

Hydrologické extrémy a jejich vliv na koncentrace organických látek v pramenných oblastech Šumavy

Vojtěch Vlach, Marie Bejčková

Anotace

Cílem příspěvku je analýza změn koncentrací organických látek (DOC) v pramenné oblasti Šumavy ve vazbě na vybrané extrémní srážko-odtokové události. Výstupy tohoto projektu jsou vytvořeny v rámci výzkumu v experimentálním povodí na horní Vydře, kde je hlavním zájmem objasnění vztahů mezi koncentracemi organických látek a odtokem s ohledem na extrémní události.

Klíčová slova: organické látky, rozpuštěný organický uhlík (DOC), rašeliniště, hydrologické extrémy

Annotation

The aim of this paper is to analyse the changes in concentrations of organic compounds (DOC) in the headwater area of the Šumava Mountains in relation to selected extreme rainfall-runoff events. The outputs of this project were carried out as a part of research in the experimental catchment on the Upper Vydra, where the main interest is the clarification of the relationships between organic matter concentrations and runoff with respect to extreme events.

Key words: organic matter, dissolved organic carbon (DOC), peatlands, hydrological extremes

Abstract

Surface water quality is one of the vital factors for natural ecosystems conditions in central European highlands and mountains. Recently, these areas have been affected by water scarcity, which has had a negative impact on water quality. This study is focused on changes of natural organic substances within hydrological extremes in headwater areas of the upper Vydra river in Šumava, southwestern Czechia. This catchment is a part of the experimental network of the Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University. The theoretical background based on domestic and foreign literature was focused on environmental and social impacts of organic substances, as well as on modern approaches investigating potential factors affecting changes in concentrations and variability of organic substances. The main aim of this work is to analyse the amount and variability of organic matter in relation to selected runoff events with clarification of these relationship. The change in of concentrations and variability of Dissolved Organic Carbon (DOC) was evaluated with respect to the catchment preconditions (14 previous days) and the actual influence of hydroclimatic inputs during the episodes. The dependence of each variable on DOC concentrations was also examined. The dependence of parameters (water temperature, conductivity, flow rate, pH, Dissolved Oxygen, DOC concentration) within the campaigns and the subsequent similarity of the profiles were also investigated. The evaluating of relationship and processes was determined, for example, using Principal Component Analysis (PCA Analysis), hysteresis loop or Pearson's correlation coefficient. The greatest influence on the concentration change and variability of DOC was confirmed for the groundwater levels and discharge. The greater lag time of maximum DOC concentration after peak discharge was primarily related to previous rainless conditions. Lower catchment saturation also leads to higher mean DOC concentrations during rainfall-runoff episodes.

1 Úvod

Zvýšené koncentrace organických látek ve vodních tocích a povrchových vodách obecně mohou mít značné environmentální i sociální dopady. Mají významný vliv na sladkovodní biotu, kvalitu pitné vody, pobřežní a mořské ekosystémy a uhlíkovou bilanci. Vysoké koncentrace také obvykle mobilizují kovy a znečišťující látky a omezují pronikání světla do vody (Kneale et al., 1999). Organické látky v případě této studie představuje rozpuštěný organický uhlík (DOC), který svými koncentracemi vyjadřuje zatížení vodního toku. Koncentrace DOC se ve vodních zdrojích velmi liší. Nejvyšší koncentrace nalezneme u vod organického původu, vod odvodňujících mokřady či rašeliniště a také u vodních toků, kde může dojít k výraznému nárůstu koncentrací při dočasně či trvale snížených hodnotách průtoků (Evans, 2005).

Zvýšení koncentrací organických látek bylo v posledních letech zaznamenáno například v některých regionech kontinentální Evropy, Velké Británie nebo Severní Ameriky. Budoucí scénáře některých studií naznačují nárůst koncentrací DOC téměř o polovinu ještě v průběhu tohoto století (Evans, 2005; Xu et al., 2020; Fenner et al., 2021). Tyto nárůsty a další dynamické změny mohou mít vliv na biochemické procesy (např. změna pH), hydro-klimatické faktory (zvýšená teplota vzduchu, sucho) nebo zvýšenou eutrofizaci (Clay, 2009). Nepřirozeně zvýšené koncentrace DOC ve vodním prostředí představují problém také pro lidskou společnost v podobě zvýšení nároků na úpravu pitné vody. Organické látky jednak zbarvují vodu zejména v rašelinných oblastech. Výrazně větší problém však představuje odbourání těchto látek z pitné vody. Voda obohacená o vyšší koncentrace DOC s sebou transportuje mikropolutanty, což může vést k nárůstu množství bakterií. Takto znečištěná voda poté působí jako prekurzor (chemická reakce, při které vzniká jiná sloučenina) během chlorace, kdy v kombinaci s chlorem může produkovat karcinogenní sloučeniny (Clay, 2009; Fenner et al., 2021).

