

Mets ja kliimamuutused

Raport

Veebruar 2020¹

Annela Anger-Kraavi², Enn Pärt³, Madis Raudsaar², Maris Nikopensius², Karl Eerik Kraavi⁴, Jill Duggan⁵, María José Sanz⁶

¹ Report: Forest and climate change. February 2020. Key messages in English added in July 2021

² Cambridge Ülikool/University of Cambridge

³ Eesti Keskkonnaagentuur/Estonian Environment Agency

⁴ Newcastle Ülikool/University of Newcastle

⁵ Carbon Policy Associates Ltd. ja/and Cambridge Ülikool/ University of Cambridge
– contributed to section 2

⁶ Baskimaa Kliimamuutuste Uurimiskeskus/Basque Centre for Climate Change

Põhisõnumid

1. Metsa ja muude ökosüsteemide süsiniku sidumise suurendamisest, maa ja metsaga seotud emissioonide vähendamisest ning bioenergia kasutamisest üksi ei piisa kliimamuutuste leevendamiseks ei Eestis, ega ka kogu maailmas. Kui kõikides muudes sektorites emissioone kiiresti ei vähendata, siis maale ja metsale kliimamuutuste poolt tekitatavad kahjustused suurenevad ja see omakorda vähendab muuhulgas süsiniku sidumist ja võimendab kliimamuutusi.
2. Mets on väga keeruline süsteem, kus muutujaid on palju (sealhulgas kliimamuutuste mõjud) ja nende omavahelised seosed on mitmekesised. Seega on pikaajalised prognoosid paratamatult väga suure võimaliku veaga. Vaatluse all oli viis Eesti metsa tuleviku stsenaariumit järgmiseks sajaks aastaks. Neist neli erinevad üksteisest peamiselt uuendusraiate mahu poolest ja viies on selline kus raied ei tehta.
3. Vaadeldud stsenaariumite põhjal on soovituslik uuendusraiate maht järgmise saja aasta jooksul keskmiselt 8-9 miljonit tihumeetrit⁷ aastas ja koguraiate maht umbes 10-12 miljoni tihumeetrit aastas.
4. Punktis 3. toodud aastaste raiemahtude juures peaks metsa tagavara jääma kas samaks või suurenema sõltuvalt metsa juurdekasvu stsenaariumist. Ja seega toimub aasta-aastalt süsiniku sidumine ja täiendav talletamine metsas. Siinkohal on oluline lähtuda jätkusuutliku metsamajanduse põhimõtetest ning tegevuste planeerimisel jälgida raieliikide ja raiutavate puuliikide optimaalset vahekorda ning lubada uuendusraieid üksnes raievanuse saavutanud või vanemates puistutes.
5. Kui metsa raiuda küpsusraie stsenaariumi alusel, siis tekivad metsaga seotud süsiniku emissioonid, mis viiksid ka Eesti maakasutuse, maakasutuse muutuse ja metsandussektori (LULUCF) lähiaastakümnetel emiteerijaks. Umbes 2040. aastaks on metsaga seotud süsiniku sidumine ja emissioonid tasakaalus ja alates 2050. aastast seotakse küpsusraie stsenaariumis süsinikku rohkem kui ühtlase raie stsenaariumis.
6. Stsenaariumi korral, kus metsa üldse ei raiuta, on süsiniku sidumine lähiaastakümnetel suurem kui teistes stsenaariumites, aga selle sajandi lõpukümnetel ületab aastane orgaanilise materjali suremine ja lagunemine selle juurde tekke. Seega tekivad süsiniku arvestuses iga-aastased metsaga seotud emissioonid ka stsenaariumis, kus raieid ei tehta.

Praegune olukord Eestis

7. Aastal 2017 olid Eesti kasvuhoonegaaside heitkogused CO₂ ekvivalendina (CO₂-e) mõõdetud 19087,1 kt (14,5 t elaniku kohta) ja ilma LULUCFita 20879,9 kt (15,9 t elaniku kohta). Ökosüsteemide (enamasti metsa) poolt seotud CO₂ vähendab umbes 1,5 tonni emissioone inimese kohta aastas. Eesti kasvuhoonegaaside emissioonid on 0.05% maailma emissioonidest.
8. Eesti asub hemiboreaalses kliimatsoonis ja umbes pool (51,4% 2018. aastal) Eestit on kaetud metsadega. 2018. aastal oli metsamaa pindala 2330,9 tuhat ha, millest 2148,7 tuhat ha oli metsa all. Elaniku kohta teeb see umbes 1,8 ha metsamaad ja 4000 puud.

⁷ 1 tihumeeter = 1 kuupmeeter (m³)

Metsamaa pindala on viimase viie aasta jooksul suurenenud umbes 1000 ha võrra aastas. Eestis on metsamaa pindala suurenenud umbes poolteist korda alates 1940. aastast ja metsaressurss on sama ajavahemiku jooksul kolmekordistunud. Võrreldes 1975. aastaga on need muutused olnud vastavalt 1,3 ja 1,9 korda. 1990-2016 suurenes metsa tagavara 50 miljoni tihumeetri võrra. Eestis annab metsa- ja puidusektor tööd peaaegu 28 tuhandele inimesele ja kaudset ning kaasnevat mõju arvesse võttes oli sektoriga seotud 2017. aastal 59 tuhat töökohta.

9. 2018. aastal oli range kaitse all kogu Eesti metsamaast 13,2% (rangelt kaitstav mets) ning täiendava metsamajandamise piiranguga umbes 11,4% (kaitsemets). Majandatavates metsades moodustavad kõigi puuliikide puistute pindalast küpsed ja valmivad puistud 37% (SMI, 2018). Tegelikuses on see protsent majandatavates metsades veelgi suurem, kuna lisaks raievanusele oleneb metsa raieküpsus ka diameetrist, millega arvestades on küpseid ja valmivaid puistuid tervelt 47% ehk pea pool. Eestis on LULUCF arvestusse kaasatud kogu metsamaa (sh range kaitsega mets).
10. Metsa raiuti Eestis 2017. aastal 12.5 miljonit tihumeetrit⁸ (ligikaudu 30% sellest läks küttepuiduks) ja juurdekasvuks arvestati umbes 16 miljonit tihumeetrit, sellest netojuurdekasvuks 11.9 miljonit tihumeetrit. Tulundusmetsas on küttepuiduks sobivate raieküpsete ja valmivate hall-lepikute tagavara umbes 23 miljonit tihumeetrit. 2011-2019 aasta keskmiseks raiemahuks oli 10,7 miljonit m³, mis on vähem kui MAK-is (2010) kehtestatud jätkusuutlik raiemaht 12-15 miljonit m³.
11. Eesti metsades oli 2015. aastal hinnanguliselt ladustatud 1903 miljonit tonni süsinikdioksiidi. Aastane süsinikdioksiidi sidumine on olnud arvestuslikult 1,6 kuni 4,5 miljoni tonni (ajaperioodil 1990 – 2017). 2017. aastal oli metsa KGH-de sidumine 1947,08 kt CO₂-e ja koos puitoodetesse talletatud süsinikuga oli see number 3089,98 kt CO₂-e.
12. Eestis on metsamaa pindala suurenenud umbes poolteist korda alates 1940 aastast ja metsaressurss on sama ajavahemiku jooksul kolmekordistunud. Metsa kasvu kiirenemisel Eestis on mitmeid põhjuseid nagu näiteks kuivendustööde mõjud, soojem kasvuperiood (kevaded on piirkonniti 3-5°C soojemad), endisest paremad metsa majandamise võtted, suurem süsinikdioksiidi kontsentratsioon õhus (nn. CO₂-ga väetamine).

Kliimamuutuste mõjud metsale

13. Kliimamuutused hakkavad suure tõenäosusega metsa kasvamist ja tervist mingi aja jooksul ohustama. Keskkonnaagentuuri andmete põhjal on Eestis olnud aasta keskmine soojenemine juba üle 2°C ja prognooside kohaselt muutuvad eelkõige kliimamuutuste tõttu talved ja kevaded Eestis niiskemaks ja soojemaks, suved aga kuivemaks. Suureneb lumeta talvapäevade arv, kus päikesekiirgust lumelt tagasi ei peegeldu ning see omakorda soojendab kliimat.
14. Metsa pinna suurenemine suurendab temperatuuri tõusu lumega talvedel kuna vähendab soojuskiirguse tagasi peegeldumist. Kasvuperioodil aitab soojenemisest tulenev metsaga seotud aerosoolide aurustumine temperatuure alandada.

⁸ Lageraied – 10.6 miljonit m³, hooldusraied – 1.7 miljonit m³, and ja muud raied - 0.2 miljonit m³ (SMI, 2018).

15. Soojemate temperatuuridega suureneb metsa hingamine ja CO₂ vabanemine, mis pikema aja jooksul koostoides suureneva niiskusega kasvuperioodil võib hakata metsa kasvukiirust kärpima.
16. Soojemate talvedega suureneb aga ellu jäävate kahjurite/metsahaiguste hulk ja levik, samuti suureneb võõrliikidest kahjurite arvukus seoses soojenevate temperatuuridega, mis neile elukeskkonnana sobivad. Suviti suureneb põua ja metsa tulekahjude võimalus. On tõenäoline, et esineb rohkem tormikahjustusi.
17. Boreaalses ja hemiboreaalses kliimatsoonis toimub kliima soojenemisega liikide, eriti oma leviala lõunapiiril elavate liikide liikumine põhja poole ja uute liikide pealetung lõuna poolt.
18. Kliimamuutuste mõju ja ulatus Eesti metsale oleneb piirkonnast ja kasvutingimustest, samuti metsa vanusest ja seisukorrast.

Kliimamuutuste leevendamine

19. Pariisi Lepe (PA) kutsub valitsusi võtma kasutusele meetmeid, et säilitada ja tõhustada kliimamuutuste konventsiooni artikli 4 lõige 1 punktis d) osutatud kasvuhoonegaaside neeldajaid (ehk sidujaid) ja reservuaare (ehk talletajaid), sealhulgas metsi. Samuti peaksid leppe osapooled saavutama tasakaalu kasvuhoonegaaside inimtekkeliste heitmete ja kasvuhoonegaaside sidumise vahel neeldajate poolt (kliimanetraalsuse) selle sajandi teisel poolel selleks, et hoida globaalne soojenemine alla 2°C (PA, artiklid 2 ja 4,1).
20. IPCC kliimamuutuste leevendamise stsenaariumid näevad ette bioenergia suuremat kasutamist, kas siis koos selle põletamisel tekkiva süsiniku kogumise ja ladustamisega või ilma, ning metsa pindala suurendamist või taasmetsastamist. Seega on suurenenud surve biomassi ja bioenergia tootmiseks. Eestis CO₂ maa alla ladustamiseks sobivaid kohti teadaolevalt ei ole.
21. Globaalsed stsenaariumid näevad ette kuni seitsme miljoni ruutkilomeetri viljaka maa vajadust bioenergiaks sobivate taimede, sealhulgas energiapuidu, kasvatamiseks. Selline suuremahuline biomassi tootmine aga ohustab põllumajandussaaduste tootmist, liigilist mitmekesisust, võib vähendada mulla viljakust ja suurendada vee nappust. Kõik see omakorda suurendab jällegi kliimamuutusi.
22. Bioenergia tootmise võimalused ja nende mõjud erinevad regiooniti, aga üldiselt ei ole soovitatav suuremahuline ja monokultuurne biomassi tootmine. Bioenergiaks soovitatakse kasutada kohalikke puidu- ja põllumajandustootmise jääke samuti harvendus- ja hooldusraietest tekkinud väheväärtuslikku puitmaterjali.
23. Toitumisharjumuste (vähem liha ja toidu raiskamist) muutumisel vabanenud või muidu söötis põllumaad võiks kasutada biomassi tootmiseks. Väikesemahulisel ja jätkusuutlikult toodetud biomassil on positiivsed mõjud keskkonnale.
24. Biomassi põletamisel on süsiniku emissioonid arvestuslikult nullis, kuna need on juba arvestatud maakasutusest, maakasutuse muutusest ja metsandusest tekkivate emissioonide hulka ja nii välditakse topeltarvestust.
25. Süsinik, mis on puidus tallel, jääb seotuks kuni selle põletamise või lagunemiseni. Sama kehtib ka puidupõhistesse toodetesse seotud süsiniku kohta ja seda arvestatakse kui süsinikuheite vähendamist kuni nende toodete lagunemiseni. Pika elueaga puittoodete kasutamine fossiilenergia-mahukate materjalide asemel aitab vähendada teiste sektorite emissioone.

26. Biomassi põletamine fossiilsete kütuste põletamise asemel aitab reeglina samuti vähendada emissioone ja fossiilsetes kütustes sisalduva süsiniku lisamist süsinikuringesse. Seega on oluline, et justnimelt Eesti päritolu biomass asendaks kodumaiste fossiilsete kütuste ja fossiilenergia-mahukate materjalide kasutamist Eestis. Siin on oluline arvestada kogu elukaare emissioone ja ka teisi keskkonna mõjusid.

Metsa majandamise mõjud

27. Metsade jätkusuutlik majandamine aitab säilitada või suurendada süsinikuvarusid orgaanilises aines ja pinnases, sealhulgas talletada süsinikku puittoodetes ja kaasa tuua asendusefekti, ning pakkuda lahendust metsasüsiniku küllastusprobleemile, mille korral küps mets enam mingist hetkest kokkuvõttes süsinikku juurde ei seo (st süsiniku emissioonid ja sidumine tasakaalustuvad üksteist või emissioonid ületavad sidumist).
28. Jätkusuutliku metsamajandamise eesmärgiks on säilitada ja parandada kõikide metsa tüüpide keskkonna-alaseid, majanduslikke ja sotsiaalseid väärtusi nii praeguste kui tulevaste põlvkondade hüvanguks.
29. Hooajalised ilmaprognoosid ja varajased hoiatussüsteemid on olulised õigete majandusvõtete kasutamiseks, mis aitavad säilitada elurikkust ning ennetada ja vähendada kahjurite ja haiguste levikut ning aitavad metsal kohaneda kliimamuutustega.
30. Erinevatel metsa majandamise võtetel on pikema aja lõikes mitmeid, sh vastandlikke mõjusid. Näiteks vähendab suurem küpse metsa raiemaht biomassis seotud süsinikku lühiajalises perspektiivis, kuid suurendab süsiniku seotust puittoodetes ja võimalikku asendusefekti.
31. Metsade jätkusuutlik majandamine, kasutades looduslähedasi tehnikaid, võib potentsiaalselt pakkuda paljusid positiivseid kaasefekte kliimamuutuste leevendamise, nendega kohanemise, bioloogilise mitmekesisuse kaitse, mikrokliima reguleerimise, mulla erosiooni kaitse, rannikualade kaitse ning vee- ja üleujutuste reguleerimise näol.
32. Jätkusuutlik metsa majandamine peaks arvestama võimalike kliimamuutuste mõjudega metsale ja aitama metsal kliimamuutustega kohaneda, näiteks vähendada liigniiskust ja tulekahju ohtu. Oluline on kohaliku liigilise koosluse säilitamine, mis aitab toetada ökosüsteemi ja selle teenuste jätkusuutlikkust (kaasaarvatud kliimamuutustele vastupidamiseks ja paremaks süsiniku sidumiseks). Riskide vähendamiseks tuleks võõrliikide kasutamisest hoiduda.
33. Metsa majandamisstrateegiatel, mille ainus eesmärk on suurendada biomassi, ka süsiniku sidumise eesmärgil, võivad olla kahjulikud kõrvalmõjud, näiteks võib väheneda metsa struktuurilise koosluse mitmekesisus, elurikkus ja vastupanuvõime looduslikele häiringutele.

Forests and Climate Change: Key messages

1. Increasing the carbon sequestration of forests and that of other ecosystems, reducing land and forest-related emissions and using of bioenergy are not enough to mitigate climate change, neither in Estonia nor worldwide. If greenhouse gas emissions are not reduced quickly in all economic sectors and areas of life, the damage to land and forests caused by climate change will increase, which in turn will reduce their carbon sequestration and exacerbate climate change.
2. Five scenarios of Estonian forests over the next hundred years were considered in this study. Four of them differ mainly in the volume of regeneration felling, and the fifth is one where there is no felling. However, forests are very complex systems with many variables (including the impacts of climate change on forests, that are not considered in these scenarios) and their interrelationships. Thus, such scenarios inevitably have high uncertainty.
3. Based on the scenarios explored, the annual indicative volume of regeneration felling could be 8-9 million cubic meters on average over the next hundred years and the total (incl. maintenance and other fellings) could be around 10-12 million cubic meters.
4. At the annual felling volumes specified in point 3, the forest growing stock would either remain the same or increase depending on the forest growth scenario. In this way, year after year, carbon sequestration and additional carbon storage takes place in the forest. To achieve this, it is important to follow the principles of sustainable forest management and to allow regeneration felling only in stands that have reached maturity or are older.
5. If harvesting takes place based on the maximum felling coupe scenario (see also point 9 below), forest-related carbon emissions will occur. This would also make Estonia an emitter in the land use, land use change and forestry (LULUCF) sector in the coming decades. Following that, by about 2040, forest-related carbon sequestration and emissions will be in balance, and from 2050 onwards this scenario will sequester more carbon than in any other felling scenario explored.
6. In a scenario where no felling takes place at all, carbon sequestration will be higher in the coming decades than in other scenarios, but in the last decades of this century, the annual mortality will increase and the degradation of organic matter will exceed its regeneration. Thus, annual forest-related carbon emissions also occur in the no-felling scenario.

Current situation in Estonia

7. In 2017, Estonia's greenhouse gas emissions (GHG) measured as CO₂ equivalent (CO₂-eq.) were 19087.1 kt (14.5 t per capita) and without the LULUCF sector 20879.9 kt (15.9 t per capita). CO₂ uptake by ecosystems (mostly forests) reduces emissions by about 1.5 tonnes per person per year. Estonia's GHG emissions are about 0.05% of the global GHG emissions.
8. Estonia is located in the hemiboreal climate zone and about half (51.4% in 2018) of the country is covered with forests. In 2018, the area of forestland was 2330.9 thousand hectares (ha), of which 2148.7 thousand ha was covered by forests. This makes roughly 1.8 ha of forest land and 4,000 trees per inhabitant. The forestland area has during the last five years increased by about 1000 ha per year. In Estonia, forest land has increased by about one and a half times since 1940, and the forest resource has tripled during the same period. Compared to 1975, these increases have been 1.3 and 1.9 times, respectively. Between 1990 and 2016, forest growing stock increased by 50 million cubic meters. In Estonia, the forest and timber sector employ almost 28 thousand people and, considering the indirect and induced effects, the sector contributed to 59 thousand jobs in 2017.

9. In 2018, 13.2% of all Estonian forestland was under strict protection (strictly protected forest) and about 11.4% had additional forest management restrictions (protected forest). In managed forests, considering all tree species, mature and near-mature stands make up 37% of the area (NFI, 2018). In reality, this percentage is even higher in managed forests, because in addition to the felling age, the maturity of the forest also depends on the tree diameter, meaning mature and near-mature stands account for 47% or almost half of all the managed forests. In Estonia, all forestland (including strictly protected forest) is included in the managed forests category for accounting purposes and hence in the LULUCF GHG emissions calculations.
10. In 2017, the felling volume was 12.5 million cubic meters in Estonia⁹ (approximately 30% of which was for firewood) and an increment (increase in forest growing stock) was of about 16 million cubic meters was calculated, of which, 11.9 million cubic meters was net increment. The forest available for wood supply (FAWS) has a growing stock of about 23 million cubic meters of mature and maturing grey alder stands suitable for firewood. The average annual felling volume in 2011-2019 was 10.7 million m³, which is less than the felling volume of 12-15 million m³ approved by the Estonian National Forestry Development Program 2011-2020.
11. In 2015, an estimated 1,903 million tons of carbon dioxide were stored in Estonian forests. Annual CO₂ sequestration was between 1.6 and 4.5 million tonnes during the period of 1990-2017. In 2017, forests took up 1947.08 kt CO₂ and together with harvested wood products (HWP), this number was 3089.98 kt CO₂.
12. In Estonia, the area of forestland has increased about one and a half times since 1940 and the growing stock has tripled during the same period. There are several reasons for the increased forest growth in Estonia, such as the effects of past drainage works, warmer growing season (spring is 3-5°C warmer in some regions), better forest management practices, and higher concentration of carbon dioxide in the atmosphere (so-called CO₂ fertilisation).

Impacts of climate change on forests

13. Climate change is likely to threaten forest growth and health over time. According to the data of the Estonian Environmental Agency, the average annual temperature in Estonia has already increased more than 2°C. According to the Agency's long-term climate forecasts, winters and springs in Estonia will become wetter and warmer, while summers will become drier, and this is primarily due to human-induced climate change impacts. The number of snow-free winter days, when the sunrays are not reflected back from the snow, is increasing, which in turn leads to warming of the local climate.
14. The increase in forest surface increases the temperature during snowy winters as it reduces the reflection of heat radiation. During the growing season, warming increases the evapotranspiration producing forest-related aerosols that help to lower temperatures.
15. Climate change can exacerbate forest respiration and CO₂ emissions, which over a longer period of time, combined with increasing humidity during the growing season, could reduce the growth rate of the forest.
16. However, warmer winters increase the number and survival of forest pests / diseases, as well as the number of invasive pests due to the creation of suitable habitats for them. In

⁹ Regeneration felling – 10.6 million m³, maintenance felling – 1.7 million m³, and other fellings - 0.2 million m³ (SMI, 2018).

summertime, the possibility of drought and forest fires increases. It is likely that there will be more storm damage.

17. In the boreal and hemiboreal climate zones, due to the warming climate, species, especially those living on the southern border of their habitat, are moving north and new species are invading from the south.
18. The impact of climate change and its extent on Estonian forests depends on the regional and growing conditions, as well as the age and condition of the forest.

Climate change mitigation

19. The Paris Agreement calls on governments to take measures to maintain and enhance the greenhouse gas sinks and reservoirs, including forests, referred to in Article 4 (1) (d) of the United Nations Framework Convention on Climate Change. Additionally, The Parties to the agreement should 'achieve a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases in the second half of this century' in order to keep global warming below 2°C (Paris Agreement, Articles 2 and 4.1).
20. The IPCC's SR1.5 climate change mitigation scenarios envisage greater use of bioenergy, with or without carbon capture and storage, and/or an increase in area (afforestation and reforestation) and stock of existing forest. Thus, the pressure for biomass and bioenergy production has increased. There are no known places suitable for underground storage of CO₂ in Estonia.
21. Global scenarios predict the need for up to seven million square kilometres of fertile land to grow bioenergy crops, including woody feedstock. However, such large-scale biomass production threatens agricultural production, biodiversity, can reduce soil fertility and increase water scarcity. All this in turn increases climate change again.
22. Bioenergy production opportunities and impacts vary from region to region, but large-scale and monocultural biomass production is generally not recommended. The use of local wood and agricultural production residues for bioenergy is recommended, as well as low-value wood material from maintenance felling (incl. sanitation felling).
23. Changes in eating habits (for example, less meat and food waste) may lead to the freeing of agricultural land, which could be used for biomass production. Small-scale and sustainably produced biomass has positive effects on the environment.
24. Following IPCC guidance, carbon emissions from biomass combustion are accounted at zero, as they are already included in emissions from land use, land use change and forestry (LULUCF), thus avoiding double counting.
25. The carbon stored in the wood remains bound until it is burned or decomposed. The same applies to the carbon associated with wood-based products (Harvested Wood Products – HWP) and is accounted as the reduction of carbon emissions until these products decompose. Using long-lived wood products instead of fossil-fuel-energy-intensive materials will help reduce emissions from other sectors.
26. Combustion of biomass instead of fossil fuels can help in most cases to reduce greenhouse gas emissions and the incorporation of carbon from fossil fuels into the carbon cycle. Thus, it is important that biomass of Estonian origin replaces the use of domestic fossil fuels and fossil-energy-intensive materials in Estonia. Here, it is important to consider life cycle emissions as well as other environmental impacts.

Impacts of forest management

27. Sustainable forest management can maintain or enhance forest carbon stocks, including by transferring carbon to wood products, thus addressing the issue of forest sink saturation, where mature forests no longer sequester carbon (i.e. carbon emissions and sequestration offset each other, or emissions exceed sequestration).
28. Sustainable forest management aims to preserve and improve the environmental, economic and social values of all types of forests for the benefit of present and future generations.
29. Seasonal weather forecasts and early warning systems are essential for the use of sound management practices to help conserve biodiversity and prevent and reduce the spread of pests and diseases and for helping forests to adapt to climate change.
30. Different forest management practices have a number of effects over time, including opposing effects. For example, higher logging volumes of mature forest reduce the carbon capture associated with biomass in the short term, but increase the carbon stored in wood products and the potential substitution effect.
31. Sustainable forest management, also through close- to-nature silvicultural techniques, can potentially offer many co-benefits in terms of climate change mitigation, adaptation, biodiversity conservation, microclimatic regulation, soil erosion protection, coastal area protection and water and flood regulation.
32. Sustainable forest management should take into account the potential impacts of climate change on forests and make forests more resilient to climate change, for example, by reducing excessive humidity in the canopies, reducing the risk of pests and diseases outbreaks, and the risk of fire. It is important to preserve the local tree species composition, which helps to support the sustainability of the ecosystem and its services (including resilience to climate change and better carbon sequestration). In order to reduce the risks, the use of non-native tree species should be avoided.
33. Forest management strategies that are only aimed at increasing the biomass stock levels, including for carbon sequestration, may have adverse side effects, such as decreasing the stand-level structural complexity, biodiversity and resilience to natural disasters.

