

VLIV EUTROFIZACE NA JAKOST VODY V NÁDRŽÍCH: METODIKA HODNOCENÍ PŘÍSUNU ŽIVIN Z POVODÍ A PROTIEUTROFIZAČNÍ ODOLNOSTI NÁDRŽOVÉHO EKOSYSTÉMU

Doc. Ing. Josef Hejzlar, CSc.¹⁾, RNDr. Jindřich Duras, Ph.D.²⁾, RNDr. Blanka Staňková³⁾, Mgr. Jan Turek¹⁾, RNDr. Jiří Žaloudík, CSc.¹⁾

¹⁾Biologické centrum AV ČR, v.v.i., Hydrobiologický ústav, Na Sádkách 7, 370 05 České Budějovice, e-mail: hejzlar@hbu.cas.cz

²⁾Povodí Vltavy, s.p., Denisovo nábřeží 14, 304 20 Plzeň, e-mail: duras@pvl.cz

³⁾Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 601 75 Brno, e-mail: stankova@povodi.cz

Úvod

Vysoký přísun živin z povodí způsobující eutrofizaci a zhoršování jakosti vody je akutním či latentním problémem mnoha našich nádrží, včetně nádrže vodárenských. Plány opatření v povodí, které se v současnosti zpracovávají pro naplnění Rámcové vodní směrnice, by měly proti eutrofizaci povrchových vod účinně postupovat. Základní předpokladem, aby správci povodí mohli navrhovat účinná protieutrofizační opatření, je znalost jednak kritických koncentrací živin, při kterých eutrofizace nastává, jednak množství znečištění, které se v povodí dostává do recipientů z jednotlivých zdrojů. Kritické koncentrace vyplývají z legislativy (např. Nař. vl. ČR č. 61/2003 Sb. o ukazatelích přípustného znečištění vod), popř. z obecných požadavků na jakost vody ve vodních zdrojích (např. průměrná roční koncentrace $P_{\text{celk}} 0,035 \text{ mg l}^{-1}$ jako hraniční hodnota pro mezotrofii jezer a nádrží využívaných vodárensky [1]). Identifikace a kvantifikace zdrojů živin v povodí není složitá záležitost, ale předpokládá vyhodnocování nejen běžné vodohospodářské evidence, např. o vypouštěných odpadních vodách, hydrologickém režimu a jakosti vody v tocích, ale také dalších dat, která zatím správci povodí soustavně shromažďována nejsou, tj. zejména údajů o krajinném krytu, zemědělské výrobě, rybářském hospodaření a demografii povodí. V ČR dosud metodika pro identifikaci a kvantifikaci zdrojů živin v povodí, kterou by správci povodí mohli rutinně používat, nebyla zavedena, což je rozdíl proti státům západní Evropy a Skandinávie, kde bylo nutné od 70. let minulého století řešit řadu problémů s eutrofizací jezer a okolních moří, a takové metody se tam používají již od této doby [2,3,4].

Cílem příspěvku je představit jeden z možných způsobů hodnocení odnosu živin z povodí a schopnosti nádrží odolávat živinovému zatížení. Metoda vychází z postupů z vodohospodářské praxe rozvinutých států EU [3,4], přitom však respektuje specifické podmínky ČR (např. fenomén rybníkářství). Snahou bylo, aby odborná úroveň hodnocení a výběr monitorovaných ukazatelů jakosti vody umožňovaly samostatné rutinní použití této metodiky správci povodí v ČR. Metodika je ukázána na příkladu vodárenské nádrže (v.n.) Mostišť, pro kterou byla v minulém roce použita při zpracování podkladů pro aktualizaci plánu pro zlepšování jakosti vodárenského odběru z této nádrže a pro plánování v oblasti vod [5].

