

5. Szerves mikroszennyezők előfordulása ivóvízbázisokban

A szerves mikroszennyezők emberre gyakorolt kockázatának egyik lehetséges útja az ivóvíz fogyasztása. Habár az ivóvíz az egyik legszigorúbban ellenőrzött élelmiszer Európában, az ivóvíz minőségét szabályzó rendeletek jelenleg még nem foglalkoznak megfelelő részletességgel a szerves mikroszennyezők kérdéskörével. A probléma azonban valós, hiszen e szennyező anyagok elsősorban emberi tevékenység hatására kikerülhetnek a környezetbe, ahol potenciálisan megjelenhetnek azokban a vízbázisokban, amelyek az ivóvízellátást biztosítják. Attekintve a hazai és európai ivóvíztisztító módszerek elterjedtségét, kijelenthető, hogy a ma széles körben alkalmazott technológiák egy része nem alkalmas a szerves mikroszennyezők hatékony visszatartására. Éppen ezért annak vizsgálata, hogy a potenciálisan veszélyeztetett, vagy esetlegesen szennyeződött vízbázisokon keresztül a szerves mikroszennyezők eljuthatnak-e a fogyasztókhoz, különösen fontos. E szennyező anyagok viselkedésének megértéséhez mindenekelőtt az ivóvízbázisok egyes típusai közötti különbségeket szükséges tisztázni.

5.1. Az ivóvízbázisok típusai

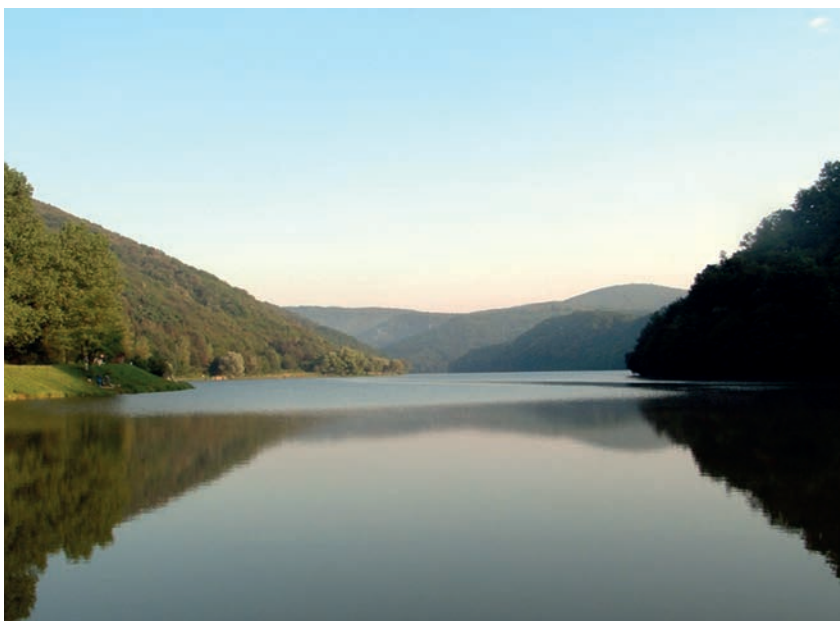
Egy ivóvízbázis kijelölésénél elsődleges feladat a környezeti paraméterek alapos felmérése és számbavétele. E lépés fontosságát nem lehet eléggé hangsúlyozni, mert egy elégtelen módon vagy hibás felmérések alapján beüzemelt vízbázis sem mennyiségben, sem minőségben nem fogja az elvárt szintet biztosítani, utólagos korrekcióra, javításra pedig általában nincs lehetőség, vagy csak igen jelentős anyagi ráfordítással. Az elérhető víz mennyisége és minősége, kitermelésének lehetősége, környezeti hatásokkal, valamint szennyező anyagokkal szembeni kitettsége mellett számos szempontot figyelembe kell venni. Többek között fontos tényező a kitermelt víz utánpótlódásának lehetséges módja és iránya, illetve annak a területnek a kiterjedése, ahonnan az ivóvízbázis üzemelése során víz érkezik. Egy, a vízbázissal közvetlenül nem érintkező szennyezőforrás is kockázatot jelenthet, ha az üzemelő vízbázis utánpótlódása a szennyezőforrás irányából történik. Erre Magyarországon is találunk több példát, amelyek közül néhányat a fejezet későbbi részeiben mutatunk be.

Az ivóvízbázisokat elhelyezkedésük alapján felszíni és felszín alatti vízbázisok csoportjába soroljuk. E két típus aránya országonként, régióként jelentős eltérést mutat, de a hazai viszonylatokról elmondható, hogy vízbázisaink 97%-a felszín alatti vízbázis. A szerves mikroszennyezők terjedésének és viselkedésének szempontjából a vízbázis típusának, elhelyezkedésének jelentős szerepe van.

5.1.1. Felszíni vízbázisok

Magyarországon 2019-ben összesen 19 felszíni vízbázist tartunk nyilván, ami két nagyságrenddel kevesebb, mint a felszín alatti vízbázisok száma. A felszíni vízbázisok jellemzően tavak, folyók, tározók lehetnek, hazánkban mindháromra találunk példát. Többek között a Balatonnál, a Zagyva,

az Ipoly és a Bódva folyók mentén, valamint a Lázbérci- és a Komravölgyi-víztározóknál üzemelnek felszíni vízbázisok Magyarországon. E vízbázisok közös jellemzője, hogy közvetlenül hatnak rájuk a meteorológiai, klimatikus és hidrológiai tényezők, vízminőségük változó lehet, természetes vagy antropogén eredetű szennyező anyagok pedig késleltetés nélkül jelenhetnek meg bennük. A felszín alatti vizekhez hasonlítva a lebegőanyag-tartalom és a szervesanyag-tartalom magas, amelyet a víztisztító technológia megválasztásánál figyelembe kell venni, továbbá a technológiának alkalmasnak kell lennie az esetleges vízminőség-változás követésére. Felszíni vizeink változó koncentrációban tartalmaznak oldott oxigént. Oxigéntelítettségük jónak mondható, míg a felszín alatti vizek jellemzően anoxikus környezetben vannak jelen. Fentiek alapján elmondható, hogy felszíni vízszerezés hazánkban általában ott alakult ki, ahol a felszín alatti víz kitermelése nehézségekbe ütközött, de a felszíni víz minősége alkalmas volt a hosszú távú felhasználásra. A felhasználás célja és mennyisége, a felszíni víz adottságai és minősége, kitermelésének és kezelésének gazdaságossága határozza meg egy felszíni vízbázis kijelölését.



5.1. ábra

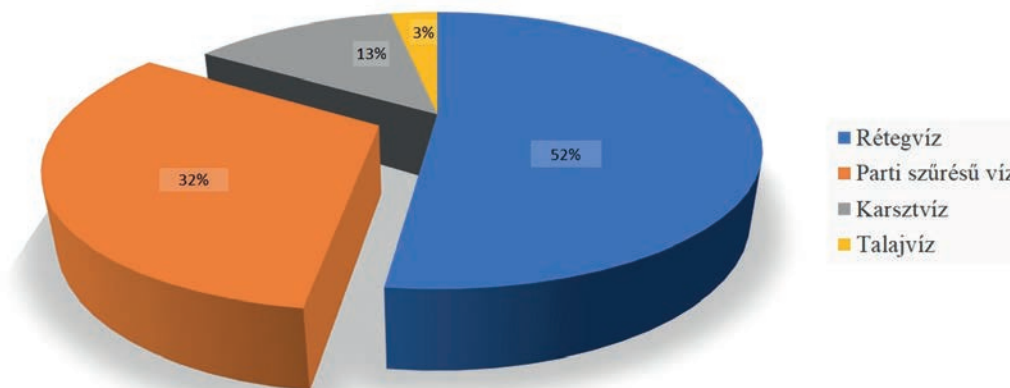
A Lázbérci-víztározó [1]

A felszíni vízszerezés kétségtelen előnye, hogy könnyen hozzáférhető, gazdaságosan kitermelhető, nincs szükség előzetes feltárássra, próbafúrásra, de a hátrányok között is számos tényezőt találunk. Felszíni víz esetében mindenképpen számolni kell úszó-lebegő szennyeződésekkel, amelyek a vízkivételi művek üzemét hátrányosan befolyásolhatják. A szélsőséges vízjárás is megnehezíti a vízkivételt, így ilyen vízkivételi művek telepítése elsősorban olyan helyeken célszerű, ahol a vízjárás viszonylag kiegyenlített, vagy mesterségesen szabályozható. Felszíni vizek vízminőségi paramétereit tekintve jellemző a kolloid méretű szennyező anyagok és a vízben oldott vagy oldhatatlan állapotban lévő szennyezők, szerves mikroszennyezők jelenléte, amelyek kezelése a víztisztítási technológia külön lépcsőjét igényli, így megnövelve az ivóvíztisztítás költségeit. Felszíni ivóvízbázis használatánál fokozott figyelmet igényel, hogy bármilyen antropogén eredetű szennyezés késleltetés nélkül jelenik meg, azaz egy szennyezéssel járó havária esemény azonnali

reakciót igényel. A hazai felszíni ivóvízbázisok vízminősége jónak mondható, a kitermelt nyersvízre épülő technológia fenntartható módon üzemeltethető. A felszíni vizet kezelő technológia egyik lépcsője a membránszűrés, amely megfelelő előkezelést követően alkalmas lehet a szerves mikroszennyezők koncentrációjának csökkentésére is.

5.1.2. Felszín alatti vízbázisok

A víztest elhelyezkedése alapján megkülönböztetünk talajvizet, rétegvizet, parti szűrészű vizet és karsztvizet. Közvetlenül a talajfelszín alatt a talaj háromfázisú, azaz a szilárd, folyadék és gáz halmazállapot egyaránt jelen van. Az ebben a rétegben előforduló vizet talajnedvességnek nevezzük, ezt azonban nem tekintjük felszín alatti víztípusnak. A talaj háromfázisú zónája a talajvíztükhöz tartozik, amely alatt már csak folyadék és szilárd fázis van jelen. A felszín alatti vízformák hazai termelési arányait tekintve elmondható, hogy a rétegvíz a teljes termelésnek valamivel több mint a felét adja, legkisebb mértékben pedig a talajvíz használata jellemző. Az ivóvízellátás jelentős részét biztosító parti szűrészű vízbázisok a teljes termelés harmadát biztosítják, míg a karsztvízbázisok összesen 13%-át.



5.2. ábra

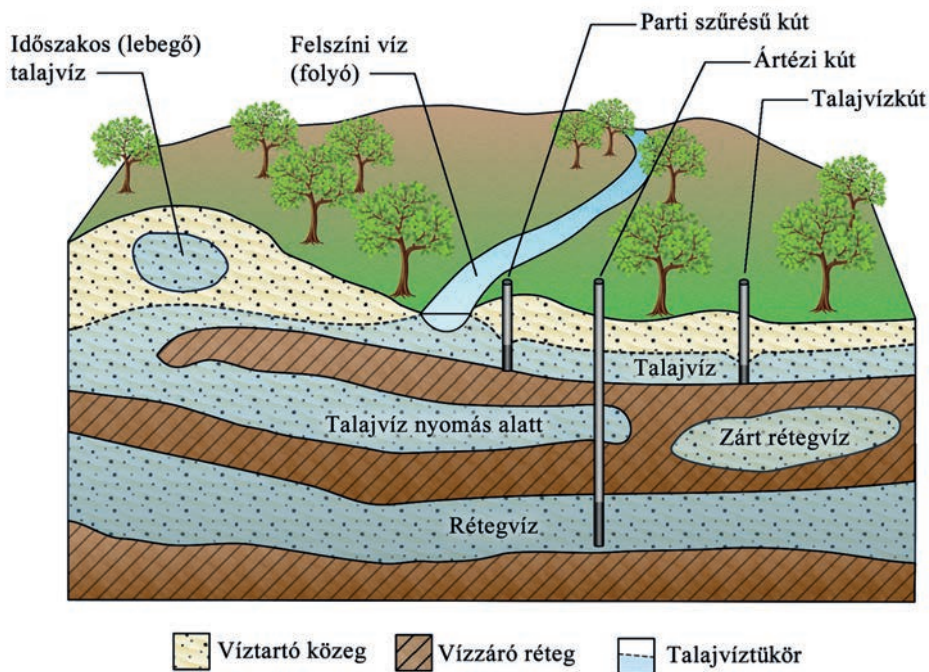
Felszín alatti víztípusok használatának arányai Magyarországon [2]

A kitermelhető nyersvíz minőségét tekintve az egyes felszín alatti vízformák között jelentős eltérés mutatkozik.

