

METODY VYHODNOCENÍ VLIVU EROZE ZEMĚDĚLSKÉ PŮDY NA EUTROFIZACI VODNÍCH ÚTVARŮ

Barbora Jáchymová, Josef Krása

Katedra hydromeliace a krajinného inženýrství, Fakulta stavební ČVUT v Praze

barbora.jachymova@fsv.cvut.cz

Souhrn

Soil erosion by water results in intensive soil particle transport by surface runoff into water bodies. Transported soil material is usually significantly enriched with nutrients. Nutrients supplied into water bodies can cause their eutrophication due to disrupting nutrient equilibrium. The dissolved phosphorus transport, which is the essential phosphorus form in terms of water bodies' protection, due to its bio-availability, can be described in different ways. This article compares dissolved phosphorus amount transported during 14 rainfall-runoff events calculated by two models with directly measured dissolved phosphorus transport within in-situ synthetic rainfall-runoff experiments.

Klíčová slova: Soil erosion, dissolved phosphorus, eutrophication

Úvod

Fosfor je jeden z hlavních faktorů ovlivňující eutrofizaci vodních útvarů [1], [2]. Omezení emisí fosforu z různých zdrojů v povodí je klíčové pro zajištění ochrany kvality povrchových vod a udržitelného využití povodí [3], [4], [5].

Vodní eroze spočívá v rozrušování půdního povrchu působením dešťových kapek a následně vzniklým povrchovým odtokem [6], [7]. Transportovaný materiál je zpravidla silně obohacen o živiny. Obsahuje větší množství těchto látek než původní půda. Důvodem je skutečnost, že větší část živin se nachází v horní vrstvě půdy, navázána na jemnou (snadno erodovatelnou) frakci. Přísun těchto sloučenin do vody může způsobovat zhoršení její kvality, voda se může stát toxickou pro živé organismy. Eutrofizace – nekontrolovaný nárůst organického materiálu ve vodě je významným problémem v České republice i v zahraničí.

Celkový fosfor (TP) v povrchovém odtoku během srážko-odtokové události se vyskytuje ve dvou formách: rozpuštěný fosfor (DP) a fosfor vázaný na částice (PP). Obě formy se z hlediska eutrofizace významně liší [8]. DP je pro rostliny snadno přístupný, a proto je jeho transport klíčový z hlediska ochrany vodních útvarů. Eutrofizační potenciál erodovaných a transportovaných půdních částic (jejich schopnost uvolnit, nebo naopak navázat fosfor) se ukazuje jako zásadní z hlediska vlivu eroze na eutrofizaci vodních útvarů [9].

V publikovaných studiích se obvyklý postup určení erozního odtoku DP skládá z (i) výpočtu ztráty půdy, (ii) výpočtu „poměru obohacení“ a (iii) aplikace podílu DP v TP uváděného v literatuře.

Poměr obohacení (ER) je poměr mezi obsahem živiny v erodovaném materiálu a jejím obsahem v původní půdě. Rovnice odvozená pro výpočet ER [10] je nejpoužívanější metodou pro stanovení transportovaného množství TP. Podíl DP v TP je třeba stanovit následně, nezávisle na vypočteném množství TP.

V rozsáhlé studii [11] byl sledován podíl DP v TP. V povrchovém odtoku z konvenčně obhospodařovaných pozemků s různým stupněm hnojení se hodnoty podílu DP v TP pohybovaly od 3,5 do 19,3%. Tento podíl významně závisí na srážkové intenzitě, koncentraci fosforu v půdě nebo přítomnosti a stavu vegetačního krytu [12], [13], [14]. V podmínkách České republiky byl podíl DP v TP v povrchovém odtoku sledován v rámci studie v povodí Lhotského potoka [15], kde během srážko-odtokových experimentů nepřesáhl podíl DP v TP 3%.

Nově odvozená metoda určuje transportované množství DP pomocí tzv. eutrofizačního potenciálu erodovaných částic. Eutrofizační potenciál půdních částic závisí na poměru mezi koncentrací P_{M3} (obsah přístupného fosforu, určený metodou Mehlich III [16]) v půdě a koncentrací DP v dotčeném recipientu [17]. Tato metoda byla odvozena k určení množství DP, které se uvolní/naváže z půdních částic v erozním odtoku do vodního toku. Koncentrace nerozpuštěných látek v analyzovaných vzorcích byla

10 g/l. Uvolněné/navázané množství DP bylo určováno při dosažení rovnovážného stavu (po 72 hodinách).

Příspěvek prezentuje výsledky 14 umělých srážko-odtokových epizod zaměřených na transport fosforu. Měřený podíl DP v TP je porovnáván s hodnotami publikovanými v literatuře. Hlavním cílem příspěvku je testování nové metody výpočtu transportovaného množství DP pomocí eutrofizačního potenciálu. Pro jednotlivé srážko-odtokové epizody je pomocí dvou metod výpočtu stanoven celkový odtok DP. Vypočtené hodnoty jsou porovnány s transportovaným množstvím DP určeným dle přímo měřených koncentrací DP v povrchovém odtoku.

Na rozdíl od experimentů realizovaných při odvozování nové metody byla koncentrace nerozpuštěných látek v odtoku velmi variabilní (odlišná od hodnoty 10 g/l) a vzorky vody a povrchového odtoku byly fixovány pomocí HNO_3 a analyzovány během 24 hodin. Detailní postupy výpočtu jsou rozepsány v dalších kapitolách.

Materiál a metody

Lokalita

In-situ experimenty byly realizovány ve dvou lokalitách. Experimenty (Tabulka 1: A-J) byly realizovány v povodí Býkovického potoka. Tato lokalita se nachází ve středních Čechách nedaleko města Benešov. Jedná se o zemědělsky využívané povodí s rozlohou více než 700 ha. Od roku 2009 jsou zde umístěny stabilní experimentální plochy pro měření srážko-odtokových vztahů a transportních procesů. V roce 2012 byla v povodí vybrána lokalita, na které byly provedeny opakované experimenty s polním dešťovým simulátorem. Povodí Býkovického potoka spadá do mírně teplého, mírně vlhkého klimatického regionu [18]. Průměrný roční srážkový úhrn se pohybuje mezi 550 a 750 mm [19]. Oblast je intenzivně zemědělsky využívána. Na pozemcích je aplikováno konvenční zemědělství. V místě experimentu byla na základě odebraných půdních vzorků analyzována písčitohlinitá půda. Koncentrace celkového fosforu v půdě je 1000 - 3200 mg/kg.

