



Planet  
Budapest  
2026



KÉK-BOLYGÓ  
ALAPÍTVÁNY



# Perfluorozott vegyületek (PFAS) eltávolítása fotokémiai vízkezelési módszerekkel

**Erdős Kornél, Dr. Alapi Tünde**

Molekuláris és Analitikai Kémia Tanszék  
Szegedi Tudományegyetem, TTIK

**Dulovics Junior Szimpózium 2026**  
2026. március 4., Budapest

# Bevezetés

## Mi az a PFAS?

*Under the law, PFAS are defined as "a class of fluorinated organic chemicals containing at least one fully fluorinated carbon atom."*

## Történet

- 50-es évek Teflon gyártásának kezdete (DuPont)
- 2000 - PFAS használatának csökkentése
- 2009 – Gen-X vegyületek bevezetése a PFAS helyett
- 2014 – feltételesen karcinogén?
- 2019 - ENSZ Persistent Organic Pollutants listája
- 2020 - alapanyagként való felhasználás megszüntetése (EU)
- 2023 – bizonyítottan emberre veszélyes - karcinogén csoportba sorolása



## Felhasználása

- víz-, por- és olajálló felületek, textíliák
- csomagolóanyagok
- festékek
- tűzoltóhabok

## Vízkezelés

**Határértékek szigorodása → Eltávolítási hatékonyságra vonatkozó igények változnak**





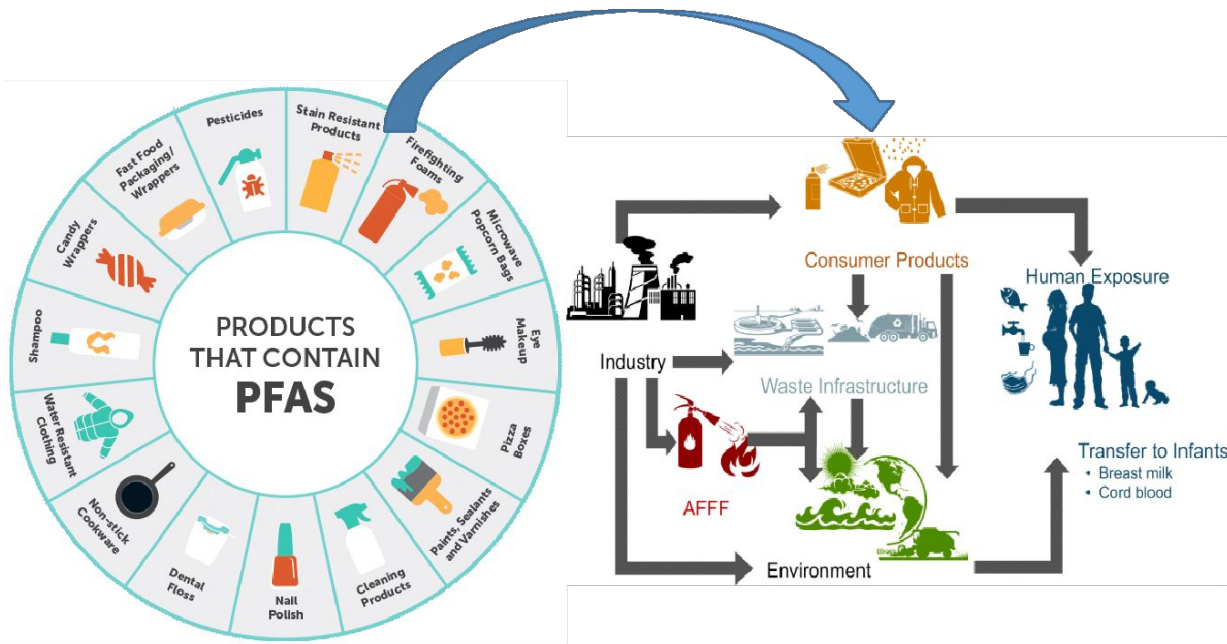
# PFAS eltávolítása

Az PFAS-vegyületekre az alábbi határértékek ismertek az ivóvízben:

A Ivóvíz-irányelv (EU 2020/2184) szerint a „20 legfontosabb PFAS” összegének határértéke **0,1 µg/l (100 ng/l)**.

Ugyanez az irányelv szerint az „összes PFAS” (vagyis az össz-PFAS-csoport) maximális koncentrációja **0,5 µg/l (500 ng/l)**.

Az előírásokat 2026-tól kell a tagállamoknak érvényesíteni az ivóvíz-minőség szabályozása keretében.



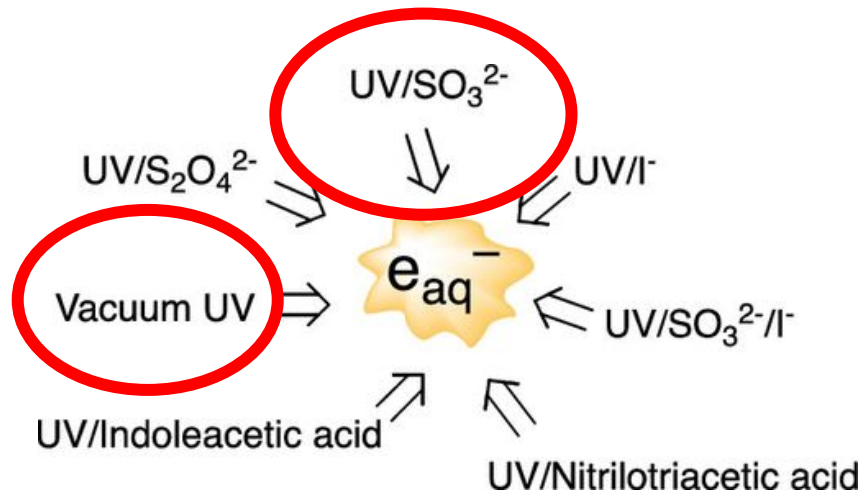
# PFAS vegyületek eltávolítási lehetőségei

**Határértékek szigorodása → Eltávolítási hatékonyságra vonatkozó igények változnak**

Adszorpció, flokkuláció, koaguláció – hatékonyság fejlesztése, eltávolítás, de nem megsemmisítés

Kémiai vízkezelési eljárások többsége oxidáción alapul → alkalmazható itt is?

