum értékeket szolgáltatta, de ennek bekövetkezése esetleges, és nagy valószínűséggel rejtve maradtak a tényleges) értékek. Például az ötperces csapadék esetén a legnagyobb érték megragadásának valószínűsége kb. 20%, a tízpercesek esetén kb. 10%, és így tovább (amennyiben az egyszerűség kedvéért perces mintavételezésre vonatkoztatjuk a vizsgálatot, és eltekintünk

attól, hogy a perces mintavételezés is bármelyik időpillanatban indulhatott volna az 5-10- stb. mérésekhez képest).

Amikor az egyperces méréseket vizsgáljuk, akkor az adatfeldolgozás módjáról is meg kell emlékezzünk. Az egyperces adatok alapján jól számolhatók a 2, 3, ... T perces időablakokhoz tartozó átlagintenzitások. Ezek előállításával jelentős mennyiségű adathoz jutunk. A jelen esetben a 236 perc csapadékhossz miatt a lehetséges intervallumszám 27966. Ezek közül kell kiválasztani a 236 perc-értékhez tartozó legnagyobb intenzitás értékeket, amelyek a csapadékesemény során előforduló intenzitások burkológörbáját képezik. Az eredményt a 4. ábra mutatja be. Az egyperces adatokból származó eredmény mellett láthatók nagyobb mintázási idővel felvett adatok alapján kapható eredmények is, függőlegesen mentén.



4. ábra. Csapadékintenzitások fix ablakos (X jelölés) és mozgó ablakos (pont és vonal jelölés) eljárással

Figure 4. Rainfall intensities with fix sampling window (X marking) and moving window (dot and line marking) procedure

A 4. ábra alapján megállapítható, hogy a perces csapadékesemények alapján készített mozgóablakos intenzitások a ritka mintázás adataiból kapott eredmények burkológörbáját képezik, annak rendje szerint. Emlékezzünk tehát arra, hogy a ritka mintázás mellett ugyan több pont is látható az adott időhöz tartozó függőlegesen, de ezek közül csak egy pont kerül be a számításba, méghozzá véletlenszerűen.

A fentiek alapján kijelenthető, hogy számottevő annak a valószínűsége, hogy a ritka mintázáson alapuló eljárás esetén nagy valószínűséggel nem a maximális csapadékintenzitás kerül be az adatok közé, így a további feldolgozás során kisebb érték figyelembevételére kerülhet sor. Ez ahhoz vezet, hogy a csapadékmaximumok helyett ebből a hibaforrásból nagy valószínűséggel 5-10 %-os alulbecslés alakul ki az 5-10-20 perces rövid időszakokban, és a hosszabb időszakokra az alulbecslés ennél is jelentősebb lehet.

## A RÉGI CSAPADÉKMAXIMUM FÜGGVÉNYEK MEGBÍZHATÓSÁGÁRÓL

A napon belüli csapadékadatok rögzítése és feldolgozása jelentős munkát adott az íróval felszerelt állomások esetében. A budapesti csapadékirókon rögzített adatokból az intenzitást az 1910-es években az időtartamot a bevezető és befejező kis intenzitású csapadékrészek elhagyásával nyerték ki, hogy valóban az legintenzívebb csapadékhullás adatait lehessen megismerni (Farkas és Fock 1918).

Az ombrográfon, valamint automata állomásokon végzett mérésekre vonatkozó összefoglalás és 1997-es adatokra vonatkozó értékelés megtalálható a szakirodalomban (Szentés 2018). A csapadékirók elterjedt típusa az úszóhengeres, vagy szintmérős csapadékiró, amely 10 mm esőnek megfelelő szintig feltelik a csapadékhullás ütemében, majd gyorsan leürül a nulla szintig. Az úszóhengeres csapadékiró berendezések adatainak feldolgozása a hagyományos módszer szerint a következőképp történt. Meg kellett határozni a csapadék kezdetét és végét, majd a szalag adatait kiértékeltek oly módon, hogy 5-10-20-30-60-180 perces részösszegeket állapítottak meg. Valamely csapadékhöz tartozó legnagyobb részösszeg az lehetett, amely nem érte el a csapadék időtartamát. Ezek után a csapadék részösszegeket összeadva ellenőrizték, hogy a napi csapadékösszeg és a részösszegek mennyire egyeznek. A differencia egyik leggyakoribb oka a mérésben keletkező hiba, amely a berendezés jellegéből adódott a nagy intenzitású mérések során, a mérő leürülése közben hullott eső méretlensége miatt. A differenciával korrigálni kellett a csapadékiró adatait, jellemzően a hiba legfőbb forrását adó igen intenzív csapadékokat tartalmazó időszakot „visszajavítva”. Ezt követően lehetett a maximális részösszegeket meghatározni az említett rögzített időszakokra. Ilyenkor a legnagyobb intenzitások rögzítésére került sor az egyes kategóriákra vonatkozóan. Szubjektív hibát okozhat több, hasonlóan nagy intenzitású részesemény elkülönítése, mérése, osztályozása. A leürülés miatti hiba felismerésére és javítására Kallós közöl kidolgozott eljárást (Kallós 1955). (Korszerűbb eljárás a grafikon digitalizálása, de mivel a régi adatokra és azok feldolgozásából eredő hibák bemutatása a jelen írás célja, az említésen túl ez az eljárás most nem kerül bemutatásra)

A vízügyi szolgálatnál használatban állított csapadékirók adatainak feldolgozására a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet a klímakutatásban megszokott érték-előlaptól eltérő űrlapot vezetett be (Kallós 1955). Az eltérő űrlap célja az volt, hogy a műszaki hidrológiai szempontból lényeges ritka, heves csapadékokat mutassák ki.

Az ombrográf mérések szűkös voltát a Meteorológiai Intézet észlelői részére javasolt mérési metodika is mutatja, amely – amennyiben arra az észlelőnek lehetősége nyílt – a csapadék elejét és végét is rögzíteni kérte; ezt egyébként már egyes észlelők saját érdeklődésüktől és elkötelezettségüktől vezérelve is elvégezték (Barta 1964).

A múlt század második felében terjedtek el a billenőkanalas automata csapadékmérők. A mérők együttes működésének és az adatok összehasonlíthatóságának kérdése emiatt lényeges. A Pécs-Pogány állomáson átfedő időszakokban működő szalagos ombrográf, fix időablakos méréssel működő automata és végül perces időlépcsővel mérő automata csapadékmérők adatainak összehasonlítására rendelkezésre áll vizsgálati eredmény (Szentés 2018). Az elemzésekhez Pécs-Pogány állomás 1997–2017-es időszakának 10 perces automata, 2009–2017-es 1 perces automata és az 1997-es év ombrográf méréseit használta fel. A rövid idejű csapadékösszegek számítása során a mintavételezésből adódó különbségek miatt a csapadékirón magasabb részösszegeket lehetett észlelni, egyes esetekben 29%-os eltéréssel.

Csapadékösszeg tekintetében a csapadékíró és a billenőkanalas mérő között a csapadékíró javára volt eltérés, különösen a rövid, 1-10 perces mérési sűrűség esetén. A csapadékírók és a billenőkanalas mérők adatai és feldolgozásuk módjának, valamint eredményük összehasonlítása rámutat arra, hogy a bemutatott eltérések a hazai mért adatokban jelen vannak.

A 6 mm-t meghaladó – jellemzően rövid idejű, intenzívebb – csapadékokra vonatkozó eredmények esetében a tapasztalat az volt, hogy a rövidebb, 10-20 perces maximum értékek a perces adatsorban magasabbak, és a hosszabb intervallumokban az eltérés mértéke csökkent. Ez a dolgot elején bemutatott mintaadatsorhoz képest eltérő eredmény; a differencia bár itt is kimutatható, nem olyan mértékű, mint amit a mintaadatsorban bemutattunk. Ennek oka az lehet, hogy a mintaadatsoron végzett vizsgálat egy – az adott csapadéokra értelmezhető – azon tartományt mutatta ki, amelybe a feldolgozás során kapott eredmények eshetnek, attól függően, hogy a mintázás mikor indult; a valóságban a tartomány szélességénél kisebb eltérést lehet látni az esetek nagy részében. Amennyiben nagyszámú összehasonlítást tehetnénk, a szélső értékek előfordulásával is találkozoznánk. Mindenesetre arra hívja fel a figyelmet ez az észlelés, hogy az utóbbi időben 1 perces mintázású automatákon látszólag valóban nagyobb intenzitásokat lehet észlelni, mint a korábbi pl. 10 perces mintázás alkalmával. Ez kelthet olyan illúziót, hogy intenzívebb csapadékokat sikerült észlelni az utóbbi időben. Vélelmezhető, hogy az ombrográf adatokkal való összehasonlítás kedvezőbb eredményre vezetne. Ehhez viszont szerencsés lenne sűrű mintázású csapadékmérő és ombrográf egyidejű méréseinek eredményét összehasonlítani.

## KÖVETKEZTETÉS

A csapadékatatok és a csapadékintenzitás adatok mérésének hibalehetőségeiről a meteorológia már régóta tud, de megfelelő megoldások a hibák jelentős részének kiküszöbölésére csak az utóbbi időkben készültek megfelelő korrekciós eljárások. Régebbi készülékekhez ilyen kompenzációra nincsenek hivatkozások a hibaforrások összességére vonatkozóan, a csapadékíró leürülésére vonatkozóan eljárás kidolgozása megtörtént. Az, hogy a korai észlelések adatai és az azokra alapított korábbi – kvázi jelenkori – IDF görbék megbízhatóságára ez miképp hat, lényegében ismeretlen terület, de pusztán a jelen írásban összefoglaltak alapján 5-20% százalékos eltérés az egyes csapadékesemények során előfordulhat. Ez különösen valószínű az intenzív csapadékhullás alkalmával, amelyre épp az IDF görbét is alkalmaznánk, és ez a hiba a mérőben, a nyers adatban már ott van. A feldolgozás kapcsán kifejtett bizonytalanságok mellett a szisztematikus alulmérést akkor is bizonyosnak tekinthetjük az előbbieken alapján. Mindennek ismeretében fel kell tenni a kérdést: mihez képest vizsgáljuk a csapadékintenzitások változását? A klímaváltozással kapcsolatban rendszeresen megemlítik az intenzívebbé váló csapadékok, gyakoribb heves csapadékok miatti intézkedések fontosságát. Ez fontos is, kétségtelenül. Ám, minthogy a dolgot leírtak alapján (az adatok újra feldolgozása nélkül) lényegében nincs mód megbízható referencia értékek felmutatására, nincs mihez

képezt megállapítani azt sem, hogy ténylegesen van-e változás a csapadékintenzitásokban, avagy nincs.

Ahhoz, hogy a csapadékintenzitások valós változása (vagy nem változása) kiderüljön, a korábbi csapadékadatok szisztematikus felülvizsgálata, és az azokon alapuló csapadékfüggvények, IDF görbék újra generálása szükséges. Enélkül a csapadékintenzitások változásáról nincs mód határozott, tudományos megalapozottságú állítást tenni, és vélelmekre alapozzuk a jövő vízgazdálkodási feladatait.

E helyzettől függetlenül ugyanakkor nem kerülhető meg a csapadékvíz elvezető rendszerek kialakításában az elmúlt évtizedekben kialakult jelentős lemaradás felszámolása, annak meg kell indulnia, és ez a műszaki-hidrológiai kérdéseken messze túlmutat. A komplex, integrált csapadékvízgazdálkodás bevezetése tehát a fenti kérdés alapos vizsgálata nélkül is elengedhetetlen, még ha nehezebb is.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Barta B. (1964). A csapadék intenzitása. *Léggör, 9.* kötet, pp. 43-45.
- Dooge, J. C. I. (1974). The development of Hydrological concepts in Britain and Ireland between 1674 and 1874. *Hydrological Sciences Journal*, 19:3, 279-302, DOI: 10.1080/02626667409493917, pp. 296-301.
- Duchon C.E., C. J. Biddle (2010). Undercatch of tipping-bucket gauges in high rain rate events. *Advances in Geosciences*, Volume 25, pp. 11-15.
- Farkas Á., Fock E. (1918). Budapest-balpart általános csatornázása. Budapest Székesfőváros Tanácsi II. ügyosztálya vonatkozó tervezetének ismertetése. Budapest. Budapest Székesfőváros.
- Habib, E., W. F. Krajewski, A. Kruger (2001). Sampling errors of tipping bucket rain gauge measurements. *Journal of Hydraulic Engineering*, April 2001. pp. 159-166.
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-31.
- Kallós I. (1955). Ombrogrammok értékelése. *Hidrológiai Közlöny*, 35. évf. 7-8. szám. pp. 293-296.
- Kurytka J. C. (1953). Precipitation measurements study. Urbana, Illinois, USA: State of Illinois, State Water Survey Division, Dpt of Education and Registration.
- Lanza L. G., I. Stagi (2008). Certified accuracy of rainfall data as a standard requirement in scientific investigations. *Advances In Geosciences*, 2008. April, 43-48.
- Lanza, L.G., E. Vuerich, I. Gnecco (2010). Analysis of highly accurate rain intensity measurements from a field test site. *Advances in Geosciences*, Volume 25, 2010. March 37-44.

Láng I. (2019). Feladataink a települési csapadékvízgazdálkodás területén. *Vízmű Panoráma*, XXVII. évf. 3. szám. pp 2-4.

Mészáros R. (2013). Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.

Mulvany, T. (1851). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relation of rainfall and flood discharges in given catchment. *Trans. Inst. cio, Engrs. Ire*, 4, 18-33.

NATÉR (2016). Éghajlatváltozás és alkalmazkodás – A Nemzeti Éghajlatváltozási Térinformatikai Rendszer kialakítása. HU04 — Alkalmazkodás az éghajlatváltozáshoz program. EEA–C11–1 projekt. Budapest.

Réthy A. (1916). A németországi leghevesebb esők percenkénti sűrűségéről. *Vízügyi Közlemények*, 6. évf. 1. szám. pp. 73-76.

Szentes L. O. (2018). *A rövid idejű intenzív csapadékok statisztikai vizsgálata*. MSc Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, Budapest.

World Meteorological Organization (1982). Sevruk B.: *Methods of correction for systematic error in precipitation measurement for operational use*. Report No. 21, WMO, Genf, Svájc. p.2.

World Meteorological Organization (2009). Vuerich E. et al.: *WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges*. Report No. 99, WMO, Genf, Svájc.

(Abtsgmünd-Untergröningen, Deutsche Wetterdienst – Német Meteorológiai Szolgálat internetes adatbázisa [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/1\\_minute/precipitation/historical/2018/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/1_minute/precipitation/historical/2018/)).

## A SZERZŐ



**RÁCZ TIBOR** 1991-ben okl. építőmérnökként végzett a BME Építőmérnöki Karán, vízépítőmérnöki szakirányon. 1991 és 2005 között tervezőként dolgozott mérnöki irodáknál és saját vállalkozásában. 2005-től 2019 végéig a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. Ár- és Belvízvédelmi Osztályán dolgozott, 13 éven át annak vezetője volt. Jelenleg a Ramboll Studio Dreiseitl pekingi irodájában senior vízépítő mérnök. 2016-tól a Szent István Egyetem Környezettudományi Doktori Iskolájának hallgatója. A Magyar Hidrológiai Társaság Vízépítési Szakosztályának elnöke.



Illusztráció a cikkhez. Egy városi meteorológiai állomás Pekingben (Fotó a Szerzőtől).

## A csapadékösszegek és az aszályos időszakok vizsgálata Markov-láncokkal

Fekete Árpád\*, Keve Gábor\*

\*Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víz tudományi Kar (Fekete.Arpad@uni-nke.hu; Keve.Gabor@uni-nke.hu)

### Kivonat

A cikkben esettanulmányként Baja térségében az utóbbi 30 év éves csapadékösszegeit és a vegetációs időszakhoz tartozó hat hónap csapadékviszonyait (SPI6 csapadékindex alapján) vizsgáljuk a Markov-láncok segítségével. Az utóbbi tíz év vegetációs időszakainak aszályos időszakai alapján becslést adunk az aszályos időszakba eső nap jövőbeli aszályosságának valószínűségéről.

Az éves csapadékösszegek alapján kategorizáljuk az éveket csapadékosság szempontjából, és hosszú távon kiszámítjuk, hogy milyen valószínűséggel esnek az évek az egyes csapadékossági kategóriákba. A mezőgazdaság számára fontos a vegetációs időszakban hullott csapadék vizsgálata, ezért az SPI6 csapadékindex alapján is osztályokba soroljuk az egyes éveket és becslést adunk az egyes kategóriák valószínűségeiről a jövőre vonatkozóan. Önmagában azonban a csapadékösszegek tanulmányozása nem elegendő. A csapadék egyenetlenül oszlik el az év folyamán és megállapítható, hogy a lehulló csapadék intenzitása növekedett, gyakoribbá váltak a heves csapadékhullással járó záporok, zivatarok az utóbbi két évtizedben. Ezért a mezőgazdaság számára fontos információ a csapadékmentes napok száma, illetve az aszályos időszakba eső napok valószínűségének kiszámítása. Az utóbbi tíz év adatai alapján Markov-láncok segítségével megkapjuk, hogy hosszú távon a vegetációs időszakban mennyi a valószínűsége, hogy egy nap aszályos-e. Az aszályok gyakoriságának növekedésével szükséges feladat lehet a települések és a lakosság helyi víztározása, a víztakarékos öntözési eljárások alkalmazása.

### Kulcsszavak

Éves csapadékösszeg, SPI6 csapadékindex, aszály, Markov-lánc, átmenet-valószínűségi mátrix, stacionárius határeloszlás.

## Markov chain analysis of rainfall sums and the periods of drought

### Abstract

In this article, as a case study, we examine the annual precipitation amounts of the last 30 years in the Baja region and the precipitation conditions for the six months of the vegetation period (based on the SPI6 precipitation index) using Markov chains. Based on the drought periods of the vegetation periods of the last ten years, we give an estimate of the probability of future drought in the day of the drought period.

Based on the annual precipitation amounts, we categorize the years in terms of precipitation and, in the long run, calculate the probability that the years fall into each precipitation category. It is important for agriculture to study the precipitation during the vegetation period, therefore we also classify each year according to the SPI6 precipitation index and give an estimate of the probabilities of each category for the future.

However, studying precipitation amounts alone is not enough. Precipitation is unevenly distributed during the year and it can be stated that the intensity of falling precipitation has increased, showers and thunderstorms with heavy precipitation have become more frequent in the last two decades. Therefore, it is important for agriculture to calculate the number of days without precipitation and the probability of days in the drought period. Based on data from the last ten years, we use Markov chains to get a long-term probability of a drought in the growing season. With the increase in the frequency of droughts, the local water storage of settlements and the population, the application of water-saving irrigation procedures may be a necessary task.

### Keywords

Annual precipitation sum, SPI6 precipitation index, drought, Markov chain, the matrix of transition probabilities, stationary limiting distribution.

## BEVEZETÉS

A globális éghajlatváltozás Magyarországot sem kerüli el. A csapadékviszonyok megváltozása mind térben, mind időben változatos képet mutat. Egyes kutatások vitatják az évi csapadékösszegek jelentős változását (*Magyarország Nemzeti Atlasza 2018; Kiss és társai 2017*), mások éppen az ellenkezőjét állítják. Utóbbira számszerűsített érték szerint a csökkenés az 1901-2004-es időszak alatt elérte a 11%-ot (*OMSZ 2005*). Ennek egyik oka az lehet, hogy a globális felmelegedés következményeként a ciklonpályák északabbra tolódnak, tehát Magyarországtól északabbra vonulnak el, ezáltal csökken az éves csapadékösszeg. A nyári félévben a mennyiséget illetően nincs szignifikáns változás, de feltehetőleg a magasabb hőmérséklet miatt a hidrológiai ciklus intenzívebbé válhat, azaz a lehulló csapadék intenzitása növekszik, gyakoribbá válnak a heves csapadékhullással járó záporok, zivatarok. Ezzel együtt a

lehulló csapadék relatív nagyobb része kerül lefolyásra és kisebb hányada szivárog be a talajba vagy kerül tározásra. Emiatt az árvízveszély is növekszik (*Padányi és Halász 2012*). Ezzel a jelenséggel párhuzamosan gyakoribbá válnak a csapadékmentes, száraz időszakok, melyek a Dél-Alföld térségében az utóbbi évtizedben már megfigyelhetővé váltak. A vegetációs időszakban jelentkező aszályos időszak igen nagy károkat okozhat a mezőgazdaságnak.

E tanulmány Baja éghajlati adatait veszi figyelembe és ez alapján próbál előrejelzéseket adni egyrészt az egész évben és a vegetációs időszakban hullott csapadékra, másrészt a vegetációs időszakban előforduló aszályos napok valószínűségeire vonatkozóan. Így tágabb értelemben következtetni tudunk a Dél-Alföld ezen éghajlati jellemzőinek hosszú távú változásaira is. A kutatásban használt matematikai modell a Markov-láncok elméletét használja fel, mely viszonylag újszerűnek számít a csapadékviszonyok

statisztikai elemzésében. A módszer előnye, hogy az adatsorra legjobban illeszkedő valószínűségi eloszlás nélkül is kiszámíthatók az egyes csapadékos évek valószínűségei a jövőre vonatkozóan. A következő rész bemutatja a Markov-láncok rövid elméleti összefoglalóját.

## A MARKOV-LÁNCOK ELMÉLETI ÖSSZEFOGLALÓJA

A matematikában a Markov-lánc olyan  $\{X_n\}$  diszkrét sztochasztikus folyamatot jelent, amely Markov-tulajdonságú. A Markov-tulajdonság azt jelenti, hogy adott jelenbeli állapot mellett, a rendszer jövőbeli állapota nem függ a múltbeliektől. Másképp fogalmazva ez azt jelenti, hogy a jelen leírása teljesen magába foglalja az összes olyan információt, ami befolyásolhatja a folyamat jövőbeli helyzetét. Tehát adott jelen mellett a jövő feltételesen független a múlttól. Semmi, ami a múltban történt, nem hat, nem ad előrejelzést a jövőre nézve.

Jelöljék valamely rendszer állapotait a  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$  időpontokban az  $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  valószínűségi változók felvett értékei. Legyen a  $t_0$  időpontban  $X_0 = x_0$ , és a  $t_n$  időpontban  $i$ , a  $t_{n+1}$  időpontban  $j$  állapotban a rendszer, azaz  $X_n = i$  és  $X_{n+1} = j$ . *Egylépéses átmenet- valószínűségnek* nevezzük azt a valószínűséget, hogy  $X_{n+1}$  a  $j$  állapotban van, feltéve, hogy  $X_n$  az  $i$  állapotban van. Képlettel:  $P_{ij}^{n,n+1} := P(X_{n+1} = j | X_n = i)$ .

