

Per- és polifluoralkil anyagok jelenléte háztartási szennyvizekben és jelentőségük az emberi egészség szempontjából

Györki Gábor^{1,2}, Knisz Judit^{1,2}

¹ Nemzeti Községi Egyetem, Víztudományi Kar, Vízi Környezettudományi Tanszék, 6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky u. 12.-14., (e-mail: gyorki.gabor@uni-nke.hu)

² Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Nemzeti Községi Egyetem Víztudományi Kar, 6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky u. 12-14.

DOI: 10.59258/hk.20298



Kivonat

A per- és polifluoralkil-anyagok (PFA) szintetikus, fluortartalmú vegyületek, amelyek a bennük lévő szén-fluor kötések kivételes stabilitása miatt rendkívül ellenállóak a kémiai reakciókkal és a biodegradációval szemben. Ezen tulajdonságok következtében a PFA vegyületek perzisztens mikroszennyezőként hosszú ideig megmaradnak a környezetben, és világszerte kimutathatók természetes vizekből, ivóvízből, élelmiszerekből és biológiai mintákból is. Előnyös technológiai jellemzőik, alacsony reakciókészségük, valamint hőálló tulajdonságaik miatt széles körben alkalmazzák őket különféle ipari és mindennapi fogyasztási cikkekben. A hagyományos szennyvíztisztító rendszerek azonban nem képesek hatékonyan eltávolítani a PFA-vegyületeket, így azok az emberi tevékenység révén, többek között szennyvizek útján folyamatosan bekerülnek a környezeti körforgásokba, az élővizekbe, sőt, ivóvízforrásokba is. A PFA vegyületek tartós környezeti jelenléte és bioakkumulációs hajlama révén veszélyeztetik az ökoszisztémák működését, továbbá komoly egészségkockázatot is jelentenek, mivel összefüggésbe hozhatók többek között daganatos megbetegedésekkel, fejlődési és szaporodási zavarokkal, és számos további betegséggel. Noha az utóbbi években egyre több kutatás irányult a PFA-k kommunális szennyvizekben való előfordulására, a tisztán háztartásból származó szennyvizek, és a decentralizált, egyedi szennyvíztisztító kisberendezések, továbbra is alulreprezentáltak a vizsgálatokban. E rendszerek PFA-eltávolítási hatékonyságáról, valamint a belőlük származó kibocsátások mennyiségi és minőségi jellemzőiről kevés adat áll rendelkezésre. Mivel ezek az alternatív megoldások világszerte egyre elterjedtebbé válnak, kiemelt kutatási és szabályozási figyelmet igényelnek, főleg a mikroszennyezőket tekintve. Az ilyen rendszerek környezeti hatásának pontosabb megismerése elengedhetetlen a PFA-szennyezés hatékony csökkentéséhez, valamint a közegészségügyi és ökológiai kockázatok mérsékléséhez.

Kulcsszavak

Per- és polifluoralkil anyagok, PFA, szennyvíz, háztartási szennyvíz, egyedi szennyvíztisztító kisberendezés, mikroszennyezők, örök vegyületek, környezetvédelem.

Presence of per- and polyfluoroalkyl substances in domestic wastewater and their public health significance

Abstract

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are synthetic, fluorinated compounds that exhibit exceptional resistance to chemical reactions and biodegradation due to the extraordinary stability of their carbon-fluorine bonds. As a result of these properties, PFAS compounds persist in the environment as persistent micropollutants and can be detected worldwide in natural waters, drinking water, food, and biological samples. Due to their favorable technological characteristics, low reactivity, and thermal resistance, they are widely used in various industrial and everyday consumer products. However, conventional wastewater treatment systems are not capable of effectively removing PFAS compounds, allowing them to continuously enter environmental cycles, surface waters, and even drinking water sources via wastewater and from other human activities. The persistent environmental presence and bioaccumulative potential of PFAS compounds threaten ecosystem functioning and also pose significant health risks, as they have been linked to cancer, developmental and reproductive disorders, and numerous other health problems. Although in recent years an increasing number of studies have focused on the occurrence of PFAS in municipal wastewater, household-originated wastewater and decentralized, individual wastewater treatment units remain underrepresented in such investigations. There is limited data on the PFAS removal efficiency of these systems, as well as on the quantitative and qualitative characteristics of emissions from them. As these alternative solutions are becoming increasingly widespread worldwide, they require prioritized research and regulatory attention, especially regarding micropollutants. A more precise understanding of the environmental impact of such systems is essential for the effective reduction of PFAS contamination and for mitigating public health and ecological risks.

Keywords

Per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS, wastewater, domestic wastewater, onsite wastewater treatment system, micropollutants, forever chemicals, environmental protection.

BEVEZETÉS

A per- és polifluoralkil-anyagok (PFA) csoportját szerves, szintetikus, fluortartalmú vegyületek alkotják, melyeket először az 1940-es években állítottak elő. Felfedezésük óta nagy mennyiségben gyártják és széleskörűen alkalmazzák

e vegyületeket, a kétezres évek elején már a környezetben, vadállatokban, sőt az emberi szervezetben is kimutatták őket mint antropogén szennyezők (*Szabo és társai 2023*). Ezzel egyidőben az EU, az Egyesült Államok és Ausztrália elkezdte szabályozni a PFA-vegyületek gyártását,

csökkenteni a hosszú szénláncú vegyületek felhasználását (Hoang Nhat és társai 2020). A vegyületek előállításának jelentős részéért mindössze néhány cég felel. Ezek a gyártók azt állítják, a PFA-k elengedhetetlenek, alkalmazásuk számos társadalmi és gazdasági előnnyel jár, viszont nem veszik figyelembe a hosszútávú egészségkárosító hatásokat, valamint a szennyezés kezelésének költségeit (Cordner és társai 2021). A kiemelkedően erős szén-fluor kötések eredményeképp a PFA-vegyületek nehezen bomlanak, és többnyire ellenállóak a biodegradációval szemben is (Hoang Nhat és társai 2020). Több ezer vegyület alkotja a PFA-k csoportját, melyeket kémiai szerkezetük-ből adódó nagyfokú perzisztenciájuk miatt „örök vegyületeknek” is neveznek (Brunn és társai 2023). Egyes PFA molekulák rendkívüli stabilitással rendelkeznek, ami meghatározza a jól ismert, és számos iparágban keresett tulajdonságaikat. A gyakorlatban ez főleg a kémiai inertséget, illetve a magas hőmérséklettel szembeni ellenállást jelenti. Ezen sajátosságok teszik a vegyületeket alkalmassá víz-álló, vízlepergető, zsírtaszító és tapadásmentes anyagok, bevonatok előállítására (Berhanu és társai 2023). Széles körben alkalmaznak különböző PFA-kat festékekben, vízlepergető textíliákban, tisztítószerekben és impregnáló szerekben. Előfordulnak továbbá elektronikai eszközökben, kozmetikumokban, élelmiszersomagoló anyagokban, valamint tapadásmentes konyhai eszközökben is (Subedi és társai 2015, Hoang Nhat és társai 2020, Berhanu és társai 2023). Előnyös tulajdonságaik miatt az ipar folyamatosan, nagy mennyiségben állítja elő ezeket az anyagokat (Gobelius és társai 2023), antropogén szennyezőként, a perzisztenciájuk miatt rendkívül nagy környezeti kockázatot jelentenek. A jelenleg alkalmazott szennyvízkezelési technológiák nem képesek hatékonyan eltávolítani a PFA-kat a szennyvízből (Blum és társai 2018), így bármilyen formájú felhasználásuk után kikerülhetnek a környezetbe (Schultz és társai 2006), beléphetnek a természetes körfolyamatokba, például a hidrológiai ciklusba. Vizsgálatok rávilágítottak, hogy már nem csak a szennyvízben és a hulladéklerakókban találhatók meg, hanem a természetes vizekben, ivóvízben, élelmiszerekben is (Hoang Nhat és társai 2020, Berhanu és társai 2023). A több évtizedes széleskörű használat, a perzisztencia, valamint a környezetben való könnyű terjedésük eredményeképp már a Föld minden részén detektálhatóak (Hartz és társai 2024). A PFA vegyületek toxikus hatást gyakorolnak az állatok és az ember szaporodási, fejlődési, immun- és idegrendszerére, továbbá endokrin rendszert károsító anyagokként tartják őket számon (Huang és társai 2022). Összefüggésbe hozták őket többek között daganatos megbetegedésekkel, szervi károsodásokkal (Berhanu és társai 2023), valamint anyagcsere-zavarokkal (Barisci és Suri 2021). Emellett a PFA vegyületek kedvezőtlen hatással vannak a mikroorganizmusok sokféleségére és azok anyagcsere-folyamataira, mind a környezetben, mind pedig a szennyvíztisztítás során (Huang és társai 2022). A PFA vegyületek tehát globálisan elterjedt mikroszennyezők, egy részük perzisztens, bioakkumulatív és toxikus is (Hartz és társai 2024). Az emberi tevékenységek során használt termékek révén, a szennyvizekkel folyamatosan terjednek a környezetben. Az utóbbi években több kutatás