Druhou lokalitou (Tabulka 1: K-M), je území HOAL v rakouském Petzenkirchenu. Jedná se o malé experimentální povodí v předhůří Alp [20]. Tato lokalita je charakterizována intenzivním využitím území, půdou se středním až vysokým obsahem jemných částic a průměrným ročním úhrnem srážek okolo 800 mm. Experimenty realizované v tomto povodí doplňují sadu měření z Býkovického povodí o charakteristiky odtoku a transportu fosforu z ploch s řídkou vegetací krátce po osetí.

Dešťový simulátor

Popisované experimenty byly realizovány na dvou dešťových simulátorech. In-situ experimenty byly realizovány s využitím mobilního dešťového simulátoru, jedna simulace pak byla realizována v laboratoři pomocí laboratorního dešťového simulátoru.

Mobilní dešťový simulátor produkuje syntetickou srážku s maximální intenzitou 120 mm/hod. Čtyři trysky FullJet 40WSQ (od společnosti Spraying System [21]) produkující srážku s parametry přírodního deště (velikost kapek více než 2 mm) jsou umístěny 2,65 m nad zadešťovanou plochou 2,4 m od sebe. Experimentální plocha s rozměry 8 x 2 m je orientována delší stranou ve směru sklonu svahu. Během prezentovaných experimentů se intenzita srážky pohybovala od 37 do 69 mm/hod (Tabulka 1) a slon svahu byl 9°.

Laboratorní dešťový simulátor produkuje syntetickou srážku s intenzitou 20-80 mm/hod. Hlavní předností tohoto zařízení je nastavitelný sklon v rozmezí 0 až 8°. Trysky jsou umístěny ve výšce 2,4 m nad půdním povrchem. Experimentální plocha je 4 m dlouhá a 0,9 m široká. Během popisovaných experimentů byly použity trysky typu VeeJet 80100 (od společnosti Spraying System [21]). Intenzita srážky byla 40 mm/hod a sklon experimentální plochy 4°.

Experimenty, odběr vzorků

Během prezentovaných experimentů byl měřen průběh a celkový objem povrchového odtoku a celkové množství transportovaného půdního materiálu. Spolu s tímto měřením byly odebrány vzorky odtoku, které byly analyzovány z hlediska koncentrace celkového a rozpuštěného fosforu. Byl odebírán filtrovaný

vzorek (filtr 0,45 µm) pro stanovení koncentrace rozpuštěného fosforu a nefiltrovaný vzorek odtoku pro stanovení koncentrace celkového fosforu metodou IPC - ICP (Inductively coupled plasma mass spectrometry [22]. Zároveň byl odebrán směsný vzorek půdy před každým experimentem pro stanovení koncentrace celkového a biologicky dostupného fosforu (dle metody Mehlich III [16]), aby bylo možné provést komplexní popis fosforové bilance během srážko-odtokové události. Spolu se vzorky povrchového odtoku byly analyzovány také vzorky vody, která byla pro simulaci využita, ve kterých byla stanovena koncentrace celkového i rozpuštěného fosforu.

Metoda 1 - stanovení transportu DP z měřených dat

Během experimentů jsou odebírány vzorky vody z vodního toku a povrchového odtoku, které jsou následně analyzovány z hlediska koncentrace DP. Množství DP uvolněné do povrchového odtoku a následně transportováno do vodního toku je stanoveno jako rozdíl mezi koncentrací DP v povrchovém odtoku a koncentrací DP ve vodě, která byla pro experimenty využita podle rovnice (1):

$$DP_{SR} = DP_M - DP_W \quad (1)$$

kde:

DP_{SR} – koncentrace rozpuštěného fosforu v povrchovém odtoku [mg/l]

DP_M – měřený odtok rozpuštěného fosforu [mg/l]

DP_W – koncentrace rozpuštěného fosforu ve vodě využité pro simulaci [mg/l]

Celkové transportované množství DP povrchovým odtokem je následně vypočteno podle rovnice (2):

$$DP = DP_{SR} \cdot V_{SR} \quad (2)$$

kde:

DP – transportované množství rozpuštěného fosforu [mg],

DP_{SR} – koncentrace rozpuštěného fosforu v povrchovém odtoku [mg/l],

V_{SR} – objem povrchového odtoku [l]

Metoda 2 - poměr obohacení

Druhý způsob využívá tzv. poměr obohacení smyvu celkovým fosforem, který je dán následujícím vztahem [14]:

$$\ln(ER) = 1,21 - 0,16 \cdot \ln(G) \quad (3)$$

kde:

ER - poměr obohacení [-]

G - ztráta půdy během epizody [kg/ha]

Tento vztah dává do souvislosti intenzitu erozní události a množství celkového fosforu, které je spolu s tímto materiálem transportováno. Rovnice byla experimentálně odvozena pro jednotlivé srážko-odtokové a erozní epizody. V současné době je však z důvodu nedostatku jiných, vhodnějších postupů využívána také pro určení dlouhodobého odnosu fosforu z povodí.

