

A klimatikus változások hatása a hazai felszín alatti vízkészletekre

Szűcs Péter, Nyiri Gábor*

Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Víz- és Környezetgazdálkodás Intézet,
Miskolc, Magyarország

*Levelező szerző, e-mail: gabor.nyiri1@uni-miskolc.hu

Beérkezett: 2025. április 7.; elfogadva: 2025. június 16.

Összefoglalás

A tanulmány átfogó képet ad arról, hogy az utóbbi évtizedek klimatikus változásai hogyan hatottak a hazai felszín alatti vízkészletekre. Javasolt intézkedések és lehetséges beavatkozási irányok is megfogalmazásra kerültek annak érdekében, hogy stratégiai fontosságú felszín alatti vízkészleteinket a jövőben is fenntartható módon tudjuk hasznosítani. A bemutatott kutatási eredmények szorosan kapcsolódnak az MTA Nemzeti Víz tudományi Programjához, amelynek létrehozásában és működtetésében Németh Tamásnak, az MTA rendes tagjának kiemelkedő szerepe volt. Jelen tanulmány első szerzője hálás szívvel gondol azokra az időkre, amikor a Nemzeti Víz tudományi Program irányító testületében együtt dolgozhatott Németh Tamás akadémikussal.

Kulcsszavak: felszín alatti vizek, hidrogeológia, klimatikus hatások, fenntarthatóság, MTA Nemzeti Víz tudományi Program

Climatic changes on groundwater resources in Hungary

Péter Szűcs, Gábor Nyiri

University of Miskolc, Faculty of Earth and Environmental Sciences and Engineering,
Institute of Water Resources and Environmental Management, Miskolc, Hungary

Summary

The study provides a comprehensive picture of how the climatic changes of recent decades have affected domestic groundwater resources. Recommended measures and possible directions of intervention were formulated in order to be able to use our strategically important groundwater resources in a sustainable way in the future. Climate change and the increase in the frequency of extreme weather conditions pose significant challenges and risks to Hungary's groundwater resources. The measurement data show that the adverse processes of climate change are often directly linked to the elements of the global water cycle and the hydrological cycle, but their impact goes far beyond water management issues. Today's modern data collection methods provide climate researchers, groundwater experts and decision-makers with a huge amount of data with global coverage. Access to data and information with modern data analysis methods can represent a significant step forward in understanding harmful processes and trends and in exploring cause-and-effect relationships. The climatic changes experienced have a significant impact on Hungary's groundwater resources, which play an important role in drinking water supply, agriculture and the maintenance of ecosystems. Adaptation and resilience measures and interventions to protect and sustainably use groundwater resources may include the following areas:

- widespread use of sustainable water management and water-saving solutions;
- increased natural water retention and soil protection, as well as soil improvement;
- artificial recharge of groundwater resources. Launch of MAR “Managed Aquifer Recharge” projects as planned in several places in the country;
- development of monitoring systems, artificial intelligence-based data analysis;
- regulating the situation of household wells without permits and reporting obligations from a water management perspective;
- ecosystem-based adaptation;
- reduction of non-revenue water (NRW) in water distribution systems.

The presented research results are significantly related to the National Water Science Program of the Hungarian Academy of Sciences, in the creation and operation of which Tamás Németh, the member of the Hungarian Academy of Sciences, played a prominent role. The first author of this study thinks with a grateful heart of the times when he was able to work together with academician Tamás Németh in the Steering Board of the National Water Science Program.

Keywords: groundwater, hydrogeology, climatic changes, sustainability, Hungarian Water Science Program of the Hungarian Academy of Sciences

Bevezetés

A hidrológiai ciklus részét képező felszín alatti vízkészletek nélkülözhetetlen elemei a hazai vízfelhasználásnak. Elég, ha csak arra gondolunk, hogy Magyarországon az ivóvízellátás több mint 95 százaléka, míg a mezőgazdasági öntözési céllal felhasznált vizek körülbelül 20 százaléka a felszín alól származik (Szűcs 2017). Világhírű ásvány- és gyógyvizeink, hévizeink és termálvizeink is a felszín alól származnak. A felszín alatti vizek emellett persze jelentős szerepet játszanak a patakok, folyók és tavak természetes vízutánpótlódásában, valamint a vizes élőhelyek és egyéb ökológiai rendszerek fenntartásában (Szűcs et al. 2024a).

Az MTA Nemzeti Víz tudományi Program egyik pillére egy országos szintű, átfogó Nemzeti Víz tudományi Kutatási Program (2018) kidolgozása (Engloner et al. 2018). Ennek célja, hogy összegezze a vízzel kapcsolatos legfontosabb hazai kihívásokat és kutatási feladatokat, ezáltal kiindulópontja legyen integrált, multidiszciplináris kutatásoknak, segítve a Nemzeti Vízstratégia célkitűzéseinek végrehajtását, valamint a nemzetközi élvonalba emelje a hazai víz tudományi kutatásokat. A kutatási programnak elsősorban a közeljövő hazai feladataira kell fókuszálnia, de figyelembe kell vennie a víz kincs jövőjét jelentősen meghatározó világméretű folyamatokat is.

A klimatikus változások hatása a felszín alatti vízkészletekre

A klímaváltozás és a szélsőséges időjárási viszonyok jelentős mértékben hatnak a hidrológiai ciklus különböző elemeire, így a felszín alatti vízkészletekre is (Darabos et al. 2016). Ilyen hatások lehetnek például a természetes utánpótlódás és a tárolt vízmennyiség csökkenése, a kiszámíthatatlan hatású villámárvizek gyakoriságának növekedése vagy akár a vízminőség kedvezőtlen irányú változása. Nagyon fontos tehát, hogy a monitoringhálózatok dinamikus fejlesztése által az eddigieknél pontosabban megismerjük ezeket a recens természeti folyamatokat, másrészt fel kell tárni azokat a vízgazdálkodási (műszaki, természettudományi, gazdasági, jogi és társadalmi) beavatkozási lehetőségeket, amelyek segítségével a felszín alatti vízkészletek is jelentős szerepet játszhatnak a klímavédelemben – legyen szó társadalmi adaptációról vagy a káros jelenségek hatásainak csökkentéséről (mitigációjáról).

A víz-keretirányelv alapján készült „Magyarország víz-gyűjtő-gazdálkodási tervének második felülvizsgálata” című VGT3 átfogó dokumentum részletesen foglalkozik a klímaváltozás hatásaival és a klímavédelemmel (OVF 2021). A több mint hatszáz oldalas áttekintő dokumentum szerint a klímaváltozás hatásai jelentős mértékben érintik a felszín alatti vizek mennyiségét és minőségét is. Az általánosan tapasztalható szárazabb talajállapotok miatt a felszín alatti vizeket tápláló természetes csapadék-utánpótlás általános csökkenése várható; arányaiban ez az Alföldön lesz a legnagyobb mértékű. A prognózisok alapján az Alföldön jelentősen csökken a kitermelhető felszín alatti víz mennyisége is. A szárazabb időjáráshoz köthető romló ökológiai állapot mellett a felszín alatti vizektől – elsősorban a talajvíztől – függő ökoszisztémák, vizes élőhelyek (például szikes tavak) válhatnak veszélyeztetetté a klímaváltozás következtében.

