

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

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Jääsoode korrastamine ja märgviljelus ning selle mõju
kasvuhoonegaaside voole**

Ülle Kass

Juhendaja: PhD Ain Kull

Tartu 2023

Annotatsioon

Jääksoode korrastamine ja märgalaviiljelus ning selle mõju kasvuhoonegaaside voole

Soode kuivendamise ja turba kaevandamisega seotud peamine probleem elupaiga hävimise kõrval on turbas oleva süsinikuvaru kahanemine ning sellega kaasnev kasvuhoonegaaside lendumine atmosfääri. See omakorda on üheks kliima soojenemist võimendavaks teguriks. Jääksoode korrastamisega on laiaulatuslikult hakatud tegelema eelmise sajandi lõpust ning selle jaoks on erinevaid meetodeid, millest üks on märgalaviiljelus, mis toetab ka säästlikku arengut.

Teoreetilises ülevaates on kirjeldatud soode ja jääksoode olemust, klassifikatsioone ning soode olulisust. Töö sisulise osa moodustab jääksoode korrastamise võimaluste ning paludikultuuri ehk märgalaviiljeluse kui alternatiivi kirjeldus. Töös kirjeldatakse jääksoode korrastamise viiside mõju kasvuhoonegaaside voogudele ning ühe näitena tuuakse välja märgalaviiljelus turbasambla kasvatamise põhjal.

Märksõnad: soo, jääksoo, kasvuhoonegaasid, märgalaviiljelus
CERCS kood: P510 - Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Abandoned cut-over peatland rewetting, paludiculture and impact on greenhouse gas

The main problem associated with the drainage of peatlands and peat extraction, apart from loss of habitat is the release of carbon stored in peat and the emission of greenhouse gases into the atmosphere, which is one of the factors contributing to climate warming. Comprehensive efforts to restore peatlands have been initiated since the end of the last century, and various methods have been employed. However, paludiculture is a less common method to conserve carbon in peatland that supports sustainable development.

The theoretical overview of the thesis describes the essence of mires and cut-over peatlands, their classifications, and the significance of mires. The substantive part of the work focuses on describing the possibilities for restoring peatlands and presents paludiculture, as an alternative. The aim of the work is to determine how paludiculture functions as a method of peatland

restoration, understand its impact, and examine its relationship with climate change through greenhouse gas fluxes.

Keywords: peatland, cut-over peatland, greenhouse gas, paludiculture

CERCS code: P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Mõisted ja lühendid.....	5
Sissejuhatus.....	8
1. Teoreetilised lähtekohad	10
1.1. Sood	10
1.2. Jääksood.....	14
1.2.1. Jääksode korrastamine	18
1.3. Kasvuhoonegaaside vood soodes ja jääksoodes	22
2. Materjal ja meetodika	26
2.1. Kirjanduspõhine ülevaade.....	26
2.2. Kasvuhoonegaaside voo mõõtmine ja aastase voo hindamine turbavõtuaukudes ...	26
3. Tulemused ja arutelu.....	29
3.1. Märjalaviljelus	29
3.1.1. Turbasammalde kasvatus	32
3.2. Lääne-Saksamaa turbasambla kasvatus ning Eesti turbavõtuaukude kasvuhoonegaaside voogude võrdlus.....	34
4. Järeldused ja kokkuvõte	36
Summary	37
Kasutatud kirjandus	38

Mõisted ja lühendid

madalsoo - põhjaveetoiteline (minerotroofne) soo

mesotroofne - kesktoiteline

miksotroofne - segaveetoiteline (vihmavee ja põhjavee toiteline siirdesoo)

oligotroofne - vähetoiteline

ombrotroofne - sademetoiteline; üksnes sademetest niiskust saav (taim, raba)

paludikultuur - märgalaviljelus; sootaimede kasvatamine märgades tingimustes, mis tagab turba säilimise või tekke ja majandusliku kasu kasvatatud kultuurist

raba ehk kõrgsoo - soo, mille turbalasund on nii paks, et raba pind kummub üle ümbritseva maastiku ja sellel kasvavad taimed saavad toitained üksnes sademeveest ja selle poolt adsorbeeritud tolmust (ombrotroofne toitumine)

siirdesoo - üleminekufaas madal- ja kõrgsoo vahel, kus turbakiht on juba paksem ja põhjaveetoite roll hakkab vähenema

soo - turbaala, kus on turbakihi paksus üle 30 cm ning selle ladestumine ei ole katkenud

süsinikupõllundus - süsinikku siduv põllumajandus; maa harimine ja kasutamine viisil, mis seob orgaanilist süsinikku mulla orgaanilisse ainesse

turbaala - kõik turbalasundiga kaetud maastiku osad, sõltumata sellest, kas seal turba ladestumine jätkub, on katkenud või turbalasund hoopiski degradeerub

turbalasund - soomassiivi või soostiku turbakihid tervikliku kogumina

CH₄ - metaan

CO₂ - süsihappegaas

CO₂ ekvivalent - universaalne kasvuhoonegaaside mõõtühik, mis peegeldab nende erinevat potentsiaali globaalse soojenemise tekitamisel kindla ajavahemiku kohta võrrelduna süsihappegaasi toimega

DOC (*dissolved organic carbon*) - lahustunud orgaaniline süsinik

DIC (*dissolved inorganic carbon*) - lahustunud anorgaaniline süsinik

GPP (gross primary productivity) - primaarne koguproduksioon; väljendab mingis ökosüsteemis taimede poolt tekitatud orgaanilise aine või biomassi kogust, arvesse ei võeta hingamise teel kasutatavat energiat, mida taimed kasutavad oma elutegevuseks; $GPP = NPP + R_p$

Gt - gigatonn

GWP (Global Warming Potentsial) - globaalse soojenemise potentsiaal näitab, mitu korda on soojuse tagasipeegeldamise võime poolest muu kasvuhoonegaasi üks molekul efektiivsem kui CO₂ molekul

N₂O - diämmastikoksiid ehk naerugaas

NEE (*net ecosystem exchange*) - ökosüsteemi neto gaasivahetus; ökosüsteemi ja atmosfäärivaheline gaasivahetus, mis iseloomustab fotosünteesi käigus seotud ja mullahingamise ning taimehingamise vahet; $NEE = P - R_s - R_p$

NEP (*net ecosystem productivity*) - ökosüsteemi netoproduksioon; väljendab ökosüsteemi süsiniku netokasvu või -kadu kindla ajaperioodi jooksul (tavaliselt aasta); $NEP = GPP - (R_e + R_s)$; $NEP = P - R_p - R_h$

NPP (*net primary productivity*) - primaarne puhasproduksioon; väljendab mingis ökosüsteemis taimede poolt tekitatud orgaanilise aine või biomassi kogust, võttes arvesse taimede kasvu jooksul kasutatavat energiat; $NPP = P - R_p$

P (*photosynthesis*) - fotosünteesi tase

PAR (*photosynthetically active radiation*) - fotosünteesiliselt aktiivne kiirgus; päikesekiirguse spektri see osa, mida fotosünteesivad organismid kasutavad fotosünteesi läbiviimiseks

POC (*particulate organic carbon*) - lahustumatu/hõljuv orgaaniline süsinik

R_a (*autotrophic respiration*) - autotroofne hingamine; juurehingamine ehk fotosünteesi käigus toodetud orgaaniliste ühendite (nt glükoosi) lagundamine elutegevusteks vajaliku energia tootmiseks; $R_a = R_e - R_h$

R_e (*respiration of ecosystem*) - ökosüsteemi hingamine; konkreetnes ökosüsteemis elavate organismide koguhingamise summa; $R_e = R_a + R_h$

R_h (*heterotrophic respiration*) - heterotroofne hingamine; mikroobse hingamise käigus tekkinud CO₂ mulla orgaanilise aine lagunemisel; $R_h = R_e - R_a$

Rp (*respiration of plants*) - taimede hingamine; elutegevuseks vajalik protsess, mille käigus taimed lagundavad orgaanilisi ühendeid, et vabastada energiat erinevate rakuliste tegevuste ja füsioloogiliste funktsioonide jaoks

Rs (*soil respiration*) - mullahingamine; biokeemiline protsess, kus mikroorganismid (nt bakterid, seened) mullas kasutavad orgaanilist ainet energia tootmiseks ja eraldavad selle protsessi käigus CO₂

Sissejuhatus

Sood ökosüsteemina on väga olulised, kuna soodes talletatakse ühe pindalaühiku kohta maismaaökosüsteemidest enim süsinikku (Yu, 2012). Ainuüksi põhjapoolkera turbaaladel on talletunud 500 ± 100 Gt süsinikku, mis on sinna talletunud rohkem kui 7000 a jooksul alates holotseenist (Yu, 2012). Selline hulk moodustab umbes 20% kogu maailma mullas sisalduvast süsinikust (Joosten et al., 2016a). Eestis on hinnatud, et turbasse on talletunud eeldatavasti 0,7 Gt süsinikku (Ilomets, 1996).

Paraku on paljud soolad mõjutatud kuivendamisest, mis seeläbi mõjutab ümbritsevat keskkonda ning seal elavaid liike (Truus et al., 2018). Kuivendamisest tulenevad mikrotasandil toimuvad muutused (vee- ja valgusrežiimi ning sademete jaotuse ümberkujunemine) võivad samuti täiendavat kahju avaldada bioloogilisele mitmekesisusele (Minayeva et al., 2008). Kuivendades turvas laguneb ja atmosfääri lendub süsihappegaasina varasemalt turbakihtides talletunud süsinikuväru ning muud kasvuhoonegaasid (Truus et al., 2018). Märjalade puhul on peamiseks eralduvateks kasvuhoonegaasideks süsihappegaas (CO_2), metaan (H_2O), veeaur (H_2O) ja diämmastikoksiid ehk naerugaas (N_2O) (Joosten et al., 2017; Salm et al., 2010a). Nende gaaside lendumine võimendab atmosfääris kasvuhooneefekti (Salm et al., 2010a). Kasvuhooneefekti ja sellest põhjustatud kliima soojenemise arutelud on tänapäeva ühiskonnas aina rohkem tähelepanu pälvinud just viimaste aastakümnetega (Günther et al., 2020).

Teoreetiline ülevaade sisaldab soode ja jääksode kirjeldust, tuuakse välja soode ja jääksode tüübid ja nende põhiprintsiibid. Töö sisulise osa moodustab jääksode korrastamise võimaluste ning paludikultuuri ehk märgalaviljeluse kui ühe korrastamise viisi kirjeldus. Töö eesmärk on välja selgitada millised on jääksode korrastamise viisid ning ühe meetmena vaadeldakse põhjalikumalt märgalaviljelust turbasambla kasvatamise näitel. Ühtlasi antakse esmane ülevaade KHG voogude erinevusest märgalaviljelusena toimivast alast turbasambla kasvatuse näitel, mille kõrvale tuuakse analoogina näide Eesti turbavõtuaukudes kujunenud sarnasest kooslusest. Töö uurimisküsimused on järgnevad:

- Kuidas eristuvad kirjanduse andmete alusel KHG vood märgalaviljeluse kui korrastamismeetodina muude korrastamismeetodite suhtes?
- Kas märgalaviljelust kasutatavatel aladel on KHG vood süsinikuneutraalsed ja -siduvad võrreldes kuivendatud soode voogudega?

Eelkõige on jääsoode kontekstis keskendunud kasvuhoonegaasidega seotud süsinikuringele, mis hõlmab CO₂ ja CH₄ voogusid, kuna N₂O vood on toitainevaeguse ning lämmastikupuuduse tõttu minimaalsed.

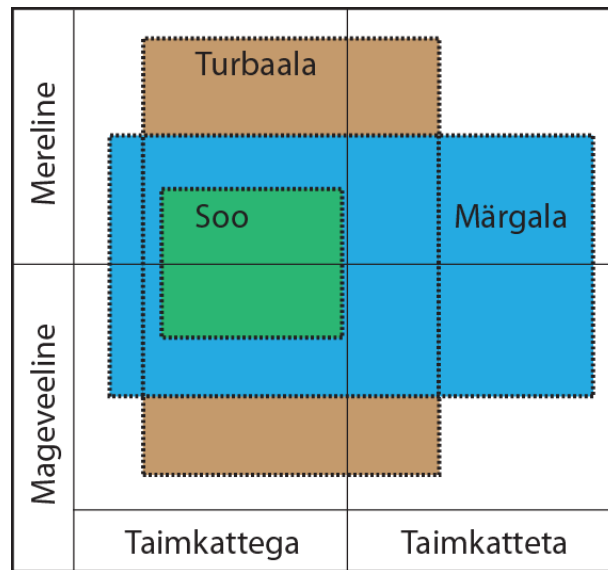
1. Teoreetilised lähtekohad

1.1. Sood

Soo ja raba terminid tekkisid eesti keele kõnekeeles juba mõned sajandid tagasi, mõlemat kasutati peaaegu samatähenduslikena ning mõlemad viitasid märgadele, põllumajanduslikult kasututele maadele (Masing, 1988b). Teaduskeeles hakkas saksa keele eeskujul soo ja raba termineid eristama A. Hueck alates 1845. aastast (Masing, 1988b). Teaduskeelse terminoloogia (vt Joonis 1) kohaselt nimetatakse tänapäeval sooks sellist osa maastikust, kus alalise veerohkuse ja hapnikuvaeguse tõttu jääb mullas osa orgaanilisest ainest lagunemata ning ajapikku see ladestub soomulla ehk turbana (Masing, 1988a). Kui varasemalt peeti soodeks kõiki alasid, kus esines turvast selle paksusest sõltumata, siis tänapäeval on soo mõiste kitsam ning enamasti mõistetakse soo puhul niisuguseid kuivendamata turbaalasid, kus turbalasundi paksus on vähemalt 30 cm (Masing, 1988b). Seega on iga soo turbaala, kuid mitte vastupidi (Joosten & Clarke, 2002). Laiemaks üldistamiseks on kasutusele võetud turbaala mõiste, mis on kuitahes paksu turbalasundiga kaetud maasiku osa sõltumata sellest, kas seal turba lagunemine jätkub, on katkenud või turbalasund hoopiski degradeerub (Masing, 1988a). Turbaala saab omakorda jaotada taimkattega või taimkatteta alaks, mis on kaetud looduslikult akumulunud turbakihi (Joosten & Clarke, 2002).