Sisukord

Põhisõnumid.....	2
<i>Praegune olukord Eestis</i>	2
<i>Kliimamuutuste mõjud metsale</i>	3
<i>Kliimamuutuste leevendamine</i>	4
<i>Metsa majandamise mõjud</i>	5
Forests and Climate Change: Key messages.....	6
<i>Current situation in Estonia</i>	6
<i>Impacts of climate change on forests</i>	7
<i>Climate change mitigation</i>	8
<i>Impacts of forest management</i>	9
1. Sissejuhatus.....	11
2. Metsad ja kliimamuutused.....	12
2.1. Kliimamuutuste mõju metsadele.....	13
2.2. Metsade roll kohanemisel.....	14
2.3. Metsade roll kliimamuutuste leevendamisel.....	15
2.4. Metsa kütuse allikana.....	16
2.5. IPCC eriaruanded 1,5°C soojenemise kohta ning kliimamuutustest ja maast.....	18
2.5.1. Mõju Põhja-Euroopale.....	21
2.6. Süsinikdioksiidi eemaldamine (CDR).....	21
2.7. Metsastamine ja taasmetsastamine.....	24
2.8. Biosüsi.....	25
2.9. Metsa majandamine.....	26
2.10. Puittooted (HWP) ja puit kui asendusmaterjal.....	28
2.11. Maksed metsa ökosüsteemiteenuste eest ja metsanduskrediidiga kauplemine.....	29
3. Metsad ning riiklik ja rahvusvaheline kliimapoliitika.....	30
4. Eesti metsade hetkeolukord.....	32
5. Eesti metsade stsenaariumid aastani 2120.....	35
6. Järeldused ja kokkuvõte.....	45
Kasutatud kirjandus.....	47
Lisa.....	58

1. Sissejuhatus

Maailmas on inimtekkeliste kasvuhoonegaaside (KHG) heitkogused ilma põllumajanduse, metsanduse ja muu maakasutusega (AFOLU) umbes 40 Gt CO₂-e aastas (IPCC, 2019). Valitsustevahelise Kliimamuutuste paneeli kliimamuutusi ja maad käsitlevas eriaruande (IPCC, 2019) kohaselt moodustasid AFOLU aastased kasvuhoonegaaside emissioonid umbes 23% inimkonna tekitatud kasvuhoonegaaside kogusest (keskmiselt ca 12 Gt CO₂-e aastas, aastatel 2008 kuni 2017). Kokku teeb see 52 Gt CO₂-e aastas. AFOLU sektor annab umbes 50% inimtegevusest põhjustatud metaani ning kolmveerandi kogu dilämmastikoksiidi emissioonidest.

AFOLU sektor seob samuti süsinikdioksiidi (ehk teisisõnu on süsiniku neeldaja), peamiselt fotosünteesi teel. Aastatel 2008–2017 oli keskmine globaalne maakasutusega seotud CO₂ neeldumine $11,2 \pm 2,6$ Gt aastas (29% kogu CO₂ emissioonidest). Kui sellele juurde arvestada maaga seotud CO₂ emissioonid, on neto tulemuseks $6,2 \pm 3,7$ Gt eemaldatud CO₂ aastas (IPCC, 2019). See arv, koos süsinikdioksiidi eemaldamisega (*Carbon Dioxide Removal* - CDR) põhinevate stsenaariumidega IPCC eriraportist, mis käsitles globaalset soojenemist 1,5 °C võrra (IPCC, 2018), on kaasa toonud suuri ootusi maale ja metsale kui CO₂ neeldajale ja seega lahendusele kliimamuutuste probleemile.

Eesti on väike Põhja-Euroopa riik, kus 2017. aastal elas 1,315 miljonit inimest (Statistikaamet, 2018). 2017. aastal oli Eesti kasvuhoonegaaside koguheid CO₂ ekvivalendina (CO₂-e) mõõdetuna 19 087,1 kt ($14,5$ t inimese kohta) ja ilma maakasutuse, maakasutuse muutuse ja metsandusega (LULUCF) 20 879,9 kt ($15,9$ t inimese kohta) (NIR, 2019). See on umbes 0,05% maailma kasvuhoonegaaside koguheitest. LULUCF sektoril on olnud roll Eesti riigi aastaste kasvuhoonegaaside koguheitte vähendamisel (2017. aastal seoti 1 792,7 kt, mis on võrdeline 8.6% koguemissioonidega ilma LULUCF-ita). Raadamisega seotud KHG emissioonid olid 244,9 kt CO₂-e (ajal vähenev trend) ning metsastamise ja taasmetsastamine sidus 179,7 kt CO₂-e (ajal suurenev trend) (NIR, 2019).

Ligikaudu pool (51,4%) Eesti maismaast on kaetud metsaga (SMI, 2018). Eesti metsas oli 2015. aastal ladustatud hinnanguliselt 1 903 miljonit tonni süsinikdioksiidi (FAO, 2015b). Aastane süsinikdioksiidi sidumine Eesti metsa poolt on olnud arvestuslikult 1,6 kuni 4,5 miljoni tonni (ajaperioodil 1990 – 2017) ja 2017. aastal oli see 2 miljonit tonni ehk võrdeline 10,5% Eesti koguemissioonidega ilma LULUCF-ita.

Eestimaa suhteliselt suur kaetus metsaga ja selle võime kliimamuutuste leevendamisele kaasa aidata paneb ka Eestis lootusi metsale. Samas on oluline, et käsitletaks metsa erinevaid funktsioone tasakaalus ja nii, et mets muutuva kliima tingimustes ei kaotaks võimet neid funktsioone täita.

Töö lähteülesandeks oli:

1. Selgitada lihtsalt kogu metsa/metsamaa ja süsiniku sidumise ning fossiilsete kütuste asendaja rolli kliimamuutuste kontekstis.

2. Välja tuua metsa seosed kliimamuutuste poliitikaga.
3. Anda ülevaade IPCC viimastest kliimaraportitest ja Eesti panusest maailma kontekstis ning millised on Eesti jaoks lähtuvalt IPCC raportis toodule kõige mõistlikumad tegevused.
4. Anda ülevaade Eesti metsade hetkeolukoreast ja tuleviku metsade tagavarast ning juurdekasvust aastani 2100 (või nii kaugele kui võimalik) KAURi arvutuste põhjal.
5. Analüüsisa Eesti metsade majanduslikke ja ökoloogilisi raievanuseid. S.h. teha ettepanek soovituslike raievanuste kohta, nii et süsiniku sidumine (ja tagavara/ladestus) oleks optimaalne, arvestades kliimamuutustega kohanemise aspektidega.
6. Määratleda edasised töö vajadused.

Selles raportis antakse ülevaade teaduskirjandusest kliimamuutuste ja metsa seostest ning võrreldakse viit Eesti metsamajandamise stsenaariumit ja nende mõju metsade CO₂ sidumisele ning süsiniku talletamisele puittoodetes. Eesti metsade kasvuhoonegaaside emissioonide hindamiseks aastatel 2020 kuni 2120 kasutati riikliku metsainventuuri ja Eesti Keskkonnaagentuuri andmeid ning riikliku kasvuhoonegaaside inventuuri LULUCF meetodikat.

2. Metsad ja kliimamuutused

Kliimamuutused ja metsad on üksteisega tihedalt seotud:

- 1) Metsa produktiivsuse ja dünaamika peamised tegurid on õhutemperatuur, päikesekiirgus, sademed ja süsihappegaasi kontsentratsioon atmosfääris. Seetõttu mõjutavad kliimamuutused metsade kasvu (ka metsatulekahjude ja tormide, samuti kahjurite ja haiguste tagajärjel), elurikkust, metsade süsiniku sidumist ja ka seda, kuidas ja millal metsaraie toimub. Seda arvesse võttes peavad metsad kohanema muutuva kliimaga.
- 2) Metsad mõjutavad omakorda kliimat, eemaldades ja vabastades suures koguses atmosfääri süsinikdioksiidi, neelates (soojendav efekt) või peegeldades päikesekiirgust (*albedo* – jahutav efekt), jahutades aurustumise kaudu ja tekitades pilvi moodustavaid aerosoole (Arneeth jt, 2010; Pielke jt, 2011). Metsad pakuvad materjale, mis võivad asendada fossiilseid kütuseid ja fossiilsetel materjalidel põhinevaid ja/või suure süsiniku jalajäljega materjale ning aitavad süsinikku talletades kaasa inimtekkeliste kliimamuutuste leevendamisele.

Eesti metsad on hemiboreaalsed (Ahti *et al.*, 1968; vaata kaarti 7. peatükis). Hemiboreaalne tähendab, et nad asuvad parasvöötme ja subarktilise (või boreaalse tsooni) vahel. Hemiboreaalsel metsal on nii boreaalse metsa tunnuseid, kui ka lõunapoolse parasvöötme metsade omi. Kuigi enamik puid on okaspuud, leidub ka arvestatav kogus lehtpuid. Eestis jaguneb okaspuumetsade ja lehtpuumetsade osakaal ligikaudu pooleks. Levinumateks puuliikideks on kask (30,1%), mänd (28,8) ja kuusk (19,4), järgnevad hall lepp (9,9%), haab (6,4%) ja sanglepp (3,7%), ülejäänud puuliikide osakaal on oluliselt väiksem (1,6%).

Hoolimata selle eritunnustega kliimatsooni olemasolust, käsitletakse kliimamuutusi puudutavas (akadeemilises) kirjanduses Eestit mõnel juhul boreaalse kliimavööndi osana (näiteks IPCC, 2019) ja mõnikord parasvöötme osana (näiteks FAO, 2015b,c). Tõenäoliselt on see tingitud nii uurimisandmete vähesusest kui ka hemiborealse tsooni suhtelisest väiksusest võrreldes teiste põhiliste kliimatsoonidega. Sellise käsitluse tulemuseks on see, et uuringute järeldused ei pruugi Eesti kohta täpsed olla, näiteks võidakse Eesti metsa süsiniku talletamisvõimet kas üle või alla hinnata.

2.1. Kliimamuutuste mõju metsadele

Metsad seovad süsinikdioksiidi ja moodustavad sellest orgaanilist ainet. Samuti emiteerivad nad süsinikdioksiidi (ja ka teisi KHG) orgaanilise aine lagunemise ja metsa elustiku hingamise käigus.

Kliimamuutused aga võivad halvendada paljusid tingimusi ja seega ka suurendada süsinikdioksiidi eraldumist metsast. Näiteks põhjustavad soojemad öised temperatuurid intensiivsemat hingamist; kuumemad ja kuivemad tingimused metsatulekahjusid; samuti võivad temperatuuri tõusu ja niiskuse suurenedes suurenedes patogeenide levik ja sageneda kahjurite rünnakud ning need mõjud varieeruvad piirkonniti (IPCC, 2019a).

Loodusliku biomassi põlengutega seotud süsiniku emissioonid olid 1997-2006 aastatel keskmiselt 2,2 Gt (sellest veerand oli metsatulekahjustest ja 0.4 Gt seotud raadamisega) ning kliimamuutustega see number suureneb. See ja raadamise ning metsa degradeerumisega seotud KHG emissioonid omakorda võimendavad kliimamuutusi (ibid.).

Boreaalsetes metsades (IPCC SRCCL-s hõlmab see ka hemiboreaalset), kus prognoositavad kliimamuutused põhjustavad puuliikide liikumist põhjasuunas, toimub tugevam kohalik soojenemine kui on globaalne keskmine. Seda peamiselt seetõttu, et väheneb pinnaalbeedo ja lumekate talvisel ajal. Samas on soojenemine vähenenud kasvuperioodil suurema evapotranspiratsiooni ehk koguaurumise (nii maapinnalt kui taimedest) tõttu (IPCC, 2019a). Raadamine aga vähendab evapotranspiratsiooni ja seega suurendab soojenemist. Praeguseks ei ole veel piisavalt uuritud kuidas looduslikud häiringud metsasüsteemis kliimamuutusi mõjutavad (ibid.).

Suurenenud tulekahjude, kahjurite ja kuumusega seotud metsa suremine võib mõjutada eriti boreaalsete metsade lõunapiiri, sh Eestit (Gauthier jt, 2015; IPCC, 2019a). Prognooside kohaselt need mõjud suurenevad koos ülemaailmse keskmise temperatuuri tõusuga ehk 2°C soojenemisel on tagajärjed halvemad kui 1,5°C soojenemise korral (IPCC, 2018).

Anderegg jt. (2015) näitasid, et ökosüsteemi üldine hingamine on globaalses mastaabis suurenenud vastusena öise temperatuuri tõusule. Eeldatakse, et see suureneb temperatuuride tõustes veelgi ja see võib põhjustada primaarse netproduktiooni vähenemist (Huntingford jt., 2017). Ökosüsteemi koguhingamise suurenemine kevadel ja sügisel, mis on seotud kõrgemate temperatuuridega, võib muuta boreaalsed metsad süsiniku neeldajatest süsinikuallikateks (Hadden ja Grelle, 2016). Ka boreaalsetes turbarabades võib

kõrgem temperatuur vähendada süsiniku ladustamist ja kahjustada turba stabiilsust (Dieleman jt., 2016).

Mulla süsiniku talletatavus on eeldatavalt suurem, kui globaalset soojenemist piiratakse 1,5°C -ni võrreldes 2°C muutusega. Samas peab arvestama, et kliimamuutuste ebakindlate ja vastuoluliste mõjude tõttu on raske kindlaks teha, kui palju täpselt mulla süsiniku sisaldus muutub (IPCC, 2018).

Suurenenud süsinikdioksiidi nn väetav mõju, mis soodustab taimede kasvu ja seeläbi aitab mõningal määral korvata kliimamuutuste negatiivsed mõjusid (IPCC, 2018 ja 2019a). Büntgen jt. (2019) leidsid, et seni kuni Maa kliima jätkab soojenemist, kiireneb puude kasv veelgi (suureneb süsiniku sidumine), samas kui süsiniku puudes talletamise aeg, nn süsiniku viibeaeg, väheneb, kuna puud surevad nooremana.

Arvatakse, et on olemas ka nn murdepunkt (*tipping point*), kus soojem temperatuur, tulekahjud või kahjurite ja haiguste puhangud põhjustavad laiaulatuslikku puude hukkumist. See loob metsades avatud alasid, mis võivad suurendada piirkondliku soojenemist ja tulekahjude kasvu (Lenton jt, 2008, Lenton , 2012). Arvatakse, et see juhtub umbes 3°C või 4°C soojenemisel, kuid sellega seotud mehhanismide keerukuse tõttu on raske täpset öelda, millal.

Praegu biomassi ja pinnase ülemaailmsed süsinikuvarud maapealsetes ökosüsteemides suurenevad, kuid see trend on tundlik tormide, looduslike tulekahjude, pinnase degradeerumise ja kahjurite puhangute prognoositava suurenemise tõttu ning atmosfääri eralduva süsiniku kogused võivad tulevikus muutuda (Settele jt, 2014; Seidl jt, 2017). Näiteks Kanada majandatavate metsade biomass suurenes aastatel 1998–2008 vaid pisut, sest tulekahjude ja mardikate puhangute põhjustatud biomassi märkimisväärne kaotus tasakaalustas juurdekasvu (Stinson jt, 2011). Lämmastiku, fosfori ja muude toitainete kättesaadavus võivad ka piirata suurenenud CO₂ ja muutunud kliimaga metsa positiivset mõju süsinikuringele (Goll jt, 2012; Yang jt, 2014; Wieder jt, 2015; Zaehle jt, 2015). Näiteks Ellsworth jt. (2017) leidsid, et CO₂ suurenemise korral toitainetes fosforisisalduse piiramine piiras ka eukalüptipuude kasvu võrreldes sellega kui fosfor polnud piiratud.

Kõike ülaltoodut silmas pidades peaks metsa majandamine arvestama kliimamuutuste mõjudega metsale ning aitama metsal vastu pidada ja kohaneda juba toimivate ja ka esseisvate muutustega.

2.2. Metsade roll kohanemisel

Metsal ja puudel on ka roll ka teiste liikide, sh inimese, kohanemisel kliimamuutustega (IPCC, 2019). Puud ja mets aitavad reguleerida kohalikku kliimat, näiteks pakuvad varju ja aitavad nii toime tulla soojema kliimaga. Sarnane on puude, eriti kliimamuutustele vastupidavate laialehiste liikide, roll linnades nii tänavate äärtes kui parkides. Mets aitab kliimamuutustega kohaneda ka ökosüsteemi teenuste kaudu. Näiteks kliimamuutuste, aga ka muude mõjurite

tõttu degradeerunud maa taasmetsastamine aitab mullakvaliteeti ja liigirikkust parandada. Metsad aitavad reguleerida veeringlust ja kaitsevad muldi erosiooni eest. Kaldaäärsed metsad (sh mangroovid) kaitsevad tormide ja lainete eest. Mets pakub süüa kui põldudel on näiteks kliimamuutuste põhjustatud põuast ikaldus.

2.3. Metsade roll kliimamuutuste leevendamisel

Metsad neelavad atmosfäärist süsinikku fotosünteesi teel, et sünteesida orgaanilisi ühendeid. Seda süsinikku talletatakse puudes (puutüvedes, juurtes, oksades ja lehtedes). Metsad talletavad süsinikku ka metsamuldades ja alustaimestik. Süsinikku eraldub langenud lehtede ja okste lagunemisel ja juurte kaudu (Brack, 2019). Maailma majandatavad metsad talletavad hinnanguliselt 296 Gt (ligikaudu 74 tonni hektari kohta) süsinikku nii maapealses kui ka maa-aluses biomassis, mis on peaaegu pool kogu metsades säilitatavast süsinikust (FAO, 2015c). Umbes 44% metsa süsinikust säilitatakse elusas biomassis, 5% surnud puidus, 6% langenud lehtedes ja 45% pinnases. 2011. aasta oli maailma metsades kokku talletatud umbes 861 Gt süsinikku (Pan *jt*, 2011). Troopilistes metsades on hektari kohta talletatud umbes 242 tonni süsinikku. Boreaalsed metsad talletavad umbes 239 tonni süsinikku hektari kohta, parasvöötme metsad 155 tonni hektari kohta (ibid.). Troopilistes metsades on 56% süsinikku talletatud biomassis ja 32% mullas, boreaalsetes metsades aga 20% biomassis and 60% mullas (ibid.).

Aastatel 2011–2015 sidusid ja talletasid metsad täiendavalt umbes 2.1 Gt CO₂ aastas, kui mitte arvestada raadamisest tulenevad heitkogused. Pool metsa süsiniku sidumisest toimub kasvavates istutatud metsades (FAO, 2015a). Mets sisaldab rohkem süsinikku biomassis ja mullas kui põllumaa. Seega (söötis) põllumaa metsastamisel on positiivne efekt süsinikku sidumisele ja talletamisele (IPCC, 2019a).

Erinevalt kolmest peamisest tüübist pole hemiboreaalsete metsade süsinikuvarude kohta palju analüüse. 2018. aasta uuringus (Kõniņa *jt*, 2018) moodeti Läti hemiboreaalsetes üleküpsetes puistutes (167–213 aastat vanad) hariliku kuuse (*Picea abies*) süsinikuvaru. Süsinikuvaru varieerus vahemikus 165 kuni 387 tonni süsinikku hektari kohta, keskmiselt 238,5 tonni, ilma et metsade kasvukohatüüpide vahel oleks olnud olulisi erinevusi. Selle uuringu keskmine näitaja on lähedane boreaalsete metsatüüpide keskmisele.

Metsade süsiniku sidumise võime suureneb alguses noore metsa kasvamisega ja pärast metsa küpsuse saavutamist hakkab see vähenema ning mingi aja pärast tekib metsa kui süsiniku neeldaja küllastumie (*sink saturation*) ja võimalik, et ka vabanemine (IPCC, 2019a; Luysaert *jt*, 2008). See aga, millal süsiniku sidumise võime vähenema hakkab ja millal mets kui neeldaja küllastub sõltub mh metsa tüübist, liigilisest (sh ka puuliigile omasest maksimaalsest elueast) ja vanuselisest kooslusest, tihedusest, majandamisest, võimalikest looduslikest häiringutest ning kasvukohast (Luysaert *jt*, 2008). Süsiniku talletamise ülempiiriks raporteerisid nad 500 – 700 tonni (1400 – 1800 m³ puitu) hektari kohta Vaikse Ookeani äärsetes metsades Ameerika Ühendriikide loode osas ja vaatluse all olid kuni 800 aastased metsad. Majandamata metsa

(15% metsadest) ei arvestata ülemaailmses süsiniku arvestuses ja selle üheks põhjuseks on toodud, et nendes metsades juba tekkinud tasakaal süsiniku sidumise ja vabanemise vahel. Luyssaert et al., (2008) arvutused, aga näitasid, et nendes metsades toimub süsiniku sidumine $1,3 \pm 0,5$ Gt aastas ja seega oleks soovitatav seda arvestada. Eestis on LULUCF arvestusse kaasatud kogu metsamaa (sh range kaitsega mets).

Stephenson jt. (2014) modelleerisid üksikute troopiliste ja parasvöötme puude (mitte metsa) kasvu ja süsiniku sidumist ning leidsid enamikel liikidel puude suurenedes nende biomass suurenes hoolimata vähenenud netproduktiivsusest ja see oli seotud lehestiku pindala suurenemisega ning puude tiheduse vähenemisega. Köhl jt. (2017) uurisid vanade (kuni 255 aastaste) troopiliste puude (kolm liiki) süsiniku sidumist ja leidsid et nende puude eluea lõpus (viimse veerandiku jooksul) toimus märgatav süsiniku sidumine (30% - 50% kogu seotud ja talletatud süsinikust). Puude kasv ei olnud piiratud toitainete kättesaadavuse poolt.

Gough et al., (2019) uurisid parasvöötme metsade katsekohtades ökosüsteemi primaatset netproduksiooni (NPP) ja seega süsiniku sidumist kui kasvu piiravaks teguriks on valgus. Nad leidsid, et struktuurselt mitmekesisemates metsades oli NPP suurem kui suurema liigilise koosseisuga metsades. Gough et al., (2019) ei võrdle struktuurselt mitmekesisemad parasvöötme metsi aeglase (enamasti vanad) või kiire fotosünteesiga (nt noorendikud) metsadega. Küll aga soovivad artikli autorid, et parasvöötmes tuleks propageerida metsa istutamisel ja majandamisel metsa looduslikku struktuuret mitmekesisust ja ka seda säilitada.

2.4. Mets kütuse allikana

Bioenergia viitab energiale, mis on saadud mis tahes vormis biomassist või selle metaboolsetest kõrvalsaadustest (IPCC, 2018). Praegu annab see umbes 9% ülemaailmsest primaarenergiast, millest poole moodustab biomassi kasutamine toidu valmistamisel ja kuumutamisel arengumaades, kas siis lahtisel tulel või pliidil (IEA, 2017).

Hinnates erinevaid stsenaariume globaalse soojenemise piiramiseks $1,5^{\circ}\text{C}$ või 2°C -ni võrreldes praeguste kliimapoliitika lubaduste või olemasolevate trendide jätkumisega (BAU), kasutavad teadlased integreeritud hindamismudeleid (IAM). IAM-id ühendavad mitmesuguste erialade teadmisi. Bioenergiat on kasutatud IPCC $1,5^{\circ}\text{C}$ raportis viidatud IAM-de energiasektori erinevates osades, sealhulgas elektrienergia, vedelkütuse, biogaasi ja vesiniku tootmiseks (IPCC, 2018). Bioenergia paindlikkus, mis lubab vesiniku, biokütuste ja biogaasi tootmist energia saamiseks koos süsiniku kogumise ja säilitamisega (BECCS), on süsiniku vabale energiakasutusele üleminekuks väga atraktiivne (nt Klein jt, 2014; Bauer jt, 2018). Eestis CO_2 maa alla ladustamiseks sobivaid kohti teadaolevalt ei ole (Simmer, 2018).

Enamike IAM-ide puhul eeldatakse, et bioenergia on saadud teise põlvkonna biomassi lähteainetest, näiteks kiirekasvulistest energiataimedest nagu hõberohi (*Miscanthus*) või

pappel, aga ka põllumajanduse - ja metsatööstuse jääkidest. Mudelites eelistatakse tavaliselt juhul, kui bioenergia on tugevalt piiratud, BECCSi tehnoloogiaid, millel on kõrge CO₂ kogumismäär. Kui bioenergiat on küllaga, valivad IAMid madalama kogumise määraga biokütustehnoloogiad, mis on suurema potentsiaaliga fossiilkütuste asendamiseks transpordis (Kriegler jt, 2013; Bauer jt, 2018). Osa IAM-e võimaldavad modelleerida ka bioenergia tootmise potentsiaalseid keskkonnamõjusid nagu maakasutuse otstarbe muutmise kaudseid heitkoguseid ning bioenergia tootmiseks kasutatava lämmastiku ja vee kasutamist (nt Kraxner jt, 2013; Bodirsky jt, 2014; Bonsch jt, 2014; Obersteiner jt, 2016).

Muret tekitab asjaolu, et bioenergia tootmise mõju veekasutusele ja ökosüsteemidele võib põhjustada pinnase degradeerumist ja erosiooni. Uuringute kohaselt sõltuvad negatiivsed mõjud biomassi tüüpidest, asukohast ja kasutatavatest majandamisvõtetest (Frank jt, 2017; Wu jt, 2018). Biomassi tootmisel võib olla oma roll ka juba degradeerunud maade kasutamisel. Neid küsimusi ei ole täielikult integreeritud kliimamuutuste leevendamise stsenaariumitesse IPCC 1,5°C eriaruandes (IPCC, 2018).

Bioenergia elukaare (biomassi kasvatamisest/kogumisest kuni selle põletamiseni) süsiniku intensiivsus, mis on ülioluline bioenergia kui heitkoguste suhtes neutraalse energiavariandi ja BECCSi kui süsiniku eemaldamise meetme mõju arvutamisel, on endiselt arutlusküsimus (Buchholz jt, 2016; Liu 2018) ja on tundlik mitmetele tingimustele, näiteks tooraine kvaliteedile, ajale, piirkonnale jne.

Ümarpuidu kasutamise asemel tuleks energia tootmiseks eelistada puidutööstuse jääkide kasutamist, kuna puidujäägid lagunevad ka muidu looduses kiiresti ja vabastaksid süsinikdioksiidi (Searchinger jt., 2018). Aga ka siin tuleks arvestada puitmaterjali elukaare emissioonidega. Searchinger jt. (2018) hoiatavad, et Euroopa Liidu taastuvenergia eesmärkide täitmiseks oleks vaja energeetikas kasutada pool praegusest aastastest raiemahust ning see ei oleks jätkusuutlik.

