

## **Možnosti modelování vlivu vodní eroze jako zdroje fosforu na vodní útvary v podmínkách ČR**

Possibilities of modeling the influence of water erosion as a source of  
phosphorus for water bodies in the Czech Republic

*Barbora Jáchymová<sup>1</sup>, Josef Krása<sup>1</sup>*

*České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební,*

*Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství<sup>1</sup>*

### **Abstrakt**

Vodní eroze je přirozený proces, při kterém dochází k narušování půdního povrchu v důsledku působení intenzivní srážky. Uvolněné částice půdy spolu se živinami, které jsou na ně navázané, jsou poté transportovány prostřednictvím vzniklého povrchového odtoku do vodních toků a následně sedimentují ve vodních nádržích a dalších vodních útvarech. Důsledkem tohoto procesu je zhoršování půdních vlastností a narušování živinové rovnováhy vodních útvarů. Fosfor je v klimatických podmínkách ČR limitujícím faktorem rozvoje vodních ekosystémů a tím i limitujícím faktorem eutrofizace vodních útvarů. Příspěvek představuje možnosti modelování dlouhodobého vlivu vodní eroze na zemědělských pozemcích na vodní útvary z hlediska transportu splavenin a erozního fosforu.

### **Klíčová slova:**

Eroze půdy, srážko-odtoková událost, eutrofizace, fosfor.

### **Abstract**

Water erosion is a natural process in which the soil surface is disturbed by intensive rainfall. The released soil particles, together with the nutrients that are attached to them, are then transported by the surface runoff into the watercourses and subsequently sediment in the water bodies. The consequences of this process are deterioration of soil properties and disturbance of the nutrient balance of water bodies. Phosphorus is a limiting factor in the development of aquatic ecosystems and thus a limiting factor in eutrophication of water bodies in the Czech climate conditions. The paper presents possibilities of modeling the long-term influence of water erosion on agricultural land on water bodies in terms of transport of soils and erosion phosphorus.

### **Keywords:**

Soil erosion, rainfall-runoff event, eutrophication, phosphorus.

## Úvod

Jedním z požadavků Rámcové směrnice o vodách (EC 2000) bylo zajistit do roku 2015 dobrý ekologický stav ve všech evropských vodních útvarech. Dobrý ekologický stav je definován řadou parametrů. Jedním z těchto parametrů je nepřítomnost eutrofizace. Fosfor je jedním z hlavních limitujících faktorů z hlediska eutrofizace vod (Schindler 2012; Wetzel 2001). Klíčovou otázkou z hlediska ochrany kvality vody a zajištění udržitelnosti vodních útvarů v povodí je proto najít reálné významné zdroje emisí fosforu (Lowrance et al. 1985; Strauss et al. 2007; Kronvang et al. 2009).

Vodní eroze je proces, při kterém intenzivní dešťové srážky narušují povrch půdy a způsobují transport uvolněných půdních částic. Tyto částice spolu s vázanými živinami vstupují spolu s povrchovým odtokem do vodních útvarů (Toy et al. 2002). Existuje řada nástrojů pro popis srážko-odtokových, erozních a transportních procesů. Tyto nástroje se liší svoji využitelností, přesností výstupů i požadovanou kvalitou vstupních dat. Obecně existují dva způsoby popisu procesu srážko-odtokové a erozní události. První způsob využívá matematické modely, zatímco druhý způsob zahrnuje pozorování a měření těchto události *in-situ*. Tyto dva přístupy popisu jednoho problému jsou zdánlivě zcela odlišné. Ve skutečnosti je však ke správnému a efektivnímu hodnocení srážko-odtokového a erozního procesu vždy zapotřebí kombinace obou těchto přístupů. Pro správnou simulaci eroze na velkých územích jsou podmínkou kvalitní datové podklady. Každý vytvořený model je rovněž třeba kalibrovat pomocí reálných naměřených dat.