Popis metody

Výpočet rozdělení zdrojů živin v povodí je založen na skutečnosti, že látkový odnos (L) v závěrovém profilu bilančního povodí se skládá z odnosu živin z přírodních zdrojů (B ; tj. především lesní půda), přímé atmosférické depozice na hladinu vodních toků a nádrží ($Atm.dep.$), emisí z bodových zdrojů ($Bod.z.$), příspěvku rybářského obhospodařování rybníků ($Ryb.$) a příspěvku antropogenních difúzních zdrojů ($Dif.z.$) zahrnujících všechny ostatní vlivy lidské činnosti v povodí (zejména zemědělství). Kromě toho je nutné vzít v úvahu zadržování (neboli retenci; $Ret.$) živin v povrchových vodách mezi zdroji a závěrovým profilem. Bilanci vyjadřuje rovnice (1):

$$L = B + Atm.dep. + Bod.z. + Ryb. + Dif.z. - Ret. \quad (1)$$

Tato bilance umožňuje vyčíslení příspěvku difúzních zdrojů, který je v praxi velmi obtížné při běžném bodovém vzorkování realisticky zjistit. Když známe látkový odnos v závěrovém profilu toku a stanovíme (popř. odhadneme) příspěvky ostatních procesů, lze z rovnice (1) velikost difúzních zdrojů dopočítat. Jestliže se látkové toky v rovnici (1) převedou vydělením množstvím proteklé vody na koncentrace, získáváme model, který je užitečný pro přímé srovnávání koncentrací a následně také pro hodnocení trofie nádrže či imisního stavu v toku a lze jej použít i pro predikční účely.

Kritický přísun živin do nádrže z povodí (L_{krit}) je takové zatížení, které odpovídá maximální koncentraci živin v nádrži, při níž právě ještě nedochází k nežádoucím projevům eutrofizace. L_{krit} se v navržené metodice stanovuje pomocí jednoduchých empirických modelů založených na funkčních závislostech součinitele retence dané živiny v nádrži (R) na době zdržení vody v nádrži nebo na hydraulickém zatížení [6]. Tyto modely lze použít s průměrnými publikovanými parametry zjištěnými pro velké soubory nádrží, v případě existence bilančních dat o retenci živin v dané nádrži je však přesnější provést vlastní parametrizaci modelů a ke výpočtům L_{krit} používat modely zkalibrované pro specifické podmínky dané nádrže.

Aplikace metody pro v.n. Mostišť. Nádrž Mostišť (celkový objem 12 mil.m³; max. zatopená plocha 0,93 km²; průměrná doba zdržení 93 d) leží na horním toku Oslavy a je vodárenský zdrojem pro ~70 tis. obyvatel kraje Vysočina [7]. Povodí nádrže o rozloze 222 km² je osídleno ~10 tis. obyvateli a je intenzivně využíváno zemědělsky (54% plochy povodí se zorněním 82%) a k chovu ryb (170 produkčních rybníků o celkové ploše 6,7 km²). Kvalita vody v nádrži trpí eutrofizací, přičemž hodnota L_{krit} pro fosfor je z hlediska mezotrofie požadované pro vodárenské zdroje překračována zhruba dvakrát [1,5]. Data pro vyhodnocení zdrojů živin v povodí byla pořízena v roce 2006 v rámci monitoringu Povodí Moravy, s.p., v němž se sledovalo 27 odběrových profilů reprezentujících přítoky do nádrže a odtoky ze všech hlavních zdrojů, tj. lesních a zemědělských ploch, rybníků i zdrojů komunálního znečištění. Vzorkování probíhalo bodově v intervalu jeden měsíc, který byl za intenzivních srážkových událostí a v podzimním období vypouštění rybníků před výlovem vhodně zkrácen. Pro bilanční hodnocení bylo povodí rozděleno do subpovodí odpovídajícím odběrovým profilům a pomocí geografického informačního systému byly vyhodnoceny pro tato subpovodí základní charakteristiky krajinného krytu (les, pole+louky, sídla+technogenní plochy a vody), počty obyvatel v obcích, odkanalizování obyvatelstva a čištění odpadních vod. Odnosy živin ze zemědělské a lesní půdy byly vypočteny z dat monitoringu 2006 pro 5 malých povodí bez komunálních zdrojů a činily u zemědělské půdy 19 kg P_{celk}

