

Lõppversioon 20.02.2023

**Taastamistööde mõjud Pääsküla raba taastamisala
süsiniku voogudele**

Ekspert hinnang



ELF Ring OÜ

Tartu

2022

Üldinfo

Töö nimetus:	Pääsküla raba kasvuhoonegaaside emissiooni prognoos
Töö eesmärk:	Töö eesmärgiks on Pääsküla raba kasvuhoonegaaside emissiooni prognoos lähtudes 2021. a koostatud Pääsküla rabakoosluse režiimi taastamise kavast (Tallinna uuringute infosüsteem) ja Pääsküla Pääsküla raba kaitseala kaitsekorralduskava 2022-2031 eelnõus (seisuga 23. aug 2022) joonisel 18 toodud võimalike sookoosluste ala piiridest. Prognoositav periood on 2023-2032. Prognoosi koostamisel käsitletakse kliimamuutustega seonduvaid aspekte pikemas perspektiivis. Töö tulemus aitab tõsta rabakoosluse taastamise alast teadlikkust sh kasvuhoonegaaside vähendamise võimaluste osas ja võimaldab korrigeerida kasvuhoonegaaside heite inventuuri andmestikku.
Töö tellija:	Tallinna Strateegiakeskus Registrikood: 75023817 Aadress: Vabaduse väljak 7, 15199 Tallinn E-post: strateegiakeskus@tallinnlv.ee
Kontaktisik:	Liis Vahter Kontakt: tel: 58 03 1009 E-post: Liis.Vahter@tallinnlv.ee
Töö täitja:	ELF Ring OÜ Registrikood: 11043521 Aadress: Staadioni 67, Tartu 51008 E-post: kadrik@elfond.ee
Projektijuht:	Jüri-Ott Salm E-post: jott@elfond.ee Kontakt: tel: 5295933
Töö koostajad	Jüri-Ott Salm – keskkonnaekspert, PhD E-post: jott@elfond.ee Martin Maddison – keskkonnaekspert, PhD E-post: martin.maddison@ut.ee Kuno Kasak – keskkonnaekspert, PhD E-post: kuno.kasak@ut.ee
Esikaane foto:	Pääsküla raba taastamisala. Maa-amet, 2022.

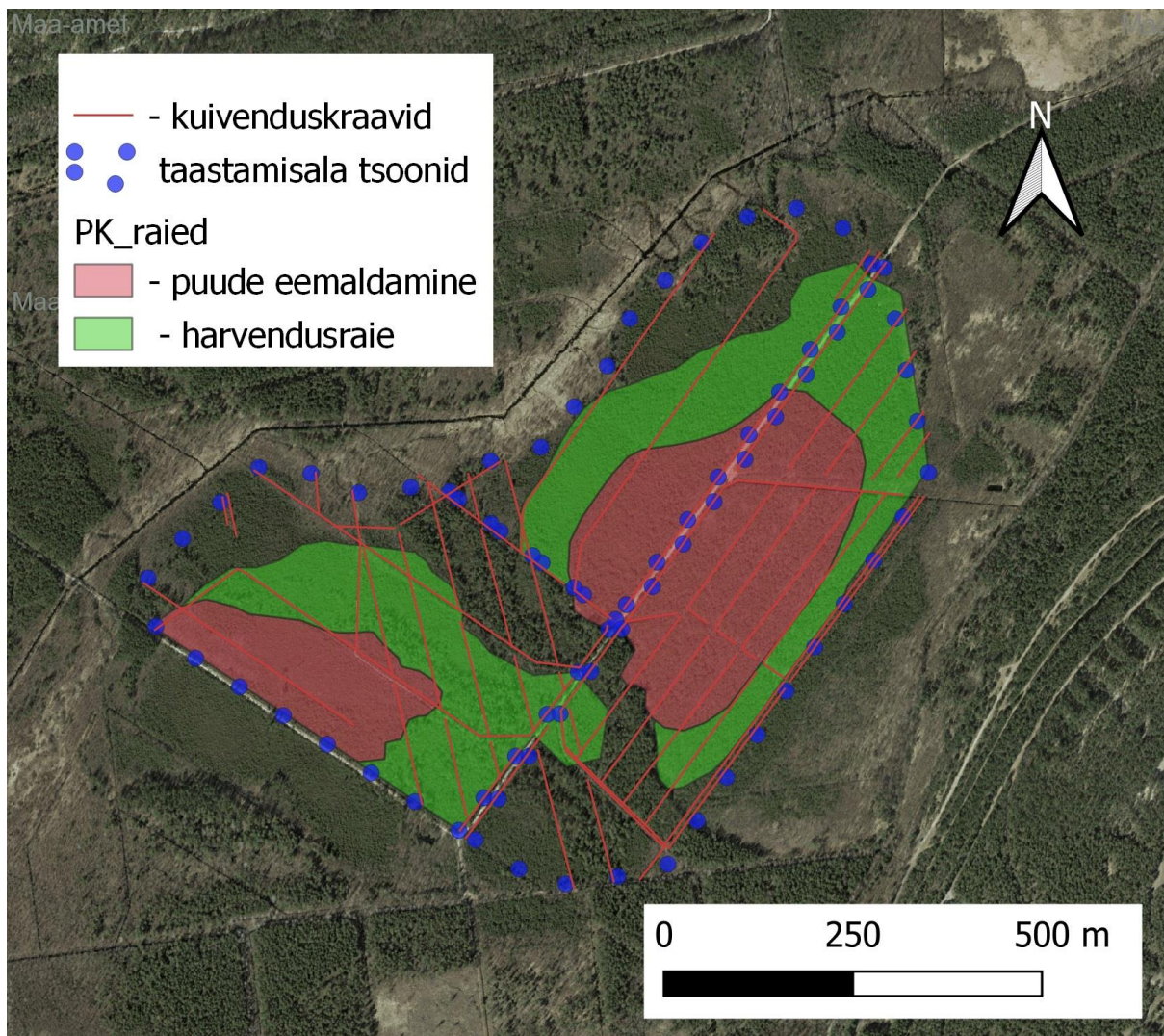
Sisukord

Sissejuhatus	4
Soode süsinikubilanss	4
Veerežiimi taastamise võimalik mõju soode taastumisele	10
Süsiniku ja kasvuhoonegaaside (CO₂ ja CH₄) voogude mõõtmise metoodika	11
Ülevaade Eestis või Eestile sarnastes tingimustes teostatud uuringutest ja nende tulemused	14
Veerežiim ja taastamise mõju	23
Metsa kasvu parameetrid kuivendatud ja looduslikes soodes	24
Kliimamuutused ja võimalikud mõjud	25
Kasvuhoonegaaside emissiooni muutuste prognoos	28
Taastamiseelne kasvuhoonegaaside bilanss.....	29
Taastamistööde järgne KHG ja C bilanss	31
Süsinikdioksiid	32
Metaan	33
Lahustunud orgaaniline süsinik	33
Puistusse seotud süsinik	34
Koondbilanss.....	36
Kokkuvõte	37
Kasutatud kirjandus	40
Lisa 1. Metaanivoog (kg CH ₄ ha ⁻¹ a ⁻¹) kõdusoometsades ja kuivendusmõjuga, korrastatud ja looduslikes rabades (Järveoja (2011), Salm (2012), Maanso (2015), Kull (2016), Mander jt. (2017), Mägi (2021), Veber jt. (2021), Rezapour jt. (2022)	44

Sissejuhatus

Töö eesmärgiks on Pääsküla raba kasvuhoonegaaside emissiooni prognoos lähtudes 2021. a koostatud Pääsküla rabakoosluse veerežiimi taastamise kavast ja Pääsküla raba kaitseala kaitsekorralduskava 2022-2031 eelnõus kavandatud sootaastamisala piiridest (joonis 1). Taastamine loob eeldused 47 ha-l sookoolsuste taastumiseks.

Prognoosi koostamisel käsitletakse ka kliimamuutustega seonduvaid aspekte. Töö tulemus aitab tõsta rabakoosluse taastamise alast teadlikkust sh kasvuhoonegaaside vähendamise võimaluste osas ja võimaldab täpsustada kasvuhoonegaaside heite inventuuri andmestikku tuginevalt Eestis ja Eestile lähedastes tingimustele tehtud teadusuuringutele.



Joonis 1. Pääsküla taastamisala, selle kuivenduskraavid ja kavandatud raietööd

Soode süsinikubilanss

Loodusliku sooökosüsteemi tähtsaim talituslik iseärasus on turba teke ja ladestumine (Paal jt. 1999). Boreaalsed looduslikud sood on pikaajaliselt akumulëerinud süsinikku ja lämmastikku ning mõjutavad kliimat globaalses ulatuses, sidudes süsinikdioksiidi (CO_2) ja emiteerides atmosfääri metaani (CH_4) ning vähesel määral naerugaasi N_2O (Minkkinen jt. 2002).

Täiendavalt toimub soodest süsiniku väljakanne veega orgaanilise lahustunud süsinikuna (DOC), mis veekogudes osaliselt oksüdeeritakse CO₂ks ning osa ladestub setetes.

Turvas koosneb taime- ja loomajäänuste osadest, mis on ladestunud veega küllastunud tingimustes – seetõttu ei ole nende lagunemine olnud täielik (Rydin ja Jeglum 2006). Põhjamaade tingimustes koosneb turvas (kuivmass) 80-90% ulatuses orgaanilisest ainest (Rydin ja Jeglum 2006). Häiringute tõttu võib orgaanilise aine osakaal väheneda, seda näiteks põllumajanduslikus kasutuses turvasmuldadel (Berglund 2011). Turba kuivainest ligikaudu 50% moodustab süsinik.

Taimejäänused pärinevad enamasti surnud samblast ja maapinnal kasvavatest taimedest, puhma- ja puurinde varisest ning maapinnast allpool paiknevatest taimeosakestest (Päivänen ja Hanell 2012). Samuti võib turvas sisaldada elusaid organisme - elavaid juuri, eoseid ja mikroorganisme (viimaseid ka sügavates turba kihtides) (Päivänen ja Hanell 2012). Looduslikus soos sisaldab turvas enda mahust 80-97% ulatuses vett - seega on tegemist ka suure veereservuaariga (Päivänen 1973).

Süsinikdioksiid (CO₂). Soodes toimub CO₂ sidumine atmosfäärist fotosünteesi abil. Antud protsess sõltub valguse kättesaadavusest, toimudes soo pinnakihi või puistus. Üks osa eraldunud süsinikust satub suurenevasse taimede biomassi (primaarne produktsioon), teine osa satub soontaimede juurte või varisena katotelmi (anaeroobsesse turba kihti) ja moodustab hästilagunevat orgaanilist ainest (Byrne jt. 2004) või turvast. CO₂ eraldub soodest või turbamaadelt peamiselt turba ja varise lagunemise tulemusena, samuti metsatulekahjudes ning erosiooni tulemusena (Alm jt. 2007b), oluline on ka taimede hingamisega kaasnev CO₂ emissioon atmosfääri (Byrne jt. 2004). Seondult veetaseme langusega võib soode ja turbamaadelt lähtuv emissioon suurened (Alm jt. 2007a, Alm jt. 2007b), sest suurenevad aeroobne pinnase kiht ja selles paikneva orgaanilise ainese lagunemine (Bubier jt. 1999). Viimane korreleerub hästi veetasemega ja pinnatemperatuuriga (Salm jt. 2012).

Metaan (CH₄). Metaani tekkemehhanism on seotud pinnases toimuva mikroobse tegevusega anaeroobsetes tingimustes, samas tarbitakse seda aeroobses keskkonnas (Edwards jt. 1998). CH₄ tekib märgaladel metaani tekitavate bakterite abil toimuva orgaanilise aine anaeroobse lagunemise tulemusena, metaan liigub atmosfääri difusiooni, pulbitsemise (gaasimullidena) või soontaimede poolt (Strack jt. 2003). Soopinnalt mõõdetud CH₄ emissiooni ei pruugi kajastada kogu metaani kogust, mis tekib katotelmis – atmosfääri jõudva metaani hulk sõltub CH₄ oksüdeerumise määrast metaani elutegevuseks tarvitavate bakterite poolt soo pealmises aeroobses kihis (vt. ka Frenzel ja Karofeld 2000). Märgalad on suurimad looduslikud allikad metaani atmosfääri paiskamisel.

Metaani (CH₄) emissiooni määr sõltub olulisel määral veetasemest ning selle muutustest kuivenduse või kuivemate kliimaolude tõttu (Salm jt. 2012). Metaani emissioonis on oluline osa taimestikul – soontaimede esinemise suurenemisega kasvab emissiooni koguhulk (Strack jt., 2003, Salm jt. 2012) tänu taimede poolt õhkkoe abil pakutavale gaasi transpordile katotelmist akrotelmi (Frenzel ja Karofeld, 2000).

Vees lahustunud orgaaniline süsinik (DOC) on defineeritud kui orgaaniline aine, mis läbib Ø 0,45 µm poorisuurusega filtri (Strack jt. 2015). DOC tekib orgaanilise aine, sh turba lagunemise käigus. Sood on suurimad vees lahustunud orgaanilise süsiniku allikad,

kuivendamise tagajärjel intensiivistunud turba lagunemise käigus DOC kontsentratsioon suureneb ning toimub selle väljakanne veekogudesse (Kull 2016).

Põhja laiuskraadidel paiknevatel turbaaladel on akumulunud hinnanguliselt kolmandik muldades paiknevast süsinikust (Gorham, 1991), omakorda moodustab nende maapealses biomassis ja pinnases talletunud orgaaniline aine ligikaudu 20% kogu maismaal paiknevatest süsiniku varudest (Post jt. 1982; Janzen, 2004). Pikaajaline süsiniku akumulatsioon soodes on Eestile sarnastes kliimaatilistes tingimustes toimunud kiirusega 0,19 kuni 0,23 t C ha⁻¹ a⁻¹ (andmed vastavalt Turunen jt. 2002 Soome kohta ja Gorham, 1991 boreaalse vööndi kohta). Spetsiifilisemalt on Turunen jt. (2002) andnud hinnangu ka Lõuna-Soomes paiknevate rabade ja siirde- või madalsoode kohta, vastavalt 0,29 ja 0,19 t C ha⁻¹ a⁻¹.

Lühiajalises perspektiivis, tuginedes iga-aastastele gaasivoogudele, näitavad Wilson jt. (2016) kogutud andmed, kus käsitleti CO₂, CH₄ ja DOCi voogusid, et sood võivad olla nii süsiniku sidujaks kui ka allikaks - boreaalse vööndi soodes olenevalt ala toitelisusest hinnati sidumiseks keskmistatult 0,22 kuni 0,33 t C ha⁻¹ a⁻¹, seevastu parasvöötmes kogutud mõõtmisandmed samas näitasid heidet 0,10 kuni 0,96 t C ha⁻¹ a⁻¹. Viimane ilmestab asjaolu, et sood võivad olla lühiajaliselt ka süsiniku emiteerijad, näiteks kuivema ja soojema ilmastiku korral ning põlengute tagajärjel.

Metaani emiteerub boreaalses ja parasvöötmes looduslikelt aladelt väikeses koguses - toitainerikkamatelt aladelt 0,19 kuni 0,29 t ha⁻¹ a⁻¹ ja toitainevaesematelt muldadelt 0,05 kuni 0,12 t ha⁻¹ a⁻¹ (Wilson jt. 2016). Antud väärtused on samas suurusjärgus Eestis teostatud mõõtmistega - Salm jt. (2012) said siirdesoods ja rabades teostatud mõõtmistele tuginevalt 0,09 (0,03 kuni 0,16) t CH₄ ha⁻¹ a⁻¹ (esitatud mediaani väärtused ja uurimisalade vastavate väärtuste ulatus). Taandades metaani süsinikule, viiakse metaani emiteerimisega soodest välja Wilson jt. (2016) andmete põhisel 0,04 kuni 0,22 t ha⁻¹ a⁻¹. DOCina viiakse soodest välja 0,08 kuni 0,26 t C ha⁻¹ a⁻¹ (Wilson jt. 2016).

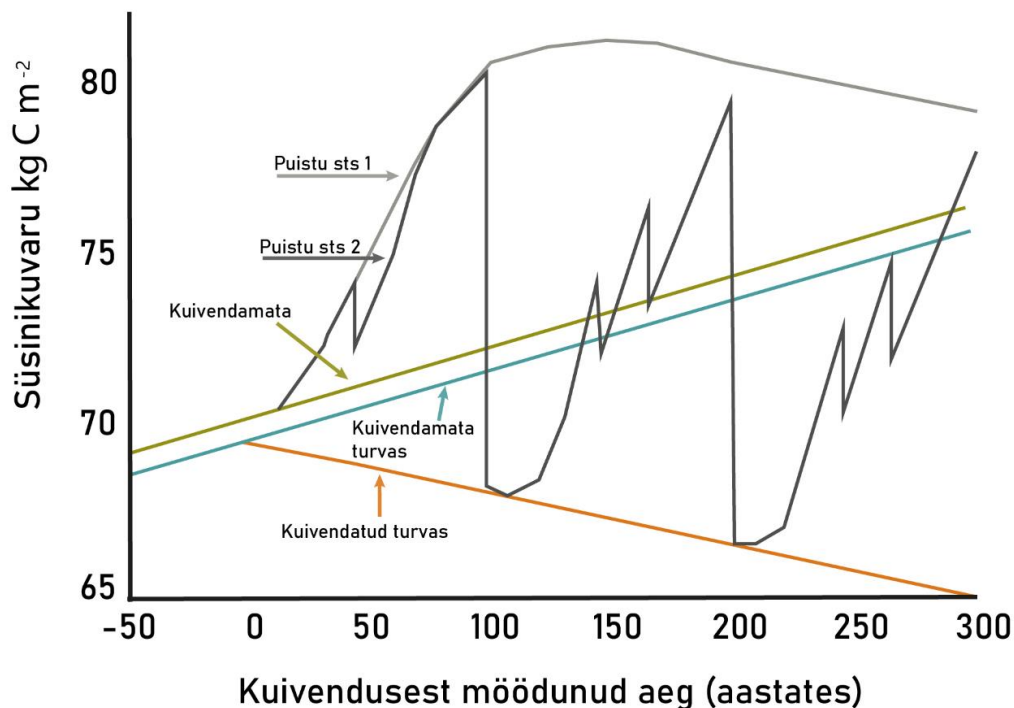
Juhul, kui soode looduslik seisund muutub inimtegevuse või kliimamuutuste tõttu, muutub ka soode kasvuhoonegaaside bilanss. CO₂, DOCi ja N₂O emissiooni suurenemise peamiseks põhjuseks on kuivendus.