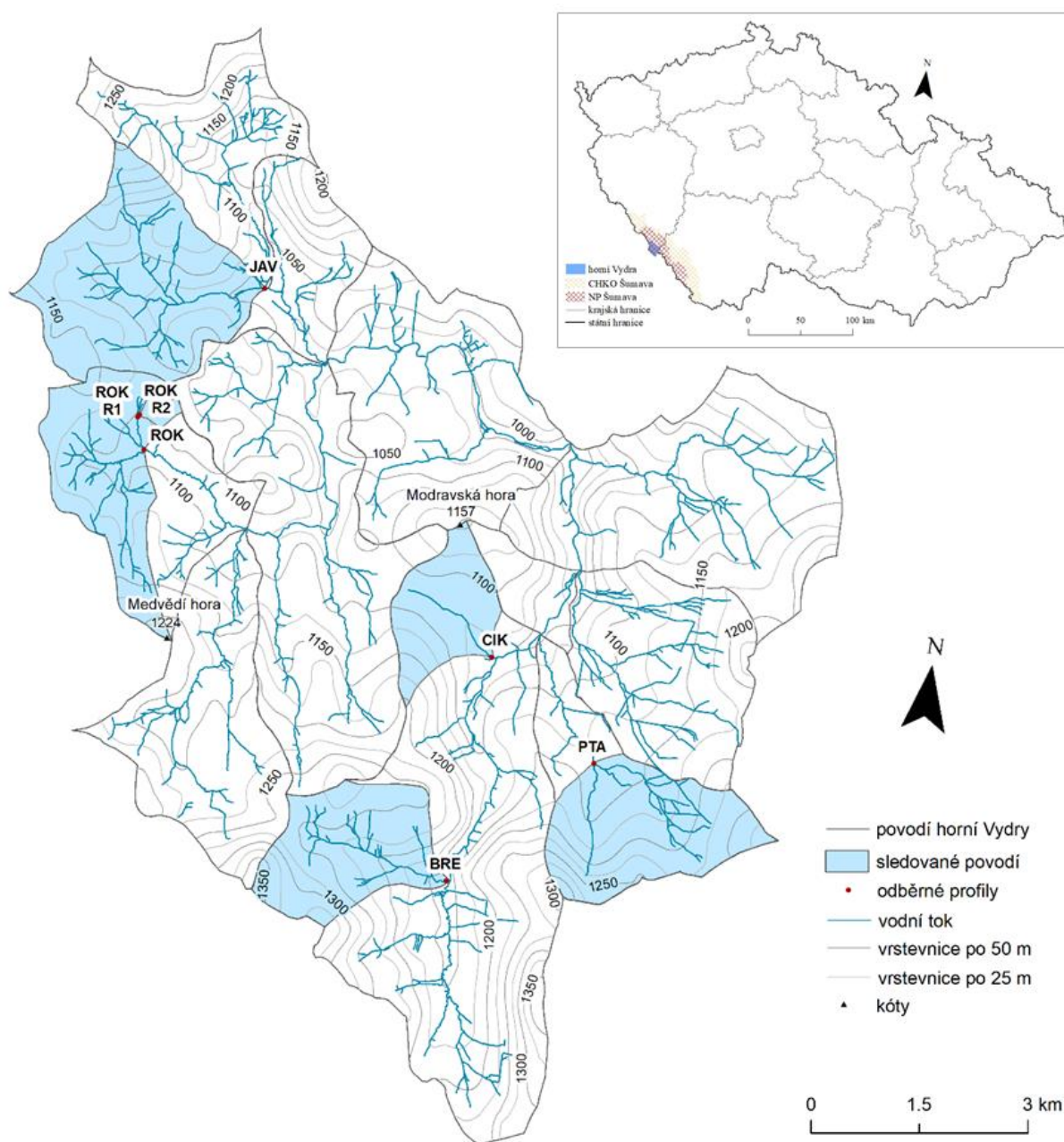
Tato studie se zabývá změnami koncentrací organických látek v kontextu hydrologických extrémů (vysokých a nízkých průtoků) v pramenných oblastech horní Vydry. Výzkum se věnuje potenciálním faktorům ovlivňující změny koncentrací a variabilitu organických látek. Za tyto faktory lze považovat biochemické procesy, hydro-klimatické faktory, půdní prostředí, využití půd (land use) či krajinný pokryv (land cover). Součástí práce stručná je charakteristika pěti dílčích experimentálních povodí Katedry fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy (KFGG PřF UK) nacházejících se v povodí horní Vydry. Konkrétně se jedná se o povodí Rokytky, Březnického potoka, Ptačího potoka, Javořího potoka a Cikánského potoka. Cílem praktické části byla analýza změn množství koncentrací a variability organických látek v povrchové vodě ve vazbě na srážko-odtokové extrémy a pokus o objasnění těchto vztahů. Tyto změny byly sledovány také s ohledem na předchozí podmínky v povodí (14 dní před vybranými epizodami). Předchozí podmínky spolu s podmínkami přímo během těchto epizod byly vyhodnoceny pomocí následujících proměnných: srážkové úhrny, teploty vzduchu, výšky hladiny podzemní vody, průtoky a výšky sněhové pokrývky, pokud byla přítomna. Řešena byla také závislost dílčích proměnných na množství rozpuštěného organického uhlíku. Dále byl v rámci studie sledován vliv průtoku na množství transportovaných organických látek (jaké průtoky generují jaké koncentrace DOC) a efekt počtu srážko-odtokových událostí (dílčích průtokových maxim) v průběhu epizod na množství transportovaného DOC. V neposlední řadě byla zkoumána závislost parametrů měřených během odběru vzorků (teplota vody, konduktivita, průtok, pH, rozpuštěný kyslík, koncentrace DOC) v rámci kampaní a následná podobnost jednotlivých profilů.

2 Data a metody

2.1 Zájmová povodí

Experimentální povodí horní Vydry se nachází v jihozápadních Čechách v centrální části Šumavy, oblasti zvané Modravské pláň. Povodí má charakter náhorní plošiny s relativně zarovnaným povrchem (střední sklon svahů 5.5°), kde se nadmořské výšky pohybují od 977 do 1370 m n. m. s nejvyšším bodem Velká Mokrůvka (1370 m n. m.). V rámci expozice svahů ke světovým stranám

převládají svahy orientované na západ, severozápad a severovýchod (Čurda et al., 2011). Významnou součástí tohoto povodí jsou šumavská rašeliniště, která představují jednu ze základních složek šumavské biodiverzity. Systematický výzkum těchto rašelinišť započal teprve v nedávné době (Soukupová et al., 2001). Zajímavý je pak i samotný vývoj těchto rašelinišť, který započal nejdříve ve východní části Šumavy před 13 000 lety v průběhu staršího dryasu. Rašeliniště centrálních náhorních plání vznikala nejpozději v období preboreálu, tedy před zhruba 10 000 lety. V povodí horní Vydry se nachází celkem pět experimentálních povodí (obrázek 1). Jsou to Březnický potok (BRE), Cikánský potok (CIK), Javoří potok (JAV), Ptačí potok (PTA) s automatickým vzorkovačem ISCO a Rokytká (ROK). Zde se nacházejí se zde dva doplňkové odběrové profily ROK – R1 a ROK – R2. ROK – R1 se nachází na horním toku Rokytky (zhruba 400 m od profilu ROK) těsně pod soutokem dvou pramenů. Tyto prameny mají velmi odlišný charakter. Jeden je hnědavě zbarvený a vytéká rovnou z rašeliniště, zatímco druhý vytéká z lesního prostředí (podmáčené smrčiny, kleč).



