

ŠÍŘENÍ LÁTEK PFAS VE VYBRANÝCH SLOŽKÁCH ŽIVOTNÉHO PROSTŘEDÍ V PODMÍNKÁCH KONKRÉTNÍCH LOKALIT

DISTRIBUTION OF PFAS COMPOUNDS IN SELECTED ENVIRONMENTAL COMPARTMENTS UNDER SITE-SPECIFIC CONDITIONS

Jan Hocke¹⁾, Petr Kvapil¹⁾

¹⁾ Photon Water Technology s. r. o., Generála Svobody 25/108, 460 01 Liberec XII-Staré Pavlovice, email: info@photonwater.com

Abstrakt: Článek se zaměřuje na popis šíření látek PFAS, ověřený v podmínkách konkrétních (avšak nespecifikovaných) lokalit. Názvy obcí, hydrogeologických objektů, vodních toků nebo zdrojových zón byly nahrazeny obecnými označeními. Chování PFAS v horninovém prostředí je závislé na délce fluorkarbonového řetězce. Látky PFAS s dlouhým řetězcem (perfluoralkyl karboxylové kyseliny PFCA ≥ 8 atomů uhlíku, perfluoralkyl sulfonové kyseliny PFSA ≥ 6 atomů uhlíku) snáze podléhají sorpčním procesům v půdě a sedimentech, což ovlivňuje jejich migraci. Šíří se relativně pomalu a dlouhodobě přetrvávají v ohniscích kontaminace. Sloučeniny PFAS s krátkými řetězci (4–6 atomů uhlíku) se váží slaběji, jsou vysoce mobilní a spolu s podzemní vodou migrují na značné vzdálenosti.

Šíření látek PFAS v podzemních vodách je řízeno zejména advekcí, disperzí, sorpcí a ředěním. Transport PFAS v podzemní vodě může urychlovat zvýšený obsah rozpuštěné organické hmoty (DOC) nebo solí. Organický uhlík „soutěží“ s PFAS o vazebná místa na pevných částicích, což vede k uvolňování kontaminantu do vodního prostředí. Rovněž byla pozorována tvorba komplexů mezi DOC a některými látkami PFAS s dlouhými řetězci. Komplexy jsou následně lépe rozpustné ve vodě a méně náchylné k sorpci na pevné částice.

Abstract: This article focuses on describing the distribution of PFAS substances, as verified under conditions at specific (though unspecified) sites. The names of municipalities, hydrogeological features, watercourses, and source zones have been replaced with general terms.

The behavior of PFAS in the rock environment depends on the length of the fluorocarbon chain. Long-chain PFAS (perfluoroalkyl carboxylic acids, PFCA, ≥ 8 carbon atoms; perfluoroalkyl sulfonic acids, PFSA, ≥ 6 carbon atoms) are more readily subject to sorption processes in soil and sediments, which affects their migration. They spread relatively slowly and persist for long periods at contamination sites. Short-chain PFAS compounds (4–6 carbon atoms) bind less strongly, are highly mobile, and migrate over considerable distances along with groundwater.

The spread of PFAS in groundwater is primarily governed by advection, dispersion, sorption, and dilution. The transport of PFAS in groundwater can be accelerated by elevated levels of dissolved organic carbon (DOC) or salts. Organic carbon “competes” with PFAS for binding sites on solid particles, leading to the release of the contaminant into the aquatic environment. The formation of complexes between DOC and certain long-chain PFAS compounds has also been observed. These complexes are subsequently more soluble in water and less prone to sorption onto solid particles.

Klíčová slova: per- a polyfluorované alkylované látky (PFAS); podzemní voda; nenasurovaná zóna; transport kontaminace.

Key words: per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS); groundwater; unsaturated zone; contaminant transport.

1. Úvod

Per- a polyfluorované alkylované látky (PFAS) představují skupinu perzistentních organických kontaminantů, které se v horninovém prostředí vyznačují kombinací vysoké chemické stability, rozdílné sorpce, dlouhodobé dotace ze zdrojových zón a schopnosti vytvářet rozsáhlé kontaminační mraky v podzemních vodách. Článek shrnuje výsledky průzkumů na anonymizovaných lokalitách střední Evropy. Zaměřen je zejména na migraci látek PFAS v nenasurované zóně a podzemních vodách.