Järjest olulisemale kohale on tõusnud soode ökosüsteemi teenused¹ mitte üksnes süsiniku sidujana vaid ka nende hoidjana – IPCC 2022 a. kliimamuutuste aruandes esitatud hinnangu põhjal realiseerub kliima muutuste jätkumisel suure tõenäosusega risk, et turbaalad muutuvad kuivemaks ja seeläbi vabaneb atmosfääri täiendav kogus CO₂-te (protsess, mida pole kliimamuutuste mudelites veel arvestatud) (Parmesan jt. 2022, vt ka Suškevičs jt. 2015, Loisel jt. 2021). IPCC aruandes (Parmesan jt. 2022) viidatud uuringutele tuginevalt on esile toodud, et globaalseks väljakutseks on turbaalade muutumine süsiniku sidujast selle allikaks veetaseme langemisel, sh pööramata tähelepanu nende kasutusele või staatusele. Vastava trendi tõenäosust on hinnatud eelviidatud IPCC aruandes keskmiseks ka parasvöötmes ja boreaalses vöötmes. Sellele viitavad mitmed uurimistööd, kus on välja toodud, et aasta

¹ Ökosüsteemi teenustena mõistame siinkohale looduse hüvesid – ökosüsteemi toimimisel tekkivaid hüvesid, mis toetavad inimkonna heaolu (toidu ja veega varustus, füüsiline ja vaimne tervis, kultuuriidentiteet jm) ja elukeskkonna säilimist. Vastav määratlus on antud keskkonnaagentuuri tehtud töö raames: <https://keskkonnaagentuur.ee/elme#kossteemide-seisun> (vaadatud 17.08.2021)

keskmise õhutemperatuuri tõus on viinud ulatuslikule veetaseme alanemisele ka rikkumata aladel, turbasammalde kuivamise ja suremiseni ning tulekahjude intensiivsuse ja sageduse suurenemiseni, mis läbi süsinik viiakse ökosüsteemist välja. Teisalt näitavad mõned IPCC aruandes viidatud uurimistulemused Põhja-Ameerikast, et taimede kasvuperioodi pikenedamine ja soojem ning niiskem kliima viib süsiniku akumulatsioonide suurenemisele.

Lisaks turbasse ladestuva süsiniku lisandumisele on oluline osa soode süsinikubilansis ka biomassi, eelkõige **puistus lade** ladestuva süsiniku osakaal (vt ka Ojanen ja Minkkinen 2020). Olenevalt metsa kasutusest sõltub, kas aladelt viiakse puitsesse biomassi seotud süsinikku raiete tulemusena välja või ladestub osa soometsast selle suuremise järgselt puiduturbana pinnasesse. Ka kuivendatud turbaalad võivad olla puistu juurdekasvu toel süsiniku sidujad, kuid pikaajaliselt võivad need ökosüsteemid olla süsiniku allikaks (vt joonis 2). Turbapinnasesse seotud süsiniku maht väheneb madalast veetasemest johtuva turba mineraliseerumise tulemusel ja raiete tõttu vabaneb puistus seotud süsinik atmosfääri – seda puittoodete suhteliselt lühikese eluea jooksul. Soome Loodusvarade Instituudi (LUKE) rakendusuuringu SOMPA raames kogutud andmete põhjal leiti, et soometsade kuivendamisel on toitainerikkamates kasvukohatüüpides turba lagunemisest tingitud süsinikuheide $4\text{--}5\text{ t ha}^{-1}$, toitaineriikamatelt $2,9\text{--}3,7\text{ t ha}^{-1}$ aastas. Puud, varis jm surnud taimeosad toovad pinnasesse süsinikku tagasi vastavalt kasvukohatüübile $3,6\text{--}4,3$ ja $2,9\text{--}3,7\text{ t ha}^{-1}$ aastas. Antud uuringutulemuste põhjal võib järeldada, et kuivendusjärgselt jätkub turbasse ja pinnasesse ladestunud süsiniku kadu eelkõige toitainerikkamast turbaaladelt. Teisalt aga puudub kindlus puude ja varise kaudu pinnasesse viidud süsiniku säilumisest pikema perioodi vältel ning on teadmata selle osa turba tekkes.



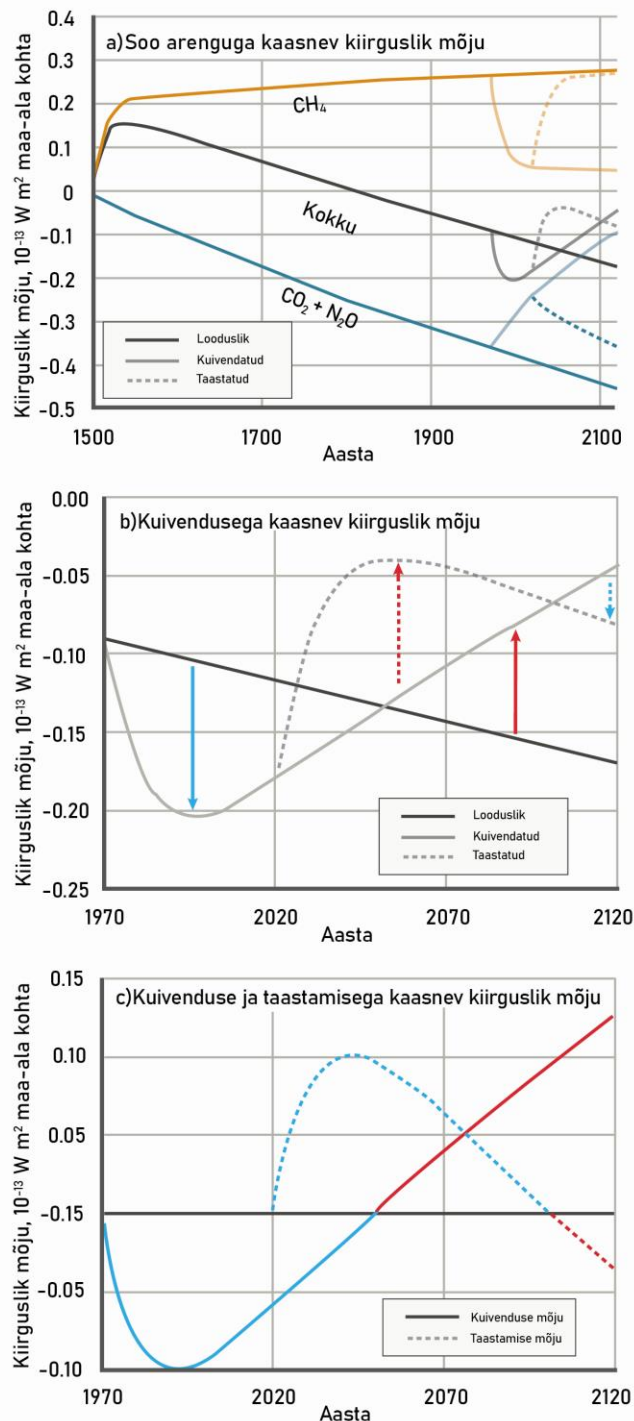
Joonis 2. Süsinikuvaru dünaamika vähetoitelises rabamännikus kuivendusjärgselt 300 a kohta. Puistu stsenaariumid (sts): 1 – süsinikuvaru raieta; 2 – süsinikuvaru raietega (harvendus- ja lageraied). Süsinikuvaru muutus kuivendamata raba turvas (sinine joon) ja puistus (roheline ja sinise joone vahe). Joonis põhineb Laine & Minkkinen (1996) avaldatul.

Puistu mõjutab omakorda sooala veerežiimi - pinnasevee tase sõltub lisaks kraavidele ka puistu tagavarast. Päivaneni ja Hanelli (2012) poolt tehtud uuringutes leiti, et $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ tagavaraga männipuistu alandab oma veekasutuse, sh läbi puude võra toimuva aurumise veetasel ligikaudu 20 cm võrra. Suurema kui $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ tagavaraga puistute kohta on antud hinnang, et puude kasvu suurendamiseks ei pruugi olla otstarbekas kuivenduskraavide uuendamine ja puistu kaudu toimuv veetaseme reguleerimine võib tagada soodsad tingimused puude kasvu jätkumiseks senises mahus (Sikström & Hökkä 2016). Väiksema tagavaraga aladel võib eeldada, et veetaseme tõus ja sellest tulenev kasvutingimuste muutumine pärsib puude senist juurdekasvu mahtu.

CO_2 , CH_4 ja DOCi voogude põhjal antakse hinnang soode süsinikubilansi, samuti nende **kasvuhooneefekti tekitava mõju ulatuse kohta CO_2 ekvivalentides ($\text{CO}_{2\text{ekv}}$)**. 1 t CO_2 emiteerimisel on selle kasvuhooneefekt 1 t $\text{CO}_{2\text{ekv}}$, CH_4 kasvuhooneefekt on 27 korda suurem kui CO_2 - sellest tulenevalt korrutatakse summaarne CH_4 heitkogus 27-ga (Forster jt. 2021). Metaan püsib atmosfääris on $9,1 \pm 0,9$ aastat, misjärel ta laguneb keemiliste protsesside tagajärjel. CO_2 püsib atmosfääris seevastu sadu aastaid ja selle mõju avaldub ka pikaajalisemalt (Forster jt. 2021) – vastav lähenemine on esitatud allpool. DOCi osas arvestatakse, et 90% selle süsiniku sisaldusest emiteerub CO_2 -na (IPCC 2014).

Metaani suure kasvuhooneefekti tõttu hinnatakse kliimamuutuste käsitlemisel soode taastamise mõju sageli kliimat soojendava tegevusena, mitte jahutavana, kuna veerežiimi tõstmisega kaasneb metaani voogude suurenemine – vastavaid järeldusi tuleb siiski teha olenevalt ajalisest perspektiivist ja kuivendatud alalt lähtuvate KHG voogude kogumõjust, nagu seda on kirjeldatud allpool käsitletud uuringutes. Oluline on siinkohal, kas märgalade taastamisel võetakse selle tegevuse kliimamõju käsitlemise lähtepunktiks tänane hetk või soodes juba seotud süsiniku ning tema kliimamõju alates mõne konkreetse soo tekkest alates. Samuti on oluline turba taastekke protsessi käivitamine – süsiniku pinnasesse sidumise taastamine. Metaani vood viivad pinnasest süsinikku välja kordades väiksemas mahus kui toimub selle lisandumine CO_2 sidumise abil.

Vastavat aspekti on vaadelnud Ojanen ja Minkkinen (2020), käsitledes veerežiimi taastamisega kaasnevat kiirguslikku mõju (*radiative forcing*, W/m^2) seonduvalt muutustele taastatava ala kasvuhoonegaasi bilansis (vt joonis 3). Teoreetilised raamid uuringule olid järgnevad: käsitledes turbaala 150 aasta lõikes, kus esimestel kümnenditel toimub selle kuivendamine, võib algset kiirguslikku mõju hinnata jähkumiseks, kuna ka metaani vood vähenevad. Samas pöördub see mõnekümne aasta möödudes täiendava turba mineraliseerumisest tingitud CO_2 heite tõttu soojenemise suunas. Kui aga poole sajandi möödudes viiakse läbi veerežiimi taastamine, võib sellega kaasneda samuti kiirgusliku mõju suurenemine, kuna atmosfääri vabaneb täiendav hulk metaani ja soo veetaseme tõstmisel taastuv CO_2 sidumise funktsioon puhverdab selle mõju alles järgneva poole sajandi möödudes.



Joonisel on looduslike, kuivendatud ja taastatud soode kasvuhoonegaaside heitega seotud kiirguslik kliimamõju (positiivne kiirguslik mõju = kliimat soojendav, negatiivne kiirguslik mõju = kliimat jahutav). Joonistel on võetud aluseks boreaalsele vööndile iseloomulikud gaasivood. Need on valitud nähtuse illustreerimiseks ja ei kirjelda mingit kindlat soo- või turbaala tüüpi. Looduslik ja taastatud soos on võetud aluseks KHG vood järgnevalt: -130 (CO₂), +7 (CH₄), +0.1 (N₂O) g a⁻¹ m⁻². Joonis põhineb Ojanen & Minkinen 2020 ja Kareksela jt (2021) poolt avaldatul.

Loodusliku soo CO₂, CH₄ ja N₂O voogudest tulenev kliimamõju. Soo tekkis 1500. a ja vood on kestnud 620 a. Soo kuivendatakse 1970. a ja taastatakse 2020. a. Suurendatud väljavõtte perioodist 1970-2120. Kuivenduse ja taastamise kliimat jahutav mõju on märgitud siniste nooltena ja kliimat soojendav mõju punastega. Kuivenduse (kuivendatud soo KHG vood - looduslike soode KHG vood) ja taastamise (taastatud soo KHG vood - kuivendatud soo KHG vood) kliimamõjud. Sinisega on märgitud periood, mil mõju on jahutav, punasega soojendava mõju periood.

Joonis 3. Looduslike, kuivendatud ja taastatud soode kasvuhoonegaaside heitega seotud kiirguslik kliimamõju.

Konkreetselt vaadeldi uuringus (Ojanen ja Minkinen 2020) veerežiimi taastamise mõju põllumajanduslikus ja metsanduslikus kasutuses olevatel turvasmuldadel 100 aasta lõikes alates taastamise hetkest, lähtudes KHG heite arvestamisel Wilson jt. (2016) andmetest, mida kasutatakse IPCC poolt soovitatud emissioonifaktoritena juhul, kui riiklikke andmeid pole kasutada (Eesti KHG aruandluses (2022) kasutatakse Rootsi emissioonifaktoreid, mis on

madalamad viidatud artiklis kasutatavatest andmetest – seeläbi võib allkirjeldatud mõju kliima jahenemisele olla Eestis kasutatavate andmete põhjal aeglasem).

Okasmetsavööndis ja toiteainevaestel segametsavööndi turvasmuldadel veerežiimi taastamise järgselt oli tänu väiksele metaani taastekkele koheselt kliimat jahutav mõju. Toitainerikastel väiksema intensiivsusega kuivendatud aladel oli väiksema CO₂ emissiooni vähenemise ja järsu CH₄ emissiooni suurenemisega tulemusel esimesel paaril kümnendil kliimat soojendava mõju. Soovituseks on veerežiimi taastamine sel viisil, et ei jääks maapinnast enam kui 10-20 cm sügavusele. See takistaks suurema osa turba mineraliseerumist ja samal ajal ei tooks kaasa suurt CH₄ emissiooni.

Veerežiimi taastamise võimalik mõju soode taastumisele

Soode veerežiimi taastamisel luuakse eeldused kuivenduseelsele olukorrale sarnaste tingimuste ja omaduste loomisele – looduslikult funktsioneeriva soo-ökosüsteemi taasloomisele. See kätkeb ühtlasi ka süsiniku ladestamist (vt ka Päivanen ja Hanell 2012). Kiiremaks taastamisjärgseks muutuseks on looduslikule soole omase pinnasevee režiimi taastamine – selle kiire tõus maapinna lähedale ja stabiliseerumine. Soole iseloomuliku taimestiku või selle struktuuri taastumine võtab aega aastaid ning sõltuvalt olukorrast võib esineda ka tagasilööke. Purre jt. (2019) uuringus on erinevatele teadusuuringutele tuginevalt hinnatud, et taimestiku taastumine looduslike oludega sarnasele tasemele võtab aega ligikaudu 10 a taastamistööde järgselt. Veerežiimi ja pinnasest lähtuvate CO₂ emissioonide mõju on hinnatud erinevates teadustöodes – läbivaks tulemuseks on CO₂ emissiooni suurenemine sõltuvalt soovee sügavusest. Soode taastumisel loetakse oluliseks kriteeriumiks pinnaveetaset aasta keskmisena kuni 30 cm maapinnast allpool (Wilson jt. 2016).

Erinevad uuringud ja koondhinnangud viitavad suurtele veapiiridele kindla ala kasvuhoonegaaside ja süsinikubilansi tulemustes. Pääsküla raba taastamisalal soo-ökosüsteemi taastumist ja selle süsinikubilansi kohta täpse hinnangu koostamist muudavad keerukamaks allesjäävad kuivendussüsteemid, mis teenindavad säilitatavaid teid; põlengu tagajärjel vabanenud toitained, mis soosivad rabadele mitteomaste taimede kasvu ja kiiremat puistu kasvu; kliimamuutusest tingitud soojenemine ja võimalik sademete vähesus vegetatsiooniperioodil (viimasest tulenev soovee taseme alanemine soojadel suvekuudel ja tuleohtlikul perioodil). Hinnangu andmist raskendab ka asjaolu, et enamus teadustöödest toodud tulemustest põhinevad aasta või paari jooksul läbiviidud mõõtmisandmetel, mis ei kata aastate vahelist looduslikku varieeruvust (vt ka Wilson jt. 2016).

Soode ja märgalade taastamisel on suurimaks probleemiks metaani lendumise suurenemine, mis olulisel määral võib pikendada seda perioodi, mil märgala muutub neto-KHG sidujaks. Mitmed uuringud on näidanud, et kui kuivendatud märgalad, mis on näiteks kasutuses põllumaana, taastatakse märgalaks, siis suurenenud metaani lendumise tõttu võib minna üle saja aasta enne kui ökosüsteem muutub neto-KHG sidujaks (Hemes jt. 2019; Valach jt. 2021a). Seetõttu on viimastel aastatel läbi viidud palju uuringuid just sellest lähtuvalt, et leida lahendusi, kuidas minimeerida soode ja märgalade taastamisega suurenenud metaani voogusid ja vähendada perioodi, mil ökosüsteem muutub kasvuhoonegaaside sidujaks. Alljärgnevalt on kokkuvõtlik ülevaade (tabel 1), kus on välja toodud erinevad märgalade taastamisega seotud disaini- ja projekteerimislahendused ning nende kasutegurid ja peamised kitsaskohad (nn *trade-off*; Valach jt. 2021b).

Tabel 1. Soovitused märgalade taastamiseks ning nendega kaasnevad positiivsed ja negatiivsed keskkonnamõjud.

Kriteerium	Kaasnev positiivne mõju	Kaasnev negatiivne mõju
Rajada madala veega märgala, kus veetase on 20-50 cm	- Sobivaim sügavus kiirekasvuliste veetaimede jaoks (nt hundinui ja pilliroog), mis kiirendab süsiniku sidumist - Kiirem turba moodustumine	- Suuremad metaanivood - Tihe taimkate vähendab elurikkust
Märgala taastades valida taimeliigid, mis on kiire kasvuga ja moodustavad tiheda taimkatte	- Suureneb süsiniku sidumine - Suvisel perioodil on tiheda taimestiku tõttu vee temperatuur madalam ja väheneb mikroobne aktiivsus, sh ka metaani tootmine	- Liiga tihe taimestik võib põhjustada hilisemat vegetatsiooniperioodi algust ja väiksemat süsiniku sidumist - Tihe taimkate vähendab elurikkust
Rajada vaba veega, sügavamaid alasid, mille pindala oleks kuni 25% kogu märgala pindalast	- Suureneb vee hapnikuga varustamine - Suureneb elurikkus	- Väheneb tiheda taimestikuga ala ja seetõttu ka süsiniku sidumise efektiivsus - Vabaveelistes alades ei moodustu turvas
Ujuvlehtedega taimede kasvu soodustamine (nt lemmel)	- Suureneb vee hapnikuga varustamine - Soodustab süsiniku sidumist - Varjutuse tõttu võib vähendada vee temperatuur ja seetõttu ka metaani tootmist	Sügisel kiire lagunemine ja osaliselt süsiniku vabanemine
Märgala taastada pikaajaliselt (>100 aastat)	Märgala muutub neto-KHG sidujaks	Võib vajada pikaajalist hooldamist ja seiret

Süsiniku ja kasvuhoonegaaside (CO₂ ja CH₄) voogude mõõtmise metoodika

Sõltuvalt uurimiseesmärgist ja metoodikast saab mõõtmistulemuste abil hinnata mulla hingamist (mullaorganismide tegevuse tulemusena tekkivad gaasivood; ingl keeles: *soil respiration*), ökosüsteemi hingamist (mõõtmisega kaetud alal asuvate organismide poolt toimuv hingamine, sh fotosünteesi käigus seotav CO₂; *ecosystem respiration*), pinnasesse ladestuva süsiniku mahtu. Kogutud andmetele tuginedes on võimalik anda hinnang ökosüsteemi CO₂ või süsinikubilansile (NEE - *Net Ecosystem Exchange*).