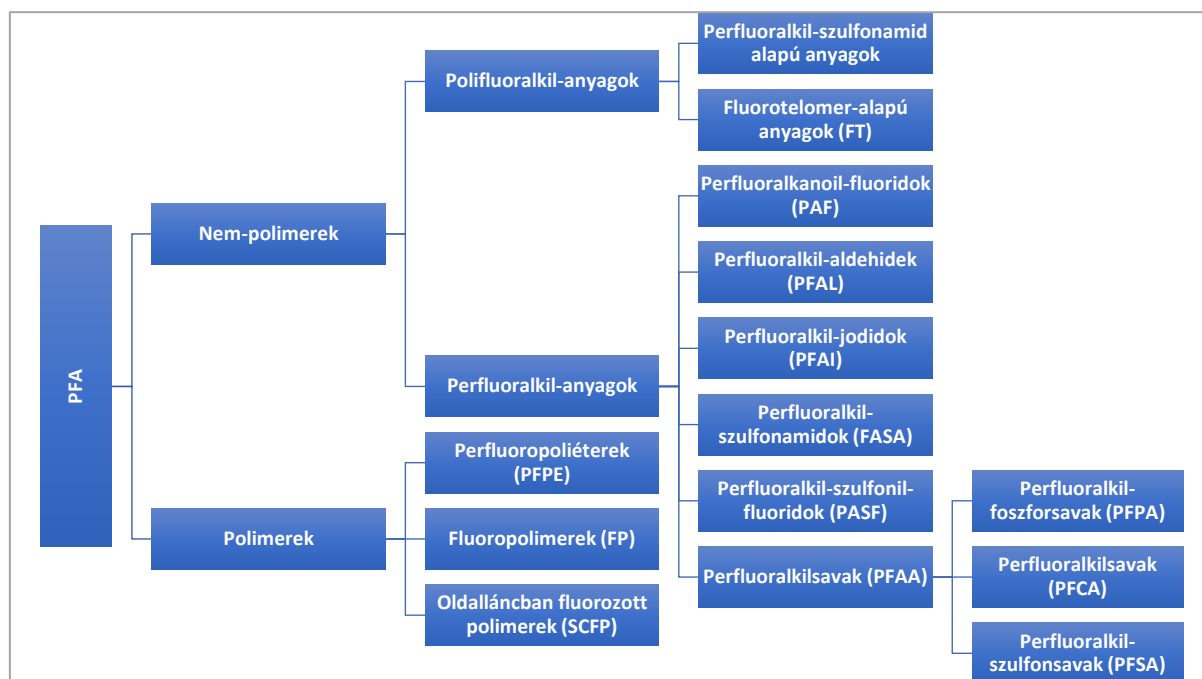
vizsgálta a PFA-k jelenlétét, összetételét és koncentrációját kommunális szennyvizekben, az EU 2024/3019 irányelve pedig 2025. januárjától elő is írja a 10 000 lakos-egyenérték feletti szennyvíztisztítók esetén a PFA-k monitorozását (EU 2025). Rendkívül kevés tanulmány foglalkozik azonban az olyan decentralizált megoldásokkal, mint az egyedi szennyvíztisztító kisberendezések (ESZKB-k), amelyek PFA-eltávolítási hatékonysága többnyire ismeretlen, így a kibocsátásuk mennyiségi és minőségi jellemzőiről is csak korlátozott adatok állnak rendelkezésre. A szennyvíztisztító telepekhez hasonlóan ezek a berendezések sem arra lettek tervezve, hogy a perzisztens mikroszennyezőket eltávolítsák (Blum és társai 2017). Tekintve az egyedi szennyvíztisztítók egyre növekvő népszerűségét (Wang és társai 2021), a háztartási szennyvizek PFA-tartalma és az egyedi rendszerek PFA-eltávolítási képessége is egyre nagyobb jelentőségű lesz mind környezetvédelmi, mind egészségügyi szempontból. Jelen tanulmány célja, hogy átfogó képet adjon a háztartások és egyedi szennyvíztisztítók szempontjából legjelentősebb PFA-k forrásairól, szennyvízbe kerüléséről, továbbá az ezzel kapcsolatos környezeti hatásokról és egészségkockázatokról.

A PER- ÉS POLIFLUORALKIL-ANYAGOK PROBLÉMÁJA

A PFA vegyületek kémiai jellemzői és osztályozása

A PFA molekulák csoportját szerves, szintetikus, fluorotartalmú vegyületek alkotják. A korábbi meghatározás szerint 4730 vegyület tartozott ide (Buck és társai 2021), míg a legújabb, kibővített definíció alapján minden olyan vegyület PFA-nak számít, amely legalább egy telített CF₂- vagy CF₃-csoportot tartalmaz. Ennek következtében a PubChem adatbázisban már több, mint hétmillió különböző PFA molekulát tartanak számon (Schymanski és társai 2023). Az iparilag jelentős vegyületek vázát egy szénlánc (alkil lánc) adja, melyen a hidrogén atomokat részben, vagy teljesen fluor atomok helyettesítik, ezen kívül leggyakrabban tartalmaznak egy funkciós csoportot is (Hoang Nhat és társai 2020). A fluor atomok hatására az alkil lánc kémiai és fizikai tulajdonságai jelentősen megváltoznak, az kompaktabb és sűrűbb, valamint erősen hidrofób lesz (EPA 2025). A szén-fluor kötés az egyik legerősebb szerves kötés, akár 536 kJ/mol erősségű is lehet (Hoang Nhat és társai 2020). A kötési energiának és az alacsony polaritásnak köszönhetően ezek a vegyületek kémiai és biológiai szempontból is nehezen bonthatók, ellenállnak a kémiai támadásoknak (Berhanu és társai 2023).

A két leggyakrabban kutatott vegyület a perfluoroktánsav (PFOS) és a perfluoroktánszulfonsav (PFOA), melyeket hagyományos PFA-knak nevezünk (legacy PFAS). E két vegyület gyártását betiltották a Stockholmi Egyezményen (Stockholm 2004). Az ezeket kiváltó vegyületeket helyettesítő PFA-knak (replacement PFAS) nevezzük, míg az újonnan alkalmazott vegyületek szélesebb csoportját új PFA-knak (emerging PFAS) (Berhanu és társai 2023). A számos ismert molekula közül napjainkban az egyszerűbb, rövidebb szénláncúak bírnak a legnagyobb ipari jelentőséggel (Hoang Nhat és társai 2020), de több különböző csoportot különböztetünk meg, melyeket az iparágak felhasználnak (1. ábra).



1. ábra. A PFA vegyületek csoportosítása (Györki szerkesztése Teymourian és társai 2021 alapján)
 Figure 1. Classification of PFAS (Edited by Györki, based on Teymourian et al. 2021)

A PFA-szennyezés forrásai és globális elterjedése

A globális PFA-gyártás és felhasználás a különféle vegyületek elterjedését okozta világszerte. A termelési volument tekintve évente több, mint ezer tonnát állítanak elő összesen (Evich és társai 2022), melynek jelentős részét mindennapi termékek előállítására használják. Egy 2023-as kutatás 107 különböző PFA-t azonosított háztartásokban alkalmazott fogyasztási cikkek 15 kategóriájában (Dewapriya és társai 2023). A szabályozások ellenére néhány PFA vegyület használatát nem lehet nullára csökkenteni. Példaként említve, PFA vegyületek használata engedélyezett habbal oltó készülékek gyártása során. Néhány fluoropolimer olyan előnyös, és adott iparágak számára elengedhetetlen tulajdonságokkal rendelkezik, melyeket a helyettesítő molekulák nem képesek nyújtani (Ameduri 2023). Gyártási folyamatok során akaratlanul is kerülhetnek PFA vegyületek a termékekbe (Dewapriya és társai 2023), így nehéz pontosan követni azok elterjedését. Kutatások bizonyították, hogy a legtöbb termék csomagolásán nincsenek feltüntetve a PFA vegyületek mint összetevők (Rodgers és társai 2022), így környezettudatos és egészségtudatos életmód mellett is nehéz elkerülni ezeket. A tiltott vegyületeket eredetileg nem tartalmazó politetrafluoretilén (PTFE) konyhai eszközökből a használat során, magas hőmérséklet és savas közeg hatására PFOA, PFOS, és más perfluorozott vegyületek oldódhatnak ki (Abulfadl és társai 2019), mely megnehezíti a bizonyítottan káros vegyületek kontrollálását. A szabályozást tovább nehezíti, hogy amikor bizonyos PFA vegyületeket betiltanak, az iparágak gyakran olyan alternatív PFA-kkal helyettesítik őket, melyek hasonló környezeti és egészségkockázatokkal jelennek meg, de még nem vonatkozik rájuk szabályozás. Ez a „sajnálatos helyettesítésnek” is nevezett gyakorlat aláássa az egyedi vegyületekre vonatkozó szabályozások hatékonyságát (Kwiatkowski és társai 2020), a legújabb tanulmányok így hangsúlyozzák egy stratégiai megközelítés szükségességét a PFA vegyületektől való átállás-

hoz, elkerülve a nem feltétlenül szükséges helyettesítéseket (Brunn és társai 2023). Jelentős problémákat vethet fel, hogy a PFA vegyületek különböző kémiai és biológiai útvonalakon keresztül átalakulhatnak egymásba. A PFA vegyületek egy része átalakulhat a környezetben, ezek a kevésbé stabil vegyületek prekursorai lehetnek a perzisztensebb PFA formáknak, így a perzisztens vegyületek még további gyártás hiányában is folyamatosan újratermelődhetnek (Evich és társai 2022). Több fajban is azonosítottak metabolikus útvonalakat, amellyel a szervezet a számára idegen és potenciálisan toxikus vegyületeket próbálja kevésbé toxikus vegyületekre bontani, tehát biotranszformációk során is keletkezhetnek említett, perzisztens PFA-k (Kolanczyk és társai 2023). A szennyvízkezelési folyamatok befolyásolhatják a PFA-profilokat a szennyvízben és szennyvíziszapban, így olyan vegyületek is jelen lehetnek a tisztítási lépésekből távozó mátrixokban, amik eredetileg nem voltak jelen, beleértve a szabályozott molekulákat is (O'Connor és társai 2022).

