

TALAJVÍZ ÉS A GYÖKÉRZÓNA KAPCSOLATÁNAK VIZSGÁLATA PÜSPÖKLADÁNY-FARKASSZIGETI MINTATERÜLETEN A 2020–2023 KÖZÖTTI IDŐSZAKBAN

Szabó András¹, Gribovszki Zoltán², Szolgay Ján³, Kalicz Péter² és Bolla Bence¹

¹Soproni Egyetem, Erdészeti Tudományos Intézet, Ökológiai és Erdőművelési Osztály

²Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

³Szlovák Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Táj- és Vízgazdálkodási Tanszék, Pozsony, Szlovákia

Kivonat

Az erdei vegetáció kifejezetten érzékeny a gyors környezeti változásokkal szemben. Az alföldi erdőállományok esetében ilyen változások lehetnek a több évtizede zajló talajvízszint-süllyedés, illetve az aszályos időszakok hosszának növekedése. Az említett negatív hatásoknak különösen kitétt püspökladány-farkasszigeti mintaterületünkön négy év azonos időszakában vizsgáltuk az erdőállomány gyökérzete és a talajvízszint közötti kapcsolatot nagy időbeli felbontású talajvízszint és meteorológiai adatokra alapozva. Eredményeink alapján megállapítható, hogy 2021 vegetációs időszakának végére részlegesen, a 2022-es év azonos időszakára pedig teljesen megszűnt a kapcsolat a talajvíz és a gyökérzet közt. Pozitív irányú változást 2023-ban sem tapasztaltunk. Amennyiben ez az állapot hosszabb távon is fennmarad, az kérdéseket vet fel a vizsgált erdőállomány fenntarthatóságával kapcsolatban.

Kulcsszavak: talajvíz, gyökérzet, vízhiány, fenntartható erdőgazdálkodás

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN GROUNDWATER AND THE ROOT ZONE IN THE PÜSPÖKLADÁNY-FARKASSZIGET STUDY SITE DURING THE PERIOD 2020-2023

Abstract

Forest vegetation is particularly sensitive to rapid environmental changes. In the case of forest stands on the Great Hungarian Plain, such changes may include the decades-long groundwater level decrease and the increasing length of drought periods. We have investigated the relationship between the root system of the forest stand and the groundwater level over four years at our study site at Püspökladány-Farkassziget, which is particularly exposed to aforementioned negative impacts, using high temporal resolution groundwater level and meteorological data. Our results show that by the end of the 2021 growing season, the connection between groundwater and the root system was partially, and by the same period in 2022, it was completely lost. We did not observe any positive changes in 2023. If this situation persists in the long term, it raises questions about the sustainability of the forest stand under investigation.

Keywords: groundwater, root system, water scarcity, sustainable forest management

Levelező szerző/Correspondence:

Szabó András, 1277 Budapest, Pf: 17.; e-mail: szabo.andras@uni-sopron.hu

BEVEZETÉS

Bár a klímaváltozás negatív hatásai a teljes ökoszisztémát érintik, az erdei vegetáció kifejezetten sérülékeny a gyorsan lezajló meteorológiai változásokkal szemben (Brodrribb et al. 2020).

A lezajló folyamatok részeként az éghajlati tényezők globális léptékű megváltozása nagy mértékben és jellemzően negatív módon befolyásolja a hozzáférhető talajvízkészletek mennyiségét és minőségét is (Atawneh et al. 2021), következésképp ezen változások vizsgálata a témakörhöz kapcsolódó kutatások középpontjában áll világszerte (Andualem et al. 2021, Lee et al. 2006, Manna et al. 2016, Obuobie et al. 2012, Szabó et al. 2022, Yadav et al. 2023). Ennek ellenére a növényzet és felszín alatti vízrendszerek közötti kölcsönhatásokra vonatkozó specifikus ismereteink nemcsak regionális, de globális szinten is hiányosak (Tóth 1963).

A talajvízkészletek csökkenése különösen érzékenyen érinti az alföldi erdőgazdálkodókat, mivel a térség kedvezőtlen csapadékviszonyai miatt a térség erdeinek a száraz időszakok alatt vízigényük kielégítése érdekében a talajvízre, mint kiegészítő vízforrásra, kell támaszkodniuk (Ijjász 1939, Magyar 1961), amit Járó (1981) eredményei is megerősítenek. A talajvíz említett szerepe különösen fontos olyan területeken, ahol egyéb – jellemzően talajtani – tényezők is negatív hatást gyakorolnak az adott termőhely hidrológiai viszonyaira. A csapadékmentes időszakok hosszának várható növekedése miatt az ilyen erdőállományok számára a talajvízhez való hozzáférése egyre fontosabbá válik majd a jövőben.

Az erdők és a talajvíz közti lokális kapcsolat megfigyelésének hatékony módja a talajvíz rövid és hosszú távú dinamikájának megfigyelése, ami meteorológiai, geológiai és biológiai tényezők eredőjeként egyértelműen tükrözi az adott terület hidrológia viszonyait, ideértve annak egyensúlyát vagy az egyensúlyi állapot megbomlását is. Ennek vizsgálatára kifejezetten alkalmas a napi talajvízszint-ingadozás és az azon alapuló White-módszer (White 1932), valamint továbbfejlesztett változatainak (Fan et al. 2014, Gribovszki et al. 2010, Hou et al. 2023) használata, amelyeket egyszerűségüknek és megbízhatóságuknak köszönhetően rendkívül széles körben alkalmazták az erdők talajvíz felvételének számítására.