Turba lasundi andmete analüüsil nendes seotud süsiniku koguse hindamine. Meetodi kohaselt võrreldakse samast kohast eri aegadel võetud turba lasundi andmeid ja vastavalt turbalasundis pikemaajaliselt (>20 a) seotud süsiniku hulga muutusele antakse hinnang kas lisandunud või vähenenud süsiniku koguse kohta. Turbalasundi proovid võetakse mullapuuriga. Vastavate tööde teostust raskendab looduses varasemate proovipunktide leidmine, mis võimaldaks võrdluse läbiviimist.

Gaasiemissioonide mõõtmine kambri meetodil. Proovide kogumiseks kasutatakse läbipaistvaid (võimaldab mõõta taimede ja mulla hingamist) ja läbipaistmatuid (mulla hingamise mõõtmine) kambreid. Läbipaistmatud kambrid on valged (vältimaks temperatuuri tõusu proovi kogumisel). Mõõtmisel asetatakse kambrid varem maapinda paigaldatud ja tasakaalustatud rõngastele või paigaldatakse mõõteseade pinnasele õhutihedalt, vältimaks ümbritseva õhu sissevoolu.

Gaasiproove saab analüüsida portatiivsete seadmetega või laboris gaaskromatograafi süsteemi abil (viimase tarbeks kogutakse gaasiproovid eelvakumeeritud pudelitesse). Joonisel 2 on näha süsinikubilansi mõõtmiseks kasutatavat läbipaistvat kambrit (A), pimekambrid gaasipudelitega ökosüsteemihingamise, metaani ja naerugaasi voogude mõõtmiseks (B) ning portatiivseid analüsaatoreid CO₂, CH₄ ja N₂O mõõtmiseks (C). Gaaside voog (μg või $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) pinna- ja ajaühiku kohta arvutatakse välja gaaside sisalduse muutuse järgi kambrites.



Joonis 2. Süsiniku bilansi mõõtmiseks läbipaistev kambrid (A), pimekambrid gaasipudelitega (B) ja portatiivsed analüsaatorid (C).

Paralleelselt mõõdetakse proovivõtukohas pinnaveetaset, õhu- ja mullatemperatuuri (sügavustel 10, 20, 30 ja 40 cm). Olenevalt võimalustest ja vajadusest mõõdetakse lisaks fotosünteesiliselt aktiivset kiirgust ja määratakse lehepinna indeks, võetakse lisaks pinnaseproov (toitainete ja süsiniku sisalduse määramiseks) ning tehakse proovist keemiline ja mineraloogiline analüüs, lüsimetritest kogutavate veeproovide järgi määratakse süsiniku-, lämmastiku- ja fosforisisaldus. Väliitingimustes mõõdetakse veeproovide põhjal ka pH, redokspotentsiaal ja hapnikusisaldus.

Mõõtmiste sagedus sõltub uurimisprojektide võimalustest, miinimumiks on nende läbiviimine kord kuus, eelistatult vähemalt kaks korda kuus vegetatsiooniperioodil.

Saadud andmete põhjal hinnatakse aastaseid vooge, sidudes uurimisandmed ilmastikunäitajatega kohapealsest ilmajaamast või lähimast meteoroloogilisest vaatlusjaamast.

Püsiseirejaam, kus automaatsüsteemidega mõõdetakse reaalajas turbulentsete kovariatsioonide (*eddy covariance*; EC) meetodiga CO₂ ja CH₄ kontsentratsioone (joonis 3). Sidumaks mõõtmisandmeid seirejaama ümbruse maastikul avalduvate tingimustega (taimestik, veetase, mullastik) teostatakse paljudel juhtudel paralleelselt kambermõõtmisi. Püsiseirejaama abil saab hõlmata ka puistu kaudu toimuvad gaasivood, kambermõõtmiste korral saab puistusse seotud süsiniku arvutada puistu juurdekasvu hindamise abil.



Joonis 3. Turbulentsete kovariatsioonide meetodil toimiv seirejaam Lavassaare ammendunud freesturbaväljal 2022. a.

Puistusse seotava süsiniku arvutamiseks on hinnatud puistu juurdekasvu muutusi, millest lähtuvalt on arvatud lisanduvast maapealses puistuses biomassis seotud süsiniku maht aasta kohta. Selleks on kasutatud Eesti riiklikus kliimaaruandluses kasutatavaid konversioonifaktorid, mille abil tuletatakse puistu tagavara põhjal maapealse biomassi kaal ja selles sisalduva süsiniku kogus (0,47 t süsinikku kuivainemassi kohta). Ehkki süsiniku lisandumist puistusse hinnatakse kasvuhoonegaaside aruandluses puistu tagavara muutuse põhjal, käsitletakse siinses analüüsis selle lisandumist aastase juurdekasvu alusel, sest puudub andmestik muutuste kohta taastamisjärgse puistu tagavara arvutamiseks kasutatavate parameetrite (näit muutused puistu kõrguses) ja juurdekasvu kujunemisel. Juhul, kui alal toimub raie, tuleb süsinikubilansi hindamisel käsitleda ka puittoodete elukaart ja seonduvaid süsiniku voogusid.

Dendrokronoloogiline meetod. Turba ja biomassi juurdekasvu hindamiseks kasutatakse markerina harilikku mändi (*Pinus sylvestris*), eeldusel, et selle juurekael paikneb stabiilselt

sügavamate turbakihtide suhtes ja samblarinne kasvab ülespoole. Seeläbi võimaldab juurekaelast ülalpoole moodustunud turba ja kasvanud samblarinde süsiniku sisaldus hinnata teatud ajaperioodil seotud süsiniku mahtu. Ajaperioodi pikkus sõltub markerina kasutatavate puude vanusest. Praeguse seisuga ei ole Eestis vastavate uuringute andmeid avaldatud.

Taimestikul põhinev GEST (Greenhouse Gas Emission Site Types) meetod. Metoodika arendati välja Greifswaldi Ülikooli poolt hindamaks nii degradeerunud kui ka taastatud alade kasvuhoonegaaside (CO_2 ja CH_4) bilanssi, tuginedes alal esinevatele taimekooslusele. Määrangud on koostatud 34 erineva koosluse kohta ja eeldab nendel teostatud KHG voogude kohta mõõtmisandmete olemasolu. Eesti oludes on teostatud uuring projekti LIFE Peat Restore raames (vt Jarašius jt. 2022).

Vees lahustunud orgaanilise süsiniku (DOC) väljakanne. DOC väljakande eesmärgiks on hinnata süsiniku väljakannet ja sellega seotud CO_2 heidet atmosfääri. DOCi määramiseks võetakse veeproovid uuritava ala looduslikust või kuivenduskraavide väljavoolust ja/või sooveest (vesilahusest orgaanilise aine eraldamiseks kasutatakse spetsiaalset filtrit, DOCi sisalduse määramiseks kasutatakse spetsiaalset analüsaatorit ja analüüs teostatakse laboris), samuti mõõdetakse või arvutatakse vee väljavoolu hulk uuritavalt alalt. Kogutud andmestiku põhjal antakse hinnang DOCi väljakandele vastavalt uuritava ala suurusele. Selle mineraliseerumist CO_2 -ks hinnatakse vastavalt DOC kontsentratsiooni muutustele allavoolu - IPCC (2014) antud hinnangu põhisel tekib 90% DOCist CO_2 heide, ülejäänud akumuleerub setetes või selle mineraliseerumine on pikemaajalisem.

Ülevaade Eestis või Eestile sarnastes tingimustes teostatud uuringutest ja nende tulemused

Alljärgnevalt antakse ülevaade Pääsküla rabale sarnastes tingimustes läbiviidud uuringutest, mis aitavad hinnata võimalikke muutusi ja ökosüsteemi süsinikubilanssi (*Net ecosystem exchange*, NEE) taastamistegevuste järgselt. Kasutatud andmed põhinevad uuringutel, mille käigus määratleti erinevate teadustulemuste põhisel NEE või teostati mõõtmisi otse taastamisaladel.

Esmalt antakse ülevaate koondhinnangutest, millest osa on kasutatud IPCC poolt koostatavates juhendites riiklike kliimaaruandluste koostamiseks, samuti on võrreldud saadud tulemusi Eestis teostatud mõõtmistega.

Eesti keskkonnaagentuuri poolt hetkel taastamisega seotud KHG voogusid ei raporteerita, kuid juhul, kui see teoks saab, kavandatakse taastatud turbaalade kohta kasutada IPCC (2014) antud emissioonifaktoreid parasvöötme toitainevaesete alade kohta (tabel 2; teave H.Karult keskkonnaagentuurist 18.10.2022). Selle põhjal taastatud alad summaarselt emiteerivad süsinikku ja taastatud alade mõju kliimale oleks soojendav, $3,34 \text{ t CO}_2\text{-ekv aastas}$; $-0,23 \text{ t CO}_2\text{-C ehk } -0,84 \text{ t CO}_{2\text{ekv}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; DOC: $0,24 \text{ t CO}_2\text{-C ehk } 0,88 \text{ t CO}_{2\text{ekv}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; CH_4 : $92 \text{ kg CH}_4\text{-C ehk } 3,3 \text{ t CO}_{2\text{ekv}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Escobar jt. (2022) on koostanud 18 teadusartiklil (sh Wilson jt. 2016, Purre jt. 2019) põhineva ülevaate looduslike, kuivendatud ja taastatud veerežiimiga orgaanikarikastel muldadel, sh turvasmuldadel paiknevate metsamaade süsinikubilansist. Uurimistöid iseloomustas lühike mõõtmiste läbiviimise tsüklid (tavaliselt alla 3 aasta) ja aeg veerežiimi taastamisest

(keskmiselt 10 a). Vaid ühe uuringu käigus olid mõõtmised läbi viidud enne ja pärast taastamistöde läbiviimist. Escobari jt. (2022) tulemused näitasid, et CO₂ mõõtmistulemused looduslike ja taastatud veerežiimiga alade vahel ei ole alati sarnased. Oluline osa uuringuandmetest näitas, et taastamisalad võivad olla CO₂ allikaks. Ehkki taastatud alad iseloomustas kõrgem CH₄ emissioon, andsid mõned andmed ka vastupidiseid tulemusi. Erinevusi hinnangutes põhjustasid ka erinevused uuringumetoodikas. Üldistatult leiti, et võrreldes kuivendatud aladega, viib taastamine KHG heite vähenemisele. Looduslikele aladele sarnaste tingimuste kujunemine võtab ligikaudu 10 kuni 30 aastat, kuid seda väidet ei saa kinnitada, sest vastavad uuringuandmed puuduvad.

Evans jt. (2021) tegid ülevaate parasvöötmes – Inglismaal ja Iirimaa paiknevatel turbaaladel – eddy-mastiga teostatud mõõtmistulemustest. Looduslähedaste alade näitajaid ilmestas nende süsiniku sidumise funktsioon, samas kuivendatud alad olid CO₂ allikaks. Looduslikelt aladelt saadud, enam kui ühe-aastased andmed näitasid ka seda, et sõltumata aastevahelisest erinevusest ilmastikus, ei olnud keskmistatud CO₂ voogude vahel suuri erinevusi. Täiendavalt koondati andmestik 49 eddy-masti mõõtmiste kohta. Kogutud andmete põhjal koostati CO₂ voogude hindamiseks mudelarvutused, mille tulemusel leiti, et oluline seos CO₂ heites avaldus efektiivse keskmise veetaseme parameetritega (keskmine aastane veetase turba horisondis, juhul kui veetase oli allpool turba horisonti, arvestati selleks turbakihi tusedust), sh mulla omaduste, hüdroloogia, sademete ja temperatuuri andmete lisamine ei täiendanud koostatud mudeli abil saadud tulemusi. Mudeli tulemusel anti CO₂ sidumise määraks looduslikel parasvöötme ja boreaalse vööndi turbaaladel -5,8 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ eeldusel, et efektiivne keskmine veetase on <20 cm. Juhul kui veetase oli >25cm, muutusid need alad CO₂ allikaks. Iga 10 cm võrra veetaseme tõstmisel vähenes CO₂ emissioon ligikaudu 3 t CO₂ võrra ha⁻¹ a⁻¹, teisalt suurenes aga CH₄ heide. Evansi jt. (2021) poolt CH₄ kohta kogutud andmestiku analüüs andis tulemuseks, kus maapinnaga samal tasandil oleva efektiivse keskmise veetaseme korral on metaani vood 0,27 t CH₄ ha⁻¹ a⁻¹ ja need on 0-lähedased veetaseme alanedes 30 cm-ni maapinnast. Seeläbi on kliima jahutamise eesmärki silmas pidades optimaalne veetase vahemikus 2-20 cm maapinnast – CO₂ sidumine kompenseerib metaani soojendava mõju.

Erinevate uuringute põhjal on koostanud koondanalüüsi Wilson jt. (2016). Antud analüüs põhineb 352 KHG mõõtepunktis teostatud mõõtmistel üle maailma, kus on läbi viidud veerežiimi taastamine või mõõtmised on toimunud looduslikel aladel (boreaalses ja parasvöötme teostatud uuringute arv CO₂ mõõtmiseks 123, metaani mõõtmisel 153 ja DOC osas 25). Põhijäreldusena on toodud CO₂ sidumise funktsiooni taastumine enamustel turvasmuldadel, metaanivoogude suurenemine ja DOC voogude vähenemine. Artikli koostamisele eelnenud töö tulemusi on kasutatatud ka IPCC emissioonifaktorite väljatöötamisel, mis käsitleb turbaalade veerežiimi taastamist (vt IPCC 2014). Antud artikli põhjal võeti kriteeriumiks, et keskmine aastane või vegetatsiooniperioodi veetase on kuni 30 cm maapinnast allpool. Puude biomassi seotava süsiniku hulka ei arvestatud. Uuringus võrreldi gaasivoogude mõõtmistulemusi looduslikes ja taastatud veerežiimiga soodes ja leiti, et olulist erinevust nende vahel ei ole, mis läbi ka looduslike alade andmestik on kasutatav taastamisalade gaasivoogude hindamiseks. Viimast siiski juhul, kui keskmine veetase on uurimisaladel sarnane.

Eesti asub hemiboreaalses vööndis ja seetõttu saab siinsete oludega vastava hinnangu aluseks võtta Wilsoni jt. (2016) poolt paras- ja boreaalse vööndi kohta antud voogude

keskmistatud väärtused (tabel 2; vastav lähenemine on võetud ka ELME projektis², kuid riiklikus aruandluses vastav lähenemine ei vastaks IPCC metoodikale): toitainevaeses keskkonnas (rabadele ja siirdesoodele vastavates tingimustes) vastavalt -0,84 ja -1,25 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹, keskmistatult -1,05 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹; toitainerikkamas keskkonnas (madalsoodele vastavates tingimustes) vastavalt 1,84 ja -2,02, keskmistatult -0,09 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹. CH₄ väärtused toitainevaeses keskkonnas (rabadele ja siirdesoodele vastavates tingimustes) vastavalt 3,30 ja 1,47 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹, keskmistatult 2,39 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹; toitainerikkamas keskkonnas (madalsoodele vastavates tingimustes) vastavalt 7,76 ja 4,92, keskmistatult 6,34 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹. DOCi kohta antud väärtused on seondult uuringuandmete vähesusega (alltoodud hinnang põhineb 15 andmeallikal) sama erineva toitelisusega aladel - parasvöötmes 0,88 ja boreaalses vööndis 0,29, keskmistatult 0,59 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹.

Soomes on teostatud kaks uurimistööd põhinevat hinnangut (vt tabel 2). Looduslikes ja taastatud soometsades Aro jt. (2022) on saadud väärtuseks, et need on süsiniku neeldujaks - toitainevaestes tingimustes -3,0 (-3,5 kuni -2,4) ja toitainerohkemas -2,8 (-5,0 kuni -3,2) t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Metaani emissiooniks on saadud vastavalt 3,6 (2,1 kuni 5,0) ja 3,0 (1,5 kuni 4,5) t CO₂-ekv ha⁻¹ a⁻¹. Aro jt. (2022) töös leitakse, et IPCC kliimaaruandluses on sobivaks väärtuseks kõigile taastatud turbaaladele -2,0 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ ja CH₄ osas 3,4 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹. DOC väärtuste kohta pole andmeid antud. Kareksela jt. (2021) põhjal on antud hinnang taastatud veerežiimiga alad samuti C neeldujaks, kuid sidumist ja CH₄ emissiooni on hinnatud väiksemaks - toitainevaestes tingimustes -0,96 ja toitainerikkamas keskkonnas -0,91 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹, CH₄ emissioon vastavalt 1,4 ja 0,7 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹.

² Projekt ELME – „Elurikkuse sotsiaal-majanduslikult ja kliimamuutustega seostatud keskkonnaseisundi hindamiseks, prognoosiks ja andmete kättesaadavuse tagamiseks vajalikud töövahendid” (projekti number: 2014-2020.8.01.16-0112).

