

Kezelt szennyvíz újrafelhasználásának lehetőségei és kihívásai Magyarországon

Györki Gábor^{1,2}

¹Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Kar Vízellátási és Csatornázási Tanszék, 6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky u. 12-14. (e-mail: gyorki.gabor@uni-nke.hu)

²Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Kar, 6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky u. 12-14.

DOI: 10.59258/hk.15659



Kivonat

A szennyvízkezelés évezredes múltja tekint vissza, ezen kívül a szennyvíz újrafelhasználására is többször volt már példa a történelem során. Napjainkban a vízkészleteket fenyegető egyre súlyosabb és változatosabb szennyezések, valamint a gyakori felelőtlen vízgazdálkodás, a népességnövekedés és a globális felmelegedés okozta általános édesvíz-hiány a fő hajtóerő az újrafelhasználás mögött. Az utóbbi évtizedekben jelentős fejlődés történt mind az analitikában, mind a szennyvíztisztítási technológiák körében, nem utolsósorban a tisztítást és az újrafelhasználást támogató jogi intézkedések tekintetében. A látszólag számos előnnyel bíró felhasználási módok bevezetése gyakran pénzügyi, technológiai, vagy jogi akadályokba ütközik, a nem körültekintő gyakorlat pedig akár több problémát is okozhat, mint amennyit megold. Jelen tanulmány a releváns szakirodalom és a szabályozások áttekintésével kíván átfogó képet adni a szennyvíz újrafelhasználásának lehetőségeiről, előnyeiről és hátrányairól, a megvalósításának nehézségeiről és a fejlődési lehetőségekről.

Kulcsszavak

Körforgásos vízgazdálkodás, környezetvédelem, szennyvíz, szennyvíz újrafelhasználás, visszanyert víz.

Possibilities and barriers of reclaimed water reuse in Hungary

Abstract

Wastewater treatment has a history dating back millennia, and there have been several instances throughout history of reusing wastewater. Nowadays, the increasingly severe and diverse pollution threatening water reserves, coupled with frequent irresponsible water management, population growth, and global warming, are the primary driving forces behind wastewater reuse. Significant advancements have been made in recent decades in both analytics and wastewater treatment technologies, especially concerning legal measures aimed at treatment and reuse. Despite the apparent advantages of various reuse methods, their implementation often faces financial, technological, or legal barriers. Incautious practices might even lead to more problems than solutions. This study aims to provide an overview of the possibilities, advantages, disadvantages, difficulties in implementation, and opportunities for development regarding wastewater reuse, through reviewing relevant literature and regulations.

Keywords

Circular water management, environmental protection, wastewater, wastewater reuse, reclaimed water.

BEVEZETÉS

Napjainkban a világ szinte valamennyi részén egyre nagyobb problémát jelent a tiszta vízhez való hozzáférés. Ennek több oka is van, melyek hatványozottan kihatnak egymásra (Dimane és El Hammoudani 2021). A globális felmelegedés maga után vonja az egyre melegebb nyarakat, hosszabb száraz évszakokat, valamint az utóbbi időben egyre gyakrabban előforduló és Magyarországon is súlyos károkat okozó elnyúló, hosszú aszályokat. A klímaváltozás hatással van a víz párolgására és a csapadékok idejének, helyének, valamint mennyiségének befolyásolása révén kihat az elérhető édesvíz mennyiségére (Jaramillo és Restrepo 2017). A népességnövekedés több szempontból óriási terheket ró az édesvízkészletre. A nagyobb populáció eltartásához folyamatosan növelni kell a vízkivételt, egyrészt a háztartási felhasználás és az ivóvízellátás biztosításához, másrészt a mezőgazdasági igények kielégítéséhez, az élelmiszerek és egyéb termékek ipari előállításához. Utóbbiakból következik a kommunális és az ipari szennyvíz egyre növekvő mennyisége is. A vízhiányt számos tényező befolyásolja, többek között az

adott területre jellemző domborzat és éghajlat, a népsűrűség, valamint a lakosok hozzáállása (Akpan és társai 2020).

A problémát tovább súlyosbítja, hogy a fogyasztók a vízre néha végtelen, kifogyhatatlan erőforrásként tekintenek, nem csak a jó vízellátottságú, de a vízszegény területeken is, valamint nincsenek tisztában a magas, néha pazarló vízfelhasználással (Chfadi és társai 2021). A kezeletlen vagy elégtelenül kezelt szennyvíz rendkívüli mértékben károsíthatja a víztesteket, legyen szó tavakról, folyókról, tengerekről vagy felszín alatti vizekről. Ennek során a szennyvízben található szennyező anyagok negatívan befolyásolják a befogadó egy, vagy több tulajdonságát. Gyakorlatilag bármilyen módon kerül felhasználásra a víz, legyen az mezőgazdasági, ipari, vagy kommunális, a folyamat végére szinte biztosan lesz valamilyen (fizikai, kémiai, vagy biológiai) nem kívánt szennyező az elfolyó vízben (Duong és Saphores 2015, Crini és Lichtfouse 2019).

A vízkészletek megvédésére az egyik legjobb módszer, ha a szennyezés mértékét a minimális szintre csökkentjük.

Ehhez az elfolyó szennyvíz szennyezőanyag-tartalmát legalább olyan szintre kell csökkenteni, hogy az ne legyen negatív hatással a befogadóra, és így annak esetleges életközösségére, valamint közvetett módon az emberi egészségre sem (Seow és társai 2016).

A „szennyvíz” önmagában tág fogalom, mivel nem utal arra, hogy pontosan milyen forrásból származik és milyen anyagokkal szennyezett. Különböző nyelvekben a „szennyvíz” szó szerinti jelentése is eltérő. Míg az angol „wastewater” és az olasz „acqua reflue” kifejezés is hulladékként utal a vízre, a német „abwasser” inkább „elfolyó” vizet, a spanyol „agua residuales” pedig „megmaradt” vizet jelent, mint ténylegesen szennyezett vizet. Az energiát, a hasznosítható nitrogént, foszfort és szénforrásokat előállító szennyvíztisztító létesítményeket (wastewater treatment plant), a jövőben érdemes lehet vízviszanyerő létesítményeknek (water resource recovery facility) nevezni, így érvényesül az a modern látásmód, mely a szennyvizet nem hulladékként, hanem nyersanyagforrásként, alapanyagként kezeli (Faragó és társai 2021). A szennyvizet ezen kívül gyakran osztályozzák fekete- és szürkevízként, melynek szétválasztáskor és újrahasznosításkor van jelentősége (Duong és Saphores 2015). A szürkevíz mosóvízből, fürdővízből, ritkábban konyhai mosogatóból származó vízből áll. Ezzel szemben a feketevíz az emberi hulladékot (székletet) tartalmazó, toaletten lehúzott vizet jelenti. Fontos megjegyezni, hogy esetenként a konyhából és a fürdőszobából érkező vizet is feketevízként kezelik, mert tartalmazhat patogén baktériumokat. A sárga (urinális) és barna (széklettel és WC-papírral) szennyvíz viszonylag ritkán használt kifejezések, melyeket a különgyűjtős toalettek (diverting toilets) esetén alkalmaznak. Az említett típusok más-más kezelést igényelnek és a lehetséges felhasználásuk is eltérő. Számos projekt foglalkozik különböző típusokkal (Fit4Reuse 2023), viszont a szabályozások ritkán térnek ki rájuk. A szürkevizet Magyarországon csak a 253/1997. (XII. 20.) Kormányrendelet említi. A terminológia megfelelő használata minden területen fontos, ebben az esetben az említett különbségek hozzájárulhatnak az emberek szennyvízhez való eltérő hozzáállásához a különböző országokban. A szennyvíztisztítás hasonlóképp többféleképpen értelmezhető, attól függően, hogy milyen típusú kezelést (fizikai, kémiai, biológiai, vagy ezek kombinációja) alkalmaznak, valamint, hogy mi a célja a tisztításnak (befogadóba engedés, szikkasztás, újrafelhasználás). A szennyvíztisztítás fontos lépés a vízkészletek minőségének megőrzésére, viszont önmagában hosszú távon nem fogja meghozni a várt eredményt. Ehhez összehangoltan kell fejleszteni a víztakarékosságot, a szennyvizek tisztítását, és legfőképp a szennyvíz újrahasznosítását, melyben még kihasználatlan lehetőségek rejlenek (Pálfai 2005), tehát multidiszciplináris megközelítés szükséges (Mu'azu és társai 2020). A XX. század végén megfogalmazódott, hogy szükséges az úgynevezett „lineáris” gazdaságról a „körforgásos” gazdaságra való átállás. A vízkezelés változatos jellegéből adódóan nem lehet tisztán lineáris vagy körforgásos vízgazdálkodásról beszélni, így a regeneratív vízgazdálkodás pontosabb megfogalmazás (Rudolph és társai 2020). A végső cél a zárt vízkörforgás létrehozása az adott közösségre vagy létesítményre nézve, szennyvíz kibocsátás nélkül, amit a szaknyelv Zero Liquid

Discharge-nak (ZLD) nevez (Yaqub és Lee 2019). Ennek kevésbé szigorú alternatívája a még mindig kedvező, nullához közeli szennyvízkibocsátás, az úgynevezett Minimal Liquid Discharge (MLD). A zárt körforgás esetén valós problémát jelenthet, hogy amennyiben egy adott szennyezőt nem lehet teljesen eltávolítani, hosszú távon ez felhalmozódhat a rendszerben (Sun és társai 2023).

A szennyvíz újrafelhasználása egyértelműen nagyobb kihívás, mint az egyszerű tisztítás és fertőtlenítés (Rudolph és társai 2020). Az újrafelhasználásnak változatos módjai vannak, melyek közül a legkézenfekvőbb, széles körben alkalmazható módszer az öntözés. Ide tartozik a mezőgazdasági területek, valamint a parkok, zöld területek öntözése. Ezen kívül szinte bármely felhasználás előnyösnek tekinthető, amennyiben az elősegíti a víztakarékosságot, azonban nem-megfelelő kezelés esetén ez kockázatos lehet. Az egészségügyi kockázatokból fakadó negatív társadalmi megítélés jelentősen megnehezíti a gyakorlatban való alkalmazást (Duong és Saphores 2015, Chfadi és társai 2021).

A szennyvizek újrafelhasználásának hosszú története van (Dimane és El Hammoudani 2021). Kutatások bizonyítják, hogy már az ősi görög és római civilizációk is felhasználták a szennyvizeket a mezőgazdasági területeken trágyaként. 1550 és 1700 között elterjedt volt a termőföldek szennyvízzel történő öntözése Németországban, Skóciában és Angliában, Ez a gyakorlat az 1800-as évek kezdetére több európai és egyesült államokbeli nagyvárosban is legálissá vált. Az 1800-as évek végén már Ausztráliában is használtak szennyvizet öntözésre egyes farmokon. Ebben az évszázadban azonban óriási járványok törtek ki Európában (például a kolera, hastífusz) a kezeletlen szennyvíz szállítása és városközeli „elhelyezése” miatt. Az 1900-as évek végére az egészségügyi veszélyekből adódóan a szennyvízkezelés megoldása globális kérdéssé vált. Ennek ellenére a XX. század végén a mezőgazdasági szektor nagy figyelmet fordított az indirekt öntözésre való hasznosításra (a szektor jelentősen megnövekedett vízigénye miatt). A WHO (World Health Organization) és a FAO (Food and Agriculture Organization) pedig irányelveket adott ki ehhez kapcsolódóan (Jaramillo és Restrepo 2017). A szakszerűtlen öntözés még napjainkban is komoly gondokat jelenthet többek között a fejlődő országokban, ahol a vízhiánnyal küzdő területeken találunk példát kezeletlen szennyvízzel való öntözésre (Singh 2021).

A szennyvízkezelés általában nem tekinthető teljesen megoldottnak csupán az elfolyó víz megtisztításával. Attól függően, hogy milyen technológiával történik a kezelés, különböző „melléktermékek” keletkezhetnek; például az elterjedt biológiai lebontás után a nagy mennyiségben keletkező iszapot kell biztonságossá tenni, majd elhelyezni vagy felhasználni. A szennyvíziszap többek között patogén baktériumokat tartalmazhat (Tervahauta és társai 2014, Ligetvári és társai 2015), ebből fakadóan közvetlen felhasználása erősen korlátozott. Kezelés után használható trágyaként a magas szerves és szervesetlen tápanyagtartalomtól adódóan (Tervahauta és társai 2014), viszont energia is visszanyerhető belőle, így csökkentve a szennyvíztisztítás költségeit (Ligetvári és társai 2015, Gao és társai 2019, Rudolph és társai 2020).

