

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

PÕLLUMAJANDUSLIKKU HAJUKOORMUST VÄHENDAVA AVAVEELISE
TEHISMÄRGALA METAANI LENDUMINE JA SEDA MÕJUTAVAD TEGURID

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal (30 EAP)

Mariel Teinlum

Juhendaja: PhD Kuno Kasak

Kaitsmisele lubatud:

Juhendajad:

Osakonna juhataja:

Tartu 2022

Abstrakt (Annotatsioon)

Pealkiri: Põllumajanduslikku hajukoormust vähendava avaveelise tehismärgala metaani lendumine ja seda mõjutavad tegurid

Metaan (CH_4) ja süsinikdioksiid (CO_2) on ühed levinumad kasvuhoonegaasid atmosfääris. Teadlased on aastakümneid uurinud võimalusi vee põllumajanduslikust äravoolust puhastamiseks ning üheks lahenduseks on rajatud märgalad, mis on keskkonnasõbralikud ja tõestatud toimima nii fosfori (P), lämmastiku (N) kui süsiniku (C) eemaldamisel (Kasak et al., 2018; Noorvee et al., 2007). Nimetatud toitainete eemaldamine võib omakorda vähendada keskkonnale kahjulikke CH_4 ja CO_2 emissioone (Nahlik ja Mitch, 2011). Käesolevas magistritöös uuritakse avaveelisi märgalasid. Uurimuseks koguti andmeid Lõuna-Eestis Uhti külas asuvast Vända tehismärgalast, mis koosneb kahest eraldi märgalast (2219m^2 ja 2140m^2). Andmeid koguti 2018. aasta aprillist kuni 2021. aasta augustini ujuvate kambrite meetodil 12-st erinevast mõõtepunktist. Gaasiproovid koguti eelevalueeritud 50ml klaaspudelitega kohe pärast kambri asetamist veepinnale, seejärel 20 minuti pärast, 40 minuti pärast ja 60 minuti pärast. Igast mõõtepunktist mõõdeti ka veeparameetreid. Käesoleva töö eesmärk on analüüsida metaani ja süsinikdioksiidi seoseid erinevate veeparameetrite vahel ning analüüsida metaani ja süsinikdioksiidi seoseid. Kuigi Spearmani korrelatsioon ei näidanud selgeid seoseid ühegi mõõdetud veeparameetri ja CH_4 , CO_2 vahel, näitasid analüüsitud tulemused siiski selget seost mainitud kasvuhoonegaaside ja veesügavuse vahel. Näiteks registreeriti nimetatud kasvuhoonegaaside suurim heide suvel, kui temperatuur oli kõrgem ja veesügavus 20-30 cm või üle 30 cm.

Võtmesõnad: metaan, süsihappegaas, kasvuhoonegaas, põllumajanduslik äravool, tehismärgala, avaveeline märgala, metanogenees, fotosüntees

Abstract (Annotation)

Title: Methane emissions and its driving mechanisms from free surface water constructed wetland treating diffuse agricultural pollution

Methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) are among the most common greenhouse gases in the atmosphere. For decades scientists have been finding ways to purify and treat water from agricultural runoff and one of the solutions is constructed wetlands, which are environmentally friendly and have proven to be working in removal of phosphorus (P), nitrogen (N) and carbon (C) (Kasak et al., 2018; Noorvee et al., 2007). Removal of aforementioned nutrients can avoid CH₄ and CO₂ emissions, which can be harmful for the environment (Nahlik and Mitch, 2011). In the following thesis, free-surface constructed wetlands are researched in theory and practice. Therefore needed data from the Vända constructed wetland containing two separate wetlands (2219m² and 2140m²) in Uhti village, Southern Estonia was collected from April 2018 to August 2021 using the closed chamber method in 12 different sampling spots, 6 on both wetlands. Gas samples were collected with 50 ml previously evacuated glass bottles right after the placement of the chamber, then after 20 minutes, after 40 minutes and lastly after 60 minutes. Water parameters were also measured from every sampling spot. The aim of this thesis is to analyze methane and carbon dioxide relationships between different water parameters and to analyze the relationships between methane and carbon dioxide. Although Spearman correlation did not show any clear relationships between any of the measured water parameters and CH₄, CO₂, the analysis still showed a clear relation between mentioned greenhouse gases and water depth. For example the highest emissions of the mentioned greenhouse gases were registered in summertime when the temperatures were higher and water depths were between 20-30cm or over 30cm.

Keywords: methane, carbon dioxide, greenhouse gas, agricultural runoff, constructed wetland, freesurface wetland, methanogenes, photosynthesis

Sisukord

Sissejuhatus	6
1. Kirjanduse ülevaade	8
1.1. Tehismärgalad ja nende tüübid.....	8
1.2. Kasvuhoonegaaside lendumine märgala ökosüsteemidest	9
1.2.1. CH ₄ teke ja lendumine	9
1.3. CH ₄ ja CO ₂ emissioonide seosed keskkonnaparameetrite vahel.....	11
2. Materjal ja metoodika.....	13
2.1. Uuringuala kirjeldus	13
2.2. Mõõtmismetoodika.....	14
2.2.1. Veeproovide mõõtmine Vända märgalal.....	14
2.2.2. Gaasiproovide kogumine Vända märgalalt	14
2.3. Statistiline andmetöötlus.....	15
3. Tulemused	16
3.1. Süsinikdioksiidi vood	16
3.2. Metaani vood	19
3.3. Gaasivoogude seos keskkonnaparameetritega.....	23
3.3.1. Seos veetemperatuuriga.....	23
3.3.2. Seos hapnikutasemega.....	24
3.3.3. Seos veetasemega	26
4. Arutelu.....	28
4.1. CO ₂ vood	28
4.2. CH ₄ vood.....	29
4.3. Seosed CO ₂ ja CH ₄ voogude vahel.....	30
Kokkuvõte	31
Summary	33
Tänuavaldused.....	35

Kasutatud allikad.....	36
LISAD	41
Lisa 1	41
Lisa 2	42
Lih litsents.....	43

Sissejuhatus

Põllumajanduslikust harjukoormusest tulenev põhjavee ja pinnavee saastumine toitainetega on kujunenud tõsiseks probleemiks keskkonnale (Hsu, 2011). Toidu järgi nõudluse kasvamisel on väetiste ja pestitsiidide kasutamine muutumas üha laialdasemaks (Kill et al., 2018). Väetised ja pestitsiidid on aga omakorda võimsad veekogude kinnikasvamist ehk eutrofeerumist põhjustavad tegurid ning seda eriti järvedes ja merelahtedes (Kasak *et al.*, 2018; Vymazal, 2010). Põllumajanduslike väetiste sattumine põhjavette on üheks suurimaks hajukoormuse põhjustajaks märgalades. Põllumajandusliku hajukoormuse läbi tekib pinnavee reostus ning märkimisväärne kogus hajureostusest juhitakse allavoolu põllumajanduslikesse valglatesse või koguni merekeskkondadesse. (Kadlec, 2012) Tehismärgalad on loodud eelkõige põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks eemaldamaks põllumajanduslikust äravoolust suurema osa toitaineid enne vee tagasisuunamist looduslikesse veekogudesse (Hsu, 2011). Tehismärgalad on inimtekkelised ökosüsteemid, mis imiteerivad looduslike märgalade omadusi kontrollitumas keskkonnas (Vymazal, 2010).

Käesolevas magistritöös on käsitletud avaveelisi tehismärgalasid, mis on madala veesügavuse ning väikese voolukiirusega veekogud (Mander et al., 2014). Enamjaolt leidub avaveelisel märgalal ka veetaimi ja -loomi ning tavapäraselt on veesügavus avaveelistel märgaladel 0,2-0,4m (Noorvee *et al.*, 2007). Avaveelist märgala loetakse eriti tõhusaks orgaaniliste ainete eemaldajaks ning seda eelkõige mikroobse lagundamise ning hõljuvaine filtreerimise ja settimise kaudu (Vymazal, 2019; Noorvee *et al.*, 2007).

Siiski eraldub märgalades toimuvate protsesside käigus kasvuhoonegaase. Süsihappegaasi ja metaani heitkogused märgaladel sõltuvad mitmete erinevate tegurite koostoimest nagu nt pinnaseomadused, orgaaniline aine ja keskkonnatingimused (Maucieri *et al.*, 2017; Chamberlain *et al.*, 2018). Keskkonnatingimused mõjutavad otseselt ja kaudselt kasvuhoonegaaside heitkoguste dünaamikat ning seejuures ka heterotroofsete mikroobide aktiivust tehismärgaladel. 2022. aastal avaldatud uuringust leiti (Kasak et al., 2022), et vee sügavus ning temperatuur olid olulisimad tegurid näiteks diämmastikoksiidi (N_2O) emissioonide tekkel. Madalamatel aladel, kus veetase oli alla 10cm, tekkisid kõrgema emissiooniga piirkonnad (ingl *hot spots*). Temperatuurid see eest suurendasid KHG lendumise intensiivsust suviste põudade tõttu tekkis märgalal veelgi rohkem kõrgemate emissioonidega piirkondi. (Kasak *et al.*, 2022) Märgaladelt lenduv metaan on leitud olema temperatuuride muutustele tundlikum kui süsihappegaas (Chen *et al.*, 2021). Orgaanilise aine lagunemine

reguleerib tihtipeale süsinikukao määra märgaladel ja mõjutab süsiniku sidumist ülemaailmse temperatuurimuutuse tingimustes (Inglett *et al.*, 2012), seega taimestikukasv on samuti KHG emissioonidele mõjutavaks teguriks.

Käesoleva magistritöö raames uuriti 2015. aastal rajatud Vända avaveelise süsteemiga tehismärgalalt mõõdetud CO₂ ja CH₄ emissioone ning eelnimetatud kasvuhoonegaaside seoseid erinevate veeparameetritega. Magistritöö raames teostati mõõtmisi lisaks olemasolevatele 2018-2020 aasta CO₂, CH₄ ja veeparameetrite andmetele aastal 2021 aprillist augustini. Mõõtepunkte oli kahe märgalaga Vända märgalal kokku 12 (VM1.1 - VM2.6). Gaaside ja veeparameetrite mõõtmised toimusid iga kahe nädala tagant.

Käesoleva magistritöö eesmärkideks on:

- 1) Analüüsida CH₄ ja CO₂ seoseid erinevate veeparameetritega;
- 2) Analüüsida kahe kasvuhoonegaasi CH₄ ja CO₂ vahelisi seoseid.

Magistritöö raames on seatud ka hüpoteesid:

1. CH₄ ja CO₂ emissioonid on mõjutatud märgala veesügavusest.
2. CH₄ emissioonid suurenevad märgala vanuse kasvades.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1. Tehismärgalad ja nende tüübid

Suureneva populatsiooni ning inimtegevusest tuleneva mõju suurenemise tõttu on keskkonna reostus oluline probleem veekvaliteedi kaitse ja elurikkuse säilitamise seisukohast. (Ma, 2004) Tänapäevaks on olemas lai valik erinevaid puhastustehnoloogiaid, mida saab reovee ja heitvee kvaliteedi parandamiseks kasutada. Sellegipoolest juhitakse tihti olme- ja tööstusreovesi otse veekeskonda, ilma seda eelnevalt puhastamata. (Hsu, 2011) Märgalad on üheks viisiks looduslikes tingimustes vett puhastada. Märgalad nimetatakse planeedi produktiivseimateks ja mitmekesisemateks ökosüsteemideks, mis toetavad otseselt ja kaudselt ka inimpopulatsiooni, pakkudes meile ökosüsteemi teenuseid, milleks on näiteks puhta veevarustuse tagamine, esteetiline ilu, haridus- ja puhkehüved jne. (EPA, 2020) Märgalade juures on märgatud suutlikkust parandada samaaegselt vee kvaliteeti kui ka hoida või koguni suurendada elurikkust, mis on tekitanud teadlaste seas üha suuremat huvi rajada ning taastada märgalad. (Vann *et al.*, 2003; Hsu, 2011)

Looduslike märgalade kadumine on ülemaailmseks probleemiks, mis võib planeedi elurikkusele suurt ohtu kujutada (Ma, 2004), selle parandamiseks on teadlased loonud tehismärgalade kontseptsiooni. Tehismärgalad tuntakse kui inimtekkelisi ökosüsteeme mis on loodud imiteerima looduslike märgalade omadusi (Zhang *et al.*, 2020), kuid tehismärgalad toimuvad kõik protsessid rohkem kontrollitud keskkonnas (Vymazal, 2010). Avaveelised tehismärgalad on loodud eelkõige põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks, eemaldades suurema osa toitainetest enne vee tagasisuunamist looduslikesse veekogudesse. (Vann *et al.*, 2003; Hsu, 2011) Tähtis on rajada mikroorganismide jaoks sobilik elukeskkond, et tagada optimaalne veepuhastus märgalades (Noorvee *et al.*, 2007).

