

# První zkušenosti s měřením retence fosforu na Lhotském potoce metodou TASCC

DANIEL FIALA, PAVEL KOŽENÝ

**Klíčová slova:** fosfor – bilanční modely znečištění – měření retence – malé vodní toky – TASCC

## ABSTRAKT

Eutrofizace vodních toků i nádrží, resp. enormní zatížení vod fosforem, je po několik dekád největším problémem vodního hospodářství v České republice (ČR). Efektivní podporou racionálního řešení jsou bilanční modely povodí, které kromě zdrojů musejí zahrnovat také charakterizaci říční sítě, tj. retenci fosforu v tocích. Přímá metoda měření retence fosforu ve vodním toku za dobře definovaných hydrologických a hydrochemických, popř. hydrobiologických podmínek, tedy metoda poskytující zobecnitelné parametry retence, nám značně chybí a mohla by zásadním způsobem zvýšit přesnost současných modelů. Takový potenciál, zdá se, skýtá metoda TASCC (Tracer Additions for Spiraling Curve Characterization). V článku popisujeme její první aplikaci v ČR, a to na experimentálním povodí Lhotského potoka v okrese Benešov. K prvotnímu testu 21. října 2021 jsme vybrali kanalizovaný 200 m dlouhý úsek, do něhož jsme aplikovali směs roztoků NaCl a  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  a při průtoku 2,3 l/s jsme pomocí vodivostních elektrod sledovali postupující vlnu. Prostřednictvím 20 odebraných vzorků a jejich chemické analýzy (chloridy a fosfor) jsme podle metody TASCC (Covino et al., 2010 [16]) charakterizovali tři parametry tzv. spirálního toku živin, tj. vypočítali jsme délku spirály ( $S_{w\text{ amb}} = 70,8$  [m]); plošný příjem ( $U_{\text{amb}} = 0,000000178$  [mg/m<sup>2</sup>.s]) a rychlost příjmu ( $v_{f\text{ amb}} = 0,00936$  [mm/min]). Výsledné hodnoty jsou v porovnání s literaturou podezřele nízké a v textu uvažujeme o příčinách odchylek. Jednou z nejpravděpodobnějších okolností je vágní formulace „saturační koncentrace“, které je třeba naváženou dávkou dosáhnout. Hlavními přednostmi metody TASCC jsou bezpochyby jednoduchost, bezpečnost a ohleduplnost vůči prostředí. Cílem příspěvku je vyhodnotit využitelnost slibné metody TASCC.

## ÚVOD

Nejenže eutrofizace vodních ekosystémů, tj. řek, jezer a moří, patří stále mezi jejich nejvážnější způsoby degradace, ale její intenzita se nadále prohlubuje, a to jak ve světě, tak v ČR. Je potom lhostejno, zda na ilustrativní podporu úvodního tvrzení použijeme zvětšující se rozsah mrtvých zón v mořích [1], včetně těch, kam ústí naše řeky [2], nejobsáhlejší výkaz stavu vodních útvarů za celý stát nebo nejvážnější příklady ekologických katastrof v Dyji [3] pod Novými Mlýny (na dolní Dyji uhynulo v létě 2022 41,6 tuny ryb 26 druhů od 10 do 250 cm z důvodu „exportu“ desetiletí neřešené eutrofizace nádrže) či na Odře [4] v Polsku a Německu (oficiálně 360 tun ryb, přičemž odborné odhady hovoří o 1 650 tunách, miliony mlžů a plžů nepočítaje; A. Szlauer-Lukaszewska, pers. comm.).

Z pohledu limnologie je přitom situace zcela jasná již déle než půl století [5]. Žel se i přes dávná varování autorit odborných [6] a nedávná varování autorit

právních [7] daří až do dnešní doby tzv. „vrcholným“ úředníkům a tzv. „zodpovědným“ činitelům zájmových organizací efektivní snahy o omezení vstupu fosforu do vod eliminovat. K eliminaci samotného fosforu z odpadních vod bohužel v žádoucí míře stále nedochází, a tak se tento z pohledu evoluce života na planetě klíčový biogenní prvek stále více a déle kumuluje v sedimentech a skrze masové květy sinic a řas působí dlouhodobě značné škody na vodárenských nádržích, v koupacích vodách i chovných rybnících.

Bilanční model povodí by tvořil v racionálně fungující společnosti, kromě obecných zákonů, jejichž základním znakem je vymahatelnost, optimální odborný nástroj užívaný managementem vodního hospodářství k dosažení uzákoněných cílů. Takový model by měl sestavit prioritní seznam bodových zdrojů žádajících si investice v takovém pořadí a výši, aby náklady byly vynaloženy efektivně. A každý model je samozřejmě tak dobrý, jak dobrá jsou jeho vstupní data.

Po mnoha letech vzorkování reprezentativních souborů a systematických průzkumů celých povodí, kdy jsme se z důvodů efektivity soustředili na co nejpřesnější změření zdrojů samotných, tedy vstupů do bilančních modelů, jsme se postupně dostali do fáze, kdy největší slabinou těchto modelů jsou procesy, tj. retence. Pod obecným pojmem retence rozumíme přitom sumu fyzikálních, chemických a biologických procesů, jež jsou samozřejmě odlišné pro stojaté a tekoucí vody. A je pochopitelné, že jednotlivé děje doznaly různé hloubky poznání. Zatímco retence fosforu v nádržích je díky mnoho desetiletí trvajícím úsilím limnologů robustně zobecněna [8], tak retence fosforu v tocích, jakkoli může být významná (obr. 1), je kvůli malé znalosti systematických hodnot mnohdy pouze arbitrárně dopočítávána, nebo v lepších případech parametřována jen velmi homogenně pro rozsáhlá území anebo hydrologický rozsah.

Zároveň platí, že koloběh fosforu v ekosystémech jezer a nádrží byl studován od počátků limnologie s ohledem na tehdy převažující zdroje, tj. „zajišťující“ chronický přísun. Naopak dopad fosforu z občasných, byť významných epizod bez rozlišení, jedná-li se během deště o epizodu erozní nebo odlehčení na jednotné kanalizaci, je mnohem méně probádaný, resp. kvantifikace epizod je mnohem složitější [9], natož zobecnění. V ekosystémech řek je dichotomie obdobná, ale celkové množství přímo naměřených dat je přitom nesrovnatelně menší. Lze tedy na úvod shrnout, že nejslabším místem našich bilančních modelů je v současné době přímo měřená retence fosforu v tocích a nejméně pozornosti se dostalo retenci epizodní.

