



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## KASVAVA METSA ENERGEETILISE POTENTSIAALI MÄÄRAMINE KAUDSEL MEETODIL VALGAMAAL

DETERMINATION OF ENERGETIC POTENTIAL OF VALGA COUNTY FORESTS  
USING INDIRECT METHOD

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Taimar Ala  
/nimi/  
163342AAHM  
Üliõpilaskood:  
Juhendaja: Allar Padari, Eesti Maaülikooli teadur  
/nimi, amet/

Tallinn, 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“17.” mai 2019

Autor: */allkiri paberversioonil/*

*/ allkiri /*

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“17.” mai 2019

Juhendaja: */allkiri paberversioonil/*

*/ allkiri /*

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

*/ nimi ja allkiri /*

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Taimar Ala

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Kasvava metsa energeetilise potentsiaali määramine kaudsel meetodil Valgamaal

*Kuupäev:* 15.05.2019

*94 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Eesti Maaülikool, teadur Allar Padari

*Töö konsultant (konsultandid):* -

## *Sisu kirjeldus:*

Käesoleva töö peamine eesmärk oli selgitada Valgamaa näitel kaudsete meetodite nagu kaugseire, sh satelliidi- ja lidarandmete ning muude kättesaadavate andmete kasutatavus kasvava metsa energeetilise potentsiaali hindamiseks. Töö käigus võeti uuritud maa-ala piires kasutusele satelliidifotode põhjal tuvastatud puuliikide andmed, aerolidarseadmega määratud puistute kõrgus- ja mahuandmed, riikliku metsaregistri andmed ning Eesti põhikaart, mullastiku kaart, looduskaitse piirangute kaart. Nimetatud andmed agregeeriti omavahel ning tekkinud andmelüngad täideti kohaldades sarnaste nimitunnustega andmekomplekte või arvutuslikult metsamajanduslikke loogikaid ja mudeleid kasutades. Saadud andmeid võrreldi paikvaatlustega kogutud andmetega ning tuvastati vajalik korreleeruvus. Leitud metsa olemist arvatati lähimate aastakümnete raievõimalus neljas erinevas põhistsenaariumis. Teoreetiliselt saadava metsamaterjali osas tehti sortimenteerimisarvutus kasutusviiside määramiseks ning täiendavaid komponente arvestades avaldati saadava materjali energeetiline potentsiaal. Kokkuvõttes leiti, et töös kasutatud meetodika on rakendatav, selle põhjal saab lihtsal viisil määrata metsade olemist ning avaldada nende energeetilist potentsiaali. Vaadeldud ala, ehk Valgamaa osas jõuti järeldusele, et õiguslike piiranguid, süsiniku sidumise eesmärke ja head tava järgides on ainuüksi raidmetest ja puidujäätmetest saada 292,6 GWh/a energiat, millega on võimalik katta kogu maakonna senine aasta soojusenergia tarve.

*Märksõnad:* puiduenergia, metsa energeetiline potentsiaal, kaugseire.

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Taimar Ala	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Determination of energetic potential of Valga county forests using indirect method	
<i>Date:</i> 15.05.2019	<i>94 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Estonian University of Life Sciences, scientist Allar Padari	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> <p>The objective of current thesis was to elaborate the use of data from indirect methods like remote sensing, including satellite and Lidar data as well as other implied data to determine the energy potential of forest on Valga county example. Tree species composition was derived from satellite data, forest stand volume and height data from aerolidar, national forest registry data as well as several map sources like soils and protected areas were used. Appropriate data was aggregated and data gaps were removed by the use of forest specific modelling and calculations. Developed dataset was compared to actual on-site measurements and its quality was acknowledged. Felling possibility for next decades was calculated based on four base scenarios and energetic potential of forest material was defined after estimations of the outcome of different wood assortments were done. As a conclusion it was found that the exercised method for the determination of forest energetic potential is usable in practice. Concerning explicitly Valga county, it was revealed that paying close attention to legal requirements, objective to maintain forests as carbon sinks and appreciating the need for sustainable management it is possible to gain energy in the amount of 292,6 GWh/y only from forest residuals and wood waste. That covers fully the current annual consumption of heat in Valga county.</p>	
<i>Keywords:</i> wood energy, energetic potential of forest, remote sensing.	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

TTÜ inseneriteaduskond

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Taimar Ala, 163342AAHM (nimi, üliõpilaskood)  
**Õppekava, peeriala:** Hajaenergeetika, AAHM12/13 (kood ja nimetus)  
**Juhendaja(d):** Allar Padari, EMÜ teadur, 731 3107  
**Konsultandid:** nimeliselt määramata valdkonna eksperdid

### Lõputöö teema:

(eesti k.) Kasvava metsa energeetilise potentsiaali määramine kaudsel meetodil Valgamaal

(inglise k.) Determination of energetical potential of Valga county forests using indirect method

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Selgitada piiratud ala näitel kaudsete meetodite nagu kaugseire, sh satelliidi- ja lidarandmete ning muude kättesaadavate andmete kasutatavus kasvava metsa energeetilise potentsiaal hindamiseks olukorras, kus puuduvad ajakohased metsa inventeerimisandmed;
2. Hinnatud saadud tulemuste usaldusväärsust olemasolevate metsa inventeerimisandmete ning statistilise metsainventuuri välitööde andmete põhjal.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Alus- ja lähtematerjalide koondamine	25.03.2019
2.	Kaardikihtide loomine, andmetöötlus ja vajalike arvutuste teostamine	25.04.2019
3.	Lõputöö kokku kirjutamine ja vormistamine	15.05.2019

**Töö keel:** eesti

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "20" mai. 2019.a

**Üliõpilane:** Taimar Ala /Allkirjastatud digitaalselt/  
/allkiri/ "08." märts 2019.a

**Juhendaja:** Allar Padari /Allkirjastatud digitaalselt/  
/allkiri/ "08." märts 2019.a

**Õppekava juht:** Jelena Šuvalova /Allkirjastatud digitaalselt/  
/allkiri/ "08." märts 2019.a

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT .....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
SISUKORD .....	6
EESSÕNA.....	9
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	10
SISSEJUHATUS .....	11
1. STRATEEGILISED VALIKUD ENERGEETIKAS .....	13
2. METSAD SÜSINIKURINGES JA –BILANSIS.....	15
2.1 Mets kui süsiniku hoidja.....	15
2.2 Arvestusreeglistik metsa süsinikuvaru hindamisel .....	18
2.3 Metsade majandamine ja süsinikukaubandus.....	20
3. METSAD TAASTUVENERGIA ALLIKANA.....	22
3.1 Puidu energeetiline potentsiaal.....	22
4. ENERGIAKASUTUS EESTIS JA VALGAMAAL.....	26
5. METS EESTIS .....	30
5.1 Puidu energeetiline potentsiaal puuliikiide lõikes .....	31
5.2 Mets Valgamaal .....	33
6. METSA HINDAMINE.....	35
6.1 Statistiline metsade hindamine .....	35
6.1.1 Traktid ja traktivõrk.....	35
6.1.2 Proovitükid .....	36
6.2 Kaugseireandmed metsanduses .....	37
6.2.1 Satelliitandmete kasutamine metsanduses .....	38
6.3 Aerolaserskaneerimine .....	42

6.3.1 ALS kasutamine metsanduses .....	42
6.3.2 ALS kasutamine puistu kõrgus- ja mahuandmete hindamisel .....	44
6.4 Radarseadmed .....	47
7. TÖÖ KÄIK .....	48
7.1 Andmehõive .....	49
7.2 Peamised kasutatud tarkvarad .....	49
7.3 Kaardiandmete töötlus .....	50
7.4 Põhikaardi töötlus .....	51
7.5 Metsaregistri kaardi töötlus.....	52
7.6 Mullastiku kaardi töötlus .....	52
7.7 Looduskaitsete andmete kaardikihi töötlus .....	53
7.8 Kaugseire andmete töötlus .....	54
8. METSAMAJANDUSLIKE PÕHIANDMETE ANALÜÜS.....	56
8.1 Metsaeraldise kõrgusindeksi leidmine .....	56
8.2 Puistu enamuspuliigi määramine .....	58
8.3 Puistu vanuse leidmine .....	58
8.4 Puistu diameetri leidmine.....	58
8.5 Metsade raieküpsuse hindamine.....	59
8.6 Harvendusraie mahu leidmine.....	61
8.7 Puitmaterjali sortimenteerimine .....	62
9. ANDMETÖÖTLUSE TULEMUSED JA RAIEMAHTUDE ARVESTUS .....	64
9.1 Metsakasutuse erinevad stsenaariumid .....	66
9.2 Võimalikud raiemahud.....	67
10. VALGAMAA PUISTUTE ENERGEETILINE POTENTSIAAL .....	69
11. ANDMETE KORRELEERUVUS .....	71
KOKKUVÕTE .....	73

SUMMARY .....	75
KASUTATUD KIRJANDUS.....	77
LISAD .....	85



## EESSÕNA

Käesoleva töö teemavalikut suunas ühest küljest igapäevatoos kerkinud probleemistik seoses metsade hindamise kui väga töömahuka ja aeganõudva tegevusega, mis on eriti viimastel aastatel saanud üldrahvalikku kriitikat. Samas teevad vähemalt riiklikku metsade hindamist oma ala parimad ja pühendunud asjatundjad, keda selles töös ei juhi omakasupüüd ega saamahimu. Olen selles veendunud! Ent kuidas ikka asjas ka ise kaasa rääkida ja aidata – tuleb panna käed külge ja järgi uurida!

Teisalt sai teemavalikul määravaks Tehnikaülikooli õppekava raames toimunud õppesemester Eesti Maaülikoolis, mis lubas veenduda meie loodusteaduste, eriti metsanduseõppe väga sügavas sisus ning viis kokku oma ala entusiastlike ekspertidega. Kombinatsioon kahe õppeasutuse võtmeteemadest – rahvuslik rikkus mets ja energeetika väljakutsed – andis mulle hea võimaluse lahendada ülesannet, mis on realselt aktuaalne juba täna või vähemalt lähitulevikus. Kõik see sobitus kokku varem õpituga keskkonnateadustes ning igapäevatooga samas valdkonnas.

Ehkki kõik see toimus rahulikult tavapärase elurütmi taustal, kuuluvad tänusõnad siinkohal kõigile kaasa elajatele. Samas vabandused nende ees, kes õppetöö käigus omandatu põhjal ehk vahel liigseid targutusi said kuulma. Juhendaja Allar Padari teadmistele ning oskustele vaatan alt üles ning tänan asjaliku nõu ja erakordse abivalmiduse eest!

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ALS	aerolaserskaneerimine
EL	Euroopa Liit
IEA	<i>International Energy Agency</i> ; Maailma energiaagentuur
IPCC	The <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ; Valitsustevaheline kliimamuutuste paneel
KHG	kasvuhoonegaas
LULUCF	<i>Land Use, Land-Use Change and Forestry</i> ; Maakasutus, maakasutuse muutus ja metsandus
SMI	Statistiline metsainventuur
tm	tihumeeter, võrdne 1m <sup>3</sup> puidumassi ruumalaga

## SISSEJUHATUS

Eesti metsi on peetud rahvuslikuks rikkuseks selle kõige laiemal moel. Eesti põlevkivipõhist suureenergeetikat unikaalseks maailmas, ent ühtlasi meid suurimate ühiksaastajate hulka viivaks. Mõlema puhul on ühendavaks lüliks keskkonnahoiu ja säästlikkuse küsimus, veelgi enam üleilmse kliimasoojenemise vastase võitlusega kaasnev vajadus piirata kasvuhoonegaaside emissiooni. Seda ennekõike fossiilkütuse kasutamise kaasnevate heitkoguste vähendamise ning metsade süsiniku sidumise võime suurendamise seoses. Eesti energeetikas juba olemas olevate ning ees seisvate suurte väljakutsete valguses on peetud üheks võimaluseks puidust saadava energia laialdast kasutusele võtmist. Eelviidatud süsiniku sidumisvõime suurendamise vajadusega on see osalt kindlasti vastuoluline, ent kindlasti mitte võimatu. Küll aga on selles osas valikute tegemise eelduseks piisavad teadmised puidu olemist, tema kättesaadavusest ja energeetilisest potentsiaalst just muutuva maailma, arusaama ning reeglite tingimustes.

Eesti metsade arvestust peetakse metsaressursi arvestuse riiklikus registris (edaspidi: metsaregister). Sellesse kantakse usaldusväärsed metsa inventeerimisandmed, mis on eelduseks suuremate metsamajandustööde teostamiseks ja mis saadakse seadusega reglementeeritud metsakorralduse kaudu. Metsaseadusest tulenevalt loetakse metsa inventeerimisandmeid kehtivateks 10 aastat pärast nende registrisse kandmist ning nende uuendamine reaalselt metsas toimunud muutuste tõttu ei ole kohustuslik. See tingib olukorra, kus registriandmed ei pruugi objektiivselt anda ülevaadet konkreetse ala kohta, ehk samuti on võimatu hinnata täpselt olemasoleva metsa olemist ja sealt saadavat energiakogust ajas. Lahendust ei paku ka raiedokumentidel tuginev statistika, sest nendes kajastatud tegevuste ellu viimise raporteerimise kohustus puudub ning aastate lõikes võib täheldada, et ca 40% metsateatistes plaanitud tegevustest ei realiseerita. Saamaks ülevaadet metsadest viiakse läbi nii ülepinnaalisi inventeerimisi kui kasutatakse proovitükkidel ja arvutusmudelitel põhinevat statistilist valikmeetodit. Neist esimese kasutusosakaal on töö mahukuse tõttu vähene. Samas on teise kvaliteet pideva arendustöö tulemusena üha paranenud, ent küsitavusi veel leiab ning välitöö järgsed tulemused valmivad pika ajalise viibega.

Täna veel otseselt mitte asendava, vaid pigem täiendava alternatiivina on aastaid uuritud võimalusi koguda adekvaatsete metsanduslike hinnangute alusmaterjal kaugseire meetoditel kasutades selleks nii satelliitandmeid kui aerolidari kaardistuse tulemusi. Käesolevas töös oli eesmärgiks võtta kasutusele viidatud andmed ning kombineerida need metsanduslike arvutusloogikate ja mudelitega viisil, mis annaks lõpuni vastuse metsa olemist, selle kasutusvõimalustest ajas ja ruumis ning avaldada teoreetiline energeetiline potentsiaal. Algandmete detailsusest tuleneva

andmetöötlusmahu piiramiseks ning muudel alustel tekkinud erihuvi rahuldamiseks otsustati meetoodika testimiseks kasutatav ala piirata geograafiliselt Valgamaaga.

Töös leidsid kasutamist mitmed uuenduslikud andmehaldusviisid. Lisaks eelnimetatule kasutati uuendatud metsamaterjali sortimenteerimismudelit ja veel avaldamata korrigeeritud mahu hindamise arvutusmeetodikat. Lisaks peeti vajalikuks arvestada keskkonna- ning energeetikavaldkonda juba täna ning tulevikus veelgi enam mõjutavate suundumustega. Siinkohal peame silmas ennekõike kliimamuutuste ning kasvuhooonegaaside heitkoguste piiramisega seonduvat ja muuhulgas seda, et üha rohkem tuleb kasvavas metsas näha pigem süsiniku sidujatalletajat kui küttematerjali.

Praegune töö on jagatud peatükkidesse nõnda, et esmalt antakse kirjanduspõhine ülevaade energeetikavaldkonna strateegilistest valikutest ja suundumustest. Seda täiendab ülevaade metsandusest, metsadest ja nende rollist nii taastuenergia allika kui kliimamuutuste leevendajana. Seejärel juba eeltoodut täiendav statistiliste andmete ülevaade asjassepuutuvatest ressurssidest ja nende olemist ning siis juba kirjanduspõhine meetodiline ülevaade metsaressursi hindamise võimalustest. Töö peatükkides seitse ja kaheksa on antud kirjeldus käesoleva töö raames teostatud praktilistest andmehõive ning andmetöötluse töödest. Peatükkides üheksa ja kümme on kirjeldatud peamine töö tulem, ehk leitud metsaressursi olem ning selle energeetiline potentsiaal. Töö käigus teostati suures mahus ruumiandmete töötlust ning kõikide vahearvutuste siinses vormistatud töös esitamine on limiteeritud mahtu arvestades mõeldamatu. Seetõttu on esitatud vaid olulisemate arvutuste tulemused ning andmetabelitena ennekõike töö lisades.

## 1. STRATEEGILISED VALIKUD ENERGEETIKAS

ÜRO kliimamuutuste raamkonventsiooni osaliste 21. konverents toimus aastal 2015 Pariisi, kus võeti vastu globaalne kliimalepe, mida tuntakse ka Pariisi kliimaleppena. Praktiliselt kõiki maailma riike ühendava leppega võeti kohustuseks hoida Maa keskmise temperatuuri tõus tuntavalt alla 2°C võrreldes tööstusrevolutsiooni eelse ajaga. Lepe jõustus 4. novembril 2015, mil 55 riiki, kelle summaarne kasvuhoonegaaside (KHG) heide moodustab globaalsest heitest 55% olid leppe riiklikul tasandil jõustanud. Lepe eesmärgi saavutamise võimalikkust on uurinud valitsustevahelise kliimamuutuste paneeli (IPCC) poolt kokku kutsutud massiivne teadlaste konsortsium ja jõudnud järeldusele, et temperatuuritõusu piiramine ka tasemele 1,5°C on võimalik, ent eeldab suuremahulisi majandusmudeli ümberkorraldusi [1].

