

Bioakumulace těžkých kovů a radionuklidů ve sladkovodních houbách a sedimentech v nádrži Mohelno, ovlivněné provozem Jaderné elektrárny Dukovany

Bioaccumulation of heavy metals and radionuclides in freshwater sponges and sediments in the Mohelno reservoir influenced by operation of the Dukovany nuclear power plant

ZDENKA ŽÁKOVÁ¹, EVA KOČKOVÁ², PETR DVOŘÁK³ A PETR MLEJNEK⁴

¹ Biotes, Brožíkova 13, CZ – 638 00 Brno, e-mail: zakova@biotes.com; ² Výzkumný ústav vodohospodářský, T. G. M., v. v. i., Mojžírovo nám. 16, CZ – 612 00 Brno, e-mail: eva.kockova@iex.cz; ³ Veterinární a farmaceutická universita Brno, Palackého 1–3, CZ – 612 42 Brno, e-mail: dvorakp@vf.u.cz; ⁴ Ústav biologie, lékařská fakulta Palackého university Olomouc, e-mail: mlejnek_petr@volny.cz

Abstract: The study showed bioaccumulation of heavy metals, mainly copper, nickel, chromium and zinc, in the biomass of water sponges (Porifera) in the Mohelno Reservoir, influenced by operation of the Nuclear Power Plant Dukovany. Only copper had its origin in the NPP technology as a consequence of corrosion processes in the NPP condensators. Bioaccumulation of radiotoxicological radionuclides, detectable by gamma-spectrometry, in the biomass of Porifera as a consequence of the NPP Dukovany operation was not proved. Only potassium ⁴⁰K activity (max. 1 kBq.kg⁻¹) was found, as well as cesium ¹³⁷Cs, in May 2001, the presence of which was due to atmospheric deposition after the Tschernobyl NPP breakdown. Cobalt ⁶⁰Co and silver ¹¹⁰Ag were detected in the bottom sediments from the Mohelno Reservoir in May 2001, which could have their origin from the NPP Dukovany technology. Only cesium ¹³⁷Cs (after Tschernobyl breakdown) and potassium ⁴⁰K were detected in all other bottom sediment samples from the Mohelno Reservoir. Small concentrations of radionuclides (manganese ⁵⁴Mn, cobalt ⁶⁰Co and beryllium ⁷Be), originating from the NPP Dukovany technology, were found in the bottom sediments in the NPP Dukovany accumulation basin.

Key words: freshwater sponges, sediments, bioaccumulation, Dalešice and Mohelno reservoirs, nuclear power plant, heavy metals, radionuclides.

ÚVOD

Sladkovodní houby (Porifera) se vyskytují jak ve stojatých, tak i v tekoucích vodách. Většinou tvoří ploché povlaky o různé tloušťce na pevném substrátu ve vodě. Mají vnitřní kostru z křemitých jehlic, spojených sponginem v praménky (Hrabě 1954). Ve stojatých vodách vytvářejí prostorové prstovité kolonie, které se však mohou tvořit i ve vodách tekoucích v místech se slabším prouděním (Manconi et Pronzato 1991).

V nádržích Dalešice a Mohelno byly zjištěny tři druhy sladkovodních hub – *Spongilla lacustris* (L., 1758), *Ephydatia fluviatilis* (L., 1758) a *Ephydatia mülleri* (Lieberkühn, 1885) – pořadí podle hojnosti (Žáková et al. 2004). Na sledovaných lokalitách byly většinou pozorovány smíšené porosty těchto hub.



Obr. 1: Porosty hub na ponořených větvích z nádrže Mohelno (10. 11. 2001).

Fig. 1: Growths of freshwater sponges (Porifera) on the submerged branches in the Mohelno Reservoir (10. 11. 2001).

Sladkovodní houby na jedné straně svou mohutnou filtrační činností přispívají k samočisticím pochodům (odstraňování drobných organismů a částic z vody spolu se škodlivými látkami), na druhé straně ale působí potíže při využívání vody k různým účelům (vodárenství, energetika ap. – více viz Žáková et al. 2005).

Vodní houby jsou schopny denně profiltrovat velké množství vody. Mohou proto velmi účinně přispívat k zadržování planktonu i látek kumulovaných v jeho buňkách (Harisson in Hart et Fuller 1974, Žáková 2002). Kaestner (1969) uvádí, že houba *Spinosella* o průměru 4 cm a délce 10 cm přefiltrovala za den 78 litrů vody, *Leuconia aspera* 7 cm dlouhá o průměru 1 cm 22,5 litru vody a jiný druh s 20 prstovitými výběžky dlouhými 10 cm o průměru 2 cm 1575 litrů vody.

Dle Weissenfelse (Weissenfels 1989) Porifera nemají trávící systém v pravém slova smyslu, mají systém kanálků, vedoucích vodu, který slouží dýchání i výživě ve spojení s komůrkami, vystlanými límečkovými buňkami. Na otázku příjmu partikulární potravy nebo výživy přijímané v rozpuštěné formě není všeobecně platná odpověď. Přes jednoduchou stavbu hub není objasněno, jak jsou částice přinášeny vodou zadržovány a převedeny do stravitelné formy pro houby. Rozhodující roli hrají nepochybně komůrky, složené z překrývajících se límečkových buněk (choanocytů) s límečky z vláček (mikrovilli), obklopujících bičíky. Potrava přichází do apikální části choanocytů, ale není zatím jasné, jestli přes mesenchym, nebo se dostává přímo do komůrky s bičíkatými buňkami z přírodního kanálu. Je prokázáno, že i některé pinakocyty jsou schopny fagocytózy. Hanzák et al. (1973) uvádí, že se voda filtruje límečkovými buňkami, pevné částice

se zachycují a všechno organické je zužitkováno jako potravina. Voda se zbylými neužitečnými látkami je nakonec vyvrhována vyvrhovacím otvorem. Měňavkovité buňky (archaeocyty) polykají potravní částice, neztrávené límečkovými buňkami, tráví je uvnitř buňky a výživné látky předávají v různých částech těla houby. Ve sladkovodních houbách nacházíme často ve velkém množství zelené řasy – zoochlorelly, které dodávají houbě zelenou barvu nebo na ní tvoří zelené skvrny. Na světle dodávají houbám organické látky, při nedostatku světla je amébovité buňky sežerou. Hejsková (1948) uvádí, že zcela neprobádaným polem jsou vztahy hub k nanoplanktonu, který tvoří podstatný díl jejich potravy a na druhé straně k ostatním konsumentům planktonu (hlavně filtrující Crustacea).

Vysoká schopnost bioakumulace těžkých kovů porosty sladkovodních hub byla zjištěna v řece Dyji v rámci řešení mezinárodního česko-rakouského projektu (Krachler et Löffler 1996, Žáková et Kočková 1999). Nejvyšší bioakumulace byla pozorována u olova, rtuti a kadmia, o něco nižší u dalších těžkých kovů – chromu, mědi, zinku, niklu, železa, manganu, molybdenu a polokovů jako arsen a selen. Obsah těžkých kovů ve sladkovodních houbách byl nejvyšší ze všech zastoupených benthických organismů i ze vzorků sedimentů. Obsah kadmia v biomase houby *Spongilla lacustris* byl 24x vyšší než v sedimentu. V nádržích Vranov n. Dyjí a Nové Mlýny byla prokázána vysoká bioakumulace těžkých kovů v biosestonu, který je významnou součástí potravy sladkovodních hub.

Sledování jakosti vody a sedimentů v nádrži Mohelno (Kočková et al. 1998) indikovalo zvýšený obsah některých cizorodých látek v chladicích vodách Jaderné elektrárny Dukovany vrácených do nádrže (radionuklidů – tritium ^3H , ^{54}Mn , ^{58}Fe a těžkých kovů – zejména Cu) a v sedimentech (Zn, Ni, Cd, Cr, Cu).

Jaderná elektrárna Dukovany (JEDU) odebírá chladicí vodu z nádrže Mohelno a zakoncentrovanou (3–4 x) a oteplenou (až o 13 °C) ji do nádrže vrací Skryjským potokem. Silné naředění v nádrži Mohelno vliv chladicích vod výrazně snižuje (Kočková et al. 1998 a,b, Žáková 1982, Žáková et Mlejnková 1997). Současně je nádrž ovlivňována energetickým provozem přečerpávací vodní elektrárny Dalešice (PVE Dalešice).

Kontaminace hydrosféry radionuklidy z technologie jaderné elektrárny je převážně způsobena kapalnými emisemi. U reaktorů typu VVER, instalovaných v Jaderné elektrárně Dukovany, mohou představovat určité riziko pro životní prostředí netěsností primárního okruhu. Jedná se především o radionuklidy, vzniklé štěpením paliva (štěpné produkty) a dále aktivací paliva, pokrytím paliva, konstrukčních materiálů a chladiva neutrony (aktivační produkty). Štěpné produkty „inventář reaktoru“ jsou závislé na typu reaktoru, paliva a stupni vyhoření (Malátová 2000).

Nejvýznamnějším radionuklidem, jehož limit uvolňování do hydrosféry je čerpán až z 90% je tritium ^3H s fyzikálním poločasem přeměny 12,26 let. Ve vodních organismech je tritium přítomno jednak jako součást volné

nebo vázané vody, což představuje 97%, a dále organicky vázané 3% (Diabaté et Strack 1993). Tritium je však též běžným radionuklidem přírodního pozadí hydrosféry. Koncentrační faktor (poměr tritia ve vodě a v organismech) se pohybuje v intervalu 0,8–1,0. Přesto však u sladkovodní řasy *Chlamydomonas*, pěstované v experimentálních podmínkách s tritiovou vodou, byl publikován údaj o pětinasobné kumulaci organicky vázaného tritia (Diabaté et Strack 1993). Naproti tomu u mořské řasy rodu *Acetabularia* měla výsledná aktivita organicky vázaného tritia 6% hodnoty prostředí (Strack et al. 1983).