Talajvíz

A legfelső vízzáró réteg felett kialakult víztartó rétegben elhelyezkedő víztest. Felső határa a talajvíztükhöz, felszín alatti mélysége jellemzően nem nagyobb, mint 50 méter. A talajvíztükhöz alatt a talaj kétfázisú rendszer, azaz szilárd és folyadék halmazállapotú. A talajvíz mennyiségére és minőségére nagymértékben hatnak a meteorológiai és más környezeti viszonyok, és különösen érzékeny a felszín felől érkező szennyezésekre. Lebegő talajvíznek a fekével, azaz vízzáró réteggel nem rendelkező talajvizet hívjuk, általában jelentősebb csapadékhullás után, felszíni beszívárgásból

származik, és elhelyezkedése nem tekinthető állandónak. A talajvízre atmoszférikus nyomás jellemző, de bizonyos esetekben, például részben zárt víztartóban kialakulhat nyomás alatti talajvíz is [3]. Változó szintje, elérhető, kitermelhető mennyisége, valamint kevésbé ideális vízkémiai jellemzői miatt ivóvízellátásra történő használata nem jellemző, felhasználása elsősorban öntözési célú. A teljes felszín alatti víztermelés 3%-át teszi ki.



5.3. ábra

Felszín alatti víztípusok és elhelyezkedésük (Goda Zoltán)

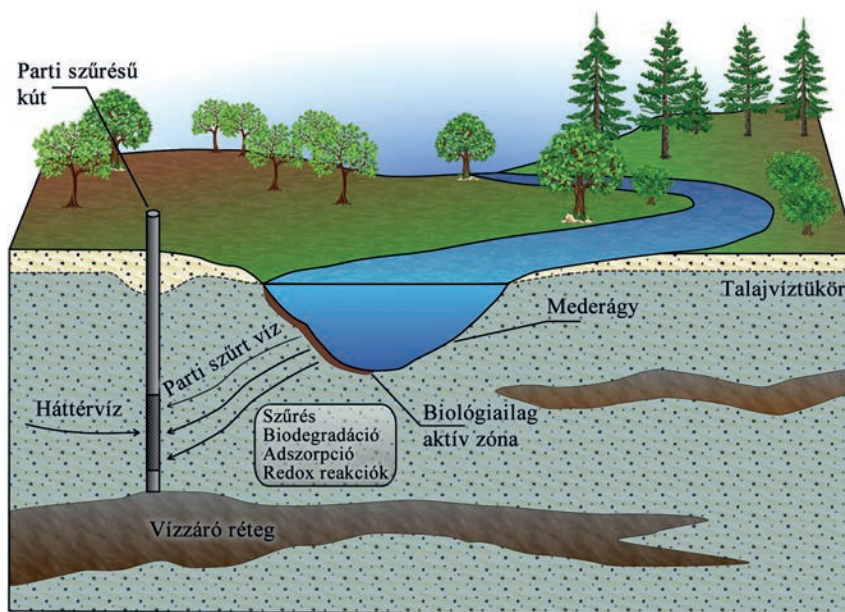
A hazai talajvízbázisok szennyezettsége szinte általánosnak mondható, a talajvizekben általában többféle és magasabb koncentrációjú szennyező anyag mutatható ki, mint a rétegvizekben.

Rétegvíz

Két vízzáró réteg között elhelyezkedő víztest. Jellemzője, hogy a felszíni hatásoktól, szennyezésektől általában védett, de jelentősebb kitermelése esetén előfordulhat, hogy az utánpótlódás felszínhez közelebbi rétegekből történik, így könnyebben szennyeződhet. A rétegvizek kitermelhető vízmennyisége és vízminősége a talajvizekhez képest kevésbé ingadozik. Jellemző természetes eredetű szennyezői a vas, mangán és arzén, problémát okozhat még a metán és a szén-dioxid jelenléte, valamint a nyersvíz magas hőmérséklete. Egy zárt réteg vízáradó képessége táj határok között mozoghat, rétegvíz kút fúrása előtt mindenképpen szükséges próbafúrások elvégzése és a vízáradó réteg alapos diagnosztikája. A rétegvíz kitermelése mélyfúrású kúttal történik. Tekintve, hogy a rétegvíz két vízzáró réteg között helyezkedik el, a diffúz szennyezés általában nem jellemző rá, de az utánpótlódás jellegéből adódóan pontszerű szennyezések előfordulhatnak. Ivóvíz előállítására sokkal alkalmasabbak, mint a talajvízbázisok.

Parti szűrésű víz

Felszíni víztest közvetlen közelében lévő felszín alatti vízbázis, amelyre jellemző, hogy a termelt víz utánpótlódása 50%-ot meghaladó mértékben a felszíni víz felől történő beszivárgásból származik. A termelhető nyersvíz minősége általában igen jó, akár az ivóvíz minőségi előírásainak is megfelelő lehet. Különlegessége abban rejlik, hogy a felszíni víz mederfalán szivárgó víz természetes tisztulási folyamaton megy keresztül. A szivárgás során 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. 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. Bizonyos szempontból a felszíni és felszín alatti víztermelés közötti átmenetnek tekinthető, de egyértelműen a felszín alatti vízszelési módok közé sorolandó. Kitermelése jellemzően galériával, csőkúttal vagy csápos kúttal történik. Szennyezőanyag-tartalmát jelentősen befolyásolja a parti szűrt víz és háttérvíz aránya, utóbbi jelentősebb mennyisége magasabb vas- és mangántartalmat jelent.



5.4. ábra

A parti szűrés folyamatai ([4] alapján)

Karsztvíz

Egyes hegységek hazánkban a Bakony és az Északi-középhegység – területein előforduló felszín alatti vízforma, amely kitermelésre, vízkivételre általában kiváló minőségű és megfelelő mennyiségű. Megkülönböztetünk nyílt és zárt karsztot, előbbi érzékeny a külső szennyezésekre, utóbbi változó mértékben védett a felszín felől érkező szennyezésektől. Mivel a karsztképződményekre jellemző, hogy nagy területen, egymással összefüggő vízszállító járatok, hasadékok, barlangok

fordulnak elő, ezért utánpótlódása általában jónak mondható. A hazai karsztvízszint a múlt század végéig folyamatos csökkenést mutatott. Ennek egyik oka, hogy a karsztvíz kitermelése – ellentétben a többi vízszervezési móddal – nem csupán a víz felhasználására irányul, hanem a mélységi bányászatot lehetővé tévő vízszintsüllyesztésre, vízmentesítésre is. A bányászat mértékének hazai csökkenésével karsztvizeink szintjének emelkedése tapasztalható. A rétegvízhez hasonlóan a karsztvíznél is alacsony a diffúz szennyezés kockázata, a pontszerű szennyezőforrások a karszt nyílt/zárt tulajdonságainak, valamint mélységének függvényében veszélyeztethetik a víz minőségét.

5.2. Szerves mikroszennyezők előfordulása ivóvízbázisokban

Szerves mikroszennyezők ivóvízbázisokban történő előfordulása az egészségre gyakorolt hatásokon túlmenően azért is jelentős probléma, mert a széles körben elterjedt ivóvíztisztító technológiák egy része e vegyületeket nem távolítja el megfelelő mértékben, így az ivóvízhálózatba kerülve eljuthatnak a fogyasztókig. Az ivóvízbázisokat veszélyeztető szennyezőanyag-források gyakorlatilag megegyeznek a környezetet általában terhelő forrásokkal, azaz a környezetbe kikerült szennyező anyagok transzmisszió révén eljuthatnak a vízbázisokba is. A legjelentősebb forrásoknak az ipari és háztartási szennyvízkibocsátást, a mezőgazdaságot és az állattartást, a hulladékelhelyezést, valamint a közlekedés különféle formáit tartjuk. E szennyező anyagok transzportját az emissziós ponttól az ivóvízbázisok irányába részben környezeti paraméterek határozzák meg: meteorológiai, hidrológiai, földrajzi és geológiai körülmények. Másrészt viszont fontos tényező a víztermelésből adódó vízáramlás, az a mesterségesen keltett vízmozgás, amely a kitermelt víz utánpótlódása következtében alakul ki. E körülmények az egyes vízbázistípusok esetében jelentős eltérést mutatnak, ezért veszélyeztetettségüket mindenképpen célszerű különállóan vizsgálni.

5.2.1. Szerves mikroszennyezők előfordulása felszíni ivóvízbázisokban

A szerves mikroszennyezők környezeti jelenlétével kapcsolatosan rendelkezésünkre álló adatsor főleg felszíni vizek vizsgálatából, illetve a felszíni víztest üledékéből származik. Szerves mikroszennyezőket több kontinens számos felszíni vízében, tavakban, folyókban és tengerekben is vizsgáltak, és a kutatások eredményei azt tükrözik, hogy mára szinte nincs olyan pontja a Földnek, ahol ne lennének jelen. Egy felszíni vízbázis jellegét tekintve nem különíthető el a víztest egészétől, valamint annak teljes vízgyűjtőjétől, hiszen a természetes vízmozgások, áramlások folyamatos keveredést okoznak, és egy emissziós pontról származó szennyezés a víztest távoli pontjára is eljuthat. Felszíni vízbázisok esetében a víztermelés módja határozza meg, hogy milyen mélységből történik a termelés, így a szennyező anyagok vertikális eloszlása, rétegződése meghatározó lehet a termelt nyersvíz szennyezettségét illetően. Ez általában csak a vízben nem oldódó, könnyű fajsúlyú (olajok és származékaik), illetve a víznél nagyobb fajsúlyú, kiülededő szennyező anyagok esetében lehet mérvadó, a vízben oldódó szennyező anyagok korlátozás nélkül kerülnek a nyersvízhálózatba.

A felszíni víztest szennyeződése történhet pontszerű forrásból, amely jellemzően kommunális vagy ipari szennyvizek bevezetését jelenti, de emissziós pont lehet a szivárgó, szennyezett talajvíz is. Hasonlóan pontszerű szennyezőforrás lehet egy havária esemény, amely általában egyszeri, változó ideig tartó szennyezést jelent. A felszíni vizek jellemző szennyezőforrásait mennyiségi szempontból vizsgálva a legjelentősebb pontszerű forrás mindenképpen a különféle jellegű és össze-

tételű szennyvizek bevezetése. A diffúz szennyezőforrások közös jellemzője, hogy nem, vagy csak nehezen körülhatárolhatók, nagyobb területet érintenek. A kibocsátott szennyező anyagaik mérhető koncentrációja általában alacsony, de a területi kiterjedés miatt nehezebben nyomonkövethető, monitorozható. Diffúz szennyezőforrásnak tekinthetők a mezőgazdasági területek, amelyek esetében a peszticidek, valamint a műtrágyák a legfőbb szennyező anyagok, de egy nagyobb területről csapadékhullást követően többféle szennyező anyag bemosódása is előfordulhat. Utóbbi esetében a szennyező anyagok széles palettájával kell számolni. A diffúz szennyezőforrások közé soroljuk a közlekedési útvonalakat is.