Euroopa riigid on kokku leppinud ja lühikese ajavahemiku jooksul võtnud üha kaugemale ulatuvamaid ning ambitsioonikamaid kliima- ja energiaalaseid eesmärke. Aastateks 2020, 2030 ja 2050 võetud eesmärgid näevad ennekõike ette KHG heitkoguste vähendamist, taastuvenergia kasutusosakaalu ja energiatõhususe suurendamist. Kliima- ja energiaraamistiku 2030 kohaselt nähakse ette:

- 40% väiksemad KHG heitkogused võrreldes aastaga 1990;
- 32% tarbitavast energiast taastuvatest allikatest (sh 14% transpordis);
- 35,5% suurem energiatõhusus võrreldes 2007.aasta mudeli tulemusega.

Euroopas aastani 2050 koostatud madala süsinikuga majanduse teekaardi kohaselt nähakse ette muuhulgas KHG heitkoguste vähenemist 80% võrreldes 1990.a. tasemega. Kui 2020 aastaks võetud kohustused on Eesti juba täitnud või täitmas, siis 2030 kohustuste täitmine eeldab kindlasti senisest rohkemat pingutust [2]. 2050.a. on küll veel piisavalt kaugel, ent käesoleva töö autori (kes on ühtlasi IPCC-s Eesti esindaja) hinnangul eeldab kliimaalaste eesmärkide täitmine komplekselt Eesti tänase majandusmudeli ning ka juba koostatud kliimaalaste riiklike teekaartide ümber hindamist. Praeguse töö koostamise ajal toimuvad teadaolevalt ka konsultatsioonid Riikliku energia- ja kliimakava aastani 2030 osas. Nimetatud kava on vajalik ennekõike rahvusvaheliste kohustuste tagamise kindlustamiseks, ent samas on selle alguses versioonis nähtud ette ka suuremat taastuvate energiaallikate kasutuselevõttu, kui rahvusvaheliste lepetega nõutud.

Euroopa Komisjon on oma teatistes ning Euroopa Liit tervikuna erinevates strateegiates ning regulatsioonides rõhutanud kliimameetmete olulisust. Uues, 2018.aastal avaldatud visioonis tehakse seda veelgi enam ning seatakse eesmärgiks kliimaneutraalne majandus. See eeldab

radikaalseid muudatusi erinevates majandussektorites ja ühtlasi nähakse selget vajadust siduda raamistikuga nii metsandus kui muu maakasutus [3]. Kuigi sama dokument näeb ette taastuvate energiaallikate veelgi suurema kasutuselevõtu ja metsamajanduse tõhususe suurenemise, soovitakse metsandust näha ennekõike siiski atmosfääris leiduva süsihappegaasi siduja ning mitte emiteerijana [4]. See seab maakasutusele ja metsandusele tulevikus kindlasti tänasest tavakasutusest suuremaid ootusi ja kohustusi. Lisaks on hiljuti täpsustatud ka transpordi, põllumajanduse, jäätmekäitluse, väikesemahulise energiatootmise jt. samalaadsete tegevuste KHG heiteid käsitlevat Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrust, mida tuntakse ka kui jagatud kohustuste määrus. Eesti jaoks on see toonud kaasa kohustuse vähendada määruse reguleerimisalasse jäävate sektorite KHG heiteid aastaks 2030 kokku 13% võrreldes 2005.aasta tasemega [5].

Aastal 2017 on Riigikogu ka läbi kliimapoliitika väljendanud, et kodumaiste taastuvate energiaallikate järk-järgult laiemat kasutuselevõttu tuleb soodustada. Seda nii elektri- kui soojusenergia tootmisel [6]. Sealjuures peetakse vajalikuks taastuvenergia tootmistehnoloogiate arendamist ja biomassi teadmispõhist ning jätkusuutlikku väärindamist.

Pikalt koostatud ja 2017.aastal kinnitatud Energiamaajanduse Arengukava aastani 2030 näeb elektri ja soojuse tootmist metsamaterjalist sõltuvalt metsade juurdekasvust ning pikaajalises perspektiivis halupuidu ja puiduhakke kahanevas kasutustrendis. Siiski nimetab arengukava põhitekst, et kava koostamisele eelnenud uuringud on näinud võimalust veelgi laialdasemale puidu energeetikas kasutamisele ja puidu summaarne energeetiline potentsiaal saaks selle järgi olla kuni 18 TWh aastas. Olulist panust nähakse energia tootmises aga just metsa- ja puidutööstuse jäätmetel. Viimane muutub eriti oluliseks arvestades riigil aastaks 2030 võetud eesmärke tarbida 50% ulatuses taastuvatest allikatest toodetud elektrienergiat ja 80% ulatuses taastuvatest allikatest toodetud soojusenergiat. Samas on kombinatsioonis erinevate reeglitega selge, et nimetatud eesmärkide täitmine eeldab rohkem kui täna selle nimel tehtud [2]. Seonduvalt nähakse ette energiasektori kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemist vähemalt 70% ning 80% aastaks 2050.

## 2. METSAD SÜSINIKURINGES JA –BILANSIS

Metsa poolt pakutavaks üheks ökosüsteemseks teenuseks on kahtlemata süsiniku sidumine. Samas leitakse, et see ei saa olla metsakoosluse ainus eesmärk ning metsa seotud süsiniku mahtu peaks hoidma minimaalselt olemasoleval tasemel või seotud süsinikukogust suurendama, ent kasutama selle juures siiski maksimaalselt metsa energeetilist ressursi [7].

### 2.1 Mets kui süsiniku hoidja

Riikidel lasuvad kohustused pidada arvestust ja raporteerida süsinikubilansi kohta. Kaalukat mõju ja erilist tähendust omab meie laiuskraadidel süsiniku sidumine ja vabanemine seonduvalt maakasutusega, sh ka metsanduse ning selles toimuvate muudatustega. Tõeste ja tõendatavate andmete saamiseks on tehtud mitmeid uuringuid selgitamaks süsinikuringluse toimist ja metsade rolli selles.

Süsiniku sidumist, biomassi akumulatsiooni ja primaarproduktiooni mõjutavad peamiselt kliima, mulla viljakus, ala vanus ja liigiline koosseis [8]. Boreaalses regioonis hinnatakse biomassi primaarproduktiooni üldiselt madalaks. Kui troopilistes männikutes on selle keskmiseks produktiooniks hinnatud  $2,31 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , siis boreaalses vaid  $0,62 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  [8].

Arvestuslikult olid Eestis metsa süsinikuvarud 2015. aastal tema maapeelses biomassis 133 650 000 tonni ja maa-aluses osas 31 470 000 tonni. Teadolevalt on aastatel 1990 kuni 2015 mõlemas nimetatud osas süsinikuvarud suurenenud vastavalt 19 500 000 ja 4 590 000 tonni [9].

Kuivõrd Eestis esineb väga erinevaid metsaökosüsteeme ja kooslusi, on vajalike uuringute maht suur ning nende teostamine mõistlik ennekõike peamiste ja enamlevinud koosluste kaupa. Nii on mõni aasta tagasi uuritud näiteks puuliikide kaupa süsiniku salvestumise dünaamikat ja aastast süsiniku akumulatsiooni kuuse-kase segametsade vanusreas [10]. Kuivõrd viidatud uuring viidi läbi Tartu- ja Põlvamaal paiknevate katsealade põhjal, siis on saadud teabe kasutamine käesolevas töös Valgamaale sarnanevate tingimuste tõttu asjakohane.

Süsiniku sidumisel omab olulist tähendust nii selle akumulatsioon puude maapeelses kui maa-aluses biomassis, varises kui mullas. Täiendavalt tuleb arvestada nii läbi alustaimestiku kui mullahingamise toimuva süsinikuvooga [10]. Üldistatud loogika on lihtne – süsinikubilanss koosneb aasta jooksul seotud ja emiteeritud süsiniku voogudest ja olukorras, kus aastane süsiniku väljundvoog ületab süsiniku sidumist tuleb konkreetne uuritav ala lugeda süsiniku allikaks/kliima soojenemist põhjustavaks [10].

Uuritud segapuistud osutusid väga efektiivseteks süsiniku sidujateks ning aastas hektaril seotud süsiniku kogus jäi vahemikku 5,9...8,8 t C/ha [10]. Selle juures ületas maa-aluse varise osa maa-pealse varise süsiniku voogu mulda tingituna kuuse peenjuurte suurest biomassist ning produktsioonist. Alustaimestik omas selle juures vähetähtsat süsiniku sidumise rolli. Ka tuvastati taaskord, et kuuskede osakaalu suurendamine (20% võrra lõikepindala põhjal) tõstis segapuistus süsiniku sidumist kuni 2 t C/ha kohta aastas [10]. Samas on Eesti karjäärimännikute uurimisel tuvastatud, et sealne süsiniku sidumise muut on puistu vanusest eksponentsiaalselt sõltuv ning varem vaadeldud kuuse-kase segametsa süsiniku sidumisest oluliselt väiksem olles 14, 21 ja 36 aastastel kultuuridel aastas vastavalt 0,6, 1,5 ja 3,3 t C/ha kohta [8].

Kui jätta kõrvale noored metsad (vanuses kuni 20.a), siis on leitud, et kogu kuuse-kase segametsa taimedes ja mullas sisalduvad süsinikuvarud on stabiilselt suurusjärgus 200 t C/ha kohta [10]. Järgmises tabelis (tabel 2.1) on toodud metsa süsinikuvarud biomassis ja mullas eelkirjeldatud uuringu [10] andmete põhjal.

Tabel 2.1 Metsa süsiniku varud biomassis ja mullas [10]

Puistu	Metsa C varu t ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>			C varu osakaal, %	
	Biomassis	Mullas	Kokku	Biomassis	Mullas
<b>KsKu20</b>	55,4	85,7	141,1	39,3	60,7
<b>KsKu25</b>	51,4	135,6	187	27,5	72,5
<b>KsKu30a</b>	65	123,5	188,5	34,5	65,5
<b>KsKu30b</b>	79,5	131,6	211,1	37,7	62,3
<b>KsKu39</b>	92,3	80,9	173,2	53,3	46,7
<b>KsKu46</b>	109,5	84	193,5	56,6	43,4
<b>KsKu70</b>	115,3	81	196,3	58,7	41,3

Tabelist võime täheldada, et nooremates puistutes ületab mulla süsiniku varu biomassist seotud süsiniku kogust. Vanemates puistutes on see vastupidine. Ühtlasi on leitud, et kogu segapuistu ökosüsteemi süsiniku varu kasv toimub valdavalt puude produktsiooni arvelt ning mulda jõudev ja mullast eralduv süsinikuvoog on tasakaalus või nõrgalt positiivne [10]. Kokkuvõttes on uuringus leitud, et ka suhteliselt vanas segapuistus (70 a.) toimub intensiivne süsiniku sidumine ning kuuse-

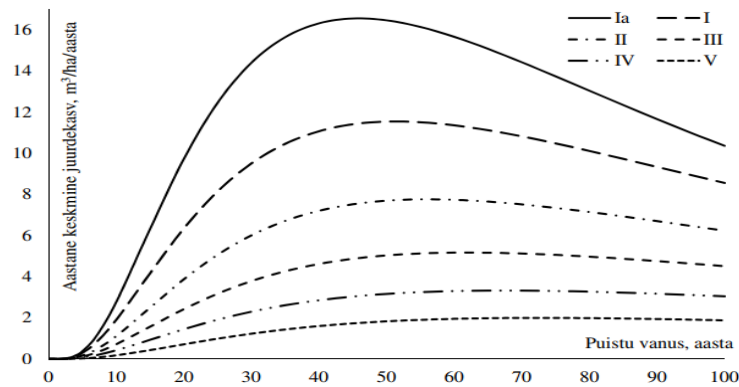


kase segapuistu kasvatamine on õigustatud. Seda näiteks võrreldes nii puhtkaasikute süsiniku sidumisvõimega kui ka segametsade suurema liigirikkuse ja parema haiguskindluse seisukohalt [10].

Seonduvalt puude maapealsesse biomassi seotud süsinikuga on täpsuse huvides oluline teada ka seda, et puu erinevate osade süsiniku sidumise ja akumulereerimise võime on erinev. Asjaolu on uuritud ja kirjeldatud mitmetes teadustöodes. Samas on näiteks ühes 2016. aasta magistritöös [11] leitud, et hariliku kuuse erinevate fraktsioonide süsiniku kontsentratsioon varieerub vaid mõne protsendi ulatuses, olles üldjuhul pisut alla 50%. Ühtlasi leiti ka seda, et hariliku kuuse tüve süsiniku kontsentratsioon on puu vanusest vähe sõltuv ning on orienteeruvalt 47%. Samas töös [11] on kirjanduslikele allikatele viidates nimetatud, et näiteks kaskede puhul tõuseb vanade puistute (> 60 a.) puhul vanades okstes süsiniku kontsentratsioon 55,2%-ni. Järeldusena praeguse töö kontekstis leian, et varem laialt levinud käsitlus, kus kuuse-kase segapuistu maapealse biomassi süsiniku kontsentratsiooniks on võetud arvestuslikult keskmisena 50%, on ka siinkohal asjakohane ja piisava täpsusega.

Teadaolevalt on analüüsitud ka võimalusi kasutada puistu biomassi ning selles leiduva süsinikuhulga hindamiseks kaugseire meetodeid. Mitmed uuringud on leidnud, et satelliitandmete ning ALS andmete kombineerimisel on võimalik saada usaldusväärne algandmestu vajalike arvutuste tegemiseks ning hinnangute andmiseks. Ühtlasi nenditakse, et metsa biomassi ja süsiniku kaardi saab kaugseire andmete abil koostada ka juba praegu mistahes alale Eestis [12]. Küll aga on oluline, et arvutusmudelitele lähendatakse kohalikele tingimustele sobivad täpsemad parameetrid vigade vähendamiseks.

Kokkuvõttes võib nentida, et arvamusi on erinevaid, kuid tuginedes uuringutele saab siiski väita, et intensiivselt majandatud metsad on süsiniku sidumist eesmärgiks seades efektiivsemad kui võrd suurenenud juurdekasvu käigus seovad atmosfäärist süsinikku intensiivsemalt [13]. Väidet ilmestab järgmine joonis (joonis 2.1), kus on toodud regressioonanalüüsi käigus tuletatud männikute keskmised juurdekasvu kõverad.



Joonis 2.1 Näitena männikute keskmise juurdekasvu sõltuvus vanusest [13]

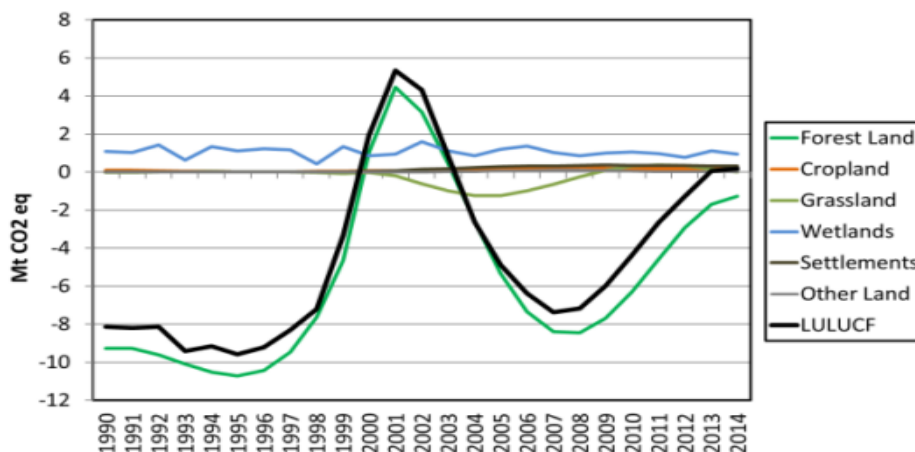
Eeltoodud jooniselt on ühtlasi tuvastatav ka seos kasvukoha boniteediga, mis omab vanuse kõrval juurdekasvu osas määravat tähtsust.

Nagu erinevad avaldatud arvutused on välja toonud, viiks metsade maksimaalse süsiniku sidumise eesmärgiks seadmine nooremate metsade raiumiseni. See omakorda vähendab puidutööstusele kättesaadava metsaressursi varu, seab ohtu elurikkuse ning vähendab metsast otseselt teenitavat tulu. Samas on viimane mõistlik hinnangu andmiseks siduda süsinikuühiku kauplemisshinnaga, mille väärtus on viimastel aastatel jõudsalt suurenenud. Rahvusvahelise praktika kohaselt on peetud raiesmikke süsiniku emiteerijateks ka 10 aastat pärast raiet, samas kui Eestis läbi viidud katsed näitavad, et juba seitsmendal aastal pärast raiet saab raiesmik/noorendik süsinikku siduvaks [9].