Märgala mõiste on kõige laiema määratlusega ning sellel on palju tõlgendusi sõltuvalt piirkondade looduslikest eripäradest ja traditsioonidest (Joosten & Clarke, 2002). Laiemalt saab märgala defineerida kui ala, mis on üle ujutatud või veega küllastunud nii sageli ja piisavalt kaua, et selle taimestik domineerivad taimed, mis on kohastunud hapnikuvaegusega mulla tingimustes (Joosten & Clarke, 2002). Ramsari konventsioonis (2008) on märgala mõistet defineeritud järgnevalt (Paal & Leibak, 2013 järgi; Ramsar Convention Secretariat, 2016 andmetel):

- Artikkel 1.1: "... märgalad on lodud, sood, turbaalad või veekogud, mis on kas looduslikud või inimese poolt rajatud, püsivad või ajutised; märgalad on küllastatud veega, mis on kas seisev, voolav, mage, riim- või soolane vesi, hõlmates seejuures ka merealad, kus vee sügavus ei ületa kuut meetrit."
- Artikkel 2.1: "Märgalad võivad hõlmata ka nende naabrusse jäävaid kaldaäärseid ja rannikualasid, samuti märgalade sisse jäävaid saari ja merealad, kus vee sügavus on mõõna ajal üle kuue meetri."



Joonis 1. Soo, turbaala ja märgala piiritlemise põhimõtteline skeem (Bragg and Lindsay, 2003 järgi).

Tänapäeval Eestis kasutusel olev terminoloogia ning kategoriseerimine „madalsoo“, „siirdesoo“ ning „raba ehk kõrgsoo“ arenes välja soolade ulatuslike kuivendamise ning turbatööstuse laialdasema levikuga 1950ndatel (Masing, 1988b). Soode morfoloogial ja arengustaadiumil põhineva kolmikjaotuse esitas esimesena C. Weber eelmise sajandi alguses (Lindsay, 2016). Soode kategoriseerimiseks on erinevaid tüpoloogiaid: maastikuline (madalsoo, siirdesoo, raba), keemia-põhine (aluseliste rikas, -vaene; toitainerikas, -vaene), hüdroloogiline (sademevee, põhjavee ja/või vooluvee toiteline) (Tabel 1) (Mitsch et al., 2009).

Tabel 1. Soo põhitüübid ning nende omadused hüdrokeemiliste tunnuste ja taimkatte alusel (Joosten & Clarke, 2002 andmetel täiendatud; Laasimer & Masing, 1995 järgi; Succow & Jeschke, 1986 andmetel täiendatud).

Tunnus	Madalsoo			Siirdesoo	Raba ehk kõrgsoo
Veerežiim	Minerotroofsus			Miksotroofsus	Ombrotroofsus
	Soligeensus (allikasoo)	Topogeensus (nõosoo)	Limnogeensus (õõtsiksoo, lammisoo)		
Toitelisus	Eutroofsus–mesotroofsus			Mesotroofsus–oligotroofsus	Oligotroofsus
pH	Lubjarikkus 6,4–8,0	Subneutraalsus, 4,8–6,4	Happelisus, 2,5–4,8	Subneutraalsus, 3,5–8	Happelisus, 2,5–4,8

Pinnamood	Tasane või nõgus	Tasane	Kumer
Mikroreljeef	Tasane või tarnamätastega	Kõrgete sambla- ja villpeamätastega	Vahelduv; mättad, peenrad, älved
Puurinne	Sookask, kohati sanglepp ja kuusk, harvem mänd	Ainult sookask ja mänd	Mänd, harva sookask
Põõsarinne	Madal kask, porss, pajud, paakspuu	Harva madal kask, Lääne-Eestis porss	-
Puhmarinne	-	Kanarbik, sookail, sinikas, kukemari, küüvits, jõhvikas, hanevits	
Rohurinne	Liigirohke (angervaksa jt rohunditega) või liigivaene (tarnadega)	Lohkudes madalsootaimed (soopihl, ubaleht jt), mätastel rabataimed	Liigivaene: tupp-villpea, murakas, valge nokkhein, rabakas, mudatarn
Samblarinne	Valdavalt nn pruunsamblad (pärislehtsamblad)	Mitmekesine, mätastel turbasamblad	Valdavalt turbasamblad
Turvas	Valdavalt puitu sisaldavad turbad	Valdavalt tarna- ja sfagnumiturvas	Sfagnumiturvas

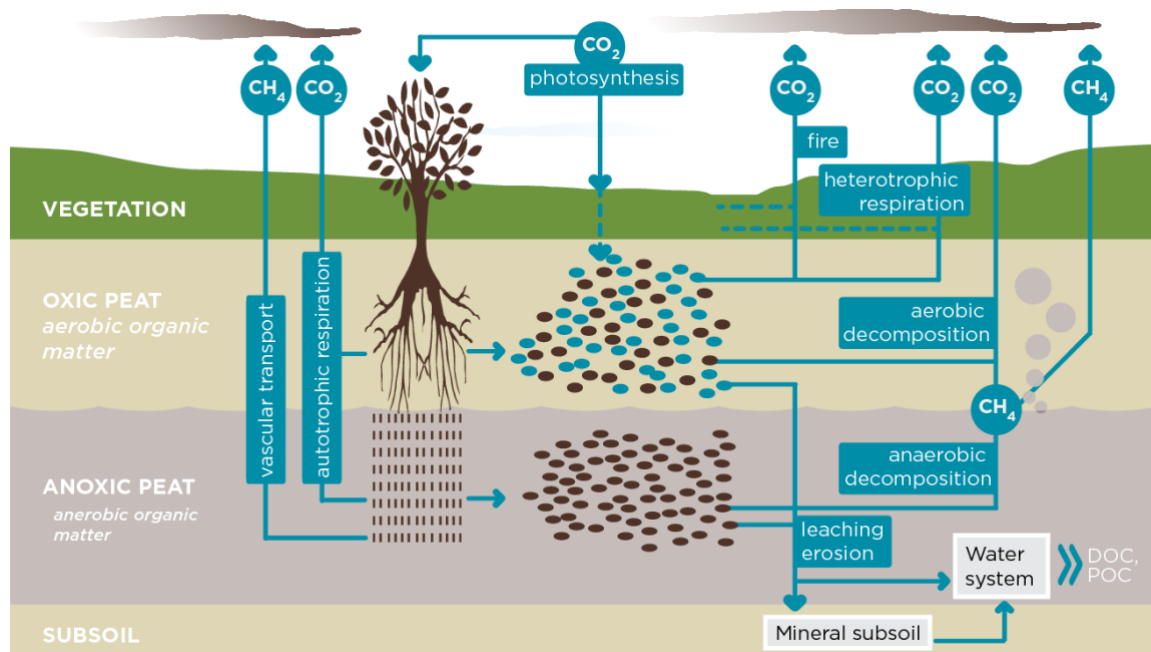
Soode mõju ümbritsevale keskkonnale on laiahaardeline (Joosten et al., 2016b). Soode olulisus ei piirdu vaid süsiniku talletamises, lisaks reguleerivad sood maastikul veerežiimi ning atmosfääri õhuniiskust nii kohalikul kui globaalsel tasandil (Minayeva et al., 2008) ning on olulisel kohal elupaigana erinevatele liikidele (Kimmel et al., 2010; Salm et al., 2010a).

Soodes ei ole liigirikkus küll suur, kuid soo pakub elupaiku kindlatele liikidele, kes muude elutingimustega aladel levida ei saaks (Vasander & Kettunen, 2006). See tähendab, et soo suurendab maastikulisel tasandil liigilist mitmekesisust (Minayeva et al., 2008). Eeldatavasti kasvas 2015. aasta seisuga Eesti soodes kokku 280 soontaimeliiki ja 153 samblaliiki, millest enamik (230) on madalsoodes, 103 liiki kasvab siirdesoodes ning 45 liiki rabades (Keskkonnaministeerium, 2015). Eesti soodes on ämblikuliike üle 300, putukaliike üle 1600, linnuliike üle 200, imetajaliike 11, kahepaiksete liike 4 ning roomajate liike 3 (Keskkonnaministeerium, 2015). Nendest on kaitse all I kaitsekategooria 4 soontaimeliiki, üle 30 II kaitsekategooria taimeliiki ning 30 loomaliiki, millest 26 on linnuliigid (Keskkonnaministeerium, 2015).

Turbaaladelt pärinevad gaasid eralduvad atmosfääri läbi erinevate protsesside ning raske on kindlaks määrata gaasivoogude täpset päritolu (Bubier et al., 1998). Gaaside eraldumine võib toimuda läbi järgnevate protsesside: autotroofne, heterotroofne hingamine, liikumine läbi spetsiaalsete kudede, aeroobne, anaeroobne lagunemine, põlengud jne (vt Joonis 2) (Page et

al., 2011). Tegemist on süsinikuringet kajastava joonisega, kus on välja toodud CO₂ ja CH₄ vood.

Maksimaalse valguse juures toimuva fotosünteesi ning ökosüsteemi hingamise vahel on tugev korrelatsioon, mis tähendab, et need protsessid on tihedalt omavahel seotud, kuigi mõlema puhul mõjutavad erinevad tegurid süsiniku omistamist ning heidet atmosfääri (Bubier et al., 1998). Fotosünteesiliselt aktiivne kiirgus (*PAR*) mõjutab eelkõige fotosünteesi, kuid valguse suurenemine on korrelatsioonis mulla temperatuuri tõusuga, mis mõjutab omakorda mulla hingamist (Mäkiranta et al., 2010). Varasemate uuringute käigus on leitud, et kombineeritud autotroofse ja heterotroofse hingamise osakaal maksimaalse valguse juures on püsivalt 1/3 CO₂ kasutuselevõttust (Bubier et al., 1998). Küll aga mõjutavad erinevad tegurid autotroofse ning heterotroofse hingamise määra (Chapman & Thurlow, 1998), kuid kuivendatud aladel kaasneb veetaseme langusega varem anaeroobsetes tingimustes olnud orgaanilise aine suurem mikroobne lagunemine ehk mineraliseerumine, mis tähendab, et suureneb heterotroofne hingamine (Chapman & Thurlow, 1998). Taimede hukkumisel lakkab fotosüntees ning seeläbi ka autotroofne hingamine (Minkkinen et al., 2007; Humphrey et al., 2021). Looduslikel aladel võib autotroofse hingamise osakaal olla 10–45% kogu mulla hingamisest. Silvola et al (1996) ja Bhardwai (1997) kohaselt isegi 30–70%, kuid pärast kuivendamist võib autotroofse hingamise määr langeda alla 10% sõltudes mitmetest erinevatest teguritest nagu fotosünteesi osakaal, toitainete kättesaadavus, mulla temperatuur ja veetase (Rankin et al., 2022).



Joonis 2. Soo turba süsinikuringe protsesside ja KHG voogude skemaatiline kujutis (Jauhiainen et al., 2001 andmetel; Page et al., 2011 järgi).

1.2. Jääksood

Jääksood on endised turba kaevandamise alad, kus on majandustegevuse (turba kaevandamise) eesmärgil veerežiim ümber kujundatud. Üldjuhul on sellistel aladel turba jääklasundi paksus maksimaalselt 0,1–0,5 meetrit, kuid kohati võib ületada ka 2 meetrit (Paal, 2011). Jääksoodes on turba teke sisuliselt katkenud ning turvas degradeerub, mis tähendab, et tegu ei ole klassikaliselt sooga, vaid turbaalaga (Joosten & Clarke, 2002). Praeguseks hetkeks on Eestis umbes 1,2 mln ha turbaalaid, millest jääksood moodustavad umbes 10 000 ha (Keskkonnaministeerium, 2022). Küll aga tuleb arvestada, et kõigi turvasmullaga alade ehk turbaalade hulka arvestatakse ka äärealasid, kus turbakihi paksus ei moodusta isegi 0,3 meetrist kihti (Ilomets, 1998). Selliste alade suurus võib olla ligi 100 000 ha (Ilomets, 1998).

Kui varasemate sajandite jooksul kaevandati soodes turvast veel osade kaupa ning üsna vähesel määral, siis olukord muutus 1950ndatel, kui turba kaevandamiseks võeti kasutusele freesimistehnoloogia ning selle jaoks hakati soid ulatuslikult kuivendama (Karofeld, 2006). Kuivendamise jaoks rajatakse soolale kuivenduskraavid, mida tuleb mitu korda paari aasta jooksul uuesti läbi kaevata, vastasel juhul ei kuiva soopind piisavalt ära masinate kasutamiseks (Orru et al., 2004). Lisaks tuleb ära hoida happelise turbaheljumi sattumine väljavoolukanalitesse ning selle jaoks on kaks võimalust (Raadla & Köpp, 2011). Üheks võimaluseks on rajada kuivenduskraavide alamvoolu ligidale settebasseinid, mis suudavad kinni hoida kuni 30–40% heljumist (Raadla & Köpp, 2011). Teine võimalus on jätta kuivendusalaade kõrvale puhastuslodu ehk veepuhastuse märgala, mis oleks kaetud kasvukohale iseloomuliku taimestikuga ehk looduslikus seisundis, aastaringselt osaliselt veega kaetud ala, sel juhul jõuab happeline heljum väljavoolu asemel puhastuslodule (Aleksand & Timmusk, 2002). Küll aga tuleb nii settebasseine kui ka puhastuslodu vähemalt kord aastas puhastada (Raadla & Köpp, 2011). Heljumi aeglasele levikule aitab kaasa soo pinna ning kuivenduskraavide väike lang (Raadla & Köpp, 2011). Arvestades, et turba kaevandamise jaoks on vajalikud mitmed tööetapid (pärast esialgset kuivendamist tuleb eemaldada soo alalt puistu ja taimestik ning tekkinud augud täita turbaga, kuivenduskraave tuleb mitmeid kordi läbi kaevata ning happelist heljumit koristada), siis võib kogu protsess aega võtta 4–6 aastat ning alles seejärel on võimalik hakata turvast masinatega kaevandama (Frilander et al., 1996). Soode kuivendamisega kaasneb mitmesuguseid probleeme, sealhulgas võivad toimuda mulla struktuuris tagasipöördumatud muutused (Gebhardt et al., 2010). Pärast kuivendamist võivad aja pikku mullapoorid veelgi suurened, mille tõttu paiskub aina enam süsinikku peamiselt süsihappegaasina atmosfääri, kuna süsiniku kaol ja kuivendamisest möödunud ajal on

positiivne log-lineaarne seos (Holden, 2006). Kuivendamisega muutub veetase madalamaks, aeroobse kihi osakaal kasvab, mis toob endaga kaasa turba mineraliseerumise (Paal, 2011). See omakorda tähendab, et veepiirist kõrgemale jääv turvas hakkab lagunema ehk mineraliseeruma (Ilomets, 2005). Mineraliseerumine võib toimuda nii aeroobses kui anaeroobses keskkonnas, kuid on anaeroobses keskkonnas palju aeglasem (Minkkinen et al., 2007). Mineraliseerumine on Eesti jääksoodes peamiseks turbakao põhjuseks, selle tagajärjel eraldub igal aastal atmosfääri ligi 400 tuhat tonni CO₂ (Salm et al., 2012; Paal et al., 2016). Kui süsinikku ladestub aastas looduslike kuivendamata soode turbasse umbes 0,2–0,5 tonni hektari kohta, siis kuivendatud aladel võib olla kadu aastas ligi 8 tonni hektari kohta (Salm et al., 2010a). Eestis lendub atmosfääri kuivendatud turbaaladelt ja jääksoodest kuni 10 mln CO₂ aastas (Paal et al., 2016). Kuivendamisest tulenevateks tagajärgedeks on ka turba lagunemine ning turba kokku vajumine, mis taaskord põhjustab KHG heidet (Holden, 2006). Lisaks kasvab kuivendamise ja turba kaevandamise ajal ning ka pärast turbavarude ammendamist jääkturbaaladel tuleohtlikkuse risk (Paal, 2011).