A VGT3 vízgazdálkodási dokumentum továbbá arról is tájékoztat, hogy az aszály előfordulásának valószínűsége, intenzitása és súlyossága Magyarország teljes területén növekvő tendenciát mutat. Az egyes talajtípusok eltérő aszályérzékenysége, a helyi klimatikus hatások, illetve az adott térség aszályhoz való alkalmazkodási potenciáljának változatossága együttesen ugyan eredményezhetnek szigetszerű eltéréseket, de a vízhiány egyre nagyobb kockázati veszélyt jelent hazánk fenntartható fejlődésében. A vízgazdálkodás területén fel kell készülni az egyre nagyobb gyakorisággal és váltakozó jelleggel előforduló hirtelen vízbőszégre, illetve tartós vízhiányra. Növekszik a szélsőségek miatti kockázatcsökkentés jelentősége, illetve előtérbe kerül az alkalmazkodás kérdése. A klímaváltozás negatív hatásaként gyakrabban és egyre intenzívebben jelentkeznek vízhiányosabb időszakok, ezáltal például az agrár-víz igény további növekedése is várható. Az öntözés fejlesztésével a gazdálkodás eredményessége növelhető, hiszen megszűnik a csapadék eloszlási bizonytalanságából eredő termelési kockázat.

A klímavédelemmel kapcsolatban a VGT3 dokumentum vízvisszatartásra építő, jobb készletgazdálkodást és kedvezőbb vízháztartással járó tájgazdálkodást említ. A 2018-ban elfogadott Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS-2) a Párizsi Megállapodásban foglalt célkitűzéseknek és prioritásoknak megfelelően módosított szöveget tartalmazza. A NÉS-2 négy tematikus célkitűzést határoz meg:

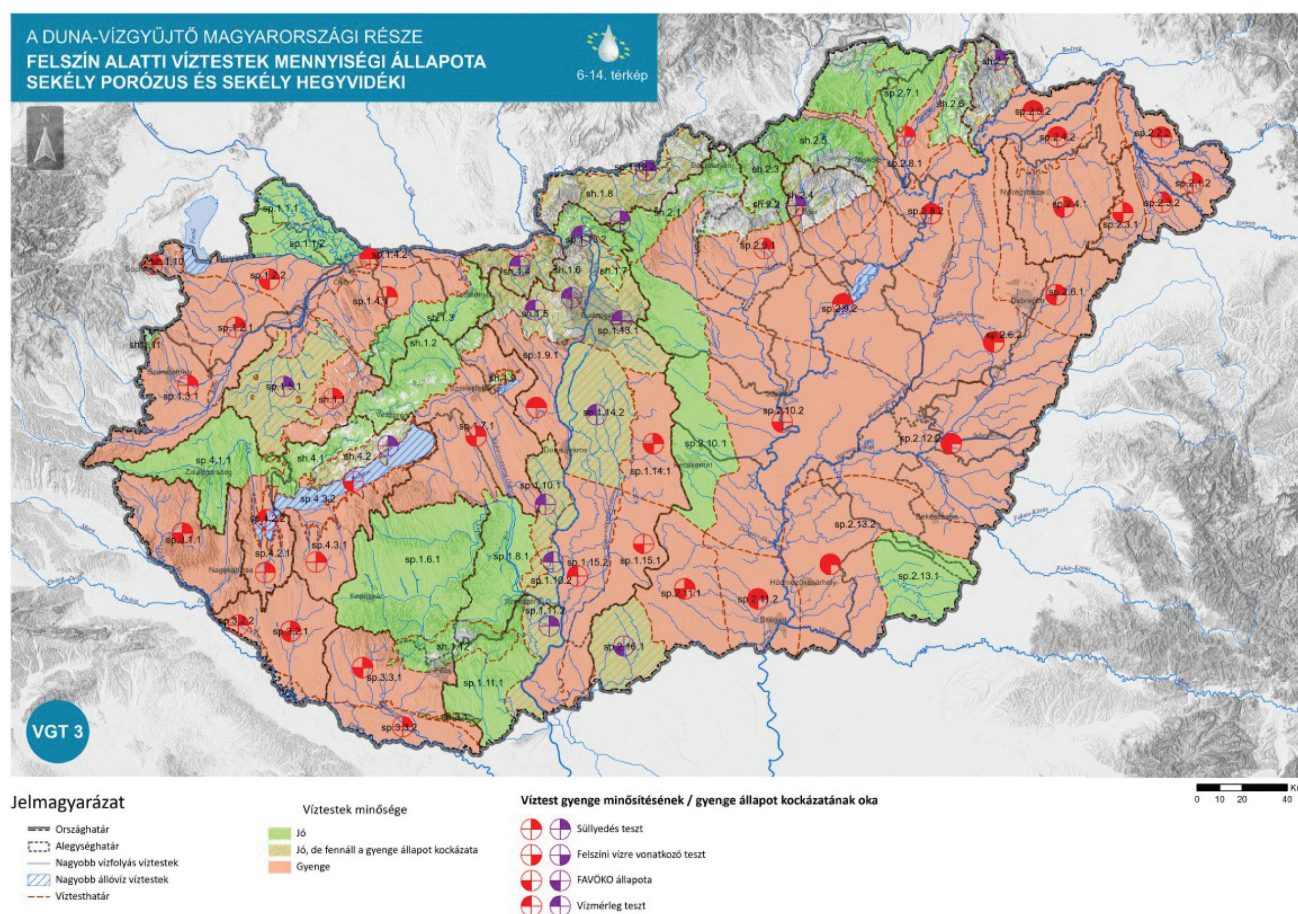
- dekarbonizáció (Hazai Dekarbonizációs Útiter 2050-ig, HDÚ);
- az éghajlati sérülékenység területi vizsgálatának térinformatikai megalapozása;
- alkalmazkodás és felkészülés (Nemzeti Alkalmazkodási Stratégia, NAS);
- éghajlati partnerség biztosítása (Partnerség az Éghajlatért Szemléletformálási Cselekvési Terv).

A négy fő terület közül leginkább a Nemzeti Alkalmazkodási Stratégiának (NAS) vannak vízgazdálkodási aspektusai. A NAS a klímaváltozáshoz való alkalmazkodás hazai kereteit és lehetőségeit vázolja fel, a rugalmas alkalmazkodás, vagyis az összehangolt, a kockázatoknak elébe menő felkészülés lehetőségének megteremtését szolgálja. A NAS részletesen vizsgálja az éghajlatváltozásnak a vizekre, a talajra, az élővilágra és az emberi egészségre gyakorolt hatásait, elemzi a várható mezőgazdasági, az épített környezetben jelentkező, valamint turisztikai és energetikai következményeket. Az éghajlati sérülékenység komplex elemzése alapján az éghajlatváltozás nem érinti majd egyformán Magyarország településeit, jelentős területi különbségek várhatók. A Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer (NATÉR)

keretében kidolgozott sérülékenységvizsgálati eredmények szemléltetik az éghajlati hatások teljes, komplex láncolatát, beleértve a társadalmi és gazdasági következményeket is.