Globaalsed stsenaariumid näevad ette kuni 7 miljoni km² viljaka maa vajadust bioenergiaks sobivate taimede, sealhulgas energiapuidu, kasvatamiseks. Sellise suuremahuline biomassi tootmine ohustab aga põllumajandussaaduste tootmist, liigilist mitmekesisust, võib vähendada mulla viljakust ja suurendada vee nappust. Kõik see omakorda suurendab jällegi kliimamuutusi (IPCC, 2019). Samuti hoiatatakse, et projekteeritud heitkoguste umbes 30%-ne vähendamise võimalikkus maakasutusel põhinevate meetmetega on suuresti kohalikest oludest sõltuv ja modelleeritud tuleviku stsenaariumites selliste meetmete ulatuslik rakendamine võib olla eksitav (Roe jt., 2019).

Bioenergia tootmise võimalused ja nende mõjud erinevad regiooniti, aga üldiselt ei ole soovitatav suuremahuline ja monokultuurne biomassi tootmine. Bioenergiaks soovitatakse kasutada kohalikke puidu- ja põllumajandustootmise jääke samuti harvendus ja hooldusraietest tekkinud väheväärtuslikku puitmaterjali. Toitumisharjumuste (vähem liha ja toidu raiskamist) muutumisel vabanenud või muidu söötis põllumaad võiks kasutada biomassi tootmiseks. Väikesemahulisel ja jätkusuutlikult toodetud biomassil on positiivsed mõjud keskkonnale (IPCC, 2019a).

Biomassi põletamisel on süsiniku emissioonid arvestuslikult nullis, kuna neid on juba arvestatud maakasutuse muutusest tekkivate emissioonide hulgas ja nii välditakse topeltarvestust.

2.5. IPCC eriaruanded 1,5°C soojenemise kohta ning kliimamuutustest ja maast

Inimtegevus on tõstnud globaalset temperatuuri keskmiselt umbes 1,0°C üle industriaalajastu eelse taseme (IPCC, 2018). Kui soojenemine jätkub praeguse kiirusega, saavutatakse vahemikus 2030 kuni 2052 1,5°C keskmise globaalse temperatuuri tõus. Suuremat soojenemist on eriti täheldatud Arktika piirkonnas, kus temperatuur on tõusnud kaks kuni kolm korda üle keskmise. Keskmise globaalne temperatuur on maismaa kohal tõusnud kiiremini kui maa ja ookeani keskmine globaalne temperatuur koos (0,87°C) ning on jõudnud umbes 1,5°C tõusuni võrreldes tööstusrevolutsioonile eelnenud ajaga (IPCC, 2019).

IPCC (2018) märgitab, et kasvuhoonegaaside aastased heitkogused (CO₂-ks ümber arvutatuna) olid 2016. aastal umbes 52 GtCO₂-e ja prognooside kohaselt tõusevad need 2030. aastaks vahemikku 52–58 GtCO₂-e. Selleks, et soojenemine piirduks 1,5°C-ga, tuleb heitkogused vähendada poole võrra 2030. aastaks (umbes 25–30 GtCO₂-e aastas). Ehkki tehniliselt on võimalik soojenemist piirata 1,5 °C-ni, nõuab see olulisi muudatusi poliitikas ja käitumises. Teisisõnu, kui kasvuhoonegaaside heitkogused täna täielikult peatuvad, ei ületa me tõenäoliselt 1,5°C soojenemist, kuid tegelikkuses nõuab see viivitamatuid muudatusi transpordisüsteemides, energiatootmises, küttesüsteemides ja tööstuses.

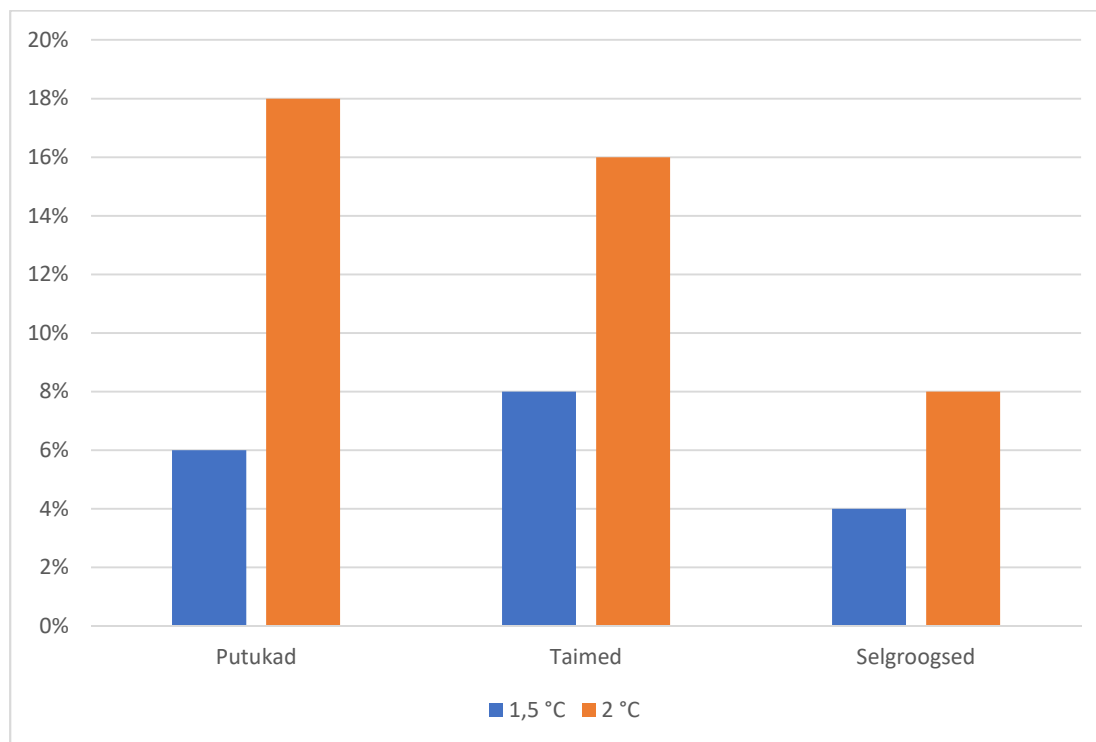
Kliimamudelid näitavad suuri erinevusi tänapäeva ja 1,5°C soojenemise ning 1,5°C ja 2,0°C soojenemise vahel (IPCC, 2018). Erinevused hõlmavad ekstreemseid temperatuure enamikus asustatud piirkondades, paljudes piirkondades tugevat vihmaseadu ja mõnes piirkonnas põuda. Globaalse keskmise temperatuuri soojenemisel 1,5°C ja 2°C suureneb keskmistel laiuskraadidel temperatuur vastavalt umbes 3,0°C ja 4 °C (ibid.).

Kui soojenemist piirata 1,5°C-ni, tõuseb 2100. aastaks ülemaailmne keskmine meretase vahemikus 0,26 meetrit kuni 0,77 meetrit ning veelgi enam, kui soojenemine jõuab 2°C-ni (IPCC, 2018). 2050. aastaks elab madalatel rannikualadel umbes miljard inimest, kelle elu ja igapäevaseid tegevusi merepinna tõus otseselt ohustab, lisaks teedele ja sadamatele tekkivatele kahjustustele (IPCC, 2019b). Umbes 10 miljonit vähem inimest puutuks kõrge merepinna seotud ohtudega kokku, kui soojenemist piiratakse temperatuurini 1,5°C-ni võrreldes 2°C-ga (IPCC, 2018). Nii Gröönimaa kui ka Antarktika jääkihtides võib esineda ebastabiilsusi, mis võivad põhjustada mitmemeetrise merepinna tõusu saja kuni tuhande aasta jooksul. On kindel, et need ebastabiilsused võivad ilmnedu globaalse soojenemisega vahemikus 1,5°C ja 2°C (IPCC, 2019b).

Ookean on neelanud umbes 30% süsinikdioksiidi heitkogustest, põhjustades ookeani hapestumist ja muutusi karbonaatkeemias, mis on vähemalt viimase 65 miljoni aasta jooksul

enneolematud. On palju tõendeid selle kohta, et 1,5°C globaalsest soojenemisest põhjustatud ookeani soojenemine ja hapestumine mõjutaks paljusid mereorganisme ja ökosüsteeme, aga ka selliseid majandussektoreid nagu vesiviljelus ja kalandus (IPCC, 2018; IPCC, 2019b).

Kliimamuutused alates tööstusrevolutsioonist on mõjutanud organisme ja ökosüsteeme, aga ka inimeste süsteeme ja heaolu (IPCC, 2018; Warren jt. 2018). Eeldatakse, et need mõjud jätkuvad ja põhjustavad liikide edasist kadu (joonis 1).



Joonis 1. Prognositav globaalne liikide hulk, kes kaotavad üle poole oma esialgsest geograafilisest levikualast ülemaailmse soojenemise (1,5°C ja 2°C) tagajärjel 2100. aastaks. Allikas: IPCC, 2018.

Kõrge laiuskraadiga tundra ja boreaalsed metsad on eriti tundlikud kliimamuutuse suhtes ning igikeltsa sulatamine kujutab endast olulist ohtu (IPCC, 2018; IPCC, 2019a). Kliima soojenemise piiramine 1,5°C-ni hoiab ära 1,5–2,5 miljoni ruutkilomeetri igikeltsa sulamise võrreldes 2°C soojenemisega 2100. aastaks (IPCC, 2018). Metaani eraldumine igikeltsa sulamise tagajärjel jätkub veel sajandite jooksul peale temperatuuri tõusu stabiliseerimist (IPCC, 2018; IPCC, 2019a).

Stsenaariumitel, mis kohe limiteerivad soojenemise 1,5°C-le¹⁰ on väga erinevad mõjud võrreldes nendega, mis pärast märkimisväärset selle temperatuuri ületamist sajandi keskel naasevad taas 1,5°C-ni 2100-ks aastaks. Viimasel juhul on kliimamuutuste mõjudest veel väga vähe teada. Soojenemise piiramine 1,5°C-ni tähendaks, et süsinikuneutraalsus saavutatakse maailmas umbes 2050. aastaks, teiste sõnadega eemaldatakse õhust sama palju

¹⁰ 1.5°C stsenaariumid on defineeritud kui need mis 1/2 või 2/3 toenaosusega hoivad temperatuuri tõusu alla 1.5°C või siis kus temperatuur pöördub tagasi 1.5°C 2100-ks kui see eesmärk on vahepeal ületatud.

kasvuhoonegaase kui sinna juurde pannakse. Mida kauem võtab aega süsinikdioksiidi heitkoguste nulli viimine, seda suurem on 1,5°C soojenemise ületamise oht ja alates 2050. aastast on seda suurem vajadus tehnoloogiate järele, mis õhust kasvuhoonegaase eemaldavad (IPCC, 2018).

Kasvuhoonegaaside heitkoguste oluline vähendamine aastaks 2030 suurendaks oluliselt 1,5°C eesmärgi saavutamise võimalust. Selle eesmärgi saavutamine eeldaks ka põllumajanduses teiste kasvuhoonegaaside (lisaks CO₂-le), näiteks metaani, heitkoguste olulist vähendamist (IPCC, 2018).

Pariisi leppe praegused lubadused (riiklikult määratud panused - NDC) ei ole piisavad globaalse soojenemise piiramiseks 1,5°C-ni võrreldes tööstusrevolutsioonile eelnenud perioodiga. Eesmärgi saavutamiseks vajalikud poliitikad peaksid sisaldama süsiniku hinnakujundust, olulist muutust investeerimisharjumustes, aga ka süsinikdioksiidi eemaldamise (*Carbon Dioxide Removal* - CDR) meetmeid, sh süsiniku sidumise suurendamist maismaasüsteemides (näiteks taimedes ja mullas). CDR-i meetmeid on vaja selleks, et kui 1,5°C soojenemine ületatakse, siis vähendada soojenemist tagasi temperatuurini 1,5°C 2100. aastaks (IPCC, 2018).

Muutused globaalses ja regionaalses maakasutuses leiavad aset kõikides stsenaariumites, mille korral saavutatakse ilma ületamiseta või väga vähese ületamisega temperatuuri piiramine 1,5°C-ni. Need sisaldavad järgmistes maakasutuse muutusi (aastaks 2050 võrrelduna aastaga 2010):

- 1) põllumaa toidukultuuride ja söödakultuuride kasvatamine (va karjamaad) vähendamine neljalt miljonilt km²-lt 2,5 miljoni km²-ni;
- 2) karjamaa vähendamine vahemikus 0,5–11 miljonit km²;
- 3) energiakultuuride aluse maa kasv 0–6 miljonit km²;
- 4) metsade pindala suurenemine 9,5 miljonit km² võrreldes praeguse 2 miljonilise kahanemisega (IPCC, 2018).

Kõigil IPCC (2018) jaoks analüüsitud stsenaariumites (temperatuuri eesmärgi ületamisega või ilma) kasutatakse CDR-i heitkoguste neutraliseerimiseks, aga konkreetsed meetmeid pole mudelites määratletud. Enamus juhtudel kasutatakse CDR-i ka negatiivse koguheitte saavutamiseks ehk süsinikdioksiidi eemaldamiseks õhust. Mõned stsenaariumid sõltuvad bioenergiast koos süsinikdioksiidi kogumise ja ladustamisega (BECCS), mõned tuginevad rohkem metsastamisele ja taasmetsastamisele. Need on kaks CDR-meetodit, mis on kõige sagedamini esindatud mudelites. Kuna biomass seob kasvu ajal süsinikdioksiidi, on selle protsessi eesmärk negatiivsete heitmete saavutamine. Suuremahuline CDR-i kasutuselevõtu võimalikkus ei ole teaduslikult tõestatud ning, tänu suurenenud nõudlusele energia, maa, vee ja investeeringute järele, võib see muid jätkusuutlikkuse eesmärgi kompromiteerida. Süsinikuringe ja kliimasüsteemi mõistmine on endiselt piiratud negatiivsete netoheidete tõhususe osas temperatuuride vähendamisel pärast nende esialgset ületamist (IPCC, 2018).

Integreeritud hindamismudelitega ei ole veel piisava põhjalikkusega uuritud ökosüsteemide säilitamise, taastamise ja majandamise (nn looduspõhiste kliimamuutuste lahendused)

võimalusi süsinikdioksiidi eemaldamiseks atmosfäärist. Majandamisvõtetal võib aga olla oluline positiivne mõju ökosüsteemide süsinikuvarudele ning see ei vaja enamasti tehnilisi lahendusi, nagu näiteks süsiniku kogumist. Looduspõhiste kliimamuutuste lahenduste kasutamisel võib olla keskkonna alaseid ja sotsiaalseid positiivseid kaasmõjusid, näiteks vee filtreerimine ja üleujutuse puhverdamine, elurikkuse ja mulla tervisel säilitamine, ja parem vastupanuvõime kliimamuutustele (Griscom jt., 2017).

Globaalse soojenemise piiramine 1,5°C-ni vähendaks tugevate sademete hulga suurenemise riski globaalses mastaabis ja mitmetes piirkondades, võrreldes 2°C globaalse soojenemisega. Piirkonnad, kus tugevate sademete hulk globaalse keskmise temperatuuri 1,5°C kuni 2°C soojenemisel suureneb kõige rohkem, hõlmavad mitmeid piirkondi kõrgetel laiuskraadidel, näiteks nagu Alaska, Kanada lääneosa, Kanada idaosa, Gröönimaa, Island, Põhja-Euroopa (sealhulgas Eesti) ja Põhja-Aasia (IPCC, 2018).

2.5.1. Mõju Põhja-Euroopale

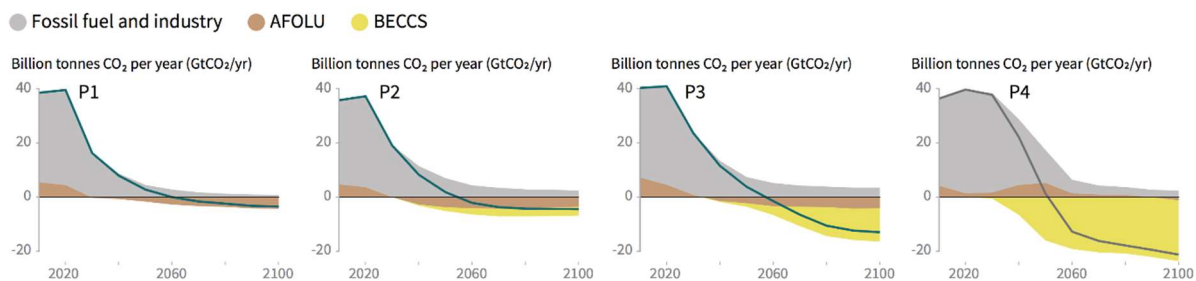
Vaadates konkreetselt Euroopat, on hiljutised uuringud (Vautard jt, 2014; Jacob ja Solman, 2017; Kjellström jt, 2018) näidanud, et 2°C globaalne keskmine soojenemine on seotud keskmise sademete hulga tõusuga talvel Kesk- ja Põhja-Euroopa kohal ja suvel Põhja-Euroopa kohal ning keskmise sademete hulga langusega suvel Kesk- ja Lõuna-Euroopa kohal. Sademete muutusi (kuni 20%), on prognoositud 2°C stsenaariumi korral (Vautard jt, 2014) ja on üldiselt rohkem väljendunud kui 1,5°C globaalse soojenemise korral (Jacob ja Solman, 2017; Kjellström jt, 2018). Boreaalses vööndis esineb praeguseks juba ka suuremaid ja sagedasemaid tulekahjusid ning soojemas kliimas võivad need veelgi sagedasemaks muutuda (IPCC, 2019a).

2.6. Süsinikdioksiidi eemaldamine (CDR)

CDR on metsasüsteemide jaoks eriti oluline. CDR-meetmete hulka kuuluvad muu hulgas metsastamine, taasmetsastamine, maa taastamine ja mulla süsiniku sidumine ning bioenergia koos süsiniku kogumise ja säilitamisega (BECCS), mis erinevad muu hulgas valmisoleku, kulude, riskide, kaashüvede ja vastasmõjude osas (IPCC, 2018). Väga vähesed stsenaariumid, mida hinnati IPCC (2018), hõlmavad teisi CDR-meetmeid peale metsastamise ja taasmetsastamise ning BECCS-i. CDR-i kasutatakse mudelites raskesti leevendavate tegevuste jääkheitmete neutraliseerimiseks ja negatiivsete netoheidete saavutamiseks.

Bioenergia koos süsiniku kogumise ja säilitamisega (BECCS) tähendab, et biomassi põletatakse energia tootmiseks ning süsinikdioksiidi heitkogused kogutakse ja säilitatakse geoloogilistes formatsioonides, eemaldades süsinikdioksiidi atmosfäärist tähtajatult. Kuna biomass neelab kasvu ajal süsinikdioksiidi, on selle protsessi eesmärk negatiivsete heitkoguste või CDR-i saavutamine, kuna ülemaailmsesse süsinikuringe ei lisata täiendavat süsinikdioksiidi, vaid seda eemaldatakse sealt. Kõik IPCC (2018) stsenaariumid, mis piiravad soojenemist 1,5°C-ni koos temperatuuri vähese ületamise või ületamiseta, eeldavad CDR kasutamist 21. sajandi jooksul 100-1000 Gt CO₂ (joonis 2).

CDR-i kasutamisel mitmesaja Gt süsinikdioksiidi eemaldamiseks kehtivad mitmed teostatavuse ja jätkusuutlikkuse piirangud ning selle tõhusust piirab paljudel juhtudel teaduse praegune arusaam süsiniku ringest ja selle koosmõjust metsadega (IPCC, 2018).



Joonis 2. IPCC 1,5 kraadi eriraporti stsenaariumid, mis limiteerivad globaalse soojenemise 1,5 °C-ni koos metsa ja BECCS-iga seotud süsinikdioksiidi neelamisega

(P1: Stsenaarium, mille sotsiaalsete, äri- ja tehnoloogiliste uuenduste tulemusel väheneb energianõudlus kuni 2050. aastani, samal ajal kui elatustase tõuseb, eriti globaalses lõunas. Vähendatud energiasüsteem võimaldab energiavarustuses kiiresti dekarboniseerida. Metsastamine on ainus kasutatud CDR-variant; ei kasutata fossiilseid kütuseid koos CCS-ga ega BECCS-i. P2: Stsenaarium, mille keskmes on jätkusuutlikkus, sealhulgas energiatõhusus, inimareng, riikide majanduskasvu lähenemine ja rahvusvaheline koostöö, aga ka üleminek jätkusuutlike ja tervislike tarbimisharjumuste, vähese süsinikdioksiidiheitega tehnoloogiainnovatsiooni ja hästi hallatavate maasüsteemide poole, millel on BECCSi jaoks piiratud ühiskondlik vastuvõetavus. P3: Kesktsee stsenaarium, milles nii ühiskondlik kui ka tehnoloogia areng järgivad ajaloolisi mustreid. Heitkoguste vähendamine saavutatakse peamiselt energia ja toodete tootmisviisi muutmisega ning vähemal määral nõudluse vähendamisega. P4: Ressursi- ja energiamahukas stsenaarium, milles majanduskasv ja globaliseerumine põhjustavad kasvuhoonegaaside mahuka eluviiside laialdast kasutuselevõttu, sealhulgas suurt nõudlust transpordikütuste ja loomakasvatussaaduste järele. Heitkoguste vähendamine saavutatakse peamiselt tehnoloogiliste vahendite abil, kasutades BECCSi kasutuselevõtmise kaudu CDR-i võimalusi tugevalt ära.) Allikas: IPCC, 2018.

BECCSi võimaliku kasutamise hinnangud on optimistlikud, kuna selle maksimaalne modelleeritud kasutus 2050. aastal ületab BECCSi potentsiaali kuni 5 Gt CO₂ võrra aastas (Fuss jt, 2018; Fuss jt, 2014), mille kasutamist omakorda piirab mure globaalse jätkusuutlikkuse pärast (Boysen jt., 2017; Heck jt, 2018; Henry jt, 2018).

AFOLU meetmete aastaseks emissioonide vähendamise potentsiaaliks on kuni 11 Gt CO₂ aastaks 2050. See on jällegi suhteliselt optimistlik number võrreldes metsastamisega seotud emissioonide sidumisega, mis mõnede uuringute hinnangul on selle sajandi keskpaigaks ainult kuni 3,6 Gt CO₂ aastas (Fuss jt, 2018). AFOLU meetmete tõhusus sõltub nende rakendamise asukohast ja seal olevatest tingimustest ning selle hindamiseks ja mõjude määramiseks on vaja rohkem uuringuid. Kõigil CDR-i meetmetel võib ulatusliku kasutamise korral olla oluline mõju maale, energiale, veele ja toitainetele. Bioenergia ja metsastamine konkureerivad muude maakasutustega ning võivad mõjutada elurikkust ja muid ökosüsteemifunktsioone ja -teenuseid, samuti põllumajandust ja toidusüsteeme. Nende mõjude piiramiseks ja süsiniku eemaldamise püsivuse tagamiseks on vaja tõhusaid juhtimissüsteeme. Mitmete CDR-meetmete koos kasutamine võimaldab nende negatiivseid mõjusid piirata, võrreldes ühe või kahe meetme laiaulatusliku kasutamise (IPCC, 2018; IPCC, 2019a).

Mõned stsenaariumid väldivad BECCSi kasutamist ja tuginevad suuremal määral nõudlusepoolsetele meetmetele (nagu väiksem tarbimine) ning maa ja metsaga seotud CDR-ile. Kuna bioenergia, kui seda toodetakse ja hallatakse vastutustundlikult, võib asendada

fossiilseid kütuseid paljudes sektorites, siis võib see üldise heitkoguse vähendamisega kõrvaldada osa BECCSi vajadusest. Põllumajanduse ja metsasüsteemide muudatused leevenduseesmärkide saavutamiseks võivad mõjutada praegusi ökosüsteeme ja nende teenuseid ning potentsiaalselt ohustada toidu-, vee- ja elukeskkonna kindlust. Ehkki need mõjud võivad piirata maismaapõhiste leevendusvõimaluste sotsiaalset ja keskkonnaalast teostatavust, võib hoolika kavandamise ja rakendamisega suurendada nende meetmete vastuvõetavust ühiskonna poolt ja ka toetada jätkusuutliku arengu eesmärke.

Kuid BECCS on vastuoluline tehnoloogia, kuna see on suures osas katsetamata, ja nii võib see olla vajalikul tasemel mitte teostatav ning nõuda bioenergiakultuuride kasvatamiseks tohtul hulgal maad (võrdub Austraalia pindalaga) (Evans, 2018). Seda sõltuvust uurisid Vaughan ja Gough (2016), kus BECCSi käsitleti koos kasvava elanikkonna toidutootmise ja energiavarustuse probleemide ning nendega kaasneva keskkonnamõju kontekstis. Järeldati, et integreeritud hindamise mudelite stsenaariumid on oma eeldustes ebarealsed. Eelkõige osutavad nad bioenergia kasutuselevõtu suurele ulatusele, mis füüsiliselt on võimalik. Ebarealistlikuks peetakse aga piisavate ühiskondlike tugistruktuuride (nt ühtsed poliitilised raamistikud ja ühiskondlik vastuvõetavus ning toetus) väljatöötamist, mida on vaja suurte CO₂ koguste kogumiseks ja säilitamiseks (ibid). BECCS kaasamine modelleerimisse oli nende sõnul peamiselt tingitud vajadusest täita Pariisi kokkuleppe ambitsioonid modelleeritud stsenaariumites, mitte aga selle tehnoloogia reaalse ja tõhusa kasutuselevõtu võimaluse peegeldus.