Jääksoid saab kategoriseerida erinevate tüpoloogiate alusel (Lode, 2011). Peamiseks eristamise tunnuseks on kaevandamise meetod vastavalt maastikule ehk üldistavalt saab eristada 1) tasase pinnamoega jääksoid, kus on kasutatud freesimistehnoloogiat ning 2) liigendatud pinnamoega jääksoid, kus on kasutatud tükkturba kaevandamise meetodit (Paidla, 1975; Wheeler & Shaw, 1995). Viimasel sajandil tulenes jääksoode korrastamine eelkõige maakasutuse eesmärgist, mis A. Paidla (1975) jagas kaheks: põllumajanduslik ning metsanduslik. Sellest tulenevalt kategoriseeriti mõlemat jääksoo tüüpi (frees- ning karjääri-jääksoo) vastavalt maakasutuse eesmärgile alamtüüpideks (vt Tabel 2) (Lode, 2011 järgi).

Tabel 2. A. Paidla (1975) frees- ja karjäärijääksoode ning J. Pikk ja U. Valk (1995) frees-jääksoode ja nende võimaliku korrastamisjärgse kasutusala klassifikatsioon (Lode, 2011 järgi).

Autorid	Frees-jääksoo		Karjääri-jääksoo
	Põllumajanduslikult kasutatav	Metsanduslikult kasutatav	Veekogude rajamine
A. Paidla (1975)	<ul style="list-style-type: none"> • Õhukesed (<0,5 m), karbonaatsel lamamil lasuvad jääksood; • Tüsedad (>0,5 m), madalsoolasundiga jääksood 	<ul style="list-style-type: none"> • Õhukesed (<0,5 m), mittekarbonaatsel lamamil lasuvad jääksood; • Tüsedad (>0,5 m) siirde- või rabalasundiga jääksood 	<ul style="list-style-type: none"> • Madal- ja siirdesooturbaga jääksood; • Rabaturbaga jääksood
J. Pikk, U. Valk (1995)	-	<ul style="list-style-type: none"> • <0,5 m paksuse turbakihiga jääksood, kus veerežiim on puude kasvule soodne, s.t põhjavee tase jääb sügavamale kui 0,3 m; • <0,5 m paksuse turbakihiga jääksood, kus võib esineda üleujutusi ja mis pidevalt või periooditi kannatavad metsakasvatustlikust seisukohast liigniiskuse all; • >0,5 m või paksema turbakihiga jääksood, kus veerežiim on puude kasvuks soodne; • >0,5 m või paksema turbakihiga jääksood, mis pidevalt või periooditi kannatavad metsakasvatustlikust seisukohast liigniiskuse all 	-

Jääksoode kultiveerimise ehk korrastamise all mõeldi eelmisel sajandil uue kasutuseesmärgi loomist, mis määrati alale pärast kaevandustegevuse lõpetamist, loodusliku keskkonna korrastamiseni sel hetkel ei jõutud (Paidla, 1975). Soodel oli varasemalt pigem negatiivne maine, maakasutajate jaoks oli soo viljatu ja tarbetu maa ning kuivendamine nõudis suurt tööd (Masing, 1988a). Samuti ei pööratud tähelepanu soode looduslikule ilule, kuna looduslik väärtus seisnes materiaalsuses (Masing, 1988a). Soode kaitse alla võtmise aluseks ei olnud ebapiisav looduslik ilu või soode massilise kuivendamise tõttu nende kadu, vaid esmalt hakati märkama erinevate sooliikide, sealjuures just lindude kaitsmise vajadust (Masing, 1988a).

Jääksoode olulisusest tulenevalt on ajaga muutunud jääksoode kategoriseerimine, kuid peamine eristusviis kategooriate alusena: turbakihi paksus (<0,5 m ja >0,5 m) on siiski jäänud samaks (Lode, 2011). Lisaks saab kategoriseerida jääksoid ka hüdrooloogiliste tingimuste, taimestiku jms alusel (Van Andel & Aronson, 2012). Tänu teadmiste laienemisele ning täpsustavatele uurimustele on jääksoode tüüpide eristamine läinud detailsemaks (Tabel 3) (Blankenburg & Tonniss, 2004).

Tabel 3. Jääksoode tüübid Põhja-Euroopas ning nende omaduste kirjeldus (Lode, 2011 järgi; Money, 2004b andmetel).

Jääksoo tüüp	Jääksoo hüdrooloogilised, bioloogilised, füüsikalised ja keemilised omadused
A	Looduskaitsealadel põhjustel või kehtivuse kaotanud kaevandamisloa tõttu lõpuni kaevandamata ala. Mitmesuguse suurema languga frees- või karjääri-jääksoo; jääkturbalasalund paks (>100 cm), pealmise kihi moodustab ombrotroofne <i>Sphagnum</i> -turvas, mille pH <4.2 . Turba jääklasundi pind on tasane, selles leidub vettpidavaid kihte. Jääklasund võib paikneda erinevate omadustega mineraalpinnastel, selle pinnaprofiil ulatub kraavidega reguleeritud veetasemest kõrgemale, s.t ala on toimiva kuivendussüsteemiga.
Bi	Frees-jääksoo, mille turba jääklasund on suhteliselt õhuke (<100 cm); selle pealmise kihi moodustab ombrotroofne <i>Sphagnum</i> -turvas, mille pH <4.2 , kuid valdav on kõrge lagunemisastmega ja vettpidav madalooturvas. Turba jääklasundi pind on tasane või mineraalpinna nõgususi järgiv, väiksema või suurema languga, lasub vett juhtival liivapinnasel, milles esineb vettpidavaid savi vms läätsi. Põhjavee alanenud veetasemest tulenevalt esineb vertikaalne veekadu mineraalsesse aluspinda. Jääklasundi pinnaprofiil ulatub kraavidega reguleeritud veetasemest kõrgemale, s.t ala on toimiva kuivendussüsteemiga, kraavid ulatuvad mineraalsesse pinnasesse.
Bii	Frees-jääksoo, milles õhukene <i>Sphagnum</i> -jääkturba kiht lasub paksul, kuid kõrge lagunemisastmega ja vettpidava madalooturba kihil; muus osas sarnane tüübiga Bi.
C	Frees-jääksoo õhukese (~ 50 cm) madalooturba-jääkturbaga, mis on kujunenud mineraalmaa soostumisel. Jääkturbas esineb rohkesti puidu, villpea, puhmastaimede ja tarnade jäänuseid, vähem turbasammalde jäänuseid. Toitub sadeveest, pealispind on happeline (pH <4.8) ja oligotroofne. Puujuurte poolt tekitatud õõnsuste kaudu infiltreerub pinnavesi jääkturbalasalundist kiiresti mineraalpinnasesse. Alad on suure languga ning mineraalpinna nõgususi järgivad; turba jääklasundi pinnaprofiil asetseb kraavidega reguleeritud veetasemest kõrgemal või madalamal; jääkturbakihi esineb kraavidest kandunud mineraalset substraati. Minearaalse aluspinna alanenud veetaseme tõttu esineb jääkturbalasalundist sellesse toimuv veekadu.
D	Frees-jääksoo oligotroofse või mesotroofse tarna-madalooturba-jääkturbaga. Pealispind on suhteliselt happeline (pH <6); alale võib mõju avaldada pinnavee läbivool või põhjavee väljakiildumine. Ala on suure languga, turba jääklasundi pinnaprofiil kraavidega reguleeritud veetasemest madalamal; kaevandamise ajal toimus liigvee ärajuhtimine alalt pumpamise teel.
E	Frees-jääksoo õhukese (~ 50 cm) subneutraalse või aluselise oligotroofse madalooturba-jääkturba lasundiga, mis on kujunenud endisel järvemudal või lubjarikkal liivakihil, pinnamood on tasane või kerge languga. Turba jääklasundi pinnaprofiil asetseb kraavidega reguleeritud veetasemest madalamal; kraavid ulatuvad mineraalsesse pinnasesse; kaevandamise ajal toimus liigvee ärajuhtimine alalt pumpamise teel. Kohati võib esineda põhjavee väljakiildumist.
Fi	Frees- või karjääri-jääksoo, mille <1 m paksuse ning kõrge pH-ga mesotroofse kuni eutroofse turba jääklasundi moodustab alluviaalsel savikihil lasuv tüüpiline lammi-madalooturvas. Turba jääklasundi pinnaprofiil asetseb reguleeritud veetasemest madalamal; kaevandamise ajal toimus liigvee ärajuhtimine alalt pumpamise teel (veetaset võidi alandada kuni 2 m).
Fii	Sarnane eelmise tüübiga, kuid turba jääklasundi paksus on >1 m.

1.2.1. Jääksoode korrastamine

Soode kuivendamisega kaasnevad probleemid ning soode kui ökosüsteemide ulatuslik kadu sai ilmsiks üsna peale nende ulatuslikku kuivendamist. Erinevad keskkonnakokkulepped ja konventsioonid andsid oma tõe märgalade kaitse alla võtmiseks ning korrastamiseks: (Ramsari rahvusvahelise tähtsusega märgalade ja veelindude kaitse konventsioon (1971), Berni Euroopa looduslike liikide ja nende elupaikade kaitse konventsioon (1979), Rio de Janeiro bioloogilise mitmekesisuse kaitse konventsioon (1992) jt) (Keskkonnaministeerium, 2015; Paal & Leibak, 2013). Pärast taasiseseisvumist hakati järjepidevalt kuivendatud soolade ja jääksoode probleemidega tegelema ning erinevate märgalade kaitseks on Eesti Vabariigis välja kuulutatud keskkonnaalased õigusaktid, mis keskenduvad turba geoloogilisele uurimisele, kaevandamisele ning turbaalade korrastamisele (Paal, 2011). Need õigusaktid on järgnevad: säästva arengu seadus (1995), maapõueseadus (2004) ja sellel põhinevad rakendusaktid, kaevandamisseadus (2003), keskkonnamõju hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seadus (2005), looduskaitse seadus (2004), veeseadus (1994) jt (Paal & Leibak, 2013). Lisaks alustati 2000. aastal Euroopas ja Eestis Natura 2000 alade võrgustiku moodustamist, mis hõlmab erinevaid looduskaitsealasid (Keskkonnaministeerium, 2015).

Jääksoode korrastamise eesmärk ei ole tingimata saavutada varasemaga võrreldav keskkond (Money, 2004a), pigem peaks korrastamisprotsess tagama ökosüsteemi püsivuse luues soosivad tingimused looduslikuks arenguks (Lode, 2001). Sealjuures võiks olla taastatud ökosüsteemil funktsioonid nagu süsiniku akumulatsioonivõime, toitainete ringlus, taimestiku struktuuri taastumine, mis soodustaks loomade ja taimede bioloogilist mitmekesisust ning viimaks ka ökosüsteemi võimekus vastu pidada bioloogilistele invasioonidele (Rochefort & Lode, 2006). Sellest tulenevalt võiks alati jääksoode peamiseks fookussuunaks korrastamisel olla veetaseme tõstmine (Pakalne et al., 2021). Eelkõige võib veetaseme tõstmine tuua positiivseid tagajärgi korrastataval alal, kuid ka negatiivseid tagajärgi sellega külgnevatele mittekorrastatavatele aladele, kus seeläbi võib kannatada bioloogiline mitmekesisus (Wheeler et al., 1995; Wheeler & Shaw, 1995). Seetõttu peab korrastamisele eelnema põhjalik eeltöö koos uuringutega, et teada saada taastatava ala topograafiline, bioloogiline, hüdroloogiline jms seisund (Wheeler et al., 1995; Pakalne et al., 2021).

Pärast korrastamist iseloomustavad igat jääksoo tüüpi kindlad hüdroloogilised ja geomorfoloogilised tingimused ning igale tingimuste kogumile vastavad kindlat tüüpi arengusuunad, mis on kujutatud järgnevas tabelis (Tabel 4) (Grootjans et al., 2012).

Tabel 4. Taassoostamise arengusuundade ning jääksoode tüüpide omavaheline seos (Lode, 2011 andmetel).

Jääk- soo tüüp	Taassoostamise arengusuund							
	Rabastu mine	Õõtsik- soo	Liigivaene siirdesoo	Madala- veeliste pinnavee- kogude roostik	Väike- tarnadega madalsoo	Kõrge rohustusega madalsoo	Sesoonselt üleujutatav rohuma	Soomets
A	x	x						
Bi	x	x						
Bii	x	x						
C	x	x	x					
D		x	x					
E				x	x	x	x	x
Fi				x	x	x		x
Fii					x	x	x	x

Taassoostamise arengusuundade juures on oluline silmas pidada, et tegemist oleks soositavate arengusuundadega, mille jaoks on olemas ka lähtetingimused, ilma milleta areng ei saa toimuda (Tabel 5) (Money, 2004a). Seetõttu peavad pärast korrastamist olema jääksoodes kindlad hüdroloogilised (pinnavee tase), bioloogilised (taimestik) ning keemilised (pH) tingimused, mis toetaksid taassoostamise arengusuundi (Money, 2004a).

Tabel 5. Hüdroloogiliste, bioloogiliste ja keemiliste tingimuste eeldused pärast jääksoode korrastamist taassoostamise arengusuundade soosimiseks (Money, 2004a järgi).

