

# VODOHOSPODÁŘSKÁ KONFERENCE VODNÍ NÁDRŽE 2013

25.-26. ZÁŘÍ 2013



# METODIKA HODNOCENÍ EUTROFIZAČNÍHO POTENCIÁLU ZDROJŮ FOSFORU V POVODÍ VODNÍCH NÁDRŽÍ – PODKLAD K VÝBĚRU EFEKTIVNÍCH OPATŘENÍ K OMEZENÍ EUTROFIZACE

**Pavel Rosendorf<sup>1</sup>, Vlastimil Zahrádka<sup>2</sup>, Tomáš Dostál<sup>3</sup>, Libor Ansoerge<sup>1</sup>,  
Jiří Beránek<sup>2</sup> a Josef Krása<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.,  
Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6, tel. 220 197 413, rosendorf@vuv.cz

<sup>2</sup>Povodí Ohře, státní podnik, Bezručova 4219, 430 03 Chomutov,  
tel. 474 636 285, zahradka@poh.cz

<sup>3</sup>ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství,  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel. 224 354 747, dostal@fsv.cvut.cz

## Abstrakt

V příspěvku je představen metodický koncept hodnocení eutrofizačního potenciálu zdrojů fosforu v povodí libovolné vodní nádrže. Eutrofizační potenciál je zde chápán jako mnohorozměrná funkce velikosti produkce fosforu, podílu emitovaných forem fosforu, vzdálenosti od nádrže, sezónnosti emisí a množství retenčních prvků mezi zdrojem a nádrží. Umožňuje relativizovat význam zcela odlišných zdrojů fosforu a sestavit jejich žebříček podle klesajícího vlivu na eutrofizaci nádrže. Vznikající metodický postup se může stát vhodným výchozím podkladem pro výběr ekonomicky efektivních opatření k omezení eutrofizace nádrží v ČR. Praktické ukázky konstrukce eutrofizačního potenciálu jsou představeny na příkladu povodí vodárenské nádrže Stanovice.

**Klíčová slova:** fosfor; eutrofizace; vodní nádrže; zdroje znečištění; program opatření.

## Abstract

In this paper a methodological concept for evaluation of phosphorus sources and its eutrophication potential in any reservoir watershed is presented. The eutrophication potential is understood here as a multidimensional function of the size of phosphorus production, the proportion of emitted forms of phosphorus, distance from the reservoir, seasonality of emissions and the amount of retention elements between the source and the reservoir. It allows relativizing the importance of completely different phosphorus sources and compiling their ranking according to their decreasing effect on the eutrophication of reservoirs. The emerging methodology can become a good starting basis for the selection of cost-effective measures to reduce eutrophication of reservoirs in the Czech Republic. Practical demonstration of eutrophication potential concept in watershed of Stanovice drinking water reservoir is presented.

**Keywords:** phosphorus; eutrophication; reservoirs; source of pollution; programme of measures.

## Úvod

Fosfor je rozhodujícím prvkem pro eutrofizaci vnitrozemských vod [1]. Zejména ve vodních nádržích pak jeho nadbytek výrazně ovlivňuje rozvoj autotrofních složek ekosystému – fy-

toplanktonu a makrofyt. Nadbytečný přísun fosforu ze zdrojů v povodí vede v řadě nádrží na území ČR k výraznému zhoršení jakosti vody a omezení jejich využití pro pitné účely nebo rekreaci. Již léta se vedou spory o to, jaké zdroje fosforu v povodí jsou odpovědné za eutrofizaci našich nádrží a zájem se přelévá střídavě od komunálních zdrojů k zemědělství a zpět. Řada komplexních bilančních studií dokumentuje, že vstupy fosforu s ohledem na celkové množství mohou být výrazně na straně přísunu s erozním smyvem a tedy zemědělského znečištění (např. [2]). V posledních letech se v některých specifických oblastech pozornost zaměřila také na vstupy fosforu z obhospodávaných rybníků, které při intenzivním chovu ryb představují především v letním období významný zdroj fosforu [3, 4, 5]. I přes rozsáhlé investice do vodohospodářské infrastruktury řady obcí přesto nadále zůstávají velmi významným zdrojem fosforu ve vodách komunální a další odpadní vody.

Koncept hodnocení eutrofizace stojatých vod je založen na znalosti vztahu mezi koncentracemi fosforu a odpovídajícím rozvojem fytoplanktonu v nádržích [6, 7]. Pro odvození průměrné koncentrace fosforu v nádrži se obvykle používá některý z retenčních empirických modelů, který ji odvozuje z koncentrací celkového fosforu na přítoku a teoretické doby zdržení [8, 9, 10]. Stále však mluvíme o koncentraci celkového fosforu, který zahrnuje všechny formy fosforu ve vodě v době odběru vzorku. Zahrnuje tedy jak formy rozpuštěné anorganické, fosfor partikulovaný (erozní částice, buňky řas a sinic apod.) tak i organický fosfor v různé míře uvolnitelný. Pro rozvoj řas a dalších autotrofních organismů je zcela zásadní zejména přítomnost rozpuštěných, snadno dostupných forem a to především ve vodních nádržích, kde řasy a sinice mohou jen velmi omezeně využívat fosfor ze sedimentů a dalších povrchů. Na důležitost snadno dostupného fosforu pro produkci ve vodních ekosystémech upozorňují zejména Reynolds a Davies [11] nebo Peters [12], kteří mluví o klíčové roli tzv. biologicky dostupného fosforu (BAP – bioavailable phosphorus). V nádržích lze tuto formu fosforu ztotožnit s fosforem stanovovaným jako ortofosforečnaný nebo rozpuštěný reaktivní fosfor (SRP – soluble reactive phosphorus).

Lze tedy při porovnávání zdrojů zapomenout na hodnocení celkového fosforu a zabývat se pouze hodnocením rozpuštěného fosforu? Odpověď není zcela jednoznačná a vyžaduje komplexnější pohled.