km² rok⁻¹ a 3500 kg N_{celk} km² rok⁻¹ a u lesní půdy 4,4 kg P_{celk} km² rok⁻¹ a 330 kg N_{celk} km² rok⁻¹ [5,8]. Zatížení vodních ploch atmosférickou depozicí bylo vypočteno na základě dat o průměrné depozici fosforu a dusíku v neznečištěných oblastech ČR (15±4 kg P_{celk} km⁻² rok⁻¹ a 800±200 N_{celk} km⁻² rok⁻¹ [9]). Při výpočtu množství P a N ve vypouštěných odpadních vodách v povodích jednotlivých rybníků jsme uvažovali jednak evidovaná množství ve výpustech čistíren odpadních vod (ČOV), jednak množství odcházející do toků od obyvatel, jejichž odpadní vody nebyly čištěny ani evidovány. Zatížení toků z neevidovaných výpustí bylo odhadnuto ve dvou variantách – minimální uvažovala pouze odkanalizované obyvatele bez připojení na ČOV s 90%-ním exportem vyprodukovaného množství živin do toků, maximální zahrnovala i obyvatele bez připojení na kanalizaci s exportem do toků 50%. Použité hodnoty specifické produkce byly 2,2 g P_{celk} obyv.⁻¹ d⁻¹ a 12 g N_{celk} obyv.⁻¹ d⁻¹ [5,8]. Příspěvek rybářského obhospodařování rybníků byl vypočten na základě bilance vnosu živin do rybníků krmivem a násadou ryb a exportu ve výlovcích [5,8]. Retence živin v rybnících a v.n. Mostišť byla stanovena z dat monitoringu 2006, v tocích se retence živin uvažovala, protože se žádné přímé měření v povodí v.n. Mostiště neprovádělo a odhady z literatury jsou zatíženy vysokou nejistotou [10]. Látkové toky v závěrových profilech bilančních povodí byly vypočteny v měsíčním kroku jako součin průměrného měsíčního průtoku vypočteného hydrologickou analogií z přítoku do v.n. Mostiště (provozní data Povodí Moravy, s.p.) a průměru koncentrací všech bodových vzorků odebraných v daném měsíci [5]. Nejistota výpočtu velikosti difúzních zdrojů a ostatních složek bilance byla stanovena metodou standardních nejistot, analogicky jako při výpočtu nejistoty analytických měření [5,11]. Kritický přísun fosforu byl vyhodnocen na základě datových řad provozního sledování jakosti vody a hydrologie nádrže Povodí Moravy, s.p., z let 1993-2006. Pro výpočet koncentrace P ve v.n. Mostišť při změně přísunu P z povodí byly použity empirické modely retence P podle Chapry [12] a Vollenweidera [6].

Výsledky a diskuse

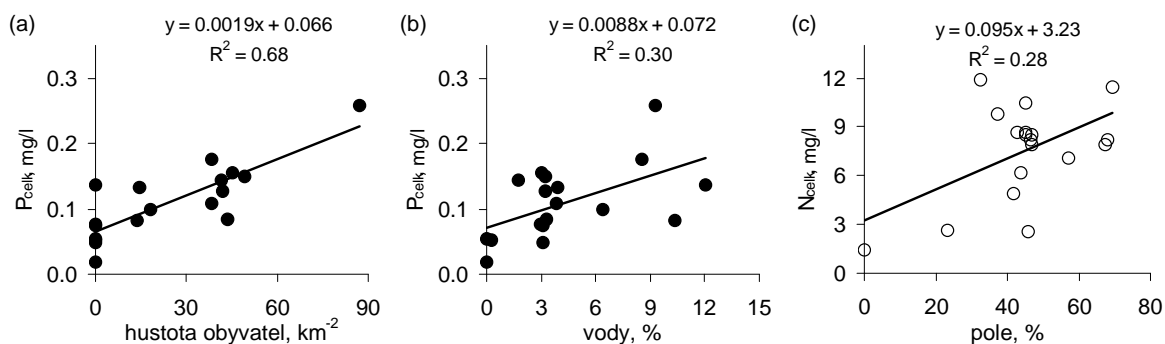
Velikost zdrojů živin vypočtená bilanční metodou pro povodí v. n. Mostiště se závěrovým profilem na hrázi je uvedena v tab. 1. U fosforu dominovaly ve všech 14 hodnocených bilančních subpovodích bodové zdroje (rozsah 39-95%, celé povodí 50%). Další v pořadí významnosti byly difúzní zdroje (26%) zahrnující především odnasy ze zemědělské půdy (se zřejmě zanedbatelným podílem urbanizovaných a nevyužívaných ploch). Rybářství se podílelo na celkových zdrojích v povodí 18%, příspěvek rybářství byl ale prakticky vykompenzován retencí fosforu, k níž v rybnících