Riiklikult määratud panustest (NDC) puudub suures osas süsiniku kogumine ja säilitamine (Spencer jt, 2015) ning seda ei kajastata ka investeerimisprioriteetides (Fridahl 2017). Kuigi on olemas palju väikesemahulisi BECCSi demonstratsioone (Kemper, 2015) ja 1 Mt CO₂ aastast eemaldamiseks on olemas täismõõduline projekt Illinoises, on hetkel maailmas CO₂ ladustamise võime (umbes 40 Mt aastas) tunduvalt madalam kui see, mis on modelleeritud 1,5°C või 2°C-le viivates stsenaariumites (Global CCS Institute, 2018; Peters jt, 2017; IEA, 2016). BECCS-i maksumuse hinnangud on väga erinevad, ehkki enamik neist on alla 200 USA dollari süsiniku tonni kohta. Bioenergia ja biokütuste BECCSi infrastruktuuri keskmised investeeringukulud 2050. aastaks on hinnanguliselt vastavalt 138 ja 123 miljardit USA dollarit aastas (Smith jt, 2016). BECCS-i ja CCS-i eemaldamine modelleeritud stsenaariumitest tõstab aga märkimisväärselt modelleeritud kasvuhoonegaaside vähendamiseks vaja minevaid kulusid (Kriegler jt, 2013; Bauer jt, 2018).

Mõned CDR-i meetmed AFOLU-sektoris võivad kaasmõjudena parandada elurikkust, mulla kvaliteeti ja toiduga kindlustatust (ja nii aidata ka kaasa kliimamuutustega kohanemisele). Metsastamise märkimisväärne potentsiaal väheneb aga aja jooksul, kuna metsade võime süsinikku siduda väheneb metsa vananedes (IPCC, 2019a). Kohalikul tasandil on mulla süsiniku sidumise suurendamisel kasu põllumajandusele ja seda peetakse kulutasuvaks ka ilma kliimapoliitikata. Selle potentsiaalne teostatavus ja tasuvus globaalses mastaabis näib olevat rohkem piiratud (IPCC, 2019a).

2.7. Metsastamine ja taasmetsastamine

Metsastamist (*afforestation*) ja taasmetsastamist (*reforestation*) nähakse kui madalate kuludega strateegiat kliimamutuste leevendamiseks (IPCC, 2018; IPCC, 2019a). LULUCF arvestuses tähendab metsastamine metsa loomist või taastamist, kas istutamise või külvamise teel, maal, mis pole pikka aega metsamaa olnud (vähemalt 50 aastat Kyoto protokollis kontekstis), samas taasmetsastamine tähendab metsa taasloomist lühema perioodi jooksul pärast maaotstarbe muutmist. Metsa istutamist või külvamist pärast uuendusraiet loetakse metsa majandamiseks kuna maa jääb selle tegevuse käigus metsamaaks (IPCC, 2014). Metsastamise ja taasmetsastamise definitsioonid aga erinevad sõltuvalt organisatsioonist ja selle eesmärkidest¹¹.

Costa Rica metsakate on suurenenud enam kui poolele riigi maismaast võrreldes viiendikuga 1980. aastal. Selle tulemusel on riigi maakasutussektor liikunud 2,4 Mt CO₂-e eraldumisest 1990. aastal 3,5 Mt CO₂-e sidumiseni 2015. aastal (Sitra, 2017). Metsastamise ja taasmetsastamise kulud on muude CDR-variantidega võrreldes madalad, vahemikus 5–50 USD tonni CO₂-e kohta. Kuid metsastamisel ja taasmetsastamisel on BECCS-ist suurem maa ja vee kasutuse jalajälg, ehkki sellel on toitainetele kasulik mõju ja palju madalam energiakulu (Smith jt, 2016). Griscom jt. (2017) hinnang 2030. aastaks on, et metsauuendus suudaks maailmas siduda 2,7–17,9 GtCO₂ aastas ja omab märkimisväärset positiivset kaasmõju. Hinnangu suur vahemik tuleneb olemasolevatest hinnangutest võimaliku taasmetsastamise ulatuse osas (345 - 1 779 miljonit ha). Metsade süsiniku sidumisvõimet vähendavad kahjurid, haigused ja tulekahjud, mida kliimamuutused võivad veelgi süvendada ja mis võivad süsiniku neeldaja muuta süsinikuheite allikaks. Mets kui süsiniku neeldaja võib samuti küllastuda, nii et enam aasta-aastalt süsinikku juurde ei ladusta - see protsess toimub tavaliselt metsades aastakümnete või sajandite jooksul, võrreldes geoloogiliselt ladustatud süsinikdioksiidi tuhandete aastate pikkuse viibeajaga (Smith jt, 2016; Seidl jt., 2017).

Metsastamise ja taasmetsastamisega on palju kogemusi, mis aitab ka nende modelleerimisel, kuid siin on vaja meeles pidada et:

- Esiteks pole metsastamise ja taasmetsastamise kliimamuutuste leevendamise potentsiaal ühtlaselt jaotunud (Bala jt, 2007). Osaliselt on see seetõttu, et sõltuvalt puude liikidest suudavad metsad kas soojust absorbeerida või seda peegeldada (heledad pinnad on võimelised soojust peegeldama), põhjustades kohalikke mõjusid (Bright jt, 2015; Jones jt, 2015).
- Teiseks, metsahaldusstruktuuride ja seirevõimekuse tase võivad olla nende meetmete rakendamise kitsaskohad, mida tavaliselt mudelites ei arvestata (Wang jt, 2016; Wehkamp jt, 2018), ning mis võivad seetõttu nende meetmete potentsiaali üle hinnata.

¹¹ FAO (2018) defineerib metsastamist (*afforestation*) kui metsa loomist, kas istutamise või külvamise teel, maal mis kuni selle ajani kuulus erinevasse maakasutus kategooriasse. Taasmetsastamine (*reforestation*) tähendab metsa taasloomist, kas istutamise või külvamise teel, maal, mis on metsamaa (maa looduslik isemetsastamine ei kuulu sellesse kategooriasse, aga külvatud või istutatud puude juure- või kannuvõsudega uuenemine metsa taastamise eesmärgil kuulub siia alla – FAO, 2018).

- Erinevatel metsastamise viisidel on erinevad positiivsed ja negatiivsed kaasmõjud. Rohumaade ökosüsteemide või mitmekesiste põllumajandusmaastike metsastamine monokultuuride või invasiivsete võõrliikide istutamise avaldab olulist negatiivset mõju elurikkusele, veevarudele jne (Smith jt, 2014), samas kui metsade taastamisel kohalike liikidega võib olla positiivne sotsiaalne ja keskkonnamõju. (Cunningham jt, 2015; Locatelli jt, 2015; Paul jt, 2016).

Metsastamist on võimalik siduda ka muude poliitiliste eesmärkidega. Näiteks varem punase liha tootmiseks kasutatud karjamaad võiks pärast toitumisharjumiste muutumist (vähema koguse liha tarbimisel) metsastada (Röös jt, 2017) või kasutada energiakultuuride kasvatamiseks (Grübler jt., 2018). Liha ja muude loomakasvatussaaduste nõudluse vähendamine vastavalt tervisejuhistele võib anda kasvuhoonegaaside vähendamise ja toidusüsteemide üldise tõhususe parandamise kaudu märkimisväärset kasu (nt Erb jt, 2009; Tukker jt, 2011; Tilman jt, 2014; van Dooren jt, 2014; Ranganathan jt, 2016). Toitumismuutused võiksid anda kuni 20% vajalikest kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamisest (veerand sellest on madala kuluga), et hoida soojenemist alla 2°C (Griscom jt., 2017), kuigi globaalses mastaabis on trend praegu vastupidises suunas (Alexandratos jt, 2012; OECD / FAO 2017).

Metsa majandamise kogupotentsiaal suurendada süsiniku neeldamisvõimet looduslike kliimalahenduste abil (konserveerimine, taastamine ja maaparanduse) on hinnanguliselt 23,8 Gt CO₂ aastas (Griscom jt, 2017).

Suur osa kirjandusest keskendub REDD+-le (raadamise ja metsa degradeerumisega põhjustatud heitkoguste vähendamine) kui institutsionaalsele mehhanismile (IPCC, 2019a). Taastamis- ja majandamistegevused ei pea siiski piirduma REDD+-ga ning nende meetmete kohalikele oludele kohandatud rakendamine võib hoida kulud madalal, teenida kaastulu ja toetada sotsiaalmajanduslikke eesmärke (Jantke jt, 2016; Ellison jt, 2017; Perugini jt, 2017; Spencer jt, 2017).

2.8. Biosüsi

Biomassi kuumutamisel hapnikuvabas keskkonnas temperatuuril 250°C või enam, protsessis mida nimetatakse pürolüüsiks, saadakse energiarikkaid gaase ja vedelikke ning tahket sütt. Kui seda sütt toodetakse mullaparandusainena või süsiniku säilitamiseks, nimetatakse seda biosöeks (UK Biochar Research Center, 2019). Biosöe süsiniku talletamise pikaealisus sõltub pinnase tüübist ja biosöe tootmistemperatuurist ning võib kesta paarist kümnest aastast kuni mitme sajandini (Fang jt, 2014).

See süsinik jääb biosöes pikka aega seotuks ja seega saaks biosöe jätkusuutlik tootmine olla üheks vahendiks võitluses inimtekkeliste kliimamuutustega (Kammann jt, 2017). On tõestatud, et biosöel võib olla mulda lisades ka muid kasulikke mõjusid (Cayuela jt, 2014;

Downie jt, 2009). Selle eriti poorne struktuur võib toimida nagu vett ja kasulike mulla toitaineid aeglaselt vabastav käsn.

Biosütt saab valmistada peaaegu igat tüüpi kuivast biomassist - sealhulgas jääkmaterjalidest. Seetõttu võiks biotsiidi tootmine olla mitmete kasuteguritega ringmajanduse tüüpi ressursside haldamise võimalus. Traditsiooniline söetootmine ei vasta nendele kriteeriumidele ja biosöe tootmise näiteid kaubanduslikus mahus on praegu väga vähe (kui üldse) (UK Biochar Research Center, 2019).

Biosütt nagu ka mulla süsiniku sidumist ei ole integreeritud hindamismudelites laialdaselt kasutatud ja nende kasutuselevõtt modelleeritud stsenaariumites eeldaks ka maa kasutamise ja/või maakorralduse muutmist (IPCC, 2019a). Et tagada süsiniku sidumisvõime 0,3 Gt CO₂-e vajatakse umbes 40–260 miljonit hektarit maad biosöe jaoks vajaliku biomassi kasvatamiseks (Smith 2016), kuigi on võimalik kasutada ka puidu ja põllumajanduse jääke (Windeatt jt., 2014, Wang jt., 2013b).

Biosöe tootmise kulud on hinnanguliselt vahemikus 30–120 USA dollarit CO₂ tonni kohta (McCarl jt, 2009; McGlashan jt, 2012; McLaren jt, 2012; Smith 2016). Veevajadus on madal ja maksimaalse kasutuselevõtu korral saaks kõrvalsaadusena toota energiat kuni 65 EJ aastas (Smith, 2016).

2.9. Metsa majandamine

Jätkusuutlikku maakorraldust määratletakse IPCC kliimamuutusi ja maad käsitlevas raportis (IPCC, 2019a) kui maaressursside, sealhulgas pinnase, vee, loomade ja taimede hooldamist ja kasutamist muutuvate inimvajaduste rahuldamiseks, tagades samal ajal nende ressursside pikaajalise tootlikkuse potentsiaali ja nende keskkonnanfunktsioonide säilitamise. Siia kuuluvad muu hulgas agroökoloogia (sealhulgas agrometsandus), põllumajanduse ja metsade säilitamise meetodid, põllukultuuride ja metsaliikide mitmekesisuse säilitamine, sobilikud põllukultuuride vaheldumised ja raieringid, mahepõllundus, integreeritud kahjuritõrje, tolmeldajate säilitamine, vihmavee kogumine, karjamaade haldamine ning täppispõllumajandussüsteemid.

Jätkusuutlikku maakorralduse alla kuulub ka jätkusuutlik metsamajandamine, mis on ajas muutuv ja arenev mõiste, ja mille eesmärgiks on säilitada ja parandada kõikide metsa tüüpide keskkonna-alaseid, majanduslikke ja sotsiaalseid väärtusi nii praeguste kui tulevaste põlvkonadade hüvanguks (FAO, 2018). Eest Metsaseaduse¹² kohaselt on metsa majandamine säästev, kui see tagab elustiku mitmekesisuse, metsa tootlikkuse, uuenemisvõime ja elujõulisuse ning ökoloogilisi, majanduslikke, sotsiaalseid ja kultuurilisi vajadusi rahuldava mitmekülgse metsakasutuse võimaluse. Säästev aga ei pruugi olla jätkusuutlik, kuna selles mõistes puudub selgelt tulevikku vaatav element ja metsamajandamine peaks olema selline, mis tagaks kõik metsa funktsioonid ka tulevikus ja tulevastele põlvkonadadele.

¹² <https://www.riigiteataja.ee/akt/MS>

Metsade jätkusuutlik majandamine aitab säilitada või suurendada süsinikuvarusid orgaanilises aines ja pinnases, sealhulgas talletada süsinikku puittoodetes ja kaasa tuua asendusefekti, ning pakkuda lahendust metsasüsiniku küllastusprobleemile, mille korral küps mets enam kokkuvõttes süsinikku juurde ei seo st süsiniku emissioonid ja sidumine tasakaalustuvad üksteist või emissioonid ületavad sidumist (IPCC, 2019a). Metsade jätkusuutlik majandamine, kasutades looduslähedasi tehnikaid, võib potentsiaalselt pakkuda paljusid positiivseid kaasefekte kliimamuutuste leevendamise, nendega kohanemise, bioloogilise mitmekesisuse kaitse, mikrokliima reguleerimise, mulla erosiooni kaitse, rannikualade kaitse ning vee- ja üleujutuste reguleerimise näol (ibid.).

Jätkusuutlik metsa majandamine peaks arvestama võimalike kliimamuutuste mõjudega metsale ja aitama metsal kliimamuutustega kohaneda, näiteks vähendada liigniiskust ja tulekahju ohtu. Oluline on kohaliku liigilise koosluse säilitamine, mis aitab toetada ökosüsteemi ja selle teenuste jätkusuutlikkust (kaasaarvatud kliimamuutustele vastupidamiseks ja paremaks süsiniku sidumiseks). Riskide vähendamiseks tuleks võõrliikide kasutamisest hoiduda (ibid.).

Erinevatel metsa majandamise võtetel on pikema aja lõikes mitmeid, sh vastandlikke mõjusid. Näiteks vähendab suurem küpse metsa raiemaht biomassis seotud süsinikku lühiajalises perspektiivis, kuid suurendab süsiniku seotust puittoodetes ja võimalikku asendusefekti. Metsa majandamisstrateegiatel, mille ainus eesmärk on suurendada biomassi, ka süsiniku sidumise eesmärgil, võivad olla kahjulikud kõrvalmõjud, näiteks võib väheneda metsa struktuurilise koosluse mitmekesisus, elurikkus ja vastupanuvõime looduslikele häiringutele (ibid.).

Kindermann jt (2013) uurisid erinevate kliimastsenaariumide alusel kahte metsa majandamise stsenaariumit, kus ühe eesmärgiks oli ladustada suuri biomassi koguseid metsades ja teisel suurendada juurdekasvu ja raiemahtu. Tulemused näitasid, et metsade majandamine Euroopas peaks maksimeerima juurdekasvu, mitte talletatud varusid, et olla kliimamuutuste leevendamisel tõhusam. See kehtib eriti piirkondade kohta, kus metsades on juba suur süsinikuvaru, nagu paljudes Euroopa metsades. Ajavahemikul 2010–2100 suudaksid Euroopa Liidu 27 liikmesriigi metsad siduda täiendavalt 1750 miljonit tonni süsinikku rohkem kui seisva biomassi maksimeerimisel (ibid.). Luyssaert jt (2018) rõhutavad aga, et oluline on metsa kohandamine kliimamuutustega ning metsa majandamine võib kaasa tuua mh pinnase albeedo muutumise ja seega suurema soojuskiirguse neeldumise, mis omakorda võimendab kliimamuutusi. Viimane omakorda võib tasakaalustada metsamajandamisega kaasneva süsiniku sidumise positiivset efekti kliimamuutustele. Nad soovivad metsa koosluse muutmist suurendades lajalehiste puuliikide osakaalu, mis aitaks maapinda jahutada ja päikese kiirgust tagasi peegeldada. Samas hoitavad autorid, et nende uuring põhines ainult ühel mudelil ning suureulatuslik metsakoosluse muutmine ei suudaks kliimamuutusi oluliselt leevendada.

Hynnen jt. (2015) hindasid erinevate metsamajandamise võtete pikaajalisi mõjusid Soome tulundusmetsades. Nad leidsid, et metsa intensiivsema kuid jätkusuutliku majandamisega saab süsiniku sidumist suurendada kuni 40%, kuigi sealjuures võib metsas talletatud

süsinikuvaru veidi väheneda. Uuringu tulemused erinesid piirkonniti sõltuvalt kliimast, metsa struktuurist ja taastootmisvõimest.

2.10. Puittooted (HWP) ja puit kui asendusmaterjal

Peale metsa raiet oleneb puidu kasutusviisist, kas tegemist on süsiniku emiteerija või sidujaga. Energia tootmiseks põletatud puittooted vabastavad nendes oleva seotud süsiniku kohe. Kui need asendatakse kiirekasvuliste energiakultuuridega, saab seda mõju kiiremini neutraliseerida nende kasvades, aga see sõltub ka metsasaaduste töötlemise ja vedude süsiniku heidete suurusest. Seetõttu on oluline puitmaterjali elukaare süsiniku emissioonide hindamine, et kindlaks teha kõik võimalikud mõjud (IPCC, 2019a; UNECE, 2008).

Paberitooted on tavaliselt lühiajalised ja nendes olev süsinik eraldub lagunedes või põledes. Mööbli või taristu jaoks kasutatav puit võib süsinikku säilitada palju pikema aja jooksul (kuni nende toodete lagunemise või põletamiseni) ning lisaks sellele võib nende toodete kasutamisel olla suurem positiivne mõju, kui puitu kasutatakse süsinikuintensiivse materjali, näiteks terase või tsemendi, asendajana (ibid., IPCC, 2013). Umbes 232 ruutmeetri suuruse puitkarkassmaja struktuuris on 30 tonni süsinikku - see võrdub sõiduauto kasutamisega 5 aasta jooksul (üle 12 000 liitri bensiini) (BC metsanduse kliimamuutuste töörühm jt., 2009).

Kui arvestada toodete elukaarega, siis puidu kasutamisel struktuurielementidena ehitistes betooni ja raua asemel aitab vähendada emissioone 3,7–11,0 tCO₂-e ühe tonni puidus seotud süsiniku kohta. Seega tuleks arvestada asendusefektiga kui arvutada puittoodete kasvuhooonegaaside leevendamise potentsiaali (Chen jt, 2018). See on 4,5-7,6 korda suurem kui puidu kasutamine elektri tootmisel kivisöe asemel (ibid.). Ehituseeskirjade ajakohastatud versioonid, mis soodustavad süsinikuvaba või vähese süsinikusisaldusega ehitiste kasutamist, julgustavad puitkonstruktsioonide laialdasemat kasutamist, vähendades ehitiste süsiniku jalajälge, ning see peab käima käsikäs jätkusuutliku metsa majandamise võtetega, mis suurendavad ja pikendavad metsade süsiniku siduvust (ibid.). Buchanan ja Levin (1999) arvutasid, et kui Uus-Meremaal asendada ehitiste konstruktsioon puiduga (17% puidu sisalduse tõus ehitistes), siis viiks see 3% riiklike süsiniku emissioonide vähendamiseni. Soomes oleks see number 1% KHG emisiionidest (Ruuska ja Häkkinen, 2012).

Sathre, R. and J. O'Connor (2010) analüüsisid 21. uuringus, kus puit asendas muid materjale (enamasti) ehituses, leitud asendusfaktoreid (tC puitmaterjal is talletatud tC kohta) ning leidsid, et need varieerusid -2,3 kuni 15-ni (enamasti vahemikus 1,0 kuni 3,0, keskmine 2,1). Oliver jt (2014) leidsid, et jätkusuutlikult majandatud raieküpse metsa puidu asendusefekt koos metsa süsiniku sidumise ja bioenergiaga oli suurem kui teistes vanustes majandatud metsadel. Asendusefekti ülemaailmseks potentsiaaliks hindasid nad 14% - 31% CO₂ emissioonide vähendamist.

Kuna riiklik emissioonide arvestus on tootmispõhine, siis sellest seisukohast on oluline et kodumaine puit asendaks energia tootmisel kasutatavaid fossiilkütuseid ja suure süsiniku jalajäljega materjale, mida toodetakse selles samas riigis. Sealjuures on oluline arvestada nende materjalide kogu elukaare emissioonidega. Globaalsete kliimamuutuste leevendamise

seisukohast, aga ei ole oluline, kus asendamiseks kasutatud materjalid toodetud on nii kaua kui nende süsiniku jalajälg on väiksem kui asendatava materjali oma.

2.11. Maksed metsa ökosüsteemiteenuste eest ja metsanduskrediidiga kauplemine

Costa Rica edu viimase 30 aasta jooksul nende metsade muutmisel süsiniku netoallikast netosidujaks tuleneb metsa kaitseks ja laiendamiseks kasutatud majandus- ja regulatiivset poliitikat. Ökosüsteemiteenuste eest tasumine (PES) programm algas 1996. aastal kahel eesmärgil: suurendada ökosüsteemi teenuseid ja vähendada vaesust. PES maksab maaomanikele keskkonnateenuste osutamise eest viies kategoorias:

- metsa säilitamine;
- kaubanduslik taasmetsastamine;
- agrometsandus;
- metsade jätkusuutlik majandamine; ja
- ülekasutatud ja kurnatud (degradeerunud) alade uuendamine (Sitra 2017).

Põllumajandustootjad saavad iga-aastaseid toetusi metsa hoiuks (64–80 dollarit hektari kohta), taasmetsastamiseks (980–1 410 dollarit hektari kohta) ja agrometsanduseks (1,3–1,9 dollarit puu kohta). Maksemäär puhul võetakse arvesse piirkonna keskkonna tähtsust ja looduslike liikide kasutamist (ibid).

Metsade säilitamise ja laiendamisega hoiab programm ära maa degradeerumise, maalihked ja pinnase erosiooni, aitab säilitada veevarusid ning kaitseb üleujutuste ja põua eest (st aitab kaasa ka kliimamuutustega kohanemisele). Programm toetab maaomanikke, eriti haavatavates maapiirkondades. Kohalikud kogukonnad teenivad raha puidutootmise või turismi kaudu (ibid).

Süsiniku talletamist metsades saab säilitada ja suurendada raadamise vähendamise, metsastamise ja puistute tasemel metsa majandamise tavade muutmisega (IPCC, 2019a). Soome uuringus (Assmuth jt., 2018) modelleeriti süsiniku majanduslikult optimaalset säilitamist hariliku kuuse (*Picea abies*) puistutes erinevate metsamajandamisrežiimide rakendamisel. Esimene põhineb lageraiel ja teine püsimeetsandusel. Nad leidsid, et süsiniku sidumise eest maksmine (€10-60 tCO₂) suurendas optimaalset raieringi nii püsimeetsades kui ka lageraiemetsade puhul, kuid esimesel juhul oli see selgemalt väljendunud. Põhjuseks oli see, et süsiniku hind aitas harvendusraiet edasi lükata, suurendas puistu tihedust, suurendas suuremate puude raiet, ja soodustas üleminekut lageraietelt püsimeetsandusele (Ibid).

Metsanduskrediiti aktsepteeritakse Uus-Meremaa heitkogustega kauplemise programmis ja kompensatsioonina California programmi raames (Climate Justice Alliance, 2018). Ladustatud süsiniku metsanduskrediitide lubamisel süsinikdioksiidi heitkogustega kauplemisse on olnud palju vastupanu. California on keskkonnarühmadelt olulise kriitika osaliseks saanud metsanduskrediidi lubamise eest oma heitkogustega kauplemisprogrammis (ibid.).

Muret tekitab metsanduskrediidisüsteemide haavatavus, nimelt asjaolu, et tulekahjud, üleujutused, haigused ja kahjurid võivad muuta süsinikuhoidla süsinikuallikaks. Californial on metsa majandamise jaoks ranged nõuded krediidina kasutatava süsiniku täiendava ladustamise hindamiseks, mis nõuab rangelt:

- puudes seotud süsiniku koguse hinnangut;
- projekti alguse süsiniku taseme väljatöötamist;
- raiemahtude hindamist;
- puittoodete pikaajalise süsiniku ladustamise hinnanguid;
- hinnanguid lekete kohta ja
- puude süsiniku suurenenud seotuse kontrollimist (ibid).

Sellise arvutuse kohaselt arvestatakse metsanduskrediitideks ainult täiendavalt puudesse ladustatud süsinikku. California metsanduskrediidi programm nõuab osalevatelt projektidelt teatud metsa majandamise kriteeriumide täitmist:

- Pikendatud raieringi
- Tootlikkuse suurendamist haigete ja kängus puude harvendamise kaudu
- Tootlikkuse suurendamist võsa ja lühikese elueaga metsaliikide majandamise kaudu
- Varude suurendamist väheste puiduvarudega aladel (näiteks puude istutamist) (ibid)

3. Metsad ning riiklik ja rahvusvaheline kliimapoliitika

Metsadega arvestatakse ka kliimamuutuste kohta käivates kokkulepetes nende tähtsuse tõttu kliima reguleerimisel, sealhulgas kasvuhoonegaaside neeldajatenä.

ÜRO kliimamuutuste raamkonventsiooni Pariisi kokkuleppes mainitakse metsi korduvalt, arvestamata viidetega süsiniku neeldajatele, mille hulka kuuluvad ka metsad. Pariisi kokkuleppe kohaselt tuleb pikaajalise temperatuuri eesmärgi saavutamiseks hoida globaalne keskmine temperatuuri tõus allpool 2 °C võrreldes tööstusrevolutsiooni eelse perioodi tasemega ning jätkata jõupingutusi temperatuuri tõusu piiramiseks 1,5 °C-ni, samuti peaksid leppe osapooled saavutama tasakaalu inimtekkeliste heitkoguste ja kasvuhoonegaaside neeldajate vahel selle sajandi teiseks pooleks (PA, 2015, artiklid 2 ja 4.1).

