Metsade majandamise ja puidu kasutamise viiside mõju süsiniku sidumisele, kliimamuutusele ning elurikkusele

Raul Rosenvald^{1,*} ja Katrin Rosenvald²

Rosenvald, R., Rosenvald, K. 2017. The influence of forest management and timber use options on carbon sequestration and the consequences on biodiversity. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 67, 37–49. ISSN 1406-9954. Journal homepage: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>

Abstract. The results of scientific studies dealing with the influence of forest management on carbon dynamics are often controversial. Substituting fossil fuels with wood is not always a climate-friendly solution, and besides, it has often a negative impact on biodiversity. The current paper reviews the literature about the influence of different forest management and timber use options on climate change and brings out the accompanying consequences on biodiversity in temperate and boreal climate zones. The forest's ability to sequester and store carbon can be enlarged by appropriate forest management planning and practices. Generally, for mitigation of climate change, the moderate (not intensive) forest management is most favourable, but intensification of management enhances global warming, since forest carbon storage in tree biomass and soil decreases. The mitigation of climate change is just one of the many roles of forest, and climate policy actions cannot come at the expense of species diversity. The complex studies dealing with several forest goals conclude that high carbon store and biodiversity protection do not contradict each other, but the achievement of maximum economic profit at the same time is not possible. The mitigation of climate change and wildlife protection is most effective when it is first of all the forests with a high biodiversity that are managed less intensively. Concerning climate change, the most negative forest biomass use is wood combustion. It is reasonable to burn only such biomass (cut and industrial residues) which cannot be used for producing goods holding carbon for a long time.

Key words: forest management, carbon sequestration, biodiversity, climate change, sustainability.

Authors' addresses: ¹Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, Estonia; ²Institute of Ecology and Earth Sciences, University of Tartu, Lai 40, Tartu 51005, Estonia; *e-mail: raul.rosenvald@emu.ee

Sissejuhatus

Inimkond kasutab praegu 20–40% primaarproduktsoonist ja vähendab primaarproduktsooni läbi elupaikade degradeerimise (Barnosky *et al.*, 2012). Asendamaks fossiilkütused biokütustega, peab inimkonna kasutatav osa maismaa primaarproduktsoonist väga palju suurenema (Barnosky *et al.*, 2012). Hinnangute järgi kasvab käesoleval sajandil nii inimkond (Gerland *et al.*, 2014)

kui ka selle energia- ning toormevajadus. Juba praegune ressursikasutuse maht on tekitanud liikide massilise väljasuremise (Barnosky *et al.*, 2011; Ceballos *et al.*, 2015). Seda peetakse isegi kriitilisemaks (rohkem kontrolli alt väljas olevaks) kui kliimamuutusi, seega vajab globaalne ressursikasutus olulist tähelepanu, mis tähendab, et inimkonna tegevused peavad muutuma ja tarbimine vähenema (Steffen *et al.*, 2015).

Praegused kliimamuutused on suuresti inimtekkelised ja mõjutatud atmosfääri suurenenud CO₂ sisaldusest (IPCC, 2014). Euroopa Liit on seadnud endale eesmärgi vähendada kasvuhooaegade heidet vähemalt 80% aastaks 2050 võrreldes aastaga 1990 (Euroopa Komisjon, 2011). Üks võimalus heite vähendamiseks on taastumatutest loodusvaradest saadavate toodete ja energia asendamine taastuvatest loodusvaradest, sh puidust saadavaga. Puidu, eriti ümarpuidu kasutamisel kütusena peab aga arvestama, et ajutiselt – umbes 40–50-ks aastaks – vabaneb atmosfääri rohkem süsinikku võrreldes taastumatu energiaallika põletamisega (Agostini *et al.*, 2013; Cornwall, 2017). Seega sõltub CO₂ vähendamise meetodite valik sellest, millise aja jooksul kliimamuutuste leevenemist soovitakse (Trømborg *et al.*, 2011). Juba toimunud muutusi (nt liustike sulamist) tagasi pöörata on palju raskem või võimatu. Pikaajaliselt, võttes arvesse kütuse kogu elutsükli (tooraine tootmine või kaevandamine, transport, rafineerimine, jaotus, põletamine, jäätmekäitlus), on süsinikuheide puitkütuste kasutamisel väiksem kui fossiilsete kütuste puhul (Wang *et al.*, 2015; Agostini *et al.*, 2013). Arvestades tänapäevast atmosfääri süsiniku kontsentratsiooni ja selle kiiret suurenemist, tuleks kliimamuutusi leevendada nii lühikeses (mõne aastakümne pikkuses) kui ka pikas ajaperspektiivis (Olsson, 2011). Seejuures ei ole ainus küsimus, milliseid energiaallikaid lähiajal eelistada, vaid oluline on ka, kuidas üldiselt süsiniku sidumist ja varusid suurendada ning teisi kliimat jahutavaid meetodeid kasutada.

Enamus maismaa aastasest CO₂ voost on seotud metsadega. Kas metsad osutuvad suureks CO₂ allikaks või kliimasoojenemise leevendamise oluliseks vahendiks, sõltub sellest, kuidas toimub nende lokaalne ja globaalne majandamine (Usi & Lal, 2017). Metsade ja metsamajanduse süsinikudünaamika kohta on ilmunud suurel hulgal uurimusi (nt Winjum *et al.*, 1993; Agostini *et al.*, 2013; Bentsen, 2017).

Antud töö annab ülevaate parasvöötme kohta käivatest kõige olulisematest ja Eesti tingimustele kohasematest tulemustest. Töö eesmärk oli teha kirjanduse ülevaade metsade majandamise ja puidu kasutamise viiside mõjust süsiniku sidumisele, kliimamuutuste leevendamisele ja elurikkusele. Lisaeesmärk oli anda soovitusi, kuidas majandada metsi nii, et nende süsinikusidumise võime oleks suurim ja sealjuures säiliks ka metsade elurikkus.

Tulemused ja diskussioon

Metsade majandamise mõjust süsinikudünaamikale on ilmunud palju teadusuuringuid, mille tulemused on sageli vastuolulised (Buchholz *et al.*, 2016; Bentsen, 2017; Cornwall, 2017). Selle peamine põhjus on teema keerukus – teadmiste suurenedes lisandub järjest tegureid, mida tuleks mudelites arvesse võtta. Lisaks pole teadlased konsensusele jõudnud ka selles, misuguseid teadaolevaid aspekte on vajalik ja oluline mudelitesse kaasata (Bellassen & Luyssaert, 2014; Buchholz *et al.*, 2016). Näitena võib tuua Buchholzi *et al.* (2016) teaduskirjanduse analüüsi, kus üks analüüsitav tunnus oli süsiniku tagastusaeg (*carbon payback period*) – aeg, mille jooksul biomassist toodetud energia muutub atmosfääri seisukohast süsiniku-neutraalseks ehk biomassi tootmisel ja põletamisel atmosfääri lisandunud süsinik saab kasvava metsa poolt uuesti seotud. Nimetatud analüüsis leiti, et sõltuvalt uuringus arvesse võetud või sealt välja jäänud aspektidest on süsiniku tagastamise aeg mõnikümmend kuni mõni tuhat aastat ehk siis 100-kordselt erinev. Samas arvestavad enamik bioenergia tootjaid ja ka Euroopa energiapoliitika alusdokumendid igasuguse puidu süsiniku tagastusaja nulliks (Agostini *et al.*, 2013). Sellises uuringute, teadmiste ja aluspõhimõtete vastuolulisuse kontekstis on poliitikutel raske langetada objektiivseid otsuseid, mistõttu on teadlaste konsensusele jõudmine äärmiselt oluline.