A szerves mikroszennyezők tehát más szennyező anyagokhoz hasonlóan késleltetés nélkül megjelenhetnek a felszíni vízbázisban, amennyiben a szennyezés emissziója közvetlenül érintkezik a felszíni vízbázissal. Tekintve, hogy a kezelt és kezeletlen szennyvizek befogadói a legtöbb esetben felszíni vizek, a szerves mikroszennyezők közvetlen megjelenésével lehet számolni. Hazai és külföldi kutatások eredményei is ezt támasztják alá, e szennyező anyagok jelenléte változó koncentrációban, de szinte minden felszíni vízbázisból kimutatható. A szennyezés transzmisszió útján is terjedhet, így jelentős távolságot megtéve eljuthat ember által nem lakott, az emberi tevékenység által közvetlenül nem befolyásolt területekre is. Szerves mikroszennyezők vonatkozásában a magyarországi felszíni vizek közül a Balatonról és a Duna budapesti szakaszáról rendelkezünk a legtöbb adattal, ahol több esetben sikerült e szennyező anyagok jelenlétét kimutatni.

Egy 2019-ben zárult kutatás során a Balatonban és annak vízgyűjtőjén gyógyszermaradványokat vizsgáltak. A kutatásban 10 mintavételi pontot jelöltek ki, ahonnan 2017 nyara és 2018 tavasza között folyt adatgyűjtés. A 134 vizsgált vegyületből 69 legalább egy alkalommal detektálható és mennyiségileg meghatározható volt. A gyógyszermaradványok többek között nem szteroid fájdalomcsillapítók, antidepresszánsok, szív- és érrendszeri gyógyszerek, hallucinogének formájában voltak jelen. E szennyező anyagok stabil, állandó forrása a szennyvízkibocsátás volt: az elégtelen szennyvízkezelést követően ezek a szennyező anyagok megjelentek a befogadókban. Emellett egyértelműen kimutatható volt a turizmus hatása is, amely a rekreációs szerek (koffein) és a tiltott kábítószeres (hallucinogének) koncentrációjának emelkedésében volt észlelhető a nyári hónapokban [5].

Bár a Duna hazai szakaszán ivóvíz-szolgáltatás céljára felszíni vízkivétel jelenleg nincs, azaz a Duna nem tekinthető felszíni ivóvízbázisnak, a folyóval közvetlen kapcsolatban álló parti szűrésű vízbázisok számos helyen üzemelnek, így a Duna vízminősége mindenképpen meghatározó. Az elmúlt évtizedből származó kutatási eredményeink a PPCPs vegyületcsoportból (gyógyszerek, kozmetikai és testápoló szerek) ofloxacin, ciprofloxacin, azithromycin, claritromycin jelenlétét mutatták ki, jellemzően 3–40 ng/l koncentrációban [6]. Egy 2017-ben zajlott átfogó kutatás párhuzamosan vizsgált egy Budapest feletti (Szentendrei-sziget) és alatti (Csepel-sziget) parti szűrésű vízbázissal közvetlen kapcsolatban álló Duna-szakaszt kifejezetten szerves mikroszennyezőkre fókuszálva. A vizsgált 36 vegyületből 30 jelenlétét lehetett kimutatni mindkét mintavételi ponton, 12 vegyület pedig a parti szűrésű kutak nyersvizében is megjelent [7]. A kutatás eredményeit az 5.1. táblázat foglalja össze.

A kutatás eredményei azt tükrözik, hogy a Dunában számos szerves mikroszennyező detektálható átlagosan 10–100 ng/l koncentrációban.

Egy másik, hasonló kutatás a lengyelországi Warta folyó vizében vizsgált szerves mikroszennyezőket Poznań város mellett. A Warta a Dunával összehasonlítva lényegesen kisebb vízhozamú, az üzemelő parti szűrésű vízbázisok pedig az 570 800 fő lakosú Poznań ivóvízellátását biztosítják [8]. A kutatás itt is talált szerves mikroszennyezőket különböző koncentrációban, az eredményeket az 5.2. táblázat foglalja össze.

5.1. táblázat

Szerves mikroszennyezők előfordulása a Duna budapesti szakaszán 2017-ben ([7] alapján)

Ipari eredetű	Peszticidek	Élelmiszer- adalékok	PPCP
Benzotriazol	Dimetaklór-ESA	Aceszulfám	Bezafibrát
Biszfénol-A	Dimetaklór-OA		Karbamazepin
Tolyltriazol	Dimetoát		Cefepim
	Diuron		Cefotaxim
	Imidakloprid		Cefuroxim
	Irgarol		Klarithromicin
	Izoproturon		Klindamicin
	Metazaklór-ESA		Diklofenák
	Metazaklór-OA		Eritromicin
	Metolaklór-ESA		Fluoxetin
	Metolaklór-OA		Gabapentin
	Nikoszulfuron		Ibuprofen
	Terbutilazin-2-hidroxy		Jomeprol
	Terbutrin		Metoprolol
			Naproxen
			Paracetamol
			Roxitromicin
			Szulfametaxozol
Vizsgált, nem kimutatható: Cefotaxim, Cefuroxim, Dimetoát, Diuron, Fluoxetin, Roxithromicin			

5.2. táblázat

Szerves mikroszennyezők a Warta folyó poznańi szakaszán 2017-ben ([8] alapján)

Szerves mikroszennyező	Warta, Poznań
Benzotriazol	120,0 ng/L
Karbamazepin	40,0 ng/L
Koffein	60,0 ng/L
Szulfametaxozol	15,0 ng/L
Tolyltriazol	30,0 ng/L
Klorotiazid	<LOQ
Ibuprofen	20,0 ng/L
Szukralóz	40,0 ng/L
Összesen	450,0 ng/L

Habár a hazai felszíni víztermelés aránya meglehetősen kicsi, ivóvízbiztonság szempontjából fokozottan védendő elemnek tekintendők a felszíni vizek, hiszen közvetlen kapcsolatban állnak a parti szűrési vízbázisokkal, amelyek több mint harmadát biztosítják a teljes hazai víztermelésnek. Ez idáig meglehetősen kevés kutatási eredménnyel rendelkezünk arra vonatkozóan, hogy a parti szűrés folyamatában a szerves mikroszennyezők visszatartása, lebontása mennyire hatékony, de valószínűsíthető, potenciális veszélyt jelentenek a termelői kutak vízminőségére. Az mindenestre kétségszövegbevonhatatlan, hogy a kapcsolódó felszíni víztestek védelme elsődleges szempont kell legyen.

5.2.2. Szerves mikroszennyezők előfordulása felszín alatti ivóvízbázisokban

A felszín alatti vízbázisok közös jellemzője, hogy a felszíni környezettel nincsenek közvetlen kapcsolatban, de közvetett hatás révén a felszín felől szennyeződhetnek. A jellemző hidrogeológiai környezet ebben meghatározó, így az egyes felszín alatti vízbázistípusokat célszerű külön tárgyalni.

Szerves mikroszennyezők előfordulása talajvízbázisokban

A talajvíz a felszínhez legközelebb található felszín alatti víztest, amelynek jellemzője, hogy felette nem található vízzáró réteg, így a felszín irányából a csapadékvízzel a szennyező anyagok korlátlanul bemosódhatnak. Jellemző pontszerű szennyezőforrások a rosszul kivitelezett vagy illegális hulladéklerakók, állattartó telepek, ipari létesítmények. Diffúz szennyezőforrásnak a mezőgazdasági területek, közlekedési útvonalak tekinthetők.

Szerves mikroszennyezők talajvízszennyezésére számos példát találunk, a művelt mezőgazdasági területek peszticidekkel, műtrágyákkal és azok adalékanyagaival történő szennyezése szinte általánosnak mondható, az ipar által okozott pontszerű szennyezőforrások leggyakrabban korábbi évtizedekben szabálytalanul elhelyezett, elásott veszélyes hulladékok, gyártási melléktermékek lehetnek.



5.5. ábra

A Budapesti Vegyiművek illatos úti telephelye 2015-ben [11]

A Tiszapalkonyai Hőerőmű föld alatti tüzelőolaj-tárolójának környékén a talajvízben jelentős mennyiségű policiklusos aromás szénhidrogén (PAH), többek között naftalin, pentaklórfenol és metil-terc-butil-éter (MTBE) jelenlétét lehet kimutatni. A szennyeződés a vizsgálatok eredményei alapján 25-30 éve keletkezhetett. Az ezredforduló után kísérlet történt az elszennyeződött terület kármentesítésére, de 2011-ben még a PAH-ok koncentrációja (17,6 µg/l) csaknem kilencszeresen haladta meg a vonatkozó határértéket [9].

A Budapesti Vegyiművek mintegy 10 hektáros Illatos úti telephelyén összesen 1300 tonna veszélyes hulladék szabálytalan tárolása miatt alakult ki jelentős talajvízszennyezés. A cég több mint 100 éves működése alatt többek között sósavat, nátrium-hypokloritot, műtrágyákat és növényvédő szereket gyártott. A céget az ezredfordulót követően felszámolták, a kármentesítés nem

fejeződött be. A szabálytalanul tárolt hulladékot elszállították, de a terület talajvizében jelentős (egyres esetekben a határértéket több nagyságrenddel meghaladó) mennyiségben mérhetők szennyező anyagok. Szerves mikroszennyezők tekintetében a benzolszármazékok, mint a klórbenzol, a klórozott rovarirtó szerek, mint a diklór-difenil-triklóretán (DDT), a hexaklórociklohexán (HCH), valamint a fluorozott amino-benzotrifluorid fordulnak elő nagyobb koncentrációban. A szennyezés a talajvízben és a talajfelszínről a levegőbe kerülve kockázatot jelenthet az egykori üzem közelében élő lakosságra nézve [10].

Talajvíz esetében a legnagyobb veszélyt az jelenti, hogy egy pontszerű forrásból származó szennyezés a talajvíz mozgásának köszönhetően nagy területen terjedhet szét, ezáltal jelentősen megnehezítve az esetleges kármentesítést. Összességében elmondható, hogy ma Magyarországon a legtöbb ipari eredetű talajvízszennyezés a múlt század második felének átgondolatlan hulladékkezeléséből származik, az azóta eltelt évtizedek alatt pedig számos helyen jelentős mértékben megnövekedett a szennyezett területek mérete. A kármentesítés legtöbbször a szennyezőforrás közvetlen megszüntetésére irányul, a kiterjedt szennyezett terület mentesítése a legtöbb esetben nem kielégítő. Fentiekből adódóan a hazai talajvízbázisok általában szennyezettnek mondhatók, ivóvíz előállítására jellemzően nem használják ezeket.

Szerves mikroszennyezők előfordulása rétegvízbázisokban

A rétegvízbázisok közös jellemzője, hogy nem csupán a vízáadó réteg alatt, hanem felette is vízázáróréteg helyezkedik el, amely megakadályozza a felszín felől szivárgó csapadékvíz közvetlen bejutását. A rétegvíz ennek ellenére nem tekinthető tökéletesen védettnek, hosszabb időtávon szennyeződhet a felszín irányából. A szennyeződés kockázatát befolyásolják a rétegvíz nyomási jellemzői is. Általánosságban elmondható, hogy a nyomás alatti rétegvízre nagyobb védetség jellemző, mert a víz pozitív nyomása megakadályozza a réteg közvetlen szennyezését. A szennyezés általában a természetes és mesterségesen keltett vízmozgásokból adódik, amikor a réteg utánpótlódására egy szennyezett területről érkezik víz. Erre több példát is találunk Magyarországon, amelyek közül a székszárdi diklór-etilén-szennyezés esettanulmányát mutatjuk be.