## 2.2 Arvestusreeglistik metsa süsinikuvaru hindamisel

Muuhulgas leiti veel aastal 2015, et Eestis oleks võimalik harvendusraiate kaudu oluliselt suurendada kogutava energiapuidu mahtu. Samas, aastal 2019 toimuva nõ järgmise perioodi Metsanduse Arengukava koostamisel peetakse LULUCF (maakasutuse, maakasutuse muutuse ja metsanduse) ning metsade süsiniku sidumisega seonduvat suurimaks regulatiivseks riskiks [9]. Seda ennekõike seetõttu, et kui seni toimus LULUCF sektori osas ainult süsinikuringluse jälgimine, siis 2018.aastal vastu võetud uue LULUCF määruse [14] kohaselt liidetakse nimetatud sektor samuti täielikult üldisesse kliimameetmete raamistikku ja seatakse sisse süsinikuringluse arvestus. Selle juures on määrava tähtsusega nõue, et LULUCF sektori heitkogused peavad saama kompenseeritud ning sektori koguheidde ning süsiniku sidumine peab olema vähemalt tasakaalus. Euroopa Komisjoni ühendatud uurimiskeskuse poolt on aastal 2016 avaldatud aruandes [15] vaadeldud LULUCF sektori mõju tervikuna Euroopa Liidu kliima ja energiapoliitikale. Muuhulgas on tehtud ka riigipõhised

analüüsid ning tagasivaated heitkogustele kuivõrd minevikuperioode arvestatakse otseselt uute nõuete seadmisel. Järgmine graafik (joonis 2.2) on nimetatud aruandest ja ilmestab Eesti kasvuhoonegaaside heitkoguseid LULUCF ning valiku maakasutustüüpide lõikes.



Joonis 2.2 Kasvuhoonegaaside heitkogused Eestis LULUCF sektori ja erinevate maakasutustüüpide lõikes [15]

Eeltoodud graafikult näeme, kuidas aastatel 1999 kuni 2003 on metsamaa osas olnud oluline kasvuhoonegaaside heitkoguste suurenemine. Seda seostatakse otseselt metsamaa erastamise ning tol ajal aktiveerunud raietegevusega [16]. Aastal 2017 on Keskkonnaministeeriumi poolt koostatud sama andmestu tulevikuperspektiividenäena kaks erinevat stsenaariumi, milles kumbki ei näe metsanduse osas ette muutumist kasvuhoonegaaside emiteerijaks [16].

Periodiks 2021-2025 on koostatud Eesti metsanduse arvestuskava eelnõu, kus määratakse riigi metsade võrdlustase (FRL), mille põhjal hakatakse hiljem pidama majandatava metsamaa süsiniku emissioonide ja sidumise arvestust. Nimetatud dokumendi eelnõust [17] võib välja lugeda, et Eesti on pakkunud oma metsade võrdlustaseme sõltuvalt arvestusest vahemikus -1,48 kuni -1,89 Mt CO<sub>2</sub> ekvivalenti. Neist väärtus -1,48 on saadud puittoodete osakaalu (kui olulist pikaajalist süsiniku sidujat) arvestamata. Keskkonnaagentuuri (Raudsaar, M. jt) hinnangul tähendab selline võrdlustaseme määratlus seda, et tüvepuidu raiemaht metsamaalt jääb tulevikus tasemele 9-10 miljonit m<sup>3</sup>. Lubatud kompensatsioonimehhanism võimaldab raiemahtu 1 miljoni m<sup>3</sup> võrra suurendada, ent sel on piirangud ning järgmisel arvestuskava perioodil võib eeldada kohustust tagada suurem kasvuhoonegaaside sidumine.

Ka Riigikogu on rahvusvahelisele praktikale tuginedes otsustanud, et metsade süsinikuvaru peab pikas perspektiivis säilima [18].

## 2.3 Metsade majandamine ja süsinikukaubandus

Metsaökosüsteemi pakutav puit ja süsiniku sidumine ei ole tänapäevases kontekstis selle koosluse kõige olulisem hüve [19], ent hindamise lihtsuse ja antud töö kontekstis käsitleme alljärgnevalt lühidalt ka seda aspekti.

Puit on selgelt hinnastatav ning hinda määrab nõudluse ja pakkumise tasakaal. Metsaga seotud süsinikuvoo rahaline väärtus on tuletatav läbi süsinikukaubanduse baashinna. Teostatud uuringus [19] võrreldi metsast saadavat tulu olukorras, kus seda ühel juhul majandatakse puidu saamise eesmärgil ning teisest küljest süsiniku sidumise ning talletamise eesmärgil. Kokkuvõttes leiti, et puidu väärtus süsiniku sidujana on kordades suurem kui puidu kui materjali turuhinna põhiselt saadav tulu [19]. Selle juures ei ole veel arvestatud muid kasvava metsa hüvesid. Ühtlasi leiab nentimist ka üldteada fakt, et vanades metsades ei toimu intensiivset süsiniku sidumist, küll aga on vanad metsad käsitlevad kui efektiivsed süsiniku reservuaarid. Seda muidugi hetkeni, mil algab puude looduslik väljalangemine ja intensiivne lagunemine.

Metsamaterjali müügihinnad on tõusnud olles 2019.aasta veebruaris männipalgil 78,05 €/tm, kuusepalgil 77,42 €/tm ja kasepalgil 68,1 €/tm ning okaspuu küttepuul 50,52 €/m<sup>3</sup> väikese koguse puhul (www.rmk.ee). Ootuspäraselt on intensiivistunud süsinikukaubandus ja tõusnud kauplemisühiku hind. Ehkki täna otsest seost metsanduse ja EL reguleeritud CO<sub>2</sub> kaubanduse vahel ei ole, tasub tulevikku planeerides sellise võimalusega vähemalt taustal arvestada. Alljärgneval joonisel (joonis 2.3) on toodud EL-s süsinikukaubanduse raames kujunenud CO<sub>2</sub> kauplemisühikute hinna dünaamika viimase viie aasta lõikes (Allikas: <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte>).

### CO2 EUROPEAN EMISSION ALLOWANCES PRICE CHART



Joonis 2.3 EL süsinikukaubanduses kasutatavate kauplemisühikute hinnadünaamika viimase viie aasta jooksul

Jooniselt võime saada kinnitust, et aastaid paigalseisus püsinud ning oma eesmärki soovitud kujul mitte täitnud süsihappegaasi hinda kujundav kauplemissüsteem on viimasel ajal tekitanud hinnamuudatuse ja seega soovitud majandusliku surve emiteerijatele. Näeme, et süsteemselt on kauplemisühiku hind aastate jooksul ca 5 eur/t tasemelt jõudnud ca 27 eur/t tasemele. Üheks põhjuseks on kindlasti suurenenud üleminek turumehhanismidele ning nõ tasuta jagatavate kauplemisühikute käibelt eemaldamine.

Eeldades kliimaregulatsioonide järjepidevat karmistumist ja arvestades erinevate kütuste põletamisel eralduvate süsihappegaasi heitkogustega peame ka siinkohal nentima teatavaid riske kui näeme puitu vaid energiaallikana. Olgu võrdluseks toodud mõningate kütuste ja nende nimetuse järel sulgudes vastavad CO<sub>2</sub> heitkogused (ühikuks kgCO<sub>2</sub>/kWh): puit (0,39 taasmetsastamist arvestamata), diiselmootor (0,27), maagaas (0,20) (Allikas: [https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index\\_e.php](https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index_e.php)).

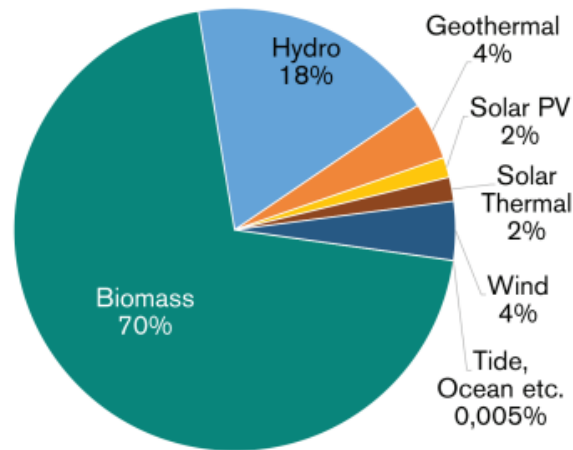
Veelkord, puidu turuhinna ja süsiniku kauplemisühiku hinna otsene võrdlus ja toodud viisil kohaldamine ei saa moodustada strateegiliste otsuste tõendatud baasi, ent see annab siiski indikatsiooni majanduslike otsuste edasiseks kaalumiseks. Lühidalt öeldes on toimunud muudatused selge märk sellest, et puitu ei saa täna ega tulevikus näha vaid energiaallikana.

### **3. METSAD TAASTUVENERGIA ALLIKANANA**

Lisaks eelkäsitletud kliimameetmetele on metsade nägemine taastuva energia allikana saanud selgemaid piiranguid samuti läbi nn EL taastuvenergia direktiivi 2018. aastal toimunud muutmise. Nimelt olid mitmed huvigrupid ja hulgaliselt teadlasi osundanud, et metsade raiumine ja vaid energeetilisel eesmärgil kasutamine ei peaks olema loetud taastuvenergia tootmiseks [20]. Taastuvenergia allikana peaks samale viitele tuginedes erinevatest puidusortimentidest nägema vaid raidmeid ja puidujäätmeid. Muudetud direktiiv on asjaolu arvesse võtnud ning rõhutab seetõttu läbivalt metsade majandamise säästlikkuse kriteeriume ning nendega arvestamise vajadust. Ka on astutud samme takistamiseks kaugematest maadest, sh arenguriikidest puidu importi läbi transpordil eralduva süsihappegaasi heitkoguse arvestamise kohustuse. Ühtlasi kinnistab direktiiv aastaks 2030 eesmärgi saavutada taastuvatest allikatest toodetud energia osakaaluks energia lõpptarbimises 32% [21]. Tõusvas trendis propageeritakse puidu kaskaadkasutust ehk vajadust eelistada pikema kasutusajaga tooteid. Siiski saame siinkohal nentida, et metsade süsinikusidumise hoidmiseks on vajalik metsade majandamine, sh kontrollitud ja piiratud viisil raiumine. Tegevuse käigus saadav puit on tänaste teadmiste juures kindlasti suurepärane alternatiiv asendamaks erinevatel elualadel kasutatavaid suurema energiamahukusega materjale. Arusaadavalt tekib kirjeldatud tegevuse käigus puitmaterjali ja selle jäätmeid, mida sobilik suunata energiatootmisse. Eeltoodud põhjusel ei lõppe käesolev töö mitte selle teadmisega, vaid järgmises peatükis tuuakse juba konkreetsem ülevaade puiduenergia kasutusest.

#### **3.1 Puidu energeetiline potentsiaal**

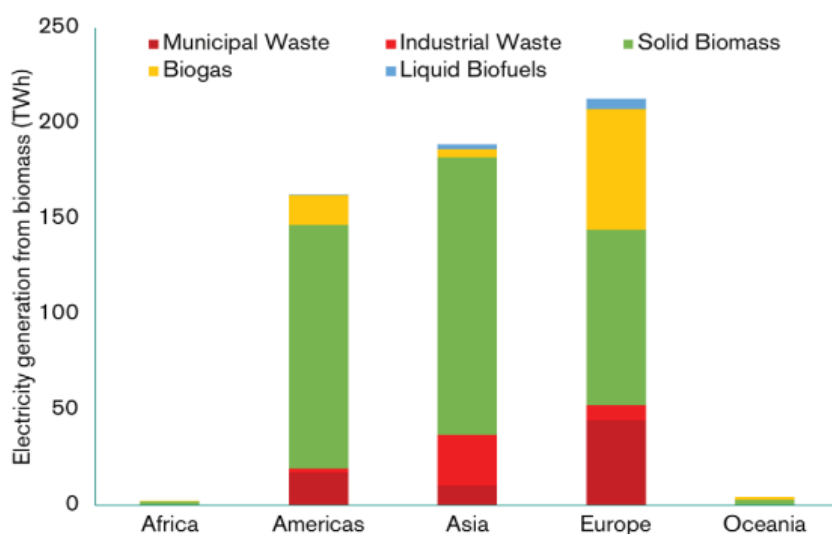
Maailmas omab taastuvate energiaallikate kasutamises äärmiselt suurt osakaalu biomass. Selle hulka arvatakse tema erinevad vormid ja kategooriad alates rohtsest biomassist kuni eriliigiliste jäätmeteni. Järgmisel graafikul (joonis 3.1) [22] on toodud 2016.aasta reaalne primaarenergia pakkumine taastuvate energiaallikate lõikes Rahvusvahelise Energiaagentuuri (IEA) andmetel.



Joonis 3.1 Primaarenergia taastuvatest allikatest 2016.aastal IEA andmetel [22]

Graafikule saab lisada, et biomassi suur osakaal on domineeriv kõikides maailmajagudes. Samas varieerub see näiteks Okeaanias 40% osakaalust 90% osakaaluni Aafrikas [23].

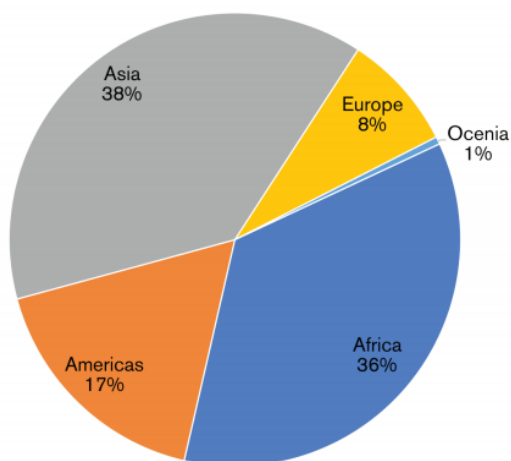
Maailma Biomassi Assotsiatsiooni hinnangul on taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia koguste arvestuses biomass kolmandal kohal hüdro- ja tuuleenergia järel [23]. Sama allika hinnangul toodeti 2016.aastal 571 TWh bioenergiat, millest tahke biomass nagu puidugraanulid ja puiduhake moodustas 65%. Seejuures 19% sama kategooria energiat toodeti jäätmetest ning 15% biogaasist. Maailmajagude kaupa on biomassi erinevate kasutuskategooriate osakaalud elektritootmises erinevad nagu järgmiselt graafikult (joonis 3.2) [23] võime näha.



Joonis 3.2 Erinevat tüüpi biomassist toodetud elektrienergia maailmajagude kaupa aastal 2018 [23]

Graafikult võime välja lugeda, et biomassi elektritootmiseks kasutamise esirinnas on Euroopa ning teistest maailmajagudest erinevalt omab suurt jäätmete ning biogaasi kasutamise osakaalu.

Otseselt puitunud biomassi, mille hulka loetakse nii tüvepuit kui ka muud puidufraktsioonid, kasutamine oli 2017.aastal 1,9 miljardit m<sup>3</sup> [23] ning sellest peamine osa leidis kasutamist Aasias ja Aafrikas, energiaallika kasutusosakaaludena vastavalt 38% ja 36% [23]. Maailmajagude kaupa ilmestab puitkütuste kasutamist järgmine graafik (joonis3.3).

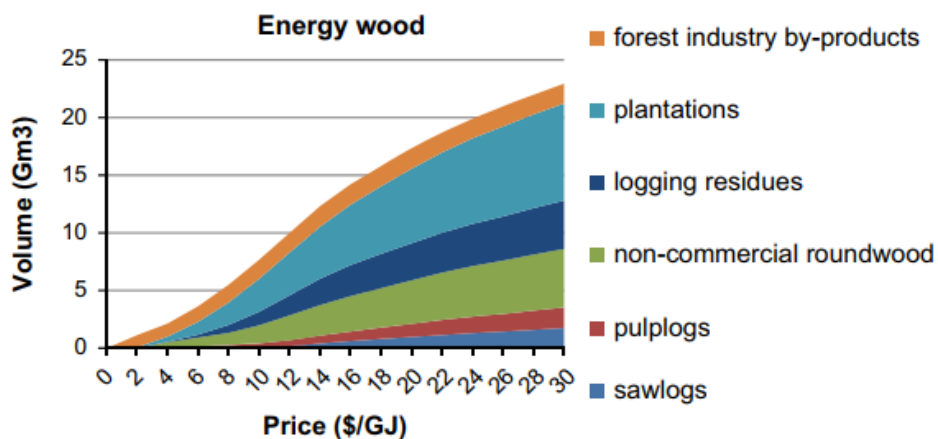


Joonis 3.3 Puitunud biomassi kasutamine 2017.aastal maailmajagude kaupa [23]

Kui eeltoodud graafikult eristada erinevad puidust toodetud kütused, siis näiteks puidugraanulite osas oleks Euroopas toodetud puidugraanulite osakaal Maailma arvestuses 54%. Teadaolevalt on märkimisväärselt suur osa selles ka Eesti tootjatel – Eesti puitoodete ekspordi osas on see suurima osakaaluga kaubagrupp [24]. Mis puutub puidugraanuli tootmiseks kasutatava puidu kvaliteeti, siis viimaste aastate trendina peame paraku nentima, kus ka suurema lisandväärtuse potentsiaaliga puit leiab autori hinnangul sageli arusaamatult kasutamist just puidugraanuli tootmises. Puidubilansi puitkütuste tootmise osas näeme viimaste aastate statistikast eriti hakkepuidu ja puidugraanuli tootmismahude suurt tõusu [24].