PFAS patří mezi kontaminanty, jejichž význam pro hydrogeologickou praxi v posledních letech rychle roste. Zatímco u tradičních organických polutantů bývá dominantní otázkou jejich degradace, u PFAS je klíčovým problémem především perzistence, rozdílné sorpční chování jednotlivých kongenerů, transport v rozpuštěné fázi a dlouhodobé uvolňování z nenasurované zóny. Biodegradace látek PFAS nebyla doposud uspokojivě dokumentována. National Ground Water Association shrnuje, že osud a transport PFAS v podzemních vodách jsou řízeny advekcí, disperzí, sorpcí a ředěním, avšak

významně se uplatňuje také vazba na rozhraní vzduch–voda, interakce s organickým uhlíkem a minerálním povrchem, případně transformace prekurzorů.

Limity pro tyto látky jsou v České republice uvedeny ve vyhlášce č. 371/2023 Sb., kterou se mění vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody (s účinností od 12.1.2026) a v nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod.

V pitných vodách byla stanovena limitní hodnota pro sumu 20 látek PFAS ve výši 0,1 ug/l (100 ng/l) – typ limitu NMH (nejvyšší mezní hodnota). Dále byl definován ukazatel se stanovenou směrnou hodnotou 0,010 ug/l pro sumu PFOA, PFNA, PFHxS a PFOS. Směrná hodnota představuje indikační limit, při jehož překročení se zpracovává dokument hodnocení a řízení rizik dle § 3a vyhlášky č. 252/2004 Sb.

Pro útvary povrchových vod bylo stanoveno sledování pouze sloučeniny PFOS (perfluoroktansulfonová kyselina a její deriváty) s typy limitů NEK-RP a NEK-NPK, tedy norma environmentální kvality – roční průměr a norma environmentální kvality – nejvyšší přípustná koncentrace. Zároveň byl definován limit NEK-RP pro biotu ve výši 9,1 ug/kg PFOS.

Hodnocením vlivu potravin kontaminovaných PFAS na lidské zdraví se zabývá Evropský úřad pro bezpečnost potravin – European Food Safety Authority (EFSA). Na základě výzkumu publikovaného v roce 2020 stanovil tolerovatelný týdenní příjem (TWI) kontaminantu na 4,4 ng PFAS na kg tělesné váhy za týden.

2. Nesaturovaná zóna: vertikální profil a složení PFAS

Posuzováno bylo ohnisko zatížené historickým používáním přípravků s obsahem PFAS. V ohnisku byla vyhloubena řada mělkých jádrových vrtů do hloubky 3 m pod terén (dále p. t.). Zkoumaná připovrchová část ohniska byla tvořena sprašovými hlínami. Z každého vrtu byly odebrány směsné zonální vzorky zemin po intervalech 0–0,5 m, 0,5–1 m, 1–2 m a 2–3 m. Celkem bylo odebráno 60 vzorků. V laboratorních rozborech zemin bylo sledováno více než 25 vybraných sloučenin PFAS.

Zjištěné sumární koncentrace PFAS se pohybovaly v rozmezí od hodnot pod mezí citlivosti použité analytické metody až po několik desítek tisíc µg/kg sušiny, přičemž maximum bylo zjištěno v intervalu 0,5–1,0 m p. t. V zeminách dominantně převažoval PFOS; u 47 vzorků přesáhl jeho podíl 60 % sumy PFAS.

Pro jednotlivé hloubkové intervaly byly dokumentovány následující koncentrační rozsahy:

- interval 0–0,5 m ... X0 – X 000 µg/kg sušiny, průměr 804 µg/kg sušiny
- interval 0,5–1 m ... X–X0 000 µg/kg sušiny, průměr 2 765 µg/kg sušiny
- interval 1–2 m ... <0,5–X 000 µg/kg sušiny, průměr 442 µg/kg sušiny
- interval 2–3 m ... X0–X00 µg/kg sušiny, průměr 474 µg/kg sušiny.

Nejvyšší koncentrace byly soustředěny ve svrchním horizontu horninového prostředí, zejména v intervalu 0,5–1,0 m p. t., zatímco se zvyšující se hloubkou docházelo k významnému poklesu koncentrací.

Z hlediska složení PFAS v zeminách dominovaly látky PFOS. V případě 47 vzorků byl podíl PFOS vyšší než 60 % sumy PFAS (viz tab. 1), zatímco pouze tři vzorky spadaly do kategorie nulových hodnot, jeden vzorek do intervalu 1–30 % a dva vzorky do intervalu 30–60 % zastoupení PFOS. Tento obraz odpovídá starším zdrojům kontaminace spojených používáním přípravků s obsahem PFAS, kde má sloučenina PFOS majoritní zastoupení, zatímco více mobilní karboxyláty se výrazněji prosazují až v migrační dráze. U vzorků s minoritním zastoupením PFOS byly zvýšené podíly PFOA, PFHpA a PFHxA.

