

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**  
**Ústav pro životní prostředí**

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Ochrana životního prostředí



**Jan Bašta**

Emise metanu z přehrad mírného pásma  
Methane emissions from temperate freshwater reservoirs

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jaroslava Frouzová, Ph.D.

Praha, 2019

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu. Tištěná verze práce je shodná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze dne

Podpis:

**Poděkování:**

Děkuji paní Ing. Jaroslavě Frouzové, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za odborné konzultace a za čas, který mi věnovala. Dále bych rád poděkoval své ženě za trpělivost a jazykovou pomoc, zaměstnavateli, rodině a přátelům za podporu a pochopení při mém studiu.

## Abstrakt

Emise metanu ( $\text{CH}_4$ ) z přehrad mírného pásma jsou uvažovány teprve v posledních desetiletích. Sladkovodní ekosystémy, včetně přehrad, uvolňují zásadní množství tohoto důležitého skleníkového plynu. Ebulice, uvolňování metanu do atmosféry z bublin ze sedimentu, je významný zdroj. Přesto existuje pouze velmi omezené množství prací monitorujících tento tok do atmosféry. Uváděné hodnoty emisí metanu z jednotlivých přehrad mírného pásma jsou značně rozdílné. Pro monitorování emisí metanu existuje mnoho odlišných metod. Také vyhodnocení poměru přírodních a antropogenních emisí není jednoduché. Zdá se, že přehrada většinou podněcuje vznik metanu ve vyšší míře. Snadné není ani konstatovat, jaké je celkové množství emisí metanu z přehrad mírného pásma.

### Hlavní sdělení:

- Existuje pouze velmi omezené množství prací monitorujících množství metanu uvolněného do atmosféry ebulicemi, která je přitom významným zdrojem
- Uváděné hodnoty emisí metanu z jednotlivých přehrad mírného pásma jsou značně rozdílné
- Opravdový antropogenní příspěvek lze zhodnotit jen po předešlém určení přirozeného příspěvku ekosystému před stavbou přehrady
- Neexistuje jednotný přístup pro stanovení celkové rozlohy přehrad

Klíčová slova: metan, emise, vodní nádrž, klimatická změna, cyklus uhlíku, hráz, vodní energie, životní prostředí

## **Abstract**

Methane (CH<sub>4</sub>) emissions from temperate freshwater reservoirs have only been evaluated for the last several decades. Freshwater ecosystems (including water reservoirs) release crucial quantities of this important greenhouse gas. Ebullition that releases methane into the atmosphere from bubbles originating from sediment is important source of methane. Regardless of the importance of these emissions, a very limited number of scientific research papers monitoring this flux into the atmosphere are available. Estimated values of methane emissions from freshwater temperate reservoirs vary considerably. There are many different methods for monitoring methane emissions. It seems that the freshwater reservoir stimulates methane formation in increasing scales. The size of the sum of methane emitted from freshwater reservoirs is also difficult to say.

### Key points:

- There is very little existing scientific research monitoring the quantity of released methane into the atmosphere by ebullition, which is a significant source of emissions.
- Estimated values of methane emissions from freshwater temperate reservoirs vary considerably.
- The quantity of released methane from freshwater temperate reservoirs is not equal to anthropogenic addition of methane emissions caused by dam construction
- There is no unitary way to determine the total freshwater reservoirs' surface areas.

Key words: methane, emissions, water reservoir, climate change, carbon cycle, dam, hydropower, environment

# Obsah

Seznam použitých zkratk	7
1 Úvod	8
2 Emise metanu z přehrad	9
2.1 Přehradní hráze a vodní nádrže	9
2.1.1 Trendy ve stavbě přehrad a jejich lokace z globálního pohledu	10
2.2 Skleníkové plyny	11
2.2.1 Inventarizace zdrojů metanu	12
2.3 Celkové emise z životního cyklu přehrad	13
2.3.1 Emise při výstavbě, údržbě, provozu a odstraňování přehrady	13
2.3.2 Vliv přehrady na biogeochemický cyklus uhlíku	14
2.3.2.1 Biogeochemický cyklus uhlíku v přehradě a emise skleníkových plynů se zaměřením na metan	14
2.3.2.2 Procesy a parametry ovlivňující množství vznikajících a uvolňovaných skleníkových plynů	16
3 Zhodnocení celkových emisí metanu z přehrad mírného pásma	19
3.1 Metodická variabilita – způsoby měření a vyhodnocování emisí	20
3.1.1 Metody sledování emisí metanu	21
3.1.1.1 Metody sledování difúzního toku	21
3.1.1.2 Metody sledování ebulice metanu	22
3.1.1.3 Metody kombinující sledování difúzního toku a ebulice	22
3.2 Stanovení celkové velikosti plochy přehrad	23
4 Diskuse	25
4.1 Vyjádření metanových emisí přehrad mírného pásma v rámci celkových metanových emisí	25
4.2 Metodické nejednotnosti	26
4.2.1 Časová a prostorová variabilita	26
4.2.2 Množství emisí metanu po průchodu přehradou	27
4.3 Antropogenní příspěvek metanových emisí výstavbou přehrad	28
4.3.1 Srovnání metanových emisí ekosystému před stavbou přehrady a po ní	28
4.4 Určení celkové velikosti přehrad mírného pásma	29
5 Závěr	31
6 Citace	33
7 Seznam příloh	42

## **Seznam použitých zkratk**

AGAGE – The Advanced Global Atmospheric Gases Experiment

DOC – rozpuštěný organický uhlík (dissolved organic carbon)

EEA – Evropská agentura pro životní prostředí (European Environmental Agency)

ICOLD – Mezinárodní komise pro velké přehrady (International Commission on Large Dams)

LCA – zhodnocení životního cyklu (life cycle assessment)

POC – partikulovaný organický uhlík (particulate organic carbon)

ppm – dílů na jeden milion (parts per million)

ppb – dílů na jednu miliardu (parts per billion)

SI – dodatečné informace (supplementary information)

# 1 Úvod

Přehrady, jako antropogenní činitel, vstupují do přirozeného biogeochemického cyklu uhlíku zadržováním organické hmoty a zvýšenou mírou sedimentace. To nám dává možnost nahlédnout blíže do této problematiky. Na metan, jako skleníkový plyn s mnohokrát vyšším efektem než oxid uhličitý, je v souvislosti s klimatickou změnou nutné se zaměřit blíže. Jsou přehrady významným zdrojem metanu nebo je jimi vyvolaná změna v cyklu uhlíku zanedbatelná? Mírné pásmo, jako to, v kterém žijeme a budujeme především, nám slouží jako vymezení oblasti, kde jsou podmínky srovnatelné a rovněž se zde velká část obyvatel a lidské činnosti koncentruje.

Práce si klade za hlavní cíle shrnout a analyzovat problematiku: (a) monitoringu a, (b) stanovování celkových emisí z přehrad mírného pásma. V úvodních kapitolách popisným způsobem odpovídá na základní otázky vztahující se k tomuto tématu, jimž je nutné porozumět pro následnou analýzu: (1) Proč přehrady? (2) Proč emise metanu? V kapitole čtvrté se dotýká především role mírného pásma a dále rozebírá úskalí, s kterými se potýkají syntézy při stanovování celkových emisí z přehrad. Těmito úskalími mohou být: (a) variabilita používaných metod, (b) problematika vztažení naměřených výsledků na celkovou plochu přehrad, jak globálně, tak pro mírné pásmo. Na příkladu několika přehrad mírného pásma v Evropě a Severní Americe uvádí variabilitu výsledných hodnot a naznačuje možné metodické činitele ovlivňující nereprezentativnost uváděných výsledků (viz *Příloha 1*). Kapitola diskuzí komentuje závěry vyplývající z předešlých částí a z připravené tabulky (*Příloha 1*).



## 2 Emise metanu z přehrad

Emise metanu z přehrad je téma akcentované od začátku 90. let minulého století (Smith and Lewis, 1992; Rudd et al., 1993). V této práci pod pojmem přehrady rozumíme přehradní komplex, to znamená většinou přehradní hráz a vodní nádrž. Přehrady mají celou řadu funkcí (Wang et al., 2018). Na druhou stranu je ohledně jejich stavby z různých důvodů mnoho dohadů (např. Friedl and Wüest, 2002). Negativem je například narušení biogeochemických cyklů (Wang et al., 2018), které díky činnosti mikroorganismů vyúsťuje, mimo jiné, ve stimulaci tvorby skleníkových plynů (St. Louis et al., 2000).

### 2.1 Přehradní hráze a vodní nádrže

Přehradní hráze jsou stavby na vodních tocích, jejichž účelem je zahradit tok pro jeho využití jako přírodní zdroj či pro jeho regulaci. Přehrada pro získávání elektrické energie neboli vodní elektrárna, může být v zásadě dvou typů: (1) průtočná a (2) akumulární (WCD, 2000). Využití energie toku má dlouhou historii. Již vodní mlýny fungovaly na tomto principu. V dnešní době mají přehrady využívající průtok zásadní vliv na říční ekosystém, mnohdy totiž zahrazují celou šíři řeky, čemuž tak u vodních mlýnů být nemuselo (Gürbüz, 2006). Akumulační vodní elektrárna se staví za účelem zadržení vody a následného využití energie jejího odtoku. Některé přehrady se pro získávání elektrické energie nevyužívají a slouží například jako (St. Louis et al., 2000; Wang et al., 2018):

- zdroj pitné vody dostupný i v obdobích sucha (vodárenské nádrže)
- zdroj vody pro průmysl, zemědělství (závlahy) a energetiku (např. chlazení jaderných nebo tepelných elektráren)
- ochrana před povodněmi zadržením vody a regulací odtoku
- stabilizace odtoku pro lodní dopravu
- rekreace, rybaření, akvakultury

Jedním z problémů při využívání vody pro většinu z těchto zmíněných funkcí může být negarantovaná kvalita vody. V souvislosti s klimatickou změnou, eutrofizací a kontaminací prostředí se ztěžují podmínky úpravy vody (Gunkel and Sobral, 2007; Gunkel, 2009). Například v zemědělských oblastech častá eutrofizace způsobuje přemnožení sinic a řas, současné znečištění vody pesticidy ve vodárenské nádrži způsobuje zásadní problém při následné úpravě na vodu pitnou (Hnatukova, 2011; Kvítek, 2017). Kromě zmíněné eutrofizace, která je přirozenou reakcí trofického režimu na zahrazení toku (např. z důvodu kumulace organické hmoty), přehrady negativně ovlivňují řadu procesů. Mění podmínky tekoucích vod téměř na

stojaté (v závislosti na době zdržení vody v nádrži) a tato transformace má vliv např. na (McCully, 2001; Friedl and Wüest, 2002; Scudder, 2006; Moran et al., 2018):

- systém sedimentace a přesunu sedimentů ve vodním toku s mnoha různými důsledky, jako je např. narušení biogeochemických cyklů, včetně cyklů živin (Ligon et al., 1995; Gunkel and Sobral, 2007; Hertwich, 2013; Liu et al., 2019; Tundusi, 2018; Wang et al., 2018)
  - *v nádrži a okolí*: zvýšené riziko povodní
  - *níže po toku*: nedostatek živin a sedimentů potřebných pro organismy, zvyšování erozní schopnosti řeky, snižování hladiny (a možnost snižování taktéž hladiny podpovrchových vod v území), narušení ukládání uhlíku hluboko do oceánu
- okysličení vody (Hertwich, 2013; Liu et al., 2019)
  - zlepšují se redukční podmínky, ve kterých se uvolňují toxické formy látek ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $H_2S$ )
  - činností mikroorganismů (společně s faktorem zadržování množství organické hmoty a živin) vzniká větší množství skleníkových plynů – oxidu uhličitého ( $CO_2$ ), metanu ( $CH_4$ ) a oxidu dusného ( $N_2O$ )
- erozi půdy litorálu vlivem managementových změn hladiny vodní nádrže
- změny teploty vody, které mohou mít za následek zvýšený nárůst biomasy (Bednarek, 2001; Hertwich, 2013; Song et al., 2018)

Následně se z důvodu změny podmínek mění celá společnost a nejsou-li vystavěna cílená opatření je migrace některým vodním organismům znemožněna. To podporuje (spolu s ostatními výše zmíněnými a dalšími faktory) ztrátu biodiverzity (Song et al., 2018; Wang et al., 2018). Mezi další negativa může patřit cena výstavby a její časová náročnost, které se týkají především velkých projektů (Ansar et al., 2014). Člověk tedy neustále hledá nejlepší kompromis mezi pozitivy a negativy jejich výstavby (Pithart, 2012).

### **2.1.1 Trendy ve stavbě přehrad a jejich lokace z globálního pohledu**

Stavba přehrad, jakou nyní známe, začala na přelomu 19. a 20. století. Dosavadní největší rozsah staveb přehrad proběhl mezi lety 1955 a 2000. Celkový objem vody uložený v přehradách stoupl v těchto letech až 16x. V Evropě je využito již přibližně 70 % celkového potenciálu využití vodní energie, přičemž právě využívání vodní energie je jedním z hlavních důvodů jejich stavby. Oproti tomu v Africe méně než 4 %, v Číně asi jen 24 % (Wang et al., 2018).

Vzhledem k rostoucímu energetickému nároku, hledání stabilního zdroje energie, a zajištění vodního blahobytu z pohledu dostupnosti pitné vody a vody na zavlažování, lze očekávat stavbu přehrad s nádržemi především v rozvojových zemích, kde jsou některé přehrady

již ve výstavbě (Zarfl et al., 2014; Hermoso, 2017). Neboť nejvýkonnější světové elektrárny jsou vodní (EIA, 2016; Moran et al., 2018) a země, jako je Čína, Indie nebo mnohé státy Afriky, kterých se rozvoj týká, se nachází u velkých řek, vodní elektrárny jako obnovitelný zdroj energie se nabízí jako nejlepší řešení (Rex et al., 2014). Nový model budoucího rozmachu stavby přehrad by měl být brzy dostupný v aktualizované a rozšířené podobě (GDW). Vodní elektrárny byly a často jsou považovány za ekologický zdroj energie (Yüksel, 2010). Ekologický zdroj energie a obnovitelný zdroj energie však není synonymum. Ekologický zdroj je takový, jehož provoz není devastující pro životní prostředí. Proto je u zhodnocení potřeba vzít v potaz všechny pozitivní i negativní vlivy zdroje energie na životní prostředí (Kettl et al., 2011; Hermoso, 2017).