Nagyhatékonyságú redukciós eljárások



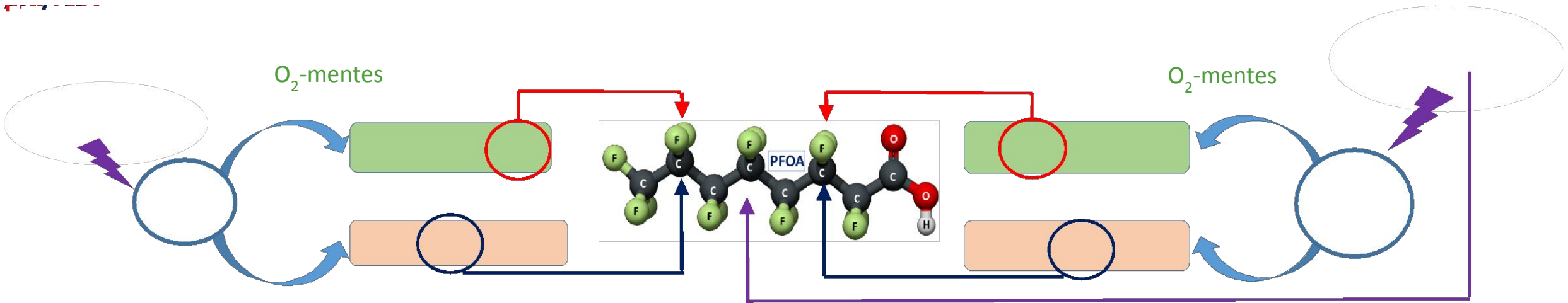
~~AOP~~ 🙄



# PFOA eltávolítása

UV/szulfid

UV/VUV/szulfid **UV/VUV fotolízis**



Célkitűzés:

PFOA: C<sub>7</sub>F<sub>15</sub>COOH



Hatékonyság vizsgálata



Optimalizálás  
(pH, O<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)



Mátrix hatás

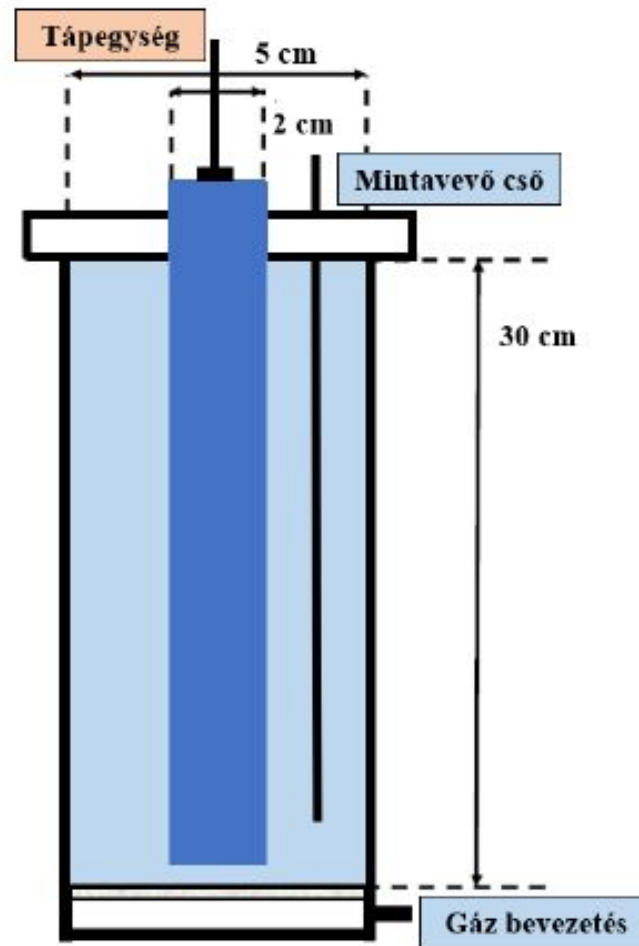


Folyamatok

# Kísérleti módszerek, reaktor

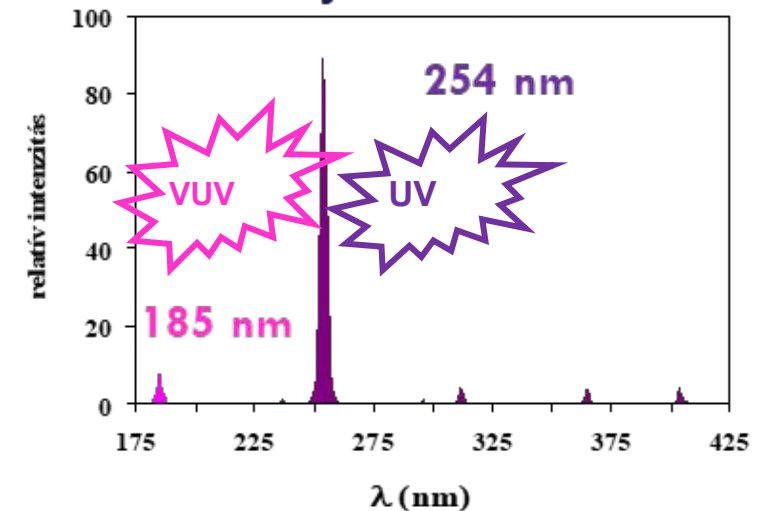
## Reaktor és mérési körülmények

- 450 ml térfogat
- N<sub>2</sub> vagy levegő átbuborékoltatása
- PFAS:  $1,0 \times 10^{-5}$  M
- Fluoridion mérése: ionkromatográfia és potenciometria (fluoridion szelektív elektród)
- Mátrix hatás vizsgálata: Szegedi Vízműtől származó biológiailag tisztított kommunális szennyvíz