Jelikož se fosfor – vzhledem k neexistenci plynného skupenství – nikde v říční síti „neztrácí“, ale ani dlouhodobě nekumuluje (nivní louky jsme po funkční stránce od řek také odloučili), není na druhou stranu pro počáteční přiblížení velkou chybou, když se jeho retence z dlouhodobého hlediska „anuluje“. Na tento předpoklad však nesmíme zapomenout v momentě, kdy v modelu konfrontujeme např. roční data z provozního monitoringu s reálnými údaji z povodí, resp. *in-situ* naměřenými koncentracemi. Zatímco vzorkováním máme

obvykle pokryto příslovečných 12 vteřin ročně a doufáme v jejich bezproblematickou extrapolací na 365 dnů, v mezidobí zjevně dochází k násobným až řádovým změnám v dočasné retenci [10]. A zatímco v modelech toků nám obvykle tuto chybu v předpokladu nic reálného nemůže připomenout, u stojatých vod, kde nakonec k významné kumulaci fosforu z takových epizod dochází, jsou to právě sinicové květy, jež dávají jasnou zpětnou vazbu našim teoretickým modelům. Ostatně výsledky každého modelu musejí být řádně interpretovány, což nelze učinit jinak než ústy zodpovědného a hlavně reálného prostředí znalého experta.

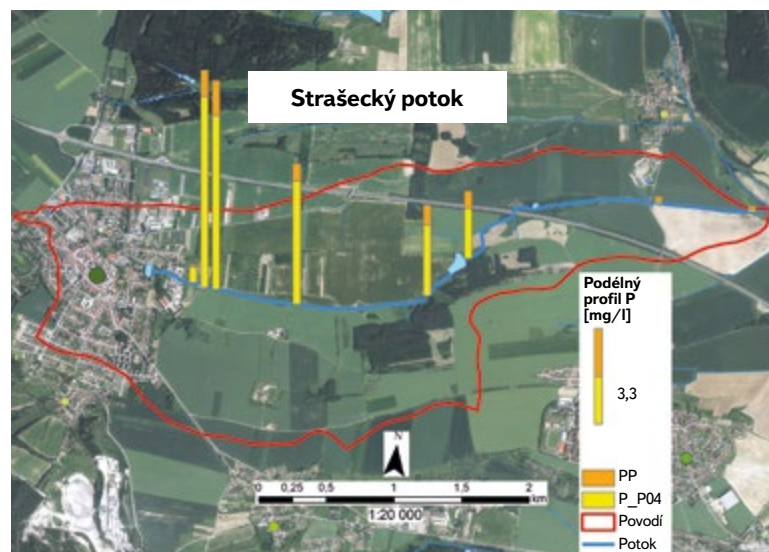
Výše uvedený stav poznání retence fosforu ve vodních ekosystémech je mj. dán historicky dostupnými metodami. Metody založené na stopování radionuklidů jsou mimo laboratoř značně omezené z důvodů zdravotních rizik. Rozdílové měření koncentrací „na začátku“ a „na konci“ zkoumané části ekosystému proto metodám dlouhodobě vévodí. Až formulace a rozvoj „teorie říčního kontinua“ [11] a z ní odvozeného „konceptu spirálního toku živin“ [12] umožnily vývoj nových metod založených na pozorování indukované odezvy celého ekosystému. Ze začátku byly sice použity opět radionuklidy [13], ale zanedlouho byly vyvinuty šetrnější postupy využívající vedle prostých živin také nekonzervativní markery. Bez rozdílu v chemické povaze látek však spočívala první vlna nových metod v dosažení plató hodnot, steady-state rovnováhy, na sledovaném úseku, a to po nezanedbatelně dlouhou dobu. Takový experiment poskytl jednu unikátní hodnotu pro daný úsek. Porovnáním výsledků z různých lokalit vyšlo najevo velké rozpětí tří zjištěných parametrů spirály, délka spirály  $S_w$ , plošný příjem  $U$  a rychlost příjmu  $v_p$  (angl. termíny viz kapitola Metody a lokalita). Následovalo proto metodologické zpřesnění, kdy se během jednoho měření v několika po sobě jdoucích krocích plató koncentrace postupně zvyšovala [14]. Z takto diferencované série měření byly parametry spirály živin extrapolovány směrem k neovlivněným podmínkám s mnohem vyšší přesností. Takovým postupem byl ovšem zkoumaný úsek vystaven v souhrnu tak vysoké zátěži, že někteří autoři pochybovali o věrohodnosti takto získaných dat pro běžné rozsahy požadovaných koncentrací [15].

V metodickém směru je poslední inovací metoda TASC, tedy „Tracer Additions for Spiraling Curve Characterization“ [16], kdy se odezva na známém úseku vodního toku indukuje pouze jednorázovým přidáním (slug injection) směsi obohacujících živin a konzervativního markeru. Na rozdíl od předchozích metod každý dílčí vzorek odebraný z výsledné vlny slouží k výpočtu jedné partikulární hodnoty, resp. odvození tří parametrů spirály ( $S_w$ ,  $U$  a  $v_p$ ), neprobíhá jen interpolací dvou nebo tří bodů (odpovídajících dvěma či třem koncentracím steady-state), nýbrž vypočtením regresní přímky nad rozsáhlou sadou bodů. Takový postup vede nejen k vyšší statistické spolehlivosti, ale hlavně k vyšší faktické přesnosti vypočtených parametrů spirály charakterizujících retenci živin, v našem případě retenci fosforu.

Covino et al. ve své práci [16] přitom důsledně rozlišují tři skupiny parametrů spirály, resp. tři dílčí roviny příjmu živin ( $U$ ), které uvedeným postupem postupně vypočítají a odvodí ( $S_w$  a  $v_p$ ): příjem pozadí (ambient uptake  $U_{amb}$ ) je kýženu cílovou veličinou charakterizující vlastní spirálu řeky v neovlivněných podmínkách, ke které mají všechny metody mířit; příjem dodatkový (added nutrient uptake  $U_{add}$ ) je uměle zvýšená část příjmu způsobená experimentálním přidáním živin, tj. zvýšení příjmu připadající na vrub samotné indukci, a konečně celkový příjem (total uptake  $U_{tot}$ ) je součtem obou uvedených dílčích složek a jedinou hodnotou získanou chemickou analýzou přímo odebraných vzorků. Na rozdíl od celkového příjmu lze dvě dílčí hodnoty pouze matematicky dovodit.

Jako každá metoda má i TASC svá omezení, ale mezi hlavní výhody patří zdravotní bezpečnost (oproti izotopům) a řádově menší zatížení studovaného ekosystému (oproti steady-state metodám). Většina z nemnoha prací, v nichž byla zatím použita [17–26], se sice zabývá retencí dusíku, ale ukazuje uplatnitelnost jak na širším rozsahu velikostí vodních toků, tak na větším geografickém rozšíření.

V ČR metoda TASC zatím nebyla použita, přestože skýtá značný potenciál ve zpřesnění bilančních modelů. Cílem naší studie je tedy implementace metody a posouzení její vhodnosti pro přímé měření retence fosforu v tocích v závislosti na predikovatelných parametrech. V ideálním případě si od metody slibujeme efektivnější dosažení dobrého ekologického stavu – formálně řečeno – neboli ekonomicky úspornější potlačení projevů eutrofizace v našich degradovaných vodních ekosystémech, a to prostřednictvím věrohodnějšího modelování procesů, s. s. retence v hydrografické síti.

