

JAN KOCUM, BOHUMÍR JANSKÝ

LIMNOLOGICKÁ STUDIE ČERTOVA JEZERA

J. Kocum, B. Janský: *Limnological Study of the Čertovo Lake*. – Geografie–Sborník ČGS, 110, 3, pp. 152–175 (2005). – The main aim of the limnological research of the Čertovo Lake (Bohemian Forest, south-western Czechia) was to make its precise ground plan, to characterize the depth conditions of the lake basin and to determine the accurate altitude of the lake water level. One of the main outcomes of the study is the bathymetric map of this second largest glacial lake in Czechia. The description of morphometric characteristics of the lake catchment was also one part of the research. The analysis of the hydrological regime of the lake and of rainfall-outflow processes in its catchment has been carried out for the first time in the history of research activities in this locality. In order to elaborate a comprehensive geographical study of the lake, monitoring of the temperature conditions and ice phenomena of the accumulated water, of water transparency and colour and of its physical and chemical characteristics was also made. KEY WORDS: limnological research – Čertovo jezero Lake – Bohemian Forest – bathymetric map – glacial lake – hydrological regime.

Článek vznikl za finanční podpory grantu GAČR „Atlas jezer České republiky“ (205/03/1264) a výzkumného záměru MSM 0021620831 „Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“.

1. Úvod

Čertovu jezeru se v minulosti věnovali badatelé rozličného zaměření – geografové, geologové, hydrobiologové, geochemici či botanici. Jedinými seriózními prameny při studiu morfometrie jezerní pánve a hydrografie povodí jezera byly však doposud práce Václava Švambery, který zde provedl zevrubný terénní průzkum již na počátku 20. století. V rámci něho uskutečnil dosud nejpresnější měření jezerní pánve. Své následovníky přitom nabádal k opakování batymetrických měření, aby mohl být sledován vývoj zanášení jezera.

V roce 2003 zpracoval kolektiv řešitelů grantového projektu GAČR „Atlas jezer České republiky“ poslední podrobný limnologický výzkum tohoto jezera. Jeho cílem bylo především vypracování komplexní limnologické studie za použití soudobých metod terénního průzkumu i zpracování naměřených dat. Všechny získané poznatky měly být porovnány s více než 90 let starými daty V. Švambery a současně měly vytvořit určitý základ pro další srovnávací studie, týkající se posouzení dynamiky vývoje jezerního ekosystému. K dosažení těchto cílů bylo zapotřebí především detailně vyměřit půdorys jezera a hloubkové poměry jezerní pánve pomocí nejmodernějších dostupných přístrojů – laserové totální geodetické stanice a echolotu. Dalším krokem mělo být měření a vyhodnocení fyzikálně-chemických vlastností jezerní vody, a to jednak pomocí multiparametrické programovatelné sondy „in situ“, jednak pomocí laboratorních analytických metod. Neméně důležitým cílem výzkumu byla rov-

něž analýza hydrologického režimu jezera a srážkoodtokových procesů v jeho povodí. Ta byla provedena vůbec poprvé v historii výzkumných aktivit na této lokalitě.

Vzhledem k široce pojatému výzkumu jsme umístili metodologický aparát jednotlivých dílčích etap limnologické studie vždy v úvodu příslušných tematických celků.

2. Poloha a název jezera

Čertovo jezero (49° 09' 57" s. š., 13° 12' 07" v. d.; obr. 1) je jedním z pěti šumavských glaciálních jezer nacházejících se na území Česka. Jeho pánev byla částečně vyhloubena ledovcem (má pobobu typické karu) a částečně zahrazena morénovým valem. Je pozůstatkem po ústupu svahového ledovce würmského stáří. Kar Čertova jezera je zahlouben ve svorovém jihovýchodním svahu Jezerní hory (1343,4 m n. m.). Podle Wagnera (1897) i Švambery (1939) leží v nadmořské výšce 1030 m. Jedná se o druhé největší šumavské jezero na české straně hranice. Švambers (1939) uvádí rozlohu 10,3318 ha. Voda z jezera odtéká Jezerním potokem do Rezné (něm. Regen) a dále do Dunaje a Černého moře. Od nedalekého Černého jezera je odděleno hřebenem, kdy prochází hlavní evropské rozvodí mezi Severním a Černým mořem. Zjištěné pozůstatky ledovce v lokalitě Čertova jezera lze zařadit pravděpodobně do würmského stáří s typickými třemi würmskými stadiály (Vitásek 1924). Německy se Čertovo jezero nazývá Teufelsee. V roce 1571 bylo na bavorské straně Šumavy nazýváno Krotensee, u nás pak později podle dvora Girglhofu v Železné Rudé vsi, k němuž částečně patřilo, jezerem Girglovým. V literatuře je někdy zmiňováno jako dvojče jezera Černého.

3. Historie výzkumů jezera

O Čertově jezeře se nejúplnější a nejpresnější informace dozvíme z prací Wagnera (1897) a Švambery (1939). Údaje o něm se ale objevují i v dřívějších pracích. První přesnější data byla poskytnuta Sommerem (1841) a Krejčím (1857). Bayberger (1886) zde v roce 1884 provedl 30 měření hloubek ve dvou



Obr. 1 – Čertovo jezero při pohledu od výtoku směrem k jezerní stěně (foto J. Kocum)

na sebe kolmých profilech. Obrisy jezera na jím vyhotovené mapce jsou ale velmi zkreslené. Největší hloubka při nízkém stavu vody (1–1,5 m pod vysokým stavem) měřila 33 m. Vávra (Frič a Vávra 1898) zde prováděl měření v letech 1893–1895. Na loďce za klidného počasí provedl 61 měření hloubek a našel největší hloubku 35 m. Wagner (1897) měřil v 9 profilech 72 hloubek a udává největší hloubku téměř uprostřed jezera, 33 m při nízkém stavu asi 3 m pod

stavem nejvyšším. Pokládá jezero za značně souměrné, čemuž by také odpovídaly izobaty jeho mapy. Wagner udává plochu jezera 9,7157 ha (katastr 10,0094 ha) a sběrnou oblast 105 ha. Objem vody podle něho činí 1 426 203 m³, střední hloubka 14,7 m. Délku jezera udává 432 m a šířku 260 m.

Václav Švamberský zde pracoval ve dnech 3.–23.8. 1909. Měřeno tu bylo celkem 14 příčných i podélných profilů, úhrnem 880 hloubek. Dne 12.8. 1911 změřil v zadní části jezera ještě 51 hloubek v jednom profilu a počet naměřených hloubek tak vzrostl na 931. V roce 1911 byla hladina Čertova, stejně tak jako Černého jezera značně snížena, neboť (cit. Švamberský 1912) „jezero musela poskytnout vodu k udržování závodů nalézajících se v kraji“. Švamberský mohl tehdy pořídit řadu fotografií rozsáhlých částí obnaženého dna. Největší hloubka vody činila 36,75 m. Protože svá měření prováděl za téměř nejvyššího možného stavu, přijal hodnotu 37 m jako největší hloubku jezera. Největší hustoty měřených hloubek ze všech jeho prací na šumavských jezerech dosáhl právě na Čertově jezeře, kde připadalo jedno měření na 104 m² (Švamberský 1912). Další Švamberské údaje o Čertově jezeře jsou následující: plocha 10,3318 ha; střední hloubka 17,93 m; sběrná oblast 0,875 km²; objem vody 1 852 378 m³; nadmořská výška hladiny 1030 m; délka břehu 1363 m; střední sklon dna 17° 53' (Švamberský 1939).

4. Povodí jezera

4.1. Geografická poloha a morfometrické charakteristiky povodí jezera

Čertovo jezero je odvodňováno Jezerním potokem, který je pravým přítokem Řezné patřící k úmoří Černého moře. Povodí jezera vějířovitě se rozkládající ve směru ZSZ–VJV náleží do geomorfologického okrsku Královský hvozď a svou pramennou oblastí zasahuje na jihovýchodní svah masivu Jezerní hory (1343,4 m n. m.). Severní část rozvodnice je současně hlavním evropským rozvodím mezi Černým (Čertovo jezero) a Severním mořem (Černé jezero), které je tvořeno hřbetem probíhajícím od Jezerní hory přes Rozvodí (1189,0 m n. m.) ke Špičáku (1201,7 m n. m.). Západní rozvodnice odděluje povodí jezera od povodí Svarožné.

Veškeré morfometrické charakteristiky povodí jezera byly zjištěny pomocí programu MapInfo. Jako podkladová mapa byla použita Základní mapa ČR 1 : 10 000. Ve stejném programu byla určena i plocha jezera na základě půdorysného měření pomocí totální geodetické stanice Leica TCR 705. Objem jezera byl stanoven v programu Surfer. Tvarové vlastnosti povodí Čertova jezera charakterizují údaje v tabulce 1.

K určení střední nadmořské výšky povodí Čertova jezera byly použity dvě metody. První z nich vychází z rozdělení povodí na vrstevnicové pásy po 25 metrech, druhá metoda počítá se všemi vrstevnicemi po 5 metrech. Jako nejnižší položené místo v povodí uvažujeme dno jezera (1027,2 – 35,4 = 991,8 m n. m.), nejvýše položeným bodem je vrchol Jezerní hory (1343,4 m n. m.). První metoda spočívá v použití vzorce $v = \Sigma(v.p)/P$, kde v je nadmořská výška středů vrstevnicových pásů, p je jejich plocha a P je plocha povodí jezera. Druhá metoda vychází z měření délek vrstevnic. Střední výška povodí se pak vypočte ze vzorce A. Steinera (1939): $v = \Sigma(v.L) / \Sigma L$, kde L je délka vrstevnice a v je její nadmořská výška. Plochy jednotlivých pásů o známé střední výšce a délky vrstevnic byly určeny v programu MapInfo. Výsledná střední nadmořská výška povodí Čertova jezera, která činí 1144,0 m, byla stanovena jako aritmetický průměr hodnot vypočtených

Tab. 1 – Základní morfometrické charakteristiky povodí Čertova jezera (měřeno v programu MapInfo s využitím podkladové Základní mapy ČR 1 : 10 000).

Charakteristika	Hodnota
Plocha povodí	$P=89,3834$ ha
Celková délka rozvodnice	$r=3\,702,5$ m
Koeficient vývoje rozvodnice	$k=4,1423$ km/km ²
Celková délka přítoků	$d=3\,319,4$ m
Délka hlavní údolnice	$l=1\,013,7$ m
Střední šířka povodí	$\bar{s}=881,8$ m
Koeficient protažení povodí	$k_p=0,870$
Charakteristika povodí	$\alpha=0,870$
Plocha jezera	$P_j=10,740943$ ha
Podíl plochy jezera na ploše povodí	$P_j/P=0,1202$
Poměr objemu jezera k ploše povodí	$V/P=2,08$ m ³ /m ²

jezera byl stanoven podle vzorce Pencka: $tg\ \beta = (V/P) \cdot [(O_1 + O_2)/2]$, kde β je úhel středního sklonu, V je výškový rozdíl vrstevnic, P je plocha vrstevnicového pásu a O_1 , O_2 jsou délky vrstevnic. Plochy jednotlivých vrstevnicových pásů a délky vrstevnic byly určeny opět pomocí programu MapInfo. Tímto způsobem se vypočítá nejprve střední sklon jednotlivých vrstevnicových pásů, přičemž střední sklon povodí se pak určí jako aritmetický průměr hodnot sklonů všech pásů. Pomocí tohoto vzorce činí střední sklon povodí Čertova jezera 21°26'. Nejnižší hodnoty sklonu se nacházejí v nejvyšších a nejnižších partiích povodí. Největší sklon najdeme mezi vrstevnicemi 1150 a 1175 m n. m.