Obrázek 1: Povodí horní Vydry a jeho poloha v rámci ČR + dílčí subpovodí (zdroj: Bejčková, 2022)

2.2 Vstupní data a jejich sběr

V průběhu jednoho hydrologického roku se uskuteční několik terénních výjezdů, během kterých probíhají odběry vzorků vody (100 ml) z odběrných profilů, transport vzorků probíhá pomocí tmavého chladicího boxu. Před laboratorní analýzou, pokud neproběhne ihned po odběrech, jsou tyto vzorky uchovány ve zmrzlém stavu. Vzorky odebrané manuálně jsou v rámci této studie nazvány jako kampaně (reprezentují jednotlivá roční období). Kromě toho se na odběrných profilech současně měří průtok, který je většinou měřen ultrazvukovým přístrojem Flow Tracker (SONTEK). Některé profily mají své vlastní automatické stanice, které jsou vybaveny automatickými hladinoměry, které měří kontinuálně výšku hladiny toku v desetiminutovém kroku. Tyto stanice jsou umístěny na profilech PTA, BRE, ROK, CIK, JAV. Dále se během odběrových kampaní měří teplota vody, pH, rozpuštěný kyslík a konduktivita pomocí multimetrické sondy (HQ40-D Hach-Lange). Základní údaje vybraných povodí a jejich měřících stanic (profilů) jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled vybraných odběrových profilů a jejich povodí

Profil (povodí)	Souřadnice	Plocha (km ²)	Sklon (°)	Elevace (m n. m.)
JAV	N 49°02'20", E 13°26'08"	6.34	5.67	1032–1257
ROK	N 49°01'01", E 13°25'03"	3.82	3.58	1090–1220
ROK-R1	N 49°01'13", E 13°24'53"	0.605	3.51	1090–1108
ROK-R2	N 49°01'16", E 13°24'57"	0.144	3.5	1098–1112
CIK	N 48°59'52", E 13°29'18"	2.17	4.2	1055–1200
PTA	N 48°59'12", E 13°30'38"	4.09	5.59	1135–1330
BRE	N 48°58'10", E 13°29'10"	3.55	6	1070–1376

Zdroj: Bejčková, 2022; KFGG PřF UK

Významnou součástí sběru dat v terénu jsou automatické vzorkovače (ISCO). Díky automatickým odběrům přímo během srážko-odtokových událostí pak lze přesněji posoudit potenciální fyzikální (zakalení, pevné částice), chemické a biologické změny v čase (Ramos et al., 2015). Přístroje ISCO byly využity na profilech PTA, ROK-R1 a ROK. Vzorky odebrané tímto způsobem jsou v této práci označeny jako epizody. ISCO je vždy zapnuto buď manuálně, nebo automaticky reaguje na změnu průtoku či hladinu vody, např. na PTA je spínán manuálně pomocí SMS zprávy. ISCO na ROK-R1 odebírá vzorky automaticky cca od června do října v závislosti na průtoku. V době malých průtoků vzorkovač odebírá v případě, kdy je vodní stav do 28 cm po proteklém objemu 4000 m³ a nad 28 cm po 1000 m³. ISCO dokáže odebrat maximálně 24 vzorků, poté je třeba vzorky vyjmout a zásobníky vyprázdnit. Pro tuto studii jsou přístroje ISCO stěžejní, jelikož umožňují přesně určit dobu zpoždění koncentrací sledovaných látek za průtokem. Vzorky jsou laboratorně analyzovány na více pracovištích (KFGG PřF UK, Geologický ústav PřF UK, ÚH AVČR) v závislosti na různé přístrojové náročnosti jednotlivých parametrů.

Tabulka 2: Vybrané hydrologické charakteristiky sledovaných povodí

Profil	Délka toku (km)	Hustota říční sítě (km.km ⁻²)	Průměrný průtok (m ³ .s ⁻¹)	Specifický odtok (l.s ⁻¹ .km ⁻²)	Maximální průtok (l.s ⁻¹ .km ⁻²)
JAV	2.86	2.69	0.240	35.49	9.89
ROK	0.86	3.20	0.150	32.40	3.42
CIK	1.61	0.71	0.077	24.88	1.34
PTA	2.14	1.97	0.115	28.06	2.00
BRE	2.54	2.34	0.095	31.50	1.65

Zdroj: Bejčková, 2022; KFGG PřF UK

Pro vyhodnocení hydro-klimatických podmínek v průběhu epizod a předchozích podmínek v povodí sledované 14 dní před epizodou byla využita data úhrnu srážek (P) a teploty vzduchu ve dvou metrech (T) z meteorologických stanic KFGG PřF UK (v desetiminutovém kroku) pro povodí, ve kterých se

nacházejí automatické vzorkovače ISCO (ROK, ROK-R1, PTA). Mezi proměnné byl zahrnut také průtok (Q). Další důležitá data se týkají hladiny podzemní vody (HPV), jež zásadně ovlivňuje změny koncentrací (vyplavování) a variabilitu organických látek. V tomto případě je sběr a zpracovávání dat prováděn kolektivně v rámci výzkumného týmu hydrologie na KFGG PřF UK. Výzkum probíhá pouze na povodí Rokytky, jež je typické výskytem rašelinišť horského typu (též vrchoviště). HPV je měřena v rašeliništi na pěti místech pomocí tlakových sond (2x podmáčená smrčina, 2x borovice kleč, 1x suchopýr (bezlesí)). Tlakové sondy jsou instalovány zhruba 60 cm pod povrchem a hladina je sledována v desetiminutovém intervalu. Výsledné změřené hodnoty jsou relativní, přepočítané k nulové hodnotě představující povrch. Poslední proměnnou je výška sněhové pokrývky (SCE) pro povodí ROK a PTA, kde je výška sněhu měřena pomocí sněhoměrného polštáře v hodinovém kroku.

2.3 Metodika a použité analytické nástroje

V rámci studie bylo vyhodnoceno celkem 18 epizod (tabulka 3) v rozmezí let 2019–2021 včetně předchozích podmínek. Vzorky DOC byly odebrány pomocí automatických vzorkovačů ISCO na profilech ROK-R1, PTA a ROK. Z důvodu omezeného rozsahu tohoto příspěvku budou prezentovány jen vybrané epizody, kompletní výsledky jsou k dispozici v práci Bejčková (2022).

Tabulka 3: Přehled sledovaných epizod a hodnocené období předchozích podmínek

Číslo epizody	Datum epizody	Profil	Předchozí podmínky (Q, HPV, T, P, SCE)
1	12. 8. – 21. 8. 2019	ROK-R1	29. 7. – 11. 8. 2019
2	5. 6. – 11. 6. 2020	ROK-R1	22. 5. – 4. 6. 2020
3	13. 6. – 29. 6. 2020	ROK-R1	30. 5. – 12. 6. 2020
4	9. 7. – 28. 7. 2020	ROK-R1	25. 6. – 8. 7. 2020
5	11. 8. – 18. 8. 2020	ROK-R1	28. 7. – 10. 8. 2020
6	23. 8. – 13. 9. 2020	ROK-R1	9. 8. – 22. 8. 2020
7	19. 9. – 28. 9. 2020	ROK-R1	5. 9. – 18. 9. 2020
8	28. 10. – 1. 11. 2020	ROK-R1	14. 10. – 27. 10. 2020
9	11. 3. – 15. 3. 2021	PTA	25. 2. – 10. 3. 2021
10	10. 5. – 16. 5. 2021	PTA	26. 4. – 9. 5. 2021
11	24. 6. – 26. 6. 2021	ROK-R1	10. 6. – 23. 6. 2021
12	30. 6. – 4. 7. 2021	ROK-R1	16. 6. – 29. 6. 2021
13	2. 8. – 11. 8. 2021	ROK-R1	19. 7. – 1. 8. 2021
14	7. 8. – 9. 8. 2021	ROK	24. 7. – 6. 8. 2021
15	16. 8. – 24. 8. 2021	ROK-R1	2. 8. – 15. 8. 2021
16	26. 8. – 27. 8. 2021	ROK-R1	12. 8. – 25. 8. 2021
17	29. 9. – 19. 10. 2021	ROK-R1	15. 9. – 28. 9. 2021
18	5. 10. – 7. 10. 2021	ROK	21. 9. – 4. 10. 2021