Metsade majandamise mõju süsiniku- ringele ja -varudele

Igasuguse raie tagajärjel väheneb puudes salvestunud süsiniku hulk ning paarikümneks aastaks ka metsa süsiniku salvestamine, kuna kasvavad puud on puistust eemaldatud (Olsson, 2011). Lisaks puiduga seotud süsinikuvoogude muutustele toimuvad metsade majandamisel olulised muutused ka mulla süsinikuvarus. Maailma muldade süsinikuvarud on kolm korda suuremad kui süsinikuvarud biomassis (Körner, 2017). Metsade muldadesse on talletunud üle 2/3 kogu sealse ökosüsteemi süsinikuvarudest, kusjuures mullasüsiniku osakaal metsa süsinikuvarust kasvab laiuskraadi suurenedes (Dixon *et al.*, 1994). Kui võrrelda metsaökosüsteemi eri komponente, siis on mullas ladestunud süsinik kõige stabiilsem (Körner, 2017). Raiejärgselt kahaneb mulla orgaanilise süsiniku varu, kuna varise hulk väheneb ning muutunud mulla vee- ja temperatuurirežiimi tõttu lagunemine kiireneb. Muutuvad ka puit- ja rohttaimede osakaal ning mulla juurte sügavusjaotus, väheneb neto primaarproduktioon ja suureneb leostumine (Lal *et al.*, 2005). Majandamise mõju metsa mulla süsinikuvarudele ja CO₂ emiteerimisele varieerub suuresti, sõltudes raieist möödunud ajast, kliimavööndist, puuliigist, mullatüübist jne (nt Laporte *et al.*, 2013; James & Harrison, 2016; Dean *et al.*, 2017). Globaalses metaanalüüsis (Achat *et al.*, 2015), kus analüüsiti raiejärgset mullasüsiniku muutumist rohkem kui 2000 alal kuni 135 aasta jooksul, leiti, et tavapärase raietsükli (lageraie ja harvendusraie) jooksul ei toimu kogu mullaprofiili arvesse võttes olulisi süsiniku kadusid mullast. Kui aga lisaks raiejäätmed eemaldada, on süsiniku eraldumine muldadedest märkimisväärne (Achat *et al.*, 2015). Siiski on oluline, millises ajapiiris on uuring tehtud. Isegi kui lühikeses ajapiiris mulla süsinikuvarud (eriti majandatud) metsades ei pruugi väheneda, siis pikemas perspektiivis metsade majandamise tagajärjel (eriti põlismetsade raiumisel) mulla süsinikuvarud kahanevad (Dean *et al.*, 2017).

Raie mõju mulla süsinikuvarule sõltub raiekraadist – kui lageraie korral süsinikuvarud mullas vähenevad, siis osalise raie puhul olulist muutust mulla süsinikuvarus ei leitud (Zhou *et al.*, 2013; James & Harrison, 2016; Puhlick *et al.*, 2016). Pikemas perspektiivis on oluline, et suurem puude tagavara metsas tingib suurema varise massi, mis hiljem lagunedes suurendab ka mulla süsinikuvarusid (Sievänen *et al.*, 2014). Seega suurendab madalam raieintensiivsus kõige enam metsamaa mulla süsinikuvaru (Sievänen *et al.*, 2014).

Mullas toimuvad muutused on aeglased ning tihti ei ole need lühiajaliste uuringutega tuvastatavad. Soomes tehtud uuringus olid kuivendatud turvasmullad süsiniku emiteerijad nii madala kui ka kõrge raiemahu puhul, alles 30-aastase uuringuperioodi lõpuks hakkasid süsinikku siduma ainult kõige madalama raieintensiivsusega majandatud metsade mullad (Sievänen *et al.*, 2014). Eestis on metsakuivendus muutnud oluliselt muldade süsinikubilanssi, muutes kuivendatud soode turvasmullad kasvuhoonegaaside emiteerijaks (Salm *et al.*, 2009). Samas võib kuivendatud metsa ökosüsteem tervikuna (muld + taimed), nt okaspuudega kõdusoomets, süsinikku siduda, kuna kuivendamine suurendab puude juurdekasvu (RMK rakendusuuringu projekt, 2016). Eriti oluline ongi metsakasvatustlike tegevustega muuta ökosüsteemi tasemel süsinikku siduvateks aladeks esmajärjekorras kasvuhoonegaase emiteerivad metsad (nt kuivendatud metsad) ja muud alad (Nabuurs *et al.*, 2007).

Pikendades raieintervalli, suurenevad metsaökosüsteemi süsinikuvarud (elus ja surnud puudes ja muudes taimedes, muldas) (Harmon *et al.*, 2009; Hynynen *et al.*, 2015), lisaks saab jämedast puidust valmistada rohkem selliseid tooteid, milles süsinik on pikemaajaliselt seotud (Felton *et al.*, 2016). Lühema raieringi korral on küll puittoodetesse salvestunud süsiniku hulk suurem, kuid see ei asenda metsaökosüsteemi süsiniku vähenemist raiete tagajärjel,

seega on ka seotud süsiniku varud (ökosüsteemis + toodetes) väiksemad lühikese raieringi korral (Harmon *et al.*, 2009). Metsasektori süsinikuvaru saab suurendada ka osalisi raieid (turbe- ja valikraieid) kasutades (Harmon *et al.*, 2009). Kui raieintensiivsuse suurenedes süsiniku sidumise kasv ei kompenseeri süsinikuvarude vähenemist, siis metsamajanduse intensiivistumine viib negatiivsete kliimamõjudeni. Näitena võib tuua Euroopa metsasektori (nii puistud kui ka puidutoodet), mis on hetkel süsiniku siduja (Luyssaert *et al.*, 2010; Valade *et al.*, 2017), kuid raie intensiivsuse kasvades metsasektori süsinikuemissioon suureneb (Valade *et al.*, 2017). Veel enam, 250 aastat tagasi jahutasid Euroopa metsad kliimat rohkem kui tänapäeval, seda valdavalt tänu suure süsinikuvaruga majandamata metsadele, mis on nüüdseks asendunud majandatud metsadega (Naudts *et al.*, 2016).