A PFA-szennyezés napjainkra világméretű problémává vált. A folyamatos PFA kibocsátás és a nem megfelelő tisztítási eljárások eredményeképp (Wee és Aris 2023) a PFA-k megtalálhatók a Föld szféráiban, mindenütt jelenlévő környezeti szennyezőkké váltak, a hidrológiai ciklus minden pontján azonosíthatók. A vízkörforgásban jelen vannak a szennyvíztől kezdve a természetes vizeken át az ivóvízig, a PFA vegyületek összesített koncentrációja a felszíni és felszín alatti vizekben jellemzően 1 ppt-től 1 ppb-ig terjed. Az ipari fejlettségtől függetlenül minden kontinensen kimutatták a PFA-k jelenlétét, a potenciális forrásoktól távol is megtalálhatók, mely nagy távolságú légköri transzportra utal (Kurwadkar és társai 2022). Változatosságukat elősegíti a korábban ismertett részleges kémiai (Evich és társai 2022) és ritka biológiai bomlás (O'Connor és társai 2022). Olyan, közösségektől távoli és elszigetelt területeken is megtalálhatók, mint az Északi

Sarkkör jégapákai (Hartz és társai 2024), sőt, ma már az emberek nagy részének a véréből is kimutathatóak (Fischer és társai 2024).

A PER- ÉS POLIFLUORALKIL-ANYAGOK FORRÁSAI

Ipari és mezőgazdasági szennyvizek

A különböző PFA vegyületeket előállító kémiai ipar az elsődleges forrása lehet a környezeti PFA-szennyezésnek, amennyiben azok szennyvizét nem tisztítják meg teljesen (Zhou és társai 2024).

A feldolgozóiparban csak felhasználják a PFA-kat mint alapanyag, adalékanyag, vagy segédanyag reakciók során, ezen kívül az alkalmazott kenőanyagok és ipari felületaktív anyagok is tartalmazhatnak ilyen vegyületeket (Wang és társai 2017). A PFA vegyületeket alkalmazó iparágak közül a legfontosabbak a fluorotelomer-alkoholokat (FTOH) alkalmazó kémiai ipar, a perfluoropolietereket (PFPE) alkalmazó élelmiszeripar, a perfluoralkil-szulfonsavakat (PFSA) és PTFE-t használó energiaszektor, továbbá az elektronikai ipar, építőipar és gyógyszeripar. Számos, modern eszközöket gyártó, illetve modern szolgáltatásokat nyújtó iparágban is kulcsszerepet töltenek be ezek a vegyületek, ilyenek például az űrkutatás, az atomenergia-szektor, a félvezetőipar, valamint a gyógyászati segédeszközök gyártása (Gluge és társai 2020). A PFOS és PFOA kivételük ellenére még mindig a leggyakrabban vizsgált és hivatkozott vegyületek közé tartoznak. Ezen kívül jelenleg a perfluoralkilszulfonsavak, a perfluoralkilszulfonil fluoridok, a perfluoralkilsavak, fluoropolimer, fluorotelomerek, fluorozott szénhidrogének, és hidrokloro-fluorolefinek a legjelentősebb vegyületek és vegyületcsoportok az iparban (Berhanu és társai 2023), de számos más, rövid szénláncú PFA-t is nagy mennyiségben állítanak elő (Hoang Nhat és társai 2020). Számos PFA vegyület annyira fontos a modern ipar számára, hogy azokat jelenleg úgy tűnik, nem lehet kiváltani. Jelentős probléma a korábban már ismertetett „sajnálatos helyettesítés”, illetve a PFA vegyületek akaratlanul a kész termékekbe kerülése is (Kwiatkowski és társai 2020, Dewapriya és társai 2023).

Az ipari forrásokhoz hasonlóan a mezőgazdasági tevékenységek is különböző PFA vegyületeket juttathatnak a környezetbe. A legjelentősebb források a PFA-kat tartalmazó kezelt szennyvíziszap trágyázásra való felhasználása, illetve ezzel párhuzamosan a szennyvízöntözés (Zhou és társai 2024). A korábban említett iparágak által kibocsátott PFA vegyületek által szennyezett öntözővíz szintén felhasználásra kerülhet a mezőgazdaságban (Zhou és társai 2024). Földműveléshez használt műanyag takarófóliákból, melegházak alapanyagából a vízbe és közvetlenül a földbe, valamint öntözéshez használt műanyag eszközökből az öntözővízbe kerülhetnek különböző vegyületek (Zhou és társai 2024). További jelentős forrás a PFA vegyületeket aktív vagy inert összetevőként tartalmazó peszticidek (Costello és Lee 2020). A felsorolt mezőgazdasági tevékenységek során közvetlenül a környezetbe, közvetetten pedig az élelmiszerekbe és ivóvizekbe juthatnak a PFA-k, melyek így bekerülnek a korábban említett körforgásba (Sepulvado és társai 2011), először a háztartásba, majd a szennyvizekkel vissza a környezetbe és termőföldekre.

Háztartási szennyvizek

A lakossági szennyvíz szempontjából a legfontosabbak az egyéni háztartásokból kikerülő, gyakran eltérő PFA összetétellel rendelkező szennyvizek. A háztartásból származó szennyvizek összetételét a fogyasztási cikkek és használati tárgyak PFA-tartalma jellemzi (Schultz és társai 2006). Egy átfogó kutatás 107 különböző PFA vegyületet azonosított összesen 1040 fogyasztási cikkben, 15 különböző termék kategórián belül (1. táblázat). A legmagasabb koncentrációkat habbal oltó készülékek esetén mérték, ezt követték a textilápoló szerek és a háztartási vegyszerek. Összetételt tekintve a ruházati és lakástextiliák a legváltozatosabbak, melyek esetén 72 különböző vegyületet detektáltak (Dewapriya és társai 2023). A termékcsoportok között elkülöníthetők magas átlagos koncentrációjúak, ilyenek például a habbal oltó készülékek, textilápoló anyagok és vegyszerek, melyekben a PFA-k központi szerepet játszanak filmképzőként és vízlepergetőként. Alacsony átlagos koncentrációjú termékcsoportok közé tartoznak az élelmiszer-csomagolóanyagok, műanyagok és elektronikai termékek, melyekben a PFAS-ok főként vékony bevonatként vannak jelen. Az élelmiszer-csomagolóanyagok 0,51 ppm-es átlagos értéke arra utal, hogy a PFAS-tartalom felületi bevonatokból vagy szennyezésből származik, nem pedig tömegalkotó anyagként van jelen.

Egyes csoportokon belül a minimális és maximális koncentrációk között akár milliós nagyságrendű eltérés is előfordulhat, ami a termékek jelentős változatosságára vezethető vissza, és magyarázható a gyártási különbségekkel, valamint az eltérő formulációs célokkal. Az egyedi szennyvíztisztító kisberendezésekbe közvetlen módon csak olyan termékekből kerülnek PFA-k, melyek a mindennapi élet során a háztartások lefolyóiba kerülnek. Ez alapján bár az építőanyagok, festékek, olajok és habbal oltó készülékek jelentős PFA-forrásként szolgálhatnak, a kisberendezések esetén általánosan véve nincs relevanciájuk.

PFA-k találhatók még többek között bőrkezelő-szerekben, impregnáló szerekben, tapadásmentes konyhai edényekben (Hoang Nhat és társai 2020), esernyők, sátrak, táskák, és további szabadidős tevékenységekhez használatos tárgyak alapanyagában, számos különböző vízlepergető és zsírtaszító csomagolóanyagban, pizzás dobozok és popcorn-zacsok alapanyagában (Teymourian és társai 2021). További kutatások rámutattak, hogy meglepő módon egyes toalettpapírokban (Thompson és társai 2023), és fogselymekben is megtalálhatók PFA-k (Boronow és társai 2019). További aggályokat vet fel, hogy a termékekben leggyakrabban nincs feltüntetve, ha azok PFA-kat tartalmaznak (Rodgers és társai 2022). Fogyasztási cikkekben kívül az élelmiszerek és az ivóvíz is tartalmazhat PFA vegyületeket, melyek szintén hozzájárulnak a háztartási szennyvíz PFA-tartalmához. Az ivóvizekben jellemzően a felszíni vizekhez hasonló, vegyületenként 0,1 ppt és 1 ppt közötti koncentrációk mérhetők, viszont az országok között jelentős különbségek vannak, az Egyesült Államokban 100 ppt feletti koncentrációkat is mértek 2017-ben. A jelenlegi ivóvíztisztító létesítmények kevésbé hatékonyak a PFA-k eltávolítását tekintve. A homokszűrés, derítés és ülepítés alacsony hatékonyságúak, de az újabban használt aktív szén adszorbensek is csak a hosszabb szénláncú ve-

gyületeket képesek megkötni. A membránszűrés hatékony alternatíva lehet, viszont magas költségekkel járhat, a vízszatartott anyagokat pedig ártalmatlanítani kell (*Hoang Nhat és társai 2020, Berhanu és társai 2023*). Abban az esetben, ha a háztartások szennyvizét egyedi szennyvíztisztító kisberendezések kezelik, az elfolyó szennyvíz leggyakrabban a föld felszíne alatt kerül elszikkasztásra. Mivel az ilyen kisberendezések nem a PFA-khoz hasonló mikro-szennyezők eltávolítására lettek tervezve (*Blum és társai*

2017), az elfolyó szennyvíz tartalmazhat a háztartásra jellemző összetételű és mennyiségű PFA vegyületeket. Különösen nagy kockázatot jelenthet továbbá, ha a szennyvizet öntözésre, illetve a szennyvíziszapot trágyázásra használják fel, ezek a gyakorlatok tovább növelhetik az expozíciót. Ásott kutak esetén a lokálisan környezetbe jutott PFA-k rövid időn belül visszakerülhetnek az ivóvízbe is, még a mélyebben fekvő víztartó rétegekből is (*Kurwadkar és társai 2022*).