Zdroj dat: KFGG PřF UK

Statistické vyhodnocení a vizualizace variability koncentrací DOC v rámci epizod s jednotlivými hydrologickými, potažmo klimatickými parametry (Q, T, P, HPV a SCE), bylo provedeno v prostředí Microsoft Excel a R (R Core Team, 2022). Spolu s analýzou a detailním popisem epizod byla provedena i manuální korekce dat DOC. Na základě této kontroly byly některé odchýlené hodnoty DOC z epizod vyloučeny. Jednalo se převážně o vzorky, u kterých bylo zřejmé, že došlo k chybě (záměna vzorků v laboratoři nebo při sběru lahvíček, metodická chyba během analýzy). Na základě detailní analýzy dat byly jednotlivé epizody rozřazeny do kategorií podle variability DOC ve vztahu k průtoku (doba zpoždění Q_{max}). První kategorie dělí epizody na základě variability DOC z pohledu doby zpoždění maximálních koncentrací DOC (DOC_{max}) za maximálním průtokem (Q_{max}). Druhá kategorie zahrnuje koncentrace organických látek bez zpoždění za průtokem, kdy se DOC_{max} dostavily vzestupu průtokové vlny. Třetí kategorie zahrnuje kombinovaný typ epizod se zpožděním i bez zpoždění DOC_{max} za Q_{max} . Čtvrtá kategorie pak představuje koncentrace DOC, které nastaly v klidovém období bez razantních změn. Pro lepší pochopení časoprostorových vztahů byl vztah mezi DOC_{max} a Q_{max} zobrazen pomocí hysteretických smyček (Zuecco et al., 2016; Su et al., 2017).

3 Výsledky

Koncentrace DOC velmi pružně reagují na změnu průtoku. Proto byla klasifikace epizod primárně založená na variabilitě organického uhlíku (doba zpoždění) a základem následné kategorizace bylo sledování koncentrací DOC s průtokem. Dalším faktorem je, že v rámci průtoku byla k dispozici veškerá data potřebná data, na rozdíl od např. HPV. Současně s průtokem byly sledovány i ostatní proměnné, které pomohly vysvětlit dynamické chování koncentrací DOC.

3.1 Zpoždění maximálních koncentrací DOC za maximem průtoku

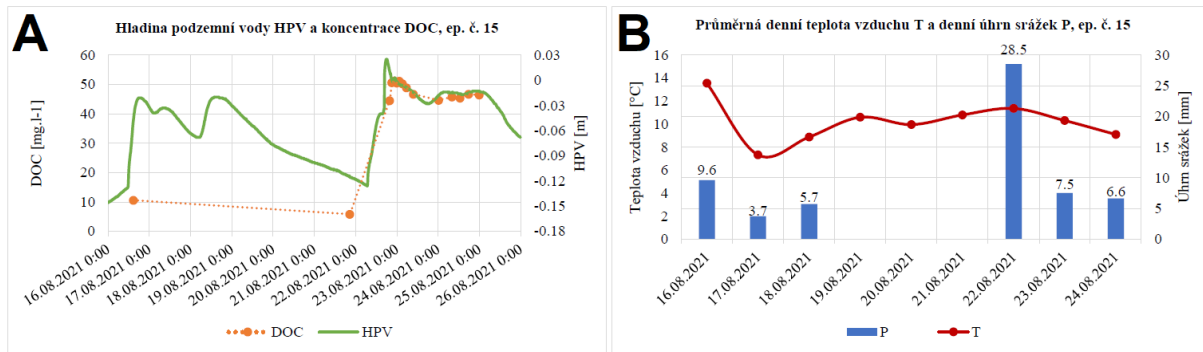
První kategorie zahrnuje epizody, během kterých koncentrace DOC dosáhly svého maxima po dosažení maximálních hodnot průtoku. Epizody, během kterých došlo ke zpoždění DOC_{max} za Q_{max} , jsou charakteristické převážně jednou průtokovou vlnou. U některých epizod, jako například č. 7, může být součástí jedné hlavní průtokové vlny i více dílčích průtokových maxim (tabulka 4).

Tabulka 4: Epizody kategorie zpoždění maximálních koncentrací DOC za maximálním průtokem včetně jednotlivých průtokových vln a dob zpoždění

Číslo epizody	Hlavní průtoková vlna č.	Dílčí průtokové maximum č.	Datum a čas dílčího průtokového maxima	Doba zpoždění
1	1	1	31. 8. 2019, 02:50	7 h 10 min
7	1	1	26. 9. 2020, 04:40	4 h 50 min
		2	26. 9. 2020, 15:00	0 h 50 min
		3	26. 9. 2020, 18:50	5 h 10 min
		4	26. 9. 2020, 19:30	12 h 30 min
9	1	1	12. 3. 2021, 00:10	1 h 40 min
		2	12. 3. 2021, 02:00	10 h 10 min
10	1	1	14. 5. 2021, 00:20	14 h 40 min
13	1	1	5. 8. 2021, 15:20	1 h 10 min
	2	2	8. 8. 2021, 00:00	3 h
14	1	1	8. 8. 2021, 01:40	1 h 10 min
15	1	1	22. 8. 2021, 20:40	1 h 50 min
		2	22. 8. 2021, 23:40	1 h 40 min
	2	3	24. 8. 2021, 03:30	4 h 30 min
		4	24. 8. 2021, 19:30	6 h 40 min
16	1	1	26. 8. 2021, 21:50	1 h 30 min
		2	27. 8. 2021, 04:10	2 h
17	1	1	13. 10. 2021, 0:10	1 h 50 min
18	1	1	6. 10. 2021, 10:40	1 h 30 min