Pokud bychom měli informace o emisích rozpuštěného fosforu pro všechny zdroje v povodí, byly by zřejmě údaje o množ-

ství celkového fosforu nadbytečné. Nepřímo to dokládá i běžně používaný postup hodnocení fosforu v tocích v řadě států Evropy, kde namísto celkového fosforu je hodnocen pouze fosfor rozpuštěný (Spojené království, Irsko, Švédsko, Rakousko). V případě nádrží však vyvstává problém v tom, že rozpuštěný fosfor je již v přítokové části rychle spotřebován fytoplanktonem a v samotné nádrži se vyskytuje ve velmi nízkých koncentracích, které neodpovídají celkovému obohacení systému živinami. Proto tedy bývá fosfor v nádržích ve většině států včetně výše jmenovaných stanovován jako celkový fosfor, zahrnující i fosfor v planktonních vodních organismech.

Praktický problém spočívá také v tom, že i kdybychom chtěli používat pouze údaje pro rozpuštěný fosfor, pro řadu zdrojů znečištění máme informace o emisích jen za celkový fosfor, případně takové údaje zcela chybějí. Navíc pokud bychom opustili stanovení celkového fosforu ve vodách, přišli bychom o důležitou informaci o stavu vodního prostředí včetně jeho zatížení např. sedimentem pocházejícím z eroze nebo výlovu rybníků. V těchto vstupech převažuje zejména partikulovaný, biologicky obtížně dostupný fosfor [13, 14].

Jaké však jsou skutečné odtoky rozpuštěného fosforu z jednotlivých typů zdrojů a jsou mezi zdroji výraznější rozdíly?

Podíl rozpuštěného reaktivního fosforu (dále jen SRP) v odtoku z běžných komunálních bodových zdrojů dosahuje obvykle velmi vysokých hodnot. Dobře to dokumentují například studie v povodí řeky Temže (Spojené království), kde byly sledovány změny koncentrací forem fosforu nad a pod vypouštěním ze dvou čistíren, jedné s aplikací solí hliníku a v druhé s aplikací síranu železitého [15]. V prvním případě byl podíl rozpuštěných forem ve vodě vždy kolem 90 %, ve druhém se pohyboval kolem 65 %. Musíme mít však na zřeteli, že jde o poměry v toku pod vypouštěním, takže skutečný podíl SRP ve vypouštěné vodě bude pravděpodobně vyšší. Ještě lépe dokumentuje rozhodující podíl SRP v bodových zdrojích studie vypouštění ze šesti čistíren odpadních vod v povodí řeky Kennet (Spojené království), [16]. Všechny studované čistírny (počet EO v rozmezí 130-5800) vypouštěly v průměru za sledované období 86,9-93,6 % SRP. Z uvedených studií je také zřejmé, že vysoký poměr odtoku SRP neovlivňuje příliš technologie čištění vod, mění se pouze množství vypouštěného fosforu.

Zcela opačná je situace v případě přísunu SRP v erozním odtoku. Jak zjistili Sharpley et al. [17], na konvenčně obhospodařovaných plochách se podíl SRP v erozním odtoku pohybuje v rozmezí 3,5-19,3 %. Zajímavé je, že s použitím ochranných způsobů obhospodařování půdy se podíl SRP v odtoku zvyšuje. Jeho celkové množství je však v porovnání s konvenčními plochami nízké. V ČR dokumentovali Fiala a Rosendorf [13] v roce 2007 podíly forem fosforu v erozní epizodě v povodí Lhotského potoka (okres Louny). Zjistili, že podíl SRP během epizody nepřekročil 3 %. Zároveň dokumentovali, že ačkoliv se během erozního odtoku výrazně mění podíl partikulovaného fosforu, koncentrace SRP se po kulminaci vlny ustálí na určité rovnovážné hodnotě a příliš se nemění.

Kromě erozních událostí přispívají zemědělské plochy k odtoku fosforu také v době běžných průtoků. Poměry mezi množství rozpuštěného fosforu a celkového fosforu v čistě zemědělských mikropovodích dokumentují studie [18, 19]. Z nich je zřejmé, že se SRP podílí na odtoku celkového fosforu přibližně v rozmezí 30-75 %, přičemž nejčastěji se hodnota pohybuje kolem 50-55 %. Mírně užší rozsah podílu SRP v rozmezí 35-60 % zjistili Fučík a kol. [20] při sledování zemědělských mikropovodí v povodí Kopaninského toku. Richtr a kol. [21] zjistili v povodí nádrže Orlík na některých orných půdách i travních porostech výrazně nižší podíly SRP v odtoku. Rozsah hodnot pro

orné půdy se pohyboval od 12 do 57 %, na travních porostech od 21-56 %.

Zajímavou skupinou zdrojů představují rybníky s intenzivním chovem ryb. Jejich vliv na zvyšování koncentrací fosforu ve vodách je dvojnásobný. První souvisí s každoročním vývojem nádrže, který je spojen s intenzivním rozvojem řas, vyčerpáním kyslíku a dusičnanů nade dnem a zvýšeným uvolňováním rozpuštěného fosforu do vodního sloupce [3, 4]. Vysoký odtok rozpuštěného fosforu nastává obvykle v letním období a podíl rozpuštěných forem fosforu se pohybuje v rozmezí 30-80 %. Jiný charakter má odtok fosforu v době výlovu rybníků, kdy převážná část fosforu odchází ve formě partikulované [4, 5, 14]. Podíl SRP je většinou nízký a nepřesahuje 5 % z celkového fosforu.

Pro úplnost je nutné zmínit také vstupy fosforu do vod atmosférickou depozicí, která je většinou uvažována pouze jako vstup na volnou hladinu hodnocené nádrže. Jak uvádějí Kopáček a kol. [22] celkové vstupy fosforu atmosférickou depozicí jsou nízké (15-100 µg/l celkového fosforu) a podíl rozpuštěného fosforu se pohybuje kolem 50 %.