1. táblázat. Különböző termékekben detektálható PFA típusok és koncentrációk (*Dewapriya és társai 2023*)

Table 1. PFAS types and concentrations in consumer products (*Dewapriya és társai 2023*)

TERMÉK-KATEGÓRIA	DETEKTÁLT PFA-K SZÁMA	ÖSSZES PFA KONCENTRÁCIÓ [PPM]		
		MINIMUM	MAXIMUM	ÁTLAG
Építőanyagok	62	0,0001	4300,28	79,18
Kozmetikumok	50	0,0020	2425,08	58,21
Textilápoló anyagok	13	2,9200	1370,00	302,92
Habbal oltó készülékek	21	0,1000	1031,30	488,51
Háztartási vegyszerek	30	0,0005	949,60	208,08
Viaszok, fényezőszerek	24	0,0020	423,40	21,85
Olajok, kenőanyagok	33	0,0020	396,00	121,05
Festékek	33	0,0020	396,00	121,05
Textíliák	72	0,0001	295,20	2,48
Élelmiszer-csomagolóanyagok	41	0,0001	25,20	0,51
Peszticidek	2	0,2200	19,20	12,36
Állateledel-csomagolóanyagok	10	0,2100	5,63	2,42
Műanyagok	22	0,0001	2,61	0,19
Elektronika	9	0,0009	0,90	0,66
Tisztálkodási szerek	9	0,0009	0,29	0,66

A PER- ÉS POLIFLUORALKIL-ANYAGOK JELENLÉTE ÉS KONCENTRÁCIÓJA A SZENNYVÍZBEN

Szennyvíztisztító telepek

A települési szennyvíztisztító telepeket (WWTP) kiszolgáló szennyvízhálózatok különböző típusú forrásokból fogadnak szennyvizet, beleértve a háztartási szennyvizet, ipari szennyvizet és csapadékvizet. Ebből adódóan a telepre érkező szennyvíz a felsoroltak keveréke (*Gobelius és társai 2023, Szabo és társai 2023*), így többek között a PFA-profilok keverednek, a beérkező szennyvíz bár nem homogén, az esetleges kiugró értékek megszűnnek. A különböző forrásokból származó szennyvizek egyenetlen összetételét jól mutatja az óránkénti mérések által szolgáltatott jelentős PFA-koncentrációk variabilitása. A beérkező vegyületek két csoportra oszthatók, az egyik csoport a hétköznapiakon, a másik csoport a hétfélegén koncentrálik, feltehetőleg az ipari tevékenységek-ből és azok hiányából adódóan (*Szabo és társai 2023*).

A szennyvizekben főleg rövid szénláncú PFA-k azonosíthatók (*Gobelius és társai 2023*). Egy 9 telepet vizsgáló kutatás alapján a befolyó szennyvízben a leggyakoribb és legnagyobb koncentrációjú PFA vegyületek közé tartozik a PFOS, PFOA, PFPeA (Perfluoropentánsav), PFHxA (Perfluorhexánsav), PFBS (Perfluorobutánszulfonsav) és PFBA (Perfluorobutánsav), jellemzően 1 és 10 ppt közötti nagyságrendekben. A mért PFA-k összes koncentrációja 39,9 és 90,8 ppt között mozgott (*Kim és társai 2024*). PFA vegyületekkel erősen szennyezett területekről, például

ipari területekről, tűzoltó kiképző létesítményektől, vagy hulladéklerakóktól csapadékvizet fogadó szennyvíztisztító telepeken rendkívül magas, 220 ppt PFOS koncentrációt is mértek. A 6:2 fluorotelomer-szulfonsav (6:2 FTSA) is esetenként jelentősen magas koncentrációban van jelen a szennyvizekben (*Gobelius és társai 2023*). Számos más PFA-vegyületet lehet azonosítani a szennyvizekben, viszont a célzott analízis rendkívüli költségekkel járhat, így esetenként az extrahálható szerves fluor (EOF) mennyiségét mérik, melynek viszont csak egy részét teszik ki a PFA-k, jelentős része a fluortartalmú gyógyszerekből származik (*Szabo és társai 2023*). A koncentrációk rendkívül széles tartományban mozoghatnak különböző telepek és mintavételi időpontok között.

A biológiai szennyvíztisztításban résztvevő mikroorganizmusok többnyire nem képesek lebontani a PFA-kat, így a telepek eltávolítási hatékonysága általában alacsony (*Gobelius és társai 2023*). Az eltávolítás hatásfoka egyedi PFA-kra nézve rendkívül változó, a 78%-os eltávolítástól a koncentráció növekedéséig terjed (*Gobelius és társai 2023*), az EOF eltávolítás pedig 25% alatti (*Szabo és társai 2023*). A kutatások jelentős variabilitásról számoltak be, míg egyes vegyületek koncentrációja csökken a tisztítás során, másoké nő. Ez valószínűleg a vegyületek átalakulásának és rövidebb szénláncú formákra való bomlásának az eredménye (*Kim és társai 2024*), de az iszaphoz való kötődés is befolyásolhatja az eredményeket (*Gobelius és társai 2023*). A vizes fázis és szilárd szemcséhez való kötődés aránya vegyületenként eltérő, a pH-n, szerves és

szervetlen vegyületek jelenlétén kívül számos faktortól függhet (Kumar és társai 2023). A rövid szénláncú PFA-k főleg a vizes fázisban, a hosszabb szénláncúak pedig az iszaphoz kötődve mozognak (Kumar és társai 2023), bár a mérési eredmények között vannak ennek ellentmondó értékek is. Általánosan elmondható, hogy az iszapban koncentrálódik a PFA-k jelentős része, az iszaprecirkuláció pedig folyamatosan magas PFA-koncentrációkat okozhat a telepek működése során (Gobelius és társai 2023).

Egyedi szennyvíztisztító kisberendezések

Az egyedi szennyvíztisztító kisberendezések olyan decentralizált szennyvíztisztítási megoldások, melyeket főleg akkor telepítenek, ha a központosított szennyvízkezelés nem elérhető, vagy ha az ehhez való csatlakozás fizikailag nem megoldható, illetve irreálisan magas költségekkel járna (Libralato és társai 2012). Mivel ezek a berendezések egyéni források szennyvizét kezelik, jelentős különbségek lehetnek azok összetételében (Gros és társai 2017, Szabo és társai 2023), mely a PFA-tartalmú fogyasztási cikkek és termékek eltérő használatából ered (Schultz és társai 2006).

Az egyedi szennyvíztisztítók változatosak lehetnek mind technológia, mind kapacitás szempontjából. A leggyakoribb rendszerek közé tartoznak az egyszerű, olcsó, régóta ismert oldómedencék, melyekben az ülephető fázis a fenékre süllyed, idővel pedig rothadásnak indul, míg a feloldódó szerves anyagok részben lebomlanak. A modernebb megoldások közül jelenleg az eleveniszapos kisberendezések a legnépszerűbbek, melyeknél egy levegőztetett térben nagyfokú aerob bomlás történik, majd egy ülephetőben megtörténik a fázisszétválasztás, a tisztított víz pedig távozik a rendszerből. A 90-es évektől megjelentek az SBR (Sequencing Batch Reactor) rendszerű kisberendezések is, melyek jobban ellenállnak a szennyvízhozam ingadozásának. A piacon megtalálhatók még csepegtetőtestes kisberendezések is, ezek esetében egy természetes vagy mesterséges hordozó felületén képződő biofilm végzi az aerob biológiai tisztítást. A membrán bioreaktor az eleveniszapos technológia és a membránszűrés ötvözte, az utóülephető helyett a hatékonyabb elválasztást egy membránszűrő biztosítja. Ismertek továbbá az önállóan ritkán alkalmazott úgynevezett természetközeli megoldások, ahol a biológiai tisztítást talajszemcsékhez, növények gyökerehez kötődő, vagy vízben lebegő mikrobák végzik (Karches 2020). A felsorolt rendszerek különböző hatékonysággal, más-más előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek, így a célnak megfelelően lehet kiválasztani a legjobb technológiát (Libralato és társai 2012).

A szennyvíztisztító telepekhez hasonlóan az egyedi szennyvíztisztítóknál is jelentős variabilitás tapasztalható a PFA-összetétel tekintetében, viszont rendkívül kevés forrás foglalkozik kis kapacitású berendezésekkel. Egy tanulmány alapján ezekben a berendezésekben többek között 6-9 szénatom hosszúságú perfluoralkil-karbonsavak és 6-8 szénatom hosszúságú PFSA-k detektálhatók, az összes PFA-koncentráció nagy részét a PFOS, PFHxA, PFHpA (Perfluorheptánsav) és PFBS vegyületek teszik ki. Egy 2025-ös kutatásban a 70 vizsgált PFA vegyületből 27-et azonosítottak emésztőgödörökben, a PFOS és PFBA a minták kétharmadában jelen voltak. A telepekhez

hasonlóan főleg rövid szénláncú vegyületeket detektáltak, és általánosan véve többféle karbonsav volt jelen, mint szulfonsav. A diPAP (dialkil-perfluoralkil-foszfát) vegyületeket szintén detektálták, melyek gyakoriak a papír- és textil-alapú fogyasztási cikkekben (Penrose és társai 2025). Az egyedi PFA-koncentrációk 1 és 27 ppt között voltak befolyó szennyvizek esetén, míg elfolyó szennyvizeknél ennél alacsonyabb, 0,27-7,5 ppt koncentrációkat mértek. Összes PFA-t tekintve ez 54-185 ppt a befolyó, 35-112 ppt az elfolyó szennyvízben, mely nagyságrendileg megegyezik a szennyvíztisztító telepekkel (Gros és társai 2017). Az emésztőgödörökben általában magasabb koncentrációk mérhetők, mely a hosszabb tartózkodási időre vezethető vissza (Penrose és társai 2025).