Pariisi kokkuleppega kutsutakse osapooli üles võtma meetmeid konventsiooni (UNFCCC, 1992) neljanda artikli lõike punktis 1(d) nimetatud kasvuhoonegaaside neeldajate ja reservuaaride, sealhulgas metsade, säilitamiseks ja parendamiseks. 'Neeldaja' on protsess, tegevus või mehhanism, mis eemaldab atmosfäärist kasvuhoonegaase, aerosoole või kasvuhoonegaase tekitavaid gaase (UNFCCC, 1992, artikkel 1). Pariisi kokkuleppe preambulis tunnustatakse "konventsioonis nimetatud kasvuhoonegaaside neeldajate ja reservuaaride säilitamise ja parendamise olulisust".

Lisaks julgustatakse Pariisi kokkuleppe viienda artikli teises lõikes lepinguosalisi kasutama juba olemasolevaid meetmeid, sealhulgas tulemuspõhiseid makseid, Konventsiooni rakendamise toetamiseks raadamise ja metsade seisundi halvenemisega seotud heitkoguste vähendamist ning metsade säilitamise, säästva majandamise ja metsade süsinikuvarude suurendamist arengumaades. Soovitatakse ka kasutada alternatiivseid lähenemisviise, näiteks ühiseid leevendus- ja kohanemisvõtteid metsade terviklikuks ja säästvaks majandamiseks, kinnitades samas, et oluline on stimuleerida selliste lähenemisviisidega seotud muid kasutegureid.

Pariisi kokkulepet (UNFCCC, 1/CP.21) vastuvõtva otsuse punktis 54 tunnustatakse piisavate ja prognoositavate rahaliste ressursside, sealhulgas vajaduse korral tulemuspõhiste maksete olulisust poliitiliste lähenemisviiside ja positiivsete stiimulite rakendamisel raadamisest ja metsade seisundi halvenemisest tulenevate heitkoguste vähendamiseks ning metsade säilitamiseks, jätkusuutlikuks majandamiseks ja metsade süsinikuvarude suurendamiseks; samuti alternatiivseid poliitilised lähenemisviiside, näiteks ühised leevendus- ja kohanemispõhimõtete, olulisust metsade terviklikuks ja säästvaks majandamiseks; kinnitades samas selliste lähenemisviisidega seotud süsiniku arvestusest sõltumatu kasutegurite olulisust; ergutades koordineeritud toetusi muu hulgas avalikest ja era-, kahe- ja mitmepoolsetest allikatest, näiteks Rohelisest Kliima Fondist (Green Climate Fund), ning teistest alternatiivsetest allikatest, mis on kooskõlas konventsiooni osaliste konverentsi asjakohaste otsustega.

Alates 2008. aastast on Euroopa Liit arvanud LULUCF sektori kasvuhoonegaaside emissioone. 2016. aastal tegi Euroopa Komisjon ettepaneku 2030. aastaks seatud Euroopa Liidu kliimaeesmärkide täitmiseks hakata kasvuhoonegaaside vähendamisel arvestama ka LULUCF sektorit. Siduvad kohustused LULUCF sektorist tulenevate süsiniku emissioonide ja sidumise osas perioodiks 2021-2030 tulenevad LULUCF määrusest¹³. Selle kohaselt peavad LULUCF sektori emissioonid olema kompenseeritud süsiniku sidumisega sama sektori poolt ning LULUCF olema vähemalt tasakaalus (ehk sektori koguemissioon on null).

LULUCF määrus kohustab Euroopa Liidu liikmesriike koostama Riikliku metsanduse arvestuskava. Metsanduse arvestuskava määrab iga liikmesriigi jaoks selle metsa heitkoguse võrdlustasemed (*Forest Reference Level*). Ajavahemiku 2021-2025 kohta tuli see esitada 31. detsembriks 2018¹⁴ ja 2026-2030 kohta tuleb arvestuskava esitada 30. juuniks 2023. Eesti pakutav metsa võrdlustase aastatel 2021-2025 koos puittoodetega (HWP) on -1,75 Mt CO₂-e ja ilma -1,33Mt CO₂-e aastas. Arvestusperioodil jooksul võrreldakse igal aastal tegelikku KHG sidumist ja emissioone eeltoodud näitajatega. Kui sidumine on väiksem võrdlustasemest, arvestatakse see LULUCF arvestusreeglite järgi süsiniku emissioonina.

Eesti kliimamuutuste leevendamise ja nendega kohanemise poliitikal on metsade ja metsanduse jaoks oluline koht. Kliimamuutustega kohanemise arengukava aastani 2030¹⁵ eesmärk on saavutada Eesti jaoks oluliste biomajandussektorite jätkusuutlikkus, sealhulgas

¹³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0841&from=EN>

¹⁴ https://www.envir.ee/sites/default/files/national_forestry_accounting_plan_2019_final.pdf

¹⁵ https://www.envir.ee/sites/default/files/kliimamuutustega_kohanemise_arengukava_aastani_2030_1.pdf

kliimateadlik metsamajandus. Sellega seatakse eesmärgiks metsa tagavara juurdekasvu 10-20 %-line suurenemine 2030. aastaks, võrreldes 12,9 miljoni m³ juurdekasvuga 2014. aastal. Arengukava kohaselt tuleks puidu ja puidu kasutamise säilimise tagamiseks suurendada investeeringuid metsade infrastruktuuri ja teavitustegevusse, et tagada seeläbi puidukasutuse säilimine ja puidu kvaliteet ning sel teel suurendada süsiniku sidumist. Metsakasvatajatele ja omanikele tuleb anda nõu kliimasoojenemise mõjusid leevendavate loodussõbralike metsandusmeetodite kasutamiseks. Suuremat tähelepanu tuleks pöörata metsataimede kasvatamisele ja valimisele, puistute hooldamisele, metsa kaitsele ja metsapatoloogiale. Kliimamuutuste tõttu on Eestis üha suuremaks ohuks liigid, mida praegu Eestis ei ole esindatud või mida on vähe, kuid mis põhjustavad naaberriikides üha rohkem kahju (nn invasiivsed võõrliigid, sh kahjurid). Samuti on oluline pöörata tähelepanu metsa geneetiliste ressursside säilitamisele ja majandamisele. Suurem geneetiline variatsioon võimaldab puuliikidel muutuva kliimaga paremini kohaneda.

Kliimapoliitika põhialused aastani 2050 (Riigikogu, 2017) seadsid eesmärgi vähendada kasvuhooaegaste heitkoguseid 2050. aastaks 80% alla 1990. aasta taset (2030. aastaks 70% ja 2040. aastaks 72%). 2017. aastal olid Eesti kasvuhooaegaste heitkogused (koos LULUCFiga) 51% madalamad kui 1990. aastal (NIR, 2019). Üldpõhimõtetele on metsade ja metsandusega seoses mitu punkti. See julgustab madala süsinikusisaldusega kütuste (elektrienergia tootmiseks ja transpordiks) laialdasemat tootmist ja kasutamist ning energiaallikate arvu suurendamist, kaasaarvatud kodumaised bio- ja muud taastuvenergia liigid. Hõlbustatakse taastuvenergia tootmistehnoloogiate ning teadmistel põhineva, ökoloogilise ja jätkusuutliku väärtusliku biomassi tootmise arendamist. Taastuvate kütuste arendamiseks suurendatakse pidevalt tõhusat bioenergia tootmist. Puidupõhiste kütuste tootmiseks kasutatakse madala kvaliteediga puitu ja puidutööstuse kõrvalsaadusi.

Metsade kasvu ja selle süsiniku sidumisvõimet suurendatakse parema ja jätkusuutliku metsamajanduse kaudu ning metsade süsinikuvaru säilitatakse pikaajaliselt. Majandatava metsamaa tootlikkust suurendatakse peamiselt parema harvendusraie, raieaja ja kiire metsauuenduse abil elupaigatüübile sobivate puuliikidega. Majandatavates metsades rakendatakse paindlikke liigispetsiifilisi raieringe ning säästva metsanduse elurikkuse säilitamise põhimõtteid. Puidu kasutamist suurendatakse järjekindlalt, mis viib puittoodete ja hoonete süsinikuvarude suurenemiseni, mis omakorda asendavad taastumatuid loodusvarasid. Soodustatakse kodumaise puidu tarbimist ja tootmist. Hõlbustatakse praeguse metsamaa pindala hooldamist. Metsanduses ja maakasutuses julgustatakse teadusuuringuid, arendustegevust ja innovatsiooni, mis aitavad suurendada süsiniku sidumist ja leida puidule alternatiivseid kasutusviise.

4. Eesti metsade hetkeolukord¹⁶

Umbes pool (51,4%) Eesti maismaast on kaetud metsaga (SMI, 2018). Metsamaad oli 2018. aastal 2 330 900 ha (1,8 ha elaniku kohta) 2018. aastal, millest 2 148 800 ha oli metsa all.

¹⁶ Siin olevad andmed pärinevad Keskkonnaagentuurist, kui ei ole märgitud sellest erinevat allikat.

Metsamaa pindala on aeglaselt kasvanud – viimastel aastatel umbes 1000 ha aastas. Viimastel aastakümnetel on oluliselt suurenenud ka kaitsealuse metsa pindala. 2018. aastal oli range kaitse all kogu Eesti metsamaast 13,2% ning metsaseadusele täiendavate metsamajandamise piiranguga umbes 11,4%.

Eestis on metsamaa pindala suurenenud umbes poolteist korda alates 1940. aastast ja metsaressurss on sama ajavahemiku jooksul kolmekordistunud. Võrreldes 1975. aastaga on need muutused olnud vastavalt 1,3 ja 1,9 korda, 1990-2016 suurenes metsatagavara 50 miljonit m³ (tm). Metsa kasv on Eestis kiirenenud (nt Lang jt., 2017; Metslaid jt., 2018; Metslaid jt., 2016). Samas aga piiravad kuivemad suved metsa kasvu (ibid.). Metsa kiiremal kasvul on mitmeid põhjuseid, nagu näiteks varasemate kuivendustööde mõjud, soojem kasvuperiood (kevad on piirkonniti 3-5°C soojemad), endisest paremad metsa majandamisvõtted ja suurem süsinikdioksiidi kontsentratsioon õhus (nn CO₂-ga väetamine).

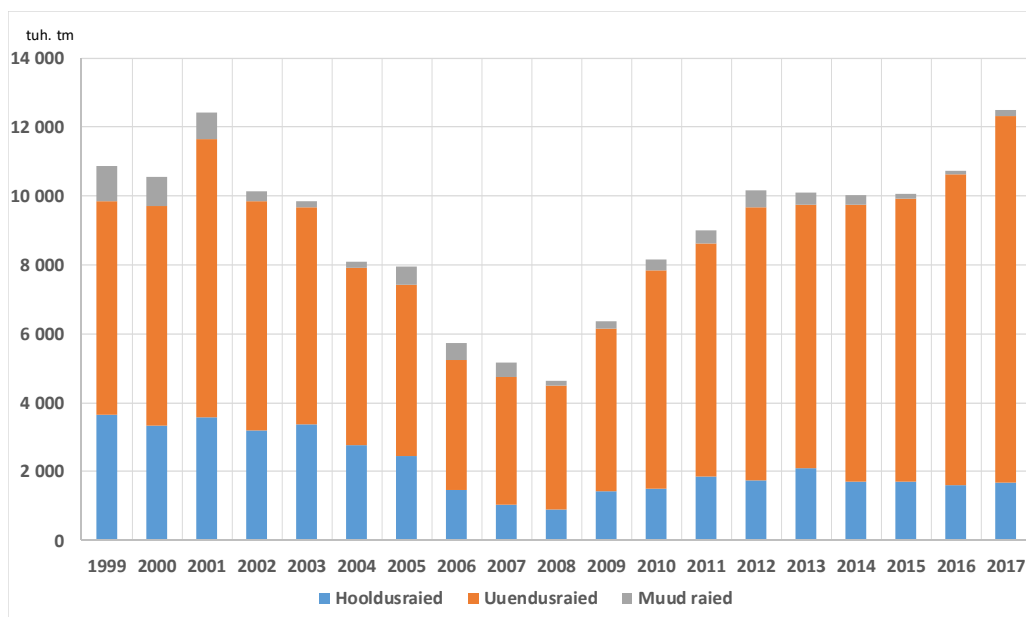
Majandatavates metsades moodustavad kõigi puuliikide puistute pindalast küpsed ja valmivad puistud 37% ja rangelt kaitstavates metsades 51% (SMI, 2018). Tegelikult on see protsent majandatavates metsades veelgi suurem, kuna lisaks raievanusele oleneb metsa raieküpsus ka diameetrist (Lisa, tabelid L1 ja L2), millega arvestades on küpseid ja valmivaid puistuid tervelt 47% ehk pea pool (40,8% kogu metsa pindalast). Eesti metsa tagavara on kokku umbes 480 miljonit m³ ning viimase 26 aasta jooksul on see suurenenud 50 miljonit m³. Eesti metsade levinumad puuliigid on mänd, kask, kuusk, hall lepp, haab ja must lepp. Aastane kogu (majandatud ja kaitstud) metsa tagavara juurdekasv oli 2017. aastal umbes 16,1 miljonit m³.

Perioodil 2011-2020 Eestis oli jätkusuutlikuks eesmärgiks kasutada 12–15 miljonit tm metsamaterjali aastas (MAK, 2010). Raiemaht oli 2016. aastal 10,7 m³, 2017. ja 2018. aastal 12,5 miljonit m³ ning 2019. aastal esialgse hinnanguna umbes 11 miljonit m³. 2011-2019 aasta keskmiseks raiemahuks oli 10,7 miljonit m³, mis on vähem kui MAK-is (2010) kehtestatud jätkusuutlik raiemaht. Eestis annab metsa- ja puidusektor tööd peaaegu 28 tuhandele inimesele ning kaudset ja kaasnevat mõju arvesse võttes oli sektoriga seotud 59 tuhat töökohta 2017 aastal (Ernst & Young Baltic, 2019).

2017. aasta kasutati küttepuiduks ligikaudu 30% raiutud tüvepuidust. Näiteks, kui raiemaht on 10 miljonit tm, siis küttepuitu on sellest 2,5-3 miljonit tm. Puuliigiti on see aga väga erinev. Kui puhtmännikute raiest võib küttepuitu osakaaluks olla 1% puidust, siis paljudest hall-lepikutes on see 100%. Küttepuiduks sobivat 30-aastat ja vanemat hall-lepa tagavara on umbes 95 tuhat hektarit, kogutagavaraga 23 miljonit tihumeetrit. Nagu muud puistud on lepikud ka vanades tundlikumad haigustele ja seega tuleks haiguskolded nende tekkimisel kohe likvideerida ning küttepuuks raiuda raieküpsuse ea ületanud puid kui võimalik.

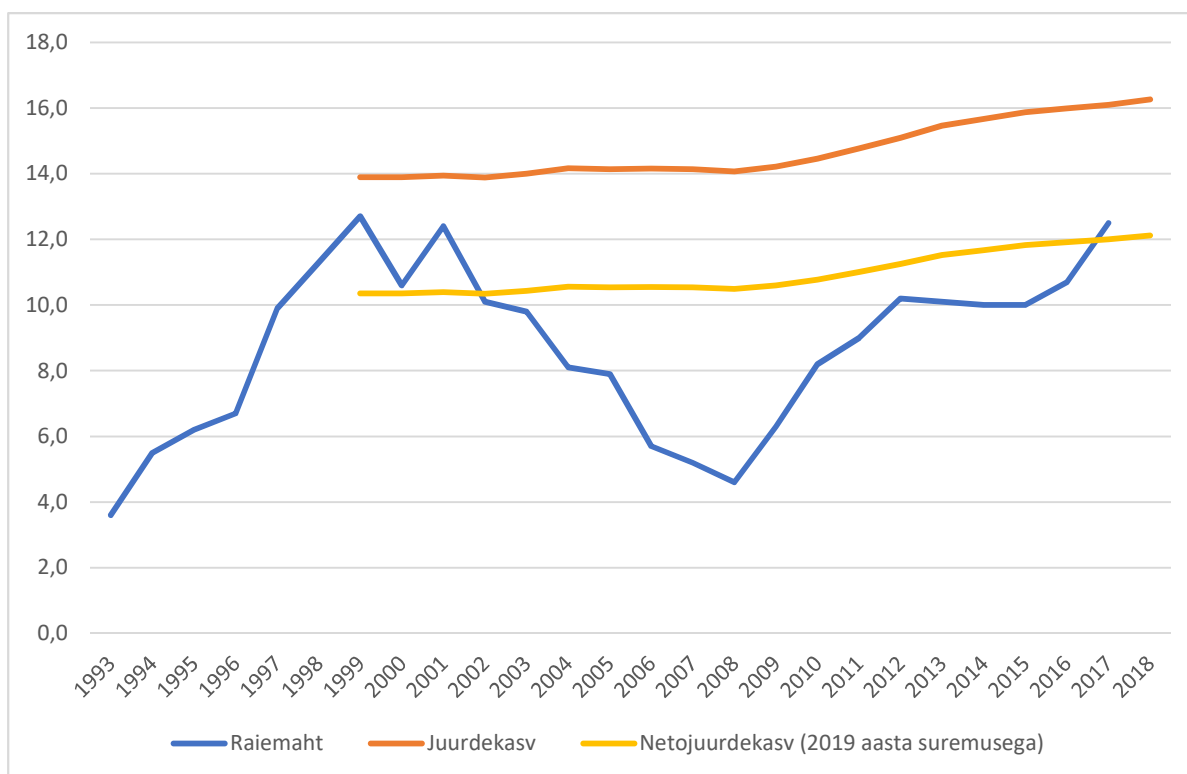
Alates 1993. aastast on aastane raiemaht olnud 3.6 kuni 12.7 miljoni tm vahel¹⁷, sõltuvalt metsamajandamise poliitikast ja erametsa omanike otsustest. Enamiku aastastest raietest moodustasid uuendusraied (joonis 4).

¹⁷ Viimasel 20 aastal on aastas keskmisena raiutud 9 miljonit tm aastas.

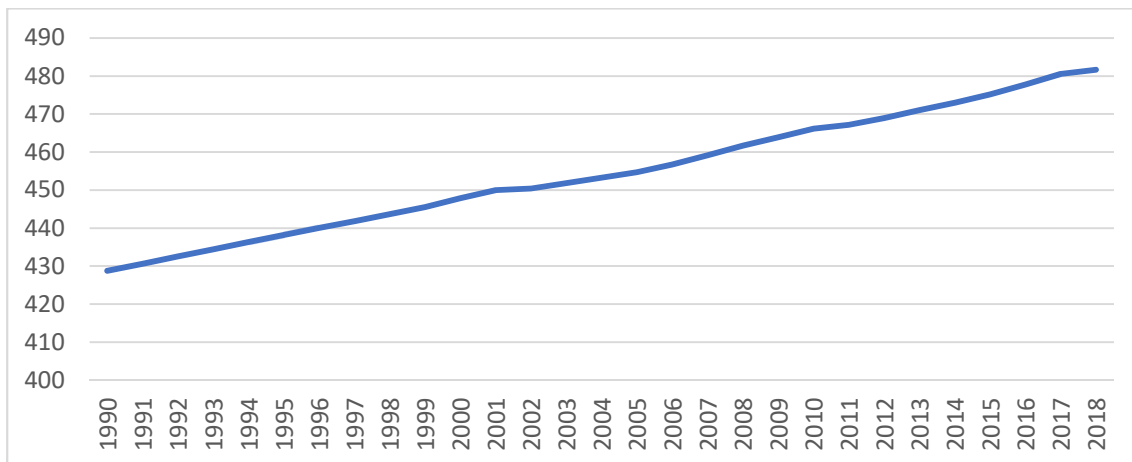


Joonis 4. Ajaloolised raiealad.

Metsa juurdekasv ilma suremuseta on suurenenud alatest 1999. aastast ja on olnud suurem kui raieaht (joonis 5). Kui arvestada 2019. aasta umbes 25% suuremusega, siis on sajandivahetusel ja ka 2017. aastal olnud aastased raied suuremad kui aastased metsa netojuurdekasvud. Samadel aastatel metsa tagavara vähenenud ei ole (joonis 6). Tegelik juurdekasv on ilmselt mõnevõrra alahinnatud, sest SMI ei arvesta väga noorte puude juurdekasvu. Ekspertide hinnangul on juurdekasv alahinnatud umbes 0,5 - 1 miljoni tm võrra.



Joonis 5. Ajaloolised raiemahud: 1993-1999 eksperthinnang, alates 2000 SMI ametlikud numbrid (sisaldab arvendusraied) ja ajalooline metsa arvestuslik juurdekasv 1999-2018: eksperthinnang ilma ja koos 2019. aasta suremusega.



Joonis 6. Ajalooline metsa tagavara

Eesti küpsete ja valmivate metsade (vanuses 60 kuni 120 aastat) keskmine ökosüsteemi süsinikuvaru on hinnatud 174 (vahemikus 141 kuni 214) tonnile hektari kohta, millest 111 tonni oli mullakihis, 61 tonni ülemistes metsakihis, 0,5 tonni aluskihis ja 1,7 tonni alustaimestikis (Lutter jt, 2019). Hinnati 165 metsa proovitükki ning metsakasvukohatüübil oli oluline mõju kõigile Lutter jt. (2019) uuringus analüüsitud süsinikuvarudele. 2015. aastal oli Eesti metsas hinnanguliselt ladustatud 519 miljonit tonni süsinikku, millest enamik ladustati mullas (348 Mt) ja biomassis (165 Mt) (FAO, 2015b). Kasutades 2015. aasta metsa pindala 2,232 miljonit hektarit (FAO, 2015b), saame 232 tonni süsiniku talletamist hektari kohta. See number jääb sektsioonis 2.3 (Pan jt, 2011) toodud parasvöötme (155 tonni hektari kohta) ja boreaalse (239 tonni süsinikku hektari kohta) metsa süsiniku talletamise numbrite vahepeale nagu oodatud, aga lähemale boreaalse metsa näitajale, kuid Lutter jt. (2019) uurimuses leitud Eesti valmiva ja küpse metsa süsinikuvaru ülemisele piirile. Arvestades viimast ja seda, et kogu Eesti mets ei ole küps või valmiv ja ka suurt erinevust mulla süsiniku sisalduses (umbes 1.4 korda), on tõenäoline, et Eesti metsa süsinikku talletamise numbrites on määramatust ja seda tuleks edasi uurida.

5. Eesti metsade stsenaariumid aastani 2120

Mets on pidevas muutuses. Metsa muudavad nii raied kui looduslikud protsessid. Järgnevalt püüame tänaste teadmiste põhjal prognoosida, kuidas muutub uuendusraiete pindala ja maht, metsa vanuseline struktuur, tagavara ning juurdekasv järgmise saja aasta jooksul ehk aastani 2120. Kuna mets on väga keeruline süsteem, kus on muutujaid palju (sh kliimamuutuste ja metsa majandamise võtete mõjud) ja nende omavahelised seosed on mitmekesised, siis on paratamatult sellised prognoosid väga suure võimaliku veaga. Seega on mõtet konkreetsetele arvude asemel vaadata eelkõige trende.

Vaatlusalused neli võimalikku metsa majandamise stsenaariumit erinevate uuendusraiete mahtudega on:

- 1) Arvestuslangi stsenaarium – siin lähtuti eeldusest, et eelmisel kümnendil raiuti metsa lähtudes sellele perioodile määratud langist. Kõigi raiestsenaariumite puhul tehti arvestus 10-aastaste ajaperioodide viisi. Igaks kümnendiks määrati arvatud lankide alusel eksperthinnanguna arvestuslank (aastane optimaalne uuendusraie pindala), seda kuue põhilise enamuspuliigi (mänd, kuusk, kask, haab, sanglepp, hall-lepp) lõikes. Järgmise 10-aastase perioodi arvestuslangi arvutamisel ja määramisel lähtuti eeldusest, et eelmisel 10-aastaselt perioodil tehti uuendusraieid eelmiseks perioodiks määratud arvestuslangi järgi, seda kõigi põhiliste puuliikide lõikes ja kokku.
- 2) Küpsusraie stsenaarium – siin eeldati, et tulundusmetsa kõik küpsed puistud raiutakse 10 aasta jooksul peale raieküpsuse saavutamist.
- 3) Ühtlase kasutuse stsenaarium - tulundusmetsas on raie aluseks ühtlase kasutuse lank. Ühtlase kasutuse lank on selline uuendusraiete aastane pindala, mida on võimalik samas suuruses raiuda kogu raieringi jooksul. Raieringiks nimetatakse sellist ajaperioodi, mille jooksul raiutakse ja uuendatakse kõik puistud. Raieringi pikkus on puuliigiti erinev sõltub sellele kehtestatud raievanusest. Näiteks hall-lepikute arvestuslik raiering on 35 aastat, kuid männikutel ca 90-100 aastat. Ühtlane kasutus on ideaalne selleks, et saaksime pikaaegselt raiuda samas mahus. Eestis on raieküpsset metsa palju ja seega eriti selle stsenaariumi alguses tekib raieküpsset ja vanemat metsa juurde.
- 4) Metsade tagavara ei muutu stsenaariumi korral arvutati raiemahud nii, et metsade tagavara jääb ajas samaks ja raiemahud on arvestatud vastavalt sellele. Seega on raiemaht selles stsenaariumis sama suur kui netojuurdekasv.

Uuendusraiete puhul raiutakse kõikides stsenaariumites ainult küpsset metsa. Kaitsemetsade raiel lähtuti ühtlasest kasutusest ja rangelt kaitstavas metsas raied ei tehta. Kõik stsenaariumid on arvestatud ilma kliimamuutuste ja võimalike muutuvate metsamajandamisvõtete mõjudeta ning oletades, et metsa kasvukiirus jääb samaks. Metsamaa pindala suurenemist metsa tagavara arvutamises ei arvestatud. Metsamaa praeguse suurenemise jätkumine, nii umbes 1000 hektarit (500 ha kuusikuid, 250 ha männikuid ja 250 ha kaasikuid) igal aastal mittemetsamaa arvelt, hakkab mõju avaldama 30-40 aasta pärast.