Průměrná roční ztráta fosforu v řešeném povodí je pak vypočtena dle vztahu [23]:

$$GP = G \cdot PT \cdot ER \quad (4)$$

Kde:

G - průměrná roční ztráta půdy [t/ha/rok]

PT - TP koncentrace v půdě [mg/kg]

ER - poměr obohacení [-]

Tímto způsobem byla v rámci projektu (QI102A265) stanovena průměrná roční ztráta fosforu v povodí. Tato metoda zahrnuje řadu zjednodušení, které mohou způsobit nepřesnost výsledků. Sharpleyho vztah

odvozený pro jednotlivé srážko-odtokové epizody je následně doplněn rovnicí (4), která byla sestavena pro výpočet průměrné roční ztráty fosforu. V rámci vyhodnocení experimentů je tato rovnice využita i pro jednotlivé epizody. Nejistotu výsledků vytváří i paušální určení podílu rozpuštěného fosforu ve smyvu jako 5% z celkového fosforu ve smyvu. Tento podíl je značně závislý na půdních vlastnostech i způsobu hospodaření v povodí [11], [15], což potvrzuje i značně odlišný podíl rozpuštěného fosforu na dvou typech experimentálních ploch - pšenice, úhor. Z tohoto důvodu byla tato metoda pro výpočet transportu DP aplikována ve dvou variantách. První varianta uvažuje pro všechny experimenty podíl DP/TP 5%, druhá varianta vychází z průměrných hodnot podílu DP/TP pro tři různé typy půdního povrchu vyskytující se v rámci prezentovaných experimentů.

Metoda 3 - eutrofizační potenciál

Rozpuštěný fosfor je pro rostliny snadno přístupný. V případě erodovaných půdních částic je proto třeba stanovit jejich tzv. eutrofizační potenciál – schopnost erodované částice uvolnit nebo navázat rozpuštěný fosfor [17]. Poměr mezi koncentrací P_{M3} v půdě a koncentrací DP v recipientu je zásadní z hlediska eutrofizačního potenciálu erodovaných částic. V rámci projektu Q1102A265 byla odvozena metoda pro přímé stanovení množství DP vstupujícího do vodních útvarů [17], [24]. Na základě této metody je možné stanovit množství DP, které se z erodovaných částic uvolní do vody na základě známé koncentrace DP v recipientu a koncentrace P_{M3} v erodované půdě podle rovnic (5), (6) a (7) [24]:

$$P_a = -1 \cdot (A \cdot P_{M3} + B) \quad (5)$$

kde:

- P_a - koncentrace rozpuštěného fosforu, která se uvolní z erodované částice [mg/g]
- P_{M3} - biologicky přístupný fosfor v půdě (dle Melich III) [mg/g]
- A, B - koeficienty vypočtené podle rovnic (6) a (7) [24]:

$$A = 0,2248 \cdot (PO_4 - P)^2 - 0,6792 \cdot (PO_4 - P) - 0,5734 \quad (6)$$

$$B = -0,1043 \cdot (PO_4 - P)^2 + 0,3006 \cdot (PO_4 - P) - 0,0002 \quad (7)$$

kde:

- $PO_4\text{-}P$ - $PO_4\text{-}P$ koncentrace v recipientu [mg/l]

Tato metoda umožňuje určit uvolněné/navázané množství rozpuštěného fosforu z erodovaných částic pro každý úsek vodního toku a celkové množství rozpuštěného fosforu, které se uvolní z erodovaného materiálu do vodních toků v povodí.

Výsledky

Během tří let (2012 – 2014) bylo realizováno 14 syntetických srážko-odtokových událostí zaměřených na sledování transportu nerozpuštěných látek a fosforu. Parametry těchto experimentů jsou shrnuty v Tabulce 1.

Tabulka 1 – Charakteristiky experimentů realizovaných během let 2012 - 2014

experiment	lokalita	počet vzorků	půdní povrch	experimentální plocha [m ²]	intenzita srážky [mm/h]
A	Býkovice	1	kultivovaný úhor	16	37
B	Býkovice	1	kultivovaný úhor	16	39
C	Býkovice	5	kultivovaný úhor	16	52
D	Býkovice	5	kultivovaný úhor	16	58
E	Býkovice	5	kultivovaný úhor	16	66
F	Býkovice	1	oves	16	39
G	Býkovice	1	pšenice	16	69
H	Býkovice	1	pšenice	16	39
I	Býkovice	1	pšenice	16	64
J	Býkovice	3	pšenice	16	63
K	Petzenkirchen (Rakousko)	2	řídká vegetace krátce po osetí	16	37
L	Petzenkirchen (Rakousko)	2	řídká vegetace krátce po osetí	16	39
M	Petzenkirchen (Rakousko)	2	řídká vegetace krátce po osetí	16	65
N	laboratoř ČVUT	5	kultivovaný úhor	3,6	40

Transport fosforu během experimentů

Prezentované experimenty se vzájemně odlišují v řadě parametrů, které více či méně ovlivňují průběh srážko-odtokového a erozního procesu a jeho charakteristiky (Tabulka 1). Srážko-odtokové události se liší intenzitou srážky, počtem odebraných a analyzovaných vzorků povrchového odtoku, přítomností a stavem vegetačního krytu i velikostí zadešťované plochy. Popisované experimenty se rovněž odlišují měřenou koncentrací TP a P_{M3} v půdě. Tato variabilita vstupních parametrů na jedné straně snižuje reprezentativnost měřených dat, ale na druhé straně umožňuje porovnat vliv charakteristik srážky, povrchového odtoku a stavu půdního povrchu z hlediska odtoku nerozpuštěných látek, celkového i rozpuštěného fosforu, a to i přes relativně nízký počet realizovaných experimentů a odebraných a analyzovaných vzorků půdy i odtoku.

Měřená data (viz Tabulka 2) ukazují významný vliv vegetačního krytu na celkové množství erodovaného a transportovaného materiálu a následně na koncentraci nerozpuštěných látek v povrchovém odtoku. Koncentrace TP v analyzovaných vzorcích se pro jednotlivé experimenty výrazně odlišuje (viz Obr. 1). Hodnoty kolísají v rozsahu 0,02 až 34,03 mg/l, průměrná koncentrace TP v odtoku je 13,29 mg/l. Naopak přítomnost vegetace nemá významný vliv na celkový objem povrchového odtoku. Rovněž koncentrace DP v odtoku se během experimentu ani v závislosti na přítomnosti nebo stavu vegetace významně nemění (viz Obr. 1). Průměrná hodnota koncentrace DP v povrchovém odtoku je 0,18 mg/l.