Eltávolítási hatékonyságot tekintve jelentős különbségeket mértek az olyan egyedi megoldások között, mint az oldómedencék, szikkasztómezők, forrás-szeparált rendszerek és konténeres szennyvíztisztítók, általánosan 70%-os eltávolítástól kezdve a prekursor-vegyületek oxidáció során történő átalakulása miatti „negatív” eltávolításig. Az alacsony számú célzott kutatás és az eredmények jelentős szórása ellenére az a tapasztalat, hogy a modernebb, biológiai tisztítást is alkalmazó többlépcsős berendezések, mint például a konténeres szennyvíztisztítók, jobb PFA-eltávolítást biztosítanak (Gros és társai 2017, Penrose és társai 2025). Az emésztőgödörök esetében a PFA-k, és az új szennyezők (Contaminants of Emerging Concern, CEC) többi csoportja között ellentét mutatkozik, a jobb CEC-eltávolításhoz alacsonyabb PFA-eltávolítás társult (Glassmeyer és társai 2022). Kisberendezések esetén a PFA-k szempontjából nem vizsgáltak utókezelési módszereket, de a nagy kapacitású szennyvíztisztító telepek vizsgálata azt mutatta, hogy a fejlett harmadlagos kezelések (aktív szén szűrés, ózonozás, ultraszűrés) sem képesek a PFA-kat hatékonyan eltávolítani. A kapacitás és a PFA-eltávolítás hatékonysága között nem találtak összefüggést (Ruyle és társai 2025). A különböző technológiák megfelelő összehasonlításához és messzemenő következtetések levonásához nagy számú, egységesített kutatásra lenne szükség.

EGÉSZSÉGHATÁSOK ÉS KOCKÁZATOK

Emberi egészségre kifejtett hatások

A PFA vegyületek széleskörűen elterjedtek, szerkezetükből adódóan pedig ellenállnak a degradációnak és könnyen akumulálódnak az élő szervezetekben. A hagyományos PFA vegyületeket egyre gyakrabban azonosítják ivóvízben, és élelmiszerekben, melyek a fő expozíciós útvonalakat jelentik az emberek számára. A kétezres évek elején végzett adatgyűjtés alapján az Egyesült Államokban a felnőttek 98%-ának vérében már megtalálhatók voltak a hagyományos PFA-k (Roth és társai 2020).

A PFA-k szintetikus vegyületek, xenobiotikumok, így nem illenek bele az élőlények anyagsere-útvonalába (Jiang és társai 2015). Ellenállnak szinte minden enzim bontásnak, így a metabolizmus során nem bomlanak más vegyületekre, nem képeznek származékokat. Az eliminációs felezési idők rendkívül magasak, számítások alapján PFOA esetén 4, PFOS esetén 5, PFHxS esetén pedig akár 8,5 év is lehet (Olsen és Zobel 2007).

Kémiai stabilitásuk ellenére képesek különböző fehérjékhez kötődni, például a humán szérumalbuminhoz, valamint olyan májban található zsírsav-kötő fehérjékhez, amelyek a savas funkciós csoportokat tartalmazó PFA-vegyületekre szerkezetileg hasonlító zsírsavakat szállítanak. A testben így különféle szerveket érhetnek el, akumulálódnak a vérben, a májban és a vesében (Lu és társai 2023). A metabolikus folyamatok befolyásolásán keresztül biokémiai és fiziológiai változásokat okozhatnak, így egyes PFA vegyületek toxikus hatást fejtenek ki az állatok és emberek szaporító szervrendszerére, fejlődésére, továbbá immunrendszerére, hormonrendszerére és idegrendszerére (Jiang és társai 2015, Huang és társai 2022). Számos más betegséggel és egészségügyi problémával is kapcsolatba hozták a PFA-kat, többek között különféle daganatos megbetegedésekkel, vetéléssel, kóros elhízással, májkárosodással, és magas vérnyomással (Berhanu és társai 2023). A PFOA-t összefüggésbe hozták a vese-, hasnyálmirigy-, here-, és májrákkal, ezen felül bizonyították, hogy pozitív összefüggés van a vérérum magas PFOA-koncentrációja és a veserák, valamint hererák valószínűsége között (Vieira és társai 2013), továbbá befolyásolja a lipid és glükóz metabolizmust is (Barisci és Suri 2021). Patkányokban végzett kísérletek során azt találták, hogy a PFA-expozíció dóziszfüggő válaszokat fejt ki az anyagcserére. Az EPA 2016-os ajánlásai szerint még nem számított egészségkárosítónak a 70 ppt alatti összes PFA-koncentráció, azonban friss vizsgálatok alapján már 10 ppt PFOS, PFOA, vagy PFBA koncentrációjú ivóvíz 14 napos fogyasztása is értékelhetően megváltoztatta a hormonrendszer működését, ezek keverékének hatása pedig additív volt a vizsgálatok során. Az ivóvizekben mért összes PFA koncentrációja gyakran eléri ezt a nagyságrendet. A szaporító szervrendszerre gyakorolt negatív hatások már nanomoláris koncentrációknál is megfigyelhető, amelyek megközelítik a környezetben mért PFA-koncentrációkat (Daugherty és társai 2023).

Az elmúlt években több régióban is csökkenő tendenciát figyeltek meg a hagyományos PFA-vegyületek emberi szervezetben mért koncentrációjában, mely a vegyületek változó arányú felhasználására vezethető vissza. Ugyanakkor ezeket egyre gyakrabban helyettesítik új, hasonló vegyületekkel, amelyekről azonban még kevés információ áll rendelkezésre (Lu és társai 2023).

Környezeti hatások

A PFA-k jelen vannak a természetes vizekben, az atmoszférában, valamint a talajban is raktározódhatnak, mivel a talajszemcsék képesek megkötni néhány PFA-t, így is hozzájárulva a stabil környezeti jelenléthez. A vizekben és talajban való előfordulás eredményeképp az ezeket felvenni képes növényeknek folyamatos forrásuk van. Különböző növényekben, gyümölcsökben, zöldségekben és gabonafélékben is kimutathatók különböző PFA-vegyületek (Xu és társai 2022). Ezeket az anyagokat főként a gyökerek abszorbeálják a talajból, a hosszú szénláncú PFA-k ($C \geq 7$ karbonsavak és $C \geq 6$ szulfonsavak esetén) elsősorban a gyökerek szöveteiben maradnak, míg a rövid láncú PFA-k a földfelszín felett akumulálódnak. Növényen belül általában a gyökér tartalmazza a legtöbb PFA-t, ezt követi a szár, majd a magok. Növénycsoportok között a levélzöldségek és a gyökérzöldségek akumulálják a

legtöbb vegyületet. A PFOA, a többi PFA-hoz képest nagyobb vízdoldhatósága miatt az egyik legnagyobb mennyiségben felhalmozódó vegyület a növényi szövetekben (Xu és társai 2022). Mind a természetes környezetben, mind a mezőgazdaságban, a növények a rövidebb szénláncú PFA vegyületeket veszik fel legnagyobb mennyiségben. Ezek befolyásolhatják a növények metabolizmusát, magas koncentráció esetén pedig fitotoxikus hatásuk van, befolyásolva a normál növekedést és fejlődést (Costello és Lee 2020, Li és társai 2020). A PFA-tartalmú peszticidek használata a mezőgazdaságban további terhet jelent a természetre és az élelmiszcélú növénytermesztésre is (Nascimento és társai 2018). Mivel a PFA vegyületek kimutathatók a környezetben különféle vizekben és biológiai mintákban, a természetes életközösségek táplálékhálózatában több helyen is megtalálhatók (Roth és társai 2020). Az emberi szervezethez hasonlóan az állatokban is különféle szaporodási és fejlődési zavarokkal, daganatos és egyéb megbetegedésekkel hozták összefüggésbe a PFA-kat. Erősen kötődnek olyan vesében található transzporterekhez, melyek több fajban is megtalálhatók, így hasonló felhalmozódást eredményeznek emberben és különböző állatokban is. A fajspecifikus különbségek feltárásához további vizsgálatok szükségesek, viszont az emberi szervezetre alkalmazott modellek más állati szervezetre is jól illeszthetők (Lu és társai 2023). A szárazföldi ökoszisztémákban különböző taxonok más-más PFA-profilokat halmoznak fel, mely valószínűleg a táplálkozási különbségeket tükrözi. Míg a növényevő gerinctelenek mind hosszú, mind rövid láncúakat, a ragadozó gerinctelenek elsősorban hosszú láncú PFA-kat akumulálnak (Groffen és társai 2023). Alacsonyabb rendű szervezetekben is érzékelhető hatásai vannak a PFA-knak, például hátrányosan befolyásolják a mikroorganizmusok diverzitását a természetben, továbbá a szennyvízben is (Huang és társai 2022). A PFA-k széles körű jelenléte különböző kontinenseken teljes ökoszisztéma-szennyezésre utal. A PFA-expozíció folyamatos monitorozása a szárazföldi és vízi szervezetekben kiemelten fontos, figyelembe véve a taxonok közötti bioakkumulációban és a potenciális toxicitásban mutatkozó különbségeket (Groffen és társai 2023).