## 2.2 Skleníkové plyny

V této práci pod pojmem emise rozumíme především emise skleníkových plynů, a to: CO<sub>2</sub> (oxid uhličitý) a CH<sub>4</sub> (metan), ale mezi významné skleníkové plyny patří například i N<sub>2</sub>O (oxid dusný). Vhodná a používaná jednotka, v souvislosti s touto prací, je (ať již přímo či nepřímo vyjádřený) ekvivalent CO<sub>2</sub> (eq.CO<sub>2</sub>). Ten převádí ostatní skleníkové plyny (zde zejména CH<sub>4</sub>) podle efektu na klimatickou změnu na jednotku ekvivalentní počtu CO<sub>2</sub> molekul a nazývá se potenciál globálního oteplování, z anglického global warming potential, zkratkou GWP (Houghton et al., 1995).

CO<sub>2</sub> v ovzduší bylo v roce 2016 přes 400 ppm, v preindustriální době jej bylo 283 ppm. To je nárůst na 140 % původní koncentrace. Je zodpovědný za přibližně 80–85 % antropogenního narušení skleníkového efektu (Goldenfum, 2010; IPCC, 2014). CH<sub>4</sub> je bylo v roce 2016 v ovzduší přes 1 842 ppb, v preindustriální době jej 751 ppb na 240 % původní koncentrace. Potenciál globálního oteplování (GWP) je u CH<sub>4</sub> 28x vyšší než u CO<sub>2</sub> v horizontu 100 let, ale vzhledem k naléhavosti hledání řešení klimatické změny je ještě důležitější, že v horizontu 20 let je GWP CH<sub>4</sub> 84x vyšší (IPCC, 2014). Třetím důležitým, ale v této práci neřešeným, skleníkovým plynem je N<sub>2</sub>O, jehož koncentrace byla v roce 2016 okolo 330 ppb. V preindustriální době jej bylo 273 ppb. To je nárůst na 120 % původní koncentrace. Potenciál globálního oteplování (GWP) je u N<sub>2</sub>O 265x vyšší než u CO<sub>2</sub> v horizontu 100 let, v horizontu 20 let je efekt 264x silnější (IPCC, 2014). Přehledně jsou hodnoty uvedeny v *Tab. 1*.

Tab. 1: Hodnoty nejvýznamnějších skleníkových plynů dle EEA – Evropské agentury pro životní prostředí (IPCC, 2014; EEA, 2019)

	Koncentrace v roce 1800	Koncentrace v roce 2016	Nárůst [%]	GWP (100 let)	GWP (20 let)	Doba setrvání v atmosféře [roky]
CO <sub>2</sub>	282,9 ppm	402,88 ppm	141	1	1	5–200
CH <sub>4</sub>	750,8 ppb	1 842,4 ppb	244	28	84	9–15
N <sub>2</sub> O	273 ppb	329,29 ppb	120	265	264	114

GWP = Global Warming Potential (Potenciál globálního oteplování)

### 2.2.1 Inventarizace zdrojů metanu

Zdrojů metanu je celá řada. Jednotlivé inventarizační studie se v jejich hodnotách liší. Dle dat zprostředkovaných EEA (Evropskou agenturou pro životní prostředí) známe přibližný nárůst emisí metanu způsobený lidskou činností. Nárůst byl exponenciální ve 20. století, na začátku 21. století stagnoval, ale od roku 2005 opět roste. (Howarth, 2017; EEA, 2019). Data poskytuje AGAGE (The Advanced Global Atmospheric Gases Experiment). Z těchto dat vychází, že zdroje metanu jsou přibližně z jedné třetiny přírodního původu a ze dvou třetin antropogenního. Nejvýznamnějším přírodním zdrojem jsou mokřady a sladkovodní ekosystémy (Cias et al., 2013; Sauniois et al., 2016). Dalšími jsou například termity a dále jimi mohou být geologické zdroje (Etiope et al., 2008; Cias et al., 2013; Kirschke et al., 2013; Sauniois et al., 2016). Jednotlivé studie se shodují na největším antropogenním zdroji emisí metanu, jímž je produkce a užívání fosilních paliv, především zemního plynu, břidlicového plynu, méně ropy a uhlí (Cias et al., 2013; Howarth, 2015; Sauniois et al., 2016). Další antropogenní emise, s odlišnými hodnotami dle jednotlivých studií, pochází z chovu dobytka, ze skládek, z rýžovišť a ze spalování biomasy, včetně biopaliv (Cias et al., 2013; Kirschke et al., 2013; Sauniois et al., 2016). Tyto zdroje jsou uvedeny v *Příloze 2*.

Díky správnému vyhodnocení izotopové analýzy uhlíku v metanu se dosavadní představy o složení zdrojů metanových emisí změnilly (Allen, 2016; Schwietzke et al., 2016). Poměr celkových emisí metanu mikrobiálního původu je dle studie o 23 % nižší, než se dříve odhadovalo (v *Příloze 3* se však toto neprojevuje). Poměr celkových emisí metanu fosilního původu (antropogenního + přírodního geologického) je o 60 – 110 % vyšší. Zastoupení fosilního metanu antropogenního původu (především těžba a další zpracování zemního plynu, ropy a uhlí) je o 20 – 60 % vyšší (Allen, 2016; Schwietzke et al., 2016). Tato zjištění vedou ke změně přístupu při snižování produkce metanu antropogenního původu. Porovnání jednotlivých hodnot dle tohoto přístupu je zobrazeno v *Příloze 3*.

Původ antropogenních emisí metanu je dle aktuálního poznání z poloviny fosilního původu a z druhé poloviny původu biogenního (Howarth, 2017). Emise přehrad jsou v těchto inventarizačních studiích částečně zahrnuty do přírodních biogenních emisí sladkovodních ekosystémů (Cias et al., 2013; Saunois et al., 2016). Zda a jaká část by měla být zahrnuta v antropogenních zdrojích je diskutováno (Santos et al., 2006; Saunois et al., 2016).

### **2.3 Celkové emise z životního cyklu přehrad**

Tak jako každá stavba a zásah do přírody a krajiny mají i přehrady, nejen pozitivní a funkční působení, ale také negativní (Wang et al., 2018). Mezi jeden z negativních faktorů patří emise skleníkových plynů, a to především metanu, z důvodu jeho potenciálu globálního oteplování, viz část 2.2 *Skleníkové plyny* (Houghton et al., 1995; St. Louis et al., 2000). K uvolňování skleníkových plynů dochází v rámci celého životního cyklu přehrady. Zhodnocení tohoto cyklu přináší tzv. life cycle assessment (LCA), který se používá jako jeden z přesnějších způsobů hodnocení dopadu lidských aktivit a staveb na životní prostředí. LCA stavby se skládá ze součtu emisí vzniklých při její výstavbě, údržbě, provozu a odstraňování (Kumar and Schei, 2011; Hertwich et al., 2014; Song et al., 2018). Hlavní příspěvek přehrad k emisím skleníkových plynů je v období jejich provozu, díky mikrobiální činnosti a uvolňování vznikajících plynů. Nejvýznamnějšími toky skleníkových plynů, jejichž význam tkví především v uvolňování metanu, jsou:

- Emise z povrchu vodní nádrže, zejména uvolňování způsobem ebulice a difúze (St. Louis et al., 2000; Goldenfum, 2010; Hertwich, 2013; Deemer et al., 2016)
- Zplyňování (degassing) metanu rozpuštěného ve vodě po průchodu turbínou nebo přepadem (Abril et al., 2005; Fearnside, 2005; Guérin et al., 2006; Diem et al., 2012)
- Uvolňování metanu pod přehradou, především v případě, že je voda čerpána z míst s anaerobními podmínkami (Fearnside, 2005; Guérin et al., 2006; Saunois et al., 2016)

Dalším způsobem uvolňování je tok zprostředkovaný rostlinami v litorálních porostech, který je významný především u mokřadů (Le Mer and Roger, 2001; Bastviken et al., 2004; Hertwich, 2013).

#### **2.3.1 Emise při výstavbě, údržbě, provozu a odstraňování přehrad**

Emise jsou součástí celého životního cyklu přehrady – výstavby, údržby, provozu i jejího odstranění. Tento způsob posuzování má správnější výpovědní hodnotu, uváděn je však méně často (Varun et al., 2009; Hertwich et al., 2014). K výstavbě každé přehradní hráze a vodní nádrže je třeba materiál – ocel, beton, PVC, písek, kamení. Písek a kamení není přílišný problém získat a přepravit, není-li místo výstavby zcela odděleno od tohoto zdroje. Získávání betonu,

PVC (pro potrubí) a oceli však emituje nemalé množství skleníkových plynů (Song et al., 2018; Pascale et al., 2011). Do emisí výstavby jsou zahrnuty také emise skleníkových plynů vzniklé při získávání surovin, jejich zpracování a dopravě nutné pro stavbu (Song et al., 2018). Výroba cementu pro produkci betonu je jedním z hlavních zdrojů uvolňování skleníkových plynů ve fázi výstavby. Proto by měla být zahrnuta do emisí celého životního cyklu přehrady (Song et al., 2016). Dalším příspěvkem k celkovým emisím je doprava materiálu na místo výstavby. Záleží především na lokální dostupnosti, není-li materiál dostupný, je nutné ho dovést, mnohdy ze vzdálených míst. Tento problém je aktuální v ostrovních nebo rozvojových oblastech, např. v Thajsku (Suwanit and Gheewala, 2011). Samotná výstavba nádrže je složená ze stavebních prací: bagrování, vrtání, výroba a míchání betonu, plnění nádrže a jiné (Song et al., 2018). Další emise spojené s výstavbou přehrady jsou způsobené např. ztrátou habitatů, fragmentací krajiny a nutnou výstavbou silnic (Gibson et al., 2017).

Do fáze údržby, provozu a odstraňování spadají např. různé opravy přehrady po poškození povodněmi, opravy generátorů, výměny potrubí, promazávání a péče o turbíny. Přehrada často zůstává stát, i když již není využívána pro výrobu elektrické energie (Song et al., 2018). Problémem při jejím odstranění je možnost uvolnění velkého množství skleníkových plynů ze sedimentů, které se nahromadily po dobu existence přehrady (Pacca, 2007). Tento náhlý zásah může způsobit nárazový nárůst emisí. Dle Pacca (2007) mohou být nárazové emise přibližně desetinásobně vyšší než běžné emise skleníkových plynů při provozu přehrady.

### **2.3.2 Vliv přehrady na biogeochemický cyklus uhlíku**

Velikost sladkovodních ekosystémů zabírá jen několik procent pevniny, i přesto jsou jejich emise uhlíku srovnatelné s emisemi oceánů a mohou být i vyšší (Raymond et al., 2013; DelSontro et al., 2018; Schubert and Wehrli, 2018). Řeky, jezera a přehrady přijímají uhlík v různých podobách a přeměňují ho do jednodušších forem. Část je uvolněna do atmosféry (30 %), část je uložena v sedimentech (30 %) a část je transportována po proudu toku (40 %), pozn. v závorce uvedeny pouze ilustrační hodnoty (Cole et al., 2007; Aufdenkampe et al., 2011; DelSontro et al., 2018).

#### **2.3.2.1 Biogeochemický cyklus uhlíku v přehradě a emise skleníkových plynů se zaměřením na metan**

Procesy popsané v této kapitole jsou zobrazeny v *Příloze 4*. Přítok vnáší do přehrady organický a anorganický alochtonní fluviální materiál, včetně DOC (rozpuštěný organický uhlík), POC (partikulovaný organický uhlík) a živin (Soumis et al., 2005; Santos and Rosa,

2011; Hertwich, 2013). Množství a složení přinášeného materiálu závisí na vlastnostech území povodí a na využití krajiny v povodí. Část materiálu se usazuje a část se rozptýluje ve vodním sloupci a pokračuje v laterálním transportu. Voda vstupující do přehrady obsahuje také určité množství rozpuštěných plynů včetně oxidu uhličitého a metanu (Hertwich, 2013). Při zakládání nádrže je zatopena biomasa a půda, která po zatopení začíná být intenzivně rozkládána, respektive degradována, mikrobiální činností (Soumis et al., 2005; McCully, 2006; Santos and Rosa, 2011; Mäkinen and Khan, 2010). Vyluhováním a erozí půdy břehů nádrže je do vodního sloupce vnášen další materiál, včetně uhlíku v různých formách (Santos and Rosa, 2011). Rozpuštěné živiny jsou substrátem pro primární produkci sinic, řas a makrofyt. Ty váží vzdušný oxid uhličitý a vnáší do systému další uhlík (Wang et al., 2018). Růst autotrofních organismů je následován rozvojem jejich konzumentů. Obě tyto fáze zahrnují rozvoj planktonních společenstev (McCully, 2006). Každý organismus po určité době odumírá a stává se substrátem pro rozklad mikroorganismy (Schubert and Wehrli, 2018; Wang et al., 2018).