	Hüdroloogilised, bioloogilised ja keemilised karakteristikud		
Taassoostamise arengusuund	Pinnavee tase	Taimestik	pH ning turbalasundi iseloomustus
Rabastumine	<30 cm	Turbasammal, kõrrelised, villpea, turbasammal	Oligotroofne
Õõtsiksoo kujunemine	50-150 cm	Turbasammaldest ujuvmatid, soontaimed vanematel aladel	Oligotroofne
Liigivaese siirdesoo kujunemine		Turbasamblad, madalakasvulised tarnad, lehtsamblad	Oligotroofne kuni mesotroofne, pH<6
Madalaveeliste pinnaveekogude roostiku kujunemine	Perioodiline või alaline üleujutus <2 m	Pilliroog, laialehine hundinui	Mesotroofne või eutroofne, neutraalse happesusega
Väiketarnadega madalsoo kujunemine	Pidev pinnaveega küllastatus (mitte üleujutatud)	Taimestik õõtsikuil, puud, põõsastik	Oligotroofne, lubjarikas
Kõrge rohustuga madalsoo kujunemine	Suvine veetase maa all	Kõrgekasvuline rohustu	Mesotroofne kuni eutroofne, subneutraalne
Sesoonselt üleujutava rohumaa kujunemine	Perioodiline üleujutus	Intensiivse niitmise tõttu liigivaene	Mesotroofne kuni eutroofne, subneutraalne
Soometsa kujunemine	Perioodiline üleujutus	Sanglepp, paju, sookask	Mesotroofne kuni eutroofne, subneutraalne

Looduslikule arengule kaasa aitamine läbi erinevate meetmete aitab kiiremale looduslikule taastumisele kaasa (Money, 2004a) ning kuigi veetaseme reguleerimine on peamiseks meetodiks jääksoode korrastamisel, siis lisanduvad mitmed meetodid erinevas seisus olevate jääksoode korrastamiseks: turbavallide, väikeste terrasside, poldrite ja pinnaspaisude rajamine, puude eemaldamine, turbasambla või muud turvast moodustava taimede/-fragmentide istutus/laotamine, kontrollitud põlemine jms (Pakalne et al., 2021). Meetod sõltub eesmärgist, seega võivad kombineeritud meetodid anda just parima või soovitud tulemuse (veekogude ja

pinnaspaisude rajamine, kraavide täitmine lausaliselt, metsastamine jne) (Wheeler & Shaw, 1995). Taimede roll jääsoode korrastamisel on suur, kuna taimestik avaldab mõju ökosüsteemi energiabilansile (Leppä et al., 2020) ning hüdroloogilistele tingimustele (Guéné-Nanchen et al., 2019). Turba akumulereerimiseks peab jääsoodesse siirdama kindlat tüüpi taimi (nt *Sphagnum*) kindlate töövõtetega, vastasel juhul ei ole sellest pikaajaliselt kasu (Rocheport & Lode, 2006).

Korrastamise eesmärgi ning taassoostamise arengusuuna saab panna paika vastavalt jääsoo seisundile ja korrastamise võimalustele, seisundit tuleb kaaluda erinevatest aspektidest nagu topograafia (lang, nõod), hüdroloogia (veetase, veehoiu võime), füüsikalised ja keemilised tingimused (toitainete kättesaadavus, pH) ning taimestik (Wheeler & Shaw, 1995). Jääsoode korrastamisel on oluliseks eelduseks eelarve, kuna erinevate meetodikatega korrastamine on erineva kuluga, lisaks ka erineva elluviimise ja taastumisaja kestvusega (Rocheport & Lode, 2006). Maksumuseks on hinnatud keskmiselt 230–1360€/ha kohta sõltuvalt vajaliku tehnika olemasolust ning saadavusest (Karofeld, 2011).

Eelnevalt loetletud korrastamise meetodid on suunatud loodusliku, isetoimiva ökosüsteemi kujunemisele, kuid jääsoode puhul on ka variant, et see jääb majanduslikku kasutusse. Kliima probleemi süvenedes on soode korrastamise aluseks jätkusuutlik ning säästlik areng, kuid see nõuab jääsoode korrastamisel kaasavaid lahendusi, mis oleksid kooskõlas ka majandusliku arenguga (Joosten et al., 2016a). Eriti kuna jääsoode korrastamine hõlmab märjutamist, millega kaasneb klassikalise põllumajandusliku maakasutuse kadu (Joosten et al., 2012). Nimelt võib olla märgalaviljelus (ingl „*paludiculture*“; lad „*palus*“ ehk soo, raba) ehk taimekasvatus märgades tingimustes justkui uus majandusviis säästvaks turbaalade majandamiseks (Joosten et al., 2012; Schäfer, 2012; Wichtmann & Joosten, 2007).

1.3. Kasvuhoonegaaside vood soodes ja jääksoodes

Pärast soode kuivendamist eemaldatakse soopinnalt pealmine kiht, mille all lasub hästi lagunenu turvas (Basiliko et al., 2007). Pealmise kihi eemaldamisega paisatakse kuivenduse ja aereerituse paranemise tõttu õhku seal ladestunud süsinik ning tekib süsiniku- ja toitainete vaene keskkond, mis on ebasoodne elukeskkond turvast lagundavatele mikroorganismidele (Basiliko et al., 2007). Kuivendatud ja kaevandavate turbaalade bakterite populatsioon on madalam kui looduslikes soodes (Croft et al., 2001). Kuivendamine tingib ülemiste turbakihtide õhustatust, mille tõttu hakkab turvas lagunema, mis viib turbas leiduva süsiniku oksüdeerimiseni. Erinevate allikate kohaselt võib intensiivsem turba oksüdeerimine lõppeda umbes 10–15 aasta jooksul pärast turbaalade kuivendamist (Gilmer et al., 1998). Küll aga mängivad pikaajalise oksüdeerimise taseme juures suuresti rolli muutused turba struktuuris ning hüdroloogilised tingimused (Price, 1997). Waddington ja McNeil (2002) leidsid Kanada uurimisala põhjal, et pikaajaline turba oksüdeerimise tase on jääksoodes kasvav, kuid antud ala ning erinevate piirkondade puhul on geograafiline laius ja asukoht, aastane sademete hulk ning aastane õhutemperatuur olulisteks teguriteks. Lisaks mõjutavad turbakadu ka tuule ja/või vee erosioon (Waddington & McNeil, 2002). Keskmine turba oksüdatsioonitase jääksoodes on ~6 mm aastas olenevalt piirkonnast (Waddington & McNeil, 2002). Turba oksüdatsioonitase on positiivses korrelatsioonis temperatuuriga, küll aga mõjutavad oksüdatsioonitase tugevalt ka mikrobioloogiline tegevus ning hüdroloogilised olud (Freeman et al., 2002). Positiivsest korrelatsioonist lähtuvalt on turba oksüdatsioon suurem suvel võrreldes kevade, sügise ja talvega (Freeman et al., 2002).

Veerežiimi ümberkujundamine on oluline komponent saavutamaks süsinikku siduvat keskkonda, lisaks vähendab veetaseme tõstmine oluliselt kõikides kliimavööndites (boreaalse, parasvöötme ja troopilise kliimaga) olevate jääksoode CO₂ ja N₂O emissioone (Wilson et al., 2016). Aeroobne keskkond soosib CO₂ emissioone ning pärsib CH₄ emissioone (Salm et al., 2012), kuna CH₄ emiteerub metanogeneesi protsessi käigus, mis toimub anaeroobses keskkonnas mikroobide aktiivsel tegevusel (Vasander & Kettunen, 2006). See tähendab, et CH₄ emissioonid veetaseme tõstmisega kasvavad (Ojanen & Minkkinen, 2020), kuid KHG heide on looduslikes keskkondades siiski vältimatu ning arvesse tuleks võtta CO₂ ekvivalenti, mis tänu CO₂ ja N₂O langemisele siiski märjutamisel väheneb (Günther et al., 2020). Arvesse tuleks võtta ka CO₂ ja CH₄ emissioonide kiirusvoo mõju ja atmosfääri püsivuse erinevusi, kuna CO₂ on nõrgema mõjuga, kuid püsivam ning CH₄ on tugevama mõjuga (28 korda tugevam kui CO₂), kuid lühiajalisem KHG (Tanneberger et al., 2020).

Süsihappegaasi emiteerub turbaaladelt atmosfääri mitmete protsesside käigus, näiteks turba mineraliseerumine ehk turba oksüdatsioon, taimede hingamine, metanogenees atmosfääris, põlengud ning nagu juba mainitud kuivendamine, seeläbi maakasutuse muutmine ning kaevandamine (Vasander & Kettunen, 2006).

Pikaajalises skaalas süsinikuringe mõistmiseks ning teiste ökosüsteemidega võrdlemiseks ei piisa vaid erinevate KHG voogude mõõtmisest (Dyukarev et al., 2021). Erinevate meetoditega (kaugseire, kambrimõõtmine, modelleerimine) ja nende meetodite kombineerimisel on võimalik hinnata kuivendatud turbaalade akumulereerimisvõimet ja süsinikuringe tasakaalu, mis on olulised tegurid kliimamõjude hingamisel (Yu, 2012). Kasutades mitmeid näitajaid, saab põhjalikuma ülevaate ökosüsteemi dünaamikast, energiavoost ning üldisest seisundist, samuti on võimalik ökosüsteemi hinnata tänu erinevatele näitajatele ajalises ja ruumilises kontekstis (Mäkiranta et al., 2010).

Koguproduktioon (*GPP*) tähistab CO₂ hulka, mida taimed mingil ajaperioodil fotosünteesi käigus seovad, ühtlasi annab see sisendit kui palju süsinikku seotakse ökosüsteemi poolt (Zhang et al., 2009). Ökosüsteemi netovahetus (*NEE*) iseloomustab CO₂ netovahetust ökosüsteemi ja atmosfääri vahel (Kramer et al., 2002). *NEE* olulisus seisneb selles, et see annab sisendit, kas ökosüsteem toimib kui süsiniku emiteerija (positiivne *NEE* näitab, et ökosüsteem emiteerib rohkem CO₂ kui seob) või süsiniku siduja (negatiivne *NEE* näitab, et ökosüsteem seob rohkem CO₂ kui lendub) (Kramer et al., 2002). Kuivendatud turbaaladel peegeldab *NEE* üldist süsinikubilassi, võttes arvesse nii CO₂ lendumist kui ka süsiniku sidumist (Kirschbaum et al., 2001). Eelmise näitajaga on väga tihedalt seotud ökosüsteemi netoproduktioon (*NEP*), mis väljendab ökosüsteemi süsiniku netokasvu või -kadu kindla ajaperioodi jooksul (tavaliselt aasta) (Lovett et al., 2006). Erinevus seisneb selles, ökosüsteemi netoproduktioon (*NEP*) rõhutab süsiniku akumulereerimist ökosüsteemi siseselt (Kirschbaum et al., 2001). Ühtlasi kajastab see koguproduktiooni (*GPP*) ja ökosüsteemi hingamise (*Re*) tasakaalu, mis tähendab, et tänu sellele saab hinnata kas ökosüsteem aja jooksul seob või emiteerib süsinikku (Lovett et al., 2006). Primaarne puhasproduktioon (*NPP*) väljendab mingis ökosüsteemis taimede poolt tekitatud orgaanilise aine või biomassi kogust, võttes arvesse taimede kasvu jooksul kasutatavat energiat (Clark et al., 2001).

Turbaaladel on KHG voogude juures järgmised hingamise tüübid määrava tähtsusega: mulla hingamine, taime hingamine, ökosüsteemi hingamine. Mulla hingamisega (*Rs*) kaasneb CO₂ eraldumine mulla pinnalt, mis tekib mullas juurehingamise (*Ra*) ning mikroobide tegevuse ja hingamise (*Rh*) tulemusena. Mullahingamise intensiivsust mõjutavad mitmesugused tegurid

nagu mulla temperatuur, mulla niiskus, orgaanilise aine sisaldus ja toitainete kättesaadavus (Mäkiranta et al., 2010). Taim hingamise (R_p) käigus oksüdeeritakse aeroobses keskkonnas orgaanilisi ühendeid (nt suhkur, tärklis), et vabastada energiat elutegevuste jaoks. Taimede hingamine toimub pidevalt kogu ööpäeva lõikes, kuigi sagedus võib varieeruda sõltuvalt keskkonnatingimustest nagu valguse intensiivsus ja temperatuur (Minkkinen et al., 2007). Ökosüsteemis toimuvat üldist hingamistegevust kirjeldab ökosüsteemi hingamine (R_e) ning seda mõjutavad temperatuur, niiskus, taimestiku tüüp ja orgaanilise aine kättesaadavus (Bubier et al., 1998). Süsiniku akumulatsioon ökosüsteemis on seotud taimede fotosünteesiga, ning see sõltub omakorda temperatuurist, õhu- ja mullaniiskusest ning fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse hulgast.

Kokkuvõtlikult saab öelda, et KHG voogude emissiooni poolt mõjutavateks teguriteks on soodes ning jääksoodes järgmised tegurid: veetase, taimkate, mulla niiskus ja temperatuur, toitainete kättesaadavus, orgaanilise aine maht ning lagunemisaste ning maakasutus (Wilson et al., 2016a).

Varasemalt on geograafia osakonnas läbi viidud mitmeid uuringuid, mis puudutavad KHG vooge ning turbaalaseid. 2020. aastal uurisid bakalaureusetöö raames päideroo kasvatamist jääksoodes R. Järvpõld ning M. Jürgenson. R. Järvpõld (2020) töö tulemustes selgus, et kuigi päideroo kasvatamine happelisel mullal tõi kaasa CO₂ voo suurenemise, siis veerežiimi parandamine tõi taimestamata jääksoodes kaasa KHG voo vähenemise. M. Jürgenson (2020) tulemuste kohaselt nõuab päideroo kasvatamine energiaheinana stabiilselt kõrgemat veetaset, samuti toimus süsiniku sidumine just kõrgema (~20 cm maapinnast) veetasemega. Lisaks on erinevaid uuringuid tehtud kuivendatud kõdusoometsades - 2015. aastal sai H. Maanso tööst kinnitust asjaolu, et kuivendamine metsades toob kaasa CO₂ voo suurenemise, CH₄ oksüdeerimise ning soodsate keskkonnatingimustega alal N₂O emissioonide suurenemise. Kõdusoometsa ökosüsteemi on uurinud ka M. Mägi (2021), kelle töös sai kinnitust CO₂ ja CH₄ voogude seos õhu- ja mullatemperatuuri ning mullaniiskuse ja veetasemega. Tegemine on vaid paari näitega bakalaureuse- ja magistratöödest.

Läbi aastate on avaldatud mitmesuguseid doktoritöid, kus on kasutatud erinevaid mõõtmismeetodeid ja lähenemisviise:

T. Tampuu, (2022) „Synthetic Aperture Radar Interferometry as a tool for monitoring the dynamics of peatland surface“,

A. Krasnova, (2022) „Greenhouse gas fluxes in hemiboreal forest ecosystems“,

G. Veber, (2021) „Greenhouse gas fluxes in natural and drained peatlands: spatial and temporal dynamics“ ,

I. Burdun, (2020) „Improving groundwater table monitoring for Northern Hemisphere peatlands using optical and thermal satellite data“,

B. Viru, (2020) „Snow cover Dynamics and its impact on greenhouse gas fluxes in drained peatlands in Estonia“,

K. Kasak, (2016) „Greenhouse gas emissions and water treatment efficiency in subsurface flow filters using various substrates“,

J. Järveoja, (2015) „Fluxes of the greenhouse gases CO₂, CH₄ and N₂O from abandoned peat extraction areas: impact of bioenergy crop cultivation and peatland restoration“

J.-O. Salm, (2012) „Emissions of greenhouse gases CO₂, CH₄ and N₂O from Estonian transitional fens and ombrotrophic bogs: the impact of different land-use practices“.