Tritium patří mezi „přirozené“ izotopy vodíku, vzniká tříštvivými reakcemi kosmického záření s atomovými jádry ve vrchních vrstvách atmosféry. Podle odhadů vzniká touto cestou $4 \cdot 10^{14}$ – $8 \cdot 10^{14}$ Bq za den. Vzhledem k tomu, že také dochází k jeho přeměně, byl obsah tritia v přírodě dlouhou dobu konstantní. Po zahájení jaderných zkoušek ve 40-tých letech minulého století však došlo k dramatickému nárůstu aktivit tritia v přírodě. Tritium je rovněž nejvýznamnějším radioizotopem, který se uvolňuje do životního prostředí i při bezporuchovém provozu jaderných reaktorů. Je produkováno primárně při jaderném štěpení v aktivní zóně reaktoru a dále v menší míře při neutronové aktivaci vody v primárním chladicím okruhu. V souvislosti s provozem jaderných elektráren vzrůstá znečištění životního prostředí tritiem, a to přibližně o $2 \cdot 10^{15}$ Bq za den. Vzhledem k tomu, že neexistují dostupné technologie na odstraňování tritia, uvolňuje se většina tohoto radioizotopu do atmosféry ve formě tritiované vody. Tritium se tedy může snadno dostat do potravního řetězce. Většina aktivity tritia, respektive tritiované vody zůstává „volná“ (přibližně 90%) a je součástí intra a extracelulárních tekutin. Menší část aktivity tritia (asi 10%) je pak vázaná na makromolekuly, proteiny a nukleové kyseliny. Obratlovci i bezobratlí živočichové žijící ve vodě mají ve tkáňových tekutinách specifickou aktivitu tritia blízkou hodnotám, jež jsou v této vodě obsaženy. Rovnováhy je obvykle dosaženo po několika týdnech. Vyjimku tvoří zelené rostliny, které díky fotosyntetické asimilaci mohou malé množství tritia převádět do organické formy. Ukázaly to experimenty s tritiovou vodou (Diabaté et Strack, 1993). U aktivity tritia, jež je vázaná na makromolekuly, se rovnováhy dosahuje podstatně pomaleji. Vzhledem k velmi malé energii záření tritia a relativně krátkému biologickému poločasu je tritium považováno za nejméně nebezpečný radionuklid. Na druhé straně bylo ukázáno, že ionizující záření způsobuje mutace DNA (deoxyribonukleové kyseliny, jež je nositelem dědičnosti). Většina radiobiologů a mezinárodní i nadnárodní organizace, reprezentující jejich postoje, vycházejí z lineární bezprahové teorie karcinogenního působení ionizujícího záření (Unscar 1994).

Dalšími významnými radionuklidy, které se mohou uvolnit do hydrosféry, jsou štěpné produkty pocházející z aktivní zóny reaktoru a unikající díky netěsnostem v primárním okruhu chladiva. Podle Malátové (Malátová 2000) jsou u reaktorů typu VVER nacházeny následující radionuklidy ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{89}Sr , ^{90}Sr ,

^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{110}Ag , ^{124}Sb , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{181}Hf a ^{182}Ta . Většinu těchto radionuklidů lze stanovit gamaspektrometrickou analýzou. Izotop stříbra ^{110}Ag by mohl pocházet z přídavných materiálů pro spojení dílů z nezelezných materiálů.

METODIKA

Sledované lokality

Nádrž Mohelno je druhým stupněm soustavy nádrží Dalešice-Mohelno. Je situována na 59,617 km řeky Jihlavy a její zátoka je dlouhá 7 km. Nádrž Dalešice leží na 66,522 km toku a vytváří 22 km dlouhou zátoku, která končí pod obcí Vladislav.

Nádrž Mohelno je v bezprostředním kontaktu s otevřeným terciárním chladicím vodním okruhem Jaderné elektrárny Dukovany. Chladicí voda v tomto okruhu cirkuluje mezi kondenzátory a chladicími věžemi, přičemž cca 30 % odtéká společně s vyčištěnou odpadní vodou JE Dukovany Skryjským potokem zpět do přehradní nádrže Mohelno. Množství vrácené vody kolísalo ve sledovaném období přibližně v rozpětí 0,350–0,500 m³.s⁻¹, zakoncentrování rozpuštěných látek bylo přibližně 2,5–2,7- násobné. Voda odpařená chladicími věžemi a voda vypuštěná Skryjským potokem je do terciárního okruhu doplňována z nádrže Mohelno prostřednictvím čerpací stanice. Základní funkcí odebrané vody je zajištění koloběhu vody mezi osmi kondenzátory turbín, kdy zajišťuje kondenzaci par a zahřívá se odebraným teplem, a osmi chladicími věžemi, kde se naopak ochlazuje a předává teplo z kondenzátorů atmosféře.

Jaderná elektrárna Dukovany (JEDU) byla postupně uváděna do provozu od roku 1985, v trvalém plném provozu je od roku 1988. Instalovány jsou čtyři tlakovodní reaktory typu VVER 440 druhé generace – model V 213. Každému reaktoru přísluší dva turbogenerátory o výkonu 2 x 220 MW. Celkový elektrický výkon jaderné elektrárny je 1 760 MW. Jaderná elektrárna Dukovany je dispozičně členěna do dvou hlavních výrobních celků z nichž každý je tvořen dvěma reaktorovými bloky.

Přečerpávací provoz vodní elektrárny Dalešice způsobuje silné kolísání hladiny (v nádrži Mohelno až o 12,5 m, v nádrži Dalešice o 1,8 m), které má za následek mísení vodních vrstev a destratifikaci obou nádrží. V nádrži Mohelno je promícháván prakticky celý objem vody. V nádrži Dalešice tato destratifikace dosahuje jen asi do třetiny až poloviny vzdálenosti od hráze, kontrolní profil Hartvíkovice již většinou není přečerpávacím provozem ovlivněn.

Sledované období

Sledování byla prováděna v letech 2001–2003 v rámci řešení grantového projektu 206/01/1595. K vyhodnocení změn obsahu těžkých kovů a radionuklidů byly použity i některé výsledky dřívějších sledování Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. M., pobočka Brno. Odběry

vzorků vody byly prováděny v květnu, srpnu a říjnu 2001, v dubnu, červnu, září a listopadu 2002, odběry vzorků hub v květnu, září a listopadu 2001 a v květnu, červenci, září a listopadu 2002, odběry sedimentů v květnu a září 2001 a v září 2002.

Místa odběru vzorků

Odběry vzorků sladkovodních hub a sedimentů byly prováděny na následujících lokalitách (obr. 2):

D – nádrž Dalešice-Hartvíkovice střed (kontrolní profil neovlivněný JEDU ani PVE)

B – nádrž Mohelno – cca 200 m od hráze – levá strana (poblíž bývalé proudnice)

A – nádrž Mohelno – cca 200 m od hráze – pravá strana

Další sledované profily: – nádrž Mohelno 200 m od hráze – střed
– akumulční nádrž JE Dukovany



Obr. 2: Schematická mapka sledované oblasti (místa odběru vzorků: nádrž Mohelno u hráze A – pravý břeh, B – levý břeh, D – nádrž Dalešice, Hartvíkovice).

Fig. 2: Schematic map of the monitored locality (sampling points: Mohelno Reservoir at the dam – A – right side, B – left side, D – Dalešice Reservoir–Hartvíkovice).

Způsob odběrů vzorků

Vzorky vody byly odebrány z lodi hloubkovým odběrákem typu Friedinger, zahuštěné vzorky biosestonu planktonní sítí o velikosti ok 40 μm.

Hloubka vody v době šetření kolísala na kontrolním profilu Dalešice-Hartvíkovice mezi 29,5–37,2 m a v nádrži Mohelno u hráze v rozmezí 16–19 m. Situace v obou nádržích byla v září 2002 ovlivněna mimořádnou manipulací během povodně.

Vzorky hub byly odebrány zaškoleným potápěčem. Výskyt hub byl pozorován v nádrži Mohelno u hráze přibližně od hloubky 3 m v celém profilu až na dno původního koryta (do hloubky 19 m). Pod vyústěním odpadních vod JE Dukovany pod čerpací stanicí byl v roce 2002 zjištěn nejsilnější výskyt hub – vysoká vrstva v celém profilu od hloubky 6 m až po původní dno koryta, zhruba do hloubky 17 m. V nádrži Dalešice na profilu Hartvíkovice se houby

vyskytovaly na větvích zatopených keřů i na kamenech od hloubky 5 m, v hloubce 9–11 m byl výskyt masivnější (až 20% povrchu kamenů). Průměrná hmotnost hub na ponořených větvích a kamenech v nádrži Mohelno dosahovala v době maxima v červenci 2002 5,4 g sušiny na 100 cm². Hrubý odhad maximální pokrývnosti hub v nádrži Mohelno pod JE Dukovany byl 70–80% plochy kamenů a potopených větví.

Vzorky dnových sedimentů byly odebírány potápěčem z hloubky maximálního rozvoje sladkovodních hub – 8–10 m – na kontrolním profilu v nádrži Dalešice-Hartvíkovice a u hráze nádrže Mohelno na levé a pravé straně. Odběry vzorků sedimentů byly prováděny vždy na pěti místech na ploše 1 m² do hloubky cca 10 cm jako směsný vzorek. 1. 9. 2002 byl proveden zónační odběr sedimentů uprostřed nádrže Mohelno u hráze v hloubce 19 m. Vzorek byl odebírán vertikálně do odběrného válce (délka 40 cm, šířka 7 cm) a následně separován na 3 vrstvy – dolní (odebraná v hloubce 30–40 cm), střední (z hloubky 10–30 cm) a horní (z hloubky 5–10 cm). Celkové množství odebraného sedimentu bylo 5 litrů a vzorky z jednotlivých vrstev byly důkladně promíchány.