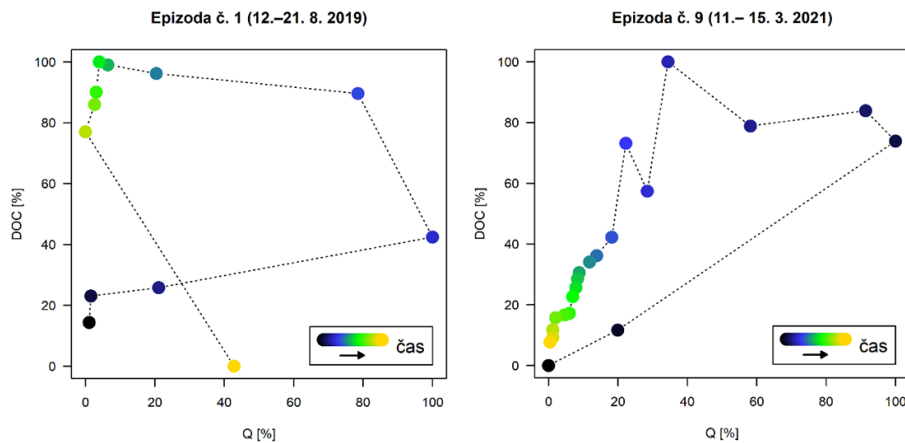
Zdroje dat: KFGG PřF UK, hodnoty tučně značí nejdelší dobu v rámci všech sledovaných epizod.

V případě epizod s více vlnami (13 a 15), proběhly hlavní průtokové vlny s dostatečným časovým odstupem na to, aby se koncentrace DOC stihly nahromadit a následně s narůstajícím průtokem pružně reagovat s časovým zpožděním. Doba mezi těmito hlavními průtokovými vlnami byla 2 až 3 dny. Roli hrály i podmínky v průběhu epizody. Například průměrná HPV byla v průběhu epizody 15 velmi vysoká a napomáhala tak k transportním procesům DOC (obrázek 2A na následující straně). Doba zpoždění maximálních koncentrací DOC za maximálními průtoky se pohybovala nejčastěji do 2 hodin. U epizod 1, 7, 9, 10 a 15 došlo k v rámci všech sledovaných epizod k největšímu časovému zpoždění DOC_{max} za Q_{max} . Větší doba zpoždění mohla být způsobena právě větším počtem dílčích průtokových maxim, která se časově nacházela velmi blízko u sebe, jako v případě epizod 7, 9, 15.



Obrázek 2: **A** Hladina podzemní vody HPV a koncentrace DOC v průběhu epizody 15; **B** Průměrná denní teplota vzduchu T a denní úhrn srážek P – epizoda 15 (zdroj: Bejčková, 2022).

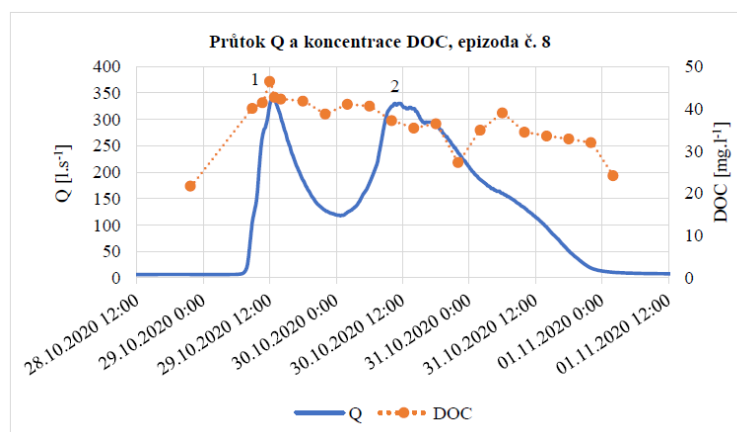
Jelikož se u této kategorie maximální koncentrace DOC projevily se zpožděním za maximálním průtokem, vychází u většiny epizod směřování hysterzezní smyčky proti směru hodinových ručiček. Z následujícího grafu (obrázek 3) znázorňující vybrané hysterzezní smyčky epizod 1 a 9 je patrné, že v první fázi smyčky rostou koncentrace DOC spolu se narůstajícím průtokem. Dále pak s klesajícím průtokem koncentrace DOC po určitou dobu stále rostou (doba zpoždění DOC_{max} za Q_{max}) a v poslední fázi hysterzeze dochází k poklesu průtoku spolu s poklesem koncentrací DOC.



Obrázek 3: Hysterezní smyčky ep. 1 a 9 - kategorie zpoždění DOC_{max} za Q_{max} (zdroj: Bejčková, 2022)

3.2 Maximální koncentrace DOC před kulminací průtoků

Do kategorie maximálních koncentrací DOC, které se vyskytly ještě během vzestupné větve průtokové vlny, byla zahrnuta pouze epizoda 8 (dvě průtoková maxima 29. 10. 2020, 12:40; 30. 10. 2020, 12:30). K časovému zpoždění DOC_{max} za Q_{max} s příchodem srážko-odtokové události během epizody nedošlo, jelikož zde zřejmě hrálo roli ředění DOC srážkovou vodou a také více průtokových vln (obrázek 4).



Obrázek 4: Průtok Q a koncentrace DOC, epizoda č. 8 (zdroj: Bejčková, 2022)

Průměrné průtoky v průběhu epizody dosahovaly zvýšených hodnot ($104 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) a celkové srážky činily 72.7 mm . V průběhu 14 dní před epizodou byly průměrné průtoky nízké ($14 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) a HPV dosahovala také nízkých hladin. V průběhu 14 dnů před událostí tudíž nedošlo k významné srážko-odtokové události a koncentrace organických látek se mohly akumulovat v dostatečném množství. Tento fakt dokládají i průměrné hodnoty DOC v průběhu epizody, které byly po celou dobu epizody zvýšené ($45.64 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) i během klesajícího průtoku po první průtokové vlně.

3.3 Kombinovaný typ chování koncentrace DOC

Tato kategorie zahrnuje kombinaci typu maximálních koncentrací organických látek s časovým zpožděním za maximálním průtokem a zároveň situace, kdy se DOC_{\max} projevily již během vzestupné větve průtokové vlny. Pro epizody zařazené do této kategorie jsou typické události s více hlavními průtokovými vlnami s více dílčími průtokovými maximy.