Kõige hiljutisemateks saab pidada järgnevaid uuringuid:

Maddison et al, (2021) „Net ecosystem exchange of CO₂ and ecosystem respiration in two bogs in Estonia along disturbance gradient“,

Veber et al, (2021) „Spatio-temporal variability of greenhouse gases along drainage gradient in 17 peatlands across Estonia“,

Pärn et al, (2019) „Kasvuhoonegaaside mõõtmine Amasoonia soodes“.

Varasematest uuringutest on antud töös kasutatud Salm et al, (2012) „Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia“ artiklit.

2. Materjal ja metoodika

2.1. Kirjanduspõhine ülevaade

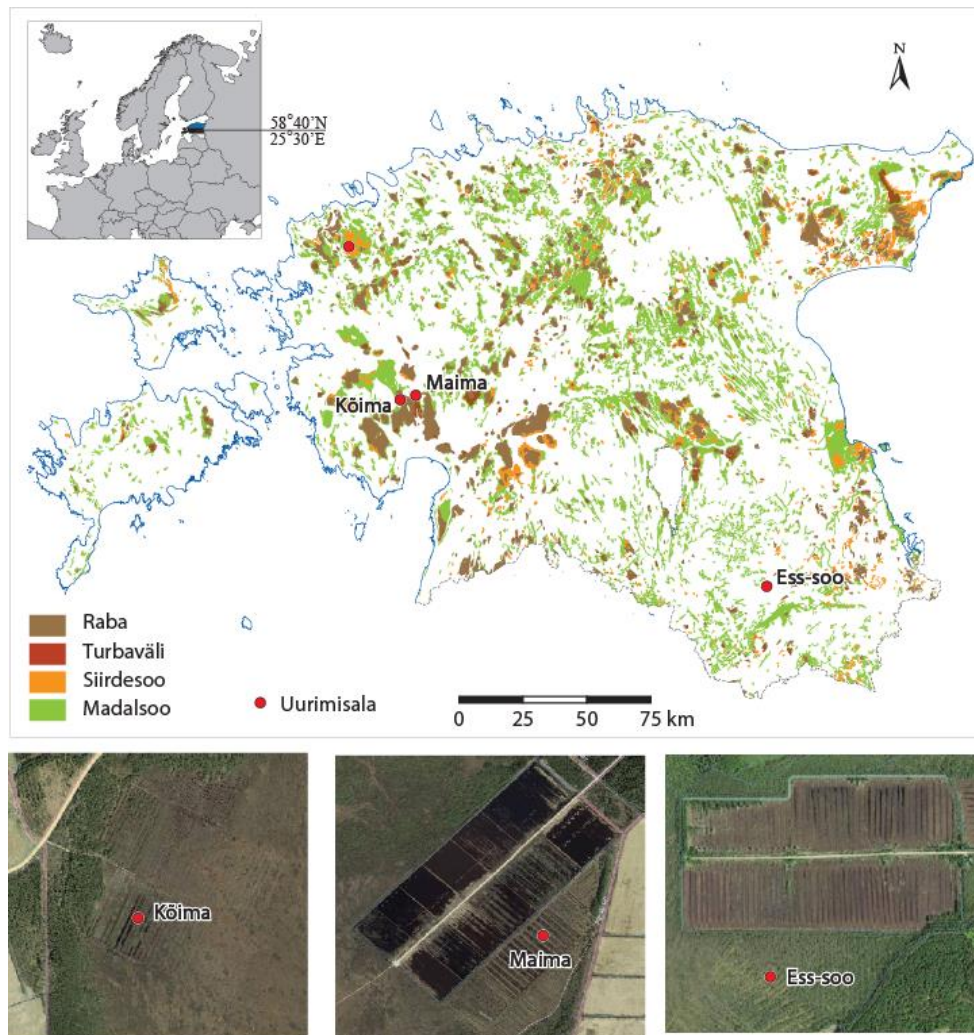
Kirjanduspõhine ülevaade on koostatud teemakohaste internetiallikate ning artiklite ja raamatute põhjal. Peamisteks kasutatavateks allikateks olid teadusajakirjades ilmunud teadustööd ning uuringud, mis keskendusid jääksoode uurimisele, korrastamisele ning kasvuhoonegaaside mõõtmisele ja hindamisele. Koostatud teoreetiline ülevaade jaguneb kolmeks temaatiliseks peatükiks, milleks on: sood, jääksood ning KHG vood soodes ja jääksoodes. Esimeses peatükis keskendutakse soode kirjeldamisele terminoloogiliselt, kui ka soode rollile kliima võtmes, teises peatükis kajastatakse jääksoode mõistet, nende kujunemist ja kategoriseerimist, lisaks kirjeldatakse jääksoode korrastamist ning korrastamise meetodeid. Kolmandas teoreetilise ülevaate peatükis selgitatakse KHG voogudega toimuvad peamisi protsesse, lisaks tuuakse välja KHG vooge mõjutavad tegurid. Töö sisulise osa moodustab märgalaviljelusena turbasammalde kasvatuse kirjeldus ning analüüs, mis on üheks jääksoode korrastamise viisideks. Turbasammalde süsinikupõllul kasvatamise kõrvale tuuakse analoogina näide Eesti jääksoode turbavõtuaukudest.

Teemakohased allikad leiti erinevate märksõnade alusel, millest mõned olid järgmised: „peatland“, „mire“, „cut-over peatland“, „drained peatland“, „greenhouse gas emissions/fluxes“, „restoration“, „carbon cycle“, „paludiculture“ jne. Piirkonna piiritlemiseks kasutati järgnevaid märksõnu „temperate“, „boreal“. Peamine otsingukeskkond oli Google Scholar veebikeskkond, kuid lisaks kasutati E-kataloogi ESTER. Vanemate eestikeelsete teoste leidmiseks kasutati DIGAR digitaalarhiivi.

2.2. Kasvuhoonegaaside voo mõõtmine ja aastase voo hindamine turbavõtuaukudes

Käesolevas töös on kasutatud kolmes Eesti jääksoos turbavõtuaukudes mõõdetud kasvuhoonegaaside voo tulemusi 2022. aastast, mille mõõtmisel osales ka uurimistöö autor. Turbavõtuauke kus turbasambla kasv on looduslikult taastunud ja moodustab kogu augu ulatuses lausalise katte, võib pidada analoogiks märgalaviljeluse käigus rajatud turbasamblakasvatustele.

Kasvuhoonegaase mõõdeti Pärnumaal Maima ja Kõima jääksoo turbavõtuaukudega alal ning Võrumaal Ess-soo jääksoo turbavõtuaukudega alal (Joonis 3).



Joonis 3. Turbavõtuaukudes gaasivoo mõõtmise ja aastase voo hindamise alade paiknemine.

Gaasivoogu mõõdeti 2022. aastal igakuiselt üks kord kuus portatiivsete gaasianalüsaatoritega Licor Li-7810 (CO_2 ja CH_4) ning Licor Li-7820 (N_2O) dünaamilise kambri meetodil. Mõõtmisteks kasutatud läbipaistev dünaamiline kamber on varustatud sundtsirkulatsiooni tekitava seadmega, et tagada suletud kambris õhu ühtlane segunemine ja stabiilne temperatuur. Läbipaistva kambriga mõõdeti NEE , samale kambrile asetati pärast kambri tuulutamist kordusmõõtmise ajaks läbipaistmatu kate ja mõõdeti Re . Vegetatsiooniperioodi välisel ajal (lumikattega või külmunud pinnas) 2022.a. jaanuarist märtsini ja detsembris mõõdeti ainult dünaamilise pimekambril meetodil, kuna sel perioodil fotosünteesi puudumise tõttu $NEE=Re$. NEE -d kõige enam mõjutavat parameetrit – fotosünteesiliselt aktiivset kiirgust mõõdeti gaasivoo mõõtmisega paralleelselt Apogee AT-100 PAR sensoriga. Veetaset mõõdeti automaatpiesomeetriga 1 h intervalliga, kuid kuna turbavõtuaukudes maapinna (turbasamblakate) tase käib sünkroonis veetaseme muutustega (veetase maapinna suhtes -9 ± 11 cm), siis antud näitaja ei olnud käesoleva töö kontekstis oluline.

CO₂ voog, eriti *NEE* on väga tugevalt korreleeritud *PAR* ja õhu- ja maapinna temperatuuriga ja suure aastate vahelise varieeruvusega. Käesolevas töös on kasutatud vaid ühe aasta andmed ning tegemist on eeluuringuga, seetõttu on CO₂ aastase voo modelleerimisel kasutatud väiksema andmevajadusega lihtsustatud lähenemist: vegetatsiooniperioodi välisel ajal 2022.a. jaanuarist märtsini ja detsembris on CO₂ voog määratud vastava kuu mõõdetud *Re* väärtusega (st. ala emiteerib), mis on arvutatud Maima, Kõima ja Ess-soo *Re* mõõtmiste keskmisena. Vegetatsiooniperioodil on CO₂ voog arvutatud kuu keskmise öö ja päeva pikkuse, kuu keskmise päeva *PAR* ning *Re* ja mõõdetud päevase *NEE* väärtuse alusel: päikeseloojangust päikesetõusuni on CO₂ voog hinnatud võrdseks *Re*-ga, päevased *NEE* mõõtmised (erinevatel aladel ja kuudel vahemikus kell 10-18) on seotud vastava mõõtmisaja *PAR* väärtusega ja selle alusel proportsionaalselt seotud kuu keskmise päevase päikesekiirgusega. Veetaset ning temperatuuri käiku ei ole antud lihtsustatud mudelis kasutatud, kuna veetaseme muutus oli ebaoluline (maapinna kõrgus muutus koos veetaseme sesoonse käiguga, sisuliselt hõljuvas olekus õõtsiksoo) ning temperatuurikäigu mõju kuu keskmisena kajastab juba igakuine mõõdetud *NEE* ning *Re* väärtus, mis mõlemad on temperatuuritundlikud.

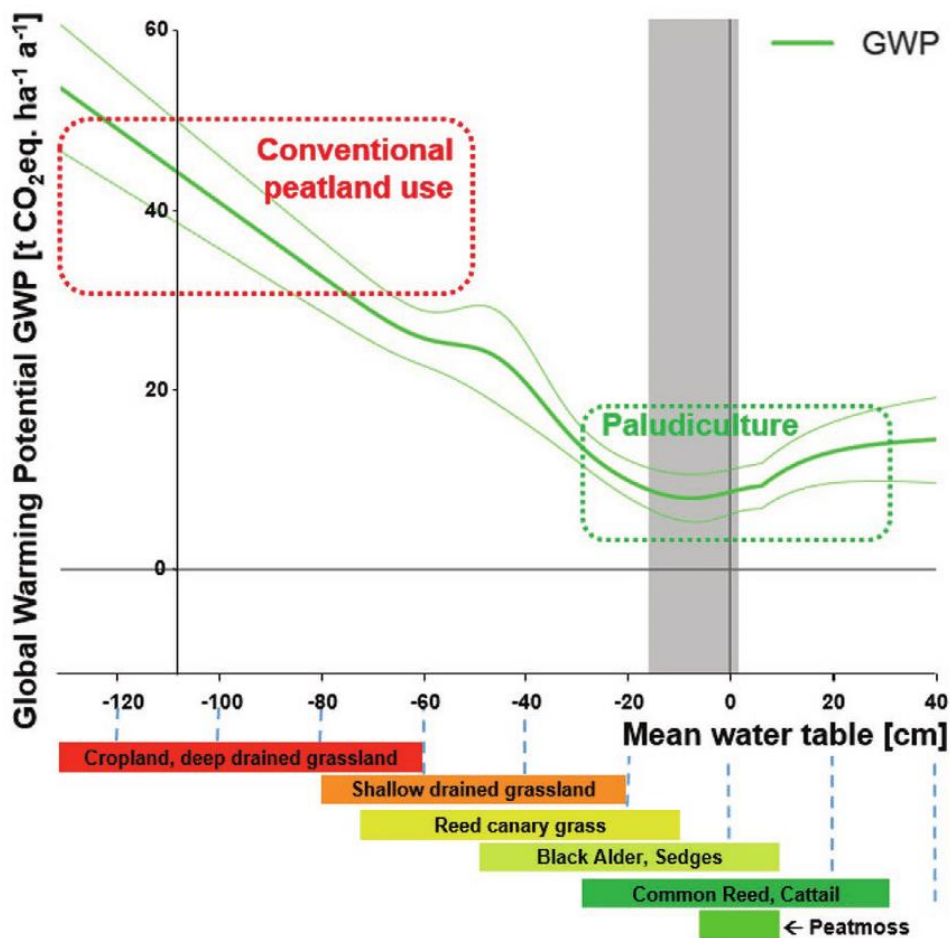
CH₄ ja N₂O aastase voo arvutamiseks keskmistati vastava gaasi voog üle kõigi kolme uurimisala ja üle kõigi kuude ning arvutati selle alusel aasta keskmine emissioon hektari kohta. 2022. a. gaasivoo tulemuste puhul tuleb arvestada, et tegemist oli pikaajalisest keskmisest erineva aastaga, kuna sellel suvel esines erandlikult 3 pikemat kuuma- ja põualainet (juunis, juulis ja kõige pikem augustis).

3. Tulemused ja arutelu

3.1. Märgalaviljelus

Märgalaviljelus on laiemas mõistes süsinikku siduva põllumajanduse ehk süsinikupõllunduse (ingl „*carbon farming*“) üks viis ning selle positiivne mõju seisneb selles, et turbaala on kasutatav põllumajanduslike või metsakultuuride kasvatamiseks, sealjuures turbas ladestunud süsinik säilitatakse ning toetatakse ökosüsteemi taastumist soolana (Tanneberger et al., 2022). Eesmärk on kasvatada niiskuskindlaid taimi, millel on kõrge biomassi ning turba akumulatsioonivõime (Tanneberger & Wichtmann, 2011). Kasvatatavat biomassi on võimalik kasutada erinevatel eesmärkidel nagu toiduainete, loomasööda, ehitusmaterjalide tootmisel aga ka kütusetoodete ja ravimite valmistamine (Wichtmann & Joosten, 2007). Kui jääsoode märjutamise mõjuks on KHG emissioonide vähendamine ning sidumise suurendamine, siis märgalaviljelus annab võimaluse kasutada biomassi fossiilsete kütuste alternatiivi biokütuse tootmiseks (Schäfer, 2012). See tähendab, et märgalaviljeluse arendamisel on kliimamuutustega kohanemisel ning kliimamõjude leevendamisel oluline roll, kuid biomassist toodetav biokütus või kütusesaadused ei asenda kiiret vajadust lõpetada fossiilsete kütuste kasutamine (Bossio et al., 2020).