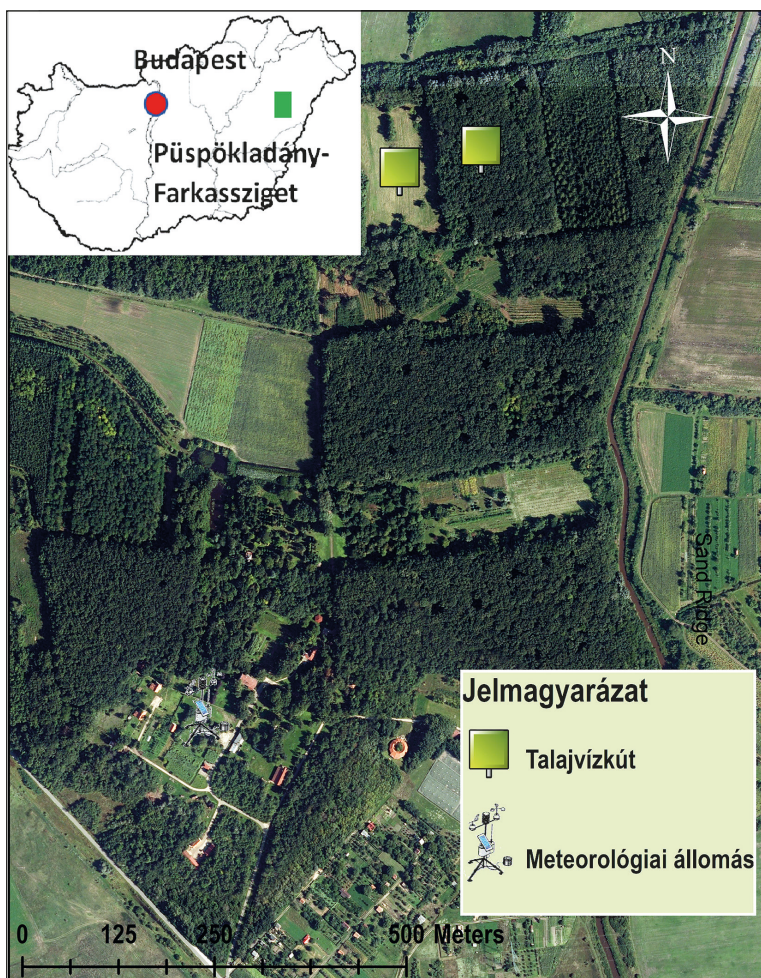
Az elmúlt időszak nagyon száraz és meleg időjárása rendkívül kedvezőtlen hatással volt a szóban forgó erdőállományokra (Bolla et al. 2024), ugyanakkor az kevésbé ismert, hogy ezek a hatások mennyiben változtatták meg az erdők és a talajvíz közti kapcsolat jellegét.

Jelen munkánkban ezen kérdés megválaszolását tűztük ki célunkként a kedvezőtlen termőhelyi adottságokkal rendelkező Püspökladány-Farkasszigeten található mintaterület talajvíz adatainak elemzésével.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A mintaterület bemutatása

A mintaterület a Tiszántúl középső részén helyezkedik el a Püspökladány melletti Farkasszigeten (1. ábra). A terület éghajlata kontinentális, az éves csapadékmennyiség 340 és 913 mm, az évi középhőmérséklet 9,8 és 12,7 °C között ingadozott az 1991 és 2020 közti időszakban. A terület geológiai szemponttól alluviális üledékkel feltöltött síkság.



1. ábra: A mintaterület elhelyezkedése
Figure 1: Location of the study site

A mintaterület egy kaszálóként hasznosított kontroll mintapontból és egy 95 éves kocsányos tölgy állományban található erdei mintapontból áll. A mintapontokon talajvízszint-monitoring kutak kerültek kialakításra 2014 augusztusában, melyekben a furatokat 5 cm átmérőjű alsó részén szűrőzött PVC csővel béleltük. A talajvízszintet a Dataqua Kft., DA-LUB 222 típusú nyomássonzái segítségével mértük 15 percnként, 1 mm-es pontossággal. A kutak fúrásával egy időben talajmintavétel is történt: A felső 1 m-en 20 centiméterenként, majd ez alatt 50 centiméterenként. A talajmintákból a talajtextúra típusa Sík-féle higroszkóposági érték (hy_1) alapján került meghatározásra.

Az alapvető meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, páratartalom, csapadék, szél sebesség, szélirány, globálsugárzás) egy közeli meteorológiai állomáson a Boreas Kft. (AgroMet) ECO logger 2 típusú adatgyűjtőjével kerültek rögzítésre 10 percnként.

A felhasznált meteorológiai adatokat a SOE ERTI által üzemeltetett közeli meteorológiai állomás szolgáltatta. (Az adatok elérhetőek az eforest.hu honlapon.)