Tyto skutečnosti způsobují vysokou variabilitu podílu DP v TP. V rámci experimentů realizovaných na kultivovaném úhoru (Tabulka 2: A – E, N) nepřesahuje podíl DP v TP 5%. Průměrná hodnota podílu DP měřená během těchto experimentů je 1,8% (viz Tabulka 3).

Odtok z ploch s vegetačním krytem je z hlediska transportu fosforu zcela odlišný (Tabulka 2: F – J). Podíl DP v TP se pohybuje od 7,2 do 27,8% a průměrná hodnota podílu DP v TP v povrchovém odtoku z plochy s vegetačním krytem je 19,8%. Experimenty v lokalitě HOAL v Rakousku (Tabulka 2: K – M) tvoří specifickou skupinu experimentů. Během těchto epizod byla půda chráněna řídkou vegetací krátce po osetí. Z tohoto důvodu je ochranný účinek vegetace významně nižší. Podíl DP měřený během těchto experimentů se pohybuje od 0,6 do 5,8% a průměrná hodnota je 2,4% (Tabulka 3).

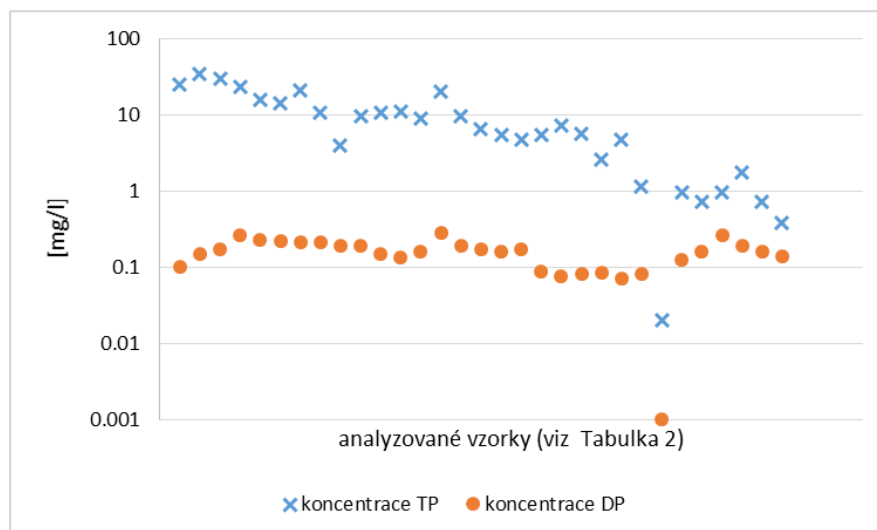
Podíl DP v TP v povrchovém odtoku je výrazně spjat s přítomností a stavem vegetace, respektive s koncentrací nerozpuštěných látek v povrchovém odtoku. V případě experimentů s nízkou koncentrací nerozpuštěných látek v povrchovém odtoku (experimenty s vegetačním krytem na experimentální ploše) byl měřen vysoký podíl DP v TP v povrchovém odtoku. V případě experimentů realizovaných na kultivovaném úhoru je naopak zastoupení DP v TP v povrchovém odtoku výrazně nižší (viz Obrázek 2), a to vlivem podstatně vyšší koncentrace nerozpuštěných látek a na ně vázaného TP v povrchovém odtoku.

Tabulka 2 – Měřené hodnoty během popisovaných experimentů

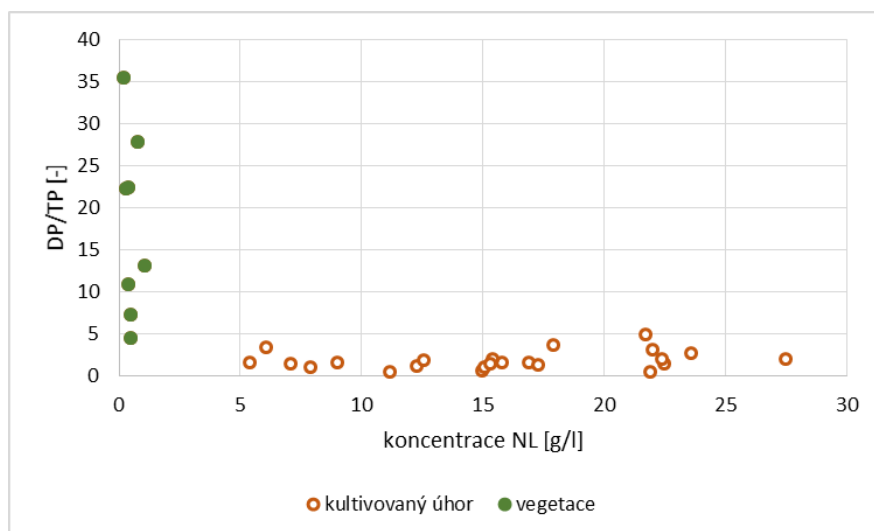
Charakteristika experimentu	TP [mg/l]	DP [mg/l]	DP/TP [-]	konc. NL [g/l]	Charakteristika experimentu	TP [mg/l]	DP [mg/l]	DP/TP [-]	konc. NL [g/l]
Kultivovaný úhor	24.52	0.099	0.4	11.2	Kultivovaný úhor	5.35	0.161	3	22
	34.03	0.147	0.4	21.9		4.77	0.172	3.6	17.9
	29.76	0.172	0.6	15		5.43	0.088	1.6	9
	23.5	0.263	1.1	12.3		7.3	0.075	1	7.9
	15.5	0.225	1.5	16.9		5.62	0.08	1.4	7.1
	14.3	0.22	1.5	15.8		2.55	0.085	3.3	6.1
	21.1	0.21	1	15.1	Vegetace	4.76	0.071	1.5	5.4
	10.8	0.213	2	15.4		1.12	0.081	7.2	0.5
	3.96	0.191	4.8	21.7		0.02	0.001	4.5	0.5
	9.55	0.187	2	27.5		0.96	0.125	13.1	1.1
	10.7	0.147	1.4	22.5		0.73	0.162	22.2	0.3
	11.2	0.133	1.2	17.3		0.95	0.263	27.8	0.8
	8.82	0.16	1.8	12.6		1.73	0.187	10.8	0.4
	19.9	0.281	1.4	15.3		0.71	0.159	22.3	0.4
	9.4	0.192	2	22.4		0.38	0.136	35.4	0.2
	6.45	0.173	2.7	23.6					