## Fényforrások

### kisnyomású HGL



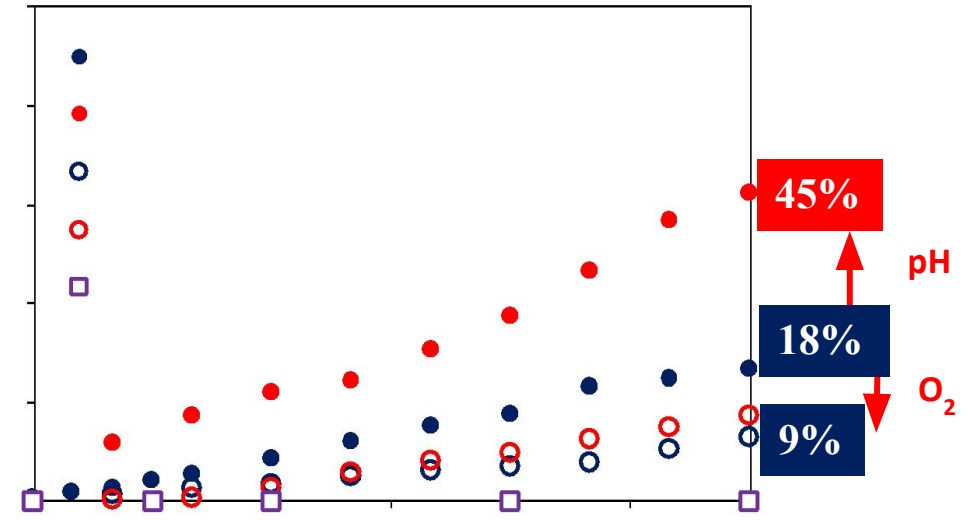
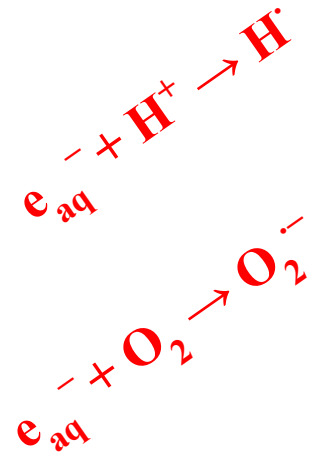
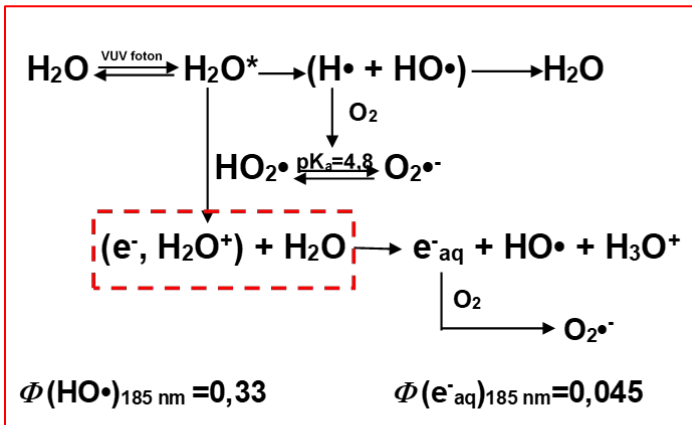
$$\phi(254 \text{ nm}) = 4,21 \times 10^{-6} \text{ mol}_{\text{foton}} \text{ s}^{-1}$$

$$\phi(185 \text{ nm}) = 4,9 \times 10^{-7} \text{ mol}_{\text{foton}} \text{ s}^{-1}$$

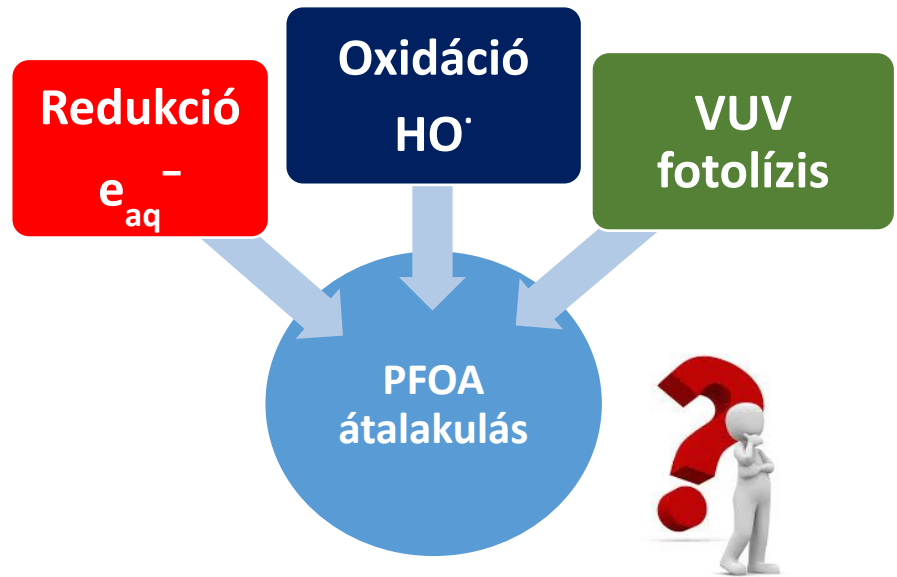
$$\phi(254 \text{ nm}) : \phi(185 \text{ nm}) = 10:1$$

UV és UV/VUV lámpa: ( $P_{\text{el}} = 15 \text{ W}$ ,  $P_{\text{UV}} = 4,3 \text{ W}$ )

# PFOA VUV fotolízise



Oldott O<sub>2</sub> és pH hatása



A ·OH szerepe elhanyagolható a PFOA VUV fotolízise és az e<sub>aq</sub><sup>-</sup>-nal való reakciója mellett.