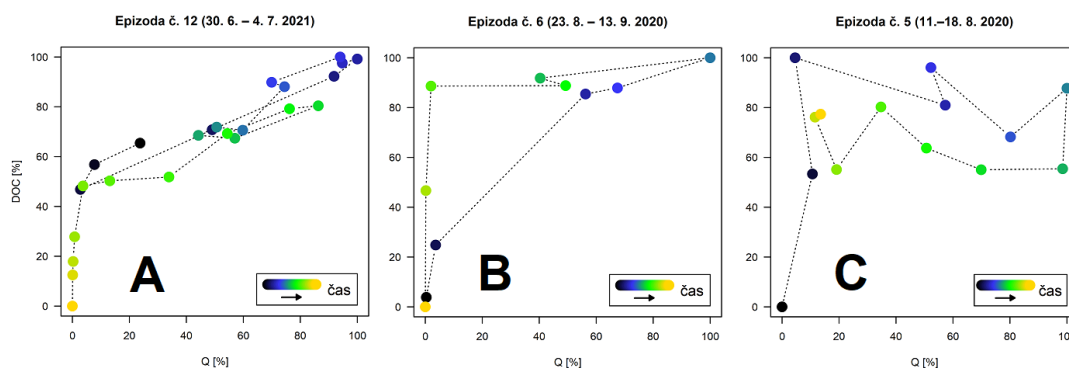
Tabulka 5: Epizody kombinovaného typu koncentrace organických látek

Číslo epizody	Hlavní průtoková vlna č.	Dílčí průtoková maxima č.	Datum a čas dílčího průtokového maxima č.	Doba zpoždění
2	1	1	7. 6. 2020, 22:50	1 h
		2	9. 6. 2020, 17:10	X
	2	3	9. 6. 2020, 23:30	1 h 10 min
		4	10. 6. 2020, 10:30	X
6	1	1	30. 8. 2020, 00:50	X
	2	2	30. 8. 2020, 15:50	4 h 10 min
	3	3	31. 8. 2020, 10:10	X
11	1	1	24. 6. 2021, 00:20	4 h 10 min
		2	25. 6. 2021, 09:30	X
	2	3	25. 6. 2021, 15:40	5 h 50 min
12	1	1	1. 7. 2021, 11:40	1 h 20 min
		2	1. 7. 2021, 19:10	X
		3	2. 7. 2021, 17:50	X
5	1	1	15. 8. 2020, 16:50	2 h 50 min
		2	17. 8. 2020, 17:20	1 h 50 min
	2	3	17. 8. 2020, 21:50	0 h 0 min
		2 (3)	4 (5)	18. 8. 2020, 11:40 (18:20)

Zdroje dat: KFGG PŘF UK; X – DOC_{\max} časově předběhly Q_{\max} nebo na Q_{\max} nereagovaly

Předchozí podmínky bez významné srážky ve většině případů způsobí dobu zpoždění. V případě přítomnosti srážko-odtokové události během epizody se zpoždění DOC_{\max} za Q_{\max} zpravidla dostavuje kvůli zvýšenému množství organických látek transportovaných podzemní vodou z hlubších vrstev rašeliny. Naopak epizody, během kterých nebyla zaznamenána doba zpoždění, jsou charakteristické buď srážko-odtokovou událostí, která nasýtila povodí vodou v předchozích 14 dnech (a tudíž došlo k vyčerpání organických látek) nebo samotnými srážkami, které koncentrace DOC naředily. Další příčinou může být i více dílčích průtokových maxim časově blízko u sebe. V tomto případě se organické látky nestačily včas a v dostatečném množství opět mobilizovat.

U kombinovaného typu vyšlo několik různých typů hysterezních smyček. Pro epizodu 12 byl zjištěn rozptýlený typ hystereze (obrázek 5A). Hysterezní smyčky proti směru hodinových ručiček byly zjištěny u epizody 6 (obrázek 5B) a epizody 11. Poslední typ smyčky (po směru hodinových ručiček) reprezentuje epizoda 5 (obrázek 5C). Z výše uvedeného vyplývá, že v kategorii značící kombinovaný typ epizod z pohledu variability DOC nelze s jistotou určit jeden typ hysterezních smyček, který by ji charakterizoval. Důvodem toho může být malé množství epizod, které tato kategorie zahrnuje.



Obrázek 5: Hysterezní smyčky A epizody 12; B epizody 6 a C epizody 5 (zdroj: Bejčková, 2022)

3.4 Koncentrace DOC sledované mezi srážko-odtokovými událostmi (klidové období)

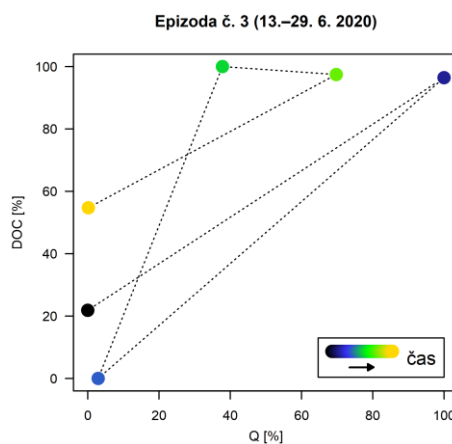
Chování DOC bylo sledováno i v mezidobí za poměrně klidové situace (tabulka 6). Cílem bylo zjištění chování rašeliniště (DOC) v době nízkých průtoků a HPV. Během toho dochází k provzdušňování rašelinišť, mineralizaci a akumulaci organických látek. Tyto epizody byly zasazeny do delšího časového období, aby byly zřejmé změny koncentrací během delšího úseku bez významné srážky.

Tabulka 6: Epizody kategorie klidového období

Číslo epizody	Hlavní průtoková vlna č.	Dílčí průtokové maximum č.	Datum a čas dílčího průtokového maxima	Doba zpoždění
3	1	1	15. 6. 2020, 12:20	X
	2	2	20. 6. 2020, 9:20	4h 20 min
		3	20. 6. 2020, 15:50	X
	3	4	11. 7. 2020, 14:15	X
4	1	1	11. 7. 2020, 14:50	3 h 45 min
	2	2	17. 7. 2020, 3:00	15 h 40min

Zdroje dat: KFGG PřF UK; X – DOC_{max} časově předběhly Q_{max} nebo na Q_{max} nereagovaly

Hysterezní smyčky u kategorie koncentrací DOC sledovaných v klidovém období vyšly u obou epizod ve tvaru osmičky. Tento typ hystereze může značit přítomnost hystereze po směru hodinových ručiček (zvýšení koncentrací DOC na počátku odtokové epizody) i proti směru (nárůst koncentrací po kulminaci a následný pokles). Hysterezní smyčka epizody 3 (obrázek 6) nejprve značila hysterezi po směru hodinových ručiček, což dokazuje fakt, že DOC_{max} časově předběhly Q_{max} . Druhá část hystereze v rámci „osmičky“ vyšla také po směru hodinových ručiček, ačkoliv v případě druhé průtokové vlny došlo ke zpoždění DOC_{max} za Q_{max} .