Kromě všech antropogenních vstupů fosforu v povodí je nutné při úvahách o eutrofizaci vodních nádrží zohlednit také přirozené vstupy fosforu v celém povodí. Jak ukazují příklady některých geologicky pestrých povodí, mohou se pozadí koncentrace fosforu značně lišit a mohou výrazně ovlivnit cílovou koncentraci v hodnocené nádrži, která se může i výrazně lišit od obvyklých koncentrací na většině území ČR.

Vzhledem k popsané rozmanitosti zdrojů fosforu je vhodné každý z nich charakterizovat souhrnným parametrem, který v sobě zahrne nejen absolutní emitované množství fosforu, ale i jeho formu, umístění v povodí, míru retence v povodí a charakter přísunu během roku. Tento parametr musí mít takové vlastnosti, aby dovolil porovnání významu rozdílných zdrojů fosforu a umožnil sestavit žebříček zdrojů podle jejich podílu na eutrofizaci nádrže. Tento parametr označujeme pracovním jako eutrofizační potenciál zdrojů a o konceptu jeho sestavení pojednává tento příspěvek.

Koncept eutrofizačního potenciálu zdrojů vyvíjí Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. ve spolupráci se státním úpodnikem Povodí Ohře a Katedrou hydromelioreací a krajinného inženýrství stavební fakulty ČVUT v Praze v rámci výzkumného projektu TA02020808 programu Alfa Technologické agentury České republiky. Jeho cílem je připravit univerzální metodu hodnocení eutrofizačního potenciálu zdrojů fosforu v povodí vodních nádrží a navrhnout postupy výběru ekonomicky nejefektivnějších opatření pro dosažení dobrého stavu vodních útvarů.

V tomto příspěvku jsou shrnuty základní principy připravované metodiky hodnocení eutrofizačního potenciálu zdrojů v povodí vodních nádrží a na příkladu povodí nádrže (VN) Stanovice jsou představeny některé dílčí kroky metodiky v reálných podmínkách.

## Materiál a metody

Koncept metodiky je založen na jednoduchém předpokladu, že pokud převedeme informaci o emisích fosforu z jednotlivých zdrojů na vhodný společný jmenovatel, budeme moci porovnávat přímo jejich význam z pohledu hodnoceného vodního útvaru, v tomto případě vodní nádrže a přiblížíme se tak k objektivnějšímu posouzení významu zdrojů a efektivnímu návrhu opatření.

Připravovaná Metodika pro posuzování vlivu zdrojů znečištění na eutrofizaci vodních nádrží, je strukturována do čtyř navazujících kroků:

1. stanovení referenčních hodnot koncentrací celkového a rozpuštěného fosforu pro povodí hodnocené nádrže,
2. inventarizace a lokalizace všech antropogenních zdrojů vstupu fosforu do vodních toků v povodí hodnocené nádrže,
3. charakterizace jednotlivých zdrojů fosforu z pohledu jejich eutrofizačního potenciálu,
4. určení pořadí významnosti jednotlivých zdrojů fosforu na základě jejich eutrofizačního potenciálu a režimu hospodaření nádrže.

První část metodiky souvisí s charakterizací povodí vodní nádrže podle přirozených koncentrací fosforu a jejich celkové variability. Tento první krok metodického postupu je důležitý proto, že definuje pro hodnocenou nádrž nejlepší přirozené dosažitelný stav, který odpovídá stavu povodí bez působení antropogenních vlivů. Současně umožňuje srovnat tento přirozený stav s aktuální situací v místě nádrže a odvodit rozdíl v koncentracích, který připadá na vrub antropogenního ovlivnění. Je důležitý i pro odvození příspěvku mimoerozního zemědělského znečištění, které je dáno odtokem fosforu ze zemědělských ploch za běžných průtoků.

Pro jednoduché odvození přirozených koncentrací v tocích povodí hodnocené nádrže lze použít Metodiku pro hodnocení stavu všeobecných fyzikálně chemických složek ekologického stavu útvarů tekoucích vod zpracovanou VÚV TGM, v.v.i. [23]. Závislost změn koncentrací celkového i rozpuštěného fosforu se podařilo v metodice prokázat na datech z referenčních lokalit pouze v případě kategorií nadmořské výšky. I když typ geologického substrátu je pro přirozené koncentrace fosforu podle některých studií významný (např. [24]), geologické kategorie pro typologii toků podle vyhlášky č. 49/2011 Sb. jsou natolik obecně definované, že zřejmě zahrnují v obou kategoriích geologické celky s nízkými i vysokými pozadovými koncentracemi fosforu. Z tohoto důvodu doporučujeme před použitím hodnot podle Metodiky [23] nejprve provést zhodnocení existujících dat z monitoringu v lesních nebo jiných antropogenně neovlivněných částech povodí a porovnat zjištěné hodnoty s referenčními hodnotami pro typy toků podle Metodiky [23]. V případě, že se budou hodnoty výrazně lišit nebo nebudou k dispozici údaje pro geologicky významně odlišné celky, doporučuje se provést dodatečný monitoring pro zjištění pozadových koncentrací celkového a rozpuštěného fosforu. Další využití získaných pozadových koncentrací v povodí závisí na složitosti hodnocené povodí. V případě, že je uniformní z pohledu geologických i dalších podmínek, je možné použít získaná data přímo pro charakterizaci koncentrací fosforu na vtoku do hodnocené nádrže. Pokud je povodí tvořeno mozaikou typů oblastí s různými hodnotami koncentrací fosforu, je vhodné zkonstruovat jednoduché schéma, založené na směšovací rovnicích, které z charakteristických hodnot koncentrací fosforu a průtoků v jednotlivých oblastech odvodí výslednou pozadovou koncentraci fosforu před vstupem do nádrže.