Oproti celkovému poklesu koncentrací látek PFAS ve vertikálním směru bylo zjištěno snižování poměrového zastoupení sloučeniny PFOS s hloubkou jen v některých vrtech (viz tab. 1). Sloučenina PFOS charakteristická delším uhlíkovým řetězcem podléhala ve větší míře sorpci na horninovou matici pouze lokálně. Podobné chování bylo sledováno při vertikální distribuci látky PFOA. Je tedy pravděpodobné, že vertikální migraci PFAS v připovrchové zóně horninového prostředí neovlivňoval pouze záchyt látek s delším uhlíkovým řetězcem, ale také nerovnoměrný výskyt organického uhlíku.

Počet uhlíků v řetězci některých sloučenin PFAS je uveden v závorce za zkrácenými názvy vybraných látek: PFOS (8), PFBA (3), PFPeA (5), PFHxA (6), PFOA (8), PFHxS (6). Látky PFOS a PFOA mají delší řetězce oproti dalším látkám s významným zastoupením.

Tab. 1 Přehled poměru zastoupení PFOS u 47 vzorků (>60 %)
Tab. 1 Overview of the relative proportion of PFOS in 47 samples (>60%)

Číslo vzorku	1 (0-0,5 m)	1 (0,5-1 m)	1 (1-2 m)	2 (0-0,5 m)	2 (0,5-1 m)	3 (0-0,5 m)	3 (0,5-1 m)	3 (1-2 m)	4 (0-0,5 m)
%PFOS ze sumy PFAS	100%	100%	100%	91,36%	80,05%	100%	95,55%	65,78%	97,99%
Číslo vzorku	4 (0,5-1 m)	4 (1-2 m)	5 (0-0,5 m)	5 (0,5-1 m)	5 (1-2 m)	6 (0-0,5 m)	6 (0,5-1 m)	6 (1-2 m)	6 (2-3 m)
%PFOS ze sumy PFAS	94,37%	75,55%	95,61%	93,92%	93,42%	96,87%	99,27%	95,69%	94,84%
Číslo vzorku	7 (0-0,5 m)	7 (0,5-1 m)	7 (1-2 m)	7 (2-3 m)	8 (0-0,5 m)	8 (0,5-1 m)	9 (0-0,5 m)	9 (0,5-1 m)	10 (0-0,5 m)
%PFOS ze sumy PFAS	93,59%	94,20%	97,34%	94,55%	95,77%	93,76%	95,16%	72,78%	87,73%
Číslo vzorku	10 (1-2 m)	11 (0-0,5 m)	11 (0,5-1 m)	11 (1-2 m)	11 (2-3 m)	12 (0-0,5 m)	12 (0,5-1 m)	12 (1-2 m)	12 (2-3 m)
%PFOS ze sumy PFAS	100,00%	98,64%	99,30%	99,22%	99,39%	99,56%	99,58%	92,33%	72,25%
Číslo vzorku	13 (0-0,5 m)	13 (0,5-1 m)	13 (1-2 m)	13 (2-3 m)	14 (0-0,5 m)	14 (0,5-1 m)	14 (1-2 m)	15 (0-0,5 m)	15 (0,5-1 m)
%PFOS ze sumy PFAS	99,41%	99,80%	100%	97,95%	88,11%	79,05%	69,93%	79,51%	93,80%
Číslo vzorku	15 (1-2 m)	15 (2-3 m)							
%PFOS ze sumy PFAS	96,95%	93,84%							

Tab. 2 Přehled běžně analyzovaných látek PFAS
Tab. 2 Overview of Commonly Analyzed PFAS Compounds