Obrázek 6: Hysterezní smyčka epizody 3 (zdroj dat: KFGG PřF UK, Bejčková, 2022)

4 Diskuze

Výsledky hodnotící vliv hydrologických extrémů (především vyšších průtoků) na změny koncentrací a variabilitu DOC v experimentálních povodích horní Vydry popisují zejména tzv. epizody, při kterých byly odebrány vzorky povrchové vody pomocí automatických odběráků ISCO na profilech ROK, ROK-R1 a PTA během významných srážko-odtokových událostí. U těchto epizod byl sledován právě vliv vybraných proměnných na variabilitu a množství koncentrací DOC z pohledu předchozích podmínek v intervalu 14 dní před počátkem sledované epizody a také po dobu trvání těchto epizod. Nejprve byla sledována variabilita a doba zpoždění koncentrací organických látek v závislosti na průtoku. Jednotlivé epizody byly dle podobnosti z pohledu variability rozděleny do čtyř kategorií dle výše uvedené metodiky. Na základě této kategorizace bylo zjištěno, že předchozí podmínky způsobující rozdílnou dobu zpoždění DOC_{max} jsou bez významné srážko-odtokové události. Zároveň byla v průběhu epizody HPV snížena, docházelo k provzdušňování rašelinišť, mineralizaci a následně ke zvýšené akumulaci DOC. Toto potvrzují i Bowes et al. (2009) a Bieroza et al., (2015), kteří tvrdí, že doba zpoždění DOC_{max} za Q_{max} může být způsobena právě předchozími podmínkami, v průběhu kterých nedošlo k významné srážko-odtokové události. Přesně tyto podmínky hrály roli i při nástupu nárůstů koncentrací DOC, který trval delší dobu. Doba zpoždění DOC_{max} za Q_{max} se mohla dostavit i v případě výskytu srážko-odtokové události během 14 dní před epizodou. Doba zpoždění DOC_{max} za Q_{max} nastala díky transportu organických látek z hlubších vrstev rašelin pomocí zvýšené HPV, v tomto případě hraje důležitou roli vzdálenost zdrojů organické hmoty (Bowes et al., 2009; Bieroza et al., 2015). Ke zvýšenému transportu organických látek v případě přítomnosti předchozí srážko-odtokové události může následně docházet pomocí vytlačování vody ze spodních vrstev rašelinišť. Tento proces může zapříčinit i delší dobu zpoždění, jelikož jsou organické látky do vodního toku transportovány z hlubších vrstev rašeliny a transportní procesy tak trvají déle (Qassim et al. 2014).

Naopak epizody, během kterých nebyla zaznamenána významná doba zpoždění, jsou charakteristické srážko-odtokovou událostí, jež nasýtila povodí během předchozích 14 dní. Tím došlo k vyčerpání většiny naakumulovaných organických látek ještě před začátkem sledované epizody. Další možností je proces ředění samotnými srážkami v průběhu epizody. Příčinou může být i více dílčích průtokových maxim v rámci jedné průtokové vlny či více těchto vln blízko u sebe. V tomto případě se organické látky nestihly včas a v dostatečném množství mobilizovat, aby mohly zareagovat na průtokovou vlnu se zpožděním. V případě, kdy DOC_{max} časově předběhly Q_{max} , dochází k vyčerpání organických látek dříve nebo se zpoždění nedostaví z důvodu ředění srážkami (Chen & Chang, 2019; Bieroza et al. 2015). Délka doby zpoždění se zkracuje v případě, kdy během předchozího období i v průběhu epizody bylo povodí nasycené a hladina podzemní vody dosahovala vysokých hodnot. Během těchto podmínek došlo k vyčerpání většiny naakumulovaných zásob organických látek, kdy ani spodní vrstvy rašeliniště pomocí HPV nebyly schopny mobilizovat další organické látky. Nicméně, jak již bylo výše zmíněno v případě nasycení povodí, doba zpoždění může být i delší. V tomto případě mohly být podmínky ještě před srážko-odtokovou událostí v době předchozích podmínek sušší (bez výrazné odtokové události) nebo zvýšená HPV neměla vliv na průtok. Dalším vysvětlením může být i roční období, které hraje významnou roli z pohledu samotné dostupnosti organického materiálu (množství DOC), kdy nejvyšší průměrné koncentrace jsou obvykle zaznamenány v létě a na podzim.

Z pohledu dostupnosti a zatížení vodního toku organickým materiálem je velmi důležitým faktorem sezónnost (Jennings et al. 2020). Doba zpoždění se také zkracuje vlivem ředění dešťovými srážkami a táním sněhové pokrývky. Různé doby zpoždění jsou přisuzovány vlhkostním podmínkám, při nasycenosti povodí je doba zpoždění DOC_{max} za Q_{max} kratší (Špringerová, 2019). Transport a množství organických látek ovlivňuje i charakter povodí a lokalizace odběrných profilů. Příkladem jsou epizody na profilu PTA, kde docházelo k tání sněhu. Kromě toho zde hrálo roli i rozmrzávání vrstev půd či doba dotoku vody do odběrného profilu a její ředění. Výsledky hysterezních smyček souzní s výsledky studií Chen et al. (2019) a Vaughan et al. (2017). V případě hystereze proti směru hodinových ručiček dochází ke zpoždění DOC_{max} za Q_{max} . Hystereze po směru hodinových ručiček pak značí fakt, že se DOC_{max} dostavily ještě v průběhu narůstajícího průtoku.

5 Závěr

Z dostupných studií zabývajících se problematikou změn koncentrací organických látek ve vodních tocích přírodních a přírodě blízkých oblastech je zřejmé, že v posledních letech v některých povodích dochází k dlouhodobým nárůstům koncentrací těchto látek. Podle některých autorů za tyto nárůsty může zejména změna klimatu. Ne všechny studie však přisuzují narůstající koncentrace organických látek místním oteplováním, ale spíše zvýšeným atmosférickým depozicím. Zvýšené koncentrace organických látek ve vodních tocích pak následně negativně ovlivňují environmentální i společenské prostředí v dané oblasti. Nejen proto je důležité výrazné změny organických látek sledovat a zabývat se jednotlivými faktory, které je ovlivňují. Tato studie byla primárně zaměřena na sledování změn variability a množství rozpuštěného organického uhlíku (DOC) vzhledem k hydro-klimatickým proměnným daného povodí. Tyto faktory byly sledovány z pohledu předchozích podmínek a také podmínek přímo v průběhu sledovaných epizod. Využita byla naměřená data in situ (teplota vzduchu, průtok, hladina podzemní vody a výška sněhové pokrývky).