Druhým krokem metodiky pro posuzování vlivu zdrojů znečištění na eutrofizaci vodních nádrží je inventarizace a lokalizace všech antropogenních zdrojů fosforu v povodí hodnocené nádrže. Je to důležitý krok, který předchází hodnocení ekologického potenciálu jednotlivých zdrojů. V každém povodí hodnocené nádrže by měly být inventarizovány tyto skupiny zdrojů:

1. bodové komunální zdroje,
2. průmyslové zdroje včetně zemědělských provozů,
3. erozní zdroje,
4. neerozní zemědělské zdroje,
5. rybníky a jejich soustavy,
6. atmosférická depozice,
7. ostatní zdroje (např. rekreace v nádrži, skládky).

Každý zdroj znečištění by měl být lokalizován tak, aby byla zřejmá jeho vazba na říční síť v povodí a bylo možné vyhodnotit, zda a jaké množství fosforu se může dostat ze zdroje do vodního toku a dále do nádrže.

Bodové komunální a průmyslové zdroje by měly být inventarizovány do co nejmenší podrobnosti. U komunálních zdrojů je vhodné pracovat s částmi obcí, případně je doplnit dalším dělením podle Základní báze geografických dat (ZABAGED®). V případě komunálních a průmyslových bodových zdrojů znečištění s kanalizací nebo čistírnou odpadních vod (ČOV) je lokalizace určena místem vypouštění do recipientu. Složitější je určení odtoku v případě obcí s decentralizovaným nakládáním s odpadními vodami. Zde je nutné například v Plánu rozvoje vodovodů a kanalizací území krajů (PRVKÚK) prověřit charakter vypouštění a nalézt vhodné místo, které nejlépe reprezentuje vypouštění z takové obce.

Erozní zdroje fosforu je vhodné lokalizovat jako odtok fosforu z pozemků, které přímo sousedí s tokem nebo těch, které jsou dráhou soustředěného odtoku na tok napojeny. Jako vhodnou jednotku pro kvantifikaci vstupu fosforu lze použít půdní bloky evidované v registru půdy podle § 3a zákona 252/1997 Sb., o zemědělství (dále jen LPIS), případně pro pozemky neregistrované v LPIS využít geografická data zemědělských půd ze ZABAGED®.

Neerozní zemědělské zdroje lze lokalizovat v hydrologických povodích VI. řádu nebo jejich částech, pokud je to z důvodu využití povodí vhodné.

V případě rybníků je jejich lokalizace snadná a případný vstup znečištění je totožný s místem odtoku z rybníka.

Atmosférická depozice je v této metodice jako zdroj znečištění uvažována jen jako vstup na hladinu hodnocené nádrže, případně dalších větších nádrží v povodí.

Případně ostatní zdroje znečištění musí být lokalizovány podobným způsobem jako výše zmíněné s ohledem na charakter vstupu fosforu do toků.

Třetím krokem metodiky je popis inventarizovaných zdrojů fosforu z pohledu jejich eutrofizačního potenciálu. Každý ze zdrojů antropogenního vnosu fosforu lokalizovaný v povodí by měl být popsán několika charakteristikami, které ve výsledku určí jeho eutrofizační potenciál ve vztahu k hodnocené nádrži.

Zvolené charakteristiky (A-E), popisující eutrofizační potenciál zdrojů jsou následující:

A) roční emitované množství celkového fosforu (v kg)

Tato charakteristika určuje množství celkového fosforu, které je emitováno za rok do vodního toku v povodí. Jde většinou o množství zjištěné přímým měřením (koncentrace x množství vody) nebo vypočítané specifickými postupy (eroze – metoda USLE + fosfor v půdách; rybníky – bilanční přebytky, zemědělské vstupy – charakteristické koncentrace x specifický odtok).

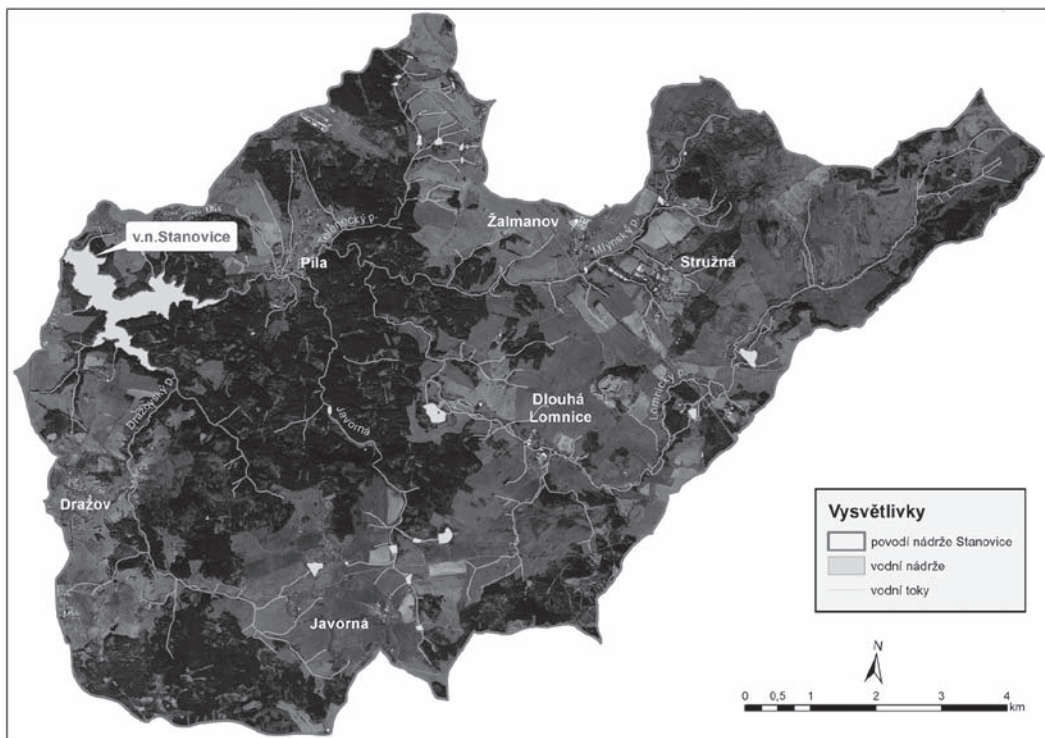
B) roční emitované množství rozpuštěného fosforu - PO<sub>4</sub>-P (v kg)

Tato charakteristika určuje množství rozpuštěného fosforu (ortofosforečnanů nebo SRP), které je emitováno za rok do vodního toku v povodí. Jde většinou o množství dopočítané na základě známých podílů SRP na celkovém fosforu.