Tabel 1. Majandatava metsa võimalik aastane uuendusraiete pindala ja raiemaht (miljonit tm)

Periood	Arvestuslank		Küpsusraie		Ühtlane raie		Tagavara ei muutu	
	Pindala	Raiemaht	Pindala	Raiemaht	Pindala	Raiemaht	Pindala	Raiemaht
	1000 ha	milj. tm	1000 ha	milj. tm	1000 ha	milj. tm	1000 ha	milj. tm
2021-2030	37.5	11.8	55.9	17.7	28.2	8.7	29.2	9.0
2031-2040	32.2	9.9	25.4	7.7	28.2	8.6	29.2	8.9
2041-2050	28.3	8.7	27.9	8.4	27.7	8.5	29.0	8.9
2051-2060	26.1	8.0	23.0	7.0	25.9	7.9	29.2	8.9
2061-2070	26.0	8.0	25.7	7.8	27.9	8.6	27.9	8.6

2071-2080	24.6	7.6	21.5	6.8	27.9	8.6	26.9	8.3
2081-2090	23.3	7.1	21.7	6.6	26.4	8.1	26.7	8.2
2091-2100	25.0	8.0	26.7	8.6	24.7	7.8	26.3	8.3
2101-2110	28.8	8.9	35.7	10.9	27.8	8.5	27.1	8.3
2111-2120	29.7	9.2	30.1	9.5	27.3	8.4	27.0	8.3
Kokku	2815	872	2936	910	2720	837	2785	857
Keskmine	28.2	8.7	29.4	9.1	27.2	8.4	27.8	8.6

Kuigi lähitulevikuks annavad stsenaariumid küllaltki erinevaid raienumbreid, siis perioodi lõpu poole toimub lähenemine kõigis stsenaariumites peale ühtlase raie stsenaariumi, kus uuendusraiate maht jääb ühe miljoni tihumeetri allapoole võrreldes teiste stsenaariumitega. Olukorras kus metsa kasvukiirus on aastas 0.1% kiirem (Lisa, Tabel L3), arvestatakse, et stsenaariumis, kus metsa tagavara jääb samaks, suureneb ka uuendusraiate maht. Perioodi viimseks kümnendiks on see 1.2 miljonit tm suurem ning kogu perioodi keskmine lageraie maht suureneb 0.4 miljonit tm võrra. Teistele stsenaariumite raiemahtudele see olulist mõju ei avalda küll aga tagavara suurenemisele. Kasvukiiruse suurenemist hakatakse arvestama perioodi esimesest aastast ja seega juba toimunud kasvu kiirenemist vaadeldud stsenaariumites ei arvestata, mis vähendab juurdekasvu numbreid,

Tabelis 2 on uuendusraie mahtudele (tabel 1) lisatud harvendusraied (tabel 3) ning muude raiete (eelkõige sanitaarraiate) mahud. Muude raiete suurus on iga üksiku stsenaariumi korral muutumatu, kuid on erinev eri stsenaariumite korral ja sõltub uuendusraiate intensiivsusest. Arvestuslangi korral on muude raiete maht 0,4 miljonit tm aastas, küpsusraie korral 0,3 miljonit tm aastas ning ühtlase raie ja tagavara ei muutu stsenaariumite korral 0,5 miljonit tm aastas. Ka stsenaariumis, kus metsa tagavara jääb samaks ning metsa kasvukiirus on aastas 0.1% kiirem perioodi viimseks kümnendiks koguraiete maht 1.2 miljonit tm suurem (Lisa, Tabel L4). Umbes 0,5 miljonit tm surnud metsa raiutakse ja veetakse metsast välja igal aastal; ülejäänud jääb metsa.

Tabel 2 Kõik raied kokku (miljon tm)

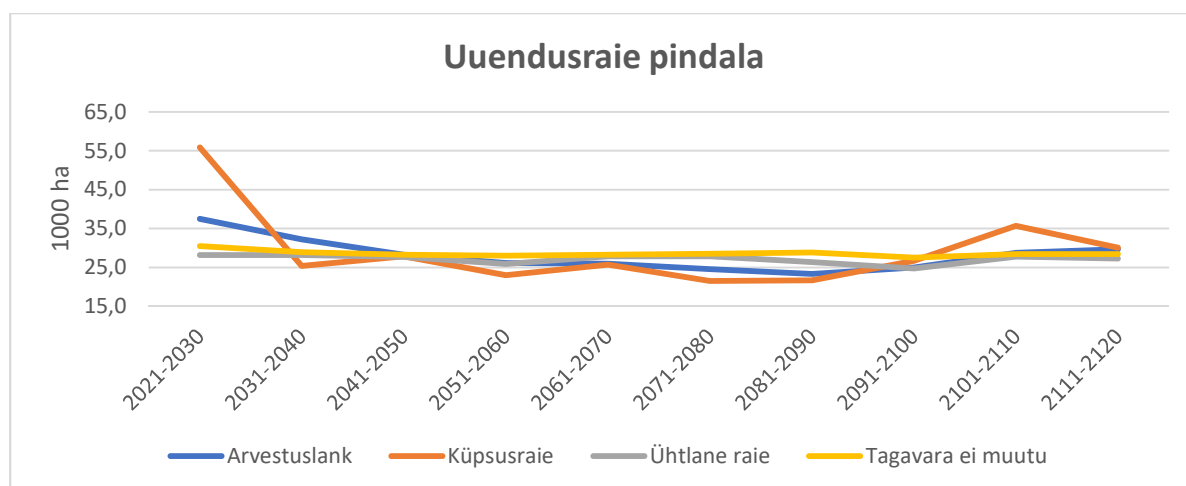
Aasta	Arvestuslank	Küpsusraie	Ühtlane raie	Tagavara ei muutu
2020	14.3	20.1	11.3	11.6
2030	12.1	9.8	10.9	11.2
2040	10.8	10.4	10.7	11.1
2050	10.3	9.5	10.2	11.2
2060	10.8	10.8	11.2	11.2
2070	10.7	10.1	11.4	11.1
2080	10.4	10.1	11.1	11.2
2090	11.3	11.8	10.9	11.4
2100	12.0	13.8	11.6	11.4
2110	12.1	12.1	11.5	11.4

Tabel 3. Harvendusraied (miljonit tm)

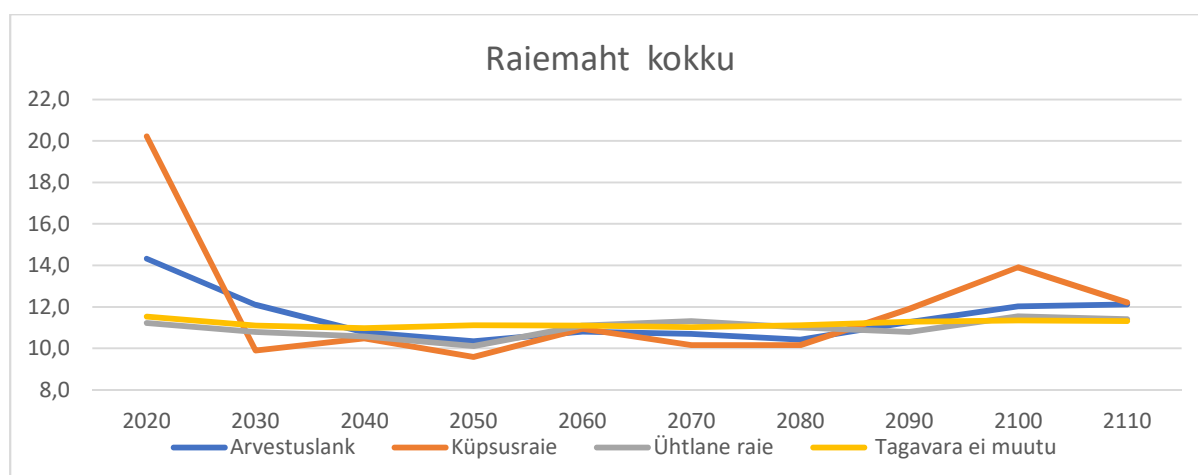
Aasta	Arvestuslank	Küpsusraie	Ühtlane raie	Tagavara ei muutu
2020	2.1	2.1	2.1	2.1
2030	1.8	1.8	1.8	1.8
2040	1.7	1.7	1.7	1.7
2050	1.9	2.2	1.8	1.8
2060	2.4	2.7	2.1	2.2
2070	2.7	3.0	2.3	2.6
2080	2.9	3.2	2.5	2.9
2090	2.9	2.9	2.6	2.9
2100	2.7	2.6	2.6	2.7
2110	2.5	2.3	2.6	2.6
2120	2.4	2.3	2.6	2.5

Joonistel 7 ja 8 on antud uuendusraie pindalad (1000 ha) ja raiemahud (miljonit tm kõik raied kokku) graafilisel kujul.

Joonis 7



Joonis 8



Metsa vanuse prognoosimisel lähtuti eeldusest, et metsa pindala ei muutu ja raiesmikud uuenevad seal varem kasvanud puude liikidega. Rangelt kaitstava metsa puhul eeldati, et see lihtsalt vananeb. Metsa juurdekasvu ja tagavara prognoosimiseks leiti Eesti statistilise metsainventuuri (SMI, 2017)¹⁸ andmete alusel vanuseklasside keskmised hektaritagavarad ja juurdekasvud enamuspüüliikide ja boniteediklasside lõikes (praegu kasutusel olevad raievanused ja diameetrid on toodud Lisas, Tabelid L1 ja L2). Konkreetset juurdekasvu ja tagavarad mingil ajahetkel leiti korrutades juurdekasvu või tagavara numbri läbi vanuseklassi pindalaga. Eeldati, et mingi puuliigi ja boniteediklassi piires sama vanuseklassi juurdekasv ning tagavara ajas ei muutu.

Umbes 13% metsast on range kaitse all ja seal majandustegevust ei toimu. Samas on need osa Eesti metsa tervikust. Tabelis 4 ja joonistel 9 ning 10 on antud kogu metsa tagavara ja juurdekasv juhul, kui majandatavaid metsi raiutakse stsenaariumite järgi ja rangelt kaitstavad arenevad oma loomulikku rada. Siin tuleb arvestada, et suur osa rangelt kaitstavat metsa, eriti lehtpuupuistud ja viljakad kuusikud, ületavad oma bioloogilise ea piiri, mistõttu nende tagavara ja juurdekasvu prognoosimine on väga problemaatiline. Sellises vanuses ja seisundis metsa kohta andmed praktiliselt puuduvad. Tagavara juurdekasv on suurim ühtlase raie puhul.

Aasta	Raie arvestuslangi järgi			Küpsusraie			Ühtlane raie			Tagavara ei muutu		
	Taga vara	Juurd ekasv	Neto juurde kasv ¹⁹	Taga vara	Juurd ekasv	Neto juurd ekasv	Taga vara	Juurd ekasv	Neto juurd ekasv	Taga vara	Juurd ekasv	Neto juurd ekasv
2020	486	16.0	11.9	486	16.0	11.9	486	16.0	11.9	486	16.0	11.9
2030	456	14.4	10.8	393	12.8	9.8	489	15.2	11.3	486	15.0	11.2
2040	442	14.0	10.6	396	13.4	10.4	492	14.8	11.1	486	14.7	11.0
2050	442	14.1	10.8	399	14.1	11.0	497	14.7	11.1	486	14.5	11.0
2060	449	14.6	11.2	417	14.8	11.5	506	14.9	11.2	486	14.3	10.8
2070	454	14.7	11.4	424	14.9	11.6	506	14.6	11.2	486	14.6	11.2
2080	461	14.8	11.5	440	15.2	11.8	504	14.4	11.2	486	14.6	11.3
2090	473	15.2	11.7	458	15.5	12.0	505	14.6	11.4	486	14.6	11.3
2100	477	15.1	11.6	458	15.1	11.6	510	14.8	11.5	486	14.5	11.3
2110	472	14.7	11.4	432	14.1	11.0	509	14.7	11.4	486	14.8	11.5
2120	464	14.4	11.2	421	13.9	10.9	508	14.7	11.4	486	14.7	11.4

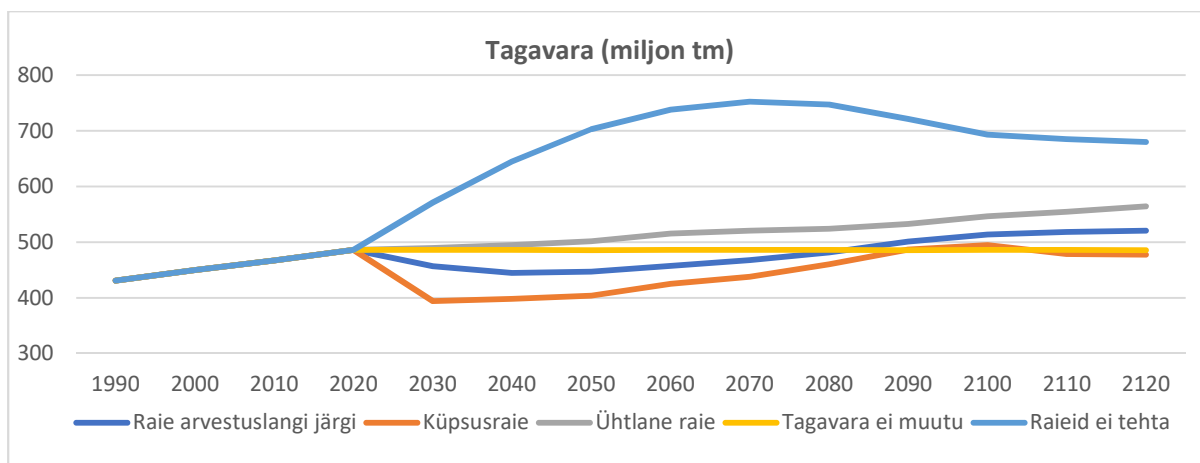
Tabel 4. Muutused metsa tagavaras, juurdekasvus²⁰, netojuurdekasvus (miljon tm) erinevate raiestsenaariumite korral

Joonis 9

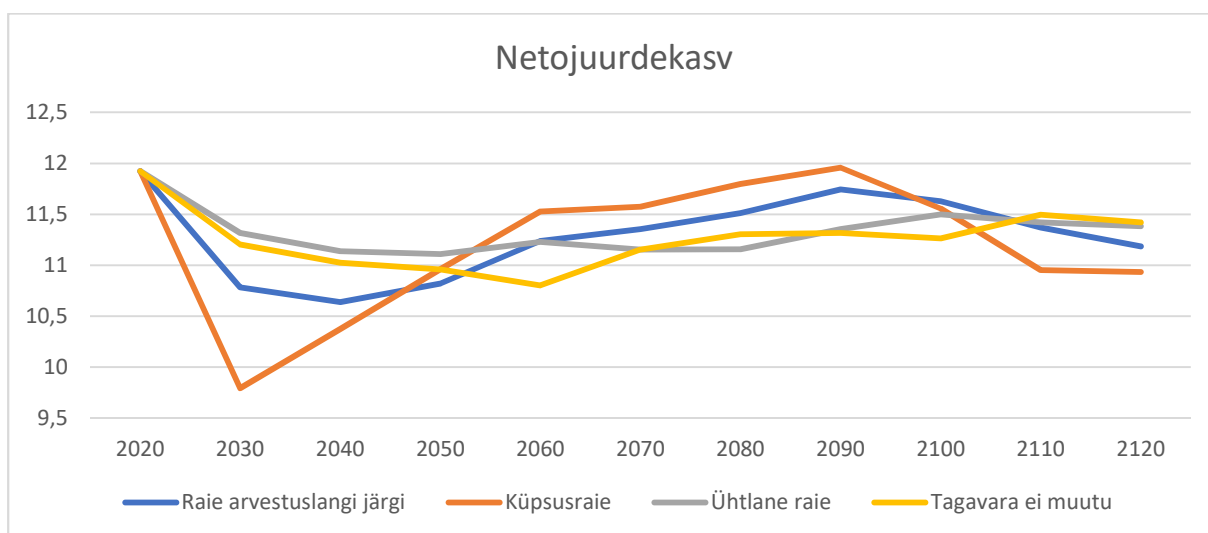
¹⁸ <https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/eesmargid-tegevused/mets/smi>

¹⁹ Tagavara muut ehk netojuurdekasv (*net annual increment*) näitab puistu tagavara reaalselt suurenemist aastas. Jooksvast juurdekasvust on maha arvatud looduslikult väljalangev puidukogus.

²⁰ See on arvestuslik aastane jooksev juurdekasv 10 aastaseks perioodiks. Näiteks 2110 a. 14,1 miljonit tm näitab, et aastatel 2110-2119 on aastane juurdekasv keskmisena 14,1 miljonit tm.



Joonis 10



Kuna Eestis on küpsset metsa palju, siis küpsusraie stsenaarium toob esialgu kaasa juurdekasvu vähenemise ja sajandi teisel poolel, kui uue noore metsa kasvukiirus suureneb, siis juurdekasv ületab teiste stsenaariumite juurdekasvu sajandi teisel poolel. Sajandi lõpus, kui mets jälle küpseb, siis juurdekasv jällegi aeglustub ja väheneb.

Tabel 5 toob ära metsa tagavara muutumise sellise stsenaariumi korral, kui igasugune metsa majandamine peatada (lisaststsenaarium). Algul tagavara hoogsalt suureneks (aastaks 2070 750-800 miljonit tm), siis stabiliseeruks ja seejärel hakkaks see aeglaselt vähenema.

Aasta	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	2120
Raieid ei tehta	486	571	645	703	738	752	747	721	693	685	680

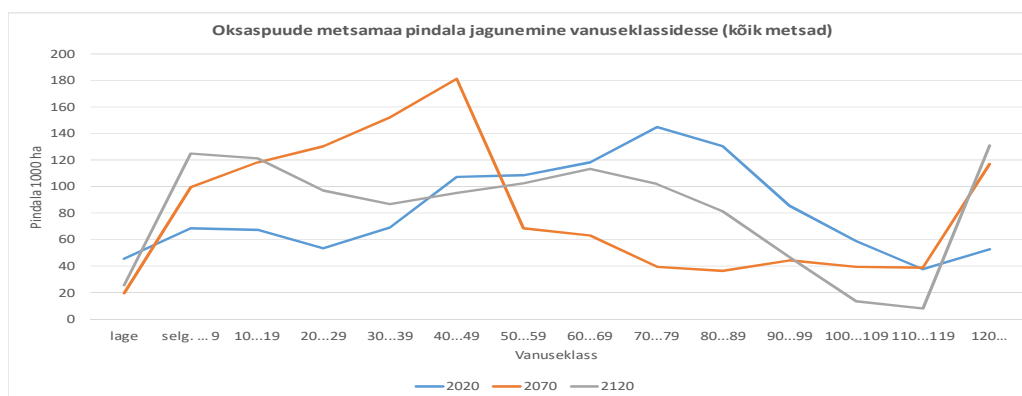
Tabel 5. Metsatagavara (miljonit tihumeetrit)

Järgnevatel joonistel (11 ja 12) on antud metsade vanuseline jaotus praegu ja aastal 2070 ning 2120. Eraldi on antud okas- ja lehtpuupuistute vanuseline jagunemine (raie arvestuslangi järgi). Joonistel ei kajastu vähemlevinud puuliikide ja Va boniteediklassi²¹ puistud.

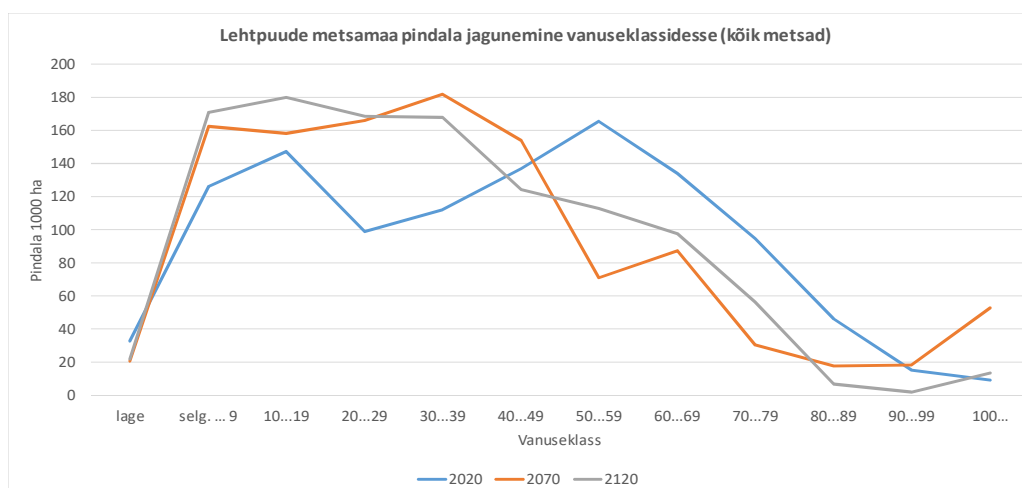
Kui võrrelda metsa vanuselist jagunemist praegu ning 50 ja 100 aasta möödudes, siis võib välja tuua kaks olulist erinevust. Tänapäevast erinevalt enam on noori ja väga vanu metsi. Majandatavad metsad on praegusest keskmiselt nooremad, rangelt kaitstavad metsad aga vanad. Joonisel 13 on metsa aastane tagavara netojuurdekasv kuupmeetrites hektari kohta liigiti (kuusk I, mänd ja kask II boniteediklass), mis näitab, et metsa vananedes netojuurdekasv ja seega ka CO₂ aastane sidumine väheneb.

Siinjuures tuleb aga veelkord rõhutada, et kogu eelnev analüüs lähtub konkreetsetest eeldustest ja stsenaariumidest ning ei arvesta metsamajandamise meetodite muutustega ega ka kliimamuutuste ning võimalike võõrliikide ja haiguste mõjudega. Tegelik elu ja loodus on palju mitmekesisemad ja ettearvatumad.

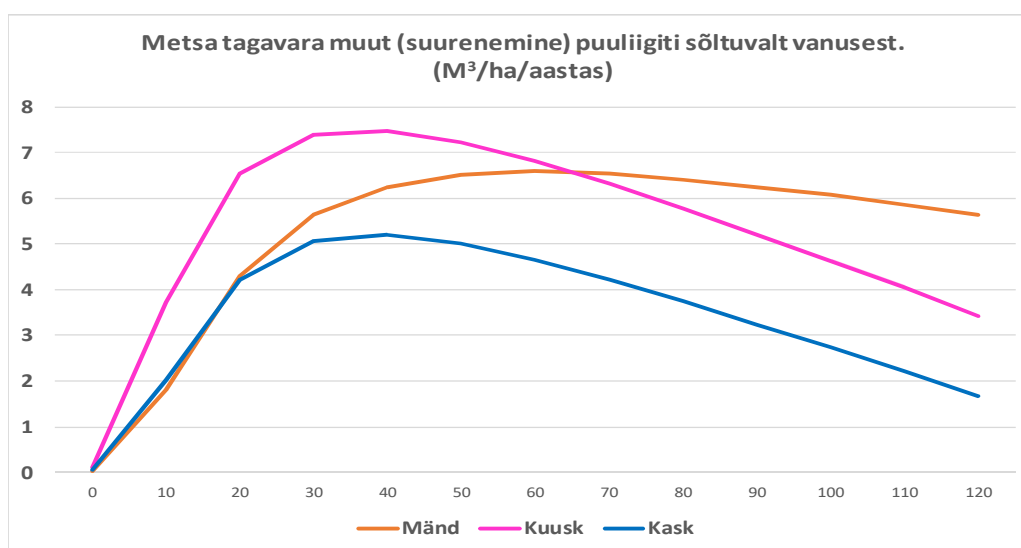
Joonis 11



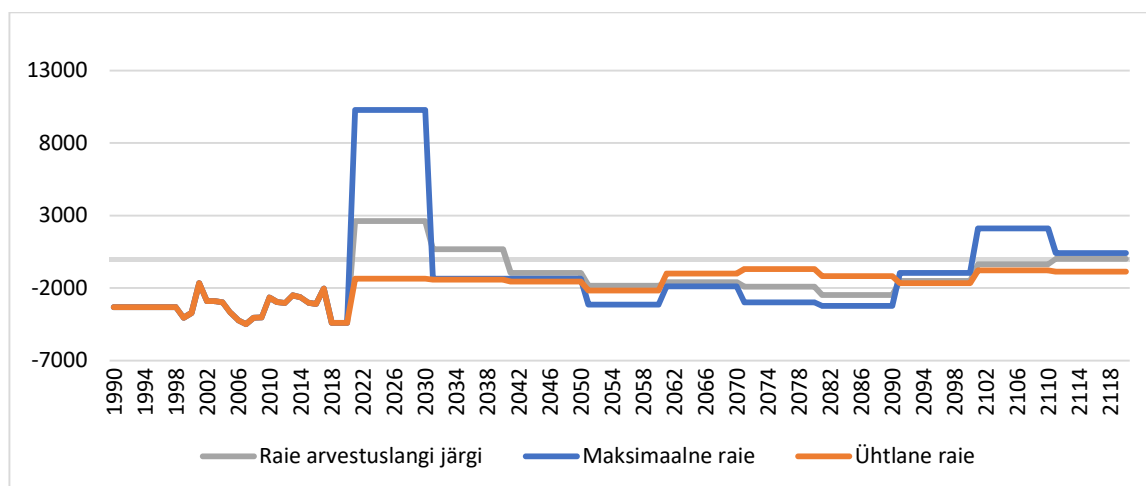
Joonis 12



²¹ Va boniteediklassi kasvavad eriti väheviljakatel muldadel (raba, toitainete vaene liiv, alvarid) ja nende kõrgus uuendusraieküpses eas ei ületa 10-12 meetrit. Majanduslikku tähtsust neil ei ole, mistõttu neid uuendusraie arvestusse ei kaasata.