Tehismärgalad saab liigitada vastavalt erinevatele kriteeriumitele nagu disain, hüdroloogilised näitajad, voolusuund ning makrofüütide kasvu tüübid. Hüdroloogiliste näitajate juures saab arvestada kas tehismärgala on pinnasisese voolamisega, avaveeline või põhjavoolne. (Vymazal, 2019; Noorvee *et al.*, 2007)

Tehismärgalad ei pea alati olema projekteeritud kindlate kriteeriumitega - need võivad olla ka kombineeritud erinevatest kriteeriumitest või olla hübriidsed, et kasutada rajatud tehismärgalade süsteemide konkreetseid eeliseid optimaalselt. (Vymazal, 2010; Noorvee *et al.*, 2007) Tehismärgala projekteerimisel valitakse märgala tüüp erinevate tegurite alusel nagu maa-

nagu maa-ala suurus, kohalik kliima ning kindlasti ka hajukoormuse omadused, mis võivad piirkonniti erineda. (Tao, 2015; Noorvee *et al.*, 2007)

Lämmastikku (N) leidub märgalades mitmetes erinevates vormides näiteks nitraadi (NO_3), nitriti (NO_2) või ammoniaagi (NH_3) kujul, samuti võib lämmastikku märgalades leiduda ka orgaanilises vormis (Noorvee *et al.*, 2007). Tehismärgalades on lämmastikku eemaldatavateks protsessideks ammooniumi lendumine, denitrifikatsioon, taimede poolne sidumine, ammoniaagi mullas absorbeerumine ja orgaanilise lämmastiku mattumine. Seetõttu on taimestikuga kaetud märgaladel suurem võime lämmastiku ärastamiseks, sest lisaks sellele, et taimed seovad lämmastikku on nad ka oluliseks elukeskkonnaks nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni läbiviivate mikroobide jaoks. (Noorvee *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2015)

Teine oluline element, mida tehismärgalad peavad veest eemaldama on fosfor. Siseveekogudes on fosfor peamiselt limiteeriv toitaine ja põhjustab järvede eutrofeerumist (Talpsep *et al.*, 2011). Fosfori ärastamine märgalades toimub peamiselt adsorptsiooni, taimse omastamine, kompleksühendite moodustumise ja sadestumise abil (Noorvee *et al.*, 2007). Märgalade abil lämmastiku ja fosfori eemaldamine on jätkusuutlik, kuid sõltub suuresti ka sissevoolu kontsentratsioonist, lämmastiku ja fosfori keemilisest vormist, vee temperatuurist ja ka aastaegadest. Avaveelisi märgalaid kasutataksegi eelkõige põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks (Mander *et al.*, 2014; Vymazal, 2010).

1.2. Kasvuhoonegaaside lendumine märgala ökosüsteemidest

Arvatakse, et põhjapoolkera märgaladel leidub ligikaudselt 455 petagrammi (Pg; 1 petagramm = 10^{15} grammi) süsinikku ning põhjapoolkera peetakse märgalade süsinikudünaamikat potentsiaalselt väga probleemseks ülemaailmselt täheldatavate kliimamuutuste suhtes (Maucieri *et al.*, 2017). Märgalad reguleerivad globaalselt kliimat ning nendes on talletunud kuni 30% planeedi süsinikust. Lisaks süsinikule eraldavad märgalad umbes sama kõrge protsendi globaalsest metaani heitkogust. (Kasak *et al.*, 2020) Kuigi pikaajaliselt toimivad märgalad pigem (CO_2) sidujatena, võivad need süsteemid olla olulised CH_4 allikad (Chamberlain *et al.*, 2018).

1.2.1. CH_4 teke ja lendumine

Metaan on üheks laialdasemalt levinud kasvuhoonegaasideks, seejuures mängib metaani lendumine märgaladelt kasvuhooneefekti protsessis väga suurt rolli (Segers, 1998). Metaani saab lugeda üsna "lühiajaliseks" kasvuhoonegaasiks, s.t peale metaani jõudmist atmosfääri

eemaldatakse see sealt kiiremini kui CO₂. Keskmine metaani eluiga atmosfääris on umbes 12 aastat, mis tegelikkuses on võrreldes CO₂-ga pea 10x vähem (Earl *et al.*, 2003; Dlugokencky, 2022). Siiski on metaan oma soojendava toime poolest mitu korda tugevam kasvuhoonegaas kui süsihappegaas. On leitud, et ühe sajandi jooksul tekitaks tonn CH₄ 34 korda rohkem soojenemist kui üks tonn CO₂ seda teeks, mis tähendab seda, et kuigi metaan moodustab alla viie protsendi kasvuhoonegaaside heitkogustest, on see alates 1750-ndast aastast põhjustanud umbes 23% kasvuhoonegaaside soojendamise mõjust planeedile. (Ritchie *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021). CH₄ moodustab ligikaudu 20% üldisest atmosfääris leiduvatest heitkogustest (Beaulieu *et al.*, 2019).

Metaani moodustumine pinnases, näiteks veekogu või märgala põhjast, tuleneb mitmete erinevate bioloogiliste ja füüsikaliste protsesside tagajärjel ning koosmõjul. Metaani tootmine ning tarbimine on mikrobioloogilised protsessid, mida viivad läbi metanogeenid ja metanotroofid. (Segers, 2020) Metaan on orgaanilise aine lagunemise lõpp-produkt anaeroobsetes tingimustes (Kim *et al.*, 2015).

Makrofüüdid, näiteks hundinui (*Typha latifolia*) ja pilliroog (*Phragmites australis*) mõjutavad märgalades CH₄ produktsiooni ja transporti läbi taimede juureeksudaadi vabanemise, mis annab hoogu metanogeenide bakterite elutegevusele (Maucieri *et al.*, 2017). Samuti juhul, kui taimestiku juurte kaudu vabaneb O₂, mis vähendab metanogeenide põhjustatud metanogeneesi protsessi ja suurendab CH₄ oksüdatsiooni ning taimede õhukudedes kaudu vahendatud CH₄ transporti (Maucieri *et al.*, 2017).

Metaani produktiivsus on metanogeenide arvukusest ja aktiivsusest sõltuv (Singh *et al.*, 2021). Metaani tootmine toimub eelkõige anoksilistes muldades ja setetes, kuid samuti satub metaan atmosfääri läbi kuivendatud muldades leiduvate ammoniaagi oksüdeerijate või metanotroofide. Märgaladel toimub metaani tootmine orgaanika anaeroobsel lagunemisel, olulist rolli mängib hapnikupuudus oksüdatsiooni redutseerimise vahemikus -250 kuni -350 mV. (Mander *et al.*, 2014) Metaanivoog on suuresti mõjutatud ka veetasemest ning temperatuurist (Segers, 1998).

Metaani produktsiooni mõjutab suuresti ka eutrofeerumine (West *et al.*, 2012). Eutrofeerumist põhjustavad taimed ning vetikad elavad enamjaolt veekogude pinnal, kus neil on rohkem eluks vajalikku valgust ja hapnikku. Sellega takistavad veepinnal elavad taimed valguse jõudmist sügavamatesse veekihtidesse (Kasak, 2018). Kolme teadlase uuringust, mille raames võeti eelnimetatud veeparameetrid arvesse selgus, et metaan on olulisim veekogudest eralduv kasvuhoonegaas kliimamõjude seisukohast (Beaulieu *et al.*, 2019). Samuti leiti, et

metaanikogused tõusevad eksponentsiaalselt üheskoos veekogude ja klorofüllü kontsentratsiooniga, mis on samuti üheks peamiseks eutrofeerumise põhjustajaks. See on kooskõlas ka mitmete uuringutega mis näitavad, et CH₄ heitkogused on positiivses korrelatsioonis üldfosfori ja vetikate arvukusega. Need seosed peegeldavad peamiselt seost orgaanika suurenemise ja metanogeneesi suurenenud kiiruse vahel produktiivsetes veesüsteemides. See on oluline leid, sest prognooside kohaselt on siseveekogude tootlikkus lähikümnenditel üha tõusmas. (Beaulieu *et al.*, 2019)

1.3. CH₄ ja CO₂ emissioonide seosed keskkonnaparameetrite vahel

Süsihappegaasi ja metaani heitkogused märgaladel sõltuvad mitmete erinevate tegurite koostoimest nagu nt. pinnaseomadused, orgaaniline aine ja keskkonnatingimused (Maucieri *et al.*, 2017; Chamberlain *et al.*, 2018). Keskkonnatingimused mõjutavad otseselt ja kaudselt KHG heitkoguste dünaamikat ning seejuures ka heterotroofsete mikroobide aktiivust tehismärgaladel. On leitud, et temperatuur on positiivses korrelatsioonis nii CO₂ kui ka CH₄ emissioonidega. (Maucieri *et al.*, 2017)

Kuigi taimede olemasolu suurendab tehismärgaladel kasvuhoonegaaside heitkoguseid võrreldes tehismärgaladega kus vegetatsioon puudub, siis taimestik siiski fikseerib atmosfääri süsiniku fotosünteesi teel. Seetõttu toimivad tehismärgalad enamustel juhtudel CO₂ sidujatena (Maucieri *et al.*, 2017), kus märgaladel eemaldatakse CO₂ atmosfäärist ning seotakse see pinnasesse orgaaniliste ühenditega (Whitting & Chanton, 2001; Titlyanova *et al.*, 1998). Sama uurimuse käigus on leitud ka kõrge süsiniku sidumine pigem suvekuudel ehk kõrgemate temperatuuride juures. (Titlyanova *et al.*, 1998).

Maucieri (*et al.* 2014) uuringust leiti samuti positiivne korrelatsioon õhutemperatuuri ning CO₂ ja CH₄ emissioonide vahel aladel, kus leidis kindlat liiki taimi. Uuringu tulemuste järgi on alust arvata, et märgala temperatuurid on seoses erinevate taimeliikidega (Maucieri *et al.*, 2014) Leitud on ka seosed aastaajaliste CH₄ ja CO₂ emissioonide vahel, kus soojematel perioodidel olid nimetatud KHG emissioonid tunduvalt kõrgemad, seega on CH₄ ja CO₂ lendumine dünaamilises seoses hooajast tingitud temperatuurimuutusega (Maucieri *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2021).

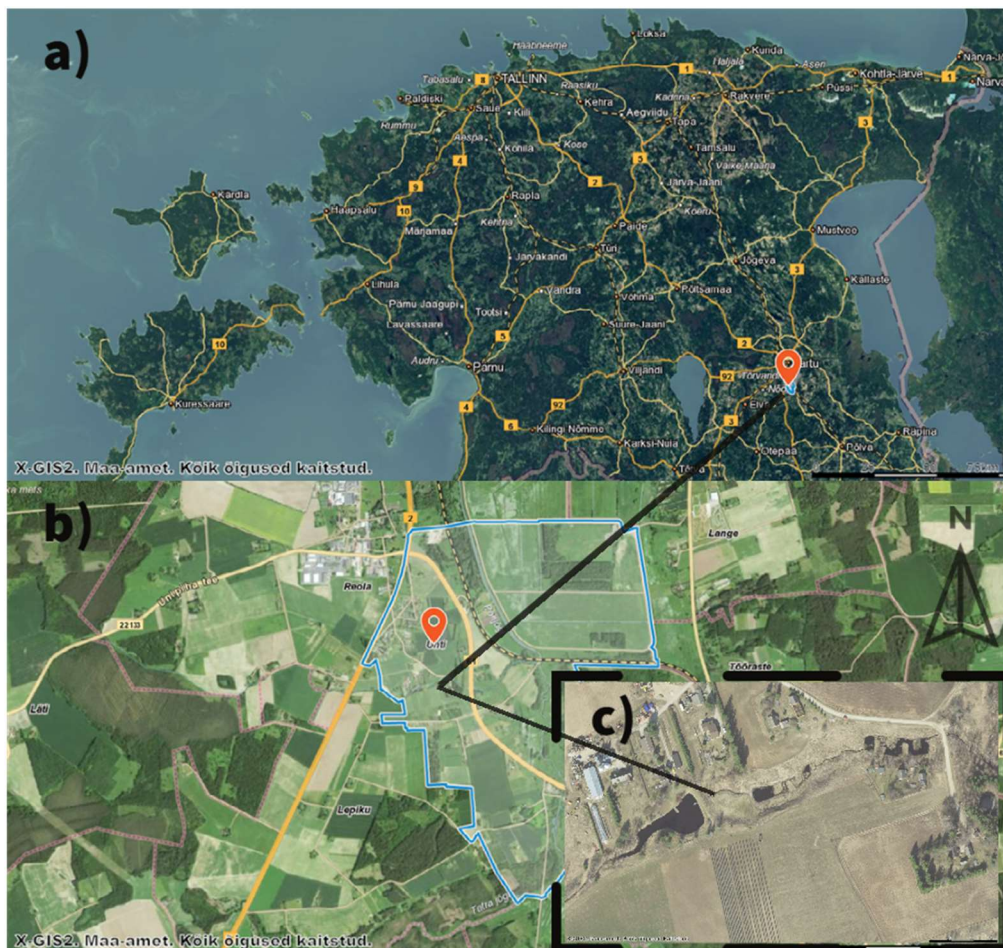
2022. aastal avaldatud uuringust leiti, et vee sügavus ning temperatuur olid olulisimad tegurid kasvuhoonegaaside emissioonide tekkel. Madalamatel aladel, kus veetase oli alla 10cm, tekkisid näiteks dilämmastikoksiidi (N₂O) puhul kõrgema emissiooniga piirkonnad (ingl *hot spots*). Temperatuurid see eest suurendasid märgala vooluhulka ning suviste põudade tõttu

tekkis märgalal veelgi rohkem kõrgemate emissioonidega piirkondi. (Kasak *et al.*, 2022)
Märgaladelt lenduv metaan on leitud olema temperatuuride muutustele tundlikum kui süsihappegaas (Chen *et al.*, 2021).

