

Szerves mikroszennyezők eltávolításának hatékonysága a parti szűrés folyamatában

Bevezetés

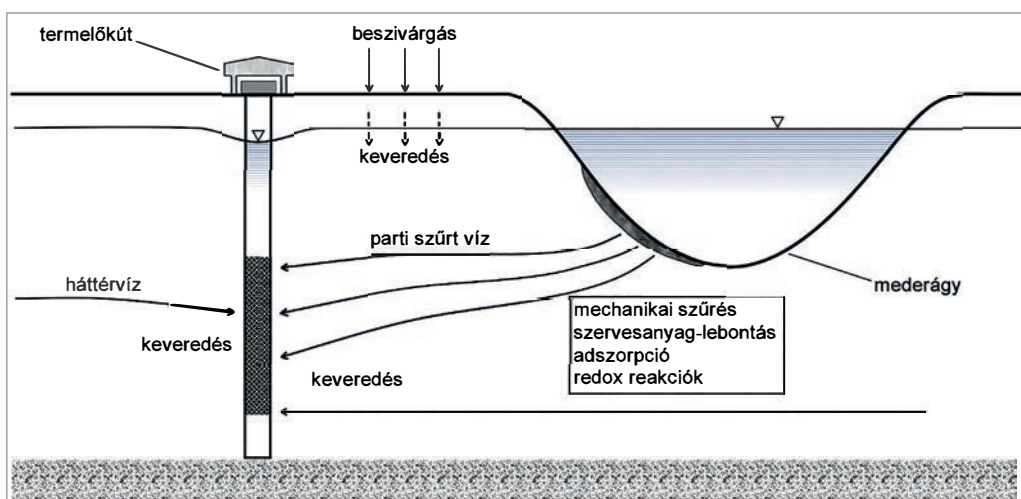
Az elmúlt néhány évtizedben felszíni vizeink és vízbázisaink állapota, környezeti hatásokkal szembeni kitettsége sokat változott, és ez a változás a mai napig nem állt meg, sőt bizonyos tekintetben még fel is gyorsult. Ellentétben a globális trendekkel, a hazai víztermelés mennyiségi mutatói a 80-as évek végén tapasztalt visszaesés után többé-kevésbé stagnálnak, esetleg további lassú csökkenést mutatnak. Túlhasználatot, illetve víztermelés-növekedést elsősorban öntözési célú vízbázisok esetében tapasztalhatunk. A meteorológiai jelenségekkel dinamikus kapcsolatban álló felszíni és egyes felszín alatti vízbázisokra a klímaváltozás jelentős hatást gyakorol. A globális változások egyik helyi hatása a csapadékvízviszonyok szélsőségesebbé válása, azaz a vízbázisok utánpótlódása egyre kevésbé tekinthető kiegyensúlyozottnak. A felkészülést nehezíti a szélsőséges időjárási események kiszámíthatatlansága és bizonytalan előrejelezhetősége [1]. A klímaváltozás számos olyan kérdést vet fel a vízkészlet-gazdálkodás területén, amelyre az eddig megszokottnál sokkal gyorsabban kell választ találni.

A környezetszennyezés továbbra is napjaink égető problémája, de a hazai felszíni és felszín alatti vízkészletek minőségére fókuszálva kijelenthető, hogy a múlt század legvégétől egy lassú, de egyértelműen pozitív irányba mutató folyamat indult el. Ez részben az ipar átalakulásának, részben pedig a szigorodó elvárások nyomán megindult szennyvíz- és hulladékkezelési technológia fejlődésének köszönhető. A kommunális és ipari szennyvizek több fokozatú tisztításának elterjedése elsősorban a befogadók szervesanyag-terhelését csökkentette, az ipari hulladékkezelésben bekövetkezett változások pedig a nehézfémek, szerves peszticidek, PCB- (poliklórozott bifenilek) és PAH- (policiklusos aromás szénhidrogének) vegyületek, kőolajszármazékok kibocsátását vetették vissza. E pozitív változás azonban nem minden területen érvényesül, sőt a palettán számos olyan szerves mikroszennyező jelent meg, amelyek korábban a napjainkban tapasztalható mennyiségben nem voltak jellemzők. E mikroszennyezők kutatása, ökológiai és humán egészségre gyakorolt hatásának vizsgálata a jelen fontos feladata. A hazai ivóvízellátás jelentős részét biztosító parti szűrésű vízbázisok szerves mikroszennyezők szempontjából nem tekinthetők védettnek, e szennyező komponensek egy része nem bomlik le a parti szűrés folyamatában, és elérheti a vízbázis termelőkútjait.