Székszárd város vízellátására 2015-ben egy új, parti szűrészű vízbázist jelöltek ki. A régi vízbázis kitermelését megszüntették. Az eset előzményeként 1993-ban észlelték azt az – elsősorban diklór-etilénből álló – klórozott alifás szénhidrogén-szennyeződést (CAH), amelynek forrása a város keleti határán található ipartelep. A vízbázis kármentesítését kezdetben a termelés Sió-csatorna menti kutakra való átcsoportosításával és a szennyezett víz szivattyúzásával szándékoztak megoldani. Később derült ki, hogy a szennyezés a Sió-parti telepet mindezek ellenére is elérte [12].

Az ivóvízbázis területén alifás halogénezett szénhidrogén szennyezőket – triklór-etilént, diklór-etilént, vinil-kloridot – mutattak ki. A részletes tényfeltárást követően vízkivétellel és hidraulikus gáttal látták el a vízbázis területén lévő termelőkutak védelmét, és folytattak kármentesítést.

Az évek folyamán a triklór-etilén és a vinil-klorid szennyezők mennyisége jelentősen csökkent, azonban a diklór-etilén-koncentráció kezdeti csökkenés után ismét növekedést mutatott. Feltételezhető, hogy a triklór-etilén diklór-etilénné alakul át, ami megmagyarázhatja, hogy az egyik szennyező koncentrációja csökken, ugyanakkor a másik növekedik. A hatékonyabb ártalmatlanítás érdekében felmerült egy újabb remediálási technológia – kémiai oxidáció – alkalmazásának lehetősége is.

A kármentesítési tevékenységek sem rövid, sem pedig hosszú távon nem hoztak elfogadható eredményt, ezért a város vezetősége az üzemeltető javaslatára a régi vízbázis felhagyása mellett döntött. Az új, parti szűrésű vízbázist közvetlenül a Duna partján alakították ki, és bár a távolság okán a nyersvíz meglehetősen hosszú vezetéken kerül az ivóvíztisztító technológiára, az eredmények azt tükrözik, hogy a város ivóvízellátásának biztosítására ez volt a célravezető megoldás. A korábbi rétegvízbázis károsodását ez idáig nem sikerült megszüntetni. A kármentesítés jelentős anyagi ráfordítás mellett jelenleg is tart, és a tervek szerint 2023-ra fejeződik be.

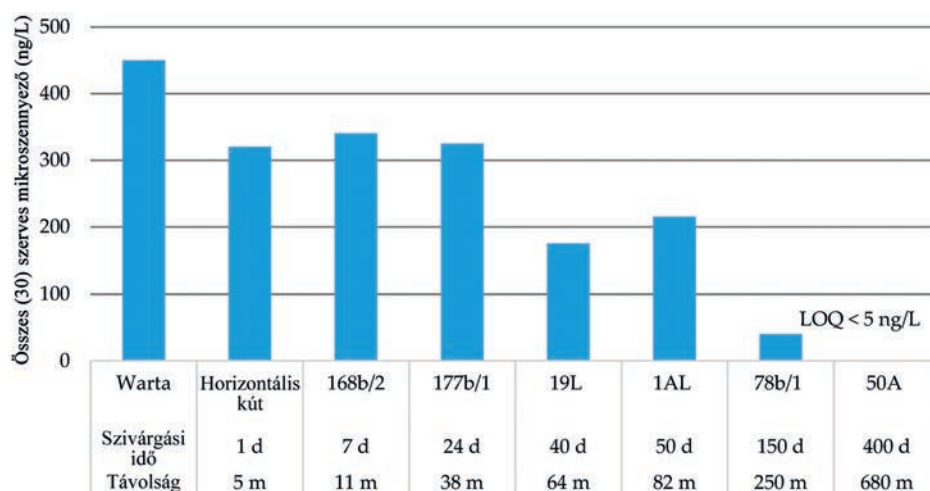
Szerves mikroszennyezők előfordulása parti szűrésű vízbázisokban

A parti szűrésű vízbázisok elhelyezkedésük és működési folyamataik szempontjából is különlegesnek tekinthetők, a veszélyeztető szennyezőforrások jellege pedig széles körű lehet. Egyrészt a háttér felől érkező felszín alatti víz a korábbi fejezetekben tárgyalt diffúz és pontszerű szennyezőforrásokból származó szennyezéseket hozhatja magával, másfelől a parti szűrésű vízbázis esetében a kapcsolódó felszíni víztest – hazánkban kivétel nélkül folyó – mellett akár több száz, vagy ezer kilométer távolságra lévő szennyezőforrás is kockázatos tényező lehet.

Szerves mikroszennyezők megjelenése parti szűrésű vízbázisainkban számottevő kockázatot jelent az ivóvízellátásra, mert alacsony koncentrációban is jelentős minőségromlást okozhatnak. Jellemzően nehezen bontható, perzisztens vegyületekről van szó, amelyek a klasszikus, a parti szűrt víz utókezelésére kialakított technológiai lépcsőkkel – mint az oxidáció, mechanikai szűrés, fertőtlenítés – nem távolíthatók el megfelelő mértékben. Koncentrációjuk hatékony csökkentése általában membránszűréssel – ultraszűréssel, nanoszűréssel vagy fordított ozmózissal – történhet, amely viszonylag költséges megoldás, azonban a hatékony tisztítást a rendelkezésre álló berendezések kapacitása korlátozhatja, továbbá jelentős lehet a karbantartási igény. Ezt a technológiai lépcsőt alapesetben nem alkalmazzák parti szűrt nyersvíz kezelésére. A vízkezelésben általános érvényű megállapítás, hogy célszerű minél kevesebb lépcsőben, minél kevesebb technológiai egység üzemeltetésével elérni a kívánt vízminőséget, így a vízkezelés nulladik lépcsőjének tekinthető parti szűrés hatásfokának vizsgálata a klasszikus szennyező anyagok mellett a szerves mikroszennyezők eltávolítására nézve is indokolt. Mindmáig számos kutatás támasztotta alá, hogy a parti szűrés igen hatékony a szerves szennyezők, valamint a mikrobiológiai paraméterek csökkentésében. A hatékonyságot a kiindulási vízminőségi paraméterek mellett a szivárgási idő, a szivárgási úthossz, valamint a szivárgási zóna oxigéntelítettsége határozza meg. Ebből adódóan feltételezhető, hogy a szerves mikroszennyezők eltávolításában is ugyanezek a paraméterek irányadók.

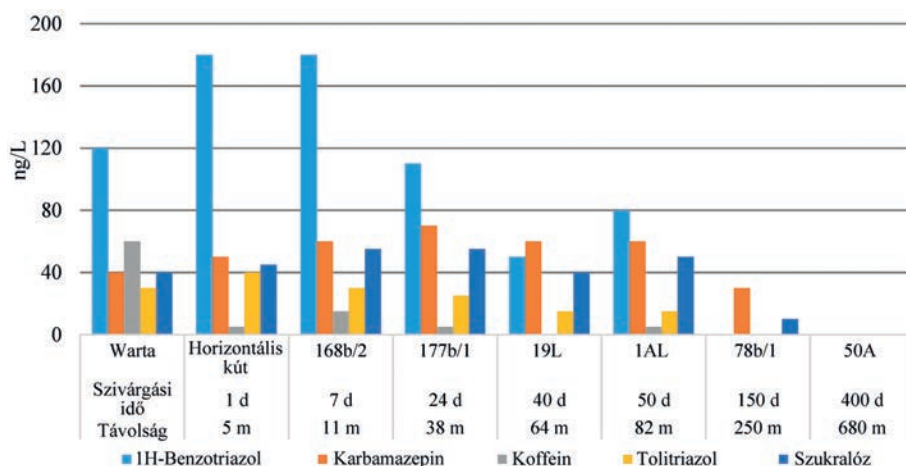
Mikroszennyezők koncentrációjának csökkenése és a szivárgási úthossz kapcsolata

Több kutatás vizsgálta a szerves mikroszennyezők eltávolításának hatékonysága, valamint a szivárgási úthossz, azaz a kút és a folyómeder távolsága közötti összefüggéseket. 2017-ben a lengyelországi Warta folyón, a Poznań város vízellátását biztosító, parti szűrésű kútcsoport 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 [8].



5.6. ábra

Szerves mikroszennyezők koncentrációja és a szivárgási úthossz kapcsolata a Warta folyó poznańi szakaszán ([8] alapján)



5.7. ábra

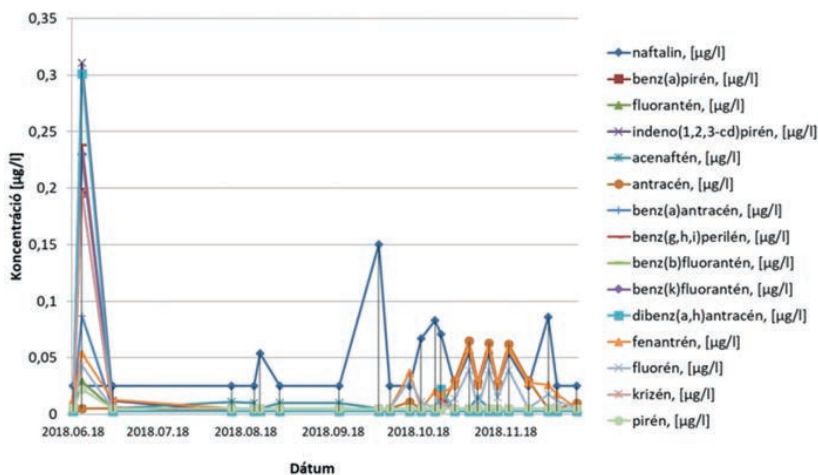
Egyes szerves mikroszennyezők koncentrációja a Warta folyóban és a folyótól különböző távolságban üzemelő kutakban ([8] alapján)

A jelentősebb koncentrációban előforduló mikroszennyezők a benzotriazol (fagyálló adalékanyag), a karbamazepin (gyógyszerhatóanyag), a koffein és a szukralóz (édesítőszer) voltak. E vegyületek koncentrációja egyértelműen csökkent a folyómedertől való távolsággal. Egyes 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 termelő-kutakban. A parti szűrés hatékonyságának vizsgálatához elengedhetetlen a szűrt víz/háttérvíz arány pontos megállapítása. Ehhez legalkalmasabb az oxigénizotópos vizsgálat, amelynek segítségével meghatározható, hogy a kút által termelt víz mekkora hányada származik felszíni vízből [13]. Ennek hiányában a felszín alatti víz befolyásoló hatásának ismerete nélkül az eredmények nem mutatnak pontos képet a szerves mikroszennyezők eltávolításának hatékonyságáról.

Mikroszennyezők jelenlétének vizsgálata budapesti vízbázisokon

Egy 2016 és 2019 között zajló nemzetközi projekt keretében végzett kutatásban a Fővárosi Vízművek a parti szűrés ultrafiltrációval, nanofiltrációval, valamint fordított ozmózissal történő kombinálhatóságát vizsgálta. A kutatás során egyéb paraméterek mellett a szerves mikroszennyezők koncentrációját is figyelemmel kísérték két üzemelő vízbázison, a Szentendrei-szigeten található északi vízbázis, valamint a Csepel-szigeten, a 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 felszínvíz-mintavételi ponton és két kútban. Az eredményeket összehasonlítva az egyes szerves mikroszennyezőkre megállapítható az eltávolítás határfoka. A vizsgált mikroszenyezők közül tizenkettőt csak a Dunából vett vízmintákban sikerült kimutatni, a parti szűrt vízből nem. 12 vegyület kimutatható volt a felszíni és a szűrtvíz-mintákban egyaránt. Ezek koncentrációjának változása a parti szűrés folyamatában tág határok között mozgott.