Tabulka 3 – Podíl DP v TP v povrchovém odtoku pro tři odlišné povrchy experimentálních ploch

	DP/TP
Vzrostlá vegetace	19,8%
Řídká vegetace	2,4%
Kultivovaný úhor	1.8%



Obr. 1 – Koncentrace TP a DP ve vzorcích povrchového odtoku odebraných během experimentů



Obr. 2 – Vliv koncentrace nerozpuštěných látek na podíl DP v TP v povrchovém odtoku

Využití měřených hodnot pro výpočet odtoku DP během srážko-odtokových epizod

Výsledky realizovaných experimentů byly využity pro stanovení množství DP, které se během epizody uvolní do povrchového odtoku a má tedy potenciál vstupovat do vodního toku.

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, jednotlivé experimenty se výrazně liší z hlediska vstupních parametrů, které ovlivňují průběh srážko-odtokového a erozního procesu. Tyto odlišnosti se odrážejí rovněž v měřených výsledcích.

Z hlediska srážko-odtokových charakteristik je patrná variabilita experimentů jak z hlediska celkového objemu odtoku, tak především z hlediska celkového transportovaného materiálu. Tyto odlišnosti jsou důsledkem výrazné variability vstupních podmínek pro jednotlivé experimenty.

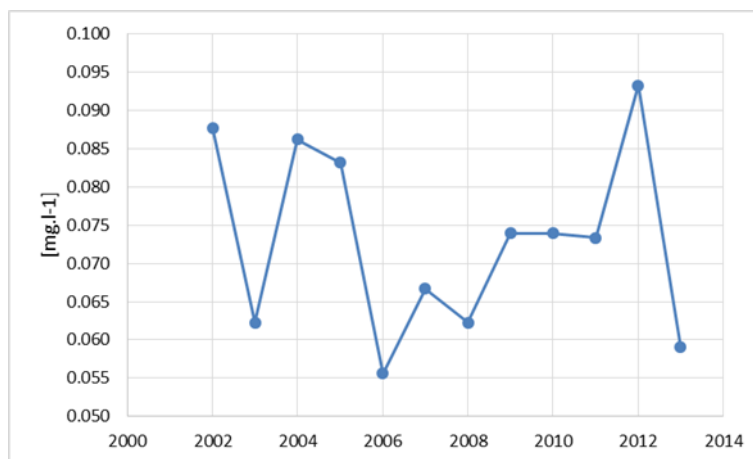
Epizody se však liší rovněž v měřených koncentracích TP v půdě, které se pohybují od 833 mg/kg (experimenty v lokalitě HOAL v Rakousku) až po 3217 mg/kg v Býkovicích na úhorových plochách). Takto vysoké hodnoty byly zjištěny ve vzorcích A a B (viz Tabulka 4), které byly odebrány v roce 2012 na počátku realizace prezentované sady experimentů. Tyto hodnoty byly ovlivněny aplikací fosforového hnojiva před sezónou 2012. Rovněž koncentrace P_{M3} je značně variabilní. Minimální hodnoty byly opět

měřeny v lokalitě HOAL v Rakousku (52 mg/kg). Pro experimenty v České republice se hodnoty koncentrace P_{M3} pohybují v rozsahu 68 – 130 mg/kg což odpovídá běžným koncentracím P_{M3} v půdě na území České republiky [25].

Stejně jako v případě koncentrace fosforu v půdě, která je značně variabilní, se i koncentrace DP v odtoku pro jednotlivé experimenty odlišuje. Měřené hodnoty (viz Tabulka 4) se pohybují od 0,081 mg/l do 0,410 mg/l. Měřené koncentrace nejsou prokazatelně ovlivněny přítomností a stavem vegetačního krytu. Rovněž koncentrace v recipientu kolísají od 0,027 mg/l (v případě experimentu v Rakouské lokalitě HOAL) až po 0,159 mg/l. Všechny měřené koncentrace DP v recipientu měřené v povodí Býkovického potoka jsou ve shodě s obvykle měřenými koncentracemi DP v nejbližším měrném profilu na vodním toku Chotýšanka (viz Obr. 3).

Tabulka 4 – Hodnoty měřené během experimentů, vstupující do výpočtu transportu DP metodami 1, 2 a 3

experiment	půdní povrch	celkový odtok [l]	transportovaný půdní materiál [g]	TP v půdě [mg/kg]	P_{M3} v půdě [mg/kg]	DP v recipientu [mg/l]	DP v odtoku [mg/l]
A	kultivovaný úhor	233	5864	3217	130	0.055	0.147
B	kultivovaný úhor	420	7453	3217	130	0.070	0.172
C	kultivovaný úhor	541	8376	2700	68	0.102	0.226
D	kultivovaný úhor	310	5429	2676	98	0.054	0.164
E	kultivovaný úhor	507	10614	1163	77	0.093	0.196
F	oves	164	84	3217	130	0.055	0.081
G	pšenice	429	624	2179	81	0.096	0.125
H	pšenice	282	92	2700	68	0.159	0.162
I	pšenice	29	36	2676	98	0.054	0.263
J	pšenice	153	31	1099	117	0.134	0.161
K	řídka vegetace krátce po osetí	101	1519	833	52	0.027	0.410
L	řídka vegetace krátce po osetí	265	6313	833	52	0.027	0.160
M	řídka vegetace krátce po osetí	38	829	833	52	0.027	0.170
N	kultivovaný úhor	51	634	1500	110	0.000	0.109



Obr. 3 - Průměrné roční koncentrace DP na toku Chotýšanka, profil Libež

Na základě měřených hodnot byl stanoven poměr obohacení, který byl porovnán s poměrem bohatení vypočteným na základě Sharpleyho vztahu (rovnice (3)). Výsledky tohoto porovnání uvedené v Tabulce 5 dokumentují značnou variabilitu skutečných hodnot poměru obohacení, které se pohybují od 0,17 až po 2,99. Zároveň je zřejmý výrazný rozdíl mezi hodnotami ER stanovenými dle rovnice (3) a

hodnotami měřenými během experimentů. Vypočtené hodnoty se pohybují v rozmezí 0,87 až 2,58. Pouze ve dvou případech je hodnota ER stanovená výpočtem menší než 1. V případě měřených hodnot je tomu naopak pro 12 experimentů je zjištěná hodnota ER menší než 1.