A parti szűrés folyamatai

Hazánkban a víztermelés közel harmada parti szűrésű vízbázisokon alapul, amelyek közös jellemzője, hogy valamely felszíni víztesttel – Magyarországon kivétel nélkül folyóval – közvetlen és dinamikus kapcsolatban állnak, amely mind a kitermelhető víz minőségére, mind pedig a mennyiségére hatással van. Parti szűrésű vízbázis létesítése esetén a termelőkutakat a folyómederhez közel – 50-100 méteren belül – a folyó által lerakott jó vízvezető képességű

kavicsteraszon alakítják ki. A parti szűrés folyamata során a felszíni víz a mederágyon átszűrődve jut el a víztermelő kútba. A folyó vizének a mederágyba történő beszivárgása és a kút irányába történő áramlása a természetes mozgások mellett a víztermelés hatására következik be. Ez a mesterségesen létrehozott áramlás a vízbázisból kitermelte víz mennyiségének függvényében határozza meg a szivárgási időt, amely a parti szűrés folyamatának lényeges tényezője. A szivárgás során főleg mechanikai, fizikai-kémiai és biológiai folyamatok zajlanak, amelyek következtében többek között a felszíni víz lebegő- és szervesanyag-tartalma csökken jelentős mértékben, valamint mikrobiológiai paraméterei akár több nagyságrenddel is javulhatnak (1. ábra) [2]. Ideális körülmények esetén a parti szűrésű kutak által termelt nyersvíz paraméterei megfelelnek a jelenleg érvényben lévő, szigorúnak mondható ivóvízszabvány feltételeinek, azaz az így termelt víz akár további kezelés nélkül – esetleg utófertőtlenítés után – továbbítható az ivóvízelosztó hálózatba.



1. ábra: A parti szűrés folyamatai [3] (a szerzők)

A parti szűrés vitathatatlan előnye tehát, hogy a vízkezelést természetes folyamatokra bízva, így az ivóvíztermelés folyamatában jelentős költség- és energiamegtakarítás érhető el. Felismerve azt a tényt, hogy a parti szűrésű kút által termelt nyersvíz más típusú felszín alatti vizekkel összehasonlítva lényegesen alacsonyabb üzemi költségek árán tisztítható ivóvízzé, a parti szűrésű vízszerezés hazánkban és a világ más országaiban is gyakran, jelentős arányban alkalmazott módszer. A szivárgás során a mederágy adottságainak függvényében a folyó vize változó arányban keveredik a felszín alatti vízzel, így a víztermelő kútból kitermelhető nyersvíz tulajdonképpen e kettő keveréke. A vonatkozó 219/2004. (VII. 21.) kormányrendelet alapján a szűrt folyóvíz aránya a termelt vízben legalább 50% kell hogy legyen [4], de korábbi kutatásokban végzett oxigén- és hidrogénizotópos vizsgálatok is alátámasztják, hogy ez az arány a vízállástól és a hidrogeológiai paraméterektől függően 60% és 95% között változhat [5]. Évtizedek tapasztalatai azt mutatják, hogy előnyösebb, ha a szűrt folyóvíz aránya lényegesen nagyobb a felszín alatti víz (úgynevezett háttérvíz) arányához képest. Ez utóbbi általában határérték feletti vas- és mangántartalommal, esetenként nitrogénformákkal szennyezett, így ilyen esetben kiegészítő vízkezelési technológia üzemeltetése elengedhetetlen. A vízbázisból kitermelte víz mennyisége

által jelentősen befolyásolt szivárgási időnek meghatározható az ideális tartománya. Túl gyors szivárgási sebesség esetén a várt biológiai-kémiai folyamatok nem zajlanak le teljes mértékben, és a felszíni vízre jellemző szennyezések elérhetik a termelőkutat. Az ideálisnál lényegesen hosszabb szivárgási idő esetén pedig a víz tartósan anaerob állapotba kerül, és e körülmények között nem kívánt kémiai folyamatok zajlanak le. Ilyen reakció a már oxidált állapotban lévő vas és mangán visszaoldódása, amelyek koncentrációja így a kút nyersvizében megemelkedik, ez pedig további vízkezelési lépéseket tesz szükségessé [6]. Összességében elmondható, hogy egy gondosan megválasztott helyre telepített parti szűrésű kút által termelt víz kiváló minőségű, a felszíni vizekre jellemző szennyező anyagok többségét a parti szűrés eltávolítja. Fontos azonban rávilágítani, hogy egyes szennyező anyagok esetében a parti szűrés hatásfoka nem tekinthető elegendőnek. Ilyenek a szerves mikroszennyezők, amelyek eltávolítása kapcsán már sokkal árnyaltabb képet kapunk.

