

TOMÁŠ HRDINKA, MIROSLAV ŠOBR

PROJEVY A PŘÍČINY MEROMIXIE JEZER PO TĚŽBĚ NEROSTNÝCH SUROVIN V ČESKU

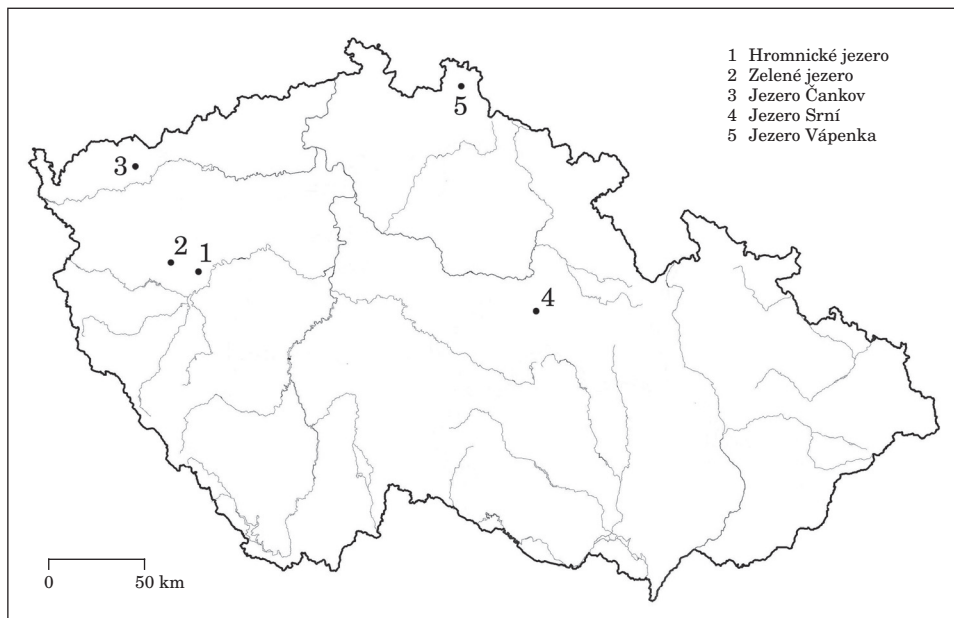
HRDINKA, T., ŠOBR, M. (2010): Manifestations and causes of meromixis in lakes resulting from mineral extraction in Czechia. *Geografie*, 115, No. 1, pp. 96–112. – Anthropogenic lakes (lakes that have developed in mined-out pits as a consequence of mineral raw material mining) exhibit many interesting phenomena. Specific water features are the most remarkable, including physical, chemical and the biological characteristics. Other very specific morphometric feature of anthropogenic lake basins include the unusual location of the lake's water surface: often several dozen meters below the adjacent terrain and the specific character of the mined-out raw materials. All of these factors affect the qualitative characteristics of lake's water, even decades after flooding. The interaction of the factors mentioned above has resulted in the creation of a permanent meromixis in some anthropogenic lakes. The author's primary objectives are to present some physical and chemical symptoms of meromixis at selected localities, to discuss the mutual interaction between the physical and chemical characteristics of lake water and to explore some probable causes of the origin of meromixis at the selected localities.

KEY WORDS: anthropogenic lakes – pit lakes – meromixis – water quality – water chemistry.

Príspevek byl vypracován s finanční podporou výzkumného záměru MŠM 0021620831 „Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“, grantu GA ČR 205/03/1264 „Atlas jezer České republiky – morfometrické, sedimentologické a limnologické poměry jednotlivých genetických typů jezer“ a grantu GA UK č. 182/2000 „Jezera ČR“.

1. Úvod

Antropogenní jezera jsou vodní plochy vyplňující deprese na zemském povrchu vzniklé po těžbě nerostných surovin, které nelze běžným způsobem vypustit (Janský, Šobr a kol. 2003). Tato jezera vykazují ve srovnání s jezery přírodního původu řadu zajímavých fenoménů (Janský 2005). Tím nejmarkantnějším jsou často velmi specifické vlastnosti vody z hlediska fyzikálních, chemických a potažmo biologických charakteristik, které souvisí s několika faktory, jež jsou antropogenním jezerům vlastní (Janský, Šobr 2004; Hrdinka 2005). Mezi tyto faktory, způsobující u některých jezer vznik tzv. meromixie, při které dochází k promíchávání vodního sloupce pouze do určité hloubky, patří zejména od přírodních jezer velmi odlišné morfometrické parametry jezerních pánví, charakteristické příkrými až kolmými svahy pánve, značnou maximální a střední volumetrickou hloubkou (morfologicky podmíněná meromixie). Poloha hladiny jezera je často několik desítek metrů pod úrovní přilehlého terénu, což má za následek omezení působení povětrnostních podmínek



Obr. 1 – Lokalizace studovaných meromiktických jezer

Zdroj: vlastní zpracování

(topograficky podmíněná meromixie). Specifický charakter dříve těžené horniny navíc ovlivňuje kvalitativní charakteristiky jezerní vody i desítky let po zaplavení a způsobuje například zvýšený obsah rozpuštěných solí v hypolimnionu (chemicky podmíněná meromixie; Kalff 2002).

U některých jezer došlo vzájemným spolupůsobením uvedených faktorů k vytvoření permanentní meromixie, prokázané řadou naměřených fyzikálních a chemických parametrů. Cílem autorů je prezentovat fyzikálně-chemické projevy takové meromixie na konkrétních příkladech antropogenních jezer, poukázat na vzájemnou provázanost jednotlivých fyzikálních a chemických charakteristik a zdůvodnit pravděpodobné příčiny vzniku této meromixie na jednotlivých lokalitách.

Na základě pětiletého limnologického průzkumu 25 jezer antropogenního původu vzniklých po těžbě různých nerostných surovin v odlišných přírodních podmínkách na území Česka bylo vybráno pět jezer, u nichž lze takovou morfologicky, topograficky či chemicky podmíněnou meromixii předpokládat. Jedná se o následující lokality – Hromnické jezero u Horní Břízy, Zelené jezero u Třemošné, jezero Čankov u Karlových Varů, jezero Srní u Hlinska a jezero Vápenka u Raspenavy (obr. 1). U každého z těchto jezer bude na základě předložených výsledků určena míra meromixie a naznačeny příčiny jejího vzniku. Výsledky budou následně porovnány se studiemi vybraných meromiktických jezer světa.

2. Morfometrické charakteristiky studovaných jezer

2.1. Hromnické jezero

Hromnické jezero (obr. 2, tab. 1) ležící v katastru obce Hromnice 12 km SSV od Plzně vzniklo před 110 lety samovolným zatopením těžební jámy po těžbě kamenečných břidlic (břidlice proterozoického stáří s vysokým podílem síranů železa a mědi). Jezero je situováno na dně asi 60 m hluboké jámy o vnějších rozměrech 260×150 m. Samotná jezerní pánve je tvořena silně ukloněnými, pravidelně se svažujícími svahy tvořenými nezpevněnou břidličnou sutí s maximální hloubkou jezera ve střední části pánve.

Tab. 1 – Morfometrické charakteristiky Hromnického jezera (Boháčková 2005)

Charakteristika	Hodnota
Nadmořská výška (m)	380
Plocha jezera (m ²)	9 740
Objem jezera (m ³)	60 980
Maximální hloubka (m)	14,0
Střední volumetrická hloubka (m)	6,3

2.2. Zelené jezero

Zelené jezero (obr. 3, tab. 2) se nachází v katastru obce Líté 19 km SSZ od Plzně. Vzniklo před 120 lety podobně jako Hromnické jezero samovolným zatopením těžební jámy po těžbě kamenečných břidlic. Jezero je situováno na dně přibližně 25 m hlubokém lomu o vnějších rozměrech 140×120 m. Svahy jsou na rozdíl od Hromnického jezera kromě výchozů již značně odtěžených břidlic tvořeny též kaolinicky zvětřalým žulovým podložím. Významný je hustý lesní porost, který dosahuje až k hladině jezera.