Puidu kasutusintensiivsus ja –otstarve on täna otseselt sõltuvuses traditsiooniliste kasutusviiside ja neist saadavate toodete hinnadünaamikast. Erinevaid hinna- ja turudünaamikast sõltuvaid seoseid on palju uuritud. Näiteks on ühes uurimustöös hinnatud puitunud biomassi energeetilist potentsiaali aastaks 2050 [25] lähtuvalt puidu hinnast ja sellega teoreetiliselt kaasnevast maakasutuse muutusest. Seosed on selgelt välja joonistunud ning üheselt võib järeldada, et energiahinna tõus toob kaasa nii tootmisahelate kui antud juhul nende aluseks olevate maakasutusviiside muutused. Eelnimetatud tööst on siinkohal välja toodud graafik (joonis 3.4), mis ilmestab konkreetsel juhul leitud seost energiapuidu tootmismahu ja energia maksumuse vahel.





Joonis 3.4 Puitkütuse tootmisintensiivsuse teoreetiline sõltuvus energiahinnast [25]

Graafikult saame välja lugeda, et piisava energiahinna taseme juures võib eeldada sihipärast ja suunatud tegevust suuremas mahus puitse biomassi tootmiseks. Antud juhul nähakse ette energiapuidu istanduste rajamise intensiivistumist, mis muuhulgas toob kaasa nii looduslikult kasvavate metsade kui rohumaade pindala vähenemise [25]. Otseselt metsade puhul nähakse juba baasstsenaariumi puhul ette, et sisuliselt ka nõ traditsioonilistest metsakooslustest ja puistutest on ca 50% inimese poolt intensiivselt majandatavad.

Muuhulgas on samas töös avaldatud ka spetsiaalsete energiapuidu istanduste teoreetiline tootlikkus Maailmajagude kaupa. Selles leitakse, et maailma keskmine on 20,3 m<sup>3</sup>/ha/aastas samas kui Euroopa vastav näitaja jääb tasemele 16,4 m<sup>3</sup>/ha/aastas. Suurimat tootlikkust nähakse Lõuna-Ameerikas suurusjärgus 30,5 m<sup>3</sup>/ha/aastas.

Aastaks 2050 prognoositakse kõigest hoolimata antud töö põhiselt siiski maailmas puitse biomassi kütusena kasutamise **vähendamist 1,8 miljardi kuupmeetrini aastas**. Selle juures nähakse, et koos kodumajapidamistes kasutatavate halupuudega võimaldab ka aastal 2050 puitne biomass katta primaarenergia vajadusest summaarselt kokku kuni 18% [25].

## 4. ENERGIAKASUTUS EESTIS JA VALGAMAAL

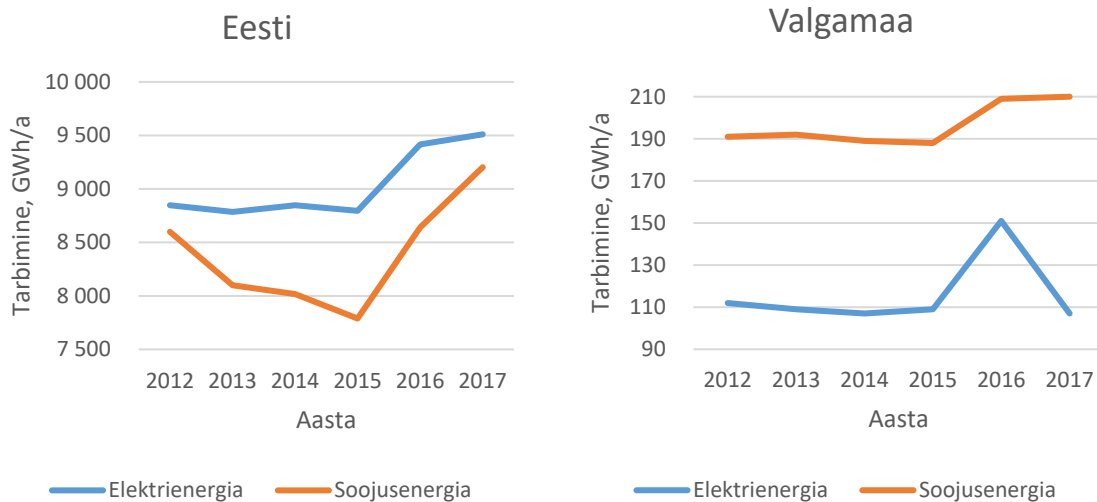
EUROSTATi andmetel moodustas Euroopas taastuvatest allikatest toodetud energia osakaal aasta 2017 summaarsest lõpptarbimisest 17,53%. Sama allika andmetel oli Eestis ainuüksi taastuvatest allikatest toodetud elektrienergia osakaal 17,03% ning üleüldine taastuvatest allikatest toodetud energiakogus ulatus kogutarbimisest 29,21%-ni, mis on selgelt 2020. aasta eesmärke täitev [26]. Faktiliselt täitis Eesti 2020. aastaks seatud eesmärke juba aastal 2014 ning selle peamiseks põhjuseks loetakse soojusmajanduses toimunud üleminekut gaasilt ja põlevkiviõlilt biomassi kütusena kasutamisele [27]. Samas oli ka juba aastaks 2016 loodud biomassil põhinevaid elektritootmisvõimsusi 118 MW ulatuses, mis moodustas 25% kõikidest taastuvatel allikatel põhinevatest tootmisvõimsustest.

Koostatud on erinevaid tulevikustsenaariume, milles ühe korral nähakse, et aastaks 2030 kasvab Eestis energia brutotarbimine 10-16% ehk umbes 0,85% aastas [28] jõudes tasemele 41-43 TWh aastas. Kuivõrd taastuvenergia kasutuselevõtu eesmärgid on seotud üldise energiatarbimisega, tuleb eeltoodud tarbimismahtude võimalikku muutumist arengu planeerimisel arvestada.

Tartu Ülikooli ja partnerite koostöös hinnatud madala süsinikuga majanduse suunas liikumise võimaluste aruandes [29] on konstrueeritud kolm erinevat stsenaariumit madalast kõrge/optimaalse CO<sub>2</sub> heiteni. **Neist madalsüsiniku stsenaariumi juures on aastateks 2020...2030 hinnatud kogu puidu energeetiliseks potentsiaaliks Eestis 68 395 TJ ehk ca 19 TWh. Sama hinnang optimaalse (suurem CO<sub>2</sub> emissioon) stsenaariumi tingimustes on 101 502 TJ ehk ca 28,2 TWh** [29]. Siinkohal on veelkord oluline nimetada, et seoses Eesti metsade vanuselise struktuuriga viib dokumendis nimetatud optimaalne stsenaarium ehk puidu intensiivsemat kasutamist ette nägev stsenaarium kättesaadava puidu energia süsteemsele vähenemisele järgmistel kümnenditel.

Taastuvate energiaallikate kasutamisel kui ka energia haja- ja väiketootmise juures peetakse seni võtmetähtsusega asjaoluks toodetud energia kohapealse kasutuse osakaalu. Eeldatakse, et sellega hoitakse täiendavalt kokku toodetud energia kaugustesse transportimisega seonduvad kulud. Seetõttu peetakse ka käesoleva töö puhul esmavajalikuks vaadelda seonduvat energiakasutust Valgemaal ja Eestis. Siinkohal ei tasu mujal toimuva suhtes olla ka ignorantne kuivõrd välisturgude nõudlus on juba kujundanud ja võib tulevikus veelgi enam kujundada nõudlust Eestist kättesaadavate taastuvate energiaallikate osas. Kuigi, arvestades keskpikka perspektiivi energiatõhususe ja kliimameetmete kontekstis võiks eeldada, et keskkonnahoidlikumate arengustsenaariumite puhul energianõudluse kasv stabiliseerub ja peatub selgelt juba pärast aastat 2030 (IPCC, 2017).

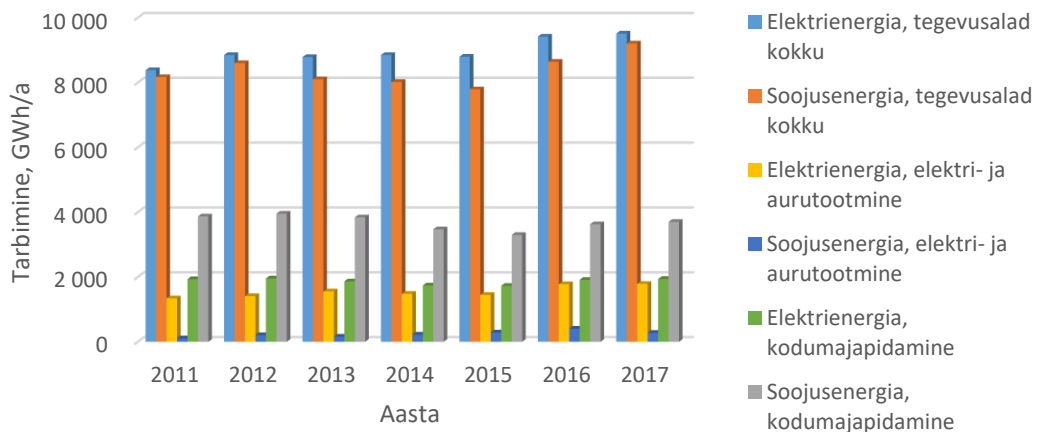
Olles tänases vaatleme järgnevalt lühidalt energiakasutust Eestis ja Valgemaal. Statistikaameti andmetest [30] on välja võetud valim energiakasutuse andmetest ning esitatud allolevatel graafikutel (joonis 4.1). Kuivõrd tervikuna riigi ja antud juhul Valgamaa energiakasutus erineb suurusjärgudes on andmed jälgitavuse huvides esitatud eraldi graafikutel.



Joonis 4.1 Elektri- ja soojusenergia kasutamine Eestis ja Valgemaal, GWh/a [30]

Toodud graafikute võrdluses võime nentida, et nii osalt Valgemaal kui riigis tervikuna on viimaste aastate jooksul suurenenud elektri- ja soojusenergia tarbimine. Mõnedel juhtudel on tõusukõver seostatav konkreetsel aastal valitsenud ilmastikuga, samas täiendab seda ka ilmselt aset leidnud üleüldine jõukuse kasv ja ka muude tarbimismahude suurenemine.

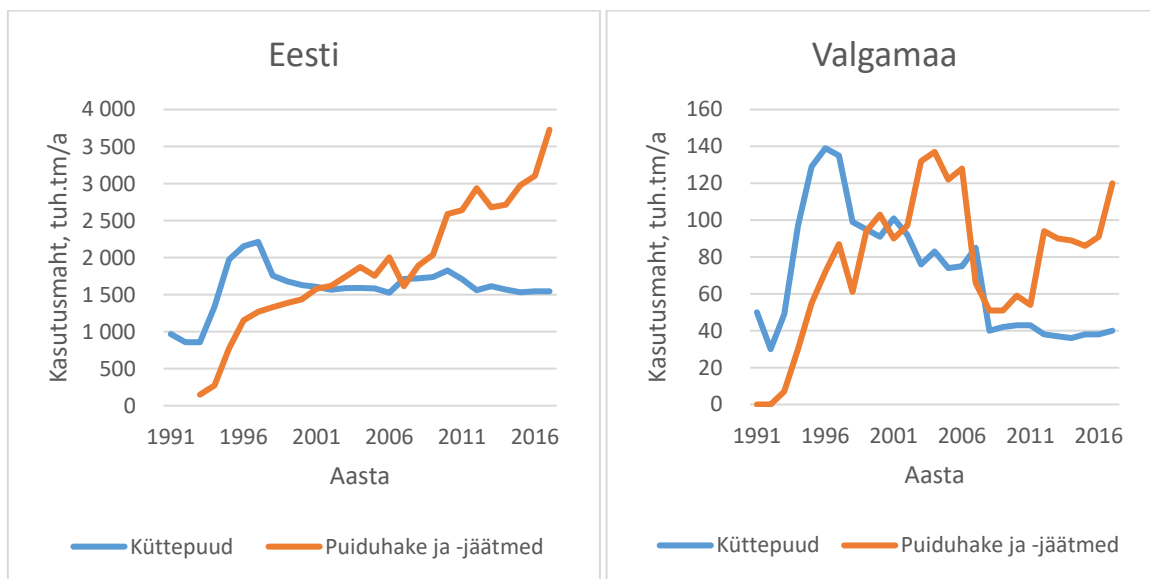
Kindlasti on tulevikuperspektiivide kujundamiseks ja stsenaariumite konstrueerimiseks hea teada, kes on peamised tarbijad. Olgu siinkohal toodud Statistikaameti andmetele [31] tuginev graafik (joonis 4.2) üleriigilisest elektri- ja soojusenergia tarbimisest valimi tegevusalade kaupa.



Joonis 4.2 Elektri- ja soojusenergia tarbimine Eestis valimi tegevusalade kaupa, GWh/a [31]

Üks olulisemaid asjaolusid, mida graafikult märgata on seotud sellega, et kodumajapidamiste soojusenergiatarve moodustab kogutarbest suhteliselt suure osa. Kindlasti on see ühest küljest viidatud võimalus kohaliku kütuse kohapealseks kasutamiseks, teisalt on siinkohal ilmselt tuletatav seos investeerimisvajadusega energiatõhususse.

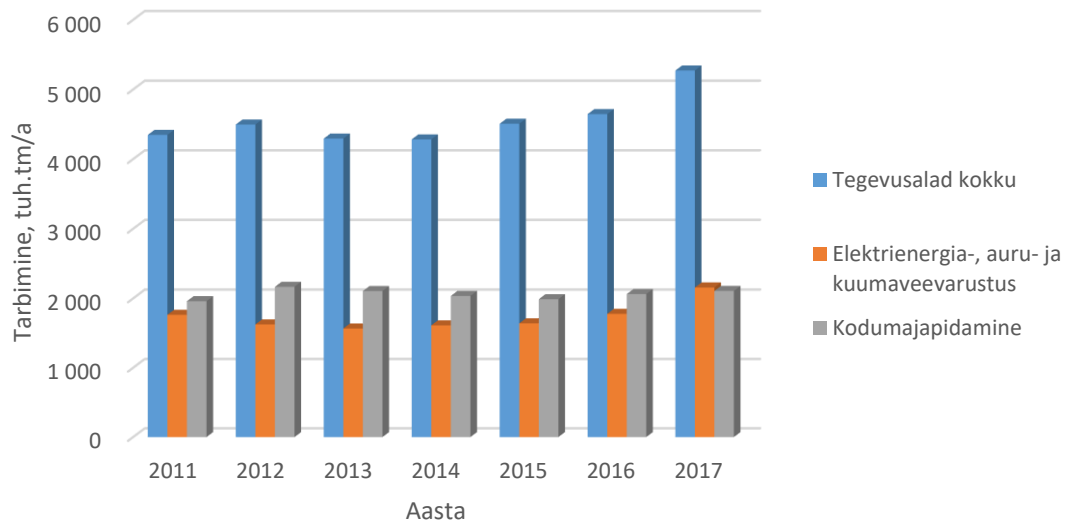
Käesoleva töö kontekstis omab erilist tähendust puidu ja puitkütuste kasutamine, mistõttu toome järgnevalt sama andmestu [32] põhjal välja ka nendega seonduvate põhiandmete graafikud (joonis 4.3) samuti Eesti ja Valgamaa lõikes.



Joonis 4.3 Küttepuude ja puiduhakke kasutamine Eestis ja Valgamaal, tuh.tm/a [32]

Graafikutelt võime selgesti välja lugeda viimasel kümnendil võimendunud trendi küttepuude vähemale kasutamisele ning puiduhakke kasutamismahtude suurenemisele. Arvestades andmestu tüüpi võib eeldada, et siinkohal on ennekõike määravaks saanud raidmete, võsa ja raie- ning puidujätmete senisest intensiivsem kasutamine kohalikele kütustele ümber ehitatud katlamajades.

Riigisiselt on mingil määral ja ennekõike nõudluse sisuliseks kirjeldamiseks asjakohane vaadelda ka puitkütuse tarbimist tegevusalade kaupa. Tuginedes taaskord Statistikaameti andmetele [31] võib öelda, et väärindamata puidu peamised tarbijad on elektrienergia-, auru- ja kuumaveevarustus ning kodumajapidamised. Nimetatud tegevusalade tarbimismahtusid iseloomustab järgmine graafik (joonis 4.4).