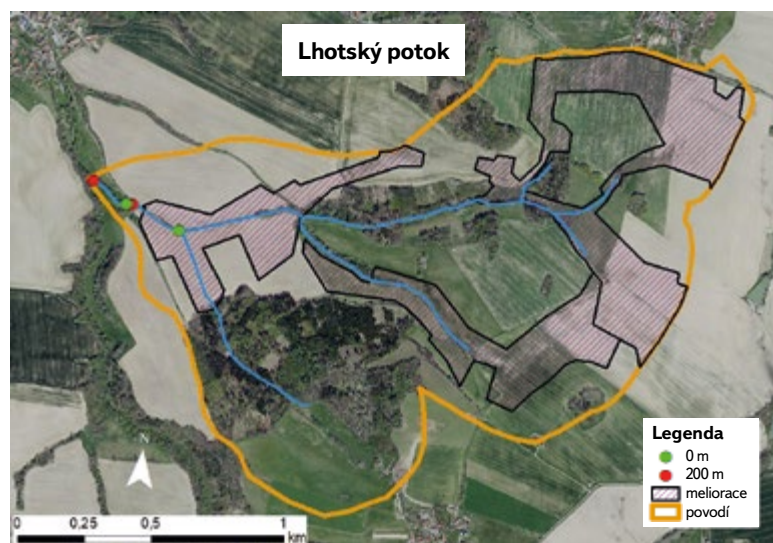


Obr. 1. Příklad výrazné změny koncentrací fosforu v podélném profilu Strašeckého potoka pod Novým Strašecím (5 500 oby.) dne 10. listopadu 2015, kdy 95 % průtoku ve Strašeckém potoce (5,0 km) tvořil odtok z ČOV. Koncentrace celkového fosforu klesala zpočátku jen zvolna, ze 7,4 mg/l na výtoku z ČOV, přes 3,1 mg/l, resp. 2,3 mg/l nad, resp. pod rybníkem Konopas, t. č. zcela vypuštěným. V dolní části potoka byla retence výrazná a koncentrace klesla až na 0,210 mg/l při ústí do Loděnice. Partikulovaný fosfor (PP) je rozdílem celkového fosforu a rozpuštěného reaktivního fosforu ( $PO_4$ -P) Fig. 1. An example of a significant change in phosphorus concentrations in the longitudinal profile downstream from Nové Strašecí (5,500 inhab.) on 10/11/2015 when 95 % of the flow in Strašecký stream (5.0 km) consisted of WWTP discharge. Total phosphorus concentration decreased slightly from 7.4 mg/l in the WWTP outlet to 3.1 mg/l and 2.3 mg/l above and below Konopas pond, respectively, which was drained completely at the time. In the lower part of the stream, retention was significant and the concentration dropped to 0.210 mg/l at the confluence with Loděnice river. Particulate phosphorus (PP) is the difference between total and dissolved reactive phosphorus ( $PO_4$ -P)

## METODY A LOKALITA

Lhotský potok (2. řád dle Strahlera) pramení 8 km východně od Benešova je pravostranným přítokem Petroupimského potoka, jehož vody skrze Benešovský potok ústí u Čerčan do Sázavy. Nejvyšším bodem povodí (2,6 km<sup>2</sup>) je vrch Kochánov (499 m n. m.), zatímco ústí (360 m n. m.) je pouze 1,46 km vzdáleno. Převládajícím půdním typem je modální kambizem na podloží silně zvětralých žul. V povodí (obr. 2) dominuje orná půda (82 %), menšinu zabírá les (8 %) a TTP (4 %). Kvůli vysoké sklonitosti terénu, skeletovitosti půd, zornění, systematické drenáži (29 %) a způsobu hospodaření je povodí pravidelně a dlouhodobě postihováno silnou erozí. Lhotský potok (2,2 km) teče zcela mimo lidská sídla a transportovaný fosfor (P) tak pochází výhradně z plošných zdrojů, kdy rozhodující podíl odnosu P připadá na zemědělskou půdu.

V uzávěrové části povodí (GPS 49° 48'13,192''N; 14° 45'38,902''E) protéká potok dvěma morfologicky výrazně odlišnými pasážemi, jež jsme použili k výzkumu. V horním úseku, dále nazývaném kanál, je potok zcela napřímený, zahluobený se dnem vydlážděným plnými betonovými dlaždicemi. Kromě solitérní skupinky vrbových keřů jsou strmé břehy pokryty pouze pásem bylinné ruderalní vegetace (š. 5–15 m), na dolním konci silně prorostlém rákosem. Ve druhém, dolním úseku, dále nazývaném meandry, se potok naopak klikatí téměř přirozeným korytem v širší nivě a po obou březích jej lemuje souvislý pás hustě zapojené stromové a keřové vegetace (š. 10–20 m). Dno je podle převládajících rychlostí proudu tvořeno různým materiálem od balvanů po hrubý písek. V obou morfologicky odlišných částech koryta jsme vyměřili dva 200 m dlouhé experimentální úseky, které jsou odděleny pouze cestním propustkem a vzdáleny cca 20 m. I když jsme k prvotnímu měření retence P metodou TASCC využili jen kanalizovaný úsek, stejnou vlnu vody obohacenou o stopovací směs jsme sledovali také na přirozeném úseku meandrů, byť pouze prostřednictvím vodivostních elektrod. Z naměřených průběhů vodivosti jsme odvodili postupové rychlosti na obou úsecích. Pro budoucí srovnání retence dvou různých typů koryta tedy předpokládáme, že se oba úseky neliší ani hydrologicky, ani hydrochemicky a nejvýznamnější rozdíl ve zkoumané retenci bude padat na vrub morfologické rozdílnosti.



Obr. 2. Mapa Lhotského potoka s vyznačením obou studovaných úseků (200 m), kde byla měřena zároveň retence fosforu metodou TASCC (horní napřímený úsek ozn. „kanál“), nebo pouze doba dotoku a morfologie koryta (dolní přírodní úsek ozn. „meandry“)  
 Fig. 2. Map of Lhotský stream showing both studied sections (200 m), where phosphorus retention was also measured by TASCC method (upper straightened section „canal“), or only arrival time and morphology of the riverbed (lower natural section „meanders“)

Na základě dlouhodobého pozorování této lokality a pro budoucí srovnání dvou úseků je vhodné podotknout, že na rozdíl od zkanalizovaného úseku je nezpevněné dno přirozeného úseku vydatnými epizodami vysokých průtoků cyklicky intenzivně přetvářeno. V delších obdobích hydrologického klidu se v korytě usazují i jemné sedimenty, jež při delší akumulaci tvoří hlinité až jílovité lavice. Vzhledem k bohatému přísunu listového opadu a spadáných větví zachytávajících se dobře v meandrech a o balvany, se navíc v četných tíšínách na povrchu jemných sedimentů vytváří charakteristická vrstvička sapropelu pokrytá postupně jemným biofilmem. Tyto struktury jsou s přívalovými odtoky odplavovány, samozřejmě spolu s bentosem. Naopak tenký biofilm na horním úseku je vzhledem k vysokému oslunění tvořen charakteristicky pevným

povlakem epilittických řas, které kromě hydrologických změn (scouring) podléhají také sezonní dynamice. Ve výsledku je v meandrující části potoka obvykle mnohem větší plocha aktivních povrchů, kde může probíhat retence, a to jak biologická, tak fyzikálně-chemická.