5.8. ábra

Dunai minták PAH-szennyezettségének összefoglaló bemutatása [14]

A metazaklór növényvédő szer esetében a szentendrei-szigeti vízbázison 78%-os eltávolítási határfokot sikerült kimutatni, míg ezen vegyület koncentrációja a Csepel-szigeti vízbázison csak 12%-kal csökkent. A legnagyobb mértékben (69% és 43%) a benzotriazol koncentrációját sikerült csökkenteni, míg legkisebb arányban a szulfametoxazol nevű antibiotikum-hatóanyag koncentrációja csökkent. A műanyagipar által széleskörűen használt biszfenol-A koncentrációja egyes esetekben a kutakban nagyobb koncentrációban volt kimutatható, mint a felszíni vízben. A kutatás megállapította, hogy a szerves mikroszennyezők elsősorban anoxikus körülmények között távolíthatók el parti szűréssel jelentősebb mértékben. Egyes mikroszennyezők, mint a szulfametoxazol vagy a diklofenák eltávolítása hosszabb szivárgási utat igényel, így ezen vegyületek koncentrációjának csökkentésében a Csepel-szigeti vízbázis hatékonyabbnak bizonyult [7].

5.3. táblázat

Szerves mikroszennyezők átlagos koncentrációja a Duna budapesti szakaszán és a parti szűrésű kutakban [7]

Szerves mikroszennyező	Duna, Szentendre	Parti szűrt víz, Szentendre	Duna, Csepel	Parti szűrt víz, Csepel
Benzotriazol	272	85	256	146
Biszfénol-A	33	51	86	105
Toliltriazol	121	63	142	88
Karbamazepin	30	24	31	29
Cefepim	358	193	394	248
Diklofenák	153	103	154	87
Jomeprol	131	<LOQ	122	<LOQ
Szulfametaxozol	14	13	13	9
Metolaklór-ESA	113	43	85	57
Metolaklór-OA	31	38	23	17
Metazaklór-ESA	180	40	152	125
Aceszulfám	219	131	266	195

A parti szűrésű vízbázisok a hazai ivóvízellátás valamivel több mint harmadát biztosítják, ezért kiemelt figyelmet kell rájuk fordítani. Az eddigi kutatások eredményei alapján a parti szűrés folyamata egyes szerves mikroszennyezők eltávolításában hatékonynak mondható, más szennyezők azonban jelentősebb koncentrációcsökkenés nélkül érhetik el a vízbázis kútjait. Általános érvényű megállapítás, hogy a parti szűrt víz utókezelésére tervezett ivóvíztisztító technológiák nem alkalmasak szerves mikroszennyezők eltávolítására, ehhez egy külön lépcső (membrán- vagy aktívszén-szűrés) beépítése szükséges.

Szerves mikroszennyezők előfordulása karsztvízbázisokban

A karsztos területeken elhelyezkedő vízbázisok általában a mészkő, esetleg dolomit kisebb-nagyobb repedéseiben, üregeiben helyezkednek el, ezért a felszín felől vízzáróréteg jellemző. A karsztvízbázisok a felszínnel legtöbbször kapcsolatban állnak, porózus vízvezető kőzetek kisebb-nagyobb repedésein keresztül érkezhethet víz a felszín felől. Mindemellett a más típusú vízbázisokhoz hasonlóan a víztermelés következtében kialakuló vízáramlás okozhat vízforgalmat különböző rétegek, víztartók között. Mikroszennyezők tekintetében a karsztvízbázis szennyeződésére is találunk hazai példát. A szennyeződések gyakran a hibás ipari hulladékkezelés okozza. Veszprém és környéke karsztosodott területen fekszik, ahol az ivóvízellátás részben karsztvízbázisokon alapul. A több mint fél évszázadon keresztül üzemelő, de 2009-ben megszűnt Bakony Művek Rt. telephelyén kiterjedt talaj-, talajvíz- és karsztvízszennyezés mutatható ki. A határértéket jelentősen meghaladó kadmium-, bárium-, króm- és nikkelszennyezés mellett policiklikus aromás szénhidrogén (PAH-vegyületek) jelenléte mérhető a felszín alatti vízrétegekben. A karsztvízből a szerves mikroszennyezők csoportjából diklór-etilén, kloroform, triklór-etilén, valamint tetraklór-etilén mutatható ki. A kimutatható aromás szénhidrogének közül a rákkeltő hatású benzol mennyisége 2000-szerese a határértéknek. A feltárás szerint a szennyezés mintegy 130 hektár kiterjedésű. 2001 és 2005 között a szennyező technológiát megszüntették, valamint a szennyezett talaj egy részét kitermelték és elszállították, ez a lépés azonban a karsztvízréteg szennyeződésének mértékét érdemben nem javította [15].

Az eddigi kutatási eredmények azt tükrözik, hogy a felszíni vízbázisok szennyeződése esetében a szerves mikroszennyezők koncentrációjának csökkenésével lehet számolni. Több természetes

folyamat a mikroszennyezők bomlását idézi elő. A fotokémiai átalakulás napfény jelenlétében zajlik le, amely a természetes vizek felső rétegét érinti, de a felszíni víztestekre általában jellemző turbulens vízmozgás, átkeveredés is elősegíti a folyamatot. A biodegradáció hasonlóan csökkentő tényező, amely oxikus körülmények között hatékonyabban zajlik le. E körülmények azonban a felszín alatti víztestek esetében – fény és oxigén hiányában – nem állnak fenn, jellemző az állandó, anoxikus környezet, így a felszín alatti vízbázisok szennyeződése tartósan fennállhat. A parti szűrésű vízbázisok hatékonynak mondhatók egyes, a felszíni víz felől érkező szerves mikroszennyezők bontásában, de a háttérvíz szennyezettsége hosszú távon is kockázatot jelenthet.

5.3. Szerves mikroszennyezők eltávolításának lehetőségei az ivóvíztisztítás folyamatában

Az ivóvíztisztítás egy jellemzően többlépcsős technológiai folyamat, amely során a nyersvízben található, emberi fogyasztásra alkalmatlan vagy az emberi egészséget károsító vegyületeket a vízből elválasztják és visszatartják. A technológiai lépcsők fizikai, kémiai és biológiai folyamatokon alapulnak. Az ivóvíztisztításra tervezett technológiai sor egyes elemeit a nyersvízben található szennyező anyagok fajtái és jellemző koncentrációértékei, valamint a várható víztermelési igények alapján tervezik meg és állítják össze. Egyes szennyező anyagok eltávolítására jellemzően többféle technológia is elérhető, a megfelelő kiválasztását általában gazdasági, fenntarthatósági és üzemeltetési szempontok határozzák meg. Ebben a jegyzetben a szerves mikroszennyezők eltávolításának lehetőségeire összpontosítunk, azokat a technológiai folyamatokat vesszük sorra, amelyek alkalmasak e szennyező anyagok hatékony eltávolítására. Az 5.4. táblázatban összefoglaljuk az ivóvízkezelésben alkalmazott eljárásokat, kiemelve a szerves mikroszennyezők eltávolítására alkalmazhatókat.

5.4. táblázat

Víztisztítási technológiák csoportosítása ([16] alapján)

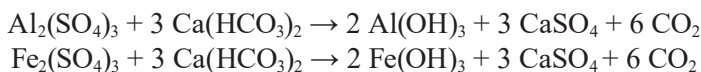
Fizikai eljárások	Fizikai-kémiai eljárások	Biológiai eljárások
Cél: gázmentesítés		
Levegőztetés	Savtalanítás	
Nyomáscsökkentés	Oxidáció	
Melegítés		
Cél: lebegőanyag-eltávolítás		
Szűrés	Derítés	
Ülepítés		
Cél: oldott komponens eltávolítása/koncentrációjának csökkentése		
Desztilláció	Vegyszeres vízlágyítás	Nitrifikáció
Termikus vízlágyítás	Csapadékképzés	
Adszorpció	Ioncsere	
Szűrés	Oxidáció	
Fordított ozmózis		
Cél: fertőtlenítés		
Termikus	Ózonozás	
UV	Klórozás	
	Klór-dioxidos kezelés	

5.3.1. Derítés: koaguláció, flokkuláció, szedimentáció

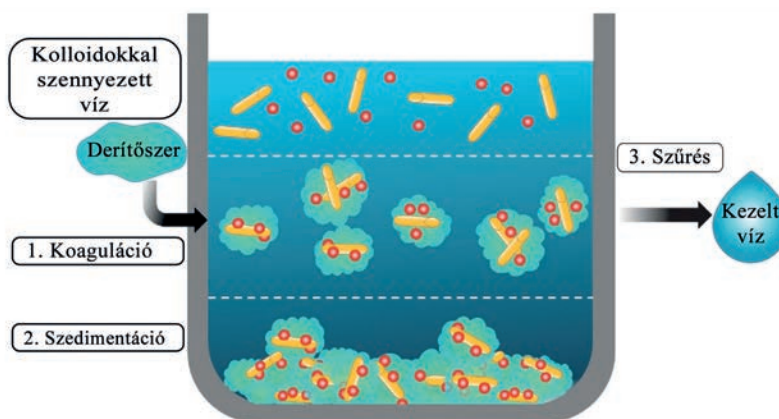
A vízben előforduló kolloid méretű szennyező anyagok negatív töltésüknek köszönhetően a vízből spontán nem, vagy csak nagyon hosszú idő alatt ülepíthetők ki. E szennyező anyagok jellemzően szerves molekulák, amelyek eltávolítása derítéssel történik. A derítés folyamata három lépésből áll:

- a koagulációból (kicsapatas),
- a flokkulációból (pelyhesítés)
- és a szedimentációból (ülepítés).

A kémiai koaguláció során a vízhez derítószert és segédderítő szert adagolnak, amelyek hatására a szuszpendált részecskék elektrosztatikus állapota megváltozik. A kolloid részecskék destabilizálódnak, a részecskék közötti taszítóerő csökkenése, illetve megszűnése következik be. A leggyakrabban alkalmazott koaguláló vegyszerek az alumínium(III)-szulfát és a vas(III)-szulfát. A vízben előforduló, keménységet okozó vegyületekkel a koaguláció folyamata során az alábbi reakciók zajlanak le.



A reakció során vízben rosszul oldódó, szilárd pelyhek keletkeznek, amelyek a van der Waals-erő hatására kapcsolódnak egymáshoz nagyobb méretű pelyheket képezve, amelyek szilárd-folyadék fázisátválással eltávolíthatók.



5.9. ábra

A derítés folyamata ([17] alapján)

A flokkuláció során a koagulálódott részecskék nagyobb méretű csoportokká, pelyhekké kapcsolódnak össze. A pelyhéképződés a segédderítő szerek (például polielektrolitok) alkalmazásával felgyorsítható, a folyamat hatékonysága növelhető, így a mikropelyhek nagyobb méretű, jól ülepíthető pelyhekké (makropelyhek) kapcsolódnak össze. A képződött makropelyhek a fém-hidroxiddal létrehozott pelyheknél lényegesen nagyobb méretűek, tömörebb szerkezetűek, így gyorsabb és hatékonyabb szilárd-folyadék elválasztást tesznek lehetővé.