2. Materjal ja meetodika

2.1. Uuringuala kirjeldus

Vända tehismärgala asub Lõuna-Eestis Uhti külas Porijõe valgadal (pindalaga 298 km²). Vända tehismärgala rajati 2015. aastal ning see koosneb kahest madalaveelisest märgalast pindaladega 2219m² ja 2140m² ning settetiigist pindalaga 1700m² (Kasak *et al.*, 2018) (Joonis 1). Ligikaudu 62% Vända tehismärgalast on haritav maa, 32% looduslik maa (nagu soo ja mets) ning ülejäänud 8% on muu kasutusala (Kasak *et al.*, 2018; Kill, 2018). Märgalal leidub erinevaid taimeliike, valdavalt hundinuia (*Typha latifolia*) ja harilikku pilliroogu (*Phragmites australis*) (Kill, 2018). Vända märgala peamiseks eesmärgiks on vähendada toitainete äravoolu ümbritsevalt põllumaalt Porijõkke, et parandada veekvaliteeti (vt. ptk 1.1.)



Joonis 1. Vända tehismärgala asukoht (a) Eesti suhtes, (b) asukoht Uhti küla suhtes, (c) Vända tehismärgala. (Allikas: X-GIS maa-ameti kaardiportaal)

2.2. Mõõtmismetoodika

Käesoleva uurimustöö jaoks koguti ja uuriti Vända tehismärgalalt gaasi- ning veeproove aastatel 2018-2021, võttes mõõtmise hetkel arvesse ka vee temperatuuri ja sügavust igast proovipunktis VM1.1-VM2.6 (Joonis 2). Mõõtmised toimusid iga kahe nädala tagant ehk kahel korral kuus.



Joonis 2. Mõõtepunktid VM1.1-VM2.6 Vända kraavi esimesel ja teisel tehismärgalal.
(Foto: Maa-amet)

2.2.1. Veeproovide mõõtmine Vända märgalal

Igas KHG mõõtepunktis mõõdeti peale gaasiproovide kogumist portatiivse YSI ProDSS analüsaatoriga vee pH taset, elektrijuhtivust, hägusust, temperatuuri, hapniku kontsentratsiooni ning redokspotentsiaali. Selleks võeti proovipunktidest plastmassnõusse vett ning asetati seadme andur anuma sisse mõõtma maksimaalselt viieks minutiks, kuni parameetrite näidud stabiliseerusid. Samuti mõõdeti ka vee voolukiirust, milleks kasutati seadet SonTek FlowTracker Handheld-ADV. Veesügavus määrati samuti iga proovipunkti juures peale gaasiproovide kogumist.

2.2.2. Gaasiproovide kogumine Vända märgalalt

CO₂ ja CH₄ gaaside mõõtmiseks kasutati ujuvaid kambreid ning igas proovipunktis asus puidust sild, mille kummalegi küljele asetati 40cm kõrgune PVC kamber ruumalaga 65 liitrit (Joonis 3). Kambrid kinnitati proovivõtu ajaks nõõridega silla külge. Gaasiproove koguti eelvakueeritud 50 ml (0,3 mbar) suurustesse klaaspudelitesse ning ühest proovipunktist kokku neljal korral 20 minutiliste intervallidega – kohe peale kambri paika sättimist, peale 20 minutit, 40 minutit ja 60 minutit. Gaaside emissioone hinnati seejärel kogutud proovidest Shimadzu GC-2014 gaasi kromatograafiasüsteemi abil.



Joonis 3. Kambrid proovipunktides (vasakul aprill 2021/paremal juuni 2021)

2.3. Statistiline andmetöötlus

Tulemuste korrastamiseks, süstematiseerimiseks, visualiseerimiseks ning Spearmani astakorrelatsiooni teostamiseks kasutati programmi MS Excel 2021. Gaasiproovide andmete kontrollil eeldati, et kontsentratsiooni muutus tunni jooksul on vähemalt 20 ppm CO₂ puhul ning 20 ppb CH₄ korral. Väiksemad väärtused loeti mõõtemääramatuseks. Gaasivoo ja erinevate proovivõtuhetkede (0, 20, 40 ja 60 min) vahelise seose puhul vaadeldi determinatsioonikordajat (R²), mis CO₂ korral pidi olema vähemalt 0,97 ning CH₄ puhul 0,95. Kui determinatsioonikordaja oli võrdne või suurem eelpoolnimetatud väärtustest, siis loeti tulemus korrektseks.

Olulisuse nivoo oli kõigil juhtudel $\alpha = 0,05$.

3. Tulemused

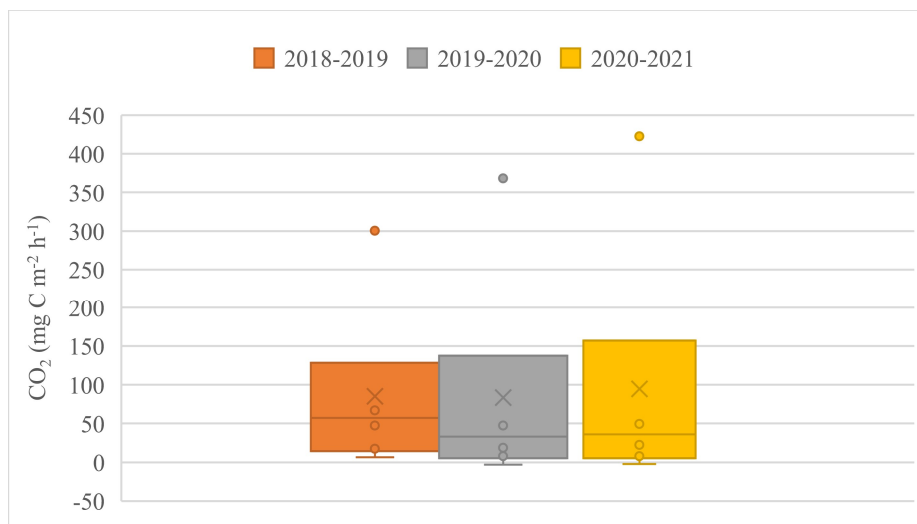
Käesolevasse peatükki on koondatud 2018-2021 aastatel mõõdetud veeparameetrid Vända tehismärgalalt ja samadel aastatel mõõdetud CH₄ ning CO₂ tulemused ning mõõtmiste põhjal teostatud analüüsid. Magistritöö raames teostas autor lisa CH₄ ja CO₂ ning veeparameetrite mõõtmisi 2021. aasta aprill-august.

Spearmani astakorrelatsiooni abil uuriti metaani (CH₄) ja veesügavuse, temperatuuri ning süsihappegaasi (CO₂) sõltuvusi üksteisest.

Spearmani korrelatsiooni analüüs viidi läbi vaatlusperioodi aastate vahemikes 2018 mai - 2019 aprill (Lisa 2, Tabel 2), 2019 mai - 2020 aprill (Lisa 2, Tabel 3) ning 2020 mai kuni 2021 aprill (Lisa 2, Tabel 4), et analüüsiperiood hõlmaks tervet aastast tsüklit. Olulisemad korrelatsioonid ilmnesisid vaid temperatuuri ja veesügavuse vahel.

3.1. Süsinikdioksiidi vood

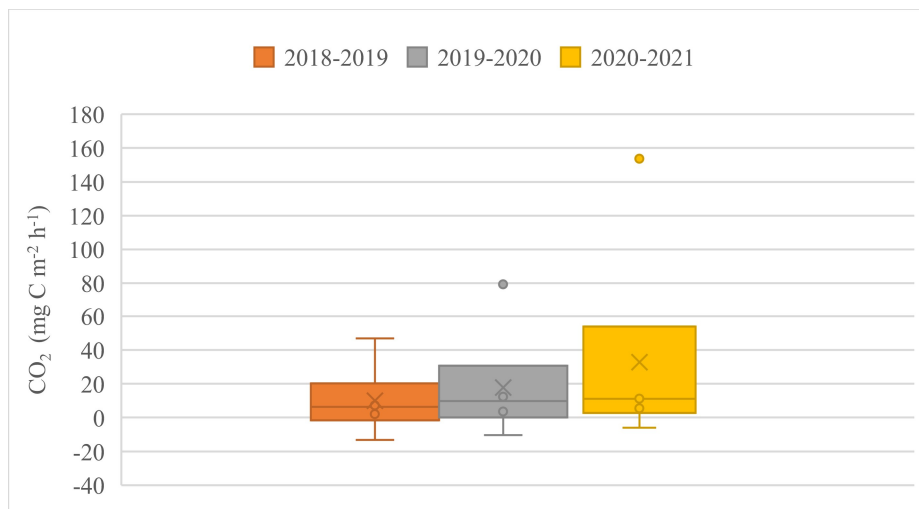
Vända tehismärgala CO₂ emissiooni võrdlused on toodud aastate 2018-2021 vahemikus. CO₂ emissioonid Vända I märgalal aastal 2021 olid vahemikus -6,1 mg C m⁻² h⁻¹ kuni 349,4 mg C m⁻² h⁻¹, mis on võrreldes aasta 2018-2019 emissioonidega -16,1 mg C m⁻² h⁻¹ kuni 360,1 mg C m⁻² h⁻¹ (Joonis 4) samas suurusjärgus.



Joonis 4. CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) emissioonide keskvaartused (x), mediaanvaartused (horisontaalne joon), 25- ja 75-protsentilid (alumine ja ülemine karbi äär), minimaalsed ja maksimaalsed väärtused (alumine ja ülemine vurr) Vända I. märgalal 2018-2021.

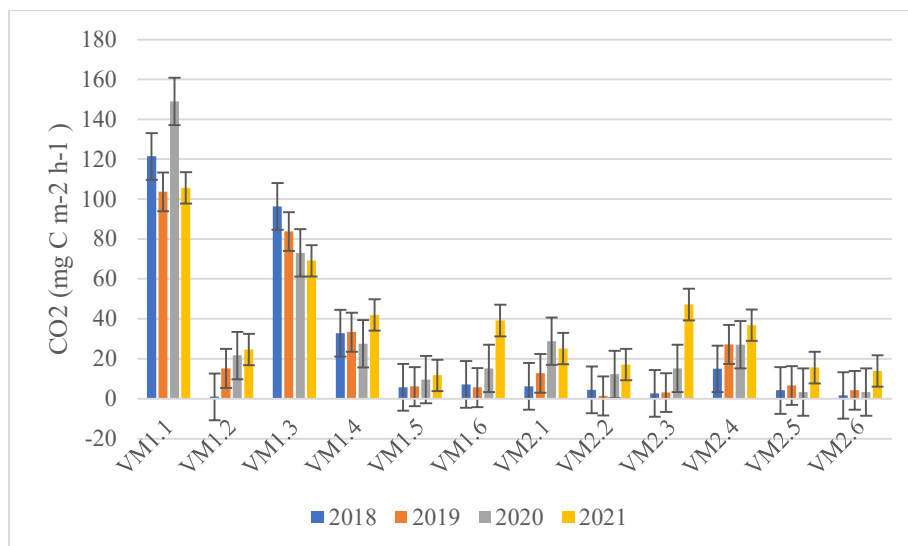
Võrreldes esimest ja teist märgala (Joonis 5), on teisel märgalal 2018., 2019. ja 2020. aastal lendunud vähem CO₂. Näiteks 2018. aastal oli mõõdetud seotud ehk negatiivne CO₂ emissioon 15,1 mg C m⁻² h⁻¹, maksimaalne heitkogus mõõdeti 36 mg C m⁻² h⁻¹, mis on I märgalaga

võrreldes 10-kordne vahe. Siiski on II märgala jooniselt näha, et kuigi ka 2021. aasta emissioonid $-2,5 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ – $206,1$ olid 40% madalamad, siis II märgalal on CO_2 emissioonid 2021. aasta mõõtmistulemuste järgi esitatud siiski tõusvas trendis.