C) celková vzdálenost zdroje od nádrže v říční síti (v metrech)

Jde o celkovou vzdálenost v říční síti od místa vstupu fosforu ze zdroje po hráz hodnocené nádrže. Vzdálenost je určena z datové vrstvy vodních toků Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD) nebo z jiného odpovídajícího podkladu.

D) charakteristika sezónnosti emisí fosforu ze zdroje (rok)



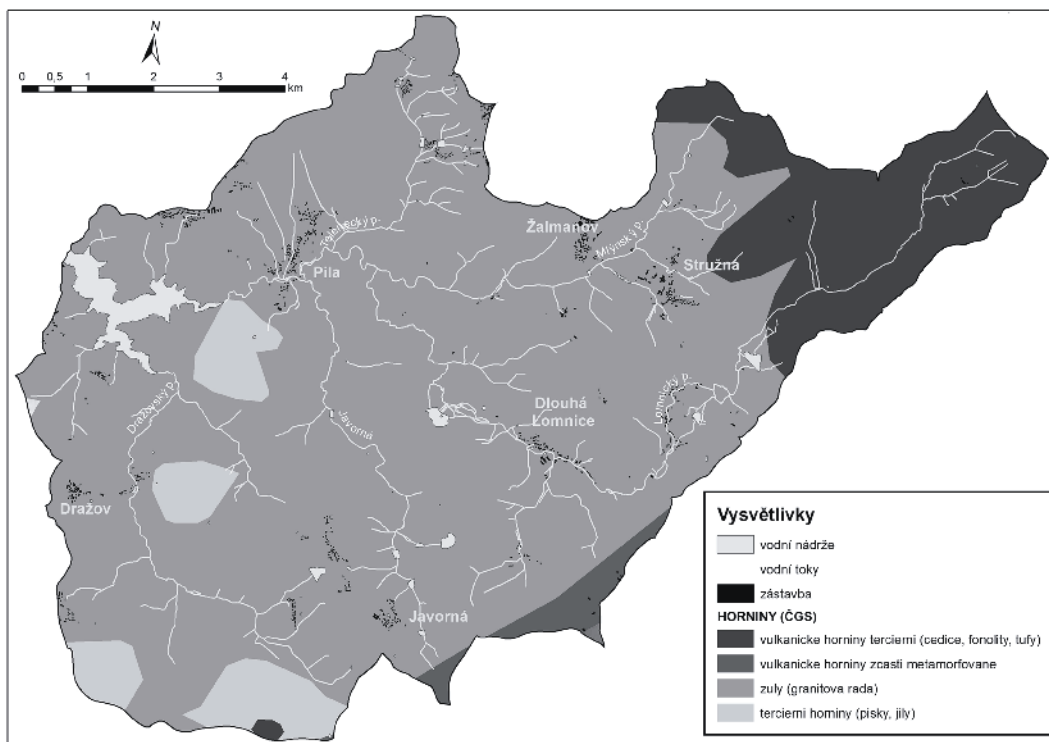
**Obrázek 1.** Situace povodí VN Stanovice s říční sítí, nádržemi, významnými sídly a celkovým charakterem využití území.

Tato charakteristika udává, jestli přísun fosforu je realizován během celého roku, nebo dochází v některém období k jeho omezení, nebo jestli má přísun pouze epizodický charakter. Hodnota je udána v rozmezí od 0 do 1, přičemž hodnota 1 udává přísun během celého roku.

E) charakteristika retenčních a transformačních prvků v říční síti mezi vstupem emise ze zdroje a hodnocenou nádrží (tis. m<sup>3</sup>)  
Tato charakteristika dokumentuje, jestli se mezi zdrojem

a cílovou nádrží nacházejí na říční síti prvky, které by mohly výrazně transformovat množství neseného fosforu v toku. Jde zejména o vodní nádrže a rybníky, které mohou svou biologickou aktivitou výrazně snížit další transport fosforu.

Poslední – čtvrtý krok metodiky spočívá v určení pořadí významnosti jednotlivých zdrojů fosforu na základě jejich eutrofizačního potenciálu. Charakteristiky jednotlivých zdrojů fosforu popsané v předchozím kroku popisují zdroje z několika pohledů. Aby však bylo možné všechny zdroje porovnat, je nut-



**Obrázek 2.** Zastoupení hornin v povodí VN Stanovice (zdroj: ČGS).

né provést na základě uvedených charakteristik výpočet, který zohlední velikost emisí, jejich vzdálenost od nádrže, případnou retenci v povodí a také sezónní charakter přísunu. Výpočet se provede podle následující rovnice:

$$Epot_x = B \cdot e^{-aC} \cdot E$$

kde

$Epot_x$  je eutrofizační potenciál x-tého zdroje

$B$  je roční emitované množství rozpuštěného fosforu v kg

$a$  je koeficient retence fosforu v tocích v  $m^{-1}$

$C$  je vzdálenost zdroje od hráze nádrže v říční síti v metrech

$E$  je koeficient retence fosforu v nádržích na tocích mezi zdrojem a vzlutím nádrže

Charakteristika D (sezónnost emisí) není ve výpočtu zahrnuta. Lze ji ale využít jako korekční faktor, který upravuje výsledné pořadí zdrojů v žebříčku. Způsob jejího využití je v současné době předmětem testování v pilotních povodích.