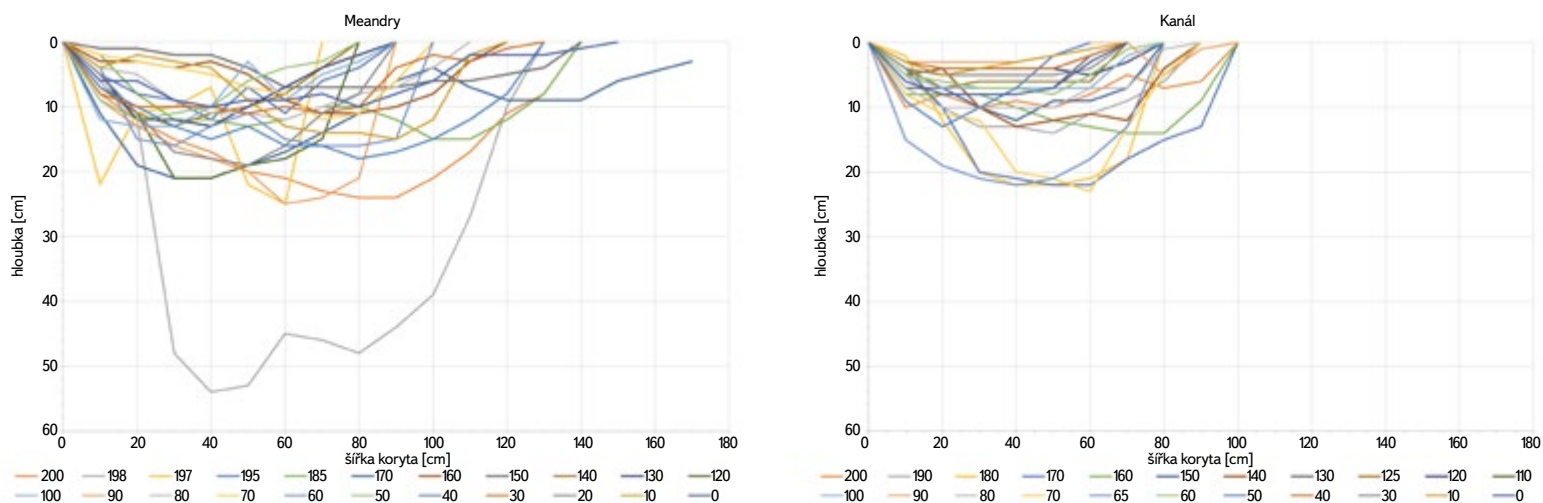
Pro prvotní měření retence fosforu podle metody TASCC [16] jsme do kanalizovaného úseku Lhotského potoka jednorázově přidali směs konzervativní složky (NaCl), sloužící jako vodivostní elektrodou snadno detekovatelná značka, a nekonzervativní složky ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), jejíž retence je vlastním předmětem výzkumu. Množství přidaného fosforu jsme podle doporučení metody volili tak, aby maximální koncentrace na konci měřeného úseku dosáhla doporučené úrovně „saturace“. Saturační koncentrace je formálně odvozena z enzymatické kinetiky podle Michaelis-Mentenové, a odpovídá tedy koncentraci, při níž daná rychlost reakce dosahuje svého maxima. Při praktickém výpočtu parametrů spirály ve vodním toku antropogenně neovlivněném a málo ovlivněném se nicméně udává, že dynamickou koncentraci je třeba zvýšit 2x až 5x, nejvýše 10x nad úroveň koncentrace pozadí [16, 19, 26]. K jejímu výpočtu tak bylo zapotřebí jednak změřit pozadovou hodnotu koncentrace P, stanovenou jako koncentrace rozpuštěných ortofosforečnanů ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ), jednak průtok (Q), ale také dobu dotoku, tj. hydromorfologický charakter vodního toku. Protože poslední dvě charakteristiky podstatně určují průběh „zplošťování“ koncentrační křivky a závisí hlavně na relativním objemu tzv. mrtvých zón (téměř stojaté vody v hlubokých tůňkách a hyporeálu), který lze bez předchozího měření těžko zjistit, oba parametry jsme napoprvé jen hrubě odhadli.

Na podzim, 21. října 2021, jsme provedli experimentální měření retence fosforu pomocí metody TASCC na Lhotském potoce. Ve 200 m dlouhém úseku označeném „kanál“ protékala voda pouze po povrchu betonových dlaždic (průměrná šířka hladiny 74,8 cm), a na retenci fosforu se tak podílela prakticky bezvýhradně sorpce na tuto minimální plochu a v omezené míře také příjem živin sporými nárosty. Jedinou odchylkou od uniformního tvaru koryta byly jedna větší a dvě menší břehové nátrže o souhrnné délce cca 15 m, kde koryto opustilo stavební linii.

Na měřený úsek potoka jsme umístili tři vodivostní sondy (HACH HQ 40d nebo WTW Multi 3320) umožňující automatické uložení dat. První byla pod místem dokonalého promíchání (0 m), druhá v polovině úseku (100 m) a třetí v uzávěrovém profilu (200 m) úseku. Na uzávěrovém profilu jsme pomocí on-line měření vodivosti odebírali sekvenci vzorků (širokohrdlé HDPE vzorkovnice 0,5 l) pokrývající vzestupnou a sestupnou část vlny vodivosti, resp. průchod měnicích se koncentrací a poměrů sledovaných živin a traceru. Časový interval mezi jednotlivými vzorky jsme arbitrárně měnili podle rychlosti měnicích se vodivosti a ve výsledku se pohyboval v rozmezí 5 minut až 30 vteřin. Odběry vzorků jsme ukončili poté, co se indukovaná vodivost ustálila na hodnotě pozadí.