Tabel 2. KHG heide looduslikelt ja taastatud aladelt

			Looduslik	t CO ₂ ekv ha a	Kareksela jt. 2021		Taastatud 30 cm	t CO ₂ ekv ha a	Aro jt. 2022	C	t CO ₂ ekv ha a
Boreaalne	Toitainevaene	CO ₂ -C t ha a	-0,34	-1,25	Toitainevaene	CO ₂ -C t ha a	-0,26	-0,96	CO ₂ -C t ha a	-0,82	-3,00
		CH ₄ -C t ha a	0,04	1,47		CH ₄ -C t ha a	0,04	1,44	CH ₄ -C t ha a	0,10	3,60
		DOC CO ₂ -C t ha a	0,08	0,29		DOC CO ₂ -C t ha a	0,09	0,33	DOC CO ₂ -C t ha a	0,09	0,33
		KOKKU C	-0,22	0,52		KOKKU C	-0,13	0,81	KOKKU C	-0,63	0,93
	Toitainerikas	CO ₂ -C t ha a	-0,55	-2,02	Toitainerikas	CO ₂ -C t ha a	-0,25	-0,91	CO ₂ -C t ha a	-0,76	-2,80
		CH ₄ -C t ha a	0,14	4,92		CH ₄ -C t ha a	0,02	0,72	CH ₄ -C t ha a	0,08	3,00
		DOC CO ₂ -C t ha a	0,08	0,29		DOC CO ₂ -C t ha a	0,09	0,33	DOC CO ₂ -C t ha a	0,09	0,33
		KOKKU C	-0,33	3,19		KOKKU C	-0,14	0,14	KOKKU C	-0,59	0,53
Parasvööde	Toitainevaene	CO ₂ -C t ha a	-0,23	-0,84	IPCC 2014						
		CH ₄ -C t ha a	0,09	3,30	Toitainevaene	CO ₂ -C t ha a	-0,23	-0,84			
		DOC CO ₂ -C t ha a	0,24	0,88		CH ₄ -C t ha a	0,09	3,30			
		KOKKU C	0,10	3,34		DOC CO ₂ -C t ha a	0,24	0,88			
	Toitainerikas	CO ₂ -C t ha a	0,50	1,84		KOKKU C	0,10	3,34			
		CH ₄ -C t ha a	0,22	7,76							
		DOC CO ₂ -C t ha a	0,24	0,88							
		KOKKU C	0,96	10,47							
Hemiboreaalne	Toitainevaene	CO ₂ -C t ha a	-0,29	-1,05							
		CH ₄ -C t ha a	0,07	2,39							
		DOC CO ₂ -C t ha a	0,16	0,59							
		KOKKU C	-0,06	1,93							
	Toitainerikas	CO ₂ -C t ha a	-0,03	-0,09							
		CH ₄ -C t ha a	0,18	6,34							
		DOC CO ₂ -C t ha a	0,16	0,59							
		KOKKU C	0,31	6,83							

Projekti 'Põhja-Euroopa madaliku soode taastamisega CO₂ emissiooni vähendamine' (LIFE_Peat-Restore) raames teostati Eestis KHG mõõtmisi Läänemaal Suursoo – Leidissoo kuivendatud madalsookompleksis ja Lätis Augstroze looduskaitsealal eesmärgiga rakendada GEST metoodikal põhinevat KHG bilansi hindamist. Projekti raames kirjeldati ja määratleti emissioonid hõreda männi katvusega ja puudeta märjal turbasambлага kaetud aladel, mis klassifitseeruvad siirdesooks (puudega katvus 30%) ja lagerabaks. Gaaside mõõtmisel kasutati kambermetoodikat, täiendavate parameetritena mõõdeti lehepinna indeksit, sooveetaset, fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse hulka, õhu- ja pinnase temperatuuri. Mõõtmisi teostati Eestis kolmel aastal (2018 kuni 2020) ja Lätis ühel aastal (2019). Ehkki mõõtmised teostati nii taastamistööde eelselt kui ka järgselt, asusid mõõtealad kraavide mõjualast eemal ja andmed on kasutatavad ka looduslikult toimivate alade kohta (Purre, A.-H., personaalne konsultatsioon sept 2022). Saadud kolme aasta mõõtmistulemused Eestis näitavad suurt varieeruvust: 2018. a 1,1, 2019. a 4,9 ja 2020. a -5,5 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Metaani emissioon oli 2018. a 0,0 2019. a 10,8 ja 2020 a 1,3 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹. Saadud tulemuste põhjal anti mõlema gaasi koosmõju kohta keskmine väärtus Eesti kohta: -4,2 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹. Keskmine veetase nendel aladel oli 14 cm maapinnast madalamal, langedes kuival ajal 40-50 cm-ni. Lätis teostati mõõtmisi vaid 2019. aastal, mis andis tulemuseks 7,1 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹, CH₄ 5,1 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹ ja N₂O 0,2 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹, kokku koguheitena 12,4 t CO_{2ekv} ha⁻¹ a⁻¹. Keskmine veetase oli maapinnast 24 cm, langedes 93 cm-ni.

RMK rahastatud teadusprojekti "Süsiniku- ja lämmastikuringe muudetud niiskusraiealade metsades" raames mõõdeti männiku, kuusiku, sookaasiku kõdusoopestite biomassi, produktsiooni, C sidumist taimestiku biomassis, kasvuhoonegaaside (CO₂, CH₄ ja N₂O) voogusid ning teostati mullakeemia, mulla mikrobioloogia ning põhjavee analüüsid (Mander jt. (2017)). Kuivendatud puistud osutuvad väga produktiivseteks metsakooslusteks. Keskealise jänese-kapsa-kõdusoo kuusiku tüvemassi aastane produktsioon oli kuni 7,7 t ha⁻¹ a⁻¹. Kõdusookuusikud olid reeglina kliima jahendajad, sest kõrge produktsioon kompenseeris ka CO₂ lendumise atmosfääri. Kõdusookuusikutes seoti keskmiselt -11,65±3,27 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Ka kõdusoomännikud osutuvad kliima jahutajateks sidudes 8,61±1,56 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Kõdusookaasikud olid C-neutraalsed, emiteerides atmosfääri keskmiselt 3,65±4,25 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Nii kaasikutes kui ka kuusikutes mõõdeti kõrged N₂O emissioonid (keskmiselt vastavalt 4,0 ja 5,2 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹, maksimaalsed väärtused kuni 1,44 mg N₂O-N m⁻² h⁻¹). CH₄ voogude puhul domineeris nõrk sidumine mullas. Antud töös ei käsitletud metsa raie ja puidu kasutusega seotud süsiniku heidet, mis on oluline komponent metsade majandamise kliimamõjude hindamisel.

Purre jt (2019) viisid läbi KHG voogude mõõtmised metsanduslikel eesmärkidel kuivendatud ja hiljem taastatud raba aladel Eestis (Soomaa Rahvusparkis asuvas Kuresoos). Võrdlusaladena teostati uuringud ka looduslikes tingimustes rabamännikutes. Kaks Soomes paiknevat mõõtmisala paiknesid riigi lõunaosas. Gaaside mõõtmisel kasutati kambermetoodikat, täiendavate parameetritena mõõdeti lehepinna indeksit, sooveetaset, fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse hulka, õhu- ja pinnase temperatuuri. Mõõtmised toimusid 2015. a vegetatsiooni perioodil maist oktoobrini igakuiselt (juulis 2 korda). Ühel Soome alal kasutati ka EC meetodil toimivat püsiseirejaama, mis võimaldas KHG voogusid hinnata 30-minutilise intervalliga.

Sooveetase oli uuringualadel maapinnast 4-35 cm sügavusel, taastamistööd olid Kuresoos läbi viidud 2013. a, Soome aladel 2005-2012. Sootaimestik oli taastamisaladele tagasi tulnud ja valdav, vaid Kuresoos esines veel erinevalt Soome aladest metsadele iseloomulikke liike.

Looduslikud alad ja Soomaa taastamisala olid vegetatsiooniperioodil CO₂ sidujad, kuid Soomes paiknevad taastamisalad olid CO₂ allikaks. Soomaa alal on võimaliku põhjusena ära toodud soontaimede suur biomassi hulk, millel on suurem fotosünteesimise potentsiaal võrreldes sammaldega. Samas toodi uuringu järeldustest välja, et vajalik on pikemaajalise seire läbiviimine, hindamaks muutusi CO₂ emissioonis.

2016. a toimusid uuringud Põhja-Eestis paiknevas Hara soos ja Pärnumaal Kõrsa soos, eesmärgiga hinnata veetaseme taastamise järgset taimestumist ja CO₂ emissioone (Purre & Ilomets, 2021). Mõlema ala puhul oli tegemist endiste kaevandusaladega, kus 20-30 taastumisajaga oli aladele taastunud soodele iseloomulik taimestik. Eelkõige võib kujunenud tingimusi Kõrsal pidada sarnaseks Pääsküla raba taastamisjärgse situatsiooniga, mil soodele iseloomulikud taimekooslus on lausaliselt taastunud.

Kõrsa uurimisalal taastus veerežiim 1980. a tuletõrjeveevõtukohta väljaehitamisel rajatud tammi mõjul. Mõõtmisalad paigutati nii mätastele kui ka nende vahelisele tasasele alale. Hara soo uurimisalal tõusis vesi peale servakraavi sulgumist 2000-2002, taimestumine oli hakanud juba varasemalt. 2012. a suleti väljavool RMK taastamistööde raames. Osal alal toimus üleujutus ja seetõttu Hara kaevandamisalal osa uuringutest katkestati. Lisaks teostati uuringud samade soomassiivide Hara ja Kõrsa soode looduslikuna säilinud osades.

Gaaside mõõtmisel kasutati kambermetoodikat, saamaks hinnangud NEE ja mullahingamise kohta. Mõõdeti taimestiku katvust, all- ja pealmaa taimestiku biomassi, samblike produktsiooni ja nende juurdekasvu, lehepinna indeksit, sooveetaset, fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse hulka, õhu- ja pinnase temperatuuri. Mõõtmised toimusid 2016. a vegetatsiooni perioodil maist septembrini igakuiselt (juulis 2 korda). Saadud mõõtmisandmetele ja ilmajaamade andmetele (õhutemperatuur, fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse hulk) tuginevalt modelleeriti igatunnised CO₂ voog perioodile mai-sept.

Võrreldes looduslike aladega, oli ökosüsteemi hingamine suurem taastatud aladel. Taastamisalasid iseloomustas ka teistest aladest suurem fotosüntees, mida seostati mitmeaastaste igihaljaste kääbuspõõsaste rohkusega. Vegetatsiooniperioodil modelleeriti mõõtmistulemuste põhiselt NEE ligi 200 g CO₂ m² (2 t CO₂ ha⁻¹) – ehkki tulemus iseloomustab üksnes osa aastasest tsüklis ja tegemist oli ühel aastal teostatud uuringuga, järeldasid uurimistöö autorid, et alal oli taastunud selle C siduv ja hoidev funktsioon. Siiski tuleb arvestada, et talvisel perioodil jätkub pinnase hingamine, mis läbi vabaneb täiendavat CO₂ ning lisandub süsiniku väljakandena DOC ja CH₄.

Järgnevalt on toodud teostatud uuringust saadud olulised järeldused: võrreldes kohaspetsiifilisi parameetreid (sh taastumisaeg, mikrotopograafia, ala üldiseloomustus), avaldus oluline seos CO₂ voogude ja taastumisaaja pikkuse vahel; mida pikem on ajaline mõõde taastamise algusest, seda enam sarnaneb kooslus looduslikele sooladele; NEE oli suurem lähtuvalt turbasambla esinemise suurenemisest; fotosüntees suurenes ühes brüofüütide ja soontaimede biomassi kasvuga; mätastelt ja nende vahelistelt mõõtealadelt lähtuvate CO₂ voogude vahel ei olnud olulisi erinevusi.

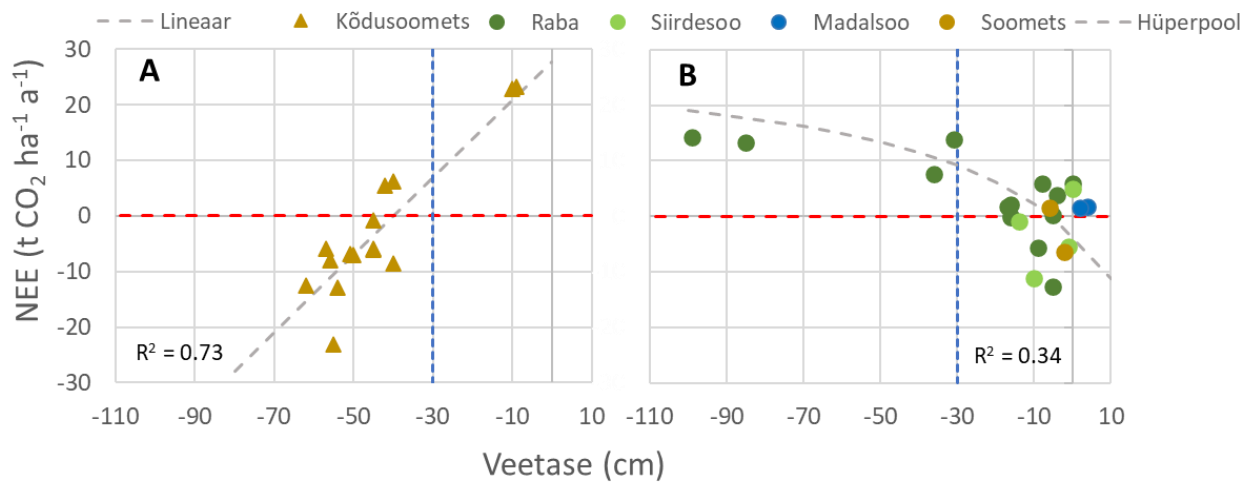
Pääsküla tööde kontekstis on olulised ka järgnevad Purre (2021) töös tehtud järeldused:

- taimkate ja CO₂ voogude tasakaal on taastatud metsakuivendusega turbaaladel suurel määral sarnane looduslikus seisundis turbaaladele;
- metsakuivendusega turbaaladel areneb taastamisel vähem kui kümnendiga välja täielik turbasammalde kate ja on olemas mäta-mättavahe mikrotopograafia.

Antud tingimuste kujunemiseks on olulised kõrge sooveetase, mille saavutamine taastamisjärgselt kui ka looduslikult toimivatel aladel ei pruugi olla tavapärane.

Veetaseme mõju uurimiseks CO₂ ja CH₄ voogudele viidi läbi süsinikubilansi mõõtmised erinevatel kaugustel kraavist häirimatu raba suunas Umbusis (10, 50, 100 ja 200 m) ja Laukasoo (3, 40, 50, 125 m). Mõlemad Kesk-Eestis paiknevad uuringualad asusid aktiivsete turbatootmisala kõrval. NEE mõõtmised toimusid 2015. a aprillist detsembrini iga kahe nädala tagant, kokku tehti 648 mõõtmist. Aastane süsinikuvoog vähenes mööda häiringugradienti kuivendatud rabast loodusliku ombrotroofse rabani. Mõlema uurimisala kahes kraavipoolsemas mõõtmispunktis toimus selge CO₂ lendumine (Umbusis 13,2 ja 7,7 ning Laukasoo 14,3 ja 13,9 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹). Samas mõlema ala kahes kaugemas mõõtmispunktis oli süsiniku emissioon nullilähedane ja ühes punktis toimus isegi sidumine (Umbusi 2,2 ja -0.1 ning Laukasoo 0 ja 1,8 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹). Keskmise veetase mõlema uurimisala kahes kraavipoolsemas mõõtmispunktis oli vahemikus 26 kuni 101 cm allpool maapinda. Kahes kaugemas punktis oli veetase keskmiselt 16 cm sügavusel maapinnast. Kuu keskmine õhutemperatuur ja sademete summa ei erinenud 2015. aasta uuritud kasvuperioodi pikaajalistest mõõtmistest, samal ajal kui talv oli oluliselt soojem. Ökosüsteemihingamine püsis talvisel ajal kõrge kõrgema õhutemperatuuri tõttu. Külmal aastaajal külmumata turbakihist püsinud kõrgema hingamise tõttu vabanes atmosfääri rohkem CO₂ ja turbasse kogunes kogunes selle võrra vähem süsinikku. Kuu keskmine õhutemperatuur külmal perioodil oli 3,5 °C soojem pikaajalisest keskmisest -4,9°C.

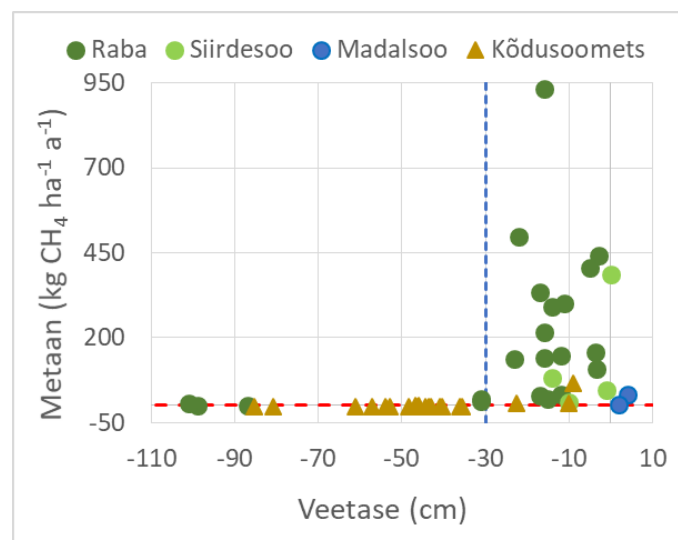
Joonisel 3 on toodud C-bilanssi ja veetaseme vahelised seosed Eestis läbi viidud uuringute tulemuste põhjal (Maanso (2015), Mander jt. (2017), Purre jt. (2019), Maddison jt. (2021), Jarašius jt. (2022) ning on täiendatud Soomes tehtud sarnaste uuringutega (Alm jt. (2007b), Minkkinen jt. (2007). Võrreldes Laine & Minkkinen (1996) uuringute tulemusena (vt joonis 2), kus kuivendus viib alalt süsinikku välja, on joonisel 3 toodud kõdusoo puistutes saadud tulemuseks, et enamasti on need süsinikku siduvad kooslused. Erinevus on tingitud siin kasutatud metoodikast – joonisel 3 toodud uuringus pole arvestatud metsaraie tulemusel alalt väljaviidava puidu ja selles seotud süsiniku kogusega.



Joonis 3. Süsinikubilanss kõdusoometsades (A) ning rabades (kuivendusmõjuga, korrastatud ja looduslikud), madalsoos ja soometsas (B) (Alm jt. (2007b), Minkinen jt. (2007), Maanso (2015), Mander jt. (2017), Purre jt. (2019), Maddison jt. (2021), Jarašius jt. (2022)).

Vastavalt IPCC 2006 ja Wilson jt (2016) järgi kasutatakse märgalade emissioonifaktori arvutamiseks alustaimestiku ja mullavoo süsinikubilanssi ning puistusse seotud süsinikku ei arvestata. Arvestades Wilson jt (2016) uuringus seatud veetaseme vahemikku -30 kuni 30 cm maapinnast, siis joonisel 3 (B) olevate andmete järgi tuleks kuivendatud, kuivenduse mõjutusega ning korrastatud raba, siirdesoo ja madalsoo CO₂ emissioonifaktoriks 0,05 +/- 2,9 $\text{t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (keskmine +/- 95%-usalduspiir).

Eestis läbi viidud metaanivoo ja veetaseme vahelise seose uuringute tulemused on toodud joonisel 4.



Joonis 4. Metaanivoo ($\text{kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) kõdusoometsades ja kuivendusmõjuga, korrastatud ja looduslikes rabades (Järveoja (2011), Salm (2012), Maanso (2015), Kull (2016), Mander jt (2017), Mägi (2021), Veber jt (2021), Rezapour jt (2022)).

Arvestades Wilson jt (2016) uuringus seatud veetaseme vahemikku -30 kuni 30 cm maapinnast, oli Eesti kõdusoometsadest, madalsoost ning kuivendatud, taastatud ja kuivendusemõjuga rabades CH_4 emissioon keskmiselt ($\pm$ 95%-usalduspiir) $167 \pm 80 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, mis oleks võrdne $4,5 \text{ t} \pm 2,2 \text{ CO}_2 \text{ ekv ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Turbatüübi järgi oli CH_4 emissioon järgmine: rabaturvas $234 \pm 116 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($6,3 \pm 3,1 \text{ t CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), siirdesooturvas $85 \pm 159 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($2,3 \pm 4,3 \text{ t CO}_2 \text{ ekv ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ning madalsoo $22,4 \pm 32 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($0,6 \pm 0,9 \text{ t CO}_2 \text{ ekv ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Täpsemad andmed on esitatud lisas 1.

DOCi väljakannet on Eestis uuritud Tartu Ülikooli uurimisprojekti "Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määramine pikaajaliste häiringute leviku piiramiseks või leevendamiseks" (Kull 2016). DOCi mõõtmiseks võeti veeproovid vaatluskaevudest, mis olid paigaldatud erinevatele kaugustele kuivenduskraavidest ja looduslikele sooladele. DOCi sisaldus rabavees oli statistiliselt olulisel määral seostatav mh kaugusega kraavist, minimaalse ja keskmise veetasemega, CO_2 ja CH_4 vooga. Antud andmestikku ei ole siiski kasutatud hinnangu andmisel DOCi väljakandele Eesti tingimustes, kuid annab kinnitust sellest, et võrreldes looduslike aladega on DOCi sisaldus suurem kuivenduse mõjuga soodes ja turbaaladel.