Tab. 2 – Porovnání morfometrických charakteristik povodí glaciálních jezer na české straně Šumavy

Jezero	Prášílské (Zbořil 1994)	Plešné (Vránek 1999)	Laka (Šobr 1999)	Černé (KFGG 2003)	Čertovo (Kocum 2004)
Plocha povodí (ha)	64,74	66,68	102,0025	124,06401	89,3834
Výška jezerní stěny (m)	236	290,8	251,1	335,9	316,21
Celková délka rozvodnice (m)	3 720	3 240	4 100	4 676,4	3 702,5
Koeficient vývoje rozvodnice	5,746	4,86	4,0195	3,7693	4,1423
Délka hlavní údolnice (m)	1 200*	730	650	1 229	1 013,7
Střední šířka povodí (m)	539	913,4	1 569	1 009,5	881,8
Koeficient protažení povodí	0,449	1,25	2,414	0,821	0,870
Podíl plochy jezera na ploše povodí	0,0649	0,1397	0,0265	0,1515	0,1202
Střední nadmořská výška povodí (m n. m.)	1 199,106	1 213,5	1 186,5	1 144,6	1 144,0
Střední sklon povodí	17°20'	27°47'	12°06'	25°22'	21°26'

Pozn.: * délka toku
Janský, Šobr, Kocum, Česák (2003)

těmito dvěma metodami. Povodí Čertova jezera je ze všech pěti glaciálních jezer na české straně Šumavy nejnižše položené. Podobnou hodnotu střední nadmořské výšky má povodí jezera Černého (1144,6 m n. m.). Porovnání morfometrických charakteristik povodí glaciálních jezer na české straně Šumavy podávají hodnoty v tabulce 2.

Střední sklon povodí

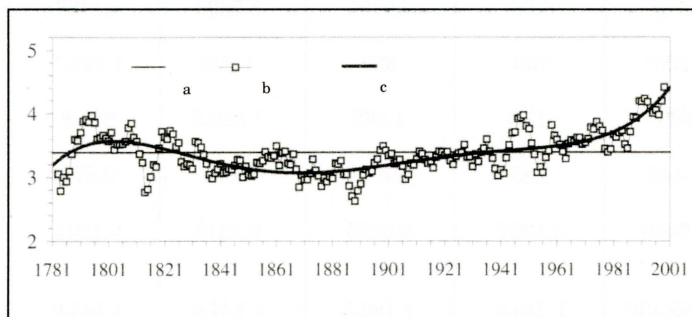
(29°33'), přičemž maxima se vyskytují v jižní a střední části jezerní stěny (až cca 40°).

4.2. Geologická stavba a geomorfologické poměry povodí jezera

Oblastí Čertova jezera v širším pojetí se z hlediska geologického zabývali především Vejnar (1963) a Kodým ml. a kol. (1961b). Oba se shodují, že je povodí jezera budováno stříbřitě šedým biotiticko-muskovitickým granátickým svorem s menšími vložkami kvarcitů. Z glacigenních a periglaciálních produktů je zcela specifickým útvarem jezerní sediment, mocný až 9 metrů (dříve uváděno až 15 metrů, Plán péče o NPR Černé a Čertovo jezero 1997). Ve vztahu k zalednění byla geologie karu Čertova jezera studována v minulosti již mnohokrát (Rathsburg 1928, 1930, 1931, Reissinger 1930, Priehäusser 1931). Zevrubně se tímto problémem zabýval rovněž Kinský (1933). Podrobný geomorfologický výzkum této oblasti byl proveden až v nedávné době a jeho výsledky byly zpracovány v rámci magisterské práce Mužíka (2003). Ta se zabývá geologickou a geomorfologickou analýzou jihovýchodní části Královského hvozdu.

4.3. Klimatické podmínky povodí jezera

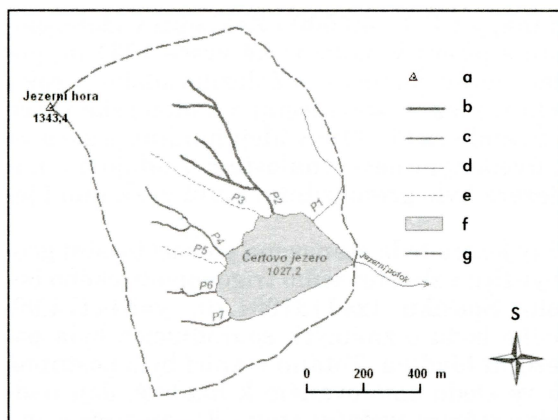
Povodí Čertova jezera náleží do chladného horského okrsku (CH4) se silně se projevujícími oceánickými vlivy (Quitt 1971). Průměrná denní teplota vzduchu činila v období 1961–2001 3,8 °C s kolísáním mezi –17,7 °C a 23,2 °C. Průměrné měsíční teploty určené s průměrnou absolutní chybou 0,5 °C se v období 1781–2001 pohybovaly mezi –12 °C a 16,2 °C. Hodnoty dlouhodobých průměrů měsíčních teplot kolísaly mezi –5,3 °C v lednu a 12,3 °C v červenci a srpnu. Průměrné roční teploty vzduchu (T_{CT-a}) se pohybovaly mezi 2,1 °C (1829) a 5,1 °C (2000), přičemž průměr v letech 1781–2001 dosahoval hodnoty 3,4 °C. Dlouhodobý trend průměrné roční teploty vzduchu vykazuje signifikantní kolísání se třemi zřetelnými periodami: (1) teplotní fluktuace kolem dlouhodobého průměru (1781–2001) 3,4 °C v letech 1781–1830, (2) chladnější období v letech 1830–1940 a (3) zvyšující se teplota od 60. let 20. st. (obr. 2). V období 1980–2001 pak došlo k nejvýraznějšímu nárůstu průměrné roční teploty vzduchu (Kettle, Kopáček a Hejzlar 2003). Tvar karu Čertova jezera způsobuje nízkou hodnotu



Obr. 2 – Rekonstruovaný trend průměrných ročních teplot vzduchu v oblasti Čertova jezera v období 1781–2001. Vysvětlivky: a – dlouhodobá průměrná roční teplota vzduchu (1781–2001); b – pětileté průměry T_{CT-a} ; c – polynomičká čára trendu. Zdroj: Kettle, Kopáček, Hejzlar (2003).

denního oslunění nad jižní částí jezera, kde se v důsledku toho vytváří chladnější klín (Plán péče o NPR Černé a Čertovo jezero 1997).

Roční srážkové úhrny se v této oblasti pohybují v rozmezí 1 200–1 800 mm. Na základě hodnot vícedenních úhrnů srážek, které byly získány



Obr. 3 – Systém přítoků do Čertova jezera (významnost jednotlivých přítoků je znázorněna různou tloušťkou linií). Vysvětlivky: a – výškový bod; b – hlavní přítok; c – významné trvalé přítoky; d – ostatní trvalé přítoky, odtok; e – občasné přítoky; f – jezero; g – hranice povodí.

ní prostor anemo-orografického systému říčky Bílé Rezné (Jeník 1959, 1961). Turbulentní proudění se zde projevuje mimo jiné i na různé mocnosti sněhové pokrývky. Přímými měřeními bylo zjištěno, že v obvodu stěny, kde náhlý pokles rychlosti závětrného proudění způsobuje usazování sněhových částic, je výška sněhové pokrývky největší (Kocum 2004, s. 120-121). V současnosti jsou mikroklimatické podmínky závětrných poloh významnými faktory ovlivňujícími rozložení rostlinných společenstev.

4.4. Hydrografie povodí jezera

Čertovo jezero je napájeno pěti stálými přítoky, které sbírají vodu z jihovýchodního svahu Jezerní hory (obr. 3). Na Základní mapě ČR 1 : 10 000 jsou vykresleny pouze dva trvalé přítoky jezera. Průběh všech přítoků, jejich délka a nadmořská výška jejich pramenů byla proto určena v rámci terénního průzkumu. Kromě přítoků celoročních se v období přibližně od dubna do první poloviny května, kdy v této oblasti dochází k intenzivnímu tání sněhové pokrývky, vytváří v povodí jezera větší množství zdrojnic. Průměrný podíl hlavního přítoku (P2) na celkovém povrchovém přítoku do jezera činí cca 60 %. Výtok z jezera je jediný, regulovaný betonovým dlážděním na koruně morény. Ta byla prý v minulosti asi o 3 m snížena (Vitásek 1924). V roce 1838 byla totiž v moréně jezera vybudována právě 3 m hluboká výpust' za účelem využití jezera jako retenční nádrže, jejíž voda měla sloužit jako energetický zdroj pro hamry v Železně Rudě. Odtok z jezera tvoří Jezerní potok, který ústí do Rezné, levostranného přítoku Dunaje.

5. Morfografické poměry jezera

5.1. Stanovení nadmořské výšky jezerní hladiny

Základní mapa ČR 1 : 10 000 nadmořskou výšku hladiny Čertova jezera přímo neudává, podle vrstevnic však lze usoudit, že leží mezi 1025

z databáze Hydrobiologického ústavu Akademie věd ČR (dále jen HBÚ AV ČR) v Českých Budějovicích, činí průměrný roční úhrn srážek za období 1998–2003 na experimentální volnou plochu (dále jen OA – „open area“) 1 430,6 mm. Ta se nachází se v bezprostřední blízkosti povodí a v nadmořské výšce odpovídající střední nadmořské výšce povodí. Převládajícími větry v této části Šumavy jsou na základě měření meteorologické stanice Pancíř (Nekovář 1959) a měření Správy NP a CHKO Šumava přímo v lokalitě Čertova jezera po celý rok větry západního směru. Kar jezera lze pokládat za typický závětrný turbulent-

a 1027,5 m n. m. Podle Základní mapy ČR 1 : 50 000 i Základní vodohospodářské mapy 1 : 50 000 leží hladina jezera v nadmořské výšce 1031 m, podle 3. vydání podrobné turistické mapy Šumava – Železnorudsko z roku 2001 v měřítku 1 : 50 000 se nachází mezi vrstevnicemi o nadmořské výšce 1020 a 1030 m. Wagner (1897) i Švambers (1939) uvádějí hladinu jezera ve výšce 1030 m n. m. Vzhledem k uvedeným nesrovnalostem v údajích o nadmořské výšce hladiny Čertova jezera bylo proto jedním z cílů výzkumu i její určení.

Přesná nadmořská výška hladiny jezera byla stanovena pomocí totální geodetické stanice Leica TCR 705 s využitím zhušťovacího trigonometrického bodu nacházejícího se na vrcholu Špičáku ($x=1131031,70$, $y=844174,90$, $Bpv(z)=1201,72$). Od tohoto pevného bodu o známých souřadnicích byla pomocí čtyř stanovisek zaměřena jezerní hladina. Totální stanicí bylo postupně zaměřeno na každý ze čtyř bodů ve sledu směřovaném k hladině. Její nadmořská výška byla při průměrném ročním vodním stavu 31 cm určena na 1027,206 m n. m. Z toho důvodu, že se v minulosti často manipulovalo s korunou morény, nelze bohužel údaj Wagnera (1897) a Švambers (1939) s touto hodnotou porovnávat.

5.2. Vyměření pŕodorysu jezera

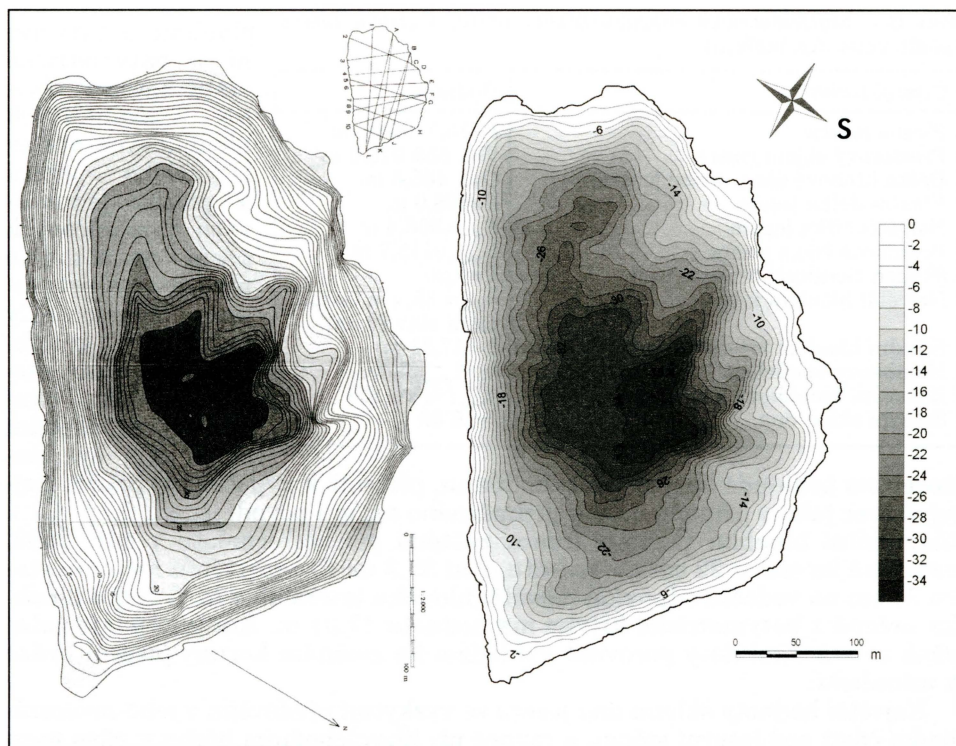
V literatuře se setkáme se dvěma hodnotami rozlohy Čertova jezera. Wagner (1897) uvádí ve svém díle hodnotu 9,7157 ha, v práci Švambersové z roku 1939 nalezneme hodnotu 10,3318 ha.