Především v sedimentech pak probíhá anaerobní rozklad, jehož součástí je metanogeneze, která generuje oxid uhličitý a metan (Gunkel, 2009; Hertwich, 2013; Wang et al., 2018). Při transportu metanu vodním sloupcem může nad oxyklinou docházet k oxidaci metanu aerobními metanotrofními bakteriemi na oxid uhličitý (Gunkel, 2009; Prairie et al., 2017). Část metanu zůstává rozpuštěná ve vodě, část však vlivem přesycení prostoru metanem vytváří bubliny, které stoupají k hladině a mohou se uvolňovat do atmosféry (McGinnis et al., 2006; Gunkel, 2009). Až k hladině se dostanou zejména bubliny vzniklé v hloubce do 10 metrů (Goldenfum, 2010; Beaulieu et al., 2016). Část ale může vystoupat celým vodním sloupcem i z hloubky 30 metrů. Většina bublin z hloubek větších než 30 metrů a ostatní neuvolněné bubliny jsou spotřebovány zmíněnými metanotrofními mikroorganismy nebo rozpuštěny. Tento tok se nazývá ebulice (McGinnis et al., 2006; Goldenfum, 2010). Ebulice je převažující způsob toku metanu z vody do atmosféry u přehrad (Bastviken et al., 2004; DelSontro et al., 2010; Bastviken et al., 2011; Schubert et al., 2012; DelSontro et al., 2015). Tvorba bublin je velmi prostorově a časově (sezónně) variabilní a záleží na mnoha faktorech (McGinnis et al., 2006; DelSontro et al., 2011; Maeck et al., 2013; Prairie et al., 2017; Tušer et al., 2017). Část metanu rozpuštěného ve vodním sloupci se na rozmezí vody a vzduchu uvolňuje difuzí do atmosféry (Gunkel, 2009; Santos and Rosa, 2011; Schubert and Wehrli, 2018). V litorální zóně je významné uvolňování metanu do atmosféry rostlinami. Metan je ze sedimentu transportován stonkem rostliny, systémem, který obvykle slouží pro tok kyslíku (Kumar et al., 2013). Aerenchym vodních cévnatých rostlin (hlavně bylin, ale například také stromů rodu *Alnus*), který slouží jako pumpa, umožňuje plynu pasivním způsobem přes póry v kořenech přecházet ze sedimentu do atmosféry skrze mikropóry

na listech. Například u rýžovišť je tento způsob uvolňování metanu zodpovědný za více než 90 % emisí (Smith and Lewis, 1992; Rusch and Rennenberg, 1998; La Mer and Roger, 2001).

Ke zplyňování (degassing) metanu rozpuštěného ve vodě dochází obzvláště, je-li výpusť (odtok vody přehradou) v anaerobní zóně (Soumis et al., 2005; Mäkinen and Khan, 2010). Při vypouštění vody, při průchodu turbínou nebo přepadem, dochází k náhlému, vysokému poklesu tlaku a nárůstu styčné plochy vody a vzduchu. Množství zplyňovaného rozpuštěného plynu je závislé především na: vypouštěném množství vody, koncentraci sledovaných plynů ve vodním sloupci a na hloubce, v které se výpusť nachází. (Galy-Lacaux et al., 1997; Fearnside, 2005; Soumis et al., 2005; Mäkinen and Khan, 2010). Voda vytékající z přehrady má vyšší koncentraci rozpuštěných plynů z anaerobního prostředí. Proto může docházet ke zvýšeným emisím metanu i pod přehradou (Guérin et al., 2006; Goldenfum, 2010).

Důležitou roli hraje také zóna poklesu hladiny (drawdown zone), která se nachází mezi nejvyšší a nejnižší výškou hladiny. Tato zóna je často narušována změnami výšky hladiny – obnažována a je pro přehrady charakteristická. Pokles hladiny zapříčiňuje změny v biogeochemických cyklech, jak v obnažované zóně, tak v zóně s nízkým vodním sloupcem. Může docházet ke změnám v distribuci uvolňování metanu (Furey et al., 2004; Harrison et al., 2017; Hilgert et al., 2019). Zvýšené emise metanu mohou nastat z podobných důvodů jako u zplyňování, tedy z náhlého poklesu tlaku a uvolnění nahromaděného metanu ze sedimentů v podobě bublin. V oblastech, kde je výška snížení hladiny ( $h_s$ ), významná vůči původní výšce vodního sloupce ( $h_p$ ; výška před snížením hladiny), dochází tedy ke změnám v distribuci uvolňování metanu (Deshmukh et al., 2014; Beaulieu et al., 2018). Pouze pro doplnění a názornost je zde tento mechanismus zobrazen zlomkem:

$$Z_{CH_4} = \frac{h_s}{h_p}$$

kde  $Z_{CH_4}$  je míra změny v uvolňování metanu,  $h_s[m]$  je velikost snížení výšky vodního sloupce (pokles hladiny), a  $h_p[m]$  je původní výška vodního sloupce (před snížením hladiny). Pokud se  $Z_{CH_4}$  rovná 0 nedochází ke změně. Čím je hodnota  $Z_{CH_4}$  blíže 0, tím k menší změně dochází. Pokud je hodnota  $Z_{CH_4}$  větší nebo rovna 1 dochází k obnažení.

### 2.3.2.2 Procesy a parametry ovlivňující množství vznikajících a uvolňovaných skleníkových plynů

Vznik skleníkových plynů (metanu a oxidu uhličitého) je určen dalšími procesy, které vnášejí organický uhlík do nádrže či sedimentu a procesy zajišťujícími podmínky pro průběh produkce plynů. Významnou roli hrají rovněž procesy ovlivňující distribuci plynů v nádrži



(UNESCO/IHA, 2008). Procesy aplikující organický uhlík již byly popisovány a zobrazeny v předchozí části a v *Příloze 4*. Za alochtonní vstupy uhlíku do nádrže a sedimentu jsou zodpovědné následující: fluviální materiál vnášený řekou/řekami do nádrže, toky podzemní vody s rozpuštěnými a rozptýlenými organickými látkami, vyústění kanálů a kanalizací do nádrže, eroze a pobřežní zóny a další. Jejich intenzita je dána například: vlastnostmi krajiny, využitím krajiny, krajinným pokryvem, hydrogeologickými a geologickými podmínkami (Friedl and Wüest, 2002; McCully et al., 2006; UNESCO/IHA, 2008; Makinen and Khan, 2010; Medonca et al., 2012; Schubert and Wehrli, 2018). Za autochtonní vstupy uhlíku do nádrže a sedimentu jsou zodpovědné například následující: primární produkce fytoplanktonu, mikrofyt a makrofyt přímo v nádrži nebo v zóně poklesu hladiny při vyšší hladině vodního sloupce, zatopená terestrická organická hmota při zakládání nádrže nebo popř. opad organické hmoty z bezprostřední blízkosti nádrže. Jejich intenzita je dána zejména dostupností živin a světla (McCully et al., 2006; UNESCO/IHA, 2008; Tranvik et al., 2009; Sepulveda-Jauregui et al., 2018).

Procesy zajišťující produkci plynů jsou především mikrobiálního principu. Plyny se produkují např. při: dekompozici organického materiálu, popř. aerobní oxidaci metanu a dalších chemotrofní procesech (Abril et al., 2005; UNESCO/IHA, 2008; World Bank, 2017). Dále abiotickou fotomineralizací rozpuštěné organické hmoty (Soumis et al., 2007). Jejich intenzita je dána například: formou, v které je vázán organický uhlík, teplotou, množstvím rozpuštěného kyslíku, dostupností živin nebo intenzitou slunečního záření (UNESCO/IHA, 2008; Gunkel, 2009; Wang et al., 2018). Procesy ovlivňující distribuci plynů v rámci vodní nádrže jsou obecně procesy míchací a transportní a stratifikace (Soumis et al., 2005; UNESCO/IHA, 2008; Guérin et al., 2016). Co se týká množství uvolňovaného plynu z přehrady, ten je dán konkrétními podmínkami. Poměr významu jednotlivých emisních toků: emisí z povrchu vodní nádrže (ebulice, difúze), zplyňování po průchodu turbínou nebo přepadem, uvolňování pod přehradou, tok rostlinami, se také liší přehrada od přehrady (UNESCO/IHA, 2008).

Dále je tvorba skleníkových plynů a jejich uvolňování dáno parametry, které je možné rozdělit na primární a sekundární, viz *Tab. 2*. Primární parametry ovlivňují míru mikrobiálních procesů. Sekundární parametry ovlivňují míru výměny plynů mezi vodní plochou a atmosférou, to jsou převážně klimaticko-hydrometeorologické a technické parametry (UNESCO/IHA, 2008). Primárními parametry jsou: teplota vody, koncentrace rozpuštěného kyslíku, množství dostupných živin a organického materiálu, množství, složení a vlastnosti sedimentu, intenzita slunečního záření nebo turbidita. Sekundárními parametry pak může být: tvar a hloubka nádrže, změny hloubky, doba od založení nádrže („věk nádrže“), doba zdržení vody v nádrži, směr a rychlost větru, úhrn srážek, hydrostatický a atmosférický tlak, turbulence vody nebo opět již

zmiňovaná teplota vody (St. Louis et al., 2000; Tranvik et al., 2009; Barros et al., 2011; Schubert et al., 2012; Lidan, 2013; Prairie et al., 2017; Samiotis et al., 2018). Několik z těchto parametrů je přibližně dáno zeměpisnou šířkou (Barros et al., 2011).

Tab. 2: Parametry udávající **vytváření** a **uvolňování** zásoby plynů (UNESCO/IHA, 2008, Goldenfum, 2010)

<b>Primární</b> Ovlivňují míru mikrobiálních procesů	<b>Sekundární</b> Ovlivňují míru výměny plynů mezi vodou a atmosférou (klimaticko-hydrometeorologické a technické)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teplota vody</li> <li>• Koncentrace rozpuštěného kyslíku</li> <li>• Množství                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• dostupných živin a OM</li> <li>• sedimentu</li> </ul> </li> <li>• Složení a vlastnosti sedimentu</li> <li>• Intenzita slunečního záření</li> <li>• Turbidita</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tvar a hloubka nádrže</li> <li>• Změny hloubky</li> <li>• Doba                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• od založení nádrže (věk)</li> <li>• zdržení vody v nádrži</li> </ul> </li> <li>• Směr a rychlost větru</li> <li>• Úhrn srážek</li> <li>• Hydrostatický a atmosférický tlak</li> <li>• Turbulence vody</li> <li>• Teplota vody</li> </ul>

OM – organický materiál

### 3 Zhodnocení celkových emisí metanu z přehrad mírného pásma

Aktuálně se při zkoumání globálních syntéz z pohledu mírného pásma dostává po vypočítání průměru hodnot uvedených v *Tab. 3* hodnota  $18.4 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$ . Tato hodnota je i při pouhém odhadu z nejčastěji uváděných hodnot pro mírné pásmo předpokladatelná. Odpovídá-li tato hodnota alespoň přibližně realitě, analyzují následující části této práce. Dosavadní syntézy jsou totiž postiženy velkým množstvím problematického zobecňování a jiných nedostatků.

Deemer et al. (2016), který provedl poslední komplexní syntézu, uvádí hodnotu podstatně vyšší z důvodu zahrnutí více, nově provedených studií než St. Louis et al. (2000). Množství měřených emisí metanu pro některé přehrady mírného pásma, především je-li zahrnuta ebulice, se pohybují řádově ve stejných hodnotách, jako přehrady v tropickém pásmu (Almeida et al., 2016; Deemer et al., 2016). Oproti původní teorii, že emise přehrad tropického pásma jsou nesrovnatelně vyšší je tento poznatek nový a mění pohled na přehrady mírného pásma (Barros et al., 2011; Bastviken et al., 2011; Maeck et al., 2013; Deemer et al., 2016). Hodnota  $58,86 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$  (uvedeno v *Tab. 3*; Deemer et al., 2016) vychází po započtení výsledků z Gruca-Rokosz et al., 2010 a Gruca-Rokost et al., 2011, ti ale měřili pouze v létě a na podzim. Po odečtení těchto studií stále vychází  $28,43 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$ , což je dvakrát vyšší hodnota než ta, kterou uvádí St. Louis et al. (2000) v iniciační syntetické studii, která poprvé rozpoutala debatu o příspěvku přehrad k emisím metanu. Dále na základě měření na přehradách na řece Saar v Německu soudíme, že průměrné roční emise metanu přehrad mírného pásma mohou dosahovat hodnot až  $617,6 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$  (Maeck et al., 2013). A nepřiliš odlišné výsledky byly zjištěny pro přehradu Lake Wohlen ve Švýcarsku, kde je průměrná roční hodnota  $720 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$  (DelSontro et al., 2015). Vyšší čísla než většina hodnot uvedených ve zmíněných syntetických studiích, vychází také u dalších přehrad (Beaulieu et al., 2014; Tušer et al., 2017). Metanové emise přehrad mírného pásma tedy vynikají značnou variabilitou. Vystává otázka, je-li tato variabilita dána zejména (a) rozdílnými podmínkami a celou řadou ovlivňujících faktorů nebo (b) metodicky – způsobem měření a vyhodnocování emisí. Problematikou porovnávání a následných syntéz se zabývají následující části této práce.