Turba lasundi andmete analüüsil nendes seotud süsiniku koguse hindamist on teostanud Eesti soode andmetele tuginevalt M. Ilomets (2005). Radiosüsiniku meetodi abil turba vanuse määramiseks tehti kaks dateeringut turba profiili erinevatel lasumissügavustel. Saadud andmete ja turbalasundi analüüsi põhjal oli võimalik hinnata turba (kuivaine massi juurdekasvu) ja süsiniku akumulatsiooni kiirust. Madal- ja siirdesoodes süsiniku pikaajalist akumulatsiooni hinnati $0,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja rabades $0,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Samuti rakendati antud meetodit ELFi poolt 2011-2012 läbi viidud projektis "Melioreeritud turbamaardlate kasutusvõimaluste hindamine. Pilootprojekt" (Aljaste 2012), mille raames Eesti Geoloogiakeskus viis läbi puurimistööd ja turba omaduste muutuste analüüsi eesmärgiga võrrelda 1980-ndate alguses ning 2012. a. võetud turbaprofiile, et hinnata muutusi turbas viimase 30. aasta jooksul. Profiilide ajaline võrdlus ei näidanud selget omavahelist erinevust, seetõttu võib järeldada, et kuivenduse mõju oli juba 1980. a. alguseks põhjustanud muutusi turba lasundis. Samuti esines erinevusi turbaliigis. Probleemseks kohaks oli ajaga muutunud turba analüüsimise metoodika (turvast tuhastati eelnevalt 850°C ning nüüd 450°C juures). Seetõttu ei saanud turbaprofiile hästi võrrelda. Soomes on vastavad uuringud olnud edukamad ja näitavad, et metsa kuivendusel on pikaajaline mõju turbaprofiilis seotud süsiniku koguse vähenemisele - Simola jt (2012) uuringu põhjal põhjustas metsa kuivendus 20 aasta jooksul turbast lähtuva heite $5,5 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Turbatekke kiiruse selgitamine tuginevalt turbasammalde juurdekasvu mõõtmisele. Vastava uuringuga alustas 1974. a M. Ilomets (2005) Nigula rabas. Proovid koguti analüüsimiseks 2003. a suvel ja määratleti nii sfagnumturba kui ka taimse aine hulk juurdekasvanud osas. Turba akumulatsiooniks rabaveetaseme lähedases kihis saadi ca 140 g m^2 aastas, mida hinnati sarnaseks turba pikaajalise akumulatsiooniga.

Veerežiim ja taastamise mõju

Taastamistegevusest tingitud veetaseme muutust seiratakse Eestis projekti “Soode kaitse ja taastamine” (LIFE Mires Estonia, projekti nr EE000129) raames (Kohv 2021). Veetaseme mõõtevahendina kasutati automaatseid rõhumõõtjaid, mis paigaldati perforeeritud kaevudesse ja seadistati mõõtma rõhku ning temperatuuri 8 tunnise intervalliga, seadme sügavus maapinna suhtes fikseeriti. Veesamba kõrguse saamiseks lahutati seadme abil mõõdetud kogurõhust õhurõhk ning teisendati saadud tulemus veetasemeks maapinna suhtes. Veeseire tulemused näitavad, et veetasemed taastamisaladel tõusid ja stabiliseerusid - sajuperioodil võis see toimuda juba mõne nädala jooksul, kuid üldistatult stabiliseerus veerežiim mõne kuu jooksul. Alljärgnevalt käsitleme kahte seireala, kus taastamistööd ja tingimused on sarnased Pääsküla rabas plaanitavaga.

Tudusoo Ika-I paikneval taastamisalal tõusis kraavide sulgemise järgselt männi enamusega siirdesoometsas (keskmine vanus 66 a, IV boniteet, rabamuld, tagavara 135 tm/ha, juurdekasv 4 tm ha⁻¹ a⁻¹, puude arv 907 tk ha⁻¹ (andmed Metsaregistri metsaportaalist, vaadatud 13.09.2022) pinnaveetase ligi 0,6 m, saavutades aasta keskmisena ca 20 cm maapinnast (taastamiseelne keskmine veetase 2018. ja 2019. a. vastavalt 30 cm, kuid kuivendusele iseloomulikult suure amplituudiga (0-80 cm). Võrreldes kõrvaloleva alaga, kus viidi läbi ka lageraie lagesoo taastamiseks, jäi veetase metsata alal ligi 10 cm võrra sügavamale (aasta keskmine 30 cm, taastamiseelselt 2018. ja 2019. a ligi 70 cm alla maapinna), samuti iseloomustab viimast lagedat ala väiksem veetaseme kõikumine. Mõlemat seiratud ala mõjutas 2021. a suvine põud, mille tulemusena langes veetase maapinnast 0,7 m.

Referentsina kasutati Lahemaa Rahvusparkis paiknevat Laukasoo taastamisala: keskealises männikus (keskmine vanus 49 a, IV boniteet, rabamuld, tagavara 87 tm ha⁻¹, juurdekasv 4 tm ha⁻¹ a⁻¹, puude arv 1130 tk ha⁻¹ (andmed Metsaregistri metsaportaalist, 88701:001:0930, KZ202, eraldis 51, vaadatud 13.09.2022) ja selle kõrval asuvat lagesooks taastatud ala (lageraie). Sarnaselt Tudusoo alale tõusis veetase ka siin taastamistegevuse järgselt ca 20 cm, jäädes metsasel alal keskmisena ligi 30 cm maapinnast allapoole, lagedatel aladel keskmisena 20 cm juurde (taastamiseelselt oli keskmine veetase 30-50 cm). Taaskord iseloomustab metsast ala suurem veetaseme kõikumine ja ligi 10 cm sügavam veetase. Ka siin langes 2021. a suvise põua tõttu pinnaveetase maapinnast ligi 0,5 m sügavuseni lagedal alal ja 0,6 m sügavuseni metsasel alal. 2021. a suve iseloomustab ka normkliimaga võrreldes oluliselt kuivem suvi.

Võrreldes Pääsküla taastamisalaga on järgnevad erinevused, mis läbi Pääskülas toimuvad protsessid veetaseme taastumisel ei pruugi viia veetaseme tõusule samal määral: mõlemal seirealal likvideeriti kuivenduskraavid täies mahus ja seeläbi nende kuivendav mõju minimeeriti; alade valgala on suurem, mis läbi keskkond on stabiilsem muutustele. Pääskülas pärssivad veetaseme tõusu ja stabiilsust raba läbivate teede kuivenduskraavid ning väiksem valgala. Samuti paikneb Pääsküla taastamisala rabakupli kõrgemas osas. Seeläbi võib allejäävate kraavide ümbruses säilida kuivendusele omased tingimused.

Metsa kasvu parameetrid kuivendatud ja looduslikes soodes

Rabades pärsib metsa kasvu fosfori ja lämmastiku vähesus, nimetatud toitainete kontsentratsiooni suurenemist pindmises mulla või turbakihi aitab suurendada kuivendamine, samuti on pidurdavaks teguriks ka soovee hapniku vähesus, vees lahustunud toitainete vähesus ja defitsiidi varajane saabumine kasvuperioodil (Päivänen ja Hånell 2012; Valk 2005). Seevastu on leitud, et veenappus (turba niiskuse sisalduse langemine alla 50%) ei esine ka tugeva kuivendusastme puhul ega saa pärssivaks puude kasvule (Valk 2005). Viimane hinnang ei käsitle siiski sagenevate põuade võimalikke mõjusid (vt ptk **Kliimamuutused ja võimalikud mõjud**).

Valk (2005) uuringutele tuginevalt on leitud, et kestva ja intensiivse kuivenduse tulemusena suureneks rabamännikute kõrguse ja diameetri juurdekasv tavaliselt veidi vähem kui kaks korda, mahu juurdekasv aga ligikaudu 2-3 korda, olles kraavi lähedasel kuivenduse tugevas mõjupiirkonnas $0,8-3,2 \text{ tm ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, kraavide vahelisel alal ligikaudu $1,4 \text{ tm ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Hainla (1957) andmetel toob kuivendus kaasa puistu juurdekasvu suurenemise - algselt $0,7-1,8$ tihumeetrit $2,0$ kuni $3,8 \text{ tm-le ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Päivänen ja Hanell (2012) kogutud hinnangute põhjal on rabade metsanduslikul kuivendusel eesmärgiks alandada rabavee (vähelagunenud turbaga aladel) taset $35-40 \text{ cm}$ allapoole maapinda ja $55-60 \text{ cm}$ madalsoode (hästilagunenud turbaga aladel). Puude kasv viib omakorda veetaseme alanemisele evapotranspiratiooni tõttu (Claude ja Pelleri, 2007).

Ehkki puidu juurdekasv kuivenduse järgselt suureneb, hakkab see aastakümnete möödumisel paljudel juhtudel pidurduma – hooldamata kuivenduskraavidega puistus võib see 40 aastaga jõuda kuivendamise eelsele tasemele, kui hooldamata kraavide vanus on 26-28 aastat, pidurdub kuivendatud rabas mändide kasv (Pikk 2003). Sookaasikute boniteedi suurenemist on hinnatud $0,1-0,8$ boniteediklassi ja soomännikute oma $0,1-0,5$ klassi võrra (Pikk 2003).

Metsa raie korral, välja raiutud puude arvel väheneb puude võrade kaudu toimuv aurumine ja põhjavesi tõuseb ning pärsib allesjäävate puude kasvu (vt. Päivänen ja Sarkkola, 2000).

Nii looduslikel kui ka kuivendatud soodes võivad põlengud olla lagedate rabade metsastumise täiendavateks teguriteks kuivenduse kõrval, lisaks soodustavad seda ka keskmisest kuivemad suved. Tule käigus võib hävineda turbasammaldest koosnev pinnakate, mis on takistavaks teguriks seemikute arengul. Põlengute mõju sookooslustele on uurinud Eestis ka V. Masing (1960), kelle hinnangul võtab põlengujärgne rabataimkoosluste taastumine aega 50 aastat või isegi kuni 100 aastat.

Tekkinud tingimused Pääskülas rabas on soodsad puistu tagavara suurenemiseks. Koostatud metsamajandamiskavas (Metsabüroo 2021) on enamusel taastamisala eraldistel nähtud ette harvendus- ja valgustusraie teostamine. Kraavivõrk omab endiselt kuivendavat mõju, koosmõjus põlengu mõjudega oleks alale sookoosluse kujunemine seeläbi pärsitud ja seniste tingimuste säilimine on pigem soodne kõdusoole iseloomuliku puistu edasisele arengule.

Pääsküla taastamisalal kasvav mets on tekkinud osalt loodusliku soometsana või kasvanud endisele lagerabale kuivenduse ja põlengute tõttu tekkinud tingimuste tagajärjel. Hetkel on taastamiseelse kooslusena alal mustika-kõdusoomets, millest suurem osa kasvab sügaval

rabamullal (R^{'''}), ala serval on kuivendatud madalsoomets (tabel 8). Taastamisjärgse sihtkooslustena on määratletud raba- ja siirdesoomets ning lage mättaraba.

Kliimamuutused ja võimalikud mõjud

Kliimamuutustega kaasnevate võimalike muutuste kohta on Keskkonnaagentuur koostanud aruande "Eesti tuleviku kliimastsenaariumid aastani 2100" (Luhamaa jt 2015). Selles on Eesti kohta antud kaks võimalikku stsenaariumi:

- RCP4.5³ – soovitatav põhistsenaarium; mõõdukas, riikide poolt olulisi leevendavaid meetmeid eeldav stsenaarium;
- RCP8.5 – soovitatav lisastsenaarium; pessimistlik, nõrk riikidevaheline koostöö ja valdavalt süsinikul põhinev majandus.

Ajaline prognoos on koostatud aastateks 2040-2070 ja 2070-2100. Järgnevalt on tehtud ülevaatlik kokkuvõtte perioodi 2040–2070 osas ja antud hinnang trendide tõenäosusele lähtuvalt lähiperioodi ilmastikunähtustest.

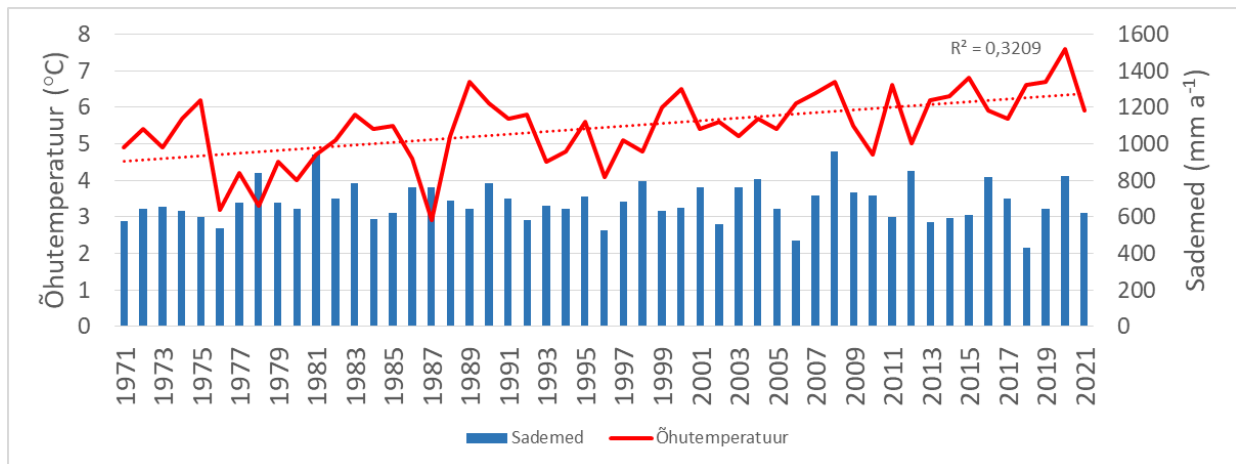
RCP4.5 2040–2070 ja RCP8.5 2040–2070 suureneb aasta keskmine õhutemperatuur võrreldes perioodiga 1971-2000 (5,6 °C) 7,6 °C-ni (+2,0 °C) ja 8,2 °C-ni (+2,6 °C). Oluliselt suurem soojenemine on prognoositud sügis- ja talvekuudel. Modelleeritud on keskmise tuule kiiruse kasvu, mis jääb alla 5% kogu Läänemere kohta keskmiselt. Stsenaariumite põhiselt suureneb sademete hulga kasv 10-14%, kuid aastaaegade ja kuude vahelisi erinevusi ei ole eristatud seonduvalt kasutatud kliimamudelite abil saadud erinevate tulemustega. Prognoositakse lumikattega päevade arvu kahanemist. Aurumise ega pöudade esinemise kohta prognoosi ei anta, kuigi käsitletakse teoreetilist võimalust nende suurenemisele seonduvalt tuule kiiruse kasvu, temperatuuri tõusu ja talvise lumikatte vähenemisega.

Suureneb ekstreemete nähtuste võimalikkus: maksimaalsete temperatuuride kasv on suurem võrreldes keskmiste temperatuuridega; suureneb suurte sadude (ööpäevas üle 30 mm) esinemise sagedus.

Eesti Keskkonnaagentuuri 2022. a avaldatud kliimanormide põhjal nähtub, et võrreldes Luhamaa jt (2015) uuringuandmetega, on keskmine õhutemperatuur tõusnud 6,4 °C-ni, olles 0,8 °C kõrgem perioodi 1971-2000 keskmisest.

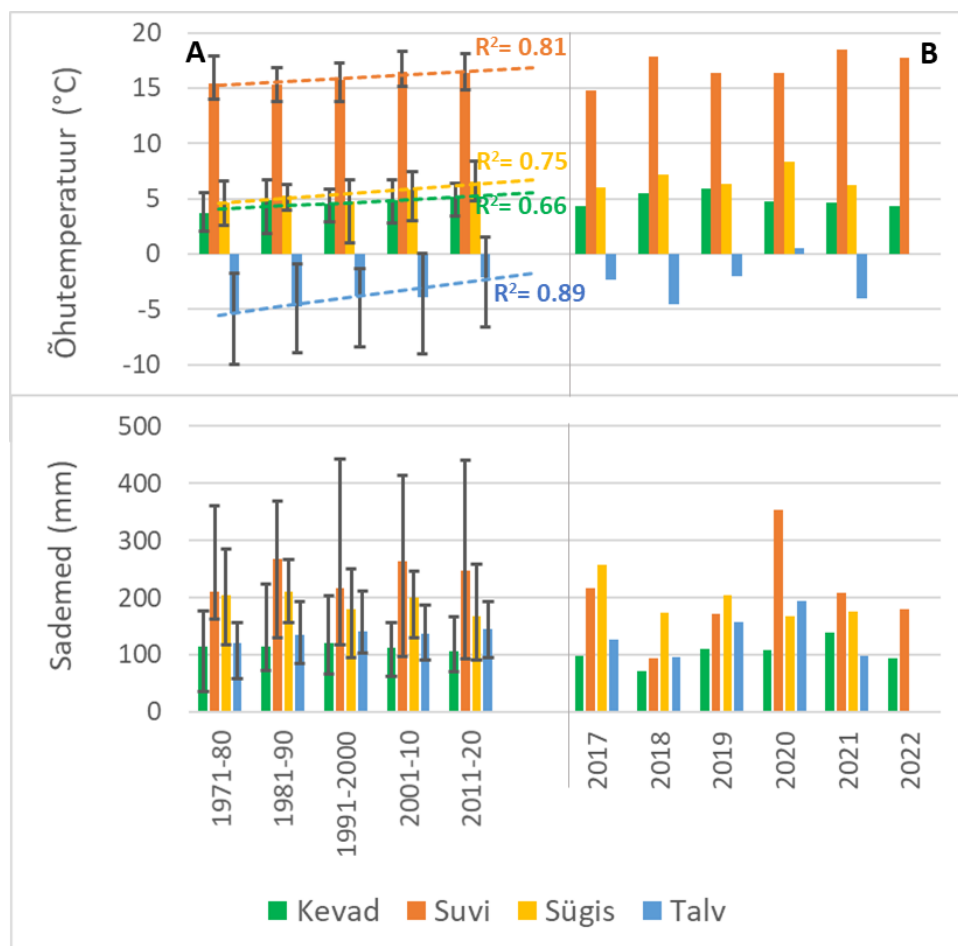
Spetsiifiliselt soode ilmastikunähtuste kogumisele spetsialiseerunud Tooma soojaamas mõõdetakse lisaks sademetele, õhutemperatuurile, vee äravoolu mahule ka sooveetaset, lumekatet ja aurumist. Viimane on oluline hindamaks soo veebilanssi. Joonisel 5 on toodud Tooma soojaamas mõõdetud aasta keskmine õhutemperatuur ja sademete summa perioodil 1971 - 2021. Õhutemperatuuri tõusu kinnitavad ka Toomal kogutud andmed, sademete osas kindlat trendi ei leitud.

³ RCP - Representative Concentration Pathway



Joonis 5. Keskmine õhutemperatuur ja sademete hulk mõõdetud Tooma soojaamas 1971-2021 (andmed Keskkonnaagentuur).