Jelen tanulmány célja egyrészt, hogy a releváns szakirodalom és szabályozások feldolgozása révén átfogó képet adjon a szennyvizek korábbi és aktuális újrafelhasználásáról, másrészt, hogy áttekintse a hatékony szennyvízkezelési technológiákat, kiemelt figyelmet fordítva az antibiotikum-rezisztens baktériumokra (ARB) és az antibiotikum rezisztencia génekre (ARG). A közlemény a legelterjedtebb újrafelhasználási lehetőségek összegyűjtésével, ezek előnyeinek és hátrányainak vizsgálatával, valamint Magyarország és az Európai Unió jogszabályainak, és a WHO ajánlásainak vizsgálatával kíván rávilágítani a jelenlegi helyzetre, valamint a lehetséges hazai fejlődési irányokra.

SZENNYVÍZKEZELÉSI TECHNOLÓGIÁK HATÉKONYSÁGA A SZENNYEZŐANYAGOK ELTÁVOLÍTÁSÁBAN

A korábban említett szennyezők eltávolításához különböző tisztítási lépések szükségesek. A szennyvíztisztító telepek jelentős részét elsősorban a szerves szén-, nitrogén-, és foszforformák eltávolítására tervezték, a mikroszennyezők eltávolítási hatékonysága azonban kérdéses. Az utóbbi években az általánosan vizsgált szennyvízparaméterek mellett nagy jelentőséget kaptak olyan, kevésbé ismert szennyezők is, mint az antibiotikum-rezisztens baktériumok (ARB-k) és antibiotikumrezisztencia-gének (ARG-k). A világon évente több, mint 100 000 tonna antibiotikum kerül felhasználásra, melynek jelentős hányada kerül a szennyvízbe eredeti formájában vagy anyagcseretermékként (*Ezeuko és társai 2021*). Közülük számos biológiailag bontható, viszont folyamatos „újratermelésüket” figyelembe véve állandó jelleggel jelen vannak a környezetben, így álperzisztens szennyezőknek tekintjük ezeket (*Gudda és társai 2020*).

Az antibiotikumok önmagukban is kockázatot rejtnek, azonban a szennyvíztisztítókból megtalálható veszélyforrások közé tartoznak az ARB-k, és az egyre nagyobb figyelmet igénylő ARG-k. Több kutatás bizonyítja, hogy az egyik legfontosabb forrásuk a szennyvíztisztítók (*Hutinel és társai 2022, Quach-Cu és társai 2018, Ezeuko és társai 2021*). Az egyszerűbb eljárások nem mindig képesek eltávolítani az ARG-ket, akár növelhetik is a koncentrációjukat koszelekció – egy rezisztenciagén szelekciója során ezzel együtt mozgó, további gének szelekciója – révén, így másodlagos szennyezőként jelen lehetnek a tisztított szennyvizekben (*Ezeuko és társai 2021*). Ennek ellenére kevés tanulmány vizsgálta az ARG-k jelenlétét az előfolyó szennyvizekben (*Gudda és társai 2020*).

Az ARB-k olyan patogén, vagy nem patogén baktériumok, melyek természetes módon ellenállnak (*Quach-Cu és társai 2018*), vagy indukció hatására ellenállóvá válnak adott működési mechanizmusú antibiotikumokkal szemben. A rezisztencia kialakulását és az ARB-k elterjedését segíthetik az antibiotikumok mellett egyéb antimikrobiális ágensek is, úgy, mint a fertőtlenítőszer (pl. triklozan), és a nehézfémek (pl. higany, ólom) (*Gudda és társai 2020, Ezeuko és társai 2021*). Az ARG-k azok a gének, melyek az említett rezisztenciát kódolják, ezeket a géneket pedig a baktériumok képesek egymás között átadni különböző mechanizmusokkal, ideértve a horizontális géntranszfer

(*Ezeuko és társai 2021*). A horizontális géntranszfer gyakoribban megy végbe közeli rokonságban álló baktériumok esetén (*Quach-Cu és társai 2018*), viszont különböző fajok között is találtak géntanszferet, például a *Legionella pneumophila* és különböző amóbák (*Acanthamoeba castellanii, Vermamoeba veriformis, Hartmanella veriformis*) ko-evolúciója során (*Gomez-Valero és Buchriese 2019*).

Az ARG-k és az ARB-k több szempontból is veszélyesek, a legnagyobb kockázat a kezeléseknél ellenálló, patogén „szuperbaktériumok” megjelenése és a jelenleg kezelhető patogének rezisztencia-szerzése (*Gudda és társai 2020*). A rezisztenciákhoz köthető halálozások száma világszerte 700 000-re tehető (*Ezeuko és társai 2021*), mely az előrejelzések szerint a jövőben emelkedni fog (*Quach-Cu és társai 2018*). Jelenleg viszonylag kevés figyelem irányul az antibiotikum-rezisztenciára, de a WHO felhívta a figyelmet, hogy hiba lenne csak „jövőben megjelenő kockázatként” kezelni ezt (*Gudda és társai 2020*).

A rezisztenciagének eltávolítása bonyolult és kevésbé ismert terület. A hatékonyságot befolyásolja többek között az alkalmazott technológia típusa és működési paraméterei, valamint, hogy mely vizsgált génről van szó. Példaként említhetjük, hogy a szulfonamid és bétalaktám antibiotikumok elleni rezisztenciagének koncentrációját a másodlagos tisztítás (eleveniszapos kezelés) egy-két nagyságrenddel csökkentette, utótisztítás (membránszűrés és klóros fertőtlenítés) során további két-három nagyságrend csökkenést tapasztaltak. Míg a szulfonamidok rezisztenciagénje az utótisztítás után is detektálható volt, a bétalaktám rezisztencia génjét még a minta kétszázszoros koncentrációja esetén sem mutatták ki (*Quach-Cu és társai 2018*). Általánosan elmondható, hogy a leggyakrabban alkalmazott szennyvíztisztítási technológiák csak egy bizonyos mértékig képesek eltávolítani az ARG-ket, néhány gén esetén pedig még a legfejlettebb technológiákkal sem érhető el a teljes eltávolítás.

A szennyvíz kezelésében alkalmazott eljárások és technológiai sorok jelentős változatosságot mutatnak mind kialakításban, funkcióban, hatékonyságban és költségekben. Az alkalmazott módszerek eltérőek lehetnek a kezelendő szennyvíz mennyiségétől és összetételétől függően, valamint a befogadótól és az erre vonatkozó határértékektől. Abban az esetben, ha a kezelt szennyvizet közvetlenül tervezik felhasználni, értelemszerűen szigorúbb előírásoknak kell megfelelni.

A szennyvíztisztításban fizikai, biológiai és kémiai módszereket különböztetünk meg. Ezeket a kategóriákban belül további csoportosítás lehetséges az alkalmazott technológia pontos működése alapján, azonban a modern megoldásoknál ezek kombinációját alkalmazzák, így nem beszélhetünk tisztán biológiai, vagy tisztán kémiai módszerekről. A legegyszerűbb lehetőségek közé tartoznak például az úgynevezett komposzt WC-k, az emésztőgödörök, ülepítők, valamint oldódmedencék. A modern, természetközeli megoldások közé tartoznak a szennyvíztavak, szűrőmezők, valamint növényágyas és gyökérszűrők tisztítók. Ezeknél korábban megjelentek a folyamatok átfolyású eleveniszapos rendszerek, melyek technológiája már lényegesen összetettebb. A biológiai folyamatokat kihasználó

rendszereknek ezután több formája is megjelent más-más kialakítással, ilyenek az SRB-rendszerek (Sequential Batch Reactor), a bemerülőtestes és a lebegőágyas berendezések és a membrán bioreaktorok (Karches 2020).

A modern, széleskörűen alkalmazott tisztítási folyamatot általában 4 lépésre osztják. Az elsődleges tisztítási fokozat előkészíti a szennyvizet a következő lépésekre, szerepe főleg a lebegő szilárd anyagok eltávolítása. A rácsokkal, szűrőkkel és aprítókkal történő mechanikai tisztítást szinte egyáltalán nem alkalmazzák önmagában, mivel szinte soha nem elégséges az előírásokban foglalt határértékek eléréséhez (Karches 2020).

Esetenként alkalmazhatók hatékony aktív szén szűrők és membránszűrők is, utóbbi esetén a nanoszűrés és reverz ozmózis a kis pórusméretből adódóan megfelelő módszer lehet a mikroszennyezők eltávolítására. A szűrés után visszamaradt, koncentrált mikroszennyezők kezelését ezután meg kell oldani (Karches 2020, Knisz 2020). Fontos megemlíteni, hogy az aktív szén szűrők, illetve membránszűrők a gyakorlatban kevésbé használhatók elsődleges kezelésre, a kis kapacitásuk és a magas üzemeltetési költségek miatt.

A másodlagos tisztítási fokozat, vagyis a biológiai tisztítás fő célja a szerves anyagok eltávolítása mikrobák által végzett biodegradációval. A nitrogén és foszfor különböző formái növényi tápanyagok, melyeket a víztestek relatívan alacsony koncentrációban tartalmazzák. Ezek eltávolítása a szennyvíztisztítás során elengedhetetlen, a víztestekbe jutás során jelentősen megnövelnék az eutrofizáció valószínűségét (Jaramillo és Restrepo 2017, Rout és társai 2021). Fontos megemlíteni, hogy amennyiben öntözési célra kívánjuk felhasználni a kezelt szennyvizet, a nitrogén és a foszfor nem feltétlenül jelent problémát, sőt, számos előnye lehet, többek között ki lehet váltani a műtrágyát (Condom és társai 2012). A másodlagos tisztítás során olyan mikroszennyezők is részben, vagy teljesen lebomlanak a metabolizmus és kometabolizmus (nem a tápanyagnyerés céljából végzett lebontás) során, mint a gyógyszerek és kozmetikai termékek (Pharmaceuticals and Personal Care Products-PPCP), az endokrin rendszert károsító anyagok (Endocrine-Disrupting Chemicals-EDC), és a felületaktív anyagok (Knisz 2020). Egy 2018-as kutatásban vizsgált három, klinikailag jelentős ARG felhalmozódott a keletkezett szennyvíziszapban, viszont az elfolyó, tisztított vízben csökkent a koncentrációjuk (Quach-Cu és társai 2018).

A harmadlagos tisztítási fokozat feladata, hogy a még megmaradt, vagy az első két lépésből származó patogéneket, növényi tápanyagokat és néhány kémiai szennyezőt eltávolítsa. Alkalmazhatók például membránszűrők, oxidálószeres és UV besugárzás fertőtlenítéshez. A több lépésből álló, korszerű oxidációs módszerek (AOP) különböző hatékonysággal rendelkeznek adott szennyezőkkel szemben (Knisz 2020). A patogén ciklus megállítására kiemelt jelentőségű, mivel a betegségeket okozó baktériumok, férgek, vírusok, protozoonok és gombák megtalálhatók a szennyvízzel érintkező élelmiszereken (Gupta és társai 2010). A leggyakoribb veszélyeket néhány közismert baktérium (*E. coli*, *Vibrio cholerae*, *Salmonella sp. stb.*)

jelent. Az utóbbi évtizedek talán legnagyobb egészségügyi problémája a SARS-CoV-2 koronavírus járvány kitörése volt, melynek nyomán követésére nagyszerű módszer a vírus koncentrációjának szennyvízben történő mérése. Ez alátámasztja, hogy a vírusok is bekerülnek a szennyvízbe, azzal együtt mozognak és jutnak ki a természetbe, vagy a szennyvíz újrafelhasználása esetén a felhasználás helyére (Gundy és társai 2009). A szennyezett víz miatt kialakuló betegség lehet akut (gyors lefolyás, a szennyezővel való érintkezés után), vagy krónikus (hosszú kitétség esetén). Szennyvízöntözés esetén különösen a nyersen fogyasztott zöldségekre kell kiemelt figyelmet fordítani (Gupta és társai 2010). A harmadlagos tisztításként alkalmazott szűrés és klóros fertőtlenítés nagyobb mértékben csökkenti az ARG-k koncentrációját, mint az ezt megelőző másodlagos, biológiai tisztítás (Quach-Cu és társai 2018).