Tab. 3: Vyjádření mírného pásma (orientačně, dle zeměpisné šířky) z globálních syntetizujících studií určujících celkové emise metanu z přehrad

Autor	Plocha 10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	CH <sub>4</sub> [Tg CH <sub>4</sub> .rok <sup>-1</sup> ]	CH <sub>4</sub> [mg CH <sub>4</sub> .m <sup>-2</sup> .den <sup>-1</sup> ]	Upřesnění lokace
St. Louis et al., 2000 <sup>1</sup>	900	4	14,6	25°–54,2°
Barros et al., 2011	–	–	11 <sup>2</sup>	25°–50°
Bastviken et al., 2011	117	0,7	16,4	25°–54°
Hertwich, 2013	130	0,7	19,7	25°–50°
Deemer et al., 2016 <sup>3</sup>	–	–	28,43 (58,86) <sup>4</sup>	25°–54°

<sup>1</sup> po vyřazení boreálních finských přehrad nad 54,2°N

<sup>2</sup> přečteno z grafu a zároveň vypočteno z SI

<sup>3</sup> vlastní úprava 25°–54° (108 přehrad), vychází vysoká díky dvěma vysokým číslům z prací Gruca-Rokosz et al., 2011a,b (Nielisz a Rzeszów); hodnota s ponecháním těchto dvou údajů uvedené v závorce

<sup>4</sup> průměr jednotlivých výsledků

### 3.1 Metodická variabilita – způsoby měření a vyhodnocování emisí

Co se týče porovnatelnosti získaných a zveřejňovaných hodnot emisí přehrad, je třeba si dávat pozor především na několik rozdílností a neslučitelností. Některé jsou již zmíněny v provedených syntézách. Mezi hlavní patří: (a) syntézy nejednotných metod sledování emisí metanu – přičemž mnohé nezahrnují prostorovou a časovou variabilitu, neuvádí sumu veškerých toků metanu do atmosféry nebo nepostihují množství metanu uvolňované do atmosféry po přechodu přes vrstvu přechodu voda-vzduch, (b) určení celkové velikosti a počtu přehrad (McGinnis et al., 2006; Deemer et al., 2016). Jak bylo popisováno v části 2.3.2 *Vliv přehrady na biogeochemický cyklus uhlíku* existuje několik způsobů uvolňování metanu do atmosféry. Velmi tedy záleží na tom, který způsob uvolňování budeme sledovat. Problém nastává, že někdy jsou monitorovány emise povrchu vodní nádrže a jindy emise celého přehradního komplexu, což zahrnuje navíc transport rostlinami (zejména litorálního porostu vodní nádrže), zplyňování po průchodu turbínou nebo přepadem a uvolňování metanu pod přehradou, jenž je zapříčiněné změnami způsobenými přehradou (difuzí nebo ebulicí). Je možné ještě započítat LCA stavby přehrady, o čemž bylo pojednááno v 2.3.1 *Emise při výstavbě, údržbě, provozu a odstraňování přehrady*, to však odpovídá obvykle pouze menší části z celkových emisí přehrad (Hertwich, 2013; Song et al., 2018).

### 3.1.1 Metody sledování emisí metanu

Uvedené nejčastější metody sledování emisí metanu lze rozdělit podle sledovaných toků metanu z vody do atmosféry. Problematické je, že každá metoda je schopna sledovat pouze určitý výsek emisí, který je dále rozdílnými způsoby propočítáván na celkové území přehrady. Porovnáním se zabývá Schubert et al. (2012), který uvádí kumulativní emise metanu sledované se značnou rozdílností právě dle užití metody. Při kvantifikaci emisí metanu pomocí Thin Boundary Layer metod (TBL) vychází až 8,5x nižší hodnota, nežli při použití metody eddy covariance towers či lapačů bublin (při podzimním míchání 350. den v roce 2008 měřeno na jezeru Rotsee ve Švýcarsku; přečteno z Figure 2). Při sledování emisí metanu pomocí stacionárních metod hrozí nebezpečí vynechání tzv. hot-spots (místa, kde je metan uvolňován ve větším množství), které jsou různě prostorově rozmístěné a jejich rozmístění se může v čase měnit (DelSontro et al., 2011; Hilgert et al., 2019).

#### 3.1.1.1 Metody sledování difúzního toku

Pro sledování difúzního toku metanu do atmosféry jsou používány následující metody: (1) Metoda výpočtu pomocí Thin Boundary Layer modelu (TBL), ta je založena na výpočtu difúzního toku na základě rozdílu koncentrace metanu na rozhraní vzduchu a vody a výměnném koeficientu, který závisí na rychlosti větru, rychlosti pohybu vody, srážkovém úhrnu a teplotním rozdílu na rozhraní vzduchu a vody (Goldenfum, 2010). Tato metoda může být velmi nepřesná (Takashi et al., 2002; Banerjee and MacIntyre, 2004) či velmi podhodnocená (Schubert et al., 2012; Deemer et al., 2016). Existuje několik TBL modelů, podle kterých se tok plynu do atmosféry počítá (Schubert et al., 2012).

(2) Metoda plovoucích komůrek (floating chambers) je často používaná a levná metoda. Funguje na principu zadržování plynů uvolňovaných z vodní hladiny do uzavřené vzduchem naplněné komůrky (chamber). Koncentrace metanu je následně určena analyticky (pomocí plynové chromatografie) a výpočtem, kde je počítáno se závislostí původní a konečné koncentrace jednotlivých plynů zachycených v komůrce. Otázkou je, jak dokáže tato metoda pokrýt variabilitu: (a) prostorovou – celkového toku metanu do atmosféry, protože plocha pokrytí je obvykle nízká, (b) časovou – měření zpravidla není diurnálně (ani ročně) kontinuální (Goldenfum, 2010; Schubert et al., 2012; Podgrajsek et al., 2014). Tento způsob může, pokud je umístěn v místech vysoké intenzity ebulice zachytit také ebuliční tok metanu do atmosféry (Varadharajan et al., 2010).

### 3.1.1.2 Metody sledování ebulice metanu

Pro sledování ebulice metanu jsou používány následující metody: (1) Lapače bublin (bubble traps), jako jsou inverzní trychtýře (inverted funnels), aj. Fungují na principu zachycení bublin a změny koncentrace ve směsi plynů ve vzorkovnici (Chanton and Whiting, 1995). Dále je zachycený plyn analyzován obvykle na plynovém chromatografu (DelSontro et al., 2010; Schubert et al., 2012). Tyto systémy mohou být automatizované a koncentrace uvolňovaného plynu je vypočítávána ze zaznamenávaných údajů (Varadharajan et al., 2010). Jejich nevýhodou podobně jako u metody floating chambers je nemožnost zachycení prostorové variability, z důvodu nízké plochy pokrytí (Wik et al., 2016).

(2) Hydroakustické metody fungují na principu sonaru/echolotu, který vysílá ultrazvukový paprsek, který se po odrazu vrací a tím zaznamenávají informace o okolí. Využívají se pro batymetrii, mapování břehů, lokalizování ryb nebo právě pro monitoring množství bublin procházejících vodním sloupcem (Ostrovsky et al., 2008; Frouzova et al., 2015). Mají výhodu zachycení prostorové variability a vyhodnocení hot spotů v kontextu celé přehrady (Zhao et al., 2015). Tyto metody jsou z pohledu použité techniky podstatně dražší (Varadharajan et al., 2010). Další nevýhodou je, že monitorují pouze průchod bublin vodním sloupcem. A rovněž, že přímo neurčují složení plynů v bublinách. Část metanu, který je v bublině, je na rozmezí vody a vzduchu, rozpuštěn ve vodě a není uvolněn do atmosféry (McGinnis et al., 2006).

### 3.1.1.3 Metody kombinující sledování difúzního toku a ebulice

Pro sledování difúzního toku v kombinaci s ebulicí je používána metoda eddy covariance towers. Ta poskytuje kontinuální měření bez větších nároků na obsluhu, ale je podstatně dražší než metoda floating chambers a zaznamenaná data je třeba ještě náročně, precizně a správně zpracovat a vyhodnotit (Goldenfum, 2010). Její hlavní předností je zachycení difúzního toku a ebulice zároveň a kontinuita, díky které je možné zachytit časovou variabilitu. Metoda eddy covariance patří mezi mikrometeorologické metody. Měřicí věž (tower) měří rychlost a směr větru, obsahuje plynový analyzátor a automaticky se zaznamenávají informace o obsahu sledovaného plynu, funguje na principu monitoringu turbulentního difúzního proudění plynů (Pattey et al., 2006; Eugster and Plüss, 2010; Eugster et al., 2011; Schubert et al., 2012). Nezachycuje ale prostorovou variabilitu, protože je většinou použito jen jediné měřicí věže (Podgrajsek et al., 2014)

### 3.2 Stanovení celkové velikosti plochy přehrad

Pro vyjádření celkových hodnot je třeba uvažovat, jaká je celková plocha v celé hodnocené zóně: globálně, pro klimatické pásmo či pro určité území, kontinent, zemi (Li et al., 2015). V určitém případě (při započítání emisí zplyňování, které je nutné při vyhodnocování emisí metanu celého přehradního komplexu) je rovněž zapotřebí celkové množství přehrad, to je světově datováno na 7320 pro přehrady větší než 0,1 km<sup>2</sup>, pro mírné pásmo je to 5534 (GRanD v1.3, McGill University, 2019).

Přístupy ke kalkulaci celkové rozlohy a počtu přehrad se různí až nečekaným způsobem. Zatímco iniciační syntézní studie St. Louis et al. (2000), která započala uvažování o potřebě započítat do významných zdrojů emisí metanu přehrady uvádí celkovou globální plochu na 1,5 mil. km<sup>2</sup>. Tutéž hodnotu použily také některé další studie (Barros et al., 2011). Bastviken et al. (2011) uvádí hodnotu 500 tis. km<sup>2</sup> a novější studie uvádí 310 tis. km<sup>2</sup> (Deemer et al., 2016). Odhady celkových emisí jsou z tohoto důvodu v novějších studiích nižší (viz *Tab. 4*). Tato variabilita je způsobená zcela odlišným přístupem při vyhodnocování celkové rozlohy. Dle St. Louis et al. (2000) není jednoduché určit hodnotu celkové globální plochy přehrad. Pro nejlepší možné údaje uvádí použití ICOLD (The International Commission On Large Dams, 1998) inventarizace z roku 1998, jenž vychází na necelých 400 000 km<sup>2</sup>. Nicméně předkládá hlavní nedostatky této inventarizace: (1) Neuvádí všechny velké přehrady, protože ne všechny jsou v databázi nutně ohlášeny, to je různé v závislosti na národních podmínkách. (2) Malé nádrže s přehradou nižší než 15 m obvykle neuvádí vůbec (The International Commission On Large Dams, 2011). (3) Výsledná hodnota nezahrnuje ani součet velikosti všech, v databázi uvedených, přehrad, z důvodu, že některé hodnoty v databázi nemají uvedenou rozlohu (St. Louis et al., 2000).

Bastviken et al. (2011) používá hodnotu uveřejněnou ICOLD Committee on Governance of Dam Projects v newsletteru z roku 2006 (The International Commission On Large Dams, 2006), kde je uvedeno, že velikost 500 tis. km<sup>2</sup> odpovídá celkové rozloze přehrad, rozložení v klimatických pásmech dle studie je uvedeno v *Příloze 5*. Dále Deemer et al. (2016) používá hodnotu vypočtenou Lehner et al. (2011), která kombinuje data z GRanD v1.1 a Pareto modelu (blíže popsáno ve zdrojové práci) pro nádrže menší než 10 km<sup>2</sup>, které GRanD databáze podhodnocuje.

Tab. 4: Odhady celkových emisí metanu přehrad dle dosavadních rešerší

Autor	Plocha 10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	Převod na 310 000 km <sup>2</sup>	CH <sub>4</sub> [Tg CH <sub>4</sub> .rok <sup>-1</sup> ]	CH <sub>4</sub> [mg CH <sub>4</sub> .m <sup>2</sup> .d <sup>-1</sup> ]
St. Louis et al., 2000	1500	14,5	70	128,1
Barros et al., 2011 <sup>a</sup>	1500	13,2	64	116,7
Bastviken et al., 2011	500	12,4	20	109,6
Deemer et al., 2016	310	17,7	17,7	156,4

<sup>a</sup>Data z St. Louis et al., 2000 aktualizované podle IPCC, 2007

Co se týče jednotlivých klimatických pásem dle GRanD v1.3, která byla publikována v roce 2019 (a oproti v1.1 zde přibylo necelých 50 000 km<sup>2</sup>, at' již nově postavených, nově zařazených či přehodnocených), rozloha dokumentovaných přehrad mírného pásma zabírá 164 tis. km<sup>2</sup>, přičemž rozloha tropického a boreálního pásma dohromady 158 tis. km<sup>2</sup>. To značí, že zhruba polovina rozlohy přehrad se nachází v mírném pásmu. Tato databáze, ale stále podhodnocuje velikost přehrad menších než 10 km<sup>2</sup> a nezapočítává vodní nádrže menší než 0,1 km<sup>2</sup>.



## 4 Diskuse

### 4.1 Vyjádření metanových emisí přehrad mírného pásma v rámci celkových metanových emisí

Chceme-li odpovědět na otázku, jaký je příspěvek přehrad mírného pásma k celkovým (biogenním, popřípadě všem) metanovým emisím, z provedených studií vyplývá, že není jednoduché určit takovou hodnotu (Saunois et al., 2016). Co se týče uváděných hodnot, jsou prezentovány v *Tab. 3* s komentářem v části 3 *Zhodnocení celkových emisí metanu z přehrad mírného pásma*. Jedním z hlavních nedostatků při pokusu o vyjádření celkového příspěvku metanových emisí přehrad mírného pásma je nedostatek dat zahrnujících ebuliční tok metanu z vodního sloupce do atmosféry. Některé práce zahrnující monitoring ebulice v mírném pásmu byly analyzovány a výstup je uveden v *Příloze 1*. Však taktéž v rámci dat zahrnujících ebuliční tok metanu je nezanedbatelná variabilita uváděných hodnot. Ta je částečně způsobena metodickou nejednotností a způsoby monitoringu, které nepokrývají časovou a prostorovou variabilitu (viz 4.2 *Metodické nejednotnosti*).