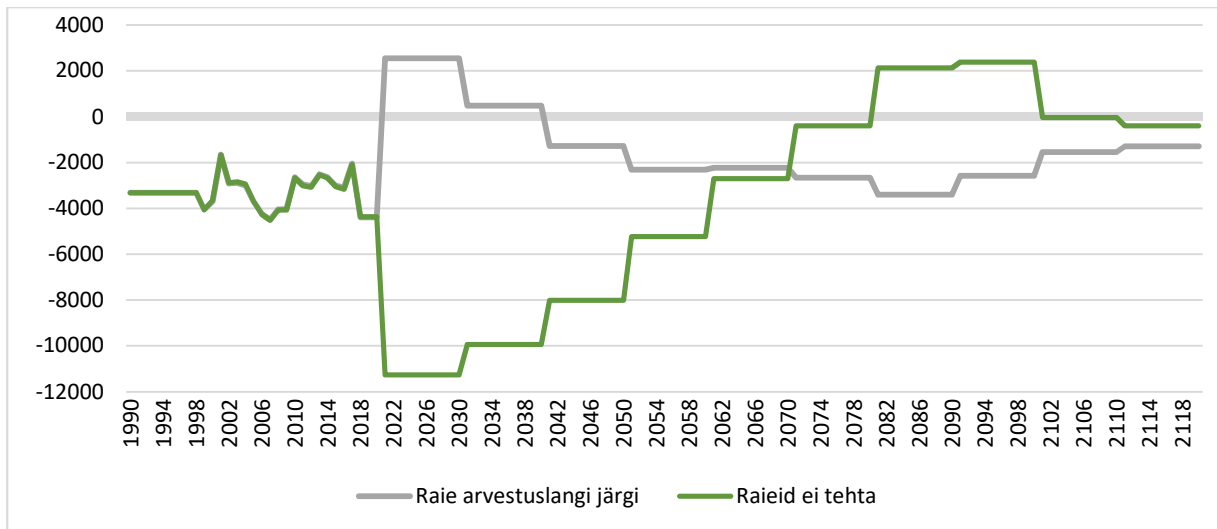
Kliimamuutuste leevendamise kohapealt on oluline metsa ja metsamaa aastane CO₂ sidumine ja see, et juba talletatud süsinik ei vabaneks. Aastane süsinikdioksiidi sidumine, mida hinnatakse LULUCF metoodika alusel (peamiselt - IPCC, 2006), on olnud arvestuslikult 1,6 kuni 4,5 miljoni tonni (ajaperioodil 1990 – 2017). 2017. aastal oli metsa KGH-de sidumine -1947.08 kt CO₂-e ja koos HWP-ga oli see number -3 089.98 kt CO₂-e (NIR, 2019). Tulevikku vaadates annab siin parima tulemuse ühtlase raie stsenaarium, mille käigus on aasta-aastalt süsiniku sidumine²² suurem kui selle vabanemine ning samuti suureneb metsa tagavara ja seal talletatud süsinik järk-järgult.



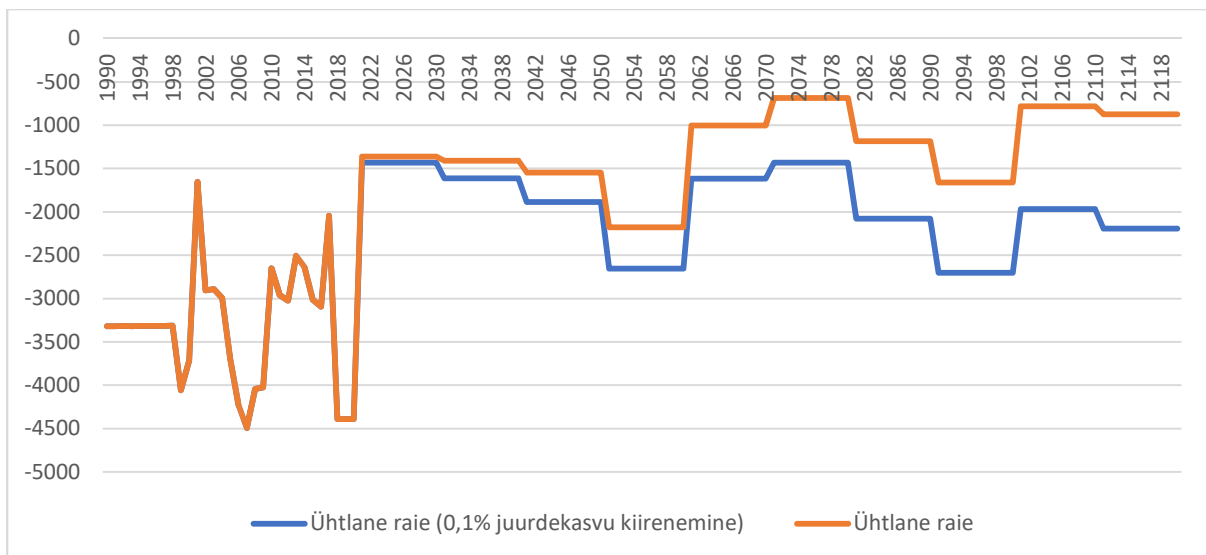
Joonis 13. Süsiniku emissioonid LULUCFi arvestuse järgi (tuh. tonni CO₂)

Kui metsa ei raiuta, siis sellise stsenaariumi korral hakkab metsa tagavara netojuurdekasv sajandilõpu poole vähenema ja sellega kaasnevad ka suuremad metsamaterjali lagunemisega kaasnevad emissioonid, mis ületavad CO₂ sidumise kasvava metsa poolt (joonis 14)..

²² Mullas ja surnud puidus ladestunud CO₂ kogust arvestusperioodiks on hinnatud referentsperioodi (2000-2009) keskmise CO₂ sisalduse alusel hektari kohta. Arvestatakse kõiki reservuaare: biomass (maa-alused ja maa pealsed osad), mineraalne ja orgaaniline (turvas) muld ja lagupuit (IPCC järgi peaks olema ka varis, aga neid andmeid veel ei ole).



Joonis 14. Süsiniku emissioonid LULUCFi arvestuse järgi (tuh. tonni CO₂)



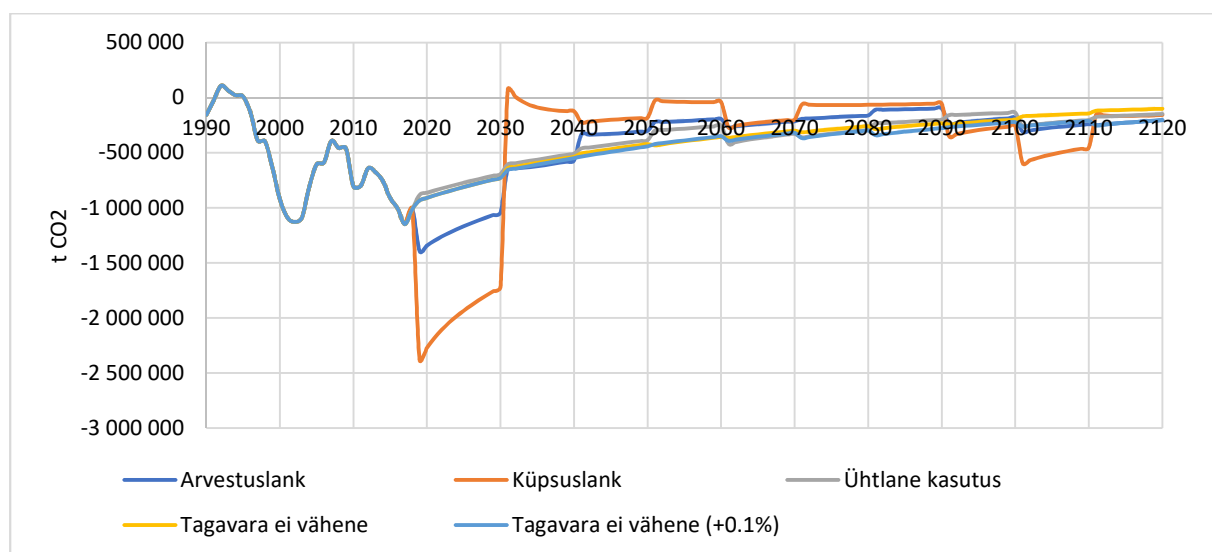
Joonis 15. Süsiniku emissioonid LULUCFi arvestuse järgi (tuh. tonni CO₂)

Kui metsa kasvu kiirenemist arvestada (0.1% aastas alates 2020 aastast) siis ühtlase raie stsenaariumi korral metsa tagavara juurdekasv suureneb ja süsiniku aastane sidumine on lähedasem ajaloolistele numbritele sarnaste raiemahtude juures (joonis 15).

Lisaks kasvavale metsale talletatakse süsinikku lühema või pikema elueaga metsa raiumisel saadud puittoodetesse (HWP). HWP arvutused on siin tehtud 2013. aasta IPCC kasvuhoonegaaside inventuuri juhendi järgi (IPCC, 2014 - peatükk 2.8). Selle meetoodika kohaselt arvutatakse puittoodetesse seotud süsinik pooltoodete tasemel ja seega eeldatakse, et iga lõpptoode läbib ka pooltoote staadiumi.

Puittooted on jaotatud kolme kategooriasse, millel igal ühel on oma poolestusaeg ehk aeg kui toode kaotab poole oma esialgsest kogusest: saematerjalil on see 35 aastat, puitplaatidel 25 aastat ning paberil ja papil kaks aastat. Arvesse on võetud ainult pooltooteid, mis on toodetud Eestist pärit puidust ja arvesse ei lähe raadatud aladelt varutud puidust valmistatud tooted. Arvutati seotud süsiniku aastane muut igas puittoodete grupis, arvestades talletatud süsinikku ja ka toodete lagunemist.

Et teha HWP tulevikuprognose, on vaja oletada tuleviku tootmis- ja väliskaubandusmahte. Tootmismahud leiti vastavalt viimase viie aasta keskmise raiemahu ja tootmismahude suhetele. Väliskaubanduse suhtarvudena (kohaliku puidu kasutus, IPCC juhendist valem 2.8.1) kasutati samuti viimase viie aasta keskmist. Eeldati, et jätkub samasugune puidu kasutus sisemiselt ning samasugune palgi ja paberipuu (tööstuslik ümarpuit) väljatulek (~70%) raiest ning sama efektiivsus tööstustes nagu seda on olnud viimase viie aasta keskmiselt. Vastavalt eelnevale jaguneb süsiniku aastane sidumine puittoodetesse aastatel 2020-2120 järgnevalt: saematerjal 65,0%, puitplaadid 19,5%, paber ja pabertooted 3,8%, puitmass 11,6%. Kui teha jaotus puittoodetes kokku talletatud süsiniku põhjal oleksid osakaalud: saematerjal 79,4%, puitplaadid 19,2%, paber ja pabertooted 0,4%, puitmass 1,1%. On tõenäoline, et tulevikus tootmine muutub efektiivsemaks ja seega võib arvata, et tootmismahude ja sellest tulenevalt ka süsiniku sidumist on arvestatud pigem konservatiivselt.



Joonis 16. Süsinikdioksiidi aasta-aastane sidumine puittoodetes või emissioonid puittoodetest erinevate raiestsenaariumite korral.

Perioodi alguses (2018-2030) on raiemahu suurendamisel maksimaalse raieni märkimisväärne positiivne mõju puittoodetes talletatava CO₂ sidumisele (kuni 2,3 miljonit tonni aastas), mis aga järgneval paaril aastal (2030-ndate alguses viib ajutiselt CO₂ emissioonide suurenemisele (kuni 66,7 tuhat tonni aastas) toodete lagunemisest (joonis 16). Ka on siin töös kasutatud teistes stsenaariumites on üldjuhul perioodi esimese kümnendi (2020-2030) raiemahud suuremad kui aastakümnete jooksul pärast seda. Tulenevalt sellest on ka puidutoodete esialgsed tootmismahud suuremad. Kui hiljem tootmismahud vähenevad, siis ei pruugi täiendav tootmine enam puittoodete lagunemist ületada. Praeguste toodete jaotuse püsimisel läheneb HWP kõikide stsenaariumite korral nullile kuna süsiniku sidumine ja emissioonid tasakaalustuvad.

Ühtlase kasutuse stsenaarium annab stabiilseima tulemuse uuringuperioodi jooksul ilma, et ühelgi aastal puittoodete lagunemisest tekkiv CO₂ ületaks selle sidumist toodetesse. Samas ei arvesta ühtlase kasutuse stsenaarium metsade vanuselist jagunemist. Seetõttu ei kasutata olemasolevat ressursi tõhusalt ära, kuna osa raieküpsset metsa jääb kasutamata, mistõttu

võib väheneda metsast saadava puidu kvaliteet mis omakorda mõjutab puidu kasutuse otstarvet ja puittoodete eluiga.

Osaliselt on praegune suurem süsiniku sidumine puittoodetes põhjustatud 90-ndate väiksematest tootmismahitudest. Toodetes talletatud süsiniku kogus oli väike ja tulenevalt sellest on ka lagunemise maht olnud väike. Täiendav süsiniku sidumine puittoodetesse kaugemas tulevikus saaks toimuda vaid tootmise pideval suurenemisel. Viimastel kümnenditel on Eesti eksportinud suure osa paberipuidust ja stsenaariumites on arvestatud, et nii jääb see ka tulevikus.

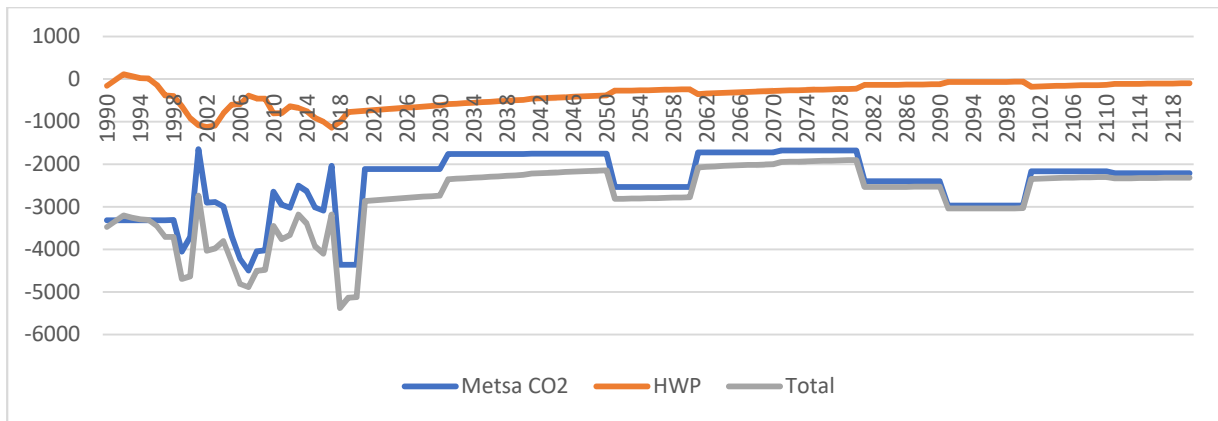
Tulevikus paberipuidu väärindamisel Eestis suureneks ka HWPs arvestatav süsiniku kogus. Samuti aitaks olukorda parandada kui toota rohkem ja ka efektiivsemalt pikemaajalisi puittooteid. Süsiniku toodetesse sidumist saaks suurendada ka erinevate metsakasvatustlike võtetega, mis soodustavad kvaliteetse puidu osakaalu suurenemist. Olulise lisamõju puidukasutusele annab ka asendusefekt. Pikas perspektiivis tuleb puittoodete kasu just sellest, et täiendatavat süsinikku maapõuest ei vabastata.

6. Järeldused ja kokkuvõte

Bioenergia kasutamisest, metsa ja muude ökosüsteemide süsiniku sidumise suurendamisest ning maa ja metsaga seotud emissioonide vähendamisest üksi ei piisa kliimamuutuste leevendamiseks ei Eestis, ega ka kogu maailmas. KHG emissioone on vaja kiiresti vähendada kõigis sektorites ja eluvaldkondades. Eestis oli 2017. aastal energia tootmise ja kasutamisega seotud 89% riiklikest KHG emissioonidest, LULUCF poolt seotud emissioonid olid võrdelised 8,9%-ga. Kui metsa iga aastast süsiniku sidumist suurendada, näiteks kaks või kolm korda, siis sellest ei piisaks praeguste energiaga seotud emissioonide kompenseerimiseks. Kui muudes sektorites emissioone kiiresti ei vähendata, siis maale ja metsale tekkivad kahjustused suurenevad ja see omakorda vähendab süsiniku sidumist ja võimendab kliimamuutusi.

Vaatluse all oli neli Eesti metsa tuleviku stsenaariumit järgmiseks sajaks aastaks, mis erinevad üksteisest uuendusraiate arvestuse poolest ning ka stsenaarium kus raied ei tehtud. Mets on väga keeruline süsteem, kus muutujaid palju (sealhulgas kliimamuutuste mõjud ja metsamajandamise võtted) ja nende omavahelised seosed on mitmekesised. Seega on sellised prognoosid paratamatult väga suure võimaliku veaga ning lähtuda tuleks eelkõige trendidest. Suure tõenäosusega hindavad kõik vaadeldud stsenaariumid metsa juurdekasvu alla samal ajal ei arvesta nad aga kliimamuutuste negatiivsete mõjudega metsadele. Seega oletati, et need mõjud tasakaalustavad teineteist, mis aga ei pruugi nii olla.

Arvestades süsinikubilanssi, metsatööstuse varustatust puiduga, metsa tagavara ja vanuselise jaotuse muutusi võiks aastane keskmine raiate maht kokku olla 10-12 miljonit tihumeetrit. Vaadeldud stsenaariumite korral võiks uuendusraiate maht raieringi jooksul keskmiselt olla 8-9 miljonit tihumeetrit aastas. Selliste aastaste keskmiste raiemahtude juures peaks metsa tagavara jääma kas samaks või suurenema sõltuvalt metsa juurdekasvu stsenaariumist. Ja seega toimub aasta-aastalt süsiniku sidumine metsas (joonis 17). Arvestades, umbes 47% majandavast metsast on raieküps või valmiv peab eeltoodud raiemahtude juures aga jälgima, et uuendusraiate puhul raiutaks raievanuse saavutanud või vanemat metsa ning, et raiate tegemisel jälgitakse raieliikide ja raiutavate puuliikide optimaalset vahekorda.



Joonis 17. Süsinikdioksiidi aastane sidumine puittoodetes (HWP) ja metsas ühtlase raie stsenaariumi korral (tuh. tonni CO₂).

Kui metsa üldse ei raiuta, siis on lähiaastakümnetel süsiniku sidumine suurem kui uuritud raiestsenaariumite korral, aga selle sajandi lõpukümnetel võib aastane orgaanilise materjali suuremine ja lagunemine ületada süsiniku sidumist. Kui raiuda küpsusraie alusel, siis tekivad lähiaastakümnetel metsaga seotud iga-aastased süsiniku emissioonid, mis viiksid ka Eestis maakasutuse, maakasutuse muutuse ja metsanduse sektori (LULUCF) emiteerijaks kuni aastani 2040. Seejärel lähevad süsiniku emissioonid jälle nulli ja tulevikus ületavad ühtlase raie stsenaariumi korral seotavad emissioonid. Ühtlase raie stsenaariumi korral on iga-aastane süsiniku sidumine parim (joonis 17). Eestis on raieküpset metsa palju ja selle stsenaariumi puhul tekib raieküpset ja vanemat metsa juurde, mille tõttu võib väheneda metsa vastupanu võime, näiteks haigustele ja tormidele.

Kõikides stsenaariumites on oletatud, et raiutakse ainult küpset metsa. Ainult küpsusraie stsenaariumi korral oleks raievanuse suurendamisel oluline positiivne efekt süsiniku sidumise ja talletamise koha pealt. Kõigi teiste metsa stsenaariumite järgi, raievanuse suurendamine ei annaks sama suurt võitu süsiniku sidumises, sest suures osas raiutakse metsa, mis on juba vanem, kui selle raieküpsus iga (Lisa, Tabel L1). Küpsusraie stsenaarium ei ole aga mõeldav kuna 2021-2030 kaasneks sellega umbes 10 miljoni tonni suurused aastased CO₂ emissioonid Eesti metsast (see on võrdeline umbes poole Eesti KGH emissioonidega 2017. aastal ilma LULUCF-ta).

Arvestades, et Eesti metsade süsiniku sidumise ja talletamise võime numbrites on suhteliselt palju määramatust, osaliselt Eesti asumisest hemiboreaalses kliimavöötmes, mille kohta on suhteliselt vähe uuringuid, ja sellega kaasnevatest riigi sisestest piirkondlikest erinevustest, võiks kaaluda detailsema arvestusmeetodi arendamist ja kasutusele võttu.

Kui vaadelda tänaseid Eesti kliimapoliitika kohustusi (mis toetavad läbi Euroopa liidu kliimapoliitika Pariisi lepe eesmärke) metsa stsenaariumite valguses, siis kõikide stsenaariumite korral on Eestile võetud metsaga seotud kliimamuutustega kohanemise eesmärk 2030. aastaks suure tõenäosusega täidetud. See eesmärk näeb ette metsa aastase juurdekasvu suurenemist 12.9 miljonilt tm-lt (2014) 14.2 kuni 15.5 miljoni tm-ni (ehk siis 10-20%) aastaks 2030. Ka peale 2030. aastat on enamikes stsenaariumites sarnase taseme hoidmine võimalik, kui ei teki kliimamuutustest põhjustatud kahjustusi, mis metsa juurdekasvu vähendavad. Seega on oluline, et jälgitakse ja ennetatakse kliimamuutustest

tulenevaid mõjusid metsale, näiteks hävitatakse uute haiguse kolded koheselt, ning aidatakse metsal toimuvate muutustega kohaneda ja kõiki jätkusuutliku metsa funktsioone säilitada. Hooajalised (regionaalsed) ilmaprognoosid ja varajased hoiatussüsteemid on olulised õigete majandusvõtete kasutamiseks, mis aitavad säilitada elurikkust ning ennetada ja vähendada kahjurite ja haiguste levikut ning metsal kohaneda kliimamuutustega.

Samuti toetaks ühtlase raie stsenaarium Eesti kliimamuutuste leevendamise eesmärgi ning majandatava metsamaa süsiniku sidumise võrdlustase (aastatel 2021-2025 koos puittoodetega (HWP) -1,75 Mt CO₂-e ja ilma -1,33 Mt CO₂-e aastas) oleks saavutatud. Siinjuures tuleks muidugi arvestada ka teisi metsaga seotud kliimamuutuste leevendamise eesmärgi (näiteks suurenenud asendusefekt bioenergia ja kvaliteetsete puittoodete kasutamisest, mis toetab kasvuhoonegaaside vähendamist teistes sektorites) ning järgida jätkusuutliku metsamajandamise põhimõtteid, mis mh aitaks ka metsal kliimamuutustega kohaneda. Seega on oluline, et justnimelt Eesti päritolu puit (biomass) asendaks kodumaiste fossiilsete kütuste ja fossiilenergia-mahukate materjalide kasutamist Eestis. Siin on oluline arvestada kogu elukaare emissioone ja ka teisi keskkonna mõjusid.

Kasutatud kirjandus

Ahti, T., Hämet-Ahti, L. & Jalas, J. (1968). Vegetation zones and their sections in northwestern Europe. *Ann. Bot. Fennici*, **5**, 169–211.

Alexandratos, N. and Bruinsma, J., 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03, *Agricultural Development Economics Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations*, pp 147.

Anderegg, W.R., Ballantyne, A.P., Smith, W.K., Majkut, J., Rabin, S., Beaulieu, C., Birdsey, R., Dunne, J.P., Houghton, R.A., Myneni, R.B. and Pan, Y., 2015. Tropical nighttime warming as a dominant driver of variability in the terrestrial carbon sink. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**(51), pp.15591-15596.

Arneth, A., Harrison, S.P., Zaehle, S., Tsigaridis, K., Menon, S., Bartlein, P.J., Feichter, J., Korhola, A., Kulmala, M., O'donnell, D. and Schurgers, G., 2010. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system. *Nature Geoscience*, **3**(8), p.525.

Assmuth, A., Rämö, J. and Tahvonen, O., 2017. Economics of size-structured forestry with carbon storage. *Canadian Journal of Forest Research*, **48**(1), pp.11-22.

Bala, G., Caldeira, K., Wickett, M., Phillips, T.J., Lobell, D.B., Delire, C. and Mirin, A., 2007. Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**(16), pp.6550-6555.

Bauer, N., Rose, S.K., Fujimori, S., Van Vuuren, D.P., Weyant, J., Wise, M., Cui, Y., Daioglou, V., Gidden, M.J., Kato, E. and Kitous, A., 2018. Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. *Climatic Change*, pp.1-16.

BC Forestry Climate Change Working Group and the California Forestry Association in cooperation with WoodWork. 2009. *Tackle Climate Change Use Wood. From:*

<http://www.softwoodlumber.org/pdfs/Book Tackle Climate Change Use Wood eVersion .pdf>

Bodirsky, B.L., Popp, A., Lotze-Campen, H., Dietrich, J.P., Rolinski, S., Weindl, I., Schmitz, C., Müller, C., Bonsch, M., Humpenöder, F. and Biewald, A., 2014. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution. *Nature communications*, 5, p.3858.

Bonsch, M., Humpenöder, F., Popp, A., Bodirsky, B., Dietrich, J.P., Rolinski, S., Biewald, A., Lotze-Campen, H., Weindl, I., Gerten, D. and Stevanovic, M., 2014. Trade-offs between land and water requirements for large-scale bioenergy production. *Gcb Bioenergy*, 8(1), pp.11-24.

Boysen, L.R., Lucht, W., Gerten, D., Heck, V., Lenton, T.M. and Schellnhuber, H.J., 2017. The limits to global-warming mitigation by terrestrial carbon removal. *Earth's Future*, 5(5), pp.463-474.

Brack, D., 2019. *Forests and Climate Change; Background study prepared for the fourteenth session of the United Nations Forum on Forests*.

Bright, R.M., Zhao, K., Jackson, R.B. and Cherubini, F., 2015. Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities. *Global change biology*, 21(9), pp.3246-3266.

Buchanan, a H. and Levin, S.B., 1999. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science and Policy*, 2, pp.427–437.

Buchholz, T., Hurteau, M.D., Gunn, J. and Saah, D., 2016. A global meta-analysis of forest bioenergy greenhouse gas emission accounting studies. *Gcb Bioenergy*, 8(2), pp.281-289.