Tabulka 5 – Porovnání měřených ER s hodnotami ER stanovených dle rovnice (3), které byly využity pro výpočet odtoku DP metodou 2

experiment	ER měřený	ER vypočtený (dle rovnice (3))	experiment	ER měřený	ER vypočtený (dle rovnice (3))
A	0.42	0.90	H	0.83	1.75
B	0.52	0.87	I	0.29	2.04
C	0.40	1.17	J	2.99	2.58
D	0.17	1.24	K	0.64	1.37
E	0.40	1.13	L	0.84	1.07
F	0.68	1.78	M	1.05	1.59
G	0.30	1.29	N	1.30	1.50

Na základě měřených hodnot (viz Tabulka 4) bylo vypočteno transportované množství DP pomocí tří prezentovaných metod (Tabulka 6).

První metoda stanovuje transport DP na základě měřených koncentrací DP v povrchovém odtoku a měření celkového objemu odtoku a množství erodovaného půdního materiálu. Jedná se tedy o skutečné, experimentálně stanovené látkové toky. Takto stanovené transportované množství DP během epizody je ve většině případů nejnižší. Výjimku tvoří experimenty H, I a J. Množství DP, které se během experimentu uvolní do povrchového odtoku, nepřesahuje 43 mg. V případě experimentů na plochách s vegetačním krytem (F – J) je transportované množství DP výrazně nižší, nepřesahuje hodnoty 12,5 mg.

Druhá metoda stanovuje transport TP na základě celkového množství erodovaného materiálu během epizody a koncentrace TP v půdě zatížené srážkou (rovnice (3) a (4)). Transportované množství DP pak bylo stanoveno ve dvou variantách. První varianta (2a v Tabulce 6) uvažuje DP jako paušální 5% podíl vypočteného TP. Tato metoda ve všech případech stanovuje hodnoty transportovaného DP výrazně vyšší, než jsou hodnoty určené na základě přímo měřených hodnot koncentrace DP v odtoku (metoda 1). Druhá varianta (2b v Tabulce 6) rovněž stanovuje DP jako podíl TP. Velikost podílu však vychází z reálně zjištěných hodnot podílu DP/TP (viz Tabulka 3). Pro tři různé stavy půdního povrchu zatíženého srážkou byla uvažována rozdílná hodnota poměru DP/TP. V tomto případě jsou hodnoty odtoku DP na úhorové ploše a ploše s řídkou vegetací (experimenty A-E, K-N) nižší, a na ploše se vzrostlou vegetací naopak vyšší, než v případě paušálního podílu DP/TP 5%. V obou uvažovaných variantách (2a a 2b) jsou vypočtené hodnoty ve všech prezentovaných experimentech vyšší, než jsou hodnoty stanovené přímým měřením (metoda 1). Zároveň jsou v obou uvažovaných variantách (2a a 2b) hodnoty transportu DP nejnižší v případě experimentů na ploše s vegetačním krytem (F – J).

Třetí metoda stanovuje transportované množství DP na základě koncentrace DP v recipientu a koncentrace P_{M3} v půdě zatížené srážkou. Tato metoda stanovuje ve všech případech nižší transportované množství DP, než je vypočteno pomocí Sharpleyho rovnice s uvažovaným podílem DP v TP 5% (metoda 2a). Ve srovnání s metodou 2b, která doplňuje Sharpleyho rovnici měřeným podílem DP/TP jsou hodnoty odtoku vypočtené metodou 3 v případě odtoku z úhorové plochy a plochy s řídkou vegetací obdobné. V případě odtoku z plochy se vzrostlou vegetací jsou výsledné hodnoty odtoku DP stanovené metodou 2b výrazně vyšší než výsledky metody 3. V porovnání s transportem DP vypočteným z měřených hodnot koncentrací DP poskytuje tato metoda výrazně vyšší hodnoty transportu DP v případě úhorové plochy (experimenty A – E, N). Pro experimenty v území HOAL v Rakousku (experimenty K – M, plocha s řídkou vegetací krátce po osetí) rovněž udává metoda 3 vyšší hodnoty transportovaného DP oproti výsledkům metody 1. Rozdíl výsledků je v těchto případech méně výrazný,

než v případě úhorové plochy. V případě experimentů na ploše s vegetací jsou výsledky stanovené metodou 3 a výsledky výpočtu dle přímo měřené koncentrace (metoda 1) obdobné.