Põhjalikus kompleksuuringus erinevate raieintensiivsuste (40–100 mln tm/a) mõjust Soome metsade puiduvarudele, süsinikubilansile ja elurikkuse indikaatoritele 90 aasta pikkuse perioodi jooksul saadi tulemuseks, et kõiki neid aspekte arvesse võttes oli optimaalseim metsade mõõdukas majandamine, mis tähendab raiemahtu 40–60 mln tm/a (55–88% metsade puidutagavara mittevähendavast raiemahust). Sellise raiemahu korral oli süsiniku bilanss kõige positiivsem ehk toimus suurim süsiniku salvestamine võrreldes emiteerimisega. Kuigi puittoodetesse seotud süsinik oli suurim maksimaalse raieintensiivsuse juures – 100 mln tm/a (137% puidutagavara mittevähendavast raiemahust), saaks sellise intensiivsusega raiet jätkata vaid 30 aastat, edasi peaksid raiemahud vähenema küpsete metsade vähesuse tõttu. Raiemahut 80 mln tm/a (110% puidutagavara mittevähendavast raiemahust) saaks rakendada kuni 60 aastat (Heinonen *et al.*, 2017). Kui analüüsida üksnes süsiniku sidumist atmosfäärist ja süsiniku varude kogunemist (nt Hynynen *et al.*, 2015) ning jätta kasvõi osade komponentide puhul süsiniku vaba-

nemine arvestamata, saab väga erinevad tulemused võrreldes süsinikubilansi analüüsiga (Heinonen *et al.*, 2017).

Metsamajandusvõtetega saab metsade süsinikusidumist ja -hoidmist suurendada (Valade *et al.*, 2017). Maastiku tasemel süsinikuvaru suurendamiseks on soovitatav metsastada lagedad alad ja jäätmaad, samuti taasmetsastada endine metsamaa, vältida raadamist ning rajada metsakaitsealasid ja taastada märgalasid (Usi & Lal, 2017). Metsa tasemel rakendatavad meetmed on osalise raie ja pikemate raietsüklike kasutamine, häiringute vähendamine, aga ka surnud orgaanilise aine kadude (nt raiejäätmete äravedu) ja erosiooni vähendamine, allesjäänud puude vigastuste vältimine, pinnasekahjustuste minimeerimine ning ainult mõõdukas kuivendamine (Nabuurs *et al.*, 2007; Usi & Lal, 2017).

Eesti kohta koostatud madala süsinikuga majanduse prognoosis (aastani 2050) soovitatakse metsaressursi ühtlase kasutuse saavutamiseks ning metsamaadelt CO₂ lendumise suurenemise välistamiseks raiuda netokasvu piires, see on 8–8,4 mln tm/a (Espenberg *et al.*, 2013). Pärast nimetatud analüüsi ilmutumist tehtud uute arvutuste järgi on Eesti metsade juurdekasv oluliselt suurem (majandusmetsades 14 mln tm/a), mistõttu ka optimaalne raiemaht võib olla mõnevõrra suurem, kuid kindlasti peab see jääma väiksemaks kui majandatavate metsade netokasv. Kui varem arvestati netokasvu osakaaluks maksimaalselt 70% juurdekasvust (Pärt, 2013), siis 2015. aasta hinnangute järgi oli Eesti majandusmetsade netokasv 84% juurdekasvust, mis on 11,8 mln tm/a (Sims, 2016).

Lisaks süsiniku salvestamisele ja sidumisele mõjutavad metsad kliimat ka albeedo (peegelduva kiirguse intensiivsus võrreldes pealelangeva kiirgusega) kaudu. Mida väiksem on ala albeedo, seda rohkem soojust pind neelab. Kuigi metsade albeedo on suhteliselt suur, sest enamik ultraviolet- ja nähtavast kiirgusest kasutatakse fotosünteesiks, leevendavad metsad kliimamuutusi, kuna suure soojuseneelamise

negatiivne mõju ei ületa süsinikusidumise ja hoidmise positiivset mõju. Erandiks on ajutise lumikattega alade igihaljad metsad, kus albeedo vähenemine võib olla piisavalt suur, et nende raadamisel korral tekiks kliimat jahutav efekt (Betts *et al.*, 2000). Lisaks geograafilisele asukohale sõltub metsa kiirguseneelamise potentsiaal puude tihedusest, liigist ja vanusest. Albeedo vähenemine Lõuna-Euroopas (eeskätt lehtmetsade asendumine okasmetsadega) ja suurenemine Põhja-Euroopas (metsade vanuse vähenemine) on üks teguritest, mis on mõjutanud Euroopa kliimat viimase paarisaja aasta jooksul (Naudts *et al.*, 2016).

Samuti tuleks kliimamuutuste analüüsid arvesse võtta teisi metsa majandamise tagajärjel muutuvate voogudega kasvuhoo- negaase, nt metaani (CH_4) ja naerugaasi (N_2O), mille ühe ühiku mõju kliima soojenemisele on kordi suurem kui CO_2 puhul (Agostini *et al.*, 2013). Raie mõju N_2O eraldumisele mullast on vastuoluline ja vood ebapüsivad (Lavoie *et al.*, 2013). Kuna metaani eraldub eeskätt anaeroobsete protsesside käigus, siis metsamajanduslikest töödest mõjutavad metaani emissioone tegevused, mis muudavad metsa hüdroloogilisi tingimusi (Gundersen *et al.*, 2012). Näiteks kuivendus vähendab metaani eraldumist turbapinnasest (Ojanen *et al.*, 2010), kuid kuivendatud metsades püsivalt veega täidetud kraavid võivad olla olulised metaani emiteerijad (Minkinen & Laine, 2006), samuti suureneb metaani eraldumine märjemates kohtades lageraiejärgselt (Sundqvist *et al.*, 2014).

Metsanduslikud kliima leevendamise tegevused ja nende mõju elurikkusele

Metsade kliimamuutusi leevendav funktsioon on vaid üks paljudest olulistest ülesannetest. Säästvale metsamajandusele kohaselt tuleb samaaegselt püüda täita mitut eesmärki, mis tähendab, et kliimapoliitilised valikud metsanduses ei tohi tulla elurikkuse ega teiste ökosüsteemi teenuste vähenemise arvelt (Felton *et al.*, 2016). Üldiselt mõjuvad elurikkusele positiivselt metsamajanduslikud tegevused, mis säilitavad

ja suurendavad metsade süsinikuvaru, nt osalise raie ja pikemate raietsüklite kasutamine, häiringute vähendamine, orgaanilise aine kadude ja pinnasekahjustuste vähendamine. Tuule- ja põuakindlamate kodumaiste lehtpuupuistute soodustamine suurendab nii süsinikuvaru ja -sidumist kui ka elurikkust. Elurikkuse kaitse põhimõtetega on vastuolus paljud majandusvõtted, mida rakendatakse süsiniku sidumise ja kasutatava biomassi maksimeerimiseks, nt ulatuslik raiejäätmete eemaldamine, lühikese raieringiga kiirekasvuliste lehtpuupuistute rajamine, tuulekindlatest võõrpuuliikidest okaspuistute rajamine, raieringi lühendamine tormi- ja putukakahjustuste vähendamiseks (Felton *et al.*, 2016).