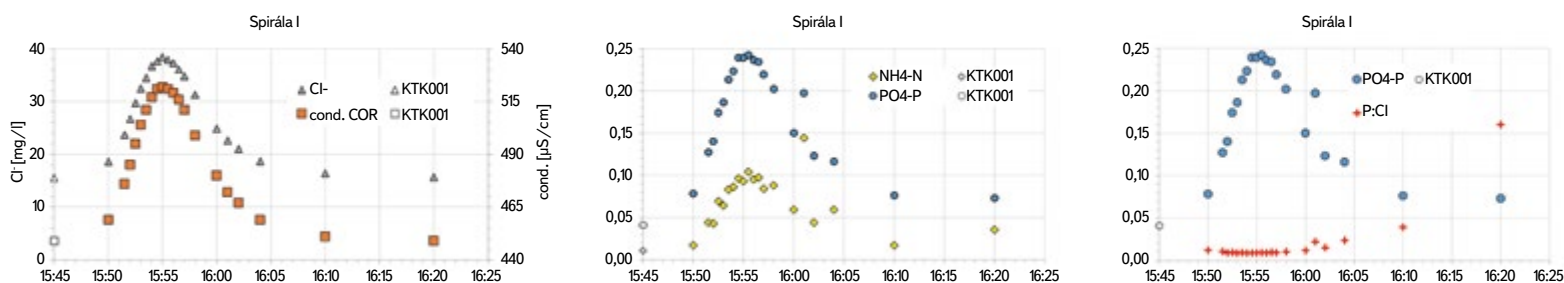
Vzorky pro analýzu živin a chloridů ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , Cl) a pro základní chemický rozbor, jež byly provedeny do 24 hodin v akreditované laboratoři VÚV TGM, byly během transportu chlazeny ledem. Z naměřených hodnot, tedy ze změn poměru úbytku fosforu a chloridů, tj. biologicky aktivní živiny ke konzervativnímu traceru, byly podle metody TASCC [16] v několika matematických krocích (viz rovnice 8–10 v práci Covino et al. [16]) vypočteny všechny tři parametry tzv. spirály. Podle „Nutrient Spiralling Concept“ [13] jde o délku spirály ( $S_w$ ), plošný příjem (U) a rychlost příjmu ( $v_p$ ). Vzhledem k neexistenci českých ekvivalentů uvádíme i jejich anglické názvy spolu s rozměry jednotek: uptake length ( $S_w$ ) [m]; areal uptake (U) [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]; uptake velocity ( $v_p$ ) [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Protože délka spirály ( $S_w$ ), tj. základní parametr udávající teoretickou vzdálenost, na kterou je průměrný atom živiny transportován vodním tokem mezi dvěma body dna od výstupu (popř. uvolnění ze dna) do jeho příjmu (popř. vázní do dna), je mimo samotný proces retence silně ovlivněna průtokem a rychlostí, resp. hloubkou vody v toku, je vhodné, zejména pro účely srovnání různých vodních toků mezi sebou nebo pro srovnání jednotlivých měření prováděných ve stejném vodním toku, ale za různých hydrologických podmínek, zavedení normalizované veličiny, která tyto rozdíly převede na jednotkový



Obr. 3. Rozdíly v základních rozměrech omočené části koryta v horním napřímeném a dolním přirozeném úseku Lhotského potoka; příčný profil hloubek a šířky hladiny byl proměřen každých 10 m od začátku (0 m) do konce (200 m) studovaného úseku, v případě výrazných změn častěji

Fig. 3. Morphological differences of riverbed in the channelized (upper panel) and natural (lower panel) stretch of Lhotský stream; the horizontal profile of the water depth and width was measured every 10 m from the beginning (0 m) to the end (200 m) of the studied section, more often in the case of significant changes



Obr. 4. Koncentrace látek a vodivost na uzávěrovém profilu napřímeného úseku (200 m) zaznamenané v procházející vlně (vylití směsi v 15:20) v porovnání s požadovou hodnotou (KTK001)

Fig. 4. Concentration of substances and conductivity on the cross-section profile of the straightened section (200 m) recorded in the passing wave (pouring of the mixture at 15:20) and compared to background (KTK001)

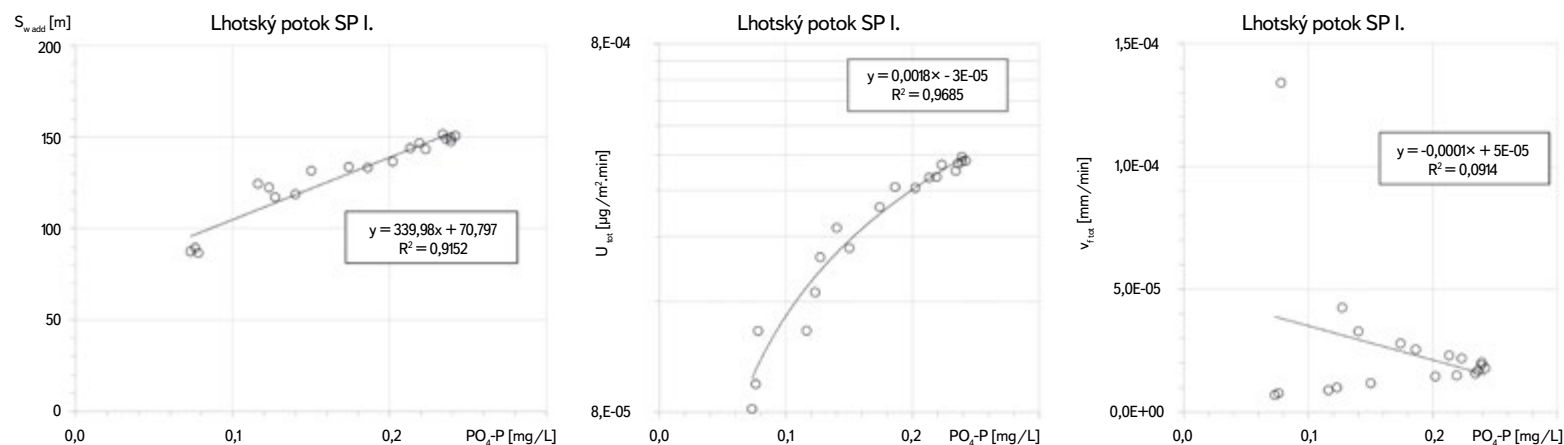
rozměr. Těmito veličinami jsou plošný příjem ( $U$ ) a rychlost příjmu ( $v_p$ ). Zatímco plošný příjem ( $U$ ) udává celkové množství živiny přijaté za jednotku času na jednotkovou plochu dna vodního toku, tak rychlost příjmu ( $v_p$ ) koriguje délku spirály na rychlost proudu a hloubku vody (podrobně viz rovnice 8.6-8.10; Covino a kol. [16], interpretaci a grafický manuál v metodickém návodu [12]), čímž umožňuje vzájemnou srovnatelnost lokalit a období měření retence  $P$ .