A jelölés azt is kidomborítja, hogy az átmenet- valószínűségek nemcsak a kezdeti és végállapot függvényei, hanem az átmeneti időnek is. Ha az egylépéses átmenet- valószínűségek függetlenek  $n$ -től, azaz az időtől, akkor azt mondjuk, hogy a Markov-folyamatnak *stacionáriusak az átmenet- valószínűségei* (Karlin és Taylor 1985). A Markov-láncok döntő többsége rendelkezik ezzel a tulajdonsággal, ezeket *homogén Markov-láncoknak* nevezzük. Ebben az esetben  $P_{ij}^{n,n+1} := P_{ij}$  és  $P_{ij}$  annak a valószínűségét jelenti, hogy az állapotok értéke az  $i$ -ből  $j$ -be megy át egy kísérlet alatt. Most már fel tudjuk írni formálisan a *Markov-tulajdonságot*:

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_1 = x_1, X_0 = x_0) = P_{ij}.$$

Ez a tulajdonság elég sok területen érvényes, például a fizikában, ahol a rendszerek jövőbeli viselkedése egyértelműen meghatározódik a jelenbeli állapotukból, és teljesen független attól, hogy milyen állapotban voltak korábban. A hidrológia tudományágában elsősorban tározók méretezésénél ismert ez az eljárás (Gálai 2013, Fekete és Keve 2019), azonban a csapadékjelenségek vizsgálatában nem elterjedt alkalmazása a hazai gyakorlatban.

A  $P_{ij}$  ( $i, j = 0, 1, 2, \dots, n$ ) számok mátrix formába is rendezhetők. A  $\mathbf{P} = (P_{ij})$  mátrixot a folyamat *átmenet-*

*valószínűség mátrixának* nevezzük:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0n} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n0} & P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}.$$

A  $P_{ij}$  mennyiségek nemnegatív számok, sorösszegük egységnyi, mert valamely esemény soronként biztosan bekövetkezik. A főátlóban szereplő értékek a helyben maradás valószínűségét adják meg és a mátrix egy sora eloszlást fejez ki.

Az átmenet- valószínűségeken kívül az ún.  $\varphi_0$  kezdeti eloszlás határozza meg a Markov-láncot. Ez egy  $n$  hosszúságú vektor, mely az egyes állapotokban való tartózkodás valószínűségeit adja meg. Adott  $\varphi_0$  esetén  $k$  lépés múlva az eloszlás:

$$\varphi_k = \varphi_0 \mathbf{P}^k.$$

Jelölje  $P_{ij}^{(n)}$  azt az átmenet- valószínűséget, hogy a rendszer  $n$  lépésben megy át az  $i$  állapotból a  $j$  állapotba. A Markov-láncot *ergodikusnak* nevezzük, ha léteznek a

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{ij}^{(n)} = P_j$$

határértékek (*határvalószínűségek*), melyek  $i$ -től függetlenek, és

$$\sum_{j=0}^n P_j = 1,$$

tehát a  $j$ -edik oszlop elemei egyenlők, és a mátrix sorösszege egységnyi (Kontur és társai 1993). A határvalószínűségekből alkotott *határmátrix* ( $\mathbf{P}^*$ ) az ergodikus Markov-láncok határeloszlására vonatkozó *Markov-tétel* alapján:

$$\mathbf{P}^* = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}^n = \begin{bmatrix} P_0 & P_1 & \dots & P_n \\ P_0 & P_1 & \dots & P_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_0 & P_1 & \dots & P_n \end{bmatrix}.$$

A határmátrix minden sora egyforma. A határvalószínűségek által alkotott valószínűségeloszlást *stacionárius* vagy *határ* vagy *invariáns* eloszlásnak is nevezzük. (A  $\mathbf{P}^*$  mátrix további hatványozásra nem változik.) A  $P_0, P_1, \dots, P_n$  valószínűségek azt fejezik ki, hogy mekkora valószínűséggel találjuk a rendszert hosszú állapotváltozások sorozata után az egyes  $0, 1, \dots, n$  állapotokban (Kontur és társai 1993). Az invariáns eloszlás számításához két eljárást követhetünk:

1. Az egylépéses átmenet- valószínűségi mátrixot addig hatványozzuk, amíg az oszlopainak elemei állandósulnak.
2. Felhasználjuk a határmátrix idempotens tulajdonságát, azaz a  $\mathbf{P}^* \mathbf{P} = \mathbf{P}^*$  tulajdonságot, így

$$\begin{bmatrix} P_0 & P_1 & \dots & P_n \\ P_0 & P_1 & \dots & P_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_0 & P_1 & \dots & P_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0n} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n0} & P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 & P_1 & \dots & P_n \\ P_0 & P_1 & \dots & P_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_0 & P_1 & \dots & P_n \end{bmatrix}.$$

Ez a mátrixszorzás a következő egyenletrendszerhez vezet:

$$P_j = \sum_{v=0}^n P_v \cdot P_{vj} \quad (j = 0, 1, \dots, n)$$

$$\sum_{j=0}^n P_j = 1$$

Az egyenletrendszert megoldva megkapjuk az invariáns eloszlást.

## AZ ÉVES CSAPADÉKÖSSZEGEK VIZSGÁLATA

### Általános jellemzés

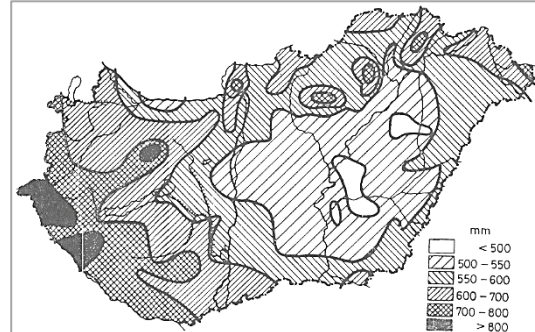
Az 1960-as évektől több külföldi kutató is modellezte Markov-láncokkal a különböző időszakok csapadékos és csapadégmentes napjainak egymás után következő folyamatát (Gabriel és Neumann 1962, Haan és társai 1976, Chin 1977). Az átmenetmátrix segítségével következtetéseket vontak le arról, hogy ez a fizikai rendszer milyen valószínűséggel található csapadékos, illetve csapadégmentes állapotban. Az utóbbi években különböző területek éves csapadékösszegeit is vizsgálták Markov-láncokkal, amely témából több publikáció is született (Selvi és Selvaraj 2011, Yusuf és társai 2014). Ezek adták az ötletet, hogy sztochasztikus módszerrel vizsgáljuk meg Baja térségében az éves csapadékösszegeket és becslést adjunk hosszú távra egy adott évről vonatkozó csapadék mennyiségéről.

Általánosságban elmondható, hogy az éghajlati tényezők és a szélsőséges időjárási jelenségek hazánkban is jelentősen befolyásolják a növénytermesztés eredményességét. A csapadék mennyisége nagymértékben csökkent, az évi 640 mm-ről 560 mm-re, továbbá az időbeli eloszlása is egyenetlen. A hőmérsékletváltozás elsősorban az Alföldet érinti majd a legnagyobb mértékben (Láng és társai 2007). Magyarország átlagos évi csapadékösszegeit mutatja az 1. ábra, melyet Péczely György szerkesztett még 1979-ben (Péczely1979).

Érdekes összevetni a Magyarország Nemzeti Atlaszában (Magyarország Nemzeti Atlasza 2018) található csapadéktérképpel az 1981-2010 időszakra vonatkozóan (2. ábra).

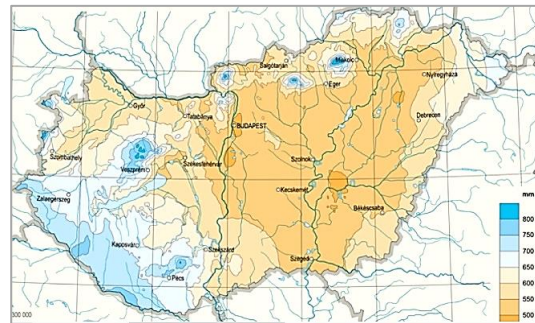
Valóban szembetűnő, hogy az Alföld több területét is érintette az éves csapadékösszegek csökkenése. Baja térsége, a Bácska északi része, Magyarország egyik legfontosabb mezőgazdasági területe. A mezőgazdasági termelés számára a természeti környezet kedvező feltételeket biztosít, de a természeti időszak igen szeszélyes, amely aszályként, túl sok esőként vagy pedig fagyveszélyként nyilvánulhat meg. Összefüggés mutatkozik az éves csapadékössze-

gek és a termésátlagok között. Főleg a nagyon csapadékhányos éveknél látszik az erőteljes korreláció. Ha összevetjük csak az elmúlt nyolc év főbb növénykultúráinak termésátlagait Magyarország évi átlagos csapadékösszegeivel erre az időszakra vonatkozóan, akkor világosan látszik, hogy a nagyon csapadékhányos 2011 és 2012 évben mennyivel alacsonyabbak a termésátlagok (KSH 2019).



1. ábra. Az átlagos évi csapadékösszeg (mm) Magyarországon (Péczely 1979)

Figure 1. Average annual rainfall sum (mm) in Hungary (Péczely 1979)



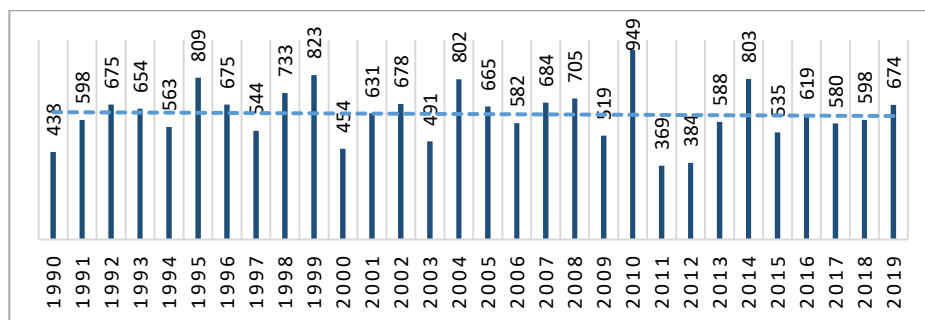
2. ábra. Az átlagos évi csapadékösszeg (mm) Magyarországon 1981-2010 (MNA 2018)

Figure 2. Average annual rainfall sum in Hungary 1981-2010 (MNA 2018)

Baja térségében egy nagyon csapadékhányos év még rosszabb hatással van a termésátlagokra, mivel itt a többségében homokos talajnak kicsi a víztartó képessége és nagyobb a talajvízszint ingadozása (KSH 2014). Célunk a csapadékhányos, illetve a nagyon csapadékhányos évek visszatérési idejének megbecslése.

### Az adatsor bemutatása, kategorizálás, az invariáns eloszlás számítása

Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisában megtalálhatók az éves csapadékösszegek Baja állomásánál. Az adatokat diagramon szemléltetjük:



3. ábra. Az éves csapadékösszegek alakulása a trendvonalal Baja (1990-2019)

Figure 3. Annual precipitation sums with the trend line at Baja (1990-2019)

Az adatok átlaga 627,4 mm, a szórás 133,57 mm. Az adatokból szembevetően a 2010-es szélsőségesen csapadékos év és az azt követő rendkívül száraz 2011-es év, amely természetesen egész Magyarországon jellemző volt. Az éghajlatkutatók szerint a két rekordév nem tudható be egyértelműen a klímaváltozás hatásának, de jelzi, hogy szélsőségesebbé válik az időjárás Magyarországon. 2010-ben a szavannák esős évszakára, 2011-ben pedig fősivatagra emlékeztetett az ország időjárása. 2010 májusában addig soha nem látott áradások alakultak ki a kisebb vízfolyásokon, de júniusban is megáradt a Bódva, a Sajó, a Hernád, az Ipoly és a Duna is. Rendkívül esős volt a szeptember, decemberben csurig telt a Balaton. A 2011-es év ellenkező irányú kilengést, rendkívüli szárazságot hozott, volt olyan vidék, ahol a sokéves átlag felét sem érte el a csapadék. Az országos csapadékösszeg 2011-ben 404,4 milliméter volt, ami 4,3 milliméterrel kevesebb, mint az eddigi legalacsonyabb érték, amelyet a meleg és száraz 2000-es évben regisztrált az OMSZ. Az OMSZ kimutatása alapján az éves csapadékösszeg csökkent az elmúlt százöt évben, vagyis egyre gyakrabban fordulnak elő szélsőségesen száraz évek (OMSZ 2005). Ezt a csökkenést nem támasztja alá egyértelműen a 3. ábra trendvonala. A szignifikánsnak nem nevezhető, alig ereszkedő vonal mutatja a Bajánál észlelt utóbbi 30 év csapadékösszegeinek alakulását.

A 3. ábra adatai alapján az éveket öt kategóriába soroltuk be csapadékoság szempontjából (Mahmut és társai 2017), az átlagtól való százalékos eltérés figyelembevételével (az átlag az 1971-2000 bázisidőszakra vonatkozik, ez alapján az átlag 636 mm, a szórás 130 mm). A kategóriák mögött zárójelben a későbbiekben használt állapotot jelöltük:

1. *nagyon csapadékhányos* (S1): éves csapadékösszeg eltérés < -30%, azaz az éves csapadékösszeg < 444 mm.
2. *csapadékhányos* (S2): -30% < éves csapadékösszeg eltérés < -10%, azaz az éves csapadékösszeg 445 és 571 mm közé esik.
3. *átlagos* (S3): -10% < éves csapadékösszeg eltérés < 10%, azaz az éves csapadékösszeg 572 és 700 mm közé esik.
4. *csapadékos* (S4): -30% < éves csapadékösszeg eltérés < -10%, azaz az éves csapadékösszeg 701 és 827 mm közé esik.
5. *nagyon csapadékos* (S5): éves csapadékösszeg eltérés > 30%, azaz az éves csapadékösszeg 828 mm-nél nagyobb.

Excelben elvégeztünk egy egyszerű grafikus illeszkedésvizsgálatot normális eloszlásra. Legyenek  $x_1 < x_2 < \dots < x_r$  az osztályközök és jelölje  $n$  a mintarealizáció elemeinek a számát,  $k_i$  pedig az  $x_i$ -nél kisebb elemek számát a mintarealizációban. Ekkor az  $x_i$ -hez tartozó empirikus eloszlásfüggvény értéke:  $F_n^*(x_i) = \frac{k_i}{n}$ . Ha teljesül, hogy a vizsgált valószínűségi változó normális eloszlású  $m$  várható értékkel és  $\sigma$  szórással, akkor

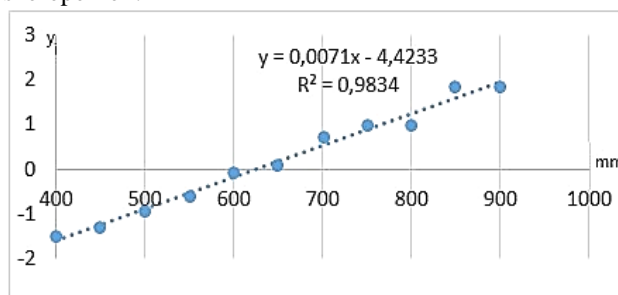
$$\frac{k_i}{n} \cong \Phi\left(\frac{x_i - m}{\sigma}\right), i = 1, 2, \dots, r,$$

azaz

$$\Phi^{-1}\left(\frac{k_i}{n}\right) \cong \frac{1}{\sigma}x_i - \frac{m}{\sigma}, i = 1, 2, \dots, r.$$

Így  $y_i := \Phi^{-1}\left(\frac{k_i}{n}\right)$  jelöléssel az  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, r$ ) koordinátájú pontok körülbelül egy olyan egyenesre esnek, melynek  $\frac{1}{\sigma}$  a meredeksége és  $-\frac{m}{\sigma}$  értéknél metszi a függőleges tengelyt.

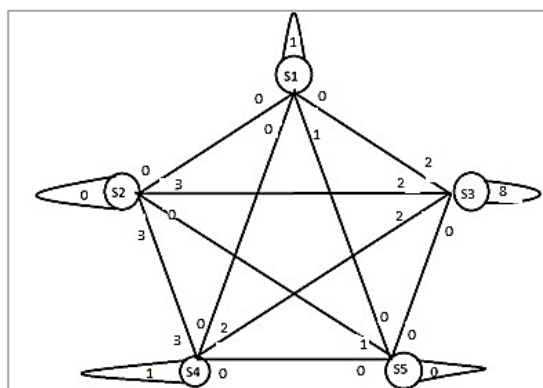
Ennek megfelelően az éves csapadékösszegek beosztását 400 mm-től 1000 mm-ig vettük, 50 mm-es osztályközökkel. A vizsgálatot a 4. ábra mutatja be, melyen a regressziós egyenes egyenlete is szerepel. A vízszintes tengelyen a csapadékmennyiségek, a függőleges tengelyen az osztályhatárokhoz tartozó  $y_i := \Phi^{-1}\left(\frac{k_i}{n}\right)$  értékek szerepelnek.



4. ábra. Grafikus normalitásvizsgálat  
Figure 4. Graphical normality test

A regressziós egyenes egyenletéből megadható, hogy a szórás  $1/0,0071=140,845$ , míg a várható érték  $4,4233 \cdot 140,845=622,999$ . Az illeszkedés szorosságát mutató 0,98-as korrelációs együttható alátámasztja, hogy az éves csapadékösszegek eloszlása közel normális.

A 3. ábra adatsora alapján meghatároztuk, hogy az egyes állapotokból milyen gyakorisággal megy át a rendszer egy másik állapotba. Először gráffal szemléltetjük az 5. ábrán.



5. ábra. Az átmenet-gyakoriság gráfja  
Figure 5. Graph of transition frequency

A gráfban például az S2 állapotból S3 állapotba való átmenetének gyakorisága 2, ez az S2-t S3-mal összekötő vonal S3-hoz közelebbi részén van feltüntetve, míg az S3-ból S1 állapotba való átmenet gyakorisága 3, ez az őket összekötő vonal S2-höz közelebbi részén van jelölve. Az egyes



állapotok ismétlődhetnek a következő évben, ezeket az önmagába jutó átmenet-gyakoriságokat mutatják az állapotok mellett lévő számok a zárt hurkokban. A gráfnak kölcsönösen egyértelműen megfeleltethető az alábbi átmenet-gyakorisági mátrix, melynek értékeit az 1. táblázat mutatja:

1. táblázat. Az átmenet-gyakoriság értékei  
Table 1. Values of the transition frequencies

	S1	S2	S3	S4	S5
S1	1	0	2	0	0
S2	0	0	2	3	1
S3	0	3	8	2	0
S4	0	3	2	1	0
S5	1	0	0	0	0

Ebből a táblázatból meghatározható a kezdeti eloszlás, azaz, hogy milyen valószínűséggel van a rendszer az egyes

$$\begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,333 & 0 & 0,667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,333 & 0,5 & 0,167 \\ 0 & 0,231 & 0,615 & 0,154 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,333 & 0,167 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \end{pmatrix}$$

Ez az alábbi egyenletrendszerhez vezet (tudjuk, hogy  $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1$ ):

$$\begin{aligned} 0,333P_1 + & & & & +P_5 & = P_1 \\ & 0,231P_3 + 0,5P_4 & & & & = P_2 \\ 0,667P_1 + 0,333P_2 + 0,615P_3 + 0,333P_4 & & & & & = P_3 \\ & 0,5P_2 + 0,154P_3 + 0,167P_4 & & & & = P_4 \\ & 0,167P_2 & & & & = P_5 \end{aligned}$$

Rendezve és Gauss-eliminációval megoldva kapjuk, hogy

$$P_1 = 0,055, P_2 = 0,218, P_3 = 0,472, P_4 = 0,218, P_5 = 0,036.$$

Ezek az értékek adják tehát az állapotok invariáns eloszlását, melyeket a  $\mathbf{P}$  mátrix hatványozásával is ellenőriztünk, a 16-dik hatványánál teljes azonosságot kaptunk. Az invariáns (egyensúlyi) eloszlás értékei alapján tehát hosszabb távon a nagyon csapadékhányos év valószínűsége 5,5%, a csapadékhányos évé 21,8%, az átlagos csapadékmennyiségű évé 47,2%, a csapadékos évé szintén 21,8%, míg a nagyon csapadékos évé 3,6%. Ebből a csapadékhányos év átlagos visszatérési idejére  $\frac{1}{0,218} = 4,58$ , míg a nagyon csapadékhányos év visszatérési idejére  $\frac{1}{0,055} = 18,18$  évet kapunk. Ha összevonjuk az utóbbi két állapotot, akkor összességében  $\frac{1}{0,218+0,055} = 3,66$  évente várható kisebb-nagyobb mértékben csapadékhányos év. Figyelemre méltó, hogy az utóbbi 10 évben kétszer is előfordult nagyon csapadékhányos év.

Nézzük meg most, hogy a Markov-lánccal kapott valószínűségek mennyire térnek el a normális eloszlással számított értékektől. A nagyon csapadékhányos év valószínűségére (a  $\xi$  valószínűségi változó az éves csapadékösszeget jelöli) kapjuk, hogy

$$P(\xi < 444) = F(444) = \Phi\left(\frac{444-636}{130}\right) = \Phi(-1,48) = 1 - \Phi(1,48) = 1 - 0,9306 = 0,0694,$$

állapotokban. Látjuk például, hogy az S1, azaz a nagyon csapadékhányos évnek a valószínűsége  $\frac{3}{29}$ . A nevező minden esetben az adatsor elemszámától eggyel kevesebb, hiszen az indulási állapotba nem vezet átmenet. A kezdeti eloszlás, azaz  $\varphi_0 = \left(\frac{3}{29}; \frac{6}{29}; \frac{14}{29}; \frac{6}{29}; \frac{1}{29}\right)$ . Az átmenet-gyakorisági táblázatból megadható az egy lépéses átmenet-valószínűségi mátrix, azaz

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0,333 & 0 & 0,667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,333 & 0,5 & 0,167 \\ 0 & 0,231 & 0,615 & 0,154 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,333 & 0,167 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

A határmátrix számításához fel kell használni a már említett  $\mathbf{P}^* \mathbf{P} = \mathbf{P}^*$  tulajdonságot. Ez alapján:

míg a csapadékhányos év valószínűségére:

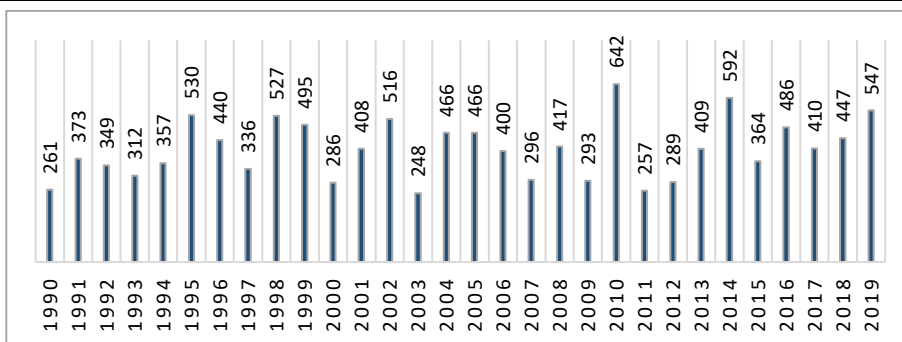
$$\begin{aligned} P(445 < \xi < 571) &= F(571) - F(445) = \Phi\left(\frac{571-636}{130}\right) - \\ &\Phi\left(\frac{445-636}{130}\right) = \Phi(-0,5) - \Phi(-1,47) = 1 - \Phi(0,5) - \\ &1 + \Phi(1,47) = 0,9292 - 0,6915 = 0,2377 \text{ adódik.} \end{aligned}$$

Szembetűnő, hogy igen közel (2%-on belül) vannak egymáshoz a két módszerrel számított valószínűségi értékek, a nagyon csapadékhányos év esetén mindössze 0,0144, míg a csapadékhányos évnél is csak 0,0197 az eltérés.