Chemické a radiochemické analýzy

Fyzikálně-chemická měření a chemické analýzy byly prováděny v laboratoři Výzkumného ústavu vodohospodářského T.G.M., pobočka Brno podle standardních metod v rozsahu uváděném ČSN 83 05 30 Chemický a fyzikální rozbor povrchových vod. V této práci jsou hodnoceny jen výsledky sledování těžkých kovů a radionuklidů, výsledky dalších fyzikálně-chemických sledování byly publikovány na jiném místě (Žáková et al. 2004).

V roce 2001 byla sledována širší škála **těžkých kovů a metaloidů** (olovo, kadmium, nikl, chrom, arzén, rtuť, měď, zinek, hliník, železo a mangan) ve vodě, v biosestonu, v biomase sladkovodních hub a v sedimentech metodou AAS. Na základě vyhodnocení dlouhodobějšího trendu od roku 1977 byly výtíčovány parametry, které vykazují zvýšení v nádrži Mohelno a které je nutno dále vyhodnotit ve vztahu k předpokládané bioakumulaci látek, jejichž koncentrace ve vodním prostředí se zvyšovala (zejména Cu, Ni, Cr a Zn).

Ve vzorcích biosestonu, sladkovodních hub a sedimentů byly sledovány koncentrace následujících **radionuklidů**: ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹³¹I, ⁵⁹Fe, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ¹⁰³Ru, ⁶⁵Zn, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ⁴⁰K, ⁶⁰Co, ⁵⁸Co, ¹¹⁰Ag a ⁵⁴Mn. Měření bylo prováděno na radioizotopovém pracovišti Ústavu biochemie, chemie a biofyziky Veterinární a farmaceutické university Brno (P. Dvořák) gamaspektrometrickou trasou CANBERRA (ověřenou ČMI č. 911-OL-Z 1947/00 a ČMI č. 911-OL-Z 2888/2003) s detektorem HPGe s 20% relativní účinností a rozlišovací schopností 1,8 keV. Podle množství dodaných vzorků byly použity dvě geometrie měření a to standardní 450 ml „Marinelliho nádoby“ a 200 ml lahvičky vedle detektoru (2 vzorky hub z roku 2002). Doba měření byla standardní u všech vzorků 64 800 s (18 hodin). Jako vyhodnocovací software

byly použity Genie 2000 a Gamat. Při vyhodnocení byla prováděna korekce na měrnou hmotnost.

Vodní houby byly vyšetřovány v nativním stavu nebo konzervovány mrazem či sušením. Před měřením byly vzorky homogenizovány. Voda s obsahem biosestonu byla vyšetřována v nativním stavu, stejně jako vzorky sedimentů, kde však byly vzorky umístěné v Marinelliho nádobách před vlastním měřením chlazeny, aby nedošlo k významnějšímu rozkladu biomasy v sedimentu. Vzhledem k vybavení pracoviště nemohly být sledovány aktivity radionuklidů s převažující složkou záření beta především ⁸⁹Sr a ⁹⁰Sr.

Doplňující radiometrické analýzy vody byly provedeny ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G.M., pobočka Brno. Celková objemová aktivita beta (CAB) byla stanovena podle ČSN 75 7612 „Stanovení radionuklidů – Celková objemová aktivita beta“. Vlastní měření bylo prováděno pomocí měřiče nízkých aktivit alfa a beta TESLA NA 6201. Výsledky měření jsou udány s chybou stanovení pro 95% hladinu spolehlivosti.

Stanovení obsahu draslíku bylo prováděno metodou atomové absorpční spektrometrie.

Objemová aktivita tritia byla měřena v laboratoři Státního úřadu pro jadernou bezpečnost Regionální centrum Brno. Analýza byla provedena v destilátu z odebraného vzorku vody metodou kapalinné scintilace přístrojem TRICRAB 2560 TR/XL fy Packard. Vzorky byly měřeny po dobu 60 minut, minimální detekovatelná aktivita činila 3 Bq.l⁻¹.

VÝSLEDKY

KOVY A METALOIDY

Těžké kovy a metaloidy ve vodě

Vyhodnocení obsahu těžkých kovů ve vodě v podélném profilu nádrží od vtokového profilu řeky Jihlavy pod Vladislaví až po odtok z nádrže Mohelno v roce 2001 ukázalo výrazný nárůst koncentrace mědi v odtoku JE Dukovany (Skryjském potoce), způsobený korozi kondenzátorů (obr. 3). Nárůst koncentrace niklu (obr. 4) a zinku v odtoku JEDU byl pravděpodobně způsoben zakoncentrováním vody v chladicích okruzích; v nádrži Mohelno nastávalo opět snížení naředěním. Výsledky šetření v podélném profilu v roce 2001 prokázaly, že koncentrace chromu byly nejvyšší v přítokové vodě nádrže Dalešice, v chladicí vodě JE Dukovany i pod nádrží Mohelno se výrazně snižovaly.

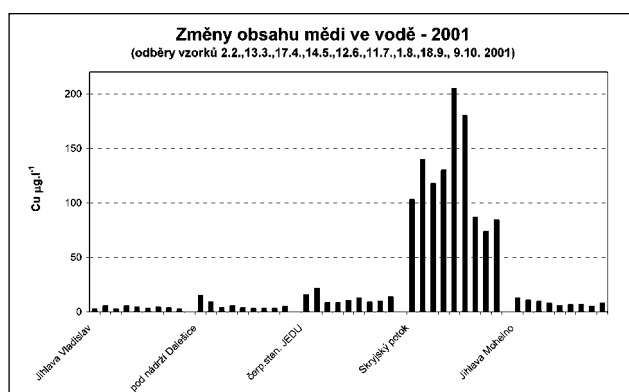
Koncentrace těžkých kovů ve **vracené vodě z JE Dukovany** se pohybovala v rozmezí I.–III. třídy jakosti podle ČSN 75 7221 (tj. neznečištěná až znečištěná voda). Pouze koncentrace mědi dosahovala až hodnot V. třídy jakosti dle ČSN 75 7221 (velmi silně znečištěná voda >100 µg.l⁻¹). Hlavní příčinou byla koroze kondenzátorů. V roce 2002 se koncentrace snížila díky náhradě mědi v kondenzátorech titanem (a možná též díky abnormálním srážkám).

V akumulčním rybníku JE Dukovany byla 1. 9. 2002 zjištěna více než 16 x vyšší koncentrace mědi ($54,9 \mu\text{g.l}^{-1}$) než v nádrži Mohelno ($3,3 \mu\text{g.l}^{-1}$). Koncentrace niklu zde byla též mírně zvýšená, koncentrace chromu a zinku byla zvýšena nepatrně.

Tab. 1: Koncentrace těžkých kovů a metaloidů ve vodě ($\mu\text{g.l}^{-1}$) 1. 9. 2002 – hladinová vrstva, střed.

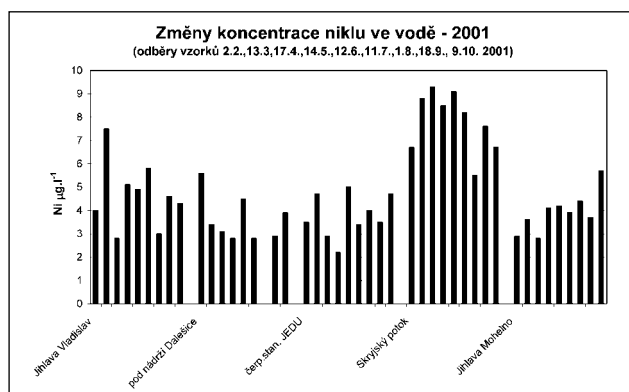
Tab. 1: Heavy metal and semimetal concentration in water ($\mu\text{g.l}^{-1}$) 1. 9. 2002 – surface layer, middle.

	Nádrž Dalešice-Hartvíkovic	Nádrž Mohelno u hráze
Pb	<1,0	< 1,0
Cd	0,16	< 1,0
Ni	6,1	6,7
Cr	<1,0	< 1,0
As	<3,0	<3,0
Hg	<0,05	<0,05
Cu	3,3	3,9
Zn	28	<10,0
Al	60,6	<40
Fe	43	38
Mn	<20	<20



Obr. 3: Koncentrace mědi ve vodě v podélném profilu nádrží Dalešice a Mohelno 2001.

Fig. 3: Concentration of copper in water along the longitudinal profile, Dalešice and Mohelno Reservoirs 2001.



Obr. 4: Koncentrace niklu ve vodě v podélném profilu nádrží Dalešice a Mohelno 2001.

Fig. 4: Concentration of nickel in water along the longitudinal profile, Dalešice and Mohelno Reservoirs 2001.

Těžké kovy a metaloidy v biosestonu

Cizorodé látky, přijímané z vody drobným biosestonem, mohou být začleňovány do biomasy sladkovodních hub, které se jím živí. Tím jsou v průběhu roku zadržovány v nádrži a po úhynu hub mohou být nárazově uvolňovány do vody nebo přecházet do sedimentů. Ve vegetačním období 2001 byl v sestonu z nádrže Mohelno zjištěn vyšší obsah **olova, niklu, chromu, mědi, zinku, železa, hliníku a manganu** ve srovnání s kontrolním profilem Dalešice-Hartvíkovic (tab. 2). Obsah olova v sestonu z nádrže Mohelno byl vyšší přibližně 6x, obsah niklu 11x, obsah chromu 15x, obsah mědi přibližně 3,5x, železa a manganu přibližně 1,5x, obsah hliníku přibližně 2x a zinku o 5 %.

