



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra biologie

Bakalářská práce

Toky metanu (CH_4) z vrb (*Salix sp.*)

Vypracovala: Klára Janebová

Vedoucí práce: RNDr. Renata Ryplová, Ph.D.

Odborný konzultant: Dr. rer. nat. Mgr. Kateřina Macháčová

České Budějovice 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Datum:

Podpis studenta:

Poděkování

Ráda bych poděkovala RNDr. Renatě Ryplové, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, za cenné rady, čas a trpělivost, kterou mi věnovala. Dále děkuji Dr. rer. nat. Mgr. Kateřině Macháčové za umožnění účasti na výzkumu, za ochotu, čas a odborné rady během něho. Dále bych chtěla poděkovat RNDr. Tomáši Ditrichovi, Ph.D. za pomoc při statistickém zpracování výsledků. A v neposlední řadě děkuji celé mé rodině za podporu při vypracování této práce.

Abstrakt

Cílem práce bylo studium toku metanu (CH_4) z vrů, konkrétně vrby křehké (*Salix fragilis*) a z vrů pětimužných (*Salix pentandra*) a jejich přilehlých půd na ekosystémové stanici Mokré Louky u Třeboně (49°01's. š.; 14°46'v. d.). Výzkum byl proveden v květnu 2016.

Metan je jeden z důležitých skleníkových plynů, který může být emitován rostlinami do atmosféry. Toky metanu z vrů a ani faktory, které je ovlivňují, však doposud nejsou dostatečně zmonitorovány. Práce se stala součástí celoročního monitoringu těchto toků prováděného Ústavem výzkumu globální změny AV ČR pod vedením odborné konzultantky Dr. rer. nat. Mgr. Macháčové.

Toky CH_4 byly měřeny pomocí manuálních statických komorových systémů umístěných ve třech výškových úrovních a on-line přenosným laserovým plynovým analyzátozem. Toky byly zpracovány, statisticky vyhodnoceny a z výsledků byly vytvořeny přehledné tabulky a grafy.

Z výsledků je zřejmé, že všechny studované stromy uvolňovaly ze svých kmenů CH_4 a CO_2 , avšak nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi dopoledními a odpoledními toky. U *S. fragilis* byly výrazně vyšší emise než u *S. pentandra*, zároveň u obou druhů dramaticky klesaly s výškou kmene. Tedy nejvyšší emise byly detekovány ihned u povrchu půdy. Zároveň byly naměřeny emise CH_4 i CO_2 z půdy.

Klíčová slova

Mokré Louky u Třeboně, metan, oxid uhličitý, *Salix fragilis*, *Salix pentandra*, kmenové a půdní emise, mokřady

Abstract

The aim of the thesis was to study the methane flux (CH₄) from crack willow (*Salix fragilis*) and bay willow (*Salix pentandra*) at the ecosystem station Wet Meadow by Třeboň (49°01' N; 14°46' E). The research was carried out in May 2016.

Methane is one of the important greenhouse gases, which plants can emit into the atmosphere. Neither the fluxes of methane from willows nor the factors influencing them were so far sufficiently monitored. The thesis became a part of the whole year's monitoring of these fluxes, carried out by the Global Change Research Institute of the Czech Academy of Sciences, under the lead of expert consultant Dr. rer. nat. Mgr. Macháčová.

The fluxes of CH₄ were measured with the help of manual static chamber systems located in three height-levels and online portable laser gas analyser. The fluxes were processed, statistically evaluated and coherent tables and charts were created from the results.

Based on these results we can conclude, that all examined trees have released CH₄ and CO₂ from their trunks, however no significant statistical difference between morning and afternoon fluxes was measured. *S. fragilis* was emitting higher amounts of CH₄ and CO₂ than *S. pentandra*. At the same time emissions dramatically decreased along with decreasing trunk height. Therefore the highest emissions were detected directly at the ground level. Moreover, the emissions of CH₄ and CO₂ were measured from the soil as well.

Key words

Wet Meadows, methane, carbon dioxide, *Salix fragilis*, *Salix pentandra*, stem and soil emissions, wetlands

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Literární přehled.....	2
2.1.	Emise plyných látek z rostlin do atmosféry	2
2.2.	Skleníkový efekt a jeho důsledky.....	2
2.3.	Skleníkové plyny	4
2.3.1.	Vývoj koncentrací skleníkových plynů.....	4
2.3.2.	Radiační působení, potenciál globálního oteplování a životnost skleníkových plynů	6
2.3.3.	Oxid uhličitý (CO ₂)	6
2.3.4.	Oxid dusný (N ₂ O).....	7
2.3.5.	Metan (CH ₄)	7
2.3.6.	Přehled dosavadních poznatků o emisích CH ₄ z vegetace do..... atmosféry	7
2.3.7.	Vznik CH ₄ v půdě (metanogeneze)	9
2.3.8.	Oxidace CH ₄	10
2.4.	Dráhy přesunu CH ₄ z pedosféry do atmosféry	10
2.4.1.	Transport CH ₄ rostlinou.....	11
2.5.	Produkce CH ₄ rostlinou	12
2.5.1.	Produkce CH ₄ samotnou rostlinou	12
2.6.	Mokřady a jejich vymezení	12
2.7.	Charakteristika Mokřých Luk	13
2.8.	Zkoumané dřeviny (<i>Salix fragilis</i> a <i>Salix pentandra</i>)	15
2.8.1.	<i>Salix fragilis</i> (vrba křehká).....	15
2.8.2.	<i>Salix pentandra</i> (vrba pětimužná).....	16
3.	Metodika práce.....	17
3.1.	Terénní měření	17

3.1.1.	Reprezentativní výběr stromů a půdy pro měření	17
3.1.2.	Charakteristika komorového systému a jeho instalace na..... vybrané vrby.....	18
3.1.2.1.	Design kmenových komor	18
3.1.2.2.	Design půdních komor	21
3.1.3.	Průběh měření toků CH ₄ a CO ₂ z kmenových komor	22
3.1.4.	Průběh měření toků CH ₄ a CO ₂ z půdních komor.....	23
3.2.	Analýza dat.....	24
3.2.1.	Výpočet objemu a povrchu kmenových komor	24
3.2.2.	Výpočet objemu a povrchu systému půdní komory	24
3.2.3.	Počítání rychlostí toků.....	24
3.3.	Statistika	25
4.	Výsledky	26
4.1.	Zjištění statisticky významných rozdílů mezi dopoledními..... a odpoledními toky	26
4.1.1.	Toky CH ₄ z kmenů <i>Salix pentandra</i> a <i>Salix fragilis</i>	26
4.1.2.	Toky CH ₄ z půdy	28
4.1.3.	Toky CO ₂ z kmenů <i>Salix pentandra</i> a <i>Salix fragilis</i>	28
4.1.4.	Toky CO ₂ z půdy.....	30
4.2.	Analýza statisticky významných rozdílů mezi toky jednotlivých úrovní kmenu.....	32
4.2.1.	Měsíční toky CH ₄ <i>Salix pentandra</i> a <i>Salix fragilis</i>	32
4.2.2.	Měsíční toky CH ₄ z půdy.....	34
4.2.3.	Měsíční toky CO ₂ <i>Salix pentandra</i> a <i>Salix fragilis</i>	35
4.2.4.	Měsíční toky CO ₂ z půdy	37
5.	Diskuze	38
5.1.	Vrby emitují CH ₄ a CO ₂ prostřednictvím kmenů	38
5.2.	Uvolňování CH ₄ a CO ₂ z půdy v blízkosti studovaných vrb.....	39

6.	Závěr.....	41
7.	Seznam literatury	42
8.	Přílohy	

1. Úvod

Tématem mé bakalářské práce jsou toky metanu (CH_4) z vrby (*Salix sp.*), které budu měřit pomocí statického komorového systému a následně provedu statistické analýzy k jejich vyhodnocení. Dále bude provedeno doplňkové měření CO_2 . Tuto problematiku jsem si vybrala, protože je to doposud málo prozkoumaná problematika. Mezi širokou veřejností je znám pojem skleníkový efekt, ale málokdo přesně ví, co znamená. Právě studovaný metan je jedním ze skleníkových plynů, který se vysokou mírou podílí na zvětšování tohoto efektu. V zahraniční literatuře je tento jev velmi studovaný a zkoumaný. Organizace jako World Meteorological Organization (WMO), International Panel on Climate Change (IPCC) podávají zprávy o stavu naší planety a predikují její budoucnost. Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (CzechGlobe) je tvořen vědeckými pracovníky, kteří zkoumají pomocí nejnovějších přístrojů a postupů globální změnu a její dopad na biosféru, atmosféru a lidskou společnost. Čerpání ze zpráv těchto institucí bylo velmi poučné a zajímavé.

V teoretické části jsem nejprve obecně popsala uvolňování plyných látek z rostlin do atmosféry. Dále jsem popsala skleníkový efekt a skleníkové plyny způsobující tento jev. Poté jsem shrnula nynější poznatky o emisích CH_4 z vegetace do atmosféry. V další části rešerše jsem se zaměřila na zdroje vzniku metanu, jeho oxidaci a cesty přesunu z pedosféry do atmosféry. V závěru rešerše jsem popsala mokřady a následně námi studovanou lokalitu Mokré Louky a zkoumané druhy vrby.

Hlavními cíli práce bylo odpovědět na stanovené otázky:

1. Emitují vrby CH_4 ?
2. Liší se dopolední a odpolední toky CH_4 ?
3. Jak vypadají profilové toky CH_4 z kmene? Jsou konstantní nebo se toky liší s výškou kmene?

Výsledky této bakalářské práce byly publikovány na dvou zahraničních konferencích (Příloha 2, 3) a na XVI. semináři z ekologie mokřadů a hydrobotaniky konaný ve dnech 7. - 8. 2. 2018 v Českých Budějovicích pod názvem Willow trees contribute to exchange of methane (CH_4) in sedge-grass marsh.

2. Literární přehled

2.1. Emise plyných látek z rostlin do atmosféry

Biosféra je významným zdrojem různých plynů, které se z ní uvolňují do atmosféry. Jak uvádí např. Goldstein a Galbally (2007), během celého života rostlin, zvířat a mikroorganismů se do atmosféry uvolňují organické sloučeniny.

Samotné rostliny do svého okolí uvolňují řadu látek, které potom mohou ovlivňovat chemismus atmosféry a tím i životní prostředí člověka. Těmito látkami jsou především oxid uhličitý (CO_2), vodní pára (H_2O), metan (CH_4), oxidy dusíků (NO_x), oxid dusný (N_2O), oxid siřičitý (SO_2), isopreny a monoterpeny (Noe a kol., 2011).

Významné jsou jednak tzv. nemetanové těkavé organické látky (NMVOC, non-methane volatile organic compounds). Z NMVOC emitují rostliny tzv. Biogenic volatile organic compounds (BVOC, těkavé organické látky biogenního původu), představované terpenoidy, především isoprenem a monoterpeny, které jsou do atmosféry emitovány především jehličnany, ale i řadou jiných rostlin. BVOC přispívají ke vzniku troposférického ozonu (O_3) a významně posouvají chemismus atmosféry (Karl a kol., 2010; Ryplová, 2015). Na rozdíl od těkavých organických látek antropogenního původu (AVOC, anthropogenic volatile organic compounds) jsou BVOC v atmosféře reaktivnější (Atkinson, 2000).

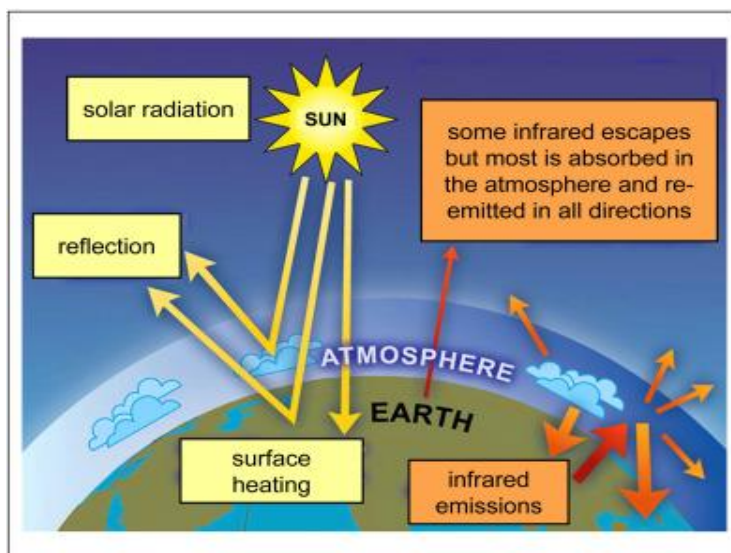
V posledních letech se však pozornost vědců soustřeďuje stále více na emisi metanu z biosféry do atmosféry (Butterbach-Bahl a kol., 1997; Keppler a kol., 2006; Gauci a kol., 2010; Pangala a kol., 2015), zejména proto, že metan je významným skleníkovým plynem (Townsend a kol., 2010). Skleníkové plyny jsou plyny, které ovlivňují klimatický systém Země v důsledku lidské činnosti a podílejí se na zesilování tzv. skleníkového efektu.

2.2. Skleníkový efekt a jeho důsledky

Skleníkový efekt je jedním z nejdiskutovanějších témat a vědeckých teorií dnešní doby. Je to jev, který je nezbytný pro život na Zemi, protože zvyšuje průměrnou teplotu povrchu Země na $14\text{ }^\circ\text{C}$. Bez přírodního skleníkového efektu by průměrná teplota na povrchu Země byla pod bodem zmrznutí vody (Le Treut a kol., 2007).

Problém skleníkového efektu spočívá v jeho neustále se zvětšující síle, působením změn chemického složení atmosféry v důsledku lidské činnosti.

Slunce směrem k zemskému povrchu vyzařuje sluneční energii ve velmi krátkých vlnových délkách. Přibližně třetina této energie je odražena atmosférou a mraky zpět do vesmíru. Zbylé dvě třetiny dopadají na zemský povrch a jsou absorbovány. Jelikož zemský povrch je chladnější než povrch Slunce, vyzařuje Země delší vlnové délky (hlavně v oblasti infračerveného spektra), ty jsou zpětně absorbovány atmosférou a mraky. V atmosféře se hromadí již zmíněné skleníkové plyny, které zabraňují unikání tepla do vesmíru (Obr. 1). Díky tomuto dochází na naší planetě Zemi ke globálnímu oteplování (In-počasí, 2007; IPCC, 2007).



Obr. 1 Schéma skleníkového efektu. Anderson a kol., 2016

Oteplování klimatického systému je nevyvratitelné a od 50. let minulého století nemá řada pozorovaných změn obdoby po celá desetiletí až tisíciletí. Došlo k oteplení atmosféry a oceánu, kleslo množství sněhu a ledu. Oproti tomu stoupla hladina oceánu a koncentrace skleníkových plynů v atmosféře (IPCC, 2013). Dalšími důsledky oteplování jsou jevy jako sucho, povodně, vichřice, ubývání dostupnosti pitné vody, redukce biodiverzity a desertifikace (ČHMÚ, 2016).

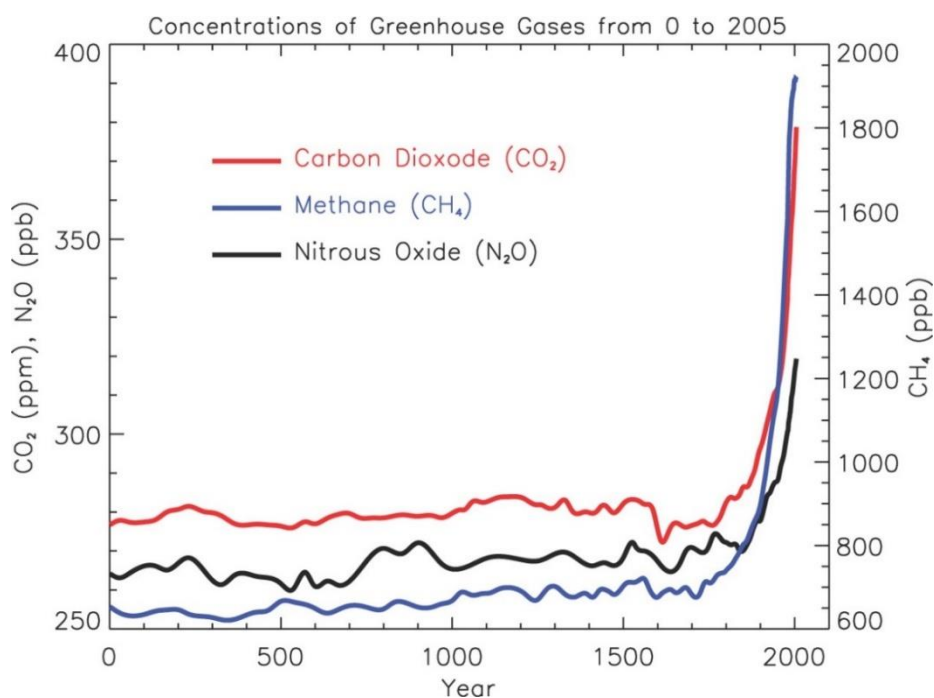
2.3. Skleníkové plyny

Mezi nejdůležitější skleníkové plyny patří oxid uhličitý, metan, oxid dusný a vodní pára, které přispívají ke globálním změnám. Koncentrace těchto plynů již razantně překročily nejvyšší naměřené hodnoty ve vrtných jádrech ledovců za posledních 800 000 let a rychlost, kterou tyto koncentrace rostou, je v posledním století bezpochyby nejvyšší za posledních 22 000 let (IPCC, 2013).