## A VEGETÁCIÓS IDŐSZAKI FÉLÉVES CSAPADÉKÖSSZEG VIZSGÁLATA

A mezőgazdaság számára fontos vegetációs időszak áprilistól szeptemberig tartó periódusára is elvégeztük a csapadékösszegek vizsgálatát. Ezt vizsgálhatjuk az előző fejezetben ismertetett kategorizálással is, azonban most az SPI6 csapadékindex alapján végeztük az elemzésünket, mely 6 havi csapadékösszeeggel számol. (Megjegyezzük, hogy az előző fejezetben vizsgált éves csapadékösszegeket az SPI12 csapadékindex alapján is kategorizálhattuk volna.)

Az SPI (Standardized Precipitation Index) a nemzetközi aszálykutatói gyakorlatban alkalmazott mutató mely adott időszak pozitív (nedves) és negatív (száraz) hidrológiai anomáliáit számszerűsíti. Az SPI pontos definíciója és számítása statisztikai eljárás alapján (McKee és társai 1993), amely során az adott helyen, különböző időszak alatt érkező csapadékmennyiségre először gamma eloszlást illesztünk, átalakítjuk standard normális eloszlássá, majd pedig SPI értékévé. A kapott SPI értékhez ( $x$ ) tartozó standard normális eloszlás értéke ( $\Phi(x)$ ) megadja a vizsgált időszakra vonatkozó csapadékösszeg előfordulási valószínűségét. Például az  $x = -1$ -hez tartozó érték kerekítve  $0,16$  ( $\Phi(-1) = 1 - \Phi(1) \approx 0,16$ ), ami azt jelenti, hogy az éghajlat változatlansága esetében 100 év alatt átlagosan 16 ilyen év fordulhat elő. Az SPI a standardizálás miatt eltérően csapadékos régiók összehasonlítására is alkalmas. Az SPI6 index tehát 6 havi csapadékösszeget vesz figyelembe, esetünkben az április 1-től szeptember 30-ig terjedő időszakot vettük. A 6. ábra mutatja az 1990-2019 időszak 6 havi csapadékösszegeit április 1-től szeptember 30-ig:



6. ábra. A 6 havi csapadékösszegek alakulása Baján (1990-2019)  
 Figure 6. The run of the six-month precipitation sums at Baja (1990-2019)

Az Excel segítségével kiszámítottuk az egyes évekhez tartozó SPI6 indexeket (itt nem részletezzük, de az olvasó

pontos leírást talál a számításról Kumar és társai 2009-ben írt cikkének mellékletében), melyeket a 2. táblázat tartalmaz:

2. táblázat. Az évekhez tartozó SPI értékek  
 Table 2. The SPI values for the years

<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>
-1,54	-0,26	-0,51	-0,92	-0,42	1,17	0,39	-0,65	1,14	0,88
<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
-1,22	0,09	1,05	-1,71	0,63	0,63	0,01	-1,10	0,18	-1,14
<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
2,02	-1,59	-1,19	0,10	1,65	-0,35	0,80	0,11	0,46	1,30

A kiszámított indexek alapján 5 kategóriába soroltuk az éveket, ezt mutatja a 3. táblázat:

3. táblázat. Kategorizálás SPI értékek alapján  
 Table 3. Categorization by the SPI values

SPI értékek	Kategóriák (állapot)
< -1,5	nagyon száraz (1)
-1,5 - -1,0	mérsékeltlen száraz (2)
-1,0 - 1,0	közel átlagos (3)
1,0 - 1,5	mérsékeltlen nedves (4)
>1,5	nagyon nedves (5)

Az állapotok alapján felírható az átmenet-valószínűségi mátrix:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 0,333 & 0,667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,75 & 0 & 0,25 \\ 0 & 0,176 & 0,53 & 0,235 & 0,059 \\ 0,333 & 0 & 0,667 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Az előző fejezetben használt mátrixszorzással és az ebből származtatott egyenletrendszer megoldásával azt kapjuk, hogy

$$P_1 = 0,079, P_2 = 0,13, P_3 = 0,586, P_4 = 0,138, P_5 = 0,067.$$

Ezen értékeket a **P** mátrix hatványozásával is ellenőriztünk, a 16-dik hatványnál itt is teljes azonosságot kaptunk. Az invariáns (egyensúlyi) eloszlás értékei alapján tehát hosszabb távon a nagyon száraz 6 hónapos időszak valószínűsége 7,9%, a mérsékeltlen száraz időszaké 13%, a közel átlagos időszaké 58,6%, a mérsékeltlen nedves időszaké 13,8%, míg a nagyon nedves időszaké 6,7%. Ha összevonjuk az első két állapotot, akkor összességében  $\frac{1}{0,079+0,13} = 4,78$  évente várható kisebb-nagyobb mértékben száraz 6 hónapos időszak Bajánál a vegetációs időszakon belül.

Az imént kapott eredmény talán nem tűnik még túlságosan riasztónak, ugyanakkor fontos kiemelni, hogy a 20.

század eleje óta a száraz időszakok hossza (vagyis a leg-hosszabb időszak, amikor a napi csapadék nem éri el az 1 mm-t), jelentősen megnövekedett (OMSZ 2018). Ennek fő oka a napi intenzitás, más néven átlagos napi csapadékos-ság (egy adott periódusban lehullott összeg és a csapadékos napok számának hányadosa) jelentős megnövekedése a nyári időszak folyamán. Az átlagos napi csapadékok növekedése arra utal, hogy a csapadék egyre inkább rövid ideig tartó, intenzív záporok, zivatarok formájában hullik és ezzel párhuzamosan nő a csapadékmentes időszakok hossza. Így alapvető igényként merült fel, hogy az aszályos időszakokat sűrűbb csapadékatatok alapján, részletesebben vizsgáljuk.

## AZ ASZÁLYOS IDŐSZAKOKBA ESŐ NAPOK VALÓSZÍNŰSÉGE

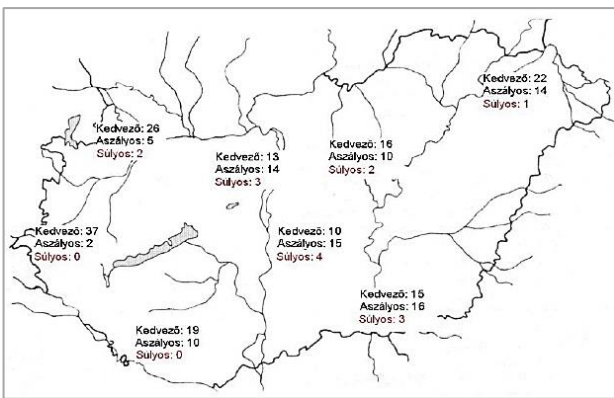
### Általános jellemzés

A várható globális éghajlatváltozás hazánk, legfőképp az Alföld éghajlatában komoly változásokat okozhat, az aszályos hónapok gyakorisága akár 60%-kal nőhet (Pálfai 2004). A nagy aszályok elsősorban az Alföld déli részén fordulnak elő, különösen a Körös-szög és a Tiszazug vidékén, ahol a potenciális vízhiány a nyári félévben meghaladja a 300 mm-t. Ezt az eredményt több aszályindex (a lehetséges párolgás és a csapadék havi értékeinek hányadosa) alkalmazásával is megkaphatjuk (OMSZ 2005). Általánosan megfigyelhető, hogy az utóbbi 40 évben a száraz időszakok hossza és gyakorisága növekszik. A Természetvédelmi Világalap (WWF) tanulmánya (Good Water Management 2019) is kiemeli, hogy Magyarország fokozott veszélyben van a szárazságot tekintve: az aszálygyakoriság növekedésének kockázata igen jelentős, vagyis a jövőben gyakoribb és hosszabb száraz periódusokra számíthatunk.

Az aszályos periódusok kutatásakor a mezőgazdaság számára kiemelkedően fontos vegetációs időszakot, azaz az április 1-től október 31-ig terjedő időszakot vettük figyelembe (összesen 214 nap). Az utóbbi 10 év (2010-

2019) aszályos időszakából számítjuk ki hosszú távra a már bemutatott Markov-moddal az aszályos időszakba eső napok valószínűségeit. Ehhez minden egyes évhez kiszámítjuk az aszályos időszakba eső napok határvalószínűségeit, majd ezek átlagát vesszük. Fontos kérdés mindelektől, hogy mit is tekintünk aszályos időszaknak.

Az aszályra vonatkozó meghatározásoknak az a fő jellemzője, hogy azt egy kritikus értéknél nagyobb vízhiánnyal definiálhatjuk. Az aszály fellépését Dunay és Tölgyesi (*Dunay és Tölgyesi 1992*) a talaj relatív nedvességének határértékéhez köti, vagyis amennyiben a talaj vízkészlete nem süllyed a szántóföld hasznos vízkapacitásának 40%-a alá, azt az évet kedvező vízellátottságúnak nevezik. Aszályosak azok az évek, melyekben 20% alá csökkent a talajnedvesség, de nem érte el a súlyos aszály fokozatát, melyet 10% alatti érték jellemez. A 7. ábrán az 1951 és 1992 közötti aszálygyakoriságok láthatók.



7. ábra. Az aszályok gyakorisága hazánkban 1951 és 1992 között (*Dunay és Tölgyesi 1992*)

Figure 7. The frequency of droughts in Hungary between 1951 and 1992 (*Dunay and Tölgyesi 1992*)

4. táblázat. A tenyészidőszakra vonatkozó aszályos időszakok Baja térségében (2010-2019)  
Table 4. Drought periods during the vegetation period in the Baja area (2010-2019)

Év	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>Időszakok száma</b>	2	5	3	3	1	3	1	2	3	1
<b>Időszakba eső napok száma</b>	57	158	102	110	27	90	27	55	99	25
<b>Dátumok</b>		04.01.- 04.29., 05.01.- 05.31., 06.20.- 07.17. 08.09.- 09.18.(!)	04.08.- 05.02., 06.13.- 07.10., 07.25.- 09.12.(!)	04.06.- 05.09., 07.11.- 08.24.(!)	05.17.- 06.12.	04.01.-04.27., 06.10.- 07.22.(!), 07.28.-08.16.	04.01.- 04.27.	06.02.- 06.24., 09.20.- 10.21.	04.01.-05.09., 08.02.-08.24., 09.25.-10.31.	08.15.- 09.08.

#### A határeloszlások számítása

Először kiszámítjuk a 2010-es évet alapul véve az aszályos időszakba eső napok valószínűségeit hosszú távra a Markov-láncok segítségével. A 0-állapot legyen a nem aszályos időszakba tartozó nap, míg az 1-es állapot az aszályos időszak napja. Az átmenet-gyakorisági mátrix:

$$\begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} \\ g_{10} & g_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 154 & 2 \\ 2 & 55 \end{pmatrix}.$$

A térképről leolvasható, hogy a vizsgált 42 év alapján Magyarország nyugati részén az aszály rendkívül ritka jelenség. Az északnyugati országgrészben a Kisalföld területén súlyos aszály csupán kétszer, míg enyhébb öt esetben fordult elő. Ezzel párhuzamosan a megfelelő vízellátottságú időszakok nagy számban (26 év) jelentkeztek. Hazánk keleti része felé haladva az aszály gyakorisága számottevően nő, így az Alföldön súlyos vízhiány átlagosan tízévente, míg aszályos év átlagosan megközelítőleg háromévente következik be (*Dunay és Tölgyesi 1992*).

Az agrometeorológiában a Palmer féle definíció terjedt el, amely szerint az aszály tartós és jelentős vízhiány (*Palmer 1965*). E meghatározás egyszerű és rugalmas, tehát nem tartalmaz semmi megkötést arra vonatkozóan, hogy mit értünk vízhiánnyon, sem arra vonatkozóan, hogy mikor tekintjük jelentősnek és tartósnak. Így egy adott vizsgálat során maga a kutató határozhatja meg a jelentős vízhiányt jelentő küszöbértéket, s azt is, hogy ezt milyen hosszú időszakra vonatkozóan elemzi. Emiatt az adott definíció rugalmasan alkalmazható különböző vizsgálatok esetén.

Az állami kárenyhítési szabályok szerint aszálynak minősül az a kedvezőtlen időjárási jelenség, amelynek során a kockázatviselés helyén az adott növény vegetációs időszakában harminc egymást követő napon belül a lehullott csapadék összes mennyisége a 10 millimétert nem éri el vagy a lehullott csapadék összes mennyisége a 25 millimétert nem éri el, de ennél a feltételnél a napi maximum hőmérsékletnek a harminc napon belül legalább tizenöt napon meg kell haladnia a 31°C-ot.

Kutatásunkban ez utóbbi definíciót vettük alapul annyi módosítással, hogy a harminc egymást követő napot huszonötre csökkentettük, ami a szabálytól szigorúbb. Az alábbi 4. táblázat tartalmazza az aszályos időszakokat 2010-től 2019-ig Bajánál.

Az értelmezéshez vegyük például a  $g_{01}$  elemet. Mivel 2 aszályos periódus fordult elő, így kétszer fordult elő, hogy nem aszályos periódusú nappól tértünk át aszályos időszakba eső napra és fordítva a  $g_{10}$  elemet tekintve. A  $g_{11}$  elemet nézve megállapíthatjuk, hogy összesen 57 aszályos időszakba eső napunk volt, így 55 átmenet volt az ebbe az állapotba tartozó napok között (az időszakok első napjaitól indulnak az átmenetek, tehát mivel 2 aszályos

időszak volt, így  $57-2=55$  átmenet van). A  $g_{00}$  elemet vizsgálva láthatjuk, hogy  $214-57=157$  nem aszályos időszakba tartozó nap volt 3 periódusban (az időszakok első napjaitól indulnak az átmenetek, tehát mivel 3 nem aszályos időszak volt, így  $157-3=154$  átmenet van). Az átmenet-gyakorisági mátrixból megkapjuk az átmenet-valószínűségi mátrixot:

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{g_{00}}{g_{00} + g_{01}} & \frac{g_{01}}{g_{00} + g_{01}} \\ \frac{g_{10}}{g_{10} + g_{11}} & \frac{g_{11}}{g_{10} + g_{11}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{154}{156} & \frac{2}{156} \\ \frac{2}{57} & \frac{55}{57} \end{pmatrix}$$

A határmatrix számításához felírható a következő szorzás:

$$\begin{pmatrix} P_0 & P_1 \\ P_0 & P_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{154}{156} & \frac{2}{156} \\ \frac{2}{57} & \frac{55}{57} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0 & P_1 \\ P_0 & P_1 \end{pmatrix}$$

Ez az alábbi egyenletrendszer megoldásához vezet:

$$\left. \begin{aligned} \frac{154}{156}P_0 + \frac{2}{57}P_1 &= P_0 \\ \frac{2}{156}P_0 + \frac{55}{57}P_1 &= P_0 \\ P_0 + P_1 &= 1 \end{aligned} \right\}$$

Ezt megoldva adódik, hogy  $P_0 = 0,73$  és  $P_1 = 0,27$ . Tehát hosszú távon 27% az esélye egy aszályos időszakba tartozó napnak a vegetációs időszakban.

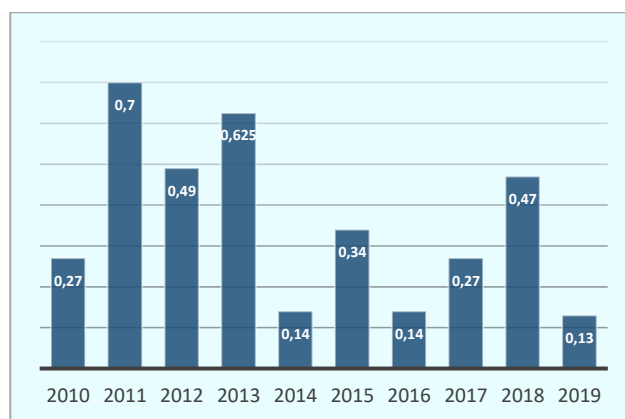
Hasonló módon számítható ki az invariáns eloszlás a többi évnél is, ezeket nem részletezzük, de az átmenet-valószínűségi mátrixokat és a határeloszlásokat az 5. táblázatba foglaljuk:

5. táblázat. Az átmenet-valószínűségi mátrixok és határeloszlások (2010-2019)

Table 5. Transition probability matrices and limit distributions (2010-2019)

Év	P	(P <sub>0</sub> , P <sub>1</sub> )
2010	$\begin{pmatrix} 0,987 & 0,013 \\ 0,035 & 0,965 \end{pmatrix}$	(0,73, 0,27)
2011	$\begin{pmatrix} 0,928 & 0,072 \\ 0,031 & 0,969 \end{pmatrix}$	(0,3, 0,7)
2012	$\begin{pmatrix} 0,972 & 0,028 \\ 0,029 & 0,971 \end{pmatrix}$	(0,51, 0,49)
2013	$\begin{pmatrix} 0,97 & 0,03 \\ 0,018 & 0,982 \end{pmatrix}$	(0,375, 0,625)
2014	$\begin{pmatrix} 0,994 & 0,006 \\ 0,037 & 0,963 \end{pmatrix}$	(0,86, 0,14)
2015	$\begin{pmatrix} 0,983 & 0,017 \\ 0,033 & 0,967 \end{pmatrix}$	(0,66, 0,34)
2016	$\begin{pmatrix} 0,994 & 0,006 \\ 0,038 & 0,962 \end{pmatrix}$	(0,86, 0,14)
2017	$\begin{pmatrix} 0,987 & 0,013 \\ 0,036 & 0,964 \end{pmatrix}$	(0,73, 0,27)
2018	$\begin{pmatrix} 0,982 & 0,018 \\ 0,02 & 0,98 \end{pmatrix}$	(0,53, 0,47)
019	$\begin{pmatrix} 0,994 & 0,006 \\ 0,04 & 0,96 \end{pmatrix}$	(0,87, 0,13)

A 8. ábra mutatja az éveket a hozzájuk tartozó  $P_1$  határvalószínűségekkel.



8. ábra. Az aszályos időszakba eső napok határvalószínűségei Baján (2010-2019)

Figure 8. Limit probabilities of days in the drought period at Baja (2010-2019)

Az 3. és 8. ábra valamint az 5. táblázat adatainak összevetése látszólag ellentmondásos, hiszen 2010 kifejezetten csapadékos év volt. Jól rávilágít ez az észrevétel arra, hogy hosszabb időszakra vonatkozó csapadékösszegek alapján nem lehet az aszályosságot vizsgálni. Annak ellenére, hogy 2010-ben extrém csapadékmennyiség hullott le, a tenyészidőszakra vonatkozólag két 30 naphoz közeli aszályos időszak is volt (definíciónk szerint). Ugyanakkor az átlagos csapadékmennyiséget mutató 2016-os év viszonylag aszálymentes időszak volt.

A 8. ábrán szereplő határvalószínűségek átlagát véve 0,3575 adódik, tehát mondhatjuk, hogy a jövőben átlagosan ekkora valószínűséggel lesz a vegetációs időszak egy napja az aszályos periódusban, ami már igen figyelemre méltónak számít. A 2011-es rendkívüli évről már az előző fejezetben is szó, de a 8. ábrán is szembevetendő a 2011-es év alapján a vegetációs időszakban számolt aszályos nap határvalószínűsége. 2011-ben az aszály mintegy 1 milliárd forint kárt okozott a mezőgazdaságban, emellett az alacsony dunai vízállás a hajózást is hátráltatta - november hónap folyamán a Dunán, a Tiszán és mellékfolyóikon is több helyen mértek rekord alacsony vízállást. A vegetációs időszakban egyetlen hónapban, júliusban örvendhettünk nagyobb mennyiségű esőnek, mely azonban felhőszakadások alkalmával érkezett. Az akkori hírek szerint a heves viharok erős szellőkésői és a hirtelen lezúduló nagy csapadék okozta károk közel 2 milliárd forintba rúgtak (*origo.hu 2012*).

A Markov-láncok segítségével meg tudjuk állapítani egy folyamat perzisztens jellegét is, azaz, hogy trendet erősítő folyamatról van-e szó. A perzisztens jelleget általában az R/S (Rescaled Range) analízisen belül a *Hurst-együtthatóval* (H) mérik, melynek értéke 0 és 1 közé esik és megmutatja, hogy egy folyamat antiperzisztens ( $H < 0,5$ ), perzisztens ( $H > 0,5$ ) vagy véletlen ( $H=0,5$ ) viselkedésű. A perzisztencia az aszályos időszakok vizsgálatában azt jelenti, hogy amennyiben az aszályos időszakba eső napok száma emelkedik egy periódusban, akkor várhatóan az emelkedés folytatódni fog a következő periódusban is.

Alijani 2011-ben (Alijani 2011) a Markov-láncok elméletéhez kapcsolódva egy egyszerű képletet alkalmazott a perzisztencia eldöntésére. Ha  $r = P_{11} - P_{01}$  pozitív, akkor perzisztens a folyamat, ha negatív, akkor a folyamat a perzisztencia hiányát mutatja. Esetünkben mivel valamennyi átmenet-valószínűségi mátrix elemei alapján az  $r > 0$ , így folyamatunkat perzisztensnek tekinthetjük, azaz az aszályossági kitettségünk növekszik. Ennek mértékét, azaz a perzisztencia erősségét itt most nem vizsgáljuk.

### KÖVETKEZTETÉSEK

A kapott eredményeink is bizonyítják, hogy az utóbbi évtizedekben az aszály és a vízhiány jelentős kockázati tényezővé vált, melynek előfordulási gyakorisága, erőssége megnövekedett, így a jelenség kezelése a vízgazdálkodás számára is fokozottabb és egyre nehezebb feladatot jelent. Ezek a kedvezőtlen változások egyre nagyobb kihívás elé állítják a természeti és a gazdasági környezetet egyaránt. Az előrejelzési modellek és a megfigyelések tanulsága alapján is, várhatóan hazánk érintettsége fokozódni fog az aszály vonatkozásában, a vízkészletek mennyiségi és minőségi változásai az alkalmazkodáson túl a megelőzést, a tervszerű használatot fogják megkövetelni (Nemzeti Vízstratégia 2017).

Az aszályok gyakoriságának növekedésével számolnunk kell az élelmiszer-ellátást biztosító mezőgazdasági területek csökkenésével (sivatagosodás), valamint a termésmennyiség csökkenésével és a termelési költségek növekedésével. Ez az élelmiszerárak növekedését eredményezheti. A megoldás értelemszerűen az, hogy Baja térségében is az öntözött területek növelésére van szükség. Ezt főként tározással lehetne megoldani. A tározás mértéke növelhető lehetne a térségi, az önkormányzati, az üzemi és a lakossági vízvisszatartás ösztönzésével. Elő kellene tehát mozdítani a települések és a lakosság helyi víztározását a nem ivóvíz célú vízszükségletek biztosítására. Megjegyzendő, hogy e gondolatok már közel 180 éve, Beszédes József (első mérnök volt akadémikusaink között) által is megfogalmazást nyertek: „Házad udvarából ne ereszd ki az eső vagy hó levét, míg nem használtad; úgy határodból, vármegyédből, országodból használatlanul a vizet ki ne bocsássad, mert az ingyen az Isten becses ajándéka.”