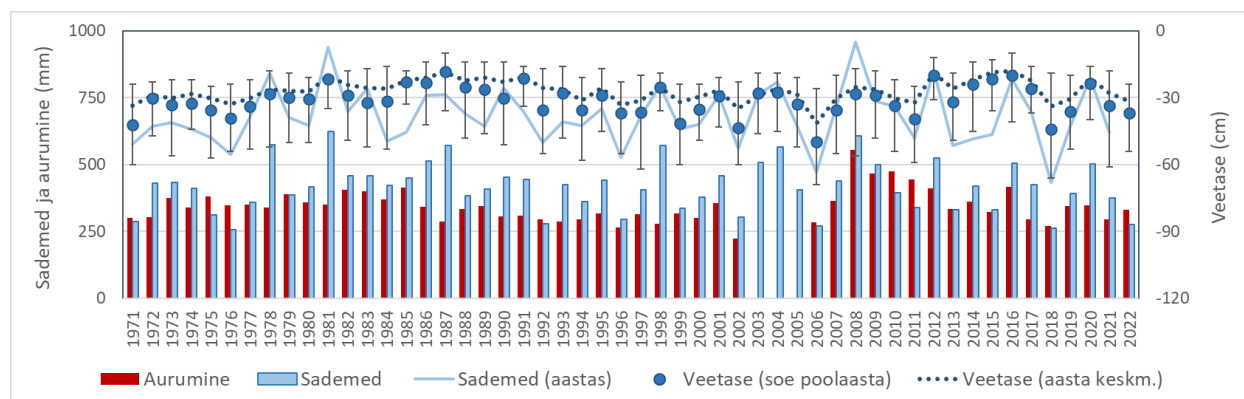
Joonisel 6 on toodud aastaegade kaupa keskmine õhutemperatuur ja sademete summa, mis on mõõdetud Tooma soojaamas 1971- 2022. Suved ja talved on 50 aastaga läinud oluliselt soojemaks. Kevadine ja sügisene temperatuur on aeglasemalt tõusnud. Sademete koguse puhul ei saa välja tuua muutuste trende. Suvel sajab kõige rohkem ja võrreldes teiste aastaegadega on siis ka sademete kogus kõige varieeruvam.



Joonis 6. Aastaegade (kevad: märts, aprill, mai; suvi: juuni, juuli, august; sügis: september, oktoober, november; talv: jaanuar, veebruar, detsember) kaupa keskmine õhutemperatuur ja

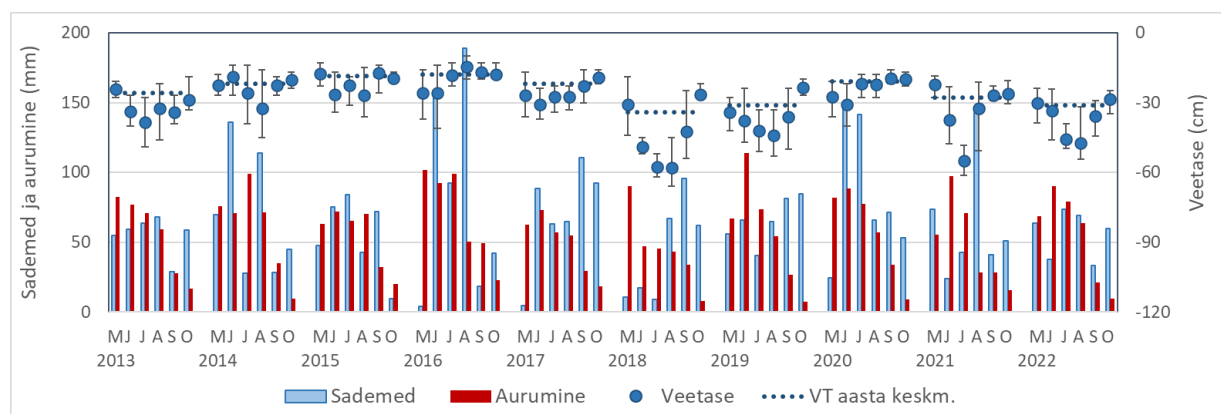
sademetesumma Tooma soojaamas 1971–2020 kümnendite keskmisena ning aastatel 2017–2022 (andmed Keskkonnaagentuurist). Varieeruvust tähistab miinimum ja maksimum väärtused. Katkendliku joontega on näidatud kümnentite keskmise õhutemperatuuri muutuse trendid. 2022. a. talve ja sügise tulemused puuduvad, sest analüüsi valmimise hetkel olid kätte saadavad jaanuar–oktoober andmed.

Sooja poolaasta aurumise ja sademete koguse võrdlus koos soo veetasemega on toodud joonisel 7. Sooja poolaasta sademed moodustavad keskmiselt 61% kogu aasta sademetest. Veetaset soojal poolaastal mõjutab otseselt sademete hulk. Andmed näitavad, et osadel aastatel on keskmine veetase looduslikule soole iseloomulikust tasemest – kuni 30 cm maapinnast – allpool.



Joonis 7. Sooja poolaasta (mai-oktoober) sademed (mm), aurumine (mm) raba pinnalt ja pinnaveetase (cm, keskmine, miinimum ja maksimum) ning aasta keskmine pinnaveetase (cm) ja sadmete (mm) hulk Endla rabas aastatel 1971–2022 (Tooma soojaama andmed Keskkonnaagentuurist). 2003–2005 puuduvad aurumise andmed.

Väheste sademete ja suure aurumise tõttu on madalaim veetase rabas juulis ja augustis (vt joonis 8).



Joonis 8. Aurumine sademete hulk ning veetase kuude (mai, juuni, juuli, august, september, oktoober) kaupa sooja poolaastal Endla rabas 2013–2022. 2022 a. keskmine veetase andmed 1. novembrini (Tooma soojaama andmed Keskkonnaagentuurist).

Sooveetase mõõtepunkti juures oli madalam sademete poolt kuivemal 2018. aastal, olles mõõtepunkti lähiümbruses perioodil juunist augustini 48 – 58 cm sügavusel, seevastu sademeterohkematel aastatel oli see 2016. a 14 kuni 26 ja 2020. a 19 kuni 30 cm sügavusel

Esitatud andmetest nähtub, kui oluline on sademete ja põudade mõju sooveetasemele. Omakorda kiirendab kõrgem õhutemperatuur ja põud kuivale jäänud turba lagunemist, mis võib muuta sooökosüsteemi (ajutiselt) sidujast heite allikaks, millele on viidatud ka IPCC aruandes (Parmesan jt. 2022). Põuaperioodidega kaasneb puudel põuastress, mis võib omakorda viia puistu maapealse biomassi juurdekasvu vähenemisele, puude suremuse kasvule ja suuremale vastuvõtlikkusele kahjurite ning haiguste suhtes (vt ka George jt. 2018). George jt. 2018 pakuvad ühe vastumeetmena välja kahepoolse reguleeritava kuivendussüsteemi, mis võimaldaks pikendada vee viibeaega kuivenduskraavides ja seda ümbristavas pinnases - samas vajab esitatud hüpotees edasisi uuringuid ja katsealasid. Teatud määral pakub puhvrit põua mõjude leevendamiseks looduslähedase veerežiimiga soo, kuid arvestada tuleb, et normkliimale vastavatel aastatel võib kõrgem veetase taaskord pärssida puude juurdekasvu võrreldes kuivendatud aladega.

Suškevičs jt. (2015) teostatud uuringus “Kliimamuutuste mõjuanalüüs, kohanemisstrateegia ja rakenduskava looduskeskkonna ja biomajanduse teemavaldkondades” anti järgnev hinnang seonduvalt võimalike mõjudega soodele. Temperatuuri tõusu ja sademete suurenemisest tingituna mõjutavad hinnangul märgalasid ja soid eeldatavalt kõige enam põudade sagenemine, üleujutus- ja tuleohu suurenemine. Koos õhutemperatuuri tõusu ja sademete suurenemisega seonduvalt prognoositakse kasvuhoonegaaside emissioonide suurenemist looduslikest ja kuivendatud turbaaladelt, kusjuures võib oluliselt suuremat kasvuhoonegaaside emissiooni suurenemist oodata just eelnevalt inimtegevusest mõjutatud aladelt. Teostatud uuringus jõuti järeldusele, et olemasolevate lühiajaliste mõõtmisandmete põhjal on keeruline eristada kliimamuutuste mõjusid inimtegevuse mõjudest.

Kliimamuutuste mõjul veetaseme võimalikust langusest seotud protsesse on uuritud Soomes (Kokkonen jt. 2022), milles jõuti järeldusele, et raba kasvukohatüübis on taimestiku kooslus kõige vastupidavam. Uuringuala veetase oli siiski suhteliselt looduslähedane, jäädes maapinnast vähem kui 30 cm sügavusele - veetaset alandati 5-15 cm. Seevastu madalsoodes täheldati suundumust metsastumisele ja metsaga seotud liikide esinemise sagenemisele. Madalsoodes on kõrge veetase kasvu limiteerivaks faktoriks ehkki madalsoomuld on hea toitelisusega. Rabas jääb pärssivaks teguriks toitainete nappus, mis ei soodusta ka veetaseme langedes suurema produktsiooniga soontaimede kasvu. Kokkonen jt. (2022) said tulemuseks, et veetaseme langusest tulenevalt suureneb soontaimede fotosüntees erinevatel soomuldadel ja sammalde oma jääb muutumatuks. Kogu ökosüsteemi tasemel suurenes fotosüntees vastavalt turvasmulla toitainete sisaldusele - enim madalsoos ja seejärel siirdesoo, seevastu rabades muutust ei leitud. Erandina on välja toodud teistes uuringutes käsitletud põudade mõju, mis vähendavad fotosünteesi kogu ökosüsteemi ulatuses.

Käesoleva töö raames ei leitud uuringut, mis modelleeriks spetsiifiliselt põudade või soojema ja kuivema perioodiga kaasnevast veetaseme langusest tingitud mõjusid NEEle. Seetõttu on võimalik mõju kvantifitseerimata. Seevastu on tugev seos temperatuuride suurenemise ja pinnasevee langemisega seotud pinnasest lähtuvale CO₂ heite kasvule.

Kasvuhoonegaaside emissiooni muutuste prognoos

Taastamistööde eesmärgiks on võimalikult looduslikule soole sarnase veerežiimi taastamine aastase keskmise veetasemega ligikaudu 30 cm maapiinast allpoole, mis on vältimatuks eelduseks sookoosluste taastumiseks 47 ha suurusel alal. Vähesel määral tuleb

kuivendusvõrku ümber kujundada, et tagada vee äravool taastamisala läbiva tee äärest ka peale muu kraavivõrgu sulgemist - sellest lähtuvalt võib kuivenduse mõju jätkuda kuni paarikümne meetri laiuses tsoonis taastamisala läbiva kirde-edela suunalise tee mõlemas küljes, kokku ligi 4 ha suurusel alal. Säiliva kuivenduse mõju siiski ei hinnata, kuna ei ole valmis taastamistööde projektilahendus, kus käsitletakse allesjäävate kraavide põhjakõrgusi. Suletavate kraavide pikkus on ligi 10 km ning pindalaga ligi 1 ha (2 km teeäärseid kraave jääb avatuks).

Taastamiseelne kasvuhoonegaaside bilanss

Hetkeolukorra kasvuhoonegaaside bilansi hindamiseks kasutatakse referentsandmestikuna Eesti riiklikus kliimaaruandluses kasutatavaid emissioonifaktoreid (tabel 3; Keskkonnaministeerium 2022, 2023). Selles kontekstis on oluline, et võrreldes 2022. a kasutatud CO₂ heiteteguritega, uuendati 2023. a metoodikat, mis viis pinnasest lähtuva CO₂ heite kaks korda suuremaks. Alternatiivina annab hinnangu IPCC (2014) andmestikul, kus on kokku võetud boreaalse ja parasvöötme kuivendatud turvasmuldadelt lähtuvad emissioonid (tabel 4). Põhjus on andmete suur varieeruvus ja Eesti põhiste andmete puudumine, mille põhjal saaks määratleda siinsetele tingimustele paremini vastavad näitajad.

Riiklikus kasvuhoonegaaside aruandluses (Keskkonnaministeerium 2022, 2023) arvestatakse kuivendatud turvasmuldadelt paiknevatelt metsamaadelt nende kasvuhoonegaaside bilanss järgnevalt: CO₂ heide ja sidumine elus biomassis (nii maapealses- kui maa-aluses osas) vastavalt puistu tagavara muutustele, seotud süsiniku maht surnud puidus, CO₂, CH₄ ja N₂O heitkogused kuivendatud turvasmuldadelt (kaugus kuivenduskraavist 100 m), ning CH₄ ja N₂O heitkogused põlengutest. Turvasmuldade emissioonifaktoriks on CO₂ osas 0,34 t ja 0,68 t CO₂-C ha⁻¹ a⁻¹ (tabel 3). Vastavalt ala toitelisusele on toitainerikastelt kuivendatud turvasmuldadelt CH₄ ja N₂O emissioonifaktoriteks vastavalt 2,0 kg CH₄ ha⁻¹ a⁻¹ ja 3,2 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹, toiteainevaeselt alalt on emissioonid 7,0 kg CH₄ ha⁻¹ a⁻¹ ja 0,22 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹. Täiendavalt lisandub CH₄ emissioon kraavidelt – 217 kg CH₄ ha⁻¹ a⁻¹.

Pääsküla kontekstis ei anta hinnangut CO₂ sidumisele vastavalt puistu tagavara muutustele, vaid juurdekasvu põhiselt; samuti pole arvestatud C mahtu surnud puidus ja põlengutest lähtuvaid heiteid ning N₂O heidet.

Keskkonnaministeeriumi (2022 ja 2023) alusel on taastamisala koos puistu kasvuga kliimat jahutava mõjuga ja samuti toimub ka senistes tingimustes C sidumine, kuid kogu ala sidumine sõltub eelkõige puistusse seotavast C-st (Tabel 4). Puistut arvestamata toimub turbapinnasest süsiniku vabanemine ligikaudu 16 kuni 137 t a, s.o. ligi 0,3 kuni 2,9 t ha⁻¹ a⁻¹. IPCC (2014) alusel on ala ka taastamiseelselt kliimat soojendava mõjuga. Teisalt, antud analüüs ei käsitle võimalike raie töötlusi ja puidu kasutust, mis on oluline komponent nende alade süsinikuringe ja kliimamõjude hindamisel (vt joonis 2). Eeldatakse, et alalt raiutud puud paigutatakse turbavõtuaukudesse, kus nendes seotud süsinik salvestatakse pikaajaliselt – seeläbi pole Pääsküla taastamise kontekstis lisatud süsinikuarvestusse raiutud puidu eemaldamisest tingitud süsiniku heidet.

Tabel 3. Metsamaadelt lähtuvad kasvuhoonegaaside emissioonifaktorid

Maakasutusviis turvasmullaga alal	Toitelisus	CO ₂ -C t ha ⁻¹ a ⁻¹	DOC t ha ⁻¹ a ⁻¹	CH ₄ kg ha ⁻¹ a ⁻¹	CH ₄ kraavist kg ha ⁻¹ a ⁻¹	N ₂ O-N kg ha ⁻¹ a ⁻¹	CO ₂ ekv t ha ⁻¹ a ⁻¹ ***
Kuivendatud metsamaa*	Toitainete vaesed mullad	0,34	Puudub	7	217	0,22	1.5
Kuivendatud metsamaa*	Toitainete rikkad mullad	0,34	Puudub	2	217	3,2	2.8
Kuivendatud metsamaa**	Toitainete vaesed mullad	2,6 (2,0-3,3)	0,31 (0,19-0,46)	2,5 (-0,6-5,7)	217 (41-393)	0,22	10.9
Kuivendatud metsamaa**	Toitainete rikkad mullad	2,6 (2,0-3,3)	0,31 (0,19-0,46)	2,5 (-0,6-5,7)	217 (41-393)	3,2	12.2
Kuivendatud metsamaa****	Toitainete vaesed mullad	0.68	Puudub	7	217	0.22	2.8
Kuivendatud metsamaa****	Toitainete rikkad mullad	0.68	Puudub	2	217	3.2	4.0

* - Keskkonnaministeerium 2022

** - IPCC 2014 Chapter 2. Drained Inland Organic Soils

*** - arvestamata kraavidest tulenevat CH₄ emissiooni

**** - Keskkonnaministeerium 2023

Tabel 4. Pääsküla taastamisala aastane KHG ja C bilanss taastamiseelselt

Kuivendatud ala tüüp	Pindala	t CO _{2ekv}		
		KeM* 2022	IPCC 2014	KeM* 2023
Toitainete vaesed mullad	46,8	72,1	507,8	130,5
Toitainete rikkad mullad	0,2	0,6	2,4	0,8
Puistu	47,0	-221,9	-221,9	-221,9
Kraavid (CH ₄)	1,2	7,0	7,0	7,0
Kokku CO _{2ekv} t		-142,3	295,3	-83,6
		t süsinikku		
Toitainete vaesed mullad	46,8	16,2	136,3	32,1
Toitainete rikkad mullad	0,2	0,1	0,6	0,1
Puistu	47,0	-60,5	-60,5	-60,5
Kraavid (CH ₄)	1,2	0,2	0,2	0,2
Kokku C t		-44,0	76,6	-28,1

* - keskkonnaministeerium

Taastamistööde järgne KHG ja C bilanss

Aro jt. (2022), Kareksela jt. (2021) ja Wilson jt. (2016) hinnangute (vt tabel 2) põhjal on boreaalses vööndis taastatud sood süsiniku sidujad, kuid seonduvalt metaani voogude suurenemise või taastumisega on neil kliimat soojendav mõju. Seevastu parasvööndis on vood Wilsoni jt. (2016) põhiselt sarnased eelnevale toitainevaestes tingimustes, kuid toitainerikkamas keskkonnas on neid hinnatud mõõtmisandmetele tuginevalt süsiniku heite allikaks. Seeläbi leiame, et andmete ja hinnangute suure varieeruvuse taustal on põhjendatud kasutada NEE ja DOCi voogude hindamiseks Wilsoni jt. (2016) poolt paras- ja boreaalse vööndi kohta antud voogude keskmistatud väärtusi, seda enam, et Pääsküla raba asukoha ilmastik on sarnane Lõuna-Soome tingimustele, millele põhinevad oluline osa Wilsoni jt. (2016) koostatud hinnangust boreaalse vööndi kohta. Eestis teostatud mõõtmisandmete maht on piisav (uuringualade arv 29, erinevad uuringud toimusid seitsmel aastal 2009 kuni 2020), et nende põhjal anda hinnang metaanivoogude, eelkõige rabade, kohta. Kasutame kogutud andmeid ka madalsoode kohta, kuigi mõõtmisandmete maht on väike.

Eelkäsitletud teaduskirjanduse põhjal võib eeldada, et taastamistöödele järgneva 10 aasta jooksul kujunevad alale looduslikele soodele sarnased lage-mättaraba ja raba või

siirdesoometsad, ühte serva ka madalsoomets. Säiliva metsa kasv eeldatavasti aeglustub (vt ka Kareksela jt. 2021)

Kliimamuutuste põhjal võib eeldada põuaperioodide sagenemist, ekstreemseid sajuhooge, soojemat sügist ja soojemat lumeta talve. Vegetatsiooniperioodi sademete vähesus ja aurumise intensiivsus võivad vegetatsiooniperioodil kaasa tuua sooveetaseme languse sügavamale kui 30 cm, kuid kindlat pikaajalist trendi selle tõenäosuse suurenemise kohta Tooma soojaama andmetele tuginevalt ei tuvastatud. Hinnangus kasutatud uuringud ei anna spetsiifilisi andmeid selle kohta, milline on kliima- või ilmastikumuutuste võimalik kvantitatiivne mõju kasvuhoonegaaside voogude muutusele taastatavatel aladel. Teatud tagasilöögid võivad põudade mõjul olla puistu arengule, samuti säilib tulekahjude esinemise tõenäosus (kõrgema veetaseme korral võib võimalik mõju ja ulatus olla väiksemad). Küll aga võib eeldada, et aladel, kus kuivenduse mõjud säilivad, muutub turba mineraliseerumine veelgi intensiivsemaks, sest viimane on lisaks pinnaseveetasemele heas korrelatsioonis õhutemperatuuri muutustega (vt ka Suškevičs jt. 2015).