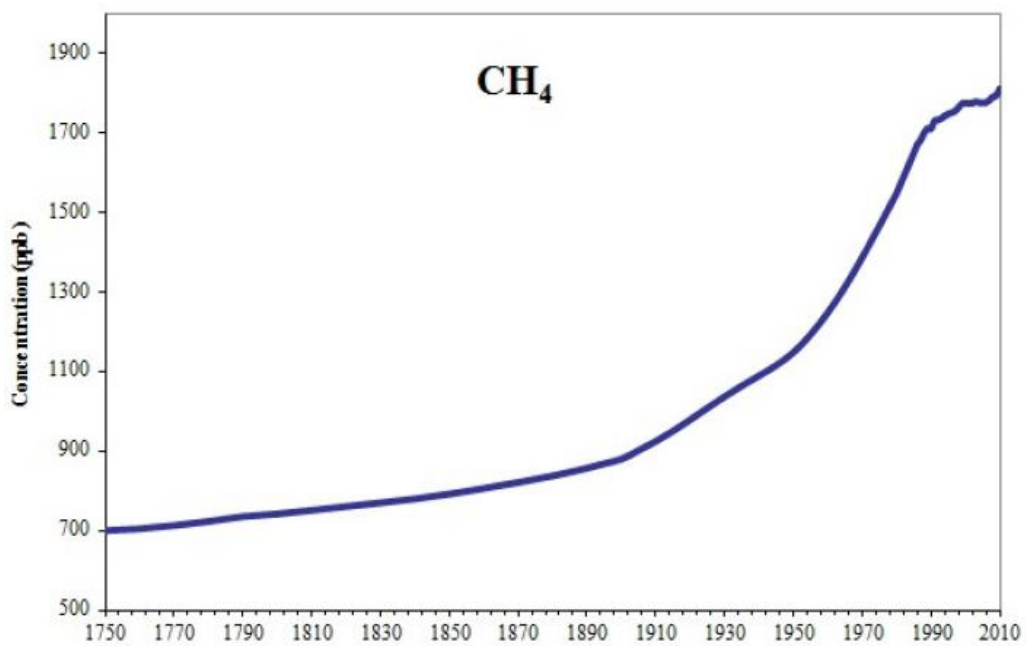
2.3.1. Vývoj koncentrací skleníkových plynů

Koncentrace skleníkových plynů v atmosféře roku 1750 razantně narostly (Obr. 2). V předindustriálním období koncentrace CO_2 a CH_4 v atmosféře dosahovaly hodnot 278 ppm a 722 ppb (Obr. 3, 4). Z důvodu antropogenní činnosti koncentrace CO_2 v roce 2016 přesáhly hodnotu 400 ppm, konkrétně 403 ppm a koncentrace CH_4 1853 ppb (WMO, 2017).

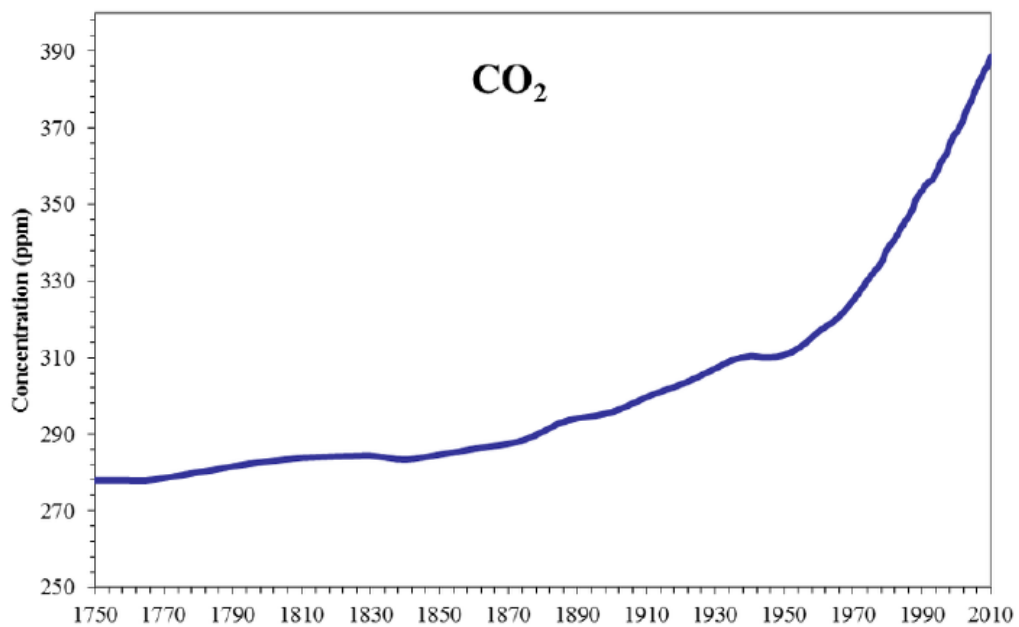
Za období 1750-2016 došlo k nárůstu emisí CH_4 o 257 %, CO_2 o 145 %. Rychlost růstu emisí za posledních 10 let byla u metanu $6,8 \text{ ppb yr}^{-1}$ a oxidu uhličitého $2,21 \text{ ppm yr}^{-1}$ (WMO, 2017).



Obr. 2 Atmosférické koncentrace skleníkových plynů (N_2O , CH_4 a CO_2) během 2 000 let. K nárůstu koncentrací dochází kolem roku 1750. Jednotky vyjádřené v ppm nebo ppb. Forster a kol., 2007



Obr. 3 Vývoj koncentrace CH₄ od roku 1750 do roku 2010. EEA, 2013



Obr. 4 Vývoj koncentrace CO₂ od roku 1750 do roku 2010. EEA, 2013

2.3.2. Radiační působení, potenciál globálního oteplování a životnost skleníkových plynů

Skleníkové plyny se hromadí v atmosféře. Molekula metanu zde zůstává 12 let než se rozpadne a má 25krát větší GWP v horizontu 100 let než CO₂ (Obr. 5)

Radiační působení vyjadřuje změnu bilance zářivých toků, tj. dopadajícího a odcházejícího záření (udáváno ve watttech na metr čtvereční, W/m²) v tropopauze díky změně vnějšího činitele, který způsobuje změnu klimatu (např. změna koncentrace CO₂, slunečního záření). Změna bilance byla mezinárodně vztažena k roku 1750 (IPCC, 2007).

Potenciál globálního oteplování (Global Warming Potential, GWP) je ukazatel založený na radiačních vlastnostech skleníkových plynů v ovzduší. Udává radiační působení jednotkové hmotnosti daného skleníkového plynu, a to v průběhu vymezeného časového období, vzhledem k oxidu uhličitému. GWP zahrnuje kombinaci rozdílných dob, kdy plyny zůstávají v atmosféře a jejich relativní účinnosti v pohlcování tepelného infračerveného záření (IPCC, 2007).

Průměrná životnost plynu zahrnuje transport a průměrnou dobu, za kterou se jedna molekula rozpadne.

Látka	Vzorec	Životnost (roky)	GWP		
			20 let	100 let	500 let
Oxid uhličitý	CO ₂		1	1	1
Metan	CH ₄	12	72	25	7,5
Oxid dusný	N ₂ O	114	289	298	153

Obr. 5 Životnost a potenciál globálního oteplování, vztaženo k CO₂.

Solomon a kol., 2007; upraveno

2.3.3. Oxid uhličitý (CO₂)

Oxid uhličitý je nejvýznamnější antropogenní skleníkový plyn, který se velkou měrou podílí na globálním oteplování naší planety. Vyskytuje se volně v atmosféře i díky činnosti vegetace a živočichů, kteří ho uvolňují při respiraci (buněčné dýchání). Během opačného procesu, fotosyntézy, ho vegetace přijímá průduchy a zabudovává do svých uhlíkatých struktur. CO₂ je tedy pro rostliny zdrojem uhlíku (Ryplová, 2014). Ovšem fotosyntéza je nedostačující pro snižování tohoto plynu, protože antropogenní činnosti vedou k tvorbě více a více CO₂. Antropogenní emise vznikají díky spalování fosilních paliv (nejvíce pevných paliv, v menší míře kapalných a plynných). Dále se

na jeho tvorbě podílí procesy odsiřování, rozklad uhličitánů při výrobě vápna, cementu a skla, metalurgická a chemická výroba (ČHMÚ, 2016).

2.3.4. Oxid dusný (N₂O)

Anderson a kol. (2010) odhadují, že přírodní zdroje N₂O přispívají 64 % k celkovým tokům do atmosféry. Největším zdrojem jsou půdy, dále oceány a řeky. K významným antropogenním zdrojům se řadí zemědělství. N₂O vzniká denitrifikací dusíku přidaného do půdy ve formě umělého hnojiva nebo organického materiálu. Dalším důležitým zdrojem je proces výroby kyseliny dusičné a v malé míře i doprava (ČHMÚ, 2016).

2.3.5. Metan (CH₄)

Metan je po oxidu uhličitým druhým nejrozšířenějším skleníkovým plynem. Přírodní zdroje metanu představují 37 % celkového toku do atmosféry za rok. Největším zdrojem jsou mokřady, které uvolňují 170 Tg CH₄ yr⁻¹. Následují je jezera (30 Tg CH₄ yr⁻¹) a vegetace (20-60 Tg CH₄ yr⁻¹). Toky CH₄ z vegetace nejsou zcela objasněny, protože výzkumy jsou teprve v začátcích (Anderson a kol., 2010). Carmichael a kol. (2014) uvádí další zdroje jako sedimenty v oceánech, zemní plyn, bioplyn, půdy v permafrostu a procesy spojené s životem termitů. Antropogenně vzniká a do ovzduší se uvolňuje CH₄ při procesu spalování fosilních paliv, biomasy, dále během těžby, zpracování paliv, anaerobním rozkladu bioodpadů na skládkách a čištění odpadních vod. Často jsou přírodní zdroje metanu ovlivněny lidskou činností, jako je tomu např. v zemědělství (pěstování rýže, chov dobytka – jejich trávicí pochody, rozklad jejich exkrementů) (ČHMÚ, 2016).

2.3.6. Přehled dosavadních poznatků o emisích CH₄ z vegetace do atmosféry

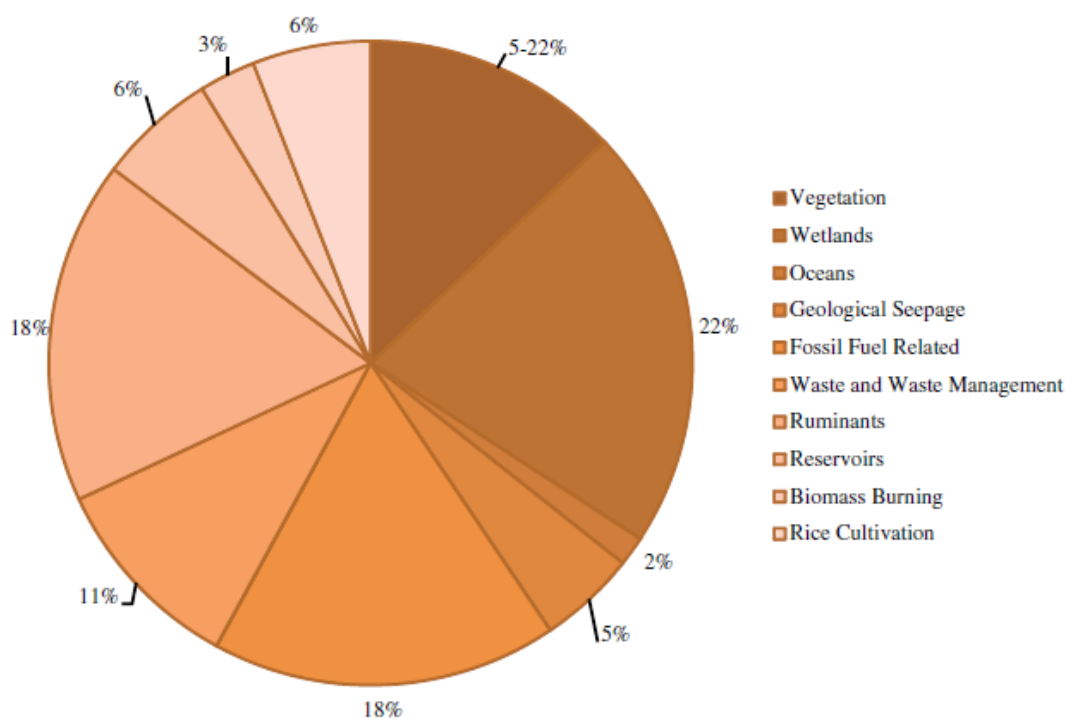
V dnešní době je tok CH₄ do atmosféry odhadován přibližně na 645 Tg CH₄ yr⁻¹ (Schlesinger a Bernhardt, 2013). Nicméně velikosti toků z přírodních zdrojů (např. mokřady, hydráty, sedimenty oceánů) nejsou plně vymezeny, stejně tak jako v případě zdrojů antropogenních. Podíl samotné vegetace na celkovém toku je nejméně prostudovaný. Na začátku studování CH₄ byla vegetace brána jako prostředek vedení CH₄ vytvořeného v půdě nebo v rostlinných tkáních (Carmichael a kol., 2014). Prvotní výzkumy se zabývaly uvolňováním metanu z bylin v oblasti rýžovišť. Bylo

zjištěno, že hlavním způsobem transportu emisí CH₄ do atmosféry byl přenos plynu vytvořeného v půdě skrze rostlinu v rámci aerenchymu a mezibuněčných prostor. Podle Butterbach-Bahla a kol. (1997) tento typ emisí čítal během celého vegetačního období 90 %, zatímco difuze a eboluce (tj. plynové bublinky) z půdy byly mnohem méně významné. Roční příspěvek CH₄ představoval 12 % (Watson a kol., 1992), a proto se následné výzkumy zabývaly otázkou snižování emisí CH₄ z rýžovišť do atmosféry prostřednictvím pěstování rýžových kultivarů s nízkou kapacitou přenosu plynů (Butterbach-Bahl a kol., 1997).

Následovaly výzkumy, které do nedávné doby odhadovaly toky CH₄ z lesního ekosystému. Měření byly pouze emise z půdy bez přínosu stromů. S možným přínosem stromů přišli Schütze a kol. (1991). Předpokládali, že samotné stromy mohou uvolňovat z kmenů plyny. Roku 1998 výzkum na semenáčcích *Alnus glutinosa* (L.) potvrdil uvolňování plynů díky lenticelám (Rusch a Rennenberg, 1998; McBain a kol., 2004; Pangala a kol., 2013). Další, nepříliš početné studie přinesly informaci o roli dřevin a jejich příspěvku metanu do ekosystému (např. Vann a Megonigal, 2003; Garnet a kol., 2005). Právě při zkoumání emisí z těchto dřevin byla pozornost věnovaná hlavně mokřadním stromům, které jsou na zaplavovanou půdu adaptovány přítomností aerenchymu a lenticel (Rusch a Rennenberg 1998; McBain a kol., 2004; Terazawa a kol., 2007; Gauci a kol., 2010; Machacova a kol., 2013; Pangala a kol., 2014).

Zatímco se většina studií zabývala výzkumy zaplavených území s bylinnou vegetací (tj. rýžoviště), měření a data ze stromů z vyšších poloh jsou vzácná nebo chybí úplně (Pihlatie a kol., 2005; Machacova a kol., 2013, 2016; Maier a kol., 2018). Machacova a kol. (2013) jako první porovnali toky CH₄ z kmenů stromu s aerenchymem *Alnus glutinosa* a stromu bez aerenchymu *Fagus sylvatica*, který je zástupcem druhů rostoucích ve vyšších polohách. Nízké toky CH₄ a jeho depozice nasvědčují přenosu plynu pouze aerenchymem.

K celkového toku CH₄ do atmosféry (645 Tg CH₄ yr⁻¹) podle Carmichael a kol. (2014) přispívá vegetace ve výši 32-143 Tg CH₄ yr⁻¹, tedy 5-22 % celkových emisí metanu (Obr. 6). Tento tok metanu je z 25-42 % tvořen samotnými rostlinami (tj. aerobní produkce CH₄) a z 58-75 % nepřímou cestou (kryptické mokřady, hnití jádrového dřeva, padlé mrtvé stromy, rostlinný opad – více Carmichael a kol. (2014)). Výše zmíněné zdroje nepřímé cesty jsou relativně nové a málo prozkoumané a pokud by po přezkoumání těchto zdrojů byly potvrzeny vyšší hodnoty odhadů, pak by příspěvek vegetace ke globálnímu toku CH₄ byl shodný s tokem z mokřadů. Poskytlo by to argument pro zavedení vegetace jako zvláštní kategorie přírodního zdroje methanu (Carmichael a kol., 2014).



Obr. 6 Procentuální vyjádření jednotlivých přírodních zdrojů CH₄ k celkovému toku CH₄ (645 Tg CH₄ yr⁻¹). Carmichael a kol., 2014

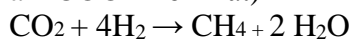
2.3.7. Vznik CH₄ v půdě (metanogeneze)

Metan vzniká v půdě při procesu metanogeneze, který probíhá za přísně anaerobních podmínkách při redoxním potenciálu nižším než - 150 mV. Při těchto podmínkách metanogenní mikroorganismy (Archea) rozkládají půdní substrát a vzniká CH₄ (Smith a kol., 2003; Li, 2007). Tyto podmínky nastávají

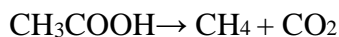
v zaplavovaných půdách i na rýžových polích, kde proto dochází k velkým emisím CH₄.