A mért adatok alapján a potenciális evapotranszpiráció a Duna–Posza–Varga–Haszonits módszer (Varga–Haszonits et al. 2014, Varga–Haszonits & Varga 2015), az ariditási index pedig Budyko (1974) egyenlete alapján került kiszámításra. A mintapontok főbb adatait az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A mintapontok fő paramétereit
Table 1: Main parameters of the sample points

Mintapont típusa	Koordináták	Magasság (mBf.)	Kúttalp mélysége (mBf.)	Szűrőzés mélysége (mBf.)	Átlagos vízmélység (felszíntől, m)
Kocsányos tölgy	É 47°20'29.48" K 21°05'42.16"	85,78	75,25	75,78–74,78	–7,92 (+/–0,52)
Kontroll	É 47°20'26.29" K 21°05'37.46"	85,83	76,80	76,3–75,3	–6,78 (+/–0,33)
Meteorológiai állomás	É 47°20'04.53" K 21°05'23.70"	88,70			

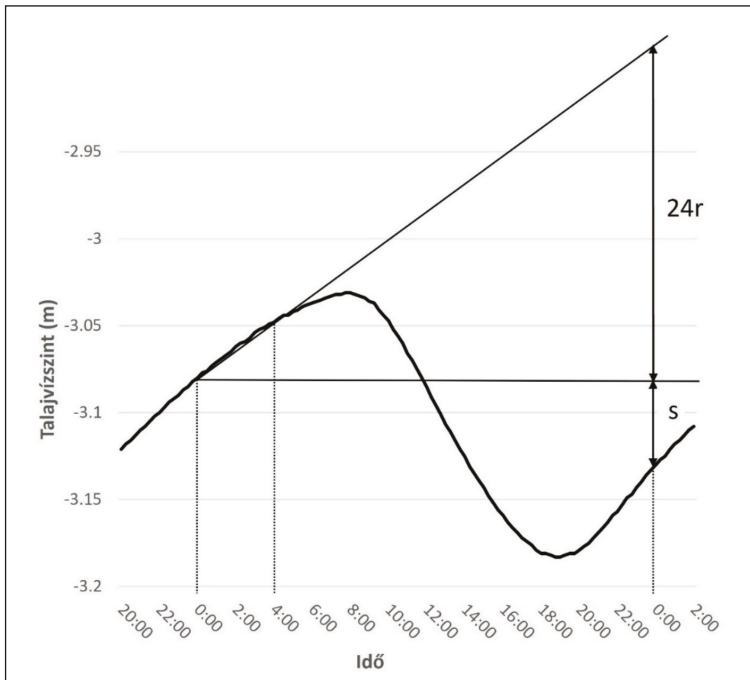
A mintaterület közelében, 280 méterre egy belvíz leeresztésére szolgáló csatorna található. Mivel ennek legnagyobb mélysége a területen 83,2 méter (tszf), az a monitoring pontokon nem fejthet ki leszívó hatást.

Talajvíz evapotranszpiráció számítása a White-módszer alapján

A talajvíz-evapotranszpiráció napi mértéke a White-módszer segítségével került meghatározásra (Loheide et al. 2005, White 1932). A módszer feltételezi, hogy a késő éjjeli, kora hajnali időszakban (0-4 óra között) az evapotranszpiráció elhanyagolható mértékű. Ennek következtében a talajvízállás növekedési rátája ebben az időszakban megegyezik a talajvíz utánpótlódásával. A görbéhez ebben az időszakban húzott egyenes iránytangense (r) tehát megmutatja az egységnyi idő (pl.: 1 óra) alatti talajvíz-utánpótlódás mértékét. Ezt a rátát 24 órán keresztül meghosszabbítva megkapjuk a napi utánpótlódás mértékét $24(r)$. Ehhez hozzáadva a 24 órás időszak alatt bekövetkező talajvízszint-változást (s érték), illetve az összeget beszorozva a talajtextúrától függő S_y (fajlagos hozam) változóval megkapjuk a talajvízfelvétel mértékét mm-ben. A módszert a 2. ábra mutatja be szemléletesen.

Az adatok elemzése során azonban megfigyelhető volt, hogy a napi feltöltődés számos esetben nem éjféltkor, hanem későbbi időpontban (esetenként jelentős késéssel) indult el. Ezért a számítási módszert úgy módosítottuk, hogy minden nap a maximális növekedési rátával jellemezhető 4 órás időszakot vettük a visszatöltődés számításának alapjául.

Mivel egy sajnálatos műszaki meghibásodás miatt a 2022-es év vegetációs időszakában csak a július 20-a után mért adatok tekinthetők megbízhatónak, az elemzésre minden évben csak az ez után mért adatokat használtuk fel az összehasonlítás érdekében.



2. ábra: A White módszer sematikus ábrázolása (Gribovszki et al. 2010 alapján)

Figure 2: Schematic representation of the White method (based on Gribovszki et al. 2010)

A fentiek ismeretében a talajvízből történő párolgást mm-ben a következőképp számíthatjuk ki:

$$(1) ET_{gw} = S_y(24r + s)$$

ahol:

ET_{gw} – a napi talajvíz evapotranszspiráció (mm),

S_y – a talajra jellemző fajlagos hozam (dimenzió nélküli),

r – a vízutánpótlás hatására bekövetkező elméleti talajvízszint emelkedés óránként (mm)

s – a két egymást követő nap azonos időpontja közti talajvízszint különbség mértéke (mm)

EREDMÉNYEK

Meteorológiai paraméterek

A 2022-es rendkívül súlyos aszály Püspökladány térségét is érintette, a vizsgált évek közül ez volt a legszárazabb (2. táblázat.), de az átlagos csapadékviszonyokhoz képest már a megelőző, 2021-es év is igen száraznak számított. Ezzel egyidőben a potenciális evapotranszspiráció értéke is jelentősen megnőtt, így az említett két év feltételezhetően jelentős mértékben csökkentette a talajban található vízkészletet.