Tab. 2 – Morfometrické charakteristiky Zeleného jezera (Boháčková 2005)

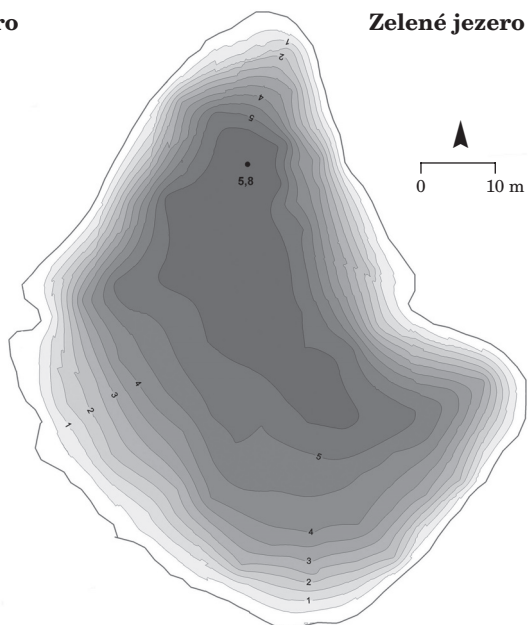
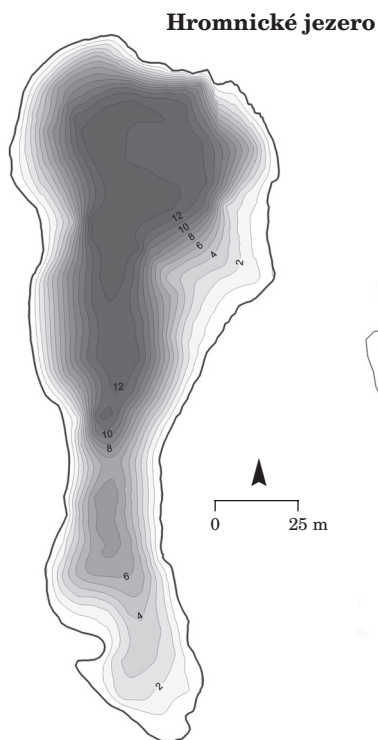
Charakteristika	Hodnota
Nadmořská výška (m)	490
Plocha jezera (m ²)	3 450
Objem jezera (m ³)	11 480
Maximální hloubka (m)	5,9
Střední volumetrická hloubka (m)	3,3

2.3. Jezero Čankov

Jezero Čankov (obr. 4, tab. 3) se nachází v katastru obce Otovice 3 km SSZ od Karlových Varů. Vzniklo před 60 lety samovolným zatopením povrchového kaolinového dolu o vnějších rozměrech 430×190 m, přičemž nadmořská výška hladiny jezera leží 5–10 m pod úrovní okolního terénu. Pozvolně se svažující symetrické svahy jezerní pánve jsou tvořeny nezpevněným kaolinem a částečně též jílem, které jsou vodní abrazí rozrušovány a suspendovány do jezerní vody.

Tab. 3 – Morfometrické charakteristiky jezera Čankov (Hrdinka 2005)

Charakteristika	Hodnota
Nadmořská výška (m)	405
Plocha jezera (m ²)	44 780
Objem jezera (m ³)	361 500
Maximální hloubka (m)	19,2
Střední volumetrická hloubka (m)	8,1



Obr. 2 – Batymetrická mapa Hromnického jezera (Boháčková 2005)

Obr. 3 – Batymetrická mapa Zeleného jezera (Boháčková 2005)

Obr. 4 – Batymetrická mapa jezera Čankov (Hrdinka 2005)

2.4. Jezero Srní

Jezero Srní (obr. 5, tab. 4) ležící na hranici katastrů obcí Srní u Hlinska a Hlinsko v Čechách situované 3 km SZ od Hlinska vzniklo před 40 lety samovolným zatopením jámového lomu po těžbě granitů. Jezero se nachází ve spodní etáži otevřeného jámového lomu s vnějšími rozměry 220 × 150 m přibližně 10–20 m pod úrovní okolního terénu. Jezerní pánev, vyznačující se značnou maximální a střední volumetrickou hloubkou, je tvořena převážně kolmými stěnami tvořenými masivní horninou.

Tab. 4 – Morfometrické charakteristiky jezera Srní (Hrdinka 2005)

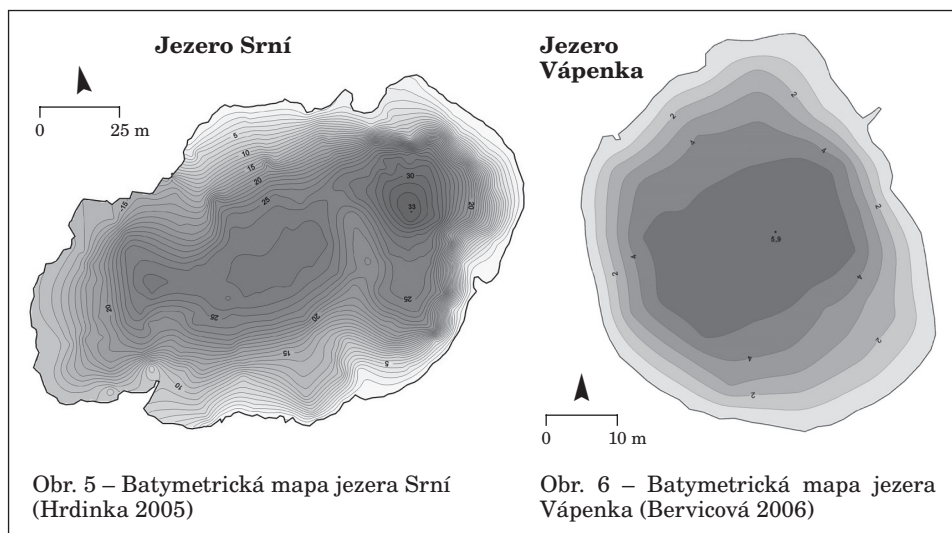
Charakteristika	Hodnota
Nadmořská výška (m)	630
Plocha jezera (m ²)	11 510
Objem jezera (m ³)	189 500
Maximální hloubka (m)	33,0
Střední volumetrická hloubka (m)	16,5

2.5. Jezero Vápenka

Jezero Vápenka (obr. 6, tab. 5) se nachází v katastru obce Raspenava 5 km JV od Frýdlantu. Vzniklo před 40 lety samovolným zatopením spodní etáže jámového lomu po těžbě krystalických vápenců. Hladina jezera se nachází asi 20 m pod úrovní okolního terénu na dně lomu s vnějšími rozměry 100 × 80 m. Jezerní pánev je charakteristická silně ukloněnými svahy tvořenými masivní horninou a relativně plochým dnem. Zde je významné zalesnění celého bývalého lomu.

Tab. 5 – Morfometrické charakteristiky jezera Vápenka (Bervicová 2006)

Charakteristika	Hodnota
Nadmořská výška (m)	350
Plocha jezera (m ²)	1 990
Objem jezera (m ³)	6 400
Maximální hloubka (m)	5,8
Střední volumetrická hloubka (m)	3,2



3. Použité metody

Na všech sledovaných lokalitách byla prováděna měření a odběry vzorků ve čtyřech ročních obdobích roku 2005. Snahou bylo zachytit vybraná jezera v typických ročních obdobích. Zimní měření probíhala ve vrcholné zimě (leden nebo únor), kdy byla jezera pokryta dostatečně silnou vrstvou ledu. Při měření v jarních obdobích byla snaha zachytit jezero v době homotermie, tedy nedlouho po roztátí ledové pokrývky (zpravidla duben). Letní sledování bylo prováděno v červenci nebo srpnu, termín podzimních měření byl volen podle změn počasí tak, aby byla zachycena podzimní homotermie zpravidla na přelomu října a listopadu (Šobr 2007).