Perfluorované sloučeniny (PFAS) - název	zkratka
11-chloreikosafluor-3-oxaundekan-1-sulfonová kyselina	11Cl-PF3OUdS
2,3,3,3-tetrafluor-2-(heptafluorpropoxy)kyselina propionová	HFPO-DA
2H,2H,3H,3H-perfluorodekanová kyselina	7:3 FTCA
4,8-dioxa-3H-perfluornonanoát sodný	NaDONA
6:2 fluorotelomerní sulfonát	6:2 FTS
8:2 fluorotelomerní sulfonát	8:2 FTS
9-chlorhexadekafluor-3-oxanonan-1-sulfonová kyselina	9Cl-PF3ONS
kyselina perfluorobutanová	PFBA
kyselina perfluorodekanová	PFDA
kyselina perfluoroheptanová	PFHpA
kyselina perfluorohexanová	PFHxA
kyselina perfluoroktanová	PFOA
kyselina perfluorononanová	PFNA
kyselina perfluoropentanová	PFPeA
kyselina perfluoroundekanová	PFUnDA
kyselina perfluorododekanová	PFDoDA
kyselina perfluortetradekanová	PFTeDA
kyselina perfluorotridekanová	PFTrDA
N-metyl perfluorooktansulfonamid	MeFOSA
perfluorobutansulfonová kyselina	PFBS
perfluorodekansulfonová kyselina	PFDS
perfluorododekansulfonová kyselina	PFDoDS
perfluoroheptansulfonová kyselina	PFHpS
perfluorohexansulfonová kyselina	PFHxS
perfluoroktansulfonová kyselina	PFOS
perfluorononansulfonová kyselina	PFNS
perfluorooktansulfonamid	FOSA
perfluoropentansulfonová kyselina	PFPeS

perfluoropropan sulfonová kyselina	PFPrS
perfluorotridekansulfonová kyselina	PFTTrDS
perfluorundekansulfonová kyselina	PFUnDS

3. Podzemní voda

3.1 Rozsah znečištění

Posuzovaná lokalita byla charakteristická výskytem dvou kolektorů ve vertikálním směru (pracovní označení – svrchní a spodní), vyvinutých v křídových sedimentech. Kolektory byly místy propojeny.

Plošným monitoringem podzemní vody byly zjištěny sumární koncentrace PFAS v rozmezí <0,2 až X 000 ng/l. V souladu s běžnou praxí pro tento typ kontaminantu byly linie výskytu nejvyšších koncentrací definovány jako hlavní migrační cesty z prostoru zdrojových oblastí. Určeny byly hlavní drenážní zóny s přihlédnutím ke koncentracím v pramenních vývěrech a domovních studních ve směru šíření znečištění.

Na lokalitě bylo posuzováno více ohnisek znečištění, přičemž ve většině byla majoritně zastoupena sloučenina PFOS. Analýzou dat monitoringu bylo možné bez větších nejistot identifikovat zejména jednu hlavní migrační linii ve svrchním kolektoru (ohnisko – kontaminační mrak – pramenní vývěr – povrchový tok). Přesné určení dalších migračních linií bylo ovlivněno nedostatečnými údaji o preferenčních cestách proudění podzemní vody v kolektorech (výraznější poruchové linie) a o prostorovém rozložení oblastí s propojením obou kolektorů

Po vyloučení nejistot spojených se sekundární kontaminací bylo zaznamenáno rozšíření hlavního kontaminačního mraku v kolektoru podzemní vody na vzdálenost několika kilometrů.

3.2 Etapy monitoringu

Látky PFAS v podzemní vodě byly vzorkovány ve více etapách. Porovnání jednotlivých etap monitoringu ukázalo relativně stabilní koncentrace v čase. Sumární koncentrace PFAS v posuzovaných etapách byly blízké a pohybovaly se v rámci jednoho řádu, přičemž odchylka většinou nepřesahovala 50 %. Vyšší odchylky byly sledovány hlavně u nízkých koncentrací v řádu jednotek a desítek ng/l. Uvedená analýza dat podpořila interpretaci dlouhodobě působícího zdroje znečištění látkami PFAS, nikoli vliv krátkodobé epizodické kontaminace.

3.3 Migrační linie vzdálené více než 1 km od ohniska – změny v poměrovém zastoupení látek PFAS

Dominantní zastoupení PFOS (>51 %) v hlavním kontaminačním mraku ve větší vzdálenosti od ohniska (> 1 km) bylo zjištěno u necelé poloviny odebraných vzorků podzemní vody. U vzorků s minoritním zastoupením PFOS byly dokumentovány zvýšené podíly PFBA, PFPeA, PFHxA, PFOA, PFHxS a ojediněle 6:2 FTS. Charakter hlavního kontaminačního mraku se mírně tedy měnil se vzdáleností od zdrojové oblasti. Pro saturovanou zónu bylo odvozeno, že látky PFOS, PFOA a podobné sloučeniny s delším uhlíkovým řetězcem snadněji podléhají sorpčním procesům a při transportu těchto látek na delší vzdálenosti se jejich relativní zastoupení v mraku snižuje.