Tabulka 6 – Množství DP uvolněné do povrchového odtoku během experimentů stanovené třemi metodami výpočtu

experiment	celkový odtok [l]	transportovaný půdní materiál [g]	celkový odtok DP během srážko-odtokové události [mg]			
			metoda 1	metoda 2a	metoda 2b	metoda 3
A	233	5864	21.41	850.85	306.31	380.72
B	420	7453	42.72	1040.72	374.66	461.04
C	541	8376	61.83	1201.59	432.57	131.69
D	310	5429	30.45	864.67	311.28	248.44
E	507	10614	41.70	634.53	228.43	250.35
F	164	84	4.27	23.94	94.82	5.43
G	429	624	12.45	87.76	347.54	15.90
H	282	92	0.85	21.78	86.26	0.23
I	29	36	6.08	9.72	38.48	1.63
J	153	31	1.78	4.12	16.33	1.26
K	101	1519	25.43	75.36	36.17	37.92
L	265	6313	35.27	251.42	120.68	157.56
M	38	829	7.40	44.40	21.31	20.68
N	51	634	5.32	31.79	11.44	41.05

Diskuze a závěr

Podíl DP v TP v povrchovém odtoku měřený během prezentovaných experimentů se pohybuje od 0,4 do 27,8%. Tyto hodnoty přibližně korespondují s hodnotami podílu DP měřených v rámci rozsáhlé studie v USA [11]. Oproti studii realizované v povodí Lhotského potoka [15] jsou měřené podíly DP v TP výrazně vyšší. Stejně jako v dosud publikovaných studiích, během experimentů realizovaných na jedné lokalitě a totožném půdním substrátu se významně nemění koncentrace DP v povrchovém odtoku při individuálních srážko-odtokových událostech a není zřejmá vazba koncentrace DP na vegetační pokryv. Značně variabilní podíl DP v TP je důsledkem výrazně se měnící koncentrace TP v odtoku především v závislosti na koncentraci nerozpuštěných látek v povrchovém odtoku. V případě odtoku z plochy s vegetací (nižší koncentrace nerozpuštěných látek) je podíl DP/TP v odtoku vyšší a naopak v případě erozní události na nechráněné půdě (vysoká koncentrace nerozpuštěných látek v odtoku) je podíl DP/TP relativně malý.

Vypočtené hodnoty transportu DP ukazují na zásadní vliv přítomnosti a stavu vegetačního krytu i na celkové transportované množství DP během srážko-odtokové události. Celkový transport DP pro experimenty na ploše s vegetací je pro všechny tři metody výrazně nižší, než celkový transport stanovený pro experimenty na úhorové ploše. To je dáno zvýšenou infiltrací a celkově nižším povrchovým odtokem na vegetačních plochách.

Výsledky třech použitých metod se značně liší. Uvažujeme-li pro výpočet transportovaného množství DP paušální hodnotu podílu DP v TP 5%, pak nejčastěji využívaná metoda 2 (varianta 2a) udává až 30x vyšší hodnotu odtoku DP než jsou hodnoty stanovené dle přímo měřených koncentrací DP v odtoku (metoda 1). Rovněž pokud zvolíme pro výpočet podíl DP v TP v povrchovém odtoku na základě reálně měřených průměrných hodnot pro daný typ vegetačního krytu (viz Tabulka 3) jsou výsledky metody 2 (varianta 2b) vyšší, než odtok DP stanovený metodou 1. Rozdíl mezi odtokem DP vypočteným metodou

2 a měřenými hodnotami je ovlivněn zvolenou hodnotou poměru DP/TP. Významnější roli zde zřejmě sehrává uvažovaná hodnota poměru obohacení. V rámci metody 2 (varianta 2a i 2b) byl vypočten poměr obohacení pomocí rovnice (3). Hodnoty ER zjištěné v rámci experimentů jsou však výrazně nižší, než vypočtené hodnoty, které jsou uvažovány ve výpočtech metody 2 (viz Tabulka 5).

Nově odvozená metoda 3 poskytuje u experimentů realizovaných na ploše s kultivovaným úhorem a řídkou vegetací (A-E, K-N) výrazně vyšší hodnoty odnosu DP během experimentů, než výsledky stanovené na základě přímo měřených koncentrací DP v povrchovém odtoku (metoda 1). V případě experimentů na ploše s vegetačním krytem (F-J) jsou výsledky metody 3 obdobné s reálně měřeným odtokem DP (metoda 1).

Rozdíl mezi odtokem DP stanoveným novou metodou 3 a výsledky metody 1 je zřejmě dán principem odvození metody 3, respektive odlišností vzorků využitých pro odvození metody 3 a vzorků odebraných při experimentech. Během experimentů při odvozování metody 3 byly zpracovávány vzorky sedimentu s koncentrací 10 g/l, ve kterých bylo zjišťováno uvolněné/navázané množství DP z částic po 72 hodinách. Během experimentů byla však měřena okamžitá koncentrace DP ve vzorcích odtoku s výrazně vyšší koncentrací nerozpuštěných látek. Lze předpokládat, že v případě shodného postupu při odběru vzorků smyvu během experimentů by měřené koncentrace DP (vlivem desorpce z partikulované formy) byly vyšší a následně by vypočtený odtok DP během experimentu lépe korespondoval s výsledky metody 3.

Běžně využívaná metoda 2 vycházející z Sharpleyho rovnice, byla odvozena pro stanovení odtoku TP. Pro její využití k výpočtu odtoku DP je nutné stanovit správnou hodnotu podílu DP v TP v povrchovém odtoku. Jak bylo zjištěno v rámci předchozích studií [11], [15] i z dat získaných během in-situ měření je zřejmé, že hodnota tohoto podílu je ovlivněna řadou parametrů a její stanovení je značně komplikované. Výsledky prezentovaných experimentů ukazují na skutečnost, že poměr obohacení stanovený v rámci metody 2 pomocí Sharpleyho rovnice (3) při těchto experimentech neodpovídá reálným hodnotám ER. Poměr obohacení, který zásadním způsobem ovlivňuje reálnou hodnotu odtoku DP během srážko-odtokové epizody zjištěný na základě přímého měření koncentrace TP půdě a povrchovém odtoku je ve všech prezentovaných experimentech nižší, než hodnota vypočtená dle rovnice (3). Metoda 2 v případě popisovaných experimentů výrazně nadhodnocuje transportované množství DP.

Přímé měření in-situ je obecně nejpřesnějším stanovením aktuálního odtoku DP. Pro stanovení množství DP, které se uvolní/naváže z půdních částic v dotčeném vodním doku nebo vodní nádrži je však třeba změnit postup odběru vzorků tak, aby odpovídal procesům, které ve vodní nádrži reálně probíhají. Z tohoto důvodu není dosud možné využít prezentované výsledky pro přímé stanovení vlivu realizovaných srážko-odtokových epizod na eutrofizaci vodních útvarů.