Napjainkban az aszály elleni egyik legjelentősebb intézkedési program az öntözéses gazdálkodás fejlesztése lehet (Nemzeti Vízstratégia 2017). Jelentős igény mutatkozik a mezőgazdasági vízszolgáltatások, az öntözésfejlesztési beruházások bővítésére és a víztakarékos öntözési eljárások alkalmazására.

### ÖSSZEFOGLALÁS

A Markov-láncok elméletét az utóbbi évtizedben széles körben alkalmazták hidrológiai folyamatok elemzésében. Ezen elméletet felhasználva becslést adtunk Baja térségére a csapadékösszegek várható jövőbeli alakulásáról. Az utóbbi három évtized bajai éves csapadékösszeg adatai alapján enyhe csökkenés érzékelhető. A csapadékösszegeket az 1971-től 2000-ig tartó bázisidőszak átlagától való eltérései alapján kategóriákba soroltuk. Az átmenet-gyakoriságok és átmenetmátrix meghatározásával az egyes kategóriákba eső csapadékösszegek határvalószínűsége

hosszú távra kiszámítható egy ötismeretlenes egyenletrendszer megoldásával. Ez alapján kaptuk, hogy kb. 3,66 évente várható kisebb-nagyobb mértékben csapadékhiányos év.

Megvizsgáltuk az utóbbi 30 év vegetációs időszakain belül az április 1-től szeptember 30-ig terjedő 6 hónapos időszakok csapadékösszegeit is. Itt a kategorizálást az SPI6 csapadékindex alapján végeztük. Ez talán kevésbé szigorú, mint az éves összegeknél alkalmazott csoportosítás, mivel több adat esik az átlagoshoz közeli kategóriába. A Markov-láncok alkalmazását hasonlóan elvégezve azt kaptuk, hogy kb. 4,78 évente várható kisebb-nagyobb mértékben száraz 6 hónapos időszak Baján a vegetációs időszakon belül. Ez a visszatérési idő az Alföld más részeihez képest talán nem tűnik veszélyesnek az SPI6 csapadékindexet tekintve. Azonban még ez a vizsgálat is félrevezető lehet az aszály részletesebb tanulmányozásában. Ugyanis ez alapján a vegetációs időszakban nem mutatható ki az utóbbi 30 év adatsora szerinti egyértelmű aszályra utaló csapadékhiány. Ennek oka, hogy a csapadék jellemzően egyre inkább rövid ideig tartó, intenzív záporok, zivatarok formájában hullik és ezzel párhuzamosan nő a csapadékmentes időszakok hossza. Ez a jelenség hosszabb időszakok csapadékösszegeiben már elmosódó információvá válik.

A csapadékösszegek eddigi, aszályosságot nem képező leíró tulajdonságai miatt áttértünk egy részletesebb megközelítésre. Az aszályos időszak definiálása után kiszámítottuk annak valószínűségét, hogy Baja térségében egy nap az április 1-től október 31-ig terjedő időszakban aszályos időszakba esik-e. Ehhez az utóbbi 10 év definíciónk szerinti aszályos időszakait gyűjtöttük ki és ezek ismeretében végeztük számításainkat. A 2010-2019 időszak minden egyes évéből kiindulva meghatároztuk az aszályos időszakba eső nap határvalószínűségét. Ezen határvalószínűségeket átlagolva kaptuk, hogy a vizsgált időszak alatt 35,75% valószínűséggel egyetlen tenyészidőszaki nap az aszályos időszakhoz tartozik. A Markov-láncokat felhasználva a perzisztenciát is ki tudtuk mutatni az aszályos időszakok vizsgálatában, ami azt jelenti, hogy az aszályos időszakba eső napok száma várhatóan növekedni fog.

Ez a cikk alapjául szolgálhat más térségekre vonatkozó hasonló számításoknak, kutatásoknak is. Érdemes lenne Magyarország területét lefedve több állomásra is elvégezni számításainkat, mely alapján a jövőre vonatkozó, országos aszályossági térkép szerkeszthető.

### IRODALOMJEGYZÉK

Alijani, B. (2011). Evaluation of the Structure of Continuance of the Two Situations of Raining in South Iran by Means of Markov Hidden Status Model. *Geography and Development Journal*, 25, 1-20.

Chin, E. H. (1977). Modelling daily precipitation occurrence process with Markov chain. *Wat. Resour. Res.* 13 (6), 949-956.

Dunay S., Tölgyesi L. (1992). Aszály – agrometeorológus szemmel. „Az 1992 évi aszály értékelése” c. kiadvány Eds. Pálfi I., Vermes L., FM, MAE, MHT, Budapest, 17-24.

- Fekete Á., Keve G.* (2019) A Magyarszéki tározó esetleges vízhasznosítási célú üzemeléséhez szükséges optimális térfogat meghatározása Moran modellel. *Hidrológiai Közlöny* 99 : 2 pp. 39-46. , 8 p.
- Gabriel, K.R. and Neumann, J.* (1962). A Markov Chain Model for Daily Rainfall Occurrence at Tel Aviv. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88, 90-95.
- Gálai A.* (2011). Bolyongás a szikes tavak körül, Szivattyús kiegészítő vízutánpótlás tervezése sztochasztikus esz-közökkel, *Hidrológiai Közlöny* 91. évf. 1. szám, p35-39.
- Good Water Management* (2019). The heart of Europe's drought response. [https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/good\\_water\\_management\\_the\\_heart\\_of\\_europes\\_drought\\_response.pdf](https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/good_water_management_the_heart_of_europes_drought_response.pdf)
- Haan, C.T., Allen, D.M. & Street, J.O.* (1976). A Markov chain model for daily rainfall. *Wat. Resour. Res.* 12 (3), 443-449.
- Kis A., Pongrácz R., Bartholy J., Szabó J. A.* (2017). A Felső-Tisza vízgyűjtő vizsgálata éghajlati és hidrológiai szimulációk alkalmazásával, *Légekör* 62. évfolyam 179-182
- Kontur I., Koris K., Winter J.* (1993). *Hidrológiai számítások*. Budapest, Akadémiai Kiadó
- Központi Statisztikai Hivatal, Szegedi főosztály* (2014). *Mezőgazdaság és agrártársadalom Magyarország megyéiben: Bács-Kiskun megye. Agronapló*, (4), 41-43. <https://www.agronaplo.hu/szakfolyoirat/2014/04/gazdasag/mezogazdasag-es-agrartarsadalom-magyarorszag-megyeben-bacs-kiskun-megy>
- Központi Statisztikai Hivatal* (2019). *Statisztikai Tükör*. <http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/stattukor/fobbnoveny/2019/index.html>
- Láng I.–Jolánkai M.–Csete L.* (2007). *A globális klíma változás–hazai hatások és válaszok – A VAHAVA jelentés*. Szaktudás Kiadó Ház Rt. Bp.
- Magyarország Nemzeti Atlasza* (2018). Forrás: [http://www.nemzetiatlasz.hu/MNA/MNA\\_2\\_5.pdf](http://www.nemzetiatlasz.hu/MNA/MNA_2_5.pdf) (A letöltés dátuma: 2020.02.28.)
- Mahmut R., Hurem D., Zeynep K.* (2017). Determining Future Precipitation Probability for Kahramanmaraş City Using Markov Chain Approach. *Turkish Journal of Forest Science* (online), <https://dergipark.org.tr/download/article-file/283502>
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J.* (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the IX Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society: Boston, MA; 179–184.
- Nemzeti Vízstratégia* (2017). Kvassay Jenő Terv, <https://www.vizugy.hu/vizstrategia/documents/997966DE-9F6F-4624-91C5-3336153778D9/Nemzeti-Vizstrategia.pdf>
- OMSZ* (2010): Magyarország éghajlata. [https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag\\_eghajlata/altalanos\\_eghajlati\\_jellemzes/csapadek/](https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/csapadek/)
- OMSZ* (2005): Magyarország éghajlatának néhány jellemzője 1901-től napjainkig. [http://www.met.hu/downloads.php?l=egh\\_doc&f=Magyarorszag\\_eghajlatana\\_k\\_nehany\\_jellemzoje\\_1901-tol.pdf](http://www.met.hu/downloads.php?l=egh_doc&f=Magyarorszag_eghajlatana_k_nehany_jellemzoje_1901-tol.pdf)
- OMSZ* (2018): Megfigyelt változások – Magyarország. [https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt\\_valtozasok/Magyarorszag](https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_valtozasok/Magyarorszag)
- Origo.hu* (2012) <https://www.origo.hu/idojaras/20120106-szarazsagerekord-idojaras-2011-szaztiz-eve-nem-volt-ilyen-szaraz-ev.html>
- Padányi József, Halász László* (2012). A klímaváltozás hatásai. [https://www.uni-nke.hu/document/uni-nke-hu/padanyi\\_klimavaltoz\\_tanulm.pdf](https://www.uni-nke.hu/document/uni-nke-hu/padanyi_klimavaltoz_tanulm.pdf)
- Pálfai I.* (2004). *Belvizek és aszályok Magyarországon*. Hidrológiai tanulmányok, VITUKI, Budapest, p. 492
- Palmer, W. C.* (1965). *Meteorological Drought*. US Weather Bureau, Washington, DC, Research Paper, no. 45, 58p
- Péczely György* (1979). *Éghajlattan*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- Samuel Karlin, Howard Taylor* (1985). *Sztochasztikus folyamatok*. Gondolat Kiadó, Budapest
- Selvi S. T., & Selvaraj R. S.* (2011). Stochastic Modelling of Annual Rainfall at Tamil Nadu. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, Volume 1, Issue 4: 566-570.
- Yusuf A. U., Adamu L., & Abdullahi M.* (2014). Markov chain model and its application to annual rainfall distribution for crop production. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 3(2): 39-43.

## A SZERZŐK



**FEKETE ÁRPÁD** matematika-földrajz szakos tanár (Szegedi Tudományegyetem, 2000). 2006-ban szerzett PhD fokozatot a Szegedi Tudományegyetemen matematika - és számítástudományból. 2003 óta a felsőoktatásban dolgozik, jelenleg a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Karán főiskolai docens, matematika tárgyakat oktat mérnök szakos hallgatóknak. Kutatási területe a matematikai analízis és a sztochasztikus folyamatok, valamint ezek alkalmazásai mérnöki-műszaki tudományokban.



**KEVE GÁBOR** okleveles építőmérnök (Budapesti Műszaki Egyetem, 1998), 2018-ban szerzett PhD fokozatot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen műszaki tudományterületen, építőmérnöki tudományágból. 2014 óta főállású oktató, jelenleg a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Karán docens, hidrológia és hidraulika tárgyakat oktat. Főbb kutatási területe a hidrometria, azon belül a folyami jégmegfigyelés.

## Egydimenziós nempermanens számításához szükséges minimális folyóhossz közelítő meghatározása. 1. rész: A feladat és annak elméleti megoldási lehetősége

Rátky István

nyugalmazott egyetemi docens (*iratky@gmail.com*)

### Kivonat

A tanulmány egy azonos főcímmel megjelenő a feladatra közelítő megoldását adó cikk bevezetője. A szabadfelszínű, fokozatosan változó  $1D$  nempermanens vízmozgás számítása során az alsó határfeltétel pontatlansága folyásirányba felfelé terjedve, egyre hosszabb folyószakaszon hibás számítási értékeket eredményezhet. Hiba alatt a pontatlan – permanens vízhozam-vízszinttel megadott – alsó határfeltétel és a „pontos” – nempermanens vízhozam-vízszint – kapcsolattal adott alsó határfeltétel mellett számított vízszintek (vízmélységek) különbségét értjük. A „pontos” nempermanens vízhozam-vízszint kapcsolatot, hosszú folyószakaszon végzett  $1D$  nempermanens számítás, alulról nem befolyásolt szakaszról vettük. Prizmatikus mederben, több példán mutattuk be, hogy ez a hiba szélső esetben a vízmélység számításában akár 1,28 m-t is elérhet (2. ábra), és a maximális vízmélységekben a hiba több mint 0,5 m-t is meghaladhatja (4. ábra). A vízmélység számításában bekövetkező hiba, terjedési sebességének (hullámsebesség, perturbáció) elméleti meghatározása – a valós  $3D$  körülmények közelítése – egyszerűsített  $1D$  síkbeli matematikai modellekkel nem lehetséges. A kényszerű közelítéseken alapuló összefüggések (4., 5. és 9. egyenletek) még elméletileg is hibás eredményeket adnak (5. ábra).

### Kulcsszavak

Szabadfelszínű fokozatosan változó, egydimenziós, nempermanens vízmozgás, numerikus módszer, határfeltételek, hullámsebesség, hullámél sebesség, tetőpont sebesség.

## Approximate determination of the minimum river length required for one-dimensional unsteady flow calculation. Part 1: The problem and its theoretical possible solution

### Abstract

The study is an introduction to an article with the same headline that provides an approach to the problem. When calculating the free-surface, gradually varying  $1D$  non-permanent water flow, the inaccuracy of the lower boundary condition, spreading upwards in the flow direction, can result in erroneous values over longer and longer river sections. By error we mean the difference between the water levels (water depths) calculated under the inaccurate lower boundary condition given by a permanent discharge rating curve and the lower boundary condition given by the “exact” non-permanent discharge rating curve relationship. The “exact” non-permanent discharge rating curve was taken from the lower-unaaffected section of a  $1D$  unsteady flow calculation performed over a long river section. In a prismatic bed, we have shown in several examples that this error in the calculation of the water depth can reach up to 1.28 m in extreme case (Fig. 2), and at the maximum water depths the error can exceed more than 0.5 m (Fig. 4). The theoretical determination of the error in the calculation of water depth, the propagation velocity (wave velocity, perturbation) - the approximation of the real  $3D$  conditions - is not possible with simplified  $1D$  plane mathematical models. Correlations based on constrained approximations (Equations 4, 5, and 9) give erroneous results even in theory (Figure 5).

### Keywords

Free-surface gradual, one-dimensional, unsteady flow, numerical method, boundary conditions, flood-wave travel velocities.

### BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Azt gondolhatnánk, nem lehet már újdonságot mondani a vízfolyásokban, a szabadfelszínű vízmozgások egydimenziós ( $1D$ ) számításával kapcsolatban. Mindent tudunk, ami az előbbi jelzőkben megfogalmazott korlátozások mellett kialakuló (modellszerű) vízmozgás számításához szükséges. Számítalan robosztus, (néha még) jó dokumentációval ellátott szoftver-csomag érhető el ingyenesen az interneten. Mít lehet ezekhez még hozzátenni? Az biztos, hogy ezeket a szoftvereket sem kezelhetjük „fekete doboz”-ként. A matematikai formulák tökéletesen leírják azt, amit ígérnek, a fokozatosan változó, egydimenziós, ( $1D$ -s), szabadfelszínű, nempermanens vízmozgást. Ezek közelítő, általános numerikus megoldása, integrálása sem hoz be számottevő számítási hibát az eredményekbe, ha az adatoknak és mellékfeltételeknek megfelelő diszkretizációt alkalmazunk. A mai számítástechnikai lehetőségek birtokában a számítógép-memória és gépidő szükséglete sem jelenthet korlátokat. Egyedül az adekvát adatrendszer megadása

okozhat (és okoz is) problémát. Az alkalmazás során felmerülő nehézségek közül most csak egyre fókuszálunk. Arra keressük a választ, hogy *milyen hosszú folyószakaszt kell bevonnunk a számításba ahhoz, hogy az alsó határfeltétel elkerülhetetlenül pontatlan közelítése ne okozzon elfogadhatatlan számítási hibát?* Ha sikerül meghatározni az árhullám két jellegzetes pontjának, – az árhullám körömpontjának, hullámélnek (azonos,  $v_{el}$  vagy ellentétes,  $v_{eli}$ ) és a tetőpontjának (azonos,  $v_{tető}$ ) – a hossz menti előrehaladási sebességét, akkor a számítandó jelenségidő ismeretében a szükséges hossz meghatározható. (A sebességek elméleti és gyakorlati definícióit később adjuk meg.)

### ÁLTALÁBAN AZ ALSÓ HATÁRFELTÉTELÉRŐL ÉS ANNAK HIBÁJÁRÓL

A szabadfelszínű, fokozatosan változó  $1D$ -s nempermanens vízmozgást leíró pseudolineáris, parciális differenciál egyenletek hiperbolikus típusúak, tehát *egyértelműségi feltételként* a kezdeti feltételt jelentő  $Z(x, t_0)$  és  $Q(x, t_0)$  mellett még a teljes számítási időintervallumra meg

kell adni a „pontos” peremfeltételeket, pl.  $Z(x_{perem}, t)$  vagy  $Q(x_{perem}, t)$  függvényeket (vagy azok diszkrét alakját). Szigorú matematikai fogalmazásban így az egyenletek megoldása „csak” egy interpolálást jelent. A szükséges egyértelműségi feltételek megadásának megvannak a speciális nehézségei, gondoljunk csak pl. a kezdeti feltétel kvázi-permanens (esetleg enyhén nempermanens) jellegére, előrejelzésnél a felső határfeltétel megadására, vagy egy tervezési feladatnál a mértékadó állapot előírására. Ha meg tudtuk adni a felső határfeltételt – leggyakrabban  $Q(x_{felső}, t)$  formájában – az alsó határfeltétel megadása jelenti a legnagyobb problémát. A pontos alsó határfeltétel megadása a gyakorlatban lehetetlen (és ez nem csak előrejelzésnél van így). Pontosan azt a  $Z(x_{alsó}, t)$  vagy  $Q(x_{alsó}, t)$  függvényt kellene megadni, melyeket éppen keresünk, melyeket a legalsó kereszt-szelvény alatt lévő szelvények geometriai és hidraulikai jellemzői is befolyásolnak, (éppen az egyenletrendszer hiperbolikus jellegből következő ellentétes karakterisztika miatt). Ezért matematikai „trükkök” alkalmazására kényszerülünk, mint például alsó határfeltételként  $Q-H$  permanens vízhozamgörbét, normál mélységet vagy energiavonal esést megadni. Ezek nempermanens számításoknál pontatlanok, hiszen az állandónak feltételezett simasági együttható, geometria és fenékesés, vagy energiavonal-esés nem tartalmazza a hidraulikai jellemzők (áradásból-apadásból adódó) időbeni változását és a hosszmenti mederváltozás hidraulikai jellemzőkre gyakorolt hatását sem.

Ismert, hogy természetes vízfolyások esetében – még permanens határfeltételek mellett is – hosszú folyószakaszon csak kvázi-permanens állapot előfordulásáról beszélhetünk. Kvázi-permanens állapotban, a mederben geometriai nemprizmatikus hatására a hosszmentén eltérő hidraulikai paraméterek alakulnak ki (nedvesített felületek, közepsebességek stb.) Nempermanens számítások során a kvázi-permanens kezdeti feltétel jellemzői az árhullám érkezéséig az adott kereszt-szelvényben, időben állandó értékűek lennének, ha nem lenne hibás az alsó határfeltétel. A pontatlan alsó határfeltétel hibája folyásiránnyal ellentétesen felfelé terjed, – éppen a hiperbolikus típus, az ellentétes karakterisztika miatt – hibássá téve a felette lévő szelvények számított  $Z$  és  $Q$  értékeit. Tehát már az árhullám e szakaszra érkezése előtt itt hibás számított  $Z$  és  $Q$  értékek lesznek, és erre fut rá az árhullám. Majd – az árhullám tovább haladva – elérve az alsó határfeltételt ott is hibás értékkel „találkozik”, (az előző bekezdésben említett megadási nehézség miatt). Természetesen, ez összetett kölcsönhatásban kialakuló hiba is elkezd terjedni ellentétes (folyásiránnyal ellentétes) irányba, mind hosszabb folyó-szakaszon rontva el a számításokat. Általában az ellentétes irányba terjedés okozta hiba nagysága – az említett kvázi-permanensség és nemprizmatikus hatás növelő hatása mellett is – kisebb, mint közvetlenül az alsó határfeltétel hibája. (Ezt, e fejezet végén, egy konkrét példán is bemutatjuk.) Bármilyen perturbáció (zavaró hatás) terjedési sebességére (a vízfolyással azonos vagy ellentétes irányban,  $v_{el}$  azonos vagy  $v_{ell}$  ellentétes sebességre) és az ezek által okozott hiba nagyságára vonatkozóan zárt, egyszerű összefüggést nem ismerünk (de még komplikáltat sem). Tisztában kell lenni

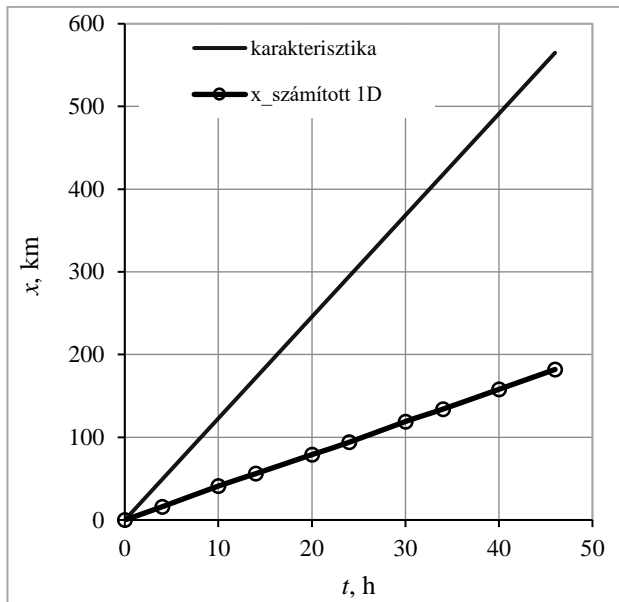
avval, hogy ezek az elkerülhetetlen hatások csökkentik az alulról befolyásoltságtól mentes folyószakasz hosszát (röviden növelik a számított vízszintek hibáját).

Jogos igény lenne legalább közelítő értéket adni közvetlenül az alsó határfeltételnél elkövetett vízszint hibára. Hiszen ennek nagysága – több más mellett – közvetlenül befolyásolja a felette lévő folyószakaszon bekövetkező hiba nagyságát és kiterjedését. Erre sajnos még „durva” becslést sem tudunk adni. A nempermanens hurokgörbe és a permanens  $Q-H$  görbe közötti időben változó maximális szint-különbséget kellene megbecsülni. Általában a permanens görbére van a gyakorlatban elfogatható becslés. De a nempermanens hurokgörbe olyan geometriai, hidraulikai paraméterektől függ, melyeket előre ( $ID$  nempermanens számítások nélkül) nem tudunk meghatározni. Utalunk itt az irodalmakra (Kozák 1958 és 1960, Rátky 2000) vagy az alábbiakban ismertetett (9) összefüggésre,  $Q_{np}$  függ: a  $Q_{pr}$  mellett a fenékeséstől, a kiegészítő fenékeséstől, az áradás-apadás hevesességétől, a hullámterjedés sebességétől stb. Nem kevés munkával a felső határfeltételi szelvényben elő lehetne állítani a hurokgörbét, de ennek transzformálását az alsó határszelvényhez csak  $ID$  nempermanens számítással adhatnánk meg, amihez természetesen az alsó határfeltétel megadása szükséges. És itt bezárult a kör.