Podle použitého substrátu se metanogenní organismy dělí na:

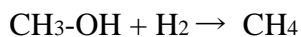
1. hydrogenotrofní metanogeny: využívají substrát typu CO₂ (tj. CO, CO₂ a HCOOH-formiát)



2. acetátrofní metanogeny: jako substrát využívají acetát



3. methylotrofní metanogeny: jako substrát využívají methanol (CH₃OH), methylmercaptan (CH₃SH), methylamine (CH₃NH₃⁺), dimethylamine ((CH₃)₂NH₂⁺) a trimethylamine (CH₃)₃NH⁺



(Baxová, 2013)

Vznik CH₄ v půdě ovlivňuje mnoho faktorů jako např. půdní vlhkost, půdní teplota, obsah O₂ v půdě (Lelieveld a kol., 1998).

2.3.8. Oxidace CH₄

Uvolněný metan vzniklý v půdě je současně oxidován na CO₂ metanotrofními bakteriemi na rozhraní anaerobního a aerobního prostředí, kde se koncentrace O₂ a CH₄ překrývají (Frenzel a Rudolph, 1998). Takové prostředí se nachází v tenké povrchové vrstvě půdy, v rhizosféře a na rozhraní voda-půda po zaplavení. Ve velkém množství byly metanotrofové detekovány v tenké vrstvě kolem kořene a na jeho povrchu (Gilbert a Frenzel, 1998). Gilbert a kol. (1998) zkoumali kořeny rýže a našli metanotrofy i uvnitř kořenů. Oxidaci CH₄ ovlivňují chemické i fyzické charakteristiky půdy, jako je půdní teplota, obsah vody v půdě, pH půdy (Min a kol., 2002).

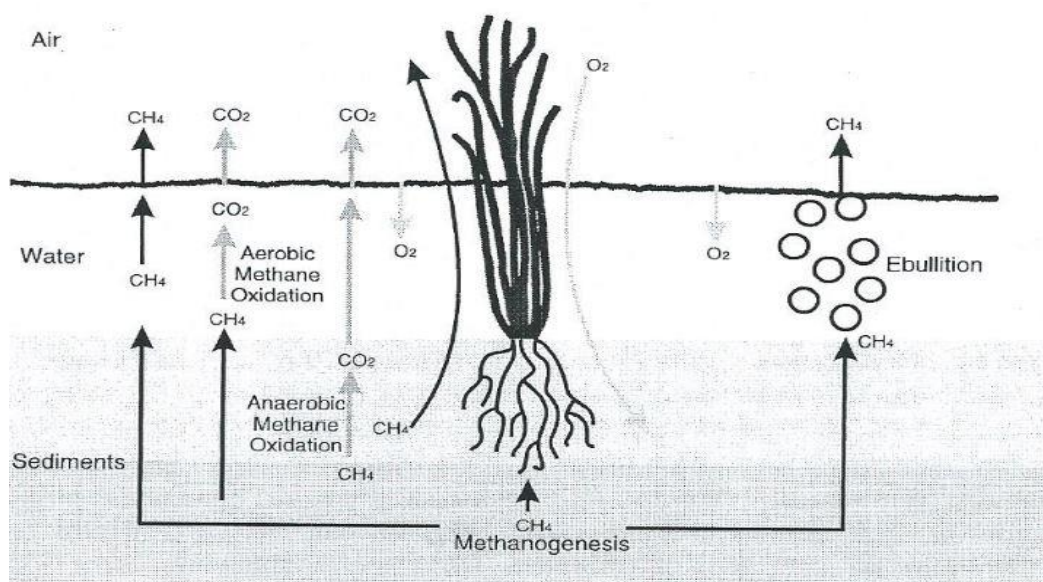
Čistý tok CH₄ z půdy do atmosféry je výsledkem bilance anaerobní produkce CH₄, aerobní spotřeby CH₄ a plynné difuze z/do/ půdy a rostlin (Macháčová, 2012).

2.4. Dráhy přesunu CH₄ z pedosféry do atmosféry

Půdy mohou být zdrojem CH₄ vytvořeného metanogenezí, ale mohou přijímat/spotřebovat metan i z atmosféry, a to díky silným oxidativním vlastnostem půdy. Oxidace CH₄ v přírodních mokřadech dosahuje nejvýše toků 10 mg CH₄ m⁻² h⁻¹, zatímco v aerobních horských půdách je málokdy vyšší než 0,1 mg CH₄ m⁻² h⁻¹ (Mer

a Roger, 2001). Největší množství atmosférického CH_4 přijímají lesní půdy, kultivované půdy a louky mírného a tropického pásu. Ačkoliv to jsou nízké hodnoty mají velký význam, protože se jedná o emise z velkého povrchu. Mer a Roger (2001) odhadují, že tyto plochy na Zemi spotřebovávají přibližně 10 % atmosférického CH_4 .

Jsou známy 3 cesty přenosu CH_4 z pedosféry do atmosféry, a to prostřednictvím difuze, eboluce (Smith a kol., 2003; Gauci a kol., 2010) a transportu cévními svazky bylinné vegetace (Butterbach-Bahl a kol., 1997; Rusch a Rennenberg, 1998; McBain a kol., 2004; Pangala a kol., 2014) (Obr. 7). Podíl jednotlivých cest na globálních tocích závisí na daném ekosystému. Např. na rýžových polích, kde prováděli výzkum Butterbach-Bahl a kol. (1997) bylo cca 90 % uvolněno rostlinou, naproti tomu difuze a eboluce byly minimální.



Obr. 7 Znárodnění výměny plynů mezi pedosférou a atmosférou.

Carmichael a kol., 2014

2.4.1. Transport CH_4 rostlinou

Rostlina vede CH_4 prostřednictvím mezibuněčných prostor, aerenchymu (Butterbach-Bahl a kol., 1997; Rusch a Rennenberg, 1998; McBain a kol., 2004; Pangala a kol., 2014) a/nebo xylémem na základě transpiračního proudu (Rusch a Rennenberg, 1998). Dřeviny uvolňují CH_4 z aerenchymu do atmosféry přes útvary lenticely nebo průduchy (Butterbach-Bahl a kol., 1997; Pangala a kol., 2014). Gauci a kol. (2010) diskutují myšlenku, že rostliny přijímají CH_4 s vodou kořeny a transportují ho v podobě kapalně fáze prostřednictvím transpirace.

2.5. Produkce CH₄ rostlinou

Dlouhou dobu byly rostliny chápány pouze jako prostředek, přes který se plyny vytvořené v půdě dopravovaly z podzemních částí do nadzemních a uvolňovaly do atmosféry. Nicméně byly navrženy další zdroje tvorby CH₄, a to mimo půdu.

Zeikus a Ward (1974) identifikovali bakterie rodu *Methanobacterium* v jádrovém dřevě dřevin *Populus deltoides*, *Ulmus americana* a *Salix nigra*, které produkovaly CH₄ přímo uvnitř kmene. Stejně jako v případě půdy, tak i uvnitř rýže byl popsán proces oxidace oxidačními bakteriemi (Gilbert a kol., 1998). U *Sphagnum sp.* byly dokonce nalezeny částečně endofytické metanotrofní bakterie v hyalinních buňkách, které také vykazovaly oxidační aktivitu vůči CH₄ (Raghoebarsing a kol., 2005).

2.5.1. Produkce CH₄ samotnou rostlinou

Keppler a kol. (2006) popsali do té doby neznámý mechanismus vzniku CH₄ mikroorganismy za aerobních podmínek. Toto zjištění vyvolalo mnoho debat mezi vědeckou komunitou. Bylo provedeno několik výzkumů, které toto tvrzení potvrdily (např. Wang a kol., 2008; Brüggemann a kol., 2009), ale i vyvrátily (Dueck a kol., 2007; Nisbet a kol., 2009).

Jako významný prekurzor pro vznik CH₄ byla určena ester methylová skupina (– CH₃). Tato skupina je součástí pektinu, který představuje 7-35 % buněčné stěny v listech a ligninu, který je hlavní složkou dřeva (31%) (Keppler a kol., 2004). Skupina – CH₃ byla uvolněna enzymem z buněčné stěny a CH₄ z ní vznikal v neenzymatické reakci při aerobních podmínkách (Keppler a kol., 2008). Při vyšších teplotách a při vystavení slunečnímu a ultrafialovému záření došlo k nárůstu tvorby a emisí CH₄ (Keppler a kol. 2006, 2008). Rostliny vystavené UV záření a jiným fyziologickým stresům uvolňovaly ROS a ty (hlavně – OH radikál) způsobovaly uvolnění methylových skupin z pektinu (Messenger a kol., 2009).

2.6. Mokřady a jejich vymezení

Mokřady pokrývají přibližně 5 % povrchu Země (Prigent a kol., 2007) a zároveň jsou největším individuálním přírodním zdrojem CH₄ do atmosféry (Schlesinger a Bernhardt, 2013). Je to biotop na rozhraní suchozemských ekosystémů

a povrchových vod. Přispívají ke zmírňování dopadů povodní, zlepšují kvalitu vody ve vodních tocích a zmírňují důsledky eroze (Hattermann a kol., 2008). Živiny a látky unášené vodou se zde usazují a recyklují.

Definici pojmu „mokřad“ vymezuje Ramsarská úmluva, podepsaná v Íránu v roce 1971, ve znění: „*území bažin, slatin, rašelinišť i území pokrytá vodou, přirozeně i uměle vytvořená, trvalá či dočasná, s vodou stojatou či tekoucí, sladkou, brakickou či slanou, včetně území s mořskou vodou, jejíž hloubka při odlivu nepřesahuje šest metrů*“. Pro potřeby České republiky se mokřadem rozumí zejména: rašeliniště a slatiniště, rybníky, soustavy rybníků, lužní lesy, nivy řek, mrtvá ramena, tůňe, zaplavované nebo mokré louky, rákosiny, ostřicové louky, prameny, prameniště, toky a jejich úseky, jiné vodní a bažinné biotopy, údolní nádrže, zatopené lomy, šterkovny, pískovny, horská jezera, slaniska (MŽP, 2018).

2.7. Charakteristika Mokřých Luk

Oblast Mokré Louky jsou plochou sníženinou o rozloze 450 ha. Nachází se východně od města Třeboň v jižních Čechách jako součást CHKO a BR Třeboňsko. Průměrná nadmořská výška je 426 m n. m., průměrný roční úhrn srážek 614 mm, a průměrná roční teplota vzduchu kolem 7,5 °C (CZ-LTER, 2018). Vyskytují se zde hlavně kultivované rašeliniště, slatiniště a vrbiny na mocné vrstvě humolitu – to odporuje botanickému i ekologickému vymezení „luk“, proto byl přidán pojem Mokré (Jeník a Květ, 1983). V době záplav může výška vodní hladiny razantně stoupnout a překročit úroveň dvou metrů, jako se tomu stalo při záplavách v roce 2002 a 2006.

Experimentální část bakalářské práce byla prováděna na Mokřích Loukách u Třeboně, které se nacházejí na území Třeboňské pánve v jižních Čechách. Pánev je tvořena pískovými a jílovými sedimenty z dob křídy do miocénu, zatímco většina území, převážně východního, je tvořena vyvěřelými krystalickými horninami. Zvlněná krajina dosahuje 550 m n.m. a roviny kolem 410 až 470 m n.m. (Jeník a Příbyl, 1978). Tato oblast je překrytá vrstvou slatiny nebo rašeliny, dlouhodobě zamokřené nebo zaplavované vodou. Půdy jsou pod stálým vlivem vysoké hladiny v přilehlé nádrži (Rožmberk) nebo toku (Jeník a Květ, 1983). Třeboňsko bylo roku 1977 zařazeno do Programu „Člověk a biosféra“ (MAB) UNESCO a tím zapojeno do celosvětové sítě

biosférických rezervací. Dále roku 1979 bylo vyhlášeno Ministerstvem kultury ČSR za Chráněnou krajinnou oblast (CHKO) o rozloze 700 km² (Jeník a Květ, 2002).

Roku 1976 byla na lokalitě postavena meteorologická stanice Botanického ústavu ČSAV, která již není používána. V dnešní době se na této lokalitě nachází ekosystémová stanice Třeboň, která je zřizována Ústavem výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. (Obr. 8). Zabývá se dlouhodobým kontinuálním monitorováním základních meteorologických charakteristik (teplota a vlhkost vzduchu, teplota půdy, srážky, směr a rychlost větru, hladina spodní vody), toků energie a látek, zpracováním fyziologických procesů jako je fotosyntéza, respirace a transpirace.



Obr. 8 Ekosystémová stanice Třeboň na Mokřích Loukách. Foto: Janebová, 2016

Stanice je vybudovaná na konstrukci samonosného odlehčeného pontonu, který zajišťuje nepoškození nainstalovaných přístrojů při záplavách. Proti odplutí je ponton ukotven a při zvedající se hladině stoupá pomocí vodících tyčí a při opadu vodní hladiny se vrátí na původní místo. Nainstalované přístroje pro měření toků CO₂, CH₄ a vodní páry jsou analyzátoři plynů Licor 7200, Licor 7700 a LGR pro měření emisí CH₄ (Stellner, 2015).

Na této ploše byly prováděny dlouhodobé studie zaměřené na měření srážek, teplotu ovzduší a výšku vodního sloupce a jejich vliv na celý mokřadní ekosystém (Dušek a kol., 2012; 2013; 2017). V letech 2012 a 2014 bylo provedeno měření emisí metanu z mokřadu. Cílem bylo zjistit, zda vegetace umístěná na pahorcích navyšuje

emise do atmosféry. Byla porovnávána holá půda bez vegetace a pahorky s vegetací tvořenou *Carex acuta* L. Vítková a kol. (2017) došli ke zjištění, že toky byly nepřímou úměrou ovlivněny výškou hladiny vody a jejich nedávnou dynamikou (tj. vyšší hladina vody vedla k nižším tokům). Vegetace přispěla k vyšším tokům, když byla hladina vody nad půdním povrchem a bazální část výhonku byla vystavena atmosféře. Po porovnání s dosavadní literaturou o vlivu pahorků v mokřadech v mírném a boreálním podnebí tato studie přinesla nižší toky. Možným vysvětlením by mohla být individuální prostorová struktura jednotlivých pahorků (Vítková a kol., 2017).

Přibližně do roku 1950 byla mokřadní vegetace na Mokřých Loukách pravidelně každoročně sečena. Po skončení kosení se zde vyvinuly charakteristické pahorky (bulty) tvořené hlavně ostřicí štíhlou (*Carex acuta* L.) a plochy holé půdy (šlenky) (Stellner, 2015) Další vegetační pokryv je představován tzv. mokřadní vegetací asociace *Caricetum gracilis* s největším zastoupením ostřice štíhlé (*Carex acuta*), dále se zde vyskytuje třtina šedavá (*Calamagrostis canescens*), chrstice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*), zblochan vodní (*Glyceria maxima*) a puškvorec obecný (*Acorus talamus*) (Chytrý, 2011; Dušek a kol., 2012).

Dřevinám se na mokřadech nedaří kvůli nedostatku kyslíku v půdě. Těmto podmínkám se dovedou přizpůsobit dřeviny jako je vrba, olše a topol. V oblasti Mokřých Luk mají dominantní úlohu *Salix triandra*, *Salix fragilis*. Po ukončení kosení došlo k razantnímu nárůstu charakteristických útvarů slatinné vrbiny představována *Salix cinerea* a *Salix pentandra* (Jeník a Květ, 1983).

2.8. Zkoumané dřeviny (*Salix fragilis* a *Salix pentandra*)

2.8.1. *Salix fragilis* (vrba křehká)

Čeleď: *Salicaceae* (vrbovité)

Zkoumanými dřevinami na lokalitě Mokré Louky byly vrba křehká (*Salix fragilis*) a vrba pětimužná (*Salix pentandra*). Vrba křehká je až 15 m vysoký strom, s rozkladitou, nízko větvicí se korunou a silnými křivými větvemi. Kmen může mít v průměru až 50 cm, je nízký, borka hrubá, tmavohnědá. Letorosty lysé, šedo zelené, v uzlinách lámavé, pupeny 4-6 mm dlouhé, květní neodlišené, krycí šupina lysá, často v horní části zaschlá a černá. Listy jsou kopinaté, čepel 7-10 cm dlouhá, 1,5-2 cm široká, tuhá, na líci tmavozelená, lesklá, na rubu šedo zelená, oboustranně lysá, na

okraji hrubě pilovitá. Řapík je dlouhý 1,0-1,3 cm se dvěma žlázkami u báze čepele. Palisty jsou kopinaté, záhy opadavé. Jehnědy úzce válcovité. Samčí květy se dvěma tyčinkami, nitky na bázi pýřité. Samičí s téměř přisedlým lysým semeníkem, čnělka krátká, blizny ven zakřivené, dvouzářezové. Květní listeny jsou podlouhlé, řídké chlupaté, žlutozelené. *Salix fragilis* má dvě nektariové žlásky: přední soudečkovitá, zadní válcovitá. V každé chlupaté tobolce se čtyřmi základy semen. Dožívá se 60 let. Plodit začíná od 8.-10. roku a kvete v období duben-květen. Vyskytuje se mezi pobřežními křovinami, břehovými porosty podél potoků a bystřin, na okrajích vlhkých luk, vodních příkopů a břehů rybníků. Daří se jí na propustných půdách se značnou příměsí skeletu, ale i na minerálně chudých podkladech. Je to mrazuvzdorná a světlomilná dřevina. Dobře snáší krátkodobé záplavy, ale ne stagnující podzemní vodu (Hejný a Slavík, 1990).