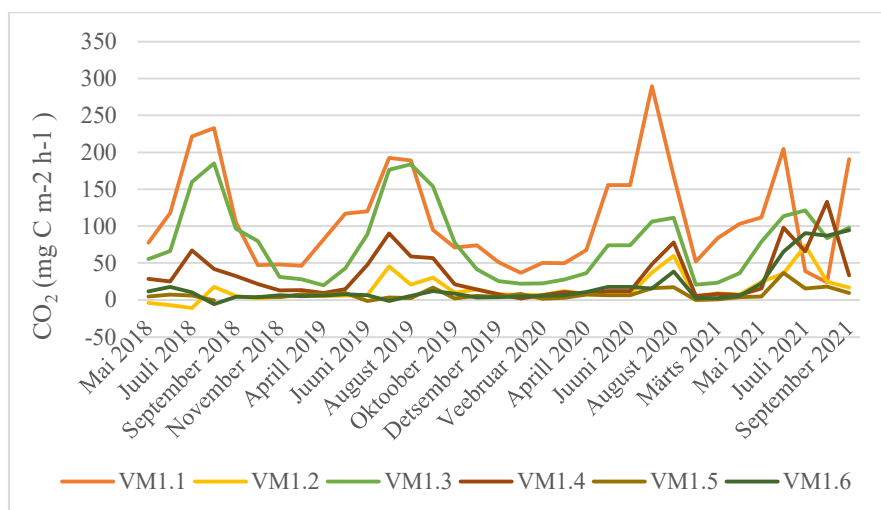
Joonis 5. CO_2 ($\text{mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) emissioonide keskvaartused (x), mediaanvaartused (horisontaalne joon), 25- ja 75-protsentiilid (alumine ja ülemine karbi äär), minimaalsed ja maksimaalsed väärtused (alumine ja ülemine vurr) Vända II. märgalal 2018-2021.

CO_2 aastatevahelisest võrdlusest oli märgata, et aastatel 2018-2021 olid CO_2 emissioonid I märgalal võrreldes II märgalaga püsivalt kõrgemad. Jooniselt 6 on lisaks aastavahelisele võrdlusele näha ka mõõtepunktide kaupa muutuvaid CO_2 emissioone. Kuigi joonis 5 näitas, et Vända märgala CO_2 emissioonid olid 2021. aastaks võrreldes eelnevate aastatega tõusnud, siis jooniselt 6 on näha, et CO_2 emissioonid märgalal vähenesid II märgalale jõudes. Siinkohal saab võrrelda näiteks I märgala mõõtepunkti VM1.1 maksimaalset tulemust 2020. aastal $319,6 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja VM2.6 maksimaalset mõõtetulemust aastal 2021 $206,1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, mis on ligikaudu 36% langus. Madalamaid emissioone on näha I märgala mõõtepunktides VM1.2, VM1.5 ning II märgala mõõtepunktides VM2.2, VM2.5 ja VM2.6.



Joonis 6. Vända I (VM1.1-VM1.6) ja II (VM2.1-VM2.6) märgala mõõtepunktide CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) keskmised emissioonid aastatel 2018-2021.

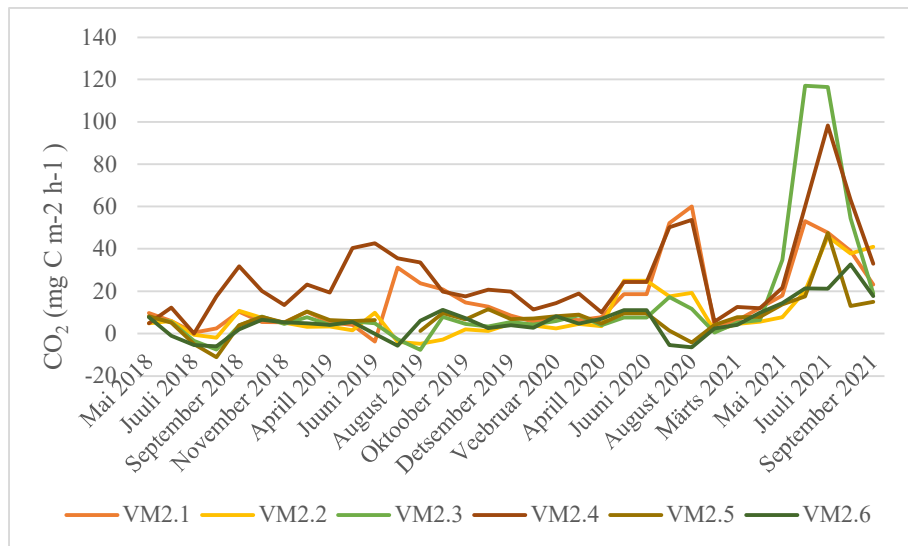
Vända I märgala maksimaalne CO₂ emissioon 374,7 mg C m⁻² h⁻¹ mõõdeti 2020. aasta juunikuus mõõtepunktist VM1.1. Seotud heitkogus 10,8 mg C m⁻² h⁻¹ mõõdeti aastal 2018 mõõtepunktist VM1.2. Andmete järgi ulatuvad esimese märgala CO₂ emissioonid soojemal perioodil (mai-august) keskmiselt 68,8 mg C m⁻² h⁻¹ ning jahedamal perioodil (september-aprill) keskmiselt 25,8 mg C m⁻² h⁻¹. Joonis 7 kinnitab, et CO₂ emissioonid on kõrgemad just soojematel perioodidel ning läbi aastate on kõrgeimad emissioonid lendunud mõõtepunktist VM1.1.



Joonis 7. CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) keskmistatud emissioonide kuupõhine vaatlus Vända I märgalal 2018-2021.

Võrreldes I märgalaga, on II märgala CO₂ emissioonimäärad kuude lõikes vähem kõikumad, kuid sarnaselt I märgalale on samuti näha soojadel kuudel veidi kõrgemaid emissioone (Joonis 8). Kõrgeim CO₂ emissioon 117,1 mg C m⁻² h⁻¹ registreeriti Vända teise märgala mõõtepunktist VM2.3 2021. aasta juunikuus, mil leidsid aset väga kõrgeid

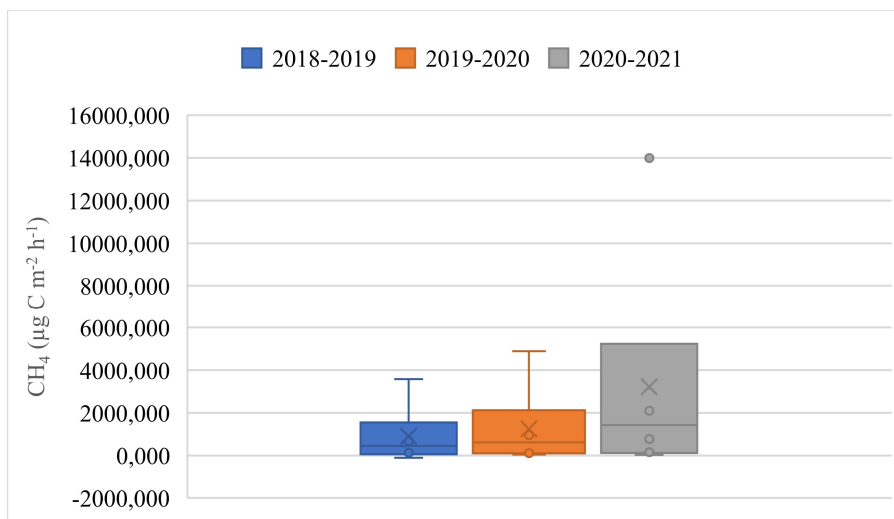
temperatuurid ja kuivad ilmad. Seotud CO₂ emissioone 11,1 mg C m⁻² h⁻¹ registreeriti aga 2018. aasta augustis mõõtepunktis VM2.5. Jooniselt on näha, et valdavalt kõrgeimate emissioonidega oli 2018-2020 mõõtepunkt VM2.4, kus 2021. aastaks emissioonimäärad siiski tõusid, kuid 2021. aastal lendus mõõtepunktist VM2.3 enim CO₂. Soojemal perioodil (mai-august) lendus Vända II märgalalt keskmiselt 19,8 mg C m⁻² h⁻¹ ning jahedamal perioodil (september-aprill) keskmiselt 7,5 mg C m⁻² h⁻¹.



Joonis 8. CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) keskmistatud emissioonide kuupõhine vaatlus Vända II märgalal 2018-2021.

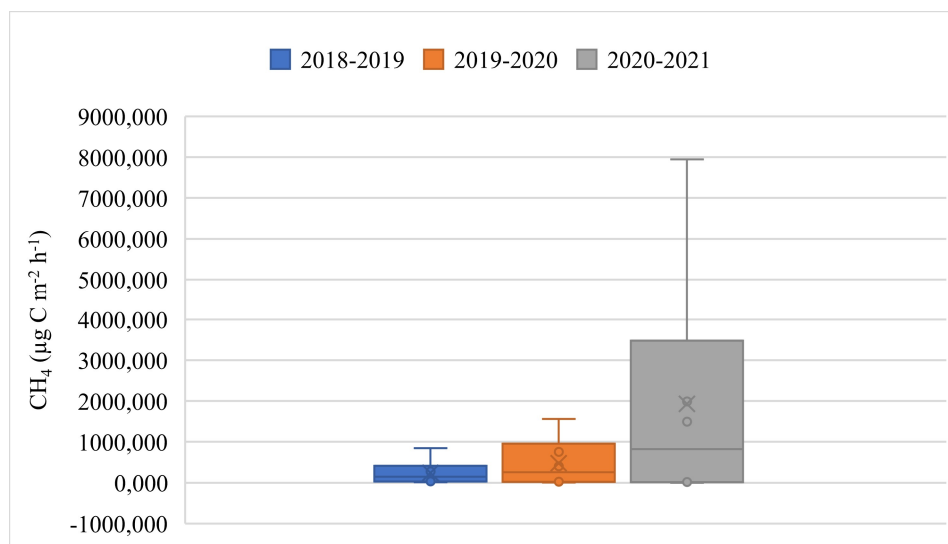
3.2. Metaani vood

CH₄ emissioonid on aasta aastalt võrreldes sarnase muustriga kui CO₂ emissioonid (Joonis 9), s.t kasvavas trendis. Vända I märgala CH₄ maksimaalse emissioonid on 2021. aastaks võrreldes 2018. aastaga tõusnud 10-kordselt. Vända I märgalal mõõdeti seotud CH₄ 263,1 µg C m⁻² h⁻¹ emissioone aastal 2018 oli mõõdetud andmete põhjal. Maksimaalsed CH₄ emissioonid oli 2018. aastal 2405,6 µg C m⁻² h⁻¹. Aastal 2021 registreeriti CH₄ kõrgeimaks emissiooniks Vända I märgalal koguni 22937,2 µg C m⁻² h⁻¹.



Joonis 9. CH₄ (µg C m⁻² h⁻¹) emissioonide keskvaartused (x), mediaanvaartused (horisontaalne joon), 25- ja 75-protsentilid (alumine ja ülemine karbi äär), minimaalsed ja maksimaalsed vaartused (alumine ja ülemine vurr) Väanda I. järgalal 2018-2021.

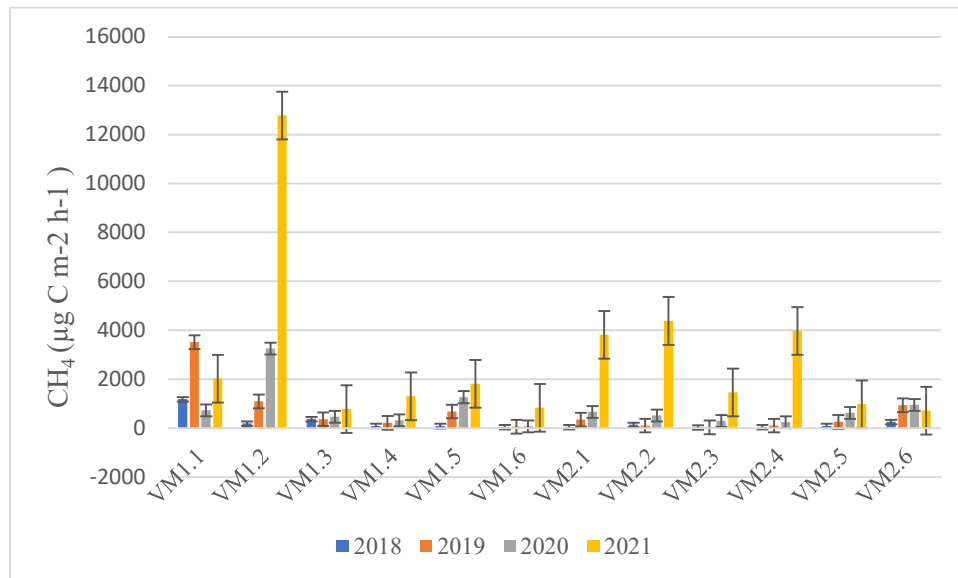
Väanda II järgalal (Joonis 10) on 2020-2021 perioodil tõusnud CH₄ emissioonid 25 korda (rohkem kui 1000%). Väanda II järgala seotud CH₄ emissioone aastal 2020 registreeriti 2,4 µg C m⁻² h⁻¹ ja maksimaalne emissioonikogus 14091,9 µg C m⁻² h⁻¹. Väanda II järgalal 2018. aasta minimaalne CH₄ emissioon oli 14,5 µg C m⁻² h⁻¹ ja maksimaalne 361,9 µg C m⁻² h⁻¹.