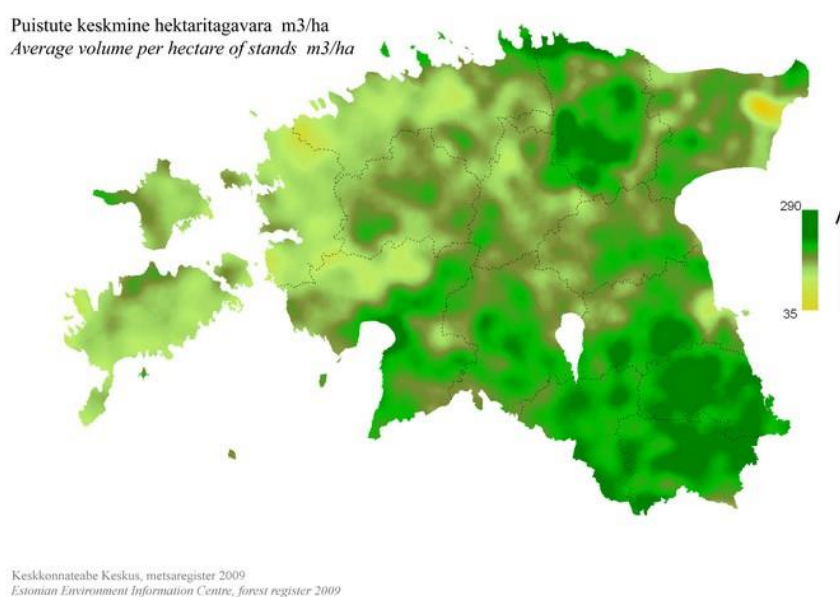


Joonis 4.4 Väärindamata puitkütuse tarbimine Eestis valimi tegevusalade kaupa, tuh.tm/a [31]

Siinkohal on oluline graafiku juurde märkida, et paljudest arvestusele allutatud tegevusaladest on siinkohal toodud vaid kaks peamist. Ehk siis „kokku“ klauslit kandvates tulpades on rohkem kui vaid kaks samuti samal graafikul kajastatud tegevusala. Mis on graafikult oluline märgata, on samuti viimastel aastate suurenenud puidukasutus elektritootmisel ning kodumajapidamiste üsna stabiilselt püsiv tarbimismaht. Neist esimest on kindlasti soodustanud Narva elektrijaamades puitkütuse kasutamine.

## 5. METS EESTIS

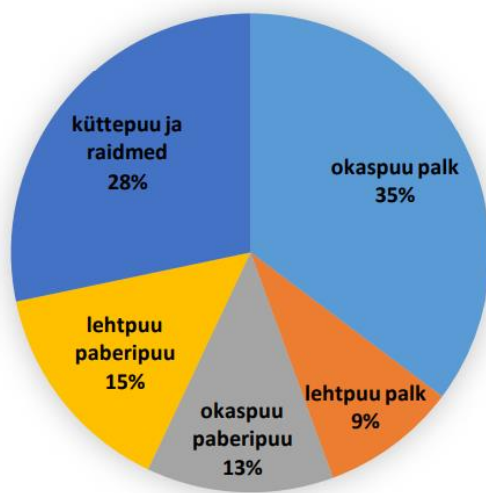
Keskonnaagentuuri 2018.aasta avaldatud andmetel on Eestis tervikuna metsamaa pindala kokku 2,33 miljonit hektarit ja riigist 53,6% on kaetud metsaga [33]. Selle juures on arvestatud metsa tagavaraks 486 104 tuhat tihumeetrit [33]. Samadele autoritele tuginedes on järgmise kümnendi jooksul uuendus- ja harvendusraiega kokku võimalik raiuda 11,6 mln tm/a [34]. Eesti metsade keskmise hektaritagavara suuruse ja üleriigilise ruumilise paigutuse iseloomustamiseks on jätkuvalt võimalik kasutada Keskonnaagentuuri poolt aastal 2009 avaldatud illustratsiooni (joonis 5.1), mis toodud järgnevalt.



Joonis 5.1 Metsade hektaritagavara suurus ja selle üleriigiline paiknemine [Keskonnateabe Keskus, 2009]

Käesoleva töö koostamise aegu, ehk aastal 2019 on Eestis koostamisel uus Metsanduse arengukava, mille üheks eesmärgiks on määratleda valikud tulevikus toimuva metsamajanduse kohta. Dokumendi koostamisele on eelnenud alusuuring ja seonduvalt antud asjassepuutuvaid eksperthinnanguid. Kuivõrd riiklikult koondab metsamajanduslikku teavet ning annab otsustajale sisendteavet Keskonnaagentuur, tuleb lähtuda ka sealsete kogunud ekspertide hinnangutest. Näiteks on seal prognoositud metsade majandusvõimalusi aastani 2050, tuginedes kolmele erinevale arengutsenaariumile. Hoolimata sellest, et pikast prognoosiperioodist tulenevalt viidatakse suhtelisele ebatäpsusele, on tõenäoline, et juba selles ajaperspektiivis on Eesti majandatavate metsade osas ette näha nii tagavara kui juurdekasvu vähenemist [35]. Suurusjärgudena on tänase teadmise juures võimalik eeldada, et aastaks 2050 on majandatavate metsade tagavara tasemel 290-352 miljonit tihumeetrit ning juurdekasv tasemel 11,7-12,3 miljonit tihumeetrit aastas [35]. Täna on samad näitajad vastavalt 413 ja 14 miljonit tihumeetrit.

Nii täna kui tulevikus eelduslikult veelgi rohkem tuleb puidu mis iganes kasutusviisi juures arvestada puidu süsihappegaasi sidumise ja pikaajase talletamise võimega. Puidu kasutamisel energeetilisel eesmärgil tuleb eelistada madalakvaliteedilist ning puidutööstuse kõrvalsaadusena tekkinud puitu [6]. Siinkohal on oluline pöörata tähelepanu raiutava metsa ja sealt saadava puidu sortimenteerimisele. Järgmisel graafikul (joonis 5.2) [24] on välja toodud reaalne 2016.aasta puidubilanss, kus on eristatud metsamaalt pärit likviidse puidu maht sortimentide kaupa.



Joonis 5.2 Eesti metsamaalt saadud likviidse puidu maht sortimenditi aastal 2016 [24]

Graafikult saame lugeda, et kogu puidust vaid pisut enam kui veerand on kohe algselt käsitletav kui otsest energiakasutuse potentsiaali omav. Ka Eesti teadlaste kokkuvõtte mujal teostatud uuringutest asub seisukohale, et puidu kasutamine otsest energia tootmiseks on mõistlik vaid muuks otstarbeks mittesobiva puidu puhul [36]. Samas töös oli muuhulgas oluline rõhuasetus ka bioloogilise mitmekesisuse ja metsamajanduse intensiivsuse seoste hindamisel. Selle põhijäreldusena leiti, et maksimaalset tulu metsa majandamisest koos suurima süsiniku sidumise ja esinduslikuma bioloogilise mitmekesisusega ei ole võimalik saavutada. Küll aga järeldati, et kõikide nende eesmärkide mingil määral täitmiseks on metsade mõõdukas majandamine siiski vajalik [36].

## 5.1 Puidu energeetiline potentsiaal puuliikiide lõikes

Kuivõrd käesoleva töö kontekstis omab olulist tähendust puidu energeetiline väärtus, on järgnevalt toodud ülevaade meie enamlevinud puuliikide energiasisaldust ja kütteväärtust iseloomustavatest näitajatest.

Puidu energeetiline potentsiaal ja täpsemalt kütteväärtus on otseses sõltuvuses puidu niiskusesisaldusest ja tihedusest. Energiamaajanduse arengukavas aastani 2030 näib olevat puidu keskmiseks kütteväärtuseks võetud 2 MWh/tm. Täpsema tulemuse huvides on mõistlik arvestada ka erinevate puuliikide erinevat tihedust ja erikaalu. Erinevatele kirjanduslikele allikatele tuginedes saab öelda, et puidu kui materjali kütteväärtus on sõltumata puuliigist samane ja võiks keskmisena olla üldistatud väärtusele **18,9 MJ/kg**. On täheldada nimetatud väärtusest erinevaid näitajaid erinevate sortimentide osas, ent ka siin ei ole kütteväärtuse diapasoone kuigi suur. Küll aga määrab oluliselt kütteväärtust puidu niiskusesisaldus, mis on sageli erinevates arvestustes võetud õhkuiva puidu iseloomustamiseks vahemikku 12-15%. Kõige olulisem muutuja puidust saadava energiakoguse määramises on aga puuliik kuivõrd erinevate puuliikide tihedused ja sellega seonduvalt puitu seotud põlevaine kogused varieeruvad. Allolevasse tabelisse (tabel 5.1) on kombineeritud kirjanduse põhjal [37], [38], [39] meie peamiste puuliikide tihedused 15% niiskusesisalduse juures.

Tabel 5.1 Erinevate puuliikide tihedused 15% niiskusesisalduse juures (Allikas: kombinatsioon erinevatest kirjanduslikest allikatest [37], [38], [39])

Puuliik	Õhkuiva puidu tihedus kg/m <sup>3</sup> (niiskusest 15%)
Mänd	515
Kuusk	460
Kask	680
Lepp	545
Haab	518
Muud lehtpuud	581
Tamm	690...700

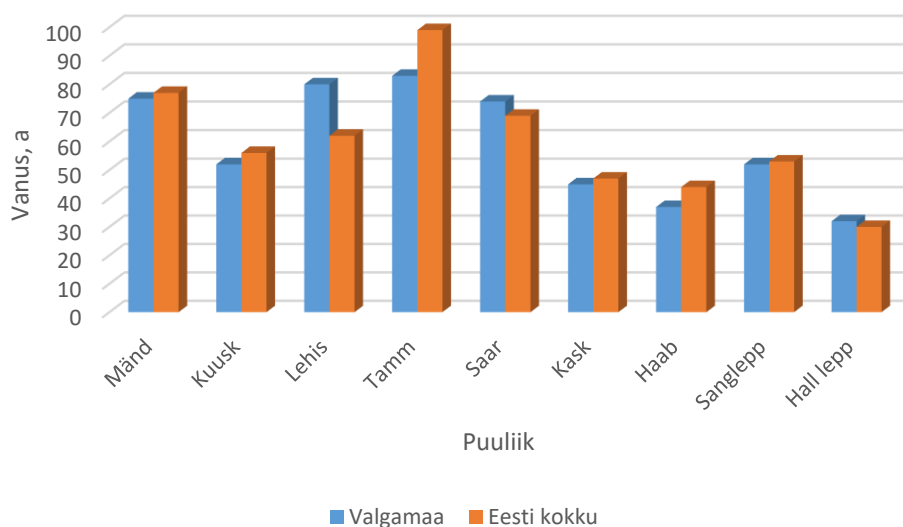
Tabelist saame kinnitust, et meie maal enamlevinud puuliikide lõikes omab suurimat tihedust puuliigina kask. Olles orienteeruvalt 680 kg/m<sup>3</sup> on see vaid mõnikümmend kilogrammi väiksem kui sama näitaja tammel. See annab kasele võrreldes muude enamlevinud puuliikidega mahuühiku kohta suure kütteväärtuse. Olgu märgitud, et kui vaadelda eraldi ka kase koore energiasisaldust, siis sellises arvestuses on see samuti temas leiduvate tõrvade toel üks suurimaid.



## 5.2 Mets Valgamaal

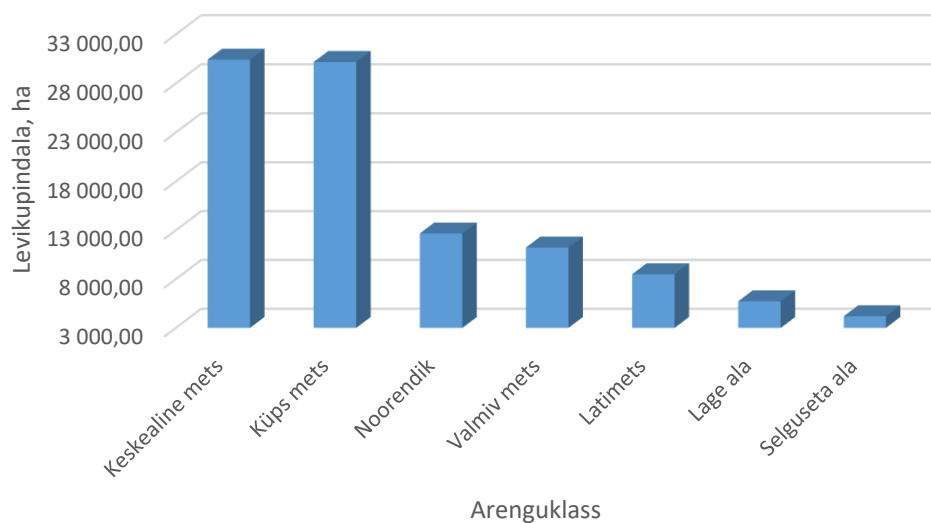
Valgamaa üldpindala on 204,3 tuhat hektarit ja statistilise metsainventeerimise andmetel moodustab sellest metsamaa 115 tuhat hektarit ning arvestuslik metsasus on 56,3% [33]. Aastaraamat „Mets 2017“ tugineb metsanduslikes hinnangutes valdavalt statistilisele metsade hindamisele ning selle andmetel on Valgamaa metsatagavara 26 393 tuhat m<sup>3</sup> ehk hektari kohta 229,4 m<sup>3</sup>. Selle järgi on Valgamaa metsade hektaritagavara maakondade lõikes üks Eesti suurimaid, jäädes pisut alla vaid Võrumaa samale näitajale. Valgamaa ja tervikuna Eestis puistute keskmise hektaritagavara võrdlev väljavõte aastaraamatu Mets 2017 järgi on toodud käesoleva töö lisa 1.

Metsaregistri kannete alusel on 2017.aasta seisuga Valgamaa metsadest korraldatud 93 904 ha, millest 52% on riigimets. Ülejäänud on eramets, millest omakorda füüsilistele isikutele kuulub 28%. Kuivõrd üheks raiete teostusvõimalusi määravaks teguriks on puistute vanus, toome siinkohal graafikuna (joonis 5.3) välja ka Valgamaa ning Eesti puistute keskmise vanuse võrdluse enamuspuliigi järgi.



Joonis 5.3. Valgamaa ja Eesti puistute keskmise vanuse võrdlus enamuspuliigi järgi [33]

Graafikult võime välja lugeda, et Valgamaa metsad ei erine vanuselise struktuuri järgi palju Eesti keskmisest ja puuliikide lõikes on Valgamaal vaid hall lepike keskmine vanus samast Eesti ülesest näitajast pisut kõrgem. Metsakorralduses on laialdast kasutamist leidnud ka puistute arenguklassidesse jaotamine. Ehkki selle juures näeb tavaliselt selgeid seoseid puistu vanusega, arvestab arenguklass tegelikku nimetusele kohast situatsiooni, mis on sõltuvuses ka kasvutingimustest ja paljudest muudest teguritest. Metsaregistri 2017.a andmete põhjal jagunevad Valgamaa metsad arenguklassidesse nagu allolevalt graafikult (joonis 5.4) võib näha.



Joonis 5.4 Valgamaa metsade pindala arenguklasside kaupa [Metsaregister 2017]

Graafikult tajume korreleeruvust varem esitatud vanuselise struktuuri graafikuga kuivõrd näeme ka siin suurt keskealiste ning küpsete metsade osakaalu. Ühest küljest viitab see kohesele või peatsele raievõimalusele. Teisest küljest näeme suurt vahet järgmiste arenguklassidega, mis omakorda viitab sellele, et suuremahuliste raiete tegemine ei ole pikas perspektiivis kestvalt võimalik. Teisisõnu, sarnaselt mujal riigis toimuvale võib ka Valgamaal tõenäoliselt ees oodata raiemahtude lühiajalist suurenemist, millele järgneb nende langemine, arvatavalt tänasest tasemest madalamalegi.

## 6. METSA HINDAMINE

Metsa hindamise all peame siinkohal silmas ennekõike teabe kogumist metsa kvalitatiivse ja kvantitatiivse seisusundi kohta eesmärgiga omada ülevaadet ja kavandada sobilike metsamajanduslike võtete rakendamist. Selle juures peame tehnoloogiliselt silmas enamat, kui täna Metsaseaduses metsakorraldustoiminguna kirjeldatud metsa inventeerimine.

Järgmistes alampeatükkides on antud ülevaade mõnedest käesoleva töö koostamisel kasutamist leidnud tehnoloogiatest ja andmekorjeviisidest. Nimetatud ülevaade on koostatud valdavalt tuginedes teaduskirjandusele ja ülevaate eesmärk ei ole mitte absoluutselt kõikehaarav, vaid kirjeldada just käesolevas töös kasutatud metsade hindamise meetodikaid.