Morfometrické charakteristiky jezer byly zjištěny pomocí metodiky Česák, Šobr (2005). Z fyzikálních parametrů byla na každé jezerní lokalitě sledována průhlednost vody pomocí Secchiho desky. Určování barvy vody bylo prováděno na základě srovnání barvy Forel-Uleovy stupnice s barvou vody proti Secchiho kotouči bílé barvy, ponořeného do poloviční hloubky průhlednosti vody. Určování dalších fyzikálních parametrů jako jsou vertikální profily teploty, konduktivity, množství rozpuštěného kyslíku a pH bylo prováděno pomocí multiparametrické sondy YSI 6920 s data-loggerem YSI 650 MDS (kapesní mikropočítač, který umožňuje kontinuální zobrazování více parametrů na displeji, uložení dat, přenos dat do PC a kalibraci sondy). Teplotní čidlo sondy YSI 6920 nepotřebuje žádnou kalibraci. Teplota je udávána ve °C, rozsah měření je -5 až 45 °C, přesnost měření $\pm 0,2$ °C. Čidlo konduktivity je sdružené s teplotním čidlem a je rovněž bezúdržbové. Rozsah měření konduktivity je 0 až 100 mS.cm⁻¹ s přesností $\pm 0,5$ % z hodnoty. Jelikož je konduktivita závislá na teplotě vody, jsou její hodnoty přepočítávány na tzv. specifickou konduktivitu, což je konduktivita přepočtená na teplotu vody 25 °C. Specifická konduktivita (25 °C) je vypočítána dle vzorce:

$$\frac{\text{konduktivita}}{1 + TC \times (T - 25)}$$

přičemž T je teplota vody, TC je teplotní koeficient 1,91 % / °C ($TC = 0,0191$). V přístroji je instalováno tlakové čidlo, které po příslušné tlakové kalibraci udává hloubku, ve které se sonda nachází. Kyslíkové čidlo má rozsah měření 0 až 50 mg.l⁻¹ (přesnost je $\pm 0,2$ mg.l⁻¹, resp. 6 mg.l⁻¹ při hodnotách nad 20 mg.l⁻¹), lze měřit i % nasycení v rozsahu 0 až 500 % s přesností ± 2 % resp. ± 6 % při nasycení nad 200 %. Kalibrace kyslíkového čidla byla prováděna vždy před každým měřením podle postupu daného výrobcem v kalibrační nádobce, kde se vytvoří 100% nasycení kyslíkem. Pro kalibraci je zapotřebí zadat tlak vzduchu, který byl měřen pomocí kapesního barometrického výškoměru Suunto Escape 203. Čidlo pro měření pH vody měří v rozsahu 0 až 14 s přesností $\pm 0,2$. Rovněž je zapotřebí provést kalibraci pH čidla, ta byla provedena vždy před začátkem série např. jarních odběrů pomocí tříbodové kalibrace s roztoky o známém pH (pH 4, 7, 10). Sonda umožňuje měření i oxidačně redukčního potenciálu v rozsahu -999 až 999 mV s přesností ± 20 mV (YSI incorporated 2002).

Odběry vody pro chemické analýzy byly prováděny současně s určováním fyzikálních vlastností. Vzorky vody pro chemický rozbor byly odebírány z povrchové vrstvy vody (cca 0,3 m pod hladinou) a pomocí van Dornova odběrného válce i z hloubky 1 m nade dnem. Voda byla do laboratoře transportová-

na v 0,5 l lahvích vymytých deionizovanou vodou. Odebrané vzorky vody byly analyzovány v laboratoři Přírodovědecké fakulty UK Velký Pálenec u Blatné pod vedením doc. E. Stuchlíka.

4. Výsledky

4.1. Fyzikální vlastnosti vody meromiktických jezer

Meromiktická jezera se vyznačují specifickým průběhem fyzikálních vlastností vody ve vodním sloupci, jak je patrné z výsledků terénních měření shrnutých v grafech na obrázku 7. Z hlediska teplotní stratifikace se v letním období hlubokých holomiktických jezer střední Evropy vytvářejí tři základní vrstvy, svrchní epilimnion, přechodný metalimnion (oddělený od povrchové vrstvy tzv. termoklinou) a spodní hypolimnion (Wetzel 2001). U meromiktických jezer se v rámci hypolimnionu vytváří další skočná vrstva chemoklina oddělující vrstvu každoročně promíchávaného svrchního mixolimnionu od vrstvy stabilního monimolimnionu, která se nepodílí na promíchávání vody v jezeře (Kalff 2002). Přítomnost této vrstvy, charakteristické mírným nárůstem teploty a podstatným nárůstem elektrolytické vodivosti s hloubkou, dokládají průběhy křivek v obrázku 7 (grafy A–D). Zcela průkazně je tento jev vyvinut u hlubokých jezer na lokalitách Hromnice, Čankov a Srní, kde se teplota a vodivost v chemoklině a monimolimnionu v průběhu roku nemění a horní hranice stabilního monimolimnionu se zde nachází v hloubkách 8 metrů, resp. 8 metrů a 24 metrů. Nárůst teploty souvisí s přítomností stabilní vrstvy vody o teplotě shodné s teplotou podzemní vody na dané lokalitě, která má vyšší hodnotu (8 až 10 °C; Pitter 2009) než spodní okraj mixolimnionu procházející pravidelnou sezónní výměnou (cirkulací) vody při teplotách 4–8 °C.

Zvýšené hodnoty konduktivity indikují zvýšené množství rozpuštěných minerálních látek, které se v monimolimnionu hromadí, zvyšují hustotu vody a umožňují tak jeho permanenci. U relativně mělkého Zeleného jezera je průkazný nárůst hodnot vodivosti a teploty v podzimním měření v hloubce 4,3 metru. Absolutní hodnoty teploty této vrstvy se však ve srovnání s letním měřením odlišují, z důvodu absence měření nebylo rovněž možné porovnat letní a podzimní křivku vodivosti. Méně průkazný je tento jev také na lokalitě Vápenka, kde je u podzimního měření znatelný nárůst teploty a vodivosti od hloubky 3,5 m. Zatímco spodní části křivek vykazují v absolutních hodnotách letního a podzimního měření zřetelnou shodu (a ukazovaly by tak na relativně stabilní monimolimnion), srovnání celkového průběhu vodivosti a teploty v rámci letního a podzimního měření však vykazuje značné odlišnosti (nestabilita předpokládané chemokliny).