Joonis 10. CH₄ (µg C m⁻² h⁻¹) emissioonide keskvaartused (x), mediaanvaartused (horisontaalne joon), 25- ja 75-protsentilid (alumine ja ülemine karbi äär), minimaalsed ja maksimaalsed vaartused (alumine ja ülemine vurr) Väanda II. järgalal 2018-2021.

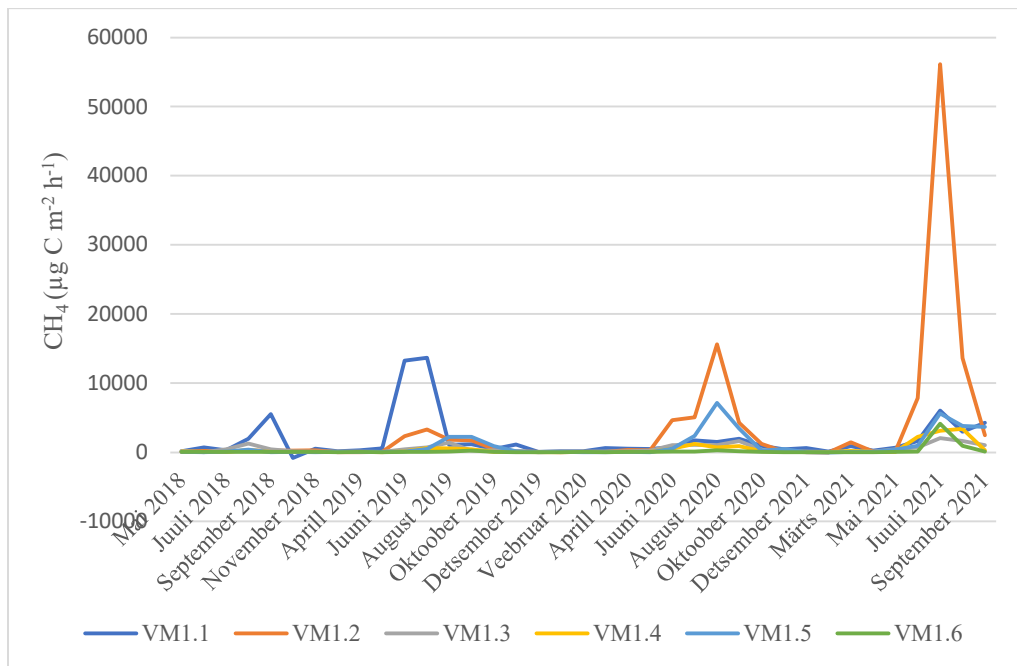
Võrreldes CH₄ emissioone läbi aastate ka eraldi mõõtepunktides (Joonis 11), väljendub samasugune tõusev muster nagu joonistel 9 ja 10, kuid kuupõhistelt joonistelt on näha, et kõrgeimad emissioonid esinevad peamiselt vegetatsiooniperioodil (aprill-oktoober).

Metaani keskmistatud 2018-2021 mõõtetulemuste (Joonis 11) järgi on CO₂-le vastupidiselt näha CH₄ emissiooni järsku tõusu aastal 2021, mil maksimaalsed mõõtetulemused küündisid juulikuus ligikaudu 138 000 µg C m⁻² h⁻¹-ni, mis on võrreldes 2020. aasta juunikuu CH₄ emissioonidega 5-kordne tõus.



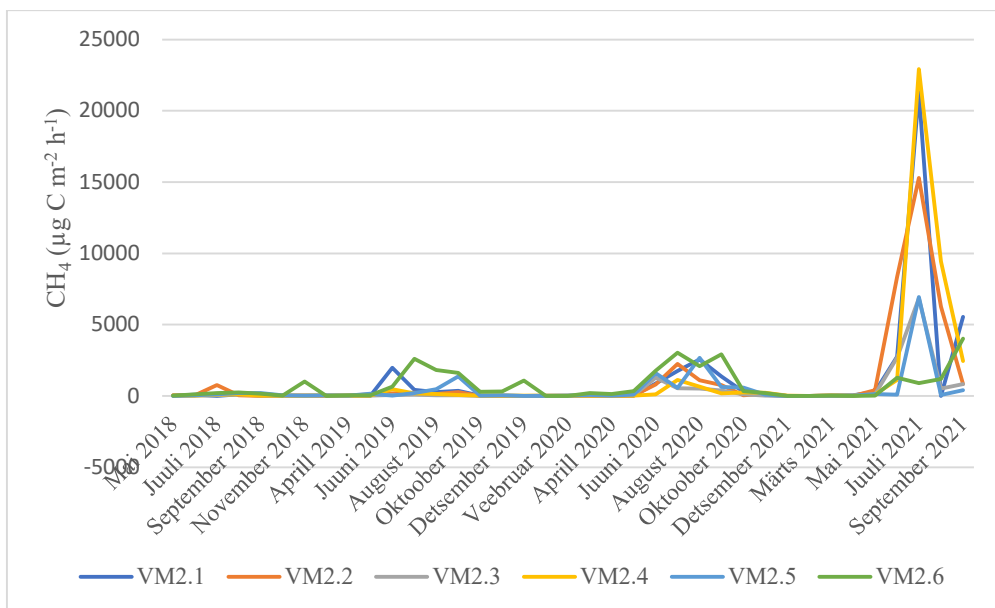
Joonis 11. CH₄ keskmised heitkogused (µg C m⁻² h⁻¹) Vända tehismärgala mõõtepunktides aastatel 2018-2021.

Vaadates CH₄ lendumist mõõtepunktidest kuupõhiselt (Joonis 12) on näha, et esimese märgala proovipunktidest lendus enim CH₄ mõõtepunktist VM1.2, mis kujunes välja kõrgeima KHG emissiooniga mõõtepunktiks (ingl *hot spot*). Keskmiselt on esimese märgala CH₄ emissioonid soojematel perioodidel aastast 2018 kuni 2021 tõusnud 17-kordselt, kui 2018-nda aasta mai-august keskmine CH₄ emissioon oli 279,7 µg C m⁻² h⁻¹ ning 2021. aasta keskmine CH₄ emissioon mai-august oli 4936,6 µg C m⁻² h⁻¹. Jahedamal perioodil september-aprill on CH₄ emissioonid tõusnud vaid 2-kordselt, näiteks 2018. aasta jahedal perioodil registreeriti emissioone Vända I märgalal keskmiselt 258,3 µg C m⁻² h⁻¹ ning 2020. aastal keskmiselt 490,9 µg C m⁻² h⁻¹.



Joonis 12. CH₄ (µg C m⁻² h⁻¹) keskmiste emissioonide kuupõhine vaatlus Vända I märgalal 2018-2021.

Teise märgala proovipunkte analüüsid (Joonis 13) on näha, et suurima varieeruvusega metaaniemissioonid on samuti selgelt välja joonistunud II märgala esimeses pooles ehk punktides VM2.1 ja VM2.2, samuti näitas kõrgemaid emissioone 2021. aastal mõõtepunkt VM2.4. 2019. aasta suveperioodil eraldus enim emissioone teise märgala sissevoolu ja väljavoolu lähedal ehk punktides VM2.1 ja VM2.6. Võrreldes aasta 2018 ja 2021 sooja perioodi emissioonide poolest, siis 2018. aastaga võrreldes on teisel märgalal suurenenud emissioonid 2021-ks aastaks pea 47-kordselt. Vända teise märgala keskmised sooja perioodi emissioonid olid 102,5 µg C m⁻² h⁻¹ ja 2021. aastal 4741,8 µg C m⁻² h⁻¹. Jahedal perioodil oli emissioonide vahe võrreldes 2018. aastaga vaid 3-kordne, 2018. aastal registreeriti september-aprill mõõteperioodil teisel märgalal 65,7 µg C m⁻² h⁻¹ ning 2020-2021 aasta jahedal perioodil 210,3 µg C m⁻² h⁻¹.

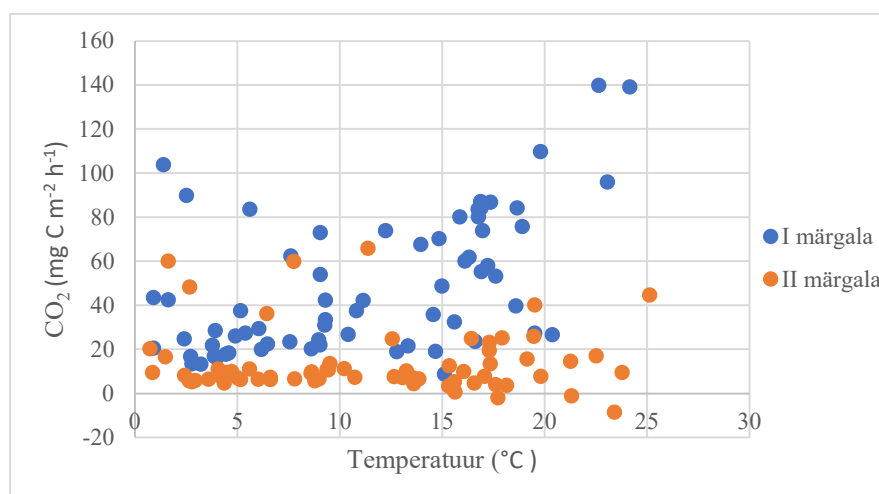


Joonis 13. CH₄ (µg C m⁻² h⁻¹) keskmiste emissioonide kuupõhine vaatlus Vända II märgalal 2018-2021.

3.3. Gaasivoogude seos keskkonnaparaameetritega

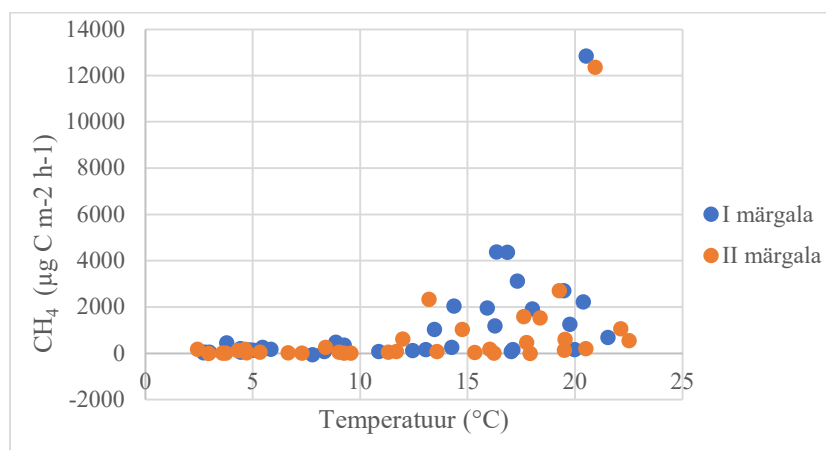
3.3.1. Seos veetemperatuuriga

Joonisel 14 on toodud CO₂ emissioonide ja temperatuuride vaheline seos. Madalaim temperatuur 0,2°C mõõdeti Vända I märgalal 2020. aasta detsembris ning kõrgeim 25,1°C Vända II märgalal 2020. aasta juunis. Jooniselt on näha, et vaatamata madalamale või kõrgemale temperatuurile on CO₂ lendumine Vända märgalalt pidev. Kõrgeimad emissioonid on registreeritud 20 ja 25 °C juures ehk mõõdetud andmete järgi soojemal perioodil (mai-august).



Joonis 14. Mõõdepunktide keskmistatud temperatuuride ning keskmistatud CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) emissioonide vaheline Vända I ja II märgala vahel aastatel 2018-2021.