Živiny a kovy, které vstupují spolu s erodovanými půdními částicemi do vodních útvarů, mohou způsobit toxicitu nebo eutrofizaci vodního prostředí v důsledku narušení živinové rovnováhy. Protože fosfor je velmi často limitujícím prvkem pro rozvoj ekosystému, je jeho nadměrný přísun do vodního prostředí spouštěčem eutrofizačního procesu.

Z hlediska dostupnosti pro rostliny je nejdůležitější formou půdního fosforu přístupný fosfor v půdě ( $P_{M3}$ ), jehož koncentrace v půdě se zjišťuje metodou Mehlich III (Sims 2000). Lokální chemické podmínky, pH, mikrobiální aktivita a koncentrace celkového fosforu (TP) v půdě mají významný vliv na přítomnost různých forem fosforu (Hillel 2007).

Fosfor v povrchovém odtoku vzniklém během srážko-odtokové události se vyskytuje ve formě rozpuštěné a vázané na částice půdy. Rozpuštěná a vázaná forma se významně liší z hlediska eutrofizace vody (Millier & Hooda 2011). Rozpuštěný fosfor (DP) je pro vodní organismy snadno dostupný, a proto má z hlediska potenciální eutrofizace vodního útvaru zásadní význam.

Běžný postup určení množství DP transportovaného během erozních událostí je (i) výpočet ztráty půdy, (ii) výpočte poměru obohacení a (iii) použití podílu DP v TP v povrchovém odtoku dle hodnot publikovaných v literatuře.

Poměr obohacení (ER) je poměr mezi koncentrací živin a kovů v erodovaném materiálu a jejich koncentrací v původní půdě zatížené erozní událostí. Základní rovnice (Sharpley 1985b) je široce používána pro odhad množství TP, který je transportován během erozních událostí. Podíl DP v TP v povrchovém odtoku je nutné následně samostatně určit. Podle výsledků studie (Sharpley et al. 1992) se podíl DP v TP v povrchovém odtoku z konvenčně používaných zemědělských pozemků pohybuje od 3,5% do 19,3%. Tento poměr se významně liší v závislosti na intenzitě srážek, koncentraci půdního fosforu, přítomnosti a stavu vegetačního krytu a na zrnitostním složení transportovaného půdního materiálu (Shigaki et al. 2007; Hahn et al. 2012; Sharpley 1985a; Martinez-Mena et al. 2000; Zhang et al. 2011) V České republice byl podíl DP v TP sledován ve studii provedené v povodí Lhotského (Fiala & Rosendorf 2009). V prezentované erozní epizodě nepřesáhl podíl DP 3% z TP. Na rozdíl od poměru DP/ TP, který se v průběhu experimentu výrazně lišil, koncentrace DP v odtoku se mírně zvýšila a ustálila na přibližně konstantní hodnotě.

Nově odvozená metoda „Eutrofizační potenciál“ určuje transportované množství DP na základě tzv. eutrofizačního potenciálu erodovaných půdních částic. Eutrofizační potenciál půdních částic (jejich schopnost uvolňovat nebo vázají fosfor) závisí na poměru mezi obsahem  $P_{M3}$  v půdě a koncentrací DP v recipientu (Borovec et al. 2012; Jan et al. 2013). Tato nová metoda byla odvozena k určení množství DP uvolněného/navázaného na erodované částice vstupujících do vodních útvarů.

## **Materiál a metody**

### Lokality

Pro modelování transportu erozního fosforu do vodního prostředí byla vybrána čtyři povodí (*Obr. 1*) na území České republiky, které se liší svými charakteristikami (*Tab. 1*).