Viimase aja uuringud toovad välja, et elurikkus on positiivselt seotud ökosüsteemi produktioonivõimega (Emmet Duffy *et al.*, 2017). Kliima soojenedes muutuvad sagedasemaks tormid, kuid on ka leitud, et just suurem elurikkus suurendab ökosüsteemi vastupanuvõimet kliimaekstreemustele (Isbell *et al.*, 2015) või üldse metsakahjustustele. Näiteks segametsades kompenseerivad ühe puuliigi kasvu pidurdumist kahjustuste korral teised puuliigid suurenenud kasvuga (Costilow *et al.*, 2017), samuti suudavad segapuistus olevad teised puuliigid vähemalt mingil määral asendada ühe puuliigi kahjustuste tagajärjel kaduvaid elupaiku (Lõhmus & Runnel, 2014).

Kuna kliimamuutused ise on potentsiaalselt elurikkuse vähenemise põhjustajad, siis kliimamuutuste leevendamine aitab teatud määral kaasa elurikkuse kaitsele (Warren *et al.*, 2013). Teisalt aitavad mitmed elurikkuse kaitseks rakendatavad metsamajanduslikud tegevused kaasa kliimamuutuste leevendamisele. Elurikkuse taastamiseks läbiviidava puistute struktuurilise mitmekesisuse suurendamise tagajärjel kasvab ka metsa pikaajaline süsinikuvaru (Ford & Keeton, 2017). Ka lageraiel elurikkuse kaitseks säilitatavatel säilikpuudel on vähemalt lühiajaliselt positiivne mõju kliimamuutuste leevendamisele. Säilikpuudes salvestunud süsinik jääb raiejärgselt metsa

alles (Santaniello *et al.*, 2017), säilikpuude kasv (ja süsiniku sidumine) suureneb kohe pärast raiet (Thorpe *et al.*, 2007) erinevalt metsa uuenduse puudest, millel arvestatava puidumahu kasvu saavutamine võtab aastaid aega. Säilikpuud mõjutavad ka raiejärgseid muutusi metsamullas. Lageraie järel väheneb ajutiselt mulla süsinikuvaru (nt Olsson, 2011), kuid säilitatud puud leevendavad seda protsessi, kuna vähendavad orgaanilise aine lagunemiskiirust mullas ja nende varisega lisandub mulda orgaanilist ainet (Taylor *et al.*, 2008).

Paljud analüüsid, mis hindavad mitmete metsanduse eesmärkide täitmist, järeldavad, et maksimaalne süsiniku hoidmine ja elurikkuse kaitse ei ole omavahel vastuolus, kuid samal ajal ei ole võimalik taotleda ka maksimaalset majanduslikku kasu metsast (nt Carpentier *et al.*, 2017; Triviño *et al.*, 2017). Uurides Soome metsanduse erinevate eesmärkide vastuolusid, leiti tugev konflikt puidutoodangu maksimeerimise ja teiste eesmärkide vahel, kuid süsiniku hoidmise, kahjustuste reguleerimise ja elurikkuse kaitse vahel oli üksnes nõrk vastuolu (Pohjanmies *et al.*, 2017). Kogu Soome raiemahtude intensiivsust analüüsid leiti, et kaks elurikkust soodustavat indikaatorit – vanade metsade hulk ning lehtpuude osakaal – on suurimad mõõduka raie korral (40 mln tm/a; 55% puidutagavara mittevähendavast raiemahust) (Heinonen *et al.*, 2017). Raiemahtude oluline suurendamine pikaajaliselt vähendaks nii puidutoodangut, metsanduse süsinikubilanssi (seotud süsinik lahutud vabanenud süsinik) kui ka metsade elurikkust Soomes. Raiemahtude suurendamine aastase netokasvu tasemeni ei vähendaks küll oluliselt puidutoodangut ja ka süsiniku sidumist, kuid selle mõju elurikkusele oleks negatiivne (Heinonen *et al.*, 2017). Ka Eestis läbi viidud analüüsi (Espenberg *et al.*, 2013) järgi oleksid väikseimad looduskaitseprobleemid neljast stsenaariumist madalaima raieintensiivsusega (raiemaht 8–8,4 mln tm/a) stsenaariumi korral.

Globaalse tarbimisvajaduse kõige keskkonnasõbralikumaks täitmiseks tuleb kaaluda kõiki alternatiive. Kuid isegi loodusõbralike taastuenergia tüüpide (tuule-, päikese-, biomassi-, ookeani-, hüdro-, geotermiline energia) kasutamisel on suurem või väiksem negatiivne mõju elurikkusele. Eelnimetatud taastuenergia tüüpide seast avaldab kõige selgemat negatiivset mõju nii elurikkusele kui ka kliimamuutuste leevendamisele energia ja kütuste tootmine biomassist, millega kaasneb näiteks elupaikade kadumine ja muutumine, saastamine, võõrliikide levik, kasvuhoonegaaside eraldumine bioenergia tootmistsükli käigus (Gasparatos *et al.*, 2017). Selline üldistus aga alati ei kehti, näiteks liigivaese jäätmaa asemele metsa (sh isegi lühikese raieringiga puupõllu) rajamine bioenergia tootmiseks suurendab nii elurikkust kui ka süsiniku sidumist (Gasparatos *et al.*, 2017).

Puitu seotud süsiniku vabanemine sõltuvalt selle kasutamiseviisidest

Kliimamuutuste leevendamise vajaduse seisukohast on puidu põletamine kõige negatiivsem puidu tarbimise viis. Puidu kasutamisel energia tootmiseks vabaneb puitu seotud süsinik kohe, kui puit jõuab katlasse; kõigi muude puidukasutusviiside ja ka loodusesse lagunema jätmise korral on süsinik suure tõenäosusega pikemaks ajaks seotud. Puidu põletamise oluline negatiivne lisategur on puidu vähene energiamahutavus, mille tõttu sama energiakoguse saamiseks eraldub puidu põletamisel tavaliselt rohkem CO₂ kui taastumatu energiaallika põletamisel (Agostini *et al.*, 2013).

Raiejärgselt on metsaökosüsteemi süsinikusidumise võime kasvavate puude eemaldamise tõttu teatud ajaks (15–20 aastat) väiksem kui enne raiet (nt Humphreys *et al.*, 2006; Olsson, 2011). Eelnimetatud tegurite tõttu tekitab puidu põletamine atmosfääri rohkem süsinikku umbes 40–50-ks aastaks, võrreldes taastumatu energiaallika põletamisega (Cornwall, 2017). Energiaks on mõistlik kasutada üksnes sellist puitu, millele ei ole muud rakendust – mida ei saa