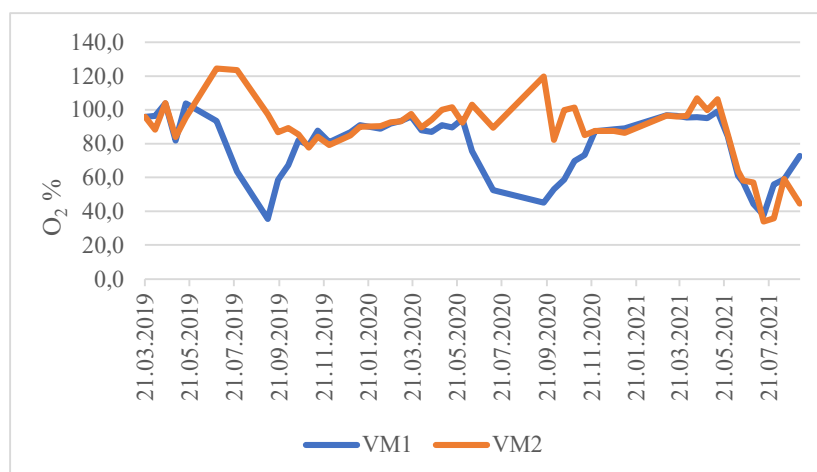
Jooniselt 15 näeb, et CH₄ produktsioon oli kõrgeim 12°C kuni 20°C vahemikus. Kõrgeima temperatuuri ca 25°C juures mõõdeti VM2.6. 2020. aasta juunis mõõdeti CH₄ emissiooniks 1762,3 µg C m⁻² h⁻¹ ja minimaalseima mõõdetud temperatuuri 0,4°C juures 2021. aasta jaanuaris mõõdeti VM2.3 4,3 µg C m⁻² h⁻¹.



Joonis 15. Mõõdepunktide keskmistatud temperatuuride ja keskmistatud CH₄ (µg C m⁻² h⁻¹) emissioonide vaheline võrdlus Vända I ja II märgala vahel aastatel 2018-2021.

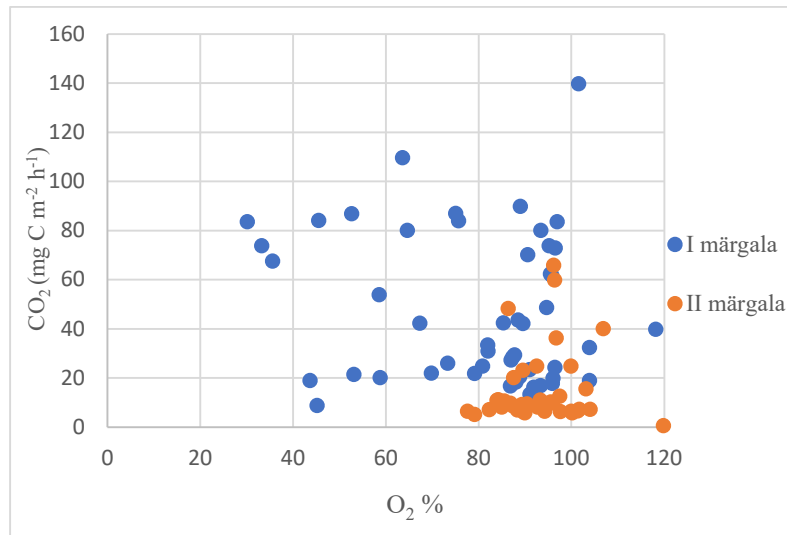
3.3.2. Seos hapnikutasemega

Hapnikusisaldus Vända märgalal varieerus 7% kuni 120% vahel (Joonis 16). Vända märgalal mõõdetud tulemuste järgi ei varieeru hapnikusisaldus suuresti, kuid näitab pigem soojematel perioodidel (mai-august) madalamaid protsente ning jahedamal perioodil (september-aprill) oli hapnikusisaldus vees valdavalt 100%-120%. Vända teisel märgalal olid hapnikusisalduse protsendid valdavalt kõrgemad, kui Vända esimesel märgalal.



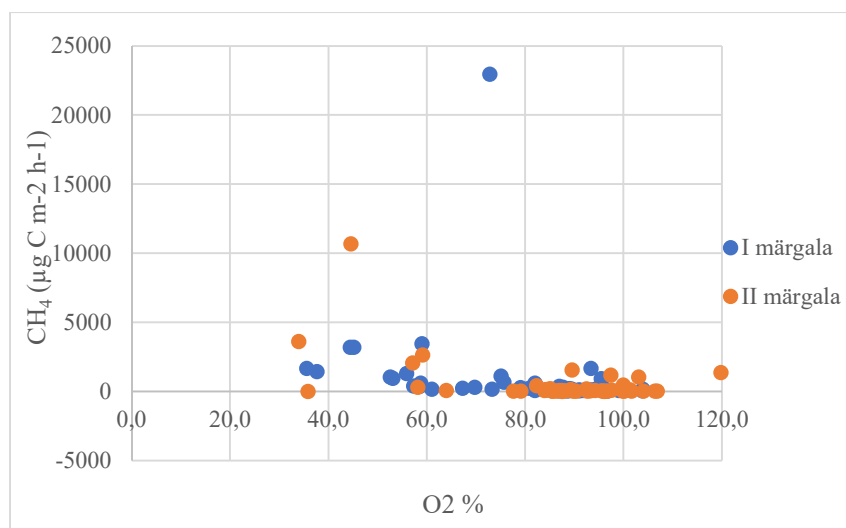
Joonis 16. Hapnikusisaldus (%) vees 2019-2021 Vända tehismärgalal.

Hapnikusisaldust ning CO₂ võrreldes (Joonis 17) on märgata, et CO₂ emissioonide lendumine oli kõrgeim ka kõrge O₂ % juures. Kõrgeim CO₂ emissioon 139,8 mg C m⁻² h⁻¹ registreeriti 2020. aasta juunis 101% hapnikutaseme juures. On näha, et I märgalal on mõõdetud CO₂ emissioonid hapnikusisaldusest vees veidi vähem sõltuvad – II märgalal on CO₂ emissioonid lendunud just 80-100% vahel.



Joonis 17. Mõõtepunktide keskmistatud hapnikusisalduste (%) ning keskmistatud CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) emissioonide vaheline võrdlus 2018-2021.

Joonisel 18 on toodud nii keskmise hapnikusisalduse kui ka keskmiste metaaniemissioonide võrdlus Vända I ja II märgalal. Võrreldes CH₄ ja O₂ eraldi on näha, et mida madalam oli hapnikutase vees, seda kõrgemad olid CH₄ emissioonid. Võrreldes hapnikusisaldust vees esimese ja teise märgala vahel on teisel märgalal näha veidi kõrgemaid metaaniemissioone.

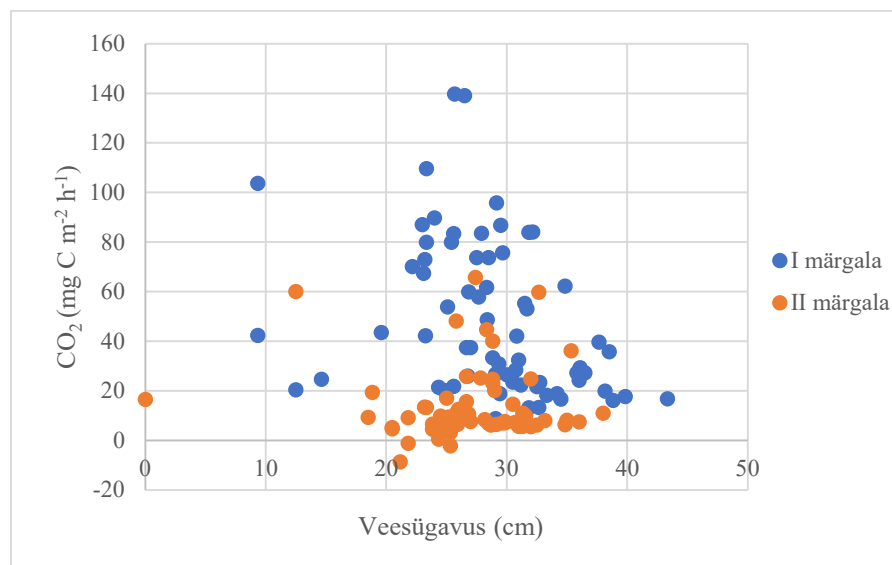


Joonis 18. Mõõtepunktide keskmistatud hapnikusisalduste (%) ning keskmistatud CH₄ (µg C m⁻² h⁻¹) emissioonidevaheline võrdlus 2018-2021.

3.3.3. Seos veetasemega

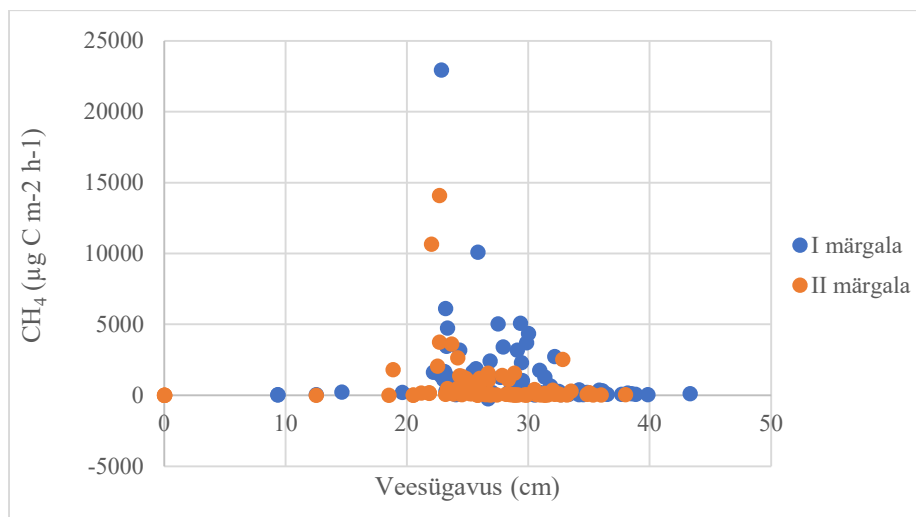
Veesügavus Vända märgalal varieerus periooditi 2cm-st kuni 80cm-ni. Kõrgeim veetase, 80cm, mõõdeti I märgalalt mõõtepunktist VM1.5 2020. aasta märtsikuus ning madalaim I märgalalt mõõtepunktist VM1.1 2018. aasta septembris. Veetasemed on üldiselt püsinud mõlemal märgalal üsna sarnased, enamjaolt 20cm ja 30cm vahel.

Võrreldes veesügavust ja CO₂ (Joonis 19) on märgata CO₂ lendumist enamjaolt 20 kuni 40 cm sügavusest veest. Keskmisest kõrgem emissioon 139 mg C m⁻² h⁻¹ registreeriti Vända I märgalalt 2020. aasta juunikuus, mil veetasemeks mõõdeti 26-29cm. Minimaalseim emissioon, ehk sidumine -8,5 mg C m⁻² h⁻¹ mõõdeti Vända märgalalt 21 cm veesügavuse juures.



Joonis 19. Mõõtepunktide keskmistatud veesügavuste ning keskmistatud CO₂ (mg C m⁻² h⁻¹) emissioonide vaheline võrdlus 2018-2021.

CH₄ ja veesügavuse vaheliselt (Joonis 20) analüüsilt on näha CH₄ lendumist enim just 20 kuni 30cm veesügavusel. Kõrgeimad metaaniemissioonid väljendusid 34,5cm juures mõõtepunktis VM1.2 aastal 2021. Madalaimad metaaniemissioonid aga 2018 aasta oktoobris mõõtepunktist VM1.1, mil veetase oli 3,8cm.



Joonis 20. Mõõtepunktide keskmistatud veesügavuste ja keskmistatud CH₄ (µg C m⁻² h⁻¹) emissioonide vaheline võrdlus 2018-2021.

4. Arutelu

Vaadates kokkuvõtvalt analüüsitud Vända märgala CO₂ ja CH₄ emissioonide tulemusi, on nimetatud kasvuhoonegaaside dünaamikas märgata sarnaseid mustreid, mis võiks viidata mõõdetud CO₂ ja CH₄ koostoimele. Tulemuste peatüki analüüsitud joonistelt on näha, et sarnaselt CH₄ emissioonidele on ka CO₂ emissioonid Vända esimesel märgalal kõrgeimad.

Vända tehismärgala eesmärgiks on vähendada põllumajanduslikku hajukoormust, kuid seejuures oleks oluline hoida märgalalt lenduvate kasvuhoonegaaside tasemed võimalikult madalad. Siiski on tehismärgalad oma keskkonnasõbralikkuse poolest ühed eelistatuimad veepuhastussüsteemid, sest vee puhastamisel ei nõua märgalad lisa energiakulu (Maucieri *et al.*, 2017) ning pakuvad erinevaid lisand väärtusi ja suurendavad piirkonna elurikkust (Rannap *et al.*, 2020).