2.8.2. *Salix pentandra* (vrba pětimužná)

Čeleď: *Salicaceae* (vrbovité)

Salix pentandra je 10-15 m vysoký strom nebo keř. Kmen má přímý, s hladkou šedou borkou, u starších stromů je borka tmavá, podélně zbrázděná. Letorosty lysé, lesklé a červenohnědé s pupeny 4-6 mm dlouhými. Listy jsou eliptické nebo podlouhlé s 5,5-8 cm dlouhou a 1,8-3,0 cm širokou čepelí, okraj je žláznatě pilovitý. Na líci leskle tmavozelená a na rubu světlejší, lysá a v mládí lepkavá. Řapík s několika žlázkami u báze čepele je dlouhý 0,4-0,9 cm. Jehnědy jsou válcovité, 4-5 cm dlouhé, 1,0-1,4 cm široké, stopka 3-4 cm dlouhá s několika žláznatě pilovitými listy. Samčí květy s 6-9 (-12) tyčinkami. Nitky jsou na bázi silně chlupaté a má dvě nektariové žlásky. Samičí květy s lysým, krátce stopkatým semeníkem, zřetelnou čnělkou, blizny ven zakřivené, dvoualočné až dvouzářezové. Nektariová žláзка je jen jedna, límečkovitá, často nepravidelně členěná. Květní listeny jsou široké, veliké a zelené, s několika žlázkami na okraji, ve spodní polovině chlupaté, u samičích květů po odkvětu zasychají a opadají. Semena dozrávají na podzim, tobolky s 11-12 základy semene vytrvávají přes zimu na stromě a až s příchodem jara se rozlétávají. *S. pentandra* kvete od května do června (Hejný a Slavík, 1990). Vyskytuje se na okrajích bažinných a rašelinných luk. Spíše na kyselých, často rašelinných půdách. Je to světlomilná dřevina (Hejný a Slavík, 1990).

3. Metodika práce

3.1. Terénní měření

Terénní měření se uskutečnilo v termínu od 17. 5. do 20. 5. 2016 na Mokřých Loukách u Třeboně (49°01' s. š.; 14°46' v. d. a 426 m n. m.) v blízkosti ekosystémové výzkumné stanice Třeboň v jižních Čechách. V době naší měřicí kampaně byla průměrná dopolední teplota 16,7 °C, odpolední 13,6 °C a teplota půdy ve 3 cm 10,4 °C. Všechna měření probíhala od 10:00 do 19:30 h. Bylo polojasno až zataženo, foukal středně silný vítr.

Pro odběr vzorků stopových plynů uvolněných z kmenů a půdy byl použit statický komorový systém.

3.1.1. Reprezentativní výběr stromů a půdy pro měření

Terénnímu měření předcházela instalace měřících komor na kmeny čtyř vybraných vrb (*Salix pentandra* a *Salix fragilis*) a k nim přilehlých půdních komor proto, aby se zabránilo možnému zkreslení dat. Omezujícím kritériem při výběru zkoumaných stromů a půdy byla jejich dostupnost v náročném terénu, umožňující instalaci měřicího systému. Byly vybrány 3 jedinci druhu *Salix pentandra* přibližně stejného stáří a jeden jedinec druhu *Salix fragilis*. Biometrické parametry měřených stromů jsou uvedeny v Tab. 1. Díky dřívější instalaci byl povrch borky uvnitř komor částečně pokryt fotoautotrofními organismy, tzv. cryptogamic stem covers (Tab. 2).

Tab. 1 Přehled označení vrb, výšky stromů a obvody kmenů.

SALIX	LATINSKÝ NÁZEV	ODHADOVANÁ VÝŠKA STROMU	OBVOD KMEN VE VÝŠCE PRSOU
<i>Salix 1</i>	<i>Salix pentandra</i>	19 m	0,87 m
<i>Salix 2</i>	<i>Salix pentandra</i>	23 m	1,10 m
<i>Salix 3</i>	<i>Salix fragilis</i>	9 m	0,50 m
<i>Salix 4</i>	<i>Salix pentandra</i>	16 m	0,96 m

Tab. 3 Přehled procentuálního zastoupení cryptogamů na borce kmene uvnitř komor a nejrozšířenější zástupce.

SALIX	PROCENTUÁLNÍ ZASTOUPENÍ CRYPTOGRAMŮ	NEJROZŠÍŘENĚJŠÍ ZÁSTUPCE
<i>Salix 1</i>	57 %	<i>Apathococcus, Orthotrichum stramineum, Trentepohlia sp.</i>
<i>Salix 2</i>	72 %	<i>Apathococcus</i>
<i>Salix 3</i>	30 %	<i>Apathococcus</i>
<i>Salix 4</i>	47 %	<i>Apathococcus, Trentepohlia sp.</i>

V přílehlé blízkosti výzkumných vrby byly naistalovány půdní komory. Půdní komora č. 1 se nacházela na rozmezí *Salix 1 (S. pentandra)* a *Salix 2 (S. pentandra)*. Půdní komora č. 3 byla umístěna v blízkosti *Salix 3 (S. fragilis)* a půdní komora č. 4 v těsné blízkosti *Salix 4 (S. pentandra)*. Tato umístění byla vybrána podle možností terénu a instalace. Také uvnitř půdních komor bylo možné nalézt vegetaci (Tab. 3).

Tab. 2 Přehled procentuálního zastoupení vegetace uvnitř komor a nejrozšířenější zástupce.

PŮDNÍ KOMORA	PROCENTUÁLNÍ ZASTOUPENÍ VEGETACE UVNITŘ PŮDNÍ KOMORY	NEJROZŠÍŘENĚJŠÍ ZÁSTUPCE
Půdní komora č. 1	30 %	<i>Carex gracilis</i>
Půdní komora č. 3	25 %	<i>Mentha arvensis, Glyceria maxima</i>
Půdní komora č. 4	Minimum vegetace	-

3.1.2. Charakteristika komorového systému a jeho instalace na vybrané vrby

3.1.2.1. Design kmenových komor

K měření byly použity dva tvary kmenových komor. Krabičkové komory byly naistalovány na *S. pentandra*, které se při měření uzavíraly vzduchotěsnými víčky. Samotná kostra kmenové komory byla představována obdélníkovou plastovou krabičkou, ze které bylo vyříznuto dno. Pomocí lepidla byl ke krabičce přilepen neoprenový rám tlustý 2 cm, který kopíroval hrany dna komory. Celá komora byla následně silikonem připevněna na kmen, ze kterého byla kvůli montáži opatrně odstraněna horní hrubá vrstva kůry. K uzavření komory docházelo díky přiléhajícímu

víčku se silikonovým těsněním a systémem Lock&Lock na každé straně. Prostřednictvím spojek byly k víčkům připevněny hadičky vedoucí vzduch do analyzátoru (Obr. 9) (Machacova a kol., 2017).



Obr. 9 Detail uzavřené kmenové komory.

Foto: Janebová, 2016

Druhým typem kmenových komor byla celoobvodová komora na *S. fragilis* (Obr. 10). Byla tvořena dvěma polyethylenovými kruhovými deskami v jejichž středu byl vyříznut otvor pro kmen stromu. Silikonem byly utěsněny mezery mezi deskou a kmenem. Desky propojovaly hliníkové trubky. K vytvoření stěn kolem této konstrukce byla použita ve 2 až 3 vrstvách teflonová fólie FEP o síle 0,05 mm nepropustná pro CH_4 a CO_2 . Do dolní části komory byly namontovány spojky pro zavedení trubek při měření (Machacova a kol., 2016).



Obr. 10 Detail celoobvodové komory *Salix 3* (*S. fragilis*).

Foto: Janebová, 2016

Za účelem profilových měření byly na kmeny umístěny protilehlé komory ve třech výškových úrovních nad sebou (označované jako úroveň 1, úroveň 2 a úroveň 3) (Obr. 11). Instalované komory měly dvě velikosti: malá komora (objem 0,00074 m³, povrch 0,00539 m²) a střední komora (objem 0,00085 m³, povrch 0,00835 m²). Výjimku představovala první úroveň *Salix 3* (*S. fragilis*), kam byla naistalována celoobvodová komora (objem 0,00432 m³, povrch 0,07388 m²). Konkrétní umístění a velikosti závisely na možnostech kmenů. Výšky komor jednotlivých úrovní na každé vrbě jsou prezentovány v Tab. 5, 9.



Obr. 11 Profilové měření na *Salix 4* (*S. pentandra*).

Foto: Janebová, 2016

3.1.2.2. *Design půdních komor*

Systém půdních komor byl složen z odnímatelných půdních komor a z půdních límců zapuštěných do půdy v letech 2014-2015. Obě části dohromady tvořily statický komorový systém.

Půdní komora (Obr. 12) vyrobená z umělé hmoty (vysoká 0,42 m, vnitřní průměr 0,43 m a objem 60 l) se usazovala na půdní límec. Samotná půdní komora obsahovala nainstalované odběrové zařízení a ventilátor, který způsoboval rovnoměrnou cirkulaci uvolňovaných plynů pod komorou. Odběrové zařízení bylo tvořeno čerpadlem, do kterého byl pomocí vstupní pryžové hadice skrz prachový filtr čerpán vzduch z komory. Výstup z čerpadla představovala výstupní pryžová hadice vedoucí do záchytného sáčku. Samotné čerpadlo pak bylo napojeno na časovač potřebný k naprogramování odběru vzorku. Záchytný sáček byl vyroben z umělohmotné fólie (Vítková a kol., 2017).

Půdní límec (Obr. 13) byl do půdy usazen ocelovou konstrukcí antikorozně upravenou. Nad povrch půdy vystupoval plastový žlábek, do kterého se usazovala horní komora. K zamezení unikání plynů mimo komoru byl žlábek naplněn vodou. Došlo tedy k vzduchotěsnému spojení obou částí. Průměr límce byl 0,451 m, hloubka zapuštění konstrukce se lišila v závislosti na přítomné vegetaci a půdních podmínkách, a proto i objem celého komorového systému byl odlišný (Vítková a kol., 2017).



Obr. 12 Detail půdní komory.

Foto: Janebová, 2016



Obr. 13 Detail půdního límce.

Foto: Janebová, 2016

3.1.3. Průběh měření toků CH_4 a CO_2 z kmenových komor

Před začátkem měření bylo zapotřebí sériově propojit komory v jedné úrovni prostřednictvím polyuretanových trubek v jeden systém. Konstantní průtok a míchání vzduchu uvnitř systému bylo zajištěno čerpadlem. Dále napojení na on-line přenosný laserový plynový analyzátor Los Gatos Research (Los Gatos Research inc., USA) (Obr. 14), který byl bezdrátově propojen s tabletem prostřednictvím aplikace VNC viewer. Dalším potřebným krokem bylo měření koncentrace plynů CH_4 a CO_2 ve vzduchu v okolí vrb, aby došlo k ustálení koncentrace těchto plynů v přístroji.

Analyzátor LGR používá laserovou absorpční technologii zvanou Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS) čtvrté generace. Analyzátor pracuje na základě principu vylepšené dutinové laserové absorpce (cavity enhanced laser absorption). Uvnitř dutiny prochází laserový paprsek, který absorbuje molekuly skleníkových plynů. Na základě pohlcování záření molekulami se vypočítá koncentrace daných plynů (LGR, 2018).



Obr. 14 Laserový přenosný plynový analyzátor.

Foto: Janebová, 2016

Samotné měření na úrovni 1 začalo ihned po pomalém přiložení vík. Následoval 15-20minutový odběr vzorků podle změny koncentrací CH₄ a CO₂ v daném systému. Po ukončení měření byly komory otevřeny a následovalo promývání analyzátoru. Stejným způsobem probíhalo měření i na ostatních úrovních vrby a dalších vrb.

U *S. fragilis* měření úrovně 1 (celoobvodová komora) byla konstrukce utěsněna teflonovou folií a propojena hadičkami k analyzátoru. Samotné změny koncentrací v komoře byly měřeny způsobem shodným s ostatními kmenovými komorami.

Díky dlouhému časovému intervalu bylo možné postup opakovat v rámci jedné vrby 2krát denně, tj. jednou dopoledne a jednou odpoledne.

3.1.4. Průběh měření toků CH₄ a CO₂ z půdních komor

Doba měření toků CH₄ i CO₂ z půdy byla 40 min., během které byly akumulovány uvolňované plyny z půdy v komoře (Obr. 15). V čase t_0 došlo k uzavření komory tzn. přiložení půdní komory na límec a zalití vodou. Následovalo sepnutí časového spínače, který po 40 minutách (čase t_1) automaticky spustil odběr plynného vzorku do záchytného sáčku pro následné analýzy. Současně v čase t_0 došlo k odběru okolního vzduchu do záchytného sáčku pro stanovení počáteční koncentrace CH₄ a CO₂ v komorách. Vzorky plynů v záchytných sáčcích byly okamžitě (během 5-10 minut) analyzovány analyzátozem. Koncentrace CH₄ a CO₂ byla vypočítána jako rozdíl koncentrace plynů v čase t_0 a t_1 .

Každá půdní komora byla měřena 2krát denně, tj. dopoledne a odpoledne. Měření kmenových komor probíhalo paralelně s měřením půdních komor.



Obr. 15 Měření na půdní komoře č. 4.

Foto: Janebová, 2016

3.2. Analýza dat

3.2.1. Výpočet objemu a povrchu kmenových komor

Objem systému kmenových komor byl počítán jako součet objemů obou komor, objemu neoprenových rámců daných komor a objemu hadiček propojující komory a připojené k analyzátoru. U *S. fragilis* byl objem celoobvodové komory vyjádřen jako rozdíl objemu včetně stromu a objemu stromu.

Povrch kmene (bere se jako rovný povrch) uvnitř komor byl určen jako obsah obdélníku. Od něho byly odečteny přesahující vrstvy silikonu. V případě *S. fragilis* byl povrch kmene uvnitř celoobvodové komory vypočten jako součin obvodu kmene a výšky komory.

3.2.2. Výpočet objemu a povrchu systému půdní komory

Objem půdní komory byl počítán jako součet objemu půdní komory a objemu půdního límce, v případě půdní komory č.1 byl odečten objem trsu trávy. Povrch byl určen jako obsah kruhu.

3.2.3. Počítání rychlostí toků

Ze získaných dat z měření vyjádřených v jednotkách ppm byla určována rychlost toků CH₄ a CO₂ prostřednictvím lineární závislosti (Machacova a kol., 2016).

$$F = S \frac{V M}{A V_m} * 3600$$

kde: F= tok plynu [$\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$]

S= sklon uložení koncentrace plynů [ppm s^{-1}]

V= objem komory [m^3]

A= plocha povrchu kmene, nebo plocha v půdní komoře [m^2]

M= molární hmotnost CH₄ a CO₂ [pro CH₄ 16,4 g mol⁻¹ a CO₂ 44,1 g mol⁻¹]

V_m= molární objem ideálního plynu [$0,0245 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$]

3.3. Statistika

Salix 3 (S. fragilis) měla několikanásobně vyšší toky, a proto byla z důvodu možného zkreslení výsledků oddělena od *Salix 1, 2 a 4 (S. pentandra)*, ze kterých byla vytvořena samostatná skupina pro analyzování.

Data rychlostí toků CH₄ a CO₂ byla statisticky vyhodnocena v programu *STATISTICA 12.0.* za použití Studentova t testu a jednofaktorové analýzy variance (ANOVA, (p <0,05)). Výsledné grafy byly zhotoveny v programu *STATISTICA 12.0.* a tabulky v programu *Microsoft Office Excel 2016* a *Microsoft Office Word 2016.*

4. Výsledky

4.1. Zjištění statisticky významných rozdílů mezi dopoledními a odpoledními toky

4.1.1. Toky CH₄ z kmenů *Salix pentandra* a *Salix fragilis*

Bylo zjištěno, že *Salix pentandra* a *Salix fragilis* emitují CH₄ (Tab. 4). Toky naměřené v komoře v úrovni 1 se pohybovaly řádově v jednotkách stovek, tedy $165,17 \pm 5,84 \text{ ug CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ až $487,51 \pm 56,22 \text{ ug CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ v dopoledních hodinách a $170,60 \pm 6,29 \text{ ug CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ až $391,34 \pm 49,56 \text{ ug CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ v odpoledních. Jedinou výjimku představovala pouze *Salix 3* (*S. fragilis*), jejíž toky byly desetinásobně vyšší dopoledne $2494,35 \pm 292,36 \text{ ug CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ a odpoledne $2261,56 \pm 398,56 \text{ ug CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vůči ostatním vrbám.

Tab. 4 Hodnoty toků CH₄ v dopoledních a odpoledních hodinách u jednotlivých vrb a v jednotlivých úrovních měření. Uvedené jsou průměrné hodnoty \pm směrodatná odchylka a hodnoty statistických testů. *Salix 1, 2 a 4* je *S. pentandra* a *Salix 3* je *S. fragilis*.