Märgalaviljeluse põhiprintsiibiks on kasutada ainult seda osa primaarsest puhasproduktioonist (*NPP*), mis ei ole turba tekkeks vajalik (turba tekkeks kulub ~80–90% *NPP*-st) (Wichtmann & Joosten, 2007). Turbaalade tavapärased kasutusviisid pärast kuivendamist on põllumajandus või metsandus, ühtlasi on seetõttu ka veetase sellistes kohtades madal (~60–120 cm sügavamal maapinnast), mis tähendab, et seal ei kasva märkimisväärsel hulgal erinevaid sootaimi ega esine piisavalt turvast moodustavaid liike, mis seoksid süsinikku (Tanneberger & Wichtmann, 2011). Tüüpiliselt on sellistel aladel globaalse soojenemise potentsiaal (*GWP*) üle 30 tonni CO₂ ekvivalenti hektari kohta aastas (vt Joonis 3) (Tanneberger et al., 2020). Metanalüüsis leiti, et märgalaviljelust kasutatavatel aladel on KHG heitkogused tunduvalt väiksemad võrreldes kuivendatud turbaaladega (Tanneberger et al., 2020). Märgalaviljeluse puhul võidakse jõuda kliimanetraalsuse lähedale, kuna emissioonid jäävad alla 20 t CO₂ ekvivalenti hektari kohta aastas, kuid see sõltub ka kasvatavatest kultuuridest (Tanneberger et al., 2020).



Joonis 3. Parasvõetme turbaalade KHG voogude metanalüüsi tulemused ning keskmine veetase klassikalise (põllumajandus, metsandus) ja märgalaviljeluse kasutuse näitel (Tanneberger et al., 2020).

Märgalaviljeluse problemaatika seisneb maakasutajate vastuvõtlikkuses, kuna tegemist on suhteliselt uue lähenemisviisiga ning nõuab paradigmuuutust (Tanneberger et al., 2020). Põllumehed, maaomanikud ning väiketalunikud ei pruugi KHG voogude vähendamist ning süsiniku sidumist iseenesest prioriteediks pidada, kuid võimalused, mis aitavad peatada või leevendada mulla degradeerumist, võivad saada eelistatuks (FAO, 2017). Küll aga sõltub sellise majandusviisi kasutus ning levik poliitikast ning rahastusest, kuna märgalaviljelusega alustamiseks on vaja suuri investeeringuid (uuringud, doonortaimed, masinad jms), seetõttu peaks märgalaviljelusega seotud projekte toetama riiklikult (Bonn et al., 2016). Kui tegemist on mahajäetud turbaväljadega pole vastuseis ilmselt sama suur võrreldes põllumajanduslikult või metsanduslikult kasutusel olevate turbaaladega, kuna nendel aladel funktsiooni asendamine märgalaviljelusega peab olema majanduslikult kasulik (FAO, 2017). Selle jaoks peaks muutuma turbaalade taassoostamine ning märgalaviljelus üldiseks normiks ning kuivendusel põhinev harimine peaks olema erand (Wichtmann et al., 2016). Eelkõige peab poliitika, mis

puudutab põllumajandust, planeerimist ning säästvat arengut, olema sidus nii riiklikul kui ka EL-i tasandil (Regina et al., 2016). Praeguse seisuga on ELis ~5,1 mln ha ehk rohkem kui 20% turbaalade kogupindalast kasutuses põllu- või rohumana (FAO, 2017).

Taimikasvatust on majandusviisina kasutatud jääksoodes juba alates eelmisest sajandist (Paal, 2011), kuid veetaseme tõstmine ning sealjuures taimikasvatust on lisandunud alles hiljuti, sellel aastakümnel (Wichtmann & Joosten, 2007). Taimede kasvatusvalik sõltub jällegi jääksoo seisundist, taassoostamise arengusuunast ning eesmärgist, kuna erinevatel taimedel on erinev võime akumuloida biomassi, lisaks kasvavad erinevad taimed erinevate keskkonnatingimustega aladel (Tabel 6) (Van Andel & Aronson, 2012). Jääksoode tüübid on määratud sootüüpidele vastavalt jääksoode taassoostamise arengusuundadele, st selliseid taimi ei saa kasvatada jääksoodes ilma nende korrastamiseta. Varasemate uurimuste kohaselt on lisaks turbasammaltele (*Sphagnum*) pilliroog (*Phragmites australis*) ning laialehine hundinui (*Typha latifolia*) märgalaviiljeluses paljulubavad biomassi akumuloidavad taimed (Wichtmann et al., 2016).

Tabel 6. Märgalaviiljeluse taimede sobivus erinevatel soo tüüpidel ning jääksoo tüüpidel (taassoostamise arengusuunast lähtuvalt) ning nende taimede kasutusvõimalused (Abel et al., 2011 andmetel; Abel & Kallweit, 2022 täiendatud; Joosten et al., 2012 järgi).

Sootüüp	Jääksoo tüüp	Taimestik	Kasutuseesmärk
Oligotroofne raba	A, Bi, Bii, C	Turbasamblad, rabamurakas	Kasvusubstraat, toiduaine
Oligotroofne-eutroofne soo(mets)	E, Fi, Fii	Sanglepp, kõrvenõges	Mööbel, puit, kütus, kiudaine, isolatsioonimaterjal, papp
Mesotroofne soo	E, Fi, Fii	Harilik pilliroog, laialehine hundinui, suur parthein	Loomasööt, isolatsiooni-, ehitus- ja katusematerjal, paber, kemikaal, kütus
Eutroofne-mesotroofne toitainerikka pinnasega soo	E, Fii	Päideroog	Sööt, kütus
Oligotroofse-mesotroofse toitainerikka pinnasega (siirde)soo	C, D	Tarnalised, huulhein, harilik jõhvikas	Allapanu, kütus, ravimid, toiduaine

Tinglikult on võimalik kasvatada näiteks oligotroofsetes tingimustes pohlasid ja mesotroofsetes tingimustes mustikaid ning kannasmustikaid, kuid mitte laialdaselt, kuna sellised taimed eeldavad väetamist ning madalamat veetaset (alla 30 cm pinnasest) (Abel & Kallweit, 2022; Karlsons et al., 2021; Valk, 1988).

3.1.1. Turbasammalde kasvatus

Riikides, kus turbaalade kuivendamise tõttu on suurem osa turbast degradeerunud, kaitstakse rangelt soid, mis on looduslikus seisundis (Wichmann et al., 2017). Sellisteks riikideks on Euroopas näiteks Saksamaa (98% sooladest kuivendatud) ja Holland (95% sooladest kuivendatud) (Wichtmann et al., 2016). Saksamaal on jääksoode korrastamisega tegeletud alates eelmise sajandi lõpust, kuid viimased ~10 aastat on jääksoodes katsetatud märgalaviiljeluses turbasammalde (*Sphagnum*) kasvatust (Daun et al., 2023; Wichmann et al., 2017).

Turbasamblad kuuluvad taimeperekonda, mis on levinud soodes ning märgalaviiljeluses seisneb nende positiivne mõju turba juurdekasvu panustajatena (Joosten et al., 2012). Saksamaa korrastatud jääksoodes on turbasamblaid kasvatatud mosaiigina nii maa- kui ka veepõhiselt (Wichmann et al., 2017), mis tähendab, et turbasamblaid on võimalik kasvatada nii pinnasel kui ka kunstlikult ehitatud ujumattidel avatud veekogudel (Abel & Kallweit, 2022). Siiani on Lääne-Saksamaal edukalt suudetud laiaulatuslikumalt kasvatada vaid kindlaid turbasammalde looduslikke populatsioone: nõgusalehelist turbasammalt (*S. palustre*), näsajast turbasammalt (*S. papillosum*) ning hõredat turbasammalt (*S. fallax*) (Gaudig et al., 2014; Gaudig et al 2017a; Krebs et al., 2012). Küll aga võivad olla suure potentsiaaliga ka teised turbasambla liigid (*Acutifolia* alam perekonda kuuluvad liigid), kuid kõiki pole jõutud veel Saksamaa uurimisalal testida (Bengtsson et al., 2018). Turbasammalde kasvatamise eesmärk on kasvatada biomassi alternatiivina kasvusubstraadile (Gaudig et al 2017a), kuid lisaks on võimalus kasutada turbasamblaid doonormaterjalina jääksoode korrastamisel (Hugron & Rochefort, 2018). Sellised kasvatusalad nõuavad aktiivset veetaseme juhtimist ning pidevat soontaimede niitmist saagikuse (biomassi) maksimeerimiseks (Gaudig et al., 2017b). Seetõttu peavad kasvatusalad olema planeeritud ning korrastatud (poldrite ja pinnaspaisude rajamine) arvestades niitmise, saagikoristuse ning biomassi transpordiga, kuna selle jaoks läheb vaja erinevaid masinaid, oluline on masinatega mitte rikkuda ega kahjustada kasvatavaid kultuure ning ladestunud turvast (Wichmann et al., 2017).

Fülogeograafiliselt kuulub Eesti paljude Euroopa riikidega samasse riikkonda, st, et taimede levik on sarnane, seetõttu on võimalik uurida ja võrrelda teiste riikide märgalaviljeluse uuringuid ning nende tulemusi ning vastavalt sellele hinnata erinevate taimede mõju KHG voogudele Eestis.

Hiljuti avaldatud artiklis (Daun et al., 2023) kirjeldati KHG bilanssi Lääne-Saksamaa endises jääksoos, kus kasvatatakse turbasamblaid märgalaviljelusena. Lääne-Saksamaa katsealal saadi 2018. aastal (seitsmes kasvuaasta) tulemuseks, et turbasammalde kasvualal toimub CO₂ sidumine, kuid pinnaspaisude alal toimub kõige suurem CO₂ heide. KHG heide toimub ka kraavide alal, kuid tegemist on väiksema pindala tõttu väiksema heitega võrreldes pinnaspaisudega. Erinevus esines ka CH₄ voogudes- turbasammalde kasvualal oli heide kõige väiksem, pinnaspaisude heide oli keskmine ning kõige suurem heide esines kraavi aladel. N₂O vood olid madalad kõikidel aladel, pinnaspaisudest esines veidi enam heidet. Sesoonselt erinesid erinevate gaaside emissioonid järgnevalt: CO₂ vood olid kõige kõrgemad suvekuudel (juunist augustini), CH₄ vood olid kõige kõrgemad jaanuaris ja augustis ning N₂O voogusid esines ainult suvel ja seda ainult pinnaspaisudest. Üldiselt oli seitsmenda kasvuaasta KHG voog sarnane esimesele kahele aastale, kuigi seitsmendal kasvuaastal oli pinnaspaisude alal CO₂ heitkogus suurem võrreldes varasemaga ning see oli ilmselt ala peamise puhasheite allikas. Tänu turbasammalde kasvatusesele märgalaviljelusena salvestatakse sellisel alal ~20 tonni CO₂ ekvivalenti hektari kohta aastas võrreldes kuivendatud rohumaaga.

Lääne-Saksamaa turbasammalde kasvatamise alad on justkui analoog Eesti jääksoodes olevatele turbavõtuaukudele, kus turvast kaevandati kihte läbistavalt paralleelsete tranšeedena, mille vahele jäeti turbatervikud. Kuigi turbakasvatust on ka Saksamaal seni tehtud väikses mahus (Daun et al., 2023) ning praegusel juhul saadav sambla kogus ei asendaks turba kaevandamist, siis tegemist on uuendusliku ning keskkonnasõbraliku majandamisviisiga, mis toetaks Euroopa kliimamäärusega sätestatud õigusnormide täitmist. Varasemate uurimusalade tulemuste näitel saab kinnitada märgalaviljeluse toimimine ning tulemuslikkus, millest ainuüksi ei sõltu inimkond, vaid ka bioloogiline mitmekesisus.

3.2. Lääne-Saksamaa turbasambla kasvatus ning Eesti turbavõtuaukude kasvahoonegaaside voogude võrdlus

Võrreldes Lääne-Saksamaa märgalaviljeluse praktikana turbasammalde kasvatust (Daun et al., 2023) oli Eesti turbaaukude näitel tegemist väiksema aastase sidumisega: 1,25 t C ha/a turbaaukudes (Tabel 7) ning 2,92 t C ha/a turbakasvatases. Lääne-Saksamaal on märgalaviljelusega tegeletud ligi 10 aastat, mis tähendab, et kultiveerimistingimuste optimeerimisel ja pikema vegetatsiooniperioodi tingimustes võidakse saavutada 1,17 t C ha aastase sidumise suurenemine. Võrreldes korrastatud jääksooga (0,2–0,95 t C ha/a) toimub Eesti turbavõtuaukudes süsiniku sidumine (Bianchi et al., 2021). Küll aga on keskkonnategurid määravateks teguriteks voogude kujunemisel. Kuivendatud turbaaladel sõltuvad KHG vood peamiselt maakasutusest. Küll aga on kõige suurem süsinikuheide pärineb põllumajanduslikus kasutuse olevatelt aladelt ning kaevandusaladelt (Wilson et al., 2016). Põllumajanduslike alade süsiniku heide on Wilson et al, 2016 järgi 7,9 t C ha/a.

Nii Saksamaa turbasamblakasvatuse kui jääksoo turbavõtuaugu ühiseks jooneks on sarnane KHG voode dünaamika: soojemal perioodil CO₂ hingamise ja CH₄ emissioonide kasv ning aastaringne madal N₂O tase, mis tuleneb oligotroofsetest keskkonnatingimustest ning madalast lämmastikutasemest. Ökosüsteemi netovahetus (*NEE*) toimub ainult vegetatsiooniperioodil, mis tähendab, detsembrist märtsini oli Eesti turbavõtuaukudes *NEE* 0. Saksamaal on üldjuhul vegetatsiooniperiood pikem, lisaks võib seal sidumine toimuda ka talvel tänu Põhjamere lähedusele, talvel ei esine püsivat lumikatet ning maapind ei külmu ei läbi.

Eesti turbaaukude CO₂ sidumine mais tulenes ebatavaliselt suure päikesepaistelisuse ja optimaalse niiskusraja tõttu. Niisketes tingimustes kasvab turvas oluliselt paremini, kuid suvekuudel hakkas (juunis, juulis, augustis) CO₂ voogu mõjutama kuumalaine, mis takistas pindmises kihis kuumastressis turbasammaldel fotosünteesi.