JELENLEGI PROBLÉMÁK A PER- ÉS POLIFLUORALKIL-ANYAGOK SZENNYVÍZBEN VALÓ SZABÁLYOZÁSA KAPCSÁN

A korábbi fejezetekben ismertetésre került, hogy a PFA anyagok gyártása és használata önmagában problémát okoz, a vegyületek nagyfokú perzisztenciája és káros egészség hatásai miatt. Az előállítást és a felhasználást célzó jelenlegi szabályozások a tapasztalatok alapján nem képesek elérni a kitűzött célokat, részben néhány PFA kiemelt szerepe miatt, részben pedig a „sajnálatos helyettesítés”, továbbá a PFA-k használat utáni átalakulásai miatt. Valós példa erre a betiltott PFOS és PFOA, melyek még mindig a leggyakrabban detektált PFA vegyületek közé tartoznak a legtöbb típusú mátrix esetén. Fogyasztói szinten is különösen nehéz tenni a szennyezések ellen, mivel a vásárlók nagy valószínűséggel nem tudják a megvásárolt termékeikről, tartalmaznak-e PFA-kat, és ha igen, milyen vegyületeket és milyen koncentrációban. Amennyiben a kiváltó okot nem lehet érdemben megszüntetni, meg kell vizsgálni, mit lehet tenni a

már környezetbe kikerült vegyületekkel, hogyan lehet azokat monitorozni, terjedésüket megállítani, legjobb esetben ártalmatlanítani.

Számos publikáció foglalkozik a szennyvíztisztító telepeken áthaladó PFA-kkal, viszont rendkívül kevés fókusz irányul az egyedi háztartási szennyvizekre, és az ESZKB-kre. Néhány kutatás már rámutatott, hogy a házi szennyvíztisztítók jelentős mennyiségű, főleg rövid szénláncú PFA-t juttathatnak a felszín alatti vizekbe. A házi szennyvíztisztítók közelében lévő, 450 vizsgált kút 71%-ának vizében kimutatható mennyiségben voltak jelen PFA vegyületek (*Silver és társai 2023*), így ezek a rendszerek pontforrásként szolgálhatnak különböző szennyezőknek. Magyarországon, ahogy Közép-Kelet-Európa nagy részén, egyre elterjedtebbek a különböző technológiával működő ESZKB-k, viszont a növekvő használat mellé nem társul kifinomult monitorozás és szabályozás (*Györki 2024*). A kisberendezések működésére vonatkozó információ hiánya jelentős kihívásokat jelent a környezeti kockázateértékelés és a szabályozások kidolgozása szempontjából is, melyet alátámaszt a Duna folyó egészére kiterjedő tanulmány, amelyben jelentős regionális eltéréseket figyeltek meg a PFA-koncentrációkban (*Kittlaus és társai 2024*). Az analitikai kihívások tovább nehezítik a monitorozást, mivel a PFA-k csoportja több ezer, különböző fizikai-kémiai tulajdonságokkal rendelkező vegyületet foglal magába. Az iparáganként és felhasználási területenként eltérő, jelentős változatosságot mutató PFA-profilok (*Gluge és társai 2020*) megnehezítik a célzott analitikai megközelítések pontos alkalmazását. Az analitikai módszereket gondosan illeszteni kell a különböző PFA-alcsoportokhoz, ennek ellenére így is előfordulhat, hogy néhány új PFA-t nem lehet kimutatni a jelenlegi technológiák korlátai miatt. Az egyéni PFA koncentrációk rendkívül alacsonyak lehetnek, így a mérések költségesek és magas technológiai igényűek lehetnek a megfelelő kimutatási határok elérése érdekében (*Nahar és társai 2023*). A mintavétel számos kihívással jár, a mátrixok fizikai és kémiai heterogenitása egyenetlen PFA-eloszlást eredményezhet, ami megnehezíti a reprezentatív és reprodukálható mintavételt. A fogyasztási cikkekben és laboratóriumi eszközökben előforduló PFA vegyületek könnyen keresztzsennyezéshez vezethetnek, a háttérkoncentrációk és a zavaró komponensek jelenléte pedig torzíthatja a mérések eredményét. A standardizált mintavételi módszerek hiánya tovább nehezíti a valós idejű megfigyelést, amely kulcsfontosságú lenne a gyors felismerés és beavatkozás szempontjából (*Nahar és társai 2023*). Az említett kihívások különösen jelentősek egyedi szennyvíztisztítók esetén, melyek működése és hatékonysága között számottevő eltérések lehetnek, továbbá hiányzik a szakszerű, rutin monitorozás és szabályozás (*Chirisa és társai 2017*).

A szabályozási környezet az utóbbi időben változáson ment keresztül az EU 2024/3019 irányelvének bevezetésével, amely a városi szennyvízkezelésre vonatkozik, és a tagállamok számára előírja a PFA vegyületek monitorozását a szennyvíztisztító telepek kibocsátott szennyvizében 2027-től. Az irányelv elsősorban a 10 000 lakosegyenértéket meghaladó kapacitású létesítményekre vonatkozik, így jelentős szabályozási hiányosság mutatkozik a decentralizált megoldások és az egyedi ESZKB-k esetében. Ez a

lakosegyenérték gyakorlatilag kizár számos olyan vidéki közösséget és egyéni háztartást, melyek decentralizált szennyvízkezelési megoldásokra támaszkodnak, így egy kétszintű monitorozási rendszert hoz létre, amely figyelmen kívül hagyhatja a számos kis forrásból származó, de összességében jelentős PFA-kibocsátást. Jelenleg a decentralizált szennyvízkezelő rendszerekre vonatkozó szabályozás az Európai Unióban, így Magyarországon is fejletlen (*EU 2025*). Abban az esetben, ha bevezetésre kerülne az ESZKB-kre vonatkozó átfogó szabályozások, a gyakorlati megvalósítás jelentős nehézségekbe ütközne. Az egyedi rendszerek elhelyezkedéséből és különbségeiből adódóan a szisztematikus monitorozás jelentős terhet róna a szakemberekre. Ezen kívül a különböző rendszerek eltérő PFA-profiljai és működési hatékonyságai is jelentős eltéréseket mutatnak (*Thompson és társai 2022*), mely megnehezíti az egységesen alkalmazható szabályozások és szankcionálás kialakítását. A háztartási szennyvizekben található PFA vegyületek csökkentésére irányuló kezdeményezéseknek magukban kell foglalniuk direkt és indirekt stratégiákat is. Direkt beavatkozások közé tartozhatnak például olyan, fejlett utótisztítási technológiák, mint az aktív szén vagy ioncserélő rendszerek használata, melyek ígéretesnek bizonyultak ivóvíz PFA-mentesítése során (*Appleman és társai 2014*). Továbbra is kérdéses, hogy ezek a technológiák háztartási alkalmazása gazdaságilag megvalósítható-e. A közvetett beavatkozások a PFA vegyületek előállítását és használatát céloznák meg, egyszerű tiltások és szabályozások helyett például a fogyasztási cikkek reformulálásával (*Figuere és társai 2025*), mely elérhetőbb cél a szisztematikus betiltások helyett. Az ilyen típusú megelőző intézkedések hosszú távon hatékony stratégiát jelenthetnek a környezeti PFA-terhelés csökkentésére.

ÖSSZEFOGLALÁS

A per- és polifluoralkil-anyagok rendkívül stabil szisztematikus vegyületek, amelyek kiemelkedő tulajdonságaik miatt széles körben elterjedtek az iparban és a háztartási termékekben, napjainkban globális szennyezőkké váltak. Perzisztens természetük, bioakkumulációs képességük és toxikus hatásaik miatt komoly környezeti és egészségkockázatot jelentenek. Bizonyított továbbá, hogy a hagyományos szennyvízkezelési rendszerek és az egyedi szennyvíztisztító kisberendezések nem alkalmasak hatékony eltávolításukra, így a PFA vegyületek gyakran bekerülnek a természetes körforgásokba, és előbb vagy utóbb érintkezésbe kerülnek az élő szervezetekkel. A PFA-szennyezést tovább súlyosbítja a vegyületcsoport rendkívüli változatossága: több ezer különböző molekula tartozik ide, amelyek eltérően viselkednek a szennyvíztisztítás során, a környezetben és az élő szervezetekben is. A szennyvizekben a PFA-profilok azok forrásától függően jelentős eltéréseket mutatnak, a különböző technológiájú szennyvíztisztító rendszerek pedig más-más PFA-összetételt eredményezhetnek a kezelt szennyvizben és a szennyvíziszapban. A jelenlegi szabályozások nem képesek elérni az általuk kitűzött célokat, részben az aggályos ipari gyakorlatok, részben pedig a PFA vegyületek változatossága és potenciális átalakulása miatt. A decentralizált rendszerekből származó PFA-terhelés ezen kívül könnyen elkerülheti a szabályozói figyelmet,

részben a kevés rendelkezésre álló adat miatt, részben mivel a jelenlegi előírások elsősorban a nagyobb léptékű szennyvíztisztító telepekre koncentrálnak.