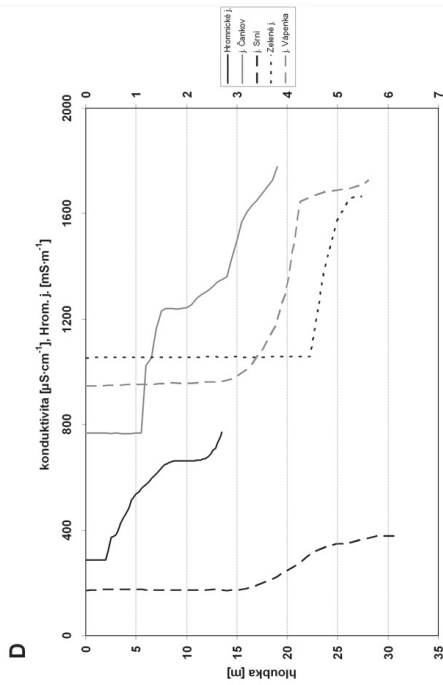
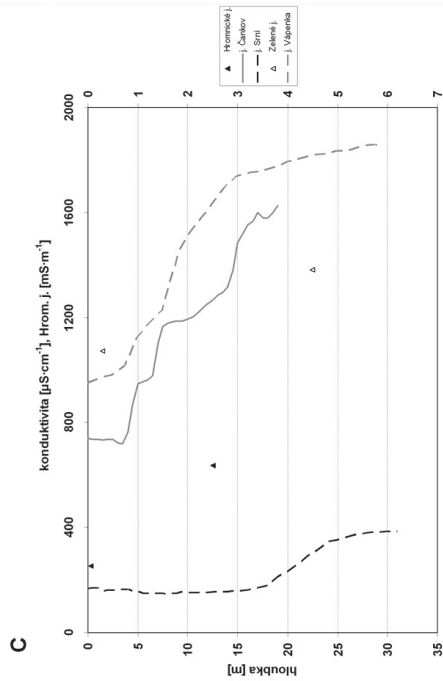
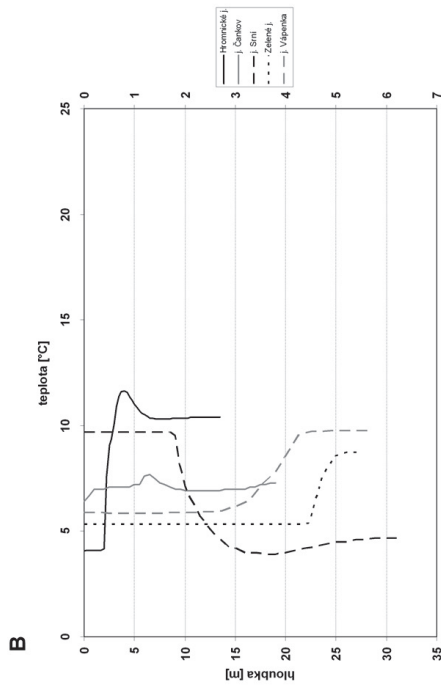
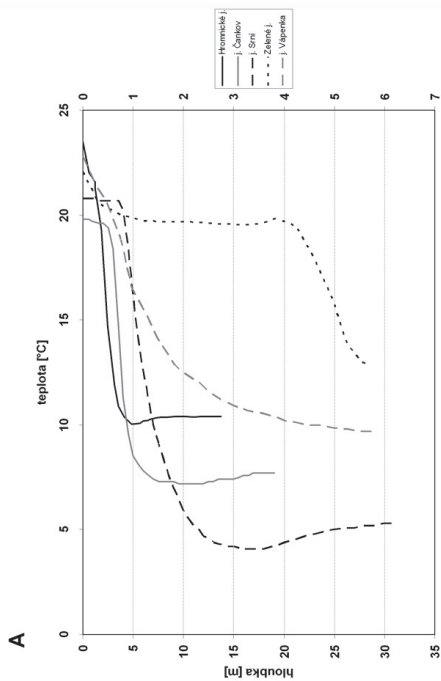
Jelikož v rámci stabilního monimolimnionu nedochází k jarnímu a podzimnímu promíchávání vody a tedy možné distribuci rozpuštěného kyslíku do větších hloubek pánve, bývá monimolimnion meromiktických jezer často v permanentním stavu anoxie s prudkým poklesem množství rozpuštěného kyslíku v chemoklině (Wetzel 2001). Tento jev je dobře patrný z obrázku 7 (grafy E, F) na lokalitě Hromnického (v 6 metrech) a Zeleného jezera (v hloubce 4,3 m).

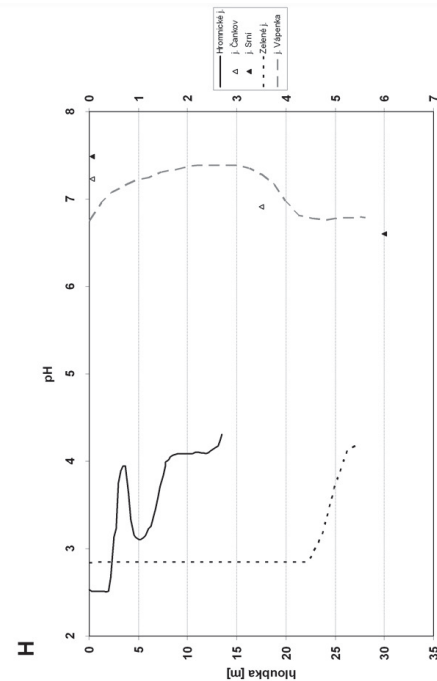
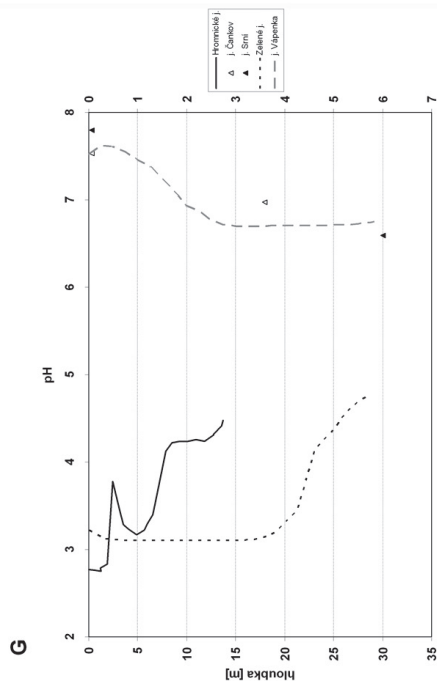
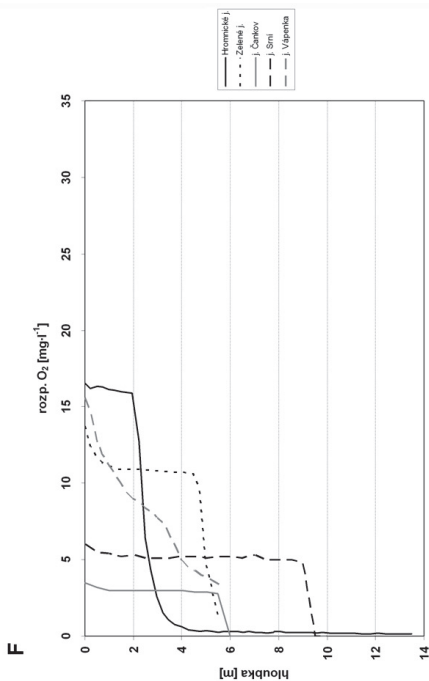
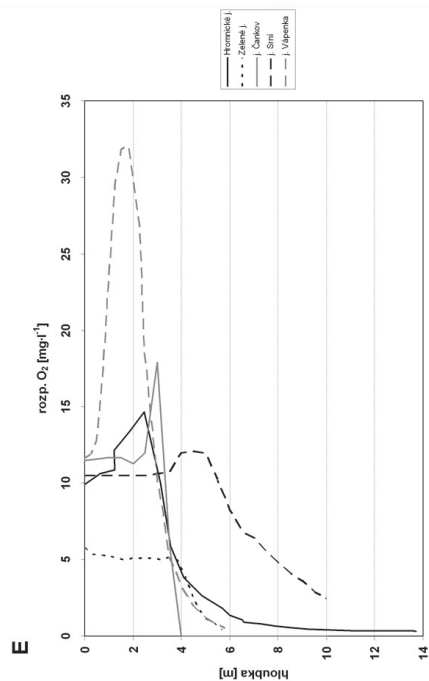
U jezera Srní dochází k markantnímu úbytku kyslíku již na přechodu epilimnionu a metalimnionu, kde je patrně spotřebováván k biochemické oxidaci odumřelé organické hmoty (Lellák, Kubíček 1999). Na lokalitě bylo měření stanoveno pouze do hloubky 10 m, obě křivky (podzimní zcela průkazně) však dokládají téměř anoxické podmínky již na spodní hranici metalimnionu, tj. nad chemoklinou, stejně je tomu na lokalitě Čankov. U jezera Vápenka nebyla vrstva stabilního anoxického monimolimnionu jednoznačně potvrzena, v podzimním termínu byla koncentrace rozpuštěného kyslíku u dna 3,3 mg.l⁻¹. Až na lokalitu Zeleného jezera byla na všech lokalitách při letním měření zaznamenána pozitivně heterográdní křivka rozpuštěného kyslíku s výrazným metalimnetickým maximem (na lokalitě Vápenka až 32 mg.l⁻¹) způsobeným fotosyntetickou produkcí autotrofních organismů. Hromnické jezero se od ostatních odlišuje extrémně vysokými hodnotami konduktivity až 7 725 μ S.cm⁻¹, způsobené velkým množstvím rozpuštěných minerálních látek (zejména síranů, obr. 8, graf G), které výrazně zvyšují hustotu vody v monimolimnionu.