V zahuštěném vzorku z kontrolního profilu Dalešice-Hartvíkovic i z nádrže Mohelno, převládá v květnu 2001 větší plankton, který nemůže být přímo konzumován sladkovodními houbami. Zooplankton indikoval bioakumulaci těžkých kovů z ultranaplanktonu, příp. drobného nanoplanktonu, podobných velikostních kategorií jako konzumují houby. Ve vzorku z nádrže Mohelno bylo větší množství fytoplanktonu, ale převládaly velké rozsivky Bacillariophyceae (*Aulacoseira granulata* a *Asterionella formosa*), které nemohou být konzumovány límečkovými buňkami hub.

Tab. 2: Obsah těžkých kovů a metaloidů v biosestonu (hladinová vrstva) 16. 5. 2001.

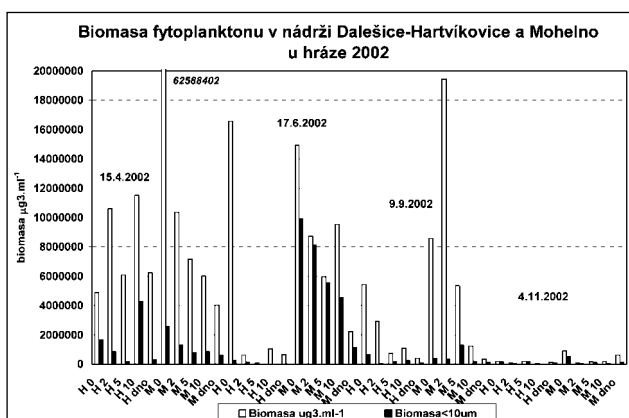
Tab. 2: Heavy metal and semimetal content in bioseston (surface layer) 16. 5. 2001.

		Nádrž Dalešice-Hartvíkovic	Nádrž Mohelno
sušina	%	4	6
minerální látky	%	10,5	3
organické látky	%	89,5	97
Pb	mg.kg ⁻¹	1,4	8,7
Cd	mg.kg ⁻¹	0,30	0,36
Ni	mg.kg ⁻¹	7,0	77,4
Cr	mg.kg ⁻¹	3,6	55,4
As	mg.kg ⁻¹	< 2,0	< 2,0
Hg	mg.kg ⁻¹	0,11	0,08
Cu	mg.kg ⁻¹	11,7	42,0
Zn	mg.kg ⁻¹	273	287
Fe	g.kg ⁻¹	17,3	25,6
Al	g.kg ⁻¹	2,26	4,45
Mn	g.kg ⁻¹	0,258	0,393

Vzhledem k tomu, že při filtraci vzorků přes planktonní síť uniká velká část drobných organismů, konzumovatelných houbami, byl v roce 2002 stanoven obsah těžkých kovů v sestonu porovnáním jejich koncentrací v nefiltrovaných vzorcích vody a ve vzorcích, zbavených filtrací biosestonu. Stanovení, provedené v září 2002, ukázalo výraznější kumulaci v sestonu z nádrže Mohelno pouze u **kadmia a niklu**. Koncentrace niklu se ale nelišila od kontrolního profilu Dalešice-Hartvíkovic, kde byl v sestonu zjištěn též zvýšený obsah železa. V akumuláč-

ním rybníku JE Dukovany byla v sestonu naměřena mírně zvýšená koncentrace zinku, hliníku a manganu.

V době prováděných analýz bylo množství biosestonu v hladinové vrstvě na kontrolním profilu Hartvíkovic v nádrži Dalešice dosti nízké. Biomasa biosestonu, konzumovatelného přímo límečkovými buňkami hub (< 10 µm) byla nejvyšší v hlubších horizontech – ve vrstvě od 5 m (v hladinové vrstvě 12%, v hloubce 2 m 1%, v hloubce 5 m 23%, v hloubce 10 m 21,5% a u dna 23%). V nádrži Mohelno u hráze byla biomasa biosestonu vyšší. V hladinové vrstvě převládaly dlouhé rozsivky v řetězcích – *Aulacoseira granulata*, větší centrické rozsivky (celkem 63,6% biomasy) a kryptomonády (24,4% biomasy). Bioseston, přímo konzumovatelný houbami (<10 µm), tvořil u hladiny pouze 5% biomasy a v hloubce 2 m 2% biomasy (obr. 5). Ve spodních vrstvách bylo také zvýšené množství konzumovatelného biosestonu – v 5 m 24%, v 10 m 16% a u dna 37%.



Obr. 5: Biomasa fytoplanktonu ve vertikálách nádrží na sledovaných profilech 2002.

(Dalešice-Hartvíkovic: hladina – H 0, hloubka 2 m – H 2, 5 m – H 5, 10 m – H 10, dno – H dno, nádrž Mohelno u hráze: hladina – M 0, hloubka 2 m – M 2, 5 m – M 5, 10 m – M 10, dno – M dno)

Fig. 5: Biomass of phytoplankton at the monitored localities – zonal sampling 2002.

(Dalešice Reservoir-Hartvíkovic: surface – H 0, depth 2 m – H 2, 5 m – H 5, 10 m – H 10, bottom – H bottom, Mohelno Reservoir at the dam: surface – M 0, depth 2 m – M 2, 5 m – M 5, 10 m – M 10, bottom – M bottom)

Těžké kovy a metaloidy v biomase sladkovodních hub

V roce 2001 byly vzorky biomasy hub pro analýzy těžkých kovů odebírány v květnu a v září, v roce 2002 byly shromažďovány za delší období od července do září, aby bylo získáno dostatečné množství sušiny pro zvýšení spolehlivosti stanovení. V květnu 2001 nebyly na kontrolním profilu Dalešice-Hartvíkovic nalezeny žádné houby (na obr. 6–9 chybějící první sloupec neznámá hodnota 0).

Sladkovodní houby v nádrži Mohelno obsahovaly v některých obdobích výrazně zvýšené koncentrace **mědi**, **niklu**, **chromu** a **zinku** na profilech, ovlivněných JE Dukovany (A, B) ve srovnání s neovlivněným profilem Dalešice-Hartvíkovic (obr. 6–9).

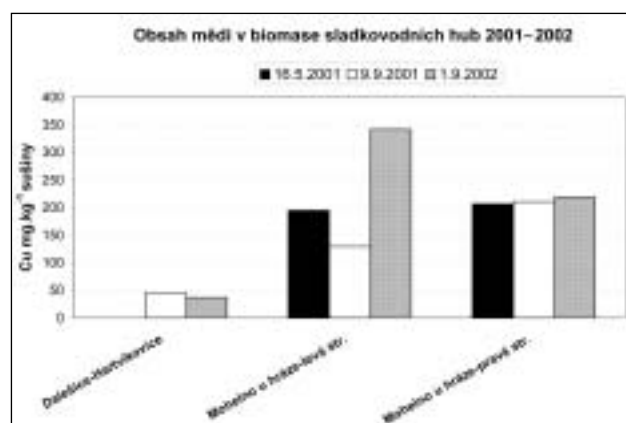
Zvýšený obsah **mědi** byl zjištěn ve všech vzorcích z nádrže Mohelno (levá i pravá strana) – obr. 6. V září 2001

bylo v nádrži Mohelno obsaženo více mědi v houbách než v sedimentech. Nejvýraznější zvýšení obsahu mědi bylo stanoveno ve smíšeném vzorku hub, analyzovaném v září 2002, odebraném na levé straně nádrže Mohelno u hráze – přibližně 9x (na pravé straně zjištěno zvýšení přibližně 6x). Mohlo dojít k určitému ovlivnění mimořádnou manipulací v nádrži v době povodně v srpnu 2002.

Největší zvýšení obsahu **niklu** v porovnání s kontrolním profilem bylo také zjištěno na levé straně nádrže Mohelno v roce 2002 – o 62% (obr. 7).

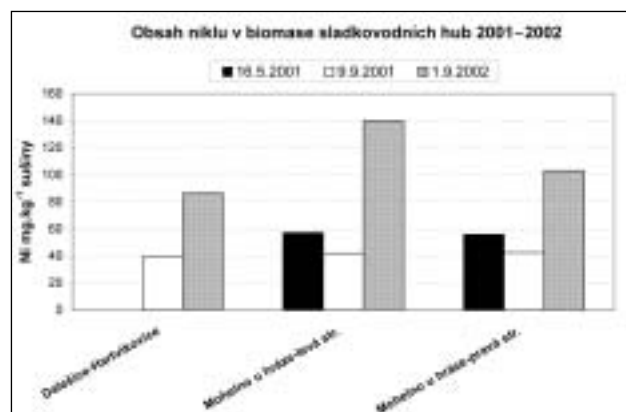
Nejvyšší obsah **chromu** v sušině hub byl zjištěn v jarním období roku 2001 v nádrži Mohelno, kdy převážná část biomasy byla tvořena gemulemi (částečně klíčovými) – obr. 8. V té době byla stanovena výrazně vyšší sušina hub – 7,1–8% než v září v době plného růstu – 4,4–4,73%. To potvrzuje, že bioakumulace těžkých kovů je závislá na fázi životního cyklu hub.

Zvýšený obsah **zinku** v houbách byl prokázán v nádrži Mohelno v září 2001 – na pravé straně o 30%, na levé straně o 19% (obr. 9).



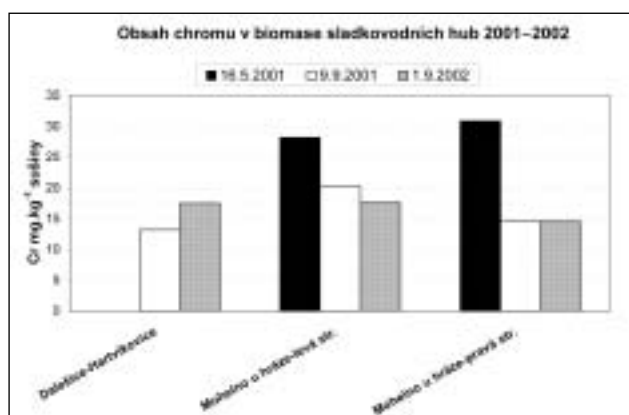
Obr. 6: Obsah mědi v biomase sladkovodních hub na sledovaných lokalitách.