St. Louis et al. (2000) používá data, kde byla pouze u 6 ze 13 přehrad (co se týče mírného pásma) použita data i z monitorování emisí ebulice. Deemer et al. (2016) zmiňuje, že pokud se sleduje ebulice a difúze zároveň, průměrná hodnota toku metanu do atmosféry je dvojnásobná, oproti pouhému sledování difúzního toku. Pro hodnocení mírného pásma používá Deemer et al. (2016) jako vstupní data stále pouze 52 % zdrojových prací, které zohledňují ebulici. To odpovídá přibližně jedenácti hodnoceným studiím (např. DelSontro et al., 2010; Deemer et al., 2011; Eugster et al., 2011; Diem et al., 2012; Maeck et al., 2013; Maeck et al., 2014; Harrison et al., 2017). Protože některé přehrady hodnotí více studií, byla ebulice sledována jen u 18 ze 74 přehrad, což je necelých 25 % a potvrzuje to tezi, že emise metanu mírného pásma budou nadále velmi pravděpodobně podhodnoceny (Wik et al., 2016). Deemer et al. (2016) uvádí, že není statisticky významný rozdíl mezi emisemi metanu přehrad v tropech a v mírném pásmu, jak bylo doposud předpokládáno. Monitoringem ebulice metanu v mírném pásmu se stále zabývá minimum studií, přestože ebulice je u velké části přehrad převažující způsob toku metanu z vody do atmosféry (DelSontro et al., 2010; Bastviken et al., 2011; Schubert et al., 2012; Beaulieu et al., 2016). Je třeba dát si pozor, že u některých studií je hodnocena pouze ebulice ze sedimentů při dně, ale chybí vyhodnocení emisí (Trojanowska et al., 2009). Problémem vyjádření celkových emisí metanu na základě dat z monitoringu jednotlivých přehrad může být

však také velká variabilita parametrů a probíhajících procesů (Goldenfum, 2010; Goldenfum, 2012; Maeck et al., 2013).

## 4.2 Metodické nejednotnosti

Při monitoringu emisí je zápoleno s jejich prostorovou a časovou (vč. sezónní) variabilitou (Tušer et al., 2016). Díky nejednotnostem v metodice je velmi nepřesné slučovat jednotlivé studie pro globální vyhodnocení. Některé studie uvádí data pouze za sledované období, některé se snaží prostorovou a časovou variabilitu poznat a vyjádřit medián či průměrnou hodnotu celkových emisí metanu za rok na jednotku plochy. Sledované období je často v létě či na podzim, kdy je hodnota ebulice a celkových emisí metanu vysoká (Wik et al., 2016). Tato situace se vyskytla například, jak již bylo rozebíráno, při zařazení hodnot Gruca-Rokosz et al. (2011a,b) do syntézy Deemer et al. (2016), kde byly emise metanu sledovány pouze v červnu, červenci a září. Vyjádření celkových emisí dané přehrady není snadné a vyžaduje kontinuální komplexní monitoring, který ale často není realizován. Uvedené výsledky v jednotlivých studiích se liší způsobem prezentace, pro jejich sloučení je nutné provést převedení na stejné jednotky (Liden, 2013). Dle Goldenfum (2010) je vhodnou jednotkou pro emise metanu  $\text{mg C-CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  nebo  $\text{mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , kde první ze dvou možností znamená vyjádření množství metanu jako množství uhlíku, které v sobě nese. Tudíž platí, že  $1 \text{ mg C-CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  se rovná přibližně  $4/3 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (Liden, 2013).

### 4.2.1 Časová a prostorová variabilita

Protože především ebuliční tok je velmi časově a prostorově variabilní, je třeba ovzorkovat velké území pro vyhodnocení emisí metanu a sledovat jej kontinuálně přes celý rok, ideálně dva roky (Goldenfum, 2010; Wik et al., 2016). Některé studie se snaží pokrýt prostorovou variabilitu umístěním velkého množství plovoucích komůrek (FC – floating chambers) nebo lapačů bublin (BT – bubble traps) na specifická místa. Jejich rozmístění se určuje dle faktorů, jako je hloubka, vzdálenost od hráze, vzdálenost od významných vstupů alochtonních organických látek a živin nebo dle dalších specifických faktorů (Beaulieu et al., 2016). Z analyzovaných studií v *Příloze 1* byl tento způsob pouze u první zde citované práce (Beaulieu et al., 2016; Wik et al., 2016). Pro sledování prostorové variability je vhodná hydroakustická metoda doplněná lapači bublin pro rozbor složení unikajícího plynu (DelSontro et al., 2015; Tušer et al., 2016). Tyto přístupy jsou vhodné pro monitoring, jak tzv. hot-spots, míst s vysokým množstvím produkovaného a unikajícího metanu, tak tzv. low-spots, míst s velmi nízkým, či žádným, množstvím produkovaného a unikajícího metanu (Hilgert et al., 2019). Variabilita časová a prostorová vyhodnocená pro celou přehradu byla z analyzovaných

studií (*Příloha 1*) pravděpodobně zachycena pouze u třech přehrad, a to u Harsha Lake, Lake Wohlen a přehrada Římov (*Příloha 1*). U ostatních studií byl výzkum zaměřen buď na časovou variabilitu, které dosahovali kontinuálním měřením a stejnou metodikou v průběhu roku, na omezeném počtu míst (např. Wilkinson et al., 2015; Sollberger et al., 2017; Samiotis et al., 2018). Kontinuální měření, na jednom či velmi omezeném počtu míst, nám poskytuje informaci pouze o časovém a sezónním trendu, oproti tomu, ale nemusí poskytovat informace o reálných emisích sledovaného systému. Zachycení prostorové variability je náročnější a zabývá se jím méně studií. Výzkum je nutné spojit i s monitorováním variability časové (sezónní), jelikož prostorová variabilita se v čase mění. Vhodné je použití pravidelného monitorování pomocí hydroakustických metod (Tušer et al., 2017). Některé studie aplikují tento způsob, ale pouze nárazově (Maeck et al., 2013; DelSontro et al., 2015; Harrison et al., 2017; Sollberger et al., 2017). Kontinuální použití hydroakustických metod je vzácné (Tušer et al., 2017).

Většina pozorování, která nejsou automatická, jsou prováděna ve dne, nabízí se tedy otázka, jaký je denní rytmus emisí metanu. Faktorů ovlivňujících denní dynamiku emisí metanu je mnoho. Může to být například: diurnální míchání z důvodu změn teploty vody (Podgrajsek et al., 2014), změna rychlosti větru, teploty nebo změny výšky hladiny (Eugster et al., 2011; Sollberger et al., 2017).

#### **4.2.2 Množství emisí metanu po průchodu přehradou**

Zplyňování (degassing) metanu rozpuštěného ve vodě po průchodu turbínou nebo přepadem a emise metanu pod přehradou často nejsou zahrnuty do celkových emisí metanu přehrady (Fearnside and Pueyo, 2012). Hodnocení těchto toků uvolňování plynu do atmosféry dává smysl především u přehrad s velkou hloubkou, kde je voda čerpána z míst s anaerobními podmínkami, kde je velké množství rozpuštěného metanu (např. Guérin et al., 2006; Eugster et al., 2011; Diem et al., 2012; Saunois et al., 2016). Z analyzovaných studií (*Příloha 1*) bylo zplyňování, a popř. emise metanu pod přehradou, hodnoceny přibližně u ¼ hodnocených přehrad (např. Beaulieu et al., 2014; Bevelhimer et al., 2016; Descloux et al., 2017). Jiné se soustředí často pouze na ebulici nebo pouze na celkové emise metanu povrchu vodní nádrže (např. DelSontro et al., 2015; Tušer et al., 2017). Existují případy, kdy lze odůvodněně zanedbat tento tok metanu do atmosféry, Harrison et al. (2017) hodnotili emise metanu přehrady Lacamas, jež není klasickou vodní nádrží s velkou přehradou. U ní je tudíž předpokladatelné, že emise zplyňováním nebudou příliš vysoké (Diem et al., 2012).

### 4.3 Antropogenní příspěvek metanových emisí výstavbou přehrad

Syntéza emisí metanu z přehrad mírného pásma samozřejmě nevypovídá o antropogenním příspěvku. Ohledně role přehrad v uhlíkovém cyklu se vedou dohady (Muller, 2019). Je však jisté, že mnohé jsou zdrojem metanu, jenž je významný skleníkový plyn. Množství autorů se shoduje, že emise s věkem přehrady klesají (Barros et al., 2011; Goldenfum, 2010; Gunkel, 2014). V nynějším naléhavém boji za omezování emisí skleníkových plynů, by tedy bylo vhodné stavět přehrady, s přihlédnutím také na tento faktor (Gunkel, 2009; Zarfl et al., 2014). A u již stojících přehrad omezovat ovlivnitelné faktory, které stimulují vznik metanu a jeho uvolňování ve vyšším množství – jako je eutrofizace, management změn vodní hladiny, aj (Beaulieu et al., 2019; Hilgert et al., 2019). Z důvodu složitosti rozdělení antropogenního a přírodního příspěvku k celkovým emisím metanu je možné emise z přehrad pouze porovnat s jinými zdroji metanu. Pro názornost, která vychází ze současného poznání, lze uvést srovnání např. s: celkovými biogenními emisemi metanu, emisemi mokřadů nebo emisemi z chovu některých hospodářských zvířat.

Celkové biogenní emise dle *Přílohy 3* jsou vyhodnoceny na  $372 \text{ Tg CH}_4 \cdot \text{rok}^{-1}$  (Howarth, 2019). Při použití hodnot z *Tab. 4* se dle dosavadních rešerší přehrady podílí z 5 – 19 % na celkových biogenních (tzn. mikrobiálního původu) emisích metanu. Při srovnání s emisemi mokřadů, které jsou  $185 \text{ Tg CH}_4 \cdot \text{rok}^{-1}$  (*Příloha 2*; Saunois et al., 2016), jsou v tomto případě emise přehrad 2,6x – 10,5x nižší než emise mokřadů. Nakonec při porovnání s emisemi z chovu některých hospodářských zvířat, které jsou  $106 \text{ Tg CH}_4 \cdot \text{rok}^{-1}$  (*Příloha 2*; Saunois et al., 2016), jsou emise přehrad 1,5x – 6x nižší.

Jaký je opravdový antropogenní příspěvek přehrad k celkovému množství emisí metanu není však snadno zjistitelné z důvodu potřeby odečíst od současných emisí:

- Emise, které na území byly před stavbou přehrady (Goldenfum, 2010; Hertwich, 2013; Prairie et al., 2017; Samiotis et al., 2018)
- Emise, které vznikaly, ale již nevzniknou v nižších částech toku či v ústí, protože se místo jejich uvolnění „přemístí“ již do přehrady (Tremblay et al., 2004; Maeck et al., 2013; DelSontro et al., 2016; Muller, 2019)

#### 4.3.1 Srovnání metanových emisí ekosystému před stavbou přehrady a po ní

Pro zhodnocení antropogenního příspěvku, či antropogenně vyvolané změny v cyklu metanu, je třeba znát, či alespoň modelovat, emise metanu ekosystému, který byl zatopen (Kelly et al., 1997; Goldenfum, 2010). Z analyzovaných studií (*Příloha 1*) byla větší pozornost rozdílu emisí metanu před zatopením a po zatopení dána pouze u jedné studie (Samiotis et al., 2018). Přirozené emise metanu v jednotlivých ekosystémech, které jsou zatopeny, se velmi liší.

Dle Ortiz-Llorente and Alvarez-Cobelas (2012) tento rozdíl není především dán zeměpisnou šířkou nebo klimatickým pásmem. Největší emise metanu mohou být u jezer a mokřadů. Je-li zatopen mokřad může stavbou přehrady, v horizontu desítek let a za vhodných podmínek, antropogenně dojít ke snížení emisí metanu. Pro představu, celosvětově určený medián ročního uvolňovaného množství metanu z mokřadů je  $50 \text{ mg CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (Ortiz-Llorente and Alvarez-Cobelas, 2012). Na druhou stranu některé zatopené ekosystémy mohly fungovat jako sink (úložna) uhlíku a produkovat jen minimum metanu. To mohou být lesy, ale i samotné půdy (Hassink, 1997; Prairie et al., 2017).

Na přehradu je třeba hledět nejen lokálně, ale především globálně. Řeky, jako krevní řečiště krajiny (Hemingway, 2015; Bonacci, 2016), jsou jednou ze zásadních součástí hydrologického cyklu i cyklu uhlíku. Přehrazením řeky vznikne překážka a organický materiál i živiny nemohou proudit volně do oceánu (Ligon et al., 1995; Vörösmarty et al., 2003; Maavara et al., 2017). Živiny, které by přirozeně proudily do oceánu, by byly základní součástí živného substrátu planktonu, který váže oxid uhličitý díky fotosyntéze. Část vyprodukované biomasy s navázaným uhlíkem by byla poté ukládána na delší čas na dno oceánu, část by se stávala velmi důležitým prvkem v globálním koloběhu živin a část by byla emitována zpět díky respiraci. Převažuje-li tento vliv přehrady v celkovém zhodnocení, je přehrada významným zdrojem skleníkových plynů (Parekh, 2008; Subramaniam et al., 2008).

Na druhou stranu je možné, že emise metanu a dalších skleníkových plynů, které jsou uvolněny v místě přehrady, by mohly být uvolněny níže po toku (Muller, 2019). Přehrada však zároveň narušuje: (a) přirozené cykly a samočistící procesy, vč. metanotrofie (Matoušů et al., 2019) a (b) terestrické ekosystémy, které váží uhlík, ať už v místě přehrady, níže po toku nebo v ústí řek (Ezcurra et al., 2019). To vede zase zpět ke konstatování, že přehrady zvyšují celkové emise skleníkových plynů, včetně metanu (Nakayama and Pelletier, 2018).