SALIX	TOK CH₄ DOPOLEDNE [$\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]	TOK CH₄ ODPOLEDNE [$\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]	t	p	F-poměr
SALIX 1					
ÚROVEŇ 1	$165,17 \pm 5,84$	$170,60 \pm 6,29$	-1,10	0,33	1,16
ÚROVEŇ 2	$98,90 \pm 4,59$	$87,66 \pm 5,35$	2,76	0,05	1,36
ÚROVEŇ 3	$22,61 \pm 0,92$	$23,01 \pm 2,10$	-0,30	0,78	5,26
SALIX 2					
ÚROVEŇ 1	$384,39 \pm 9,48$	$391,34 \pm 49,56$	-0,24	0,82	27,47
ÚROVEŇ 2	$139,77 \pm 2,87$	$135,92 \pm 17,23$	0,38	0,72	36,14
ÚROVEŇ 3	$75,24 \pm 8,91$	$77,94 \pm 7,00$	-0,41	0,70	1,62
SALIX 3					
ÚROVEŇ 1	$2494,35 \pm 292,36$	$2261,56 \pm 398,56$	0,82	0,46	1,86
ÚROVEŇ 2	$52,86 \pm 14,40$	$41,43 \pm 9,31$	1,15	0,31	2,39
ÚROVEŇ 3	$92,41 \pm 22,45$	$79,28 \pm 24,50$	0,68	0,53	1,19
SALIX 4*					
ÚROVEŇ 1	$487,51 \pm 56,22$	$294,56 \pm 341,76$	1,04	0,37	36,86
ÚROVEŇ 2	$44,88 \pm 10,87$	$56,31 \pm 2,23$	-1,39	0,26	23,73
ÚROVEŇ 3	$42,61 \pm 3,54$	$49,80 \pm 4,38$	-2,05	0,13	1,53

* vzhledem k meteorologickým podmínkám nebylo možné provést 3. měření.
Průměr jen ze 2 hodnot, výsledky orientační.

Na základě výsledků statistických testů nebyl zjištěn signifikantní rozdíl mezi dopoledními a odpoledními měřeními, proto byly toky CH₄ zprůměrovány za celý den pro každý strom a úroveň zvlášť (Tab. 5).

Tab. 5 Průměrné denní toky CH₄ u jednotlivých vrb a v jednotlivých úrovních měření. Uvedené jsou průměrné hodnoty ± směrodatná odchylka a vzdálenost spodního okraje komory od země. *Salix 1, 2 a 4* je *S. pentandra* a *Salix 3* je *S. fragilis*.

SALIX	TOK CH₄ [μg CH ₄ m ⁻² h ⁻¹]	VZDÁLENOST SPODNÍHO OKRAJE KOMOR OD ZEMĚ [m]
SALIX 1		
ÚROVEŇ 1	167,89 ± 6,19	0,355
ÚROVEŇ 2	93,28 ± 7,60	0,6925
ÚROVEŇ 3	22,81 ± 1,46	1,625
SALIX 2		
ÚROVEŇ 1	387,86 ± 32,14	0,385
ÚROVEŇ 2	137,85 ± 11,24	0,840
ÚROVEŇ 3	76,59 ± 7,32	1,595
SALIX 3		
ÚROVEŇ 1	2377,96 ± 337,62	0,355
ÚROVEŇ 2	47,15 ± 12,52	1,115
ÚROVEŇ 3	85,84 ± 22,21	1,565
SALIX 4*		
ÚROVEŇ 1	496,09 ± 45,76	0,225
ÚROVEŇ 2	47,81 ± 8,98	0,760
ÚROVEŇ 3	45,49 ± 5,16	1,355

* vzhledem k meteorologickým podmínkám nebylo možné provést 3. měření.
Průměr jen ze 2 hodnot, výsledky orientační.

4.1.2. Toky CH₄ z půdy

Na základě naměřených dat se potvrdilo, že i půda uvolňuje do svého okolí CH₄ (Tab. 6). Dopolnední toky (233,79 ± 129,03 ug CH₄ m⁻² h⁻¹ až 540,96 ± 270,34 ug CH₄ m⁻² h⁻¹) se ani v případě půdy statisticky signifikantně nelišily od odpoledních (246,00 ± 110,20 ug CH₄ m⁻² h⁻¹ až 739,15 ± 110,39 ug CH₄ m⁻² h⁻¹). Proto i u půdy stejně jako u kmenových toků byly toky zprůměrovány (Tab. 7).

Tab. 6 Hodnoty toků CH₄ v dopoledních a odpoledních hodinách z půdních komor. Uvedené jsou průměrné hodnoty ± směrodatná odchylka a hodnoty statistických testů.

ČÍSLO PŮDNÍ KOMORY	TOK CH ₄ DOPOLEDNE [μg CH ₄ m ⁻² h ⁻¹]	TOK CH ₄ ODPOLEDNE [μg CH ₄ m ⁻² h ⁻¹]	t	p	F-poměr
1	233,79 ± 129,03	246,00 ± 110,20	-0,12	0,91	1,37
3	540,96 ± 270,34	302,67 ± 185,55	1,26	0,28	2,12
4*	498,78 ± 262,78	739,15 ± 110,39	-1,18	0,32	5,67

* vzhledem k meteorologickým podmínkám nebylo možné provést 3. měření. Průměr jen ze 2 hodnot, výsledky orientační.

Tab. 7 Průměrné denní toky CH₄ z půdy. Uvedené jsou průměrné hodnoty ± směrodatná odchylka.

ČÍSLO PŮDNÍ KOMORY	TOK CH ₄ [μg CH ₄ m ⁻² h ⁻¹]
1	239,90 ± 107,53
3	421,81 ± 245,03
4*	594,93 ± 234,32

* vzhledem k meteorologickým podmínkám nebylo možné provést 3. měření. Průměr jen ze 2 hodnot, výsledky orientační.

4.1.3. Toky CO₂ z kmenů *Salix pentandra* a *Salix fragilis*

Krom měření emisí CH₄ proběhlo i měření emisí CO₂, které jsou nedílnou součástí metabolické aktivity všech živých organismů. Je patrné, že se toky CH₄ a CO₂ velmi lišily. Toky metanu se pohybovaly v řádech g CH₄ m⁻² h⁻¹, zatímco CO₂ v mg či g CO₂ m⁻² h⁻¹. Toky naměřené v komoře v úrovni 1 se pohybovaly řádově v jednotkách stovek, tedy 182,13 ± 33,70 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ až 319,52 ± 43,50 mg CO₂ m⁻² h⁻¹

dopoledne a $251,68 \pm 39,47 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ až $313,69 \pm 57,86 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ odpoledne (Tab. 8). Podobně je tomu i v dalších úrovních krom *Salix 3* (*S. fragilis*), která má v úrovni 2 a úrovni 3 desetinásobky toků ostatních vrb. Nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly mezi dopoledními a odpoledními toky CO₂. Výjimkou byla pouze *Salix 4* (*S. pentandra*) v úrovni 1 způsobených nedostatkem provedených měření. Na základně jinak kladné statistiky byly toky CO₂ zprůměrovány pro každý strom a úroveň zvlášť (Tab. 9).

Tab. 8 Hodnoty toků CO₂ v dopoledních a odpoledních hodinách u jednotlivých vrb a v jednotlivých úrovních měření. Uvedené jsou průměrné hodnoty ± směrodatná odchylka a hodnoty statistických testů. *Salix 1, 2 a 4* je *S. pentandra* a *Salix 3* je *S. fragilis*.

SALIX	TOK CO₂ DOPOLEDNE [mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]	TOK CO₂ ODPOLEDNE [mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]	t	p	F-poměr
SALIX 1					
ÚROVEŇ 1	283,44 ± 51,49	303,03 ± 60,16	-0,43	0,69	1,37
ÚROVEŇ 2	139,23 ± 20,01	140,21 ± 38,17	-0,04	0,97	3,64
ÚROVEŇ 3	110,52 ± 13,09	110,45 ± 29,22	0,00	1,00	4,98
SALIX 2					
ÚROVEŇ 1	238,66 ± 23,965	251,68 ± 39,47	-0,49	0,65	2,71
ÚROVEŇ 2	182,53 ± 11,82	176,46 ± 52,59	0,20	0,85	19,81
ÚROVEŇ 3	196,61 ± 8,66	209,94 ± 63,26	-0,36	0,74	53,31
SALIX 3					
ÚROVEŇ 1	319,52 ± 43,50	285,23 ± 58,25	0,82	0,46	1,79
ÚROVEŇ 2	1442,65 ± 449,40	1289,14 ± 470,86	0,41	0,70	1,10
ÚROVEŇ 3	1627,52 ± 523,57	1486,58 ± 505,65	0,34	0,75	1,07
SALIX 4*					
ÚROVEŇ 1	182,13 ± 33,70	313,69 ± 57,86	-3,33	0,04	2,95
ÚROVEŇ 2	98,96 ± 18,45	131,88 ± 26,29	-1,69	0,19	2,03
ÚROVEŇ 3	126,13 ± 11,26	183,26 ± 37,87	-2,64	0,08	11,31

* vzhledem k meteorologickým podmínkám nebylo možné provést 3. měření. Průměr jen ze 2 hodnot, výsledky orientační.

Tab. 9 Průměrné denní toky CO₂ u jednotlivých vrst a v jednotlivých úrovních měření. Uvedené jsou průměry se směrodatnou odchylkou. Dále je uvedena vzdálenost spodního okraje komory od země.

<i>SALIX</i>	TOK CO ₂ [mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]	VZDÁLENOST SPODNÍHO OKRAJE KOMOR OD ZEMĚ [m]
<i>SALIX 1</i>		
ÚROVEŇ 1	293,24 ± 51,21	0,355
ÚROVEŇ 2	139,72 ± 27,26	0,693
ÚROVEŇ 3	110,48 ± 20,25	1,625
<i>SALIX 2</i>		
ÚROVEŇ 1	245,17 ± 30,06	0,385
ÚROVEŇ 2	179,50 ± 34,25	0,840
ÚROVEŇ 3	203,28 ± 41,04	1,595
<i>SALIX 3</i>		
ÚROVEŇ 1	302,37 ± 49,67	0,355
ÚROVEŇ 2	1365,89 ± 420,17	1,115
ÚROVEŇ 3	1557,05 ± 466,78	1,565
<i>SALIX 4*</i>		
ÚROVEŇ 1	234,75 ± 81,22	0,225
ÚROVEŇ 2	112,13 ± 25,85	0,760
ÚROVEŇ 3	148,98 ± 37,43	1,355

* vzhledem k meteorologickým podmínkám nebylo možné provést 3. měření. Průměr jen ze 2 hodnot, výsledky orientační.

4.1.4. Toky CO₂ z půdy

Toky CO₂ z půdy vykazovaly vyšší toky v rádech mg CO₂ m⁻² h⁻¹. Dopolnední toky se pohybovaly v intervalu od 236,21 ± 31,10 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ do 331,18 ± 36,58 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ a odpolední od 343,75 ± 169,29 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ do 404,05 ± 272,09 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ (Tab. 10). Ani po provedení statistiky nebyl nalezen signifikantní rozdíl. Tab. 11 zobrazuje zprůměrované toky CO₂ z půdy.

Tab. 10 Hodnoty toků CO₂ v dopoledních a odpoledních hodinách z půdních komor. Uvedené jsou průměrné hodnoty ± směrodatná odchylka a hodnoty statistických testů.

ČÍSLO PŮDNÍ KOMORY	TOK CO₂ DOPOLEDNE [mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]	TOK CO₂ ODPOLEDNE [mg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]	t	p	F-poměr
1	331,18 ± 36,58	343,75 ± 169,29	-0,13	0,91	21,41
3	541,65 ± 330,07	404,05 ± 272,09	0,56	0,61	1,47
4*	236,21 ± 31,10	345,60 ± 39,84	-1,09	0,35	10,83

* vzhledem k meteorologickým podmínkám nebylo možné provést 3. měření. Průměr jen ze 2 hodnot, výsledky orientační.

Tab. 11 Znázornění průměrných denních toků CO₂ z půdy. Uvedené jsou průměry se směrodatnou odchylkou.

ČÍSLO PŮDNÍ KOMORY	TOK CO₂ [μg CO ₂ m ⁻² h ⁻¹]
1	337,47 ± 109,75
3	472,85 ± 280,84
4*	279,97 ± 112,16

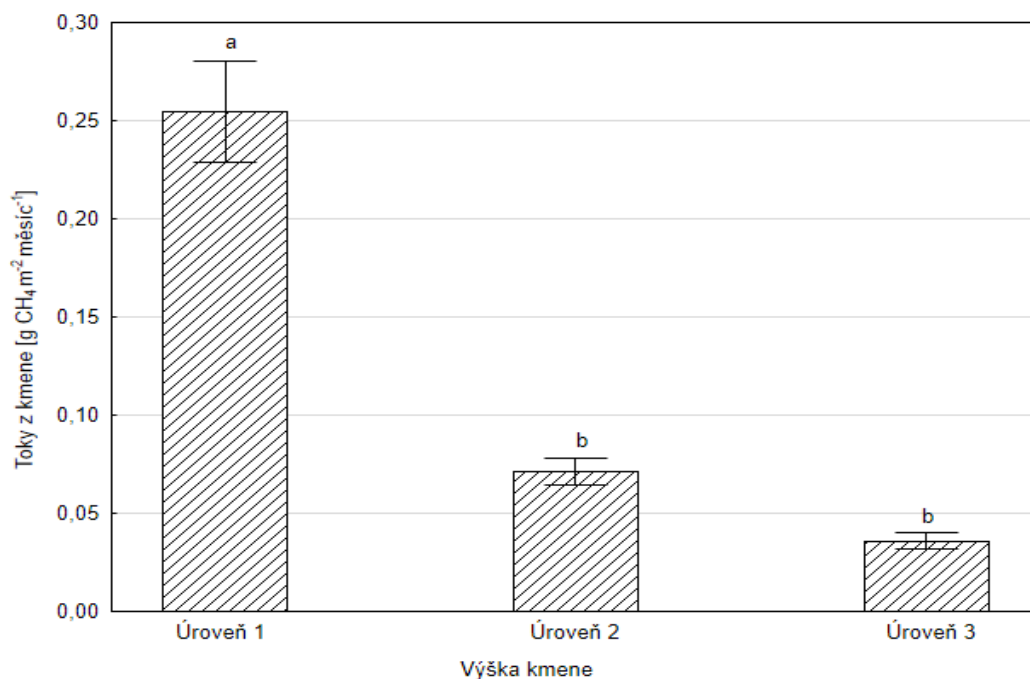
* vzhledem k meteorologickým podmínkám nebylo možné provést 3. měření. Průměr jen ze 2 hodnot, výsledky orientační.

4.2. Analýza statisticky významných rozdílů mezi toky jednotlivých úrovní kmenu

4.2.1. Měsíční toky CH₄ *Salix pentandra* a *Salix fragilis*

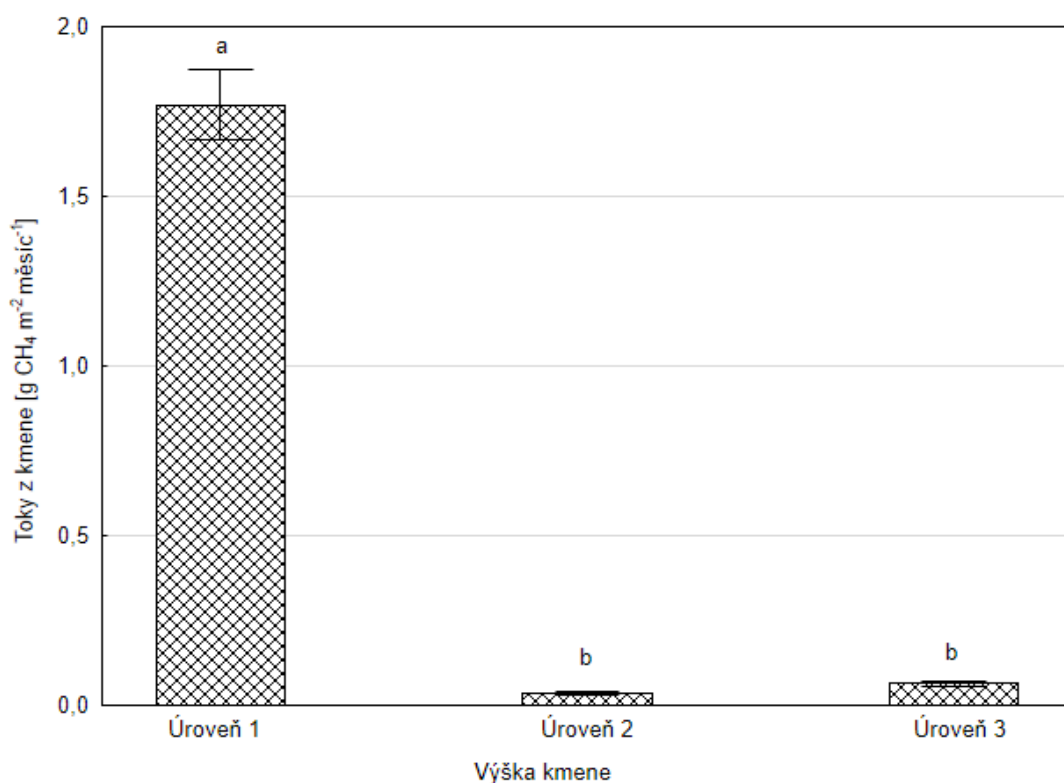
Vzhledem k tomu, že *Salix 3* (*S. fragilis*) vykazovala několikanásobně vyšší toky než *Salix 1, 2 a 4* (*S. pentandra*) nebyla zahrnuta do statistické analýzy s ostatními vrbami. Údaje jsou uvedeny zvlášť.