Uvedený postup hodnocení eutrofizačního potenciálu zdrojů je v současné době testován v povodí VN Stanovice a po úpravách a doladění výpočetních postupů bude odzkoušen na velkém datovém souboru v povodí vodní nádrže Nechranice.

Pilotní povodí VN Stanovice má plochu 92,1 km<sup>2</sup> a nachází se v Karlovarském kraji, jižně od Karlových Varů. VN Stanovice byla vybudována na Lomnickém potoce, který je pravostranným přítokem říčky Teplé blízko jejího soutoku s Ohří. Hlavním účelem VN Stanovice je především akumulace vody pro zásobování Karlovarska pitnou vodou, zajištění minimálního průtoku v profilu limnigrafu Stanovice-odtok, ochrana města Karlovy Vary před povodněmi a periodické proplachy koryta pod hrází [25].

Povodí VN Stanovice je morfologicky poměrně členité, kóta koruny hráze vodní nádrže se nachází v nadmořské výšce 519,5 m n. m., zatímco nejvyšší místa v povodí dosahují výšky přes 900 m n. m. Hydrografická síť je tvořena dvěma hlavními

větvemi – potokem Dražovským, který tvoří jižní přítok a potokem Lomnickým, který tvoří spolu s Mlýnským potokem severní větev. Z hlediska využití území, část povodí přibližně severně od rychlostní komunikace R6 Praha – Karlovy Vary spadá do vojenského výcvikového prostoru Hradiště, zatímco plochy jižně od komunikace R6 jsou využívány k běžnému hospodářství. V zájmovém území není žádné velké sídlo ani významný průmyslový podnik. Osídlení je lokalizováno do menších obcí a má částečně i rekreační charakter. Z hlediska zemědělského využití jsou plochy zejména ve vojenském výcvikovém prostoru minimálně hospodářsky využívány. Převážná většina pozemků leží ladem, některé v okrajových částech jsou sečeny jako louky nebo využívány jako extenzivní pastviny. Ve zbylé části území tvoří významnou část v nejbližším okolí nádrže les, zemědělská půda je zastoupena v plošších částech povodí ornou půdou, významně též trvalým travním porostem. Celková situace povodí je patrná z obrázku 1.

## Výsledky a diskuse

Pro ilustraci postupu odvození eutrofizačního potenciálu zdrojů fosforu budou v následující části dokumentovány některé kroky metodiky na datech z povodí VN Stanovice.

První krok – stanovení referenčních hodnot pro fosfor v povodí vychází ze znalosti geologických podmínek v povodí a monitoringu charakteristických koncentrací fosforu v neovlivněných částech povodí. Jak vyplývá z obrázku 2, je převážná část povodí tvořena žulami granitové řady, pouze v severovýchodní části do povodí zasahuje výběžek Doupovských hor s terciárními vulkanickými horninami. V blízkosti nádrže a v jižní části leží několik malých oblastí s písky a jíly terciárního stáří.

Z pohledu koncentrací fosforu a požadových hodnot jsou rozhodující oblasti se žulami a také výběžek vulkanických hornin Doupovských hor. Z provedeného monitoringu lesních povodí vyplývá, že charakteristické koncentrace celkového fosforu na žulách se pohybují v rozmezí 0,03-0,04 mg/l a na terciárních

**Tabulka 1.** Odhad významu vypouštění fosforu z obcí v povodí VN Stanovice se zohledněním retence v tocích mezi zdrojem a nádrží.

část obce	počet obyvatel	vzdálenost od hráze nádrže	množství celkového fosforu	množství SRP	přísun P do nádrže po zahrnutí retence	poznámka
		(m)				
Žalmanov	157	11270	99,9	79,9	32,4	
Stružná	277	12900	76,6	61,3	21,8	
Dražov	94	5660	33,8	27,1	17,2	
Dlouhá Lomnice	95	12970	35,5	28,4	10,1	
Javorná	70	12020	25,0	20,0	7,6	
Rybničná	44	11800	16,8	13,4	5,2	
Horní Tašovice	52	15820	16,4	13,1	3,7	
Andělská Hora	191	9190	7,2	5,8	2,8	
Nové Kounice	17	8940	6,9	5,5	2,7	
Německý Chloumek	16	14840	7,2	5,8	1,8	
Nová Víska	14	10920	4,6	3,7	1,5	
Peklo	2	9270	0,3	0,3	0,1	
Hlinky	3	7930	0,0	0,0	0,0	bezodtoké jímky
Nové Stanovice	9	2650	0,0	0,0	0,0	bezodtoké jímky
Píla	435	5510	0,0	0,0	0,0	odvod odpadních vod mimo povodí

vulkanických horninách dokonce v rozmezí 0,06-0,09 mg/l. To jsou značně rozdílné hodnoty než ty, které uvádí pro nadmořské výšky 500-900 m Metodika [23] - hraniční koncentrace pro velmi dobrý stav jsou 0,025 mg/l a nižší. Ještě markantnější je rozdíl při srovnání pilotního povodí s odtoky fosforu z oblasti Krušných hor, kde se průměrné koncentrace celkového fosforu běžně pohybují kolem 0,015 mg/l a jen výjimečně překročí hodnotu 0,02 mg/l. Je tedy zřejmé, že povodí VN Stanovice nezapadá do kategorií Metodiky [23] a referenční hodnota přirozených koncentrací fosforu bude muset být nastavena výše - přibližně na úrovni 0,035-0,04 mg/l. Tato hodnota předurčuje i výslednou trofii nádrže, pokud by povodí nebylo ovlivněno žádnými antropogenními vnosy fosforu.

Z pohledu inventarizace zdrojů v povodí převažují malé obce a různé využívané zemědělské pozemky. Hlavní část inventarizace zdrojů proto zahrnuje průzkum sídel a nakládání s odpadními vodami a pak také inventarizaci erozně ohrožených ploch a zemědělských pozemků s rizikem odtoku fosforu za běžných situací. V povodí se nachází jen několik menších rybníků, které nejsou intenzivně využívány pro chov ryb.