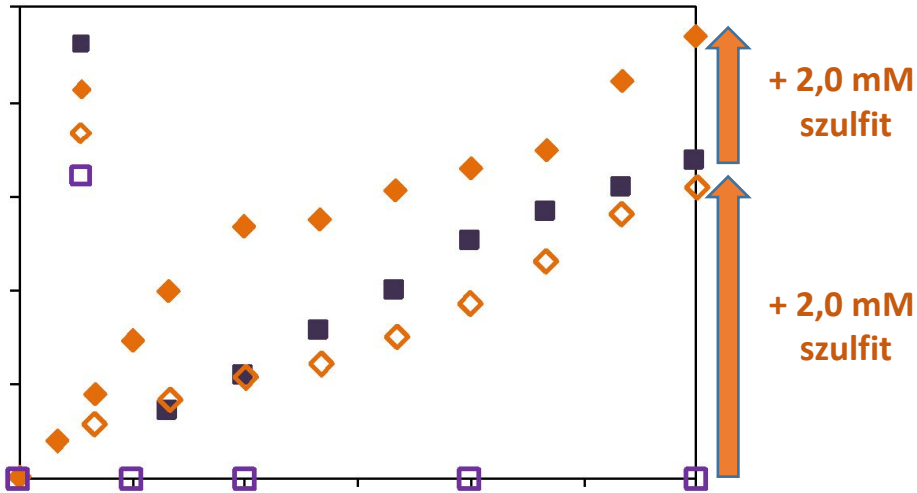
# UV/szulfít és UV/VUV/szulfít (pH = 10)



VUV fény hatása jelentős – mire vezethető vissza?

PFOA VUV fotolízisének hozzájárulása

Szulfition UV és VUV fotolízise közti különbség



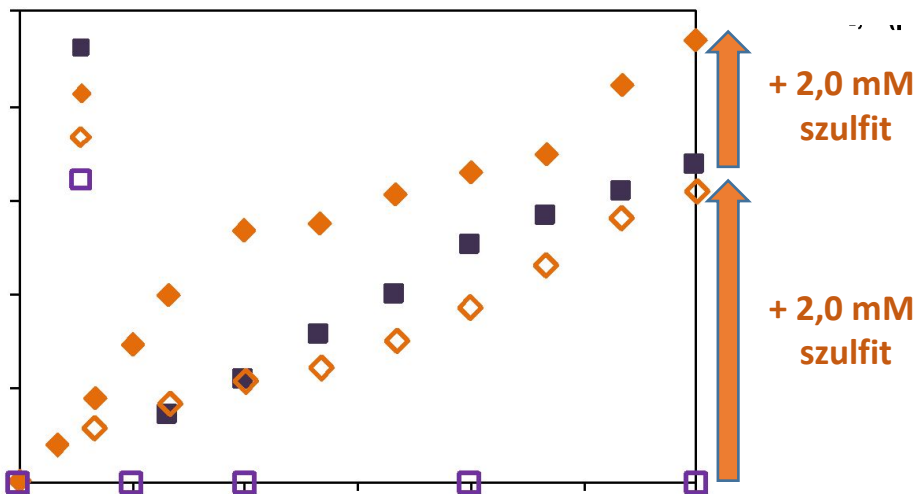
Moláris abszorbancia ( $\text{M}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )

	254 nm	185 nm
$\text{SO}_3^{2-}$	21	3730
PFOA	-	~60

Kvantumhasznosítási tényező ( $\phi(e^-_{\text{aq}})$ )

	254 nm	185 nm
$\text{SO}_3^{2-}$	~0,39	0,85

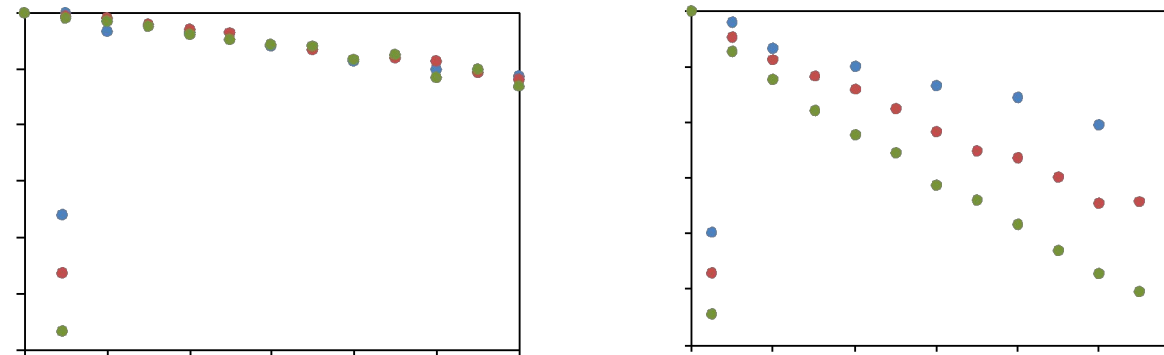
# UV/szulfít és UV/VUV/szulfít – a szulfition fotolízise



Moláris abszorbancia ( $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$ )