Fig. 6: Content of copper in biomass of freshwater sponges in the monitored localities.



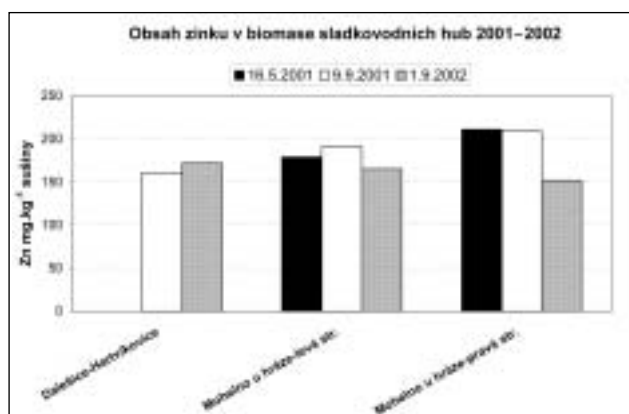
Obr. 7: Obsah niklu v biomase sladkovodních hub na sledovaných lokalitách.

Fig. 7: Content of nickel in biomass of freshwater sponges in the monitored localities.



Obr. 8: Obsah chromu v biomase sladkovodních hub na sledovaných lokalitách.

Fig. 8: Content of chromium in biomass of freshwater sponges in the monitored localities.



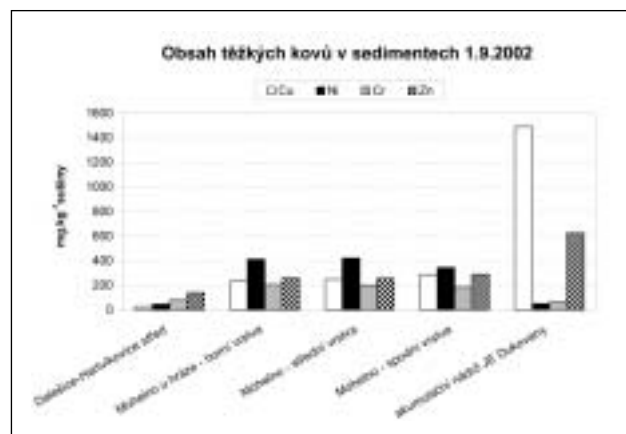
Obr. 9: Obsah zinku v biomase sladkovodních hub na sledovaných lokalitách.

Fig. 9: Content of zinc in biomass of freshwater sponges in the monitored localities.

Těžké kovy a metaloidy v sedimentech

V roce 2001 bylo v nádrži Mohelno u hráze zjištěno v sedimentech zvýšené množství **mědi**, **niklu** a **chromu**, podobně jako v houbách, a dále **manganu** v porovnání s kontrolním profilem Dalešice-Hartvíkovice (tab. 3).

Vyhodnocení výsledků dřívějších analýz od roku 1994 ukázalo, že se nikl, chrom a měď vyskytovaly v menším množství i v sedimentech na vtoku do nádrže Dalešice a pocházely z různých průmyslových odvětví a zemědělské výroby na horním toku Jihlavy.



Obr. 10: Obsah těžkých kovů v sedimentech 1. 9. 2002.

Fig. 10: Heavy metal content in sediments 1. 9. 2002.

Při zónacím odběru 1. 9. 2002 bylo v sedimentech u hráze nádrže Mohelno zjištěno podstatně vyšší množství **mědi**, **niklu**, **chromu** a **zinku** než na kontrolní lokalitě Dalešice-Hartvíkovice (obr. 10). Obsah mědi byl 8–10 x vyšší s maximem ve spodní vrstvě, niklu 7,6–9,3 x vyšší s maximem ve střední vrstvě, chromu 2,4–2,6 x vyšší bez výrazných rozdílů mezi vrstvami a zinku 1,1–1,8 x vyšší. Analýzy těžkých kovů v sedimentech v akumulčním rybníku JE Dukovany opět jasně prokázaly pů-

Tab. 3: Koncentrace těžkých kovů a metaloidů v sedimentech na sledovaných lokalitách v roce 2001.

Tab. 3: Heavy metal and semimetal content in sediments of the monitored localities 2001.

koncentrace	Nádrž Dalešice-Hartvíkovice střed		Nádrž Mohelno – pravý břeh		Nádrž Mohelno – levý břeh	
	13. 5. 2001	9. 9. 2001	13. 5. 2001	9. 9. 2001	13. 5. 2001	9. 9. 2001
mg.kg⁻¹						
Pb	53,1	67,2	26,2	27,2	24,1	29,6
Cd	1,18	1,61	0,44	0,44	0,44	0,22
Ni	52,9	56,6	647	529	902	957
Cr	109	155,8	302	376	690	996
As	15,1	31,2	8,3	11,2	6,8	12,1
Hg	0,14	0,21	0,07	0,13	0,10	0,04
Cu	53,3	59,5	124	143,3	134	120
Zn	220	272	219	146	187	147
g.kg⁻¹						
Fe	42,4	43,6	40,0	45,3	41,8	52
Al	52,3	49,9	23,9	40,7	23,7	35
Mn	1,31	1,5	2,61	2,8	2,08	1,9

vod mědi z provozu elektrárny – obsah byl 6x vyšší než v nádrži Mohelno (1490 mg.kg⁻¹ sušiny). V jednotlivých vrstvách v nádrži Mohelno před hrází bylo zjištěno v horní – 233 mg Cu.kg⁻¹ sušiny, ve střední – 248 mg Cu.kg⁻¹ sušiny a v dolní 288 mg Cu.kg⁻¹ sušiny. Obsah zinku byl více než dvojnásobný, ale obsah niklu a chromu v akumulaci nádrži byl nižší.

RADIONUKLIDY

Vliv provozu Jaderné elektrárny Dukovany na obsah radionuklidů v nádrži Mohelno

Aby bylo možno posoudit vliv činnosti Jaderné elektrárny Dukovany na obsah radionuklidů v nádrži Mohelno, byly vyhodnoceny výsledky komplexních radiologických šetření řeky Jihlavy od roku 1976 (Staněk 1980 a, b, 1984, Procházka 1995, 1997, Mlejnek 1997, 2003) na vytipovaných odběrových místech v podélném profilu řeky Jihlavy včetně obou nádrží.

Z **přirozených radionuklidů** bylo sledováno radium ²²⁶Ra, uran ²³⁸U, draslík ⁴⁰K, celková aktivita alfa a beta, z umělých radionuklidů cesium ¹³⁷Cs, stroncium ⁹⁰Sr a tritium ³H. Výsledky sledování z období před spuštěním provozu Jaderné elektrárny Dukovany ukázaly, že celý horní tok řeky Jihlavy až k přítoku do Dalešické údolní nádrže není ovlivněn žádnými odpadními vodami z uranového průmyslu. Hodnoty aktivit přirozených radionuklidů včetně koncentrace přírodního uranu byly velmi nízké, neměnily se v průběhu roku a korespondovaly s geologickým podložím v této oblasti (Staněk 1980 a,b). Aktivita radia se pohybovala v rozmezí 0,018–0,098 Bq.l⁻¹ ve všech odběrových místech. Koncentrace přírodního uranu byly v rozmezí 0,6–2,2 µg.l⁻¹ a byly konstantní. Celková aktivita beta kolísala v rozmezí 0,097–0,889 Bq.l⁻¹, z toho většina aktivity připadala na draslík ⁴⁰K, a to v rozmezí 0,078–0,672 Bq.l⁻¹ (Kočková et al. 2001, Staněk et al. 1980, Mlejnek 1997).

Hodnoty aktivit **umělých radionuklidů** byly pod mezí detekce, aktivity cesia ¹³⁷Cs byly v rozmezí 0,006–0,020 Bq.l⁻¹, aktivity stroncia ⁹⁰Sr se pohybovaly v přibližně stejných hodnotách s maximem kolem 0,018 Bq.l⁻¹ (Staněk 1984, 1980 a,b, Kočková et al. 2001, Mlejnek 1997).

Vzhledem k tomu, že **tritium ³H** patří k nejvýznamnějším radioaktivním izotopům, uvolňovaným do životního prostředí z jaderných elektráren, byly již od roku 1980 monitorovány aktivity tritia ve vodě. Vzorky vody byly odebírány přibližně v měsíčních intervalech v průběhu roku v podélném profilu řeky Jihlavy od vtoku do nádrže Dalešice, v obou nádržích, v čerpací stanici JE Dukovany, ve Skryjském potoce a pod nádrží Mohelno (Kočková et al. 1998, 2001, Staněk 1991). Pozadové hodnoty tritia ve vodě se v kontrolním profilu řeky Jihlavy Mohelský mlýn pohybovaly před rokem 1986 v průměru kolem 10 Bq.l⁻¹. V letech 1988–1991 – po uvedení JE Dukovany do trvalého provozu – byla zjištěna průměrná roční aktivita tritia v řece Jihlavě v kontrolním profilu Mohelský mlýn v rozmezí 63–91 Bq.l⁻¹ (celkový průměr 77, 5

Bq.l⁻¹), což znamená významné zvýšení, které ale zdaleka nepřesáhlo limitní koncentrační hodnotu pro kontrolní profil 5000 Bq.l⁻¹ (danou Rozhodnutím Okresního úřadu, odboru životního prostředí v Třebíči) Kočková et al. (1998).