Významným potenciálním zdrojem fosforu pro eutrofizaci nádrže jsou především některé obce situované v povodí. V tabulce 1 jsou uvedeny části obcí s jejich odhadovanou produkcí celkového fosforu, který končí v místních vodotečích. Pro odhad vnosu fosforu za obcí podle způsobu nakládání s odpadními vodami byla použita Metodika bilanční analýzy zdrojů živin v povodí [26]. Podíl SRP v odtoku byl stanoven konzervativně na 80 %. Pro odhad eutrofizačního potenciálu je rozhodující nejen celkové množství SRP v odtoku, ale také vzdálenost zdroje od nádrže a případná retence a transformace fosforu v tocích a nádržích. V tabulce je započítána pro všechny zdroje retence v tocích podle [27] jednoduchou rovnicí kinetiky prvního řádu, kde byl koeficient retence fosforu stanoven prozatím jako jedno číslo pro všechny úseky toků v povodí. Stanovení různých koeficientů v závislosti na charakteristikách toků v povodí dosud v pilotním povodí probíhá.

Z tabulky je zřejmé, že nejvýznamnějším zdrojem fosforu v povodí je obec Žalmanov, která leží v relativně větší vzdálenosti od nádrže. Přesto že druhá obec v pořadí – Stružná – má téměř dvojnásobný počet obyvatel, projevuje se zde rozdílný způsob čištění odpadních vod. Zatímco v obci Stružná je v provozu ČOV s dočišťováním odtoku v soustavě malých rybníků, obec Žalmanov je odkanalizována a odpadní vody jsou zčásti svedeny do dvou septiků, ze kterých voda odtéká přímo do toku. Vliv malých obcí v blízkosti nádrže je eliminován nízkým počtem trvale bydlících obyvatel a v některých případech větší vzdáleností míst odtoku ze septiků do vodoteče. Odpadní vody z největší obce v povodí – Pily – jsou odvedeny mimo povodí a čištěny na ČOV Karlovy Vary.

Vliv zemědělských zdrojů je v pilotním povodí posuzován s ohledem na erozní smyky fosforu a dále jako přísun fosforu ze zemědělských ploch za běžných průtoků. V obou případech výpočty celkového vstupu fosforu a podílu SRP dosud probíhají a jejich zařazení do seznamu zdrojů a vyhodnocení jejich eutrofizačního potenciálu bude provedeno v průběhu následujících dvou měsíců.

V příspěvku prezentovaný přístup hodnocení eutrofizačního potenciálu je v určitém smyslu zjednodušeným způsobem simulačního modelování, založeného na použití empirických závislostí a koeficientů. Jeho výhodou je, že umožňuje provést základní porovnání významu zdrojů bez nutnosti použití složitého programu.

Kromě simulačního modelování je pro hodnocení úrovně zatížení vod živinami využíván již řadu let koncept stanovení trofického potenciálu [28, 29]. Ten je založen na kultivaci řasových kultur ve vzorku vody a stanovení narostlé sušiny. Dobře dokumentuje míru využitelného fosforu ve vzorku a určuje maximální produkci biomasy za standardních podmínek. Jeho plošné využití je však limitováno relativně vyššími nároky na stanovení než prostá analýza SRP ve vzorcích. Výsledek také může výrazněji ovlivnit případná toxicita vod nebo jiné nepříznivé vlivy.

## Závěr

Hodnocení vlivu rozpuštěného fosforu (SRP) produkovaného jednotlivými antropogenními zdroji v povodí může pomoci namísto běžně používaného celkového fosforu porovnávat vliv zdrojů na eutrofizaci vodních nádrží. Při hodnocení je však nutné zohlednit případnou retenci a transformaci rozpuštěného fosforu v tocích a nádržích v povodí a pravděpodobně také sezónnost přísunu znečištění ze zdrojů ve vztahu k teoretické době zdržení vody v hodnocené nádrži. V pilotním povodí VN Stanovice byly výpočetní postupy testovány na reálných datech a jsou zde postupně odvozovány chybějící koeficienty do rovnice výpočtu eutrofizačního potenciálu zdrojů. V průběhu druhé poloviny roku 2013 budou tyto postupy finalizovány a na začátku roku 2014 bude konečná verze Metodiky pro posuzování vlivu zdrojů znečištění na eutrofizaci vodních nádrží představena odborné veřejnosti a bude zahájen proces její certifikace.

## Poděkování

Příspěvek vznikl s podporou projektu Technologické agentury České republiky v programu Alfa TA02020808 „Metody optimalizace návrhu opatření v povodí vodních nádrží vedoucí k účinnému snížení jejich eutrofizace“.

## Literatura

- [1] HARPER, D. *Eutrophication of Freshwaters*, 1991, Chapman and Hall, London
- [2] KRÁSA, J., ROSENDORF, P., HEJZLAR, J., DURAS, J., DOŠTÁL, T., DVOŘÁKOVÁ, T., DAVID, V., KOUDELKA, P., JANOTOVÁ, B., BAUER, M., DEVÁTÝ, J., MIKŠÍ KOVÁ, K., KAVKA, P., STROUHAL, L., VRÁNA, K., ANSORGE, L., FIALA, D., BOROVEC, J. *Určení podílu erozního fosforu na eutrofizaci ohrožených útvarů stojatých povrchových vod*. Dílčí zpráva projektu NAZV ev. č. Q1102265 za rok 2011. ČVUT v Praze, 2011, 81 s.
- [3] PECHAR L., CHMELOVÁ, I., POTUŽÁK, J., ŠULCOVÁ, J. *Dynamika dusíku a fosforu v eutrofních rybnících*. 2009. In: Sborník příspěvků Konference Revitalizace Orlické nádrže. 6.-7. října 2009. Písek.
- [4] POTUŽÁK, J. ; DURAS, J. ; BOROVEC, J, RUCKI, J. *Rybníky Dehtář a Hejtman - látkové bilance*. 2010. Sborník příspěvků. Konference Revitalizace Orlické nádrže 2010, Písek, 12.-13.10. 2010.
- [5] DURAS, J., POTUŽÁK, J. *Látková bilance fosforu v produkčních a rekreačních rybnících*. 2012. Vodní hospodářství. 6: 210-216.
- [6] VOLLENWEIDER, R. A. *Scientific fundamentals of the eutrofication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrofication*. OECD, Paris, 1968, 159 p.
- [7] DILLON, P. J., RIGLER, F. H. *The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes*. Limnology and Oceanography, 1974, 19 (5): 767-773.
- [8] LARSEN, D. P., MERCIER, H. T. *Phosphorus retention capacity in lakes*. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1976, 33: 1742-1750.
- [9] OECD. *Eutrophication of Waters – Monitoring, Assessment and Control*. Final report. OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters. Vollenweider, R. A. and Kerekes, J (eds.). Organisation for Economic Development and Co-operation. Paris. 1982, 332 s.
- [10] HEJZLAR, J., ŠÁMALOVÁ, K., BOERS, P., KRONVANG, B. *Modelling phosphorus retention in lakes and reservoirs*. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2006, 6: 487-494.