2. táblázat: A vizsgált évek főbb meteorológiai jellemzői (hidrológiai év)
Table 2: Main meteorological parameters of the investigated years (hydrological year)

Év	Hőmérséklet (°C)	Csapadék (mm)	Potenciális evapotranspiráció (mm) ¹	Ariditási index ²
2018	11,8	504,9	951,4	1,9
2019	11,7	439,5	897,2	2,0
2020	11,8	627,3	877,4	1,4
2021	11,3	300,2	916,9	3,1
2022	11,7	288,2	1069,5	3,7
2023	11,6	501,6	890,1	1,8

¹ A potenciális evapotranspiráció számítása a Dunai–Posza–Varga–Haszonits módszer (Varga-Haszonits et al. 2014; Varga-Haszonits & Varga 2015) alapján történt

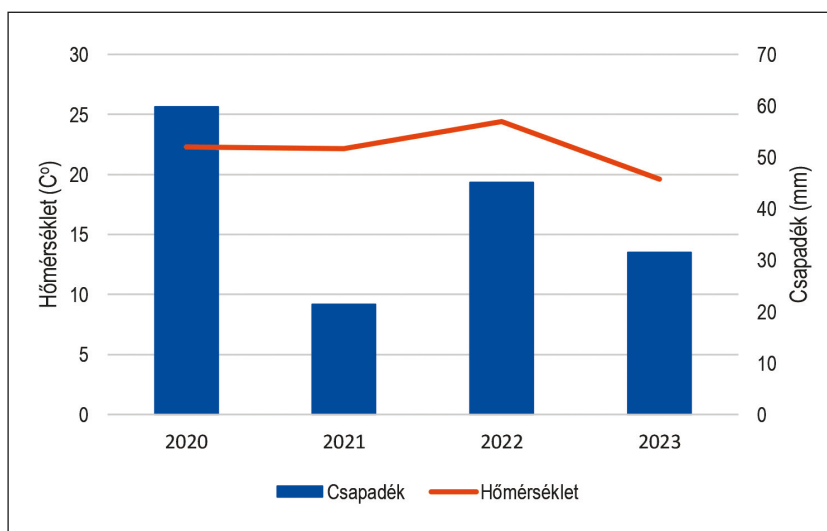
² Ariditási index számítása Budyko (1974) alapján: Ariditási index = PET / Csapadék

¹ The calculation of potential evapotranspiration was performed based on the Dunai–Posza–Varga–Haszonits method (Varga-Haszonits et al. 2014, Varga-Haszonits & Varga 2015)

² Aridity index calculation was based on Budyko (1974): Aridity index = PET / Precipitation

Az általunk vizsgált időszakot nézve (minden év július–augusztusa) látható, hogy a 2021-es év jelentős mértékben alatta maradt az 2022-es évben mérteknek is (21,4, illetve 45,1 mm, 3. ábra). Ezzel párhuzamosan az átlag hőmérséklet adatokban egyértelmű emelkedést tapasztalhattunk 2020 és 2022 közt (22,3 °C-ról 24,4 °C-ra), amit csökkenés követett 2023-ban (19,6 °C).

A fent bemutatott meteorológiai adatok alapján a vizsgált időszakban a 2022-es évben várhatnánk a legmagasabb párolgási értékeket.

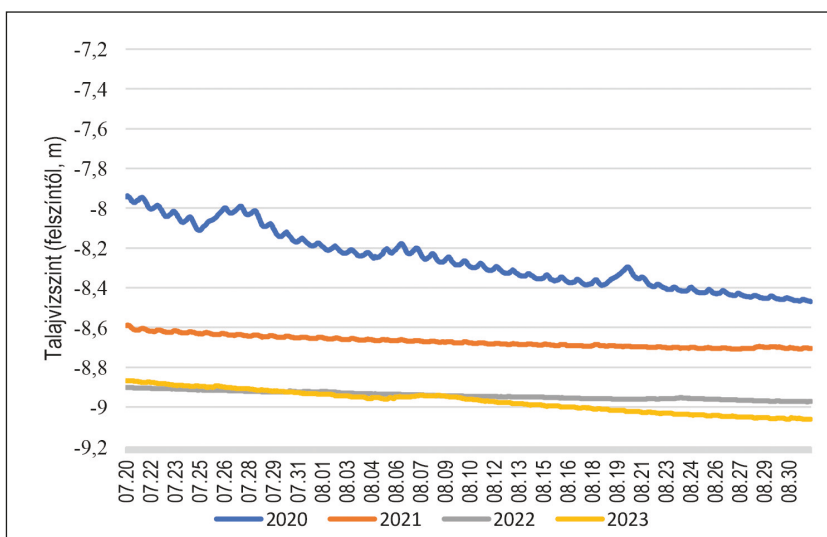


3. ábra: A megfigyelt időszak (07.20–08.30.) hőmérséklet és csapadékviszonyai évenkénti bontásban

Figure 3: Temperature and precipitation of the observed period (July 20–August 30) by year