Měsíční tok CH₄ v úrovni 1 u *Salix pentandra* (3 jedinci) byl více než 3krát vyšší (0,25 g CH₄ m⁻² měsíc⁻¹) než úroveň 2 (0,07 CH₄ m⁻² měsíc⁻¹) a 6krát vyšší než úroveň 3 (0,04 CH₄ m⁻² měsíc⁻¹). Graf ukazuje, že s výškou kmene toky klesaly. Mezi úrovní 1 a úrovní 2 a současně úrovní 1 a úrovní 3 byly zjištěny statisticky významné rozdíly. Za to mezi toky úrovní 2 a úrovní 3 nebyly statisticky významné rozdíly (Obr. 16).



Obr. 16 Graf měsíčního toku CH₄ z kmenů *Salix 1, 2 a 4* (*S. pentandra*) dohromady v závislosti na výšce komor. Chybové úsečky značí střední chybu průměru. Různá písmena v jednotlivých sloupcích značí významné rozdíly dle testu Tukey ($p < 0,05$) při porovnání úrovní mezi sebou.

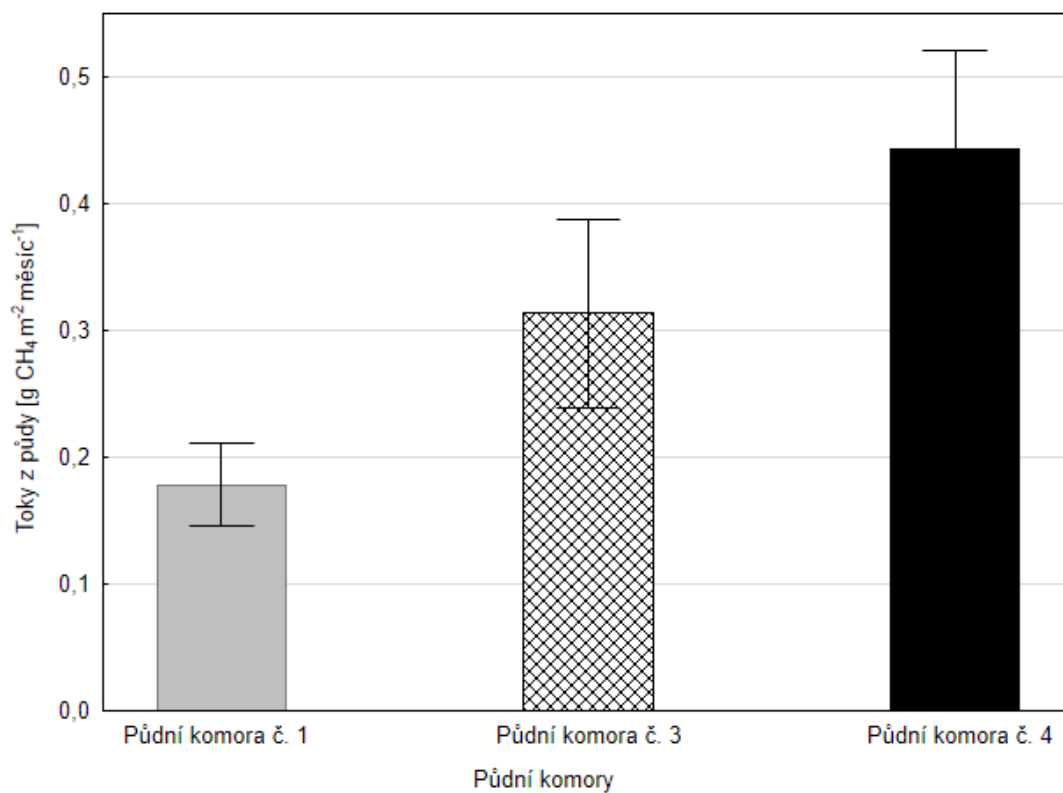
Na Obr. 17 je zobrazen měsíční tok *Salix fragilis* (1 jedinec). Tok z úrovně 2 a úrovně 3 byl minimální v porovnání s úrovní 1, ve které bylo dosaženo hodnoty 1,75 g CH₄ m⁻² měsíc⁻¹. Zatímco toky z úrovně 2 a úrovně 3 se pohybovaly lehce nad 0 g CH₄ m⁻² měsíc⁻¹. U *S. fragilis* byl tok z úrovně 3 nepatrně vyšší než na úrovni 2. To je rozdíl oproti tokům *S. pentandra*. Statistika potvrdila stejný trend jako u *S. pentandra*, tedy že s výškou klesaly toky CH₄. Byl nalezen statisticky významný rozdíl úrovně 1 k úrovni 2 a úrovni 3. Mezi úrovněmi 2 a 3 nebyl nalezen.



Obr. 17 Graf měsíčního toku CH₄ z kmene *Salix 3* (*S. fragilis*) v závislosti na výšce komor. Chybové úsečky značí střední chybu průměru. Různá písmena jednotlivých sloupcích značí významné rozdíly dle testu Tukey ($p < 0,05$) při porovnání úrovní mezi sebou.

4.2.2. Měsíční toky CH₄ z půdy

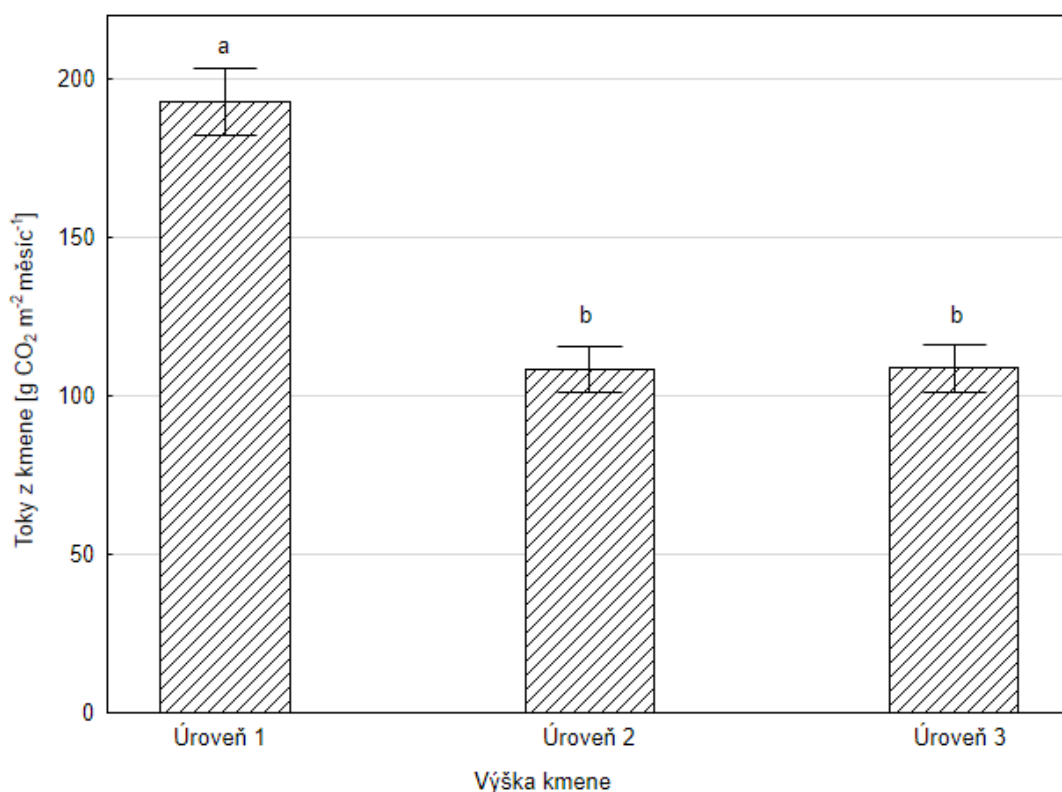
Měsíční toky CH₄ z půdy se velmi nelišily (Obr. 18). Tok z půdní komory č. 1 byl 0,18 g CH₄ m⁻² měsíc⁻¹, z půdní komory č. 3 0,31 g CH₄ m⁻² měsíc⁻¹ a půdní komory č. 4 0,45 g CH₄ m⁻² měsíc⁻¹.



Obr. 18 Graf měsíčního toku CH₄ z půdních komor č. 1, 3 a 4. Chybové úsečky značí střední chybu průměru.

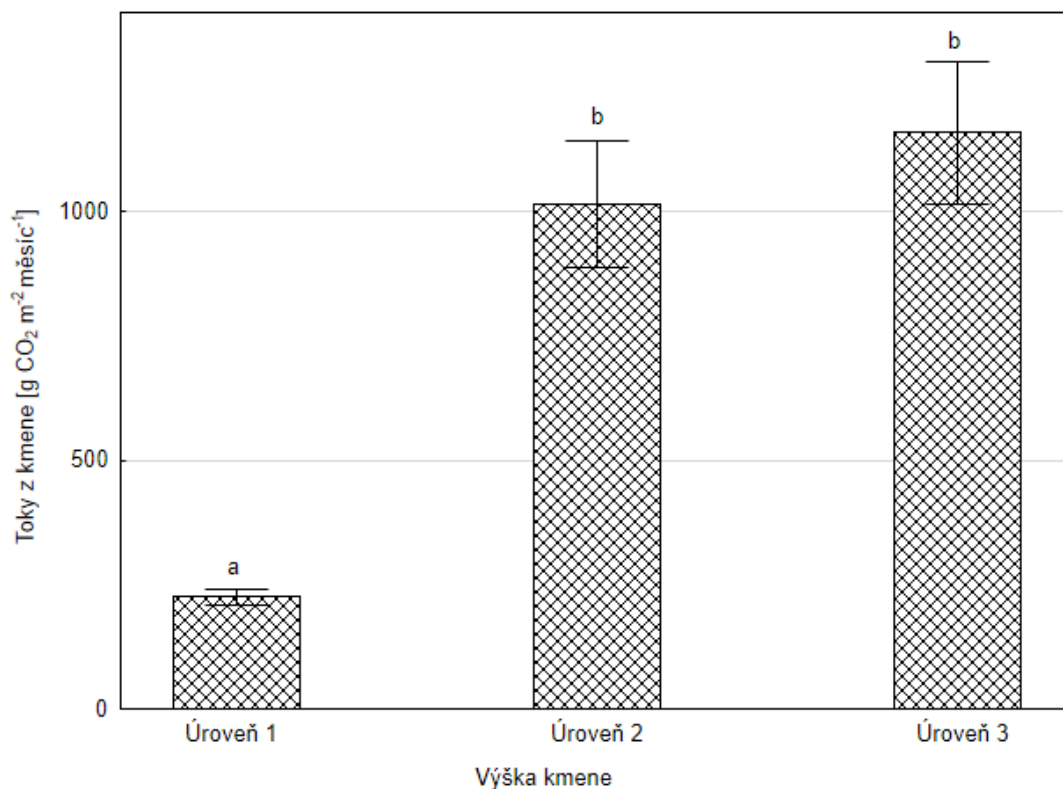
4.2.3. Měsíční toky CO₂ *Salix pentandra* a *Salix fragilis*

Na Obr. 19 je vyjádřen měsíční tok CO₂ z kmenů *Salix pentandra* v jednotlivých úrovních. V úrovni 1 tok dosahoval 190 g CO₂ m⁻² měsíc⁻¹ a představoval téměř dvojnásobek toků z dalších komor. Toky z úrovně 2 a úrovně 3 byly stejné, tedy 110 g CO₂ m⁻² měsíc⁻¹. Z grafu je patrné, že toky CO₂ s výškou kmene klesaly. To bylo potvrzeno statistickou analýzou. Mezi úrovní 1 a úrovní 2 a současně úrovní 1 a úrovní 3 byly zjištěny statisticky významné rozdíly. Za to mezi toky úrovní 2 a úrovní 3 nebyly statisticky významné rozdíly.



Obr. 19 Graf měsíčního toku CO₂ z kmenů *Salix 1, 2 a 4* (*S. pentandra*) dohromady v závislosti na výšce komor. Chybové úsečky značí střední chybu průměru. Různá písmena v jednotlivých sloupcích značí významné rozdíly dle testu Tukey ($p < 0,05$) při porovnání úrovní mezi sebou.

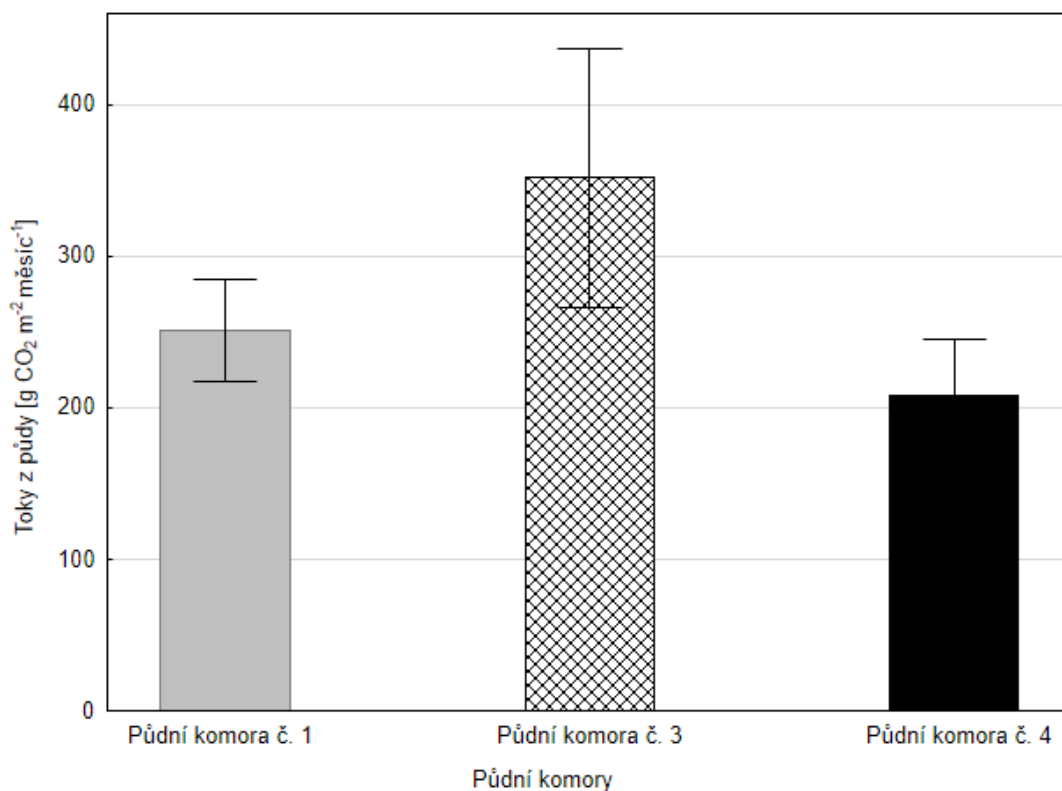
Z Obr. 20 je patrné, že nejnižší toky CO_2 *S. fragilis* byly v úrovni 1 4,5krát nižší než v úrovni 2 a 5krát než v úrovni 3. Tok v úrovni 1 byl $250 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ měsíc}^{-1}$, v úrovni 2 $1000 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ měsíc}^{-1}$ a úrovni 3 $1250 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ měsíc}^{-1}$. Na rozdíl od *S. pentandra* toky CO_2 s výškou rostly. Byl nalezen statisticky významný rozdíl úrovně 1 k úrovni 2 a úrovni 3. Mezi úrovněmi 2 a 3 nebyl nalezen.



Obr. 20 Graf měsíčního toku CH_4 z kmene *Salix 3* (*S. fragilis*) v závislosti na výšce komor. Chybové úsečky značí střední chybu průměru. Různá písmena v jednotlivých sloupcích značí významné rozdíly dle testu Tukey ($p < 0,05$) při porovnání úrovní mezi sebou.

4.2.4. Měsíční toky CO₂ z půdy

Společně s toky CH₄ z půdy se měřily i toky CO₂. Obr. 21 ukazuje měsíční toky CO₂ ze třech půdních komor. V porovnání s CH₄ toky je patrné, že byly řádově vyšší. Měsíční tok z půdní komory č. 1 byl 250 g CO₂ m⁻² měsíc⁻¹, půdní komory č. 3 350 g CO₂ m⁻² měsíc⁻¹ a půdní komory č. 4 209 g CO₂ m⁻² měsíc⁻¹. Na rozdíl od toků CH₄ tok z půdní komory č. 3 významně převyšoval ostatní.



Obr. 21 Graf měsíčního toku CO₂ z půdních komor č. 1, 3 a 4. Chybové úsečky značí střední chybu průměru.

5. Diskuze

V rámci terénního výzkumu na Mokřích Loukách u Třeboně bylo zjišťováno, zda *Salix fragilis* a *Salix pentandra* z kmenů uvolňují CH₄ do svého okolí. Statisticky byly vyhodnoceny dopolední a odpolední toky z kmenů a nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi nimi. V současné literatuře chybí data dopoledních a odpoledních měření. Dostupné studie se zabývají denními toky zahrnujícími i noční toky. V naší lokalitě nebylo možné noční měření provést kvůli ztíženým terénním podmínkám. Jedním z důležitých zjištění bylo, že se toky lišily s výškou kmene. Současně s tím bylo zkoumáno uvolňování těchto plynů z půdy v okolí vrb do atmosféry.