- [11] REYNOLDS, C. AND DAVIES, P. *Sources and bioavailability of phosphorus fractions in freshwaters: a British perspective*. 2001. *Biological Reviews*, 76(1): 27-64.
- [12] PETERS, R. H. *Phosphorus availability in Lake Memphremagog and its tributaries*. 1981. *Limnol. Oceanogr.*, 26(6): 1150-1161.
- [13] FIALA, D., ROSENDORF, P. *Plošné zdroje fosforu v povodí VN Orlík*. In Očásková I. *Revitalizace Orlické nádrže 2009*. Písek, 6.10.2009. Písek: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, 2009, s. 75-86. ISBN 978-80-87278-29-1.
- [14] MIKŠÍKOVÁ, K., DOSTÁL, T., VRÁNA, K., ROSENDORF, P. *Transport sedimentu a fosforu při výlovu malých vodních nádrží*. 2012. *Vodní hospodářství*. 6: 203-209.
- [15] MILLIER, H. K. G. R., HOODA, P. S. *Phosphorus species and fractionation – Why sewage derived phosphorus is a problem*. 2011. *Journal of Environmental Management*. 92: 1210-1214.
- [16] NEAL, C., JARVIE, H. P., NEAL, M., LOVE, A. J., HILL, L., WICHAM, H.. *Water quality of treated sewage effluent in a rural area of the upper Thames Basin, southern England, and the impacts of such effluents on riverine phosphorus concentrations*. 2005. *Journal of Hydrology*. 304: 103-117.
- [17] SHARPLEY, A. N., SMITH, S.J., JONES, O.R., BERG, W. A., COLEMAN, G. A. *The Transport of Bioavailable Phosphorus in Agricultural Runoff*. 1992. *Journal of Environmental Quality*. 21: 30-35.
- [18] FIALA, D., ROSENDORF, P. *Plošné zdroje fosforu v povodí VN Orlík a její eutrofizace*. *Vodní hospodářství*, 2010. s. 199-202.
- [19] FIALA, D., ROSENDORF, P. *Variabilita odnosu fosforu ze zemědělské půdy v měřítku mikropovodí*. *Vodní hospodářství*, 2011. VTEI 6/2011, s. 27-31.
- [20] FUČÍK, P.; KAPLICKÁ, M.; ZAJÍČEK, A.; KVÍTEK, T. *Vyhodnocení monitoringu jakosti vod v malém zemědělsko-lesním povodí: diskretní a kontinuální přístup*. *Vodní hospodářství*, 2010. 8/2010, s. 213-217.
- [21] RICHTR J., HEJZLAR J., SEMANČÍKOVÁ E. *Koncentrace a formy fosforu v odtoku z malých zemědělských povodí v povodí nádrže Orlík*. In Očásková I. *Revitalizace Orlické nádrže 2009*. Písek, 6.10.2009. Písek: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, 2009, s. 65-74.
- [22] KOPÁČEK, J., PROCHÁZKOVÁ, L., HEJZLAR, J., BLAŽKA, P. *Trends and seasonal patterns of bulk deposition of nutrients in the Czech Republic*. 1997. *Atmospheric Environment*, 31(6): 797-808.
- [23] ROSENDORF, P., TUŠIL, P., DURČÁK, M., SVOBODOVÁ, J., BERÁNKOVÁ, T. A VYSKOČ, P. *Metodika hodnocení všeobecných fyzikálně-chemických složek ekologického stavu útvarů povrchových vod tekoucích*. 2011. Závěrečná zpráva dílčí části projektu SFŽP č. 02671012 (MŽP). VÚV TGM, v.v.i., prosinec 2011, 20 s.
- [24] DILLON, P.J., KIRCHNER, W.B. *The effects of geology and land use on the export of phosphorus from watersheds*. 1975. *Water Research*. 9(2): 135-148.
- [25] VODNÍ DÍLO STANOVICE [online]. Povodí Ohře, státní podnik [citováno dne 20.8.2013] Dostupné na: <<http://www.poh.cz/vd/stanovice.htm>>
- [26] HEJZLAR, J. *Metodika bilanční analýzy zdrojů živin v povodí*. 2010. Biologické centrum AV ČR, Hydrobiologický ústav. České Budějovice. 11 s.
- [27] REDDY, K. R., KADLEC, R. H., FLAIG, E., GALE, P. M. *Phosphorus Retention in Streams and Wetlands: A Review*, 1999. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29:1, 83-146,
- [28] ŽÁKOVÁ, Z. (ed.) *Stanovení trofického potenciálu vody*. 1981. Metodická příručka. Brno, DT ČSVTS, 104 s.
- [29] TNV 75 7741. *Mikrometoda stanovení toxicity a trofického potenciálu řasovým testem*. 1997. Hydroprojekt a.s., Praha, 15 s.