### 6.1 Statistiline metsade hindamine

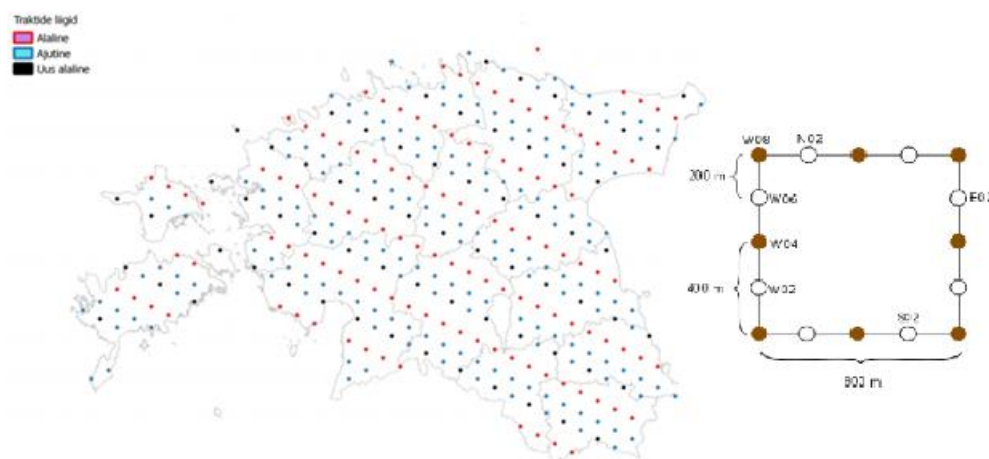
Kavandamiseks pikaajalisi metsamajanduslikke tegevusi on vajalik omada teavet metsade seisundi ja varude suuruse kohta. Selle tarbeks on loodud metsa korraldamine, mis koosneb ennekõike metsa inventeerimisest ja metsamajanduslike tööde planeerimisest [40]. Metsa inventeerimiseks on kasutusel ülepinnaalne takseerimine katastri- või majandusüksuste kaupa ja statistiline valikmeetod (edaspidi: SMI). Neist viimast peetakse jätkuvalt ökonoomseks viisiks, kuidas koguda operatiivselt teavet metsades toimuvate muutuste kohta (Keskkonnaagentuur).

#### 6.1.1 Traktid ja traktivõrk

SMI traktid on korrapäraselt üle riigi paigutatud ning nendega on seotud proovitükkide võrgustik. Traktivõrgu aluseks on põhikaardi (M: 1:10 000) lehtede raamistikust moodustuv ruudustik ja sama aasta traktid on joonel, mille asimuut geograafilisest põhjasuunast on 117° [41]. Traktid on jagatud ajutisteks, mida mõõdetakse vaid üks kord ning alalisteks, mida mõõdetakse iga viie aasta järel. Viimati nimetatul põhjal jaotatakse ka SMI mõõtmised viie aasta kaupa perioodideks.

Üks trakt on 800 meetrise küljepikkusega ruut, kus esimene proovitükk on ruudu nurgast 200 meetri kaugusel. Ruudukujuline trakt tagab optimaalse liikumise – trakti läbimisel on teekonna algus ja lõpp samas asukohas. Järgmisele joonisele (joonis 6.1) märgitud ringid tähistavad proovitükke ja värviga täidetud ringid markeerivad tagavara määramise ning seest tühjad ringid markeerivad kasvukoha määramise proovitükke.

Parema andmetiheduse ning hindamaks kõlvikulisi muudatusi on aastast 2014 suurendatud alaliste traktide hulka. Alloleval vasakpoolsel joonisel on toodud 2017. aasta traktivõrk, kus on juurde märgitud ka nõ uued alalised traktid ning nende kõrval paremal esitatud joonis kujutab proovitükkide paiknemist traktis.



Joonis 6.1 SMI 2017. aasta traktivõrk ja paremal joonisel proovitükkide paiknemine traktis [41]

Nagu võime jooniselt välja lugeda on uute alaliste traktide lisandumine tihendanud oluliselt traktivõrku tervikuna.

## 6.1.2 Proovitükid

Proovitükid asetsevad traktidel nagu eelpool toodud joonisel kujutatud. Kasutusel on kahte tüüpi proovitükke – kasvukoha ja tagavara määramiseks. Kõik proovitükid on ringikujulised ja nende raadiused on 7 meetrit. Kasutusel on ka suuremat määramistäpsust võimaldavaid 10 meetrise raadiusega proovitükke ja neid kasutatakse alalistel traktidel tagavara määramiseks.

Kui ühele proovitükile jääb mitu kõlvikut või puistut, jagatakse proovitükk kuni neljaks osatükiks, millele leitakse ja arvutatakse eraldi otsitavad näitajad. Kuivõrd proovitükkide mõõtmised tehakse ühesuguse meetodika alusel, on limiteeritud ka võimalus mudeldamisel oluliste süstemaatiliste vigade tekkeks [41].

SMI proovitükkidelt kogutud välitööde andmed moodustavad ühest küljest hea sisendi, et valideerida ja kontrollida teiste kaudsete meetoditega saadud metsa hindamise tulemusi. Samas peab võtma arvesse, et SMI proovitükid on väga väikese pindalaga ning paigutatud ette määratud

asetusega, sh ka mittemetsamaale. Sellest johtuvalt võib arvestada, et keskmisena satub igas maakonnas metsamaale hinnangulisel 200 proovitükki, mis ei anna väiksemate pindade võrdluses head valideerimisreferentsi [42]. Seda eriti olukorras, kui arvestame, et lisaks puu liigilisele kuuluvusele määrab spektraalse signaali omadused ka puistu vanus, tihedus, lehtede ulatus ja alustaimede tüüp.

## 6.2 Kaugseireandmed metsanduses

Tavapärasel ja aastaid kasutusel olnud meetodid metsa ja koosluste kohta teabe kogumiseks on üldjuhul suure inim- või andmetöötlustöö mahu tõttu aeganõudvad ja kulukad. Sagedased on juhtumid, kus peab valima töö kiiruse ja andmekvaliteedi (sh mahu) vahel ning kasutusele võetud üldistused toovad hinnangutes kaasa liialt suure vea. Töömeetodeid on teaduslikel alustel üha edasi arendatud ning metsandus on eluslooduse valdkondadest kindlasti üks enim ja täpsemini matemaatiliste mudelite kaudu kirjeldatud valdkondasid. Selle juures suudetakse tagada ka piisavat usaldusväärsust ent oluliseks komponendiks andmete valideerimisel ja mudelikonstantide korrigeerimisel on siiski erinevates tingimustest toimuvad paikvaatlused.

Samas on erinevad riigid juba aastakümneid arendanud nii satelliitsüsteeme kätkevaid kosmoseprogramme kui maapealseid kaugseire<sup>1</sup> mõiste alla mahtuvaid vaatlusmeetodeid. Veel kümnendi taguse ajaga võrreldes saame öelda, et kogume erinevate tööpõhimõtetega sensorite abil ennenägematus koguses teavet väga paljude keskkonnakomponentide kohta. Oskame ka kogutud andmeid kasutada, ent paljude allikate hinnangul saaksime tõenäoliselt tänasest kordades rohkem teha. Ühtlasi oleme tunnistajaks, et nii maakasutuse hindamisel kui ühtlasi ka metsanduses on kaugseireandmete kasutamist uuritud aastaid ning teaduskirjandusele tuginedes on üle maailma leitavad viited nende andmete edukast usalduspiiridesse mahtuvast kasutamisest. Järgmistes alapeatükkides on antud ülevaade enim levinud ja ka käesoleva töö koostamisel kasutamist leidnud lahendustest.

Euroopa Liidus välja arendatud kosmoseprogrammide seas omab praeguse töö kontekstis tähendust Euroopa Komisjoni juhitud Copernicus programm ja selle Sentinel missioonide satelliitidest Sentinel 2A ja 2B. Nimetatud missiooni satelliit kannab kõrglahutusega mitme

---

<sup>1</sup> Kaugseire - <https://kaugseire.ee/kaugseirest>

spektrikanaliga pildiskannerit, millel on lai 290 km vaatenurk. Satelliit lendab üle Eesti paaril korral nädalas ja tagab seega tiheda andmevoo. Kuivõrd kasutusel on optiline seade, siis on andmete tootmisel takistuseks erinevad atmosfäärinähtused ja andmeuuendus võib olla lünklik.

Lisaks omab siinkohal olulist tähendust eelmisega tehniliselt sarnane USA satelliit Landsat 8, mis kannab pardal nii OLI (*Operational Land Imager*) seadet kui ka temperatuurisensorit (TIRS). Neist esimene vaatleb maapinda 185 km laiuse vööndina ning toodab selles ulatuses andmeid 15...30 meetrise resolutsiooniga.

Satelliidid ja nende pardal olevate instrumentide valik ning konfiguratsioon sõltub konkreetsest missioonist ja sellele seatud eesmärgist. Samas on ka kogutud andmete hilisemal töötlemisel ja nende interpreteerimiseks kasutatavate mudelitega võimalik leida meid huvitavaid andmeid omakorda kaudselt, tulemuslikult. Selle juures on loomulikult kriitilise tähtsusega andmetöötlemiseks kasutatavate mudelite konfiguratsioon ja kvaliteet ning meie tolerants vea suhtes. Kasutusel on ka teisi erineva omandikuuluvusega satelliite, mis kannavad sarnaseid seadmeid ja kaardistavad maapinda ja selle elemente sarnaselt Sentinel-2 ning Landsat 8 missioonidele.

### **6.2.1 Satelliitandmete kasutamine metsanduses**

Selgitamaks Sentinel-2 ning Landsat 8 andmete kasutatavust metsade hindamisel ning hindamaks tulemi kvaliteeti on näiteks Soomes teostatud võrdlev uuring [43]. Uuringus võeti vaatluse alla Lõuna-Soome metsamassiivid ning neis tüve mahu ja diameetri, puu kõrguse ja rinnaspindala hindamine [43]. Võrdluse teostamisel ja hinnangu andmisel keskenduti puuliikidest männile, kuusele ja laialehistele puudele. Kõikide uuritud näitajate põhjal jõuti järeldusele, et parimat kvaliteeti tagab Sentinel-2, ehkki arvestatud viga kahe erineva satelliidi poolt toodetud andmete ja nendest tehtud järelduste põhjal oli väike. Huvitava järeldusena jõuti ka selleni, et erinevalt ootustest ei paranenud järelduste ja lõpp-produkti kvaliteet olukorras, kus kahe erineva satelliidi andmeid kasutati samaaegselt omavahel kombineerituna [43].

Sentinel-2 andmete metsanduses kasutamise sobilikkust kinnitavale järeldusele on hiljuti jõutud ka Vietnamis, kus hinnati katseliselt metsa biomassi hindamiseks satelliidi andmete ja masinalgoritmi kooskasutamise võimalusi ja saadud tulemi kvaliteeti [44].

Eestiski on aktiivselt uuritud satelliitidega kogutavate andmete kasutatavust metsanduslikel eesmärkidel. Uuritud on nii võimalusi kasutada neid andmeid kasvava metsa mahu kui ka puistute liigilise koosseisu hindamisel. Neist esimese puhul on Tamm & Remm (2009) kasutanud metsa inventuuri andmeid seotuna mullastiku kaardi ning Landsat ETM+ ülesvõtetega ning masinõpet

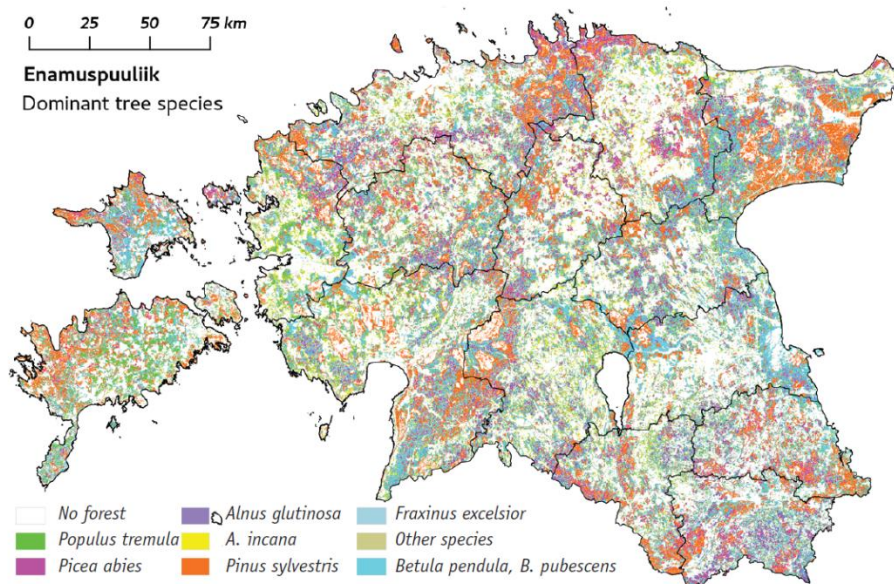
rakendades konstrueerinud kasvava metsa mahu kaardi. Olgu siinkohal öeldud, et puidu mahu järgi on kahtlemata otseselt hinnatav ka sellesse seotud süsinik. Samas on ka saadava puidu maht baasteadmine arvestamaks erinevate metsamajanduslike võtete mõistlikkust ja tulukust.

Satelliitandmete kasutusvõimalusi on puistute liigilise koosseisu ja tüvemahu hindamiseks uuritud veelgi. Nii on juba aastal 2014 avaldatud Eestis paiknevatel proovitükkidel tehtud mahukas uurimistö [45], mille üheks eesmärgiks oli sisuliselt selgitada satelliitfoto metsateabeks konverteerimise võimalusi kasutades selleks  $k$ -lähima naabri meetodit. Nimetatud meetod on iseenesest ka rahvusvaheliselt palju kirjeldatud ja katsetatud ning see tugineb puistu takseerimisel saadud andmete sidumises sama ala spektraalsete mõõtmiste või kolmemõõtmeliste punktiparvedega. Sidumise käigus arvutatakse maapealseid paikmõõtmise andmeid kasutades konkreetses asukohas näiteks satelliidipiltidele tunnusvektorid, mis sisaldavad spektraalset heledust või muid asjakohaseid statistikuid. Seejärel võetakse vaatluse alla juba suurem maa-ala ning satelliitfotode puhul otsitakse selle igale pikslile tunnusvektori järgi kõige sarnasemat näidist. Selle leidmisel omistatakse juba uuritud pikslile lähima näidise andmetest võetud takseertunnuse andmed. On hinnatud sellise meetodi võimalikke vigu ning leitud, et üheks olulisemaks puudujäägiks on saadavate hinnangute süstemaatiline erinevus ehk nihe. Selle põhjuseks peetakse kahel erineval viisil kogutud andmete mittelineaarseid ja küllastuvaid seoseid [45]. Nagu öeldud on meetod kasutatav erineval viisil kogutud kaugseireandmete tõlgendamiseks.

Kõnealuse valdkonna üks olulisemaid hiljuti teostatud ning aastal 2018 avaldatud töö uuris ja kirjeldas kogu Eesti puistute liigilist koosseisu kasutades selleks muuhulgas Landsat 8 ja Sentinel 2 satelliitidega kogutud andmeid [42]. Nimetatud töö tulemina valminud Eesti puistute liigilise koosseisu kaart ja selle aluseks olev andmestu moodustab ka käesoleva töö ühe peamise alusmaterjali.

Eelnimetatud puistute koosseisu hinnang on koostatud keskmise ruumilahutusega digitaalse kaardina, mille piksli suuruseks valitud 25 meetrit. Uuritavata ala kirjeldavad tunnused olid saadud Landsat-8 OLI ja Sentinel-2 MSI piltidelt, digitaalselt mullastiku kaardilt ning metsaregistrist. Sobilikuks masinõppe meetodiks oli valitud *random forest* GRASS GIS paketist ja selle ülesandeks oli ennustada igale pikslile kõikide klasside (puuliigid, arenguklassid) esinemistõenäosused. Selle juures eeldati, et satelliidipildi pikslite spektraalne signatuur on käsitletav koosseisuliikide spektraalsete signatuuride lineaarkombinatsioonina [42]. Saadud tõenäosusi loeti puuliikide osakaaludena puistu liigilises koosseisus. Konkreetse töö käigus eristati puistutes satelliidi pildi spektri põhjal kaheksa erinevat klassi, millest seitse jagunesid Eesti metsades enamlevinud puuliikide põhiselt. Kaheksandasse eristatavasse klassi koondati kõik ülejäänud ja looduslikult harva

esinevad puuliigid. Järgmisel illustratsioonis (joonis 6.2) on toodud välja üldvaade viidatud töö [42] peamisest tulemusest graafilisel kujul.



Joonis 6.2 Eesti puistute liigilise koosseisu enamuspuliigi kaart kaugseire andmetel [42]

Joonisel kajastatud erinevad värvid tähistavad erinevaid puuliike. Üldistatud kujul võime jooniselt välja lugeda selgeid liigilise koosseisu levikumustreid üle terve riigi. Detailvaates ning töödeldaval kujul annab kaart hea ülevaate puistute enamuspuliikidest moodustatud piksli tasemel ja tagab seetõttu tänaste tehniliste võimaluste juures usaldusväärse alusmaterjali metsamajanduslike otsuste tegemiseks.

Eelpool kirjeldatud viisil saadud andmete osas oli tehtud ka valideerimine kasutades uuendusriietel kogutud harvester mõõtmiste, statistilise metsainventuuri ja metsa kasvukäigu püsiproovitükkide andmeid. Näiteks SMI proovitükkidest oli valitud ennekõike metsa iseloomustavad ning need seostati satelliidi foto piksliga. Seejärel oli arvatud puuliikide osas eukleidiline kaugus iga proovitüki ja ennustatud vektori vahel.