	254 nm	185 nm
$\text{SO}_3^{2-}$	21	3730
PFOA	-	~60

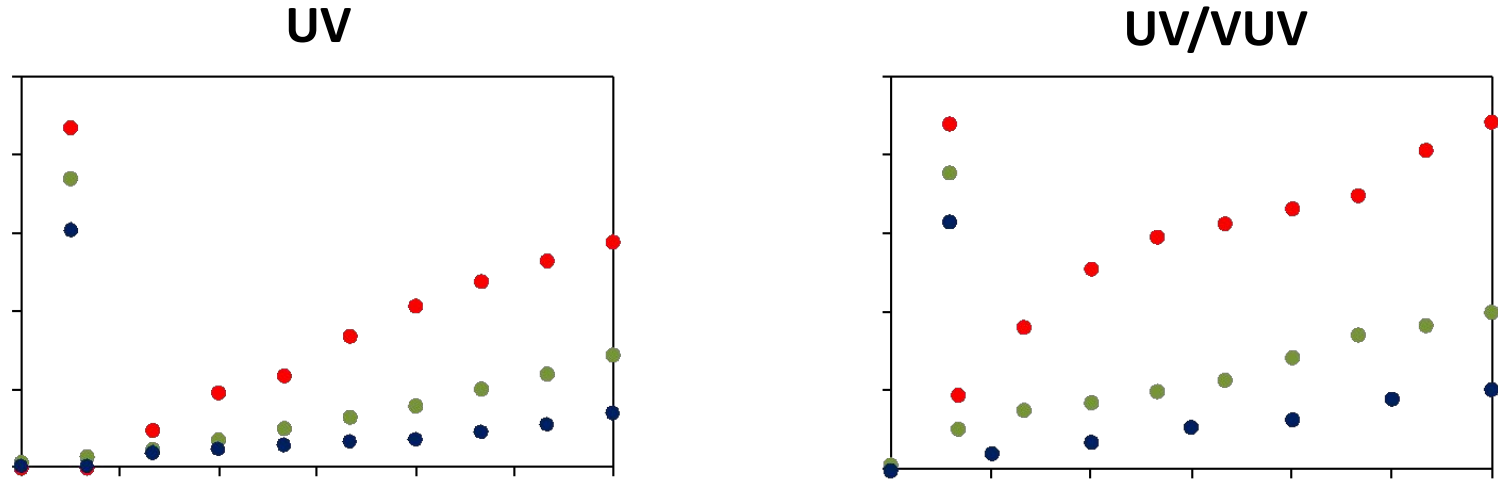
A szulfition UV és UV/VUV fotolízise



Kvantumhasznosítási tényező ( $\phi(e^-_{aq})$ )

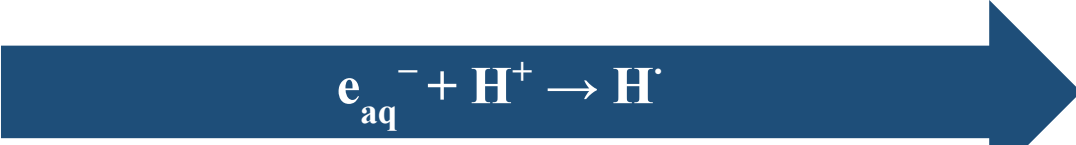
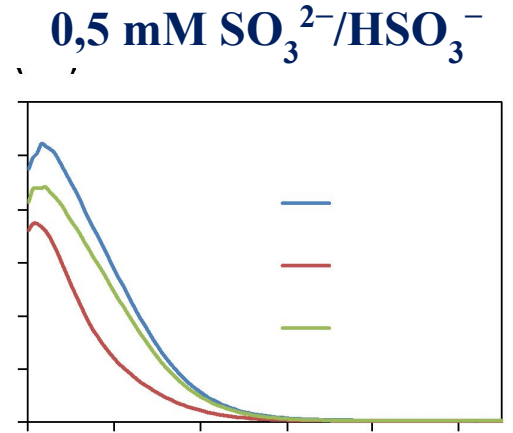
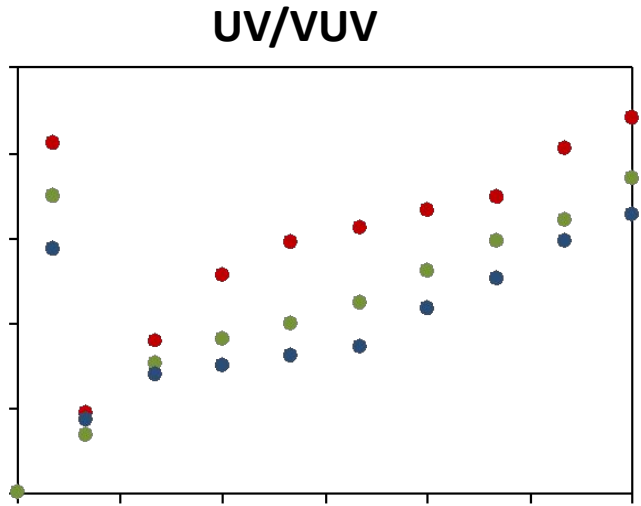
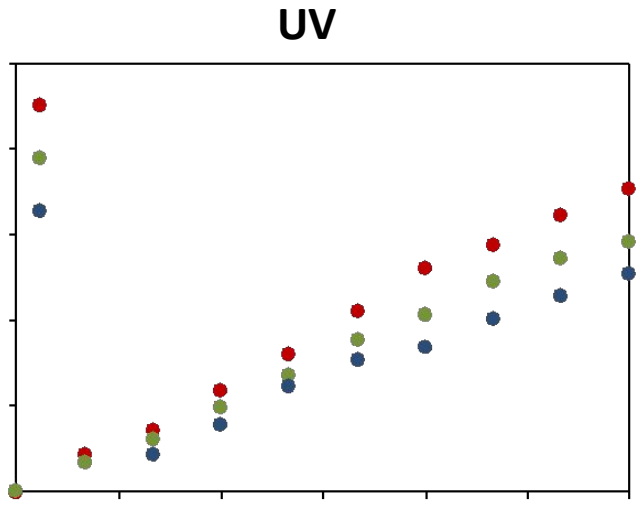
	254 nm	185 nm
$\text{SO}_3^{2-}$	~0,39	0,85

# Oldott O<sub>2</sub> hatása (pH = 10, c(SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) = 2,0 mM)



Az oldott oxigén elektron-befogó hatása még 2 ppm oxigén koncentrációnál is jelentős.