**Obr. 1** Povodí vybraná pro k modelování transportu erozního fosforu do vodního prostředí

**Tab. 1** Základní charakteristiky povodí

Název povodí	Plocha povodí [km <sup>2</sup> ]	Průměrná nadmořská výška [m]	Průměrný sklon povodí [%]	Využití území [%]			Intenzita eroze [t.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ]	Průměrná koncentrace P <sub>M3</sub> v půdě [mg.kg <sup>-1</sup> ]
				Orná půda	Les	TTP		
Fryšták	44.2	344	14.6	32.6	42.1	14.1	4.8	37.2
Luhačovice	44.8	417	19.3	12.7	52.5	24.6	4.5	45.2
Stanovice	92.0	651	9.3	6.9	44.6	39.6	0.5	120.3
Vrchlice	97.7	427	5.1	56.3	22.8	10.7	4.4	57.7

### Modelování erozního procesu

Pro modelování erozních procesů ve vybraných povodích byl využit prostorově distribuovaný empirický model WaTEM/SEDEM (Van Oost et al. 2000; Van Rompaey et al. 2001; Verstraeten et al. 2002). Model stanovuje průměrnou ztrátu půdy v modelovaném území pomocí Univezrální rovnice ztráty půdy (USLE - Wischmeier & Smith 1978; Renard et al. 1997) s aplikací novějších postupů pro výpočet L, S a R faktoru dle Revidované univerzální rovnice ztráty půdy (RUSLE - Renard et al. 1997).

Výpočtový model řeší tři základní výpočtové úlohy:

- Stanovení průměrné roční ztráty půdy v povodí (při zohlednění depozice v rámci povodí)

- Stanovení průměrného množství transportovaného sedimentu pro každý úsek vodního toku
- Stanovení průměrného množství sedimentu usazené ve vodních nádržích

Díky distributivnímu charakteru modelu je možné lokalizovat nejvíce erozně ohrožené oblasti v povodí, nejrychleji zanášené vodní nádrže a simulovat různé způsoby hospodaření v povodí a jejich dopad na intenzitu odnosu půdy a rychlost zanášené vodních útvarů v povodí. Vstupy do modelu jsou analogické se vstupy do USLE.

#### Modelování transportu rozpuštěného fosforu

Množství rozpuštěného fosforu vstupujících ročně do vodních toků bylo stanoveno dvěma metodami. První, dosud často využívaný přístup, stanovuje tzv. **poměr obohacení** erodovaného materiálu celkovým fosforem (TP), který závisí na dlouhodobém transportu půdního materiálu, a vychází z obsahu TP v půdě. Transport rozpuštěného fosforu (DP), je stanoven jako podíl z transportovaného TP. Velikost tohoto podílu byla v práci uvažována jako paušální podíl 5%.

Druhá metoda stanovuje tzv. **eutrofizační potenciál** erodovaných částic, který závisí na koncentraci přístupného fosforu v půdě  $P_{M3}$  (dle Melich III), koncentraci DP v recipientu a dlouhodobém přísunu erodovaného půdního materiálu do recipientu.

#### Poměr obohacení

Tato metoda využívá tzv. poměr obohacení smyvu celkovým fosforem, který je dán vztahem R. 1 (Sharpley 1985b):

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

kde

- ER - poměr obohacení [-]  
 G - průměrná ztráta půdy [ $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ ]

Při výpočtu v programu WaTEM/SEDEM byla původní vrstva K faktoru (faktor erodovatelnosti půdy USLE) nahrazena vrstvou  $K_p$ , která zohledňuje erodovatelnost půdy a zároveň poměr obohacení erodovaného materiálu v daném místě (Krása et al. 2015). Hodnota  $K_p$  je v každém místě řešeného území stanovena dle vztahu R. 2:

$$K_p = \frac{K \cdot P_T \cdot ER}{1000} \quad R. 2$$

kde

- $K_p$  - potenciální erodovatelnost celkového fosforu [ $kg \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ]  
 K - erodovatelnost půdy [ $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ]  
 $P_T$  - koncentrace celkového fosforu v půdě [ $mg \cdot kg^{-1}$ ]

ER - poměr obohacení [-]

Průměrná roční ztráta fosforu v povodí byla vypočtena dle vztahu R. 3 (Krása et al. 2015):

$$G_P = G \cdot P_T \cdot ER \quad \text{R. 3}$$

kde

G - průměrná ztráta půdy [ $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ ]

PT - koncentrace celkového fosforu v půdě [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

ER - poměr obohacení [-]

Tímto způsobem byla stanovena průměrná roční ztráta fosforu v povodí a zároveň průměrné množství celkového fosforu vstupující do vodních toků. Množství rozpuštěného vstupující do vodních toků bylo určeno jako 5% podíl z množství celkového fosforu.