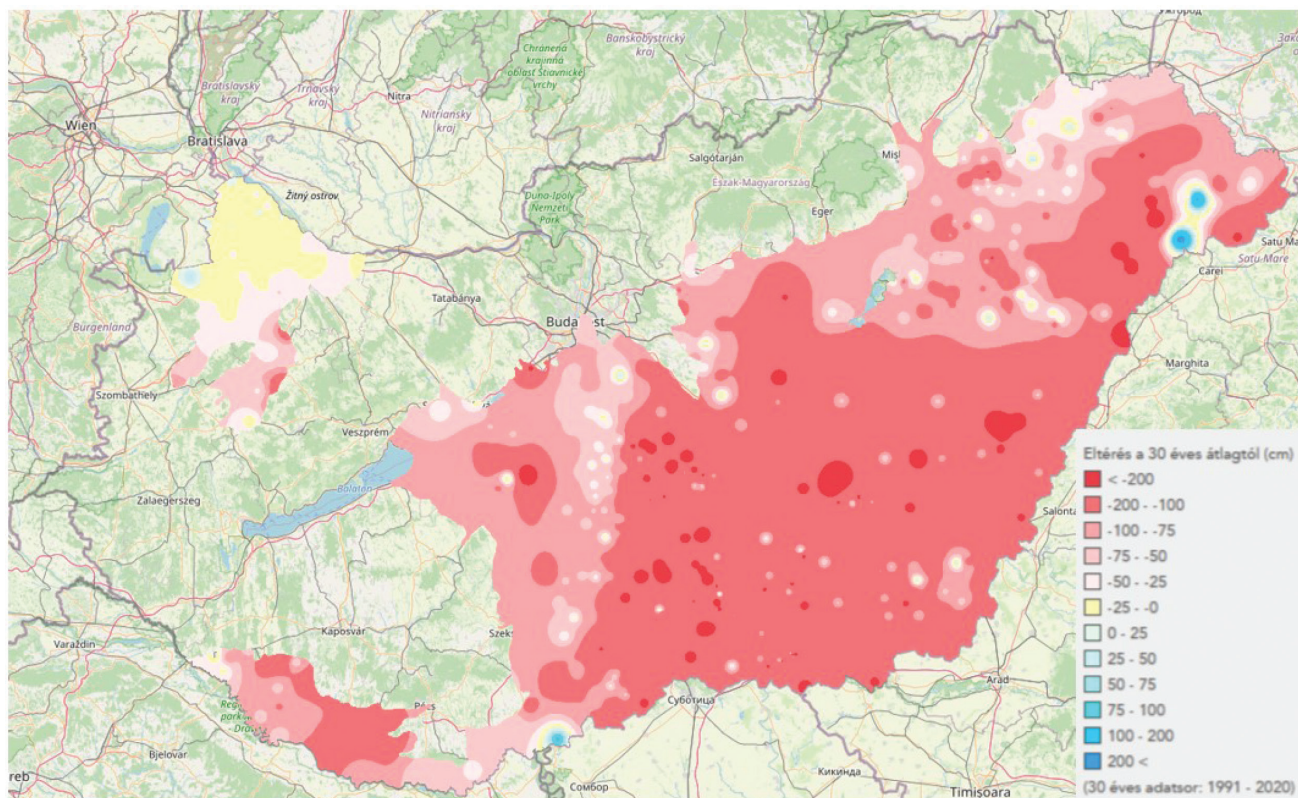
A klímaváltozás és a szélsőséges időjárási viszonyok negatív hatásai sajnos megjelennek a hazai felszín alatti víztestek mennyiségi és minőségi állapotában is (Madarász *et al.* 2015). A felszín alatti sekély, porózus víztestek döntően gyenge mennyiségi állapotához (1. ábra) jelentősen hozzájárulnak a kedvezőtlen időjárási viszonyok. A klímaváltozás negatív hatásai konkrét talajvízszint-csökkenésben is tetten érhetők, elsősorban az Alföldön (2. ábra). Az átlagos talajvízszint az elmúlt három évtized vonatkozásában több helyen is többméteres csökkenést mutat.

A szélsőséges időjárási viszonyok hatásai egyértelműen tapasztalhatók a Bükk hegységben található karsztvízkészlet esetében is (Kovács *et al.* 2015). A Miskolci Egyetem által már harminc éve működtetett Bükki Karsztvíz-észlelő Rendszer monitoringadatai és ezek statisztikai értékelése egyértelműen alátámasztják ezt az állítást (Miklós *et al.* 2021). A bükki karsztvízkészlet jellemzése szempontjából az egyik legfontosabb figyelőpont a jávor-kúti Nv-17-es jelű. Ennek a megfigyelőkútnak a karszt-