Szerves mikroszennyezők csoportosítása

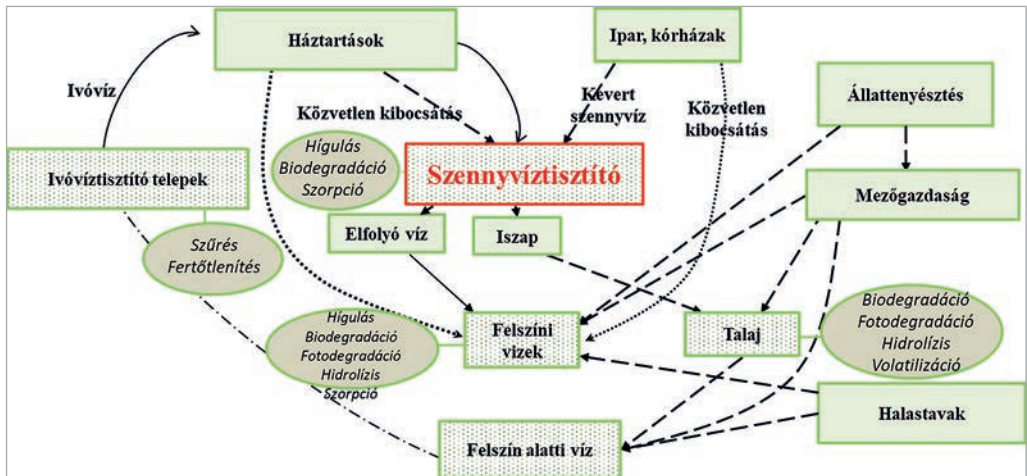
Szerves mikroszennyezőknek azokat a vegyületeket nevezzük, amelyek már mikrogramm/liter koncentrációban is negatívan befolyásolják a víz felhasználhatóságát, fogyaszthatóságát, ökológiai paramétereit [7]. Közös jellemzőjük, hogy biológiailag nem, vagy csak nehezen bonthatók, a szennyezőforrástól nagy távolságra képesek eljutni gyakorlatilag változatlan formában, koncentrációjuk hígulás folyamán csökkenhet, illetve kiüledés során bizonyos zónákban növekedhet. A mikroszennyezők alapvetően két csoportba, a szerves és a szerves mikroszennyezők csoportjába sorolhatók. A szerves mikroszennyezők közé soroljuk többek között a vas- és mangánvegyületeket, egyéb nehézfémeket, az arzén szerves módosulatait, amelyek főleg felszín alatti vizek anaerob környezetében fordulnak elő.

A szerves mikroszennyezők köre igen jelentős számú és eltérő tulajdonságú vegyületet foglal magában, ami megnehezíti vizsgálatukat, kutatásukat, eltávolítási lehetőségüket. E szennyező anyagok jellemzően az alábbi csoportokba sorolhatók:

- PPCP-k (gyógyszerek és testápolási termékek);
- peszticidek;
- felületaktív anyagok;
- égésgátlók;
- égési termékek és melléktermékek;
- üzemanyag-adalékanyagok;
- perfluorozott anyagok (PFC);
- élelmiszer-adalékanyagok, poliklórozott bifenilek;
- biszfenolok;
- algatoxinok stb. [7].

Szerves mikroszennyezők felszíni és felszín alatti vizekben

A szerves mikroszennyezők közös jellemzője, hogy az esetek jelentős többségében antropogén eredetűek, azaz előfordulásuk jelenlegi vagy múltbéli emberi tevékenységhez köthető. A leggyakoribb forrásokat és utakat a 2. ábra mutatja be.