A talajvízszint-dinamika általános jellemzése

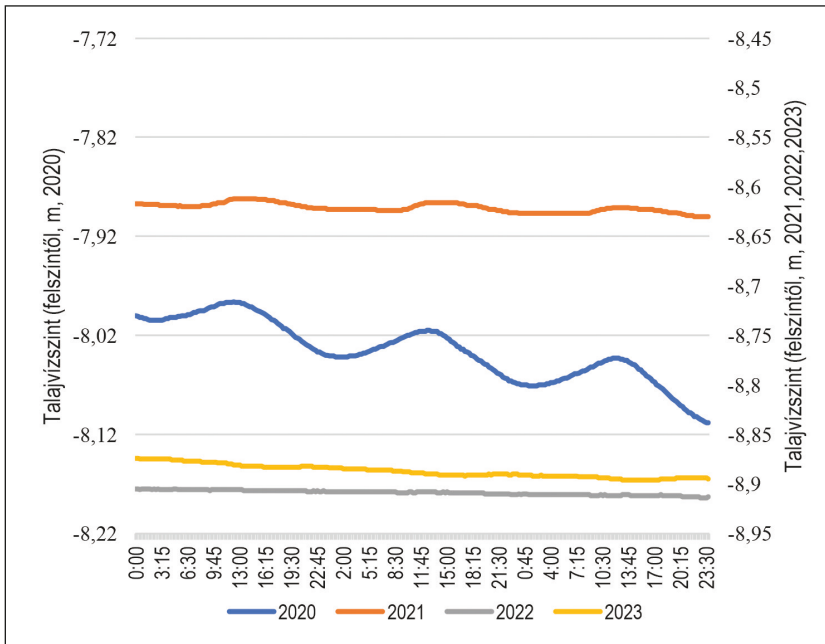
A talajvíz esetében az egymást követő években a vízszintsüllyedés meghatározó trendnek tekinthető. Ez alól kivételt jelentett a 2022 és 2023-as év, melyek közt nem volt tapasztalható jelentős különbség. 2020-ban 8 m-en; 2021-ben 8,6 m-en; 2022-ben és 2023-ban közelítőleg 8,9 m-en volt a talajvíz szintje a megfigyelési időszak elején. Az időszak végére, ugyanakkor itt is kialakult 9 cm különbség a 2022-es és 2023-as adatsor közt (8,97, illetve 9,06 m). A vizsgált négy év alatt, tehát nagyjából 1 m talajvízszint-süllyedés volt megfigyelhető, aminek semmiképp nem lehet egyedüli oka a 2022-ben tapasztalt rendkívüli szárazság tekintve, hogy egyrészt a területen több évtizede trend jellegű talajvízszint-süllyedés tapasztalható, másrészt már a 2020-as és 2021-es évek közt is igen jelentős, nagyjából 60 cm-es süllyedést mérhettünk (4. ábra.).



4. ábra: A megfigyelt időszak (07.20–08.30.) talajvízszint adatai évenkénti bontásban
Figure 4: Groundwater level data of the observed period (July 20–August 30) by year

Az említett évek közti további jelentős különbség, hogy míg 2020-ban 0,5 m-t süllyedt a talajvíz az adott időszakban, addig a következő években a maximális vízszintsüllyedés mértéke mindösszesen 19 cm volt (2023). Szintén jelentős változás, hogy a 2020-ban még megfigyelhető napi talajvíz ingadozás is jelentősen mérséklődött 2021-re, míg az ezt követő években ez teljes mértékben megszűnt (5. ábra).

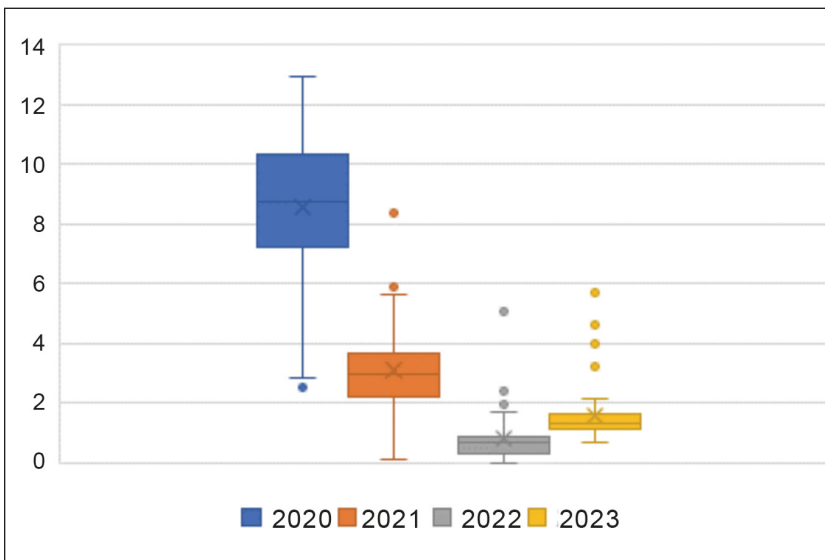
Mindezen különbségek egyöntetűen arra utalnak, hogy a megfigyelt hidrológiai folyamatok már 2020 és 2021 közt is jelentősen megváltoztak.



5. ábra: Napi talajvíz ingadozás az egyes években 3 egymást követő csapadéktelen napon (07.22.–07.25.)

Figure 5: Daily groundwater fluctuations in individual years on 3 consecutive rainless days (July 22–25)

A talajvíz-evapotranszpiráció változásának jellemzése



6. ábra: Napi talajvíz felvétel az egyes években a vizsgált időszakban (07.20.–08.31.)

Figure 6: Daily groundwater uptake in individual years during the observed period (July 20–August 31)

A korábbi megállapítással összhangban a talajvíz-evapotranszpirációs adatok is a 2020-as és az utána következő évek hidrológiai folyamatainak alapvető különbségére utalnak (6. ábra). 2020-2022 közt egyértelműen csökkenő trendet tapasztalhattunk, ami a 2022-es évet tekintve ellentétes a fent bemutatott meteorológiai paraméterek alapján vártakkal. Ez is egyértelműen arra utal, hogy az erdőállományok gyökérszóna és a talajvíz közti kapcsolat megszakadt.

