

## Scénářová studie pro snížení eutrofizace nádrže Lipno

Josef Hejzlar<sup>1</sup>, Milan Hladík<sup>1</sup>, Martin Růžička<sup>2</sup> & Vladimír Rohlík<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hydrobiologický ústav AV ČR a Biologická fakulta JU, Na sádkách 7, 370 05 České Budějovice,

<sup>2</sup>Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, Pod Paťankou 5, 166 12 Praha,

<sup>3</sup>Povodí Vltavy s.p., z. Horní Vltava, Litvínovická silnice 5, 371 21 České Budějovice

### Úvod

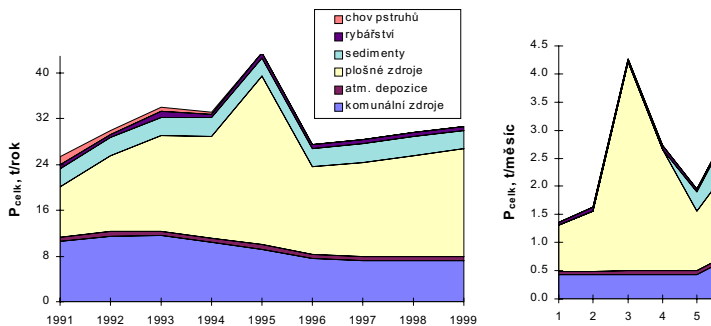
Nádrž Lipno nese příznaky eutrofizace již nejméně od počátku 80. let minulého století (PORCALOVÁ 1984, HEJZLAR 1998). Eutrofizace této nádrže je způsobena nadměrným přísunem fosforu, který má původ zejména v komunálních odpadních vodách vypouštěných do nádrže a do toků v povodí (HEJZLAR 1998). Během posledního desetiletí byla vybudována řada účinných čistíren, což částečně snížilo vnos fosforu do nádrže, avšak k výraznějšímu snížení trofie nádrže nedošlo. V současnosti existuje tlak na další rozvoj okolí nádrže i celého povodí, což může znamenat potenciální ohrožení kvality vody v nádrže, pokud současně nebudou přijata regulační opatření ve vypouštění odpadních vod.

Cílem příspěvku je ukázat výsledky scénářové studie s použitím jednoduchého regresního modelu mezi přísunem fosforu a trofii nádrže, v rámci které jsme se snažili nalézt maximální přípustné zatížení nádrže fosforem pro přijatelnou kvalitu vody v nádrži z hlediska jejího rekreačního využití. V příspěvku je uveden (i) vývoj zdrojů fosforu v nádrži v letech 1991 až 1999, (ii) vztah mezi přítokovou koncentrací fosforu a koncentrací chlorofylu v nádrži a (iii) výsledky scénářové studie pro reálné i hypotetické varianty budoucího vývoje.

### Metodika

Nádrž Lipno (kóta max. hladiny 726 m n. m., celkový objem 310 mil. m<sup>3</sup>, zatopená plocha 48,7 km<sup>2</sup>, průměrná/maximální hloubka 6,2/21 m, průměrná doba zdržení 0,74 roku) je významnou víceúčelovou nádrží v podhůří Šumavy. Podrobné informace o nádrži a vývoji kvality vody uvádějí NOVÁK (1968), BRANDL (1973) a HEJZLAR (1998).

K charakterizaci vývoje jakosti vody v nádrži byla použita data pravidelného monitoringu Povodí Vltavy a.s., které v měsíčních intervalech sledovalo profily Lipno–hráz a Vltava–Pěkná. Do bilance přísunu celkového fosforu ( $P_{\text{celk}}$ ) do nádrže byly zahrnuty následující zdroje: (i) čistírny odpadní vod (ČOV) Frymburk, Lipno, Černá v Pošumaví, Horní Planá a dalších 18 ČOV v povodí nádrže, u nichž bylo množství  $P_{\text{celk}}$  vypočteno na základě odtokových koncentrací a množství vypouštěné odpadní vody podle údajů provozovatelů, (ii) zatížení od ostatního obyvatelstva včetně rekreatantů, (iii) atmosférická depozice na hladinu nádrže v jednotlivých měsících roku podle dat z nádrže Slapy, (iv) přísun Vltavou, vypočtený z průměrných měsíčních průtoků a koncentrací v profilu Vltava–Pěkná, (v) vnos do nádrže z difúzních zdrojů v mezipovodí hráz až Vltava–Pěkná, vyhodnocený z regresních vztahů mezi krajini-



**Obrázek 1.** – Průměrné roční přísuny fosforu do nádrže Lipno v období 1991–1999 (vlevo) a průměrné měsíční přísuny fosforu do nádrže Lipno v období 1998–1999 (vpravo).

ným krytem a koncentrací  $P_{\text{celk}}$ , (vi) uvolňování fosforu ze sedimentů a (vii) množství  $P_{\text{celk}}$ , dodávaná do nádrže v podobě rybích násad vysazovaných Českým rybářským svazem (ČRS) (HEJZLAR A KOL. 2000).