Pro výpočet jednotlivých parametrů spirály jsme ještě proměřili morfologii zatopené části koryta (obr. 3), tj. šířku hladiny (příčný profil každých 10 m) a hloubku (každých 10 cm na daném příčném profilu) a vypočetli omočený obvod. Všechny tři parametry spirály, tzv. trojice metrik (angl. metric triad, viz [12]) jsou vzájemně matematicky převoditelné veličiny, a jsou mezi sebou tedy i fakticky těsně provázány. Postupovou rychlost, jedinou veličinu jednoznačně a spolehlivě srovnávající morfologii napřímeného a přírodního úseku potoka za aktuálních hydrologických podmínek, jsme odvodili z doby dotoku, tj. z intervalu mezi maximální vodivostí na prvním (0 m) a posledním profilu (200 m). Průtok ( $Q$ ) byl změřen přímou metodou na měrném přelivu podle Cipolettiho, ex post instalovaném do propustku, tj. mezi oběma úseky. Rozdíly na horním a dolním okraji zkoumané pasáže považujeme za marginální. Měření  $Q$  jsme provedli až po proběhnutí vlny, aby hydraulickým rázem vyvolaným montáží přelivu nedošlo ke změnám retenčních „kapacit“, tj. k mechanickému přeskupení listů, větví a sedimentů.

## VÝSLEDKY A DISKUZE

K měření parametrů spirály jsme použili směs roztoků  $\text{NaCl}$  (cond. = 25,0 mS/cm, 4 l) a  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  ( $\text{PO}_4\text{-P}$  = 152 mg/l, 4 l). Celý objem stopovacího roztoku jsme vylili jednorázově během pěti sekund na šterkovitou peřejku těsně nad měřeným úsekem, abychom zajistili dokonalé promíchání, a přitom nezvířili sediment. Navážku jsme stanovili podle den předem zjištěných koncentrací  $\text{NH}_4\text{-N}$  a  $\text{PO}_4\text{-P}$  v orientačním vzorku (0,019 a 0,024 mg/l) a průtoku (2,4 l/s). Těsně před měřením jsme odebrali tři kontrolní vzorky, a to na začátku a konci napřímeného úseku a na konci úseku meandrů. Pro výpočty parametrů spirály byl jako požadová hodnota  $\text{NH}_4\text{-N}$  a  $\text{PO}_4\text{-P}$  použit vzorek z horního okraje experimentálního úseku (0,010 a 0,041 mg/l), protože prostřední vzorek byl při odběru kontaminován vyplašenou zvěří pohybující se v korytě. Koncentrací fosforu se vzorek odebraný ve třetím, nejnižším položeném profilu lišil od prvního do 5 %. Z hodnot zjištěných při průchodu vlny (obr. 4) je zřejmé, že během experimentu došlo k optimálnímu zvýšení koncentrací o požadovaný dvou až pětinasobek udávaný v literatuře [16, 19, 26].

Při aktuálním průtoku (2,3 l/s) a při logovacím intervalu 10–30 s byla naměřena postupová rychlost 5,76 m/min (0,096 m/s). Výsledný velmi rychlý průchod vlny (35 minut od vylití, resp. od průchodu vlny profilem 0 m do odběru posledního vzorku na profilu 200 m) jsme zachytili celkem 20 vzorky s nejkratším intervalem 30 s okolo maximální vodivosti (obr. 4). Synchronním měřením vodivosti na dolním úseku označeném „meandry“ jsme zjistili výrazně nižší postupovou



Obr. 5. Dílčí hodnoty dynamické délky spirály ( $S_{w-add}$ ), celkového plošného příjmu ( $U_{tot}$ ) a celkové rychlosti příjmu ( $v_{f-tot}$ ) fosforu získané metodou TASC

na zkanalizovaném úseku Lhotského potoka

Fig. 5. Dynamic uptake length ( $S_{w-add}$ ), total areal uptake ( $U_{tot}$ ), and total uptake velocity ( $v_{f-tot}$ ) of phosphorus values obtained by TASC method in the channelized stretch of Lhotský stream

rychlost (3,60 m/min) danou přirozeným charakterem koryta a dokládající už předběžně rozhodující vliv hydromorfologického stavu vodního toku (obr. 3) na retenci P v toku, protože rozdíly ve sklonu koryta jsou minimální.

Integrací koncentrační křivky pomocí lichoběžníkové metody jsme zjistili, že průchodem vlny v napřímeném úseku (200 m) došlo k retenci 353 mg přidaného fosforu (38,8 %) a pouhých 3,0 % přidaných chloridů. Celkový plošný příjem je potom  $U = 0,714$  [mg/m<sup>2</sup>.s], čímž při geometrickém průměru koncentrace korigované na pozadí (0,114 mg/l) obdržíme celkovou rychlost příjmu  $v_f = 0,376$  [mm/min]. Při použití původní metodiky [16] obdržíme extrapolaci pro neindukovaný stav (ambient condition) následující hodnoty parametrů spirály:  $S_{w-amb} = 70,8$  [m];  $U_{amb} = 0,000000178$  [mg/m<sup>2</sup>.s] a  $v_{f-amb} = 0,00936$  [mm/min], což jsou velmi nízké a u posledních dvou veličin prakticky nulové hodnoty.

Vzeme-li v potaz koeficienty variance tří vypočtených parametrů spirály ( $R^2$  pro  $S_w = 0,92$ , pro  $U = 0,97$  a pro  $v_f = 0,13$ ), je navíc zřejmé, že závislost celkové rychlosti příjmu na koncentraci je nevýznamná, zatímco u délky spirály a celkového plošného příjmu je naopak velmi vysoká (obr. 5). I když jsme během měření nepozorovali žádné změny v odtékající vodě (ani zákalu, ani změnu hladiny), náhodnou chybou jsme se přesvědčili o extrémní citlivosti korelace dílčích délek spirály ( $S_w$ ) na koncentraci fosforu, resp. na drobné nepřesnosti způsobené odběrem vzorků. Při odběru dílčího vzorku v čase 16:01 patrně došlo ke zviření jemného sedimentu, protože naměřené koncentrace výrazně vybočují z jinak plynulého průběhu. Následným vynecháním této odlehle hodnoty se korelační koeficient diametrálně zlepšil (z původní hodnoty  $R^2 = 0,73$  na  $R^2 = 0,92$ ).