A negyedleges tisztítási fokozat melynek fő célja az antropogén mikroszennyezők eltávolítása, az utóbbi évtizedben nyert nagyobb jelentőséget. E kezelés sokrétű lehet, többek között aktív szén szűrés, kémiai kicsapás vagy oxidáció, illetve biológiai nehézfémek kötés (Knisz 2020). Az ebben a lépésben eltávolított nehézfémek súlyos negatív hatással vannak az élőlények egészségére, ideértve a rákos megbetegedéseket is. Leggyakrabban az arzén, kadmium, réz, ólom, nikkel, cink, higany és króm kerül előtérbe a toxicitást tárgyalva. A befogadóba engedett szennyvizek nehézfém-tartalma károsítja a környezetet és bekerülhet a táplálékláncba, a szennyvízöntözés pedig közvetlenül a termőföldbe juttatja ezeket. Ebből adódóan romlik a megművelt talaj minősége, és a természet zöldségeken át közvetlenül a táplálékláncba juthatnak a nehézfémek (Gupta és társai 2010).

Egy 2021-es kutatás alapján a tisztítási lépések után beiktatott hosszútávú tározóban tovább csökkent a mikroszennyezők koncentrációja, azonban néhány patogén baktérium miatt a közvetlen földfelszíni öntözés még ezután is kockázatos lehet egészségügyi szempontból (Knisz és társai 2021). A fertőtlenítés, koagulálás, AOP-k alkalmazása mind hatékony tisztítási folyamatok, két ilyen technológia egymás utáni alkalmazásával akár teljes ARG eltávolítás is elérhető (Ezeuko és társai 2021). A szennyvízkezelés fejlődésével, és mértékének növekedésével nem tartott lépést a keletkezett melléktermékek kezelése. Ilyen melléktermékek a rácscsémét, természetközeli technológiáknál a növényi maradványok, valamint a leggyakrabban alkalmazott biológiai lépéseknél a szennyvíziszap. A visszamaradt iszap veszélyessége függ az alkalmazott folyamatoktól és a nyers szennyvíz minőségétől is. Jelentős mennyiségben tartalmaz vizet, nagy biomassza-tartalma miatt tápanyagban dús, viszont feldúsulhatnak benne olyan, a környezetre és az emberekre ártalmas anyagok is, mint a nehézfémek vagy a mikroműanyagok. A szennyvíziszapot gyakran alkalmazzák mezőgazdaságban, amennyiben annak összetétele a jogszabályokban meghatározott paramétereknek megfelel. Az 50/2001. (IV.3.) Kormányrendelet alapján vizsgálni kell többek között a pH-t, a vezetőképességet, a szárazanyagot, az ionokat, a nitrogénformákat, a foszforformákat és a mikrobiológiai paramétereket is. Maximális koncentrációk vonatkoznak a fémekre, a szabad klorid-ionokra, a felületaktív anyagokra, a policik-

lusos aromás szénhidrogénekre (PAH), a poliklórozott bifenilekre (PCB), az összes ásványi szénhidrogénre (TPH) és a belféreg peteszámra, a *Salmonella sp.*, a coliform és a fekál streptococcus számra is. Ha az iszap ezeknek nem felel meg, más felhasználási vagy ártalmatlanítási módot kell választani (Karches 2020). Gyakori az energiatermelésben való felhasználás, mely módja Magyarországon főleg a biogáz termelés. Az égetés is lehetséges mód, viszont feltehetően a hasznosítható anyagok, mikroelemek és energia pazarlása miatt hazánkban ez ritka (Ligetvári és társai 2015).

A SZENNYVÍZ ÚJRAFELHASZNÁLÁSÁNAK JOGSZABÁLYI KÖRNYEZETE

A szennyvízkezeléssel és felhasználással kapcsolatos szabályrendszerek kialakulása már több, mint egy évszázaddal ezelőtt elkezdődött. A XIX. század közepén terjedő kolera és hastífusz járványok több tízezer ember életét követelték, melyek következményeként Londonban egy 1861-es törvény mondta először ki, hogy a szennyvizet tisztítani szükséges befogadókba vezetés előtt. 1904-ben a németek hozták létre Európa első vízvédelmi szervezetét, mely többek között a folyók szennyezettségi állapotát vizsgálta. Ebben az időszakban definiálták a szennyvíz máig egyik legfontosabb paraméterét, a biodegradálható szénforrások lebontásához szükséges oxigénmennyiség mérőszámát, a biokémiai oxigénigényt (Juhász 2011).

A WHO gyakran tesz részletes ajánlásokat a vizekkel és a szennyvizekkel kapcsolatos egészségügyi problémákról. 1973-ban kiadott egy technikai jelentést, hogy segítse a szennyvizek biztonságos és racionális felhasználását, 1989-ben pedig átfogó kutatások és kockázatbecslések után frissítették az irányelveket, kiegészítve ezeket az öntözésre vonatkozó mikrobiológiai követelményekkel (Jaramillo és Restrepo 2017). A következő évtizedben is részletes ajánlásokat tettek. Egy 2017-es iránymutatásban a WHO javasolja, hogy a szennyvízkezelés és kibocsátás olyan helyen történjen, hogy az ne befolyásolhassa az esetleges vízkivételt. Ezen kívül felhívja a figyelmet, hogy a befogadókban előforduló patogének spektrumát jelentősen befolyásolhatja az a szelektív nyomás, mely többek között a szennyvíz újrafelhasználásából és a gyógyászati szerek alkalmazásából ered (WHO 2017).

Az Európai Unió több évtizede fontos állásfoglalásokat tesz a vízvédellemmel és a szennyvízkezeléssel kapcsolatban. Az Európai Parlament és a Tanács által kiadott kiadványok révén jól nyomon követhetők a prioritásokban és a célokban megjelenő változások; az utóbbi években egyre nagyobb jelentőséget kap a szennyvíz újrafelhasználása, az ehhez kapcsolódó helyes gyakorlatok kialakítása (2020/741 rendelet 2020, 2455/2001/EK határozata 2001).

Az 1988-as Frankfurtban tartott miniszteri szemináriumon előkerült az ökológiai minőség védelme, a Bizottságot pedig arra kérték, hogy nyújtsanak be a felszíni vizek minőségének javítására vonatkozó javaslatokat. Hasonlóképp, az 1991-es Hágában tartott miniszteri szeminárium után, 1992-ben és 1995-ben a felszín alatti vizekkel kapcsolatban kértek cselekvési programot. Ezek hatására az Európai Unió az ezredforduló kezdetén kezdte el sürgetni a közösségi fellépést a vízpolitika terén, az első részletes

dokumentum a vízszennyezés elleni stratégiákat meghatározó 2000/60/EK irányelv (2000), azaz az EU Víz Keretirányelve. Ezen irányelv elején megfogalmazzák, hogy a víz nem csupán kereskedelmi termék, hanem örökség, amit ennek megfelelően kell kezelni, és védeni. Az irányelv kijelenti, hogy szükség van egy integrált, közösségi vízpolitika kialakítására, mely a szoros együttműködésen kívül figyelembe veszi a Közösségen belüli különböző adottságokat és szükségleteket, és jól illeszkedik az olyan egyéb politikákhoz, mint a mezőgazdasági, halászati, és az energiapolitika. Célként tűzi ki a felszíni vizek, az átmeneti vizek, a parti tengervizek és a felszín alatti vizek hosszútávú védelmét, ezen ökoszisztémák romlásának megelőzését, valamint a fenntartható, méltányos és kiegyensúlyozott vízhasználathoz elegendő víz biztosítását. Előírja a vizek állapotának megfigyelését, a különböző szennyező források szabályozását, és gazdasági elemzések elvégzését. A tagállamoknak biztosítani kell, hogy az árpolitika készítményt biztosítson a vízhasználók számára a hatékonyabb felhasználáshoz. Az intézkedési programok tartalmazhatják a hatékonyságjavító és a víz újra használatát elősegítő megoldásokat. Az irányelv előír továbbá olyan felszíni és felszín alatti vízszennyezés elleni stratégiákat, mint a jelentős kockázattal bíró szennyezőanyag-csoportok csökkentése, kibocsátások megszüntetése, valamint a vizekre kockázatot jelentő, úgynevezett elsőbbségi anyagokat felsoroló lista elkészítése. Mellékleteiben a fő szennyezők közül kiemeli a karcinogén készítményeket és a bomlástermékeket, a szerves halogénvegyületeket, a biocid anyagokat, az eutrofizációt elősegítő anyagokat, az oxigénháztartásra kedvezőtlen hatású anyagokat, a fémeket és vegyületeiket, valamint a cianidokat. A vízpolitika területén elsőbbséginek minősülő anyagok jegyzékében megtalálható 45 anyag és anyagcsoport, köztük például a benzol, naftalin, több klórozott szénhidrogén, valamint ólom, higany és ezek vegyületei (2000/60/EK irányelve 2000). Az elsőbbséginek minősülő anyagok listáját folyamatosan felülvizsgálják és frissítik, a 2455/2001/EK határozata (2001) 33 tagú listát tartalmaz, a közel egy évtizeddel későbbi 2009/90/EK bizottsági irányelv (2000) minimális teljesítmény-kritériumokat határoz meg a szennyezők monitorozásához. A néhány évvel később kiadott 2013/39/EU irányelv (2013) több változást is tartalmaz, az így 45 tagú listában szerepelnek többek között dioxinok és a DDT. Az elsőbbségi anyagokra és néhány további szennyezőre különböző víztestekben környezetminőségi előírást is tartalmaz az irányelv, éves átlagértékek és maximálisan megengedett koncentrációk formájában. Ez az irányelv fontos pontként emeli ki a felszíni vizek kémiai szennyezéséből adódó akut és krónikus toxicitást, a szennyező anyagok felhalmozódását, a biológiai sokféleség csökkenését, és nem utolsósorban részletesen tárgyalja a szennyvízkezelés nehézségeit, és költségeit. A szennyvízkezelés jelentős költségekkel járhat, ezért ösztönözni kell a költség-hatékonyabb technológiák kidolgozását. Megemlíti a perzisztens, a bioakkumulatív és a toxikus anyagokat (PBT) is, melyek kibocsátásának csökkentése vagy megszüntetése után is évtizedekig kockázatot jelentő szinten maradhatnak fenn és juthatnak el nagy távolságokra. A 2013/39/EU Irányelv (2013) és a 2008/105/EK Irányelv (2008) előkészíti egy eredetileg legfeljebb 10 anyagot

vagy anyagcsoportot tartalmazó megfigyelési lista felállítását, mely anyagok a rendelkezésre álló információk alapján a vízi környezetre és az EU-ra kockázatot jelentenek, és egyben nem áll róluk rendelkezésre elegendő monitoring adat. Az első listára a diklofenákot, az antibiotikumokat és néhány hormont vettek fel, a listát két évente naprakésszé kell tenni (2000/60/EK irányelv 2000, 2008/105/EK Irányelv 2008, 2013/39/EU Irányelv 2013). Az első listát a Bizottság 2015/495 végrehajtási határozata (2015) rögzíti, monitoringmátrix és elemzési módszerek feltüntetésével, legnagyobb elfogadható kimutatási határok megjelölésével. A Bizottság 2018/840 végrehajtási határozata (2018) frissítette a listát. Ezen a listán mindössze 8 anyag szerepel, a 2008/105/EK Irányelv (2008) értelmében töröltek 5 olyan anyagot, melyekre a kockázatelemzés monitoring nélkül is elvégezhető, valamint 3 új anyagot hozzáadtak. Ez a határozat kiemeli a környezetbe kerülő gyógyszerek okozta antimikrobiális rezisztenciát, és hivatkozik az erre vonatkozó európai cselekvési tervre (2018/840 végrehajtási határozat 2018). A 2020/1161 végrehajtási határozat (2020) idején lejárt az első és második listán lévő több anyag előírt monitoring-ideje, így jelentős változás történt. A harmadik, 9 tagú lista több különböző csoportból származó antibiotikumot is tartalmaz, így az amoxicillint, ciprofloxacint, szulfametoxazolt, és trimetoprimet is. Jelenleg a 2022/1307 végrehajtási határozat (2022) tartalmazza az újabb frissítéseket követő legfrissebb listát. A megfigyelési lista célja, hogy a listán töltött idő alatt a veszélyes anyagokról elegendő információ gyűljön össze a további lépések megállapításához, például határértékek felállításához, vagy kockázatbecslések elkészítéséhez.