A környezeti PFA-szennyezés csökkentésére irányuló megoldások két irányban keresendők: egyrészt közvetlen technológiai beavatkozások, másrészt megelőző jellegű, rendszerszintű intézkedések szükségesek. A szabályozásoknak továbbá ki kell terjedniük a decentralizált megoldásokra is, különösen olyan régiókban, ahol az ilyen rendszerek elterjedése miatti PFA-expozíció kockázata kiemelten magas lehet. A jövőre nézve elengedhetetlen a szabályozási és monitorozási rendszer bővítése, valamint az analitikai módszerek továbbfejlesztése annak érdekében, hogy az újonnan megjelenő PFA-vegyületek is azonosíthatók legyenek. A hatékony fellépés alapját a pontos adatgyűjtés, a szabályozási rendszerek részletes és rugalmas kidolgozása, valamint a különböző léptékű szennyvíztisztítás technológiai támogatása képezi. A jelenlegi tapasztalatok alapján csak ezek összehangolt megvalósításával lehet mérsékelni a PFA-k által jelentett környezeti és egészségügyi kockázatokat.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24-3-30 kódszámú egyetemi kutatói ösztöndíj programjának a nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

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

IRODALOMJEGYZÉK

Abulfadl, M.M., Sharaf, A.M., Mostafa, M.M., El-Saeid, M.H. (2019). Impact of household cooking on release of fluorinated compounds PFOA and PFOS from Tefal coated cookware to foods. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 3(2), pp. 24-30. <https://doi.org/10.30574/wjarr>

Ameduri, B. (2023). Fluoropolymers as Unique and Irreplaceable Materials: Challenges and Future Trends in These Specific Per or Poly-Fluoroalkyl Substances. *Molecules*, 28, 7564. <https://doi.org/10.3390/molecules28227564>

Appleman, T.D., Higgins, C.P., Quinones, O., Vanderford, B.J., Kolstad, C., Zeigler-Holady, J.C., Dickenson, E.R. (2014). Treatment of poly- and perfluoroalkyl substances in U.S. full-scale water treatment systems. *Water Research*, 51, pp. 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.067>

Barisic S., Suri, R. (2021). Occurrence and removal of poly/perfluoroalkyl substances (PFAS) in municipal and industrial wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*, 84, pp. 3442-3468. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.484>

Berhanu, A., Mutanda, I., Taolin, J., Qaria, M.A., Yang, B., Zhu, D. (2023). A review of microbial degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Biotransformation routes and enzymes. *Science of The Total Environment*, 859, 160010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160010>

Blum, K.M., Andersson, P.L., Renman, G., Ahrens, L., Gros, M., Wiberg, K., Haglund, P. (2017). Non-target screening and prioritization of potentially persistent, bioaccumulating and toxic domestic wastewater contaminants and their removal in on-site and large-scale sewage treatment plants. *Science of The Total Environment*, 575, pp. 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.135>

Blum, K.M., Andersson, P.L., Ahrens, L., Wiberg, K., Haglund, P. (2018). Persistence, mobility and bioavailability of emerging organic contaminants discharged from sewage treatment plants. *Science of The Total Environment*, 612, pp. 1532-1542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.006>

Boronow, K.E., Brody, J.G., Schaidler, L.A., Peaslee, G.F., Havas, L., Cohn, B. A. (2019). Serum concentrations of PFASs and exposure-related behaviors in African American and non-Hispanic white women. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29, pp. 206-217. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0109-y>

Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K.G., Valentin, I. (2023). PFAS. forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environmental Sciences Europe*, 35. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>

Buck, R.C., Korzeniowski, S.H., Laganis, E., Adamsky, F. (2021). Identification and classification of commercially relevant per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS). *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17, pp. 1045-1055. <https://doi.org/10.1002/ieam.4450>

Chirisa, I., Bandaiko, E., Matamanda, A., Mandisvika, G. (2017). Decentralized domestic wastewater systems in developing countries: the case study of Harare (Zimbabwe). *Applied Water Science*, 7, pp. 1069-1078. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0377-4>

Cordner, A., Goldenman, G., Birnbaum, L.S., Brown, P., Miller, M.F., Mueller, R., Patton, S., Salvatore, D.H., Trasande, L. (2021). The True Cost of PFAS and the Benefits of Acting Now. *Environmental Science & Technology*, 55, pp. 9630-9633. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03565>

Costello, M.C.S., Lee, L.S. (2020). Sources, Fate, and Plant Uptake in Agricultural Systems of Per- and Polyfluoroalkyl Substances. *Current Pollution Reports*, 10, pp. 799-819. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00168-y>

Daugherty S., Mulabagal, V., Hayworth, J., Akingbemi, B.T. (2023). Legacy and Emerging Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances Regulate Steroidogenesis in the Male Gonad. *Endocrinology*, 164, pp. <https://doi.org/10.1210/endo/bqad142>

Dewapriya, P., Chadwick, L., Gorji, S.G.i, Schulze, B., Valsecchi, S., Samanipour, S., Thomas, K.V., Kaserzon, S.L. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in consumer products: Current knowledge and research gaps. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 4, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2023.100086>

EPA (2025). Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS).

EU (2025). Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2024/3019 irányelve a települési szennyvíz kezeléséről.

Evich, M.G., Davis, M.J.B., Mccord, J.P., Acrey, B., Awkerman, J.A., Knappe, D.R.U., Lindstrom, A.B., Speth, T.F., Tebes-Stevens, C., Strynar, M.J., Wang, Z., Weber, E.J., Henderson, W.M., Washington, J.W. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. *Science*, Vol. 375, eabg9065. <https://doi.org/10.1126/science.abg9065>

Figuiere, R., Miaz, L.T., Savvidou, E., Cousins, I.T. (2025). An Overview of Potential Alternatives for the Multiple Uses of Per- and Polyfluoroalkyl Substances. *Environmental Science & Technology*, 59, pp. 2031-2042. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c09088>

Fischer, F.C., Ludtke, S., Thackray, C., Pickard, H.M., Haque, F., Dassuncao, C., Endo, S., Schaidler, L., Sunderland, E.M. (2024). Binding of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) to Serum Proteins: Implications for Toxicokinetics in Humans. *Environmental Science & Technology*, 58, pp. 1055-1063. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07415>

Glassmeyer, S. T., Wigginton, S., Baumgaertel, B., Heufelder, G., Mills, M. A., Corum, S., Brown, A., Modiri, M., Kolpin, D. W., Tettenhorst, D. R., Story, J., Dombroski, I., McCobb, T., Erban, L., Bradley, P., & Smalling, K. (2022). Transformation of per-and polyfluoroalkyl substances during onsite septic system treatment [Konferenciaelőadás]. SETAC North America 43rd Annual Meeting, Pittsburgh, PA, United States. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/innovativealternative-septic-systems>

Gluge, J., Scheringer, M., Cousins, I.T., Dewitt, J.C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C.A., Trier, X., Wang, Z. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22, pp. 2345-2373. <https://doi.org/10.1039/D0EM00291G>

Gobelius, L., Glimstedt, L., Olsson, J., Wiberg, K., Ahrens, L. (2023). Mass flow of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Swedish municipal wastewater network and wastewater treatment plant. *Chemosphere*, 336, 139182. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139182>

Groffen, T., Prinsen, E., Devos Stoffels, O.A., Maas, L., Vincke, P., Lasters, R., Eens, M., Bervoets, L. (2023). PFAS accumulation in several terrestrial plant and invertebrate species reveals species-specific differences. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, pp. 23820-23835. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23799-8>

Gros, M., Blum, K. ., Jernstedt, H., Renman, G., Rodriguez-Mozaz, S., Haglund, P., Andersson, P. ., Wiberg, K., Ahrens, L. (2017). Screening and prioritization of micropollutants in wastewaters from on-site sewage treatment facilities. *Journal of Hazardous Materials*, 328, pp. 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.12.055>

Györki G. (2024). Kezelt szennyvíz újrafelhasználásának lehetőségei és kihívásai Magyarországon. *Hidrológiai Közöny*, 104. évf. pp. 28-42. <https://doi.org/10.59258/hk.15659>

Hartz W. F., Bjornsdotter, M. K., Yeung, L. W. Y., Humby, J. D., Eckhardt, S., Evangeliou, N., Ericson Jogsten, I., Karrman, A., Kallenborn, R. (2024). Sources and Seasonal Variations of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Surface Snow in the Arctic. *Environmental Science & Technology*, 58, pp. 21817-21828. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c08854>

Hoang Nhat, P.V., Huu Hao, N., Wenshan, G., Thi Minh, H.N., Li, Jianxin, L., Heng L., Deng, L., Chen, Z., Hang Nguyen, T.A. (2020). Poly- and perfluoroalkyl substances in water and wastewater: A comprehensive review from sources to remediation. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101393. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101393>

Huang, D., Xu, R., Sun, X., Li, Y., Xiao, E., Xu, Z., Wang, Q., Gao, P., Yang, Z., Lin, H., Sun, W. (2022). Effects of perfluorooctanoic acid (PFOA) on activated sludge microbial community under aerobic and anaerobic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, pp. 63379-63392. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18841-8>

Jiang, Q., Gao, H., Zhang, L. (2015). *Metabolic Effects PFAS*. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15518-0_7

Karches T. (2020). Kis kapacitású szennyvíztisztító létesítmények (T. Karches, Szerk.), Ludovika Kiadó.