DISZKUSSZIÓ

A klimatikus viszonyok változása miatt az egész régióra jellemző az erdőállományok egészségi állapotának romlása (Hlásny et al. 2014). A folyamat része, illetve azt kiegészíti az Alföldön több évtizede megfigyelhető talajvízszint-süllyedés. Ennek okairól hosszú ideje tart a szakmai vita. A szerzők éghajlati és antropogén (pl.: talajvízkivétel, erdősítés) okokat egyaránt feltételeznek a jelenség hátterében (Major 1993, Szilágyi & Vörösmarty 1993). Jelen kutatásunk, az erdő és talajvíz közötti lokális kölcsönhatás változásainak vizsgálatára, valamint a White-módszer alkalmazására korlátozódott, ami nem tette lehetővé az antropogén hatások vagy a hosszú távú meteorológiai tényezők vizsgálatát és számszerűsítését.

Az Alföld erdőállományai szénmegkötő hatásuk mellett több olyan pozitív hatást is kifejtenek, melyek lokálisan igen nagy jelentőséggel bírnak. Ilyenek a környezet hűtése (Li et al. 2015) a felső talajréteg kiszáradásának mérséklése (Novák 2022), vagy felső talajrétegek sótartalmának csökkenése (Hbirkou et al. 2011), ami a szikesedéssel érintett régiókban lehet különösen fontos.

Ezen pozitív hatások ökológiai „ára”, hogy a szóban forgó erdőállományok szükségszerűen az talajvízre, mint pótlólagos vízforrásra támaszkodnak a hosszabb csapadékmentes időszakok alatt, mivel a területen lehulló csapadék az esetek többségében nem elegendő az erdei állományok vízigényének fedezéséhez (Ijjász 1939, Magyar 1961).

A talajvíz és a gyökérszóna közti kapcsolat kifejezetten fontos az olyan termőhelyeken, ahol a talaj vízháztartási tulajdonságai kedvezőtlenek. Mivel a klímaváltozás hatására a csapadékeloszlás az egész Kárpát medencében szélsőséges irányba tolódik el (Bartholy & Pongrácz 2007), várhatóan a talajvíz, mint pótlólagos vízforrás szerepe is egyre fontosabbá válik majd.

A bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy 2021-től a mintaterület hidrológiai folyamataiban jelentős változás állt be, mind az általunk vizsgált 2020-as évhez, mind a korábban Csáfordi et al. (2017) által vizsgált időszakhoz képest. 2021-től kezdődően a talajvíz vegetatív időszakokban megfigyelhető süllyedése kisebb mértékű, a napi, fotoszintézishez köthető talajvíz ingadozás kevésbé kifejezett, a későbbi években (2022, 2023) pedig teljesen megszűnik, következésképpen az ebből számított talajvíz-transzspirációs értékek is jelentősen alacsonyabbak, mint a megelőző évben. A leírt folyamatok mindegyikét magyarázza feltételezésünk, miszerint a folyamatos talajvízszint-csökkenés hatására a 2021-es év vegetációs időszakának végére részlegesen, ez után pedig teljesen megszűnt a kapcsolat az erdőállomány gyökérszónája és a talajvíz közt. Ezt támasztja alá, hogy a kritikus években a talajvíz megközelítette a 9 m-es mélységet, miközben a rendelkezésre álló szakirodalom alapján (Csiha & Keserű 2014, Hruska et al. 1999, Mauer et al. 2017, Tatarinov et al. 2008, Thomas & Hartmann 1998) a gyökérszóna fő tömege ennél jóval sekélyebben helyezkedik el.

A megfigyelt folyamatok egészségi állapotra gyakorolt negatív hatásai már egyértelműen mutatkoztak a 2022-es aszály után is (Bolla et al. 2024), így értelemszerűen felmerül a vizsgált erdőáll-



mány fenntarthatóságának kérdése is. A fák fiziológiai folyamataik szabályozásával vagy vízfelvételi stratégiájuk megváltoztatásával bizonyos mértékig képesek alkalmazkodni a hosszan tartó száraz periódusokhoz (Barbeta et al. 2015, Skiadaresis et al. 2021) ugyanakkor ennek határait igen nehéz megbecsülni adott termőhelyi viszonyok közt. Az alkalmazkodás további lehetőségét jelentheti az őshonos fajok szárazságtűrő genotípusainak kutatása (Ábri et al. 2022, Benke et al. 2022), illetve a mesterséges vízutánpótlás (Szabó et al. 2020).

KONKLÚZIÓ

Az Alföldi erdőállományok hosszútávú fennmaradása nagy mértékben függ a talajvíztől, mely a fák számára pótlólagos vízforrásként szolgál a hosszú csapadéktelen időszakok alatt. Jelen esettanulmányunkban a 2022-es rendkívüli aszály után, a vegetációs időszakok végén, nagy időbeli felbontással mért talajvíz adatokra támaszkodva vizsgáltuk az erdő és a talajvíz közti kapcsolatot egy erdei talajvíz monitoring ponton, a White-módszer módosított változatának segítségével. A megfigyelt napi léptékű talajvízszint-ingadozás és a számított talajvízfelvétel alapján megállapítható, hogy a talajvízsüllyedés hatására a gyökérzet 2021-ben – azaz már az aszály előtti időszakban – részlegesen, majd 2022-ben teljesen elszakadt a talajvíztől. Következtetésünket a vonatkozó szakirodalom is megerősíti. Amennyiben a talajvíz süllyedése a korábbi időszakhoz hasonlóan folytatódik, a leírt folyamat megkérdőjelezheti a vizsgált erdőállomány hosszútávú fenntarthatóságát.