K vyměření pŕodorysu jezera bylo použito rovněž laserové totální geodetické stanice Leica TCR 705. Pŕodorysná měření byla uskutečněna společně s měřeními batymetrickými ve dnech 11.–12.9.2003 při stavu 22 cm na vodočtu. Protože byla měření prováděna po dlouhém relativně suchém období, patří tato hodnota výšky hladiny mezi vůbec nejnižší, jež se podařilo během pozorování jejího kolísání zachytit. Proto můžeme konstatovat, že hodnota plochy jezera při ročním průměrném stavu jezerní hladiny, který činí 31 cm, bude ještě o něco vyšší, než která je uváděna níže. Rozdíl bude ale minimální, protože větší část břehu spadá do jezera velice příkře a plocha jezera by se tudíž při kolísání výšky hladiny neměla výrazně měnit. Celkově bylo zaměřeno 546 bodů břehové linie, hustota měření tak dosáhla hodnoty jednoho zaměřeného bodu na cca 2,7 m délky břehové čáry. Z toho vyplývá, že Čertovo jezero je ze všech glaciálních jezer na české straně Šumavy v současnosti nejpřesněji vyměřené. Plocha jezera zjištěná v programu MapInfo činí při stavu 22 cm na vodočtu 10,740943 ha. Tento údaj je o 0,409143 ha větší než údaj, který uvádí Švambers (1939). Délka břehové linie činí 1466,3 m, což je o 103,3 m více než délka uvedená v práci Švambers (1939). Stejně tak jako v případě nadmořské výšky hladiny jezera nelze bohužel ani tyto údaje porovnávat s daty Wagnera (1897) či Švambers (1939) vzhledem k tomu, že se v minulosti s korunou morény často manipulovalo.

5.3. Batymetrická měření a morfometrické charakteristiky jezerní pánve

Kromě Wagnera (1897) a Švambers (1939) se batymetrií jezera ještě dříve zabývali Sommer (1841), Krejčí (1857), Bayberger (1886), Frič a Vávra (1898). Výsledky jejich prací byly uvedeny v předchozím textu (kap. 3).

Pro poslední batymetrický výzkum jsme použili echolot Fishfinder 240 měřící s přesností na 5 cm upevněný na stabilní platformě gumového člunu. Mě-



Obr. 4 – Kuchařova batymetrická mapa Čertova jezera 1 : 2 000 (Kuchař 1947) podle měření V. Švambers v srpnu roku 1909 (interval hloubnic 1 m; vlevo) a batymetrická mapa Čertova jezera podle měření v září 2003 (interval hloubnic 2 m; vpravo, Kocum 2004). Hloubkové stupně v metrech.

ření bylo provedeno klasickým způsobem za využití kevlarového vlákna s vyznačenými měrnými body po pěti metrech (blíže viz Česák, Šobr 2005). Celkem bylo na Čertově jezeře provedeno 2 746 bodových hloubkových měření v 69 profilech o souhrnné délce 13 257 m, které vedly mezi 80 body břehové linie. Jeden bod tedy reprezentuje plochu cca 39,1 m², a proto lze toto měření hloubek považovat za zatím nejpodrobnější v dosavadní historii výzkumů Čertova jezera. Ke grafickému zpracování a tvorbě batymetrické mapy byly použity programy MapInfo a Surfer. Porovnáním batymetrické mapy vykreslené na základě měření V. Švambers s mapou vytvořenou podle našich měření (obr. 4) je nutné podotknout, že Švambers vytvořil již na počátku minulého století hloubkovou mapu velmi podrobnou a přesnou, která se od batymetrické mapy současné liší minimálně.

Z batymetrického plánu, batymetrické křivky (viz Janský, Šobr, Kocum, Česák 2005) a hodnoty hloubkového koeficientu (tab. 3) je patrná velmi výrazná souměrnost pánve Čertova jezera s výskytem maximálních hloubek v jeho středních partiích. Čtyři výrazná údolí zahloubená ve dně jezera a směřující k jeho největším hloubkám od severního, severozápadního a západního břehu jsou velmi markantním geomorfologickým tvarem jezerního dna. Jejich průběh velmi těsně odpovídá reliéfu povrchu v okolí jezera. Jde tedy pravděpodobně o jednotlivá skalní žebra odolnějších partií svoru vytvořená erozní činností ledovce. Program Surfer je schopen kromě vykreslení

Tab. 3 – Morfometrické charakteristiky pánve Čertova jezera (podle vlastních měření)

Charakteristika	Hodnota
Plocha jezera	$P=10,740943$ ha
Prostorový objem jezera	$V=1\,859\,018,6$ m ³
Délka břehové čáry (obvod jezera)	$O=1\,466,3$ m
Vlastní délka jezera	$L=498,0$ m
Největší šířka jezera	$B_{max}=306,4$ m
Průměrná šířka jezera	$B_{prům}=215,7$ m
Stupeň členitosti břehové čáry	$R=1,26$
Největší hloubka jezera	$h_{max}=35,4$ m (prům. roční stav 31 cm)
Střední hloubka jezera (volumetrická)	$h_s=17,31$ m
Hloubkový koeficient	$h_s/h_{max}=0,49$
Relativní hloubkový koeficient	$h_{max}/\sqrt{P}=0,108$
Střední sklon dna	$I=16^{\circ}59'$

hloubnic a vytvoření batymetrické mapy spočítat objemy jednotlivých hloubkových vrstev i celého jezera a plochy jednotlivých hloubnicových pásů. Pomocí tohoto programu a programu MapInfo byly vypočteny morfometrické charakteristiky jezerní pánve (tab. 3). Střední sklon dna byl sta-

noven na podkladě batymetrického plánu, přičemž k výpočtu byl použit stejný vzorec jako v případě určení průměrného sklonu povodí jezera (kap. 4.1.). Maximální hloubka Čertova jezera zjištěná pomocí echolotu v září 2003, vztažená ke stavu 22 cm na vodočtu, činí 35,3 m. Průměrnému ročnímu stavu 31 cm na vodočtu odpovídá největší hloubka jezera 35,4 m. Střední hloubka určená z batymetrické křivky má hodnotu 17,31 m. Ani tyto údaje nelze však se staršími daty porovnat vzhledem ke změnám koruny jezerní hráze v minulosti.

Největší hodnoty sklonu dna jezera se vyskytují především v jeho severozápadní části pod jezerní stěnou a rovněž při jihovýchodním břehu v pásu mezi 4 a 12 m hloubky (maximum v hloubnicovém pásu 6–8 m dosahuje hodnoty 25° 28'). Nejnižší hodnoty sklonu se nacházejí v centrálních nejhlubších částech jezera především pod hloubnicí 32 m (minimum činí 2° 39' pod 34 m hloubky). Dno Čertova jezera dosahuje v porovnání s ostatními glaciálními jezery na české straně Šumavy nejvyšší hodnoty středního sklonu (tab. 4).

Tab. 4 – Porovnání morfometrických charakteristik pánví glaciálních jezer na české straně Šumavy

Jezero	Prášílské (Zbořil 1994) ¹	Plešné (Vránek 1999) ²	Laka (Šobr 1999) ³	Černé (KFGG 2003) ⁴	Čertovo (Kocum 2004) ⁵
Nadmořská výška (m n. m.)	1079	1087,2	1084,8765	1007,513	1027,116
Plocha (ha)	4,204375	7,643	2,57705	18,792913	10,740943
Prostorový objem (m ³)	349920	614320	48817,5	2924775,1	1859018,6
Délka břehové čáry (m)	819	1320	817,5	2110,70	1466,3
Vlastní délka (m)	306	514	345,4	693,07	498,0
Největší šířka (m)	204	183	95,2	459,03	306,4
Průměrná šířka (m)	137,4	148,7	74,61	271,15	215,7
Stupeň členitosti břehové čáry	1,13	1,35	1,44	1,37	1,26
Největší hloubka (m)	17,2	18,7	3,5	40,1	35,3
Střední hloubka (m)	8,32	8,04	1,89	15,57	17,31
Hloubkový koeficient	0,48	0,43	0,54	0,39	0,49
Relativní hloubkový koeficient	0,084	0,068	0,022	0,093	0,108
Střední sklon dna	13° 00' 43''	14° 23'	3° 35' 20''	14° 20'	16° 59'

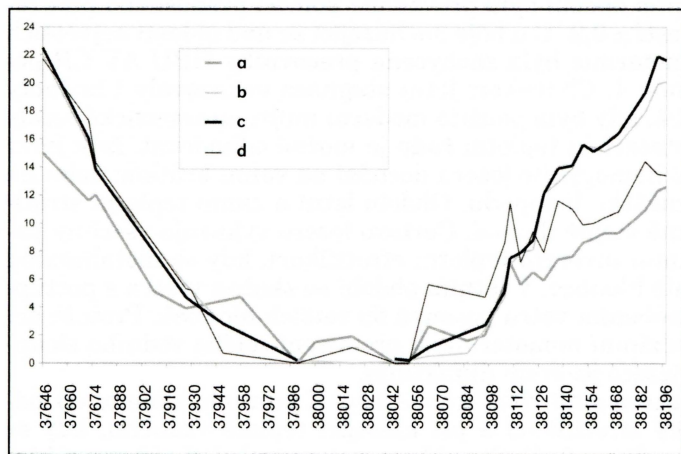
Pozn.: ¹ 47 cm pod úrovní hráze, ² stav na vodočtu 68 cm, ³ stav na vodočtu 99 cm, ⁴ stav na vodočtu 84 cm, ⁵ stav na vodočtu 22 cm

Pramen: Janský, Šobr, Kocum, Česák (2003)

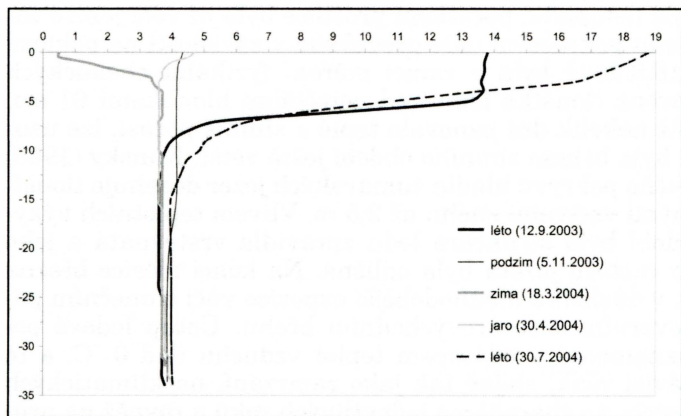
6. Fyzikální vlastnosti a chemismus akumulovaných vod

6.1. Teplotní režim akumulované vody a ledové jevy

V období 13.8.2003–30.7.2004 bylo prováděno měření teploty vody jednotlivých přítoků jezera, povrchové vrstvy jezerní vody (hloubka 0,2 m) na stálém místě u vodočetné latě, na odtoku z jezera a na dolním toku Jezerního potoka v profilu nad soutokem s Řeznou. Měření teploty povrchové vrstvy jezerní vody bylo prováděno u vodočetné latě z toho důvodu, že se v její blízkosti nenachází žádné ústí přítoku, které by teplotu jezerní vody nějak ovlivňovalo.



Obr. 5 – Vývoj teploty vody (°C) hlavního přítoku (P2), povrchové vrstvy jezerní vody u jihovýchodního břehu jezera, na výtoku z jezera a na dolním toku Jezerního potoka v období 13.8.2003–30.7.2004. Vysvětlivky: a – hlavní přítok (P2), b – JV břeh (vodočetná lať), c – odtok, d – dolní tok. Zdroj: vlastní měření.



Obr. 6 – Teplota vody Čertova jezera ve vertikálním profilu nad oblastí největších hloubek v jednotlivých ročních obdobích. Osa x – teplota (°C), osa y – hloubka (m). Zdroj: vlastní měření a HBU AV ČR.