2. ábra: A szerves mikroszennyezők forrásai és sorsuk a környezetben [8] (a szerzők)

Tekintve, hogy az ivóvíztermelésünk felszíni vagy felszín alatti vízádókon alapul, mindenképpen érdemes vizsgálni a szerves mikroszennyezők jelenlétét vízbázisainkban. A felszín alatti vizek jellemző szennyezőforrása a mezőgazdaság, amely főleg peszticidek és műtrágyákból származó vegyületek kibocsátását jelenti. Szintén fontos szennyezőforrás lehet az ipar. Bár hazánkban az ipari szennyvizek és hulladékok kezelése ma már szigorú előírások szerint zajlik, korábbi, sokszor kontroll nélkül elhelyezett hulladékok több helyen is működő vízbázisokat veszélyeztetnek [9]. Ezek felszámolása bár hosszadalmas és meglehetősen költséges feladat lehet, kiemelt figyelmet kell hogy kapjon.

Felszíni vizeink szennyezőforrásai többek között a kommunális és ipari szennyvízbevezetések, a hulladéklerakókról és mezőgazdasági területekről eredő bemosódások és a haváriaesemények. Szennyvízkezelésünk sokat fejlődött az elmúlt évtizedek során, a korábban kezeletlen vagy csak egy lépcsőben kezelt szennyvizek ma bár biológiai tisztítási fokozatot követően kerülnek a befogadóba. Fontos azonban kihangsúlyozni, hogy egyes szerves mikroszennyezők, így például a gyógyszermaradványok esetében a biológiai szennyvíztisztítás sem elégséges, csak bizonyos technológiák, mint az MBBR (mozgó ágyas biofilm reaktor), vagy összetett, membránszűréssel kombinált harmadik tisztítási fokozat üzemeltetésével lehetne elérni e vegyületek elfogadható mértékű visszatartását [10]. A hazai felszíni vizekben előforduló mikroszennyezőkről viszonylag kevés adat áll rendelkezésünkre, de az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy a Duna vízminősége e tekintetben határozottan jobb, mint más, kisebb vízhozamú európai folyóké [13].

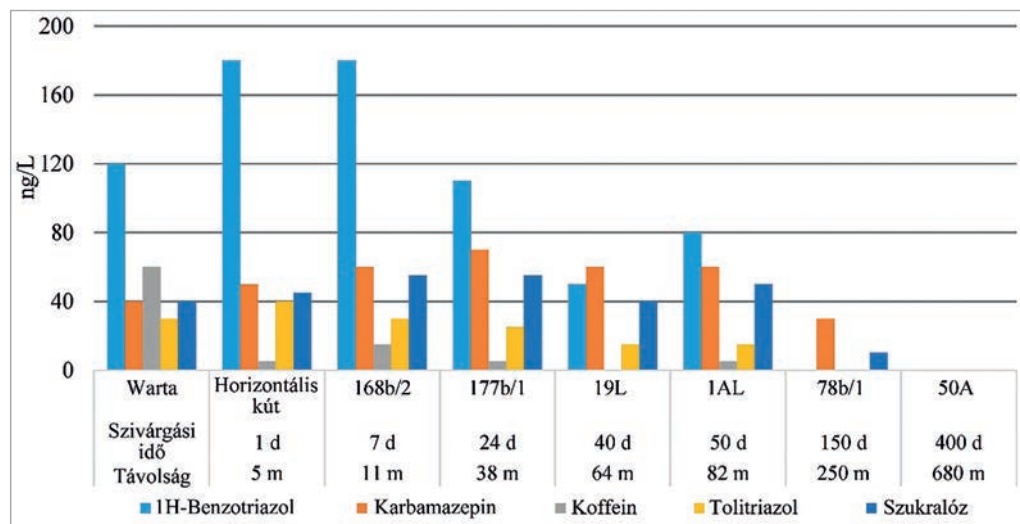
Szerves mikroszennyezők koncentrációjának csökkenése a parti szűrés folyamatában