Kim, J., Xin, X., Hawkins, G.L., Huang, Q., Huang, C.H. (2024). Occurrence, Fate, and Removal of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Small- and Large-Scale Municipal Wastewater Treatment Facilities in the United States. *ACS ES&T Water*, 4, pp. 5428-5436. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00541>

Kittlaus, S., Kardos, M.K., Dudás, K.M., Weber, N., Clement, A., Petkova, S., Sukovic, D., Kučić Grgić, D., Kovacs, A., Kocman, D., Moldovan, C., Kirchner, M., Gabriel, O., Krampe, J., Zessner, M., Zoboli, O. (2024). A harmonized Danube basin-wide multi-compartment concentration database to support inventories of micropollutant emissions to surface waters. *Environmental Sciences Europe*, 36, 52. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00862-4>

Kolanczyk, R.C., Saley, M., Serrano, J.A., Daley, S.M., Tapper, M.A. (2023). PFAS Biotransformation Pathways: A Species Comparison Study. *Toxics*, 11, 74. <https://doi.org/10.3390/toxics11010074>

Kumar, R., Dada, T. K., Whelan, A., Cannon, P., Sheehan, M., Reeves, L., Antunes, E. (2023). Microbial and thermal treatment techniques for degradation of PFAS in biosolids: A focus on degradation mechanisms and pathways. *Journal of Hazardous Materials*, 452, pp. 131212. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131212>

Kurwadkar, S., Dane, J., Kanel, S.R., Nadagouda, M.N., Cawdrey, R.W., Ambade, B., Struckhoff, G.C., Wilkin, R. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution. *Science of The Total*

Environment, 809, 151003.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151003>

Kwiatkowski, C.F., Andrews, D.Q., Birnbaum, L.S., Bruton, T.A., Dewitt, J.C., Knappe, D.R.U., Maffini, M.V., Miller, M.F., Pelch, K.E., Reade, A., Soehl, A., Trier, X., Venier, M., Wagner, C.C., Wang, Z., Blum, A. (2020). Scientific Basis for Managing PFAS as a Chemical Class. *Environmental Science & Technology Letters*, 7, pp. 532-543. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00255>

Li, P., Oyang, X., Xie, X., Li, Z., Yang, H., Xi, J., Guo, Y., Tian, X., Liu, B., Li, J., Xiao, Z. (2020). Phytotoxicity induced by perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate via metabolomics. *Journal of Hazardous Materials*, 389, 121852.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121852>

Libralato, G., Volpi Ghirardini, A., Avezzù, 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>

Lu, Y., Guan, R.Z., Nali, H., Jinghua, P., Hanyong, H., Anen, Z., Chunyan, W., Yawei, W., Jiang, G. (2023). A critical review on the bioaccumulation, transportation, and elimination of per- and polyfluoroalkyl substances in human beings. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54, pp. 95-116.

<https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2223118>

Nahar, K., Zulkarnain, N. A., Niven, R.K. (2023). A Review of Analytical Methods and Technologies for Monitoring Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Water. *Water*, 15, 3577.

<https://doi.org/10.3390/w15203577>

Nascimento, R.A., Nunoo, D.B.O., Bizkarguenaga, E., Schultes, L., Zabaleta, I., Benskin, J.P., Spano, S., Leonel, J. (2018). Sulfluramid use in Brazilian agriculture: A source of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) to the environment. *Environmental Pollution*, 242, pp. 1436-1443. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.122>

O'Connor, J., Bolan, N.S., Kumar, M., Nitai, A.S., Ahmed, M.B., Bolan, S.S., Vithanage, M., Rinklebe, J., Mukhopadhyay, R., Srivastava, P., Sarkar, B., Bhatnagar, A., Wang, H., Siddique, Kadambot H.M., Kirkham, M.B. (2022). Distribution, transformation and remediation of poly- and per-fluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater sources. *Process Safety and Environmental Protection*, 164, pp. 91-108.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.002>

Olsen G.W., Zobel, L.R. (2007). Assessment of lipid, hepatic, and thyroid parameters with serum perfluorooctanoate (PFOA) concentrations in fluorochemical production workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 81, pp. 231-246. <https://doi.org/10.1007/s00420-007-0213-0>

Penrose, M., Deighton, J., Glassmeyer, S.T., Brougham, A., Bessler, Scott M., Mcknight, T., Ateia, M. (2025). Elevated PFAS Precursors in Septage and Residential Pump Stations. *Environmental Science & Technology Letters*, 12, pp. 454-460.

<https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5c00246>

Rodgers, K.M., Swartz, C.H., Occhialini, J., Bassignani, P., Mccurdy, M., Schaidler, L.A. (2022). How Well Do Product Labels Indicate the Presence of PFAS in Consumer Items Used by Children and Adolescents? *Environmental Science & Technology*, 56, pp. 6294-6304. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05175>

Roth, K., Imran, Z., Liu, W., Petriello, M.C. (2020). Diet as an Exposure Source and Mediator of Per- and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) Toxicity. *Frontiers in Toxicology*, 2, 601149.

<https://doi.org/10.3389/ftox.2020.601149>

Ruyle B. J., Pennoyer, E. H., Vojta, S., Becanova, J., Islam, M., Webster, T. F., Heiger-Bernays, W., Lohmann, R., Westerhoff, P., Schaefer, C. E., Sunderland, E. M. (2025): High organofluorine concentrations in municipal wastewater affect downstream drinking water supplies for millions of Americans. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.*, 122, pp.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2417156122>

Schultz, M.M., Higgins, C.P., Huset, C.A., Luthy, R.G., Barofsky, D.F., Field, J. A. (2006). Fluorochemical mass flows in a municipal wastewater treatment facility. *Environmental Science & Technology*, 40, pp. 7350-7357. <https://doi.org/10.1021/es061025m>

Schymanski, E.L., Zhang, J., Thiessen, P.A., Chirsir, P., Kondic, T., Bolton, E.E. (2023). Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in PubChem: 7 Million and Growing. *Environmental Science & Technology*, 57, pp. 16918-16928.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04855>

Sepulvado, J.G., Blaine, A.C., Hundal, L.S., Higgins, C.P. (2011). Occurrence and fate of perfluorochemicals in soil following the land application of municipal biosolids. *Environmental Science & Technology*, 45, pp. 8106-8112. <https://doi.org/10.1021/es103903d>

Silver, M., Phelps, W., Masarik, K., Burke, K., Zhang, C., Schwartz, A., Wang, M., Nitka, A.L., Schutz, J., Trainor, T., Washington, J.W., Rheineck, B.D. (2023). Prevalence and Source Tracing of PFAS in Shallow Groundwater Used for Drinking Water in Wisconsin, USA. *Environmental Science & Technology*, 57, pp. 17415-17426. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c02826>

Stockholm (2004). A vegyi anyagok jelentette veszélyek kezelése (Stockholmi Egyezmény).

Subedi, B., Codru, N., Dziewulski, D.M., Wilson, L.R., Xue, J., Yun, S., Braun-Howland, E., Minihane, C., Kannan, K. (2015). A pilot study on the assessment of trace organic contaminants including pharmaceuticals and personal care products from on-site wastewater treatment systems along Skaneateles Lake in New York State, USA. *Water Research*, 72, pp. 28-39.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.049>

Szabo, D., Marchiandi, J., Samandra, S., Johnston, J.M., Mulder, R.A., Green, M.P., Clarke, B.O. (2023). High-resolution temporal wastewater treatment plant investigation to understand influent mass flux of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130854.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130854>

Teymourian, T., Teymoorian, T., Kowsari, E., Ramakrishna, S. (2021). A review of emerging PFAS contaminants: sources, fate, health risks, and a comprehensive assortment of recent sorbents for PFAS treatment by evaluating their mechanism. *Research on Chemical Intermediates*, 47, pp. 4879-4914. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04603-7>

Thompson J.T., Chen, B., Bowden, J.A., Townsend, T.G. (2023). Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Toilet Paper and the Impact on Wastewater Systems. *Environmental Science & Technology Letters*, 10, pp. 234-239. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00094>

Thompson K.A., Mortazavian, S., Dana, J. G., Bott, C., Hooper, J., Schaefer, C.E., Dickenson, E.R.V. (2022). Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Municipal Wastewater Treatment Plants in the United States: Seasonal Patterns and Meta-Analysis of Long-Term Trends and Average Concentrations. *ACS ES&T Water*, 2, pp. 690-700. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00377>

Vieira, V.M., Hoffman, K., Shin, H.M., Weinberg, J.M., Webster, T.F., Fletcher, T. (2013). Perfluorooctanoic acid exposure and cancer outcomes in a contaminated community: a geographic analysis. *Environmental Health Perspectives*, 121, pp. 318-323. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205829>

Wang, M., Zhu, J., Mao, X. (2021). Removal of Pathogens in Onsite Wastewater Treatment Systems: A Review of Design Considerations and Influencing Factors. *Water*, 13, pp. <https://doi.org/10.3390/w13091190>

Wang, Z., Dewitt, J.C., Higgins, C.P., Cousins, I.T. (2017). A Never-Ending Story of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)? *Environmental Science & Technology*, 51, pp. 2508-2518. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04806>

Wee, S.Y., Aris, A.Z. (2023). Environmental impacts, exposure pathways, and health effects of PFOA and PFOS. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 267, 115663. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115663>

Xu, B., Qiu, W., Du, J., Wan, Z., Zhou, J.L., Chen, H., Liu, R., Magnuson, J.T., Zheng, C. (2022). Translocation, bioaccumulation, and distribution of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in plants. *iScience*, 25, 104061. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104061>

Zhou, Y., Wang, M., Xin, J., Wu, Y., Wang, M. (2024). The Distribution and Pollution Pathway Analysis of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) in a Typical Agricultural Plastic Greenhouse for Cultivated Vegetables. *Agriculture*, 14, 1321. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081321>

A SZERZŐK



GYÖRKI GÁBOR okleveles vegyészmérnök (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2021), jelenleg a Nemzeti Közszerzői Egyetemen dolgozik mint tanársegéd, és folytat PhD tanulmányokat. 2022 óta a Nemzeti Közszerzői Egyetem Vízstudományi Karán a Környezeti Mikrobiológia Kutatócsoport tagja, részt vesz a Vízstudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium című projektben, továbbá kémia, mérnöki kémia, vízkémia, környezeti biotechnológia tárgyakat oktat.



KNISZ JUDIT biológus (Pécsi Tudományegyetem, 2001), a biológia doktora (Pécsi Tudományegyetem, 2010), a PhD területe a „Molekuláris biológia” volt. Az NKE VTK tudományos főmunkatársa. Kutatási területei: mikrobiálisan befolyásolt korrózió, egyedi szennyvíztisztító kisberendezések tisztítási hatékonyságának vizsgálata, valamint az ezek működése során a környezetbe jutó szerves mikroszennyezők azonosítása.