Egyes kutatások eredményei azt mutatják, hogy a koaguláció alkalmas lehet egyes szerves mikroszennyezők eltávolítására, koncentrációjának csökkentésére [18]. Az 5.5. táblázat összefog-

lalja egyes szerves mikroszennyezők eltávolíthatóságának hatékonyságát különböző derítőszer alkalmazása mellett.

5.5. táblázat

Egyes szerves mikroszennyezők koagulációval történő eltávolításának hatásfoka [18]

Derítőszer	Dózis	Szennyező anyag	Eltávolítás hatásfoka (%)
FeCl ₃	25,50 mg/L	Ibuprofen	12,0
		Diklofenák	21,6
		Naproxen	21,6
		Karbamazepin	6,3
		Szulfametoxazol	6,0
		Trimetropim	32,1
		Galaxolid	79,2
Al ₂ (SO ₄) ₂	25 mg/L	Diazeepam	12,5
		Szulfametaxozol	0,9
		Tonalid	75,8
		Galaxzolid	76,4
FeCl ₃	100, 200 mg/L	Biszfenol-A	20,0
		Dietilhexifitalát	70,0
		Noniphenol	90,0
Al ₂ (SO ₄) ₂	200 mg/L	Aldrin	46,0
	100 mg/L	Bentazon	15,0
PACl	30 mg/L	Szulfametaxozol	43,0
		Szulfametazin	52,0
		Koffein	16,0
		Acetaminofen	17,0
		Diklofenák	0
		Metoprolol	10,0

Az eredményekből azt láthatjuk, hogy az adagolt derítőszer fajtája és koncentrációja meghatározó. Diklofenák esetében vas(III)-klorid alkalmazásával 20% körüli eltávolítást sikerült elérni, míg a polialumínium-klorid adagolása nem hozott eredményt. Szulfametoxazol eltávolításában pedig épp az utóbbi bizonyult hatékonynak, közel 50%-os eltávolítás volt tapasztalható, szemben a vas-(III)-klorid és az alumínium(III)-szulfát 10% körüli hatékonyságával.

A koaguláció-szedimentáció hatékonyságát több kutatás is vizsgálta. Matamoros és Salvadó tanulmányában [19] a szerves mikroszennyezők koaguláció útján történő eltávolítását viszonylag magas (20–50%) hatásfokkal sikerült elérni olyan vegyületek esetében, amelyek K_{ow} -értéke 4, a pH 7 és 8 közötti (például galaxolid, tonalid és oktil-fenol). Suárez és társai kutatásában számottevő csökkenést tapasztaltak egyes szerves mikroszennyezők esetében (diklofenák 46%; naproxen 42%; ibuprofen 23%) [20]. Ezzel szemben Asakura és Matsuto eredményei szerint a biszfenol-A esetében a koaguláció-szedimentáció segítségével nem sikerült érdemben koncentrációcsökkentést elérni [21].

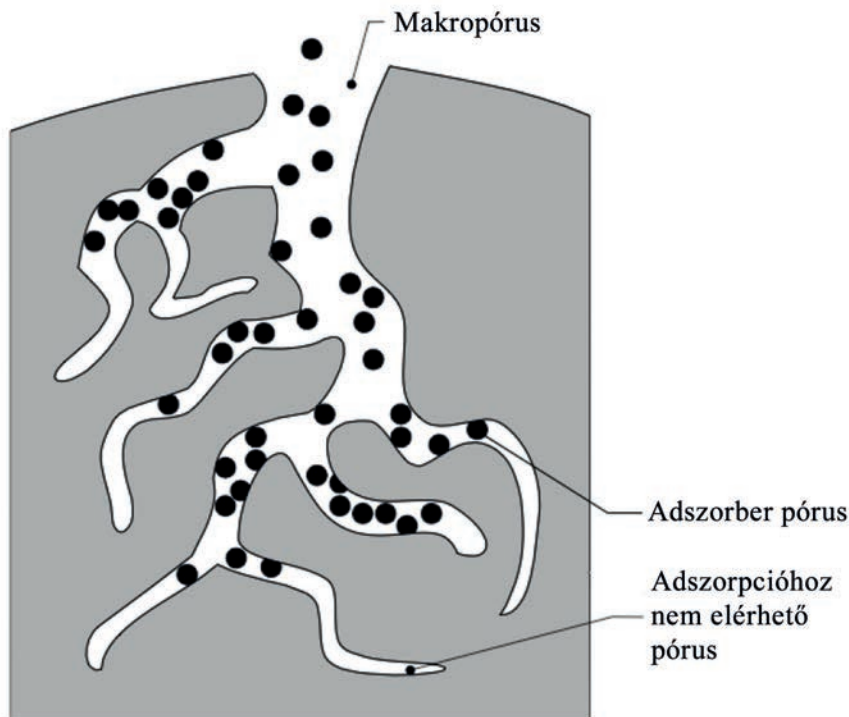
A koaguláció hatékonysága a szerves mikroszennyezők eltávolításában függ az adagolt derítőszer fajtájától, dózistól, valamint a pH-tól. Összességében elmondható, hogy a legtöbb szerves mikroszennyező eltávolításának esetében a koaguláció hatásfoka alacsony, általában 50% alatti. Egyes tanulmányok azonban elektrosztatikus kapcsolódást mutattak ki bizonyos szerves mikroszennyezők és az alkalmazott derítőszer között. Hidrofil mikroszennyezők, mint az acetaminofen ($\log K_{ow} = 0,46$), szulfametoxazol ($\log K_{ow} = 0,68$) és szulfametazin ($\log K_{ow} = 0,62$) kapcsolódhat Al^{3+} vagy Fe^{3+} ionokkal a koaguláció során. A pKa-értékek miatt [SMZ = 5,7, SMA = 2,6 (pKa-1) / 7,7 (pKa-2)] a szulfametoxazol és szulfametazin semleges pH mellett negatív ionként

viselkedik, ezért ezek a vegyületek hatékonyan koagulálhatók a PACl (polialumium-klorid) Al^{3+} ionjával [21].

Egyes egyéb eltávolítási mechanizmusok (adszorpció, fotolízis) koagulációval történő kombinálása növelheti a szerves mikroszennyezők eltávolításának hatékonyságát. Nyitott rendszerekben, ahol a koaguláció folyamata mellett a napfény is jelen volt, nagyobb eltávolítási hatékonyságot lehetett kimutatni az acetaminofen (76,6%, $24,7 \pm 43,3$ ng/L koncentráció), koffein (81,2%, $6,7 \pm 6\%$ koncentráció 10,5 ng/L) és diklofenák (100%, kimutathatósági határ közeli koncentráció) esetében. E vegyületek fényérzékenyek, és fotolitikus bomlásuk megfigyelhető volt a koagulációs folyamat során [22]. Ez az eredmény azt mutatja, hogy a napfény által keltett fotolízis további növelheti a koaguláció hatásfokát, ha ezek a mechanizmusok egyidejűleg is működnek.

5.3.2. Adszorpció: aktív szén alkalmazása

Az adszorpció egy tisztán fizikai folyamatokon alapuló folyamat, amely során egyes komponensek az adszorbens felületén megkötődnek. Ha kémiai folyamatok is szerepet játszanak, akkor kemisorpcióról beszélünk. Az adszorbens anyagok jellemzője, hogy tömegükhöz képest nagy fajlagos felülettel rendelkeznek. Az adszorpció folyamata reverzibilis, azaz megfelelő körülmények között – például a hőmérséklet emelésével – a megkötött anyagok eltávolíthatók, azaz az adszorbens regenerálható. A vízkezelésben leggyakrabban alkalmazott, elterjedt adszorbens az aktív szén.



5.10. ábra

Az adszorpció folyamata aktív szénen ([23] alapján)

5.6. táblázat

Egyes szerves mikroszennyezők aktív szén adszorpcióval történő eltávolításának hatásfoka ([18] alapján)

Adszorbens	Dózis	Szennyező anyag	Eltávolítás hatásfoka (%)
PAC	8, 23, 43 mg/L	Diklofenák	96, 98, 99
		Karbamazepin	98, 99, 100
		Szulfametaxozol	2, 33, 62
	100 mg/L	Koffein	>94
		Biszfénol-A	>94
		Nonifénol	>94
	5 mg/L	Acetaminofen	70–79
		Koffein	60–62
		Diklofenák	30–57
		Naproxen	52–57
		Szulfametaxozol	30–37
		Atrazin	55–57
Adszorbens	Módszer	Szennyező anyag	Eltávolítás hatásfoka (%)
GAC	üzemi körülmények között	Diklofenák	>98
		Karbamazepin	23
		Ösztron	64
		17β-ösztadiol	>43
		17α-etinil-ösztadiol	>43
	29 g / 70,6 ml laborkísérletben	Biszfénol-A	66
		Nonifénol	84
		Triklózán	95
	üzemi körülmények között, kontaktidő: 15 perc	Diklofenák	~100
		Trimetoprim	90
		Karbamazepin	75
		Koffein	45
		Acetaminofen	58
	1 mg/L	Koffein	71,3
		Altrazin	53
		Karbamazepin	69,9
		Diklofenák	25,5
		Ibuprofen	23,3
		Naproxen	46,6
		Szulfametaxozol	27,1

Az aktív szén fajlagos felülete 1000–1200 m²/g, nem szelektív, azaz többféle vegyület megkötésére alkalmazható. Apoláros, szerves vegyületek megkötésére alkalmas. A gyakorlatban két változatban találkozhatunk vele, granulált aktív szén (GAC) és por alakú aktív szén (PAC) formájában. A granulált aktív szenes szűrés folyamatában a tisztítandó víz átfolyik az aktív szenes tölteten, miközben a szerves vegyületek megkötődnek a felületén. Kialakítását tekintve a homokszűrőhöz hasonlóan lehet zárt, nyomás alatti, valamint nyitott kialakítású. A nyomás alatti rendszereket jellemzően felszín alatti vizek tisztítására alkalmazzák, míg a felszíni vizek tisztításában általában nyitott gyorszűrőket alkalmaznak. A töltet regenerálása technológiától függően történhet helyben vagy a szűrőegységből kitermelve, illetve kémiai vagy fizikai módszerekkel egyaránt. Por alakú aktív szén alkalmazása során az adszorbent a tisztítandó vízhez adagolják, szemcséin megkötődnek a szerves anyagok, majd megfelelő behatási idő eltelte után szilárd-folyadék fázisszétválasztással eltávolítják a vízből. Az aktív szenet általános víztisztításban a törésponti klórozásból származó klóraminok, THM, valamint kellemetlen íz- és szaganyagok eltávolítására alkalmazzák.

Számos tanulmány vizsgálta a szerves mikroszennyezők adszorpcióval történő eltávolításának hatékonyságát laboratóriumi és félüzemi méretű kísérletekben (5.6. táblázat). A por alakú aktív szén (PAC) és a granulált aktív szén (GAC) széles körben alkalmazzák adszorpciós folyamatokban, amelyeket mind az adszorbeálendő vegyületek, mind pedig az adszorbens tulajdonságai befolyásolhatnak.

Sikerült kimutatni, hogy a víztisztítás során megemelt PAC-dózis a kezdeti koncentrációtól függetlenül csökkentette egyes szerves mikroszennyezők koncentrációját [18]. Hernández-Leal et al. kimutatta, hogy egyes mikroszennyezők, mint a koffein és a butilparabén koncentrációja jelentős mértékben (~94%) alacsonyabb volt a szűrt vízben 5 perc kontaktidő eltelte után [24].