K určování teploty vody byl použit digitální teploměr s přesností měření na desetinu stupně Celsia. Vývoj teplot vody ve výše uvedných čtyřech měřných profilech je znázorněn v grafu na obrázku 5. Celoročně nejchladnějšími jsou občasné přítoky P3 (průměrná roční teplota 4,9 °C) a P5 (5,4 °C), naopak nejteplejšími jsou přítoky ústící do jezera od severu – P1 (6,5 °C) a hlavní přítok P2 (6,4 °C). Jezerní voda na výtoku má téměř o 1 °C vyšší průměrnou roční teplotu než u vodočetné latě. To je způsobeno tím, že jižní partie jezera, kde se nachází vodočetná lať, se vyznačují díky své expozici nižší hodnotou denního oslunění. Rozkolísanost v teplotě vody je z důvodu její retence v jezerní pánvi menší u vodočetné latě a na výtoku než v přítocích a dolním toku Jezerního potoka. V let-

ních měsících jsou teploty přítoků menší než teplota epilimnia jezera. V důsledku toho voda přiváděná do jezera přítoky se noří do větších hloubek. Co se týče rozložení teplot povrchové vrstvy jezerní vody během dne, pak nejchladnější je voda při východu slunce, nejteplejší je kolem čtvrté hodiny odpolední. Denní tepelné změny jsou málokdy větší než 2 °C a dotýkají se jen zmiňované tenké povrchové vrstvy (Dub 1953).

Čertovo jezero vykazuje *termický režim* typický pro jezera mírného klimatického pásma s obdobími letního přímého zvrstvení (letní stagnace), jarní a podzimní homotermie a období zimního inverzního zvrstvení (zimní stagnace, viz obr. 6). K tomuto závěru jsme dospěli na základě měření teploty jezerní vody ve vertikálním profilu v jednotlivých ročních obdobích. Měření v letním, zimním a jarním období byla prováděna pomocí přenosného přístroje GRYF 310 A s přesností $\pm 0,2$ °C u bóje nacházející se nad oblastí největších hloubek, podzimní homotermie byla zachycena pracovníky HBÚ AV ČR pomocí přístroje DataSonde 4. Charakter letní stagnace vykazovaly i hodnoty naměřené dne 30.7.2004, kdy bylo použito moderní multiparametrické sondy YFI 6920. I přes nedostatečnou teplotní řadu je možné odhadovat, že k jarní resp. podzimní teplotní homogenitě jezera dochází na velmi krátkou dobu na konci dubna resp. na začátku listopadu. Období letní a zimní teplotní stratifikace je časově přibližně stejně dlouhé. Čertovo jezero vykazuje všechny parametry typické pro zimní inverzní teplotní stratifikaci, kdy se metalimnion nachází v relativně malé hloubce. V letním období se skočná vrstva s postupným prohříváním a působením větru posouvá do větších hloubek. Protože dochází během jarní a podzimní homotermie k promísení celého vodního sloupce, nazýváme Čertovo jezero jezerem dimiktním.

Na termický režim jezera mají vliv i *ledové jevy*. K prvnímu zámrazu dochází při inverzní termické stratifikaci a při klesající teplotě vzduchu, kdy se ochladí svrchní vrstva vody na 0 °C. Obvykle se pak vytvoří led nejprve u břehu a na mělčinách (kromě ústí přítoků a oblasti výtoku) a odtud se postupně rozšíří na celou hladinu. Hladina Čertova jezera zamrzá nejdříve v jeho severní části. Mandák (1981) uvádí, že proces zamrzání šumavských glaciálních jezer začíná zpravidla v polovině listopadu, led pak často roztaje až koncem dubna, někdy i o měsíc později. Na konci roku 2003 se první led objevil na hladině přibližně v polovině listopadu, počátkem prosince bylo již celé jezero zamrzlé. Růst mocnosti ledu pokračoval dále především v závislosti na poklesu teplot vzduchu. Dne 18.3.2004 byla v rámci měření fyzikálně-chemických vlastností jezera stanovena tloušťka ledu nad největšími hloubkami 61 cm. Vzhledem k tomu, že již několik dní panovalo teplé a slunné počasí, lze usuzovat, že mocnost ledu byla během zimního období ještě větší. Kunský (1968) uvádí, že mocnost ledového pokryvu hladin šumavských jezer dosahuje tloušťky 75 cm a s přeměněnými vrstvami sněhu až 2,5 m. Vlivem teplotních výkyvů během zimního období byla struktura ledu zpravidla vrstevnatá a jeho tloušťka v jednotlivých částech jezera byla odlišná. Na konci měsíce března začalo jezero rozmrzat, v důsledku dlouhodobější expozice vůči slunečním paprskům nejprve při severním a severovýchodním břehu. Ústup ledové pokrývky lze obvykle zaznamenat s nástupem teplot vzduchu nad 0 °C, a to zpravidla od břehů. Závisí však, stejně tak jako zamrzání, na klimatických a topografických poměrech, na charakteru jednotlivých roků a rovněž na průběhu zimy. V průběhu dubna docházelo postupně k úbytku mocnosti ledové pokrývky, ve druhé polovině měsíce byla intenzita tání navíc umocněna dešťovými srážkami. Na konci dubna byla již jen 1/3 jezera při jihovýchodním břehu a v jihozápadním cípu jezera pokryta kašovitým ledem. Na začátku

května byla hladina jezera již bez ledu. Dlouhodobé zamrzání šumavských jezer ovlivňuje podle některých autorů i jejich relativní organickou chudobu (např. Kunský 1968).

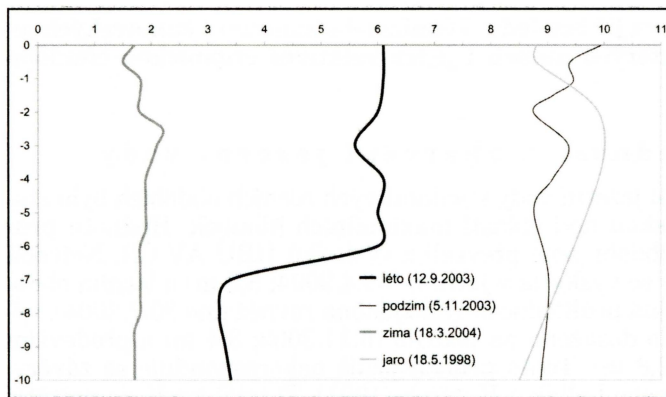
6.2. Průhlednost a zbarvení jezerní vody

Průhlednost a zbarvení jezerní vody v jednotlivých ročních obdobích bylo stanoveno bílou Secchiho deskou nad oblastí maximálních hloubek. Hodnotu průhlednosti v podzimním období jsme převzali z výsledků HBÚ AV ČR. Největší průhlednost jezerní vody se vyskytla v jarním (30.4.2004; 5,3 m) a letním období (12.9.2003; 5,1 m – stejná průhlednost byla zjištěna rovněž dne 30.7.2004), výrazně nižších hodnot bylo dosaženo na podzim (5.11.2003; 3,4 m) a především pak v zimě (18.3.2004; 2,8 m). Tento průběh příliš nekorresponduje se závěry, které uvádí Dub (1957) nebo Lellák a Kubiček (1991). Ti totiž tvrdí, že největší průhlednost stojatých vod by měla být zjištěna v zimě. Ledový pokryv chrání vodu před zakalením ode dna, které v jiných obdobích vyvolává vítr a vlnění při březích jezera. Na jaře, v době tání sněhu a zvýšené vodnosti, se většinou průhlednost vody zhorší. Zlepší se až s poklesem vodnosti, ale v té době (zpravidla na konci léta) většinou voda obsahuje větší množství organismů (Dub 1957). Průhlednost může proto sloužit jako první orientační informace o produkčním potenciálu a o množství fytoplanktonu v nádrži (Lellák a Kubiček 1991). Vývoj průhlednosti vody Čertova jezera ale vykazuje opačný průběh. To je pravděpodobně způsobeno jednak celoročně velmi nízkými hodnotami biomasy planktonu ve vodě, jednak zvýšeným rozkladem barevných látek rozpuštěných nebo rozptýlených ve vodě slunečními paprsky v jarním a letním období. Lean (1998) a Allard, Borén, Pettersson a Zhang (1994) uvádějí, že sluneční záření efektivně redukuje koncentrace rozpuštěných látek ve vodě, zmenšuje jejich průměrnou molekulární hmotnost a mění jejich optické vlastnosti. Čertovo jezero je relativně velké a hluboké, a proto je zakalení vody ode dna minimální. Během jarního procesu tání sněhové pokrývky pak dochází k výraznému snižování průhlednosti pouze v příbřežních oblastech. Protože bylo určování průhlednosti vody v zimním období prováděno na zamrzlém jezeře, je zjištěná nízká hodnota pravděpodobně zkreslena malou prostupností světla přes led a sněhovou pokrývku.

Secchiho deska se pro stanovení *zbarvení* jezerní vody ponoří do poloviční hloubky průhlednosti a barva vody se posuzuje podle toho, jak se jeví sloupec vody nad ní v porovnání s Ule-Forelovou stupnicí o 21 barevných odstínech od tónů tmavě modrých přes zelené, žluté až po temně hnědé. Vzhledem k možným odchylkám, které mohou vzniknout při subjektivním posuzování zbarvení vody, prováděli měření současně vždy nejméně dva pozorovatelé. Barva vody se v jednotlivých obdobích výrazně lišila. Barvám charakteristickým pro oligotrofní jezera se voda Čertova jezera nejvíce blížila v letním období (12.9.2003; č. 10), naopak na jaře (30.4.2004; č. 19) získalo jezero hnědý odstín typický pro rašelinistní jezera. V zimním období (18.3.2004) byla pod ledovým pokryvem jezera stanovena barva vody č. 15 Ule-Forelovy škály. Stejně jako u průhlednosti je však tento výsledek ovlivněn menším množstvím pronikajícího světla přes ledovou pokrývku.

6.3. Další fyzikálně-chemické charakteristiky jezerní vody

Studiem chemismu a oživení šumavských jezer se nesoustavně již více než 100 let zabývala celá řada autorů a později i vědeckých týmů. Výsledky těch-



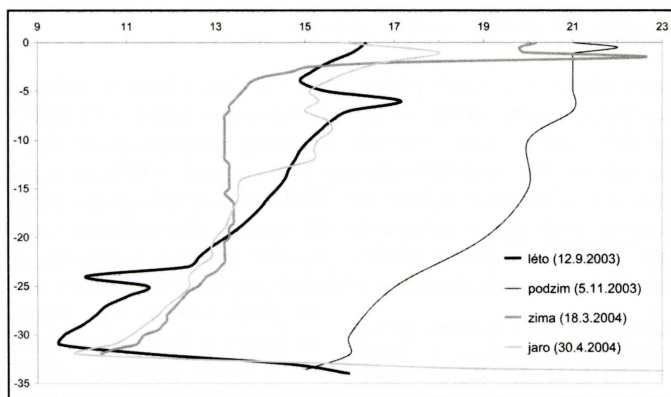
Obr. 7 – Obsah rozpuštěného kyslíku v jezerní vodě ve vertikálním profilu do hloubky 10 m v jednotlivých ročních obdobích. Osa x – obsah O_2 (mg/l), osa y – hloubka (m). Zdroj: vlastní měření a HBÚ AV ČR.

to výzkumů shrnují např. Veselý (1994) nebo Vrba a kol. (2001). Byly tak zachyceny významné změny ve složení planktonu, zejména úbytek zooplanktonu a vymizení ryb (přehled viz Veselý 1994, Vrba a kol. 2000a). Acidifikací jezer, jejími důsledky a rychlostí biologického zotavení jezer včetně reintrodukce původních druhů se v posledních letech zabývala katedra parazitologie a hydrobiologie PřF UK (např. Fott, Pražáková, Stuchlík a Stuchlíková 1994, Fott, Kohout a Pražáková 2001). Osm šumavských ledovcových jezer představuje unikátní soubor jezerních ekosystémů, který заслужuje soustavnou pozornost badatelů i českých a bavorských orgánů ochrany přírody. Hlavním důvodem je kromě existence dlouhodobých dat a vysoké citlivosti jezer i jejich povodí na změny atmosférické depozice na Šumavě především unikátnost samotných jezerních ekosystémů, které se zde vyvinuly v důsledku acidifikace. Po extrému na počátku 80. let 20. století se koncentrace jednotlivých složek v jezerech vrací postupně na předacidifikační úroveň (Majer a kol. 2001). Rychlost a rozsah těchto změn je unikátní v celosvětovém měřítku a Šumava se stala jedinečnou lokalitou umožňující studium dynamiky chemických a biologických procesů v těžce postižených oblastech (Kopáček a kol. 2001). Čertovo jezero ale řadí Vrba a kol. (2000b) spolu s jezery Černým, Plešným a Roklanským mezi jezera dosud silně acidifikovaná. Acidifikace a chemismus šumavských jezer je již dlouhodobě předmětem výzkumu HBÚ AV ČR v Českých Budějovicích.