Specifický průběh křivek hloubkového profilu pH vody Hromnického a Zeleného jezera na obrázku 7 (graf G) souvisí s extrémním chemismem obou jezer, vzniklých po těžbě pyritických břidlic. Extrémně nízké hodnoty pH jsou způsobeny slabým roztokem minerálních kyselin (volné ionty H⁺), především kyseliny sírové, vzniklé oxidací minerálu pyritu přítomného v pyritických břidlicích. Silně kyselé prostředí charakterizují i záporné hodnoty alkality, které indikují podmínky s pH < 4,5 bez možnosti uplatnění pufracího systému iontů HCO₃⁻ (Pitter 2009). Hodnota pH je nejnižší v oxických podmínkách ve svrchní části vodního sloupce (nejvíce iontů H⁺), výkyv pH do vyšších hodnot u Hromnického jezera v hloubce 2,5 m byl způsoben intenzivní fotosyntézou spojenou se zvýšenou produkcí kyslíku (Lellák, Kubíček 1992). U ostatních jezer se naopak pH s hloubkou snižuje. Pokles je způsoben zvýšeným množstvím ve vodě rozpuštěného CO₂ ve větších hloubkách, naopak při hladině dochází k jeho úniku do atmosféry a tím k posunutí uhlíčitanové rovnováhy do mírně alkalického prostředí (Pitter 2009). Tento jev je v částečně oxických podmínkách na dolní hranici mixolimnionu rovněž podpořen produkcí CO₂ při bakteriálním rozkladu organické hmoty (Lellák, Kubíček 1992). Absolutní hodnoty pH jsou na všech lokalitách vyšší v letním termínu v důsledku spotřeby CO₂ v procesu fotosyntézy.

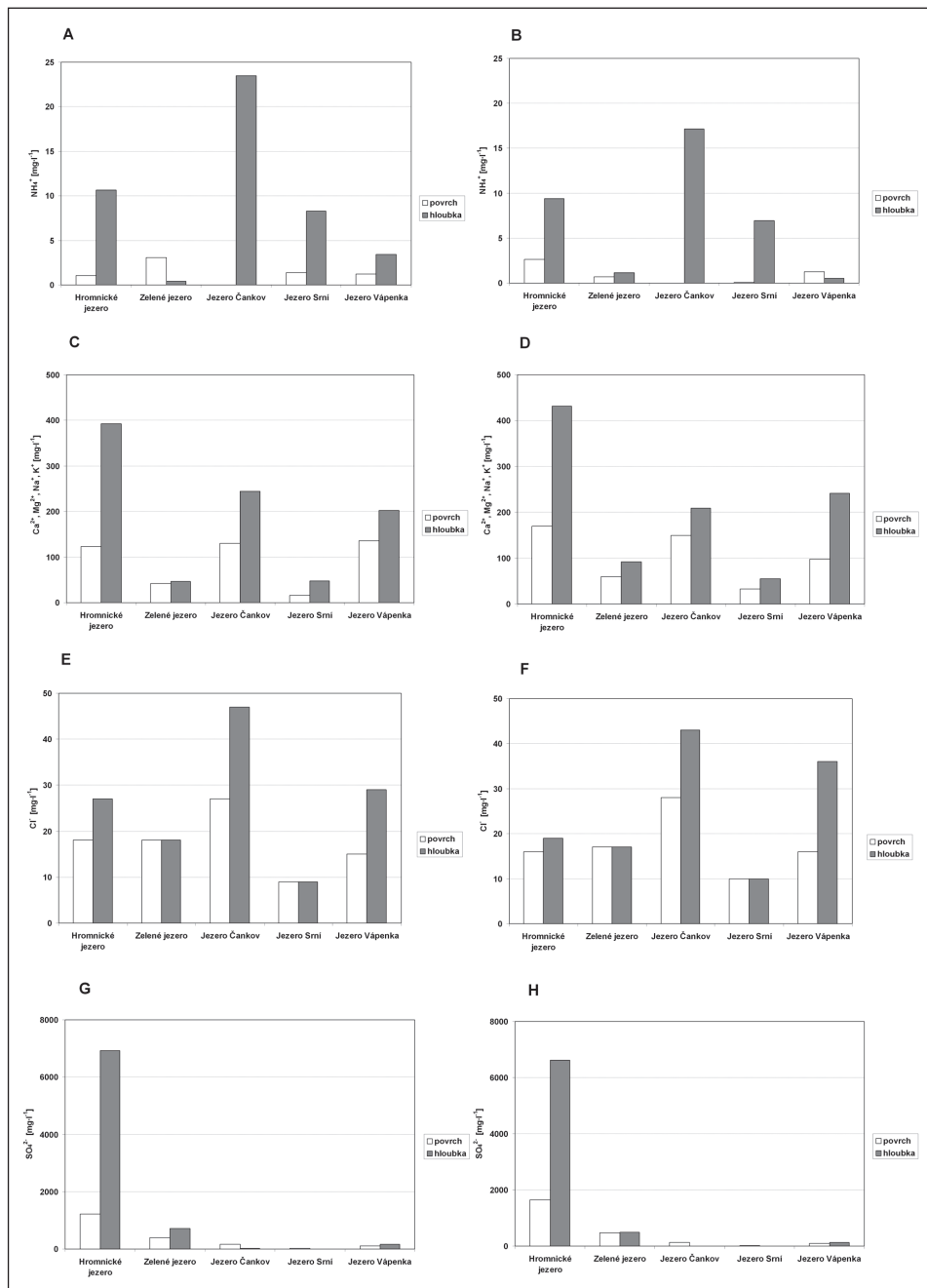
4.2. Chemické vlastnosti jezerní vody

Fyzikální vlastnosti vody jsou úzce spjaté s chemickým složením. U mero-miktických jezer je tato vazba zvláště markantní a názorně ji vystihuje obrázek 8. Ve stabilním monimolimnionu dochází ke koncentraci rozpuštěných minerálních látek, vzniklých rozkladem odumřelých organismů v mixolimnionu a zejména rozpouštěním minerálů z dříve těžených nerostných surovin. Koncentrace těchto rozpuštěných minerálních látek ve formě iontů je přímo úměrná naměřené konduktivitě. Forma, v jaké se budou rozpuštěné ionty nacházet, závisí rovněž na hodnotě pH a velikosti oxidačně-redukčního potenciálu (ORP). Stabilní anoxický monimolimnion může být v hodnotách pH velmi variabilní, bývá však charakteristický nízkými až zápornými hodnotami ORP (-200 až 200 mV) (Pitter 2009), které také byly na lokalitách pozorovány.





Obr. 7 – Fyzikální charakteristiky jezerní vody naměřené na vybraných lokalitách v období letní stratifikace (levý sloupec) a podzimní cirkulace (pravý sloupec). Hodnoty hloubek Zeleného jezera a jezera Vápenka u grafů A–D a G, H jsou na vedlejší ose. A, B – teplotní stratifikace, C, D – hloubkové profily konduktivity, E, F – hloubkové profily rozpustného kyslíku, G, H – hloubkové profily rozpustného pH. Zdroj: vlastní analýza.