Eddig többször említettük a hibát, pontosan nem definiálva azt. Reméljük, hogy a szöveggörnyezet alapján egyértelmű volt és később is az lesz, hogy mit értünk alatta, mely két érték összehasonlításáról van szó. Ebben a tanulmányban mindig két vízszint vagy vízmélység ( $dZ$  vagy  $dH$ ) különbséget értünk alatta. Általánosságban egy pontosabb, a valóságot jobban közelítő és egy pontatlanabb – több közelítést megengedő – feltételezés alapján, mindig  $ID$  nempermanens modellekből számított szintek különbségeként értelmezzük a hibát. Tehát az összehasonlítás alapja sohasem a tényleges, természetben előforduló árhullám levonulása során, – csak mérési hibával terhelt – mért, észlelt érték, vagy az elméletileg „helyes” érték lesz.

A karakterisztikák definíciójából következik, hogy a hullám élének a hullámfelszínen való terjedése egy karakterisztikának nevezett vonal mentén történik (Kozák 1977). Elméleti alapon levezetett azonos vagy ellentétes irányba terjedő változások, az azonos vagy ellentétes karakterisztika hajlása, még szabályos prizmatikus medrek esetén sem ad elfogatható pontosságú eredményt a gyakorlatban észlelt vagy mérhető változásokra (pl. vízmélység emelkedésre, vagy hullámél megjelenésére). Ezt szemléltetjük az 1. ábrán, ahol egy prizmatikus mederben, az  $(x-t)$  hullámfelszínen, az elmélet által meghatározott azonos irányú alap-karakterisztikát (hajlása  $w = \Delta x / \Delta t = v + (h \cdot g)^{1/2}$ ) és az  $ID$  nempermanens egyenletek alapján számított, a hullámél által befutott utat adtuk meg. Látható, hogy a karakterisztika hajlásából számított hullámél-hely, az idő előrehaladtával – a kezdetben talán elfogadható eltérés mellett – e példánál már 2 nap alatt 400 km hibát eredményezne. (Itt a hibát nem a vízszintkülönbségek, hanem a két módszer közötti befutott utak különbségeként értelmeztük.)





1. ábra. Prizmatikus mederben levonuló árhullám élének előre haladása

Figure 1. Propagation of the edge of a flood wave in a prismatic bed

Egy konkrét példán mutatjuk be, hogy a vízmélység számításában mekkora hibát követhetünk el az alsó határfeltétel pontatlansága (közelítő jellege) miatt. Az alábbi jellemzőkkel definiált összetett keresztmetszvényű szabályos, prizmatikus test-folyón végeztünk számításokat. A főmeder: szélessége a fenéken 40 m, a partélnél 80 m, mélysége 5 m, simasága (simasági együtthatója)  $37 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; a hullámtér szélessége  $2 \cdot 260 \text{ m}$ , maximális mélysége 5 m, simasága  $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; fenék esése (a főmedernél és a hullámtéren is)  $3 \text{ cm}/\text{km}$ . A peremfeltételek minden számításnál azonosak voltak. Felső határfeltétel 2 nap alatt  $Q_{\min,pr} = 96 \text{ m}^3/\text{s}$ -ról  $Q_{\max,pr} = 1541 \text{ m}^3/\text{s}$ -ra felfutó vízhozam, majd az apadási periódus 5 nap alatt  $Q_{\max,pr}$ -ről  $Q_{\min,pr}$ -re változik, ezután – hosszan, 24 napon keresztül – állandó maradt a vízhozam. A  $Q(t)$  alakját koszinusz függvénnyel adtuk meg (Kozák 1977, Rátky 2000). Mivel a későbbi ID számításokhoz is ilyen felső határfeltételeket alkalmaztunk itt meg adjuk a  $Q(t)$  számítás általános formáját:

ha  $T < T_{Q\text{árad}}$

$$Q = Q_{\min} [T_{\cos} - (T_{\cos} - 1) \cos(\pi * T / T_{Q\text{árad}})],$$

ha  $T > T_{Q\text{árad}}$  és  $T < (T_{Q\text{apad}} + T_{Q\text{árad}})$

$$Q = Q_{\min} \left[ T_{\cos} - (T_{\cos} - 1) \cos \left( \pi * (T_{Q\text{árad}} + T_{\text{plus}}) / (2 * T_{Q\text{árad}} + T_{\text{plus}}) \right) \right],$$

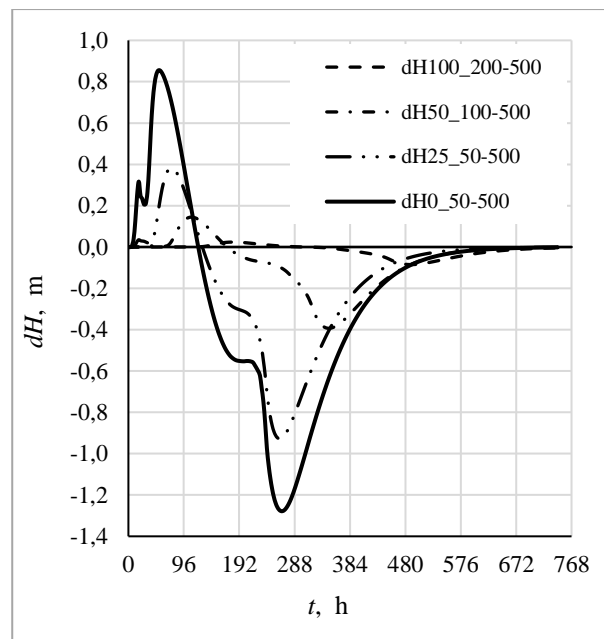
ha  $T > (T_{Q\text{apad}} + T_{Q\text{árad}})$ , akkor  $Q = Q_{\min}$ ,

ahol  $Q_{\min}$  – alap-vízhozam (a kezdeti feltétel permanens hozama), amire az árhullám ráfut,  $T_{Q\text{árad}}$  – a vízhozam áradási időtartama,  $T_{Q\text{apad}}$  – a vízhozam apadási időtartama,  $T_{\cos} = (Q_{\max} Q_{\min} + I) / 2$  és  $T_{\text{plus}} = (T_{Q\text{apad}} - 2 * T_{Q\text{árad}})$ .

Alsó határfeltétel a fenékeséshez tartozó normál mélység volt – ami most megegyezett a permanens  $Q$ - $H$  görbé-

vel. Kezdeti feltétel mostani teszt-példánk mindegyik változatnál  $96 \text{ m}^3/\text{s}$ -hoz tartozó permanens egyenletes állapot volt. A prizmatikus medrű folyóhosszak 500, 400, 300, 225, 200 és 100 km-esek voltak.

A számítások eredményei azt mutatták, hogy az 500 km-es folyóhossz esetén 0 km-nél megadott alsó határfeltétel hibája (pontatlansága) biztosan nem befolyásolja a 300. km-nél számított vízszintet és vízhozamot (31 napos jelenség idő esetén). Tehát kijelenthetjük, hogy az adott geometriájú és peremfeltételű 500 km hosszú folyó felső 200 km-e az alsó-határfeltételből adódó hibától mentes. Az alábbiakban erre az eredményre „500 km-es számítások” jelzővel hivatkozunk. Ha megegyező geometriájú, de 100 km hosszú folyón végezzük el a számítást („100 km-es számítások”: felső határfeltétel 100 km-nél, az alsó határfeltétel 0 km-nél) és összehasonlítjuk a felső (határfeltéti) szelvény alatti 50. km-es szelvényre kapott  $H$ , vízmélység értékeket az 500 km-es számítások eredményeivel (pontosabban a 450. km-es szelvényének  $H(t)$  értékeivel), akkor a két számítás között a maximális eltérés – 39,3 cm.

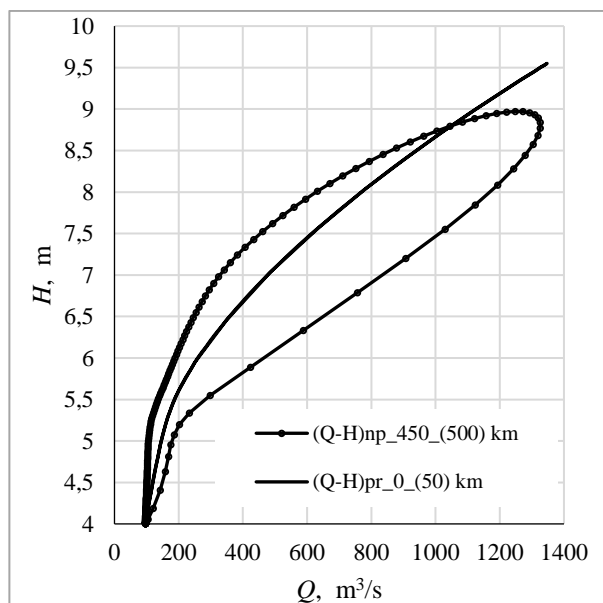


2. ábra. Az 500 km-es és a rövidebb folyóhosszaknál számított vízmélységek különbsége

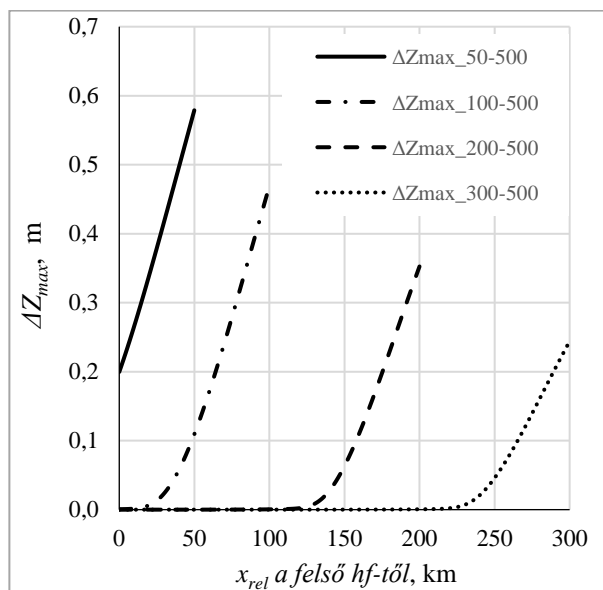
Figure 2. Difference between water depths of 500 km and shorter river lengths

Ezt mutatja a 2. ábrán a  $dH_{50\_100-500}$  jelű görbe (pontosított vonal), ahol 50 utal arra, hogy a felső határfeltéti szelvény alatt az 50. km-t vizsgáljuk, 100-500 pedig azt jelzi, hogy 100 és 500 km-es számítások megfelelő (50 ill. 450 km-es szelvények) vízmélységeinek különbségét képeztük. Hasonlóan számítottuk a  $dH_{100\_200-500}$  és  $dH_{25\_50-500}$  valamint a  $dH_{0\_50-500}$  jelű görbék értékeit. Látható, hogy ha csak 50 km-es folyóhosszt vonunk be a számításba és 31 napos jelenséget vizsgálunk, akkor 0 km-nél adott permanens  $Q$ - $H$  görbe okozta maximális hiba a 25. km-nél 0,93 m, (a teljes vízszint emelkedés közel 20%-a, óriási!) Természetesen az nem valószínű, hogy valaki egy 50 km-es folyószakaszon – permanens  $Q$ - $H$  görbével megadott alsó határfeltétel esetén – egy 31 napos jelensé-

get akarna számítani. Az ilyen mértékű hiba oka könnyen belátható, ha számszerűsítjük közvetlenül az alsó határfeltételben elkövetett hibát.



3. ábra. A felső szelvénytől azonos távolságra lévő permanens  $Q$ - $H$  görbe és nempermanens hurokgörbe  
Figure 3. Permanent  $Q$ - $H$  curve and non-permanent looping curve at equal distance from upper profile



4. ábra. Az 500 km-es és a rövidebb folyóhosszaknál számított maximális vízszintek különbsége  
Figure 4. Difference between maximum water levels at 500 km and shorter river lengths

A 3. ábrán az 50 km-es számításnál 0 km-nél megadott permanens  $Q$ - $H$  görbét és az 500 km-es számításnál a 450. km-nél számított hurokgörbét mutatjuk be. Látható, hogy a „jó” (hurokgörbés) nempermanens alsó határfeltételi  $H$  és  $Q$  helyett az áradó ágon szélsőértékben 0,86 m-el magasabb, majd az apadó ágon szélső esetben 1,28 m-el alacsonyabb vízmélységet ad a permanens  $Q$ - $H$  görbe, és vízhozamban is  $+80 \text{ m}^3/\text{s}$  és  $-128 \text{ m}^3/\text{s}$  a maximális eltérés a „jó” (alulról befolyásolatlan) határfeltételtől. A  $dH$  hiba időbeni változását a 2. ábra  $dH_{0\_50-500}$ -jelű görbéje mu-

tatja (zöld szaggatott vonal). Szerencsére a 2. ábrán megadott görbéknek a szélső értékei, a legnagyobb eltérések az adott szelvényben általában nem a legnagyobb vízszintnél vannak. Az 4. ábrán az 50, 100, 200 és 300 km-es számításoknál kapott maximális vízszintek és az 500 km-es számításnál kapott maximális vízszintek különbségeit szemléltetjük, (pl.  $\Delta Z_{\max\_100-500} = Z_{\max}(x)_{100} - Z_{\max}(x)_{500}$ ,  $\Delta Z_{\max\_200-500} = Z_{\max}(x)_{200} - Z_{\max}(x)_{500}$  stb.). Látható – a  $\Delta Z_{\max\_100-500}$  jelű görbén (pontozott vonal) –, hogy míg pl. 100 km-es számításnál 50. km-nél a maximális vízszintben keletkező hiba  $\sim 11,9 \text{ cm}$  (4. ábra), addig e szelvény aktuális szintjeiben a 348. órában keletkezik a legnagyobb vízszint eltérés, 39,3 cm (2. ábra, pontozott vonal).

### LEVONULÁSI SEBESSÉGEK ANALITIKUS MEGHATÁROZÁSI LEHETŐSÉGE

A címbeli analitikusság alatt szabatos, elméleti (hullámelméleti) módszert értünk. Most „csak” az  $1D$  nempermanens vízmozgás számításához, a megfelelő folyóhossz meghatározásához szeretnénk megbecsülni az ár hullám levonulási sebességeket. Nem célunk áttekinteni a sebességeket szabatos elméleti alapon tárgyaló irodalmakat. Itt csak azt szeretnénk bemutatni, hogy milyen nehézségekkel néz szembe az, aki tisztán elméleti alapon vizsgálódik.

A múlt század közepén Kozák Miklós egy tanulmányában áttekintette (az addig) a témához kapcsolódó hazai és nemzetközi irodalmat (Kozák 1958). Tudomásunk szerint ennél részletesebb, elméleti alapot is ismertető, átfogó tanulmány e területen azóta sem született. Tágabban és gyakorlati oldalát tekintve, hazánkban az ár hullám levonulási sebességével sokan foglalkoztak, a teljesség igénye nélkül néhányat említve: Kovács 1955, Szigyártó 1966, 1978 és 1985, Vágás 1981 és 1982, Rátky 2000. Ez utóbbiból idézve „A hullámsebesség megfelelő értelmezése és számítása a hurokgörbékkel kapcsolatban rendkívül fontos.” A vízhozam görbék, a hurokgörbék viszont a vízügyi gyakorlatban fontosak. Ezért van nagy átfedés a két terület elemző tanulmányok között. Ezért utalhatunk a vízhozam görbékkel, hurokgörbével foglalkozó hazai tanulmányok irodalomjegyzékére is az irodalmak áttekintésekor (Kozák 1960, Vágás 1984a és 1984b, Szigyártó 1984, Rátky-Kozák 1999, Rátky 2000).

Kozák Miklós tanulmányára alapozva (Kozák 1958) röviden, a részletek, a levezetések mellőzésével áttekintjük a különböző levonulási sebességeket. Az itt mellőzött levezetések mindig prizmatikus medrekben, legtöbbször végtelen széles meder kiragadott egységnyi szélességére vonatkoztak. (Az alábbiakban az eredeti tanulmányban alkalmazott jelöléseket alkalmazzuk.)

Az adott értékű vízmélységhez tartozó levonulási sebességet ( $w_h$ ) az ár hullám felszínét leíró  $h=h(x,t)$  felület  $h_i$  konstans nívóvonalának  $\partial x/\partial t$  érintője adja meg (az ár hullám ellapulásától eltekintve):

$$\frac{\partial x}{\partial t} = w_h = -\frac{\frac{\partial h}{\partial t}}{\frac{\partial h}{\partial x}} = -\frac{h'_t}{h'_x} \quad (1)$$

A folytonossági egyenlet felhasználásával levezethető:

$$w_h = \frac{1}{B} \frac{Q'_x}{h'_x} \quad (2)$$

Felhasználva a  $Q_{np}=f(h)$  függvény deriváltját, kapjuk

$$w_h = \frac{1}{B} \frac{dQ_{np}}{dh} \quad (3)$$

A (2) egyenletből, feltételezve az egyszerűsített folytonossági egyenlet érvényességét,  $Q_{np} \approx Q_{pr} = A v = B h v(h)$  deriválásával egy újabb összefüggést kapunk

$$w_h = v + h \frac{dv}{dh}, \quad (4)$$

majd a sebességre a középsebesség Chèzy összefüggésének Manning-Strickler-féle közelítését alkalmazva, ( $v_k = k h^{2/3} S^{1/2}$ ), és csak a  $h$ -t tekintve független változónak, így deriválva kapjuk az ismert

$$w_h \approx \frac{5}{3} v_k \quad (5)$$

közelítő kapcsolatot a  $h$  vízmélységhez tartozó levonulási sebességre.

Az árhullám tetőpontjának haladási sebességénél meg kell különböztetni két féle értelmezést. Vizsgálhatjuk az árhullám felszínét leíró  $h=h(x,t)$  felület kiválasztott  $x_i$  helyei  $\partial h/\partial t = 0$ -nál lévő maximális vízmélységeit. A különböző  $x_i$  helyek e pontjait összekötő görbe  $\partial x/\partial t$  érintője adja a helyi tetőzésekhez tartozó levonulási sebességet

$$w_{ht} = \frac{\frac{\partial^2 h}{\partial t^2}}{\frac{\partial^2 h}{\partial x \partial t}} \quad (6)$$

Gyakorlatiasabb megfogalmazásban, ez a  $h=f(t)$  árhullámkép legmagasabb  $h_{max}$  pontjának levonulási sebessége. A folytonossági egyenlet felhasználásával ez a

$$w_{ht} = \frac{B h''_t}{Q''_{x^2}} \quad (7)$$

alakra rendezhető. Tehát „A  $w_{ht}$  sebesség annak a távolságnak a mértéke, mely két olyan helyet választ el, ahol a maximális vízállások időegységnyi különbséggel keletkeznek” (Kozák 1958).

Az árhullám tetőpont haladási sebességének egy másik értelmezése a pillanatnyi hossz-szelvényen lévő  $h_{max}$  levonulási sebességére,  $w_{hx}$ -re vonatkozik. Ezt analitikusan meghatározó összefüggések formailag hasonlóak a (6) és (7)-ben adottakhoz. A  $w_{ht}$  és  $w_{hx}$  sebességek számértékben nem sokban különböznek egymástól, a gyakorlatban  $w_{ht}$  szokták hullámsebességnek nevezni, (talán az árhullámképen a könnyebb értelmezhetősége miatt.) Ha további feltételezéseket is megengednek, akkor a hullám tetőpontjának sebességére Kleitz (in Kozák 1958) jó közelítésnek tartja a

$$w_{hx} \approx \frac{1}{B} \frac{dQ_{pr}}{dh} \quad w_{hx} \approx \frac{5}{3} v_k \quad (8)$$

(3) és (5)-höz hasonló összefüggéseket.

Nem meglepő, a – fenti feltételezések mellett – levezetett „pontos” összefüggéseket a gyakorlatban nem alkalmazzák. A parciális differenciálhányadosok számítása azoknak a függvényeknek (akár diszkrét értékeinek) az ismeretét tételezi fel, melyek legtöbbször ismeretlenek, éppen ezek számításához kívánjuk meghatározni a sebessé-

geket. Nem beszélve a differenciálhányadosok diszkrét értékekből való számításának, a differenciálhányadosok képzésének nehézségéről és pontatlanságáról. Az egyszerű (4), (5) és (8) összefüggések pedig olyan feltételezések, közelítések mellett születtek, melyek elfogadhatatlan hibát eredményeznek. Ennek bizonyítására alkalmazhatjuk az adott értékű vízmélységhez tartozó levonulási sebesség (4) és (5) összefüggéseit az 1. ábra szerkesztéséhez felvett geometriájú medernél, hiszen a hullámél mindig a kezdeti  $h_0$  vízmélységgel vonul le:

$$\begin{aligned} w_h &= v + h_0 \frac{dv}{dh_0} = v + h_0 \left( \frac{2}{3} k_{str} \sqrt{s_0} h_0^{-1/3} \right) \\ &= 0,28 + 1 * \left( \frac{2}{3} 40 \sqrt{0,00005} * 1^{-1/3} \right) = 0,469 \frac{m}{s} \\ &= 1,69 \frac{km}{h} \end{aligned}$$

és természetesen  $w_h = 5/3 v_k = 5/3 0,28 = 0,467$  m/s = 1,68 km/h.

Az 1. ábránál az azonos irányú alap-karakterisztika hajlása ( $w = \Delta x / \Delta t = v + (h \cdot g)^{1/2}$ ) 12,28 km/h, míg a részletes 1D nempermanens számítás alapján meghatározott hullámél sebesség 3,96 km/h. Látható, hogy a fent röviden idézett elméleti összefüggések alá becsülik, a karakterisztika vonal pedig nagyon felül becsüli az 1D nempermanens számítás alapján „jó”-nak mondható értéket.

Az ismertett definíció szerint az adott értékű vízmélységhez tartozó levonulási sebességet nem csak a hullámélre, hanem – az ellapulástól eltekintve – a  $h_{max}$ -ra is lehetne értelmezni. Az (1) egyenlet  $\partial h/\partial x = 0$  esetén  $w_{hr}$  végtelent ad, ami fizikailag lehetetlen. Pontosítani kell az ott írottakat: az (1)-(3) összefüggések a tetőpont és annak környezetében nem érvényesek. És bár a (4) és (5) összefüggésekből számszerű értéket kaphatunk a levonulási sebességre, de mivel ezeket – a tetőpontkörnyékén érvénytelen – (1)-ből származtattuk ezért is pontatlanok az így számított értékek.