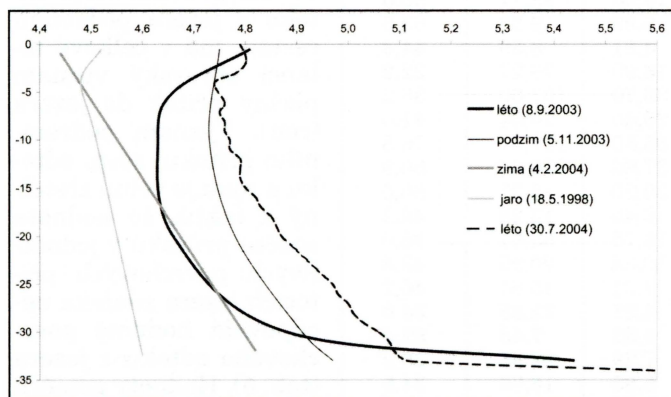
V rámci měření fyzikálně-chemických vlastností jezerní vody v jednotlivých obdobích roku byl kromě teploty sledován ve vertikálním profilu nad oblastí maximálních hloubek i obsah rozpuštěného kyslíku, konduktivita a pH akumulované vody. Pro málo produktivní jezera, jako je jezero Čertovo, je obvyklá přibližně ortográdní distribuce *rozpuštěného kyslíku* s mírným poklesem ke dnu (Vrba a kol. 1996). Ke stanovování obsahu rozpuštěného kyslíku ve vodě v letním, zimním a jarním období byl používán oxymetr GRYF 463, přičemž k dispozici jsme měli kabel o délce jen 10 m. Z jednotlivých profilů vynesенých v grafu na obrázku 7 lze vyčíst obecně vyšší obsah rozpuštěného kyslíku ve vertikálním profilu v jarním a podzimním období než v obdobích ostatních. Tento fakt a rovněž relativní vyrovnanost průběhu obou křivek je způsobena procesem promíchávání vody v celém jejím sloupci. Nejnižší hodnoty kyslíku vykazovalo zimní období, kdy je celá hladina jezera pokryta ledem a jezerní vodě není tudíž umožněno absorbovat vzdušný kyslík. Z křivky pro léto roku 2004 je patrný rapidní pokles obsahu kyslíku v metalimniu mezi 6 a 7 m hloubky.

Vertikální profily *konduktivity*, k jejímuž měření byl ve všech obdobích kromě podzimního použit přístroj GRYF 156, jsou pro jednotlivá roční období vy-

to výzkumů shrnují např. Veselý (1994) nebo Vrba a kol. (2001). Byly tak zachyceny významné změny ve složení planktonu, zejména úbytek zooplanktonu a vymizení ryb (přehled viz Veselý 1994, Vrba a kol. 2000a). Acidifikací jezer, jejími důsledky a rychlostí biologického zotavení jezer včetně reintrodukce původních druhů se v posledních letech zabývala katedra parazi-



Obr. 8 – Konduktivita jezerní vody ve vertikálním profilu nad oblastí největších hloubek v jednotlivých ročních obdobích. Osa x – vodivost ($\mu\text{S.cm}^{-1}$), osa y – hloubka (m). Zdroj: vlastní měření a HBÚ AV ČR.



Obr. 9 – Hodnoty pH jezerní vody ve vertikálním profilu nad oblastí největších hloubek v jednotlivých ročních obdobích. Osa x – hodnota pH, osa y – hloubka (m). Zdroj: vlastní měření a HBÚ AV ČR.

v jeho přítocích. Vertikální profily pH jezerní vody pro jednotlivá roční období byly převzaty od HBÚ AV ČR. Ke grafu na obrázku 9 byl přidán profil pH ze dne 30.7. 2004, jehož hodnoty byly zaznamenány moderní multiparametrickou sondou YFI 6920. Ke grafu je nutné podotknout, že k sestrojení jarního pH profilu musely být použity hodnoty naměřené dne 18.5.1998, protože novější data reprezentující přibližně toto období nebylo možné získat. Z křivek pro jednotlivá období lze vyčíst větší či menší pokles pH do hloubky cca 5–10 m a následnou mírně vzestupnou tendenci až k jezernímu dnu, přičemž ve vrstvě vody bezprostředně u dna je vzestup pH rapidní. Tento průběh je typický pro acidifikovaná jezera (Vrba a kol. 2000b). Hodnoty pH povrchové vrstvy jezerní vody se ve sledovaném období pohybovaly mezi 4,4 a 4,8. Obecně lze říci, že na základě získaných dat se nižší hodnoty pH jezerní vody vyskytly v zimním a jarním či časně letním období, vyšší pak v období podzimním a letním.

kresleny v grafu na obrázku 8. Z něho je patrný především mírný pokles vodivosti směrem do hloubky během celého roku. Přibližně stejných hodnot jako na podzim dosahovala vodivost povrchové vrstvy jezerní vody (do hloubky cca 1,5 m) v zimním období. Od této hloubky ovšem vykazoval průběh křivky rapidní pokles a v hloubce 4 m již konduktivita představovala pouhých 60 % hodnoty při hladině. V nejhlubší vrstvě jezerní vody u dna vodivost zákonitě výrazně vzrůstá.

V Plánu péče o NPR Černé a Čertovo jezero (1997) se uvádí, že povrchové vody v povodí Čertova jezera vykazují pH 4,5–5,5, jihovýchodně od vrcholu Jezerní hory pak 5,5–6,5. Hodnoty pH jsou obecně vyšší na odtoku z jezera než

7. Hydrologický režim jezera

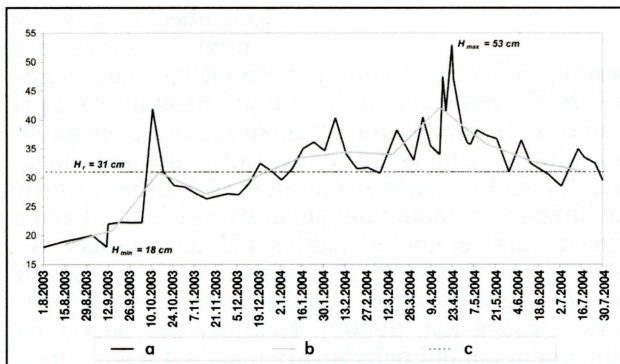
Měření průtoků bylo prováděno na všech přítocích a odtoku z jezera během období jednoho roku od začátku srpna 2003 do konce července 2004. Od HBÚ AV ČR byly pro stejné období poskytnuty rovněž hodnoty průměrných denních průtoků na odtoku z jezera. Ve vzdálenosti cca 150 m pod výtokem z jezera je na Jezerním potoce v nadmořské výšce asi 1020 m nainstalován průtokoměr, který měří okamžité průtoky v intervalu 15 minut. Do celkové vodní bilance jezera vstupuje několik dalších prvků, jejichž přesná hodnota je velmi obtížně stanovitelná. Význam kondenzace vodních par nad hladinou ne-

Tab. 5 – Porovnání hodnot celkového povrchového přítoku do jezera a povrchového odtoku z jezera v období 15.10.2003–30.7.2004 (P/O – přítok/odtok). Zdroj: vlastní měření a HBÚ AV ČR.

Datum	Vodní stav (°C)	Přítok (l/s)	Odtok (l/s)	P/O (%)
15.10.2003	34	14,08	28,17	50,0
5.11.2003	28	5,99	9,38	63,8
3.12.2003	27,5	3,81	8,59	44,4
14.1.2004	39	16,90	76,27	22,2
4.2.2004	41	38,70	107,00	36,2
7.4.2004	38,5	29,40	70,64	41,6
19.4.2004	41,5	85,50	111,31	76,8
24.4.2004	47	137,60	270,34	50,9
3.5.2004	36	30,20	45,37	66,6
30.5.2004	31	6,40	13,28	48,2
7.6.2004	36,5	18,75	53,61	35,0
13.6.2004	32,5	10,32	20,95	49,3
19.6.2004	31,5	7,21	15,61	46,2
25.6.2004	30,5	4,21	12,38	34,0
3.7.2004	28,5	4,63	7,43	62,4
18.7.2004	33,5	7,29	27,85	26,2
25.7.2004	32,5	5,85	16,96	34,5
30.7.2004	29,5	2,75	8,99	30,6
Průměr	34,4	23,9	50,2	45,5

ní jistě tak velký, jinak je tomu u hodnoty výparu z volné hladiny. Podzemní přítok a podzemní odtok z jezera jsou ale prvky, které mají výrazný vliv na vodní bilanci. Kromě přítoku, resp. odtoku z jezera podzemní cestou, má v celkové bilanci obrovský význam plošný přítok do jezera (ron). Význam podzemního přítoku, resp. odtoku a ron je velmi zřetelný z faktu, že hodnota součtu průtoků v jednotlivých povrchových přítocích jezera zdaleka neodpovídá hodnotě povrchového odtoku z jezera (tab. 5). Hodnoty poměrů jsou ovšem do určité míry rovněž ovlivněny tím, že jsou zde porovnávány okamžité průtoky na přítocích s průměrnými denními průtoky na odtoku.

Průtoky vodotečí ústících do jezera dosahující relativně nižších hodnot byly měřeny tzv. přímou metodou pomocí kalibrované nádoby o objemu 12 litrů, zatímco u hlavního přítoku (P2) během jarního tání sněhové pokrývky byly zjištěny jednak plovákovou metodou a jednak hydrometrickou vrtulí. Současně byl v některých případech

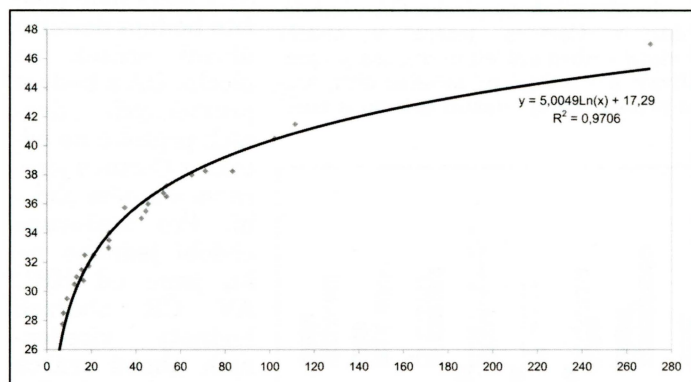


Obr. 10 – Kolísání výšky hladiny Čertova jezera během období 1.8. 2003 - 31.7. 2004. Osa y – vodní stav (cm). Vysvětlivky: a – okamžitý vodní stav, b – průměrný měsíční vodní stav, c – průměrný roční vodní stav. Zdroj: vlastní měření.

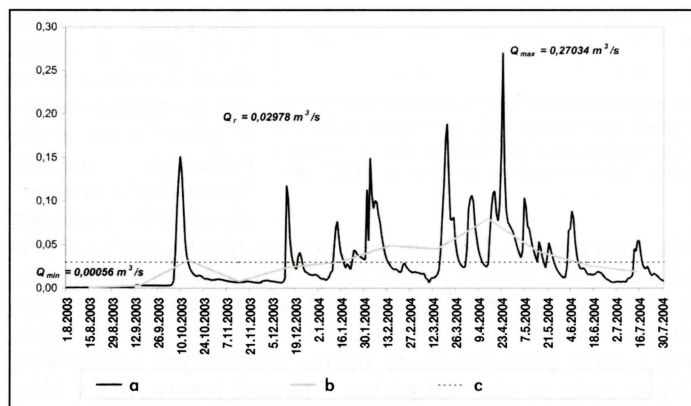
pomocí hydrometrické vrtule měřen i odpovídající průtok na odtoku z jezera v profilu bezprostředně pod výtokem, aby mohla být zjištěná hodnota porovnána s odpovídajícím průměrným denním průtokem získaným od HBU AV ČR.