# pH hatása ( $c(\text{SO}_3^{2-}) = 2,0 \text{ mM}$ , $\text{N}_2$ )

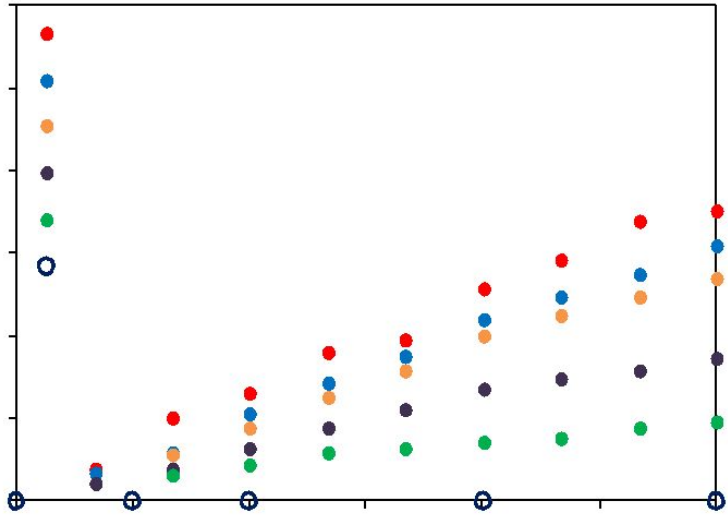


A pH növelése  
több okból is  
kedvez a hatékonyságnak.

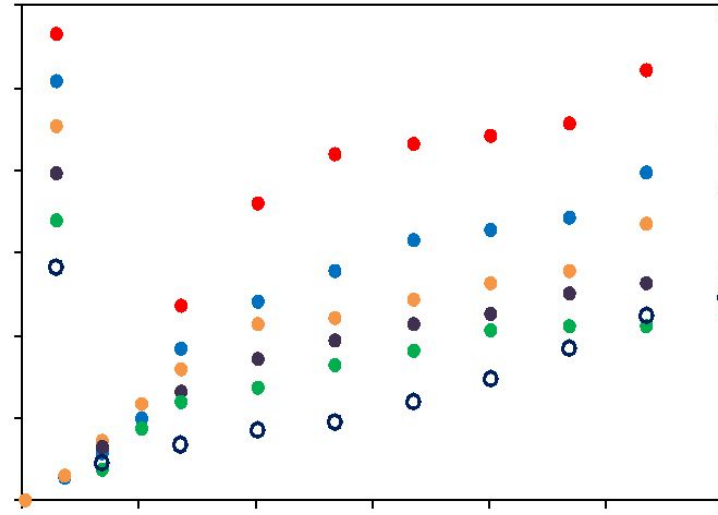
# Szulfition koncentráció hatása (pH 10, N<sub>2</sub>)

1000000

UV



UV/VUV



**A kis intenzitású VUV fény hozzájárulása a PFOA átalakulásához jelentős.**

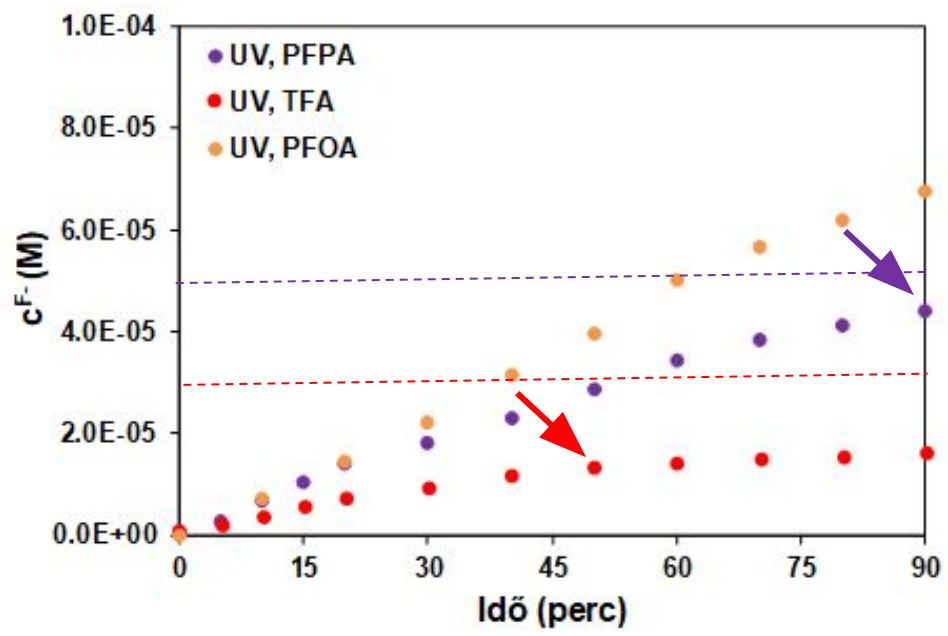
**Az UV/VUV fotolízis során tapasztalt fluoridion képződés három szakaszra bontható:**