## Výsledky a diskuse

### Zdroje $P$ v nádrži

Roční vnosi  $P_{\text{celk}}$  do nádrže v letech 1991–1999 z jednotlivých zdrojů a rozdělení úhrnného ročního vnosu na jednotlivé měsíce jsou uvedeny na obr. 1.

Největším zdrojem fosforu pro nádrž byly odnasy ze zalesněných ploch a z polí, které přispívaly k celkovému zatížení nádrže 35–68 %. Jejich velikost závisela především na průtoku v daném roce bez dlouhodobého časového trendu. Podíl komunálních zdrojů zahrnujících splaškové odpadní vody v celém povodí se pohyboval v rozmezí 21–42 %. Tento zdroj se v letech 1998–1999 oproti období 1991–1997 snížil zhruba o jednu pětinu, což bylo způsobeno jednak výstavbou ČOV s odstraňováním fosforu v Horní Plané a Lipně a rovněž poklesem specifické produkce fosforu obyvatelstvem o ~25 % v důsledku částečného snížení obsahu fosforu v pracích prostředcích. Odhad příspěvku sedimentů uložených na dně nádrže na zatížení vodního sloupce fosforem se pohyboval kolem 10 % rovněž bez časové závislosti. Podíl rybochovného hospodaření na vnosu fosforu do nádrže prostřednictvím rybích násad činil 1,7–2,9 %; zároveň je však u tohoto zdroje třeba mít na zřeteli, že prostřednictvím odlovů byl tento fosfor z nádrže opět odstraněn, takže čistá bilance  $P$  v rybách byla naopak mírně záporná (průměr za roky 1990–1998 byl –0,2 %). Klecový chov pstruha v zátoce Černého potoka u Frymburku přispíval významněji (2–6 %) k fosforové bilanci nádrže pouze v letech 1991–1993 a v roce 1995 byl úplně zrušen. Podíl atmosférické depozice fosforu na hladinu nádrže činil v průměru 2,4 %.

Průměrné hodnoty přísunu fosforu do nádrže v jednotlivých měsících roku v letech 1998 až 1999 (obr. 1) ukazují, že v letním období nabývají na významu komunální odpadní vody a spolu se zatížením ze sedimentů mohou zahrnovat až 70 % celkového vnosu fosforu do vodního objemu nádrže.

### Závislost koncentrace fytoplanktonu na přísunu fosforu a scénáře vývoje eutrofizace

Pro popis závislosti koncentrace fytoplanktonu na koncentraci, popř. přísunu fosforu v nádrži Lipno byl použit model podle Vollenweidera/OECD (SAS 1989), jenž reprezentuje průměr-

né roční hodnoty pro 150 různých jezer a nádrží mírného pásma a vyjadřuje všeobecně platnou závislost míry eutrofizace na koncentraci fosforu v celkovém přítoku. Poloha bodů nádrže Lipno ve Vollenweiderově modelu (viz HEJZLAR A KOL. 2000) dokládá specifický charakter nádrže Lipno. Body koncentrace fytoplanktonu v nádrži Lipno jsou umístěny na horním okraji pásu 95%ní spolehlivosti modelu, což znamená, že při daném přísunu fosforu je koncentrace fytoplanktonu v nádrži téměř o půl řádu vyšší než v průměrné nádrži či průměrném jezeře. Zřejmou příčinou je malá hloubka nádrže Lipno a styk velké části produkční vrstvy nádrže se sedimenty. Časté promíchávání nádrže větrem způsobuje resuspenzi sestonu i dnových sedimentů do vodního sloupce a možnost opakovaného využití fosforu pro produkci fytoplanktonu.