Na jihovýchodním břehu jezera byla nainstalována vodočetná lať pro sledování kolísání hladiny jezera. K tomuto vodočtu byla vztažena i nadmořská výška jezerní hladiny. Při každém měření průtoku byl odečten i údaj o vodním stavu, aby mohl být zkonstruován graf závislosti průtokového množství vody na odtoku na stavu jezerního vodočtu (obr. 11). Kolísání výšky hladiny Čertova jezera v období 1.8.2003–31.7.2004 je znázorněno na obrázku 10, vývoj průměrných denních a měsíčních průtoků na odtoku z jezera pro stejné období na obrázku 12. Kopáček a kol. (2000b) uvádějí teoretickou dobu zdržení vody jezera v hydrologickém roce 1998, a to 567 dnů.

Z grafů na obrázku 10 a 12 je patrný vzestup hladiny Čertova jezera v jarním období, kdy dochází k nejvýznamnějšímu procesu tání sněhu v jeho povodí.

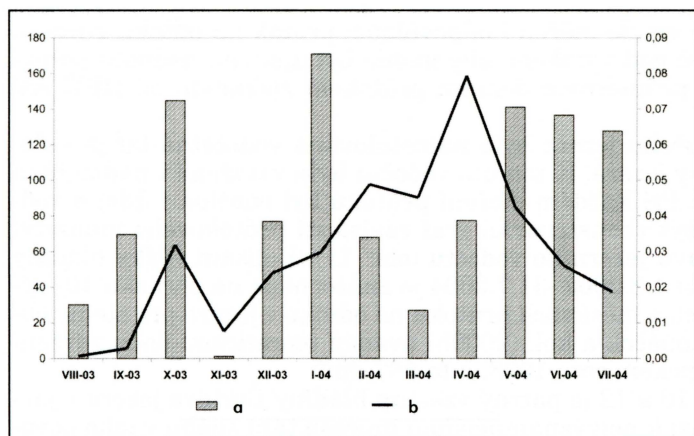


Obr. 11 – Závislost průtokového množství vody na odtoku z Čertova jezera na stavu jezerního vodočtu. Osa x – průtok (l/s), osa y – vodní stav (cm).

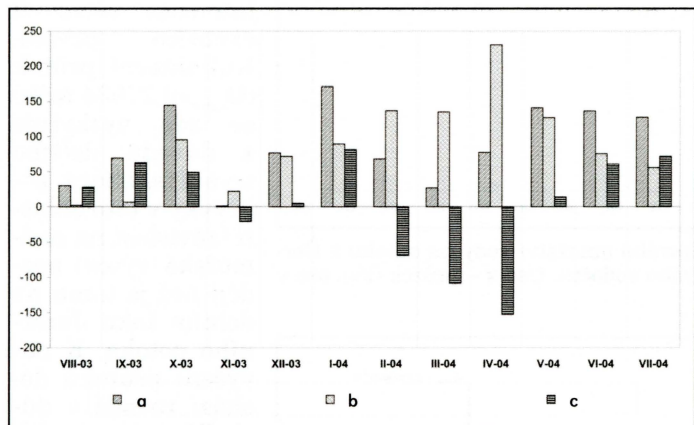


Obr. 12 – Vývoj průměrných denních a měsíčních průtoků v porovnání s průměrným ročním průtokem na odtoku z Čertova jezera v období 1.8.2003–31.7.2004. Osa y – průtok (m³/s). Vysvětlivky: a – průměrný denní průtok, b – průměrný měsíční průtok, c – průměrný roční průtok (VII/03–VII/04).

Kromě teploty vzduchu ovlivňují tento proces především dešťové úhrny, vodní hodnota sněhové pokrývky, intenzita větru či expozice povodí. Kulminační průtok ($Q_{\max}=0,27034 \text{ m}^3/\text{s}$) se zde vyskytuje z důvodu delšího trvání sněhové pokrývky v této oblasti (závislost na nadmořské výšce) později než je tomu na dolním toku Jezerního potoka. K navýšení průtoků dochází rovněž v důsledku intenzivních srážkových úhrnů během celého roku. Taková situace se vyskytla např. na začátku října 2003. Minimální průtok ze dne 11.9.2003 ($Q_{\min}=0,00056 \text{ m}^3/\text{s}$) svědčí o suchosti hydrologického roku 2003. Minimální průtoky během léta 2003 se vyskytly v důsledku absence významných srážek



Obr. 13 – Vývoj měsíčních úhrnů srážek na plochu OA a měsíčních průtoků na odtoku z Čertova jezera v období 1.8.2003–31.7.2004. Osa y vlevo – úhrn srážek (mm), osa y vpravo – průtok (m^3/s). Vysvětlivky: a – průměrný měsíční úhrn srážek, b – průměrný měsíční průtok. Zdroj: vlastní měření a HBÚ AV ČR.



Obr. 14 – Měsíční úhrny srážek na plochu OA (a; v mm), měsíční výšky odtoku (b; v mm) z Čertova jezera a jejich rozdíl (c; v mm) v období 1.8.2003–31.7. 2004. Zdroj: vlastní měření a HBÚ AV ČR.

denních úhrnů srážek na tuto plochu. Protože se zmíněná plocha nachází přibližně ve střední nadmořské výšce povodí jezera, byly tyto hodnoty zvoleny jako reprezentativní pro celé toto povodí. Vypočtené hodnoty denních, měsíčních a ročních úhrnů srážek mohou být v důsledku existence anemo-orografického systému do určité míry podhodnoceny oproti skutečným hodnotám. Srážkoměrná plocha OA se totiž nenachází přímo v povodí jezera, ale v blízkosti rozvodí mezi úmořím Černého a Severního moře. Z grafu na obrázku 13 je patrné srovnání jednotlivých měsíčních úhrnů srážek s měsíčními průtoky na odtoku z jezera ve sledovaném období. Je z něj zřetelně vidět závislost odtoku z jezera na srážkových úhrnech, přičemž do této těsné korelace výrazně zasahuje proces tání sněhové pokrývky v jarních měsících, především v dub-

společně s vysokým stavem vyčerpání zásob podzemních vod v povodí v tomto období. Nejvodnějším měsícem ve sledovaném období byl duben 2004, nejméně vodným pak srpen 2003.

Pro zhodnocení srážkoodtokových vztahů v povodí Čertova jezera v období 1.8.2003 – 31.7.2004 bylo použito hodnot denních úhrnů srážek na plochu OA a hodnot průměrných denních průtoků na odtoku z Čertova jezera ve stejném období. Pro sledované období jednoho roku jsme od HBÚ AV ČR obdrželi hodnoty vícedenních úhrnů srážek z experimentální volné plochy OA v blízkosti lokality Rozvodí v nadmořské výšce 1175 m. Vzhledem k velmi těsné korelaci mezi úhrny srážek na této ploše a na srážkoměrné stanici Špičák byly zrekonstruovány hodnoty

nu. Na intenzitu tohoto procesu má vliv kromě teploty vzduchu rovněž délka trvání a intenzita srážkových úhrnů, vítr a expozice reliéfu. Srážkoodtokové vztahy v povodí jezera ve sledovaném období demonstrovuje i graf na obrázku 14. Ten vyjadřuje závislost lépe porovnatelných veličin, měsíčních úhrnů srážek, jim odpovídajících měsíčních výšek odtoku a rovněž rozdíl obou těchto hodnot, které označuje Shaw (1994) ve své práci jako ztráty („loss“). Záporné hodnoty rozdílů mají v jednotlivých měsících ovšem různé vysvětlení. V případě listopadu šlo o vyčerpávání zásob podzemní vody z povodí jezera, jež již množství se výrazně zvýšilo v důsledku významných srážkových úhrnů v říjnu. V případě měsíců února, března a dubna byla výrazná dominance odtoku oproti úhrnu srážek způsobena v důsledku procesu tání sněhové pokrývky v povodí. Nejvyšší intenzity dosahuje tento proces ve druhé polovině měsíce dubna. Kladné hodnoty rozdílů srážkových úhrnů a odtokových výšek charakteristické pro ostatní měsíce odpovídají součtu infiltrace a výparu. Nejvyšší kladné hodnoty tohoto rozdílu bylo dosaženo v lednu. Tento fakt zapříčinily intenzivní sněhové srážky a současně relativně slabý odtok z jezera. Z jeho povodí je i v delších téměř bezesrážkových obdobích (např. srpen a září roku 2003) uskutečňován minimální bazální odtok dosahující hodnoty cca 0,5 l/s. Podzemní vody v této oblasti mají tedy sezónní doplňování zásob. Tyto procesy souvisí s výškou hladiny podzemní vody v povodí. V Plánu péče o NPR Černé a Čertovo jezero (1997) jsou uvedeny závěry, které odpovídají i výše popsané analýze srážkoodtokových vztahů. Nejvyšší stavy hladiny podzemní vody bývají v květnu a červnu, nejnižší pak v prosinci až únoru. Průměrný specifický odtok podzemních vod z 1 km² má hodnotu 5 a více litrů za sekundu. Porovnání hodnot průtoků na odtoku z jezera s odpovídajícími průtoky na dolním toku Jezerního potoka a na Řezné u státní hranice dokládá výrazně nižší rozkolísanost odtoku z jezera než průtoků v níže položených profilech a tedy významnou akumulaci a retenční schopnost jezerní pánve a povrchu celého povodí. Z tohoto důvodu dosahuje i kolísání hladiny jezera v rámci dne velmi nízkých hodnot. Vyrovnávací účinek jezerní pánve souvisí i s tím, že se významný úhrn srážek na odtoku z jezera projeví navýšením průtoků až po relativně delší době, během které dochází k postupnému nasycování jeho povodí. V oblasti kolem jezera se v tomto období zaplňují mnohé mělké deprese vodou.

7. Závěr

V posledních letech se lokalitou Čertova jezera zabývala řada projektů, ale chybělo nové detailní vyměření půdorysu jezera, zpracování hloubkových poměrů jezerní pánve a analýza hydrologické bilance jezera. Na informačních tabulích u všech šumavských jezer dodnes vidáme téměř sto let staré údaje, které jsou ve velké míře chybné. Správa Národního parku a Chráněné krajinné oblasti Šumava i autoři publikací vycházejí z údajů získaných na počátku 20. století, kdy zde prováděl výzkumné aktivity Václav Švambera. Šumavskými jezery ledovcového původu se ale v minulosti zabývali i mnozí další geografové. Novodobý komplexní geografický výzkum glaciálních jezer na české straně Šumavy započal kolektiv katedry fyzické geografie a geoekologie PřF UK v roce 1994. O deset let později vznikla limnologická studie Čertova jezera (Kocum 2004).

Kromě detailní morfometrie samotné jezerní pánve byly vypočteny morfometrické charakteristiky rovněž pro celé povodí jezera. Vzhledem k nesprávnému znázornění toků na veškerých podkladových mapách včetně Základní

mapy České republiky 1 : 10 000 bylo nutné určit průběh rozvodnice terénním průzkumem. Povodí Čertova jezera je ze všech pěti glaciálních jezer na české straně Šumavy nejnižše položené (1144,0 m n. m.). V rámci terénního průzkumu bylo zmapováno celkem pět stálých přítoků jezera na rozdíl od situace na topografické mapě 1 : 10 000, kde jsou zakresleny pouze dva. Kromě přítoků celoročních se v jarním období, kdy v této oblasti dochází k intenzivnímu tání sněhové pokrývky, vytváří v povodí jezera větší množství zdrojnic. Hlavní přítok s cca 60% podílem na celkovém přítoku do jezera odvodňuje jihovýchodně exponovaný svah Jezerní hory.

Protože se na různých mapách můžeme setkat s odlišnými údaji o nadmořské výšce jezerní hladiny, bylo jedním z hlavních cílů výzkumných prací i její přesné zaměření. Její nadmořská výška byla při průměrném ročním vodním stavu 31 cm stanovena na 1027,206 m n. m.