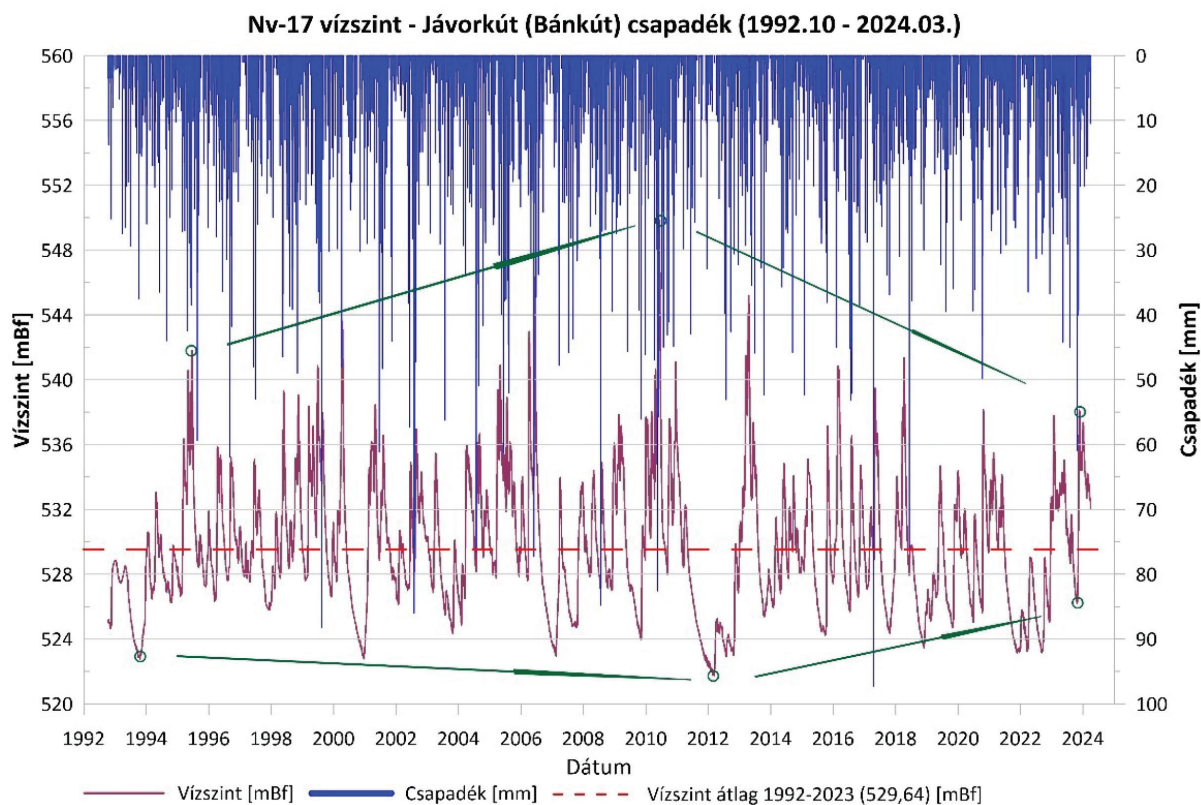


1. ábra A sekély porózus és a sekély hegyvidéki felszín alatti víztestek mennyiségi állapota a VGT3 dokumentum alapján

Forrás: www.vizeink.hu



2. ábra | A talajvízszint eltérése a harmincéves átlagtól 2024-ben Magyarországon
Forrás: www.vizugy.hu



3. ábra | Az Nv-17 monitoringkút közel harmincévnyi vízszintadatainak alakulása Jávorkútnál a Bükk hegységben
Forrás: saját szerkesztés

vízszint-adatsora az elmúlt harminckét évből igen szemléletesen megjeleníti az egyre gyakoribbá váló szélsőséges helyzeteket (3. ábra), amelyeket minden szempontból megfelelő hatékonysággal kezelni kell. Az egyre alacsonyabb minimumvízszintekhez tartozó időszakokban kritikussá válhat a térségi közműves vízigények biztosítása, míg az egyre magasabbá váló maximumkarsztvízszintek a villámárvizek előfordulásának gyakoribbá válásáért felelősek. Mindkét helyzet komoly kihívást jelent a vízgazdálkodással foglalkozó szakemberek számára. Új vízgazdálkodási módszerek bevezetése vált szükségessé Miskolc esetében is (Szűcs–Mikita 2016), hogy a szélsőséges helyzeteket a bükki karsztvízkészlet vonatkozásában megfelelő hatékonysággal lehessen kezelni.

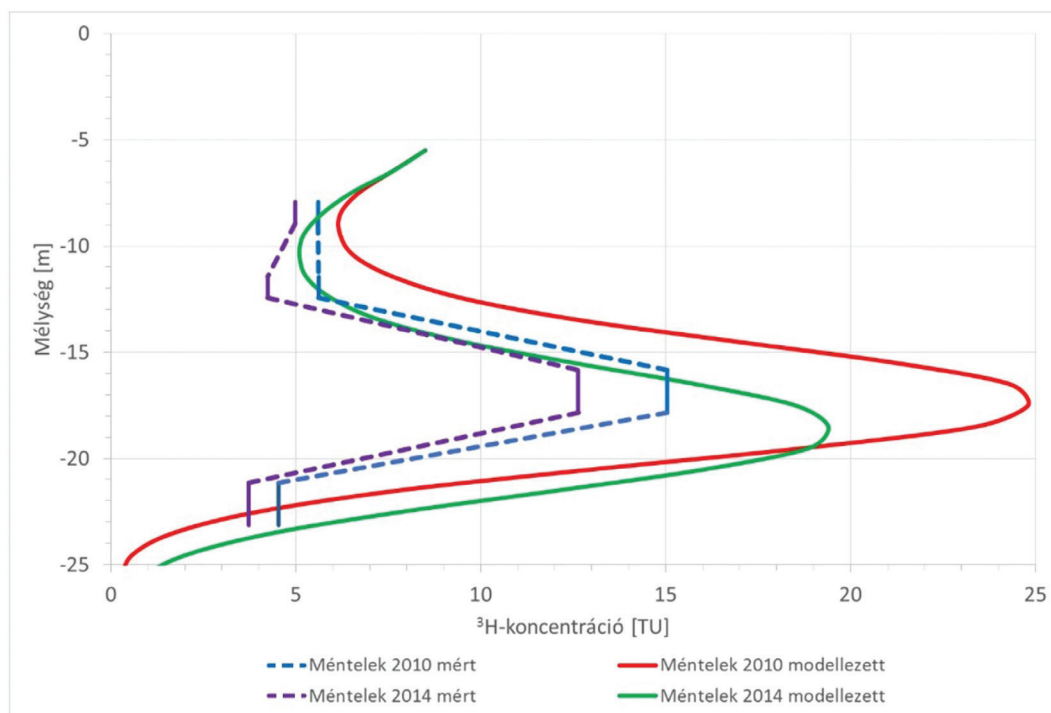
A hatékony klímavédelem alapvetése, hogy az adott térségben lehetőség szerint minél pontosabban ismerjük a lejátszódó természeti folyamatokat. Ennek elengedhetetlen eleme a megfelelő sűrűségű monitoringhálózat megléte, valamint a mért adatok feldolgozása és elemzése. Vízgazdálkodási szempontból nagyon fontos azoknak a vizsgálatoknak az elvégzése is, amelyek a felszín alatti vizek természetes utánpótlódásának, valamint a vízszinteknek az időbeli változásáról adnak információt (Szűcs et al. 2024b).

Innovatív környezeti izotópvizsgálatok (4. ábra) rávilágítottak, hogy az Alföld felszín alatti vízkészleteinek megújulása szempontjából kulcsfontosságú Duna–Tisza közti hátság és a Nyírségben az elmúlt tíz–tizenöt éves időszakban körülbelül 10–20 mm/év mennyiséggel

csökkent az éves természetes utánpótlódás mértéke (Szűcs 2017). Ez a jelenség is megerősíti, hogy Magyarországon is egyre inkább számításba kell venni azokat a vízgazdálkodási megoldási javaslatokat, amelyek a felszín alatti vízkészletek mesterséges utánpótlásával és a felszín alatti vízraktározással kapcsolatosak.