A 91/271/EGK irányelv (1991) előírja, hogy a kezelt szennyvizet újra fel kell használni, amennyiben lehetséges. A 2020/741 rendelet (2020) rögzíti a víz újrafelhasználá-

sára vonatkozó minimumkövetelményeket és a kockázatkezelési rendelkezéseket, célja a visszanyert víz biztonságos, mezőgazdasági öntözéses felhasználásának elősegítése. A vízkészletekre nehezedő éghajlati, valamint mezőgazdasági és városfejlesztési nyomásokra az Unió többek között a szennyvíz víztestekbe történő bevezetése okozta hatások csökkentésével és a szennyvíz többszörös felhasználásával reagálna. Az Unióban korlátozott mértékben történik a megfelelően kezelt szennyvíz újrafelhasználása annak ellenére, hogy ez egy környezetkímélő megoldás. Erre a magas költségeket és a pénzügyi ösztönzés hiányát, az előírások elégtelenségét, valamint a kockázatokat említi indokként, pedig jelentős előnyökkel járna: a visszanyert vízből származó tápanyag kinyerés előmozdíthatja a körforgásos gazdaságot, csökkentené a műtrágyák iránti igényt. Erdészeti területen való öntözéses felhasználás esetén a nitrogén, foszfor, kálium, és további tápanyagok visszakerülhetnek a természetes biogeokémiai ciklusokba. A mezőgazdaságban az élelmiszer-higiéniai előírások csak akkor teljesíthetők, ha a tagállamok között nincs jelentős különbség a minőségi követelményekben, a visszanyert víz előállítására engedély-köteles kell hogy legyen, ennek rendszeres felülvizsgálata szükséges. Megfogalmaz olyan nem-műszaki vonatkozású előírásokat is, melyek szerint a végfelhasználókat széleskörűen tájékoztatni kell mind a visszanyert víz tápanyagtartalmáról, képzésben kell részesíteni őket az újrafelhasználásról, a biztonságos gyakorlatok alkalmazásával erősíteni a nyilvánosság eziránti bizalmát, és figyelemfelkeltő kampányokat kell folytatni. Az irányelv a visszanyert vizet 4 minőségi osztályra bontja (1. táblázat), pontosan definiálja a szükséges tisztítási lépéseket, minőségi követelményeket (2. táblázat) és ezek ellenőrzésének gyakoriságát, valamint a lehetséges felhasználási területeket (2020/741 rendelet 2020).

1. táblázat. A visszanyert víz minőségi osztályai és az engedélyezett mezőgazdasági felhasználási módok (2020/741 rendelet 2020)
Table 1. Quality classes of reclaimed water and permitted agricultural uses (2020/741 Order 2020)

VISSZANYERT VÍZ MINŐSÉGI OSZTÁLYA	TERMÉNYKATEGÓRIA	ÖNTÖZÉSI MÓDSZER
A	Valamennyi nyersen fogyasztandó élelmiszeri célú termék, amelyek ehető része közvetlen kapcsolatba kerül a visszanyert vízzel, valamint a nyersen fogyasztandó gyökérművények	Valamennyi öntözési módszer
B	Nyersen fogyasztandó élelmiszeri célú termékek, amelyek ehető része a föld felett terem, és nem kerül közvetlen kapcsolatba a visszanyert vízzel, feldolgozandó élelmiszeri célú termékek és nem élelmiszeri célú termékek, beleértve a tej- vagy hústermelő állatok takarmányozására használt termékeket is	Csepegtető öntözés vagy egyéb olyan öntözési mód, amely nem eredményezi a termék ehető részének a visszanyert vízzel való közvetlen kapcsolatba kerülését
C	Nyersen fogyasztandó élelmiszeri célú termékek, amelyek ehető része a föld felett terem, és nem kerül közvetlen kapcsolatba a visszanyert vízzel, feldolgozandó élelmiszeri célú termékek és nem élelmiszeri célú termékek, beleértve a tej- vagy hústermelő állatok takarmányozására használt termékeket is	Valamennyi öntözési módszer
D	Ipari növények, energianövények, vetőmagkultúrák	Valamennyi öntözési módszer

2. táblázat. A visszanyert víz minőségére vonatkozó követelmények mezőgazdasági öntözés esetében (2020/741 rendelet 2020)

Table 2. Reclaimed water quality requirements for agricultural irrigation (2020/741 Order 2020).

VISSZANYERT VÍZ MINŐSÉGI OSZTÁLYA	TÁJÉKOZTÓ JELLEGŰ TECHNOLÓGIAI CÉLKITŰZÉS	MINŐSÉGI KÖVETELMÉNYEK				
		<i>E. COLI</i> (EGYED/100 ml)	BOI ₅ (mg/l)	ÖSSZES LEBEGŐANYAG (mg/l)	ZAVAROSÁG (NTU)	EGYÉB
A	Másodlagos kezelés és fertőtlenítés	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	<i>Legionella</i> spp.: < 1 000 CFU/l, amennyiben fennáll az aeroszolizáció veszélye
B	Másodlagos kezelés és fertőtlenítés	≤ 100	A 91/271/E GK irányelvvel összhangban: 25	A 91/271/EGK irányelvvel összhangban: 25	-	
C	Másodlagos kezelés és fertőtlenítés	≤ 1 000			-	
D	Másodlagos kezelés és fertőtlenítés	≤ 10 000			-	Bélrendszeri fonalférgék (bélféregpeték): ≤ 1 pete/l, legelők vagy takarmány-növények öntözésénél

Az antimikrobiális rezisztencia határokon átnyúló, sürgető kérdés, mellyel globális szinten kell foglalkozni. Az Unió 2001-ben felismerte ezt, a Bizottság 2001/0333 közleménye (COM(2001)0333) így szükségessé teszi egy közösségi stratégia elfogadását az emberi egészség védelme érdekében. E dokumentum a monitoringra és a szabályozásra koncentrál, még nem esik szó a szennyvizekről. A Bizottság egy évtizeddel később kiadta a 2011-2016-os cselekvési tervet a tagállamok közti fellépés előmozdítására [COM (2011) 748 2011], amit a 2017-es, antimikrobiális rezisztencia leküzdésére szolgáló cselekvési terv követett (European Commission 2017). Azóta is több kezdeményezés történt a témában az EU részéről a kutatás, a fejlesztés és az innováció terén. Ilyenek a szennyezőanyag-mentességi cselekvési terv [COM (2021) 400 final 2021] és az uniós gyógyszerstratégia [SWD(2020) 286 final 2020], valamint a 2022/0345, települési szennyvíz kezeléséről szóló irányelv felülvizsgálatára irányuló bizottsági ajánlás [COM(2022)541]. Utóbbi ajánlásban a 100 000 LE feletti agglomerációk szennyvíztisztítóinak befolyó és elfolyó szennyvizénél köteleznék az antimikrobiális rezisztencia vizsgálatát.

A 2023/0125 ajánlás [COM (2023) 191 2023] részletes ismertetőt ad az antimikrobiális rezisztencia problémájáról. Ez az ajánlás kijelenti, hogy az antibiotikum-rezisztens gének és organizmusok potenciális környezetbe jutási pontjai a szennyvíztisztítók. A szennyvíziszap mezőgazdasági felhasználása tovább növelheti a rezisztenciát a környezetben, így tovább szennyezi az élelmiszerláncot. Hangsúlyozzák, hogy jelenleg nem áll rendelkezésre elegendő adat a pontos kockázatbecslésre, de körültekintő gyakorlatra van szükség a szennyvíziszap felhasználása során. Az antimikrobiális szerek felhasználásának csökkentése, optimalizálása még mindig nem megoldott [COM (2023) 191 2023].

A 27/2005 KvVM rendelet határoz a szennyvízkibocsátás önellenőrzésének és helyszíni ellenőrzésének részletes szabályairól. A 28/2004 KvVM rendelet pedig előírja a vizsgálandó anyagokat (például dikromátos oxigénfogyasztás, biokémiai oxigénigény, össznitrogén, pH, lebegőanyag, coliform szám, fémek, peszticidek), azok vizsgálati módszereit és alsó mérőhatárokat a szennyvíztisztító telepekre, kislétesítményekre és a természetközeli szennyvíztisztításra. A szennyvíz minőségére vonatkozó követelményeket is ismerteti felszíni, és a felszín alatti vizekbe való vezetés esetére is. Előírja a kötelező időszakos fertőtlenítést és rendelkezik a szennyvíziszap kezeléséről.

A 30/2008. (XII. 31.) KvVM rendelet, valamint a 2011. évi CCIX. törvény rendelkeznek a vízhasznosítás és a szennyvízkezelés műszaki szabályairól, megjelennek az egyedi szennyvízkezelő létesítményre vonatkozó rendelkezések is. Többek között előírják, hogy illet csak abban az esetben lehet létesíteni, ha a tisztított szennyvíz szennyezőanyag-tartalma nem haladja meg a mellékletben foglalt értékeket (dikromátos oxigénfogyás, ammónia-nitrogén, össznitrogén), valamint, hogy a magas talajvízállású és érzékeny területeken csak denitrifikációt is megvalósító berendezést lehet telepíteni. Kitér a szennyvízöntözés és szikkasztás műszaki szabályaira is.

A 147/2010 (IV. 29.) Kormány rendelet részletesen foglalkozik a szennyvízhasznosítással. Előírja, hogy a természetközeli megoldásokat kell előnyben részesíteni, és minden esetben meg kell vizsgálni a tisztított szennyvíz hasznosítási lehetőségeit, a szennyvíziszapot pedig mezőgazdasági, energetikai, vagy egyéb módon kell hasznosítani. A kisberendezésekkel kapcsolatban részletes szabályozást ad: a szennyvíz keletkezésével érintett ingatlan tulajdonosa köteles gondoskodni ennek tisztításáról és biztonságos elhelyezéséről. Összegyűjti a korábbi kormányrendeletek által megállapított, kisberendezés telepítéssel kapcsolatos természeti és műszaki követelményeket. Elő-

írja, hogy a tulajdonosnak kell gondoskodni a működtetés feltételeinek biztosításáról, ideértve az ellenőrzést és karbantartás elvégzését (a tulajdonos a kötelességeit átruházhatja), a működésért felelős szolgáltatónak pedig a helyszíni szemlérel, karbantartások elvégzéséről, mintavételezésről és mérések elvégzéséről kell gondoskodnia. A VII. fejezet foglalkozik a térségi vízzétosztással és mezőgazdasági hasznosítás általános előírásaival. Az előtisztítás mértékét a talajadottságok, vízvédelmi és egészségügyi követelmények, és a felhasználás technológiája határozza meg. Öntözés során pangó szennyvíz nem keletkezhet, valamint a tisztított szennyvíz nem juthat szomszédos területre, természetvédelmi területre, talajvízbe és befogadóba. Szennyvíz és települési folyékony hulladékkal történő tápanyagképzés, takarmányozás (például tavaknál) tilos [147/2010. (IV. 29.) Kormányrendelet]. Ezt a rendeletet módosítja a 2023-ban hatályba lépő 7/2023. (I. 12.) Kormányrendelet, mely a minimumkövetelmények végrehajtásához szükséges rendelkezéseket állapít meg.