Jedním z hlavních výstupů současného limnologického výzkumu Čertova jezera je jeho batymetrická mapa a batymetrická křivka. Porovnáním mapy vykreslené na základě našich měření v září 2003 s mapou Švamberskou je nutné uvést, že V. Švamberský vytvořil již téměř před sto lety hloubkový plán velmi přesný, který se od batymetrické mapy současné liší jen v detailech. Preciznost a poctivost, s jakou byla provedena jeho hloubková měření, dokumentuje i porovnání obou batymetrických křivek. Z nich je patrná o 1,6 m menší hodnota maximální hloubky naměřené řešitelským kolektivem katedry v září 2003 (35,4 m), než je hodnota zjištěná Švamberskou. Intenzitu zanášení jezera ovšem nelze z důvodu manipulace s korunou morény v minulosti nijak kvantifikovat. Tuto problematiku je možné řešit pouze budoucími opakovanými měřeními hloubkových poměrů pánve. Plocha jezera činí při stavu 22 cm na vodočtu 10,740943 ha, což je hodnota o více než 0,4 ha větší než ta, kterou uvádí Švamberský (1939). Dno jezera pak dosahuje v porovnání s ostatními šumavskými glaciálními jezerami na české straně hranice nejvyšší hodnoty středního sklonu (16°59'). Čertovo jezero je ze všech glaciálních jezer na české straně Šumavy jak z hlediska půdorysu, tak hloubkových poměrů, v současnosti nepřesněji vyměřené.

Protože cílem naší práce byl komplexní limnologický výzkum jezera, provedli jsme průběžný monitoring vybraných fyzikálně-chemických vlastností akumulované vody v jednotlivých ročních obdobích. Čertovo jezero vykazuje termický režim typický pro jezera mírného klimatického pásu s obdobími letního přímého zvrstvení (letní stagnace), jarní a podzimní homotermie a období zimního inverzního zvrstvení (zimní stagnace), kdy se metalimnion nachází v relativně malé hloubce. Z hlediska průhlednosti a zbarvení jezerní vody dochází v rámci roku k výrazným změnám v závislosti na ročním období, přičemž největší průhlednosti bylo v rámci sledovaného období dosaženo na jaře a v létě. Tento fakt příliš nekoresponduje se závěry, které uvádí Dub (1957) nebo Lellák a Kubiček (1991). Naše závěry se naopak shodují s poznatky Leana (1998) a Allarda, Boréna, Petterssona a Zhanga (1994), kteří uvádějí, že sluneční záření efektivně redukuje koncentraci rozpuštěných látek ve vodě. Kromě teploty byl stanovován i obsah rozpuštěného kyslíku, konduktivity a pH vody ve vertikálním profilu vždy nad oblastí maximálních hloubek. Pro málo produktivní Čertovo jezero je charakteristická přibližně ortográdní distribuce rozpuštěného kyslíku s velice mírným poklesem směrem do hloubky. Obecně vyšší obsah rozpuštěného kyslíku se v celém vertikálním profilu vyskytuje v jarním a podzimním období v důsledku procesu promíchávání vody v celém jejím sloupci. Naopak v zimním období, kdy je celá hladina pokryta ledem a jezerní vodě tedy není umožněno absorbovat vzdušný kyslík,

dosahují koncentrace kyslíku výrazně nižších hodnot. Konduktivita vykazovala během celého sledovaného období jednoho roku směrem do hloubky mírně poklesovou tendenci, v nejhlubší vrstvě jezerní vody u dna vodivost zákonitě výrazně vzrůstala. Hodnoty pH jsou obecně vyšší na odtoku z jezera než v jeho přítocích. Průběh pH směrem do hloubky je typický pro acidifikovaná jezera. Charakterizuje ho určitý pokles pH do hloubky cca 5–10 m a následná mírně vzestupná tendence až k jezernímu dnu, přičemž ve vrstvě vody bezprostředně u dna je vzestup pH rapidní. Nižší hodnoty pH jezerní vody se v rámci sledovaného období vyskytly v zimním a jarním období (4,4–4,5), vyšší naopak v období podzimním a letním (cca 4,8). Acidifikace a chemismus jezerní vody je dlouhodobě předmětem výzkumu Hydrobiologického ústavu Akademie věd České republiky v Českých Budějovicích. Čertovo jezero zůstává z tohoto pohledu i přes rapidní pokles atmosférické depozice síry v posledních letech stále silně acidifikované. V důsledku toho došlo v minulosti k výraznému úbytku zooplanktonu a vymizení ryb (Fott, Kohout a Pražáková 2001).

Podstatnou součástí novodobého výzkumu Čertova jezera byla rovněž analýza jeho hydrologického režimu a srážkoodtokových vztahů v jeho povodí, která byla provedena vůbec poprvé v historii výzkumů v této lokalitě. Vzhledem k tomu, že se jedná o horské povodí, dochází v jarním období v důsledku tání sněhu v jeho povodí k výraznému vzestupu jezerní hladiny. Kulminační průtok nastává vzhledem k závislosti na nadmořské výšce a tedy delšímu trvání sněhové pokrývky v této oblasti později, než je tomu na dolním toku Jezerního potoka. Minimální průtoky se v rámci sledovaného období (1.8.2003–31.7.2004) vyskytly v důsledku absence významných srážek společně s vysokým stavem vyčerpání zásob podzemních vod v povodí v letním období roku 2003. Do těsné korelace závislosti odtoku z jezera na srážkových úhrnech výrazně zasahuje proces tání sněhové pokrývky v jarních měsících. Významný úhrn srážek se na odtoku z jezera projeví navýšením průtoků až po relativně dlouhé době, což souvisí s vysokou akumulací a retenční schopností jezerní pánve a celého povrchu povodí jezera. Kromě toho má na reakci odtoku na úhrn srážek velmi podstatný vliv míra předchozí nasycenosti povodí.

Literatura:

- ALLARD, B., BORÉN, H., PETTERSSON, C. a ZHANG, G. (1994): Degradation of humic substances by UV irradiation. *Environ. Int.* 20, s. 97–101.
- BAYBERGER, F. (1886): *Geographisch-geologische Studien aus dem Böhmerwalde*. Erghft. No. 81 zu Petermanns Geogr. Mitt. Gotha 1886.
- ČESÁK, J., ŠOBR, M., (2005): Metody batymetrického mapování českých jezer. *Geografie – Sborník ČGS*, 110, č. 3, ČGS, Praha, s.141–151.
- DUB, O. (1953): *Limnológia. Hydroológia jezer a barín*. Vydavateľství SAV, Bratislava, 109 s.
- DUB, O. (1957): *Hydroológia, hydrografia, hydrometria*. SVTL, Bratislava, 526 s.
- FOTT, J., PRAŽÁKOVÁ, M., STUHLÍK, E., STUHLÍKOVÁ, Z. (1994): Acidification of lakes in Šumava (Bohemia) and in the High Tatra Mountains (Slovakia). *Hydrobiologia*, č. 274, Praha, s. 37–47.
- FOTT, J., KOHOUT, L. a PRAŽÁKOVÁ, M. (2001): Zooplankton šumavských jezer: 130 let změn a perspektivy dalšího vývoje. *Aktuality šumavského výzkumu*, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 58–59.
- FREJLACH, J. (1898): Bathymetrická mapa jezera Plöckensteinského. *Věstník Československé akademie nauk*, 7, č. 4, Praha, s. 267–270.
- FRÍČ, VAVRA (1898): Výzkumy zvířeny ve vodách českých. III. Výzkumy dvou jezer šumavských, Černého a Čertova jezera. *Archiv pro přír. výzkum Čech*, X, č. 3, Praha.
- JANSKÝ, B.(1996): Tradice geografických výzkumů jezer na Karlově univerzitě. *Geografie–Sborník ČGS*, 101, č. 1, ČGS, Praha, s. 59–63.

- JANSKÝ, B., ŠOBR, M. a kol. (2003): Jezera České republiky. KFGG PřF UK, Praha, 216 s.
- JANSKY, B., ŠOBR, M., KOCUM, J., ČESÁK, J. (2003): Mapování Černého a Čertova jezera. Manuskript výsledků terénních měření. Katedra fyzické geografie a geologie, PřF UK, Praha.
- JANSKÝ, B., ŠOBR, M., KOCUM, J., ČESÁK, J. (2005): Nová batymetrická mapování glaciálních jezer na české straně Šumavy. Geografie–Sborník ČGS, 110, č. 3, ČGS, Praha, s. 176–187.
- JENÍK, J. (1959): Kurzgefasste Übersicht der Theorie der anemo-orographischen Systeme. Preslia 31, s. 337-357.
- JENÍK, J. (1961): Alpínská vegetace Krkonoš, Králického Sněžníku a Hrubého Jeseníku. Praha, 409 s.
- KETTLE, H., KOPÁČEK, J. a HEJZLAR, J. (2003): Modelling air temperature at Čertovo Lake back to 1781. Silva Gabreta, 9, s. 15-32.
- KOCUM, J. (2004): Limnologická studie Čertova jezera a režim odtoků v českém povodí Řezné. Diplomová práce, KFGG PřF UK, Praha, 210 s.
- KODYM, O. jun. (1961a): Geologická mapa ČSSR – Mapa předětvrtohorních útvarů 1 : 200 000 M-33-XXVI Strakonice. Ústřední ústav geologický, Praha 1963.
- KODYM, O., ml. a kol. (1961b): Vysvětlivky k přehledné geologické mapě ČSSR 1 : 200 000 M-33-XXVI Strakonice. Ústřední ústav geologický, Praha, 149 s.
- Plán péče o NPR Černé a Čertovo jezero. Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, 1997.
- KOPÁČEK, J., HEJZLAR, J., PORCAL, P. (2000b): Mass balance of major ions in the Čertovo watershed-lake ecosystem the 1998 hydrological year. Silva Gabreta, 4, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 117-133.
- KOPÁČEK, J., HEJZLAR, J., KAŇA, J., PORCAL, P. (2001): Faktory ovlivňující chemismus šumavských jezer. Aktuality šumavského výzkumu, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 63-66.
- KREJČÍ, J. (1857): Zpráva o lesních cestách na Šumavě, vykonaných od údů musejního sboru přírodnického. Živa, 5, s. 277-281.
- KUCHAR, K. (1947): Mapy šumavských jezer podle měření prof. V. Švambery. Kartografický přehled, II, č. 3-4, Praha, s. 41-42.
- KUNSKÝ, J. (1933): Zalednění Šumavy a šumavská jezera. Sborník ČSZ, 39, č. 1, ČSZ, Praha, s. 1-6, 33-40.
- KUNSKÝ, J. (1968): Fyzický zeměpis Československa. SPN, Praha, 537 s.
- LEAN, D. (1998): Attenuation of solar radiation in humic waters. In: Aquatic humic substances, Hessen D.O. & Tranvik L.J. (eds.). Ecological Studies 133, Springer, Berlin, s. 109-124.
- LELLÁK, J., KUBÍČEK, F. (1991): Hydrobiologie. Karolinum, Praha, 260 s.
- MAJER, V., KOPÁČEK, J., VESELY, J. (2001): Modelování budoucího vývoje chemismu Plešného jezera. Aktuality šumavského výzkumu, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 60-62.
- MANDAK, F. (1981): Šumavská jezera. Šumava, č. 15, s. 5-8.
- MUŽÍK, F. (2003): Geomorfologická analýza jihovýchodní části geomorfologického okrsku Královský hvozď (se zvláštním zřetelem na kryogenní reliéf). Diplomová práce, KFGG PřF UK, Praha, 187 s.
- PRIEHÄUSSER, G. (1931): Neue Beitrage zur Vergletscherung des Bohmerwaldes wahrend der Eiszeit. Firgenwald, Praha, č. 4, s. 37-40.
- QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Studia Geographica 16, Academia, Brno, 73 s.
- RATHSBURG, A. (1928): Die Gletscher des Böhmerwaldes zur Eiszeit. Berichte naturwiss. Gesellschaft, Chemnitz, č. 22, s. 65-161.
- RATHSBURG, A. (1930): Neue Beitrage zur Vergletscherung des Böhmerwaldes während der Eiszeit. Mitteil. Ver. Erdkunde, Dresden, 106 s.
- RATHSBURG, A. (1931): Vergletscherung des Böhmerwaldes. Firgenwald, Praha, č. 4, s. 167-169.
- REISSINGER, A. (1930): Der Schwarzer See im Böhmerwald. Monatschrift Inst. Ostbayer. Heimatsforschung, Passau.
- REISSINGER, A. (1931): Schlammuntersuchungen am Schwarzen See im Böhmerwalde, Naturwiss. Gesellsch. Bayreuth, Bayreuth.
- SHAW, E. M. (1994): Hydrology in practice. Chapman & Hall, London, 569 s.
- SOMMER (1841): Das Königreich Böhmen. Budweiser Kreis, IX, Prag, s. XXX, 258.
- STRÁNÍK, F. (2001): Geomorfologie oblasti Čertova jezera. Diplomová práce, katedra FGG PřF UK, Praha, 55 s.