Tulemusena oli leitud, et maakonna suuruse ala osas on puistuplaani enamuspuliigi piksli taotus väga heas korreleeruvuses statistiliste andmetega. Era- ja riigimetsade puhul esines minimaalne erinevus vastavalt  $R^2=0.93$  ja  $R^2=0.98$ . Väiksemal mõõtkaval, puistute ja proovitükkide tasemel tehtud valideerimishinnangutest ilmselt aga puistu koosseisus vähemlevinud puuliikide üle- ning enamlevinud puuliikide osakaalude allahindamine [42]. Nii leiti ka seda, et okaspuliikide osakaalu hindamistulemusi võib pidada heaks samas kui lehtpuuliikide osakaalude hindamist tuleb täpsuse



huvides veel edasi uurida [42]. Ka täheldati, et enamuspuuliikide prognoosi täpsus ulatus 78,4%-ni olukorras, kus puistu vanuseks oli enam kui 20 aastat ning domineeriva liigi osakaal oli vähemalt 75% [42]. Nooremate puistute puhul oli viga hinnangutes suurem.

Sõltuvalt uurimissuunast võib olla vajalik ja täpsuse huvides otstarbekas kasutada ja kaasata ka andmeid, mis kogutud sama ala kohta teiste tehniliste vahenditega või teise suunitlusega. Heaks näiteks on osutunud satelliidiandmete ning aerolidariga kogutud andmete kombinatsioon selgitamaks korraga nii puistu liigilist koosseisu kui selle mahtu. Näiteks 2013.aastal teostatud spetsiaalsete katsete käigus hinnati puistu tüvemahtu aerolidari andmete põhjal [45] ja saadi kinnitust, et sel viisil kogutud andmete kaasamine parandab tüvemahu ennustamise täpsust. Samas küll nenditakse, et ühegi testitud kaugseiretunnuste komplekti puhul ei õnnestunud süstemaatilist nihet lõpuni kõrvaldada. Ühtlasi leiti, et puistu koosseisu ennustamisel sõltub viga nii puuliigist kui selle vanusest. Näiteks kaskede puhul tuvastati, et nende osakaalu hinnati nooremas puistus alla ja vanemates üle samas kui haabade puhul oli seos vastupidine. Kuuskede osas oli arvestus hea täpsusega ent samas segapuistu andmetest täpsuse huvides lehtpuude andmetötluslik vähendamine viis ka kuuskede osas tajutava hindamisvea tekkeni. Sellise vea põhjuseks peetakse tunnusevektorite info kattumist [45].

Satelliitandmete kasutamine on võimalik ka harvendusraiate hindamisel, samas väikesemahuliste raietööde hindamistäpsus on suhteliselt suure satelliidifoto piksli (10-30 m) juures liialt ebatäpne. On hinnatud, et olukorras, kus raiutud on vähem kui 20% puistu kogu rinnaspindalast, ei ole see meetod täna usaldusväärne [46]. Seejuures ei ole ka järgmise harvendusraie ootamine lahendus kuivõrd harvendusraie metsanduslikud parameetrid on realselt satelliitandmetelt tuvastavad 4-5 aastat pärast raiet.

Üldise teadlikkuse tõstmiseks ning taustafooni loomiseks on tänapäeval samuti leitavad ja kasutatavad erinevad kaugseire andmetel põhinevad rakendused ning algatused. Neist üheks suuremaks ja ohtrat tsiteerimist leidnuks tuleb pidada Maailma Ressurside Instituudi (<https://www.wri.org/>) ning paljude teiste osapoolte koostöös loodud *Global Forest Watch*'i (<https://www.globalforestwatch.org/>), mis on võtnud eesmärgiks jooksvalt monitoorida muutusi maakasutuses ja peaaesjalikult seonduvalt metsasusega.

*Global Forest Watch* andmestut saadab ka selle koostaja poolt märke, et aastate vahelised võrdlused nende andmete pealt ei ole piisavalt esinduslikud ja seega ei saa need moodustada alusmaterjali täpseteks otsusteks. Samas annavad andmed hea indikatsiooni ning neid on oma töödes kasutanud mitmed organisatsioonid, teiste seas ka Euroopa Komisjon ja tema ühendatud uurimiskeskus [47]. Neist viimane on aastal 2017 koostanud ökosüsteemide hinnastamise

alusmaterjalina käsitletava töö, kus on ühtlasi erinevate andmekogude ja infoallikate põhjal hinnatud peamiste ökosüsteemi tüüpide levikualade muutusi ja neid iseloomustavate andmete olemit.

## 6.3 Aerolaserskaneerimine

Aerolaserskaneerimine (ALS) on õhusõidukilt teostatud LiDAR mõõdistuste kirjeldamiseks kasutatav kaugseire meetod. Meetod tugineb õhusõidukilt välja saadetud laserimpulsi maani jõudmise ja õhusõidukini tagasi peegeldumise aja mõõtmisel. Sealjuures määratakse skaneerimise ajal pidevalt õhusõiduki positsioon maapealse globaalse navigatsioonisatelliitide süsteemi (GNSS) baasjaama suhtes ning selgitatakse laserimpulsi emiteerinud seadme positsioon nii selle väljasaatmise kui vastuvõtmise hetkel. Võttes aluseks eelnimetatud parameetrid ja lisades neile laserimpulsi lähetusnurga, impulsi kestuse ja atmosfääritingimuste andmed on võimalik välja arvutada laserpunkti peegelduse asukoht maapinnal (Maa-amet). Piisava tihedusega teostatud mõõdistuste tulemusena on saadud andmetest võimalik tuletada uuritud pinna kõrgusmudel.

### 6.3.1 ALS kasutamine metsanduses

Taimestikuga kaetud alade, sh metsaga kaetud alade puhul tuleb ALS andmete kogumisel, kasutamisel ja töötlemisel arvestada muuhulgas piirkonnale iseloomuliku vegetatsiooniperioodi ning uuritava pinnal kasvava taimestiku eripäradega. Kuivõrd laserimpulsi tagasipeegeldumine toimub ka puude okstelt ja lehtedelt on täpsemate andmete saamise ning hilisema andmetöötluse mahu vähendamise nimel mõningates kirjandusallikates toodud soovitus metsaga kaetud maa-alade ALS mõõdistamine teostada varakevadel või sügisel. Selline ajavalik tagab üldjuhul maapinna ja tüve täpsema kaardistuse.

Alates 2008.aastast teostab Eestis üleriigiliselt ALS mõõdistuslende Maa-amet. Kujundatud viisil kulub terve riigi kaardistamiseks 4 aastat ja nõ kolmas kaardistusring on näiteks Kagu-Eesti aladel toimunud/planeeritud 2017.aasta suvele ja 2019.a kevadele. Selle juures on kevadised lennud kaardistuslennud ning suvised metsandusliku otstarbega mõõdistuslennud [64].

Erinevate keskkonnaandmete puhul on määrava tähtsusega andmete aegriidade täiuslikkus ning neis sisalduvate andmete omavaheline võrreldavus. Maa-ameti poolt on ALS meetodi kasutamisel toimunud töövahendite ja seadmete uuendamised, mis on kaasa toonud ka muutused kogutavate andmete tehnilistes karakteristikutes. Näiteks on aastast 2017 kasutusel aerolaserskanner Riegl VQ-

1560j, mis võimaldab paremat lõpp-produkti kvaliteeti läbi suurema punktiheduse. Optimeerimaks tegevusega kaasnevaid kulusid kombineeritakse ja teostatakse ühel ülelennul sageli mitu erinevat ülesannet. Nii on leitud, et üle-riigilise kaardistuse teostamisel on ALS ja aeropildistamise üheaegseks teostamiseks optimaalne kasutada lennukõrgust 2600 meetrit maapinnast, mis tagab ALS punktiheduseks 2,1 punkti ruutmeetrile [64]. Maa-ameti poolt toodetud ALS andmed on loetud avaandmeteks ning alla laetavad nende avaandmete kodulehelt.

ALS on sellega seotud kulude ning andmekatvuse poolest positioneeritav maapealse metsainventuuri ja satelliitandmete vahele ning sellel nähakse metsanduses väga suurt kasutuspotentsiaali [48]. Lisaks heale katvusele ja kiirele kaardistusvõimalusele nähakse selle peamist kasutegurit just puuvõradest läbitungivate laserimpulsside kasutamises, mis erinevalt fotogrammeerial põhinevatest seadmetest võimaldab kaardistada ka võra alla jäävat puutüve ning maapinda. Samas nähakse ALS puudusena hea andmekatvuse juures siiski võrdlemisi suuri kaardistuskulusid – madalal lennukõrgusel on ka kaardistatava ala pind väiksem ning lennutunde tuleb kulutada rohkelt.

Hiljuti teostati Rootsis praktiline uurimistöö, mille käigus vaadeldi ALS andmete kasutatavust ja neist tuletatud puistu andmete kvaliteeti erinevates tingimustes [49]. Andmete kvaliteedi võrdluseks kasutati riikliku metsainventuuri andmeid ning peamise järelalusena nenditi, et vegetatsiooniperioodil lehtpuu puistutes tehtud ALS kaardistamine andis üldise trendina tegelikust suuremaid väärtusi tüvemahu ja rinnaspindala kohta. Samas aga nenditi, et puude lehes mitte olemise ajal tehtud kaardistuse andmed korreleerusid riikliku metsainventuuriga üpris hästi [49]. Kokkuvõttes järeldati, et puistutes, kus laialehiste puude osakaal oli vähem kui 50%, ei ületanud ALS-ga saadud andmete ruutkeskmise viga 20%-i [49]. Võrdluses näiteks satelliitidele paigutatud passiivsete optiliste sensoritega leitakse, et ALS pakub töö käigus saadavate andmete osas paremat geograafilist sidusteavet [46]. See omakorda võimaldab ALS andmete alusel hinnata nii puistu kõrgust kui võra katvust, millest omakorda on nende omavahelise hea korrelatsiooni puhul võimalik tuletada ka hinnanguline tüvepuidu maht [46].

ALS kasutamise võimalusi on uuritud ka Eestis kasutades selleks erinevates asukohtades asuvaid katsealasid. Nii on näiteks võrreldud ALS andmetel põhinevate puistu tüvemahu mudelite tulemuste korreleeruvust sama asukoha andmetega, mis kantud Metsaregistrisse [50]. Uuringu käigus korrigeeriti ning kohaldati oludele vastavaks ka mahu arvutamiseks kasutatavaid mudeleid. Töö tulemusena on jõutud põhimõttelise järelaluseni, et vaadeldud alade puhul on Metsaregistrisse kantud tüvemahu andmed süstemaatiliselt alla hinnatud [51] ning viga suureneb oluliselt alates puistute tüvemahust 250 m<sup>3</sup>/ha [50]. Sama täheldati mõlema vaadeldud katseala puhul. Samas ilmnes, et kahe looduslike tingimuste poolest erineva katse ala puhul viib ühe ja universaalse

arvutusmudeli kasutamine suurema veani. Põhjuseks on leitud erinevate metsade ja puistute erinevad karakteristikud alates näiteks võrastiku katvusest, mis ka vaadeldud kahe ala puhul olid 11% võrra erinevad. Lahendusena nähakse enne ALS andmete töötlemist puistu liigilise koosseisu selgitamist näiteks satelliitinfo alusel [50].

Ühtlasi tuvastati, et suurel pindalal vaadeldava ALS punkt pilve kirjeldamine kõrgusprotsentiili abil ei pruugil olla parim lahendus, sest vaadeldava ala võimalikud heterogeensed tingimused mõjutavad lõpptulemust [50]. Lahendusena nähakse, et suurte maa-alade korral tuleks ALS andmetele läheneda pigem rastroõhiselt ja arvutada takseertunnused väikse pilve mudeliga, sest sel moel kajastub uuritava ala heterogeensus täpsemalt [50]. Ühtlasi refereeritakse, et katvuse stabiilse hinnangu saamine eeldab uuritava ala vähemalt 300 punkti olemasolu proovitüki kohta, mis omakorda võib suurendatava piksli tõttu tõsta riski piirivigade tekkeks. Viimane on eriti määrav olukorras, kus näiteks uuritava noorendiku kõrval kasvavad kõrged puud, mis sattuvad sisuliselt samuti arvestusse ning põhjustavad arvutustes olulisi hälbeid kuivõrd aerolidari mahumudel on tundlik kõrgushinnangu vigadele [50].

Sarnast tehnoloogiat – laserskaneerimist – võib kasutada ka maapealse paigutusega. Ehkki samast maa-alast on ülevaate saamine aeganõudvam kui ALS puhul, on hinnatud sel viisil saadavad andmed täpseteks ja kasutatavateks rinnasdiameetri ja tüve kuju kaardistamisel. Seda ennekõike männikutes, kus puudub alusmets. Kaasikutes on alusmetsa esinemine 1. rinde hindamisel selgelt häiritud ning tihedates vanades kuusikutes kaasneb andmete kogumisel lubamatult suur viga [52]. Loomulikult on võimalik mõõdistusi ja nende kvaliteeti optimeerida, teostades neid näiteks tihedama punktijaotusega ning korruga väiksema pinnaladusega. Seega võiks järeldada, et töömeetod andmete kogumiseks on kasutatav, ehkki tööde mahtu ning paranevat andmetöötlusvõimekust arvestades võiks olla esmaseks eelistuseks ALS meetod.

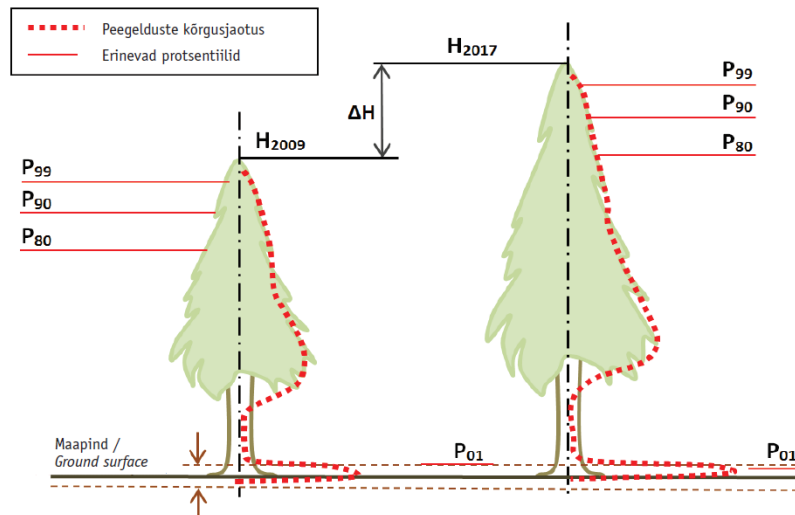
### **6.3.2 ALS kasutamine puistu kõrgus- ja mahuandmete hindamisel**

Metsade hindamisel kasutatakse sageli varasemaid andmeid ja metsa kasvu seaduspärasusi kirjeldavaid mudeleid. Enamasti eeldavad need, et välised keskkonnatingimused on konstantsed ja ajas oluliselt mitte muutuvad. Samas on teada, et keskkonna, sh kasvukeskkonna tingimused on muutuses ning mitmetes töödes on tuvastatud, et näiteks metsa kasvukiirused on olnud ajas muutuvad, tuvastatult tõusvas trendis [53]. Kasvukiiruste suurenemise kohta on erinevaid hüpoteese alates kliima soojenemisest, muldade viljakuse suurenemisest kuni metsa intensiivse majandamiseni. Samas peab arvestama ka looduskaitse rangeid piiranguid, mis vanade puude väljalangemise tõttu tekitavad summaarselt hoopis negatiivset puistu kõrguskasvu.

ALS meetodil kogutud andmete põhjal teostati võrdlusuuring [53] ning tuvastati, et kõik kõrgusjaotuse ülemised protsentiilid v.a  $H_{P80}$  kasvasid tegelikult oluliselt kiiremini, kui vastavate diferentsiaalmodelitega ennustatud. Puistute kõrgus oli 8-aastase perioodi lõpus lidarandmete põhjal sõltuvalt vaadeldavast kõrgusjaotuse protsentiilist 0,38...0,48 meetrit suurem kui diferentsiaalvõrrandiga prognoositud [53]. Mõningane erinevus oli tuvastatud valimi kõige nooremates puistutes, kus diferentsiaalmodeliga saadud kõrguskasvu prognoosid ületasid lidarandmetest tuvastatud kõrgusväärtusi. Samas uuringus on refereeritud ka teisi sarnaseid töid ning kokkuvõttes järeldatud, et lidarmõõdistuse andmete põhjal saadud puistute kõrguse muudu hinnangut võib pidada usaldusväärseks.

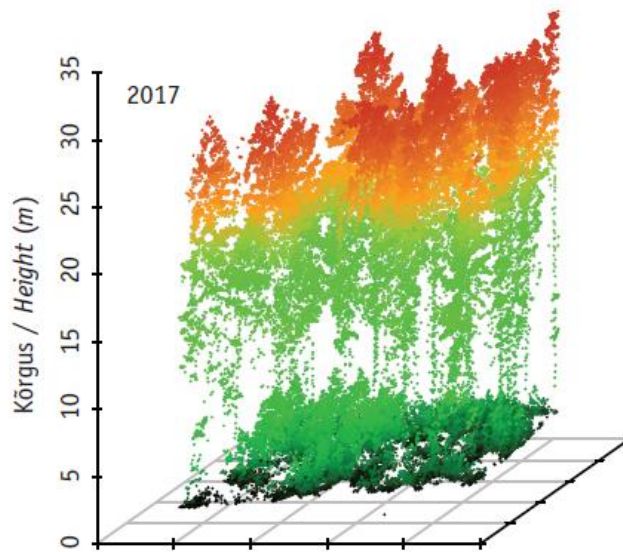
Tavalise lausmetsakorralduse meetodi kasutamisel puistud piiritletakse, hinnatakse selle koosseis, mõõdetakse puistuelementide rinnaspindala [54]. Puistuelementide kõrguse hindamiseks teostatakse üksikpuude mõõtmised ja takseerkirjeldusse märgitakse puistuelemendi kõrguseks rinnaspindala järgi keskmise puu kõrgus.