Data ze sledování nádrže v 90. letech doplněná daty BRANDLA (1973) pro období 1967 až 1968, kdy nádrž nevykazovala známky eutrofizace, umožnila sestavení vlastního regresního modelu (1) pro shodné proměnné jaké používá Vollenweiderova závislost:

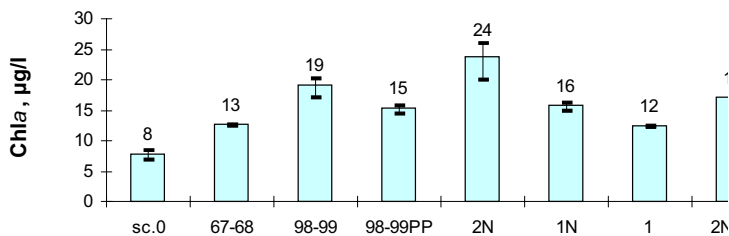
$$Chla = 2,06e^{0,065P_i(1+TRT^{0,5})}, \quad (n=11, R=0,88, P>0,99) \quad (1)$$

kde  $Chla$  – průměrná koncentrace chlorofylu a v období duben–říjen,  $P_i$  – průměrná koncentrace  $P_{celk}$  v celkovém přítoku do nádrže a  $TRT$  – teoretická doba zdržení vody v nádrži. Ačkoliv byl tento model vypočten z pouze 11 bodů, je statisticky významný na hladině významnosti  $\alpha > 0,01$  a reprezentuje 78 % variability vztahu mezi přísunem fosforu a koncentrací chlorofylu  $a$ . Zbývající část variability může být způsobena řadou faktorů, např. rozdíly ve složení fytoplanktonu v jednotlivých letech danými různými teplotními podmínkami anebo nepřesnostmi ve vzorkování a analytických metodách. Je třeba zdůraznit, že tento model nelze extrapolovat mimo rozmezí naměřených dat, neboť zvolený typ regresní rovnice nerespektuje reálný průběh závislosti zejména v oblasti zvyšování přísunu fosforu.

#### *Trofie nádrže při různých scénářích přísunu fosforu*

Scénáře kvality vody v nádrži byly vypočteny pomocí složeného modelu zahrnujícího jednak výpočet koncentrace  $P_{celk}$  v přítoku do nádrže na základě zadaných počtů obyvatel a rekreatantů v povodí, účinnosti čištění odpadních vod a retence v povodí a jednak regresní vztah (1) mezi přítokovou koncentrací  $P_{celk}$  koncentrací chlorofylu. Výsledná množství fosforu v odpadních vodách byla aplikována pro hydrologické podmínky jednotlivých let 1967–1968 a 1991–1999, takže pro každou variantu byla získána sada 11 hodnot, z nichž byl vypočten průměr a interval spolehlivosti průměru na hladině významnosti 0,05. Výpočty byly provedeny celkem pro deset scénářů, které se lišily v míře zatížení nádrže fosforem z komunálních zdrojů, přičemž plošné zdroje byly uvažovány ve stejné jako v období 1998–1999.

Výsledky jsou uvedeny na obr. 2 a vyplývají z nich následující skutečnosti: (i) I když bude odstraněn fosfor ze všech komunálních zdrojů v celém povodí, plošné zdroje budou poskytovat dostatek fosforu k tomu, aby se v nádrži udržovala koncentrace chlorofylu kolem hodnoty  $8 \text{ mg l}^{-1}$ , tj. na úrovni mezotrofie až mírné eutrofie. (ii) Pokud nastane plánovaný rozvoj lipenského regionu a zároveň se bude většina odpadních vod čistit s účinností 70 %, tj. přibližně na úroveň  $2 \text{ mg l}^{-1} P_{celk}$ , průměrná koncentrace chlorofylu oproti současnému stavu (1998–1999) vzroste o 26 %. Ke zlepšení stavu na úroveň srovnatelnou s 60. lety nedojde ani v případě, když se budou čistit všechny odpadní vody ve vzdutí nádrže na úroveň  $1 \text{ mg l}^{-1} P_{celk}$ . Pro dosažení trofie v nádrži jako v 60. letech bude třeba čistit fosfor v odpadních vodách na úroveň nejméně  $1 \text{ mg l}^{-1} P_{celk}$  jak v povodí vlastního vzdutí, tak v povodí nad nádrží, popř. současně nerealizovat plánovaný nárůst počtů obyvatel a rekreačních kapacit. (iii) Zavedení bezfosfátových pracích prostředků by vedlo k výraznému zlepšení jakosti vody v nádrži. Oproti stavu v letech 1998–1999 by klesla okamžitě průměrná koncentrace chlorofylu o 20 % a stav jakosti vody v nádrži na úrovni 60. let by bylo možné udržet i za plánovaného rozvoje s účinností čištění  $P_{celk} 1 \text{ mg l}^{-1}$  v povodí vzdutí nádrže a s běžnou účinností ve zbylé části povodí.