- ŠOBR, M. (1999): Jezero Laka. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 89 s.
- ŠVAMBERA, V. (1912): Výzkum šumavských jezer. Sborník ČSZ, 18, Praha, s. 250-257.
- ŠVAMBERA, V. (1939): Jezera na české straně Šumavy. Sborník ČSZ, 45, Praha, s. 15-23.
- VEJNAR, Z. (1963): Svorová oblast série Královského hvozdu na Šumavě. Sborník ÚUG, 28, Praha, s. 107-142.
- VESELÝ, J. (1994): Investigation of the nature of the Šumava lakes: a review. Časopis Národního muzea, řada přírodovědná, 163, Praha, s. 103-120.
- VITÁSEK, F. (1924): Naše hory ve věku ledovém. Sborník ČSZ, 30, ČSZ, Praha, s. 86-89.
- VRÁNEK, T. (1999): Plešné jezero. Diplomová práce, PřF UK, Praha.
- VRBA, J., BITTL, T., NEDOMA, J., KOPÁČEK, J., NEDBALOVÁ, L., FOTT, J. (2000a): Jedinečný plankton acidifikovaných šumavských jezer jako důsledek působení hliníku a limitace fosforem. In: XII. limnologická konference, Sborník referátů, Česká limnol. společnost., Slov. limnol. společnost., Kouty nad Desnou, s. 47-51.
- VRBA, J., FOTT, J., KOPÁČEK, J., NEDBALOVÁ, L., NEDOMA, J. (2001): Dlouhodobý limnologický výzkum šumavských jezer a jejich současný stav. Aktuality šumavského výzkumu, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 56-57.
- VRBA, J., KOPÁČEK, J., FOTT, J. (2000b): Long-term limnological research of the Bohemian Forest lakes and their recent status. Silva Gabreta, 4, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 7-27.
- VRBA, J., KOPÁČEK, J., STRAŠKRABOVÁ, V., HEJZLAR, J., ŠIMEK, K. (1996): Limnological research of acidified lakes in Czech part of the Šumava mountains: trophic status and dominance of microbial food webs. Silva Gabreta, 1, Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 151-164.
- WAGNER, P. (1897): Die Seen des Böhmerwaldes. Leipzig, s. 52-55.
- Základní mapa ČR 1 : 10 000. List 21-44-03, 21-44-04, 21-44-05, 21-44-09, 21-44-10, 21-44-14. Český úřad zeměměřičský a katastrální, Praha 1996.
- Základní mapa ČR 1 : 50 000. List 21-44 Železná Ruda. Český úřad zeměměřičský a katastrální, Praha 1995.
- Základní vodohospodářská mapa ČSR 1 : 50 000. List 21-44 Železná Ruda. Český úřad geodetický a kartografický, Praha 1989.
- ZBOŘIL, A. (1994): Prášílské jezero. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 90 s.

Summary

LIMNOLOGICAL STUDY OF THE ČERTOVO LAKE

The Čertovo Lake (49° 09'57"; 13° 12'07"; fig. 1), the second largest glacial lake in Czechia, is situated in the northwestern part of the Bohemian Forest. Its basin was partly hollowed by glacier (cirque lake) and partly dammed-up by the dumped moraine. This lake is the vestige of regress of Würm aged glacier. The water from the Čertovo Lake runs out by Jezerní Brook to the Řežná River and further to the Danube and the Black Sea.

Various research activities have been consecutively concentrated on this locality. The only serious sources for the study of morphometry and hydrography of the lake have been so far publications by Švambara who was pursuing his research activities here already at the beginning of the 20th century. Within his research, he has made the so far most precise survey of the lake basin, and he was inciting his followers to reiterate the bathymetric measurements in order to determine the intensity of sedimentation. In 2003, the team of the GAČR grant project "Atlas of Lakes in Czechia" made the so far last detailed limnological research of the lake using modern equipment – laser total station, echosounder and modern multiparametric probe (Kocum 2004).

As on various maps we can find different data about the altitude of the lake water level, its accurate determination was one of the main aims of our research. The altitude of the Čertovo Lake water level (mean annual water level 31 cm) was determined as 1027.206 m a.s.l. One of the main outcomes of this limnological study is the bathymetric map made by means of MapInfo and Surfer software, and the bathymetric curve. When comparing the bathymetric map based on our measurements in September 2003 with the map made by Švambara, it is necessary to note that almost one hundred years ago, Švambara made a very precise and detailed depth plan that differs from the present map only minimally (Fig. 4). His preciseness can be also demonstrated by comparison of both bathymetric curves (see Janský, Šobr, Kocum, Česák in this issue). It clearly shows by

a 1.6 m lower value of the maximum depth measured in September 2003 (35.4 m) than the depth established by Svambera. However, the intensity of sedimentation cannot be quantified because of manipulations with the dam in the past. This problem can be solved just by future repetition of precise and exact mapping of the basin's depth conditions. The lake area is 10.740943 ha (water level 22 cm). The value stated by Svambera (1939) is of more than 0.4 ha lower. The slope of bottom reaches the highest value in comparison with other Bohemian Forest glacial lakes ($16^{\circ} 59'$). At present, the Čertovo Lake is, from the point of ground plan and depth conditions, the best measured lake of all. Besides the description of morphometry of the lake basin (Tab. 3), the morphometric characteristics for whole lake catchment were calculated (Tab. 1). Because of an incorrect presentation of tributaries on all source maps including the General Map of Czechia 1 : 10 000, it was necessary to determine the catchment boundary within the field survey (see Fig. 3). We had to take into account that only two of five permanent tributaries are represented on the source map and that their courses are moreover mismatched. In the spring period, much more springs are formed due to the process of snow melting. The main tributary (P2) brings about 60 % of the total inflow into the lake. The catchment of the Čertovo Lake has the lowest mean altitude from all five glacial lakes of the Bohemian Forest (1 144.0 m a.s.l.).

In order to do the comprehensive geographical research of the lake, the ever first systematic observations of temperature conditions and ice phenomena of the accumulated water, of water transparency and colour and of its physical and chemical characteristics have been made. The Čertovo Lake is a dimictic lake with the temperature regime typical for the lakes of the mild climatic zone with periods of summer direct stratification (summer stagnation), spring and autumn temperature homogeneity and winter inverse stratification (winter stagnation), when the metalimnion is found in a relatively small depth (Fig. 6). In terms of water transparency and colour, strong changes occur within the year according to seasons, while the highest transparency was reached in spring and summer. This corresponds with conclusions by Lean (1998) and Allard, Borén, Pettersson and Zhang (1994), who state that the solar radiation effectively reduces concentrations of dissolved aquatic humic matter in water. Together with temperature, the amount of dissolved oxygen, conductivity and pH value were determined in the vertical profile always above the area of maximum depth. For the low productive Čertovo Lake, an approximately orthograde distribution of dissolved oxygen with a very slow decrease to depth is characteristic. During the spring and autumn temperature homogeneity, generally a higher amount of dissolved oxygen occurs in the whole vertical profile in consequence of the mixing up process (Fig. 7). More notably lower amounts of dissolved oxygen are measured during the winter period (ice cover existence). Conductivity showed a slightly decreasing tendency towards depth during the whole monitored period of one year. It significantly increases in the deepest layer of water near the lake bed (Fig. 8). The pH values are generally higher in the outlet than in tributaries. The course of pH values to the depth is typical for acidified lakes, characterized by its certain decrease to 5–10 m depth and a slightly increasing tendency towards the bottom where the increase is very rapid (Fig. 9). Lower pH values of the lake water within the monitored period occurred in winter and spring months (4.4–4.5), higher ones respectively in the autumn and summer period (about 4.8). Acidification and chemism of the lake water is a long-term subject of research of the Hydrobiological Institute of the Czech Academy of Science. From this point of view, the Čertovo Lake still remains highly acidified even despite of the rapid decrease of sulphur atmospheric deposition in recent years.

Another important part of our research, i.e. the analysis of hydrological regime of the lake and rainfall-outflow processes in its catchment, has been carried out for the first time in the history of research activities in this locality. The mean annual amount of precipitation in 1998–2003 counted on basis of values measured on an experimental open area situated approximately in the mean altitude of the catchment reached 1430.6 mm. Because of the mountain character of the lake's catchment, a strong increase of lake water level occurs during the spring period due to intensive snow melting (Figs 10 and 12). With the relation to altitude, the culminating discharge occurs here later than on the lower reach of the Jezerní Brook. During the monitored period (August 1, 2003–July 31, 2004), the minimum discharges were detected in consequence of absence of significant rainfall and of a high degree of depletion of ground water reserves in the catchment during summer period 2003. The process of snow melting in spring months significantly interferes with the close correlation between precipitation and outflow (Figs 13 and 14). Intensive rainfall influences the outflow by increasing discharge after a relatively long time, which is in correlation with

a high accumulating and retention capacity of the lake basin and catchment. Besides these factors, the degree of previous saturation of the catchment essentially affects the outflow reaction to precipitation.

- Fig. 1 – View of the Čertovo Lake from the outlet to the lake wall (Photo J. Kocum).
- Fig. 2 – The reconstructed trend in mean annual air temperature at Čertovo Lake in the 1781–2001 period. Key: a – long-term mean annual air temperature (1781–2001); b – five-year running average of T_{CT-a} ; c – polynomial trend line. After: Kettle, Kopáček, Hejzlar (2003).
- Fig. 3 – System of tributaries to the Čertovo Lake (significance of each tributary is represented by different thickness of lines). Key: a – altitude point; b – main tributary; c – significant permanent tributaries, d – outflow; e – occasional tributaries; f – lake; g – limits of the catchment area.
- Fig. 4 – Bathymetric map of the Čertovo Lake, 1 : 2 000 by Kuchař (Kuchař 1947) according to the measurements by V. Švampera in August 1909 (interval of isobaths 1 m; left) and bathymetric map of the Čertovo jezero Lake according to the measurements in September 2003 (interval of isobaths 2 m; right, Kocum 2004). Depth degrees in metres.
- Fig. 5 – Development of water temperature of the main tributary (P2), surface layers of the lake water at the southeast bank of the lake, at the outflow from the lake and at the lower course of the Jezerní Brook between August 13, 2003 and July 30, 2004. Key: a – main tributary (P2), b – southeast bank, c – outflow, d – lower course. After own measurements.
- Fig. 6 – Water temperature of the Čertovo Lake in the vertical profile above the maximum depth in each season. Axis x – temperature ($^{\circ}\text{C}$), axis y – depth (m). After own measurements and HBÚ AV ČR.
- Fig. 7 – Amount of dissolved oxygen in the lake water in the vertical profile into the 10 m depth in each season. Axis x – content O_2 (mg/l). After own measurements and HBÚ AV ČR.
- Fig. 8 – Conductivity of the lake water in the vertical profile above the maximum depth in each season. Axis x – conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), axis y – depth (m). After own measurements and HBÚ AV ČR.
- Fig. 9 – pH values of the lake water in the vertical profile above the maximum depth in each season. Axis x – pH values, axis y – depth (m). After own measurements and HBÚ AV ČR.
- Fig. 10 – Fluctuation of the Čertovo Lake water level between August 1, 2003 and July 31, 2004. Axis y – water level (cm). Key: a – immediate water level, b – monthly water level, c – annual water level. After own measurements.
- Fig. 11 – Relationship between the outflow from the Čertovo Lake and its water level. Axis x – outflow (l/s), water level (cm).
- Fig. 12 – Mean daily and monthly discharges in comparison to the mean annual discharge from the Čertovo Lake between August 1, 2003 and July 31, 2004. Axis y – discharge (m^3/s). Key: a – mean daily discharge, b – monthly discharge, c – annual discharge (July 2003 – July 2004).
- Fig. 13 – Monthly precipitation amount on an open area (OA) and monthly discharges from the Čertovo Lake between August 1, 2003 and July 31, 2004. Axis y left – total precipitation (mm), axis y right – discharge (m^3/s). Key: a – total monthly precipitation, b – monthly discharge. After own measurements and HBÚ AV ČR.
- Fig. 14 – Monthly precipitation amount on an open area (OA) (a; in mm), monthly height of discharge (b; in mm) from the Čertovo Lake and their difference (c; in mm) between August 1, 2003 and July 31, 2004. After own measurements.

(Pracoviště autorů: katedra fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty UK, Albertov 6, 128 43 Praha 2; e-mail: kocum1@natur.cuni.cz, jansky@natur.cuni.cz.)

Do redakce došlo 29. 6. 2005