kasutada pikemat aega süsinikku siduvates toodetes. Metsamajanduse ja -tööstuse tootmisjääkide põletamisel on süsiniku tagastusaeg lühem kui ümarpuidu põletamisel (nt Agostini *et al.*, 2013; Hanssen *et al.*, 2017). Raiejäätmete puhul tuleb aga arvestada, et raiejäätmete kogumiseks ja transportiks kulub samuti energiat ning kogumisel tekkivad pinnasekahjustused võivad vähendada mulla orgaanilise süsiniku varu (Simola, 2017; Ranius *et al.*, 2018). Pikemas ajaperspektiivis kui 50 aastat on puidust toodetud energia üldjuhul kliimasõbralikum kui taastumatutest energiaallikatest toodetud energia. Agostini *et al.* (2013) tehtud analüüsis leitakse, et puiduenergia efektiivsuse objektiivseks hindamiseks taastumatu energiaallika asendajana tuleb arvesse võtta, millist taastumatut energiaallikat asendatakse, põletamise efektiivsust (kasutegur), puidu kasvukiirust tulevikus, biomassi raiumise sagedust ja intensiivsust jm tegureid. Samuti ei ole eriti just pikemaajaliste analüüside puhul õige eeldada, et energiatootmine jääb tulevikus samal määral süsinikku tootvaks kui praegu. Alternatiivsete taastuvate energiaallikade (eeskätt tuule- ja päikeseenergia) tootmine areneb väga kiiresti ning seal on piiranguid (nt kasutatava maa piiratus) ja negatiivseid tegureid (pikk süsiniku tagastusaeg) vähem kui biomassi kasutamise puhul (Agostini *et al.*, 2013). Seega peaks kliimastrateegiate koostamisel hindama taastumatute ja bioenergia allikate kõrval lisaks ka muude alternatiivsete energiaallikate kasutamise mõju kliimale.

Kuigi puidu kasutamist toodetes peetakse üldiselt süsinikusidumise seisukohast paremaks kui põletamist, on erinevate puittoodete salvestusaegade vahel väga suured erinevused. Näiteks paberipuidu süsiniku salvestusaeg on 3 aastat, ehituspuidul aga 50 aastat (Profft *et al.*, 2009). Kliimamõju poolest on biokütustega võrreldavad väga lühikese süsinikusalvestamise aja ja suure tootmismahuga tooted. Näiteks puidust tselluloosi tootmine on süsiniku sidumise seisukohast negatiivne

tegevus, kuna tootmine on energiamahukas ja tselluloosist valmistatud toodete elutsüklil lühike. Nii soovitakse Soomes, kus on väga kõrgelt arenenud tselluloositööstus, kasutada puitu tselluloosi tootmise asemel pikemat aega süsinikku siduvate toodete (nt saematerjal ja sellest tehtud tooted) valmistamiseks ja tootmisjääke energiapuiduna, asendamaks taastumatuid energiaallikaid (Pukkala, 2017).

Kui hinnata puidu kasutuse mõju kliimale, tuleks arvestada ka seda, et puit asendab taastumatutest loodusvaradest valmistatud tooteid ja energiat. Asendus efekti arvutamisel peab aga silmas pidama reaalseid asendamis (Trømborg *et al.*, 2011). Tegelikult kiputakse sageli kliimasõbralikku toodet hoopis rohkem tarbima ja sellega positiivne mõju kliimale neutraliseeritakse või muudetakse koguni negatiivseks (Agostini *et al.*, 2013). Kõigist kliimamõju vähendavatest tegevustest on kasu vaid siis, kui ka tarbimise kasvu vähendada.

Kokkuvõte ja soovitused metsasektori süsinikusidumise ning metsade elurikkuse tagamiseks

i) Teadlased peavad välja selgitama ja jõudma ühistele alustele, milliseid süsinikuringega seotud sisendparameetreid kliimamudelites kasutada. Praegu on teadusuuringutes väga palju vasturääkivusi (Bellassen & Luyssaert, 2014; Buchholz *et al.*, 2016). Teadmiste suurendamine on vajalik ka seetõttu, et süsinikubilanss on väga asukohaspetsiifiline.

ii) Teadmisi kliimamuutuste pidurdamiseks tuleb ka praktikas rakendada. Metsasektoris on oluline potentsiaal vähendada atmosfääri CO₂ kontsentratsiooni tõusu. Kuna aga Pariisi kliimakokkulepe jätab riikidele palju otsustamisõigust oma süsinikuheidete vähenemise tegevusteks ja kirjeldamiseks, on riikide metsasektoris võimalus tegeleda „rohepesuga“ – järgida küll kliimakokkuleppe reegleid, kuid mitte

selle sügavamat sisu, s.o püüda aktiivselt vähendada kliimamuutusi (Valade *et al.*, 2017). Metsasektori potentsiaali rakendamisest on rohkem kasu, kui vähendada kogu tarbimist ja suurendada taaskasutust.

iii) Väga intensiivse puidutootmise seadmine esikohale, mis on valdav eeskätt Fennoskandias (Triviño *et al.*, 2017), ei ole säästlik ega kliimasõbralik. Rootsis on püütud rakendada mudelit „kõike rohkem“, st majandada metsi nii, et suureneksid nii puidu tagavara, raiutava puidu maht, metsa sotsiaalsed väärtused kui ka elustikuväärtus. Paraku tuleb nentida, et tegelikkuses see süsteem ei toimi – metsa majanduslikku või puidulist väärtust suurendavad tegevused toimuvad eeskätt elurikkuse kahanemise arvel (Beland Lindahl *et al.*, 2016).

iv) Tuleb eelistada neid majandamisviise, mis suurendavad kasutatavat puidumahtu (nt vähetootliku maa metsastamine produktiivsete puuliikidega, haiguskindlate puuliikide soodustamine) ning hoiavad ja kasvatavad metsa süsinikuvaru ja elurikkust (nt raieringi pikendamine, osaliste raiete kasutamine).

v) Süsinikku on vaja salvestada nii metsades kui ka puittoodetes. Tuleb leida kõige tõhusamad süsiniku salvestamise meetodid (Bellassen & Luyssaert, 2014) ja vähendada ebaefektiivsete rakenduste kasutamist. Suurem osa Euroopas raiutavast puidust läheb energiaks või tselluloosiks (Mantau, 2012), mistõttu tuleks suurendada pikaajaliselt süsinikku siduvate puidukasutusviiside osakaalu. Energiaks on soovitatav tarvitada üksnes sellist puitu, mida ei saa kasutada pikemat aega süsinikku siduvate toodete valmistamiseks.

vi) Energiatootmise süsinikuheidet saab vähendada, arendades ja suurendades alternatiivsete taastuenergialiikide (tuule-, päikeseenergia jt) tootmist (Gasparatos, 2017). Kliimasõbraliku biokütusena võib arvestada vaid mõõdukas mahus puidujäätmete põletamist suure kasuteguriga seadmetes (Agostini *et al.*, 2013).

vii) Tuleks vältida puhtpuistute rajamist ning mitmekesistada metsamajandus-

võtteid (Felton *et al.*, 2016). Osaline raie näib olevat soodsam kui lageraie nii elurikkusele (Fedrowitz *et al.*, 2014) kui ka metsa stabiilse ja suureneva süsinikuvaru saavutamisele (Harmon *et al.*, 2009; Prévost & Dumais, 2014).

viii) Puiduvajaduste katmiseks ja majandusliku tulu säilitamiseks võib metsad jagada erineva intensiivsusega majandatavateks puistuteks (nt Noormets & Nouvelon, 2015; Carpentier *et al.*, 2017; Santanello *et al.*, 2017). Näiteks Eesti tingimustes võiks majandada intensiivselt põllumaaadele rajatud esimese põlvkonna metsi, mille elustikuväärtus on väike, ning väheintensiivselt suure elustikuväärtusega metsi. Siiski eeldab ka selline lähenemine eelnevat põhjalikku analüüsi, sest erinevates metsatüüpides võivad kõiki metsa väärtusi arvestavad optimaalsed majandamisstsenariumid erineda (Carpentier *et al.*, 2017).