Egy korábban megjelent tanulmányunk (Rátky 2000) kiegészítéseként, megadtuk egy teszt példa eredménye alapján, a számított helyi tetőzések levonulási sebességének alakulását. Szorosan mostani témánkhoz tartozó megállapítása miatt – a részletek mellőzésével – megismételjük az ott bemutatott összefoglaló ábrát. Az 5. ábra a honlapomon, a hurokgörbével foglalkozó tanulmány kiegészítésében jelent meg, („Hurokgörbével kapcsolatos megjegyzéseim. Miért nem lehet egyszerű analitikus összefüggéssel hullámlevonulási sebességet számítani?” címen, <https://iratky.wixsite.com/ratky>). Az árhullám  $h(t)$ ,  $Q_{pr}(t)$ ,  $Q_{pr}(t)$ ,  $v(t)$ ,  $h_x(t)$  és  $h_t(t)$  jelleggörbéi mellett a számított  $v_{tető}(t)$  levonulási sebességeket is ábrázoltuk. A 2000. évben még színes vonalak alkalmazása nélkül nehezen áttekinthető ábrát csak azért adtuk meg színesen, hogy a jelleggörbék szélső értékeinek egymáshoz viszonyított helyzetét mutassuk be. E miatt születtek a koordináta tengely szokatlan léptéke is. (Meg kell jegyezni, hogy e színes vonalakkal készített ábra értelmezése sem könnyű, de – azt, amit ki akartunk hangsúlyozni –, a szélső értékek egymáshoz viszonyított helyzetét, azt jól mutatja.) A levonulási sebességet három féle módon közelítettük:  $w_{hx}$ -el (kék-

szerű pontokkal) jelöltük az (1) egyenletnek megfelelő  $w_{ix} = h'_i/h'_x$ -ből,  $w_Q$ -val (piros pontokkal) a  $Q_{np} = Q_{pr}(1+h'_x/S_0)^{1/2}$ -ből és  $w_{(9)}$ -el (zöld pontokkal) jelöltük a (2000. évi) tanulmányunkban az 1D nempermanens dinamikai egyenletből a legkevesebb közelítéssel levezetett, nempermanens hurokgörbe egyenletéből számított

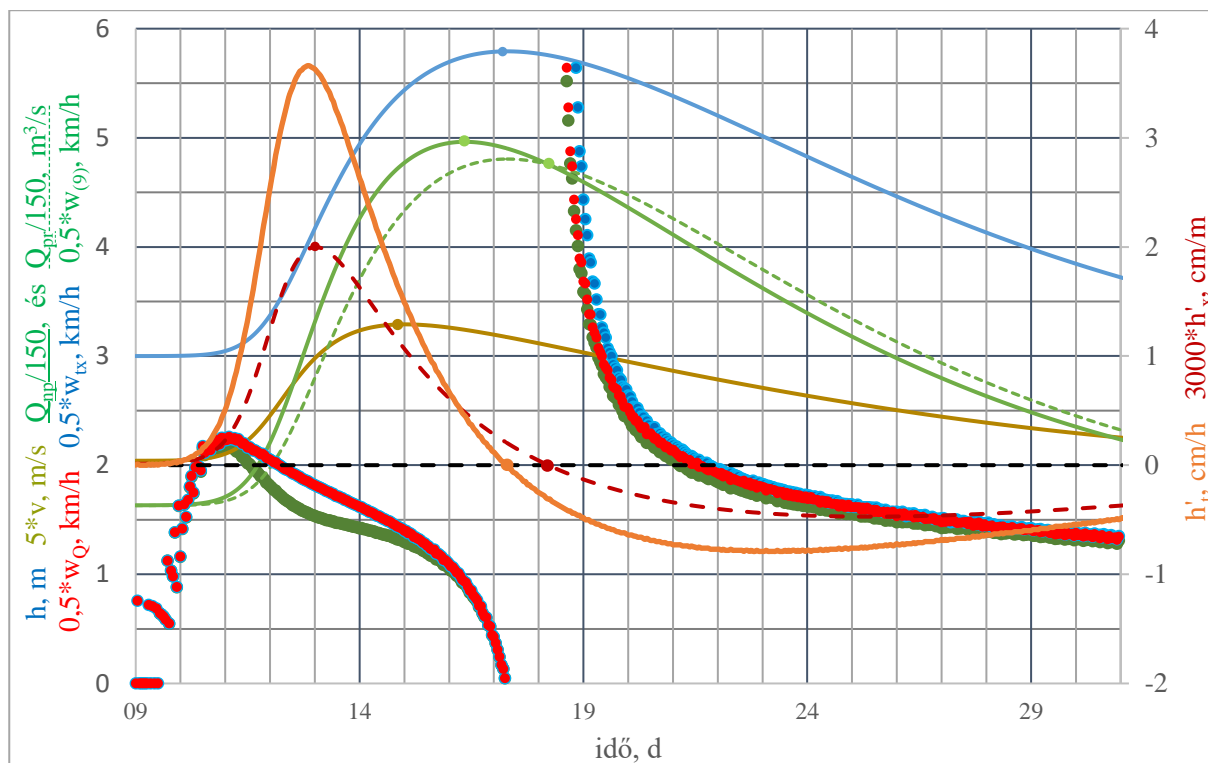
$$Q_{np} = Q_{pr} \sqrt{1 + \frac{1}{w_0 \sqrt{S_0}} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{Q_{pr}}{2Bw_0 S_0} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}} \quad (9)$$

összefüggésből meghatározott levonulási sebességet. Az eddig még nem értelmezett jelölések:  $w_0 = dQ_{pr}/dh$  – a permanens vízhozam görbe érintőjének reciprokával arányos, sebesség jellegű mennyiség,  $S_0 = S_0 dZ/dx$  – a vízfelszín és a fenékvonal relatív esésének szorzata.

Mind a három közelítésnél  $h'_x = 0$ -nál (sötétvörös vonal) a függvénynek szakadása van. Az eredményekkel egy gyakorlati példán keresztül is bizonyítottuk, hogy a tetőpont levonulási sebessége nem számítható egyszerű analitikus módon, legalábbis az itt megadott módon  $h$ ,  $h'_x$ ,  $h'_i$ ,  $Q_{pr}$ ,  $w_0$ ,  $S_0$ ,  $S_s$  paraméter-kombinációkkal nem.

„Összegezve: a változó sebességeloszlás miatt a jelenleg térbeli áramlási probléma, melyet síkbeliként megoldani, tehát a hullámsebességet a közepességből számolni ...nem lehet.” (Kozák 1958). Tehát az 1D, a síkbeli feltételezés okozza a legnagyobb hibát és nem csak a nemprizmatikus (vagy más általában figyelembe nem vett hatás). Tudjuk, hogy már egy prizmatikus (hossz mentén nem változó) szabályos alakú keresztmetszvényben a pontbeli közepes sebességek keresztmetszvénybeli eloszlását kifejező sebesség diszperziós tényező mindig nagyobb, mint 1,0 (Ven Te Chow 1959). Természetes medrekben a sebességeloszlás egyenletlenségét kifejező tényező legalább 1,10-1,15, de előfordulhat – partmentén örvényes, limányos – keresztmetszvényeknél 1,35-1,65 érték is (Starosolszky 1970).

Ezért nem kaphattunk mi sem szabályos, prizmatikus medrek felvétele mellett sem elfogadható eredményt a közelítő képletekből. Pedig a hivatkozott számításoknál „Egyszerű” (nem összetett) medrű keresztmetszvény esetén semmilyen zavaró körülmény: hullámter „lefáragási” hatás, mellékág hozzáfolyás, talajvíz hozzáfolyás-elszivárgás, duzzasztás-leszivás, alulról befolyásoltság nincs hatással az eredményekre.



5. ábra. Egy árhullám lényegesebb hidraulikai jellemzőinek időbeli változása egy választott szelvényben  
Figure 5. The temporal change of the most important hydraulic characteristics of a flood wave in a selected section

A Tisza polgári és taksonyi szelvény geometriai adatainak ismeretében meghatározott elméleti számítások és a vízmérce adatokból számított tényleges tetőponti hullámsebesség összehasonlítása alapján Kozák Miklós megállapította, „nem találtunk olyan paramétert, amelynek bevezetésével a sebességek szóródó pontjai rendeződnének (bár végleges következtetést levonni csak azután lesz célszerű, ha az adatfeldolgozás rajzolómércek segítségével történik)” (Kozák 1958). E cikk folytatásaként megjelenő „A feladat közelítő gyakorlati megoldása” alcímű tanulmányunkban látni fogjuk, hogy található olyan paraméter kombináció (legalábbis prizmatikus medrek esetén), mely

a számított sebességpontok szóródását lényegesen lecsökkenti.

Gyakorlatilag csak az 1D teljes alapegyenlet-pár megoldása adhatja meg az elfogadható pontosságú  $v_{ei}$  és  $v_{elt}$  értékeket. De a számítás, ha pontatlan az alsó határfeltétel az ebből adódó hibát is tartalmazó visszafelé terjedés és a fentről érkező vízvintváltozás együttes hatását adja meg, amiből nehéz leválasztani csak az alsó határfeltételi hiba okozta változásokat. Mi sem vállalkoztunk arra, hogy a visszafelé terjedő hiba nagyságára vagy a terjedési sebességre pontos (analitikus) számítási összefüggést adjunk.

Mivel a mostani célunk teljesítéséhez nélkülözhetetlen a  $v_{el}$  és  $v_{ell}$  ismerete, ezért széles geometriai és hidraulikai intervallumot átölelő (65 db)  $ID$  nempermanens számítás eredményei alapján *statisztikai alapú, nagyságrendi becslést fogunk adni a sebességekre, melyek segítségével a befolyásolatlan folyóhossz megbecsülhető.*

### A HULLÁMÉL ÉS A TETŐPONT LEVONULÁSI SEBESSÉGÉNEK GYAKORLATI DEFINIÁLÁSA

*Hullámélnak* (körömpontnak, vagy röviden *élnak*) nevezük az árhullám felszínét leíró  $h = h(x-t)$  hullám-felület hossz-metszetén ( $t = konst$  metszetén) azt a pontot, ahol a vízmélység a kezdeti feltételnek megadott mélységet meghaladja. A numerikus kezelhetőség érdekében mi az 1 cm-es meghaladási értéket fogadtuk el. A hossz-metszet  $t$  időpontja és a hullámél hossz-szelvénybeli  $x$  helye egyértelműen azonosítja a hullámél helyzetét ( $x_{el}$ ,  $t_{el}$ ). Az  $x_{el}$  a vízfolyás azon pontjának felső határfeltételi szelvényétől való távolságát adja meg, mely alá  $t_{el}$  időpontig még nem ért el az árhullám áradó ágának vízszint növelő hatása.

Összetett (hullámteres) kereszt-szelvényenél – már  $ID$  esetén is – külön kellene meghatározni a főmederre és külön a hullámterre a hullámél helyzetét, ami már az általunk alkalmazott szabályos kereszt-szelvények esetén is nehézkes. A *HEC-RAS ID* nempermanens programcsomag (*HEC-RAS 2016*) adottságait felhasználva mi a vízmélység helyett a teljes kereszt-szelvényre számított kezdeti hidraulikus közép-mélységet 1 cm-el meghaladó hely időbeni előrehaladását határozzuk meg, ezt nevezzük *hullámél sebességnek* és  $v_{el}$ -el jelöltük.

Ismert, hogy egy függvényben a gravitációs hullámterjedés elméleti sebessége a vízmélységtől függ ( $v = (g \cdot h)^{1/2}$ ). A főmederben és a hullámteren egyszerre áramló víz esetén a  $h_{fm}$ -ből számított  $v_{el, fm}$  sebesség, a főmeder fölött gyorsabban terjed, mint a hullámter feletti részen a  $v_{el, ht}$ , így a főmederi  $x_{el, fm}$  adná a kritikus távolságot. Ez nem ilyen egyértelmű, mert a kisebb terjedési sebességű hullámterei víztest – a két mederrész közötti nyírófeszültség eredményeként – fékezi a főmederi hullám előrehaladását. E tanulmányban alkalmazott szabályos prizmatikus mederalak esetén meg lehet határozni a főmeder és a hullámter (legnagyobb) mélységét, de természetes medreknél ez minden függvényben más lehet. Ezért választottuk a mederalak jellemzésére (szokásosan) a hidraulikus közép-mélységet, az egyszerű és az összetett szelvényenél a könnyebb számíthatóság miatt is, a teljes szelvényalakra vonatkozó hidraulikus közép-mélységet. Néhány próbaszámítással ellenőriztük, hogy a vízmélység helyett a hidraulikus közép-mélység alkalmazása elhanyagolható hibát eredményezett a hullámél haladási sebességének számításában (más, főleg a hosszú szakaszon feltételezett prizmatikussághoz képest).

Az árhullám tetőpontjának levonulási sebessége ( $v_{tető}$ ), valamely szelvényben előálló legnagyobb vízállás haladási sebessége, pontosabban: „annak a távolságnak a mértéke, amely két olyan helyet választ el, ahol a maximális vízállások időegységenyi különbséggel keletkeznek” (Kozák 1977, melyet a gyakorlatban röviden csak *hullámsebességnek* neveznek). Felhasználva a *HEC-DSS* modul

adta lehetőséget, az árhullám tetőpontjának levonulási sebességét az adatgyűjtéséből („LOCATION-ELEV//MAX STAGE”, *HEC-RAS 2016*) határoztuk meg.

### ÖSSZEFOGLALÁS

Először ismertettük, hogy  $ID$  nempermanens hidraulikai számításokhoz matematikailag miért szükséges határfeltételeket megadni és a gyakorlatban miért csak pontatlan alsó határfeltételt tudunk megadni. A szabadfelszínű, fokozatosan változó  $ID$  nempermanens vízmozgást leíró alapegyenletek megoldásuk során – a hiperbolikus jellegéből következően – a pontatlanságok folyásirányba felfelé terjedve, a számítási idő előrehaladtával, egyre hosszabb folyószakaszon hibás számításokat eredményeznek. Prizmatikus mederben, egy konkrét példán mutattuk be (*1. ábra*), hogy mekkora hibát eredményezne, ha a hullámél előrehaladását az azonos karakterisztika hajlásából határoznánk meg. Konkrét példákön mutattuk be, hogy ha a szükségesnél rövidebb folyószakaszt (esetünkben 500 km-nél rövidebb) vonunk be a számításba, a pontatlan alsó határfeltétel mekkora hibát eredményez a vízmélység számításában (*2. ábra*). Egy példán láthattuk (*3. ábra*), hogy 50 km-es folyóhossz esetén a „jó” nempermanens alsó határfeltételi  $H$  és  $Q$  helyett az áradó ágon szélsőértékben 0,86 m-el magasabb, az apadó ágon szélső esetben 1,28 m-el alacsonyabb vízszintet ad a permanens  $Q-H$  görbével adott alsó határfeltétellel történő számítás. Szerencsére egy adott szelvényben az időben változó eltérések legnagyobbja  $(\Delta Z_i)_{max}$  nem a legnagyobb  $Z_{max}$  vízszintnél van  $(\Delta Z_i)_{max} \neq (\Delta Z_{max})_i$  (*2. és 4. ábra*).

Ez követően az árhullám levonulási sebességek analitikus meghatározási lehetőségét tekintettük át. A levonulási sebességek elméletileg szabatos definiálása majd, – bizonyos egyszerűsítések mellett – a levezetett „pontos” összefüggéseket a gyakorlatban nem alkalmazzák. Ennek oka nem csak a parciális differenciálhányadosok meghatározásának nehézsége miatt van így, elméletileg hibás a kiindulási alap: a *hullám-jelenség térbeli áramlási probléma*, – a főáramlás irányra merőleges térben is változó a sebességeloszlás – ezt *síkbeliként megoldani*, a hullámsebességet a középsebességből számítani *nem lehet*. Egy konkrét számpéldán keresztül mutatjuk be, hogy mekkora különbségek vannak – a használhatóságig leegyszerűsített – különböző, explicit algebrai összefüggésekkel számítható  $w_h$ , hullámél sebességek között. Ugyan itt, egy 4000 km prizmatikus medrű tesztpélda eredménye alapján, a számított helyi tetőzések levonulási sebességének alakulását mutatja az *5. ábra*, bemutatva, hogy a tetőpont levonulási sebessége nem számítható egyszerű analitikus módon, legalábbis az itt megadott módon  $h$ ,  $h'_x$ ,  $h'_b$ ,  $Q_{pr}$ ,  $w_0$ ,  $S_0$ ,  $S_s$  paraméter-kombinációkkal nem.

Végül – e tanulmány folytatásaként megjelenő „A feladat közelítő gyakorlati megoldása” alcímű cikkünkben számítandó – a hullámél és a tetőpont levonulási sebességeket definiáltuk, és a numerikus számítás eredményeiből könnyen meghatározható gyakorlati értelmezésüket adtuk meg.

Miután bizonyítottuk, hogy *nem tudunk* (nem lehet) *a gyakorlatban alkalmazható, elméletileg megalapozott,*

*explicit algebrai összefüggést előállítani, a levonulási sebességeket és azokból a címben kitűzött célt, 1D szabadfelszínű, fokozatosan változó nempermanens vízmozgás alapegyenleteinek megoldása után kapott eredmények felhasználásával határozzuk majd meg. Ezt azonos főcímmel, „A feladat közelítő gyakorlati megoldása” alcímmel megjelenő tanulmányunkban mutatjuk be.*

## IRODALOMJEGYZÉK

*HEC-RAS (2016). River Analysis System User's Manual <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>*

*Kovács Gy. (1955). Az árhullámok levonulására jellemző hidrológiai mennyiségek meghatározása. Hidrológiai Közlöny, 35. évf. 11-12. szám. pp. 394-423.*

*Kozák M. (1958). Árhullámok levonulásának néhány hidraulikai kérdése. Építési és Közlekedési Műszaki Egyetem Tudományos Közleményei, IV. kötet 5. sz. Budapest, pp. 61-108.*

*Kozák M. (1960). Árhullámok kiegészítő felszíni esésének meghatározásáról. Építési és Közlekedési Műszaki Egyetem Tudományos Közleményei, VI. kötet 3. sz. Budapest, pp. 123-134.*

*Kozák M. (1977). A szabadfelszínű nempermanens vízmozgások számítása digitális számítógép felhasználásával. Akadémiai Kiadó, Budapest.*

*Rátky I. (2019). Hurokgörbével kapcsolatos megjegyzéseim. <https://iratky.wixsite.com/ratky>*

*Rátky I. (2000). Árvízi hurokgörbék közelítő számítása. Vízügyi Közlemények, LXXXII. évf. 2000. 2. füzet, pp. 232-261.*

*Rátky I., Kozák M. (1999). Határfeltételek közelítése árhullámok számításánál. Hidrológiai Közlöny, 79. évf. 4. szám. pp. 193-196.*

*Starosolszky Ö. (1970). Vízépítési hidraulika. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.*

*Szigyártó Z. (1966). Árhullámlevonulási kísérletek az átvonulási elmélet igazolására. Építés- és Közlekedés-tudományi Közlemények, 1966. 4. sz.*

*Szigyártó, Z. (1978). A lökeshullám ellapulásának leírása az átvonulási-elmélet alapján. Hidrológiai Közlöny, 58. évf. 1. szám. pp. 1-6.*

*Szigyártó Z. (1984) A nempermanens viszonyok közötti vízhozam meghatározásának elméleti alapjai. Hidrológiai Közlöny, 64. évf. 3. szám. pp. 148-153.*

*Szigyártó Z. (1985). Gyakorlati módszerek a nempermanens viszonyok közötti vízhozam meghatározására 1. Vízhozam meghatározás a vízállás változás intenzitása alapján. Hidrológiai Közlöny, 65. évf. 3. szám. pp.158-163.*

*Vágás I. (1981). A vízszín természetes duzzasztásának és süllyesztésének meghatározó szerepe a Tisza és alföldi mellékfolyóinak vízjárásában. Hidrológiai Közlöny, 61. évf. 9. szám. pp. 419-430.*

*Vágás I. (1982). A Tisza árvizei. VIZDOK, Budapest.*

*Vágás I. (1984a). Folyók vízhozamának és vízállásának kapcsolatai. Hidrológiai Közlöny, 64. évf. 3. szám. pp.152-157.*

*Vágás I. (1984b). Az árvízi hurokgörbe. Hidrológiai Közlöny, 64. évf. 6. szám. pp. 333-341.*

*Ven Te Chow (1959). Open-channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.*

## A SZERZŐ



**RÁTKY ISTVÁN** Okleveles mezőgazdasági gépészmérnök, okleveles építőmérnök, "IHE,Delft", NUFFIC ösztöndíjjal 10 hónapot töltött Delft, The International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, "Experimental and computational hydraulics" posztgraduális képzésen. PhD fokozatot 1998-ban szerzett. 1970-től a BME oktatója 2009-ig, egyetemi docensként nyugdíjba vonulásáig. Nyugdíjazása után vendégelőadóként a Szent István Egyetem Mezőgazdaság Tudományi Karán, az Eötvös József Főiskola Műszaki Fakultás Szakmérnök képzésében, valamint az ELTE Természettudományi Karán hidrológus szakirányú továbbképzésben előadóként vett részt. 1974-től a Magyar Hidrológiai Társaság (MHT) tagja. Társasági kitüntetései: Pro Aqua- emlékérem (2001), Schafarzik Ferenc-emlékérem (2016), négy alkalommal részesült Vitális Sándor szakirodalmi nívódíjban. Hidrológiai Közlöny szerkesztőbizottsági tag. 2000-tól az MHT Hidraulikai és Műszaki Hidrológiai Szakosztályának elnöke. Kutatási területe: árvízmentesítés, árvízvédelem, folyó és tószabályozás, sík- és dombvidéki vízrendezés, belvízvédelem.

## A magyarországi és németországi kommunális szennyvíztisztító telepek energiahatékonyságának összehasonlítása

Tamás János<sup>1</sup>, Harald Schönberger<sup>2</sup>, Carsten Meyer<sup>2</sup>, Peter Baumann<sup>3</sup>, Werner Maier<sup>4</sup>, Ányos József<sup>5</sup>, Szabó Istvánné<sup>6</sup>, Bakondi Patrik<sup>7</sup>, Murányiné Krempels Gabriella<sup>8</sup>, Magyar Tamás<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Debreceni Egyetem, Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet, 4032 Debrecen, Böszörményi út 138. e-mail: [tamas@agr.unideb.hu](mailto:tamas@agr.unideb.hu)

<sup>2</sup> ISWA, Universität Stuttgart, Bandtåle 2, 70569 Stuttgart-Büsnau.

<sup>3</sup> HFT Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart.

<sup>4</sup> iat-Ingenieurberatung GmbH, Friolzheimer Str. 3A, 70499 Stuttgart.

<sup>5</sup> Debreceni Vízmű ZRt., 4025 Debrecen, Hatvan u. 12-14.

<sup>6</sup> Nyírségvíz ZRt., 4401 Nyíregyháza, Tó u. 5.

<sup>7</sup> Tiszamenti Regionális Vízművek ZRt., 5000 Szolnok, Kossuth Lajos út 5.

<sup>8</sup> Belügyminisztérium, 1051 Budapest, József Attila utca 2-4.