Tabulka 1. Zdroje a retence P_{celk} a N_{celk} v povodí v.n. Mostiště v r. 2006. Chybový interval u hodnot odnosu představuje nejistotu stanovení.

Zdroje/retence živin	P _{celk}		N _{celk}	
	t.rok ⁻¹	%	t.rok ⁻¹	%
Lesy	0,3±0,1	4,1	26±4	4
Atmosférická depozice	0,11±0,02	1,3	6±1	1
Bodové zdroje	4,2±0,3	50	27±2	4
Rybářství	1,5±0,2	18	7±1	1
Difúzní zdroje	2,2±1,0	26	619±370	90
<i>Celkem zdroje</i>	<i>8,4±1,6</i>	<i>100</i>	<i>685±378</i>	<i>100</i>
Retence – povodí	1,4±0,7	16	214±99	31
Retence – v.n.Mostiště	2,8±0,6	33	30±25	4
<i>Celkem retence</i>	<i>4,1±1,3</i>	<i>49</i>	<i>269±124</i>	<i>39</i>

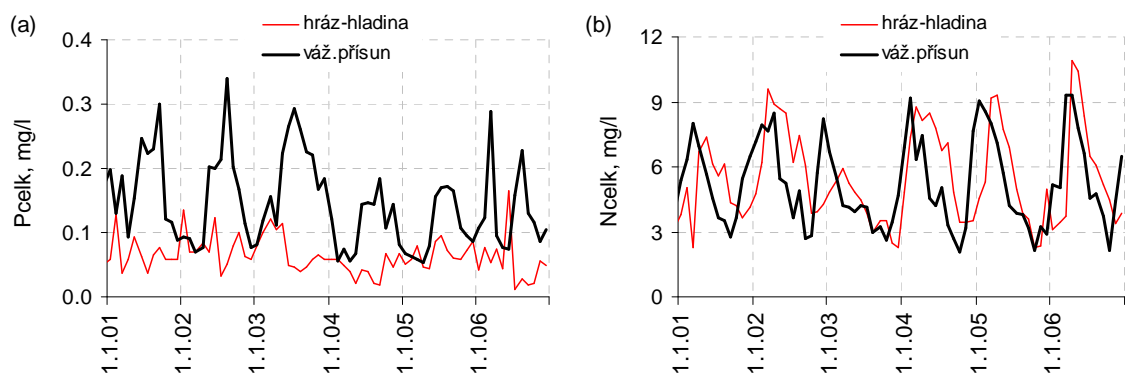
současně docházelo [5,8]. Přírodní pozadí (odnos z lesů) a atmosférická depozice na vodní hladiny se podílely méně než 7%. U dusíku se jednoznačně nejdůležitějšími ukázaly difúzní zdroje, které dodávaly do toků v povodích jednotlivých odběrových profilů 67-88% N_{celk} . Bodové zdroje se podílely na odnosu dusíku méně než 10%. *Intervaly nejistoty* byly pro přímo stanovené zdroje (lesy, atmosférická depozice, bodové zdroje, rybářství) relativně malé (do $\pm 15\%$), ale u difúzních zdrojů, které byly dopočítávány nepřímou z bilance, výrazně rostly na $\sim 50\%$ u P_{celk} a na $\sim 60\%$ u N_{celk} .