4.1. CO₂ vood

Süsihappegaasi emissioonid on Vända märgalal aastast aastasse olnud tõusvas trendis. Mõõdetud süsihappegaasi emissioonid on varasemalt läbiviidud uurimuste kohaselt kõrgeimad vees aeroobsetes tingimustes, kuna süsihappegaasi tootmine leiab aset aereeritud keskkonnas (Drösler *et al.*, 2008; Berglund & Berglund, 2011).

Märgalad on lisaks süsihappegaasi tootmisele ka süsihappegaasi sidujad (Titlyanova *et al.*, 1998; Whitting & Chanton, 2003) Analüüsitud tulemuste raames toetab süsihappegaasi sidumise tulemusi mitu varasemat uurimustööd (Titlyanova *et al.*, 1998; Whitting & Chanton, 2003). Sarnaselt uurimustele mõõdeti Vända tehismärgalal süsihappegaasi negatiivsed tulemused (toimus sidumine) just suvistel perioodidel.

CO₂ andmete põhjal ei eristunud teisel märgalal olulisi seoseid temperatuuride vahel, kuid esimesel märgalal registreeriti soojematel perioodidel kõrgeimad CO₂ emissioonid. Varasemalt läbiviidud uuringud on näidanud, et CO₂ emissioon võib olla ka temperatuurist sõltuv (von Arnold *et al.*, 2005; Kaisal & Kohv, 2009, Pihlatie *et al.*, 2010). Analüüsitud andmete põhjal väljenduvadki kõrgemad CO₂ emissioonid just kõrgema veetemperatuuri korral. Varasemates uurimustes on leitud, et CO₂ vood võivad olla hooajaliselt temperatuuride järgi intensiivsemad, mille põhjal saab seose tuua ka vegetatsiooniperioodil temperatuuride kõikumisel kaasnevate suurenenud emissioonidega. (Berglund & Berglund, 2011; Friborg *et al.*, 2003).

Andmeanalüüsist selgub, et süsihappegaasi emissioonide kõrgem tase tuleneb madalast veesügavusest. Madala veesügavuse korral leiab märgalal aset aeroobne keskkond ehk

hapnikusisaldus vees on kõrgem, mis omakorda kiirendab taimestiku lagunemist ning süsihappegaasi emissioonid suurenevad läbi oksüdatsiooni protsessi (Vann *et al.*, 2003; von Arnold *et al.*, 2005; Kaisel & Kohv, 2009; Berglund & Berglund, 2011).

Märgatav seos ilmnes süsihappegaasi ja hapnikusisalduse vahel. Uurimustest on saadud kinnitust, et tugevama pinnase aeratsiooni juures on aeroobsete mikroorganismide elutegevus kõrgendatud, mis mõjutab ka CO₂ emissioonide tekkimist (Berglund & Berglund, 2011).

4.2.CH₄ vood

Metaani süntees toimub vastupidiselt CO₂-le anaeroobses keskkonnas. Märgalal tekib anaeroobne keskkond taimede lagunemisel (Vann *et al.*, 2003). CH₄ jõudes aeroobsesse kihti muundatakse metanotroofide poolt CO₂-ks. (Drösler *et al.*, 2008).

Analüüsitud CH₄ kohta andmetest on näha, et CH₄ ja veesügavuse vahel on seos. Metaan lendub enim 20-30cm vahel, seega on läbiviidud uurimuste põhjal alust arvata, et kõrgemate CH₄ emissioonide hetkel on üheks põhjuseks madal veetase tehismärgalal (Vann *et al.*, 2002; von Arnold *et al.*, 2005).

Tulemuste peatükist selgus, et CH₄ lendub pigem kõrgemate temperatuuride ja soojema perioodi jooksul, mil soojemad temperatuurid metanogeneesi protsessi esile kutsuvad (Drösler *et al.*, 2008).

Taimestiku katvuse ja CH₄ ning CO₂ emissioonide vahel saab samuti tuua paralleele, sest intensiivne taimekasv soodustab ka orgaanika lisandumist setetesse (Chamberlain *et al.*, 2018). Näiteks taimestiku katvus Vända I märgalal oli peale rajamist 33%, mis suurenes 88% peale 2021 aasta sügisel. Vända I märgala puhul istutati peale süsteemi rajamist ca 4 hundinuia taime m² kohta (Kasak *et al.*, 2018). Vända II märgala puhul toimus loomulik taimestikuareng, mis peale rajamist oli 2.5% ja suurenes 73% peale 2021 aasta sügisel (Kill *et al.*, 2022). Koos taimestiku arenguga on samuti paralleelselt suurenenud ka CH₄ emissioonid.

Kõrgeimad CH₄ emissioonid on eraldunud vegetatsiooniperioodil, seega saab seose tuua biomassi kasvu- ja lagunemisprotsessidega, mis lisab põhjamutta orgaanikat pakkudes metanogeenidele toitaineid. (Maucieri *et al.*, 2017; Drösler *et al.*, 2008). Siinkohal saab seose leida ka vee hapnikusisaldusega (Maucieri *et al.*, 2017). Varasemate uurimustööde põhjal võib eeldada, et 25%-60% vee hapnikusisalduse vahel, mil mõõdetud CH₄ emissioonid näitasid kõrgemaid tulemusi, leidis Vända märgalal aset biomassi lagunemine, mis tekitab vees anorgaanilise keskkonna (Drösler *et al.*, 2008). Metaani rohkuse korral on tavaliselt vees ka

madal hapnikusisalduse protsent, mis viitab anoksilisele keskkonnale, mis on ühtlasi ka metaani tootmiseks ideaalne keskkond (Chamberlain *et al.*, 2018). Mida kõrgem on hapnikusisaldus vees, seda suurem on ka elusorganismide hulk vees.

Metaanikoguste vähendamiseks Vända märgalal saab tuua soovitusi. Näiteks tuleks CH₄ emissioonide vähendamiseks märgala pidevalt hooldada ning periooditi niita taimi, et lisaks orgaanikale ka süsteemist toitaineid välja viia. Biomassi niitmist on soovitatav läbi viia hilissügisel või talvel, mil jahedamad temperatuurid metaani lendumise minimaalsena hoiavad. (Kasak *et al.*, 2020)

4.3. Seosed CO₂ ja CH₄ voogude vahel

Varasemast uurimusest leiti, et CH₄ emissioonid tõusevad üheskoos klorofüllü kontsentratsiooniga fotosünteesi protsessi käigus, seega saab eeladada, et Vända märgalal on ka CO₂ ja CH₄ emissioonide tõus paralleelne. (Vann *et al.*, 2003; Beaulieu *et al.*, 2019) Intensiivne taimekasv tingib ka suuremad CO₂ emissioonid, kuid ka potentsiaalselt suurema CO₂ sidumise. Taoliste süsteemide sidumise hindamiseks oleks vaja läbi viia ökosüsteemi tasandil mõõtmisi (Hemes *et al.*, 2019).

Vaadates kokkuvõtvalt mõõtepunkte, väljendusid kõrgeimad emissioonid esimesel märgalal mõõtepunktides VM1.1 ning VM1.2, teisel märgalal aga VM2.1, VM2.2 ja VM2.4. Mõõtepunktide emissioonide erinevus tuleneb oludest, et mõnes punktis leidub kas rohkem või vähem taimi, varieeruvad veetasemed või kõiguvad temperatuurid, mida on kinnitanud ka varasemad uurimused (Mahmood *et al.*, 2011).

Kuigi analüüsid andsid aimu, et CH₄ ja CO₂ on üsna sarnase dünaamikaga, siis tuleks kindlasti läbi viia täiendavaid uurimusi saamaks teada millised veeparameetrid täpsemalt mainitud kasvuhoonegaaside dünaamikat mõjutavad.

Kokkuvõte

Tehismärgala eesmärgiks on vee puhastamine põllumajanduslikust reostusest, kuid seejuures oleks oluline hoida märgalalt lenduvate kasvuhoonegaaside emissioonide tasemed võimalikult madalad. Siiski on tehismärgalad oma keskkonnasõbralikkuse poolest ühed eelistatuimad veepuhastussüsteemid, sest vee puhastamisel ei nõua märgalad lisa energiakulu (Maucieri *et al.*, 2017).

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli:

- 1) Analüüsida CH₄ ja CO₂ seoseid erinevate veeparameetritega;
- 2) Analüüsida kahe kasvuhoonegaasi CH₄ ja CO₂ vahelisi seoseid.

Andmete kogumiseks viidi läbi Vända avaveelise süsteemiga märgalal Uhti külas läbi gaaside ning veeparameetrite mõõtmised. Mõõtepunkte oli kahel Vända märgalal kokku 12 (VM1.1 - VM2.6). Gaaside ja veeparameetrite mõõtmised toimusid iga kahe nädala tagant ehk kahel korral kuus. mõõdetud CO₂ ja CH₄ emissioone ning eelnimetatud kasvuhoonegaaside seoseid erinevate veeparameetritega nagu hapnikusisaldus vees, veesügavus ja vee temperatuur. Veeparameetreid mõõdeti igast Vända märgala proovipunktist. Veeparameetritest mõõdeti pH taset, elektrijuhtivust, hägusust, temperatuuri, hapniku kontsentratsiooni ning redokspotentsiaali. CO₂ ja CH₄ gaaside mõõtmiseks kasutati veepealset kambermeetodit. Gaasiproove koguti eelevalkueritud 50 ml (0,3 mbar) suurustesse klaaspudelitesse ning ühest proovipunktist kokku neljal korral 20 minutiliste intervallidega – 0-minutil ehk kohe peale kambri paika sättimist, peale 20 minutit, 40 minutit ja 60 minutit. Veeparameetrite vaheliste seoste uurimiseks viidi läbi Spearmani astakorrelatsioon ning andmete analüüsimiseks kasutati MS Excel-it.

Tulemusi kokkuvõtvalt selgub, et esimese märgala juures on KHG emissioonid kõrgeimad ning vähenevad teise märgala poole jõudes, kusjuures sama muster väljendub nii CO₂ kui CH₄ emissioone analüüsivatelt joonistelt. Andmete põhjal on näha, et metaani lendumine on süsihappegaasi lendumisest kõrgem ning veeparameetrite muutustest ka mõjutavam.

Läbiviidud Spearmani korrelatsioon ei andnud piisavalt usaldatavaid tulemusi, millega saaks kindlaks teha CO₂ ja CH₄ lendumist põhjustavaid tegureid ning seoseid veeparameetrite vahel. See-eest näitasid analüüsitud graafikuid seoseid näiteks veesügavuse, temperatuuri ja hapnikusisalduse vahel. Kindlasti tuleks antud teema kohta läbi viia lisa uurimusi tegemaks kindlaks millised veeparameetrid kasvuhoonegaaside lendumist Vända märgalal mõjutavad.

Magistritöö tulemuste analüüsi põhjal saab seatud hüpoteesidele teha järgnevaid järeldusi:

- 1) CH₄ emissioonid on rohkem mõjutatud märgala veesügavusest, kui CO₂ emissioonid;
- 2) CH₄ emissioonid suurenevad märgala vanuse kasvades, mis on kokkuvõttes põhjustatud orgaanilise aine kogumisest märgala setetes.

Summary

The purpose of the Vända free surface water (FSW) constructed wetland (CW) is to treat water from agricultural pollution, at the same time keeping the levels of greenhouse gas emissions from the wetland as low as possible. However, constructed wetlands are among the most preferred water treatment systems in terms of their environmental friendliness, as wetlands do not require additional energy consumption (Maucieri *et al.*, 2017).

The aim of the Master's thesis was:

- 1) to analyze the relationships between CH₄ and CO₂ with different water parameters, and;
- 2) to analyze the relationships between the two greenhouse gases CH₄ and CO₂.

In order to collect data, measurements of greenhouse gases and water parameters were carried out in the wetland area with open water system of Vända in Uhti village. Data was measured from 12 different sampling points (VM1.1 - VM2.6) in Vända FSW wetland. Measurements of gases and water parameters took place every two weeks, from April 2021 to August 2021. Measured CO₂ and CH₄ emissions and the relationships between with different water parameters such as dissolved oxygen, water depth, and water temperature. The water parameters were measured at each sample point in the Vända wetland. The water parameters measured pH level, electrical conductivity, turbidity, temperature, oxygen concentration and redox potential. The CO₂ and CH₄ samples were collected using the static floating chamber method. The gas samples were collected in pre-evacuated 50 ml (0.3 mbar) glass bottles four times from one sample point at 20-minute intervals - immediately after setting the chamber in place, after 20 minutes, 40 minutes and 60 minutes. Gas samples were analyzed in the laboratory using gas chromatography (Shimadzu GC-2014). To investigate the relationship between water parameters, Spearman's rank correlation was performed, and MS Excel was used to analyze the data.