Největší vliv na změnu koncentrací a variabilitu organického uhlíku ve vodních tocích měla změna výšky hladiny podzemní vody a průtok. Větší doba zpoždění DOC_{max} za Q_{max} a vyšší průměrné hodnoty koncentrací DOC během epizody nastaly v případě bezesrážkových předchozích podmínek. Významný vliv na množství a dobu zpoždění maximálních koncentrací DOC má i proces ředění (tání sněhové pokrývky, zvýšené úhrny kapalných srážek) či rozmrzávání půd. Zřetelná doba zpoždění byla pozorována i během samotných srážko-odtokových událostí. V těchto případech hrálo roli postupné vyplavování organických látek z jednotlivých vrstev rašeliny díky zvýšené hladině podzemní vody.

V rámci výsledků sledujících variabilitu a množství koncentrací DOC je nutné zohlednit například fyzicko-geografický charakter povodí, odlišnou délku sledovaných epizod, roční období apod. Dále byla sledována podobnost jednotlivých profilů v rámci kampaní z pohledu sledovaných parametrů (teplota vody, DOC, pH, rozpuštěný kyslík, průtok a konduktivita). V tomto případě bylo zjištěno, že největší vliv z pohledu podobností jednotlivých profilů měl DOC, pH, rozpuštěný kyslík, průtok a konduktivita. Naopak teplota vody neměla téměř žádný význam. Stejně jako u sledovaných epizod se i v rámci jednotlivých kampaní potvrdila kladná a silná závislost DOC na průtoku. Dále spolu silně korelovaly například DOC s pH.

Kromě sledování variability a množství koncentrací DOC pomocí Pearsonova korelačního koeficientu a PCA analýzy by bylo nasnadě tyto změny a další procesy spojené s organickými látkami sledovat a ověřovat pomocí nejrůznějších geoprostorových, hydrologických a geochemických modelů. Pomocí těchto modelů by mohly být organické látky sledovány z pohledu kvantifikace jednotlivých příspěvků rozpuštěného organického materiálu uvolněných z různých zdrojových oblastí. Mohl by být sledován i samotný proces transportu v podélném profilu toku. Užití těchto modelů je vhodné porovnávat i s dalšími přístupy, jelikož je nutné brát zřetel na nedostatky (nejistoty), které při jejich užití nastávají. Dále by mohly být předchozí podmínky před sledovanou epizodou sledovány z hlediska delšího časového období. To bylo zmíněno u klasifikace na základě množství koncentrací DOC. Konkrétně se jednalo o kategorii, do které spadaly epizody s vysokými koncentracemi DOC ovlivněné podle PCA analýzy průtokem a hladinou podzemní vody. U této kategorie byly průměrné hodnoty hladiny podzemní vody v době předchozích podmínek velmi vysoké (průměrné průtoky nižší oproti ostatním epizodám), což bylo pravděpodobně způsobeno zvýšenou srážko-odtokovou událostí ještě před více, jak 14 dny před sledovanou epizodou. Zajímavé by bylo kromě současně sledovaných proměnných (průtok, teplota vzduchu, srážky, hladina podzemní vody a výška sněhu) sledovat v průběhu epizod i další parametry, např. teplota vody, intenzita srážek v kratším časovém kroku či evapotranspirace.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu Grantové agentury Univerzity Karlovy (GAUK) č. 1168820: "Hydrologické extrémy a jejich vliv na kvalitu povrchové vody v pramenných oblastech Česka".

6 Zdroje

- Bejčková, M., 2022. *Změny koncentrací organických látek v kontextu hydrologických extrémů v pramenných oblastech*. Diplomová práce, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, p. 154..
- Bieroza, M. Z., Heathwaite A. L., 2015. *Seasonal variation in phosphorus concentration–discharge hysteresis inferred from high-frequency in situ monitoring*, *Journal of Hydrology.*, 524, p. 333–347
- Bowes M. J. et al., 2009. *The value of high-resolution nutrient monitoring: A case study of the River Frome, Dorset, UK*. *J. Hydrol.*, 378, p. 82–96.
- Clay, G. D., et al., 2009. *Effects of managed burning upon dissolved organic carbon (DOC) in soil water and runoff water following a managed burn of a UK blanket bog*. *JoH*, Vol. 367, p. 41-51.
- Evans, C. D., et al., 2005. *Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts*. *Envir. Pollution*, Vol. 137, p. 55-71.
- Fenner, N. et al., 2021. *Effects of Climate Change on Peatland Reservoirs: A DOC Perspective*. *Global Biochemical Cycles*, p. 23.
- Chen, J., Chang, H., 2019. *Dynamics of wet-season turbidity in relation to precipitation, discharge, and landcover in three urbanizing watersheds, Oregon*. *River Res Applic.*, 35, p. 892–904.
- Jennings, E. et al., 2020. *From Highs to Lows: Changes in Dissolved Organic Carbon in a Peatland Catchment and Lake Following Extreme Flow Events*. *Water* 2020, 12, 2843
- Kneale, P. T., McDonald, A. T., 1999. *Bridging the gap between science and management in upland catchments*. In: *Water Quality: Processes and Policy*, John Wiley and Sons, Chichester, p. 121-133.
- Qassim, S. M. et al., 2014. *A 5-year study of the impact of peatland revegetation upon DOC concentrations*. *Journal of Hydrology*, p. 3578-3590.
- R Core Team, 2022. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. <https://rproject.org/>.
- Ramos T. B. et al., 2015. *Sediment and nutrient dynamics during storm events in the Enxoé temporary river, southern Portugal*. *Catena*, 127, p. 177–190.
- Su, Y., et al., 2017. *Geochemical responses of forested catchments to bark beetle infestation: Evidence from high frequency in-stream electrical conductivity monitoring*. *J. of Hydrology*, 550, p. 635-649.
- Špringerová, P., 2019. *Změny koncentrací organického uhlíku v povrchových vodách v pramenných oblastech*. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, p. 147.
- Vaughan M. C. H., 2017. *High-frequency dissolved organic carbon and nitrate measurements reveal differences in storm hysteresis and loading in relation to land cover and seasonality*. *Water Resour. Res.*, 53, p. 5345-5363.
- Xu, J. et al., 2020. *Increased Dissolved Organic Carbon Concentrations in Peat-Fed UK Water Supplies Under Future Climate and Sulfate Deposition Scenarios*. *Water Resources Research*, p. 19.
- Zuecco, G., et al., 2016. *A versatile index to characterize hysteresis between hydrological variables at the runoff event timescale*. *Hydrological Processes*, 30, p 1449-1466.