Tento výzkum navazoval a byl součástí rozsáhlé celoroční měřicí kampaně Dr. Macháčové a výzkumného týmu CzechGlobe. Studie ukázala, že všechny studované stromy uvolňovaly CH₄ a CO₂ z kmenů po celý rok (data nejsou ukázána).

5.1. Vrby emitují CH₄ a CO₂ prostřednictvím kmenů

V souladu s předchozím návrhem Schütze a kol. (1991) a zjištěním Rusche a Rennenberga (1998), kteří zjistili, že plyny CH₄ a CO₂ jsou uvolňovány z kmene dřevin prostřednictvím lenticel (McBain a kol., 2004; Pangala a kol., 2013), pak i náš výzkum toto potvrdil. Následovalo i několik dalších studií, které se tím to zabývaly např. Terazawa a kol., 2007; Gauci a kol., 2010; Macháčová, 2012; Pangala a kol., 2013; Carmichael a kol., 2014; Pangala a kol., 2015. Podle nich by mohla dosud málo popsaná role vegetace objasnit nesrovnalosti v příspěvcích ke globálním emisím v rámci celého ekosystému.

Salix fragilis vykazovala podstatně vyšší toky CH₄ z kmene než *Salix pentandra*, ačkoliv se jednalo pouze o jednoho jedince ku třem. Mohlo by to být dáno možnými odlišnostmi v transportní kapacitě aerenchymu u obou druhů stromů (Rusch a Rennenberg, 1998; Smialek a kol., 2006), nižším věkem (Pangala a kol., 2015) a lokací stromu. Byla zřejmě umístěna na hot spotu (čili horká skvrna), což je místo v zemském plášti, kudy proudí teplo směrem vzhůru a při své cestě taví horniny. Vzniklé magma na zemském povrchu způsobuje vulkanismus (Svoboda, 1983). To by

bylo jedno z možných vysvětlení vyšší výměny CH₄ mezi půdou a atmosférou (Turner a kol., 2016; Stimson a kol., 2017).

Po provedení statistiky bylo zřejmé, že toky CH₄ s výškou kmene razantně klesaly (Rusch a Rennenberg, 1998) u obou druhů *Salix pentandra* i *Salix fragilis*. Rusch a Rennenberg (1998) to vysvětlili jako výsledek transportu přes aerenchym, který je morfologická adaptace rostlin na mokré/ zaplavené půdy.

V kmenových měřících komorách se nacházely tzv. cryptogams (sinice, řasy, houby, mechy a lišejníky), zdroje N₂O a CH₄, a proto mohly navýšit toky CH₄ do atmosféry (Lenhart a kol., 2015). Výzkum Lenhartové a kol. (2015) probíhal za aerobních podmínek, tudíž plyny nemohly vznikat z heterotrofních bakterií nebo archaí uvnitř kmene, ale z fotoautotrofních organismů na povrchu borky. Ačkoliv emise CH₄ : N₂O byly minimální, po zvýšení teploty nad 20 °C došlo k silnému navýšení těchto plynů a to by v době globálního oteplování mohlo hrát velkou roli.

Naměřené vysoké toky CO₂ z kmenů obou druhů vrb v každé úrovni souvisely s jejich fyziologickou aktivitou. CO₂ je uvolňováno v procesu respirace ve fázi citrátového cyklu. Následně volně difunduje z mitochondrie a prostřednictvím průduchů či lenticel opouští rostlinu (Ryplová, 2014). Vzhledem k velkému množství faktorů ovlivňující celkový metabolismus rostliny a respiraci je vysvětlení toků CO₂ z kmene velmi složité a málo prozkoumané, a proto je otázkou příštích výzkumů. Měsíční tok CO₂ v případě *S. pentandra* vykazuje podobný trend jako u CH₄ (tok s výškou klesal). U *S. fragilis* je trend opačný, tzn. toky v úrovních 2 a 3 jsou 5krát vyšší než v úrovni 1. Důvod není zcela objasněn. Jedním z možných vysvětlení by mohlo být odlišné stáří *S. fragilis* (Cerasoli a kol., 2009), chůze v blízkosti komory před měřením nebo lidským dýcháním. Jak uvádí Cerasoli a kol. (2009) k objasnění by bylo zapotřebí provést komplexní měření vnitřních a vnějších faktorů ovlivňující emise CO₂.

5.2. Uvolňování CH₄ a CO₂ z půdy v blízkosti studovaných vrb

Vytvoření plynů v půdě a vedení rostlinou mezibuněčnými prostory, aerenchymem (Butterbach-Bahl a kol., 1997; Rusch a Rennenberg, 1998; McBain a kol., 2004; Pangala a kol., 2014) a/nebo xylémem v rámci transpiračního proudu (Rusch a Rennenberg, 1998) je známo delší dobu. Samotné uvolnění do atmosféry je

umožněno lenticelami nebo průduchy (Butterbach-Bahl a kol., 1997; Pangala a kol., 2014) v závislosti na samotném typu transportu. Uvolňování plynů z listů ovlivňují fyziologické a fotochemické procesy, např. teplota, denní světlo, stomatální vodivost a další (Garnet a kol., 2005). Existuje i studie, ve které nebyly detekovány emise plynů z listů (Pangala a kol., 2014). Machacova a kol. (2016) v nedávné studii porovnávali toky N_2O a CH_4 z kmenů a listů a přišli s nečekaným závěrem. Došli k výrazně vyšším tokům z listů než z kmenů. To je utvrdilo v tom, že se transpirační proud a průduchy podílí na vedení a uvolňování plynů do atmosféry. S ohledem na rozmanité terénní podmínky na Mokřých Loukách a ekonomickou náročnost nebylo možné ověřit, zda nedocházelo k uvolňování plynů skrz listy.

Výzkum probíhal v oblasti Mokřých Luk představující rozsáhlé mokřady. Ty jsou považovány za jedny z dominantních (dále rýžoviště) biogenních zdrojů atmosférického CH_4 (Butterbach-Bahl a kol., 1997). V zaplavené půdě bez kyslíku je CH_4 tvořen metanogenními organismy a uvolňován do atmosféry difuzí nebo ebolucí. Nižší emise CH_4 z půdní komory č. 1 mohla být zapříčiněna silnou oxidací na CO_2 na rozmezí aerobního a anaerobního prostředí na povrchu půdy. Nebo vyšší vodní hladinou, při níž by došlo uvolnění uhlíku ve formě CO_2 , a tak by byly snižené toky CH_4 (Smith a kol., 2003). Leone a kol. (1977) přichází s tím, že je CO_2 v půdním vzduchu toxický pro kořeny (již při koncentraci 5-10 %), tím by došlo ke zpomalení růstu samotné rostliny a výsledně uvolňování CO_2 při respiraci. Toto by mohlo být jedno z vysvětlení, proč mají půdní komory č. 1 a č. 4 nižší toky než půdní komora č. 3.

Tato práce představuje krátkou prvotní studii zabývající se toky CH_4 ze *Salix fragilis* a *Salix pentandra* na území Mokřých Luk u Třeboně. V budoucím výzkumu by bylo zapotřebí provést analýzy morfologických odlišností obou druhů vrb a měření prostorové a sezónní variability toku CH_4 z vrb a půdy. Neméně důležité by bylo provedení rozsáhlejšího a komplexnějšího výzkumu zkoumající podíl cryptogamů na celkových tocích CH_4 , toky z listů a profilová půdní měření. Vedlo by to ke komplexnějšímu pochopení příspěvku dřevin a půdy ke globálním tokům.

6. Závěr

V tomto výzkumu bylo zjišťováno, zda *Salix fragilis* a *Salix pentandra* na Mokřích Loukách uvolňují metan a oxid uhličitý z kmenů a také z půdy v jejich blízkosti.

Z výsledku bylo zjištěno, že *S. fragilis* a *S. pentandra* uvolňovaly do svého okolí CH₄ a CO₂. Statistická analýza nevyhodnotila odlišnosti mezi dopoledními a odpoledními toky CH₄ a CO₂ z kmene a přilehlé půdy jako statisticky signifikantní rozdíl. Po porovnání toků CH₄ i CO₂ *S. pentandra* a *S. fragilis* bylo zřejmé, že *S. fragilis* měla mnohonásobně vyšší toky. Možným vysvětlením by bylo umístění na hot-spotu, stáří stromu či jiná morfologická stavba aerenchymu. Toky CH₄ z kmenů se pohybovaly v řádě μg CH₄ m⁻² h⁻¹ a toky CO₂ v řádě mg CO₂ m⁻² h⁻¹. I z půdy byly detekovány emise CH₄ a CO₂.

Na základě provedené statistiky bylo patrné, že měsíční toky CH₄ u obou druhů vrb s výškou klesaly. Mezi úrovněmi 1 a úrovněmi 2 a současně úrovněmi 1 a úrovněmi 3 byly zjištěny statisticky významné rozdíly jak u toků CH₄, tak u toků CO₂. Za to mezi toky v úrovních 2 a úrovních 3 nebyly statisticky významné rozdíly. Stejný klesající trend byl zjištěn u toku CO₂ u *S. pentandra*. Oproti tomu toky CO₂ z kmene *S. fragilis* s výškou kmene rostly.

7. Seznam literatury

Anderson B., Bartlett K., Frohling S., Hayhoe K., Jenkins J., Salas W., 2010: Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. Office of Atmospheric Programs, United States Environmental Protection Agency: Washington D.C. 194 s.

Anderson T. R., Hawkins E., Jones P. D. 2016: O₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour* **40 (3)**: 178-187.

Atkinson R. 2000: Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. *Atmospheric Environment* **34**: 2063-2101.

Baxová J., 2013: Produkce a oxidace metanu v půdách rašelinných smrčín ovlivněných odvodněním, revitalizací a přísunem dusíku. Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, 49 s.

Brüggemann N., Meier R., Steigner D., Zimmer I., Louis S., Schnitzler J. P. 2009: Nonmicrobial aerobic methane emission from poplar shoot cultures under low-light conditions. *New Phytologist* **182**: 912-918.

Butterbach-Bahl K., Papen H., Rennenberg H. 1997: Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields. *Plant, Cell & Environment* **20**: 1175-1183.

Carmichael M. J., Bernhardt E. S., Bräuer S. L., Smith W. K. 2014: The role of vegetation in methane flux to the atmosphere: should vegetation be included as a distinct category in the global methane budget?. *Biogeochemistry* **119**: 1-24.

Cerasoli S., McGuire M. A., Faria J., Mourato M., Schmidt M., Pereira J. S., Chaves M. M., Teskey R. O. 2009: CO₂ efflux, CO₂ concentration and photosynthetic refixation in stems of *Eucalyptus globulus* (Labill.). *Journal of Experimental Botany* **60 (1)**: 99–105.

CZ-LTER, 2018: Mokré louky u Třeboně. [online]: LTER [cit. 18.3.2018]. Dostupné z: <http://www.lter.cz/mokre-louky-u-trebone>

ČHMÚ, 2016: Grafická ročenka 2016 [online]: Český hydrometeorologický ústav [cit. 18.3.2018]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/Obsah_CZ.html

Dueck T. A., de Visser R., Poorter H., Persijn S., Gorissen A., de Visser W., Schapendonk A., Verhagen J., Snel J., Harren F. J. M., Ngai A. K. Y., Verstappen F., Bouwmeester H., Voesenek L. A. C. J., van der Werf A. 2007: No evidence for substantial aerobic methane emission by terrestrial plants: a ¹³C-labelling approach. *New Phytologist* **175**: 29-35.

Dušek J., Čížková H., Stellner S., Czerný R., Květ J. 2012: Fluctuating water table affects gross ecosystem production and gross radiation use efficiency in a sedge-grass marsh. *Hydrobiologia* **692**: 57-66.

Dušek J., Hudecová Š., Stellner S. 2017: Extreme precipitation and long-term precipitation changes in a Central European sedge-grass marsh in the context of flood occurrence. *Hydrological Sciences Journal* **62**: 1796-1808.

Dušek J., Stellner S., Komárek A. 2013: Long-term air temperature changes in a Central European sedge-grass marsh. *Ecohydrology* **6 (2)**: 182-190.

EEA, 2013: Atmospheric greenhouse gas concentrations [online]. European Environment Agency [cit.18.3.2018] Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-2/assessment-1>

Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D. W., Haywood J., Lean J., Lowe D. C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R. 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.) 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Frenzel P., Rudolph J. 1998: Methane emission from a wetland plant: the role of CH₄ oxidation in *Eriophorum*. *Plant and Soil* **202**: 27-32.

Garnet K. N., Megonigal J. P., Litchfield C., Taylor G. E. Jr. 2005: Physiological control of leaf methane emission from wetland plants. *Aquatic Botany* **81**: 141–155.

Gauci V., Gowing D. J. C., Hornibrook E. R. C., Davis J. M., Dise N. B. 2010: Woody stem methane emission in mature wetland alder trees. *Atmospheric Environment* **44**: 2157–2160.

Gilbert B., Aßmus B., Hartmann A., Frenzel P. 1998: In situ localization of two methanotrophic strains in the rhizosphere of rice plants. *FEMS Microbiology Ecology* **25**: 117-128.

Gilbert B., Frenzel P. 1998: Rice roots and CH₄ oxidation: the activity of bacteria, their distribution and the microenvironment. *Soil Biology & Biochemistry* **30**: 1903-1916.

Goldstein A. H., Galbally I. E. 2007: Known and Unexplored Organic Constituents in the Earth's Atmosphere. *Environmental science & technology* **41**: 1515–1521.

Hattermann F. F., Krysanova V., Hesse C. 2008: Modelling wetland processes in regional applications. *Hydrological Science Journal* **53 (5)**: 1001–1012.

Hejný S., Slavík B. (eds) 1990: Květena České republiky. Svazek 2. Praha: Academia, 544 s.

Chytrý M. (eds.) 2011: Vegetace České republiky. 3. Vodní a mokřadní vegetace. Praha: Academia, 828 s.

In-počasí, 2007: Skleníkový efekt [online] [cit. 26.3.2018]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/sklenikovy-efekt/>

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 [Core Writing Team, Pachauri R. K., Reisinger A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 s.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T. F., Qin D., Plattner G. K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jeník J., Květ J. (eds) 1983: Studie zaplavovaných ekosystémů u Třeboně. Praha: Academia. Studie ČSAV 83/4, 147 s.

Jeník J., Květ J. 2002: Human impacts on the Třeboň Basin Biosphere Reserve. In: Květ J., Jeník J., Soukupová L. (eds.): Freshwater wetlands and their sustainable future. A case study of Třeboň Basin Biosphere Reserve, Czech Republic. 3–9. Paris; London: UNESCO: Parthenon Publishing Group.

Jeník J., Příbyl S. (eds.) 1978: Ekologie a ekonomika Třeboňska. Sborník přednášek. Botanický ústav ČSAV Třeboň, 470 s.

Karl T., Harley P., Emmons L., Thornton B., Guenther A., Basu C., Turnipseed A., Jardine K. 2010: Efficient atmospheric cleansing of oxidized organic trace gases by vegetation. *Science* **330**: 816-819.

Keppler F., Hamilton J. T. G., Brass M., Röckmann T., 2006: Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature* **439**: 187–191.

Keppler F., Hamilton J. T. G., McRoberts W. C., Vigano I., Braß M., Röckmann T. 2008: Methoxyl groups of plant pectin as a precursor compound for atmospheric methane: evidence from deuterium labelling studies. *New Phytologist* **178**: 808-814.

Keppler F., Kalin R. M., Harper D. B., McRoberts W. C., Hamilton J. T. G. 2004: Carbon isotope anomaly in the major plant C₁ pool and its global biogeochemical implications. *Biogeosciences* **1**: 123-131.

Le Treut H., Somerville R., Cubasch U., Ding Y., Mauritzen C., Mokssit A., Peterson T., Prather M., 2007: Historical Overview of Climate Change. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

Change. 97 s. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lelieveld J., Crutzen P. J., Dentener F. J. 1998: Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus* **50B**: 128-150.

Lenhart K., Weber B., Elbert W., Steinkamp J., Clough T., Crutzen P., Pöschl U., Keppler F. 2015: Nitrous oxide and methane emissions from cryptogamic covers. *Global Change Biology* **21**: 3889–3900.

Leone I. A., Franklin B. F., Arthur J. J., Gilman E. F. 1977: Damage to woody species by anaerobic landfill gases. *Journal of Arboriculture* **3**: 221-225.

LGR, 2018: Los Gatos Research, inc. [online] [cit. 15.2.2018]. Dostupné z: <http://www.lgrinc.com/advantages/>

Li Ch. 2007: Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach. *Soil Science and Plant Nutrition* **53**: 344-352.

Macháčová K., 2012: Nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) emissions from stems of different tree species. Doctoral thesis, Faculty of Forest and Environmental Sciences, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Germany, 180 s.

Machacova K., Bäck J., Vanhatalo A, Halmeenmäki E., Kolari P., Mammarella I., Pumpanen J., Acosta M., Urban O., Pihlatie M. 2016: *Pinus sylvestris* as a missing source of nitrous oxide and methane in boreal forest. *Scientific Report* **6**: 23410.

Machacova K., Maier M., Svobodova K., Lang F., Urban O. 2017: Cryptogamic stem covers may contribute to nitrous oxide consumption by mature beech trees. *Scientific Report* **7**: 13243.

Machacova K., Papen H., Kreuzwieser J., Rennenberg H. 2013: Inundation strongly stimulates nitrous oxide emissions from stems of the upland tree *Fagus sylvatica* and the riparian tree *Alnus glutinosa*. *Plant Soil* **364**: 287-301.