Kontrolu správnosti výpočtu difúzních zdrojů poskytlo srovnání koncentračního vyjádření difúzních zdrojů vůči koncentracím P_{celk} v odtoku ze 4 zemědělských povodí naměřeným v monitoringu 2006, které se pohybovaly v rozmezí 0,061-0,108 mg l^{-1} s průměrem 0,083 mg l^{-1} . Od tohoto rozmezí se asi polovina ze 14 hodnocených subpovodí odchylovala jak do nižších, tak k vyšším hodnot. Příčinou bylo nejspíše nepřesné stanovení látkového toku v závěrových profilech anebo kombinace chyb při stanovení ostatních zdrojů a retence. Další ověření správnosti metody bylo provedeno korelační analýzou vztahů mezi charakteristikami dílčích subpovodí (kategorie krajinného krytu, hustota obyvatel, bodové zdroje P a N) a průtokově váženými koncentracemi živin v odtoku. Tato analýza ukázala těsné vztahy ($p < 0,01$) mezi koncentracemi P_{celk} a koncentracemi $N\text{-NH}_4$, plochou sídel v povodí, hustotou obyvatel (obr. 1a) a vypouštěním P_{celk} i N_{celk} z bodových zdrojů, méně těsně ($p < 0,05$) koncentrace P_{celk} korelovaly s plochou vodních hladin (obr. 1b). Koncentrace N_{celk} byly významně a pozitivně korelovány s koncentrací dusičnanového dusíku, s rozlohou polí (obr. 1c) a s rozlohou celé zemědělské půdy, tj. polí a luk dohromady. Nevýznamné vztahy N_{celk} byly vůči všem veličinám souvisejícím se sídly a vypouštěním odpadních vod. Z toho vyplývá, že nejdůležitějším zdrojem N_{celk} v tocích v povodí v.n. Mostiště bylo vyplavování dusičnanů z orné půdy. I když sloučeniny dusíku byly obsaženy v nezanedbatelném množství ve vypouštěných komunálních odpadních vodách, jejich dopad na toky byl řádově nižší.



Obr. 1. Závislosti koncentrace P_{celk} v tocích na hustotě obyvatel a zastoupení vodních ploch, resp. závislost koncentrace N_{celk} na podílu polí, v povodí v.n. Mostiště v r. 2006

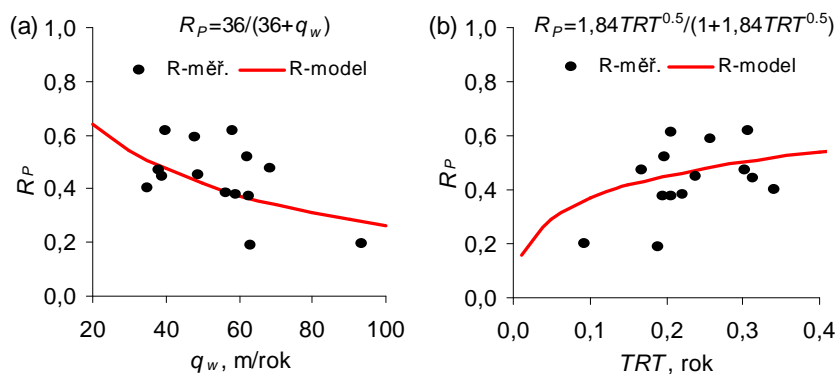
Retence živin v nádrži a výpočet kritického zatížení. Srovnání nádržových koncentrací s koncentracemi v celkovém přísunu na obr. 2 ukazuje, že P_{celk} je v nádrži během vegetačního období roku účinně zadržován, kdežto vysoké přítokové koncentrace N_{celk} nádrží pouze procházejí s fázovým posunem 1 až 2 měsíců, který zhruba odpovídá době zdržení vody v nádrži za jarních průtoků. Hodnoty součinitele retence P_{celk} v nádrži (R_P) se v jednotlivých letech pohybovaly v rozmezí 0,19-0,62 s průměrem 0,45. Průměrná hodnota součinitele retence dusíku v nádrži v období 1993-2006 byla záporná (-0,01). Tento výsledek pravděpodobně není vhodné vysvětlovat možností fixace dusíku v nádrži (např. sinicemi), ale spíše jde o nepřesné stanovení přísunu N do nádrže v důs-