Kokkuvõttena võib nentida, et metsade mõõduka majandamisega saab tagada nii elurikkuse säilimise metsades kui ka süsiniku sidumise suurenemise. Oluline on, et majandamisotsuseid tehakse teadmiste- põhisel.

Tänuõnad. Autorid tänavad retsensente ja toimetajat abistavate märkuste eest, mis aitasid oluliselt käsikirja parandada. Käesolev ülevaateartikkel on valminud institutsionaalsete uurimistoetuste IUT21-04 ja IUT34-9 abil.

Kasutatud kirjandus

- Achat, D.L., Fortin, M., Landmann, G., Ringeval, B., Augusto, L. 2015. Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. – Scientific Reports, 5, art. no. 15991.
- Agostini, A., Giuntoli, J., Boulamanti, A. 2013. Carbon accounting of forest bioenergy. JRC Technical Report, Luxembourg. [WWW document]. URL http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC70663/eur25354en_online.pdf [Accessed 8 November 2017].
- Barnosky, A.D., Hadly, E.A., Bascompte, J., Berlow, E.L., Brown, J.H., Fortelius, M., Getz, W.M., Harte, J., Hastings, A., Marquet, P.A., Martinez,

- N.D., Mooers, A., Roopnarine, P., Vermeij, G., Williams, J.W., Gillespie, R., Kitzes, J., Marshall, C., Matzke, N., Mindell, D.P., Revilla, E., Smith, A.B. 2012. Approaching a state shift in Earth's biosphere. – *Nature*, 486(7401), 52–58.
- Barnosky, A.D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G.O.U., Swartz, B., Quental, T.B., Marshall, C., McGuire, J.L., Lindsey, E.L., Maguire, K.C., Mersey, B., Ferrer, E.A. 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? – *Nature*, 471(7336), 51–57.
- Beland Lindahl, K., Sténs, A., Sandström, C., Johansson, J., Lidskog, R., Ranius, T., Roberge, J.-M. 2017. The Swedish forestry model: More of everything? – *Forest Policy and Economics*, 77, 186–199.
- Bellassen, V., Luyssaert, S. 2014. Managing forests in uncertain times. – *Nature*, 506, 153–155.
- Bentsen, N.C. 2017. Carbon debt and payback time – Lost in the forest? – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1211–1217.
- Betts, R.A. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. – *Nature*, 408(6809), 187–190.
- Buchholz, T., Hurteau, M.D., Gunn, J., Saah, D. 2016. A global meta-analysis of forest bioenergy greenhouse gas emission accounting studies. – *GCB Bioenergy*, 8(2), 281–289.
- Carpentier, S., Filotas, E., Handa, I.T., Messier, C. 2017. Trade-offs between timber production, carbon stocking and habitat quality when managing woodlots for multiple ecosystem services. – *Environmental Conservation*, 44(1), 14–23.
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Barnosky, A.D., García, A., Pringle, R.M., Palmer, T.M. 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. – *Science Advances*, 1, no. 5, e1400253.
- Cornwall, W. 2017. Is wood a green source of energy? Scientists are divided. – *Science*, doi:10.1126/science.aal0574.
- Costilow, K.C., Knight, K.S., Flower, C.E. 2017. Disturbance severity and canopy position control the radial growth response of maple trees (*Acer* spp.) in forests of northwest Ohio impacted by emerald ash borer (*Agrilus planipennis*). – *Annals of Forest Science*, 74(1), art. no. 10.
- Dean, C., Kirkpatrick, J.B., Friedland, A.J. 2017. Conventional intensive logging promotes loss of organic carbon from the mineral soil. – *Global Change Biology*, 23(1), 1–11.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. – *Science*, 263(5144), 185–190.
- Emmett Duffy, J., Godwin, C.M., Cardinale, B.J. 2017. Biodiversity effects in the wild are common and as strong as key drivers of productivity. – *Nature*, 549(7671), 261–264.
- Espenberg, S., Kuhl-Thalfeldt, R., Lahtvee, V., Jüssi, M., Moora, H., Laht, J., Mander, Ü., Salm, J.-O., Parts, K. 2013. Estonian possibilities for moving towards competitive low carbon economy by 2050. Final report. (Eesti võimalused liikumaks konkurentsivõimelise madala süsinikuga majanduse suunas aastaks 2050. Lõppraport.) Tartu Ülikool RAKE, SA SEI Tallinn, SA Eestimaa Loodus Fond. 429 pp. (In Estonian).
- Euroopa Komisjon 2011. A roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. (Konkurentsivõimeline vähese CO₂-heitega majandus aastaks 2050 – edennemiskava). [WWW document]. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0112&from=EN> [Accessed 8 November 2017].
- Fedrowitz, K., Koricheva, J., Baker, S.C., Lindemayer, D.B., Palik, B., Rosenvald, R., Beese, W., Franklin, J.F., Kouki, J., Macdonald, E., Messier, C., Sverdrup-Thygeson, A., Gustafsson, L. 2014. Can retention forestry help conserve biodiversity? A meta-analysis. – *Journal of Applied Ecology*, 51(6), 1669–1679.
- Felton, A., Gustafsson, L., Roberge, J.-M., Ranius, T., Hjältén, J., Rudolphi, J., Lindblad, M., Weslien, J., Rist, L., Brunet, J., Felton, A.M. 2016. How climate change adaptation and mitigation strategies can threaten or enhance the biodiversity of production forests: Insights from Sweden. – *Biological Conservation*, 194, 11–20.
- Ford, S.E., Keeton, W.S. 2017. Enhanced carbon storage through management for old-growth characteristics in northern hardwood-conifer forests. – *Ecosphere*, 8(4), art. no. e01721.
- Gasparatos, A., Doll, C.N.H., Esteban, M., Ahmed, A., Olang, T.A. 2017. Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 161–184.
- Gerland, P., Raftery, A.E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B.K., Chunn, J., Lalic, N., Bay, G., Buettner, T., Heilig, G.K., Wilmoth, J. 2014. World population stabilization unlikely this century. – *Science*, 346(6206), 234–237.
- Gundersen, P., Christiansen, J.R., Alberti, G., Brüggemann, N., Castaldi, S., Gasche, R., Kitzler, B., Klemetsson, L., Lobo-Do-Vale, R., Moldan, F., Rütting, T., Schleppi, P., Weslien, P., Zechmeister-Boltenstern, S. 2012. The response of methane and nitrous oxide fluxes to forest change in Europe. – *Biogeosciences*, 9(10), 3999–4012.
- Hanssen, S.V., Duden, A.S., Junginger, M., Dale, V.H., van der Hilst, F. 2017. Wood pellets, what else? Greenhouse gas parity times of European electricity from wood pellets produced in the south-eastern United States using different softwood feedstocks. – *GCB Bioenergy*, 9(9), 1406–1422.
- Harmon, M.E., Moreno, A., Domingo, J.B. 2009. Effects of partial harvest on the carbon stores in douglas-fir/western hemlock forests: A simulation study. – *Ecosystems*, 12(5), 777–791.
- Heinonen, T., Pukkala, T., Mehtätalo, L., Asikainen, A., Kangas, J., Peltola, H. 2017. Scenario analyses