#### **4.4 Určení celkové velikosti přehrad mírného pásma**

Mezi další nedostatky při pokusu o vyjádření celkového příspěvku metanových emisí přehrad mírného pásma je nejednotnost ve vyjádření celkové plochy přehrad. Tento problém se dotýká jak vyjádření globálních hodnot, tak hodnot mírného pásma. Variabilita dosavadních vyjádření celkových emisí je z velké části dána právě tímto. V databázích chybí zejména menší přehrady (St. Louis et al., 2000). Pro účel zhodnocení rozloh přehrad v jednotlivých klimatických pásmech (*Příloha 5*) byly největší vodní plochy, ovlivněné zahrazením odtoku z jezera, vyřazeny (McGill University, 2019). Menší, člověkem vytvořené, vodní nádrže (např. malé přehrady a rybníky) je vhodné nevykloučovat z těchto syntéz. Rozloha malých nádrží a rybníků menších než  $0,1 \text{ km}^2$  je odhadována na 3 – 30 % z celkové globální rozlohy všech

vodních nádrží (Downing et al., 2006; Lehner et al., 2011). Je-li, dle definice přehrad, nevhodné tyto plochy zahrnovat do určení celkových emisí metanu přehrad, pak je důležité na ně nezapomínat, protože se rovněž podílejí na produkci a uvolňování metanu (Holgerson and Raymond, 2016; Aben et al., 2017; Grinham et al., 2018; Ollivier et al., 2019). Malé vodní plochy (jako jsou rybníky), jsou často mělké a intenzivně využívané, popř. hnojené. To může stimulovat tvorbu a uvolňování metanu do atmosféry (Rutegwa et al., 2019).

## 5 Závěr

Hodnoty emisí metanu z přehrad mírného pásma vykazují významnou variabilitu. Ebulice, uvolňování metanu do atmosféry z bublin uvolňujících se ze sedimentu, jako významná složka emisí metanu z přehrad mírného pásma, vykazuje značnou časovou (sezónní) a prostorovou variabilitu. Nejen, že hodnocením ebulice se zabývá zatím malé množství prací, ale i výsledky studií hodnotících ebulici se díky metodám monitoringu velmi liší. Většinou z důvodu menší náročnosti sledují časovou (sezónní) variabilitu jen na několika málo místech v přehradě. Převažují studie vynechávající zimu či zaměřující se pouze na léto a podzim, kdy bývají emise metanu vyšší. Některé studie sledují prostorovou variabilitu. Při jejím monitoringu je nutné použití hydroakustických metod nebo velkého množství vhodně rozmístěných plovoucích komůrek, lapačů bublin či jiných metod. Jen velmi malý počet prací se snaží určit časovou (sezónní) a prostorovou variabilitu zároveň. Standardizace metodiky zatím není příliš možná, protože je třeba ji vyvíjet směrem k pochopení variability a zvýšení přesnosti. Bude-li v budoucnu možná je však otázka, protože podmínky jednotlivých přehrad se velmi liší a kvalitní výzkum v této oblasti je, jak časově, tak technicky, dosti náročný. Pro správné zhodnocení emisí metanu z přehrad je nutná především kontinuita monitoringu a komplexní sledování veškerých toků metanu. V případě kladení většího důrazu na tento výzkum, bychom mohli být schopni vyjádřit, jaký je příspěvek přehrad k celkovým metanovým emisím a blíže porozumět jejich roli v uhlíkovém biogeochemickém cyklu. Zhodnocení antropogenního příspěvku emisí metanu stavbou přehrad je možné pouze po porovnání změněného říčního ekosystému s původním.

Pro zhodnocení celkových emisí metanu z přehrad je velmi důležité uvádět v jednotlivých studiích přesnou metodiku a následně uvažovat nejednotnost výsledných hodnot při syntéze. Pro zpřesnění vyhodnocení celkových emisí metanu z přehrad je rovněž potřebné sjednotit vyjádření celkové plochy přehrad.

V dalším studiu této problematiky je vhodné se zabývat reakcí emisí metanu z přehrad na významné činitele. Výzkum by se měl tudíž zaměřovat na toto téma s ohledem na<sup>1</sup>: (a) klimatickou změnu a oteplování, které stimuluje především ebulici, (b) klimatickou změnu a zvyšující se frekvenci výskytu extrémních hydro-meteorologických jevů, jako je sucho a přívalový déšť a (c) efekt eutrofizace. Nové přehrady je třeba stavět s ohledem na emise

---

<sup>1</sup> pozn. Již nyní se z části zaměřuje, viz několik nových prací (Aben et al., 2017; DelSontro et al., 2018; Kosten et al., 2018, Beaulieu et al., 2019; Deemer and Harrison, 2019; Marcé et al., 2019; Sanches et al., 2019).

metanu a dalších skleníkových plynů, které mohou být velmi významné. U již postavených je možné přizpůsobit management kompromisu (socio-ekonomicko-environmentálnímu), kde jedním z faktorů budou emise metanu. Další výzkum by se měl zabývat také tím, jaký management u již postavených přehrad je náležitý pro redukci metanových emisí. Jednou z možností může být vhodná regulace vodní hladiny<sup>2</sup>. Mezi další otázky, které je nasnadě si klást, mohou patřit následující: Jaký vliv mají přehrady na oceánské ekosystémy? Dá se metan zplyňovaný po průchodu turbínami energeticky využít? Jsou emise metanu vyšší u přehrad tropického pásma než u přehrad pásma mírného?

---

<sup>2</sup> pozn. Tímto se také zabývá několik nových prací (Deemer and Harrison, 2019; Hao et al., 2019; Hilgert et al., 2019).



## 6 Citace

- Aben, Ralf C.H., Nathan Barros, Ellen Van Donk, Thijs Frenken, Sabine Hilt, Garabet Kazanjian, Leon P.M. Lamers, et al. 2017. "Cross continental increase in methane ebullition under climate change." *Nature Communications* (Nature Publishing Group) 8 (1).
- Abril, Gwenaëel, Frédéric Guérin, Sandrine Richard, Robert Delmas, Corinne Galy-Lacaux, Philippe Gosse, Alain Tremblay, Louis Varfalvy, Marco Aurelio Dos Santos, and Bohdan Matvienko. 2005. "Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana)." *Global Biogeochemical Cycles* 19 (4).
- Allen, G. 2016. "Rebalancing the global methane budget." *Nature* 538, 10: 46-48.
- Almeida, Rafael M., Gabriel N. Nóbrega, Pedro C. Junger, Aline V. Figueiredo, Anízio S. Andrade, Caroline G.B. de Moura, Denise Tonetta, et al. 2016. "High primary production contrasts with intense carbon emission in a eutrophic tropical reservoir." *Frontiers in Microbiology* (Frontiers Media S.A.) 7 (5).
- Ansar, Atif, Bent Flyvbjerg, Alexander Budzier, and Daniel Lunn. 2014. "Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development." *Energy Policy* (Elsevier BV) 69: 43-56.
- Aufdenkampe, Anthony K., Emilio Mayorga, Peter A. Raymond, John M. Melack, Scott C. Doney, Simone R. Alin, Rolf E. Aalto, and Kyungsoo Yoo. 2011. "Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere." *Frontiers in Ecology and the Environment*. 53-60.
- Barros, Nathan, Jonathan J. Cole, Lars J. Tranvik, Yves T. Prairie, David Bastviken, Vera L.M. Huszar, Paul Del Giorgio, and Fábio Roland. 2011. "Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude." *Nature Geoscience* 4 (9): 593-596.
- Bastviken, David, Jonathan Cole, Michael Pace, and Lars Tranvik. 2004. "Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate." *Global Biogeochemical Cycles* 18 (4): 1-12.
- Bastviken, David, Lars J. Tranvik, John A. Downing, Patrick M. Crill, and Alex Enrich-Prast. 2011. "Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink." *Science*. Vol. 331. no. 6013. 1 7. 50.
- Beaulieu, Jake J., David A. Balz, M. Keith Birchfield, John A. Harrison, Christopher T. Nietch, Michelle C. Platz, William C. Squier, et al. 2018. "Effects of an Experimental Water-level Drawdown on Methane Emissions from a Eutrophic Reservoir." *Ecosystems* (Springer New York LLC) 21 (4): 657-674.
- Beaulieu, Jake J., Michael G. McManus, and Christopher T. Nietch. 2016. "Estimates of reservoir methane emissions based on a spatially balanced probabilistic-survey." *Limnology and Oceanography* (Wiley Blackwell) 61: S27-S40.
- Beaulieu, Jake J., Rebecca L. Smolenski, Christopher T. Nietch, Amy Townsend-Small, and Michael S. Elovitz. 2014. "High methane emissions from a midlatitude reservoir draining an agricultural watershed." *Environmental Science and Technology* (American Chemical Society) 48 (19): 11100-11108.
- Beaulieu, Jake J., Tonya DelSontro, and John A. Downing. 2019. "Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century." *Nature Communications* (Nature Publishing Group) 10 (1).
- Bednarek, ANGELA T. 2001. "Undamming rivers: A review of the ecological impacts of dam removal." *Environmental Management*. Vol. 27. no. 6. 803-814.
- Bevelhimer, Mark S., Arthur J. Stewart, Allison M. Fortner, Jana R. Phillips, and Jennifer J. Mosher. 2016. "CO<sub>2</sub> is dominant greenhouse gas emitted from six hydropower reservoirs in southeastern United States during peak summer emissions." *Water (Switzerland)* (MDPI AG) 8 (1).
- Bonacci, Ognjen. 2016. "River - The Bloodstream Of Landscape And Catchment."

- Cole, J. J., Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, et al. 2007. "Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget." *Ecosystems* 10 (1): 171-184.
- Deemer, Bridget R., and John A. Harrison. 2019. "Summer Redox Dynamics in a Eutrophic Reservoir and Sensitivity to a Summer's End Drawdown Event." *Ecosystems* (Springer New York LLC).
- Deemer, Bridget R., John A. Harrison, Siyue Li, Jake J. Beaulieu, Tonya Delsontro, Nathan Barros, José F. Bezerra-Neto, Stephen M. Powers, Marco A. Dos Santos, and J. Arie Vonk. 2016. "Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis." *BioScience*. Vol. 66. no. 11. Oxford University Press. 949-964.
- DelSontro, T., D. F. McGinnis, B. Wehrli, and I. Ostrovsky. 2015. "Size does matter: Importance of large bubbles and small-scale hot spots for methane transport." *Environmental Science and Technology* (American Chemical Society) 49 (3): 1268-1276.
- DelSontro, Tonya, Daniel F. McGinnis, Sebastian Sobek, Ilia Ostrovsky, and Bernhard Wehrli. 2010. "Extreme methane emissions from a swiss hydropower Reservoir: Contribution from bubbling sediments." *Environmental Science and Technology* 44 (7): 2419-2425.
- DelSontro, Tonya, Manuel J. Kunz, Tim Kempter, Alfred Wüest, Bernhard Wehrli, and David B. Senn. 2011. "Spatial heterogeneity of methane ebullition in a large tropical reservoir." *Environmental Science and Technology* 45 (23): 9866-9873.
- Descloux, S., V. Chanudet, D. Serça, and F. Guérin. 2017. "Methane and nitrous oxide annual emissions from an old eutrophic temperate reservoir." *Science of the Total Environment* (Elsevier B.V.) 598: 959-972.
- Deshmukh, C., D. Serça, C. Delon, R. Tardif, M. Demarty, C. Jarnot, Y. Meyerfeld, et al. 2014. "Physical controls on CH<sub>4</sub> emissions from a newly flooded subtropical freshwater hydroelectric reservoir: Nam Theun 2." *Biogeosciences* (Copernicus GmbH) 11 (15): 4251-4269.
- Diem, T., S. Koch, S. Schwarzenbach, B. Wehrli, and C. J. Schubert. 2012. "Greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O) from several perialpine and alpine hydropower reservoirs by diffusion and loss in turbines." *Aquatic Sciences* 74 (3): 619-635.
- Santos, Dos, M. A., and L. P. Rosa. 2011. "Greenhouse gas emissions from hydropower reservoirs: A synthesis of knowledge." *International Journal on Hydropower and Dams* 18 (4): 71-74.
- Santos, Dos, Marco Aurelio, Luiz Pinguelli Rosa, Bohdan Sikar, Elizabeth Sikar, and Ednaldo Oliveira dos Santos. 2006. "Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants." *Energy Policy* 34 (4): 481-488.
- Downing, J A, Y T Prairie, J J Cole, C M Duarte, L J Tranvik, R G Striegl, W H McDowell, et al. 2003. "Downing, J. A., et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnol. Oceanogr.*, 51(5), 2006, 2388–2397." 2388-2397.
- Downing, John A. 2008. "Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot." *Limnetica* 29 (1): 9-24.
- EEA (European Environmental Agency). 2019. *Trends in atmospheric concentrations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O* [Online]. [cit. 2019-04-25] [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-4#tab-chart\\_5\\_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre\\_config\\_pollutant%22%3A%5B%22CH4%20\(ppb\)%22%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-4#tab-chart_5_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_pollutant%22%3A%5B%22CH4%20(ppb)%22%5D%7D%7D).
- EIA (U.S. Energy Information Administration). 2016. *The world's nine largest operating power plants are hydroelectric facilities - Today in Energy* [Online]. [cit. 2019-04-25] <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=28392>.
- Etiopie, Giuseppe, Keith R. Lassey, Ronald W. Klusman, and Enzo Boschi. 2008. "Reappraisal of the fossil methane budget and related emission from geologic sources." *Geophysical Research Letters* 35 (9).