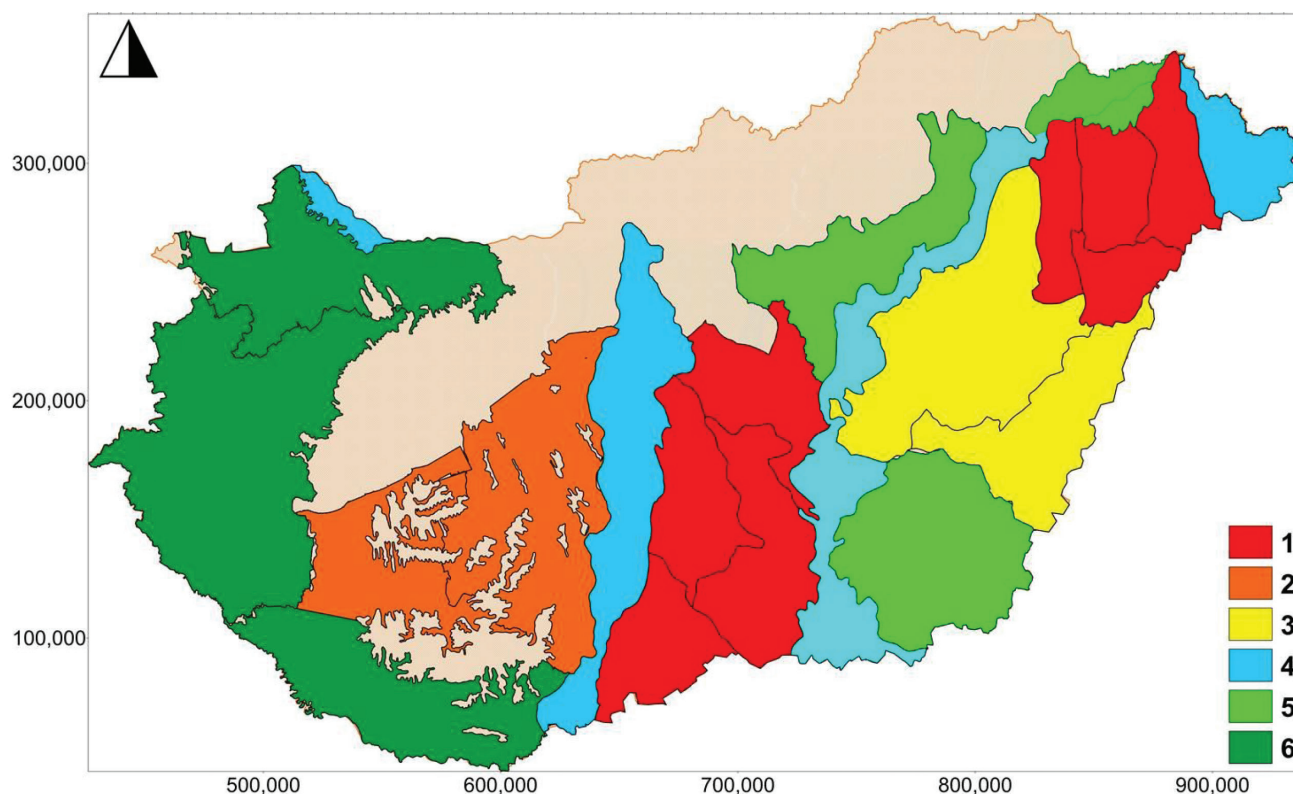
Az eddig bemutatott eredményekkel jól korrelál az a vizsgálatosorozat, amelynek eredményeként az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) koordinálásával 2020-ban elkészült a hazai talajvízkészletek klímaváltozás miatti veszélyeztetettségét bemutató térkép (5. ábra). Fokozottan veszélyeztetett, jelentős vízhiányt mutató területek a piros színnel jelölt Duna–Tisza közti hátság, a Nyírség és a Hajdúság. A helyzet súlyosságát jól mutatja, hogy már hazánkban is számos terv készült a felszín alatti vízkészletek mesterséges utánpótlására. Több technikai megoldás is lehetséges, például szivárogtatóárkok vagy nyelőkutak alkalmazásával a kijelölt területeken.

Konkrét példaként megemlíthető az a korábbi komplex projekt, amely mesterséges vízpótlás alkalmazását tűzte ki célul a talajvízszint emelésére és az erdők ökológiai állapotának javítása érdekében Debrecenben. A Miskolci Egyetem részéről hidrodinamikai (MODFLOW) modellezés segítségével vizsgálták, hogy a javasolt szivárogtató drének alkalmazásával (6. ábra) milyen időléptékben és milyen környezeti hatásokkal valósítható meg a talajvízszint mesterséges megemlése a debreceni Nagyerdő vízpótlása céljából (Szűcs et al. 2009). A tervezett mesterséges vízpótlás célkitűzése a következő volt: 2–3 méte-



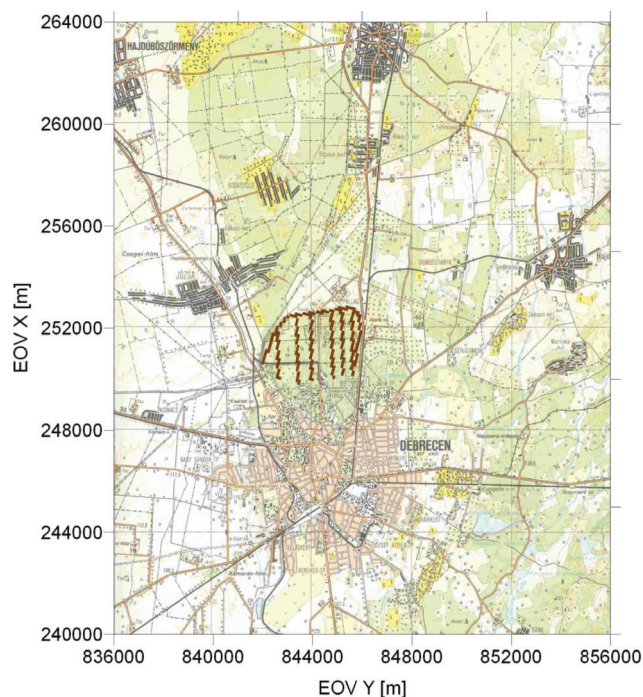
4. ábra | A ménteleki mért és modellezett ^3H -koncentrációk 2010-ben és 2014-ben

Forrás: saját szerkesztés



5. ábra A talajvízkészletek klímaváltozás miatti veszélyeztetettsége Magyarországon

Forrás: www.ovf.hu, https://vizeink.hu/wp-content/uploads/2021/04/Aszaly_VGT3_2021.pdf