Az egyre szélsőségesebb csapadékeloszlási trend alapján a jövőben a talajvízhez való hozzáférés, vagy annak hiánya, még kritikusabb tényező lesz az Alföld erdeinek vízellátásában. Annak érdekében, hogy a szóban forgó erdőállományok továbbra is biztosítani tudják számunkra a leírt ökológiai szolgáltatásokat, a téma további kutatása mellett kiemelten fontos lenne az olyan célzott emberi beavatkozások lehetőségeinek vizsgálata is, mint például a klímaváltozás hatásainak ellenállóbb genotípusok alkalmazása, vagy a talajvízkészletek mesterséges utánpótlása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikáció a TKP2021-NKTA-43 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg. A kutatást a 143972SNN azonosítószámú OTKA pályázat támogatta.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Ábri T., Keserű Z., Borovics A., Rédei K. & Csajbók J. 2022: Comparison of Juvenile, Drought Tolerant Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Clones with Regard to Plant Physiology and Growth Characteristics in Eastern Hungary: Early Evaluation. *Forests* 13(2): 292. <https://doi.org/10.3390/f13020292>
- Barbeta A., Mejía-Chang M., Ogaya R., Voltas J., Dawson T.E. & Peñuelas J. 2015: The Combined Effects of a Long-Term Experimental Drought and an Extreme Drought on the Use of Plant-Water Sources in a Mediterranean Forest. *Global Change Biology* 21(3): 1213–25. <https://doi.org/10.1111/gcb.12785>

- Andualet T.G., Demeke G.G., Ahmed I., Dar M.A. & Yibeltal M. 2021: Groundwater Recharge Estimation Using Empirical Methods from Rainfall and Streamflow Records. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 37: 100917. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100917>
- Atawneh D.A., Cartwright N. & Bertone E. 2021: Climate Change and Its Impact on the Projected Values of Groundwater Recharge: A Review. *Journal of Hydrology* 601: 126602. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126602>
- Bartholy J. & Pongrácz R. 2007: Regional Analysis of Extreme Temperature and Precipitation Indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change* 57(1): 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.002>
- Benke A., Köbölkuti Z.A., Cseke K., Borovics A. & Tóth E.G. 2022: Szárazságtűrésben szerepet játszó SNP-k azonosítása kocsánytalan tölgy populációkban: alapkutatási eredmények a fenntartható tölgygazdálkodásért. *Erdészettudományi Közlemények* 12(2): 77–90. <https://doi.org/10.17164/EK.2022.05>
- Bolla B., Manninger M., Molnár T., Horváth B., Szolgay J., Gribovszki Z., Kalicz P. & Szabó A. 2024: Evaluation of the Compound Effects of the 2022 Drought and Heatwave on Selected Forest Monitoring Sites in Hungary in Relation to Its Multi-Year Drought Legacy. *Forests* 15(6): 941. <https://doi.org/10.3390/f15060941>
- Brodrribb T.J., Powers J., Cochard H. & Choat B. 2020: Hanging by a Thread? *Forests and Drought*. *Science* 368(6488): 261–66. <https://doi.org/10.1126/science.aat7631>
- Budyko M.I. 1974: *Climate of Life*. New York and London, Academic Press.
- Csáfordi P., Szabó A., Balog K., Gribovszki Z., Bidló A. & Tóth T. 2017: Factors Controlling the Daily Change in Groundwater Level during the Growing Season on the Great Hungarian Plain: A Statistical Approach. *Environmental Earth Sciences* 76: 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7002-1>
- Csiha I. & Keserű Z. 2014: Szárazodó homoki termőhelyen álló idős fák gyökérzetének vizsgálata. *Erdészettudományi Közlemények* 4(2): 33–42. Teljes szöveg
- Fan J., Oestergaard K.T., Guyot A. & Lockington D.A. 2014: Estimating Groundwater Recharge and Evapotranspiration from Water Table Fluctuations under Three Vegetation Covers in a Coastal Sandy Aquifer of Subtropical Australia. *Journal of Hydrology* 519: 1120–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.039>
- Skiadaresis G., Schwarz J., Stahl K. & Bauhus J. 2021: Groundwater Extraction Reduces Tree Vitality, Growth and Xylem Hydraulic Capacity in *Quercus robur* during and after Drought Events. *Scientific Reports* 11(1): 5149–5149. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84322-6>
- Gribovszki Z., Szilágyi J. & Kalicz P. 2010: Diurnal Fluctuations in Shallow Groundwater Levels and Streamflow Rates and Their Interpretation – A Review. *Journal of Hydrology* 385(1–4): 371–83. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.001>
- Hbirkou C., Martius C., Khamzina A., Lamers J.P.A., Welp G. & Amelung W. 2011: Reducing Topsoil Salinity and Raising Carbon Stocks through Afforestation in Khorezm, Uzbekistan. *Journal of Arid Environments* 75(2): 146–55. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.09.018>
- Hlásny T., Mátyás C., Seidl R., Kulla L., Merganičová K., Trombik J., Dobor L., Barcza Z. & Konôpka B. 2014: Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Central European Forestry Journal* 60(1): 5–18.
- Hou X., Hui Y., Cao J., Feng W. & Zhang Y. 2023: A Review of Advances in Groundwater Evapotranspiration Research. *Water* 15: 969. <https://doi.org/10.3390/w15050969>
- Hruska J., Čermák J. & Šustek S. 1999: Mapping Tree Root Systems with Ground-Penetrating Radar. *Tree Physiology* 19(2): 125–30. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125>
- Ijjász E. 1939: A fatenyészet és az altalajvíz, különös tekintettel a nagyalföldi viszonyokra. *Erdészeti kísérletek* 42(1): 107.
- Járó Z. 1981: A hazai erdők vízfogyasztása. *Agrártudományi közlemények: A magyar tudományos akadémia agrártudományok osztályának közleményei* 40(2–4): 353–56.
- Lee C.-H., Chen W.-P. & Lee R.-H. 2006: Estimation of Groundwater Recharge Using Water Balance Coupled with Base-Flow-Record Estimation and Stable-Base-Flow Analysis. *Environmental Geology* 51(1): 73–82. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0305-2>