Komplexní posouzení vlivu provozu Jaderné elektrárny Dukovany na jakost vody v nádržích Dalešice, Mohelno a řece Jihlavě, a to nejen z hlediska zvyšování obsahu minerálních látek vodami vrácenými z chladicích okruhů, ale především s ohledem na možné znečištění radioaktivními látkami, zejména tritiem ukázalo:

Podle naměřených dat lze pro ukazatel CAB – **celková aktivita beta** jakost vody v nádržích Dalešice a Mohelno charakterizovat I. třídou jakosti vody podle ČSN 757221 (jako neznečištěnou vodu) stejně jako v řece Jihlavě. Jakost vody ve Skryjském potoce lze pak pro stejný ukazatel charakterizovat II. třídou jakosti ve smyslu ČSN 757221 tj., jako vodu mírně znečištěnou. Na základě měření vodivosti a koncentrace draslíku je zřejmé, že nárůst CAB ve Skryjském potoce je způsoben zvýšeným obsahem solí, respektive draselného iontu. Toto tvrzení je v souladu s výsledky dřívějších studií (Procházka 1995, 1997, Mlejnek 1997), kde byla prokázána lineární korelace mezi CAB a vodivostí, respektive koncentrací draselného iontu.

Na základě naměřených hodnot objemových aktivit **tritia** lze jakost vody v nádržích Dalešice, Mohelno a v řece Jihlavě ve sledovaném období pro ukazatel tritium charakterizovat II. třídou jakosti vody podle ČSN 757221 tj., jako vodu mírně znečištěnou. Jakost vody ve Skryjském potoce lze pak pro stejný ukazatel charakterizovat až IV. třídou jakosti (ve smyslu ČSN 757221) tj., jako vodu silně znečištěnou. Nepravidelně odebrané vzorky z vertikálních profilů nádrže Dalešice svědčily o pouze částečném promíchávání vody v této nádrži. Naproti tomu voda v nádrži Mohelno byla dokonale promíchávána a naměřené objemové aktivity tritia se lišily jen nepatrně vzhledem k hloubce odběru. Hodnoty objemových aktivit tritia ve Skryjském potoce kolísaly až o dva řády, což souvisí s periodami vypouštění odpadních vod z JEDU.

Hodnoty objemové aktivity tritia ve Skryjském potoce ve sledovaném období 2001–2002 nepřesahovaly hodnotu přípustného znečištění povrchových vod (4000 Bq.l⁻¹) dle Nařízení vlády č. 61/2003 Sb. Nebyla překročena ani maximální efektivní dávka, povolená pro odpadní vody z JE Dukovany, 6 µSv na jedince/rok na kontrolním profilu pod veškerými vypustěmi odpadních vod.

Bioakumulace radionuklidů ve složkách biosféry na sledovaných lokalitách

Celkem bylo měřeno 23 vzorků odebraných z vodních ekosystémů. Jednalo se o vzorky vody s biosestonem, vodních hub a sedimentů dna. Vzorky byly odebrány z nádrží Dalešice (profil Hartvíkovice), Mohelno a akumulaci nádrže Jaderné elektrárny Dukovany (JEDU).

V tabulce č. 5 jsou uvedeny minimální detekovatelné aktivity (MDA) nejvýznamnějších radionuklidů pro danou geometrii měření a v závislosti na množství vzorku (měrné hmotnosti).

Tab. 4: Objemová aktivita tritia (Bq.l^{-1}) na sledovaných lokalitách v nádržích 2001–2003.Tab. 4: The tritium volume activity (Bq.l^{-1}) in the monitored localities in the reservoirs 2001–2003.

	16. 5. 2001	6. 8. 2001	22.10. 2001	15. 4. 2002	17. 6. 2002	9. 9. 2002	4. 11. 2002	3. 6. 2003	16. 9. 2003
Hartvíkovice 0m	10,5	3,7	23,4	8,5	6,4	4,2	8,5	<4	33,9
Hartvíkovice 10m	21,1	19,4	20,5	3,7	9,6	6,0	9,8	13,6	29,2
Hartvíkovice dno	14,2	18,4	19,1	5,8	7,5	5,4	7,7	6,3	24,4
Mohelno 0m	193,6	71,7	47,6	191,9	110,5	24,7	16,3	112,8	96,7
Mohelno 10m	195,3	65,5	50,3	203,2	102,0	22,4	14,4	91,2	88,2
Mohelno dno	162,5	66,9	50,1	208,3	122,0	34,3	14,8	97,9	83,4

Tab. 5: Minimální detekovatelné aktivity (Geometrie „Marinelliho nádoby“ 450 ml, geometrie jedné 200 ml lahvičky, doba měření 64 800s).

Tab. 5: Minimum detectable activity.

Radionuklid	Marinelliho nádoba [Bq.kg^{-1}] $\rho = 0,900-1,099$	200 ml lahvička [Bq.kg^{-1}] $\rho = 0,300-1,000$
^{134}Cs	<0,3	< (5,8 - 1,9)
^{137}Cs	<0,4	< (6,7 - 2,2)
^{131}I	<0,3	< (5,3 - 1,7)
^{59}Fe	<0,8	< (13 - 4,3)
^{140}Ba	<0,6	< (21 - 6,9)
^{140}La	<0,7	< (8 - 2,6)
^{103}Ru	<0,3	< (5,6 - 1,8)
^{65}Zn	<0,9	< (14 - 4,6)
^{95}Zr	<0,7	< (6,1 - 2,0)
^{95}Nb	<0,4	< (6,1 - 2,0)
^{40}K	<20	< (310 - 100)

Ve vzorcích **vodních hub**, odebraných v nádrži Mohelno v květnu 2001, analyzovaných Státním ústavem pro jadernou bezpečnost (laboratoř Moravský Krumlov), bylo zjištěno cesium ^{137}Cs – u pravého břehu $30,55 \text{ Bq.kg}^{-1}$ a u levého břehu $9,93 \text{ Bq.kg}^{-1}$ (Kočková in Žáková, 2004). U vzorků vodních hub, odebraných v období září 2001 až září 2002, analyzovaných na radioizotopovém pracovišti Ústavu biochemie, chemie a biofyziky Veterinární a farmaceutické university Brno (P. Dvořák), byla nalezena pouze aktivita draslíku ^{40}K . U sušených vzorků dosahovala tato hodnota až 1 kBq.kg^{-1} , u nativních vzorků, stejně jako u vzorků vody s **bioestonem** byly nalezeny hodnoty ^{40}K pod mezí detekce (tab. 5). Všechny ostatní radionuklidy, sledované v daném gamaspektrometrickém systému, byly pod minimálními detekovatelnými aktivitami (MDA), uvedenými v tab. 5.

Významné jsou výsledky z měření **sedimentů**. Ve vzorcích sedimentů z nádrže Mohelno, odebraných v květnu 2001, analyzovaných laboratoří Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) byly zjištěny radionuklidy kobalt ^{60}Co a stříbro ^{110}Ag , které mohou pocházet z technologie JE Dukovany (zřejmě z korozních a štěpných produktů, případně z přídavných materiálů pro spojování neželezných dilů). Výsledky měření vzorků, odebraných v období od září 2001 do září 2002, analyzovaných na radioizotopovém pracovišti Ústavu biochemie, chemie a biofyziky Veterinární a farmaceutické university Brno (P. Dvořák), jsou uvedeny v tabulce č. 6. Jediný radionuklid, obsažený

ve všech vzorcích, bylo cesium ^{137}Cs . Jeho hmotnostní aktivita se pohybovala v intervalu od 4 do 47 Bq.kg^{-1} . Nejnižší hodnota byla naměřena ve vzorku z akumulární nádrže JE Dukovany, nejvyšší hodnota pak v sedimentu nádrže Dalešice. To potvrzuje, že tento radionuklid je spíše pozůstatkem kontaminace životního prostředí vlivem jaderné havárie v Černobylu (v roce 1986) než činnosti JEDU. Vyplývá to též z výsledků sledování radioaktivity v povrchových vodách a materiálech vodního prostředí v okolí JE Dukovany (Staněk in Kočková et al. 1998) v letech 1984–1991. Někdy byly hodnoty aktivity cesia ^{137}Cs provázeny též relativně vyššími hodnotami draslíku ^{40}K . Také v sedimentu z akumulární nádrže JE Dukovany byly prokázány nízké aktivity radionuklidů, které mají původ z technologie JEDU – manganu ^{54}Mn , kobaltu ^{60}Co a dále berylia ^7Be , které může mít kosmogenní původ, avšak může pocházet i z chladiva reaktoru JEDU (reaktory VVER). Aktivity tohoto vzorku jsou v souladu s výsledky dlouhodobého sledování sedimentů usazovací nádrže pracovníky kontrolních laboratoří JEDU.

Aktivita tritia v biomase nebyla zkoumána vzhledem k obtížné technické dostupnosti měření. Také vzhledem k tomu, že většina publikovaných údajů se shoduje v tom, že tritium, jež je součástí molekuly vody, se za přirozených podmínek ve většině vodních organismů výrazně neakumuluje a jeho specifická aktivita v biomase odpovídá aktivitě, obsažené ve vodě (viz úvod).

Velké množství korektních údajů o aktivitě tritia ve vodách, kontaminovaných JE Dukovany (viz výše), spolu s trvalým monitorováním laboratoří JEDU a SÚJB umožňuje kvalifikovaný odhad obsahu tritia ve vodních organismech.

SOUHRN A DISKUSE

TĚŽKÉ KOVY A METALOIDY

Těžké kovy a metaloidy se do hub dostávají a) z vody, kterou přefiltrují, b) z potravy – z drobných organismů, které přímo pohlcují (organismy menší než $10 \mu\text{m}$ – drobné řasy, sinice, prvoci a bakterie), c) z větších částic, které jsou obsaženy v houbách pouze jako inkluze, které nejsou tráveny, ale mohou se usazovat na jejich povrchu, v převodních kanálech nebo v subepidermálních prostorech a zvyšovat obsah těžkých kovů v analyzovaných vzorcích

Tab. 6: Vzorky s nálezem vyšším jak minimální detekovatelné aktivity radionuklidů. Hmotnostní aktivity [Bq.kg⁻¹] a kombinovaná relativní standardní nejistota ± u_A [%], vše vztaženo k datu odběru. (MA geometrie „Marinelliho nádoby“).
 Tab. 6: Samples with findings higher than minimum detectable activities of radionuclides.