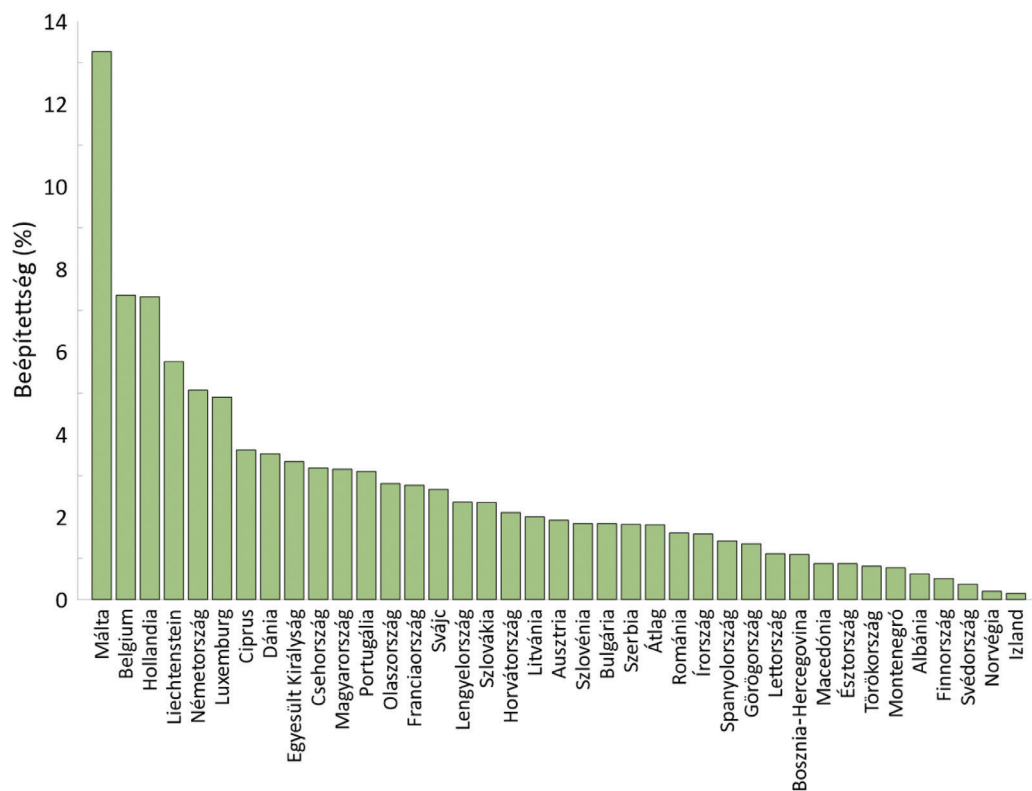
6. ábra A talajvízszint mesterséges megemlése felszín alatti szivárgó drének alkalmazásával a debreceni Nagyerdő vízpótlása céljából

Forrás: Szűcs et al. 2009

res talajvízszint-emeléssel vissza lehetne állítani egy feltételezett 19. század végi, 20. század eleji, természetközeli talajvízállapotot, amely a természetes erdőállapotok megőrzése szempontjából ideális viszonyokat teremtené. A lehetséges műszaki megoldások között szerepelt

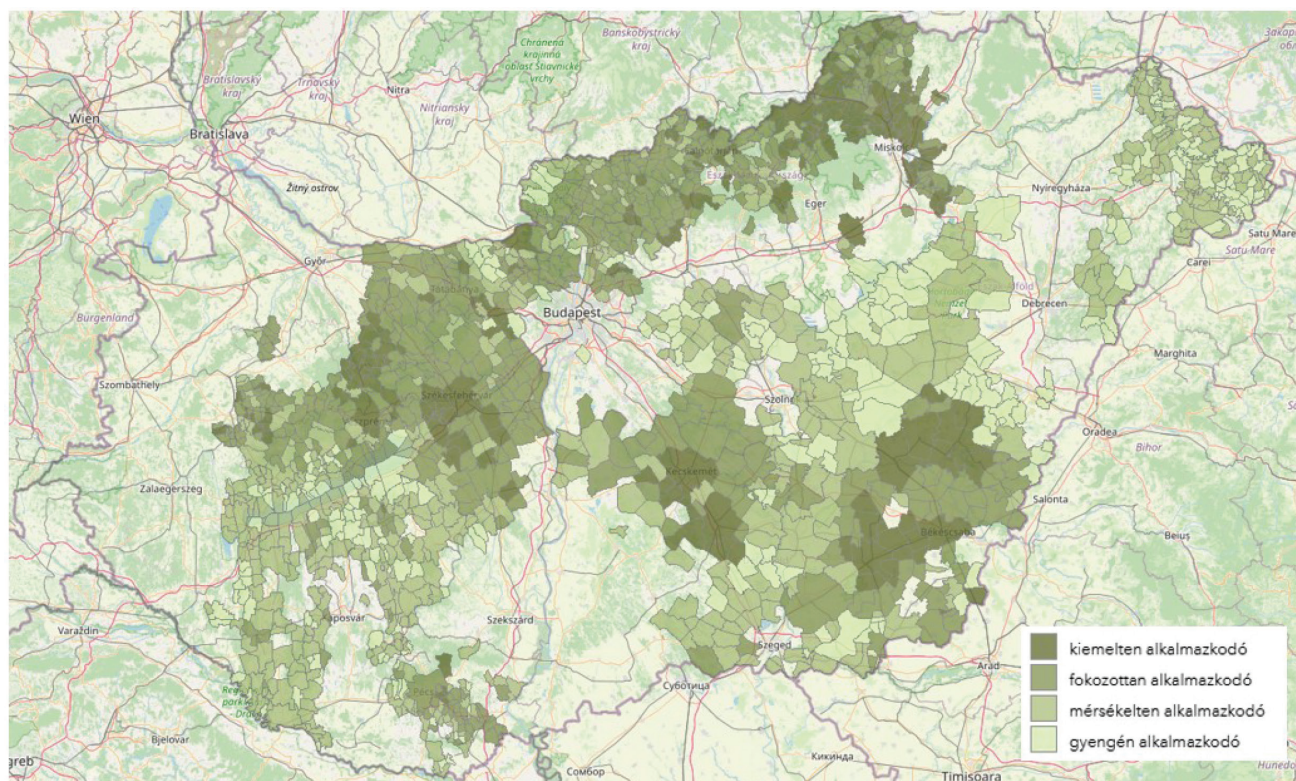
- felszín alatti szivárgó drének alkalmazása a Nagyerdőben;
- szivárogtató tó alkalmazása a Nagyerdőtől északra;
- besajtoló kutak alkalmazása;
- vízpótlás a Keleti-főcsatornából (Balmazújváros).