A szerves mikroszennyezők jelenlétének, eltávolíthatóságának vizsgálatát több tényező is indokolja. E szennyező anyagok megjelenése vízbázisainkban határozott kockázatot jelent az ivóvízellátásra, mert alacsony koncentrációban is jelentős minőségromlást okozhatnak. Sok esetben nehezen bontható, perzisztens vegyületekről van szó, amelyek a klasszikus ivóvízkezelési módszerekkel – mint a mechanikai szűrés, oxidáció, flokkuláció vagy az aktívszén-szűrés – nem

távolíthatók el megfelelő mértékben. Eltávolításuk általában membránszűréssel – ultraszűrés, nanoszűrés vagy fordított ozmózis – történik, amely viszonylag költséges megoldás, kapacitással kapcsolatos problémák merülhetnek fel, továbbá jelentős lehet a karbantartási igény. A vízkezelésben általános érvényű megállapítás, hogy célszerű minél kevesebb lépcsőben, minél kevesebb technológiai egység üzemeltetésével elérni a kívánt vízminőséget, így a parti szűrés hatásfokának vizsgálata a klasszikus szennyező anyagok mellett a szerves mikroszennyezők eltávolítására nézve is indokolt.

A szerves mikroszennyezők csökkenése és a szivárgási úthossz kapcsolata

Több kutatás vizsgálta a szerves mikroszennyezők eltávolításának hatékonysága, valamint a szivárgási úthossz, azaz a mederfal és a kút távolsága közötti összefüggéseket [11] [13]. 2017-ben a lengyelországi Warta folyóban és a Poznan város vízellátását biztosító parti szűrésű kutak által termelt nyersvízben vizsgáltak néhány kiválasztott szerves mikroszennyezőt. A kutatás egyértelmű összefüggést mutatott a mikroszennyezők koncentrációja és a kutak folyótól való távolsága, azaz a szivárgási úthossz között [11]. A jelentősebb koncentrációban előforduló mikroszennyezők az 1H-benzotriazol (fagyálló adalékanyag), a karbamazepin (gyógyszerhatóanyag), a koffein és a szukralóz (édesítőszer) voltak. Egyes vegyületek mérhető koncentrációja egyértelműen csökkent a folyómedertől való távolsággal, de bizonyos vegyületek esetében, mint a karbamazepin és a szukralóz, csupán kisebb mértékű változás volt kimutatható (3. ábra).



3. ábra: Szerves mikroszennyezők koncentrációjának csökkenése és a szivárgási úthossz kapcsolata [11] (a szerzők)

Más vegyületeket, mint a diklofenák fájdalomcsillapítót csak a folyóvízből sikerült kimutatni, a kutakban nem jelent meg. A kutatás hiányossága a parti szűrt víz arányának előzetes meghatározása a vizsgált termelőkutakban. A parti szűrés hatékonyságának vizsgálatához elengedhetetlen a szűrt víz és a háttérvíz arányának pontos megállapítása. Ehhez legalkalmasabb az oxigénizotópos vizsgálat, amelynek segítségével meghatározható, hogy a kút által termelt víz mekkora

hányada származik felszíni vízből [12]. Ennek hiányában, a felszín alatti víz hígító hatásának ismerete nélkül az eredmények nem mutatnak pontos képet a szennyező anyagok eltávolításának hatékonyságáról.

Szerves mikroszennyezők jelenlétének vizsgálata budapesti vízbázisokon

Egy 2016 és 2019 között zajló nemzetközi projekt során végzett kutatásban a Fővárosi Vízművek a parti szűrés ultrafiltrációval, nanofiltrációval, valamint fordított ozmózissal történő kombinálhatóságát vizsgálta [13]. A kutatás során egyéb paraméterek mellett szerves mikroszennyezők koncentrációját is figyelemmel kísérték két üzemelő vízbázison, a Szentendrei-szigeten található északi vízbázis, valamint a Csepel-szigeten Ráckeve és Szigetszentmiklós között elhelyezkedő déli vízbázis kútjaiban. A két vízbázis között elhelyezkedésük mellett lényeges különbség a kutak medertől való távolsága, amely a Csepel-szigeti vízbázis esetében nagyobb. A kutatásban 36 mikroszennyezőt vizsgáltak, két felszíni vízmintavételi ponton és két kútban. Az eredményeket összehasonlítva az egyes mikroszennyezőkre megállapítható az eltávolítás határfoka. A vizsgált mikroszennyezők közül tizenkettőt csak a Dunából vett vízmintákban sikerült kimutatni, a parti szűrt vízben nem voltak jelen, vagy csak a kimutathatósági határérték alatti koncentrációban. 12 vegyület kimutatható volt a felszíni és a szűrt vízmintákban egyaránt. Ezek koncentrációjának változása a parti szűrés folyamatában tág határok között mozgott. A metazaklór növényvédőszer esetében a szentendrei-szigeti vízbázison 78%-os eltávolítási határfokot sikerült kimutatni, míg ezen vegyület koncentrációja a Csepel-szigeti vízbázison csak 12%-kal csökkent. Jelentősebb eltávolítás az benzotriazol esetében volt mérhető (69% és 43%), míg legkisebb arányban a szulfametoxazol nevű antibiotikum-hatóanyag koncentrációja csökkent. A műanyagipar által előszeretettel használt biszfenol-A koncentrációja egyes esetekben a kutakban nagyobb koncentrációban volt kimutatható, mint a felszíni vízben. A kutatás megállapította, hogy a szerves mikroszennyezők elsősorban anaerob körülmények között távolíthatók el parti szűréssel jelentősebb mértékben. Egyes mikroszennyezők, mint a szulfametoxazol vagy a diklofenák eltávolítása hosszabb szivárgási utat igényel, így ezen vegyületek esetében a Csepel-szigeti vízbázis hatékonyabbnak bizonyult [13].