Tabel 7. Maima, Kõima ja Ess-soo turbavõtuaukude keskmistatud mõõtmistulemused ning aastased KHG vood.

	Re CO ₂ -C (mg C m ⁻² h ⁻¹)	Päevane NEE CO ₂ -C (mg C m ⁻² h ⁻¹)	Aastane NEE CO ₂ -C (mg C m ⁻² h ⁻¹)	CH ₄ (mg C m ⁻² h ⁻¹)	N ₂ O (mg N m ⁻² h ⁻¹)
Jaanuar	1.174	0.00		0.065	-0.002
Veebruar	2.018	0.00		0.127	0.000
Märts	8.007	0.00		0.072	-0.002
Aprill	61.345	-11.18		0.158	0.001
Mai	101.537	-113.28		0.207	0.000
Juuni	163.131	-63.77		0.612	0.000
Juuli	276.01	-65.26		0.508	0.002
August	108.720	-85.38		0.839	0.004
September	64.891	-75.13		0.427	0.004
Oktoober	22.227	-42.60		0.355	0.000
November	11.779	-8.43		0.307	0.000
Detsember	9.202	0.00		0.246	0.001
Aasta keskmine (mg C m ⁻² h ⁻¹)	69.179			0.327	0.001
Aasta voog (t C ha/a)			-1.25	0.03	0.0001

4. Järeldused ja kokkuvõte

Soode roll kliimasüsteemis on kajastatud erinevates allikates, välja on toodud soode olulisus just süsinikuringes, kuid soode tähtsus on tegelikkuses palju laiem. Soode tähtsus seisneb lisaks ka looduslikus mitmekesisuses, reguleerides maastiku tasandil hüdroloogiat ning atmosfääri õhuniiskust. Eelmisel sajandil laialdaselt levima hakanud turbatööstus pani aluse suuremahulisele soode kuivendamisele, mis on paraku tugevalt mõju avaldanud regionaalselt ümbritsevale keskkonnale ning globaalselt kliimale.

Paljudes Euroopa riikides on soode osakaal väike, mahajäetud jääksoid on mitmeid ning korrastamine on ainus võimalus aidata kaasa looduslikule taassoostumisele ning seeläbi luua ökosüsteem, mis oleks sobilik elupaik erinevatele sooliikidele, kuid samas ka süsiniku siduja ning talletaja globaliseerivas maailmas. Viimaste aastakümnete jooksul on jääksode korrastamisel hakatud kasutama paludikultuuri ehk märgalaviljelust, mis on levinud just riikides, kus jääksode korrastamise vajadus on kõige suurem. Märgalaviljeluse kasu on laiahaardeline, kuna see ei aita kaasa ainult soode kiiremale taastumisele, vaid annab võimaluse toota biomassi, mida saab kasutada erinevates tööstussektorites.

Kuigi märgalaviljelus on suhteliselt uus jääksode majandamisviis, siis katsetusi ning uuringuid on selle osas tehtud juba mitmeid, näiteks Euroopas Saksamaal ja Põhja-Ameerikas Kanadas. Eestis on võimaluste all seda mainitud, kuid täpsemaid või suuremaid uuringuid selles osas veel toimunud ei ole. Hiljutise Lääne-Saksamaal läbi viidud uuringu põhjal saab väita, et märgalaviljelusena turbasammalde kasvatus võib olla tulemuslik majandusviis, kuna lisaks bioloogilisele mitmekesisusele muutub varasemalt kuivendatud turbaala taaskord KHG siduvaks keskkonnaks. Eesti mõistes on teema väga vähe uuritud, märgalaviljelusega seotud uuringuid on minimaalselt ning samuti ei leidu parasvöötme lõikes kuigi palju KHG voogusid kajastavaid uuringuid. Küll on teema väga oluline just säästliku arengu vaates ning nõuab täpsemaid uuringuid, mida oleks võimalik võrrelda nii regionaalselt kui kliimavöötme lõikes.

Töö täitis oma eesmärgi, kuna töö sisaldab põhjalikku eestikeelset teaduskirjanduslikku kirjeldust jääksode taastamise viisidest ning välja on toodud märgalaviljeluse põhiprintsiibid ning kasutusviisid, analüüsitud on märgalaviljelusena kasvatavate taimede kasutusvõimalusi ning kasvukohti. Lisaks on kajastatud turbasambla kasvatuses kui märgalaviljeluse analoogi ühe aastased tulemused turbavõtuaukude kohta, mille kohaselt on tegu süsinikku siduva keskkonnaga.

Summary

The role of mires in the climate system is reflected in various sources, highlighting the importance of mires in the carbon cycle. However, the significance of mires extends beyond that. Mires are also important in terms of biodiversity, regulating landscape hydrology, and atmospheric humidity. The extensive peat industry that emerged in the previous century laid the foundation for large-scale drainage of peatlands, which unfortunately has had a strong impact on the surrounding regional environment and the global climate.

In many European countries, the proportion of bogs is small, and there are several abandoned peatlands. Restoration is the only way to contribute to natural peatland regeneration and create an ecosystem suitable for various peatland species, while also serving as a carbon sink and storage in a globalized world. In recent decades, paludiculture, which refers to wetland cultivation, has been used as an alternative for peatland restoration, particularly in countries where the need for peatland restoration is greatest. Paludiculture has broad benefits, as it not only contributes to the rapid recovery of wetlands but also gives an opportunity to produce biomass that can be used in various industrial sectors.

Although wetland farming is a relatively new method of managing peatlands, there have been several experiments and studies conducted on this topic in Europe, such as Germany, and North America, particularly Canada. While the possibilities of paludiculture have been mentioned in Estonia, no specific or extensive studies have been conducted yet. Based on a recent study conducted in western Germany, it can be stated that paludiculture through sphagnum moss cultivation can be an effective economic method. In addition to biodiversity, the previously drained peatland area becomes a carbon-sequestering environment once again. In the context of Estonia, this topic has been minimally researched, with minimal studies related to paludiculture and a scarcity of research on greenhouse gas fluxes in temperate regions. However, this topic is highly important from a sustainable development perspective and requires more precise studies that can be compared both regionally and across climatic zones.

The thesis fulfilled its objective as it contains a comprehensive description of peatland restoration methods in Estonian scientific literature. The main principles and applications of paludiculture have been presented, and the potential uses and growth sites of plants cultivated through paludiculture have been analyzed. Furthermore, the one-year results of cultivating sphagnum moss as an analogue of paludiculture in peat pits have been reflected, indicating that it is a carbon-sequestering environment.

Kasutatud kirjandus

- Abel, S., Haberl, A., & Joosten, H. (2011). A decision support system for degraded abandoned peatlands illustrated by reference to the peatlands of the Russian Federation. *Michael Succow Foundation for Protection of Nature: Greifswald, Germany*, 1–52.
- Abel, S., & Kallweit, T. (2022). Potential Paludiculture Plants of the Holarctic. *Proceedings of the Greifswald Mire Centre 04/2022*, 1–440.
- Alekand, K., & Timmusk, T. (2002). *Vooluveekogude ökoloogiline käsitus*. Eesti Põllumajandusülikooli Kirjastus.
- Baldocchi, D. D., Hincks, B. B., & Meyers, T. P. (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69(5), 1331–1340.
- Basiliko, N., Blodau, C., Roehm, C., Bengtson, P., & Moore, T. R. (2007). Regulation of decomposition and methane dynamics across natural, commercially mined, and restored northern peatlands. *Ecosystems*, 10, 1148–1165.
- Bengtsson, F., Rydin, H., & Hájek, T. (2018). Biochemical determinants of litter quality in 15 species of Sphagnum. *Plant and Soil*, 425, 161–176.
- Bhardwaj, A. K. (1997). *Seasonal variability of net carbon dioxide exchange in a headwater bog, Kenora, Ontario*.
- Bianchi, A., Larmola, T., Kekkonen, H., Saarnio, S., & Lång, K. (2021). Review of greenhouse gas emissions from rewetted agricultural soils. *Wetlands*, 41, 1–7.
- Blankenburg, J., & Tonniss, W. (2004). *Guidelines for Wetland Restoration of Peat Cutting Areas: Results of the BRIDGE-PROJECT*.

- Blievernicht, A., Irrgang, S., Zander, M., & Ulrichs, C. (2013). Sphagnum biomass-the next generation of growing media. *Peatlands International*, 1(2013), 32–35.
- Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., & Stoneman, R. (2016). *Peatland restoration and ecosystem services: Science, policy and practice*. Cambridge University Press.
- Bossio, D., Cook-Patton, S., Ellis, P., Fargione, J., Sanderman, J., Smith, P., Wood, S., Zomer, R., Von Unger, M., & Emmer, I. (2020). The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, 3(5), 391–398.
- Bubier, J. L., Crill, P. M., Moore, T. R., Savage, K., & Varner, R. K. (1998). Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland complex. *Global biogeochemical cycles*, 12(4), 703–714.
- Chapman, S., & Thurlow, M. (1998). Peat respiration at low temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(8–9), 1013–1021.
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., & Ni, J. (2001). Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological applications*, 11(2), 356–370.
- Croft, M., Rochefort, L., & Beauchamp, C. J. (2001). Vacuum-extraction of peatlands disturbs bacterial population and microbial biomass carbon. *Applied Soil Ecology*, 18(1), 1–12.
- Daun, C., Huth, V., Gaudig, G., Günther, A., Krebs, M., & Jurasinski, G. (2023). Full-cycle greenhouse gas balance of a Sphagnum paludiculture site on former bog grassland in Germany. *Science of The Total Environment*, 877, 162943.
- Dyukarev, E., Zarov, E., Alekseychik, P., Nijp, J., Filippova, N., Mammarella, I., Filippov, I., Bleuten, W., Khoroshavin, V., & Ganasevich, G. (2021). The Multiscale Monitoring of Peatland Ecosystem Carbon Cycling in the Middle Taiga Zone of Western Siberia: The Mukhrino Bog Case Study. *Land*, 10(8), 824.

- Escobar, D., Belyazid, S., & Manzoni, S. (2022). Back to the Future: Restoring Northern Drained Forested Peatlands for Climate Change Mitigation. *Frontiers in Environmental Science*, 108.
- Evans, C., Artz, R., Moxley, J., Smyth, M.-A., Taylor, E., Archer, E., Burden, A., Williamson, J., Donnelly, D., & Thomson, A. (2017). *Implementation of an emissions inventory for UK peatlands*. Centre for Ecology and Hydrology.
- FAO. (2017). *Unlocking the potential of soil organic carbon: Outcome document of the Global Symposium on Soil Organic Carbon, 21-23 March 2017, FAO headquarters, Rome, Italy*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Freeman, C., Nevison, G., Kang, H., Hughes, S., Reynolds, B., & Hudson, J. (2002). Contrasted effects of simulated drought on the production and oxidation of methane in a mid-Wales wetland. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(1), 61–67.
- Frilander, P., Leinonen, A., & Alakangas, E. (1996). Peat production technology. *Peatlands in Finland*, 99–106.
- Gaudig, G., Fengler, F., Krebs, M., Prager, A., Schulz, J., Wichmann, S., & Joosten, H. (2014). Sphagnum farming in Germany-a review of progress. *Mires and Peat*, 13(8), 1–11.
- Gaudig, G., Krebs, M., & Joosten, H. (2017). Sphagnum farming on cut-over bog in NW Germany: Long-term studies on Sphagnum growth. *Mires & Peat*, 20.
- Gaudig, G., Krebs, M., Prager, A., Wichmann, S., Barney, M., Caporn, S., Emmel, M., Fritz, C., Graf, M., & Grobe, A. (2017). Sphagnum farming from species selection to the production of growing media: A review. *Mires and Peat*.
- Gebhardt, S., Fleige, H., & Horn, R. (2010). Shrinkage processes of a drained riparian peatland with subsidence morphology. *Journal of soils and sediments*, 10(3), 484–493. <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0130-9>

- Gilmer, A., Ward, S., Holden, N., Brebreton, A., & Farrell, E. (1998). *Restoration peatland carbon sequestration model: An aid in carbon cycling research*. 197–201.
- Grootjans, A. P., Van Diggelen, R., & Bakker, J. P. (2012). Restoration perspectives—Restoration of mires and grasslands. J. Van Andel & J. Aronson, *Restoration ecology: The new frontier* (1k 111–123). John Wiley & Sons.
- Guéné-Nanchen, M., Hugron, S., & Rochefort, L. (2019). Harvesting surface vegetation does not impede self-recovery of Sphagnum peatlands. *Restoration Ecology*, 27(1), 178–188.
- Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebisch, F., & Couwenberg, J. (2020). Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nature communications*, 11(1), 1644.
- Holden, J. (2006). Sediment and particulate carbon removal by pipe erosion increase over time in blanket peatlands as a consequence of land drainage. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(F2). <https://doi.org/10.1029/2005JF000386>
- Hugron, S., & Rochefort, L. (2018). Sphagnum mosses cultivated in outdoor nurseries yield efficient plant material for peatland restoration. *Mires and Peat*, 20(11), 1–6.
- Humphrey, V., Berg, A., Ciais, P., Gentine, P., Jung, M., Reichstein, M., Seneviratne, S. I., & Frankenberg, C. (2021). Soil moisture–atmosphere feedback dominates land carbon uptake variability. *Nature*, 592(7852), 65–69.
- Ilomets, M. (1996). Temporal changes of Estonian peatlands and carbon balance. *Estonia in the system of global climate change. Institute of Ecology, Tallinn, Publication, 4*, 65–74.

- Ilomets, M. (1998). Sood-meie kaasavara Euroopa Liitu. *Eesti Loodus*, 5(6), 220–223.
http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_loodus/EL/vanaweb/9805/sood.html (viimati kasutatud 28.10.2022).
- Ilomets, M. (2005). Kas turvas on taastuv loodusvara? *Eesti Loodus*, 8.
http://eestiloodus.horisont.ee/artikkel1189_1178.html (viimati kasutatud 28.10.2022).
- Jauhiainen, J., Heikkinen, J., Martikainen, P. J., & Vasander, H. (2001). CO₂ and CH₄ fluxes in pristine peat swamp forest and peatland converted to agriculture in Central Kalimantan, Indonesia. *International Peat Journal*, 11, 43–49.
- Joosten, H., & Clarke, D. (2002). Wise use of mires and peatlands. *International mire conservation group and international peat society*, 304.
- Joosten, H., Gaudig, G., Tanneberger, F., Wichmann, S., & Wichtmann, W. (2016). *Paludiculture: Sustainable productive use of wet and rewetted peatlands* (Kd 10). Cambridge University Press, Cambridge, UK. DOI.
- Joosten, H., Sirin, A., Couwenberg, J., Laine, J., & Smith, P. (2016). *The role of peatlands in climate regulation* (Kd 66). Cambridge University Press Cambridge, UK.
- Joosten, H., Tanneberger, F., & Moen, A. (2017). *Mires and peatlands of Europe*.
- Joosten, H., Tapio-Biström, M.-L., & Tol, S. (2012). *Peatlands: Guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- Järvpöld, R. (2020). *Kasvuhoonegaaside vood ja neid mõjutavad keskkonnategurid päiderooga taimestatud Keressaare jääkturbaalal. Bakalaureusetöö*.
- Jürgenson, M. (2020). *Süsihappegaasi- ja metaanivoog kodusookaasikute mullast. Bakalaureusetöö*.