Druh vzorku	Hmotnost vzorku [g]	⁷ Be	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
Sediment nádrže Mohelno levá strana 9. 9. 2001	789 MA					4,7 ± 5,7	17 ± 34
Sediment nádrže Mohelno pravá strana 9. 9. 2001	699 MA					25 ± 4,0	88 ± 8,9
Sediment nádrže Dalešice Hartvíkovice 9. 9. 2001	646 MA				1 ± 18	47 ± 4,0	160 ± 6,1
Sediment nádrže Mohelno střed 19 m horní vrstva 1. 9. 2002	636 MA					13,2 ± 4,4	79 ± 10
Sediment nádrže Mohelno u hráze 19 m střední vrstva 1. 9. 2002	550 MA					5,8 ± 5,9	28 ± 30
Sediment nádrže Mohelno u hráze 19 m dolní vrstva 1. 9. 2002	631 MA					8,5 ± 4,9	75 ± 11
Sediment nádrže Dalešice – střed 17 m dolní vrstva 1. 9. 2002	574 MA					3,7 ± 6,8	140 ± 7,3
Sediment akumulační nádrže JE Dukovany 1. 9. 2002	682 MA	6 ± 17	1 ± 19	3 ± 6,3		3,8 ± 6,8	46 ± 3,6

(větší organismy, detritus, příp. minerální částice ze sedimentů zvířených v důsledku přečerpávacího provozu).

Výzkum ukázal, že biomasa sladkovodních hub, vytvořená v nádrži Mohelno, kumulovala v sobě velké množství těžkých kovů (zvláště mědi, niklu, chromu a zinku), které se po odumření hub ukládaly do sedimentů spolu s těžkými kovy, kumulovanými v odumřelém planktonu. Tato zásobárna těžkých kovů představuje nebezpečí pro následný úsek řeky Jihlavy při zvýšeném odpouštění vody z nádrže Mohelno, i zátěž pro samotnou nádrž v důsledku rozvíření sedimentů při přečerpávacím procesu.

Vliv Jaderné elektrárny Dukovany byl prokázán u **mědi**, která měla svůj původ v korozi kondensátorů. Přestože se v roce 2002 koncentrace mědi ve vodě snížila díky postupnému nahrazování mědi v kondensátorech titanem, její bioakumulace ve sladkovodních houbách v nádrži Mohelno byla vysoká (na levé straně u hráze byla v houbách přibližně 6450x vyšší koncentrace Cu ve srovnání s vodou s biosestonem). Bioakumulace v houbách byla pozorována i u dalších těžkých kovů – **niklu, chromu a zinku**. Výsledky ukázaly, že bioakumulace těžkých kovů byla rozdílná v různých obdobích roku, což potvrdilo její závislost na růstové fázi hub.

Přítomnost mědi v nádrži Mohelno snižovala rozvoj fytoplanktonu. Po snížení koncentrace mědi (po náhradě v kondensátorech titanem), lze očekávat zvýšený rozvoj fytoplanktonu včetně negativního dopadu na odběr vody čerpací stanicí a technologii JE Dukovany.

RADIONUKLIDY

V námi sledovaných vzorcích sladkovodních hub – *Spongilla lacustris* (L., 1758), *Ephydatia fluviatilis* (L., 1758) a *Ephydatia mülleri* (Lieberkühn, 1885) a biosestonu nebyl prokázán vliv činnosti Jaderné elektrárny Dukovany na bioakumulaci radiotoxikologicky významných radionuklidů, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹³¹I, ⁵⁹Fe, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ¹⁰³Ru, ⁶⁵Zn, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ⁴⁰K, ⁶⁰Co, ⁵⁸Co, ¹¹⁰Ag a ⁵⁴Mn, stanovených pomocí spektrometrie gama.

V květnu 2001 bylo zjištěno ve sladkovodních houbách z nádrže Mohelno cesium ¹³⁷Cs (9,93 Bq.l⁻¹– 30,55 Bq.l⁻¹), které pravděpodobně pocházelo ze spadu po havárii v Černobylu (bylo zjišťováno ve výrazně zvýšené koncentraci po Černobylské havárii ve vodních organismech i na lokalitách, neovlivněných činností JE Dukovany – Staněk in Kočková et al. 1998). U všech vzorků vodních hub, odebraných v období září 2001 – září 2002, byla nalezena pouze aktivita ⁴⁰K. U sušených vzorků dosahovala tato hodnota až 1 kBq.kg⁻¹, u nativních vzorků, stejně jako u vzorků vody s biosestonem byly nalezeny hodnoty ⁴⁰K pod mezí detekce. Všechny ostatní radionuklidy, sledované v daném gamaspektrometrickém systému, byly pod minimálními detekovatelnými aktivitami (MDA). Výsledky měření aktivity sedimentů ukázaly, že jediný radionuklid, obsažený ve všech vzorcích, bylo cesium ¹³⁷Cs. Jeho hmotnostní aktivita se pohybovala v intervalu od 4 do 47 Bq.kg⁻¹. Nejnižší hodnota byla naměřena v akumulační nádrži JE Dukovany a nejvyšší v sedimentu nádrže

Dalešice. Z toho lze usoudit, že tento radionuklid je spíše pozůstatkem kontaminace životního prostředí vlivem jaderné havárie v Černobylu než činnosti Jaderné elektrárny Dukovany a má zřejmě původ ve srážkách a spadech z atmosféry. Hodnoty aktivity cesia ^{137}Cs byly provázeny též relativně vyššími hodnotami draslíku ^{40}K .

V květnu 2001 byly v sedimentech v nádrži Mohelno zjištěny navíc radionuklidy kobalt ^{60}Co a stříbro ^{110}Ag , které mohou pocházet z technologie JE Dukovany (zřejmě z korozních a štěpných produktů, případně přídavných materiálů pro spojování neželezných dílů). Také v sedimentu z akumulační nádrže Jaderné elektrárny Dukovany byly prokázány nízké aktivity radionuklidů, které mají původ v technologii JE Dukovany – manganu ^{54}Mn , kobaltu ^{60}Co a berylia ^7Be , které může mít kosmogenní původ, avšak může pocházet i z chladiva reaktoru JE Dukovany (reaktory VVER), případně z korozních produktů.

Tritium je nejvýznamnějším radioizotopem, který se uvolňuje do životního prostředí i při bezporuchovém provozu jaderných reaktorů. Porovnání naměřených koncentrací tritia ve vodě v nádrži Mohelno před zahájením provozu JE Dukovany s hodnotami naměřenými v minulých letech ukázalo, že došlo k významnému zvýšení hodnot objemových aktivit tritia po spuštění provozu elektrárny, ale nebyly překračovány hodnoty přípustného znečištění povrchových vod dle Nařízení vlády č. 61/2003 Sb. (4000 Bq.l^{-1}), ani maximální efektivní dávka, povolená pro odpadní vody z JE Dukovany – $6 \mu\text{Sv}$ na jedince/rok na kontrolním profilu pod veškerými výpustěmi odpadních vod.

Aktivita tritia ve sladkovodních houbách ze sledovaných lokalit nebyla zkoumána, vzhledem k tomu, že nebyly z dostupné literatury získány žádné důkazy o případné bioakumulaci tritia prostřednictvím potravních řetězců ani s experimentálně sestavenými potravními řetězci, ani z údajů z kontaminovaných prostředí (Staněk 1994).

ZÁVĚR

Prováděný výzkum ukázal, že sladkovodní houby kumulovaly ve svém těle sledované těžké kovy (měď, nikl, chrom a zinek) a radionuklidy (^{137}Cs), avšak vzhledem k jejich životnímu cyklu – každoročnímu odumírání a obnovování větší části biomasy, nemohou být považovány za vhodné bioindikátory dlouhodobějšího znečištění hydrosféry radionuklidy ani těžkými kovy. Mohou indikovat pouze aktuální případně sezónní zatížení vodního prostředí. Přispívají však k zadržování těžkých kovů a radionuklidů v sedimentech nádrže, jejichž nahromadění může představovat potenciální riziko pro vodní prostředí.

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum byl prováděn v rámci projektu, finančně podpořeného Grantovou agenturou ČR, č. 206/01/1595 „Funk-

ce a sezónní změny porostů sladkovodních hub (Porifera) ve vodní nádrži ovlivněné provozem jaderné elektrárny“.

Autoři děkují Mgr. Jiřímu Kelblovi a jeho manželce za svědomité a iniciativní provádění potápěčských odběrů vzorků, pracovníkům Elektrárny Dalešice za pomoc při odběrech vzorků a všem dalším spolupracovníkům.

SUMMARY

The research project „Role and seasonal changes of freshwater sponges (Porifera) in a reservoir influenced by nuclear power plant operation“, and conducted from 2001 to 2003, was aimed at explaining the role and life cycle of freshwater sponges (Porifera) in the Mohelno Reservoir, which is used as a source and recipient of cooling water from the Dukovany Nuclear Power Plant and is also influenced by operation of the Dalešice Pumped Storage Hydroelectric Plant. The reference locality of the Dalešice Reservoir (Hartvíkovice) is influenced neither by cooling water nor by pumped storage operation.

The study found bioaccumulation of heavy metals, mainly copper, nickel, chromium and zinc, in the biomass of Porifera in Mohelno Reservoir, but only copper had its origin in the operation of the Nuclear Power Plant Dukovany, due to corrosion processes in the NPP condensators.

Heavy metals accumulated annually in Porifera and plankton biomass are deposited in the bottom sediments and could increase heavy metal content in the Mohelno Reservoir by the mixing of water caused by the repumping process, or may be leached to the Jihlava River in periods of increased water discharge.