Obr. 8 – Chemické charakteristiky jezerní vody naměřené na vybraných lokalitách v období letní stratifikace (levý sloupec) a podzimní cirkulace (pravý sloupec). A, B – koncentrace amonných iontů, C, D – koncentrace iontů alkalických kovů a kovů alkalických zemin, E, F – koncentrace chloridových iontů, G, H – koncentrace síranových iontů. Zdroj: vlastní analýza.

Přítomnost téměř anoxického prostředí v monimolimnionu vybraných lokalit je prokázána vysokými hodnotami amonných iontů ve srovnání s povrchovým odběrem dobře prokysličené vody mixolimnionu, jak je patrné z obrázku 7 (grafy A, B). V takovém prostředí téměř neprobíhá nitrifikace amonných iontů na ionty dusičnanové, u Hromnického a Zeleného jezera je navíc inhibována extrémně nízkým pH (Pitter 2009). Zvýšené hodnoty NH_4^+ iontů v letním povrchovém odběru na lokalitě Zeleného jezera, indukující čerstvé organické/fekální znečištění (Pitter 2009), byly nejspíše způsobeny povrchovým smyvem po intenzivní srážce den před samotným odběrem (jezero se nachází v oboře s chovem lesní zvěře). Výskyt dusičnanových iontů nebyl v hlubinných vzorcích v obou časových horizontech prokázán až na podzimní měření z lokality Zelené jezero, kde se vyskytly v oxickém prostředí (koncentrace rozpuštěného kyslíku $10,6 \text{ mg.l}^{-1}$) v koncentraci $11,7 \text{ mg.l}^{-1}$.

Zvýšená mineralizace monimolimnionu je doložena výsledky rozborů vody shrnutých v obrázku 8 (grafy C–H), z nichž jednoznačně vystupuje extrémně mineralizované Hromnické jezero. Maximální koncentrace rozpuštěných síranových iontů v hlubinném vzorku $6\,915 \text{ mg.l}^{-1}$ je způsobena oxidací pyritu proterozoických pyritických břidlic promívaných srážkovou vodou. Síranové ionty se v hlubinných vzorcích vyskytují i přesto, že zde panují anoxické podmínky, neboť jsou redukovány až jako jedny z posledních (na rozdíl od dusičnanů; Pitter 2009). Zvýšená mineralizace, která je typickým znakem pro většinu jezer vzniklých po těžbě nerostných surovin, byla zjištěna i na ostatních lokalitách kromě jezera Srní. Zelené jezero vykazuje podobně jako Hromnické jezero zvýšený obsah síranových iontů, avšak mnohem menší obsah iontů alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Vzhledem k tomu, že se v březní linii Zeleného jezera nacházejí výchozy zkaolizovaných permokarbonských arkóz, je tento výsledek překvapující a k jeho vysvětlení bude nutná podrobnější chemická analýza. Potvrdil se však předpokládaný vliv zkaolinizovaných žul karlovarského masívu (podle Pittera 2009 dochází k uvolnění Na^+ iontů) na množství rozpuštěných alkalických minerálů na lokalitě Čankov, viz obr. 8 (graf E). Jezero Vápenka vykazovalo v návaznosti na bývalou těžbu prvohorních krystalických vápenců zvýšené množství ve vodě rozpuštěných iontů kovů alkalických zemin, tedy vápníku a hořčíku. Nejmenší mineralizace a elektrolytická konduktivita byla zjištěna na lokalitě Srní, vzniklé po těžbě minerálně chudých kyselých biotitických granitů železnohorského plutonu. Jako nejméně variabilní se ve srovnání všech lokalit jeví koncentrace konzervativních chloridových iontů, vykazující mírně zvýšené hodnoty u všech hlubinných odběrů.

4.3. Příčiny meromixie jezer

Stav úplné nebo částečné meromixie nastává u jezer nebo jiných antropogenních vodních ploch z několika důvodů. Příčinou může být např. malá plocha hladiny jezera ve srovnání s maximální i průměrnou hloubkou jezera (morfologicky podmíněná meromixie), vodní plocha jezera může být vlivem okolního terénu také velmi dobře chráněna před účinky větru (topograficky podmíněná meromixie; Schimaraev et al. 1994). Za nejčastější důvod vzniku permanentní meromixie se považuje zamezení promíchávání vody způsobené zvýšeným obsahem rozpuštěných minerálních látek v hypolimnionu (chemic-

ky podmíněná meromixie) (Šobr 2007). Pokud zhodnotíme jednotlivé faktory, podílející se na vzniku meromixie výše zmíněných pěti antropogenních jezer, je zřejmé, že k podmínění vzniku meromixie došlo většinou kombinací výše uvedených příčin.

V případě extrémního chemismu hornin, těžených na lokalitách Hromnického a Zeleného jezera, se jedná o zcela prokazatelně chemicky podmíněnou meromixii s hromaděním rozpuštěných minerálních látek (zejména síranových iontů) ve spodní části hypolimnionu. U Hromnického jezera dosahuje monimolimnion mnohem větší mocnosti (zasahuje do poloviny celého vodního sloupce jezera) než u Zeleného jezera (max. 20 % z mocnosti vodního sloupce), k čemuž u Hromnického jezera výrazně přispívá faktor topografie, protože poloha vodní hladiny je 60 m pod úrovní okolního terénu a větší relativní hloubka jezera (12,6 m vs. 8,9 %). U jezera Čankov se jedná také o chemicky podmíněnou meromixii, vzniklou hromaděním minerálních látek rozpouštěním kaolinitu (též přítomen ve vodě ve formě jemné suspenze, která zvyšuje hustotu vody) a odumřelého organického materiálu (břehy s hustou vegetací, opad listů do jezera). Účinky větru se na hladině vlivem polohy jezera projevují velmi zřetelně, nedochází však k dostatečnému promíchávání vody do hlubších horizontů i vzhledem ke značné maximální hloubce jezera (monimolimnion na lokalitě Čankov tvoří 35 % mocnosti vodního sloupce). Jezero Srní je charakteristické velmi stabilním monimolimnionem a to i při jeho relativně nízké mineralizaci. U tohoto jezera s morfoloicky podmíněnou meromixií se nejvíce uplatňuje faktor velké relativní hloubky jezera (27,3 %) v kombinaci s charakterem dna jezerní pánve (kolmé stěny, relativně ploché dno) při mocnosti monimolimnionu zasahující 30 % vodního sloupce. Na lokalitě jezera Vápenka byly zjištěny znaky chemicky podmíněné meromixie, způsobené hromaděním rozpuštěných Ca^{2+} a Mg^{2+} iontů při dně jezera a také množství odumřelé organické hmoty související s vyšší trofíí jezera (viz přítomnost fytoplanktonu vyplývající z křivky nasycení kyslíkem v letním odběru). Mocnost monimolimnionu na lokalitě Vápenka je v průběhu roku nejméně stabilní, což dokládá např. kolísání elektrolytické vodivosti, přičemž z podzemního měření lze usoudit na jeho mocnost zasahující max. 25 % výšky vodního sloupce.