A hidrofil vegyületek (azaz a koffein, az acetaminofen, a szulfametoxazol és a szulfametazin) szorpciós együtthatói lineáris izotermához, míg a hidrofób vegyületek (azaz naproxén, diklofenák, 2,4-D, triklorkarban és atrazin) egy Freundlich-izotermához illeszkednek [25]. Egy tanulmány kimutatta, hogy a hidrofób szennyező anyagok és a hidrofil koffein eltávolítása független a pH-változástól, de az acetaminofent, a szulfametazint és a szulfametoxazolt elsősorban a PAC-kal végzett elektrosztatikus kölcsönhatás adszorbeálja, ezért a pH befolyásolta eltávolításukat.

Felszíni vizek esetében alacsonyabb az aktív szén adszorpció hatékonysága, ez a különbség különösen a hidrofób vegyületeknél volt szignifikáns. Felszíni vizek esetében az adszorpció hatékonyságának csökkenését az oldott szerves anyag (*dissolved organic material* – DOM) jelenléte okozta, amely könnyebben adszorbeálódik az aktív szénhez, mint a vizsgált szerves mikroszennyezők. Az alacsony hőmérséklet (5°C) csökkentette a mikroszennyezők adszorpciójának hatékonyságát, és a hidrofób vegyületeket jobban befolyásolta, mint a hidrofil vegyületeket.

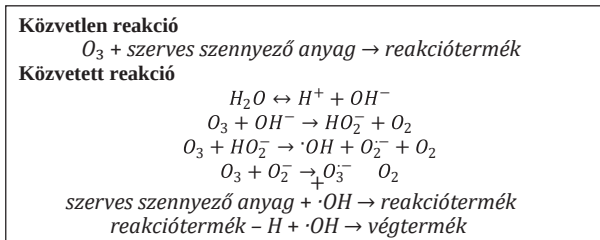
5.3.3. Klórozás

Az ivóvízkezelés folyamata szinte kivétel nélkül fertőtlenítést is magában foglal, mint a klórozás, az ózonizálás (O₃) vagy az ultraibolya fénnel (UV-C) történő csíráatlanítás a vízzel terjedő betegségek, patogén baktériumok terjedésének megakadályozása érdekében.

A klórozás széles körben elterjedt, napjainkban is alkalmazott fertőtlenítési eljárás. A klórozást elsősorban fertőtlenítésre használják, és nem kifejezetten a szerves szennyező anyag eltávolítására alkalmazott eljárás, de a szabad klór oxidáció révén lebonthatja a szerves szennyező anyagokat [18]. A klórmolekulák nagyobb reakcióképességet mutattak aromás gyógyszerkészítményekkel és nagyobb elektromos affinitást mutattak a szerves mikroszennyezők egyes funkcionális csoportjaihoz. A klórozás költséghatékonyabb, mint más technológiák (például ózonálás és az UV-besugárzás), és viszonylag egyszerűen üzemeltethető technológia. Szerves mikroszennyezők eltávolításában azonban meglehetősen alacsony hatásfokú (<20% a szulfametoxazol, acetaminofen, koffein és ibuprofen esetében), a reakcióidő pedig viszonylag hosszú. A klórozás további hátránya, hogy klórozási melléktermékek, például triklórmetán keletkezhet, amely káros az emberi egészségre.

5.3.4. Ózonozás

Az ózonnal való kezelés célja a fertőtlenítés és oxidálás, de oxidációs szerként alkalmas a szerves mikroszennyezők oxidálására is. Az ózonozás oxidálhatja a mikroszennyezőket akár ózonnal való közvetlen reakcióval, akár közvetett módon a hidroxilcsoportok képződése után, az alábbi reakciók szerint [18].

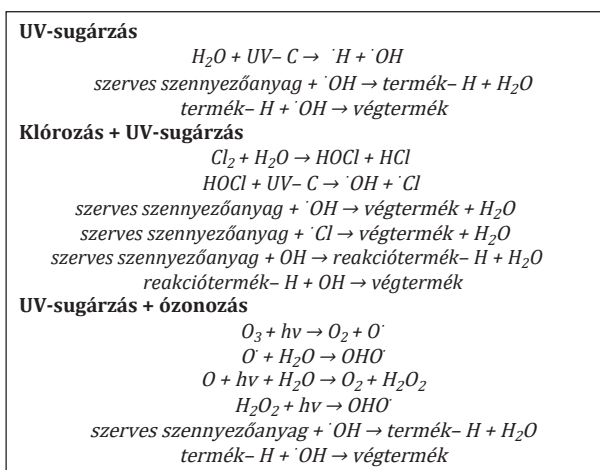


5.11. ábra

Az ózonizálás közvetlen és közvetett reakciófolyamatai ([18] alapján)

5.3.5. Kombinált oxidációs folyamatok UV, Cl₂/UV, UV/O₃

Egyes kutatások eredményei arra utalnak, hogy a 253,7 nm hullámhosszúságú, az ivóvíztisztításban csírátlantításra használt UV-fény kombinálása egyes oxidációs eljárásokkal hatékony lehet a szerves mikroszennyezők eltávolításában. A kutatásokban az UV-fény hatékonyságát klórgázzal és ózonnal növelték. Ezekben a rendszerekben lezajló reakciókat az 5.12. ábrán látható reakcióegyenletek foglalják össze [18].



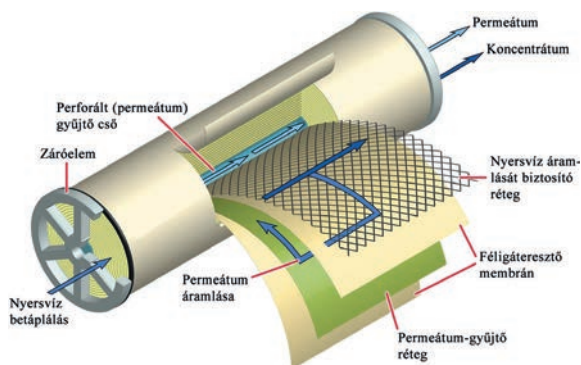
5.12. ábra

Kombinált oxidációs eljárások reakciófolyamatai ([18] alapján)

5.3.6. Membrántechnológiák

Az ivóvízkezelésben alkalmazott membrán olyan mesterségesen kialakított felület, amely féligáteresztő tulajdonságokkal rendelkezik, azaz a víz egyes komponenseit átereszt, más komponenseit pedig visszatartja. Jellemző tulajdonsága az áteresztőképesség, amely a pórusméret, az üzemi nyomás, a folyadék hőmérsékletének és kémhatásának függvénye. A membrán anyaga leggyakrabban cellulóz- vagy műanyagalapú, amelyek néhány tulajdonságát adalékanyagokkal módosítják, hidrofíli komponenszt építenek bele, továbbá ellenállóvá, tartóssá teszik. A membrántechnológiák közé soroljuk a mikroszűrést (MF), az ultraszűrést (UF), a nanoszűrést (NF),

valamint a fordított ozmózist (RO). Egy fordított ozmózis elvén működő membránszűrő általános felépítése az 5.13. ábrán látható.



5.13. ábra

A membránszűrő felépítése [26]

A membrántechnológiák jellemző mérettartománya								
Mikrométer	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000	
Angström	1	10	100	1000	10^4	10^5	10^6	10^7
Molekulatömeg (kD)	0,5	50	7000					
Részecskék jellemző mérettartománya	Sók	Cukrok	Fém ionok	Vírusok	Fehérjék	Kolloidok	PAH-vegyületek	Baktériumok
							Vörösvértest	Pollen
							Gyógyszerek	Emberi haj
								Homok
								Mikroműanyagok
Szűrési technológiák jellemző mérettartománya	Fordított ozmózis		Nanoszűrés		Mikroszűrés		Makroszűrés	
			Ultraszűrés					

5.14. ábra

A membrántechnológiák jellemző mérettartománya (Goda Zoltán)

A membránszűrők felhasználhatóságát és hatékonyságát tekintve azok pórustartománya mérvado. A rájuk jellemző pórustartománynál kisebb részecskéket átengedik, a nagyobbakat visszatartják. Ebből adódóan jól meghatározható egyes membrántípusok alkalmazhatósági területe. Az 5.14. ábra a membrántechnológiák, valamint egyes anyagok, szennyező anyagok jellemző mérettartományát mutatja be.

Mikroszűrés

A mikroszűrés (MF) a 0,1–10 µm közötti mérettartományban használható, alkalmas vízben nem oldódó porok, pelyhek, valamint baktériumok, illetve a vírusok egy részének visszatartására. A szerves mikroszennyezők, főleg a vízben oldott állapotban előforduló szennyező anyagok visszatartására nem alkalmas.

Ultraszűrés

Az ultraszűrést (UF) elsősorban felszíni vizek tisztítására, szennyvíztisztítás biológiai lépcsőjének utókezelésére, valamint élelmiszeripari és gyógyszeripari vízkezelésre alkalmazzák. Csak vízben nem oldódó komponensek eltávolítására képes, azaz a víz megfelelő előkészítését követően tulajdonképpen szilárd-folyadék fázisszétválasztásként működik. Anyaga általában poliakril-nitril (PAN) és poliéter-szulfon (PES), az üzemi transzmembrán nyomás 1–7 bar. Mérettartománya 0,01–0,1 µm, a baktériumok mellett alkalmas vírusok és makromolekulák visszatartására, de az oldott anyagok kivételével hatékonyan képes csökkenteni minden olyan komponens mennyiségét, amely a megelőző tisztítási fokozatokon átjutott. Ebből adódóan ez a technológia a szerves mikroszennyezők egy részének visszatartására, koncentrációjának csökkentésére, szűrésére alkalmas.

Nanoszűrés

A nanoszűrés (NF) fő alkalmazási területe a gyógyszer- és élelmiszeripar, valamint a vegyipar, megoldást jelent nagyobb molekulásúlyú oldott anyagok, többértékű anionok (foszfát, szulfát), szerves (szín-, szag-) anyagok, huminsavak, peszticidek visszatartására.

5.7. táblázat

A nanoszűrés hatékonysága egyes szerves mikroszennyezők eltávolításában [27]

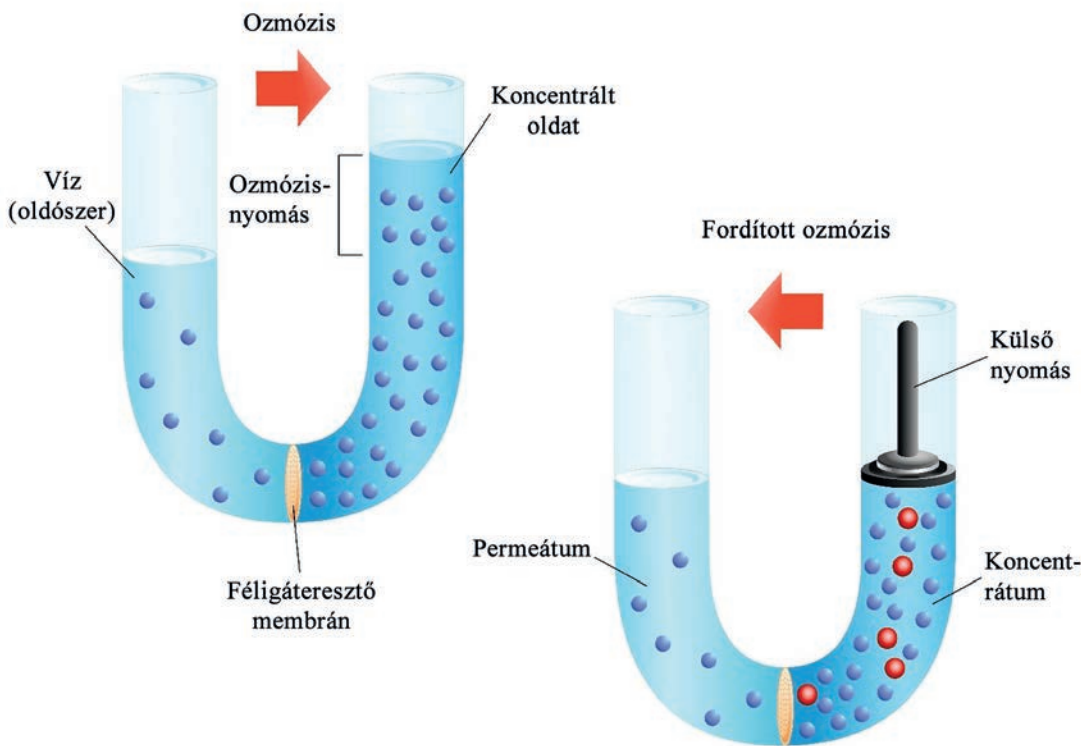
Szennyező anyag	oldat pH-ja	Eltávolítás határfoka
Szulfametaxozol	5,0	87
	5,9	91
	7,1	94
Karbamazepin	5,0	93
	6,1	93
	7,1	92

Mérettartománya 0,001–0,01 µm, már alkalmazható nagyobb súlyú (200–400 Dalton) szerves molekulák visszatartására, így a vízben oldott állapotban lévő szerves mikroszennyezők egy részének eltávolítására is alkalmazható. Anyaga általában szerves polimer vagy szervesetlen kerámia.