- Eugster, W., T. Delsonro, and S. Sobek. 2011. "Eddy covariance flux measurements confirm extreme CH<sub>4</sub> emissions from a Swiss hydropower reservoir and resolve their short-term variability." *Biogeosciences* 8 (9): 2815-2831.
- Eugster, Werner, and Peter Plüss. 2010. "A fault-tolerant eddy covariance system for measuring CH<sub>4</sub> fluxes." *Agricultural and Forest Meteorology* 150 (6): 841-851.
- Ezcurra, E., E. Barrios, P. Ezcurra, A. Ezcurra, S. Vanderplank, O. Vidal, L. Villanueva-Almanza, and O. Aburto-Oropeza. 2019. "A natural experiment reveals the impact of hydroelectric dams on the estuaries of tropical rivers." *Science Advances* (American Association for the Advancement of Science) 5 (3).
- Fearnside, Philip M. 2005. "Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (2005) 10: 675-691 C DO HYDROELECTRIC DAMS MITIGATE GLOBAL WARMING? THE CASE OF BRAZIL'S CURU'ACURU' CURU'A-UNA DAM."
- Fearnside, Philip M., and Salvador Pueyo. 2012. "Greenhouse-gas emissions from tropical dams." *Nature Climate Change* 2 (6): 382-384.
- Friedl, Gabriela, and Alfred Wüest. 2002. "Disrupting biogeochemical cycles-Consequences of damming."
- Frouzova, Jaroslava, Michal Tušer, and Petr Stanovsky. 2015. "Quantification of methane bubbles in shallow freshwaters using horizontal hydroacoustical observations." *Limnology and Oceanography: Methods* (American Society of Limnology and Oceanography Inc.) 13 (11): 609-616.
- Furey, P. C., R. N. Nordin, and A. Mazumder. 2004. "Water level drawdown affects physical and biogeochemical properties of littoral sediments of a reservoir and a natural lake." *Lake and Reservoir Management* 20 (4): 280-295.
- Galy-Lacaux, Corinne, Robert Delmas, Corinne Jambert, Jean François Dumestre, Louis Labroue, Sandrine Richard, and Philippe Gosse. 1997. "Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana." *Global Biogeochemical Cycles* (Blackwell Publishing Ltd) 11 (4): 471-483.
- GDW (Global Dam Watch). n.d. *Future Hydropower Reservoirs and Dams [Online]*. [cit. 2019-04-25] <http://globaldamwatch.org/fhred/>.
- Gibson, Luke, Elspeth N. Wilman, and William F. Laurance. 2017. "How Green is 'Green' Energy?" *Trends in Ecology and Evolution*. Vol. 32. no. 12. Elsevier Ltd, 12 1. 922-935.
- Goldenfum, J. A. (Joel Avruch), International Hydropower Association., and UNESCO/IHA Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project. 2010. *GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs : derived from: The UNESCO/IHA Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project*. International Hydropower Association (IHA).
- Goldenfum, Joel Avruch. 2012. "Challenges and solutions for assessing the impact of freshwater reservoirs on natural GHG emissions." *Ecohydrology and Hydrobiology* (Elsevier B.V.) 12 (2): 115-122.
- Grinham, Alistair, Simon Albert, Nathaniel Deering, Matthew Dunbabin, David Bastviken, Bradford Sherman, Catherine E. Lovelock, and Christopher D. Evans. 2018. "The importance of small artificial water bodies as sources of methane emissions in Queensland, Australia." *Hydrology and Earth System Sciences* (Copernicus GmbH) 22 (10): 5281-5298.
- Gruca-Rokosz, Renata, E. W.A. Czerwieniec, and Janusz A. Tomaszek. 2011. "Methane emission from the nielisz reservoir." *Environment Protection Engineering* 37 (3): 101-109.
- Gruca-Rokosz, Renata, Janusz Tomaszek, Piotr Koszelnik, and Ewa Czerwieniec. 2011. "Methane and carbon dioxide emission from some reservoirs in SE Poland." *Limnological Review* (Walter de Gruyter GmbH) 10 (1): 15-21.
- Guérin, Frédéric, Gwenaël Abril, Sandrine Richard, Benoît Burbán, Cécile Reynouard, Patrick Seyler, and Robert Delmas. 2006. "Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers." *Geophysical Research Letters* (American Geophysical Union) 33 (21).

- Guérin, Frédéric, Chandrashekhara Deshmukh, David Labat, Sylvie Pighini, Axay Vongkhamsoo, Pierre Guédant, Wanidaporn Rode, et al. 2016. "Effect of sporadic destratification, seasonal overturn, and artificial mixing on CH<sub>4</sub> emissions from a subtropical hydroelectric reservoir." *Biogeosciences* (Copernicus GmbH) 13 (12): 3647-3663.
- Gunkel, Günter. 2009. "Hydropower - A green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions." *Clean - Soil, Air, Water* 37 (9): 726-734.
- Gunkel, Günter, and Technische Universität, Berlin. 2007. *Reservoir and river basin management : exchange of experiences from Brazil, Portugal and Germany*. Univ.-Verl. der TU.
- Gürbüz, A. 2006. "The Role of Hydropower in Sustainable Development." 63-70.
- Hao, Qingju, Shijie Chen, Xue Ni, Xiaoxi Li, Xinhua He, and Changsheng Jiang. 2019. "Methane and nitrous oxide emissions from the drawdown areas of the Three Gorges Reservoir." *Science of the Total Environment* (Elsevier B.V.) 660: 567-576.
- Harrison, John A., Bridget R. Deemer, M. Keith Birchfield, and Maria T. O'Malley. 2017. "Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission." *Environmental Science and Technology* (American Chemical Society) 51 (3): 1267-1277.
- Hassink, Jan. 1997. "The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles." *Plant and Soil* (Kluwer Academic Publishers) 191 (1): 77-87.
- Hermoso, Virgilio. 2017. "Freshwater ecosystems could become the biggest losers of the Paris Agreement." *Global Change Biology*. Vol. 23. no. 9. Blackwell Publishing Ltd, 9 1. 3433-3436.
- Hertwich, Edgar G. 2013. "Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA." *Environmental Science and Technology* 47 (17): 9604-9611.
- Hertwich, Edgar G., Thomas Gibon, Evert A. Bouman, Anders Arvesen, Sangwon Suh, Garvin A. Heath, Joseph D. Bergesen, Andrea Ramirez, Mabel I. Vega, and Lei Shi. 2014. "Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies." *Proceedings of the National Academy of Sciences* (Proceedings of the National Academy of Sciences) 112 (20): 6277-6282.
- Hilgert, Stephan, Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, and Stephan Fuchs. 2019. "Redistribution of methane emission hot spots under drawdown conditions." *Science of the Total Environment* (Elsevier B.V.) 646: 958-971.
- Hnatukova, Petra, Ivana Kopecka, and Martin Pivokonsky. 2011. "Adsorption of cellular peptides of *Microcystis aeruginosa* and two herbicides onto activated carbon: Effect of surface charge and interactions." *Water Research* (Pergamon) 45 (11): 3359-3368.
- Holgerson, Meredith A., and Peter A. Raymond. 2016. "Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds." *Nature Geoscience* (Nature Publishing Group) 9 (3): 222-226.
- Howarth, Bob. 2019. "The Role of Shale Gas Development in the Global Methane Cycle: New Insights from 13 C and 14 C data Biogeochemistry Seminar Series Cornell University [Online]."
- Howarth, Robert. 2015. "Methane emissions and climatic warming risk from hydraulic fracturing and shale gas development: implications for policy." *Energy and Emission Control Technologies* (Dove Medical Press Ltd.) 45.
- Chanton, JP, and GJ Whiting. 1995. "Trace gas exchange in freshwater and coastal marine environments: ebullition and transport by plants." In *Biogenic trace gases : measuring emissions from soil and water*, by JP Chanton and GJ Whiting, edited by P. A. (Pamela A.) Matson and R. C. (Robert Curtis) Harriss, 98-125. Oxford: Blackwell Science.
- ICOLD. 2011. „Constitution Statuts“ [Online]. [cit. 2019-04-25] [https://www.icold-cigb.org/userfiles/files/CIGB/INSTITUTIONAL\\_FILES/Constitution2011.pdf](https://www.icold-cigb.org/userfiles/files/CIGB/INSTITUTIONAL_FILES/Constitution2011.pdf)

- ICOLD. 2006. "The Dams Newsletter, No. 5" [Online]. [cit. 2019-04-25] <https://www.icold-cigb.org/userfiles/files/NEWSLETTERS/newsletter5.pdf>
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland. Edited by R.K Pachauri and A. Reisinger. IPCC.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by R.K. Pachauri and L.A. Mayer. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Hemingway, Jordon. 2015. *Earth's Riverine Bloodstream – Woods Hole Oceanographic Institution*. [Online]. [cit. 2019-04-25] <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/earths-riverine-bloodstream/>.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K.. 1995. "Climate Change 1995 - The Science of Climate Change." Chap. Technical Summary, by K. Maskell J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, 588.
- Kelly, C. A., Rudd, J. W. M., Bodaly, R. A., Roulet, N. P., St. Louis, V. L., Heyes, A., Moore, T. R., et al. 1997. "Increases in Fluxes of Greenhouse Gases and Methyl Mercury following Flooding of an Experimental Reservoir." ( American Chemical Society ).
- Kettl, Karl-Heinz, Nora Niemetz, Nora Sandor, Michael Eder, and Michael Narodoslawsky. 2011. "Ecological Impact of Renewable Resource-Based Energy Technologies." *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications* (OMICS Publishing Group) 1: 1-5.
- Kirschke, Stefanie, Philippe Bousquet, Philippe Ciais, Marielle Saunois, Josep G. Canadell, Edward J. Dlugokencky, Peter Bergamaschi, et al. 2013. "Three decades of global methane sources and sinks." *Nature Geoscience*. Vol. 6. no. 10. 813-823.
- Kosten, Sarian, Sanne van den Berg, Raquel Mendonça, José R. Paranaíba, Fabio Roland, Sebastian Sobek, Jamon Van Den Hoek, and Nathan Barros. 2018. "Extreme drought boosts CO2 and CH4 emissions from reservoir drawdown areas." *Inland Waters* (Taylor and Francis Ltd.) 8 (3): 329-340.
- Kumar, Amit, Ashutosh Kumar, and M P Sharma. 2013. "Mechanism and factors affecting methane emissions in hydropower reservoirs: A review."
- Kumar, Arun, Tormod Schei, Alfred Ahenkorah, Rodolfo Caceres Rodriguez, Jean-Michel Devernavy, Marcos Freitas, Douglas Hall, et al. 2011. "Hydropower Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Contributing Authors: Review Editors: This chapter should be cited as."
- Kvítek, Tomáš. 2017. *Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce : význam retence vody na zemědělském půdním fondu pro jakost vody a současně i průvodce vodním režimem krystalinika*. První vydání. Praha: Povodí Vltavy.
- Le Mer, Jean, and Pierre Roger. 2001. "Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils : a review." 25-50.
- Lehner, Bernhard, Catherine Reidy Liermann, Carmen Revenga, Charles Vörösmarty, Balazs Fekete, Philippe Crouzet, Petra Döll, et al. 2011. "High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management." *Frontiers in Ecology and the Environment*. Vol. 9. no. 9. 11. 494-502.
- Li, Siyue, Quanfa Zhang, Richard T. Bush, and Leigh A. Sullivan. 2015. "Methane and CO2 emissions from China's hydroelectric reservoirs: a new quantitative synthesis." *Environmental Science and Pollution Research* (Springer Verlag) 22 (7): 5325-5339.
- Liden, Rikard. 2013. "Greenhouse Gases from Reservoirs Caused by Biochemical Processes : Interim Technical Note. Water papers." Water papers. World Bank, Washington, DC. © World Bank.
- Ligon, Franklin K, William E Dietrich, and William J Trush. 1995. "Downstream Ecological Effects of Dams." 45 (3): 183-192.

- Liu, Sheng, Yuwei Chen, and Jinfu Liu. 2019. "Methane emissions from the littoral zone of Poyang lake during drawdown periods." *Journal of Freshwater Ecology* (Taylor and Francis Inc.) 34 (1): 37-48.
- Maavara, Taylor, Ronny Lauerwald, Pierre Regnier, and Philippe Van Cappellen. 2017. "Global perturbation of organic carbon cycling by river damming."
- Maeck, A., H. Hofmann, and A. Lorke. 2014. "Pumping methane out of aquatic sediments & Ebullition forcing mechanisms in an impounded river." *Biogeosciences* (Copernicus GmbH) 11 (11): 2925-2938.
- Maeck, Andreas, Tonya Delsontro, Daniel F. McGinnis, Helmut Fischer, Sabine Flury, Mark Schmidt, Peer Fietzek, and Andreas Lorke. 2013. "Sediment trapping by dams creates methane emission hot spots." *Environmental Science and Technology* 47 (15): 8130-8137.
- Mäkinen, Kirsi, and Shahbaz Khan. 2010. "Policy considerations for greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs." *Water Alternatives* (Water Alternatives Association) 3 (2): 91-105.
- Marcé, Rafael, Biel Obrador, Lluís Gómez-Gener, Núria Catalán, Matthias Koschorreck, María Isabel Arce, Gabriel Singer, and Daniel von Schiller. 2019. "Emissions from dry inland waters are a blind spot in the global carbon cycle." *Earth-Science Reviews*. Vol. 188. Elsevier B.V., 1 1. 240-248.
- Matoušů, Anna, Martin Rulík, Michal Tušer, Adam Bednařík, Karel Šimek, and Ingeborg Bussmann. 2019. "Methane dynamics in a large river: a case study of the Elbe River." *Aquatic Sciences* (Birkhauser Verlag AG) 81 (1).
- McCully, Patrick. 2001. *Silenced rivers : the ecology and politics of large dams*. Zed Books.
- McCully, Patrick. 2006. "Fizzy Science: Loosening the Hydro Industry's Grip on Reservoir Greenhouse Gas Emissions Research." International Rivers Network.
- McGill University. 2019. *GRanD v1.3 [Online]*. [cit. 2019-04-25] <https://ln.sync.com/dl/bd47eb6b0/anhxaikr-62pmrgtq-k44xf84f-pyz4atkm/view/default/447819520013>.
- McGinnis, Dan F., J. Greinert, Y. Artemov, S. E. Beaubien, and A. Wüest. 2006. "Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere?" *Journal of Geophysical Research: Oceans* (Blackwell Publishing Ltd) 111 (9).
- Mendonca, Raquel, Nathan Barros, Luciana O., Felipe Pacheco, Sarian Kosten, and Fbio Rol. 2012. "Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Reservoirs: What Knowledge Do We Have and What is Lacking?" In *Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management*, by Raquel Mendonca, Nathan Barros, Luciana O., Felipe Pacheco, Sarian Kosten and Fbio Rol. InTech.
- Miller, Benjamin L., Evan V. Arntzen, Amy E. Goldman, and Marshall C. Richmond. 2017. "Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions." *Environmental Management* (Springer New York LLC) 60 (4): 615-629.
- Moran, Emilio F., Maria Claudia Lopez, Nathan Moore, Norbert Müller, and David W. Hyndman. 2018. "Sustainable hydropower in the 21st century." *Proceedings of the National Academy of Sciences* (Proceedings of the National Academy of Sciences) 115 (47): 11891-11898.
- Muller, Mike. 2019. "Dams have the power to slow climate change." *Nature*, 2: 3.
- Nakayama, Tadanobu, and Gregory J. Pelletier. 2018. "Impact of global major reservoirs on carbon cycle changes by using an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model." *Ecological Modelling* (Elsevier B.V.) 387: 172-186.
- Ollivier, Quinn R., Damien T. Maher, Chris Pitfield, and Peter I. Macreadie. 2019. "Punching above their weight: Large release of greenhouse gases from small agricultural dams." *Global Change Biology* (Blackwell Publishing Ltd) 25 (2): 721-732.
- Ortiz-Llorente, M. J., and M. Alvarez-Cobelas. 2012. "Comparison of biogenic methane emissions from unmanaged estuaries, lakes, oceans, rivers and wetlands." *Atmospheric Environment*. Vol. 59. 11. 328-337.