### Eutrofizační potenciál

Tato metoda stanovuje tzv. eutrofizační potenciál erodovaných částic vstupujících do vodních toků, neboli schopnost těchto částic uvolňovat (případně vázat) fosfor. Z hlediska eutrofizačního potenciálu erodovaných částic se jeví jako zásadní poměr mezi obsahem přístupného fosforu v půdě (dle Melich III) a koncentrací rozpuštěného fosforu v recipientu (Borovec et al. 2012).

Pro přímý způsob stanovení byl odvozen vztah R. 4 (Krása et al. 2013).

$$P_a = -1 \cdot (A \cdot P_{M3} + B) \quad \text{R. 4}$$

kde

Pa - koncentrace fosforečnanového fosforu uvolněná z částice smyvu [ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ]

P<sub>M3</sub> - koncentrace přístupného fosforu v půdě (dle Melich III) [ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ]

A, B - koeficienty vypočtené dle vztahů R. 5 a R. 6 (Krása et al. 2013) [-]

$$A = 0,2248 \cdot (PO_4 - P)^2 - 0,6792 \cdot (PO_4 - P) - 0,5734 \quad \text{R. 5}$$

$$B = -0,1043 \cdot (PO_4 - P)^2 + 0,3006 \cdot (PO_4 - P) - 0,0002 \quad \text{R. 6}$$

kde

PO<sub>4</sub>-P - koncentrace fosforečnanového fosforu v recipientu [ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ]

Takto bylo pro jednotlivé úseky stanoveno množství rozpuštěného fosforu uvolněného (případně sorbovaného) z částic smyvu.

## **Výsledky**

### Porovnání přímé a nepřímé metody ve velkých povodích

Porovnání dvou metod stanovení množství rozpuštěného fosforu transportovaného do vodních toků bylo provedeno pro obecně využívaný 5 % podíl rozpuštěného fosforu z celkového fosforu v erozním odtoku. Pro porovnání byly vybrány čtyři lokality (viz Obr. 1).

Výsledky zpracované v Tab. 2 ukazují značnou shodu v případě povodí s vysokou průměrnou roční ztrátou půdy (Fryšták, Luhačovice, Vrchlice), která se v těchto povodí pohybuje okolo 4,5 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. U těchto tří lokalit se podíl rozpuštěného fosforu vstupujícího do vodních toků z celkového fosforu vstupujícího do vodotečí pohybuje kolem běžně používané hodnoty 5% (rozmezí 4,2 – 5,2 %). Těchto hodnot je dosaženo i přes značnou odlišnost těchto povodí z hlediska charakteristik, které průběh erozního procesu (erozi a depozici) značně ovlivňují – zastoupení orné půdy a průměrný sklon povodí.

Naproti tomu v povodí vodní nádrže Stanovice, které je z erozního pohledu poměrně málo ohrožené (průměrná roční ztráta půdy 0,451 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>), je podíl rozpuštěného fosforu z celkového transportovaného fosforu do vodních toků výrazně vyšší, než je obecně používaná hodnota 5 %. Důvodem je vysoký podíl trvale travních plocha lesních pozemků v této lokalitě. Intenzita eroze na těchto pozemcích je nižší, stejně jako koncentrace erodované půdy v povrchovém odtoku. V důsledku toho klesá koncentrace TP v odtoku a podíl DP v odtoku je proto vyšší.