A szélsőséges időjárási viszonyok miatt hazánkban látványosan csökken a felszín alatti vizek természetes utánpótlódása. Így különösen károsak azok a folyamatok, amelyek tovább csökkentik a természetes beszivárgási lehetőségeket a felszín alá. Sokat beszélünk a talajokat veszélyeztető folyamatokról, amelyek közül a legdrasztikusabb beavatkozás a beépítés (7. ábra). Egy elfedett talaj gyakorlatilag minden ökológiai funkcióját elveszíti. Beszivárgó víz híján és fény hiányában az élet teljes megszűnése gyakorlatilag teljes mértékben inaktívvá teszi a talajokat. Az Európai Unióban 2000 és 2006 között az évente beépített, betonnal, aszfalttal lefedett területek mérete meghaladta az 1000 km²-t, ami egy Berlin méretű területet vont el a víz-, szén- és tápanyagkörforgás egészséges rendszeréből. Ez az érték az EU-27 országai-



7. ábra

A beépítettség aránya az ország teljes területéhez viszonyítva

Forrás: EEA 2019, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/degree-of-soil-sealing-as>


8. ábra

A települések éghajlatváltozással szembeni alkalmazkodóképessége az ivóvízellátás területén

Forrás: map.mbfisz.gov.hu/nater

ban szerencsére csökkenő tendenciát mutat: a 2012 és 2018 közötti időszakban 539 km²-re csökkent. Magyarországon a 2000–2018 közötti időszakban 191,3 m²/km² területnyi talaj pusztult el, míg ez idő alatt a rekultivációs arány 27,3 m²/km² volt, vagyis folyamatosan fogy a talajfelszín (EEA 2019).

Számos további, jól használható információ található a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer honlapján (<https://map.mbfisz.gov.hu/nater>). A honlapon megjelenített főbb témák közül a „Felszín alatti vízház-tartás”, valamint az „Ívóvízbázis” rétegeken belül találunk számos fontos információt a felszín alatti vizek klímakitettőségét illetően. A 8. ábra bemutatja a hazai települések éghajlatváltozással szembeni alkalmazkodóképességét az ívóvízellátás területén. A sötétzöld szín jelöli a kiemelten alkalmazkodó területeket és településeket, ahol számos jó gyakorlatot vezettek be a vízgazdálkodással foglalkozó szakemberek.

Az úgynevezett parti szűrűsű vízadókra is hatással vannak a klimatikus változások. Ebből a szempontból különösen Budapest vízellátása lehet érintett, hiszen az itt élő közel kétmillió ember vízellátását jelentős kiterjedésű parti szűrűsű vízadók biztosítják a Szentendrei- és a Csepel-sziget mentén. A Duna vízjárásának jövőbeli alakulása kihathat a parti szűrűsű vízadók működésére, az ívóvízellátás biztonságára. A klímamodellek eredményei alapján összegzőképpen elmondható, hogy a főváros vonatkozásában a jelenlegi vízigények mellett a következő harminc évben biztosítható a víztermelés. Meg kell említeni azonban, hogy egyes kutaknál kis valószínűséggel ugyan, de lehetnek üzemeltetési problémák a parti szűrűsű vízadóknál. Elsősorban azoknál a kutaknál, amelyeknél a csápok sekélyebb mélységben vannak kialakítva, és közelebb helyezkednek el a Dunához. Az üzemeltetést a Duna tartósan alacsony vízállása és a magas vízigény veszélyezteti. A rendszer érzékeny a tartósan alacsony vízállás fennállásának időtartamára és a megelőző hidrológiai körülményekre is.

Javasolt intézkedések és beavatkozások

A klímaváltozás és a szélsőséges időjárási viszonyok gyakoriságának növekedése komoly kihívásokat és kockázatokat jelent a hazai felszín alatti vízkészletek vonatkozásában. Bár a veszélyeztetettség mértékének megoszlása nem egyenletes, a kiterjedt adatgyűjtés és a modellezési előrejelzések alapján kimondható, hogy Magyarország egyetlen régiója sem nézheti közönyösen a klímaváltozás folyamatait. A mérési adatok alapján látható, hogy a klímaváltozás kedvezőtlen folyamatai gyakran közvetlenül kapcsolódnak a globális vízkörforgás, a hidrológiai ciklus elemeihez, de hatásuk messze túlmutat a vízgazdálkodás kérdéseire – élelmiszer-biztonsági, ökológiai, életminőségi, katasztrófavédelmi és gazdasági kihatásai is rendkívül összetettek.

Nem szükségszerű, hogy a vízgazdálkodás és a talajgazdálkodás egymással szorosan összekapcsolódó kérdé-

sei csak elszenvedői legyenek a klímaváltozás kedvezőtlen hatásainak. Tudatos klímaadaptációs stratégiák és intézkedések bevezetésével a kedvezőtlen hatások lokális és regionális léptékben tompíthatók. A mai korszerű adatgyűjtő eljárások óriási mennyiségű és globális lefedettségű adathalmazzal látják el a klímakutatókat, a felszín alatti vizekkel foglalkozó szakembereket és a döntéshozókat. Az adatokhoz és információkhoz való hozzáférés és azok információtartalmának korszerű adatbányászati és -értelmezési módszerekkel történő elemzése komoly előrelépést jelenthet a káros folyamatok és trendek megismerésében és az ok-okozati viszonyok feltárásában. A bemutatott hazai vízgazdálkodási rutinok és egyes szabályozások felülvizsgálata, áttekintése szükséges annak érdekében, hogy döntéseinkben szakmailag megalapozott és egyben klímatudatos szemlélet érvényesüljön.

Célunk lehet a méréseken alapuló, integrált vízgazdálkodás megteremtése, amelynek során a vízkárelhárítási és vízkészlet-gazdálkodási tevékenység az ökoszisztéma-szolgáltatások megtartásával vagy növelésével teljeskörűen el tudja látni feladatát.

A tapasztalt klimatikus változások jelentős hatással vannak Magyarországon felszín alatti vízkészleteire, amelyek fontos szerepet játszanak az ívóvízellátásban, a mezőgazdaságban és az ökoszisztémák fenntartásában. Az adaptációt és a rezilienciát elősegítő intézkedések és beavatkozások a felszín alatti vízkészletek védelme és fenntartható használata érdekében a következő területekre terjedhetnek ki.

1. *Fenntartható vízgazdálkodás és víztakarékos megoldások széles körű alkalmazása.* Az iparban, a mezőgazdaságban és a háztartásokban bevezetett víztakarékos technológiák és eljárások segítenek csökkenteni a vízfogyasztást, így a felszín alatti vízkészletek terhelését. Öntözési rendszerek modernizálása a mezőgazdaságban. Vízmegtakarításra irányuló fejlesztések alkalmazása a mezőgazdaságban. Községi vízhasználati tervek készítése. Az úgynevezett szürkevizek alkalmazása a háztartásokban és az iparban. A helyi közösségek szerepvállalása a vízkészletek fenntartható kezelésében.

2. *Nagyobb mértékű természetes vízviszatarlás és talajvédelem, valamint talajjavítás.* Felszín alatti vizektől függő vizes élőhelyek helyreállítása és fenntartása. Ezek az élőhelyek természetes módon segítenek a felszín alatti vízkészletek utánpótlásában és a vízminőség javításában. Talajmegőrzési és talajjavító programok beindítása. Az erózió csökkentése és a talaj víznyelő és vízmegtartó képességének javítása növényborítással, valamint a talaj szervesanyag-tartalmának növelésével.