Büntgen, U., Krusic, P.J., Piermattei, A., Coomes, D.A., Esper, J., Myglan, V.S., Kirilyanov, A.V., Camarero, J.J., Crivellaro, A. and Körner, C., 2019. Limited capacity of tree growth to mitigate the global greenhouse effect under predicted warming. *Nature communications*, 10(1), p.2171.

Cayuela, M.L., Van Zwieten, L., Singh, B.P., Jeffery, S., Roig, A. and Sánchez-Monedero, M.A., 2014. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, pp.5-16.

Chen, J., Ter-Mikaelian, M.T., Yang, H. and Colombo, S.J., 2018. Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in Canada. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 91(2), pp.193-205.

Climate Justice Alliance. 2018. Say no to forest offsets. From: <https://climatejusticealliance.org/notfs/>

Cunningham, S.C., Mac Nally, R., Baker, P.J., Cavagnaro, T.R., Beringer, J., Thomson, J.R. and Thompson, R.M., 2015. Balancing the environmental benefits of reforestation in agricultural regions. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 17(4), pp.301-317.

- Dieleman, C.M., Lindo, Z., McLaughlin, J.W., Craig, A.E. and Branfireun, B.A., 2016. Climate change effects on peatland decomposition and porewater dissolved organic carbon biogeochemistry. *Biogeochemistry*, 128(3), pp.385-396.
- Downie, A., Crosky, A. and Munroe, P., 2009. Physical Properties of Biochar, in Lehmann, J. and Joseph, S. (editors), *Biochar for Environmental Management*, Earthscan, London: 13-32.
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., Van Noordwijk, M., Creed, I.F., Pokorny, J. and Gaveau, D., 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, pp.51-61.
- Ellsworth, D.S., Anderson, I.C., Crous, K.Y., Cooke, J., Drake, J.E., Gherlenda, A.N., Gimeno, T.E., Macdonald, C.A., Medlyn, B.E., Powell, J.R. and Tjoelker, M.G., 2017. Elevated CO₂ does not increase eucalypt forest productivity on a low-phosphorus soil. *Nature Climate Change*, 7(4), p.279.
- Erb, K.H., Haberl, H., Krausmann, F., Lauk, C., Plutzer, C., Steinberger, J.K., Müller, C., Bondeau, A., Waha, K. and Pollack, G., 2009. *Eating the planet: Feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely: A scoping study*. Vienna, Austria: Institute of Social Ecology.
- Evans, S., 2018. World can limit global warming to 1.5C 'without BECCS', *Carbon Brief*, 13 April
- Fang, Y., B. Singh, B.P. Singh, and E. Krull, 2014: Biochar carbon stability in four contrasting soils. *European Journal of Soil Science*, 65(1), 60–71.
- FAO, 2015a FAO assessment of forests and carbon stocks, 1990–2015. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome Available: <http://www.fao.org/3/a-i4470e.pdf>
- FAO, 2015b. Global Forest Resources Assessment 2015. Desk reference, , Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>
- FAO, 2015c. Global Forest Resources Assessment 2015. How are the world's forests changing? Second edition. , Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/3/a-i4793e.pdf>
- FAO, 2018. Global Forest Resources Assessment 2020: Terms and Definitions. Forest Resources Assessment Working Paper 188, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome. Available at:
- Frank, S., Havlík, P., Soussana, J.F., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., Kleinwechter, U., Fricko, O., Gusti, M., Herrero, M. and Smith, P., 2017. Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security?. *Environmental Research Letters*, 12(10), p.105004.
- Fricko, O., Parkinson, S.C., Johnson, N., Strubegger, M., van Vliet, M.T. and Riahi, K., 2016. Energy sector water use implications of a 2 C climate policy. *Environmental Research Letters*, 11(3), p.034011.

Fridahl, M., 2017. Socio-political prioritization of bioenergy with carbon capture 412 Chapter 4 Strengthening and Implementing the Global Response 4 and storage. *Energy Policy*, 104, 89–99.

Fuss, S., Canadell, J.G., Peters, G.P., Tavoni, M., Andrew, R.M., Ciais, P., Jackson, R.B., Jones, C.D., Kraxner, F., Nakicenovic, N. and Le Quéré, C., 2014. Betting on negative emissions. *Nature climate change*, 4(10), p.850.

Fuss, S., Lamb, W.F., Callaghan, M.W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T. and Luderer, G., 2018. Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), p.063002.

Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A.Z. and Schepaschenko, D.G., 2015. Boreal forest health and global change. *Science*, 349(6250), pp.819-822.

Global CCS Institute, 2019. The Global Status of CCS 2019. Report. Global CCS Institute. Available at: file:///C:/Users/aak/Dropbox/COP22/GCC_GLOBAL_STATUS_REPORT_2019.pdf

Goll, D.S., Brovkin, V., Parida, B.R., Reick, C.H., Kattge, J., Reich, P.B., Van Bodegom, P.M. and Niinemets, Ü., 2012. Nutrient limitation reduces land carbon uptake in simulations with a model of combined carbon, nitrogen Nutrient and phosphorus cycling. *Biogeosciences*, 9, pp.3547-3569.

Gough, C. M., J. W. Atkins, R. T. Fahey, and B. S. Hardiman. 2019. High rates of primary production in structurally complex forests. *Ecology* 100(10):e02864. 10.1002/ecy.2864

Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P.W., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., Schlesinger, W.H., Shoch, D., Siikamäki, J.V., Smith, P. and Woodbury, P., 2017. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), pp.11645-11650.

Grübler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D.L., Rao, N.D., Riahi, K., Rogelj, J., De Stercke, S. and Cullen, J., 2018. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy*, 3(6), p.515.

Hadden, D. and Grelle, A., 2016. Changing temperature response of respiration turns boreal forest from carbon sink into carbon source. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, pp.30-38.

Heck, V., Gerten, D., Lucht, W. and Popp, A., 2018. Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries. *Nature climate change*, 8(2), p.151.

Hejazi, M., Edmonds, J., Clarke, L., Kyle, P., Davies, E., Chaturvedi, V., Wise, M., Patel, P., Eom, J., Calvin, K. and Moss, R., 2014. Long-term global water projections using six socioeconomic scenarios in an integrated assessment modeling framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 81, pp.205-226.

Henry, R.C., Engström, K., Olin, S., Alexander, P., Arneth, A. and Rounsevell, M.D.A., 2018. Food supply and bioenergy production within the global cropland planetary boundary. *PloS one*, 13(3), p.e0194695.

Huntingford, C., Atkin, O.K., Martinez-de la Torre, A., Mercado, L.M., Heskell, M.A., Harper, A.B., Bloomfield, K.J., O'Sullivan, O.S., Reich, P.B., Wythers, K.R. and Butler, E.E., 2017. Implications of improved representations of plant respiration in a changing climate. *Nature communications*, 8(1), p.1602.

Hynynen, J., Salminen, H., Ahtikoski, A., Huuskonen, S., Ojansuu, R., Siipilehto, J., Lehtonen, M., Eerikäinen, K., 2015. Long-term impacts of forest management on biomass supply and forest resource development: a scenario analysis for Finland. *Eur J For Res*134:415–431.

IEA, I., 2017. Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy.

IEA, 2016. *20 Years of Carbon Capture and Storage: Accelerating Future Deployment*. International Energy Agency.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

IPCC, 2014. 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland.

IPCC, 2018. Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. From: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

Jantke, K., Müller, J., Trapp, N. and Blanz, B., 2016. Is climate-smart conservation feasible in Europe? Spatial relations of protected areas, soil carbon, and land values. *Environmental Science & Policy*, 57, pp.40-49.

Jones, A.D., Calvin, K.V., Collins, W.D. and Edmonds, J., 2015. Accounting for radiative forcing from albedo change in future global land-use scenarios. *Climatic Change*, 131(4), pp.691-703.

Kammann, C., Ippolito, J., Hagemann, N., Borchard, N., Cayuela, M.L., Estavillo, J.M., Fuertes-Mendizabal, T., Jeffery, S., Kern, J., Novak, J. and Rasse, D., 2017. Biochar as a tool to reduce the agricultural greenhouse-gas burden—knowns, unknowns and future research needs. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(2), pp.114-139.

Kemper, J., 2015. Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, pp.401-430.

Ķēniņa, L., Elferts, D., Bāders, E. and Jansons, Ā., 2018. Carbon pools in a hemiboreal over-mature Norway spruce stands. *Forests*, 9(7), p.435. Lenton, T.M. et al., 2008: Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), pp. 1786-93.

Kindermann, G., Schoerghuber, S., Linkosalo, T., Sanchez, A., Rammer, W., Seidl, R. and Lexer, M. J., 2013. Potential stocks and increments of woody biomass in the European Union under different management and climate scenarios. *Carbon Balance and Management*, 8 (2), <http://www.cbmjournals.com/content/8/1/2>

Kjellström, E., et al., 2018: European climate change at global mean temperature increases of 1.5 and 2 °C above pre-industrial conditions as simulated by the EURO-CORDEX regional climate models. *Earth Syst. Dyn.*, 9, 459–478, <https://doi.org/10.5194/esd-9-459-2018>.

Klein, D., Luderer, G., Kriegler, E., Strefler, J., Bauer, N., Leimbach, M., Popp, A., Dietrich, J.P., Humpenöder, F., Lotze-Campen, H. and Edenhofer, O., 2014. The value of bioenergy in low stabilization scenarios: an assessment using REMIND-MAGPIE. *Climatic change*, 123(3-4), pp.705-718.

Kraxner, F., Nordström, E.M., Havlík, P., Gusti, M., Mosnier, A., Frank, S., Valin, H., Fritz, S., Fuss, S., Kindermann, G. and McCallum, I., 2013. Global bioenergy scenarios—Future forest development, land-use implications, and trade-offs. *Biomass and Bioenergy*, 57, pp.86-96.

Kriegler, E., Edenhofer, O., Reuster, L., Luderer, G. and Klein, D., 2013. Is atmospheric carbon dioxide removal a game changer for climate change mitigation?. *Climatic Change*, 118(1), pp.45-57.

Köhl, M., Neupane, P.R. and Lotfiomran, N., 2017. The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname. *PloS one*, 12(8), p.e0181187.

Lang, M., Arumäe, T., Laarmann, D., Kiviste, A. 2017. Estimation of change in forest height growth. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 67, 5–16. ISSN 1406-9954. Journal homepage: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>

Lenton, T.M., 2010. The potential for land-based biological CO₂ removal to lower future atmospheric CO₂ concentration. *Carbon Management*, 1(1), pp.145-160.

Lenton, T.M., 2012. Arctic climate tipping points. *Ambio*, 41(1), pp.10-22

- Liu, W., Yu, Z., Xie, X., Von Gadow, K. and Peng, C., 2018. A critical analysis of the carbon neutrality assumption in life cycle assessment of forest bioenergy systems. *Environmental Reviews*, 26(1), pp.93-101.
- Locatelli, B., Catterall, C.P., Imbach, P., Kumar, C., Lasco, R., Marín-Spiotta, E., Mercer, B., Powers, J.S., Schwartz, N. and Uriarte, M., 2015. Tropical reforestation and climate change: beyond carbon. *Restoration Ecology*, 23(4), pp.337-343.
- Lutter, R.; Kölli, R.; Tullus, A.; Tullus, H. (2019). Ecosystem carbon stocks of Estonian pre-mature and mature managed forests: effects of site conditions and overstorey tree species. *European Journal of Forest Research*, 138, 125–142.10.1007/s10342-018-1158-4.
- Luyssaert, S., Schulze, E., Börner, A. *et al.* (2008) Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Luyssaert, S., Marie, G., Valade, A. *et al.* (2018). Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature* 562, 259–262 <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0577-1>
- McCarl, B.A., Peacocke, C., Chrisman, R., Kung, C.C. and Sands, R.D., 2009. Economics of biochar production, utilization and greenhouse gas offsets. *Biochar for environmental management: Science and technology*, pp.341-358.
- McGlashan, N., Shah, N., Caldecott, B. and Workman, M., 2012. High-level techno-economic assessment of negative emissions technologies. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6), pp.501-510.
- McLaren, D., 2012. A comparative global assessment of potential negative emissions technologies. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6), pp.489-500.
- Metslaid, S., Stanturf, J. A., Hordo, M., Korjus, H., Laarmann, D., Kiviste, A., 2016. Growth responses of Scots pine to climatic factors on reclaimed oil shale mined land. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (14), 13637–13652.[dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5647-4](https://doi.org/10.1007/s11356-015-5647-4).
- Metslaid, S., Hordo, M., Korjus, H., Kiviste, A., Kangur, A., 2018. Spatio-temporal variability in Scots pine radial growth responses to annual climate fluctuations in hemiboreal forests of Estonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 283–295.10.1016/j.agrformet.2018.01.018.
- Ministry of the Environment. 2016. Climate Change Adaptation Development Plan until 2030, Estonia Available at https://www.envir.ee/sites/default/files/national_adaptation_strategy.pdf [Accessed 28.06.2019]
- Ministry of the Environment. 2019. National Forestry Accounting Plan, 2021-2025, Estonia Available at https://www.envir.ee/sites/default/files/national_forestry_accounting_plan_2021-2025_estonia.pdf [Accessed 21.07.2019]

- Mouratiadou, I., Biewald, A., Pehl, M., Bonsch, M., Baumstark, L., Klein, D., Popp, A., Luderer, G. and Kriegler, E., 2016. The impact of climate change mitigation on water demand for energy and food: An integrated analysis based on the Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Science & Policy*, 64, pp.48-58.
- Obersteiner, M., Walsh, B., Frank, S., Havlík, P., Cantele, M., Liu, J., Palazzo, A., Herrero, M., Lu, Y., Mosnier, A. and Valin, H., 2016. Assessing the land resource–food price nexus of the Sustainable Development Goals. *Science Advances*, 2(9), p.e1501499.
- NIR, 2019. Estonia’s National Inventory Report (NIR) under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and the Kyoto Protocol, Ministry of the Environment, available at https://www.envir.ee/sites/default/files/content-editors/Kliima/Inventuur/nir_est_1990-2017_150319.pdf
- OECD. Publishing and Food and Agriculture Organization, 2017. *OECD-FAO agricultural outlook 2017-2026*. OECD Publishing.
- Oliver, C., Nassar, N., Lippke, B. and Mccarter, J., 2013. Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation With Wood and Forests. *Journal of Sustainable Forestry*. 33. 248-275. 10.1080/10549811.2013.839386.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G. and Ciais, P., 2011. A large and persistent carbon sink in the world’s forests. *Science*, 333(6045), pp.988-993.
- Paul, K.I., Cunningham, S.C., England, J.R., Roxburgh, S.H., Preece, N.D., Lewis, T., Brooksbank, K., Crawford, D.F. and Polglase, P.J., 2016. Managing reforestation to sequester carbon, increase biodiversity potential and minimize loss of agricultural land. *Land use policy*, 51, pp.135-149.
- Perugini, L., Caporaso, L., Marconi, S., Cescatti, A., Quesada, B., de Noblet-Ducoudre, N., House, J.I. and Arneth, A., 2017. Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change. *Environmental Research Letters*, 12(5), p.053002.
- Peters, G.P., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Fuss, S., Jackson, R.B., Korsbakken, J.I., Le Quéré, C. and Nakicenovic, N., 2017. Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 7(2), p.118.
- Pielke, R. A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmood, R., McAlpine, C., Hossain, F., Goldewijk, K. K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P. & de Noblet-Ducoudré, N. 2011. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Climate Change*, Vol 2; Issue 6; pp. 828-850
- Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B.L., Dietrich, J.P., Doelmann, J.C., Gusti, M. and Hasegawa, T., 2017. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 42, pp.331-345.

Ranganathan, J., Vennard, D., Waite, R., Dumas, P., Lipinski, B., Searchinger, T.I.M. and GLOBAGRI-WRR, M.A., 2016. Shifting diets for a sustainable food future. World Resources Institute.

Riigikogu. 2017. Riigikogu otsus: Kliimapolitika põhialused aastani 2050
https://www.envir.ee/sites/default/files/362xiii_rk_o_04.2017-1.pdf

Roe, S., Streck, C., Obersteiner, M. *et al.* Contribution of the land sector to a 1.5 °C world. *Nat. Clim. Chang.* **9**, 817–828 (2019).

Röös, E., Bajželj, B., Smith, P., Patel, M., Little, D. and Garnett, T., 2017. Protein futures for Western Europe: potential land use and climate impacts in 2050. *Regional Environmental Change*, **17**(2), pp.367-377.

Ruuska, A. and Häkkinen, T., 2012. Potential impact of wood building on GHG emissions. VTT Technical Research Centre of Finland (VTT), VTT Technical Research Centre of Finland (VTT)

Searchinger, T.D., Beringer, T., Holtzmark, B. *et al.* 2018. Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. *Nat Commun* **9**, 3741
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-06175-4>

Sathre, R. and J. O'Connor, 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environ. Sci. Pol.*, **13**, 104–114.

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J. and Lexer, M.J., 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature climate change*, **7**(6), p.395.

Settele, J., Scholes, R., Betts, R.A., Bunn, S., Leadley, P., Nepstad, D., Overpeck, J., Taboada, M.A., Fischlin, A., Moreno, J.M. and Root, T., 2015. Terrestrial and inland water systems. In *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 271-360). Cambridge University Press.

Simmer, K., 2018. Estonian-Latvian Transboundary Carbon Dioxide Capture, Transport and Storage (CCS) Scenario for the Cement Industry, Master thesis, Department of Geology, Tallinn University of Technology.

Sitra, 2017. Afforestation and reforestation. The Finnish Innovation Fund Sitra. 2017. From: <https://www.sitra.fi/en/cases/afforestation-and-reforestation/>

Smith, P., 2016. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global change biology*, **22**(3), pp.1315-1324.

Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M. and Masera, O., 2014. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In *Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- Smith, P., Davis, S.J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R.B., Cowie, A., Kriegler, E. and Van Vuuren, D.P., 2016. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature climate change*, 6(1), p.42.
- Smith, P., Haszeldine, R.S. and Smith, S.M., 2016. Preliminary assessment of the potential for, and limitations to, terrestrial negative emission technologies in the UK. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 18(11), pp.1400-1405.
- Spencer, B., Lawler, J., Lowe, C., Thompson, L., Hinckley, T., Kim, S.H., Bolton, S., Meschke, S., Olden, J.D. and Voss, J., 2017. Case studies in co-benefits approaches to climate change mitigation and adaptation. *Journal of environmental planning and management*, 60(4), pp.647-667.
- Spencer, T., Pierfederici, R., Waisman, H., Colombier, M., Bertram, C., Kriegler, E., Luderer, G., Humpenoeder, F., Popp, A., Edenhofer, O. and Den Elzen, M., 2015. Beyond the numbers: understanding the transformation induced by INDCs.
- Statistics Estonia, 2018. Minifacts about Estonia 2017 Available at: https://www.stat.ee/publication-2017_minifacts-about-estonia-2017 [Accessed 21.07.2019]
- Stephenson, N., Das, A., Condit, R. *et al.* 2014. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature* 507, 90–93. <https://doi.org/10.1038/nature12914>
- Stinson, G., Kurz, W.A., Smyth, C.E., Neilson, E.T., Dymond, C.C., Metsaranta, J.M., Boisvenue, C., Rampley, G.J., Li, Q., White, T.M. and Blain, D., 2011. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008. *Global change biology*, 17(6), pp.2227-2244.
- Tilman, D. and Clark, M., 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), p.518.
- Tukker, A., Goldbohm, R.A., De Koning, A., Verheijden, M., Kleijn, R., Wolf, O., Pérez-Domínguez, I. and Rueda-Cantuche, J.M., 2011. Environmental impacts of changes to healthier diets in Europe. *Ecological Economics*, 70(10), pp.1776-1788.
- UK Biochar Research Centre. 'What is biochar?' From: https://www.biochar.ac.uk/what_is_biochar.php
- UNECE. 2008. Carbon Storage in Harvested Wood Products From: <https://www.unece.org/forests/outlook/carbonstorage.html>
- van Dooren, C., Marinussen, M., Blonk, H., Aiking, H. and Vellinga, P., 2014. Exploring dietary guidelines based on ecological and nutritional values: A comparison of six dietary patterns. *Food Policy*, 44, pp.36-46.
- Vaughan, N.E. and Gough, C., 2016. Expert assessment concludes negative emissions scenarios may not deliver. *Environmental research letters*, 11(9), p.095003.
- Vautard, R. *et al.*, 2014: The European climate under a 2°C global warming. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034006, doi:10.1088/1748-9326/9/3/034006.

- Von Stechow, C., McCollum, D., Riahi, K., Minx, J.C., Kriegler, E., Van Vuuren, D.P., Jewell, J., Robledo-Abad, C., Hertwich, E., Tavoni, M. and Mirasgedis, S., 2015. Integrating global climate change mitigation goals with other sustainability objectives: a synthesis. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, pp.363-394.
- Wang, Q., Xiao, F., Zhang, F. and Wang, S., 2013. Labile soil organic carbon and microbial activity in three subtropical plantations. *Forestry*, 86(5), pp.569-574.
- Wang, X., Biewald, A., Dietrich, J.P., Schmitz, C., Lotze-Campen, H., Humpenöder, F., Bodirsky, B.L. and Popp, A., 2016. Taking account of governance: Implications for land-use dynamics, food prices, and trade patterns. *Ecological Economics*, 122, pp.12-24.
- Warren, R., Price, J., Graham, E., Forstnerhaeusler, N. and VanDerWal, J., 2018. The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5 C rather than 2 C. *Science*, 360(6390), pp.791-795.
- Wehkamp, J., Pietsch, S.A., Fuss, S., Gusti, M., Reuter, W.H., Koch, N., Kindermann, G. and Kraxner, F., 2018. Accounting for institutional quality in global forest modeling. *Environmental Modelling & Software*, 102, pp.250-259.
- Wieder, W.R., Cleveland, C.C., Smith, W.K. and Todd-Brown, K., 2015. Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability. *Nature Geoscience*, 8(6), p.441.
- Windeatt, J.H., Ross, A.B., Williams, P.T., Forster, P.M., Nahil, M.A. and Singh, S., 2014. Characteristics of biochars from crop residues: potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of environmental management*, 146, pp.189-197.
- Wu, Y., Zhao, F., Liu, S., Wang, L., Qiu, L., Alexandrov, G. and Jothiprakash, V., 2018. Bioenergy production and environmental impacts. *Geoscience Letters*, 5(1), p.14.
- Yang, X., Thornton, P.E., Ricciuto, D.M. and Post, W.M., 2014. The role of phosphorus dynamics in tropical forests—a modeling study using CLM-CNP. *Biogeosciences*, 11(6), pp.1667-1681.
- Zaehle, S., Jones, C.D., Houlton, B., Lamarque, J.F. and Robertson, E., 2015. Nitrogen availability reduces CMIP5 projections of twenty-first-century land carbon uptake. *Journal of Climate*, 28(6), pp.2494-2511.

Lisa

Tabel L1. Uuendusraiet lubavad vanused puuliikide ja boniteediklasside lõikes

Puuliik	Boniteediklass					
	IA	I	II	III	IV	V; VA
Harilik mänd	90	90	90	100	110	120
Harilik kuusk	60	70	80	90	90	90
Aru- ja sookask	60	60	70	70	70	70
Harilik haab	30	40	40	50	50	
Sanglepp	60	60	60	60	60	60
Kõvad lehtpuud	90	90	100	110	120	130
Hall-lepp*	30	30	30	30	30	

* Hall-lepal raievanus puudub, kuid raiearvestustes kasutatakse väärtust 30 aastat

Tabel L2. Uuendusraiet lubavad rinnasdiameetrid (cm) puuliikide ja boniteediklasside lõikes

Puuliik	Boniteediklass					
	IA	I	II	III	IV	V; VA
Harilik mänd	28	28	28	28	28	28
Harilik kuusk	26	26	26	26	26	26
Aru- ja sookask	26	26	24	22	18	16
Harilik haab	20	20	18	18	18	
Sanglepp	24	24	22	22	18	16

Tabel L3, Majandatava metsa võimalik aastane uuendusraiate pindala ja raiemaht (metsa kasvukiirus 0,1% suurem) (miljonit tm)

Periood	Arvestuslank		Küpsusraie		Ühtlane raie		Tagavara ei muutu	
	Pindala	Raiemaht	Pindala	Raiemaht	Pindala	Raiemaht	Pindala	Raiemaht
	1000 ha	milj. tm	1000 ha	milj. tm	1000 ha	milj. tm	1000 ha	milj. tm
2021-2030	37.5	11.8	55.9	17.7	28.2	8.7	29.2	9.0
2031-2040	32.2	9.9	25.4	7.7	28.2	8.6	29.5	9.0
2041-2050	28.3	8.7	27.9	8.4	27.7	8.5	29.7	9.1
2051-2060	26.1	8.0	23.0	7.0	25.9	7.9	29.2	8.9
2061-2070	26.0	8.0	25.7	7.8	27.9	8.6	28.5	8.8
2071-2080	24.6	7.6	21.5	6.8	27.9	8.6	28.2	8.7
2081-2090	23.3	7.1	21.7	6.6	26.4	8.1	28.4	8.7
2091-2100	25.0	8.0	26.7	8.6	24.7	7.8	27.6	8.7
2101-2110	28.8	8.9	35.7	10.9	27.8	8.5	29.8	9.1
2111-2120	29.7	9.2	30.1	9.5	27.3	8.4	30.9	9.5
Kokku	2815	872	2936	910	2720	837	2908	895
Keskmine	28.2	8.7	29.4	9.1	27.2	8.4	29.1	9.0

Tabel L4. Kõik raied kokku juhul, kui metsa kasvukiirus 0,1% suurem (miljonit tm)

Aasta	Arvestuslank	Küpsusraie	Ühtlane raie	Tagavara ei muutu
2020	14.3	20.1	11.3	11.6
2030	12.1	9.8	10.9	11.3
2040	10.8	10.4	10.7	11.3
2050	10.3	9.5	10.2	11.2
2060	10.8	10.8	11.2	11.5
2070	10.7	10.1	11.4	11.8
2080	10.4	10.1	11.1	12.1
2090	11.3	11.8	10.9	12.1
2100	12.0	13.8	11.6	12.3
2110	12.1	12.1	11.5	12.6