5. Diskuze

Území Česka je na jezera přírodního původu relativně chudé a jejich dlouhodobý výzkum prokázal, že se v naprosté většině jedná o jezera holomiktická. Z literatury vyplývá (Hakala 2004), že meromiktická jezera jsou v porovnání s jezery holomiktickými poměrně vzácná a tento fakt byl potvrzen i v rámci výzkumu jezer Česka. Bylo identifikováno pouze 5 meromiktických jezer (všechna antropogenní) z celkového počtu 45 jezer podrobených výzkumu (z toho 25 jezer bylo antropogenních). Výsledky měření a rozborů vody umožňují vzájemné srovnání s obdobnými jezery ve světě, a to jak antropogenního, tak přírodního původu. Studiemi hlubokých jezer s převážně morfoloicky podmíněnou meromixií nebo jezer s pánvemi tvořenými horninami s extrémním chemismem se zabývala řada autorů, např. Aeschbach-Hertig et al. (1999), Boehrer a Schultze (2006), Eggleton (1956), España (2008), Flite (2006), Hakala (2004), Roman-Ross et al. (2005), Stevens a Lawrence (1998), Wanchun et al. (2001)

a další. Výsledky jejich analýz se v základních charakteristikách vlastností vody meromiktických jezer (potažmo monimolimnionu) shodují s trendy zjištěnými na českých lokalitách (u třech zcela, u zbylých částečně) a liší se pouze v absolutních hodnotách. Za hlavní rysy monimolimnionu uvádějí zvýšené koncentrace rozpuštěných minerálních látek (iontů) ve srovnání se svrchními horizonty vody jezer, anoxické prostředí nebo velmi omezené kyslíkové poměry, mírně zvýšenou teplotu monimolimnionu ve srovnání se spodní vrstvou mixolimnionu a přítomnost specifických produktů mikrobiální aktivity (výskyt sulfanu nebo metanu jako produktů rozkladu sedimentované odumřelé organické hmoty v bezkyslíkatém prostředí). Jednotlivé studie prokázaly jako hlavní příčiny meromixie vliv specifických morfometrických poměrů jezerní pánve, vliv specifického geologického podloží, omezení vlivu proudění vzduchu (účinků větru) při hladině jezera, míru trofie jezera související s charakterem jeho okolí a množství a kvalitu povrchové vody přitékající do jezera. Největší vliv na vznik meromixie má zcela jednoznačně geologické podloží, ostatní příčiny pak tento vliv zesilují (např. poloha hladiny Hromnického jezera). Výsledky studií českých lokalit vykazují kombinaci několika faktorů, přičemž pouze na lokalitě Srní převládá faktor specifické morfometrie. Vliv výraznějšího povrchového přítoku (Boehrer, Schultze 2006) se u lokalit podrobených výzkumu neprojevil.

Z hlediska teploty vody byl v rámci českých lokalit pozorován vzestup v rámci chemokliny o 0,3–0,8 °C s maximem změřeným u nehlubšího jezera Srní (33 m), což odpovídá trendům změřeným na lokalitách jezer Lac Pavin (1 °C; Aeschbach-Hertig et al. 1999), Fayetteville Green Lake (3 °C; Eggleton 1956), Brenda Mines pit-lake (1 °C; Stevens a Lawrence 1998) a San Telmo pit-lake (1,5 °C; España 2008), které dosahují max. hloubek 60–140 m a vliv teploty podzemní vody na teplotu vody v monimolimnionu je u nich markantnější. U mělkého Zeleného jezera a jezera Vápenka nebyl tento jev přesvědčivě prokázán.

Charakteristický vzestup konduktivity v rámci chemokliny, přímo úměrný množství rozpuštěných minerálních látek, se u jednotlivých lokalit pohyboval v relativních hodnotách (zvýšení konduktivity mezi horní a spodní hranicí chemokliny) 65–125 %. Narozdíl od absolutních hodnot vodivosti, která s druhem geologického podloží úzce souvisela, nebyla prokázána závislost mezi mírou zvýšení konduktivity a druhem, resp. rozpustností horniny. Minerálně chudé prostředí jezera Srní vykazovalo po Hromnickém jezeru druhý nejvyšší relativní vzestup konduktivity v rámci chemokliny (o 115 %) a vykazuje tak značnou míru stability monimolimnionu. Naměřené hodnoty se pohybují v rozmezí hodnot získaných z výše uvedených příkladů meromiktických jezer světa (25–500 %). Z hlediska množství rozpuštěných minerálních látek byly na jednotlivých lokalitách vždy zjištěny vyšší koncentrace u hlubinných vzorků (v průměru 0–200% zvýšení), výjimkou byla značně zvýšená koncentrace amonných iontů u dna jezer Čankov, Srní a Hromnického jezera s hodnotami 8–23 mg.l⁻¹, dokládající značné organické znečištění a anoxické podmínky (Pitter 2009). Extrémně vysoké hodnoty koncentrace síranových iontů v Hromnickém jezeru, související s oxidací pyritu, se shodují s koncentracemi naměřenými na obdobné lokalitě jezera San Telmo (4 700 mg.l⁻¹; España 2008).

Kyslíkové poměry ve vodním sloupci se u Hromnického jezera a jezer Čankov a Srní shodují s trendy typickými pro meromiktická jezera. V rámci che-

mokliny došlo ke snížení koncentrace kyslíku na 0–3 % nasycení vody kyslíkem na dolní hranici mixolimnionu. U Zeleného jezera a jezera Vápenka došlo ke snížení nasycení vody kyslíkem pouze na 10, resp. 20 % a nedochází tak u nich k vytvoření typického anoxického monimolimnionu. Přítomnost produktů anoxického rozkladu organické hmoty (sulfanu) nebyla laboratorně stanovena, na lokalitách Srní a Čankov však byla při odběru hlubinných vzorků senzoricky potvrzena.

6. Závěr

Na základě výsledků morfometrických měření jezerních pánví a fyzikálně-chemických analýz jezerní vody pěti potenciálně meromiktických jezer antropogenního původu po těžbě nerostných surovin byly učiněny následující závěry:

1. Za permanentně meromiktická jezera lze označit Hromnické jezero, jezero Čankov a Srní vykazující atributy typické pro existenci stabilního monimolimnionu, vzestup teploty a konduktivity v rámci chemokliny je spojen s úbytkem ve vodě rozpuštěného kyslíku až na úroveň úplné anoxie, ve všech případech se jedná o hluboká jezera s monimolimnionem zasahujícím více než 30 % vodního sloupce.
2. Lokality Zelené jezero a jezero Vápenka lze označit za částečně meromiktická s náznaky přítomnosti monimolimnionu z hlediska průkazného zvýšení konduktivity v rámci chemokliny, teplotní a kyslíkové poměry však byly v průběhu měření proměnlivé a nevykazovaly stabilní anoxické prostředí (nasycení kyslíkem 10–20 %).
3. Hlavní příčinou vzniku meromixie je přítomnost specifického geologického podloží (druh těžené horniny ovlivňující množství rozpuštěných látek ve vodě) s výjimkou jezera Srní, kde se výrazně uplatňují specifické morfometrické podmínky jezerní pánve, ostatní faktory se uplatňují sekundárně (např. před větrem chráněná poloha Hromnického jezera).

Literatura:

- AESCHBACH-HERTIG, W., HOFER, M., KIPFER, R., IMBODEN, D. M., WIELER R. (1999): Accumulation of mantle gases in a permanently stratified volcanic lake (Lac Pavin, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, č. 19–20, s. 3357–3372.
- BERVICOVÁ, D. (2006): Limnologická charakteristika vybraných antropogenních jezer ČR. Diplomová práce. PrF UK, katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha, 85 s.
- BOEHRER, B., SCHULTZE, M. (2006): On the relevance of meromixis in mine pit lakes. In: Barnhisel, R. I., ed. (2006): 7th International Conference on Acid Rock Drainage, American Society of Mining and Reclamation, Lexington, Kentucky, USA, s. 200–213.
- BOHÁČKOVÁ, E. (2005): Hromnické a Zelené jezírko. Bakalářská práce. PrF UK, katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha, 47 s.
- ČESÁK, J., ŠOBR, M. (2005): Metody batymetrického mapování českých jezer. *Geografie*, 110, č. 3, s. 141–151.
- EGGLETON, F. R. (1956): Limnology of a meromictic, interglacial, plunge-basin lake. *Transactions of the American Microscopical Society*, 75, č. 3, s. 334–378.
- ESPAPANA, S. J. (2008): The acidic mine pit lakes of the Iberian Pyrite Belt: An approach to their physical limnology and hydrogeochemistry. *Applied Geochemistry*, 23, č. 5, Pergamon Press Ltd., s. 1260–1287.