Výsledky experimentů a jejich porovnání s výsledky dvou metod výpočtu odtoku DP ukazují na řadu skutečností, které komplikují správný popis srážko-odtokových událostí z hlediska transportu fosforu. Zároveň je z výsledků in-situ experimentů i výpočetních modelů zřejmý zásadní význam přítomnosti vegetačního krytu z hlediska ochrany kvality zemědělské půdy a vodních útvarů před významným přísunem erozního fosforu a jejich následné degradaci. Během experimentů na ploše bez vegetačního krytu bylo transportováno až 62 mg DP z 8 m² což odpovídá 77,5 g/ha. V případě plochy z vegetačním krytem tato hodnota nepřesáhla 12,5 mg z 8m² respektive 15,6 g /ha. Přesto, že přítomná vegetace nemá přímý vliv na koncentraci DP v odtoku, díky ní dochází ke zvýšení infiltrace, snížení objemu odtoku a následně výraznému snížení odnosu fosforu ze zemědělské půdy.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory grantů SGS14/180/OHK1/3T/11 "Srážko-odtokové, erozní a transportní procesy - experimentální výzkum" and NAZV QJ1330118 "Monitoring erozního poškození půd a projevů eroze pomocí metod DPZ".

Literatura

- [1] Wetzel R. (2001): Limnology: Lake and River Ecosystems. San Diego, USA: Academic Press, Third Edition.

- [2] Schindler D.J. (2012): The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences*, 279: 4322–4333
- [3] Lowrance R.R., Leonard R.A., Asmussen L.E. (1985): Nutrient budgets for agricultural watersheds in the southeastern coastal plain. *Ecology*, 66: 287-296.
- [4] Strauss P., Leone A., Ripa M.N. et al. (2007): Using critical source areas for targeting cost-effective best management practices to mitigate phosphorus and sediment transfer at the watershed scale. *Soil Use and Management*, 23 (1): 144-153.
- [5] Kronvang B., Behrendt H., Andersen H.E. et al. (2009): Ensemble modeling of nutrient loads and nutrient load partitioning in 17 European catchments. *Journal of Environmental Monitoring* 11, 572-583.
- [6] Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. *Agr. handbook no. 537*. USDA, Washington, DC.
- [7] TOY T.J., Foster G.R. a Renard K.G.(2002): *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control*. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc. ISBN 0-471-38369-4.
- [8] Millier H.K., Hooda P.S. (2011): Phosphorus species and fractionation - Why sewage derived phosphorus is a problem. *Journal of Environmental Management*. 92: 1210-1214.
- [9] Borovec J., Jan J., Hejzlar J., Krása J., Rosendorf P. (2012): Eutrophication potential of eroded particles in water reservoirs. *Proceedings of Conference Water reservoirs 2012*. In: Kosour, D. (ed.). Brno, the Czech Republic. Pp. 57–61.(in Czech)
- [10] Sharpley A. N. (1980): The Enrichment of Soil Phosphorus in Runoff Sediments. *J. Environ. Qual.* č. 9.
- [11] Sharpley A.N., Smith S.J., Jones O.R., Berg W.A., Coleman G.A. (1992): The Transport of Bioavailable Phosphorus in Agricultural Runoff. *Journal of Environmental Quality*. 21: 30-35
- [12] Shigaki F., Sharpley A., Prochnow L.I. (2007): Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays. *Science of the Total Environment*. 373: 334 - 343.
- [13] Hahn C., Prasuhn V., Stamm Ch. a Schulin R. (2012): Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. č. 153.
- [14] Sharpley A. N. (1995): Dependence of Runoff Phosphorus on Extractable Soil Phosphorus. *J. Environ. Qual.* č. 24.
- [15] Fiala D., Rosendorf P. (2009): Diffuse phosphorus sources in catchment of the Orlík water reservoir. In: Očásková I. *Orlík water reservoir revitalization. The Institute of Technology and Business in České Budějovice, Písek*: 75-86. (in Czech)
- [16] Sims J. T. (2000): Soil Test Phosphorus: Mehlich 3. In: Pierzynski (ed). *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*. Southern Cooperative Series Bulletin No. 396
- [17] Jan J., Borovec J., Kopáček J., Hejzlar J. (2013): What do results of common sequential fractionation and single-step extractions tell us about P binding with Fe and al compounds in non-calcareous sediments? *Water Research*. 47 (2): 545-557.
- [18] (<http://www1.cenia.cz/www/>). CENIA, česká informační agentura životního prostředí. CENIA, česká informační agentura životního prostředí [online]. 2012 [cit. 2012-11-09]. Dostupné z: <http://www1.cenia.cz/www/>
- [19] *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. Praha, Olomouc: Český hydrometeorologický ústav, 2007. ISBN 978-80-86690-26-1.
- [20] HOAL Petzenkirchen (2015). *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, [cit. 2015-10-02]. Available at: http://www.experimental-hydrology.net/wiki/index.php?title=HOAL_Petzenkirchen

- [21] Strauss P., Pitty J., Pfeffer, Menter A. (2000): Rainfall Simulation for Outdoor Experiments. In: P. Jamet, J. Cornejo (eds.): Current research methods to assess the environmental fate of pesticides. Pp. 329-333, INRA Editions,
- [22] Hou X., Jones B. T. (2000): Inductively Coupled Plasma/Optical Emission Spectrometry. In: R.A. Meyers. Encyclopedia of Analytical Chemistry. p. 9468 – 9485
- [23] Krása J. et al. (2010): Určení podílu erozního fosforu na eutrofizaci ohrožených útvarů stojatých povrchových vod. Dílčí zpráva projektu NAZV ev. č. QI102265. Praha. 145 pp.
- [24] Krása J. (2013): Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy: Certifikovaná metodika pro praxi. Praha: ČVUT v Praze, ISBN 978-80-01-05428-4.
- [25] Klement V., Sušil A. (2013): Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2007-2012. Brno, Česká republika: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. ISBN 978-80-7401-077-4.