**Tab. 2** Porovnání výsledků obou prezentovaných metod pro čtyři modelovaná území

Název povodí	Celková eroze [t.rok <sup>-1</sup> ]	Intenzita eroze [t.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup> ]	Depozice mimo vodní toky [t.rok <sup>-1</sup> ]	Vstup splavenin do vodních toků [t.rok <sup>-1</sup> ]	*Vstup TP do vodních toků [kg.rok <sup>-1</sup> ]	Vstup DP do vodních toků [kg.rok <sup>-1</sup> ]		**DP/TP [%]
						5% TP (nepřímá m.)	přímé určení DP	
Fryšták	21 435	4.8	12 381	9 054	7 279	364	382	5.2
Luhačovice	20 083	4.5	12 790	7 293	5 799	290	269	4.6
Stanovice	4 152	0.5	2 590	1 562	1 403	70	120	8.6
Vrchlice	42 605	4.4	32 275	10 329	7 635	382	324	4.2

\*) vypočteno dle rovnic R. 3-1, R. 3-2 a R. 3-3 \*\*) DP vypočteno dle rovnic R. 3-4, R. 3-5 a R. 3-6

#### Faktory ovlivňující velikost rozdílu výsledků přímé a nepřímé metody

Z principu obou metod vyplývá, že nejvýznamněji jsou hodnoty vstupu DP do jednotlivých úseků vodního toku ovlivněny množstvím splavenin přicházejícím ročně do tohoto úseku a v metody „Eutrofizační potenciál“ rovněž průměrnou koncentrací P<sub>M3</sub> v příslušném sub-povodí.

V řešených územích byl sledován význam hodnot vstupu splavenin do úseku a průměrné koncentrace P<sub>M3</sub> v příslušném sub-povodí z hlediska rozdílu hodnot vstupu DP do úseků VT stanovených oběma metodami (

Tab. 3).

**Tab. 3** Hodnoty korelačního koeficientu pro sledované vztahy

	Fryšták	Luhačovice	Stanovice	Vrchlice
Korelační koeficient (R) mezi velikostí rozdílu poskytovaných výsledků a vstupem sedimentu	0.71	0.65	0.37	0.37
Korelační koeficient (R) mezi velikostí rozdílu poskytovaných výsledků a průměrnou koncentrací $P_{M3}$	0.36	0.34	0.29	0.15

Výsledky této analýzy ukazují na značnou závislost mezi absolutní hodnotou rozdílu mezi výsledky obou metod v jednotlivých úsecích toku a hodnotou vstupu splavenin do tohoto úseku. Naopak závislost mezi absolutní hodnotou rozdílu výsledků poskytnutých oběma metodami na průměrné koncentraci  $P_{M3}$  v povodí je výrazně slabší, korelační koeficient se pohybuje v rozmezí 0,15 – 0,36.

### Diskuze

Z porovnání obou prezentovaných metod je zřejmé, že se obě metody shodují ve výsledných hodnotách v případě povodí s relativně vysokou hodnotou průměrné eroze. Pokud je průměrná roční ztráta půdy nízká (povodí Stanovice) jsou hodnoty vstupu rozpuštěného fosforu do toků určené přímou metodou výrazně vyšší, než hodnoty určené nepřímou metodou.

Zastoupení rozpuštěného fosforu v celkovém fosforu v odtoku roste s klesající koncentrací nerozpuštěných látek, (Janotová et al. 2014). Z tohoto pohledu udává přímá metoda stanovení vstupu rozpuštěného fosforu do sítě vodních toků výsledky odpovídající více reálné situaci.

Existují tři faktory, které mohou ovlivnit rozdíl výsledků obou metod – množství splavenin vstupující do hydrografické sítě, koncentrace  $P_{M3}$  v půdě a koncentrace DP v recipientu. Analýza vlivu hodnot  $P_{M3}$  a vstupu splavenin do úseku vodního toku na rozdíl výsledků poskytovaných oběma metodami ukazuje závislost velikosti rozdílu mezi výsledky na množství splavenin vstupujícím do hydrografické sítě (R v rozmezí 0,37 – 0,71). V případě koncentrace  $P_{M3}$  v půdě nebyla významná závislost sledována (R= 0,15 – 0,36).

Z tohoto důvodu je správné a co nejpřesnější modelování transportu erozního materiálu během srážko-odtokových událostí klíčové.