The study did not find bioaccumulation of radiotoxicological radionuclides, which are detectable by gamma-spectrometry, in the Porifera samples as a consequence of the operation of the Nuclear Power Plant Dukovany from September 2001 to September 2002. Only potassium ^{40}K activity (max. 1 kBq.kg^{-1}) was found, as well as cesium ^{137}Cs , in May 2001.

Only cesium ^{137}Cs was detected in the bottom sediments of the Mohelno Reservoir from September 2001 to September 2002. Its presence was not the consequence of NPP Dukovany operation, but due to atmospheric deposition after the Tschernobyl NPP breakdown. High concentrations of potassium ^{40}K in sediments showed the organic origin of the radionuclides. Cobalt ^{60}Co and silver ^{110}Ag were also detected in May 2001, which could have their origin in the NPP Dukovany technology.

Small concentrations of radionuclides, manganese ^{54}Mn , cobalt ^{60}Co and beryllium ^7Be (which could have also a cosmogenic origin), originating from the NPP Dukovany, were found in the bottom sediments from the NPP Dukovany accumulation basin.

Tritium ^3H is the most important radioisotope that is released into the environment by normal NPP reactor operations. The long-term monitoring of water quality

showed significant changes in the Mohelno Reservoir since the NPP Dukovany was put into operation, but the values didn't exceed the given limit concentrations. Bioaccumulation of tritium in most water organisms is not presumable; only in photosynthetically active organisms can a small part of tritium be bound organically. In principle, the activity of tritium in biomass is mostly equal to its activity present in water.

LITERATURA

- DVOŘÁK P. (2003): Bioakumulace radionuklidů ve složkách biosféry. – Dílčí zpráva zpracovaná v rámci řešení projektu GA ČR 206/01/1595.
- DIABATÉ S., STRACK S. (1993): Organically bound tritium. – *Health Physics* 65, 6: 698–712.
- GUGEL J. (2001): Life cycles and ecological interactions of freshwater sponges (Porifera, Spongillidae) in the River Rhine in Germany. – *Limnologica*, 31: 185–198.
- HANZÁK J., HALÍK L. et MIKULOVÁ M. (1973): Světem zvířat V. Bezobratlí I. – Albatros, Praha: 88–91.
- HARRISON F.W. (1974): Sponges (Porifera: Spongillidae), In: HART, C. W., jr. et FULLER S. L. H., (1974) – *Pollution Ecology of Freshwater Invertebrates*. Academic Press, Inc. New York, London, 389 s.
- HART C. W. JR. et FULLER S. L. H. (1974): *Pollution Ecology of Freshwater Invertebrates*. – Academic Press, Inc. New York, London, 389 s.
- HEJSKOVÁ E. (1948): Sladkovodní houby a mechovky Lnářských rybníků. – *Čas. nár. muzea, odd. přírod.*, 1948/117: 119–125.
- HRABĚ S. et al. (1954): *Klíč zvířeny ČSR, díl I.* – Nakl. ČSAV, Praha: 127–128.
- KAESTNER A. (1969): *Lehrbuch der speziellen Zoologie. Band I: Wirbellose, 1. díl. Třetí rozšířené vydání.* – VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- KOČKOVÁ E., ŽÁKOVÁ Z., MLEJNKOVÁ H., BERÁNKOVÁ D. et STANĚK Z. (1998 a): Dlouhodobý vývoj jakosti vody v soustavě nádrží Dalešice-Mohelno a řece Jihlavě – vliv povodí, přečerpávací vodní elektrárny a atomové elektrárny Dukovany. – *Přírodověd. Sborn. Západoslov. muzea Třebíč*, 32: 1–112.
- KOČKOVÁ E., ŽÁKOVÁ Z., MLEJNKOVÁ H., BERÁNKOVÁ D. (1998 b): Influence of River Basin, Hydro- and Nuclear Power Plants on Water Quality Changes in Dalešice-Mohelno Reservoir System. – *Internat. Rev. Hydrobiol.*, 83: 331–338.
- KOČKOVÁ E., MLEJNKOVÁ H. et ŽÁKOVÁ Z. (2001): Vliv Jaderné elektrárny Dukovany na jakost vody v řece Jihlavě a soustavě nádrží Dalešice a Mohelno. – *Výzkum pro praxi, sešit 43*, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 128 s.
- KRACHLER R., LÖFFLER H. (1996): Fische als Bioindikatoren für Schwermetallbelastungen der Thaya. – *Forschungsprojekt des Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung. GZ: 45.158 – Endbericht*, Institut f. Zoologie der Univ. Wien, 94 s.
- MALÁTOVÁ I. (2000): Zdroje ionizujícího záření v Jaderné elektrárně. – In: KLENER V. et al.: *Principy a praxe radiační ochrany.* – AZIN CZ pro SÚJB Praha, vyd. 1.: 390–394.
- MANCONI R. et PRONZATO R. (1991): Life cycle of *Spongilla lacustris* (Porifera, Spongillidae): a cue for environment-dependent phenotype, *Hydrobiologia*, 220: 155–160. Kluwer Academic Publishers, Belgium.
- MLEJNEK P. (1997): *Výzkumná zpráva VÚV T.G.M., Brno.*
- MLEJNEK P. (2003): Vliv činnosti JEDU na kvalitu vody v řece Jihlavě a v soustavě nádrží Dalešice-Mohelno. – Dílčí zpráva zpracovaná v rámci řešení projektu 206/01/1595.
- PROCHÁZKA J. (1995): Sledování a hodnocení vlivu výpustí odpadních vod JE Dukovany na kvalitu vod řeky Jihlavy. – *Výzkumná zpráva VÚV T.G.M., Brno.*
- PROCHÁZKA J. (1997): Sledování a hodnocení vlivu výpustí odpadních vod JE Dukovany na kvalitu vod přehradních jezer Dalešice, Mohelno a řeky Jihlavy. – *Výzkumná zpráva VÚV T.G.M., Brno.*
- STANĚK Z. (1980 a): Výzkum přípustnosti znečištění z jaderné elektrárny Dukovany. – *Závěrečná zpráva VÚV, Brno.*
- STANĚK Z. (1980 b): Radiační pozadí povrchových a podzemních vod v oblasti Dukovany. – *Vodohospodářské zprávy Jihomoravského kraje, Brno*, 14: 3.
- STANĚK Z. (1984): Radioaktivita hydrosféry v okolí jaderné elektrárny Dukovany. – *Závěrečná zpráva, VÚV 1984.*
- STANĚK Z. (1991): Vliv radioaktivních odpadních vod z provozů jaderné elektrárny Dukovany a vzdušného spadu na okolní hydrosféru a materiály vodního prostředí. – *Závěrečná zpráva VÚV T.G.M., Brno*, 103 s.
- STANĚK Z. (1994): Vliv JE a ostatních zařízení na hydrosféru. *Odvozené limity.* – TRITIUM. Kritická rešerše, VÚV T.G.M., Brno
- STANĚK Z., PEŇÁZ M, TRNKOVÁ J., WOLGEMUTH E. (1980): Radioactive background in principal components of the Jihlava River ecosystem. – *Folia zoologica*, 29, 4: 279–284.
- STRACK S., KIRCHMANN R., LUTTKE A., BONOTTO S. (1983): Selective Accumulation of Organically Bound Tritium in The Marine Unicellular Algae *Dunaliella-Biocolata* and *Acetabularia-Mediterranea*. – *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 34, 5: 865–869.
- UNSCEAR (1994): Sources and Effect of Ionizing Radiation. – Report to the General Assembly. New York, United Nations.
- WEISSENFELS N. (1989): *Biologie und Mikroskopische Anatomie der Süßwasserchwämme (Spongillidae).* – Gustav Fischer Verlag Stuttgart, New York, 110 s.
- ŽÁKOVÁ Z. (1982): Vliv soustavy nádrží Dalešice-Mohelno na trofickou úroveň a biologické oživení řeky Jihlavy. – In: *Sborn. VI. limnol. konf.*, Blansko: 239–243.

- ŽÁKOVÁ Z. (2002): Bioaccumulation of Harmful Substances in Biomass of Porifera – Influence on Reservoir Water Quality. – In: 4th International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality, Extended Abstracts, Hydrobiological Institute- Academy of Sciences of the Czech Republic České Budějovice: 378–379.
- ŽÁKOVÁ Z. (2004): Funkce a sezónní změny porostů sladkovodních hub (Porifera) ve vodní nádrži ovlivněné provozem jaderné elektrárny. – Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR 206/01/ 1595, Biotes Brno.
- ŽÁKOVÁ Z., KOČKOVÁ E. (1999): Biomonitoring and Assessment of Heavy Metal Contamination of Streams and Reservoirs in the Dyje/Thaya River Basin, Czech Republic. – *Wat. Sci. Tech.*, 39, 12: 225–232.
- ŽÁKOVÁ Z., MARVAN, P. (2004): Řasy a sinice ve sladkovodních houbách (Porifera) v nádržích Dalešice a Mohelno. – *Czech Phycology Olomouc*, 4: 123–133.
- ŽÁKOVÁ Z., OPRAVILOVÁ V., SCHENKOVÁ J., MLEJNKOVÁ H. (2004): Occurrence of Freshwater Sponges (Porifera, Spongillidae) and Sponge-associated Organisms in the Dalešice and Mohelno Reservoirs (Czech Republic). – *Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Masaryk. Biology, Brun.*, 29: 9–41.
- ŽÁKOVÁ Z., OPRAVILOVÁ V., MARVAN P. (2005): Výskyt sladkovodních hub (Porifera: Spongillidae) a dalších organismů, které jsou na ně vázány, v soustavě nádrží Dalešice-Mohelno. – *Acta rerum naturalium*, 1: 157–173.