- for the effects of harvesting intensity on development of forest resources, timber supply, carbon balance and biodiversity of Finnish forestry. – *Forest Policy and Economics*, 80, 80–98.
- Humphreys, E.R., Black, T.A., Morgenstern, K., Cai, T., Drewitt, G.B., Nestic, Z., Trofymow, J.A. 2006. Carbon dioxide fluxes in coastal Douglas-fir stands at different stages of development after clearcut harvesting. – *Agricultural and Forest Meteorology*, 140(1–4), 6–22.
- IPCC 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. – Core Writing Team. Pachauri, R.K., Meyer, L.A. (eds.). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 pp.
- Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T.M., Bonin, C., Bruelheide, H., De Luca, E., Ebeling, A., Griffin, J.N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., Meyer, S.T., Mori, A.S., Naeem, S., Niklaus, P.A., Polley, H.W., Reich, P.B., Roscher, C., Seabloom, E.W., Smith, M.D., Thakur, M.P., Tilman, D., Tracy, B.F., van Der Putten, W.H., van Ruijven, J., Weigelt, A., Weisser, W.W., Wilsey, B., Eisenhauer, N. 2015. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. – *Nature*, 526(7574), 574–577.
- James, J., Harrison, R. 2016. The effect of harvest on forest soil carbon: A meta-analysis. – *Forests*, 7(12), art. no. 308.
- Körner, C. 2017. A matter of tree longevity: Tree longevity rather than growth rate controls the carbon capital of forests. – *Science*, 355(6321), 130–131.
- Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. – *Forest Ecology Management*, 220 (1–3), 242–58.
- Laporte, M.F., Duchesne, L.C., Morrison, I.K. 2003. Effect of clearcutting, selection cutting, shelterwood cutting and microsites on soil surface CO₂ efflux in a tolerant hardwood ecosystem of northern Ontario. – *Forest Ecology and Management*, 174(1–3), 565–575.
- Lavoie, M., Kellman, L., Risk, D. 2013. The effects of clear-cutting on soil CO₂, CH₄, and N₂O flux, storage and concentration in two Atlantic temperate forests in Nova Scotia, Canada. – *Forest Ecology and Management*, 304, 355–369.
- Luyssaert, S., Ciais, P., Piao, S.L., Schulze, E.-D., Jung, M., Zaehle, S., Schelhaas, M.J., Reichstein, M., Churkina, G., Papale, D., Abril, G., Beer, C., Grace, J., Loustau, D., Matteucci, G., Magnani, F., Nabuurs, G.J., Verbeeck, H., Sulkava, M., van der Werf, G.R., Janssens, I.A. 2010. The European carbon balance. Part 3: Forests. – *Global Change Biology*, 16(5), 429–450.
- Löhmus, A., Runnel, K. 2014. Ash dieback can rapidly eradicate isolated epiphyte populations in production forests: A case study. – *Biological Conservation*, 169, 185–188.
- Mantau, U. 2012. Wood flows in Europe (EU27). Project report. Celle 2012. 24 pp.
- Minkinen, K., Laine, J. 2006. Vegetation heterogeneity and ditches create spatial variability in methane fluxes from peatlands drained for forestry. – *Plant and Soil*, 285(1–2), 289–304.
- Nabuurs, G.J., Maser, O., Andrasko, K., Benitez-Ponce, P., Boer, R., Dutschke, M., Elsiddig, E., Ford-Robertson, J., Frumhoff, P., Karjalainen, J., Krankina, O., Kurz, W.A., Matsumoto, M., Oyhanhantabal, W., Ravindranath, N.H., Sanz Sanchez, M.J., Zhang, X. 2007. Forestry. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (eds.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Naudts, K., Chen, Y., McGrath, M.J., Ryder, J., Valade, A., Otto, J., Luyssaert, S. 2016. Forest management: Europe's forest management did not mitigate climate warming. – *Science*, 351(6273), 597–599.
- Noormets, A., Nouvellon, Y. 2015. Introduction for special issue: Carbon, water and nutrient cycling in managed forests. – *Forest Ecology and Management*, 355, 1–3.
- Ojanen, P., Minkinen, K., Alm, J., Penttilä, T. 2010. Soil-atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. – *Forest Ecology and Management*, 260(3), 411–421.
- Olsson, R. 2011. To manage or protect? – Boreal forest from a climate perspective. *Air Pollution and Climate Series* 26. 67 pp.
- Pohjanmies, T., Triviño, M., Le Tortorec, E., Salminen, H., Mönkkönen, M. 2017. Conflicting objectives in production forests pose a challenge for forest management. – *Ecosystem Services*, 28(C), 298–310.
- Prévost, M., Dumais, D. 2014. Shelterwood cutting in a boreal mixedwood stand: 10-year effects of the establishment cut on growth and mortality of merchantable residual trees. – *Forest Ecology and Management*, 330, 94–104.
- Profft, I., Mund, M., Weber, G.E., Weller, E., Schulze, E.D. 2009. Forest management and carbon sequestration in wood products. – *European Journal of Forest Research*, 128, 399–413.
- Puhlick, J.J., Weiskittel, A.R., Fernandez, I.J., Fraver, S., Kenefic, L.S., Seymour, R.S., Kolka, R.K., Rustad, L.E., Brissette, J.C. 2016. Long-term influence of alternative forest management treatments on total ecosystem and wood product carbon storage. – *Canadian Journal of Forest Research*, 46(11), 1404–1412.
- Pukkala, T. 2017. Does management improve the carbon balance of forestry? *Forestry*, 90 (1), 125–135.
- Pärt, E. 2013. Increase in stand volume – basics and myths in forestry. (Puistute juurdekasv – metsanduse põhitõed ja müüdid). – *Eesti Mets*, 3, 24–27. (In Estonian).