Süsinikdioksiid

Heite osas on kuivendatud aladel aluseks võetud riiklikus KHG aruandluses antud heite määr (Keskkonnaministeerium 2022, 2023) ja taastamisjärgselt Wilsoni jt. (2016) boreaalse ja parasvöötme keskmistatud (hemiboreaalne) väärtus (tabel 5). Võrreldes Keskkonnaministeerium 2022 ja 2023 andmeid, on uuendatud andmete põhiselts kuivendatud ala heide kaks korda korda suurem.

Tabel 5. CO₂ emissioon taastamisalalt lähtuvalt Keskkonnaministeeriumi (2022 ja 2023) ja Wilsoni jt (2016) andmetest

Sihtkooslus	Pindala	Enne taastamist Keskkonnaministeerium 2022		Taastamisjärgselt 10 a möödudes	
		CO ₂ t ha ⁻¹ a ⁻¹	Heide kokku t CO ₂	CO ₂ t ha ⁻¹ a ⁻¹	Heide kokku t CO ₂
Lageraba	14,5	1,25	18,1	-1,05	-15,17
Raba või siirdesoo mets	32,4	1,25	40,4	-1,05	-33,89
Madal soo või Madal soomets	0,3	1,25	0,4	-0,09	-0,03
KOKKU			58,9		-49,1
Sihtkooslus	Pindala	Enne taastamist Keskkonnaministeerium 2023		Taastamisjärgselt 10 a möödudes	
		CO ₂ t ha ⁻¹ a ⁻¹	Heide kokku t CO ₂	CO ₂ t ha ⁻¹ a ⁻¹	Heide kokku t CO ₂
Lageraba	14,5	2,50	36,3	-1,05	-15,17
Raba või siirdesoo mets	32,4	2,50	81,0	-1,05	-33,89
Madal soo või Madal soomets	0,3	2,50	0,8	-0,09	-0,03
KOKKU			118,0		-49,1

Metaan

Heite osas on kuivendatud alade osas aluseks võetud Eesti riiklikus kasvuhoonegaaside aruandluses (2022, 2023) antud heite määr. Hinnang taastamistööde järgselt pinnasest lähtuvatele metaani voogudele põhineb Eestis teostatud uuringute andmetele (vt joonis 4, lisa 1). Seonduvalt taastamistööde tulemusel kujuneva kõrgema pinnaveetasemega suurenevad ka metaanivood (tabel 6). Taastamisjärgselt arvestati ka teeäärsete kraavide säilimisega ja nendelt lähtuva metaani heitega vastavalt eelnimetatud heite määradele, kuid selle osa on väike (0.004 t) ja seetõttu ka tabelis kajastub see nullina. Taandades metaani süsinikule, moodustab metaaniga kaasnev süsinikuheide taastamisjärgselt 8,3 t (vt tabel 10).

Tabel 6. CH₄ emissioon, sh kuivenduskraavidelt lähtuvalt Keskkonnaministeeriumi (2022, 2023) ja Wilson jt (2016) andmetest, taastamisjärgselt Eestis teostatud uuringutel põhinevatest andmetest

		Enne taastamist		Taastamisjärgselt 10 a möödudes	
Sihtkooslus	Pindala	CH ₄ t ha ⁻¹ a ⁻¹	Heide kokku t CH ₄	CH ₄ t ha ⁻¹ a ⁻¹	Heide kokku t CH ₄
Lageraba	14,5	0,007	0,10	0,234	3,39
Raba või siirdesoo mets	32,4	0,007	0,23	0,234	7,58
Madal soo või Madal soomets	0,3	0,002	0	0,022	0,01
Kraavid	1,2	0,217	0,59	0,217	0,00
KOKKU			0,38		10,98

Lahustunud orgaaniline süsinik

Lahustunud orgaanilise süsiniku väljakandel on kuivendatud alade osas aluseks võetud IPCC (2014) antud heite määr ja taastamisjärgselt Wilsoni jt (2016) boreaalse ja parasvöötme keskmistatud väärtus - võrreldes kuivendatud alaga väheneb väljakanne ligi kaks korda (tabel 7).

Tabel 7. DOC väljakanne ja seonduv CO₂ heide lähtuvalt IPCC (2014) ja Wilson jt (2016) andmetest

	Enne taastamist		Taastamisjärgselt 10 a möödudes	
Pindala	DOC t C ha ⁻¹ a ⁻¹	Heide kokku t CO ₂	DOC t ha ⁻¹ a ⁻¹	Heide kokku t CO ₂
14,5	0,31	16,5	0,16	8,5
32,4	0,31	36,9	0,16	19,0
0,3	0,31	0,3	0,16	0,2
		53,8		27,8

Puistusse seotud süsinik

Pääsküla taastamisalal kasvav mets on tekkinud osalt loodusliku soometsana või kasvanud endisele lagerabale kuivenduse ja põlengute tõttu tekkinud tingumuste tagajärjel. Hetkel on taastamiseelse kooslusena alal mustika-kõdusoomets, millest suurem osa kasvab sügaval rabamullal (R'''), ala serval on kuivendatud madalsoomets (Tabel 8). Taastamisjärgse sihtkooslustena on määratletud raba- ja siirdesoomets ning lage mättaraba.

Tabel 8. Taastamisala metsakooslused ja taastamisjärgne sihtkooslus

Taastamiseelne kooslus	Sihtkooslus	Mullatüüp*	Pindala, ha
Mustika-kõdusoomets	Lage mättaraba	R''', t1	14,9
Mustika-kõdusoomets	Rabamets	R''', t1	10,9
Mustika-kõdusoomets	Rabamets	R''', t1; W servas S''' t1 ja t2	21,0
Madalsoomets (K), mustika-kõdusoomets	Madalsoo, madalsoomets	AM''', M'''; M''', S'''' t2	0,2
	KOKKU		47

* - mullatüüp põhineb mullakaardi andmetel, Maa-amet 2022

Taastamiskava alusel on kavandatud lage-mättaraba koosluse taastamiseks teostada lageraied 14,5 ha suurusel alal. Lisaks teostatakse harvendusraied ligi 17 ha-l, et luua üleminekutsoon lageraiega alal ning töötlustest puutumata metsa vahel. Antud aladele kujuneb eeldatavasti raba või siirdesoomets. Ülejäänud 15,5 ha suurusel alal mets säilib ja nendest kujunevad eeldatavasti looduslikud madalsoo, siirdesoo ja rabametsad.

Puistu edasise arenguga seonduvat süsiniku sidumist Pääsküla taastamisalal on hinnatud järgnevalt:

- enam kui 100 tm ha⁻¹ metsa tagavaraga aladel säilib juurdekasv samas mahus võrreldes taastamiseelse olukorraga. Seda soodustavad puude võra kaudu aurumine, mis hoiab veetaset puude juurdekasvu ja toitainete kättesaadavuse toetamiseks piisavalt sügaval. Toitainete olemasolu tagab ka varasema põlengu läbi pinnasesse ladestunud ained;
- madala boniteediga (IV ja V) aladel, mida iseloomustab ka taastamiseelselt väike juurdekasv (1,4 kuni 3,4 tm ha⁻¹), säilib juurdekasv senisel määral. Vastava hinnangu saamiseks kasutati juurdekasvu andmeid ka sarnastes tingimustes kasvavate puistute kohta Eestis;
- väiksema kui 100 tm tagavaraga 10-50 vanuselistes metsaeraldistel eeldati puistu juurdekasvu vähenemist 2.5 kordselt - selle looduslikule nivoole. Viimast tingib ka niisketes tingimustes vähenev taimede kasvuks kättesaadava toitainete hulk;
- aladel, kus plaanitakse harvendusraiet, lähtutakse eeltoodud kriteeriumitest;
- eeldatakse, et antud tingimused kujunevad välja 10 a jooksul.

Taastamiseelselt on taastamisala puistu aastane juurdekasv 2021. a koostatud metsamajandamiskava alusel 214,4 tm, mis annab maapealses puidus seotud sidumiseks

221,9 t CO₂, taastamisjärgset juurdekasvu prognoos on 73,4 tm - vastavalt 75,9 t CO₂ (Tabel 9). Oluline osa juurdekasvu vähenemisel on puistu eemaldamisel ja metsamaa vähenemisel, ala üleselt keskmise juurdekasvu langemine 2,2 tm ha⁻¹ praeguselt juurdekasvult 3,9 tm ha⁻¹.

Puistu eemaldamisega seotud süsinikuheidet pole eraldi esitatud, kuna taastamistööde käigus on kavandatud selle paigutamine paisude rajamiseks võetava turba aukudesse. Taastamistöödest tuleneva veetaseme tõusu mõjul võib eeldada, et puud jäävad soovee tasemest allapoole, mis pärsib nende kõdunemist - seeläbi on tõenäoline, et välditakse puude lagunemisest tingitud CO₂ heidet ja suurem osa puidus seotud süsinikust akumuleerub pinnases. Kinnituse sellele annavad Eesti soodest hästi säilinud palkteed või ka ehituste osas (joonis 9).



Joonis 9. Lahemaal Rahvuspargist, Laukasoo turbast leitud vai, mis oli tõenäoliselt ligikaudu 100 a eest ehitatud turbakuuri osa ja paiknes soovees hapnikuvaeses keskkonnas. Vaia ülemine osa, mis oli kuivas pinnasekihis, oli kõdunenud - teatud osa sellest oli ladestunud varisena, teine osa lendunud puidu lagundajate poolt CO₂na atmosfääri. Foto: J.-O. Salm

Toodud lähenemine on teoreetiline, sest teadaolevalt puuduvad hinnangud taastamisjärgselt puistu juurdekasvu ja sellega kaasneva puistu tagavara muutuste kohta. Samuti varise ja alusrinde süsinikuvaru muutuste kohta. Käesolevas analüüsis võeti eelduseks, et taastamistööde tulemusel taastub või säilib looduslikele soometsadele iseloomulik juurdekasv ja anti hinnang üksnes juurdekasvu põhisele CO₂ sidumisele. Hinnangu kokkulangevust looduses toimuvaga saab anda taastamistöödest 10. a möödudes, kasutades alusmaterjalina 2021. a koostatud metsamajandamiskava või LIDAR andmestikku ja andes hinnangu muutustele puistu tagavaras. Viimane annab võimaluse täpsustada puistus, sh nii puude maapealses kui ka maa-aluses osas iga-aastaselt seotava süsiniku hulga.

Tabel 9. Puistu juurdekasv (tihumeetrites) ja sellega kaasnev CO₂ sidumine (tonni aasta kohta)

	Enne taastamist		Taastamisjärgselt 10 a möödudes	
	Juurdekasv (tm)	Seotud CO ₂ (t)	Juurdekasv (tm)	Seotud CO ₂ (t)
Rabamets	68,6	71,0	39,6	41,0
Raba või siirdesoo mets	141,6	146,6	33,2	34,4
Madalsoon või Madalsoonmets	4,2	4,3	0,6	0,6
KOKKU	214,4	221,9	73,4	75,9

Võrreldes soode süsinikuvaruga, võib puistusse seotava süsiniku osatähtsus olla väike – Kareksela jt. (2021) hinnangul on 100 m³ hektaritagavaraga puistu süsinikutagavara võrreldav 10 cm paksuses turbakihi seotuga. Samas panustavad puud turba akumulatsioonidesse – osa puudest, eelkõige nende juurtest ladestub turbana (Minkkinen jt. 2018). Käesolevas töös kajastub see hinnangus pinnasesse seotava CO₂ kohta. Pikaajalises vaates on süsinikubilansi hindamisel oluline arvestada eelkõige orgaanilise materjali ja süsiniku ladestumist turbana, samas on lühemaajalises perspektiivis oluline ka (soode) puistus seotud süsiniku kogus (vt ka joonis 2 ja Minkkinen jt. 2018).

Koondbilanss

Erinevate alusandmete (Keskkonnaministeerium 2022 ja 2023) põhisel võib Pääsküla taastamisala taastamise tulemusel aastane CO₂ sidumine kas väheneda 12,0 t (vastavalt süsiniku sidumine 3,3 t võrra) või suureneda 47,1 t võrra (süsinikuna 12,8 t). Arvestades juurde ka metaani voogudega kaasnev süsiniku heide, siis süsiniku sidumine väheneb 11,1 t või suureneb 5,0 t võrra (tabel 10). Ala jääb endiselt süsinikku sidujaks, kuid seonduvalt CH₄ voogude suurenemise ja jätkuva DOCi väljakandega võib turbast süsiniku ärakanne jätkuda.

Tabel 10. Taastamisala süsinikuvoogude koondbilanss ja kliimamõju ühe aasta lõikes

	Enne taastamist, keskkonnaministeerium 2022			Taastamisjärgselt 10 a möödudes			Heite muutus
	t	C t a	CO ₂ ekv	t	C t a	CO ₂ ekv	C t
CO ₂	58,9	16,0	58,9	-49,1	-13,4	-49,1	-29,4
CH ₄	0,6	0,4	15,9	11,0	8,3	296,5	7,8
DOC - CO ₂	53,8	14,7	53,8	27,8	7,6	27,8	-7,1
Puistu CO ₂	-221,9	-60,5	-221,9	-75,9	-20,7	-75,9	39,8
KOKKU		-29,3	-93,3		-18,2	199,2	11,1
	Enne taastamist, keskkonnaministeerium 2023			Taastamisjärgselt 10 a möödudes			Heite muutus
	t	C t a	CO ₂ ekv	t	C t a	CO ₂ ekv	C t
CO ₂	118,0	32,2	118,00	-49,1	-13,4	-49,1	-45,5
CH ₄	0,6	0,4	15,91	11,0	8,3	296,5	7,8
DOC - CO ₂	53,8	14,7	53,78	27,8	7,6	27,8	-7,1
Puistu CO ₂	-221,9	-60,5	-221,92	-75,9	-20,7	-75,9	39,8
KOKKU		-13,2	-34,2		-18,2	199,2	-5,0

Kokkuvõte

Pääsküla taastamisala süsinikuvoogude koondbilansi hinnang näitab, et taastamisjärgselt on alal süsiniku aastane sidumine 18,2 t (tabel 10). Sellest oluline osa on pinnasesse ja puistusse seotud süsinikul, vastavalt 13,4 ja 20,7 t a⁻¹. Seevastu metaani ja lahustunud orgaanilise süsiniku poolt viiakse alalt välja vastavalt 8,3 ja 7,6, kokku 15,8 t a⁻¹. Taastamiseelse olukorraga võrreldes on olulised järgnevad muutused: katkeb pinnasesse seotud süsiniku vabanemine CO₂-na, väheneb väljakanne DOCina, suureneb metaani emissioon ja sellega seotud süsiniku väljakanne. Otseselt turbast lähtuvad süsinikuvood väheneksid kuivenduseelse olukorraga oluliselt: 28,7 kuni 44,8 t aasta kohta, teisalt – CH₄ ja DOCi suure osakaaluga võib säilida turbast süsiniku väljakanne 2,4 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹.

Oluline on siinkohal viidata, et pikaajaliselt on sood toiminud süsiniku sidujatena, vastasel korral ei oleks turvast moodustunud. Turunen jt. (2002) antud hinnangu põhjal on süsiniku sidumine Lõuna-Soomes paiknevates rabades ja siirde- või madalsoodes olnud vastavalt 0,29 ja 0,19 t C ha⁻¹ a⁻¹ ehk 1,05 ja 0,69 t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Ligilähedastele tulemustele on Eestis jõudnud ka Ilomets (2005).

Toodud erinevused andmetes, mis on saadud erinevate meetodikate abil, annavad kinnitust vajadusest viia läbi pikemaajalised (>10 a) süsinikuvoogude uuringud Eesti soodes ja turbaaladel, mis võimaldaksid anda hinnangu nii kuivendatud, looduslike kui ka korrastatud soode süsinikubilansile, korrastustööde mõjule kui ka ilmastiku teguritele soode süsinikubilansis. Kriitiline on siinkohal ka lahustunud orgaanilise süsiniku väljakande uuringute

teostamine, kuna IPCC (2014) ja Wilson jt. (2016) andmestik, mida kasutatakse emissioonifaktoritena, põhineb suhteliselt väikesel hulgal uuringutel.

Käesoleva analüüsi tulemusel koondati Eesti looduslikes, korrastatud või vähemmõjutatud soodes teostatud ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE) uuringute ja metaani voogude mõõtmisandmed. Kogutud andmete põhjal on võimalik hinnata siinses piirkonnas paiknevate looduslike ja korrastatud soo-alade (eelkõige rabade) metaani emissiooni. NEE andmete vähesus enamaks aga võimalust ei andnud. Seeläbi on oluline andmestikku täiendada ja ka metaani voogude hinnangut täpsustada, sest Eestis teostatud uuringud on teostatud erinevatel uurimisaladel 1 (sh mõnedel juhtudel üksnes vegetatsiooniperiood) kuni 3 aasta pikkuste perioodidena, mis ei kata ilmastiku varieeruvusest, sh kliimamuutustest tingitud muutuseid.

Võrreldes boreaalset ja parasvööndit käsitlevate teaduskirjanduse andmetega (Aro jt 2022, Kareksela jt. 2021, Wilson jt. 2016) või IPCC (2014) soovitustega on käesolevas analüüsis metaani heide oluliselt suurem. Mõnel juhul jäävad eelviidatud andmed käesoleva analüüsi 95%-usalduspiiridesse, osalt aga on sellest väiksemad. Kas ja kuivõrd on Eestis kogutud andmed pikaajalisest keskmisest suuremad, annab vastuse täiendavate gaasimõõtmiste teostamine ja andmeanalüüs.

Täiendav mõõde siinkohal on ka Eesti paiknemine paras- ja boreaalse vööndi piirimail, mis läbi IPCC (2014) ega Wilson jt. (2016) poolt soovitatud parasvöötme emissioonifaktorid ei pruugi siinsetele oludele kõige paremini vastata. Seeläbi kasutasime ka siinse hinnangu koostamisel mõlema eelpool nimetatud vööndi kohta antud hinnanguid CO₂ ja DOC voogude kohta. Oluline on sarnaste uuringute ja tööde puhul kasutada Soome kogemusi, sest vastavate uuringute ja meetodikate täiendamisel ollakse maailmas esirinnas, samuti on tingimused riigi lõunaosas sarnased Eestile.

Eeldatavasti täiendatakse lähiaastatel ka hinnanguid võimalike kliimamuutuste mõju kohta Eestis, mille põhjal saaks paremini prognoosida muutusi looduslikes, korrastatud ja kuivendatud soodes (näiteks sademete ja aurumise osakaalu ning selle mõju soo elustikule, sooveetasemetele ning süsinikuvoogudele). On tõenäoline, et järjest olulisemaks muutub siinsetes soodes seotud süsiniku säilitamine, sest õhutemperatuuri soojenemine, ekstreemsed põuad, kasvav maastikepõlengute oht või lumevaesed talved võivad kaasa tuua soode käekäiku puudutavaid muutusi. Seda enam on oluline süsinikurikaste soode veerežiimi taastamine, et hoida neid võimalike mõjude süvenemise eest või minimeerida kaasnevaid riske.