- Ostrovsky, I., D. F. McGinnis, L. Lapidus, and W. Eckert. 2008. "Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake." *Limnology and Oceanography: Methods* (John Wiley & Sons, Ltd) 6 (2): 105-118.
- Pacca, Sergio. 2007. "Impacts from decommissioning of hydroelectric dams: A life cycle perspective." *Climatic Change* 84 (3-4): 281-294.
- Parekh, Payal. 2008. "Amazon powers major carbon sink." *International Rivers* 23 (3): 1 [Online]. [cit. 2019-04-25] [https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/wrr\\_sept\\_2008-8\\_0.pdf](https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/wrr_sept_2008-8_0.pdf).
- Pattey, E., G. Edwards, I B Strachan, R L Desjardins, S. Kaharabata, and C. Wagner Riddle. 2006. "Towards standards for measuring greenhouse gas fluxes from agricultural fields using instrumented towers." *Canadian Journal of Soil Science* (Canadian Science Publishing) 86 (3): 373-400.
- Pithart, David. 2012. *Význam retence vody v říčních nivách*. DAPHNE ČR - Institut aplikované ekologie.
- Podgrajsek, E., E. Sahlée, D. Bastviken, J. Holst, A. Lindroth, L. Tranvik, and A. Rutgersson. 2014. "Comparison of floating chamber and eddy covariance measurements of lake greenhouse gas fluxes." *Biogeosciences* (Copernicus GmbH) 11 (15): 4225-4233.
- Prairie, Yves T., Jukka Alm, Jake Beaulieu, Nathan Barros, Tom Battin, Jonathan Cole, Paul del Giorgio, et al. 2018. "Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs: What Does the Atmosphere See?" *Ecosystems* (Springer New York LLC) 21 (5): 1058-1071.
- Raymond, Peter A., Jens Hartmann, Ronny Lauerwald, Sebastian Sobek, Cory McDonald, Mark Hoover, David Butman, et al. 2013. "Global carbon dioxide emissions from inland waters." *Nature* 503 (7476): 355-359.
- Rex, William, Vivien Foster, Kimberly Lyon, Julia Bucknall, and Rikard Liden. 2014. "Supporting Hydropower : An Overview of the World Bank Group's Engagement." (World Bank Group, Washington, DC).
- Robert Howarth. 2017. "COP23 Methane Discussion Document [Online]."
- Rudd, John W M, Reed Harris, C A Kelly, and R E Hecky. 1993. "Royal Swedish Academy of Sciences Are Hydroelectric Reservoirs Significant Sources of Greenhouse Gases?" 246-248.
- Rusch, H., and H. Rennenberg. 1998. "Black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) trees mediate methane and nitrous oxide emission from the soil to the atmosphere." *Plant and Soil* 201 (1): 1-7.
- Rutegwa, Marcellin, Radek Gebauer, Lukáš Veselý, Ján Regenda, Otakar Strunecký, Josef Hejzlar, and Bořek Drozd. 2019. "Diffusive methane emissions from temperate semi-intensive carp ponds." *Aquaculture Environment Interactions* (Inter-Research Science Center) 11: 19-30.
- Samiotis, Georgios, Giorgos Pekridis, Nikolaos Kaklidis, Eleni Trikoilidou, Nikolaos Taousanidis, and Elisavet Amanatidou. 2018. "Greenhouse gas emissions from two hydroelectric reservoirs in Mediterranean region." *Environmental Monitoring and Assessment* (Springer International Publishing) 190 (6).
- Sanches, L. F., Guenet, B., Marinho, C. C., Barros, N., & de Assis Esteves, F. (2019). Global regulation of methane emission from natural lakes. *Scientific reports*, 9(1), 255.
- Saunois, Marielle, Philippe Bousquet, Ben Poulter, Anna Peregon, Philippe Ciais, Josep G. Canadell, Edward J. Dlugokencky, et al. 2016. "The global methane budget 2000-2012." *Earth System Science Data* (Copernicus GmbH) 8 (2): 697-751.
- Scudder, Thayer. 2006. *The future of large dams : dealing with social, environmental, institutional and political costs*. Earthscan.
- Sepulveda-Jauregui, Armando, Jorge Hoyos-Santillan, Karla Martinez-Cruz, Katey M. Walter Anthony, Peter Casper, Yadira Belmonte-Izquierdo, and Frédéric Thalasso. 2018. "Eutrophication exacerbates the impact of climate warming on lake methane emission." *Science of the Total Environment* (Elsevier B.V.) 636: 411-419.

- Schubert, Carsten J., and Bernhard Wehrli. 2018. "Contribution of Methane Formation and Methane Oxidation to Methane Emission from Freshwater Systems." In *Biogenesis of Hydrocarbons*, by Carsten J. Schubert and Bernhard Wehrli, 1-31. Springer International Publishing.
- Schubert, Carsten J., Torsten Diem, and Werner Eugster. 2012. "Methane emissions from a small wind shielded lake determined by eddy covariance, flux chambers, anchored funnels, and boundary model calculations: A comparison." *Environmental Science and Technology* 46 (8): 4515-4522.
- Schwietzke, Stefan, Owen A. Sherwood, Lori M.P. Bruhwiler, John B. Miller, Giuseppe Etiope, Edward J. Dlugokencky, Sylvia Englund Michel, et al. 2016. "Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database." *Nature* (Nature Publishing Group) 538 (7623): 88-91.
- Smith, Lesley K., and William M. Lewis. 1992. "Seasonality of methane emissions from five lakes and associated wetlands of the Colorado Rockies." *Global Biogeochemical Cycles* 6 (4): 323-338.
- Sollberger, Sébastien, Bernhard Wehrli, Carsten J. Schubert, Tonya DelSontro, and Werner Eugster. 2017. "Minor methane emissions from an Alpine hydropower reservoir based on monitoring of diel and seasonal variability." *Environmental Science: Processes and Impacts* (Royal Society of Chemistry) 19 (10): 1278-1291.
- Song, Cuihong, Kevin H. Gardner, Sharon J.W. Klein, Simone Pereira Souza, and Weiwei Mo. 2018. "Cradle-to-grave greenhouse gas emissions from dams in the United States of America." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 90. Elsevier Ltd, 7 1. 945-956.
- Song, Dan, Jin Yang, Bin Chen, Tasawar Hayat, and Ahmed Alsaedi. 2016. "Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain." *Applied Energy* (Elsevier Ltd) 164: 916-923.
- Soumis, Nicolas, Marc Lucotte, Catherine Larose, François Veillette, and René Canuel. 2007. "Photomineralization in a boreal hydroelectric reservoir: A comparison with natural aquatic ecosystems." *Biogeochemistry* 86 (2): 123-135.
- Soumis, N., Lucotte, M., Canuel, R., Weissenberger, S., Houel, S., Larose, C., & Duchemin, É. 2005. „Hydroelectric reservoirs as anthropogenic sources of greenhouse gases“. *Water encyclopedia*, 3, 203-210
- Subramaniam, A., P. L. Yager, E. J. Carpenter, C. Mahaffey, K. Bjorkman, S. Cooley, A. B. Kustka, et al. 2008. "Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean." *Proceedings of the National Academy of Sciences* (Proceedings of the National Academy of Sciences) 105 (30): 10460-10465.
- Suwanit, Wannarat, and Shabbir H. Gheewala. 2011. "Life cycle assessment of mini-hydropower plants in Thailand." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16 (9): 849-858.
- Tranvik, Lars J, John A Downing, James B Cotner, Steven A Loiselle, Robert G Striegl, Thomas J Ballatore, Peter Dillon, et al. 2009. "Tranvik, Lars J., et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol. Oceanogr.*, 54(6, part 2), 2009, 2298–2314." 2298-2314.
- Tremblay, A., M. Lambert, and L. Gagnon. 2004. "Do hydroelectric reservoirs emit greenhouse gases?" *Environmental Management* 33 (SUPPL. 1).
- Trojanowska, Adriana, Marta Kurasiewicz, Łukasz Pleśniak, and Orion Jędrysek. 2009. "Emission Of Methane From Sediments Of Selected Polish Dam Reservoirs." 368-373.
- Tušer, Michal, Tomáš Pícek, Zuzana Sajdlová, Tomáš Jůza, Milan Muška, and Jaroslava Frouzová. 2017. "Seasonal and Spatial Dynamics of Gas Ebullition in a Temperate Water-Storage Reservoir." *Water Resources Research* (Blackwell Publishing Ltd) 53 (10): 8266-8276.
- UNESCO/IHA. 2008. "Scoping paper Assessment of the GHG Status of Freshwater Reservoirs Working Group on Greenhouse Gas Status of Freshwater Reservoirs."
- Varadharajan, Charuleka, Richard Hermosillo, and Harold F. Hemond. 2010. "A low-cost automated trap to measure bubbling gas fluxes." *Limnology and Oceanography: Methods* 8 (JULY): 363-375.



- Varun, I.K. Bhat, and Ravi Prakash. 2009. "LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (5): 1067-1073.
- Vörösmarty, Charles J., Michel Meybeck, Balázs Fekete, Keshav Sharma, Pamela Green, and James P.M. Syvitski. 2003. "Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments." *Global and Planetary Change* (Elsevier B.V.) 39 (1-2): 169-190.
- Wang, Fushun, Stephen C. Maberly, Baoli Wang, and Xia Liang. 2018. "Effects of dams on riverine biogeochemical cycling and ecology." *Inland Waters* (Taylor and Francis Ltd.) 8 (2): 130-140.
- Wik, Martin, Brett F. Thornton, David Bastviken, Jo Uhlbäck, and Patrick M. Crill. 2016. "Biased sampling of methane release from northern lakes: A problem for extrapolation." *Geophysical Research Letters* (Blackwell Publishing Ltd) 43 (3): 1256-1262.
- Wilkinson, Jeremy, Andreas Maeck, Zeyad Alshboul, and Andreas Lorke. 2015. "Continuous Seasonal River Ebullition Measurements Linked to Sediment Methane Formation." *Environmental Science and Technology* (American Chemical Society) 49 (22): 13121-13129.
- World Bank. 2017. "Greenhouse Gases from Reservoirs Caused by Biogeochemical Processes." World Bank, Washington, DC.
- World Commission on Dams. 2000. *Dams and development : a new framework for decision-making : the report of the World Commission on Dams*. Earthscan. [Online]. [cit. 2019-04-25]  
[https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/world\\_commission\\_on\\_dams\\_final\\_report.pdf](https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/world_commission_on_dams_final_report.pdf)
- Yüksel, Ibrahim. 2010. "Hydropower for sustainable water and energy development." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Pergamon) 14 (1): 462-469.
- Zarfl, Christiane, Alexander E. Lumsdon, Jürgen Berlekamp, Laura Tydecks, and Klement Tockner. 2014. "A global boom in hydropower dam construction." *Aquatic Sciences* (Birkhauser Verlag AG) 77 (1): 161-170.
- Zhao, Yan, Bradford Sherman, Phillip Ford, Maud Demarty, Tonya DelSontro, Atle Harby, Alain Tremblay, et al. 2015. "A comparison of methods for the measurement of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from surface water reservoirs: Results from an international workshop held at three Gorges Dam, June 2012." *Limnology and Oceanography: Methods* (American Society of Limnology and Oceanography Inc.) 13 (1): 15-29.

## 7 Seznam příloh

- Příloha 1: Příklad analýzy studií monitorujících ebulici, či celkové emise metanu včetně ebulice, 21 přehrad mírného pásma v Evropě a Severní Americe. Uvádí variabilitu výsledných hodnot a možné metodické činitele (pozitivní a negativní) ovlivňující výsledky. 43
- Příloha 2: Hodnoty množství emisí metanu z jednotlivých systémů, celkové množství emisí, hodnoty emisí přírodních a antropogenních zdrojů. Dle dvou různých inventarizačních studií, průměrné hodnoty uváděné v  $Tg\ CH_4.rok^{-1}$  45
- Příloha 3: Porovnání hodnot pravděpodobných zdrojů metanu s červeně vyznačenými největšími změnami v poznání 46
- Příloha 4: Schématické zobrazení části biogeochemického cyklu uhlíku v přehradě a zobrazení emisí skleníkových plynů vzniklých mikrobiální aktivitou se zaměřením na metan 47
- Příloha 5: Rozlohy přehrad v  $km^2$  v jednotlivých klimatických pásmech, určeno zjednodušeně podle zeměpisné šířky z uvedených studií a databáze GRanD v1.3 (McGill University, 2019) 47