- Karlsons, A., Tomsone, S., Lazdāne, M., & Osvalde, A. (2021). *Effect of fertilization on growth of lingonberry (Vaccinium vitis-idaea L.)*.
- Karofeld, E. (2006). Jääksood soodeks tagasi. *Eesti Loodus*, 6, 16–20. http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_loodus/artikkel1513_1508.html (viimati kasutatud 28.10.2022).
- Karofeld, E. (2011). Tingimuste loomine taassoostumiseks. Kogemusi maailmast. J. Paal (Toim), *Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine*. Keskkonnainvesteeringute Keskus.
- Keskkonnaministeerium. (2015). *Kaistavate soode tegevuskava 2016-2023*. <https://envir.ee/media/1755/download> (viimati kasutatud 29.10.2022).
- Keskkonnaministeerium. (2022). *Turvas*. <https://envir.ee/ringmajandus/maapou/turvas> (viimati kasutatud 29.10.2022).
- Kimmel, K., Kull, A., Salm, J.-O., & Mander, Ü. (2010). The status, conservation and sustainable use of Estonian wetlands. *Wetlands ecology and management*, 18, 375–395.
- Kirschbaum, M., Grace, P., Keenan, R., Landsberg, J., McKeon, G., Moore, A., Paul, K., Pepper, D., Probert, M., & Sands, P. (2001). The control of ecosystem carbon dynamics by the linkages between above and belowground processes. *Net Ecosystem Exchange*, 82–88.
- Kramer, K., Leinonen, I., Bartelink, H., Berbigier, P., Borghetti, M., Bernhofer, C., Cienciala, E., Dolman, A., Froer, O., & Gracia, C. (2002). Evaluation of six process-based forest growth models using eddy-covariance measurements of CO₂ and H₂O fluxes at six forest sites in Europe. *Global Change Biology*, 8(3), 213–230.
- Krebs, M., Gaudig, G., & Joosten, H. (2012). *Sphagnum farming on bog grassland in Germany—first results*. Proceedings of the 14th International Peat Congress.

- Laasimer, L., & Masing, V. (1995). Taimestik ja taimkate.—Rmt-s: Raukas, A.(koostaja). *Eesti. Loodus. Valgus, Eesti Entsüklopeediakirjastus, Tallinn*, 364–396.
- Leppä, K., Korkiakoski, M., Nieminen, M., Laiho, R., Hotanen, J.-P., Kieloaho, A.-J., Korpela, L., Laurila, T., Lohila, A., & Minkkinen, K. (2020). Vegetation controls of water and energy balance of a drained peatland forest: Responses to alternative harvesting practices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 295, 108198.
- Lindsay, R. (2016). *Peatland classification*.
- Lode, E. (2001). *Natural mire hydrology in restoration of peatland functions*. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Lode, E. (2011). Jääksood-Jääksode tüübid ja arengusuunad. J. Paal (Toim), *Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine* (lk 45–50). Keskkonnainvesteeringute Keskus.
- Lovett, G. M., Cole, J. J., & Pace, M. L. (2006). Is net ecosystem production equal to ecosystem carbon accumulation? *Ecosystems*, 9, 152–155.
- Maanso, H. (2015). *Kasvuhoonegaaside emissioon kõdusoometsadest. Magistritöö*.
- Maddison, M., Veber, G., & Kull, A. (2021). *Net ecosystem exchange of CO₂ and ecosystem respiration in two bogs in Estonia along disturbance gradient*. EGU21-12999.
- Masing, V. (1988a). Eesti soode kaitse-Soode kaitsmise vajadusest ja kaitse korraldamise kujunemisloost. U. Valk (Toim), *Eesti sood* (lk 224). Valgus.
- Masing, V. (1988b). Soode mõiste, levik ja väärtus. U. Valk (Toim), *Eesti sood* (lk 7). Valgus.
- Minayeva, T., Bragg, O., Cherednichenko, O., Couwenberg, J., Duinen, G. A. (Gert-J., Giesen, W., Grootjans, A. P., Grundling, P., Nikolaev, V., & van der Schaaf, S. (2008). Peatlands and biodiversity. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change*, 60–98.

- Minkkinen, K., Laine, J., Shurpali, N. J., Mäkiranta, P., Alm, J., & Penttilä, T. (2007). *Heterotrophic soil respiration in forestry-drained peatlands*.
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G., Zhang, L., & Anderson, C. J. (2009). *Wetland ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Money, R. P. (2004a). End-point options for wetland restoration – habitat creation from former commercial peat workings. J. Blankenburg & W. Tonnis, *Guidelines for Wetland Restoration of Peat Cutting Areas: Results of the BRIDGE-PROJECT*.
- Money, R. P. (2004b). Starting conditions for restoration following commercial peat extraction. J. Blankenburg & W. Tonnis, *Guidelines for Wetland Restoration of Peat Cutting Areas: Results of the BRIDGE-PROJECT*.
- Mägi, M. (2021). *Süsihappegaasi- ja metaanivoog kõdusookaasikute mullast. Bakalaureusetöö*.
- Mäkiranta, P., Riutta, T., Penttilä, T., & Minkkinen, K. (2010). Dynamics of net ecosystem CO₂ exchange and heterotrophic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(12), 1585–1596.
- Myhre, G., Shindell, D., & Pongratz, J. (2014). *Anthropogenic and natural radiative forcing*.
- Ojanen, P., & Minkkinen, K. (2020). Rewetting offers rapid climate benefits for tropical and agricultural peatlands but not for forestry-drained peatlands. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(7), e2019GB006503.
- Orru, M., Liibert, S., & Elevant, N. (2004). *Pärnu maakonna Rääma turbamaardla lääneosa geoloogilise uuringu aruanne*. Eesti Geoloogiakeskus. <https://fond.egt.ee/fond/egf/7567> (viimati kasutatud 28.10.2022).

- Paal, J. (Toim). (2011). *Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine*. Keskkonnainvesteeringute Keskus.
- Paal, J., Ilomets, M., Karofeld, E., Truus, L., Leibak, E., Lode, E., Pajula, R., Pikka, J., & Kull, A. (2016). *Korrastamiseks prioriteetsete jääksoode valik ja korrastamise tulemuste hindamine. Metoodiline juhend*. https://loodusveeb.ee/sites/default/files/inline-files/jaaksoode_hindamise_metoodika_140516_loplik.pdf (viimati kasutatud 28.10.2022).
- Paal, J., & Leibak, E. (2013). Eesti soode seisund ja kaitstus. *Tartu: AS Regio, 204*.
- Paal, J., Lode, E., & Triisberg, T. (2011). Jääksood-Jääksoo ja turba jääklasund. J. Paal (Toim), *Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine* (lk 44). Keskkonnainvesteeringute Keskus.
- Page, S. E., Morrison, R., Malins, C., Hooijer, A., Rieley, J. O., & Jauhiainen, J. (2011). Review of peat surface greenhouse gas emissions from oil palm plantations in Southeast Asia. *ICCT white paper, 15*, 1–78.
- Paidla, A. (1975). Mis saab jääksoodest. *Eesti loodus, 11*, 617–623.
- Pakalne, M., Etzold, J., Ilomets, M., Jarašius, L., Pawlaczyk, P., Bociag, K., Chost, I., Cieśliński, R., Gos, K., & Libauers, K. (2021). *Best Practice Book for Peatland Restoration and Climate Change Mitigation. Experiences from LIFE Peat Restore Project. University of Latvia, 184 pp*.
- Pikk, J., & Valk, U. (1995). *Jääksoode metsastamiskatsete tulemused Eestis.[Käsikiri.]*.
- Price, J. (1997). Soil moisture, water tension, and water table relationships in a managed cutover bog. *Journal of Hydrology, 202*(1–4), 21–32. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00037-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00037-1)

- Raadla, K., & Kõpp, V. (2011). Jääksoode kasutamine turbakaevandusalade kuivendusvee puhastamiseks, Näited puhastuslodudest, Vee kvaliteedi seire puhastuslodudes. J. Paal (Toim), *Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine* (lk 111–119). Keskkonnainvesteeringute Keskus.
- Ramsar Convention Secretariat. (2016). An introduction to the Ramsar Convention on Wetlands. *Ramsar Handbooks*.
- Rankin, T. E., Roulet, N. T., & Moore, T. R. (2022). Controls on autotrophic and heterotrophic respiration in an ombrotrophic bog. *Biogeosciences*, *19*(13), 3285–3303.
- Regina, K., Budiman, A., Greve, M. H., Grønlund, A., Kasimir, Å., Lehtonen, H., Petersen, S. O., Smith, P., & Wösten, H. (2016). GHG mitigation of agricultural peatlands requires coherent policies. *Climate policy*, *16*(4), 522–541.
- Rocheffort, L., & Lode, E. (2006). Restoration of degraded boreal peatlands. *Boreal peatland ecosystems*, 381–423.
- Rochette, P. (2011). Towards a standard non-steady-state chamber methodology for measuring soil N₂O emissions. *Animal Feed Science and Technology*, *166*, 141–146.
- Salm, J., Soosaar, K., Maddison, M., Tammik, S., & Mander, Ü. (2010a). Kasvuhoonegaasid ja süsinikukaod Eesti soodest. *Eesti Loodus*, *9*, 14–19. http://www.eestiloodus.ee/artikkel3455_3441.html
- Salm, J., Soosaar, K., Maddison, M., Tammik, S., & Mander, Ü. (2010b). Kasvuhoonegaasid ja süsinikukaod Eesti soodest. *Eesti Loodus*, *9*, 14–19. http://www.eestiloodus.ee/artikkel3455_3441.html (viimati kasutatud 25.05.2023).
- Salm, J.-O., Maddison, M., Tammik, S., Soosaar, K., Truu, J., & Mander, Ü. (2012). Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia. *Hydrobiologia*, *692*(1), 41–55. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0934-7>

- Schäfer, A. (2012). Paludiculture for biodiversity and climate–economics of rewetted peatlands. *on Biodiversity and Climate Change–Science, Practice and Policy–*, 63.
- Silvola, J., Alm, J., Ahlholm, U., Nykaenen, H., & Martikainen, P. J. (1996). The contribution of plant roots to CO₂ fluxes from organic soils. *Biology and fertility of Soils*, 23, 126–131.
- Soosaar, K. (2010). Greenhouse gas fluxes in rural landscapes of Estonia. *Tartu Ülikooli Kirjastus, Doktoritöö*. <https://dspace.ut.ee/handle/10062/15924>
- Szafranek-Nakonieczna, A., & Bennicelli, R. P. (2010). Ability of Peat Soil to Oxidize Methane and Affect Temperature and Layer Deposition. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(4).
- Succow, M. (1988). Landschaftsökologische Moorkunde, VEB G. Fischer-Verlag Jena.
- Succow, M., & Jeschke, L. (1986). Moore in der Landschaft.–268 S. Thun, Frankfurt/M.
- Zhang, Y., Xu, M., Chen, H., & Adams, J. (2009). Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: Effects of ecosystem type, geographical location and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 18(3), 280–290.
- Tanneberger, F., Appulo, L., Ewert, S., Lakner, S., Brolcháin, Ó., Peters, J., & Wichtmann, W. (2020). *The power of nature-based solutions: How peatlands can help us to achieve key EU sustainability objectives. Advanced Sustainable Systems*.
- Tanneberger, F., Birr, F., Couwenberg, J., Kaiser, M., Luthardt, V., Nerger, M., Pfister, S., Oppermann, R., Zeitz, J., & Beyer, C. (2022). Saving soil carbon, greenhouse gas emissions, biodiversity and the economy: Paludiculture as sustainable land use option in German fen peatlands. *Regional Environmental Change*, 22(2), 69.

- Tanneberger, F., & Wichtmann, W. (2011). *Carbon credits from peatland rewetting-climate-biodiversity-land use*.
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., & Fiedler, S. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators*, 109, 105838.
- Truus, L., Ilomets, M., Pajula, R., Purre, A.-H., & Sepp, K. (2018). *Sood kliima võtmes*. 28. <https://life-peat-restore.eu/ee/wp-content/uploads/sites/8/2018/02/sood-kliima-votmes.pdf> (viimati kasutatud 29.10.2022).
- Valk, U. (Toim). (1988). *Eesti sood*. Valgus.
- Van Andel, J., & Aronson, J. (2012). *Restoration ecology: The new frontier*. John Wiley & Sons.
- Vasander, H., & Kettunen, A. (2006). Carbon in boreal peatlands. *Boreal peatland ecosystems*, 165–194.
- Veber, G., Kull, A., & Paal, J. (2021). *Spatio-temporal variability of greenhouse gases along drainage gradient in 17 peatlands across Estonia*. 120–126.
- Waddington, J., & McNeil, P. (2002). Peat oxidation in an abandoned cutover peatland. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(3), 279–286.
- Wheeler, B. D., Shaw, S., Fojt, W. J., & Robertson, R. A. (1995). *Restoration of temperate wetlands*. Wiley.
- Wheeler, B., & Shaw, S. (1995). *Restoration of Damaged Peatlands. With particular reference to lowland raised bogs affected by peat extraction*. HMSO.

- Wichmann, S., Prager, A., & Gaudig, G. (2017). Establishing Sphagnum cultures on bog grassland, cut-over bogs, and floating mats: Procedures, costs and area potential in Germany. *Mires & Peat*, 20.
- Wichtmann, W., & Joosten, H. (2007). Paludiculture: Peat formation and renewable resources from rewetted peatlands. *IMCG Newsletter*, 3(2007), 24–28.
- Wichtmann, W., Schröder, C., & Joosten, H. (2016). *Paludiculture-productive use of wet peatlands*.
- Wilson, D., Blain, D., Couwenberg, J., Evans, C. D., Murdiyarso, D., Page, S., Renou-Wilson, F., Rieley, J., Sirin, A., & Strack, M. (2016a). *Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils*.
- Yu, Z. (2012). Northern peatland carbon stocks and dynamics: A review. *Biogeosciences*, 9(10), 4071–4085.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ülle Kass,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **„Jääksoode korrastamine ja märgviljelus ning selle mõju kasvuhoonegaaside voole“**, mille juhendaja on **Ain Kull**, 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.

Ülle Kass

29.05.2023