Obr. 2. Srovnání měsíčních průměrných vážených koncentrací v celkovém přítoku a hladinových koncentrací u hráze v.n. Mostiště v období 2001-2006: (a) P_{celk} , (b) N_{celk}

ledku příliš dlouhého intervalu vzorkování, zejména během jarního odtokového maxima z povodí, kdy se kombinují vysoké koncentrace s vysokým průtokem.

Kritické živinové zatížení nádrže z hlediska eutrofizace bylo vypočteno pro fosfor (jakožto faktor řídící primární produkci ve v.n. Mostiště) pomocí rovnice $P_i = P/(1-R_p)$, kde P_i je průměrná objemově vážená koncentrace P_{celk} v celkovém vstupu vody do nádrže, P je průměrná roční koncentrace v nádrži u hráze odpovídající horní hranici mezotrofie požadované pro vodárenské zdroje ($0,035 \text{ mg l}^{-1}$) a R_p je součinitel retence vypočtený pomocí empirického modelu, jehož funkčnost je pro použití v nádrži ověřena. Pro v.n. Mostiště byla na datovém souboru 1993-2006 ověřena možnost použití dvou modelů R_p , které poměrně dobře vyhovovaly trendům závislosti na průtočnosti (obr. 3). Výsledky výpočtů kritické živinové zátěže pro hydrologické podmínky v.n. Mostiště v jednotlivých letech období 1993-2006 poté ukázaly shodně při použití obou modelů, že k dosažení mezotrofie v nádrži bude třeba snížit koncentraci a přísun fosforu v přítocích na cca $0,04\text{-}0,07 \text{ mg l}^{-1}$, resp. $2\text{-}3 \text{ t rok}^{-1}$ (tab. 2). Požadované snížení přísunu fosforu z povodí je značné. Koncentrace P_i zhruba odpovídá za podmínek roku 2006 exportu P z lesní půdy a difúzních zdrojů a velikosti retence P v povodí beze změny, ale např. s nutností čistit komunální odpadní vody ve všech obcích v povodí bez ohledu na velikost s účinností 90%. Takový výsledek je podstatným impulsem pro správce povodí při hledání možností snížení jak snížit export P do vodotečí a zároveň je kvantifikovatelným cílovým ukazatelem pro ověření účinnosti budoucích opatření.



Obr. 3. Ověření modelů součinitele retence R na datech z v.n. Mostiště 1993-2006: (a) model Chapry [12], (b) model Vollenweidera korigovaný pro nádrže [6]

Tabulka 2. Předpověď kritické hodnoty koncentrace a množství P_{celk} v přítoku pro dosažení mezotrofie u hráze v.n. Mostiště na základě dat z období 1993-2006. Hodnoty představují průměry za celé období \pm nejistotu vyplývající z hodnoty střední absolutní chyby modelů R_P (v závorkách jsou rozsahy průměrných ročních hodnot).