Podobný vývoj (s přihlédnutím k nejistotám) byl zaznamenán i v některých dalších kontaminačních mracích. V oblasti blíže k ohnisku dosahoval podíl PFOS ve vybraných objektech 62,77–69,55 % a ve vzdálenějších objektech klesal až na 40,14–45,53 %, současně s růstem podílu PFHxA a PFPeA. V jiné dílčí oblasti, v objektech vzdálenějších od ohniska, činil podíl PFOS 54,13–64,85 %, zatím co v blízkosti zdrojových oblastí byly pozorovány i vyšší hodnoty (přes 79 %).

4. Povrchová voda

V recipientech byly překročeny limity stanovené nařízením vlády č. 401/2015 Sb. pro povrchovou vodu.

5. Závěry

Výsledky průzkumu ukázaly, že nesaturovaná zóna v ohnisku znečištění je stále aktivním sekundárním zdrojem, který dlouhodobě dotuje podzemní vodu látkami PFAS. Nejvyšší koncentrace PFAS byly soustředěny ve svrchní vrstvě horninového prostředí, do hloubky cca 1 m pod terénem. Jedná se o historickou zátěž s významnou akumulací látek PFAS schopných dlouhodobého uvolňování do saturované zóny.

Dále bylo posuzováno šíření znečištění ve dvou nad sebou vyvinutých hydrogeologických kolektorech. Kolektory byly hydraulicky i transportně propojeny s drenážními bázemi a lokálně i s poruchovými zónami charakteristickými zvýšenou hydraulickou vodivostí. Přednostní šíření látek PFAS prostřednictvím poruchových linií vytvářelo v částech některých lokalit užší kontaminační mraky protáhlé ve směru proudění podzemní vody. Relativně prostorově omezené otevřené poruchové zóny v heterogenním prostředí tak mohou ovlivňovat směr, rychlost i chemické složení migrující kontaminace.

Analýza zastoupení hlavních analytů PFAS v hydrogeologických objektech umožnila interpretaci migračních linií. V blízkosti některých zdrojových oblastí a v části blízkých drenážních bází převládala látka PFOS, zatímco ve vzdálenějších objektech rostl podíl PFHxA, PFPeA, PFBA nebo PFOA. Pozorování odpovídalo obecným poznatkům, kdy kratší řetězce karboxylových kyselin vykazují vyšší mobilitu, zatímco delší lineární řetězce sulfonových kyselin více podléhají sorpci. V části posuzovaného prostoru bylo rovněž zjištěno, že došlo ke spojení jednotlivých kontaminačních mraků do jednotného proudu znečištěné podzemní vody. Změny chemického složení migrující kontaminace nemusí být tedy určeny pouze diferenciací v rámci sorpčních procesů, ale i mísením toků polutantu z více zdrojových oblastí. Interpretace výsledků byla zatížena několika typy nejistot: heterogenitou horninového prostředí, omezenou znalostí přesné polohy poruchových zón a jejich hydraulických parametrů, omezenou hustotou monitorovacích objektů v některých částech posuzovaných území a neznalostí časové proměnlivosti vyluhování PFAS z nesaturované zóny vlivem infiltrace srážek. Mezi nejistoty byla zařazena také absence dat zohledňující dlouhodobý vývoj kontaminace ve vztahu k režimnímu kolísání hladin podzemní vody. Bylo nutné zohlednit i procesní nejistoty, které vyplývají z obecného chování PFAS v horninovém prostředí: vliv organického uhlíku, pH, iontové síly, Ca^{2+} a konkurence dalších látek o sorpční místa, případně existenci dalších látek PFAS nezařazených na seznamu sledovaných sloučenin (viz tab. 2).

Seznam literatury

- [1] National Ground Water Association (2021): PFAS Fate and Transport. NGWA Press, Westerville, Ohio.
- [2] European Commission (2024): Technical guidelines regarding methods of analysis for monitoring of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in water intended for human consumption. Official Journal of the European Union, C/2024/4910.
- [3] Varga, I. et al. (2026): Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Fish: Global Occurrence, Bioaccumulation, Analytical Approaches, and Human Exposure Risks—A Review. *Toxics* 14(4), 336.

Poznámka: zdroje dat o kontaminaci popisovaných lokalit byly anonymizovány.