3. *Felszín alatti vízkészletek mesterséges utánpótlása.* „Managed Aquifer Recharge” (MAR) projektek indítása tervezett módon több helyen az országban. Infiltrációs drének és nyelőkutak rendszerének kialakítása a kritikus területeken. Olyan komplex módon tervezett rendszerek létrehozása, amelyek segítik az esővíz beszívargását a talajba, elősegítve a felszín alatti vizek természetes pótló-

dását és tározódását. Kísérleti vagy helyi szinten olyan rendszerek bevezetése, amelyek célzottan juttatják be a vizet a talajba, például folyók vagy tavak víztöbbletének felhasználásával. Az ilyen jellegű projektek csökkenthetik a villámárvizek előfordulásának valószínűségét.

4. *Monitoringrendszerek fejlesztése. Mesterséges intelligencia alapú adatelemzés.* A vízszintek és a vízminőség folyamatos nyomon követése. Innovatív monitoringrendszerek kiépítése, amelyek segítenek megérteni a felszín alatti vizek állapotát, és lehetővé teszik a gyors beavatkozást a káros folyamatok megelőzésére. Klíma-modellek és hatásvizsgálatok szélesebb körű alkalmazása. A klímaváltozás várható hatásainak előrejelzése és elemzése mesterséges intelligencia alapú adatelemző eljárások segítségével, hogy hatékonyan lehessen tervezni a felszín alatti vízkészletekkel kapcsolatos alkalmazkodási intézkedéseket.

5. *Engedély- és bejelentési kötelezettség nélküli háztartási kutak helyzetének vízgazdálkodási szempontú rendezése.* Az engedély- és bejelentési kötelezettség nélküli háztartási kutak működése lehetetlenné teszi a felelős gazdálkodást a felszín alatti vízkészletekkel. A háztartási kutak igen jelentős mértékű, de nem mért víztermelése komoly veszélybe sodorhatja a felszín alatti vízkészletek hasznosítását. A háztartási kutak működése ráerősít a klimatikus változásokból fakadó negatív hatásokra, amelyek a sekély felszín alatti vízkészleteket érintik leginkább. Ezt a helyzetet valamilyen megnyugtató módon kezelni kell, a vízgazdálkodási aspektusok mellett a társadalmi és gazdasági értékelést is figyelembe véve. Becslések szerint az engedély és bejelentés nélküli kutak száma az egymilliót is elérheti. Az e kutak által kivett felszín alatti vízmennyiség nagysága elérheti az évi 200–300 millió m³ mennyiséget. Ilyen mértékű vízhasználat nem ismerete, figyelmen kívül hagyása szembemegy a víz-keretirányelv iránymutatásaival és alapelveivel.

6. *Ökoszisztéma-alapú alkalmazkodás.* Zöld infrastruktúra fejlesztése. Fásítás, városi zöldterületek bővítése és természetes vízmegtartó megoldások alkalmazása a városi hősziget-hatás mérséklésére és a vízkészletek védelmére. Agrár-környezetvédelmi programok. A fenntartható földhasználati gyakorlatok támogatása, amelyek hozzájárulnak a vízviisszatartáshoz és a talajvédelemhez. Telken belüli (magán és intézményi/ipari) vízviisszatartásra ösztönző program elindítása.

7. *Hálózati veszteségek csökkentése.* Az előregedett hazai víziközmű-rendszerben 20–30 százalékos hálózati veszteségek keletkeznek. Az infrastruktúra lépcsőzetes megújításával e veszteségérték nagysága 2040-ig 10 százalék alá csökkenthető.

A javasolt intézkedések összességében segítenek mérsékelni a klímaváltozás negatív hatásait a felszín alatti vízkészletekre, és biztosítják ezek hosszú távú fenntarthatóságát.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta.

Irodalomjegyzék

- Darabos E., Miklós R., Kovács P., Szűcs P. & Lénárt L. (2016) A büki karsztvízszelző rendszer adatainak vizsgálata a hegységben jelentkező klímaváltozás jellegének és következményeinek meghatározásához. In: Csicsék G., Kiss I. & Pincehelyi Z. É. (szerk.) XII. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia tanulmánykötete. PTE TTK Szentágotthai János Protestáns Szakkollégium, Pécs. pp. 72–81.
- Engloner A., Vargha M., Báldi A. & Józsa J. (szerk.) (2018) A Nemzeti Víztudományi Kutatási Program kihívásai és feladatai. MTA Ökológiai Kutatóközpont, Tihany.
- European Environmental Agency (EEA) (2019) Land Take: Indicator Assessment. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/land-take-3/assessment>
- Kovács, A., Perrochet, P., Darabos, E., Lénárt, L. & Szűcs, P. (2015) Well Hydrograph Analysis for the Characterisation of Flow Dynamics and Conduit Network Geometry in a Karstic Aquifer, Bükk Mountains, Hungary. *Journal of Hydrology*, Vol. 530. pp. 484–499. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.058>
- Madarász, T., Szűcs, P., Kovács, B., Lénárt, L., Fejes, Z., Kolencsikné Tóth, A., Székely, I., Kompár, L. & Gombkötő, I. (2015) Recent Trends and Activities in Hydrogeologic Research at the University of Miskolc, Hungary. *Central European Geology*, Vol. 58. No. 1–2. pp. 171–185. <https://doi.org/10.1556/24.58.2015.1-2.11>
- Miklós R., Lénárt L., Darabos E., Kovács A., Czesznak L., Peczedér Á. & Szűcs P. (2021) A Bükk hegység karsztvízkészleteinek feltárása és hasznosítása. *Hidrológiai Közlöny*, Vol. 101. No. 2. pp. 31–43.
- Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) (2021) Vízügytő-gazdálkodási terv 3. OVF, Budapest.
- Szűcs P. (2017) Felszín alatti vizek. A hidrológiai ciklus láthatatlan része. *Magyar Tudomány*, Vol. 178. No. 10. pp. 1184–1197.
- Szűcs, P., Madarász, T. & Civan, F. (2009) Remediating Over-Produced and Contaminated Aquifers by Artificial Recharge from Surface Waters. *Environmental Modeling and Assessment*, Vol. 14. No. 4. pp. 511–520. <https://doi.org/10.1007/s10666-008-9156-4>
- Szűcs P. & Mikita V. (2016) Felszín alatti vízkészleteink és a hidrogeológiai kutatások helyzete hazánkban. *Hidrológiai Közlöny*, Vol. 96. No. 1. pp. 7–20.
- Szűcs P., Madarász T. & Dobos E. (2024a) A víz- és talajgazdálkodás szerepe a klímavédelemben. In: Veresné Somosi M. & Sikos T. T. (szerk.) A fenntarthatóság holisztikus megközelítésben. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Szűcs, P., Dobróka, M., Turai, E., Szarka, L., Ilyés, Cs., Hamdy Eid, M. & Szabó, N. P. (2024b) Combined inversion and statistical workflow for advanced temporal analysis of the Nile River's long term water level records. *Journal of Hydrology*, Vol. 630. Article No. 130693. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130693>