### Kivonat

A tanulmány célja, hogy átfogó képet adjon a magyarországi kommunális szennyvíztisztító telepek jelenlegi energetikai helyzetéről, ehhez kapcsolódóan pedig javaslatokat fogalmazzon meg az energiatakarékossági- és termelési potenciálok feltárásához. Az energetikai ellenőrzésből számított mutatókat összehasonlítottuk a németországi (Baden-Württemberg tartomány) szennyvíztisztító telepek referencia-értékeivel, amely során a telepek teljesítményét statisztikailag (alul- illetve felül-teljesítési gyakoriság) is értékeltük. A vizsgált magyarországi szennyvíztisztító telepek fajlagos villamosenergia-fogyasztásán belül meghatároztuk, hogy milyen arányt képvisel a biológiai fokozatnál alkalmazott levegőztetés energia-szükséglete, továbbá a biogáztermelés jellemző paramétereit figyelembe véve számításokat végeztünk a telepek elektromos önellátási arányainak megállapításához.

### Kulcsszavak

Szennyvíztisztító telep, energiahatékonyság, biogáz, összehasonlítás.

## Comparison of energy efficiency of municipal wastewater treatment plants in Hungary and Germany

### Abstract

In this paper, the current energy status of the investigated Hungarian wastewater treatment plants (Debrecen, Nyíregyháza and Karcag) are presented. The aim of the research is to provide proposals for a possible energy optimization in the future. The indicators calculated from the energy audit were compared with reference values of the wastewater treatment plants in Germany (Baden-Württemberg State) and statistically evaluated to a database including German wastewater treatment plants. The ratio of energy demand required for aeration in the biological stage was assessed within the specific electricity consumption for three Hungarian wastewater treatment plants. The electric self-supplying ratio was also determined taking into account the major parameters of biogas production.

### Keywords

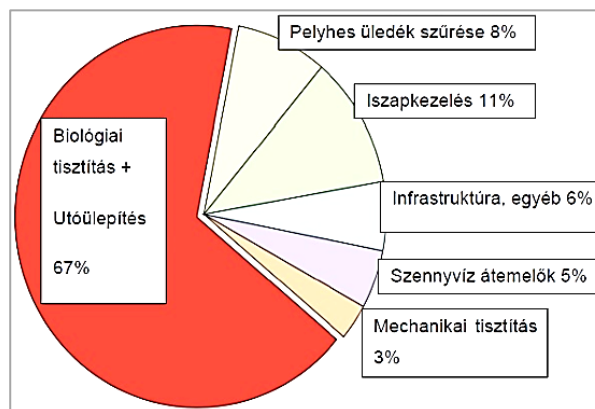
wastewater treatment plant, energy efficiency, biogas, comparison

### BEVEZETÉS

A németországi önkormányzati szektort tekintve általában a szennyvíztisztító telepek a legnagyobb energiafelhasználók. Az országban több mint 10 000 kommunális szennyvíztisztító telep található, amelyek átlagosan az összes kommunális létesítmény villamosenergia-fogyasztásának csaknem 20%-át teszik ki. Ennek megfelelően a szennyvíztisztító telepeken magas az energiamegtakarítás lehetősége is, amely az utóbbi 5 évben került a leginkább a német kutatások fókuszpontjába (DWA 2015).

Az 1. ábra mutatja a németországi kommunális szennyvíztisztító telepek tipikus tisztítási eljárásainak energiaigényeit, a teljes villamosenergia-szükségletre vonatkoztatva. Általánosságban kijelenthető, hogy a technológiai lépéseket tekintve a levegőztetés jár a legnagyobb energiaigénnyel egy szennyvíztisztító telepen. Az anaerob iszapstabilizálással rendelkező telepeken – ahol a technológiában a szennyvíziszap-rothasztás és biogáztermelés is megtalálható – a levegőztetés áramszükséglete átlagosan a teljes energiafogyasztás 50%-át teszi ki. A kisebb kapacitású, és hasonló

elven működő telepeken a levegőztetés a szennyvíztisztító telep teljes áramszükségletének a 60-80%-át is elérheti (Umweltbundesamt 2009).



1. ábra. Egy németországi kommunális szennyvíztisztító tipikus villamosenergia-szükségletének arányai (Umweltbundesamt 2009)  
Figure 1. Energy demand ratios of typical wastewater treatment plants in Germany (Umweltbundesamt 2009)

A szennyvíztisztító telepek energetikai optimalizálásával (átemelő, keverő, levegőztetés stb.) szignifikánsan lehetne csökkenteni az energiafogyasztást anélkül, hogy a tisztítási teljesítményben veszteségekkel kellene számolni. Az energetikai optimalizálás gyakran már igen csekély befektetéssel is megvalósítható.

Az anaerob iszapstabilizációval működő szennyvíztisztító telepeken a szennyvíziszap szervesanyag tartalmának lebontásával energiahordozóként funkcionáló biogáz termelhető, amit például fűtőberendezésekben hasznosítható energiaformává lehet alakítani. A képződő biogáz segítségével a tisztító telepeken időszakosan, illetve részlegesen energia- vagy fűtési önállóság biztosítható. Az úgynevezett energia-autarkia, azaz a külső energiaszállítótól történő komplett függetlenség azonban nem reális cél. Alapelvként rögzíthető, hogy a szennyvíztisztító telepről elfolyó víz minősége az energetikai megtakarítási indokokra vezethetően nem romolhat.

Németországban a relatíve magas népsűrűségnek köszönhetően a lakosság 98%-a központi szennyvízelvezető hálózatokra és szennyvíztisztító telepekhez kötött. Magyarország a 109 LE/km<sup>2</sup>-es értékkel fele olyan sűrűn lakottnak számít szennyvíztisztítás szempontjából, mint Németország (227 LE/km<sup>2</sup>). A magyarországi helyzetet tekintve elmondható, hogy a 100 000 LE feletti 9 városban lakik a lakosság 30%-a, és Pest megye a legnépesebb közigazgatási egység. A 2015-ös adatok alapján Magyarországon a lakosság 79,1%-a kötött rá közüzemi szennyvízelvezető hálózatra (*Ligetvári és társai 2015*). Az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA) 2009-es adatai 635 szennyvíztisztító telepet tüntetnek fel Magyarországon.

A jövőbeni fejlesztéseket tekintve célszerű lenne a ritkán lakott települések decentralizált létesítmények segítségével való ellátása (*Tamás és Fehér 2009*). Az új építésű szennyvíztisztító telepek létesítésére is készültek már különböző koncepciók. Míg Németországban a tervezést szokásosan különválasztják az építéskivitelezéstől, Magyarországon inkább konzorciális projektek vannak, amelyeket közgazdasági és műszaki szempontok alapján ítélnek oda egy-egy vállalkozónak. Az üzemgazdasági és energetikai szempontok ezidáig inkább elhanyagolható jelentőséggel bírtak.

A tanulmány célja, hogy átfogó képet adjon a magyarországi kommunális szennyvíztisztító telepek jelenlegi energetikai helyzetéről, ehhez kapcsolódóan pedig javaslatokat fogalmazzon meg az energiatakarékossági- és termelési potenciálok feltárásához, amelyeket a németországi (Baden-Württemberg tartomány) szennyvíztisztító telepekkel történő összehasonlítás útján elemzünk ki a tartományban 2017-ben bevezetett energetikai önellenőrzési eljárás alkalmazásával, a projektben együttműködő három szennyvíztisztító telep esetében.

## ANYAG ÉS MÓDSZER

### Az adatok gyűjtésének és kiértékelésének módszertana

A vizsgálat keretén belül három szennyvíztisztító telepet választottunk ki (Debrecen, Nyíregyháza és Karcag) statisztikai megfontolások alapján, az összes magyarországi szennyvíztisztító telepet figyelembe véve, majd ezek adatait gyűjtöttük össze és értékeltük ki. Ehhez egy speciális kérdőívet állítottunk össze az alapadatok összegyűjtése céljából, amelyet a szennyvíztisztító telepek üzemeltetőinek adtunk át. Rendelkezésünkre álltak továbbá a szennyvíztisztító telepek üzemnaplói a 2015-ös, 2016-os, valamint a 2017-es évekről. Az így kapott információk és adatok alapján egy energetikai ellenőrzést készítettünk a három szennyvíztisztító telep számára. Végezetül az energetikai ellenőrzésből kapott mutatókat összehasonlítottuk a németországi szennyvíztisztító telepek referenciaértékeivel.

Az energetikai ellenőrzés alapján meg lehet becsülni az energiafogyasztást, az energiatermelést és bizonyos esetben a tisztítótelep energetikai optimalizációjának lehetőségéről is képet kaphatunk. A kiértékelés során a kapott értékeket rendszereztük más, hasonló technológiával működő és méretű (pl. osztott anaerob iszapstabilizációjú) telepek mutatóinak (referenciaadatainak) megfelelő adatbázisába, ezáltal meg tudtuk állapítani az egyes szennyvíztisztító telepek relatív energetikai helyzetét. Például, megállapítható egy bizonyos tisztítótelep mutatójának túllépési vagy alulteljesítési gyakorisága, illetve annak a teljes sokaság mediánjától való eltérése is. Döntő fontosságú a kapott értékek és referenciaadatok statisztikai sokaságának minősége, továbbá a peremfeltételek megállapítása. Általában az energetikai ellenőrzés megfigyelési időtartama egy évet vesz igénybe, amelyet évente meg kellene ismételni. A rendszeres időközönként elvégzett felülvizsgálatok alapján a telep energetikai változására lehet következtetni. Az ellenőrzések esetén mindig figyelembe kell venni a szennyvíztisztító telep sajátosságait vagy kényszerű peremfeltételeit, amelyek például a terep topográfiájából vagy a nagy távolságokon átemelt szennyvíz mennyiségéből és beérkező minőségéből adódnak.

A szakirodalom az elmúlt években számos mutatót vezetett be a szennyvíztisztító telepek energiahatékonyságának nyomon követésére és értékelésére. A mutatók az egész telep lakosegyenértékre (LE) vetített fajlagos villamosenergia-fogyasztásán-, valamint az egyes részterületek összehasonlításán alapulnak kWh/(LE, év) értékben kifejezve. A módszerrel így a lakosegyenértékre vetített fajlagos villamosenergia-fogyasztás a ténylegesen csatlakoztatott lakosegyenértékhez viszonyítva adja meg a villamosenergia-fogyasztást. Figyelembe kell venni, hogy a mutatók egy közelítőleg összehasonlítható szintet adnak meg, azonban az értékek levezetése különbözőképpen is történhet, mint például statisztikai elemzésekből, egy modell-tisztítótelep eljárástechnikai számításaiból vagy akár az úgynevezett legjobb elérhető gyakorlat (BAT) elvéből is (DWA, 2015). Az energetikai ellenőrzés végrehajtásához felhasznált energiatechnológiai mutatókat és azok meghatározásának módjait az 1. táblázatban foglaltuk össze.



1. táblázat. Az energetikai ellenőrzés végrehajtásának főbb mutatói (DWA 2015).

Table 1. Major indicators for the implementation of energy audit (DWA 2015).

	Egység	A meghatározás képlete	Megnevezés
<b>Tisztítótelep</b>			
$e_{ges}$	kWh/(LE, év)	$e_{ges} = E_{ges} / LE_{KOI}$	Fajlagos villamosenergia-fogyasztás
$e_{Bel}$	kWh/(LE, év)	$e_{Bel} = E_{Bel} / LE_{KOI}$	Levegőztetés fajlagos villamosenergia-fogyasztása
<b>Tisztítótelepek rothasztóval</b>			
$e_{FG}$	l/(LE, d)	$e_{FG} = Q_{FG,daM} / LE_{KOI}$	Fajlagos biogáz-termelés a lakosegyenértékre vonatkoztatva
$N_{FG}$ vagy $N_2$	%	$N_{FG} = (E_{KWK} \cdot 100) / (Q_{FG,a} \cdot g_{CH_4} \cdot 10)$	Biogáz villamosenergiává történő átalakításának aránya
$EV_{el}$ vagy $V_e$	%	$EV_{el} = (E_{KWK} / E_{ges}) \cdot 100$	Önellátás aránya elektromossággal

### A vizsgált szennyvíztisztító telepek jellemzése

A debreceni szennyvíztisztító telep vízgyűjtő területe magába foglalja Debrecen városát, illetve további 4 települést a környéken. A telepet először az 1960-as években helyezték üzembe és az 1980-as években egy biológiai fokozattal bővítették, amelyet 2001-ben és 2012-ben az új kibocsájtási határértékek miatt tovább fejlesztettek. A telepen már 1988-ban megvalósult az anaerob iszapstabilizációs kezelés. A tisztítóműben villamos- és hőenergiát állítanak elő, amelyet annak környezetében hasznosítanak. A telepre be- és elfolyó átlagos szennyvíz koncentrációk a következők (2. táblázat).

2. táblázat. A debreceni szennyvíztisztító telep átlagos be- és elfolyó koncentrációi

Table 2. The average influent and effluent concentrations of the wastewater treatment plant in Debrecen

Paraméter	Befolyó értékek	Elfolyó értékek	Megjegyzések
KOI	800 mg/l	<60 mg/l	
Összes N	95 mg/l		
NH <sub>4</sub> -N		<0,01 mg/l	
NO <sub>3</sub> -N	Csekély	<20 mg/l, <10 mg/l nyáron	Határérték: 10 mg/l Összes N
Összes lebegő anyag		<20 mg/l	
Foszfor	14 mg/l	<0,5 mg/l	Határérték: 1,0 mg/l Összes P

A telep terhelése az üzemi adatok szerint gyakran az üzem kapacitásának 50%-án mozog (300 000 LE), nyáron az élelmiszerfeldolgozó üzemek hatása miatt szignifikánsan megnő a terhelés (akár az üzemi kapacitás 100%-ig). A napi- és az éves vízfogyasztás értéke 45 000 m<sup>3</sup>/d (nyár) és 13 000 000 m<sup>3</sup>/év, a tisztítótelepre érkező mennyiség átlagosan 35 000-40 000 m<sup>3</sup>/d közötti.

A nyíregyházi szennyvíztisztító telepet 1966-ban helyezték üzembe és 1999-2001 között átfogóan, egy teljesen új biológiai szennyvíztisztító teleppé alakították át anaerob iszapstabilizációval. A telep kapacitása a megadott érték szerint 133 000 LE, a maximális átfolyás 17 000 m<sup>3</sup>/d. A kihasználtság a kapott adatok alapján kb. 80 000 LE, amelyből az ipari részarány (kb. 20 000 LE). Az átlagos, a telepre be- és elfolyó szennyvíz paramétereit a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. A nyíregyházi szennyvíztisztító telep átlagos be- és elfolyó koncentrációi

Table 3. The average influent and effluent concentrations of the wastewater treatment plant in Nyíregyháza

Paraméter	Befolyó értékek	Elfolyó értékek	Megjegyzések
KOI	900 mg/l	34-36 mg/l	Határérték: 120 mg/l (üzemeltetői adat)
BOI <sub>5</sub>	480 mg/l	<10 mg/l	Határérték: 25 mg/l
Összes N	-	10-12 mg/l	Határérték: 25 mg/l
NH <sub>4</sub> -N	70	<0,01 mg/l	Határérték: 10 mg/l
NO <sub>3</sub> -N	Csekély	8 <20 mg/l / <10 mg/l nyáron	-
Összes lebegő anyag	-	-	Határérték: 35 mg/l
Foszfor	16-20 mg/l	0-1 mg/l	Határérték: 10 mg/l (üzemeltetői adat)

A karcagi szennyvíztisztító telepet 2011-ben újították fel, a maximális befolyás így kb. 3 000 m<sup>3</sup>/d-ről 4 000 m<sup>3</sup>/d-re emelkedett. A telep kapacitása 26 600 LE, amelyből kb. 20 000 LE van átlagosan kihasználva. Az utóbbi évek villamosenergia-fogyasztása az átemelő szivattyú nélkül 959 146 kWh/év volt. A befolyó koncentrációk értékét kb. 10 évvel ezelőtt vették fel és ezek ma is igen hasonlóan alakulnak (4. táblázat).

4. táblázat. A karcagi szennyvíztisztító telep átlagos be- és elfolyó (határérték) koncentrációi

Table 4. The average influent and effluent (limit) concentrations of the wastewater treatment plant in Karcag

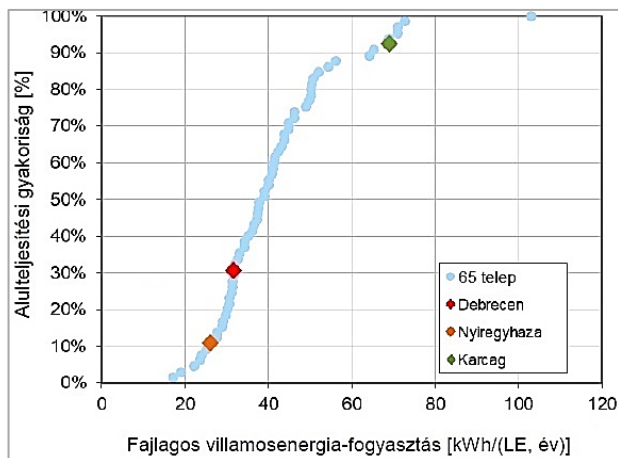
Paraméter	Befolyó értékek	Megjegyzések
KOI	800 mg/l	Elfolyó határérték: 75 mg/l
BOI <sub>5</sub>	400 mg/l	Elfolyó határérték: 25 mg/l
Összes N	70 mg/l	Elfolyó határérték: 25 mg/l
NH <sub>4</sub> -N	66 mg/l	Elfolyó határérték: 5 mg/l
Összes lebegő anyag	400 mg/l	Elfolyó határérték: 5 mg/l
Összes P	15 mg/l	Elfolyó határérték: 5 mg/l

## AZ ENERGETIKAI ÖSSZEHASONLÍTÁS EREDMÉNYEI

### Fajlagos villamosenergia-fogyasztás ( $e_{ges}$ )

A 2. ábra a vizsgált magyar szennyvíztisztító telepek fajlagos villamosenergia-fogyasztását ábrázolja a németországi telepek fajlagos villamosenergia-fogyasztásának függvényében. A tisztítótelepek összességének fajlagos villamosenergia-fogyasztása közötti nagy eltérés a különböző tisztítási technológiákra és eljárási módokra, valamint a lokális peremfeltételekre vezethető vissza. A helyzet alapvetően függ a tisztítótelep méretétől is, amennyiben a fajlagos villamosenergia-fogyasztás csökken a növekvő méretek függvényében. A magyarországi debreceni- és nyíregyházi szennyvíztisztító telepek referencia diagramba sorolásakor felismerhető, hogy ezen telepek fajlagos villamosenergia-fogyasztása 32 kWh/(LE, év), valamint 26 kWh/(LE, év) értékekkel a németországi energetikai elemzés adatsorának tükrében relatíve alacsony. A debreceni szennyvíztisztító telepnél jobban teljesítő németországi telepek aránya 30%, a nyíregyházi szennyvíztisztító telepnél pedig 10%. Ez tulajdonképpen azt jelenti, hogy a vizsgálatba bevont németországi szennyvíztisztító

telepek csupán 30%-ánál, valamint 10%-ánál mutatható ki alacsonyabb fajlagos villamosenergia-szükséglet, mint a debreceni vagy nyíregyházi szennyvíztisztító telep esetében.



2. ábra. A vizsgált magyarországi szennyvíztisztító telepek teljes villamosenergia-fogyasztásának összehasonlítása a németországi adatbázissal

Figure 2. Comparison of specific electricity consumption of the investigated Hungarian and German wastewater treatment plants

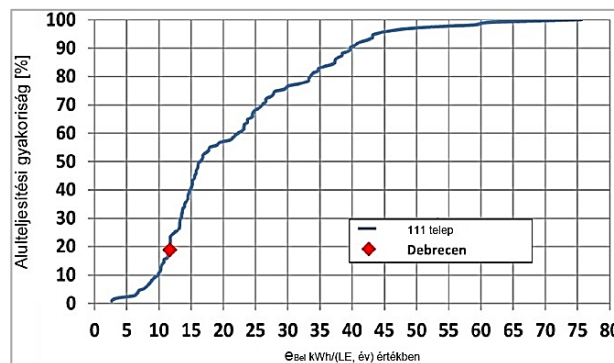
A karcagi szennyvíztisztító telep összehasonlítása a németországi telepekkel csak korlátozottan lehetséges, mivel a karcagi telep esetében egy membránszűrős technológiával működő telepről van szó. A karcagi telep esetében jól látszik a 69 kWh/(LE, év) értékű, a többi tisztítótelephez képest magas fajlagos villamosenergia-fogyasztás, amelyhez így 91%-os aluteltelési gyakoriság társul.

### Fajlagos villamosenergia-fogyasztás a levegőztetésnél ( $e_{Bel}$ )

A szennyvíztisztító telepek energia-hatékonyására vonatkozó útmutató szerint átlagosan a teljes villamosenergia-fogyasztás 53%-a szükséges a biológiai fokozatnál. Amennyiben az átemelőket, továbbá a szivattyúzást, valamint a szeparációs berendezéseket is beleszámítjuk, akkor a biológiai fokozatnál szükséges villamosenergia-fogyasztás aránya kb. 67%-ra emelkedik. A biológiai fokozat legnagyobb egyéni fogyasztója ebben az esetben 69%-kal a levegőztető rendszer (Steinmetz és társai 2015).

A levegőztetés fajlagos villamosenergia-fogyasztásának kapott mutatói információt szolgáltatnak ahhoz, hogy a levegőztető fűvókák teljesítménye csökken-e (folyamatos felülvizsgálat esetében), illetve ennek megfelelően szükséges-e azoknak a tisztítása vagy felújítása.

A levegőztetés fajlagos villamosenergia-fogyasztását a hiányzó adatok miatt csak a debreceni szennyvíztisztító telep esetében tudtuk megvizsgálni, amelynek értéke nagyjából 12 kWh/(LE, év). A németországi adatok tükrében ez a villamosenergia-fogyasztás inkább alacsonynak tűnik, amelyhez kapcsolódóan a referenciaként használt 111 német szennyvíztisztító telep csupán 19%-a mutat még ennél is alacsonyabb értéket (3. ábra).

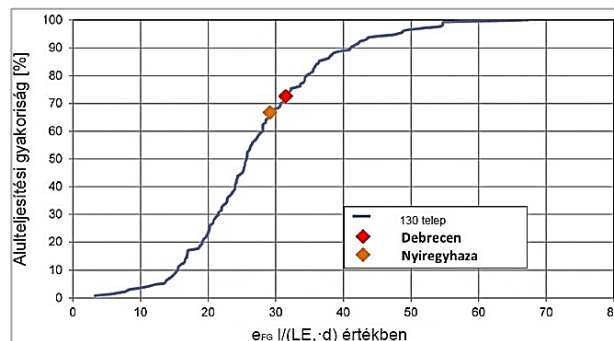


3. ábra. A debreceni szennyvíztisztító telep levegőztetésre felhasznált fajlagos villamosenergia-fogyasztásának összehasonlítása a németországi adatbázissal

Figure 3. Comparison of specific electricity consumption used for biological aeration of the Debrecen and German wastewater treatment plants

### Fajlagos biogáztermelés ( $e_{FG}$ )

Az anaerob iszapstabilizációs technológiát használó tisztítótelepek biogáztermelését a lakosegyenértékre vetített fajlagos biogáztermelés ( $e_{FG}$ ) segítségével írjuk le. Az így számított érték a debreceni tisztítótelep esetében 32,4 l/(LE, d), a nyíregyházi telep esetében pedig 29,9 l/(LE, d), amelyek a 130 németországi tisztítótelepet magába foglaló adatbázis értékeihez képest meglehetősen magasak. A debreceni tisztítótelep esetében az aluteltetés gyakorisága kb. 72%, a nyíregyházi tisztítótelep esetében pedig nagyjából 68%-ra adódott (4. ábra).