AZ ÚJRAFELHASZNÁLÁS ELŐNYEI ÉS HÁTRÁNYAI

A tiszta víz elengedhetetlen az emberiség fejlődéséhez, viszont az olcsó, könnyen elérhető vízforrások már többnyire kiaknázásra kerültek (Duong és Saphores 2015). Az urbanizáció, a klímaváltozás, a vízkészletek egyenetlen eloszlása a világ legtöbb részén érezteti a hatását. 1,6 milliárd embert érint évente legalább egy hónapnyi szárazság, így elengedhetetlen a víz jobb kihasználása. A mezőgazdaságnak van a legmagasabb vízszükséglete (Akpan és társai 2020), amely a globális felmelegedéssel és a népességnövekedéssel várhatóan még tovább emelkedik. A megoldandó problémák között jelentős eltérések lehetnek attól függően, mely területről van szó (Robinson és társai 2005), ettől függetlenül viszont nemzetközi szinten foglalkoznak a témával (Chfadi és társai 2021). Európa fejlettebb, északi részén a környezetvédelem és az ipari felhasználás a szennyvízhasznosítás fő hajtóereje, míg délebbre inkább a mezőgazdaság. Keleten és az Észak-Afrikai területeken a vízhiány teszi ezt elengedhetetlenné (Chfadi és társai 2021). Fontos megjegyezni, hogy gyakran nincs szükség folyamatos újrafelhasználásra, elég lehet adott napszakokban vagy a száraz évszakokban (Jaramillo és Restrepo 2017, Rudolph és társai 2020).

Az eddig tárgyaltak mellett különféle okok lehetnek még amiért szükséges, vagy megéri az újrafelhasználást választani: kevesebb tiszta vízért kell fizetni, illetve a kisebb mennyiségű kibocsátott, vagy elszállítandó szennyvíz is kisebb költségekkel jár. A pénzmegtakarításhoz, vagy további bevétel eléréséhez ezen kívül adott esetben hő- vagy mechanikus energia is kinyerhető, illetve biogáz is termelhető. Összetételtől függően visszanyerhető olyan értékes komponensek, mint a fémek vagy a fehérjék. Az értékes anyagok és az energia visszanyerése technológiai szempontból hatékonyabb az iparban, mint a változó összetételű szennyvízzel dolgozó közműveknél, valamint a háztartásokban. Stratégiai szempontból előnyös lehet, ha egy létesítmény részben, vagy teljesen függetlenedni tud a vízszolgáltatóktól. Az újrafelhasználással javítható továbbá egy cég vagy üzem „öko-képe”, valamint teljesíthető a fenntartható fejlődésre vonatkozó előírások. Ezekből

a pénzügyi és technológiai okokból adódik, hogy a szennyvízhasznosítás fejlődése jelenleg az iparban a leggyorsabb. Namíbia fővárosában, Windhoek városában valósult meg a világon először nagyléptékben a technológiai víz újrafelhasználás céljából, a másik beruházás pedig a városi szennyvíztisztító fejlesztésére irányult, melynek kezelt vize egy külön létesítményben ivóvíz minőségűre tisztítható. Észak-Namíbia Outapi városában a korábban problémás, egészségügyi kockázatokat rejtő szennyvíztisztító tavak fejlesztésével takarmánynövények öntözésére alkalmas minőségű vizet nyernek. Az ipari területeken belül megvalósított „zárt-körű” víz-újrafelhasználás is egyre gyakoribb, mely a helyi vízbázisokat is védi és az ipar szempontjából is előnyös (Rudolph és társai 2020).

Visszanyert víz lehetséges felhasználási területei

A kezelt szennyvíz széles körben felhasználható attól függően, hogy milyen szennyezőktől lett megtisztítva, illetve, hogy a felhasználási terület milyen minőséget követel meg. „Ipari” alkalmazás lehet például az építőiparban való felhasználás, az utcák tisztítása, az autómosás, a toaletto-öblítés és a tűzoltás, esetleg hóolvasztás (Duong és Saphores 2015). Az iparban alkalmazható még hűtővízként, papír, műanyag és fémgyártásnál, viszont a korróziót, a rothadást, és a lerakódást ki kell küszöbölni. A nem-élelmiszer célú mezőgazdaságban használható erdők, kertek, parkok, városi zöldfelületek locsolására, és az ipari felhasználásra termesztett növények öntözésére. A háztartásban is különböző módon hasznosítható: toaletto-öblítésre, tisztításra és mosásra, fürdésre, kerti tavak és medencék feltöltésére. Az élelmiszer célú mezőgazdaságban alkalmazható többek között zöldségek, gyümölcsöskertek, takarmánynövények öntözésére, állatok itatására, halgazdaságokban, valamint az élelmiszeriparban. A vízkészletek dúsítása és a közvetlen ivóvízként való hasznosítás is egyre szélesebb körben elfogadott. Egyes kultúrák esetében a szertartásos mosdást is fontos megemlíteni, a közvetlen érintkezésből adódóan. Az ivóvízként való hasznosítás esetén fontos megkülönböztetni a direkt (a tisztított víz közvetlenül az ivóvízhálózatba kerül betáplálásra) és az indirekt (a tisztított vizet egy környezeti „pufferbe” vezetik a vízkivétel előtt) felhasználást (Duong és Saphores 2015, Chfadi és társai 2021).

A visszanyert víz használatának előnyei és lehetséges hátrányai

A szennyvíz újrafelhasználása részben megoldást kínál a jelenkor olyan problémáira, mint a vízszennyezés és a vízhiány, ezen kívül rendkívüli előnyökkel is járhat: logikus megoldás, hogy a keletkező szennyvizet (lehetőleg a keletkezése helyén) hasznosítsuk, így ennek nem csak környezetvédelmi, de gazdasági vonzata is van. Energia takarítható meg azzal, hogy nem kell több tiszta vizet a felhasználási helyre szállítani, és az ehhez szükséges infrastruktúra is feleslegessé válik (Robinson és társai 2005, Duong és Saphores 2015, Mu'azu és társai 2020). A haszon mértékét jelentősen befolyásolja, hogy az adott területen mekkora a vízhiány (Rudolph és társai 2020), mivel a legnagyobb sikerekre a szárazabb területeken lehet számítani (Jaramillo és Restrepo 2017).

A visszanyert víz használatának talán a legnagyobb jelentősége a mezőgazdaságban van: kielégítheti az öntözési vízigényét (globális szinten az édesvíz-felhasználás 70%-a a mezőgazdaságban történik), ezáltal csökkenti az édesvízkészletek terhelését, valamint jó hatással van a környezetre és a gazdaságra. A nagyobb hozamok közelebb visznek a globális élelmiszerhiány megoldásához. Gazdasági szempontból előnyös, hogy az említett jelentős mennyiségű vizet nem kell kitermelni, így az öntözésre fordított energia akár 65%-a is megtakarítható. Az öntözés során a kezelt szennyvízben természetes módon megtalálható tápanyagok a talajba jutnak, így visszaszorítható a felhasznált vegyszerek és a műtrágyák használata, mely nem csak költségghatékony, de környezetkímélő is. A szennyvíz nagy mennyiségben tartalmazhat makroelemeket (nitrogén, foszfor és kálium), valamint mikroelemeket (kalcium, magnézium, bór, vas, mangán és cink) is, melyek igazoltan növelik a terméshozamot (*Jaramillo és Restrepo 2017*). Ezen kívül így megakadályozható a makro- és mikroelemek közvetlen víztestekbe jutása, így kialakul egy zárt, környezetbarát tápanyag-körforgás, nem romlik a víztestek minősége és csökkenthető az eutrofizáció kockázata. A szennyvíz felhasználásából adódó pénzügyi előnyök nagyban motiválhatják új szennyvíztisztítók telepítését és a meglévők fejlesztését is (*Jaramillo és Restrepo 2017*). Fontos megjegyezni, hogy amennyiben a kezelt szennyvizet célzottan a makroelemek jelenléte miatt kívánjuk öntözésre alkalmazni, akkor a kezelésből érdemes lehet kihagyni azokat a lépéseket, melyek célja ezek eltávolítása (például kémiai foszforeltávolítás, polifoszfát-akkumuláló baktériumok). Ilyen esetben az említett lépések kifejezetten hátrányosak a szennyvíz újrafelhasználása szempontjából, a teljes folyamatot tekintve akár magasabb összköltséget is jelenthet. Természetesen a technológiai sort megváltoztatni csak akkor érdemes, ha ez nem befolyásolja a kezelt szennyvíz többi minőségi paraméterét.

A visszanyert víz felelős és körültekintő felhasználásából adódó előnyök mellett számolni kell néhány nehézséggel is, amennyiben az újrafelhasználás helytelenül, nem az előírásoknak megfelelően történik. A kezelt szennyvízzel való direkt és indirekt érintkezés is számos egészségügyi kockázatot jelenthet, a korábbi fejezetekben már említett kémiai és biológiai szennyezők jelenléte miatt. Fontos kiemelni azonban, hogy a szennyezők jelenléte és mennyisége több faktortól is függ, főleg attól, milyen folyamatból származik a szennyvíz, de a közösségek szociogazdasági helyzetétől is. A vírusok, protozoonok és férgek koncentrációja a szennyvízben 10-szer, akár 1000-szer magasabb lehet a fejlődő országokban, mint a fejlett országok esetén. A mikrobiális eredetű megbetegedések, főleg a fejlődő országokban hozzájárulnak a halálozási arány növekedéséhez (*Jaramillo és Restrepo 2017*). Ebből adódóan minden alkalmazási területen egyedi, részletes kockázatelemzésre lehet szükség.

Az öntözés és a trágyázás bizonyított előnyei mellett az esetleges hátrányokra is ügyelni kell: a talaj fizikokémiai paraméterei (pH, szerves anyag mennyiség, tápanyagok, sók stb.) is megváltozhatnak. Háztartási szennyvízzel való öntözés során megnövekedhet a szerves szénformák és a nitrogén mennyisége a talajban, növelve a szerves anyag

tartalmát. A szerves anyagok mennyisége a talajszemcsék létrejöttén és stabilitásán keresztül kihat a talaj vízmegtartó képességére is. Friss kutatások alapján a mikrobák mennyisége és aktivitása, valamint a mikrobiális összetétel is megváltozhat a tápanyagok függvényében. Mindezek következtében a talaj veszíthet termékenységéből. Nehézfémetek és egyéb toxikus anyagok átszivároghatnak a talajon, erősen ingadozhat a pH, valamint felhalmozódhat a nátrium a talajban, hátrányosan befolyásolva a szemcsé-képződést. Az ARG-k és ARB-k öntözés útján szintén közvetlenül eljuthatnak a fogyasztókhoz (*Jaramillo és Restrepo 2017*).

A kémiai kockázatok rendkívül széleskörűek, többek között a szénhidrogének (dioxinok, PCB-k), és peszticidek jelentenek problémát. Ezekon kívül az újonnan megjelenő szennyezőanyagok is veszélyesek lehetnek, mivel biológiai aktivitással bírnak adott élő szervezetekben, fiziko-kémiai tulajdonságaikból adódóan pedig esetenként nehezen bonthatók, bioakkumulálódhatnak. Ide tartoznak a fájdalomcsillapítók (diklofenák, szalicilsav), a vérnyomáscsökkentők, az antibiotikumok, és az utóbbi időkben egyre nagyobb aggodalomra okot adó, az endokrin rendszert károsító anyagok (*Knisz 2020*).

Az újrafelhasználás megvalósításának nehézségei

Ahhoz, hogy a szennyvíz újrafelhasználás környezetvédelmi és gazdasági szempontból is sikeres legyen, ügyelni kell arra, hogy a kitűzött cél szem előtt tartása mellett a felhasználás logikusan és megfontolt módon, ne pedig kényszeresen történjen. Megfelelő indok és értékelés szükséges ennek biztosításához, a kérdésre, hogy megéri-e az újrafelhasználás, a válasz nem lehet egyszerű „igen” vagy „nem”. Ahol nincs vízhiány, hosszútávon célravezetőbb lehet inkább erőforrásokat megtakarítani (vegyszerek, energia, pénz, emberi erőforrások) az újrahaznosítás helyett (*Rudolph és társai 2020*).

Az újrahaznosítás gyakorlati megvalósítását első körben az nehezíti, hogy sok területen még a szennyvíztisztítás sem megoldott. Európában, országtól függően a lakosság 20-30%-a él 2000 főnél kevesebb lakosú településeken. Az EU 2022-ig ezt a népességet tekintette egy válaszpontnak. A települési szennyvíz kezeléséről szóló irányelv felülvizsgálatára az Európai Bizottság 2022. október 26-án javaslatot nyújtott be [*COM(2022) 541 2022*], melyben az 1000 főt meghaladó településekre is javasolja az irányelv kiterjesztését. Közép- és Kelet-Európában 2014-ben ezen települések csupán 9%-a csatlakozott központi szennyvíztisztító telepekhez (*Capodaglio 2017, Istenic és társai 2015*).