- FLITE, O. (2006): Onset and persistence of biogenic meromixis in a filling pit lake – a limnological perspective. PhD. thesis, Clemson University, Biological Sciences, Clemson, South Carolina, 175 s.
- HAKALA, A. (2004): Meromixis as a part of lake evolution – observations and a revised classification of true meromictic lakes in Finland. *Boreal Environment Research*, 9, č. 1, Helsinki, s. 37–53.
- HRDINKA, T. (2005): Antropogenní jezera Česka. *Geografie*, 110, č. 3, s. 210–228.
- JANSKÝ, B., ŠOBR, M. a kol. (2003): Jezera České republiky. Monografie. PřF UK, katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha, 216 s.
- JANSKÝ, B., ŠOBR, M. (2004): Genetic classification of lakes in the Czech Republic. *Geografie*, 109, č. 2, s. 117–128.
- JANSKÝ, B. (2005): Nové trendy geografického výzkumu jezer v Česku. *Geografie*, 110, č. 3, s. 129–140.
- KALFF, J. (2002): *Limnology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 592 s.
- LELLÁK, J., KUBÍČEK, F. (1992): *Hydrobiologie*. Karolinum, Praha, 260 s.
- PITTER, P. (2009): *Hydrochemie*. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha, 592 s.
- ROMAN-ROSS, G., CHARLET, L., TISSERAND, D., GLEMME, M. (2005): Redox processes in a eutrophic coal-mine lake. *Mineralogical Magazine*, The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 69, č. 5, s. 797–805.
- SHIMARAIEV, M. N., VERBOLOV, V. I., GRANIN, N. G., SHERSTYANKIN, P. P. (1994): Physical Limnology of Lake Baikal: A review. Baikal International Center for Ecological Research, Irkutsk, 81 s.
- STEVENS, C. L., LAWRENCE, G. A. (1998): Stability and meromixis in a water-filled mine pit. *Limnology and Oceanography*, 43, č. 5, s. 946–954.
- ŠOBR, M. (2007): Jezera České republiky – fyzickogeografické a fyzikálně-limnologické poměry. Disertační práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, PřF UK, Praha, 235 s.
- WANCHUN, L., SHIJIE, L., YU, Y., JIANG, J., PEIMIN, P. (2001): Science in China Series D. Earth Sciences. Science in China Press and Springer-Verlag GmbH, 44, Supp. 1, s. 338–342.
- WETZEL, R. G. (2001): *Limnology*. Academic Press, San Diego, 1006 s.
- YSI INCORPORATED (2002): *YSI Environmental Operations Manual*. Yellow Springs, Ohio, 220 s.
- Soubor geologických map 1:50 000. Český geologický ústav, Praha, 1986–1999.

S u m m a r y

MANIFESTATIONS AND CAUSES OF MEROMIXIS IN LAKES RESULTING FROM MINERAL EXTRACTION IN CZECHIA

The article presents an investigation of five anthropogenic lakes that, on the basis of an examination of the physical and chemical features of their accumulated water, show meromictic stratification of the water column over the course of a year. Anthropogenic lakes are bodies of water, filling depressions in the earth's surface that result from the mining of mineral resources, which cannot be drained by any normal means (Janský, Šobr et al. 2003). Meromictic lakes are quite rare, in comparison with holomictic lakes, a fact which has been confirmed with lake research in Czechia. Measurements of the physical features of the water were taken during all four seasons of the year by means of direct measurement using a YSI multi-parameter probe above the maximum lake depth. Analyses of water samples taken 0.3 m below the water surface and 1 m above the bottom were performed in the laboratory of Charles University's Faculty of Natural Sciences at Velký Pálenec. Morphometric characteristics were determined on the basis of the methodology of Česák and Šobr 2005. All of the examined lakes are former quarries that have been flooded. The locations of Hromnické and Zelené lakes were quarried for vitriolic slate, kaolin was extracted at Čankov quarry, granite at Srní quarry, and crystalline limestone at the location of Vápenka Lake.

On the basis of the results of morphometric measurements in the lake basins and the physical-chemical analyses of lake water in five potentially meromictic, anthropogenic lakes, resulting from mineral extraction, Hromnické, Čankov, and Srní lakes can be classified as

permanently meromictic lakes, showing the attributes typical of the existence of a stable monimolimnion, an increase in temperature and conductivity within the chemocline is combined with a decrease in oxygen dissolved in the water, even to the extent of complete anoxia. All of the lakes are deep, with the monimolimnion comprising more than 30 % of the water column.

The primary characteristics of the monomolimnion include an increased concentration of dissolved trace minerals (ions) in comparison with the upper horizons of lake water, an anoxic environment or very limited oxygen in the water, the slightly higher temperature of the monomolimnion in comparison with the lower layer of the mixolimnion and the presence of specific products of microbial activity (the occurrence of sulfane or methane as products of the dissolution of sedimentary dead organic matter in an oxygen-free environment). The greatest influence on the occurrence of meromixis clearly comes from the geological sub-layer, while other causes can add to this influence (e.g. the situation of the surface of Hromnické Lake). The results of research on Czech localities points to a combination of a number of factors, from which the specific morphometric characteristics factor dominate only at the Srní locality. The impact of a significant surface tributary was not observed at any of the studied localities.

The locations of Zelené and Vápenka lakes can be considered partly meromictic with signs of monimolimnion, in light of a marked increase in conductivity within the chemocline; however, temperature and the oxygen conditions varied during the measuring and did not exhibit a stable anoxic environment (oxygen saturation of 10–20 %).

The main cause of meromixis is the presence of a specific geological subsoil (the kind of the rock extracted influences the amount of materials dissolved in the water), except in Srní Lake, where the specific morphometric conditions of the lake basin manifest themselves significantly, while other factors are manifested only secondarily (e.g. the location of Hromnické Lake is protected from the wind).

Fig. 1 – The meromictic lakes studied. 1 – Hromnické Lake, 2 – Zelené Lake, 3 – Lake Čankov, 4 – Lake Srní, 5 – Lake Vápenka. Source: own preparation

Fig. 2 – Bathymetric map of Hromnické Lake. Source: Boháčková 2005.

Fig. 3 – Bathymetric map of Zelené (Green) Lake. Source: Boháčková 2005.

Fig. 4 – Bathymetric map of Lake Čankov. Source: Hrdinka 2005.

Fig. 5 – Bathymetric map of the Lake Srní. Source: Hrdinka 2005.

Fig. 6 – Bathymetric map of the Lake Vápenka. Source: Bervicová 2006.

Fig. 7 – Physical characteristics of the lake water measured at the selected localities during the period of summer stratification (left column) and autumn circulation (right column). Depth values of Zelené Lake and Lake Vápenka on graphs A–D and G, H are on the right depth axis. A, B – stratification of temperature, C, D – depth profiles of conductivity, E, F – depth profiles of dissolved oxygen, G, H – depth profiles of pH. (Source: own analysis)

Fig. 8 – Chemical characteristics of the lake water measured at the selected localities during the period of summer stratification (left column) and autumn circulation (right column). A, B – concentration of ammonium ions, C, D – concentration of ions of alkaline metals and alkaline earth metals, E, F – concentration of chloride ions, G, H – concentration of sulfate ions. Dark columns – depth, white columns – surface. Source: own measurement.

Pracoviště autorů: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Albertov 6, 128 43, Praha 2; e-mail: tomashrdinka@centrum.cz; sobr@natur.cuni.cz.

Do redakce došlo 3. 6. 2009; do tisku bylo přijato 8. 2. 2010.

Citační vzor:

HRDINKA, T., ŠOBR, M. (2010): Projevy a příčiny meromixie jezer po těžbě nerostných surovin v Česku. *Geografie*, 115, č. 1, s. 96–112.