Prezentovaná analýza využívá pro modelování eroze model WaTEM/SEDEM, který se jeví jako vhodný nástroj pro modelování takto rozsáhlých území. Dle prezentované studie je pro správný odhad odnosu rozpuštěného fosforu klíčové správné určení transportu splavenin



z plochy povodí při srážko-odtokových událostech. Pro zpřesnění odhadu tohoto klíčového vstupu je možné využít také jiný model pro výpočet eroze z jednotlivých pozemků. Jedním z nich je model ATLAS (Krása & Bek 2014) respektive modul ATLAS Eroze, který je pro výpočet erozní ohroženosti doporučován také metodikou Státního pozemkového úřadu. Tento model nabízí přesnější výpočet směřování odtoku pomocí unikátního algoritmu identifikace odtokových drah na podkladu trojúhelníkové sítě TIN. Dále pak umožňuje lépe zohlednit aktuální využití území včetně reálných překážek povrchového odtoku.

Další možností je např. model Erosion 3D (<https://tu-freiberg.de/fakult3/tbt/boden/forschung/erosion-3d>). Na rozdíl od využívaného modelu WaTEM/SEDEM nebo modelu ATLAS Eroze se jedná o epizodní model, který umožňuje vyhodnotit konkrétní srážko-odtokovou událost. Přesné výstupy jsou však podmíněny podrobnými vstupními daty.

### **Závěr**

Nově odvozená metoda „Eutrofizační potenciál“ pro určení transportu rozpuštěného fosforu přímo vypočítá vstup rozpuštěného fosforu do vodního toku na základě koncentrace  $P_{M3}$  v půdě a koncentrace rozpuštěného fosforu v dotčeném recipientu. Obě tyto hodnoty jsou k dispozici v České republice jako reálná naměřená data z monitorování vodních toků a pravidelných zemědělských půdních testů. Díky tomu je možné pro výpočet transportu rozpuštěného fosforu do vodního toku využít metodu Eutrofizačního potenciálu bez nutnosti znát skutečný podíl rozpuštěného fosforu v celkovém fosforu v povrchovém odtoku.

V lokalitách s nízkou intenzitou eroze (plochy s vegetačním krytem) poskytuje metoda Eutrofizačního potenciálu vyšší hodnoty transportu rozpuštěného fosforu do recipientu, než metoda Poměru obohacení. Tyto hodnoty jsou obdobné reálně měřeným hodnotám transportu rozpuštěného fosforu do toku během srážko-odtokových experimentů. Metoda Poměru obohacení tedy v těchto případech podhodnocuje hodnoty vstupu rozpuštěného fosforu do recipientu.

V podmínkách České republiky probíhá hlavní podíl významných erozních událostí za stavu, kdy je orná půda bez vegetačního krytu nebo s vegetačním krytem bez reálného protierozního účinku. Vzhledem k těmto skutečnostem je správné modelování transportu rozpuštěného fosforu z lokalit s vysokou intenzitou eroze velmi potřebné. Nová metoda „Eutrofizační potenciál“ poskytuje relativně realistické hodnoty pro množství rozpuštěného fosforu transportovaného do vodních toků z těchto ploch. Tuto metodu lze s dostatečnou přesností použít pro dlouhodobé odhady transportu rozpuštěného fosforu ze zemědělských pozemků a z povodí do vodních útvarů.

Klíčovou úlohu z hlediska přesnosti výstupů hraje kvalita vypočteného transportu erodovaných částic.