A decentralizált rendszerek terjedése ellenére (*Libralato és társai 2012*), az emberi tevékenységekből származó szennyvíz több mint 80%-a elégséges tisztítás nélkül kerül a befogadóba (*Capodaglio 2017*). A városi szennyvíztisztító telepek az elsődleges forrásai az újonnan megjelenő szennyezőanyagoknak, mivel az általános technológiák nem képesek teljes mértékben eltávolítani ezeket, így például szennyvízöntözés vagy trágyázás során ugyanúgy a környezetbe kerülhetnek, mintha a tisztított szennyvíz közvetlenül a befogadó víztestbe kerülne (*Jaramillo és Restrepo 2017*).

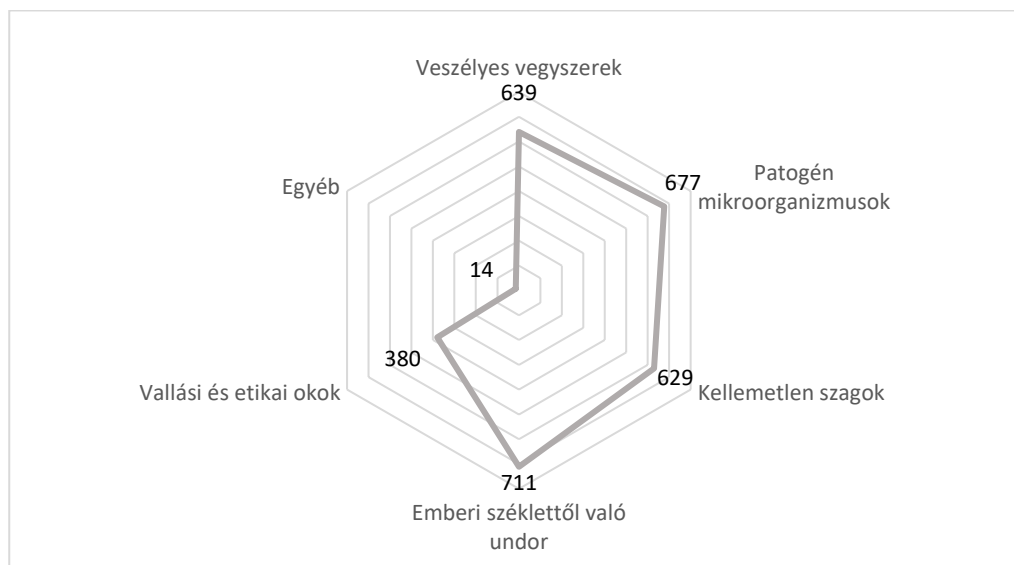
A centralizált szennyvíztisztítókhöz nem csatlakozó területrészek és kistelepülések szennyvízkezelésének megoldására alkalmazhatók az egyre népszerűbb decentralizált rendszerek (Prado és társai 2020). Ezek teljesítménye azonban erősen változó, függ az alkalmazott technológiáktól és a karbantartás mértékétől (Moelants és társai 2008, Reymond és társai 2020), így a kezelt víz felhasználása behatároltabb lehet a kockázatok csökkentésének érdekében. Hiába a kormányzati vagy önkormányzati beruházás, a karbantartás hiánya rossz hatékonyságot, vagy akár teljes működésképtelenséget eredményezhetnek (Moelants és társai 2008, Reymond és társai 2020).

A szennyvízkezelés volumene általában nagy hatással van a fajlagos költségekre. A nagyobb léptékű kezelés általában pénzügyileg kevésbé megterhelő hosszú távú alkalmazás során, de csak akkor, ha nincs kihasználatlan kapacitás. Ellenkező esetben az alacsony energiabefektetést igénylő rendszerek (például a szürkevíz-feketevíz szétválasztást is alkalmazó rendszerek) olcsóbban működhetnek (Roefs és társai 2017). A szennyvíz újrafelhasználása esetében általában modern, összetett, több lépéses tisztítórendszerek szükségesek, ám a beruházási költségek jelentősek lehetnek (Roefs és társai 2017, Rudolph és társai 2020). Egy, az Indiában kivitelezett ZLD projekt, bár nem

enged kezelte szennyvizet a környezetbe, olyan jelentős többletköltségekkel jár, melyeket nem ellensúlyoznak az elért előnyök (Rudolph és társai 2020).

A lakosság hozzáállása

Azokon a helyeken, ahol mind a technológiai, mind a pénzügyi háttér megfelelő az újrahasznosítás megvalósításához, valamint bizonyítottak a gazdasági és környezeti előnyök, a legnagyobb probléma a szennyvíz negatív megítélése és a lakosok ellenérzése (Friedler és Lahav 2006). Alapvetően két oka lehet az idegenkedésnek, melyek egészségügyi és pszichés okokra vezetnek vissza. Az egyik ok a természetes aggodalom a szennyvíz által okozott megbetegedések és szennyezések miatt, annak ellenére is, hogy nem történtek bizonyított egészségügyi problémák helyes felhasználás esetén. Azonban a helytelen felhasználásból eredő problémákra van példa, ilyen a római salátát érintő E. coli fertőzések esete Kanadában (Coulombe és társai 2020). A másik ok inkább pszichológiai eredetű, az úgynevezett „undor faktor”, például az „egyszer már toaletten lehúzott víz” fogyasztásának ösztönös elutasítása. Ezeket jelentősen befolyásolhatja a hatóságok kommunikációja, a média, és az oktatás is. További ellenállás adódhat a vallási meggyőződésből is (Chfadi és társai 2021, Duong és Saphores 2015). A lakossági ellenállás fő okait az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. A lakosság ellenállásának okai a szennyvíz-újrafelhasználással szemben (Chfadi és társai 2021, szerkesztette a szerző)

Figure 1. Reasons for the population's resistance to wastewater reuse (Chfadi et al. 2021, edited by the author)

Az önkormányzatok és a döntéshozók gyakran nehezen érik el, hogy a lakosok elfogadják a szennyvíz újrafelhasználást, így akár tervezési fázisban is megbukhatnak az ilyen tervek (Adewumi és társai 2010). Az ezredforduló előtt Ausztráliában egy szavazáson elutasították a szennyvíz ivóvízként való újrahasznosítását, pedig a szükséges technológia rendelkezésre állt. Hasonlóképp a lakosság ellenállása késleltette Sydney-ben egy sótalánító projekt megvalósulását, és San Diegoban az indirekt ivóvízként való újrahasznosítást. Az ilyen ellenállásoknak esetenként szervezett formája is kialakul, ilyenek voltak a CADS (Citizens Against Drinking Sewage – „Lakosok a szennyvíz-ivás ellen”), és a SCUD (Sydney Community United Against Desalination in Australia – „Sydney-i közösségi összefogás a sótalánítás ellen Ausztráliában”) (Dolnicar és

társai 2010). Volt rá példa, hogy megtévesztő, vagy szenzációhajhász médiamegjelenések miatt alakult ki a közösségben olyan mértékű ellenállás, hogy akár a megfinanszírozott, megépült rendszereket sem tudták működtetni (Mu'azu és társai 2020, Robinson és társai 2005).

Az aggodalmaknak lehetnek valós és képzelte alapjuk is, ennek ellenére a döntéshozók gyakran a közösség megítélése alapján cselekszenek a tudományosan megalapozott kockázatértékelések helyett (Robinson és társai 2005).

A hozzáállás területenként eltérő lehet a különböző kultúra, éghajlat, gazdasági helyzet és a víz ára miatt. Nagy jelentősége van viszont az emberek környezettudatosságának, az általuk érzékelt vízhiánynak, vagy épp a jó vízellátottságnak is (Chfadi és társai 2021, Friedler és Lahav

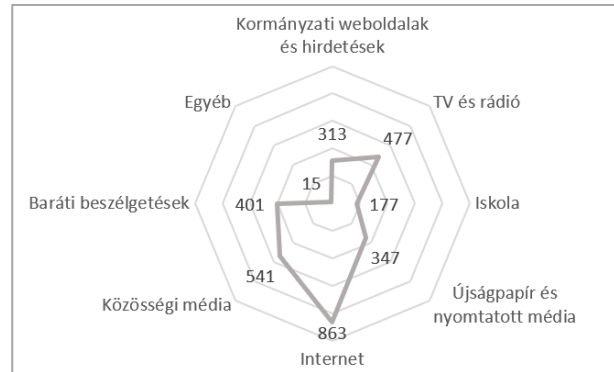
2006, Mu'azu és társai 2020). Ausztrália lakosai alapvetően elleneztek a szennyvíz újrafelhasználását annak ellenére, hogy kevesünknek volt közvetlen tapasztalata ilyen alternatív vízforrásokkal. Egy 5 évig tartó aszály, majd az azt követő szigorú szabályozások, és a jelentős médiaközvetítés hatására lettek elfogadóbbak az emberek a szennyvíz újrafelhasználása felé (Akpan és társai 2020). A megkérdezettek 94%-a állította, hogy tapasztalták a szigorításokat, és a 89%-nak emiatt változtatniuk kellett a szokásaikon. Részben emiatt, részben pedig az alaposabb informálódás hatására Ausztráliában sokkal szélesebb körben támogatják az újrafelhasználás különböző formáit (Dolnicar és Schäfer 2009).

Jelentős eltérések mutatkoznak abban, hogy az emberek mely felhasználási módot mennyire támogatják. Több tanulmány kimutatta, hogy esetenként szignifikáns különbség lehet a különböző életkorú, tájékozottságú, vallású lakosok válaszai között, de a jövedelem is befolyásoló tényező lehet (Mu'azu és társai 2020). Az alacsonyabb jövedelmű, kevésbé tanult, illetve idősebb emberek kevésbé tájékozottak a szennyvíztisztítást és felhasználást tekintve (Akpan és társai 2020). A hatóságok iránti bizalom, valamint a vízminőségről alkotott kép sem elhanyagolható (Chfadi és társai 2021). Ezen kívül, különböző országokban végzett kutatások egybehangzó eredményei alapján az emberek (függetlenül a tájékozottságtól, életkortól stb.) előnyben részesítik azokat a felhasználásokat, amikor nem kell kapcsolatba kerülniük a kezelt szennyvízzel (Chfadi és társai 2021, Mu'azu és társai 2020). Ausztráliában például a válaszadók 92%-a támogatja az „érintkezésmentes” újrafelhasználást, de csak 36%-a fogadná el ivóvízként. Egy Kínában végzett kutatás alapján az emberek több mint 70%-a támogatja a nem ivóvízként való felhasználást (Mu'azu és társai 2020).

Az Egyesült Arab Emírségekben végzett átfogó kutatás során 32 különböző felhasználási mód elfogadottságát mérték fel (Chfadi és társai 2021). Több kutatás eredményéhez hasonlóan, a legelfogadottabb újrafelhasználási módok közé tartozik a tűzoltás, az építészet és az irodai toalet-öblítés (Akpan és társai 2020, Duong és Saphores 2015, Robinson és társai 2005). Jelentős támogatása van továbbá a nem-élelmiszercélú öntözésnek, azaz a parköntözésnek. Nem meglepő módon az otthoni felhasználásokat kevésbé támogatják (az otthoni toalet-öblítést is), a legnagyobb ellenállás pedig az élelmiszercélú, és az ivóvízként való felhasználás esetében tapasztalható.

Ahhoz, hogy a közösség félelmeit el lehessen oszlatni, így nyitva utat az újrafelhasználásnak, több irányból kell megközelíteni a problémát. A projekteket teljes átláthatóság mellett kell végezni, minden információt szabadon elérhetővé kell tenni, valamint oly módon kommunikálni, hogy a nem-szakmabeliek is könnyen megértsék, egyben felkeltve az érdeklődésüket. Ezen felül, a politikusok, a szakemberek és a befektetők mellett ajánlatos bevonni a polgárokat is a döntéshozatalba (Friedler és Lahav 2006). Logikusan, több kutatás is javasolja az információterjesztést, például médiacsatornákon keresztül, vagy képzések segítségével (2. ábra). Tényszerűen kell bemutatni az egészségügyi kockázata-

tokat és eloszlatni a félreinformáltságból adódó kétségeket. Figyelemfelkeltő kampányokkal kell segíteni a szóban forgó problémák felismerését, és megerősíteni a bizalmat az újrafelhasználással kapcsolatban. Az emberek támogatását sikeres projektekkal, hatékony és korszerű technológiák kifejlesztésével, és az ezekkel elért előnyök, eredmények bemutatásával lehet a legegyszerűbben elérni (Duong és Saphores 2015, Friedler és Lahav 2006, Mu'azu és társai 2020).