- Ranius, T., Hämäläinen, A., Egnell, G., Olsson, B., Ek-löf, K., Stendahl, J., Rudolphi, J., Sténs, A., Felton, A. 2018. The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis. – *Journal of Environmental Management*, 209, 409–425.
- RMK rakendusüüringu projekt 2016. Carbon and nitrogen cycling in drained forests. Project period 24.04.2013–30.04.2016, principal investigator Mander, Ü. (Süsiniku- ja lämmastikuringe muudetud veerežiimiga metsades. Projekti kestus 24.04.2013–30.04.2016, projekti juht Mander, Ü). [WWW document]. URL http://media.rm.ee/files/Rakendusüüringu%20lopparuanne_Kodusoometsad.pdf [Accessed 8 November 2017]. (In Estonian).
- Salm, J.-O., Kimmel, K., Uri, V., Mander, Ü. 2009. Global warming potential of drained and undrained peatlands in Estonia: A synthesis. – *Wetlands*, 29(4), 1081–1092.
- Santaniello, F., Djupström, L.B., Ranius, T., Weslien, J., Rudolphi, J., Sonesson, J. 2017. Simulated long-term effects of varying tree retention on wood production, dead wood and carbon stock changes. – *Journal of Environmental Management*, 201, 37–44.
- Sievänen, R., Salminen, O., Lehtonen, A., Ojanen, P., Liski, J., Ruosteenoja, K., Tuomi, M. 2014. Carbon stock changes of forest land in Finland under different levels of wood use and climate change. – *Annals of Forest Science*, 71(2), 255–265.
- Simola, H. 2017. Persistent carbon loss from the humus layer of tilled boreal forest soil. – *European Journal of Soil Science*. Article in press.
- Sims, A. 2016. Changes in data analysis methodology and results in 2015. Presentation at the Ministry of the Environment on 20nd of Dec., 2016. (Andmeanalüüsi metoodika muudatused ja 2015. a tulemused. Ettekanne Keskkonnaministeeriumis 20.12.2016). http://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/andmeanaluusi_metoodika_muudatused_ja_2015.pdf [Accessed 8 November 2017]. (In Estonian).
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., De Vries, W., De Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Rayers, B., Sörlin, S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. – *Science*, 347 (6223), art. no. 1259855.
- Sundqvist, E., Vestin, P., Crill, P., Persson, T., Lindroth, A. 2014. Short-term effects of thinning, clear-cutting and stump harvesting on methane exchange in a boreal forest. – *Biogeosciences*, 11(21), 6095–6105.
- Zhou, D., Zhao, S. Q., Liu, S., Oeding, J. 2013. A meta-analysis on the impacts of partial cutting on forest structure and carbon storage. – *Biogeosciences*, 10, 3691–3703.
- Taylor, A.R., Wang, J.R., Kurz, W.A. 2008. Effects of harvesting intensity on carbon stocks in eastern Canadian red spruce (*Picea rubens*) forests: An exploratory analysis using the CBM-CFS3 simulation model. – *Forest Ecology and Management*, 255(10), 3632–3641.
- Thorpe, H.C., Thomas, S.C., Caspersen, J.P. 2007. Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (*Picea mariana*) boreal forest. – *Canadian Journal of Forest Research*, 37(9), 1563–1571.
- Triviño, M., Pohjanmies, T., Mazziotto, A., Juutinen, A., Podkopaev, D., Le Tortorec, E., Mönkkönen, M. 2017. Optimizing management to enhance multifunctionality in a boreal forest landscape. – *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 61–70.
- Trømborg, E., Sjølie, H.K., Bergseng, E., Bolkesjø, T.F., Hofstad, O., Rørstad, P.K., Solberg, B., Sunde, K., 2011. Carbon cycle effects of different strategies for utilisation of forest resources-a review. Department of Ecology and Natural Resource Management, Norwegian University of Life Sciences. 34 pp.
- Usi, D.A.N., Lal, R. 2017. Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation. Springer International Publishing, Cham. 563 pp.
- Valade, A., Bellassen, V., Magand, C., Luyssaert, S. 2017. Sustaining the sequestration efficiency of the European forest sector. – *Forest Ecology and Management*, 405, 44–55.
- Wang, W., Dwivedi, P., Abt R., Khanna, M. 2015. Carbon savings with transatlantic trade in pellets: accounting for market-driven effects. – *Environmental Research Letters*, 10, 114019.
- Warren, R., Vanderwal, J., Price, J., Welbergen, J.A., Atkinson, I., Ramirez-Villegas, J., Osborn, T.J., Jarvis, A., Shoo, L.P., Williams, S.E., Lowe, J. 2013. Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. – *Nature Climate Change*, 3(7), 678–682.
- Winjum, J.K., Dixon, R.K., Schroeder, P.E. 1993. Forest management and carbon storage: An analysis of 12 key forest nations. *Water, Air, & Soil Pollution*, 70(1–4), 239–257.

The influence of forest management and timber use options on carbon sequestration and the consequences on biodiversity

Raul Rosenvald and Katrin Rosenvald

Summary

The EU should cut greenhouse gas emissions at least 80% from 1990 levels by 2050. A part of this reduction will be done by substituting fossil fuels with alternative renewable energy, including wood. However, an increase in the use of wood is not always a climate-friendly solution, and besides, it has often a negative impact on biodiversity. Extinction of species is largely caused by the overconsumption of natural resources, the resulting degradation and loss of habitats; and climate change speeds it up.

The current paper reviews the literature about the influence of different forest management and timber use options on carbon sequestration and brings out the accompanying consequences on biodiversity in temperate and boreal climate zone. The results of scientific studies dealing with the influence of forest management on carbon (C) dynamics are often controversial due to the complexity of the subject and the missing consensus between scientists. Besides the forest C budget, climate models should take into account also the influence of other greenhouse gases than carbon dioxide, changes in albedo, the wood substitution effect and other indirect factors.

The forest ability to sequester and store C can be enlarged by appropriate forest management planning and practices. Generally, for mitigation of climate change, the moderate (not intensive) forest management is most favourable, but intensification of management enhances global warming, since forest carbon storage in tree biomass and in soil decreases.

The most of forest C is located in soil, and the influence of managing on soil C budget differs by soil type. In the short

term (during one forest generation), soil C stock might not decrease in managed forests. However, C loss from soil becomes remarkable if cutting residues are intensively removed. In the long term, forest management decreases soil C stock, and an especially big loss of soil C occurs when old-growth forests are cut. The influence of partial cutting on soil C loss is weaker.

Sustainable forest management balances the needs of the environment, wildlife, and forest communities. The mitigation of climate change is just one of the many roles of forest, and climate policy actions cannot come at the expense of species diversity. However, part of the climate change mitigation strategies contribute to biodiversity protection, i.e. increased rotation time, continuous cover forestry, and promotion of native broadleaf tree species. Other climate actions like intensive removing of logging residues, establishing short-rotation plantations of fast-growing deciduous tree species, use of introduced tree species, and decreasing the rotation time infection-susceptible tree species conflict with biodiversity conservation. The complex studies dealing with several forest goals conclude that high C store and biodiversity protection do not contradict each other, but the achievement of maximum economic profit at the same time is not possible. The mitigation of climate change and wildlife protection is most effective when management intensity is lowered first of all in the forests whose biodiversity value is high.

Concerning climate change, the most negative forest biomass use is wood combustion. It is reasonable to burn only such biomass (cut and industrial residues) which cannot be used in products storing

C for a long time. Among renewable energy sources, biomass energy has the most negative influence on biodiversity and climate change.

The recommendations for climate- and biodiversity sustaining forest management include: the management systems and practices retaining or raising forest wood stock, increasing the proportion wood sale assortments used for of long-lived products, and decreasing C emissions as well

as contributing to biodiversity must be favoured; avoiding the establishment of monoculture forest and promoting the diversification of forest management (i.e. use of partial cutting); abandoning the aim of very intensive wood production; however, to cover the wood supply and retain the income, forests can be divided into stands with different management intensity; using other renewable energy sources instead of biomass combustion.

Received November 15, 2017, revised January 8, 2018, accepted March 5, 2018