In summary of the results, the greenhouse gas emissions at the first wetland, were the highest and decreased as they reached the second wetland. Data analyses showed that methane emissions were higher than carbon dioxide emissions and are also more affected by changes in water parameters. It was also observable that the main driver for greenhouse gas emissions was water temperature and water level depth. The results also indicated that the emission of CH₄ increased together with increased vegetation coverage. The latter is important as the

biomass is the source of organic carbon, which is important for methanogens and concordant CH₄ production. And although vegetation is highly important to increase water treatment efficiency, it is also important to carry out periodic vegetation harvesting to removed organic material and nutrients from the the treatment system.

Additional studies are also required to understand the level of CO₂ sequestration by plants, which can be accomplished by ecosystem level greenhouse gas measurements.

Tänuavaldused

Magistritöö autor soovib südamest tänada eelkõige käesoleva magistritöö juhendajat Dr. Kuno Kasakut heade ideede ning motivatsiooni süstimise eest. Samuti soovib autor tänada välitööde juhendajat Dr. Keit Killi. Tänuavaldused soovib autor edastada ka laborantidele Mae Urile ning Dr. Alar Teemuskile. Samuti soovib autor tänada programmijuht Kairi Põldsaart alati motiveerimast ning julgustamast.

Autor soovib tänada oma pere ja lähedasi sõpru ning eraldi ka ainsat kursusekaaslast Kadri Kuuske, kellelt autor sai suurel hulgal moraalset tuge ja häid mõtteid kogu magistriõppe jooksul ning kes aitasid kaasa käesoleva magistritöö valmimisele.

Käesoleva magistritöö on toetatud Eesti Teadusagentuuri grantide (PSG631 ja PSG714) ning Euroopa Liidu Regionaalarengu Fondi (Teaduse tippkeskus EcolChange) poolt.

Kasutatud allikad

Beaulieu, J. J., DelSontro, T., Downing, J. A. (2019). Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*, 10(1375). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5>

Berglund, Ö., Berglund, K. (2011). Influence of water table level and soil properties on emissions of greenhouse gases from cultivated peat soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43:923-931. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.002>

Chamberlain, S. D., Anthony, T. L., Silver, W. L., Eichelmann, E., Hemes, K. S., Oikawa, P. Y., Sturtevant, C., Szutu, D. J., Verfaillie, J. G., Baldocchi, D. D. (2018). Soil properties and sediment accretion modulate methane fluxes from restored wetlands. *Global Change Biology*, 24(9). <https://doi.org/10.1111/gcb.14124>

Chen, H., Xu, X., Fang, C., Li, B., Nie, M. (2021). Differences in the temperature dependence of wetland CO₂ and CH₄ emissions vary with water table depth. *Nature Climate Change*, 11, 766-771. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01108-4>

Dlugokencky, E. (2022). Global Monitoring Laboratory: Trends in CH₄. gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/ (viimati vaadatud 14.05.2022).

Drösler, M., Janez, H., Freibauer, A., Christensen, T. R., Friborg, T. (2008). Observations and status of peatland greenhouse gas emissions in Europe, *Ecological Studies*, 203: 243-261.

Earl, J., Hall, G., Pickup, R. W., Ritchie, D. A., Edwards, C. (2003). Analysis of Methanogen Diversity in a Hypereutrophic Lake Using PCR-RFLP Analysis of *mcr* Sequences, *Microbial Ecology* 46, 270-278. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-2003-x>

EPA (2016) US Environmental Protection Agency. Polluted runoff: nonpoint source pollution. <https://www.epa.gov/nps>. (viimati vaadatud 20.05.2022)

Friborg, T., Soegaard, H., Christensen, T. R., Lloyd, C. R., Panikov, N. S. (2003). Siberian wetlands: Where a sink is a source. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 2129. <https://doi.org/10.1029/2003GL017797>

- Hemes, K. S., Chamberlain, S. D., Eichelmann, E., Anthony, T., Valach, A., Kasak, K., Szutu, D., Verfaillie, J., Silver, W. L., Baldocchi, D. D. (2019). Agricultural and Forest Meteorology, 268, 202-214. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.017>
- Hsu, C. B., Hsieh, H. L., Yang, L., Wu, S. H., Chang, J. S., Hsiao, S. C., Su, H. C., Yeh, C. H., Ho, Y. S., Lin, H. J. (2011). Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 37, 1533–1545. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.002>
- Inglett, K. S., Inglett, P. W., Reddy, K. R., Osborne, T. Z. (2012). Temperature sensitivity of greenhouse gas production in wetland soils of different vegetation. *Biogeochemistry*, 108, 77-90. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9573-3>
- Kadlec, R. H. (2012). Constructed Marshes for Nitrate Removal. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(9), 934–1005.
- Kaisel, M., Kohv, K. (2009). Metsakuivenduse keskkonnamõju ülevaade. Eestimaa Looduse Fond, Ecoprint, Tartu.
- Kasak, K., Kill, K., Uuemaa, E., Maddison M., Aunap, R., Riibak, K., Okiti, I., Teemusk, A., Mander, Ü. (2022). Low water level Drives high nitrous oxide emissions from treatment wetland. *Journal of Environmental Management*, 312, 114914. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114914>
- Kasak, K., Kill, K., Pärn, J., & Mander, Ü. (2018). Efficiency of a newly established in-stream constructed wetland treating diffuse agricultural pollution. *Ecological Engineering*, 119, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.015>
- Kasak, K., Valach, A. C., Rey-Sanchez, C., Kill, K., Shortt, R., Liu, J., Dronova, I., Mander, Ü., Szutu, D., Verfaillie, J., & Baldocchi, D. D. (2020). Experimental harvesting of wetland plants to evaluate trade-offs between reducing methane emissions and removing nutrients accumulated to the biomass in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 715, 136960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136960>
- Kill, K. (2018). Avaveelise tehismärgala efektiivsus põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks. Tartu, 62 lk.
- Kill, K. (2022) Nutrient fluxes regulation in an in-stream constructed wetland treating polluted agricultural runoff. Institute of Ecology and Earth Sciences, University of Tartu.

- Kill, K., Pärn, J., Lust, R., Mander, Ü., ja Kasak, K. (2018). Treatment Efficiency of Diffuse Agricultural Pollution in a Constructed Wetland Impacted by Groundwater Seepage. *Water*, 10(11), 1601. <https://doi.org/10.3390/w10111601>
- Kim, S. Y., Veraart, A. J., Meima-Franke, M., Bodelier P. L. E. (2015). Combined effects of carbon, nitrogen and phosphorus on CH₄ production and denitrification in wetland sediments. *Geoderma*, 259-260, 354-361. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.015>
- Ma, Z., Li, B., Zhao, B., Jing, K., Tang, S., Chen, J. (2004). Are artificial wetlands good alternatives to natural wetlands for waterbirds? – A case study on Chongming Island, China. *Biodiversity & Conservation*, 13, 333-350. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000006502.96131.59>
- Mahmood, S., Stack, M. (2011). Methane Dynamics of recolonized cutover minerotrophic peatland: Implications for restoration. *Ecological Engineering*, 37: 1859-1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.007>
- Mander, Ü., Dotro, G., Ebie, Y., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C., Nogueira S. F., Jamsranjav, B., Kasak, K., Truu, J., Tournebize, J., Mitsch, W. J. (2014). Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 66, 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.006>
- Mander, Ü., Tournebize, J., Kasak, K., ja Mitsch, W. J. (2014). Climate regulation by free water surface constructed wetlands for wastewater treatment and created riverine wetlands. *Ecological Engineering*, 72, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.05.004>
- Maucieri, C., Barbera, A. C., Vymazal, J., Borin, M. (2017). A review on the main affecting factors of greenhouse gases emission in constructed wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 236, 175-193. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.006>
- Maucieri, C., Borin, M., Barbera, A.C. (2014). Role of C3 plant species on carbon dioxide and methane emissions in Mediterranean constructed wetlands. *Italian Journal of Agronomy*, 9(601), 120-126. <https://doi.org/10.4081/ija.2014.601>
- Nahlik, A. M., Mitsch, W. J. (2011). Methane emissions from tropical freshwater wetlands located in different climatic zones of Costa Rica. *Global Change Biology*, 17(3), 1321-1334.
- Noorvee, A., Mander, Ü., Karabelnik, K., Pöldvere, E., Maddison, M. (2007). Kombineeritud pinnasfiltersüsteemide ja tehismärgalapuhasüsteemide rajamise juhend. Tartu, 102 lk.

Okiti, I. Modelling the nitrous oxide emissions from Vända free water surface constructed wetland, Tartu, Estonia. (2021). Tartu, 55 lk. https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/72807/Okiti_Isaac.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rannap, R., Kaart, M. M., Kaart, T., Kill, K., Uuemaa, E., Mander, Ü., & Kasak, K. (2020). Constructed wetlands as potential breeding sites for amphibians in agricultural landscapes: A case study. *Ecological Engineering*, 158, 106077. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106077>

Ritchie, H., Roser, M. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (Viimati vaadatud 11.05.2022).

Pihlatie, M. K., Kiese, R., Bruggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Kieloaho, A. J., Laurila, T., Lohila, A., Mammarella, I., Minkkinen, K., Penttil, T., Schonborn, J., Vesala, T. (2010). Greenhouse gas fluxes in a drained peatland forest during spring frost-thaw event. *Biogeosciences*, 7, 1715-1727. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1715-2010>

Segers, R. (1998). Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 41, 23-51. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1005929032764.pdf>

Singh, K. M., Tripathi, A. K., Pandya, P. R., Parnerkar, S., Rank, D. N., Kothari, R. K., Joshi, C. G. (2012). Methanogen diversity in the rumen of Indian Surti buffalo (*Bubalus bubalis*), assessed by 16S rDNA analysis. *Research in Veterinary Science*, 92(3), 451-455. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2011.03.022>

Talpsep, I., Kasak, K., Tamm, I., Piirimäe, K. (2011). Tehismärgalad: põllumees puhastab vett. 72 lk.

Tao, W. (2015). Comparative Analysis of Greenhouse Gas Emission from Three Types of Constructed Wetlands. *Forest Research*, 4(2). <https://doi.org/10.4172/2168-9776.1000e116>

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

Von Arnold, K., Nilsson, M., Hånell, B., Weslien, P., Klemedtsson, L. (2005). 37(6), 1059-2071. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.11.004>

Vymazal, J. (2019). Constructed Wetlands, Surface Flow. *Encyclopedia of Ecology*, 1, 14-21. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00079-3>

Vymazal, J., (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>.

West, W. E., Coloso, J. J., Jones, S. E. (2012). Effects of algal and terrestrial carbon on methane production rates and methanogen community structure in a temperate lake sediment. *Freshwater Biology*. 57, 949 – 955. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02755.x>

Whitting, G. J., Chanton, J. P. (2001). Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus*, 53(5), 521-528. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2001.530501.x>

Zhang, C., Wen, L., Wang, Y., Liu, C., Zhou, Y., & Lei, G. (2020). Can Constructed Wetlands be Wildlife Refuges? A Review of Their Potential Biodiversity Conservation Value. *Sustainability*, 12(4), 1442.

LISAD

Lisa 1

Tabel 1. Proovipunktide koordinaatide tabel

Mõõtepunkt	X-koordinaat	Y-koordinaat
VM1.1	6463460	659673
VM1.2	6463454	659661
VM1.3	6463446	659648
VM1.4	6463438	659638
VM1.5	6463433	659627
VM1.6	6463427	659604
VM2.1	6463481	659741
VM2.2	6463478	659755
VM2.3	6463477	659773
VM2.4	6463486	659754
VM2.5	6463478	659786
VM2.6	6463481	659794

Lisa 2

Tabel 2. Spearmani astakkorrelatsioon 2018-2019

	CH₄	Veesügavus	Temperatuur	CO₂
CH₄	1			
Veesügavus	-0,3286713	1		
Temperatuur	0,04195804	0,013986014	1	
CO₂	0,17482517	-0,552447552	0,237762238	1

Tabel 3. Spearmani astakkorrelatsioon 2019-2020

	CH₄	Veesügavus	Temperatuur	CO₂
CH₄	1			
Veesügavus	-0,17483	1		
Temperatuur	-0,24476	0,888111888	1	
CO₂	0,426573	-0,727272727	-0,804195804	1

Tabel 4. Spearmani astakkorrelatsioon 2020-2021

	CH₄	Veesügavus	Temperatuur	CO₂
CH₄	1			
Veesügavus	0,188811	1		
Temperatuur	0,020979	0,87412587	1	
CO₂	-0,14685	-0,87412587	-0,902097902	1

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mariel Teinlum,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Põllumajanduslikku hajukoormust vähendava avaveelise tehismärgala CH₄ lendumine ja seda mõjutavad tegurid”, mille juhendaja on Kuno Kasak, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Mariel Teinlum

27.05.2022