Ze srovnání s jinými pracemi dále vyplývá, že nejrobustnější hodnota – délka spirály – se nachází na dolní hranici pozorování na málo zatížených lokalitách [26], jinými slovy je velmi krátká. Protože hodnota délky spirály ( $S_w$ ) je silně závislá na aktuálním průtoku, resp. rychlosti proudu a hloubce, používají se ke srovnání lokalit normalizované veličiny plošného příjmu ( $U$ ) a celkové rychlosti příjmu ( $v_f$ ). Ovšem autoři, kteří se jako v našem případě potýkali s jejich netypickými průběhy či hodnotami, uvádějí na vysvětlení diskrepancí zásadní předpoklad, že celá teorie stojící za výpočtem parametrů spirály platí pouze v rozsahu podmínek pod saturací [25, 27], tj. přidání živiny musí významně indukovat její uptake. To by v našem případě znamenalo, chceme-li se vyhnout aplikaci extrémních dávek, že požadované hodnoty jsou příliš vysoké samy o sobě. Takové tvrzení však logicky odporuje zjištěné krátké délce spirály  $S_w$ . Možné je proto dle našeho názoru i jiné vysvětlení, že totiž omezený povrch uměle zkanalizovaného potoka nedisponuje již žádnou další kapacitou k retenci P, a tedy indukce není doprovázena očekávaným zvýšením retence. Poslední spekulativní

příčinou netypických hodnot může být zjevná diskrepance v poměru mezi fosforem a chloridy v tzv. ocasu (tailing) koncentrační vlny (obr. 4 dole), kdy se poměr P : Cl v časech posledních dvou vzorků (16:10 a 16:20) významně zvyšuje. Toto zvýšení zjevně koresponduje s mnohem pozvolnějším ustálením koncentrace fosforu v porovnání s rychlým návratem koncentrací chloridů k pozadovým hodnotám. Za spekulativní označujeme tuto možnost proto, že jsme zdaleka nenabýli dostatek zkušeností s metodou TASC, abychom ji považovali za spolehlivě osvojenou.

Měření retence P metodou TASC simuluje pouze podmínky vyrovnaného a nízkého průtoku, což v našem případě je rozmezí do cca 10 l/s. Jeho výsledky tedy nic nevypovídají o vzájemných poměrech při vysokých průtocích či extrémních odnosech. Během přívalů lze teoreticky uvažovat o zanedbatelném podílu adheze erozních partikulí v biofilmu. Ta bude ovšem velmi limitována prostorově tenkým biofilmem, protože úsek není sycen živinami z komunálního znečištění, a také časově krátkou dobou trvání piků. Navíc bude pravděpodobně docházet během těchto epizod spíše ke strhávání (scouring) biofilmu než k jeho narůstání. V dolním, přirozeném úseku Lhotského potoka lze předpokládat mnohem vyšší retenční kapacitu. Nejen delší doba kontaktu protékající vody a dna, ale hlavně bohatě rozvinutý hyporeál budou pravděpodobně výslednou retenci znásobovat. Domníváme se proto, že teprve další měření srovnávající oba úseky a provedená v různých ročních obdobích poskytnou ucelenější obraz o parametrech spirály, resp. o retenci fosforu na výhradně zemědělském potoce.

## ZÁVĚRY

Za kritickou vlastnost nepříliš rozšířené metody TASC považujeme navážku aplikované dávky, protože bez předchozího měření lze jen těžko odhadovat kýženou saturační koncentraci. Na druhé straně je i jednoduchá anorganická sůl v malém množství znečištěním a z toho plyne velikostní a početní limit proměřených toků. Každopádně oproti metodám využívajícím radionuklidy je metoda TASC zcela bezpečná a na rozdíl od metod využívajících platů koncentrace je celková spotřeba chemických látek zlomková, i když není při eventuálně větším rozšíření metody rozhodně zanedbatelná. Jednoduchost, bezpečnost a ohleduplnost vůči prostředí jsou tedy hlavní výhody této metody. Teprve po vyřešení nejasností stran zvýšení navážky lze přikročit ke srovnání úseků v různém hydromorfologickém stavu, popř. bude možno definitivně rozšířit její aplikaci v podmínkách ČR. Od metody TASC si slibujeme preciznější a hlavně

přímo změřenou charakterizaci retence fosforu v tocích celého státu, pro začátek za průměrných podmínek, resp. při vyrovnaných průtocích. Takto zjištěné hodnoty retence mohou podstatně zpřesnit naše bilanční modely, a tedy zvýšit jejich věrohodnost při projednávání nápravných opatření.

## Poděkování

*Příspěvek byl zpracován za finanční podpory projektu Technologické agentury ČR SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“. Za cenné rady při interpretaci výsledků chemických analýz a zpracování matematického aparátu děkujeme Ing. Ondřeji Tauferovi. Děkujeme také personálu našich laboratoří pod vedením Ing. Lenky Smetanové za osobní nasazení a dvěma anonymním recenzentům, kteří kritickými poznámkami významně přispěli ke kvalitě a jasnosti článku.*

## Literatura

- [1] BREITBURG, D., LEVIN, L. A., OSCHLIES, A., GRÉGOIRE, M., CHAVEZ, F. P., CONLEY, D. J., ZHANG, J. a kol. Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters. *Science*. 2018, 359, 6371.
- [2] CARSTENSEN, J., CONLEY, D. J. Baltic Sea Hypoxia Takes Many Shapes and Sizes. *Limnology and Oceanography Bulletin*. 2019, 28(4), s. 125–129.
- [3] FIALA, D. *Masový úhyn ryb na Dyji v létě 2022 a sinice Aphanizomenon flosaque – příčiny a okolnosti*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2023, s. 82.
- [4] FREE, G., VAN DE BUND, W., GAWLIK, B., VAN WIJK, L., WOOD, M., GUAGNINI, E., STIELSTRA, H a kol. An EU Analysis of the Ecological Disaster in the Oder River of 2022: Lessons Learned and Research-Based Recommendations to Avoid Future Ecological Damage in EU Rivers, a Joint Analysis from DG ENV, JRC and the EEA. *Publications Office of the European Union*. 2023.
- [5] DILLON, P. J., RIGLER, F. H. The Phosphorus-Chlorophyll Relationship in Lakes. *Limnology and Oceanography*. 1974, 19(5), s. 767–776.
- [6] HRBÁČEK, J. Jsou fosfáty hlavní příčinou eutrofizace jezer a přehradních nádrží? *Vesmír*. 1971, 50(4), s. 125.
- [7] PUFAN, G., WELDON, P., RADULESCU, M., VANSILLIETTE, A., COLONERUS, M., GULLOVA, Z., PREISS, I. a kol. *Water Quality in the Danube River Basin: Progress in Implementing the Water Framework Directive but Still Some Way to Go*. Luxembourg: European Court of Auditors, Union, P. O. O. T. E., 2016, s. 86.
- [8] HEJZLAR, J., ŠAMALOVÁ, K., BOERS, P., KRONVANG, B. Modelling Phosphorus Retention in Lakes and Reservoirs. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2006, 6(5–6), s. 487–494.
- [9] ZNACHOR, P., ZAPOMELOVA, E., REHAKOVA, K., NEDOMA, J., SIMEK, K. The Effect of Extreme Rainfall on Summer Succession and Vertical Distribution of Phytoplankton in a Lacustrine Part of a Eutrophic Reservoir. *Aquatic Sciences*. 2008, 70(1), s. 77–86.
- [10] DURAS, J., MARCEL, M., KUBÍK, M., KOŽELUH, M., KOPP, J. Odlehčované odpadní vody – ošklivá stránka hezkých měst. In: KABELKOVÁ, I., BENÁKOVÁ, A., ŠPAČKOVÁ, A., BAREŠ, V. (eds.) *15. biendáň konference CzWA 2023*. B. m.: Asociace pro vodu ČR, 2023, s. 66–73.
- [11] VANNOTE, R. L., MINSHALL, G. W., CUMMINS, K. W., SEDELL, J. R., CUSHING, C. E. River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1980, 37(1), s. 130–137.
- [12] WORKSHOP, S. S. Concepts and Methods for Assessing Solute Dynamics in Stream Ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*. 1990, 9(2), s. 95–119.
- [13] NEWBOLD, J. D., ELWOOD, J. W., O'NEILL, R. V., VAN WINKLE, W. Measuring Nutrient Spiralling in Streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1981, 38(7), s. 860–863.
- [14] PAYN, R. A., WEBSTER, J. R., MULHOLLAND, P. J., VALETT, H. M., DODDS, W. K. Estimation of Stream Nutrient Uptake from Nutrient Addition Experiments. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2005, 3(3), s. 174–182.
- [15] HALL, JR, R. O., BAKER, M. A., ROSI-MARSHALL, E. J., TANK, J. L., NEWBOLD, J. D. Solute-Specific Scaling of Inorganic Nitrogen and Phosphorus Uptake in Streams. *Biogeosciences*. 2013, 10(11), s. 7 323–7 331.
- [16] COVINO, T. P., MCGLYNN, B. L., MCNAMARA, R. A. Tracer Additions for Spiraling Curve Characterization (TASCC): Quantifying Stream Nutrient Uptake Kinetics from Ambient to Saturation. *Limnology and Oceanography: Methods*. 2010, 8(9), s. 484–498.
- [17] ARCE, M. I., VON SCHILLER, D., GOMEZ, R. Variation in Nitrate Uptake and Denitrification Rates across a Salinity Gradient in Mediterranean Semiarid Streams. *Aquatic Sciences*. 2014, 76(2), s. 295–311.
- [18] DIEMER, L. A., MCDOWELL, W. H., WYMORE, A. S., PROKUSHKIN, A. S. Nutrient Uptake along a Fire Gradient in Boreal Streams of Central Siberia. *Freshwater Science*. 2015, 34(4), s. 1 443–1 456.
- [19] RODRIGUEZ-CARDONA, B., WYMORE, A. S., MCDOWELL, W. H. DOC:NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ratios and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Uptake in Forested Headwater Streams. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*. 2016, 121(1), s. 205–217.
- [20] DAY, N. K., HALL, R. O. Ammonium Uptake Kinetics and Nitrification in Mountain Streams. *Freshwater Science*. 2017, 36(1), s. 41–54.