- Li Y., Zhao M., Motesharrei S., Mu Q., Kalnay E. & Li S. 2015: Local Cooling and Warming Effects of Forests Based on Satellite Observations. *Nature Communications* 6(1): 6603. <https://doi.org/10.1038/ncomms7603>
- Loheide S.P., Butler Jr J.J. & Gorelick S.M. 2005: Estimation of Groundwater Consumption by Phreatophytes Using Diurnal Water Table Fluctuations: A Saturated-Unsaturated Flow Assessment. *Water resources research* 41(7). <https://doi.org/10.1029/2005WR003942>
- Magyar P. 1961: Alföldfásítás. I–II. Budapest. Akadémiai Kiadó.
- Major P. 1993: A Nagy-Alföld talajvízháztartása. *Hidrológia Közlöny* 73(1): 40–43.
- Manna F., Cherry J.A., McWhorter D.B. & Parker B.L. 2016: Groundwater Recharge Assessment in an Upland Sandstone Aquifer of Southern California. *Journal of Hydrology* 541: 787–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.039>
- Mauer O., Houšková K. & Mikita T. 2017: The Root System of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) at the Margins of Regenerated Stands. *Journal of Forest Science* 63(1): 22–33. <https://doi.org/10.17221/85/2016-JFS>
- Novák T. 2022: Afforestation Affects Vertical Distribution of Basic Soil Characteristics and Taxonomic Status of Sodic Soils. *Plant, Soil and Environment* 68(5): 245–52. <https://doi.org/10.17221/53/2022-PSE>
- Obuobie E., Diekkruieger B., Agyekum W. & Agodzo S. 2012: Groundwater Level Monitoring and Recharge Estimation in the White Volta River Basin of Ghana. *Journal of African Earth Sciences* 71–72: 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.06.005>
- Szabó A., Gribovszki Z., Kalicz P., Szolgay J. & Bolla B. 2022: The Soil Moisture Regime and Groundwater Recharge in Aged Forests in the Sand Ridge Region of Hungary after a Decline in the Groundwater Level: An Experimental Case Study. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 70(3): 308–320. <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0019>
- Szabó Z., Tahy A. & Mádl-Szőnyi J. 2020: A célzott felszín alatti vizutánpótlás nemzetközi trendjei és hazai alkalmazási lehetőségei (Managed Aquifer Recharge – State of the Art, Needs and Possibilities in Hungary). *Hidrológiai Közlöny* 100(4): 40–51.
- Szilágyi J. & Vörösmarty Ch. 1993: A Duna–Tisza közti talajvízszint-süllyedések okainak vizsgálata. *Vízügyi Közlemények* 75(3): 280–94.
- Tatarinov F., Urban J. & Čermák J. 2008: Application of 'Clump Technique' for Root System Studies of *Quercus robur* and *Fraxinus excelsior*. *Forest Ecology and Management* 255(3–4): 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.022>
- Thomas F.M. & Hartmann G. 1998: Tree Rooting Patterns and Soil Water Relations of Healthy and Damaged Stands of Mature Oak (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* [Matt.] Liebl.). *Plant and Soil* 203: 145–58. <https://doi.org/10.1023/A:1004305410905>
- Tóth J. 1963: A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. *Journal of Geophysical Research* 68(16): 4795–4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>
- Varga-Haszonits Z., Tar K., Lantos Z. & Varga Z. 2015: Párolgási formulák összehasonlítása a mosonmagyaróvári meteorológiai állomás adatai alapján. *Növénytermelés* 64(3): 77–96.
- Varga-Haszonits Z. & Varga Z. 2014: A meteorológiai tényezők és a növényfejlődés közötti kapcsolat modellezésének módszertani alapjai. *Acta Agronomica Óváriensis* 56(1): 53–74. Teljes szöveg
- White W.N. 1932: A Method of Estimating Ground-Water Supplies Based on Discharge by Plants and Evaporation from Soil: Results of Investigations in Escalante Valley, Utah. *Water Supply Paper 659-A* US Government Printing Office. p. 115. <https://doi.org/10.3133/wsp659A>
- Yadav B., Parker A., Sharma A., Sharma R., Krishan G., Kumar S., Corre K.L., Moreno P.C. & Singh J. 2023: Estimation of Groundwater Recharge in Semiarid Regions under Variable Land Use and Rainfall Conditions: A Case Study of Rajasthan, India. *PLOS Water* 2(3): e0000061. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000061>

Érkezett: 2024. október 09.

Közlésre elfogadva: 2025. január 27.