Változó éghajlat, szélsőséges időjárás, növekvő kockázat

Parti szűrésű vízbázisainknak az éghajlat változásával kétségtelenül új kihívásokkal kell szembenéznük. A klímaváltozás okozta hatások lehetnek közvetlenek, mint a hőmérséklet-változás, vagy közvetettek, mint az áramlási viszonyok és a vízminőség változása. A vízbázis kiválasztásánál, tervezésénél és kivitelezésénél figyelembe vett környezeti körülmények, hidrológiai paraméterek változása a korábban kifogástalanul működő folyamatokat felboríthatja, negatívan befolyásolhatja. Az éghajlatváltozás egyik hatása a csapadékesemények szélsőségesé válása, megjelentek a tartósan csapadékmentes időszakok, amelyeket rövid idő alatt lehulló, extrém intenzitású csapadékesemények követnek. Ez természetesen befolyásolja a folyók vízjárását, ezáltal a parti szűrésű vízbázisra jellemző szivárgási irányokat, sebességet és ebből következően a szivárgási időt. A szivárgási idő és sebesség kulcsfontosságú tényező a kitermelhető víz minőségének vonatkozásában. Alacsony vízállás esetén a szivárgás sebessége lelassul, a szivárgási idő

megnő a szűrési zónában, és a mikrobiológiai szervezetek által irányított redoxfolyamatok után további nem kívánt kémiai reakciók zajlanak le. Az alacsony vízállással arányosan lecsökkent vízhozam kapcsán feltételezhető, hogy egyes szennyező anyagok fajlagos koncentrációja megemelkedik, hiszen a bevezetett szennyvizek mennyisége változatlan marad. Az extrém magas vízállás, árvíz szintén problémát okozhat. Az átmenetileg elöntött területekről meginduló beszivárgás megváltoztatja az áramlás irányát és sebességét, továbbá a felszíni víz szivárgása egy olyan zónán keresztül valósul meg, amely korábban nem állt közvetlen kapcsolatban a folyóval, így biológiailag aktív zóna nem alakult ki. Ez nem várt szennyező anyagok megjelenését, koncentrációjának emelkedését eredményezheti a kutakban. Megállapítható, hogy a parti szűrésű vízbázis szempontjából a kiegyenlített, szélsőségektől mentes vízjárás ideális. A klímaváltozás hatására bekövetkező szélsőséges vízállások következtében gyakoribbakká válhatnak a szűrési folyamatok szempontjából problémás körülmények, szennyezőanyag-betörések, mindez pedig ingadozó vízminőséget okozhat a termelőkutakban [14].