## Literatura

- Borovec, J. et al., 2012. Eutrofizační potenciál erozních částic v nádržích. In *Konference vodní nádrže 2012*. Brno, pp. 57–61.
- EC, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Union*, (327), pp.1–73.
- Fiala, D. & Rosendorf, P., 2009. Difúzní zdroje fosforu v povodí vodní nádrže Orlik. In I. Očásková, ed. *Revitalizace vodní nádrže Orlik*. Písek, pp. 75–86.
- Hahn, C. et al., 2012. Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 153, pp.65–74.
- Hillel, D., 2007. *Soil in the Environment - Crucible of Terrestrial Life*, New York: Academic Press/Elsevier.
- Jan, J. et al., 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), pp.547–557.
- Krásá, J. et al., 2013. *Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy*, Praha: ČVUT v Praze.
- Krásá, J. et al., 2015. Modelling of Sediment and Phosphorus Loads in Reservoirs in the Czech Republic. *Advances in GeoEcology* 44, pp.21–34.
- Krásá, J. & Bek, S., 2014. Atlas Eroze - Manuál programu.
- Kronvang, B. et al., 2009. Ensemble modelling of nutrient loads and nutrient load partitioning in 17 European catchments. *Journal of environmental monitoring : JEM*, 11(3), pp.572–583.
- Lowrance, R.R. et al., 1985. Nutrient Budgets for Agricultural Watersheds in the Southeastern Coastal Plain. *Ecology*, 66(1), pp.287–296.
- Martinez-Mena, M. et al., 2000. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment. *Catena*, 38(3), pp.175–190.
- Millier, H.K.G.R. & Hooda, P.S., 2011. Phosphorus species and fractionation - Why sewage derived phosphorus is a problem. *Journal of Environmental Management*, 92(4),

- pp.1210–1214. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.12.012>.
- Van Oost, K., Govers, G. & Desmet, P., 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, 15(6), pp.577–589. Available at: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008198215674>.
- Renard, K. et al., 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Washington, DC, USA.: US Department of Agriculture. Available at: [http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64080530/RUSLE/AH\\_703.pdf](http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/64080530/RUSLE/AH_703.pdf).
- Van Rompaey, A. et al., 2001. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), pp.1221–1236. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.275>.
- Sharpley, A.N., 1985a. Phosphorus Cycling in Unfertilized and Fertilized Agricultural Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), pp.905–911.
- Sharpley, A.N., 1985b. The Selective Erosion of Plant Nutrients in Runoff. *Soil Science Society of America Journal*, (49), pp.1527–1534.
- Sharpley, A.N. et al., 1992. The Transport of Bioavailable Phosphorus in Agricultural Runoff. *Journal of Environment Quality*, 21(1), p.30.
- 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(1), pp.334–343.
- Schindler, D.W., 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1746), pp.4322–4333.
- Sims, J.T., 2000. Soil Test Phosphorus: Mehlich 3. In Pierzynski, ed. *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*.
- Strauss, P. 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(SUPPL. 1), pp.144–153.
- Toy, T.J., Foster, G.R. & Renard, K.G., 2002. *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control*, New York, USA: John Wiley and Sons. Available at: <https://books.google.co.tz/books?id=7YBaKZ-28j0C>.
- Verstraeten, G. et al., 2002. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management*, 18(4), pp.386–394. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1079/SUM2002150>.
- Wetzel, R.G., 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems* Third Edit., San Diego, USA:

Academic Press. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1529-8817.2001.37602.x>.

Wischmeier, W. & Smith, D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*, Washington, DC, USA: US Department of Agriculture.

Zhang, G.H. et al., 2011. Effects of Vegetation Cover and Rainfall Intensity on Sediment-Bound Nutrient Loss, Size Composition and Volume Fractal Dimension of Sediment Particles. *Pedosphere*, 21(5), pp.676–684.

### **Poděkování**

Príspevek vznikl v souvislosti s řešením projektů Národní agentury pro zemědělský výzkum QI102A265 „Určení podílu erozního fosforu na eutrofizaci ohrožených útvarů stojatých povrchových vod“, Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze SGS17/173/OHK1/3T/11 „Experimentální výzkum erozních a transportních procesů v zemědělsky využívané krajině“ a Technologické agentury České republiky TJ01000270 „Atlas HYDROLOGIE - moderní nástroj pro výpočet smyvu, odtoku a dimenzování prvků protierozní ochrany“.

### **Kontakt:**

Ing. Barbora Jáchymová, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

Thákurova 7

166 29 Praha 6 – Dejvice

+420 723 244 606, [barbora.jachymova@fsv.cvut.cz](mailto:barbora.jachymova@fsv.cvut.cz)