Maier M., Machacova K., Lang F., Svobodova K., Urban O. 2018: Combining soil and tree-stem flux measurements and soil gas profiles to understand CH₄ pathways in *Fagus sylvatica* forests. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **181**: 31-35.

McBain M. C., Warland J. S., McBride R. A., Wagner-Riddle C. 2004: Laboratory-scale measurements of N₂O and CH₄ emissions from hybrid poplars (*Populus deltoides* X *Populus nigra*). *Waste Manage Res* **22**: 454–465.

Mer J. L., Roger P. 2001: Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* **37**: 25-50.

Messenger D. J., McLeod A. R., Fry S. C. 2009: The role of ultraviolet radiation, photosynsitzers, reactive oxygen species and ester groups in mechanisms of methane formation from pectin. *Plant Cell and Environment* **32**: 1-9.

Min H., Chen Z. Y., Wu W.X., Chen M. C. 2002: Microbial aerobic oxidation of methane in paddy soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **64**: 79–85.

MŽP, 2018: Ramsarská úmluva o mokřadech [online]. Ministerstvo životního prostředí [citováno 18.3.2018] Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/ramsarska_umluva_o_mokradech

Nisbet R. E. R., Fisher R., Nimmo R. H., Bendall D. S., Crill P. M., Gallego-Sala A. V., Hornibrook E. R. C., Lo'pez-Juez E., Lowry D., Nisbet P. B. R., Shuckburgh E. F., Sriskantharajah S., Howe C. J., Nisbet E. G. 2009: Emission of methane from plants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **276**: 1347–1354.

Noe S. M., Kimmel V., Hüve K., Copolovici L., Portillo-Estrada M., Püttsepp Ü., Jõgiste K., Niinemets Ü., Hörtnagl L., Wohlfahrt G. 2011: Ecosystem-scale biosphere – atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvselja, Estonia. *Forest ecology and management* **262**: 71-81.

Pangala S. R., Gowing D. J., Hornibrook E. R. C, Gauci V. 2014: Controls on methane emissions from *Alnus glutinosa* saplings. *New Phytologist* **201**: 887-896.

Pangala S. R., Hornibrook E. R. C, Gowing D. J., Gauci V. 2015: The contribution of trees to ecosystem methane emissions in a temperate forested wetland. *Global Change Biology* **21**: 2642–2654.

Pangala S. R., Moore S., Hornibrook E. R. C., Gauci V. 2013: Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands. *New Phytologist* **197**: 524–531.

Pihlatie M., Rinne J., Ambus P., Pilegaard K., Dorsey J. R., Rannik Ü., Markkanen T., Launiainen S., Vesala T. 2005: Nitrous oxide emissions from a beech forest floor measured by eddy covariance and soil enclosure techniques. *Biogeosciences* **2**: 377–387.

Prigent C., Papa F., Aires F., Rossow W. B., Matthews E. 2007: Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **112**: D12107.

Raghoebarsing A. A., Smolders A. J. P., Schmid M. C., Rijpstra W. I. C., Wolters-Arts M., Derksen J., Jetten M. S. M., Schouten S., Sinninghe Damsté J. S., Lamers L. P. M., Roelofs J. G., Op den Camp H. J., Strous M. 2005: Methanotrophic symbionts provide carbon for photosynthesis in peat bogs. *Nature* **436**: 1153-1156.

Rusch H., Rennenberg H. 1998: Black alder (*Alnus Glutinosa* (L.) Gaertn.) trees mediate methane and nitrous oxide emission from the soil to the atmosphere. *Plant and Soil* **201**: 1–7.

Ryplová R., 2014: Fyziologie rostlin. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 113 s.

Ryplová R., 2015: Rostlinné terpenoidy v atmosféře. *Biologie – Chemie – Zeměpis* **3**: 121-124.

Schlesinger W. H., Bernhardt E. S. 2013: *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Elsevier Inc.: Academic Press; 3 edition, 688 s.

Schütz H., Schröder P., Rennenberg H. 1991: Role of plants in regulating the methane flux to the atmosphere. In: Sharkey T. D., Holland E. A., Mooney H. A. (eds) *Trace gas emissions by plants*. Academic Press Inc., New York, s. 29–63.

Smialek J., Bouchard V., Lippnamm B., Quigley M., Granata T., Mastin J., Brown L. 2006: EFFECT OF A WOODY (*SALIX NIGRA*) AND AN HERBACEOUS

(*JUNCUS EFFUSUS*) MACROPHYTE SPECIES ON METHANE DYNAMICS AND DENITRIFICATION. *Wetlands* **26**: 509-517.

Smith K. A., Ball T., Conen F., Dobbie K. E., Massheder J., Rey A. 2003: Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science* **54**: 779-791.

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Stellner S., 2015: *Dynamika výdeje CO₂ modelového mokřadního ekosystému*. Diplomová práce, Zemědělská fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, 69 s.

Stimson A. G., Allott T. E. H., Boulton S., Evans M. G. 2017: Reservoirs as hotspots of fluvial carbon cycling in peatland catchments. *Science of the Total Environment* **580**: 398–411.

Svoboda J. 1983: *Encyklopedický slovník geologických věd I.*, Praha: Academia, 920 s.

Terazawa K., Ishizuka S., Sakata T., Yamada K., Takahashi M. 2007: Methane emissions from stems of *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* trees in a floodplain forest. *Soil Biology & Biochemistry* **39**: 2689–2692.

Townsend C. R., Begon M., Harper J. L., 2010: *Základy ekologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 505 s.

Turner P.A., Griffis T. J., Mulla D. J., Baker J. M., Venterea R. T. 2016: A geostatistical approach to identify and mitigate agricultural nitrous oxide emission hotspots. *Science of the Total Environment* **572**: 442–449.

Vann C. D., Megonigal J.P. 2003: Elevated CO₂ and water depth regulation of methane emissions: comparison of woody and non-woody wetland plant species. *Biogeochemistry* **63**: 117–134.

Vítková J., Dušek J., Stellner S., Moulisová L., Čížková H. 2017: Effect of Hummock-Forming Vegetation on Methane Emissions from a Temperate Sedge-Grass Marsh. *Wetlands* **37**: 675-686.

Wang Z. P., Han X. G., Wang G. G., Song Y., Gullledge J. 2008: Aerobic methane emission from plants in the Inner Mongolia steppe. *Environmental Science & Technology* **42**: 62-68.

Watson R. T., Meira-Filho L. G., Sanhueza E., Janetos A. 1992: Greenhouse gases: sources and sinks. In: Houghton J. T., Callander B. A., Varney S. K. (eds.) *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press.

WMO, 2017: WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 13. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations Through 2016. Geneva: World Meteorological Organization, 8 s. Dostupné z: https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4022

Zeikus J. G., Ward J. C. 1974: Methane formation in living trees: a microbial origin. *Science* **184**: 1181-1183.

8. Přílohy

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Seznam použitých zkratk

Příloha č. 2: Příspěvek na konferenci EGU 2017 ve Vídni ve dnech 23.-28.4. 2017. v sekci BG2.19/SSS10.19 “Forests and the methane and nitrous oxide cycles“ s názvem Willows strongly emit methane (CH₄) during dormant season.

Příloha č. 3: Příspěvek na konferenci EGU 2018 ve Vídni ve dnech 8.-13.4.2018 v sekci BG2.25 “Forests and the methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) cycles" s názvem Methane (CH₄) fluxes in trees of temperate and boreal zones. What have we learned?

Příloha č. 4: Fotodokumentace

Příloha č. 1: Seznam použitých zkratk

- CH ₃	metylová skupina	
ANOVA	Analýza rozptylu	Analysis of variance
AVOC	těkavé organické látky antropogenního původu	anthropogenic volatile organic compounds
BR	biosférická rezervace	
BVOC	těkavé organické látky biogenního původu	Biogenic volatile organic compounds
CO ₂	oxid uhličitý	
GWP	potenciál globálního oteplování	Global Warming Potential
H ₂ O	vodní pára/ voda	
CH ₄	metan	
CHKO	Chráněná krajinná oblast	
IPCC	International Panel on Climate Change	
LGR	Los Gatos Research	
m n. m.	metr nad mořem	
MAB	Program člověk a biosféra	Man and the Biosphere Programme
N ₂ O	oxid dusný	
NMVOC	nemetanové těkavé organické látky	Non-methane volatile organic compounds
NO _x	oxidy dusíků	
O ₂	kyslík	
O ₃	ozon	
OA-ICOS	Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy	
ROS	reaktivní formy kyslíku	
<i>S. fragilis</i>	<i>Salix fragilis</i>	
<i>S. pentandra</i>	<i>Salix pentandra</i>	
s. š.	severní šířka	
SO ₂	oxid siřičitý	
UNESCO	Organizace Spojených národů pro výchovu, vědu a kulturu	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
v. d.	východní délka	
WMO	World Meteorological Organization	

Příloha č. 2: Příspěvek na konferenci EGU 2017 ve Vídni ve dnech 23.-28.4. 2017. v sekci BG2.19/SSS10.19 “Forests and the methane and nitrous oxide cycles“ s názvem Willows strongly emit methane (CH₄) during dormant season.

Geophysical Research Abstracts
Vol. 19, EGU2017-19380, 2017
EGU General Assembly 2017
© Author(s) 2017. CC Attribution 3.0 License.



Willows strongly emit methane (CH₄) during dormant season

Katerina Machacova (1), Klara Janebova (2), Stanislav Stellner (3), Jiri Dusek (3), Marian Pavelka (3), Renata Ryplova (2), and Otmar Urban (1)

(1) Laboratory of Ecological Plant Physiology, Global Change Research Institute CAS, Brno, CZ, (2) Department of Biology, Faculty of Education, University of South Bohemia, Ceske Budejovice, CZ., (3) Department of Matters and Energy Fluxes, Global Change Research Institute CAS, Brno, CZ

Wetlands are considered to be a substantial natural source of methane (CH₄), due to CH₄ production by methanogens in flooded soil. Trees, especially wetland tree species possessing an aerenchyma system in roots, are known to emit CH₄ into the atmosphere. However, information about the seasonal dynamics of tree CH₄ emissions is rare.

We determined CH₄ emissions from stems of mature willow trees (*Salix pentandra*, *S. fragilis*) in wetlands from March 2014 to September 2015. We aimed to investigate the seasonal changes of CH₄ emissions within the soil-tree-atmosphere continuum and the impact of environmental parameters on these emissions. An intensive campaign investigating vertical profile of CH₄ emissions in stems was performed in May 2016.

The measurements were performed in sedge-grass marsh surrounding the ecosystem station Wet Meadows in South Bohemia, Czech Republic (49°01'30"N, 14°46'20"E), with scattered willow trees. Emissions of CH₄ were determined from stems and adjacent soil each month using static chamber systems and laser analyses.

Our study revealed that all trees studied consistently emitted CH₄ from their stems over the whole year. The CH₄ emissions were significantly higher in *S. fragilis* (up to 14.2 mg CH₄ m⁻² stem area h⁻¹) than in *S. pentandra* (up to 1.03 mg CH₄ m⁻² h⁻¹), and dramatically decreased within first 1.5 m of stem height with highest emissions detected close to the soil surface. Even though the CO₂ exchange of willow stems, as an indicator of their physiological activity, showed strong seasonality typical for tree species of temperate zone (high CO₂ emissions during vegetation season followed by low, but still detectable emissions in dormant season), the stems emitted CH₄ in an opposite pattern. The CH₄ emissions were the lowest in summer months (from June until August/September) and dramatically increased from September onwards and remained very high and almost constant until May. The soil even deposited CH₄ from the atmosphere from June until August/September, and emitted CH₄ during the rest of the year with highest emissions at the beginning and end of vegetation seasons. We assume that CH₄ is “passively” taken up by tree roots in the deep soil layers, transported via aerenchyma system to the bottom part of stems and released into the atmosphere independently on the physiological activity of the trees. Ongoing regression analyses with environmental/micrometeorological parameters will closer clarify the aspects of the unique and very strong emissions of CH₄ from the willow trees in winter time.

Acknowledgement

This research was supported by the National Programme for Sustainability I (LO1415), the Czech Science Foundation (17-18112Y) and CzeCOS (LM2015061). We thank Jiří Mikula and Marek Jakubík for technical support.

Příloha č. 3: Příspěvek na konferenci EGU 2018 ve Vídni ve dnech 8.-13.4.2018 v sekci BG2.25 "Forests and the methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) cycles" s názvem Methane (CH₄) fluxes in trees of temperate and boreal zones. What have we learned?

Geophysical Research Abstracts
Vol. 20, EGU2018-7299, 2018
EGU General Assembly 2018
© Author(s) 2018. CC Attribution 4.0 license.



Methane (CH₄) fluxes in trees of temperate and boreal zones. What have we learned?

Katerina Machacova (1), Elisa Halmeeenmäki (2,3), Mari Pihlatie (2,3), Iikka Haikarainen (2,3), Martin Maier (4), Friederike Lang (5), Katerina Svobodova (1), Klara Janebova (6), Stanislav Stellner (1), Jiri Dusek (1), Marian Pavelka (1), Renata Ryplova (6), Jürgen Kreuzwieser (7), Heinz Rennenberg (7), and Otmar Urban (1)

(1) Global Change Research Institute CAS, Brno, Czech Republic (machacova.k@czechglobe.cz), (2) Environmental Soil Science, Department of Agricultural Sciences, University of Helsinki, Finland, (3) Institute for Atmospheric and Earth System Research/Forest Sciences, University of Helsinki, Finland, (4) Forest Research Institute Baden Wuerttemberg, Freiburg, Germany, (5) Chair of Soil Ecology, Albert-Ludwigs-University, Freiburg, Germany, (6) Department of Biology, Faculty of Education, University of South Bohemia, Ceske Budejovice, Czech Republic, (7) Chair of Tree Physiology, Albert-Ludwigs-University, Freiburg, Germany

The increase in atmospheric methane (CH₄) concentration affects global radiative forcing consequently leading to changes in the Earth's climate. Plants are known to be able to emit CH₄ under certain conditions; however, the role of trees, especially upland tree species, in the CH₄ exchange of forest ecosystems is still not well understood. We have particularly investigated (1) whether trees exchange CH₄ with the atmosphere, (2) to which extent trees contribute to net ecosystem CH₄ exchange, (3) how soil water content affects the tree fluxes and (4) whether these fluxes show seasonal dynamics.

To answer these questions, we have measured, since 2009, stem CH₄ fluxes in a wide spectrum of tree species under different environmental conditions in the Czech Republic, Germany, and Finland, including seasonality of these fluxes. The fluxes were studied in common broad-leaf and coniferous tree species of boreal and temperate zones: Scots pine (*Pinus sylvestris*, including shoot fluxes), Norway spruce (*Picea abies*), European beech (*Fagus sylvatica*), bay and crack willow (*Salix pentandra*, *S. fragilis*), black alder (*Alnus glutinosa*), downy and silver birch (*Betula pubescens*, *B. pendula*), and poplar hybrids (*Populus* sp.). Stem and also forest floor fluxes were measured using static chamber systems followed by gas chromatographic and/or laser analyses of CH₄ concentration changes. Such a broad data set enables now to make some general conclusions about the role of trees in the forest ecosystem CH₄ exchange.

Our research revealed that stems of all tree species studied mostly emitted CH₄ into the atmosphere, even though the studied soils, except wetlands, were predominant sinks for CH₄. The CH₄ emissions decreased with increasing stem height and being highest close to the soil surface. The stem CH₄ emissions showed high spatial heterogeneity likely related to variability in soil water content (larger scale) and variability in subsoil CH₄ production (small scale). Different seasonal courses in CH₄ and CO₂ emissions were observed. While high CH₄ emissions were detected in stems of pine, spruce, birch, and willow trees during the winter and/or spring time; CO₂ respiratory efflux, an indicator of a physiological activity, was substantially reduced. Since shoot CH₄ emissions in pine trees were substantially higher than emissions from stems, shoots might be the primary tree surface emitting CH₄ into the atmosphere. Therefore, the up to now rarely investigated shoot fluxes have to be incorporated in the future experiments.

All tree species studied contributed to the CH₄ exchange between forest ecosystems and the atmosphere, indicating that these fluxes need to be included in the forest CH₄ emission inventories.

Acknowledgement

This research was supported by Czech Science Foundation (17-18112Y), Czech Academy of Sciences and German Academic Exchange Service (DAAD-15-03), National Programme for Sustainability I (LO1415), CzeCOS (LM2015061), DFG (MA 5826/2-1), DAAD (PhD scholarship), EU FP7 project ExpeER (262060) and Academy of Finland projects (288494, 294088, 1118615, 272041). We thank M. Jakubík, J. Mikula, S. Paulus, E. Halaburt, S. Haddad and U. Großmann for their support.

Příloha č. 4: Fotodokumentace



Obr. 22 Ukázka probíhajícího měření v celoobvodové komoře na *Salix fragilis* a půdního měření v půdní komoře č. 3. Foto: Janebová, 2016



Obr. 23 Ukázka probíhajícího měření v komoře úrovně 1 na *Salix pentandra*.
Foto: Janebová, 2016



Obr. 24 Uzavírání půdní komory č. 1

Foto: Janebová, 2016



Obr. 25 Měření plynů ze sáčku, které se přečerpaly z půdní komory po 40-ti minutovém uzavření.

Foto: Janebová, 2016