- gyors kezdeti**
- lassú**
- gyorsan növekvő**

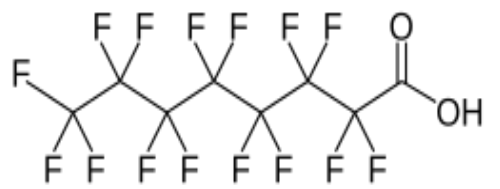
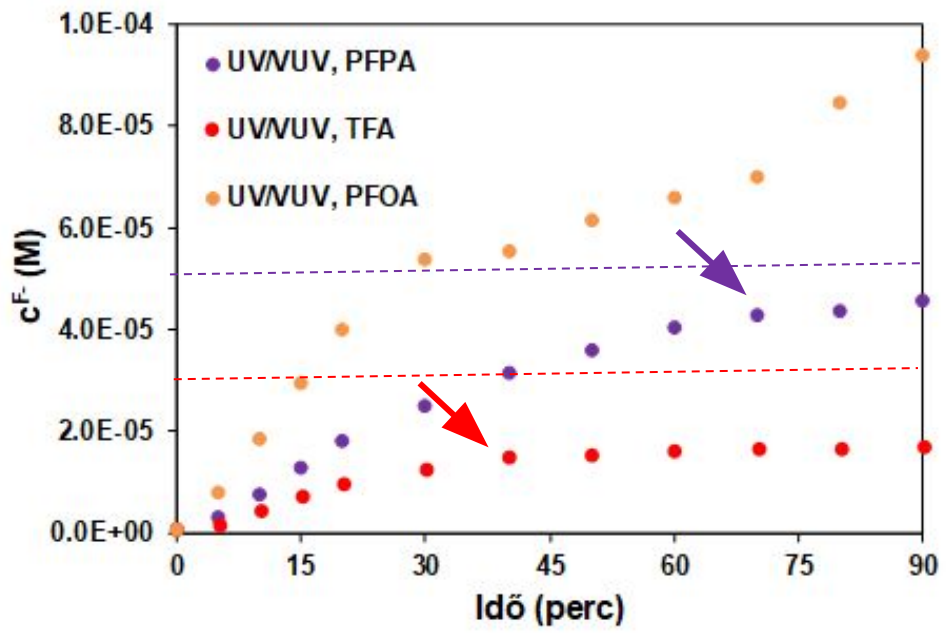


# Rövidebb szénláncú PFAS vegyületek bontása (pH = 10, c(SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) = 2,0 mM, N<sub>2</sub>)

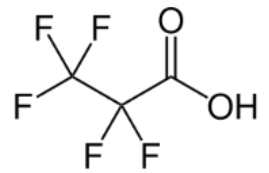
UV



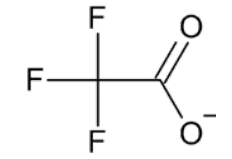
UV/VUV



Perfluorooktánsav (PFOA)



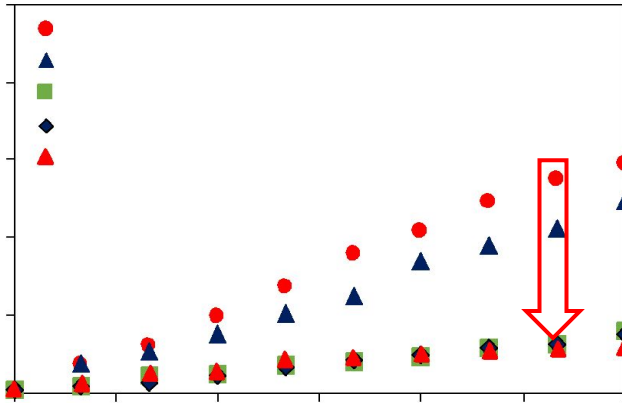
Perfluoropropánsav (PFPA)



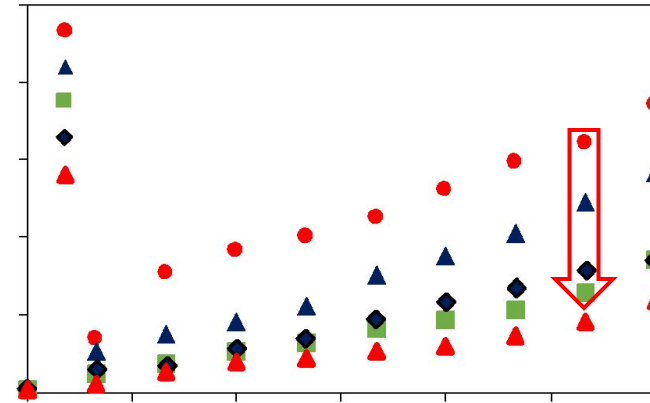
Trifluoroecetsav (TFA)

# Mátrixhatás ( $c(\text{SO}_3^{2-}) = 2,0 \text{ mM}$ , $\text{pH} \sim 8$ , $\text{N}_2$ )

UV



UV/VUV



Biol. Tisztított Komm. SzV.