Soovitav on teostada ka Pääsküla taastamisalal seiretöid, mis aitavad hinnata süsinikubilansi muutusi taastamisalal kui ka laiemalt Eestis: taimestiku seire hindamiseks soodele iseloomuliku koosluse taastumist ja elustiku tagasitulekut, veetaseme seire hindamiseks taastamisjärgset veerežiimi ja ilmastiku mõju, metsaseire ja hinnang metsa parameetrite (juurdekasv, tagavara, alusrinne ja varis) muutustele. Gaasivoogude mõõtmine peab katma siinses piirkonnas esindatud sootüüpe ja olema pidev ning pikaajaline (>10 a). Regionaalne lähenemine, samaaegne uuringute teostus Lätis ja Lõuna-Soomes, aitab selgitada ja kvantifitseerida ka võimalike kliimamuutustega seotud mõjusid, seetõttu on oluline sarnase meetodikaga uuringute läbiviimine ka lähiriikides.

Metaanivoogude ja nende kliimamõju arvestamine näitab, justkui (korrastatud) sood oleksid kliimat soojendavad – siinkohal on siiski oluline silmas pidada soode pikaajalist mõju kliima reguleerimisel ja looduslike märgalalade toimimisest tingitud stabiilset, mitte kasvavat metaani kontsentratsiooni atmosfääris. Oluline on vähendada pika viibega CO₂ sattumist atmosfääri ja vältida täiendavat süsiniku leket, mis kaasneb soode kuivendusega ja viimase tõttu ka maastikupõlengutele altima keskkonnaga. Samas on paljud üle maailma läbi viidud uuringud näidanud, et isegi kui märgalad on alguses n.ö. kliimat soojendavad, siis teatud aja möödudes, mis võib võtta aega aastakümneid, muutuvad nad ikkagi neto-KHG sidujateks ehk kliimat jahutavateks ökosüsteemideks. Siinkohal tuleb arvestada ka seda, et sood on moodustunud aastatuhandete jooksul ja peale hävitamist/rikkumist ei saa eeldada, et nende taastumine on kiire protsess.

Kasutatud kirjandus

- Aljaste, A. 2012. Melioreeritud turbamaardlate kasutusvõimaluste hindamine. Pilootprojekt. Projekti aruanne. SA Eestimaa Looduse Fond. https://media.voog.com/0000/0037/1265/files/Melioreeritud_turbamaardlate_projekti_koondylevaade.pdf
- Alm J., Shurpali N.J., Tuittila E.S., Laurila T., Maljanen M., Saarnio S. Minkkinen K. 2007a. Methods for determining emission factors for the use of peat and peatlands – flux measurements and modelling. *Boreal Env. Res.* 12: 85-100.
- Alm J., Shurpali, N.J., Minkkinen, K., Aro, L., Hytönen, J., Laurila, T., Lohila, A., Maljanen, M., Martikainen, P.J., Mäkiranta P., Penttilä T., Saarnio S., Silvan N., Tuittila E.-S., Laine J. 2007b. Emission factors and their uncertainty for the exchange of CO₂, CH₄ and N₂O in Finnish managed peatlands. *Boreal Env. Res.* 12: 191-209.
- Aro, L., Assmuth, A., Haltia, E., Hellsten, S., Larmola, T., Lempinen, H., Lindfors, L., Lohila, A. K., Lång, K., Miettinen, A., Minkkinen, K., Myllys, M., Nieminen, M., Ollikainen, M., Ojanen, P., Sarkkola, S., Sorvali, J., Seppälä, J., Tolvanen, A., Vainio, A., Wall, A. ja Vesala, T. 2022. Turvemaiden käytön vaihtoehdot hiilineutraalissa Suomessa . Suomen ilmastopaneelin raportti , Nro 2/2022 , *Suomen ilmastopaneeli*
- Berglund, Ö. 2011. Greenhouse gas emissions from cultivated peat soils in Sweden. https://www.researchgate.net/publication/50220768_Greenhouse_gas_emissions_from_cultivated_peat_soils_in_Sweden
- Bubier, J.L., Frolking, S., Crill, P.M., Linder, E. 1999. Net ecosystem productivity and its uncertainty in a diverse boreal peatland. *J. Geophys Res.* 104: 683-92.
- Byrne, A.K., Chojnicki, B., Christensen, T.R., Drösler, M., Freibauer, A., Friborg, T., Frolking, S., Lindroth, A., Mailhammer, J., Malmer, N., Selin, P., Turunen, J., Valentini, R., Zettenberg, L. 2004. EU Peatlands: Current Carbon Stocks and Trace Gas Fluxes. Edited by Christensen R., Friborg T. Discussion paper originated from a workshop in Lund, Sweden, October 2003, a contribution to the project *Concerted Action CarboEurope-GHG* which is part of CarboEurope Cluster. <http://gaia.agraria.unitus.it/ceuroghq/ReportSS4.pdf> - vaadatud 15.06.2007.
- Claude, L. ja Pellerin, S. 2007. Fires in temperate peatlands (southern Quebec): past and recent trends. *Botany* 85.3: 263-272.
- Edwards, C., Hales, B.A., Hall, G.H. 1998. Microbial processes in the terrestrial carbon cycle: methane cycling in peat. *Atmos. Environ.* 32: 3247-3255.
- Escobar, D., Belyazid, S. and Manzoni, S. 2022. Back to the Future: Restoring Northern Drained Forested Peatlands for Climate Change Mitigation. *Front. Environ. Sci.* 10:834371. doi: 10.3389/fenvs.2022.834371
- Eesti Keskkonnaagentuur. 2022. Õhutemperatuurid ja sademed Tooma soojaamas 1971- 2022.
- Evans, C.D., Peacock, M., Baird, A.J. et al. 2021. Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature* 593, 548–552 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- Frenzel, P., Karofeld, E. 2000. CH₄ emission from a hollow-ridge complex in a raised bog: the role of CH₄ production and oxidation. *Biogeochemistry.* 51: 91-112.
- Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, doi:10.1017/9781009157896.009
- George, J.-P., Lang, M., Hordo, M., Metslaid, S., Post, P., Tamm, T. 2020. Potential of ecological modelling and smart-drainage development for mitigating adverse effects of future global change-type droughts for the Estonian forest sector. *Metsanduslikud Uurimused* 73, 98–106, ISSN 1406-9954.
- Gorham, E. 1991: Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable response to climatic warming. *Ecol. Appl.* 2: 182-195.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>

IPCC 2014. – Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Switzerland

Hainla, V. 1957. Siirdesoomännikute kuivendamise tulemustest Eestis. *Metsanduslikud Uurimused* 1:5–78.

Ilomets, M. 2005. Turba juurdekasv Eesti soodes. Lõpp-aruanne Keskkonnainvesteeringute Keskuse rakenduslikule uurimisprojektile. Tallinn

Janzen, H. H. 2004. Carbon cycling in earth systems – a soil science perspective. *Agr.Ecosyst. Environ.* 104: 399–417.

Jarašius, L., Etzold, J., Truus, L., Purre, A.-H., Sendžikaite, J., Strazdina, L., Zableckis, N., Pakalne, M., Bociag, K., Ilomets, M., Herrmann, A., Kirchey, T., Pajula, R., Pawlaczyk, P., Chlost, I., Cieslinski, R., Gos, K., Libauers, K., Sinkevicius, Ž., Jurema, L. 2022. Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Application of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore. Lithuanian Fund for Nature, 201 p.

Järveoja, J. 2011. Kasvuhoonegaaside emissioon päideroo abil rekultiveeritavalt turbatootmisalalt. Magistritöö. Tartu Ülikool.

Kareksela, S., Ojanen, P., Aapala, K., Haapalehto, T., Ilmonen, J., Koskinen, M., Laiho, R., Laine, A., Maanavilja, L., Marttila, H., Minkinen, K., Nieminen, M., Ronkanen, A.-K., Sallantausta, T., Sarkkola, S., Tolvanen, A., Tuittila, E.-S. ja Vasander, H. 2021. Soiden ennallistamisen suoluonto-, vesistö-, ja ilmasto vaikutukset. Vertaisarvioitu raportti. *Suomen Luontopaneelin julkaisu* 3b/2021.

Keskkonaministeerium. 2022. GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN ESTONIA 1990-2020. NATIONAL INVENTORY REPORT. SUBMISSION TO THE EUROPEAN COMMISSION. Common Reporting Formats (CRF) 1990–2020

Keskkonaministeerium. 2023. GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN ESTONIA 1990-2021. NATIONAL INVENTORY REPORT. SUBMISSION TO THE EUROPEAN COMMISSION. Common Reporting Formats (CRF) 1990–2021

Kohv, M. 2021. Projekti „Soode kaitse ja taastamine“ – LIFE MIREs ESTONIA projekti veeseire aruanne 2021. a. Tartu

Kokkonen, N., Laine, A.M., Männistö, E. *et al.* Two Mechanisms Drive Changes in Boreal Peatland Photosynthesis Following Long-Term Water Level Drawdown: Species Turnover and Altered Photosynthetic Capacity. *Ecosystems* 25, 1601–1618 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00736-3>

Kull, A. 2016. Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertosoonide määratlemine pikaajaliste häiringute leviku piiramiseks või leevendamiseks, II etapp. Sihtfinantseerimislepingu 8286 SFL nr 3-2_15/835-14/2014 aruanne. Tartu

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. Assessing the carbon and climate benefit of restoring degraded agricultural peat soils to managed wetlands, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol: 268, pp 202-214. ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.017>.

Laine, J. ja Minkinen, K. 1996. Effect of forest drainage on the carbon balance of a mire: A case study, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 11:1-4, 307-312, DOI: [10.1080/02827589609382940](https://doi.org/10.1080/02827589609382940)

Loisel, J., Gallego-Sala, A.V., Amesbury, M.J. *et al.* 2021. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nat. Clim. Chang.* 11, 70–77 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>

Luhamaa, A., Kallis, A., Mändla, K., Männik, A., Pedusaar, T., Rosin, K. 2015. Eesti tuleviku kliima stsenaariumid aastani 2100. Lepingulise töö aruanne projekti “Eesti riikliku kliimamuutuste mõjuga kohanemise strateegia ja rakenduskava ettepaneku väljatöötamine” lisana. Keskkonnaagentuur.

Mander, Ü., Uri, V., Ostonen, I., Bekker, A., Aosaar, A., Maddison, M. 2017. RMK Uurimisprojekti “Süsiniku- ja lämmastikuringe muudetud niiskusrežiimiga metsades” lõpparuanne.

Masing, V. 1960. Rabade põlemine ja põlemisjärgsed taimkatte muutused. – Tartu Riikliku Ülikooli Toim. 93. Botaanika-alased tööd 4: 96-122.

Maddison, M., Veber, G., Kull, A. 2021. Net ecosystem exchange of CO₂ and ecosystem respiration along disturbance gradient in two bogs in Estonia. EGU21, the 23rd EGU General Assembly, id.EGU21-12999. doi: [10.5194/egusphere-egu21-12999](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-12999)

Maanso, H. 2015. Kasvuhoonegaaside emissioon kõdusoometsadest. Magistritöö. Tartu Ülikool.

Minkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J.-P., & Lohila, A. (2018). Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences*, 15(11), 3603–3624. <https://doi.org/10.5194/bg-15-3603-2018>

Minkinen, K., Laine, J., Shurpali, J.S., Mäkiranta, P., Alm, A., Penttilä, T. 2007. Heterotrophic soil respiration in forestry-drained peatlands. *Boreal Environment Research* 12: 115–126.

Minkinen, K., Korhonen, R., Savolainen, I., Laine, J. 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900–2100 – the impact of forestry drainage. *Global Change Biol.* 8: 785–799.

Mägi, M. 2021. Süsihappegaasi- ja metaanivoog kõdusookaasikute mullast. Bakalaureuse töö. Tartu Ülikool.

Ojanen, P. ja Minkinen, K. 2020. Rewetting offers rapid climate benefits for tropical and agricultural peatlands but not for forestry drained peatlands. *Global Biogeochemical Cycles*, 34, e2019GB006503. <https://doi.org/10.1029/2019GB006503>

Paal, J., Ilomets, M., Fremstad, M., Moen, A., Børset, E., Kuusemets, V., Truus, L., Leibak, E. 1999. Eesti märgalade inventeerimine 1997. a. Projekt „Eesti märgalade kaitse ja majandamise strateegia“ aruanne. Eesti Loodusfoto, Tartu, 166 lk.

Pakalne, M., Etzold, J., Ilomets, M., Jarašius, L., Pawlaczyk, P., Bociąg, K., Chlost, I., Cieśliński, R., Gos, K., Libauers, K., Pajula, R., Purre, A.-H., Sendžikaitė, J., Strazdiņa, L., Truus, L., Zableckis, N., Jurema, L., Kirschey, T. 2021. *Best Practice Book for Peatland Restoration and Climate Change Mitigation - Experiences from LIFE Peat Restore Project*. Riga: Latvijas Universitāte.

Parmesan, C., M.D. Morecroft, Y. Trisurat, R. Adrian, G.Z. Anshari, A. Arneth, Q. Gao, P. Gonzalez, R. Harris, J. Price, N. Stevens, and G.H. Talukdar, 2022. Terrestrial and Freshwater Ecosystems and Their Services. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 197–377, doi:10.1017/9781009325844.004

Pikk, J. 2003. Puistute ja puuliikide kohanemine toitumistingimuste muutustele erineva veerežiimi ja troofsusega kasvukohtadel. Metsanduslikud uurimused XXXVIII, 58–73. ISSN 1406-9954.

Post, W. M., Emanuel, W. R., Zinke, P. J., Stangenberger, A. G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298: 156–159.

Purre, A.-H. 2021. Carbon dioxide dynamics and recovery of vegetation on restored peatlands. Tallinna Ülikool, Loodusteaduste Dissertatsioonid. ISBN 978-9949-29-551-7

Purre, A.-H., Penttilä, T., Ojanen, P., Minkinen, K., Aurela, M., Lohila, A., Ilomets, M. 2019. Carbon dioxide fluxes and vegetation structure in rewetted and pristine peatlands in Finland and Estonia. *Boreal Env. Res.* 24: 243–261.

Purre, A.-H., Ilomets, M. 2021. Vegetation Composition and Carbon Dioxide Fluxes on Rewetted Milled Peatlands — Comparison with Undisturbed Bogs. *Wetlands* 41, 120. <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01518-2>

Päivänen, J., Hånell, B. 2012. Peatland Ecology and Forestry - a Sound Approach. *University of Helsinki Department of Forest Science Publications* 3: 1-267.

Päivänen, J. 1973. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Silva Fennica* no. 129 article id 7563. <https://doi.org/10.14214/aff.7563>.

Päivänen, J., and Sarkkola, S. 2000. The effect of thinning and ditch network maintenance on the water table level in a Scots pine stand on peat soil. *Suo* 51, 131–138.

Rydin, H. ja Jeglum, J.K. 2006. *The Biology of Peatlands* (1st edn). Oxford. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198528722.001.0001>

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*. DOI: 10.1007/s10750-011-0934-7.

Sikström, U., Hökkä, H. 2016. Interactions between soil water conditions and forest stands in boreal forests with implications for ditch network maintenance. *Silva Fennica*, vol. 50 no. 1 article id 1416. 29 p.

Simola, H., Pitkänen, A. & Turunen, J. 2012. Carbon loss in drained forestry peatlands in Finland, estimated by re-sampling peatlands surveyed in the 1980s. *European Journal of Soil Science*. 63. 798-807. 10.1111/j.1365-2389.2012.01499.x.

Strack, M., Waddington, J.M., Kellner, E., Price, J.S., Rochefort, L. 2003. Methane storage and emissions at a natural and drained fen in central Quebec. In E. Järvet & E. Lode (eds.) *Proceedings of the International Conference on Ecohydrological Processes in Northern Wetlands*. Tallinn, Estonia (June 30-July 03, 2003). Tartu University Press, Tallinn, Estonia, pp. 227-232.

Strack, M., Zuback, Y., McCarter, C., Price, J. 2015. Changes in dissolved organic carbon quality in soils and discharge 10years after peatland restoration. *J. Hydrol.* 527, 345–354.

Suškevičs, M. (koost.); Freiberg, R.; Kangur, K.; Kriiska, K.; Kruus, E.; Melts, I.; Peterson, K.; Poltimäe, H.; Pärnoja, M.; Randveer, T.; Salm, J.-O.; Sudakova, L.; Tullus, H.; Drenkhan, R.; Evans, R.; Hanso, M.; Jäärats, A.; Kaasik, A.; Kalamees, R.; Kaljund, K. ... Vetemaa, M. 2015. Kliimamuutuste mõjuanalüüs, kohanemisstrateegia ja rakenduskava looduskeskkonna ja biomajanduse teemavaldkondades. Projekti BioClim lõpparuanne (alusuuring).

Turunen, J., E. Tomppo, K. Tolonen, Reinikainen, A. 2002. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *Holocene* 12: 69–80.

Valk, U. 2005. Eesti rabad. Eesti Põllumajandusülikool. Metsanduslik Uurimisinstituut. Tartu

Rezapour, A., Truu, M., Maddison, M., Rohula-Okunev, G., Tullus, A., Uri, V., Mander, Ü., Ostonen, I. 2021. Morphological Variation in Absorptive Roots in Downy Birch (*Betula pubescens*) and Norway Spruce (*Picea abies*) Forests Growing on Drained Peat Soils. *Forests* 13(1), 112; <https://doi.org/10.3390/f13010112>

Valach, A.C., Kasak, K., Hemes, K.S., Szutu, D., Verfaillie, J. and Baldocchi, D.D. 2021a. Carbon Flux Trajectories and Site Conditions from Restored Impounded Marshes in the Sacramento-San Joaquin Delta. In *Wetland Carbon and Environmental Management* (eds K.W. Krauss, Z. Zhu and C.L. Stagg). <https://doi.org/10.1002/9781119639305.ch13>

Valach A. C., Kasak, K., Hemes, K. S., Anthony, T. L., Dronova, I., Taddeo, S., Silver, W. L., Szutu, D., Verfaillie, J., Baldocchi, D. D. 2021b. Productive wetlands restored for carbon sequestration quickly become net CO₂ sinks with site-level factors driving uptake variability. *PLoS One*. 2021 Mar 25;16(3):e0248398. doi: 10.1371/journal.pone.0248398. PMID: 33765085; PMCID: PMC7993764.

Veber, G., Kull, A., Paal, J. 2021. Spatio-temporal variability of greenhouse gases along drainage gradient in 17 peatlands across Estonia. *Proceedings of the 16th International Peatland Congress 2021*, Tallinn, Estonia. 120–126.

Wilson, D., Blain, D., Couwenberg, J., Evans, C. D., Murdiyarso, D., Page, S. E., Renou-Wilson, F., Rieley, J. O., Sirin, A., Strack, M., and Tuittila, E.-S. 2016. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils, *Mires Peat*, 17, 1–28.

Lisa 1. Metaanivoog ($\text{kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) kõdusoometsades ja kuivendusmõjuga, korrastatud ja looduslikes rabades (Järveoja (2011), Salm (2012), Maanso (2015), Kull (2016), Mander jt. (2017), Mägi (2021), Veber jt. (2021), Rezapour jt. (2022))