2. ábra. A lakosság információs forrásai a vízzel és szennyvízzel kapcsolatban (Chfadi és társai 2021, a szerző szerkesztése)
Figure 2. Public sources of information on water and wastewater (Chfadi et al. 2021, edited by the author)

MAGYARORSZÁG JELENLEGI HELYZETE ÉS FEJLŐDÉSI LEHETŐSÉGEI

A szennyvíz általános újrafelhasználása Magyarországon más országokhoz képest alacsony, feltehetőleg azért, mert az ország kedvező vízellátottsága és éghajlata eddig ezt nem követelte meg, valamint jelentős a bizalmatlanság a visszanyert víz vonatkozásában (Bíró 2022). Ez nem azt jelenti, hogy az ország szakemberei nem foglalkoztak a kérdéssel. A Hidrológiai Közlönyben már az 1950-es évektől kezdve található közlemények a szennyvíz újrafelhasználásával, a zárt vízkörök kialakításával kapcsolatban. Az 1954-es első Országos Vízgazdálkodási Kereterv tartalmazza a víztakarékos technológiai eljárások kialakítását, a vízvisszaforgatást és a különböző mértékben tisztított szennyvizek újrafelhasználását (Mosonyi 2009). Ebben az időben az országban csak kazántápvízként, hűtővízként való felhasználás történt, az 1980-as években már a bőriparban és az élelmiszeriparban való újrafelhasználásról is jelentek meg tanulmányok (Toókos 1981, Vágás 1985). A fordulópontot viszont az EU csatlakozás jelentette (Janetasari és Bokányi 2022). Az Európai Unió rendeleteiben megfogalmazott célokat és fejlesztési irányokat Magyarország is folyamatosan beépíti a jogszabályokba. Ennek ellenére az országban még mindig kicsi az újrafelhasználás mértéke, továbbá szinte csak öntözésre használják a kezelt szennyvizet. 2018-ban a Magyarországon keletkezett szennyvíziszap 57,4%-át használták fel mezőgazdasági célra (Kovács és társai 2022).

Az 1970-es évektől kezdtek el kísérleti jelleggel nyárfás területeket öntözni kezelt szennyvízzel, bár ebben az időben inkább a szennyvíz elszikkasztásán volt a hangsúly, mintsem a gazdasági haszonszerzésen. Más növénykultúrák öntözése is történt, viszont valószínűleg támogatottság hiányában ez fokozatosan visszaszorult (Tóth 2018).

A Szegedi Tudományegyetem, a Miskolci Egyetem, a Szegedi Biológiai Kutatóközpont és a „TÁRS-95” Acélszerkezet és Gépgyártó Építőipari Kereskedelmi Kft. együttműködése során olyan membránszűrési technológiákat dolgoztak ki, melyek lehetővé teszik a szennyvizek hatékonyabb kezelését és a szennyvíziszap biztonságosabb mezőgazdasági felhasználását, azonban jelen tanulmány írásakor ezek még kísérleti fázisban voltak (*Alapi és társai 2022, Szerencsés és társai 2021*).

A közlemény írásának időpontjában más országokkal ellentétben még nem volt olyan közvéleménykutatás, amely a magyar emberek véleményét vizsgálta volna a szennyvíz különböző újrahasznosítási módjainak elfogadtságáról. Magyarország számára a vízbázisok nagy számából, a mezőgazdaságból és a termálvizekből adódóan rendkívül fontos a vízügy, a Magyar Hidrológiai Társaság és a Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség minden évben több konferenciát is szervez hallgatóknak, fiatal kutatóknak és a vizes kutatással foglalkozó szakembereknek, amely érinti az újrafelhasználást. A szakmán kívüli magyarok viszont az intézmények nyílt napjain és a Víz Világnapján tartott rendezvényein kívül nemigen találkoznak a téma fontosságával és az aktuális hírekkel és problémákkal.

Az utóbbi években olyan változások történtek, melyek jelentős hajtóerőként szolgálhatnak a szennyvíz és szennyvíziszap újrahasznosításához. Ilyenek például az extrém meteorológiai és a hidrológiai aszályok gyakoriságának növekedése, a vízfolyások öntisztulóképességének csökkenése, a vízfelhasználás és a műtrágyák jelentős drágulása (*Bíró 2022*).

A korábbi fejezetekben bemutatott Európai Uniói szabályozások, valamint a más országokban elért sikerek alapján meg lehet határozni az elérni kívánt célt és az ehhez vezető irányt. Az előrelépéshez nem elég a hajtóerő, olyan körülményeket kell teremteni, amelyek biztosítják a víztakarékosság és a széleskörű újrafelhasználás zökkenőmentes, biztonságos, hosszútávú megvalósítását.

Ehhez többek között szükség van innovatív technológiai megoldások bevezetésére, a döntéshozók megfelelő tájékoztatására, pénzügyi támogatók meggyőzésére és bevonására. Nem elhanyagolható továbbá az emberek véleményének kikérése, tájékoztatni kell őket a szennyvíz és szennyvíziszap újrahasznosításának menetéről és lehetőségeiről, meg kell győzni őket ennek fontosságáról és előnyeiről. A feldolgozott kutatások alapján el kell oszlatni továbbá az emberek kétségeit és félelmeit a visszanyert vizekkel kapcsolatban, tisztázni kell a tévhiteket és könnyen érthető módon elmagyarázni, esettanulmányokkal alátámasztani az üzeneteket. Magyarország a vízellátást tekintve kiváltságos helyzetben van, így a lakosok a jó mezőgazdaság, az alacsony vízárak, valamint az elérhető, általában jó minőségű csapvíz miatt nem feltétlenül érzékelik a víztakarékosság fontosságát. Ezért kiemelten fontos a széleskörű, minden generációhoz eljutó tájékoztatás, a médián, rendezvényeken keresztül, akár az iskolákban is.

ÖSSZEFOGLALÁS

Ez a tanulmány az utóbbi két évtizedből származó releváns szakirodalom és szabályozások áttekintésével szemléltette

a szennyvíz újrafelhasználásának előzményeit, a lehetséges újrafelhasználási módok előnyeit és hátrányait, valamint Magyarország helyzetét. Az analitikai módszerek fejlődésének köszönhetően ma már ismerjük, hogy mely szennyezők és milyen mennyiségben fordulnak elő a különböző szennyvizekben, valamint, hogy ezek milyen egészségügyi és környezeti veszélyeket rejtenek. Jelentős előrelépések történnék a szennyvíztisztítás technológiájában, ezen kívül mind a közösségek, mind a jogalkotók egyre gyakrabban foglalkoznak a felelős vízgazdálkodás és az újrafelhasználás témakörével. Ennek ellenére még a világ számos pontján történik pazarló, felelőtlen vízgazdálkodás, esetenként a szennyvíz környezetszennyező és egészségügyi kockázatokat rejtő újrafelhasználása. Magyarország pedig a jó vízellátottsága és az alacsony vízár miatt nem foglalkozik olyan intenzíven a visszanyert vízzel, mint a környező országok. A feldolgozott tanulmányok eredményei alapján a szennyvíztisztítás technológiája nagy ütemben fejlődik, így egyre több újrafelhasználási mód válik lehetővé. Fontos kiemelni azonban, hogy teljes megoldást, és a vízkészletek hosszú távú fenntartását csak a vízgazdálkodás minden területét érintő újításokkal és a víz értékének helyreállításával lehet elérni, melybe szükséges a jogalkotók, az ipari és mezőgazdasági szereplők, valamint a lakosság bevonása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

2011. évi CCIX. törvény a víziközmű-szolgáltatásról.

50/2001. (IV. 3.) Kormány rendelet a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól.

147/2010. (IV. 29.) Kormány rendelet a vizek hasznosítását, védelmét és kártételeinek elhárítását szolgáló tevékenységekre és létesítményekre vonatkozó általános szabályokról.

7/2023. (I. 12.) Kormány rendelete a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól.

253/1997. (XII. 20.) Kormány rendelet az országos településrendezési és építési követelményekről.

28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet a vízszennyező anyagok kibocsátásaira vonatkozó határértékekről és alkalmazásuk egyes szabályairól.

27/2005. (XII. 6.) KvVM rendelet a használt és szennyvizek kibocsátásának ellenőrzésére vonatkozó részletes szabályokról.

30/2008. (XII. 31.) KvVM rendelet a vizek hasznosítását, védelmét és kártételeinek elhárítását szolgáló tevékenységekre és létesítményekre vonatkozó műszaki szabályokról.

2020/741 rendelet (2020). Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2020/741 rendelete a víz újrafelhasználására vonatkozó minimumkövetelményekről.

91/271/EGK irányelv (1991). A TANÁCS IRÁNYELVE (1991. május 21.) a települési szennyvíz kezeléséről.

2013/39/EU irányelve (2013). Az Európai Parlament és a Tanács 2013/39/EU irányelve a 2000/60/EK és a 2008/105/EK irányelveknek a vízpolitika terén elsőbbségüknek minősülő anyagok tekintetében történő módosításáról.

2000/60/EK irányelve (2000). Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK irányelve (2000. október 23.) a vízpolitika terén a közösségi fellépés kereteinek meghatározásáról.

2015/495 végrehajtási határozat (2015). A bizottság (EU) 2015/495 végrehajtási határozata a 2008/105/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv alapján a vízpolitika keretében uniós szintű monitoring alá helyezendő anyagok megfigyelési listájának összeállításáról.

2018/840 végrehajtási határozat (2018). A Bizottság (EU) 2018/840 végrehajtási határozata (2018. június 5.) a vízpolitika területén uniós szintű monitoring alá helyezendő anyagok megfigyelési listájának a 2008/105/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv alapján történő összeállításáról és az (EU) 2015/495 bizottsági végrehajtási határozat hatályon kívül helyezéséről.

2020/1161 végrehajtási határozat (2020). A bizottság (EU) 2020/1161 végrehajtási határozata a vízpolitika területén uniós szintű monitoring alá helyezendő anyagok megfigyelési listájának a 2008/105/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv alapján történő összeállításáról.

2022/1307 végrehajtási határozat (2022). A Bizottság (EU) 2022/1307 végrehajtási határozata (2022. július 22.) a vízpolitika területén uniós szintű monitoring alá helyezendő anyagok megfigyelési listájának a 2008/105/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv alapján történő összeállításáról.

COM(2001) 0333 (2001). A Bizottság „Közösségi stratégia az antimikrobiális rezisztenciával szemben” című, 2001. június 20-i közleménye.

COM (2011)748 (2011). Action plan against the rising threats from Antimicrobial Resistance.

COM (2021) 400 final (2021). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Pathway to a Healthy Planet for All EU Action Plan: 'Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil'.

COM(2022) 541 (2022). Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning urban wastewater treatment (recast).

COM/2023/ 191 final (2023). A Tanács Ajánlása az antimikrobiális rezisztencia elleni küzdelmet célzó uniós fellépésnek az „Egy az egészség” koncepció keretében történő fokozásáról. (2023). <https://eu-jamrai.eu/wp->

2455/2001/EK határozat (2001). Az Európai Parlament és a Tanács 2455/2001/EK határozata (2001. november 20.) a vízpolitika területén az elsőbbségi anyagok jegyzékének megállapításáról és a 2000/60/EK irányelv módosításáról.

2008/105/EK Irányelv (2008). Az Európai Parlament és a Tanács 2008/105/EK irányelve (2008. december 16.) a vízpolitika területén a környezetminőségi előírásokról, a 82/176/EGK, a 83/513/EGK, a 84/156/EGK, a 84/491/EGK és a 86/280/EGK tanácsi irányelv módosításáról és azt követő hatályon kívül helyezéséről, valamint a 2000/60/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv módosításáról.

2009/90/EK Irányelv (2000). A vizek állapotának kémiai elemzésére és figyelemmel kísérésére vonatkozó műszaki előírásoknak a 2000/60/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv szerinti megállapításáról.