Ukazatel	Naměřená data	Model Chapra [12]	Model Vollenweider [6]
P_i , mg.l ⁻¹	0,132 (0,083-0,176)	0,060 \pm 0,004 (0,048-0,071)	0,066 \pm 0,006 (0,055-0,073)
P_i , t.rok ⁻¹	5,6(3,3-8,3)	2,5 \pm 0,1(1,9-2,9)	2,7 \pm 0,2(2,0-3,4)

Souhrn

Navržená metodika umožňuje identifikaci a kvantifikaci zdrojů živin v povodí (např. bodové zdroje, difúzní zdroje, rybářské obhospodařování rybníků, atmosférická depozice, přírodní pozadí) a stanovení kritického zatížení dané nádrže živinami z hlediska eutrofizace, což jsou nezbytné informace pro navrhování účinných protieutrofičních opatření v nádržích. Použití této metodiky pro hodnocení vodárenské nádrže Mostiště a jejího povodí ukázalo, že její výsledky jsou v souladu s alternativními způsoby vyhodnocení zdrojů živin v povodí, např. se vztahovou analýzou mezi charakteristikami využití krajiny v povodí a jakostí vody tocích anebo s přímým stanovením odnosu ze zemědělských povodí při vyloučení ostatních zdrojů.

Poděkování

Tato práce vznikla s podporou projektů AVOZ č. 60170517, AV ČR č. 1QS600170504 a MŠMT č. OC08040.

Literatura

1. Eutrophication of Waters – Monitoring, Assessment and Control. Final Report. OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters, OECD, Paris, 1982, 332 pp.
2. Behrendt H.: Separation of point and diffuse loads of pollutants using monitoring data of rivers. Water Sci. Technol. 28, 165-175, 1993.
3. Borgvang S. A., Selvik J. R., Glesne O. (ed.): Development of HARP Guidelines - Harmonised Quantification and Reporting Procedures for Nutrients. SFT Report 1759/2000. Norwegian Pollution Control Authority, Oslo, Norway, 2000, 180 p.
4. Source apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2005, 48 p.
5. Hejzlar J., Duras J., Komárková J., Turek J., Žaloudík J.: Vodárenská nádrž Mostiště: vyhodnocení monitoringu nádrže a povodí 2006. Studie pro MZe ČR, Biologické centrum AV ČR, v.v.i., Hydrobiologický ústav, České Budějovice, 2007, 131 s.
6. Hejzlar J., Šámalová K., Boers P., Kronvang B.: Modelling phosphorus retention in lakes and reservoirs. Water, Air, Soil Pollut.: Focus 6, 487-494, 2006.
7. Povodí Moravy, s.p.: Manipulační řád pro přehradu Mostiště na řece Oslavě v km 65,948. Povodí Moravy, s.p. Brno, vodohospodářský dispečink, Dřevařská 11, Brno, 2003.
8. Hejzlar J., Žaloudík J., Duras J., Staňková B., Mivalt R.: Vliv rybářského obhospodařování rybníků na jakost vody ve vodárenské nádrži Mostiště. Sborník konference Vodárenská biologie 2008, 29-30. ledna 2008, Praha, Česká republika (J. Říhová Ambrožová, Ed.), Vodní zdroje EKOMONITOR spol. s r.o., str. 933–101.
9. Kopáček J., Procházková L., Hejzlar J., Blažka P.: Trends and seasonal patterns of bulk deposition of nutrients in the Czech Republic. Atmos. Environ. 31, 797-808, 1997.
10. Kronvang B., Hejzlar J., Boers P., Jensen J.P., Behrendt H., Anderson T., Arheimer B., Venohr M., Hoffmann C. C.: Nutrient Retention Handbook. Software Manual for EUROHARP-NUTRET and Scientific Review on Nutrient Retention, EUROHARP report 9-2004, NIVA report SNO 4878-2004, Norwegian Institute for Water Research, Oslo, Norway, 103 pp.
11. Kvalimetrie 6. Stanovení nejistoty analytických měření. (M. Suchánek, Ed.) EURACHEM-ČR, Praha, 1999, 95 s.
12. Chapra S. C.: 'Comment on 'An empirical method of estimating the retention of phosphorus in lakes', by W. B. Kirchner and P. J. Dillon'. Water Resour. Res. 2, 1033-1034, 1975.