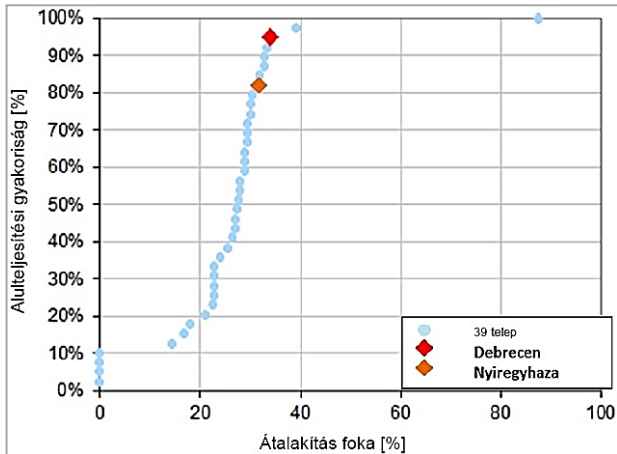
4. ábra. A vizsgált magyarországi szennyvíztisztító telepek fajlagos biogáz-termelésének összehasonlítása a németországi adatbázissal

Figure 4. Comparison of specific biogas production of the investigated Hungarian and German wastewater treatment plants

### A biogáz villamos-energiává történő átalakításának aránya ( $N_2$ )

Ideális esetben az összes előállított biogáz villamosenergia-termelésre hasznosítják. A valóságban azonban ennek felhasználása sokszor behatárolt a nem egyenletes gázképződés miatt, amihez gyakran társul az alacsony gáztároló kapacitás is. A biogáz villamos-energiává történő átalakításának aránya tehát megadja, hogy mekkora a biogázban található energiamennyiség, amelyet egy kapcsolt erőmű elektromossággá képes alakítani (DWA 2015). Hatékonyan működő rendszert, továbbá megfelelő metántartalmat feltételezve a biogázban ez az érték rendszerint 30% feletti.

A vizsgált szennyvíztisztító telepek hiányzó adatai miatt csak a debreceni telepen tudtuk a biogáz villamos-energiává történő átalakításának arányát megállapítani, amelynek értéke 34%-ra adódott 95%-os alutteljesítési gyakorisággal. Amennyiben a nyíregyházi telep esetében a biogáz metántartalmát 60%-ra becsüljük, akkor a biogáz-hasznosítás arányára 32%-os értéket kapnánk, megközelítőleg 81%-os alutteljesítési gyakorisággal (5. ábra).



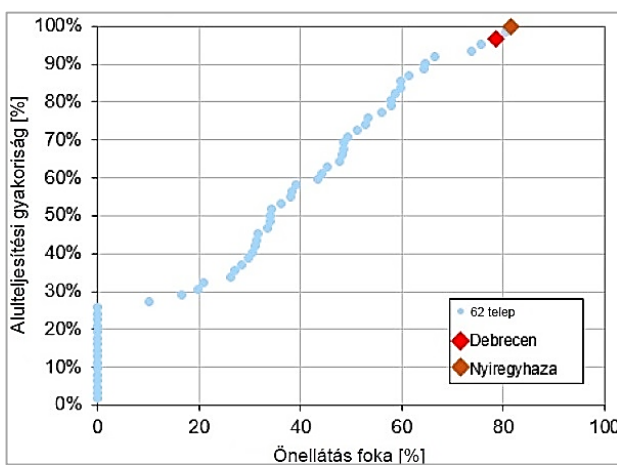
5. ábra. A vizsgált magyarországi szennyvíztisztító telepek biogáz villamos-energiává történő átalakításának aránya ( $N_2$ ) összehasonlítva a németországi adatbázissal

Figure 5. Comparison of biogas-to-energy ratio ( $N_2$ ) of the investigated Hungarian and German wastewater treatment plants

#### Az elektromos önellátás aránya ( $V_e$ )

Az elektromos önellátás fokát az éves villamosenergia-termelés és a teljes villamosenergia-fogyasztás hányadosából kapjuk meg. A cél az energia-szükséglet messzemenő lefedése a rendelkezésre álló biogáz mennyiségének maximális kihasználásával. A debreceni tisztítótelep önellátásának aránya elektromosság tekintetében 78,6%, az alutteljesítési gyakoriság értéke pedig 97%.

A nyíregyházi tisztítótelep önellátásának aránya elektromosság tekintetében 81%, amelyhez 98% alutteljesítési gyakoriság társul a németországi telepeket figyelembe véve (6. ábra).



6. ábra. A vizsgált magyarországi szennyvíztisztító telepek elektromos önellátásának aránya összehasonlítva a németországi adatbázissal

Figure 6. Comparison of self-supplying ratio of the investigated Hungarian and German wastewater treatment plants

#### KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A magyarországi és a németországi szennyvíztisztító telepek energetikai összehasonlítása alapján az alábbi következtetéseket vontuk le:

- A kiválasztott három magyar szennyvíztisztító telep adatainak kiértékelése jól mutatja, hogy a debreceni- és a nyíregyházi szennyvíztisztító telep viszonylag csekély fajlagos villamosenergia-fogyasztással bír.
- A debreceni szennyvíztisztító telep csekély teljes villamosenergia-fogyasztásának egyik fontos aspektusa, hogy alacsony a fajlagos villamosenergia-fogyasztás a levegőztetésnél, ami általában a teljes villamosenergia-fogyasztás jelentős részét képezi.
- A levegőztető alacsony villamosenergia-fogyasztásának egyik lehetséges oka a relatív magas szennyvíz-hőmérséklet Magyarországon (Debrecenben az éves középérték kb. 20°C, a legalacsonyabb hőmérséklet kb. 12°C), amely hatására a németországgal szemben itt rövidebb az iszapkor.
- A karcagi membránszűrős technológiával működő telepet érthető módon nem lehet beilleszteni az összehasonlításba, hiszen a fajlagos villamosenergia-fogyasztás a membránszűrős technológia miatt sokkal magasabb. Általában a membrános bioreaktoros telepek teljes energiaszükséglete kétszer, de szélsőséges esetben akár négyszer akkora is lehet, mint a hagyományos telepek esetében.
- A fajlagos biogáz-termelésre vonatkozóan a debreceni és a nyíregyházi tisztítótelepek is nagyon jók az értékei. A nyíregyházi telepen ez bizonyosan arra vezethető vissza, hogy itt nagy mennyiségben kezelnek idegen iszapot is.
- A debreceni és a nyíregyházi telep esetében is előnyös értéket mutat a biogáz villamos-energiává történő átalakításának aránya, amelynek értéke mindkét esetben magasabb, mint 30%. Így mindkét telep közel 80%-os önellátási fokról számolhat be.

Az energetikai ellenőrzés során kapott következtetések alapján tehát kijelenthetjük, hogy nem várható jelentős energetikai optimalizáció, amelyet egy energetikai vizsgálat mutathatna ki, éppen ezért a részletes energetikai vizsgálat megvalósítása a debreceni és nyíregyházi telepeken nem javasolt. Karcag esetében beruházás szükséges, a jelen üzemeltetési körülmények között az energetikai hatékonyság érdemben nem javítható.

#### A PROJEKTEN TÚLMUTATÓ HATÁSOK

A német mintára kialakított kérdőívek alapján minden szennyvíztisztító telep önellenőrzése és ennek folyamatos évenkénti ismétlése lehetséges. A projekt rámutatott a szennyvíztisztító telepeken belüli egyes tisztítási fozatok elkülönített energetikai mérésének kiemelt fontosságára. A módszertan átvételéből adódó eredmények a víziközmű üzemeltetők elemi érdeke. Az adatok gyűjtése, az automatikus informatikai adatelemzések robbanásszerű bővülése, az adatokon alapuló üzemelés-irányítás az energia-hatékonysági célkitűzések alá is rendelhetőek. Az eddigi beruházásokban ez a szemlélet csak közvetve kapott

szerepet, de a 2021-től várható tervezési időszakban a tervek szerint a rekonstrukciós projektek is támogatást kaphatnak. Az energia-felhasználási racionalizálás csakis a szennyvíztisztító telepekről elfolyó vízminőségi követelmények egyidejű biztosítása mellett lehetséges. Uniformizált hatékonysági célértékek a helyi sajátosságok miatt nincsenek, ezek csakis egyedileg határozhatóak meg, de az értékeléseket a benchmarking adatelemzésen alapulva lehet vizsgálni.

A német Fél szándéka szerint nemcsak Magyarország részére kívánta a módszertant átadni, hanem a projekt-tapasztalatok alapján a jövőben további Duna-menti országokra is tervezi kiterjeszteni a tudást.

A projekt a szennyvíztisztító telepekre fókuszált. A helyi, vagy regionális hálózatokon további energetikai hatékonyság-javító célterület azonosítható. Az adatok ismerete, az alapos adatelemzés és az innovatív megoldások e területen is jelentős hatékonyság-bővülést eredményezhetnek.

Az Európai Bizottság a települési szennyvíz kezeléséről szóló 91/271/EGK irányelv átfogó értékelését 2019-ben végezte el, amelynek a keretében kijelölte a jövőben vizsgálandó feladatokat. Célkitűzésként a meglévő művek megfelelő üzemeltetése mellett a társ-irányelvek előírásai felé történő általános nyitás szakaszát határozták meg a jövőre nézve. A gazdasági hatásokra tekintettel kiemelten vizsgálják az energetikai kérdéseket, mivel az energia-hatékonyság javítását az automatizálásból és a folyamatos üzemirányításból adódó többlet-ismeretekkel kívánják összehangolni. Mivel a szennyvíztisztító telepek az önkormányzati szektor legnagyobb energia-fogyasztói, emiatt az energetikai kérdéskörben elérhető eredmény-potenciál a szennyvíz irányelvvel összefüggésben nagy.

## A SZERZŐK



**TAMÁS JÁNOS** a Debreceni Egyetem, Víz- és Környezetgazdálkodási Intézetének igazgatója; agrármérnök, agro-kémiai, vízgazdálkodási és térinformatikai szakmérnök. 2007-ben megkapta Magyar Tudományos Akadémia Doktora címet. Elismerései: Az év publikációja díj, Környezetért díj, Sajó Elemér vízgazdálkodásért díj, Hatvani professzori kutatási díj, Magyar Köztársaság Lovagkeresztje. Publikációinak száma közel 500, tankönyvek száma 16. Több szakkönyvet jegyzett a precíziós mezőgazdaság és a vízgazdálkodás területén. Szűkebb szakterülete a talaj és a környezet állapotának modellezése térinformatikai és távérzékelési eszközökkel. A Magyar Hidrológiai Társaság tagja, a Hidrológiai Közlöny szerkesztőbizottságának 2015 óta tagja.

**HARALD SCHÖNBERGER** a Stuttgarteri Egyetem, Sanitary Engineering and Water Recycling tanszékének professzora. Jelenleg a Tartományi Környezetvédelmi Minisztérium ipari környezetvédelemért felelős szakértője.

**CARSTEN MEYER** Dipl.-Ing., Regierungsbaumeister. Szennyvíztechnológiai Tanszék vezetője, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA), Stuttgarteri Egyetem, Németország. Carsten Meyer vezette a német kutatási munkacsoportot. Szennyvíztechnológiai területen az elmúlt 8 évben 43 tudományos és szakmai publikációt jegyzett. Az Institute for Sanitary Engineering, Water Quality and Solid Waste Management honlapja: <https://www.iswa.uni-stuttgart.de/>

**PETER BAUMANN** Prof. Dr.-Ing. a Siedlungswasserwirtschaft Hochschule für Technik Stuttgart professzora. Az elmúlt évtizedben 38 publikációt jelentetett meg szennyvíztechnológia területén. A projektben többek között a Debreceni Szennyvíztelep felülvizsgálatát végezte. Honlapja: [www.dr-peter-baumann.de](http://www.dr-peter-baumann.de).

**WERNER MAIER** Dr.-Ing. az IAT -Ingenieurberatung GmbH mérnöki intézet ügyvezetője. Doktori dolgozatát a biológiai szennyvíztisztítás területén: A biológiai foszfor-eltávolítás témájában szerezte. A projektben elsősorban a nyíregyházi és karcagi telephelyek átvilágításában vett részt. Honlapja: <https://www.iat-stuttgart.de/ueber-uns/>

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A magyarországi kommunális szennyvíztisztító telepek energiahatékonyági vizsgálatának módszertani megalapozásához” című kutatás a Duna Régió Stratégia keretében Németország Baden-Württemberg tartománya Környezetvédelmi, Klíma és Energiaügyi Minisztériumának megbízásából készült a tartomány és a Magyar Kormány közötti Gazdasági Vegyesbizottság együttműködése keretében. A magyarországi koordinátor feladatokat a Belügyminisztérium látta el.

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Innovációs és Technológiai Minisztérium által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program NKFIH-1150-6/2019 számon támogatta, a Debreceni Egyetem 4. téma-területi programja keretében.

## IRODALOM

DWA (2015). Arbeitsblatt DWA-A 216. Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Hennef.

Ligetvári F., Zsabokorszky F., Kovács K., Zsirai I. (2015). Wastewater Treatment and Sludge Utilisation in Hungary. In: *JESE-B* 4 (3). DOI: 10.17265/2162-5263/2015.03.005.

Steinmetz H., Reinhardt T., Gasse J., Meyer C., Maier W., Poppe, B. (2015). Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Stuttgart.

Tamás J., Fehér J. (2009). Solution for urban and regional water resources management conflicts – a Hungarian case, Singapore International Water Week 2009, Water Convention 2009. Planning for Sustainable Water Solutions, 1-12.

Umweltbundesamt (2009). Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen.

**ÁNYOS JÓZSEF** okleveles vízépítő mérnök végzettséggel rendelkezik, melyet 1983-ban szerzett meg a Budapesti Műszaki Egyetemen. Pályafutását a Vízügyi Tervező Vállalatnál kezdte, majd a Tiszántúli Vízügyi Igazgatóságnál, később az A.K.S.D. Városgazdálkodási Kft.-nél töltött be vezető pozíciókat. 1999-től 2020. június 30-ig vezérigazgatói beosztást töltött be a DÉVÍZ Zrt-ben. 48 éve dolgozik a vízügyi szektorban. A Magyar Víziközmű Szövetség által alapított és adományozott Reitter Ferenc életműdíj elismerésben részesült.

**SZABÓ ISTVÁNNÉ** a Nyírségvíz Zrt vezérigazgatója, ahol a jogelőd vállalatot is figyelembe véve 1978-tól dolgozik.

**BAKONDI PATRIK** a Tiszamenti Regionális Vízművek Zrt. vezérigazgatója. A vállalat 2019-ben nyerte el Jász-Nagykun-Szolnok megye legjobb vállalata címet.

**MURÁNYINÉ KREMPELS GABRIELLA** a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán 1983-ban szerzett vízépítőmérnök diplomát. 2000-ig tervező mérnöki, illetve vezető tervezői beosztásban szennyvízelvezető hálózatok és szennyvíztisztító telepek tervezésével foglalkozott a VIZITERV-ben és a jogutód K+K Kft-ben. 2000. óta a központi közigazgatásban a Vízgazdálkodási Főosztályon a települési vízgazdálkodással kapcsolatos feladatokat látja el. Feladatait 2003-tól osztályvezetőként, 2007-től főosztályvezető-helyettesként, majd 2010. óta főosztályvezetői kinevezéssel végzi a Belügyminisztériumban, illetve jogelődjeinél. 1995. és 2005. között a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken a Vízépítés című tantárgy óraadó oktatója a német tannyelvű oktatás keretében. Elismerései: Vezérigazgatói dicséret (1989), Ezüst Széchényi Emlékérem (2002), Miniszteri elismerés (2006 és 2012), Kvassay Jenő emlékérem (2014), A köz szolgálatáért érdemjel ezüst fokozata (2017). A Magyar Hidrológiai Társaság és a Mérnöki Kamara tagja.

**MAGYAR TAMÁS** a Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Karán szerzett környezetmérnök diplomát 2011-ben, majd 2018-ban doktori (PhD.) fokozatot. Jelenleg a Debreceni Egyetem, Víz- és Környezetgazdálkodási Intézetének adjunktusa. Kutatói és tudományos tevékenységének részét képezi a víz- és szennyvíztisztítási technológiák-, illetve a szervesanyagok biodegradációjának vizsgálata. Publikációinak száma 63, amelyek között több megadott szabadalom és használati mintaoltalom is szerepel.



*Illusztráció a cikkhez. A debreceni szennyvíztisztító telep látképe (Fotó a Szerzőktől)*



*Illusztráció a cikkhez. A nyíregyházi szennyvíztisztító telep biológiai fokozata (a háttérben a rothasztó berendezés) (Fotó a Szerzőktől)*

## Nekrológ



Életének 92. évében elhunyt dr. Rákóczi László okleveles mérnök (BME 1952), egyetemi doktor (ÉKME 1966), a műszaki tudomány kandidátusa (MTA 1981), címzetes egyetemi docens (ELTE 1989), címzetes egyetemi tanár (BME 2011).

Mérnöki diplomájának átvétele után, 1952–1958 között az UVATERV Víz osztályának tervezője, majd 1958-tól nyugdíjba menetelég, 1989-ig tudományos kutató, főmunkatárs, tanácsadó a VITUKI-ban. Főbb munkaterületei: tervezőként közlekedési üzemi vízellátás és csatornázás, kutatóként: folyami hidraulikai, hordalékmozgási és folyószabályozási vizsgálatok, folyami és tavi hordalékmozgás radioaktív izotópokkal történő nyomjelzéses vizsgálata, ill. üledékdinamikai vizsgálatok voltak. 1966-tól 1977-ig vezette a VITUKI nicki folyószabályozási kísérleti telepét, melyet ő és Csoma János alapított.

Munkásságát számos kitüntetéssel ismerték el, többek közt birtokosa a Munka Érdemrendnek (1964), arany pecsétgyűrűnek (VITUKI, 1984), a Vízrajzi Szolgálatért Emlékéremnek (1986), Pro Hidrológia díjnak (VITUKI, 1999), valamint a KvVM Vásárhelyi Pál-díjának (2005).

Nemzetközi kutatói ismertségét a folyami és tavi hordalékmozgás lumineszcens nyomjelzése alapozta meg. Ebből a témakörből írta 1965-ben „A görgetett hordalék mozgásának vizsgálata jelzőanyagok segítségével” című mérnöki doktori értekezését. Az 1960-as évek közepétől egyre intenzívebben foglalkozott tavi üledékvándorlással, balatoni és Fertő-tavi kutatások keretében. Jelzőanyagok alkalmazásával vizsgálta például a Balatonban a déli part hullámvágás által elmosott anyagának mozgását, és a Keszthelyi-öbölben az oda bejutott iszapanyag felkeveredési és leülepedési viszonyait. Részt vett ökohidraulikai tárgyú kutatásokban is, például vizsgálta a szennyezett hullámterek rehabilitációs lehetőségeit a Sajó folyón, vagy a Vén-Duna mellékág revitalizációjának feliszapolódási hatásait a Duna Gemenci ágrendszerében.

1989-ben vonult nyugdíjba, de nagy lendülettel folytatta a hordalékvándorlással kapcsolatos kutatásait, különös tekintettel a Felső-Duna és szigetközi ágrendszerek mederalakulására, és a Dráva hordalékszállítására. Szeke-res Jánossal (VITUKI) közösen kifejlesztette és elsőként a Dráva folyón hajtotta végre a Károlyi-féle görgetett

### Dr. Rákóczi László

Debrecen, 1929. 01. 14. – Budapest, 2020. 08. 04.

hordalékmintavevőre szerelt vízalatti kamerával való hordalékvizsgálatokat. Fontos szerepe volt az Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság által beszerzett zavartalan, fagyasztásos mederanyag mintavevő berendezés beüzemelésében, tesztméréseiben és az eredmények értékelésében.

Hazai folyóiratokban (mint pl. a Hidrológiai Közlöny, Vízügyi Közlemények), valamint külföldi folyóiratokban, kongresszusi kiadványokban mintegy 100 publikációja jelent meg. A hordalékmozgás jellemzőinek mérése c. könyve 1982-ben jelent meg. Amerikában, Ázsiában és Európában több mint 50 országban, számos egyetemen tartott előadásokat, a VITUKI /UNESCO Nemzetközi Hidrológiai Továbbképző Tanfolyam rendszeres előadója volt. 1966-1968 között Kanadában (Albertai Egyetem), 1985-1986 között Svédországban (Uppsalai Egyetem) dolgozott vendégkutatóként. Szakértőként részt vett thaiföldi, nepáli, kínai, indiai, venezuelai és francia kiküldetéseken, utóbbinál a Loire folyón demonstrálta a vízalatti kamerával felszerelt görgetett hordalék mintavevő alkalmazását. Szakmai elhivatottságát jól jelzi, hogy még az utóbbi években is szívesen adott tanácsokat különböző hazai és nemzetközi szakmai-tudományos munkákban, amelyek a folyami hordalékvándorlás témájához kapcsolódtak, például a teljes Duna hordalékvizsgálatát célzó nemzetközi DanubeSediment projektben vagy a hazai Duna hajózási fejlesztését célzó tervezői munkában.

1982-től 1988-ig tagja volt a Nemzetközi Hidraulikai Kutatási Szövetség (IAHR) Folyami Hidraulikai Bizottságának, továbbá folyamatosan aktív tagja volt az MTA Vízgazdálkodás-tudományi, valamint a Hidrológiai Osztályközi Állandó Bizottságának.

1961-től több cikluson át részt vett a Magyar Hidrológiai Társaság (MHT) Számvizsgáló bizottságának munkájában. Az MHT vándorgyűléseinek gyakori előadója volt. Az MHT 1965-ben Vásárhelyi Pál-émlékklappal, 1999-ben Pro Aqua díjjal tüntette ki.

Laci bácsival végzős egyetemi hallgatóként találkoztam először, több mint 15 évvel ezelőtt. Kutatói pályám alakulására a folyamatos mentori tevékenysége nagy hatással volt, és gyümölcsöző szakmai beszélgetéseink mindig további lendületet adtak új innovatív hordalékvizsgálati módszerek fejlesztéséhez, legyen szó számítógépes modellezésről vagy új terepi mérési eljárások fejlesztéséről. Műegyetemi előadói, konzulensi és bírálói munkái számos hallgatói TDK és doktori kutatást fémjelveznek, amelyekért nagy hálával tartozunk neki. Szakmai-tudományos eredményei a hazai és a nemzetközi hordalékkutatás területén meghatározók, egyúttal jövőbeli kutatások alapjául szolgálnak.

Emlékét kegyelettel megőrizzük!

*Dr. Baranya Sándor  
egyetemi docens, tanszékvezető  
BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék*