2020/1161 végrehajtási határozat (2020). A Bizottság (EU) 2020/1161 végrehajtási határozata (2020. augusztus 4.) a vízpolitika területén uniós szintű monitoring alá helyezendő anyagok megfigyelési listájának a 2008/105/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv alapján történő összeállításáról.

SWD(2020) 286 final (2020). A bizottság közleménye az európai parlamentnek, a tanácsnak, az európai gazdasági és szociális bizottságnak és a régiók bizottságának, Európai gyógyszerstratégia.

Adewumi, J.R., Ilemobade, A.A., Van Zyl, J.E. (2010). Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential and challenges. Resources, Conservation and Recycling, 55(2), pp. 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.012>

Akpan, V.E., Omole, D.O., Bassey, D.E. (2020). Assessing the public perceptions of treated wastewater reuse: opportunities and implications for urban communities in developing countries. Heliyon, 6(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05246>

Alapi, T., Berkecz, R., Ilisz, I. (2022). Proceedings of the 28th International symposium on analytical and environmental problems. University.

Biró T. (2022). Az európai szennyvízöntözési jó gyakorlat. Szennyvizek öntözési célú hasznosítása konferencia. Baja, 2022, november 16.

Capodaglio, A.G. (2017). Integrated, decentralized wastewater management for resource recovery in rural and peri-urban areas. In Resources (Köt. 6, Szám 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/resources6020022>

Chfadi, T., Gheblawi, M., Thaha, R. (2021). Public acceptance of wastewater reuse: New evidence from factor and regression analyses. Water (Switzerland), 13(10). <https://doi.org/10.3390/w13101391>

Condom, N., Lefebvre, M., Vandome, L. (2012). Treated wastewater reuse in the Mediterranean: lessons learned and tools for project development. Plan Bleu, Valbonne.

Coulombe, G., Catford, A., Martinez-Perez, A., Buena-ventura, E. (2020). Outbreaks of escherichia coli O157:H7 infections linked to Romaine Lettuce in Canada from 2008 to 2018: An analysis of food safety context. In Journal of Food Protection International Association for Food Protection. Vol. 83, Issue 8, pp. 1444-1462. <https://doi.org/10.4315/JFP-20-029>

- Crini, G., Lichtfouse, E. (2019).* Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. In *Environmental Chemistry Letters* Springer Verlag. (Vol. 17, Issue pp. 145-155). <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Dimane, F., El Hammoudani, Y. (2021).* Assessment of quality and potential reuse of wastewater treated with conventional activated sludge. *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 7742-7746. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.428>
- Dolnicar, S., Hurlimann, A., Nghiem, L.D. (2010).* The effect of information on public acceptance-The case of water from alternative sources. *Journal of Environmental Management*, 91(6), pp. 1288-1293. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.003>
- Dolnicar, S., Schäfer, A.I. (2009).* Desalinated versus recycled water: Public perceptions and profiles of the accepters. *Journal of Environmental Management*, 90(2), pp. 888-900. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.02.003>
- Duong, K., Saphores, J.D.M. (2015).* Obstacles to wastewater reuse: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(3), pp. 199-214. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1074>
- Ezeuko, A.S., Ojemaye, M.O., Okoh, O.O., Okoh, A.I. (2021).* Technological advancement for eliminating antibiotic resistance genes from wastewater: A review of their mechanisms and progress. In *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Elsevier Ltd. Vol. 9. issue 5. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106183>
- Faragò, M., Damgaard, A., Madsen, J.A., Andersen, J.K., Thornberg, D., Andersen, M.H., Rygaard, M. (2021).* From wastewater treatment to water resource recovery: Environmental and economic impacts of full-scale implementation. *Water Research*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117554>
- Fit4Reuse (2023).* <https://fit4reuse.org/about/fit4reuse-objectives/>
- Friedler, E., Lahav, O. (2006).* Centralised urban wastewater reuse: What is the public attitude? *Water Science and Technology*, 54(6-7), pp. 423-430. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.605>
- Gao, M., Zhang, L., Florentino, A.P., Liu, Y. (2019).* Performance of anaerobic treatment of blackwater collected from different toilet flushing systems: Can we achieve both energy recovery and water conservation? *Journal of Hazardous Materials*, 365, pp. 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.055>
- Gomez-Valero, L., Buchrieser, C. (2019).* Intracellular parasitism, the driving force of evolution of *Legionella pneumophila* and the genus *Legionella*. In *Genes and Immunity*, Vol. 20, Issue 5, pp. 394-402. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41435-019-0074-z>
- Gudda, F.O., Waigi, M.G., Odinga, E.S., Yang, B., Carter, L., Gao, Y. (2020).* Antibiotic-contaminated wastewater irrigated vegetables pose resistance selection risks to the gut microbiome. In *Environmental Pollution*, Vol. 264. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114752>
- Gundy, P.M., Gerba, C.P., Pepper, I.L. (2009).* Survival of Coronaviruses in Water and Wastewater. *Food and Environmental Virology*, 1(1), pp. 10-14. <https://doi.org/10.1007/s12560-008-9001-6>
- Gupta, N., Khan, D.K., Santra, S.C. (2010).* Determination of public health hazard potential of wastewater reuse in crop production. *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, 7(4), pp. 328-340. <https://doi.org/10.1504/WRSTSD.2010.032741>
- Hutinel, M., Larsson, D.G.J., Flach, C.F. (2022).* Antibiotic resistance genes of emerging concern in municipal and hospital wastewater from a major Swedish city. *Science of the Total Environment*, 812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151433>
- Istencic, D., Bodik, I., Bulc, T. (2015).* Status of decentralised wastewater treatment systems and barriers for implementation of nature-based systems in central and eastern Europe. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(17), pp. 12879-12884. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3747-1>
- Janetasari, S.A., Bokányi, L. (2022).* Challenges on creation of sustainable municipal waste and wastewater management in Indonesia using experience of Hungary. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1017(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1017/1/012028>
- Jaramillo, M.F., Restrepo, I. (2017).* Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. In *Sustainability (Switzerland)*. MDPI. Vol. 9. Issue 10. <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- Juhász E. (2011).* A szennyvíztisztítás története (E. Juhász, Szerk.). Magyar Víziközmű Szövetség.
- Karches T. (2020).* Kis kapacitású szennyvíztisztító létesítmények (T. Karches, Szerk.), Ludovika Kiadó.
- Knisz J. (szerk.) (2020).* Szerves mikroszennyezők a vizekben, Ludovika Kiadó.
- Kovács, R., Wang, C.T, Nagy, V. (2022).* Marginal note on wastewater recycling margins from the perspective of simultanism of sustainability and technological development. *Columella: Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 9(2), 135-143. <https://doi.org/10.18380/szie.colum.2022.9.2.135>
- Knisz, J., Shetty, P., Wirth, R., Maróti, G., Karches, T., Dalkó, I., Bálint, M., Vadkerti, E., Bíró, T. (2021).* Genome-level insights into the operation of an on-site biological wastewater treatment unit reveal the importance of storage time. *Science of the Total Environment*, 766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144425>
- Libralato, G., Volpi Ghirardini, A., Avezzi, F. (2012).* To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. *Journal of Environmental Management*, 94(1), pp. 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.07.010>
- Ligetvári F., Zsabokorszky F., Kovács, K., Zsirai, I. (2015).* Wastewater Treatment and Sludge Utilisation in Hungary. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 4(3). <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2015.03.005>

Moelants, N., Janssen, G., Smets, I., Van Impe, J. (2008). Field performance assessment of onsite individual wastewater treatment systems. *Water Science and Technology*, 58(1), pp. 1-6. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.325>

Mosonyi E. (2009). Az 1954. évi első Országos Víz-gazdálkodási Keretterv. *Hidrológiai Közlöny*, 89(5). pp. 11-20.

Mu'azu, N.D., Abubakar, I.R., Blaisi, N.I. (2020). Public acceptability of treated wastewater reuse in Saudi Arabia: Implications for water management policy. *Science of the Total Environment*, 721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137659>

Pálfai I. (2005). Néhány szó a Duna-Tisza közti Homokhátság vízviszonyairól. *Hidrológiai közlöny*, 85. évf. 4. sz. pp. 63.

Prado, L.O., Souza, H.H.S., Chiquito, G.M., Paulo, P.L., Boncz, M.A. (2020). A comparison of different scenarios for on-site reuse of blackwater and kitchen waste using the life cycle assessment methodology. *Environmental Impact Assessment Review*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106362>

Quach-Cu, J., Herrera-Lynch, B., Marciniak, C., Adams, S., Simmerman, A., Reinke, R.A. (2018). The effect of primary, secondary, and tertiary wastewater treatment processes on antibiotic resistance gene (ARG) concentrations in solid and dissolved wastewater fractions. *Water (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/w10010037>

Reymond, P., Chandragiri, R., Ulrich, L. (2020). Governance Arrangements for the Scaling Up of Small-Scale Wastewater Treatment and Reuse Systems-Lessons From India. *Frontiers in Environmental Science*, 8(72), pp. 1-16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00072>

Robinson, K. G., Robinson, C.H., Hawkins, S.A. (2005). Assessment of public perception regarding wastewater reuse. <https://iwaponline.com/ws/article-pdf/5/1/59/417393/59.pdf>

Roefs, I., Meulman, B., Vreeburg, J.H.G., Spiller, M. (2017). Centralised, decentralised or hybrid sanitation systems? Economic evaluation under urban development uncertainty and phased expansion. *Water Research*, 109, pp. 274-286. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.051>

Rout, P.R., Shahid, M.K., Dash, R.R., Bhunia, P., Liu, D., Varjani, S., Zhang, T.C., Surampalli, R.Y. (2021). Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies.

Journal of Environmental Management, 296. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113246>

Rudolph, K.U., Boysen, B., Hilbig, J., Shalizi, F., Stroemer, K., Walenzik, G. (2020). Drivers, challenges and solutions—Case studies for water reuse. In *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*, Vol. 5, pp. 189-225. <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2020.07.009>

Seow, T.W., Lim, C.K., Md Norb, H.M., Mubarak, M.F.M., Mubarak, M.F.M., Lam, C.Y., Yahya, A., Ibrahim, Z. (2016). Review on Wastewater Treatment Technologies. In *International Journal of Applied Environmental Sciences*, Vol. 11. Issue 1. pp. 111-126.

Singh, A. (2021). A review of wastewater irrigation: Environmental implications. In *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 168. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105454>

Sun, L., Dog, H., Lu, Y., Zhang, L., Yang, L., Zhao, J., Song, Y. (2023). A hydrate-based zero liquid discharge method for high-concentration organic wastewater: resource recovery and water reclamation. *npj Clean Water*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00262-w>

Szerencsés Sz.Gy., Beszédes S., László Zs., Veréb G., Szegedi B., Horváth Z., Hodúr C., Rákhely G., Kertész, S. (2021). Effect of vibration on the efficiency of ultrafiltration. *Analecta Technica Szegedinensia*, 15(1), pp. 37-44. <https://doi.org/10.14232/analecta.2021.1.37-44>

Tervahauta, T., Rani, S., Hernández-Leal, L., Buisman, C.J.N., Zeeman, G. (2014). Black water sludge reuse in agriculture: Are heavy metals a problem? *Journal of Hazardous Materials*, 274, pp. 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.018>

Toókos I. (1981). Vízújrahasználat az élelmiszeriparban. *Hidrológiai Közlöny*, 61(4), pp. 159-166.

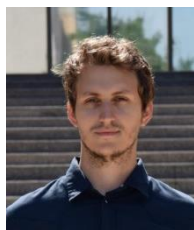
Tóth T. (2018). A tisztított szennyvíz mezőgazdasági hasznosítására alkalmas területek meghatározása Magyarországon. *Hadmérnök*, XIII. évfolyam 3. szám

Yaqub M., Lee, W. (2019). Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review. In *Science of the Total Environment*, Vol. 681. pp. 551-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.062>

Vágás I. (1985). Egyesületi és Műszaki Hírek. *Hidrológiai Közlöny*, 65(5), pp. 273.

WHO (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth Edition Incorporating the First Addendum*.

A SZERZŐ



GYŐRKŐ GÁBOR okleveles vegyész-mérnök (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2021), jelenleg a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen folytat PhD tanulmányokat. 2022 óta a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Karán a Környezeti Mikrobiológia Kutatócsoport tagja, továbbá kémia, mérnöki kémia, vízkémia, környezeti biotechnológia tárgyakat oktat.