A nanoszűrés megfelelő előkezelést követően alkalmas a szerves mikroszennyezők egy részének eltávolítására, koncentrációjának csökkentésére. Mivel a membrántechnológiáknál a szűrés hatékonyságát a pórusméret határozza meg, így az egyes szerves mikroszennyezők visszatartásának hatékonysága számolható, illetve tervezhető. Konkrét eredményeink vannak karbamazepin és a szulfametaxozol gyógyszermolekulák visszatartásának hatékonyságáról [27] (5.7. táblázat).

Fordított ozmózis

A leghatékonyabb szűréssel a fordított ozmózis (RO) rendelkezik, amely a vízben oldott állapotban lévő, kis molekulásúlyú komponensek visszatartására is alkalmas. Mérettartománya $0,0001\text{--}0,001\text{ }\mu\text{m}$. A fordított ozmózis folyamata során külső nyomás hatására a víz keresztüláramlik a membránon a magasabb koncentrációjú oldatból az alacsonyabb koncentrációjú oldat felé (5.15. ábra).



5.15. ábra

Az ozmózis és a fordított ozmózis folyamata ([28] alapján)

A fordított ozmózis jellemzője, hogy nem szelektív, így használatával nem csupán a szennyező anyagok, hanem minden oldott állapotban lévő vegyület, ion is eltávolításra kerül. A fordított ozmózis permeátuma tehát ionmentesített víz lesz, amely lényegében nem tartalmaz idegen ionokat, csupán a víz oxónium- és hidroxidionjait. A fordított ozmózist elsősorban vízkezelésben alkalmazzák a víz sótalanítására, lágyítására, ionmentesítésére, elsősorban olyan területeken, ahol nagy tisztaságú víz előállítására van szükség. Köszönhetően a nagy szűrési hatékonyságának, a fordított ozmózis a szerves mikroszennyezők valamennyi változatának eltávolítására alkalmas. Több kutatás vizsgálta az egyes membránszűrési technológiák hatékonyságát, és nem meglepő módon a fordított ozmózis hatásfoka a legnagyobb [27].

5.8. táblázat

A fordított ozmózis hatékonysága egyes szerves mikroszennyezők eltávolításában [27]

Szennyező anyag	oldat pH-ja	Eltávolítás határfoka
Szulfametaxozol	5,0	94
	6,1	97
	7,1	98
Karbamazepin	5,1	93
	6,1	94
	6,9	92

Fontos azonban figyelembe venni, hogy a membrántechnológiák közül az RO fajlagos energia-igénye a legnagyobb, a permeátum-koncentráció aránya pedig a legrosszabb. Ebből adódóan, ha a körülmények lehetővé teszik, a kicsit alacsonyabb hatásfokú nanoszűrés jobb választás lehet.

Az ivóvízkezelésben alkalmazott technológiai folyamatok, mint a derítés, adszorpció, kombinált oxidációs eljárások, valamint a membránszűrés, alkalmasak a szerves mikroszennyezők eltávolítására. Fontos azonban megjegyezni, hogy a különböző vegyületek eltávolítási határfoka jelentősen eltérhet, amelyet bizonyos esetekben a környezeti körülmények is jelentősen befolyásolhatnak. A témával kapcsolatos kutatások rámutattak, hogy a különböző eljárások kombinációi jelentősen növelhetik a szennyező anyagok visszatartásának hatásfokát. Fontos tényező a tisztítandó víz megfelelő előkezelése és az optimális környezeti körülmények, mint a hőmérséklet vagy a pH beállítása.

5.4. Összefoglalás

A szerves mikroszennyezők témaköre az ivóvíztisztítás területén is meglehetősen újdonságnak számít. Bizonyos kutatási eredmények szerint a szerves mikroszennyezők bizonyos körülmények között potenciális kockázatot jelentenek az ivóvízbázisokra, mivel bekerülhetnek a termelői kutakba. A jelenleg elterjedt és legnagyobb arányban alkalmazott ivóvíztisztító technológiák nem a szerves mikroszennyezők eltávolítására lettek optimalizálva, egyes technológiák hatásfoka számszerűsíthető, ám ez a hatásfok az esetek egy részében nem kielégítő. Kísérletek eredményei azt tükrözik, hogy az egyes technológiai folyamatok kombinációja, valamint olyan természetes folyamatok, mint a fotolízis vagy a biodegradáció alkalmazása jelentősen növelheti a szerves mikroszennyezők eltávolításának eredményességét. A kifejezetten szerves mikroszennyezők eltávolítására alkalmazható technológiák közül a membránszűrés a leghatékonyabb, amelyek közül a pórusméretet figyelembe véve a fordított ozmózis határfoka a legnagyobb. Ez utóbbi egyéb tulajdonságait – mint a permeátum-koncentráció arány vagy a fajlagos üzemeltetési költség – figyelembe véve a nanoszűrés vagy az ultraszűrés tűnik inkább hatékony és gazdaságos megoldásnak.

Bibliográfia

1. Wikipedia. A Lázberci-víztároló látképe. 2005. [letöltve: 2019. 11. 11.]. Elérhető: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Okt_32.jpg
2. Goda Z. Hazai üzemelő és távlati parti szűrő ivóvízbázisok minőségi és mennyiségi értékelése. Hadmérnök. 2019;14(2):157–166.
3. Karácsony S, Mészáros G. Vízellátás-vízszerezés. Baja: Eötvös József Főiskola; 1998.

4. Goda Z. Az éghajlatváltozás lehetséges hatásai a parti szűrésű vízbázisokra. *Műszaki Katonai Közlöny*. 2019;29(1):185–194.
5. Maasz G, Mayer M, Zrinyi Z, Molnar E, Kuzma M, Fodor I, et al. Spatiotemporal variations of pharmacologically active compounds in surface waters of a summer holiday destination. *Science of The Total Environment*. 2019;677:545–555.
6. Vargha M. Magyarországi vízminőségi helyzet aktualitásai. Budapest: Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség, Ivóvíztechnológiai szakmai nap; 2017.
7. Nagy-Kovács Z, László B, Fleit E, Czichat-Mártonné K, Till G, Börnick H, et al. Behavior of Organic Micropollutants During River Bank Filtration in Budapest, Hungary. *Water*. 2018;10:1861.
8. Dragon K, Górski J, Kruć R, Drożdżyński D, Grischek T. Removal of Natural Organic Matter and Organic Micropollutants during Riverbank Filtration in Krajkowo, Poland. *Water*. 2018;10:1457.
9. Greenpeace. Tiszapalkonyai talaj- és talajvízszennyezés. [letöltve: 2019. 08. 12.]. Elérhető: <https://hu.greenpeace.org/mergezett-oroksegunk/tiszapalkonya/>
10. Greenpeace. A Budapesti Vegyiművek felszámolás alatt álló Illatos úti telephelye. [letöltve: 2019. 08. 13.]. Elérhető: <https://hu.greenpeace.org/mergezett-oroksegunk/bvm/>
11. Halmos M. Illatos út: 180 napot kaptak a 2300 tonna hulladék elszállítására. 2015.
12. Aquaplus Kft. Szekszárd, Fadd-Dombori parti szűrésű vízbázis biztonságba helyezési terve. 2005.
13. Deák J, Hertelendi E, Süveges M, Barkóczi Z. Parti szűrésű kutak vizének eredete trícium koncentrációjuk és oxigén izotóparányaik felhasználásával. *Hidrológiai Közlöny*. 1992;72(4):204–210.
14. Nagy-Kovács Z, Fleit E, László B, Mártonné Czihát K. Szerves mikroszennyező anyagok (peszticidek és PAH vegyületek) viselkedése a parti szűrés folyamatában Budapesten. *Hidrológiai Közlöny*. 2019;99(2):47–55.
15. Greenpeace. Bakony Művek, Veszprém. [letöltve: 2019. 08. 20.]. Elérhető: <https://hu.greenpeace.org/mergezett-oroksegunk/bakonymuvek/>
16. Mátrai I. Vízisztítási alapfolyamatok. In: Vadkerti E, editor. *Vízszerezés, víztisztítás*. Baja: Nemzeti Közszerzői Egyetem Víz tudományi Kar; 2021.
17. Popowich A, Zhang Q, Le XC. Removal of nanoparticles by coagulation. *Journal of Environmental Sciences*. 2015;38.
18. Moon-Kyung K, Kyung-Duk Z. Occurrence and removals of micropollutants in water environment. *Environmental Engineering Research*. 2016;21:319–332.
19. Matamoros V, Arias CA, Nguyen LX, Salvadó V, Brix H. Occurrence and behavior of emerging contaminants in surface water and a restored wetland. *Chemosphere*. 2012;88(9):1083–1089.
20. Suarez S, Lema JM, Omil F. Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation. *Bioresource Technology*. 2009;100(7):2138–2146.
21. Asakura H, Matsuto T. Experimental study of behavior of endocrine-disrupting chemicals in leachate treatment process and evaluation of removal efficiency. *Waste Management*. 2009;29(6):1852–1859.
22. Nam SW, Jo BI, Yoon Y, Zoh KD. Occurrence and removal of selected micropollutants in a water treatment plant. *Chemosphere*. 2014;95:156–165.
23. Sirocki AR, Lanza RA, Connors S. Removal of Ibuprofen from Drinking Water using Adsorption. Worcester: Worcester Polytechnic Institute; 2013.
24. Hernández LL, Temmink H, Zeeman G, Buisman C. Removal of micropollutants from aerobically treated grey water via ozone and activated carbon. *Water Research*. 2011;45:2887–2896.
25. Nam SW, Choi DJ, Kim SK, Her N, Zoh KD. Adsorption characteristics of selected hydrophilic and hydrophobic micropollutants in water using activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*. 2014;270:144–152.
26. EVOQUA. What is Reverse Osmosis and how does it work? [cited 2019 Aug 10]. Elérhető: www.evoqua.com/en/brands/IPS/Pages/what-is-reverse-osmosis.aspx
27. Phadunghus K, Wongrueng A, Rakruam P, Wattanachira S, Punyapalakul P. Efficiencies of NF and RO Membranes on Pharmaceutical Removal and Membrane Fouling Effects. *Engineering Journal*. 2017;21:101–112.
28. K&R Water Services. Osmosis/Reverse osmosis. [cited 2019 Aug 10]. Elérhető: www.kandrwaterservice.com/wp-content/uploads/2016/03/shutterstock_178188626.jpg