**Obrázek 2.** – Porovnání koncentrace chlorofylu v nádrži Lipno za různých scénářů vývoje komunálních zdrojů fosforu v povodí nádrže. 0: Teoretický stav bez odpadních vod s fosforem. 67–68: Přísun P jako v letech 1967–1968 (3,8 t P<sub>celk</sub>). 98–99: Přísun P jako v letech 1998–1999 (7,4 t). 98–99PP: Přísun P do nádrže jako v letech 1998–1999, ale za předpokladu bezfosfátových pracích prostředků (5,5 t). 2N: Budoucí rozvoj lipenského regionu (KRATOCHVÍL & al. 1996) s 10,8 tis. trvalých obyvatel, rekreační kapacitou 39,7 tis. míst a s limitem 2 mg l<sup>-1</sup> pro ČOV s velikostí nad 1 tis. ekvivalentních obyvatel; v povodí nad vzduším stav 1998–1999 (9,6 t). 1N: Výhledový stav v povodí vzduším nádrže jako ve scénáři 2N, ale s limitem 1 mg l<sup>-1</sup> pro všechny ČOV; v povodí nad vzduším stav 1998–1999 (5,8 t). 1: Výhledový stav v povodí vlastního vzduší nádrže jako ve scénáři 2N, ale s limitem 1 mg l<sup>-1</sup> pro všechny ČOV (3,6 t). 2NPP: Viz 2N, ale za předpokladu bezfosfátových pracích prostředků (6,2 t). 1NPP: Viz 1N a bezfosfátové prací prostředky (3,8 t). 1PP: Viz scénář 1 a bezfosfátové prací prostředky (2,6 t).

## Závěry

Rozbor problematiky eutrofizace nádrže Lipno ukázal, že tato nádrž je z hlediska produktivity limitována fosforem a má přirozenou tendenci k mezotrofii až slabé eutrofii. Z hlediska ročních průměrů byl v letech 1991–1999 největším zdrojem fosforu v nádrži odtok z plošných zdrojů, ale z hlediska eutrofizace nádrže byly *nejdůležitějším* zdrojem komunální odpadní vody a vnitřní zatížení ze sedimentů. V letních měsících, kdy je nádrž z hlediska rozvoje vodního květu nejcitlivější, dominoval přísun fosforu odpadními vodami (až 70 %).

Sezónní průměrná koncentrace chlorofylu *a* v nádrži byla pozitivně korelována s koncentrací fosforu v přítoku do nádrže, korigovanou na dobu zdržení vody v nádrži podle Vollenweidera. Výsledky scénářů pro různé varianty vývoje osídlení a rekreačního využití oblasti ukázaly, že k dosažení cílového stavu mezotrofie až slabé eutrofie, odpovídajícího přírodním podmínkám dané oblasti, je třeba čistit odpadní vody v povodí celé nádrže na hodnoty ~1 mg l<sup>-1</sup> P<sub>celk</sub>.

**Poděkování.** Tato práce vznikla za podpory GA ČR – grant č. 103/98/0281, GA AV ČR – grant č. S6017004 a Povodí Vltavy a.s. – smlouva č. 820159/1999.

## Literatura

- BRANDL Z., 1973: Horizontal distribution of some chemical and physical characteristics in Lipno Reservoir. *Hydrobiological Studies* 3, 53–90.
- HEJZLAR J., 1998: Jakost vody v nádrži Lipno v letech 1991–1997 a prognóza jejího dalšího vývoje. *Hydrobiologický ústav AV ČR, České Budějovice*, 31.
- HEJZLAR J., ŽALOUDEK J., HLADÍK M. & ZNACHOR P., 2000: Zhodnocení jakosti vody v nádrži Lipno a bilance živin v období 1998–1999. *Hydrobiologický ústav AV ČR, České Budějovice*, 33.
- KRATOCHVÍL M., SMAŽÍK J., PATERA J., LISTOPAD F., TANCEROVÁ P. & ZBORNÍKOVÁ J., 1996: Generel odkanalizování a čištění odpadních vod v zájmové oblasti Lipno. *Ing. Miloš Kratochvíl – EKO EKO, České Budějovice*.
- NOVÁK M., 1968: Údolní nádrž Lipno – geograficko-limnologická studie. *VÚV Praha, Práce a studie, sešit č. 122, Praha*, 162.
- PORCALOVÁ P., 1984: Kvalita vody nádrže Lipno. In: *Sborník semináře Ekologické problémy hospodaření v Chráněné krajinné oblasti Šumava – III., říjen 1984, Ústav krajinné ekologie ČSAV, České Budějovice*, 87–89.
- SAS H. (ed.), 1989: Lake Restoration by Reduction of Nutrient Loading: Expectations, Experiences, Extrapolations. *Academia-Verlag Richarz*.