Összefoglalás

A szerves mikroszennyezők környezeti és humán egészségügyi hatásának kutatása az elmúlt évtizedekben vált igazán fontossá. A csoportba tartozó nagyszámú, eltérő tulajdonságú vegyület számos forrásból kerülhet azokba a ciklikus folyamatokba, amelynek az ember is része. E szennyező anyagok az ivóvízellátás jelentős részét biztosító parti szűrésű vízbázisok számára kiemelt kockázatot jelentenek, mert pillanatnyilag nincs átfogó képünk arról, hogy milyen környezeti faktorok befolyásolják e vegyületek kutakban való megjelenését. A szivárgási úthossz, a szivárgási idő, a szennyező anyag (bio)degradációs tulajdonságai, valamint a szűrőközeg aerob/anaerob zónáinak arányai meghatározó tényezők. A parti szűrés rendkívül összetett folyamatait, valamint a szerves mikroszennyezők viselkedését a természetes szűrési folyamatok során tovább bonyolítja az éghajlatváltozás. A változó klíma hatására bekövetkező szélsőséges meteorológiai események, mint a tartós aszályok és villámárvizek a parti szűrésű vízbázisok stabilitását negatívan befolyásolják, így egyes szennyező anyagok kutakban történő váratlan megjelenésére is számítani lehet. A hazai ivóvízellátás jelentős részét biztosító parti szűrésű vízbázisok stabil, jól működő rendszerek. Ezt a stabilitást célzott kutatásokkal, a lehetséges scenáriók számbavételével és az azokra történő gondos felkészüléssel tudjuk megőrizni.

Felhasznált irodalom

1. Földi L, Kuti R. Extreme weather phenomena, improvement of preparedness. Hadmérnök. 2012. szeptember;7(3):60–65.
2. Hiscock KM, Grischek T. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. J Hydrol [Internet]. 2001 [letöltve 2019. november 17.];266(3–4):139–144. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00158-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00158-0)
3. Goda Z. Az éghajlatváltozás lehetséges hatásai a parti szűrésű vízbázisokra. Műszaki Katonai Közlöny [Internet]. 2019 [letöltve 2019. november 17.];29(1):185–194. DOI: <http://doi.org/10.32562/mkk.2019.1.15>
4. 219/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet a felszín alatti vizek védelméről
5. Kármán K. A parti szűrésű vízbázisok és jelentőségük. Magyar Tudomány. 2013;174(11):1300–1306.

6. Salamon E, Goda Z, Berek T. Analysis of reverse osmosis filter permeability. Pollack Periodica: An international journal for engineering and information sciences [Internet]. 2018 Dec [letöltve 2019. november 17.];13(3):221–230. DOI: <https://doi.org/10.1556/606.2018.13.3.21>
7. Knisz J, szerkesztő. Szerves mikroszennyezők a vizekben. Budapest: Nemzeti Közszerkesztési Egyetem; 2020. 371 p.
8. Knisz J, Vadkerti E. A szerves mikroszennyezők előfordulása, sorsa, hatása a környezetben. In: Knisz J, szerkesztő. Szerves mikroszennyezők a vizekben. Budapest: Nemzeti Közszerkesztési Egyetem; 2020. p. 47–84.
9. Greenpeace [Internet]. Budapest: Greenpeace Magyarország Egyesület; [s. a.]. Mérgezett örökségünk. Szennyezett területek és időzített vegyi bombák Magyarországon [letöltve 2019. november 17.]. Elérhető: <https://hu.greenpeace.org/mergezett-oroksegunk/>
10. Weiwei B, Bing Z, Xiangyuan Y, Yu Z, Min Y, Zhimin Q. Occurrence, removal and risk of organic micropollutants in wastewater treatment plants across China: Comparison of wastewater treatment processes. Water Res [Internet]. 2018 March [letöltve 2019. november 17.];130:38–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.057>
11. Dragon K, Górski J, Kruc R, Drożdżyński D, Grischek T. Removal of natural organic matter and organic micropollutants during riverbank filtration in Krajkowo, Poland. Water [Internet]. 2018 Oct [letöltve 2019. november 17.];10(10):1457. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10101457>
12. Deák J, Hertelendi E, Süvegés M, Barkóczy Zs. Parti szűrésű kutak vizének eredete trícium koncentrációjuk és oxigén izotóparányai felhasználásával. Hidrológiai Közlemény. 1992;72(4):204–210.
13. Nagy-Kovács Zs, László B, Fleit E, Czihat-Mártonné K, Till G, Börnick H, Adomat Y, Grischek T. Behavior of organic micropollutants during river bank filtration in Budapest, Hungary. Water [Internet]. 2018 Dec [letöltve 2019. november 17.];10(12):1861. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10121861>
14. Von Rohr MR, Hering JG, Kohler HP, Von Gunten U. Column studies to assess the effects of climate variables on redox processes during riverbank filtration. Water Res [Internet]. 2014 Sep [letöltve 2019. november 17.];61:263–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.018>