[21] GARCÍA, V. J., GANTES, P., GIMÉNEZ, L., HEGOBURU, C., FERREIRO, N., SABATER, F., FEIJÓO, C. High Nutrient Retention in Chronically Nutrient-Rich Lowland Streams. *Freshwater Science*. 2017, 36(1), s. 26–40.

[22] COVINO, T. P., BERNHARDT, E. S., HEFFERNAN, J. B. Measuring and Interpreting Relationships between Nutrient Supply, Demand, and Limitation. *Freshwater Science*. 2018, 37(3), s. 448–455.

[23] REINALDO FINKLER, N., TROMBONI, F., BOÉCHAT, I. G., GÜCKER, B., GASPARINI FERNANDES CUNHA, D. Nitrogen and Phosphorus Uptake Dynamics in Tropical Cerrado Woodland Streams. *Water*. 2018, 10(8), 1080.

[24] SALTARELLI, W. A., DODDS, W. K., TROMBONI, F., CALIJURI, M. D. C., NERES-LIMA, V., JORDÃO, C. E., CUNHA, D. G. F. a kol. Variation of Stream Metabolism along a Tropical Environmental Gradient: Stream Metabolism Variation. *Journal of Limnology*. 2018, 77(3).

[25] WEIGELHOFER, G., RAMIÃO, J. P., PURITSCHER, A., HEIN, T. How Do Chronic Nutrient Loading and the Duration of Nutrient Pulses Affect Nutrient Uptake in Headwater Streams? *Biogeochemistry*. 2018, 141(2), s. 249–263.

[26] CUNHA, D. G. F., FINKLER, N. R., GÓMEZ, N., COCHERO, J., DONADELLI, J. L., SALTARELLI, W. A., THOMAS, S. A. a kol. Agriculture Influences Ammonium and Soluble Reactive Phosphorus Retention in South American Headwater Streams. *Ecohydrology*. 2020, 13(2), e2184.

[27] WEIGELHOFER, G. The Potential of Agricultural Headwater Streams to Retain Soluble Reactive Phosphorus. *Hydrobiologia*. 2017, 793(1), s. 149–160.

## Autoři

**Mgr. Daniel Fiala**

✉ [daniel.fiala@vuv.cz](mailto:daniel.fiala@vuv.cz)

ORCID: 0000-0003-0047-870

**Mgr. Pavel Kožený**

✉ [pavel.kozeny@vuv.cz](mailto:pavel.kozeny@vuv.cz)

ORCID: 0000-0002-6091-4205

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2023.11.005

## FIRST EXPERIENCE WITH MEASUREMENT OF PHOSPHORUS RETENTION IN LHOTSKÝ STREAM USING TASCC METHOD

FIALA, D.; KOŽENÝ, P.

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

**Keywords:** phosphorus — pollution budget models — retention measurement — headwaters — TASCC

Eutrophication of watercourses and reservoirs, specifically the enormous phosphorus load on water, has been the biggest problem of water management in the Czech Republic for several decades. Budget models as effective support for rational solution, must also include, in addition to resources, the characterization of the river network, i.e. the retention of phosphorus in streams. A direct method for measuring phosphorus retention in the stream under well-defined conditions, i.e. a method providing generalizable retention parameters, is fundamentally lacking and could significantly increase the accuracy of our current models. Such potential, it seems, is offered by the TASCC method (Tracer Additions for Spiraling Curve Characterization). In this article, we describe its first application in the Czech Republic, namely in the experimental catchment of Lhotský stream (Benešov district). On October 21, 2021, we selected a 200 m long channelized section, into which we applied a mixture of NaCl and  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  solutions. Using conductivity probes we monitored the advancing wave at a flow rate of 2.3 l/s. In total 20 samples were analysed for chlorides and phosphorus, and helped us to characterize three parameters of the nutrient spiralling. According to the TASCC method (Covino et al. [16]), we calculated the spiral length ( $S_{w_{amb}} = 70.8$  [m]); areal uptake ( $U_{amb} = 0.000000178$  [mg/m<sup>2</sup>.s]) and uptake velocity ( $v_{f_{amb}} = 0.00936$  [mm/min]). The resulting values are suspiciously low compared to the literature and the causes of the deviations are considered in the article. One of the most likely circumstances is the vague definition of the “saturation concentration” that needs to be achieved with dose. Undoubtedly the main advantages of the TASCC method are simplicity, safety and environmental friendliness. The aim of the paper is to evaluate the applicability of the promising TASCC method for water management in the Czech Republic.