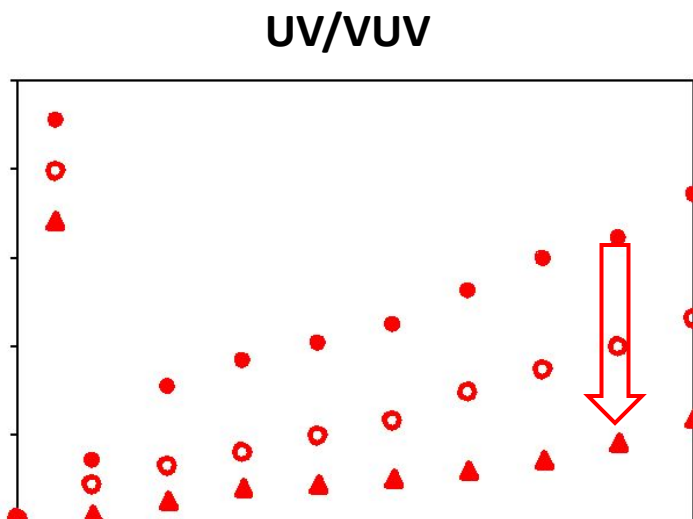
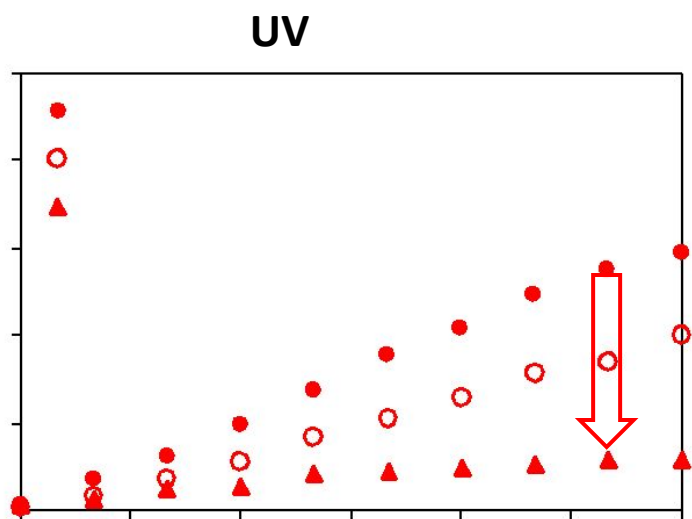
pH	8,7
Vezetőképesség ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	1258
KOI ( $\text{mg L}^{-1}$ )	24
$\text{NH}_4\text{-N}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	<0,4
$\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	3,37
$\text{Cl}^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	120
TOC ( $\text{mg L}^{-1}$ )	5 - 7
$\text{HCO}_3^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	525

Erőteljes negatív mátrix hatás.



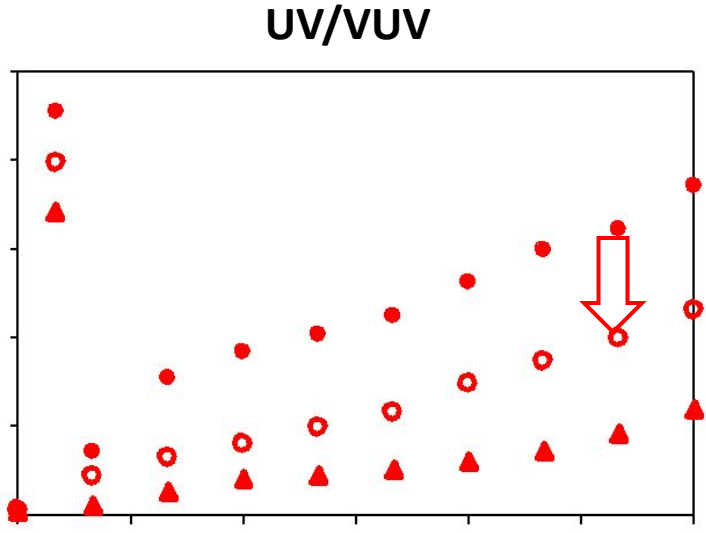
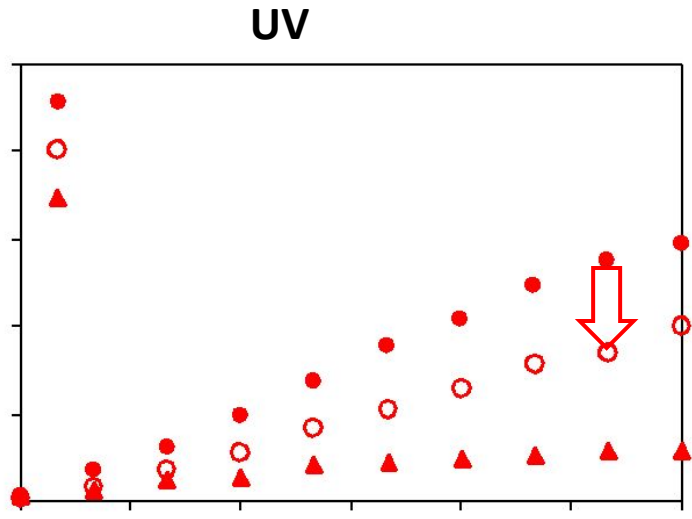
A  $\text{HCO}_3^-$  gátló hatása jelentős, a  $\text{Cl}^-$  hatása elhanyagolható.

# Mátrixhatás ( $c(\text{SO}_3^{2-}) = 2,0 \text{ mM}$ , $\text{pH} \sim 8$ , $\text{N}_2$ )



**A mátrix hatása csökkenthető, a szennyvíz savazásával, majd a pH 8-ra állításával.**

# Mátrixhatás ( $c(\text{SO}_3^{2-}) = 2,0 \text{ mM}$ , $\text{pH} \sim 8$ , $\text{N}_2$ )



**A mátrix hatása csökkenthető, a szennyvíz savazásával, majd a pH 8-ra állításával.**

# Összefoglalás

- UV/szulfid eljárás hatékony a PFOA bontásban
- A VUV fotolízis önmagában is képes a PFOA bontására
- Az  $e_{aq}^-$ -nal való reakció a meghatározó
- A VUV hatékonysága a szulfidion fotolízisében kiemelkedően jó
- A VUV fény hatása összetett



- Az eljárás érzékeny a pH-ra (>10) és az oldott  $O_2$  jelenlétére
- A mátrix hatás jelentős, de a  $HCO_3^-$  eltávolításával csökkenthető.
- VUV fotonokért való kompetíció az 1 cm behatolási mélységet tovább csökkentheti



**Köszönöm  
a  
figyelmet!**