ALS puhul mõõdetakse puistu kõrgust maapinna suhtes ja seega kanduvad laserimpulsi peegelduste kasutamisel maapinna kõrguse vead edasi ka puistu kõrguse andmetesse [53]. Leitakse, et ALS andmete kasutamisel puistu kõrguse hindamiseks tuleb valida sobilik peegelduste kui ka kõrgusjaotuse protsentiil ja üldiselt on osutunud otstarbekamaks kõrgusjaotuse ülemiste protsentiilide valik [53]. Harvendusraie mahtude hindamisuuringu [46] tulemusena on leitud, et võra katvuse muutused 8 meetri võrdlustasemel on süsteemselt väiksemad kui sama näitaja 1.3 meetri kõrguse võrdlustasemel. Samas peetakse suuremal kõrgusel valitud punktisarve raiemahtu paremini esindavamaks kui võrd sellega on välistatud madalamate rinnete ja alustaimestiku põhjustatud häiringud. Alljärgneval joonisel (joonis 6.3) on kujutatud kõrgusjaotuse erinevad protsentiilid ning viidatud uuringus teostatud kõrguste võrdluse skeem.



Joonis 6.3 Laserimpulsi ülemised protsentilid ja kõrguskasv [53]

ALS kasutamisel moodustub peegeldustest punktipilv, mis kirjeldab vaadeldavat puistut ja mille alusel on võimalik anda puistule metsakorralduslikke hinnanguid. Järgmisel joonisel (joonis 6.4) on näide ALS punktipilvest, mis saadud 2017.a mõõdistamise tulemusena.



Joonis 6.4 ALS punktipilve näide 2017. mõõdistamisest konkreetse uurimustöö raames [53]

Toodud joonise puhul on oluline teada, et mõõdistus on toimunud võrreldes Maa-ameti poolt tavaolukorras teostatavast mõõdistusest erinevatel tingimustel. Eelkõige on ülelennud toimunud madalamatel kõrgustel ja seeläbi on saavutatud punktipilve suurem tihedus.

## 6.4 Radarseadmed

Täiendavaks ning tehnoloogiliselt juba kättesaadavaks võimaluseks metsade kaugseirel ja kaardistamisel on kindlasti ka SAR (*Synthetic-aperture Radar*) seade. Tegemist on liikuva radarseadmega, mis emiteerib suunatult mikrolaineid ning püüab nende tagasipeegeldused eristades tagasi peegeldunud signaalis toimunud muutatusi. Seadmega on võimalik hinnata metsa biomassi, luua nii 2D kui 3D kuvasid kaardistatud objektidest ning selle peamine kasu erinevalt optilisest seadmest väljendub väheses ilmatundlikkuses [48]. Nii ei ole satelliidile paigaldatud SAR seadmele probleemiks kaardistada maapinda ka olukorras, kus taevas on täielikult pilves. Seadme kasutamise puudused ja ebatäpsused ilmnevad täna olukorras, kus hinnatava biomassi kogus kaardistataval alal on väga suur, sest see tekitab signaali küllastumise ning sellest tuleneva väärhinnangu [48]. Lahendust nähakse emiteeritava signaali lainepikkuse muutmisel, ent pigem peetakse seda tehnoloogiat metsanduse jaoks veel arengujärgus olevaks.

Kokkuvõttes saab nii meil kui mujal sooritatud teadustööde põhjal öelda, et üldjuhul on nii puistu liigilise koosseisu kui tüvemahu hindamine kaugseiremeetoditel täiesti teostatav ja saadud metsanduslik teave piisava usaldusväärsusega metsanduslikeks strateegilisteks otsusteks kasutatav. Levinud on mitmeid meetodeid ja praktikaid, täna neist ehk enim ja usaldusväärsemaid tulemusi andvamaks tuleb pidada optilise detektoriga satelliidi ja ALS andmete kombinatsiooni, milles liigiline koosseis määratakse esimesega ning kõrgus- ja mahuandmed teisega.

Lisaks tavametsanduslike andmete kogumisele on selle juures üha olulisemaks muutunud teabe kogumine metsakoosluste primaarproduktiooni, liigilise mitmekesisuse ja sellest lähtuva elupaiga kvaliteedi ning pakutava ökosüsteemse teenuse kohta [42].

## 7. TÖÖ KÄIK

Käesoleva töö peamiseks eesmärgiks on selgitada kaudsel viisil Valgamaa metsade energeetiline potentsiaal. Selle juures eeldatakse, et puidust saadav energia võetakse kasutusele traditsioonilisel viisil läbi metsade majandamise, sh raiete ning saadud puidu põletusseadmetes kasutamise teel. Sellest johtuvalt on võtmeküsimuseks metsavarude olem, raiete lubatavus ja selle tulemuslikkus.

Lisaks õigusraamistikule määrab raiete lubatavuse suures osas metsade vanus ja raieküpsus, samuti ka metsa majandaja ootused ja soovid. Kui seada esikohale ühiskondlikult oluline eesmärk siduda puitu maksimaalne hulk süsinikku, siis soovitud erinevad allikad metsade küpsust hinnata läbi mahuküpsuse [55]. Sisuliselt on see defineeritav olukorrana, kus puistu keskmine ja jooksev juurdekasv võrdsustuvad või kui vaadeldava ajaraami keskmine juurdekasv hakkab vähenema võrreldes puistu keskmise juurdekasvuga. Selle põhimõtte läbival kasutamisel oleks Eesti tingimustes tulemuseks oluliselt kiirenenud metsade noorenemine, suurenenud juurdekasv ja süsiniku sidumine, ent samas ka metsade tagavara vähenemine [55].

Antud töö koostamise hetkel on käimas uue metsanduse arengukava koostamise protsess (<https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/metsandus/metsanduse-arengukava-aastateks-2021-2030>). Selle üheks eesmärgiks ongi leida tasakaal ning ühiskondlik kokkulepe metsade majandamisel olukorras, kus juba on selgelt tajutavad konfliktid erinevate huvigruppide huvide vahel ning faktiliselt teada, et tänase küpsete ja valmivate tulundusmetsade suure osakaaluga kaasneb juba lähimatel aastakümnetel paratamatult võimaliku uuendusraie tagavara vähenemine. Ajas ette ruttamata kasutatakse käesoleva töö koostamise hetkel kehtivaid regulatsioone ja arvestusaluseid.

Metsaseaduse [40] § 28 lg 4 kohaselt on lubatud järgmised raied: uuendusraie, hooldusraie, valikraie, trassiraie, raadamine ja kujundusraie. Neist uuendusraie hulka loetakse ka lageraie, mis sama seaduse § 29 alusel tähendab seda, et raielangilt raiutakse ühe aasta jooksul raie algusest arvates kõik puud välja arvatud seemne- ja säilikuud. Metsaseaduse § 29 lg 4 kohaselt on lageraie lubatav puistus, kus vähemalt üks järgmistest tingimustest on tagatud:

- puistu koosseisu põhjal kaalutud esimese rinde keskmine vanus on võrdne puistu koosseisu põhjal kaalutud esimese rinde raievanusega või sellest suurem;
- puistu on saavutanud metsa majandamise eeskirjaga määratud keskmise rinnasdiameetri;
- puistu rinnaspindala või täius on metsa majandamise eeskirjas määratud väiksem.



Kuigi metsa majandamise reeglistik on nüansirohke ning raiete lubatavust mõjutavaid detaile hulganisti, loeme antud töö teostamise kontekstis määravaks ennekõike just eelpool loetletud kolm kriteeriumit ning nende täiendusena kehtivad looduskaitseelised piirangud. Neist viimased on grupeeritud ja arvestatud käesoleva töö looduskaitseelise kaardikihi töötlust kajastavas peatükis kirjeldatud viisil ehk jagatud kaitsereežiimi põhjal kaheks: a) Rangelt kaitstavad metsad, mis on rangete piirangutega ja b) Kaitsemetsad, millel on teatavad piirangud. Kus põhjendatud, on need antud töö kontekstis koos käsitletud ka kui „kaitstavad metsad kokku“ ning eraldiseisvalt tähendavad seda, et tulundusmetsa raiete kavandamine allub üldistele õigusakti nõuetele, rangelt kaitstavates metsades on raied keelatud ning kaitsemetsades ei ole raie keelatud, ent sel on erinevad piirangud.

## 7.1 Andmehõive

Käesoleva töö koostamine ja võimalikult täpsete järeluste tegemine eeldab asjakohaste andmete olemasolu. Kasutusele võeti erinevad andmekogud, mis sisaldavad otseste või kaudsete mõõtmiste ja hinnangute andmeid ja õigusaktides ning teaduskirjanduses avaldatud andmed. Ka kõigi nimetatud andmeallikate kasutamisel oli käesoleva töö peamise eesmärgi täitmiseks ja järeluste tegemiseks puudu suur osa vajalikke algandmeid. Need leiti kaudsel viisil kasutades selleks muid andmeallikaid ja seostel põhinevaid tuletisi ning arvutusi teostades. Erinevates allikates leiduvate samanimeliste andmete puhul kaaluti võimalusi parandada andmekvaliteeti nende andmete omavahelise kombineerimise ja omavahelise täiendamise kaudu. Näiteks oli juba enne andmehõive algust teada, et metsaregistrisse kantud andmete puhul on puistu mahtu sageli alla hinnatud samas kui puistu liigiline koosseis on üsnagi täpne [42].

## 7.2 Peamised kasutatud tarkvarad

Erinevate ruumiandmete töötlemiseks kasutati peamiselt tarkvara MapInfo Pro 17.0. Nimetatud tarkvara võimaldab nii päringuid kui ka seonduvat andmetöötlust. Samas tuleb tunnistada, et mahukate päringute teostamine on äärmiselt aeganõudev ja väga tundlik ka väiksematele andmevigadele mistõttu kasutati mahukama andmetöötluste jaoks tänaseks kasutajatoeta ent oluliselt kiiremini toimivat Visual FoxPro 9 tarkvara. Nimetatud programmis koostati erinevaid skripte, millega teostati mahukad andmepäringud, andmete liidestamised ja koostati arvutusteks vajalikud baastabelid. Statistilise analüüsi jaoks leidis kasutamist programm R v.3.2.0 ja muud vabavaralised rakendused. Täiendavalt leidis kasutamist MS Office ning andmetöötlustes selle

tabelarvutusprogramm MS Excel. Satelliit- ning aerolidarandmete töötlemiseks oli kasutatud käesoleva töö kirjanduse ülevaates kajastatud tarkvarasid ja meetodikaid.

### 7.3 Kaardiandmete töötlus

Kaardiandmetena kasutati erinevaid Maa-ameti veebilehelt 2019.a märtsikuus alla laetavaid ja WMS-teenusena kättesaadavaks tehtud kaarte nagu näiteks Eesti põhikaart mõõtkavas 1:10 000, mullastiku kaart ja haldusüksuste kaart. Täiendavalt on looduskaitseliste piirangute selgitamiseks kasutatud Eesti Looduse Infosüsteemi (EELIS) kaitstavate loodusobjektide kaardikihte ning Metsaressursi arvestuse riikliku registri (edaspidi: metsaregister) metsaeraldiste kaardikihti. Neist EELISe andmed olid võetud seisuga november 2018 ning metsaregistri andmed seisuga aprill 2018. Kaardiandmete kuupäevalised nihked on tingitud sellest, et otsustati ressursi säästmise nimel taaskasutada varasemate masspäringute tulemeid ja aja nihkes toimunud muudatuste osakaal ei ole konkreetse töö eesmärgi täitmisel olulist mõju omav.

Töö peamise uurimissuuna, kaudsel meetodil puistuandmete selgitamine, täitmiseks on kasutatud ruumiandmeid, mis saadud Landsat-8 ja Sentinel-2 satelliitandmete ning Maa-ameti aerolidarandmete tööstlustest. Viimased on teostatud Maaülikoolis ja viisil nagu kirjeldatud käesoleva töö kirjanduslikus ülevaates. Töö käigus saadud andmete usaldusväärsuse kontrollimiseks leidis kasutust perioodi 2014...2018 Valgamaa SMI välitööde andmestik ja selle kaardikiht, mis õppe- ja teadustöö eesmärgil saadud Keskkonnaagentuurist. Kaardimaterjalina võeti kasutusele nii palju kui võimalik olemasolevaid teema- ja muid asjakohaseid ruumiandmeid sisaldavaid kaarte ametlikest andmekogudest. Ootuspäraselt ei olnud leitav käesoleva töö uurimiseesmärgi täitmiseks vajalikku terviklikku kaardimaterjali ega selle juurde kuuluvat andmestut. Seega oli vajalik erinevate kaardimaterjalide ja nendega seotud andmete omavaheline sidumine, kombineerimine ja teaduslikult tunnustatud ent ka veel välja töötamise lõppfaasis olevate arvutusmeetodikate kasutamine. Uuritud ala iseloomustavate andmetega töötamisel kasutati erinevaid tarkvarasid ja nende andmetöötlusvõimalusi. Töö läbiviimise üheks eesmärgiks oli võimalikult vähene käsitöö ning maksimaalne tänapäevaste andmetöötlusvõimaluste kasutamine. Arvestades ka töödeldud andmete mahtu, võib andmete masintöötlust siinkohal pidada ka lahenduseks, millele ei ole võrreldavat käsitöö alternatiivi. Siiski, parema ülevaate ning täiendava kontrolli tagamiseks teostati ka juhuvalikule tuginedes samade andmete manuaalset ja visuaalset kontrolli. Ühtlasi on asjakohane nentida, et selle käigus tuvastati ka väheses mahus vigasid andmete masintöötluses. Näiteks selgus, et teadmata põhjustel olid jäänud satelliidi andmetest mõnel juhul välja väiksemad ent siiski kompaktsed ja silmaga selgelt eristatavad

metsamassiivid. Uurides lähemalt kirjeldatud ilminguid leiti, et viga võis olla tingitud ennekõike kahest asjaolust. Esmalt sellest, et kasutatud satelliidi ülelennu andmed ja vaadeldud ortofotod pärinesid erinevatest ajahetkedest ning kahe erineva ülesvõtte vahel oli vaadeldav metsamassiiv oluliselt muutunud. Näiteks oli teostatud uuendusraie, mistõttu vaadeldud maa-alalt satelliidiga enam puistut ei tuvastatud. Teine põhjus nimetatud andmehälvete tekkimiseks võis olla põhjustatud siiski algsest satelliidiandmete töötlemisest ja sellest, et taevaalaotuses olnud pilved jäid maa ülesvõtet varjutama.

Lisaks vaadeldi erinevate pinnaelementide omavahelisi piire, nende võimalikku ülekatet ja mittetäielikku külgnevust. Ka selles osas tuvastati mõningaid hälbeid, mis on ennekõike omased metsaregistri ruumiandmetele kuivõrd neid toodetakse väga erinevate isikute poolt ja väga erinevatel ajahetkedel. Kirjeldatud vigade vähendamiseks kasutati MapInfo automaatseid andmetöötluslikke võimalusi pindobjektide ülekatete kõrvaldamiseks ja kokkuvõttes hinnati leitud vead väikesteks ja väheolulisteks.

Järgnevalt on antud üldine kirjeldus peamistest töös kasutatud kaardimaterjalidest, ruumiandmetest ja nende töötlemisest. Kirjelduses ei ole detailides välja toodud kõiki teostatud toiminguid ning ruumi säästmise nimel on keskendutud vaid ennekõike olulist tähendust omanud seoste/tegevuste välja toomisele.

## 7.4 Põhikaardi töötlus

Päringute kiiremaks teostamiseks piiritleti uuringuala Valgamaaga, ehk peamiselt Eesti põhikaardi kaardiruutudega 44, 53 ja 54. Selleks lõigati haldusüksuste kaardikihilt leitava Valgamaa kontuuriga muudest kaardikihtidest välja vaid Valgamaale jäävad alad. Lisaks eraldati metsamaa kõlvikud võttes valimisse andmed, mis märgitud tunnusega „Puittaimestik\_a“ ja ka näiteks kaardil märgalana tähistatud objektid märkega „puis\_t“ markeeringuga „jah“. Metsamaale jäänud erinevad joonobjektid nagu kraavid, teed, elektriliinid ja metsasihid töödeldi pindobjektideks ning lõigati välja ja eemaldati. Selleks kasutati „Topograafiliste andmete kaardistusjuhendis“ (Maa-amet, 2016) toodud objektide piiritlemise mõõte lisades neile asjakohased puhvertsoonid. Olukorras, kus konkreetsele joonobjektile ei olnud kaardiandmetes vastavat laiust võimalik leida, lisati mõõt ja puhvertsoon teiste analoogiliste objektide põhjal.

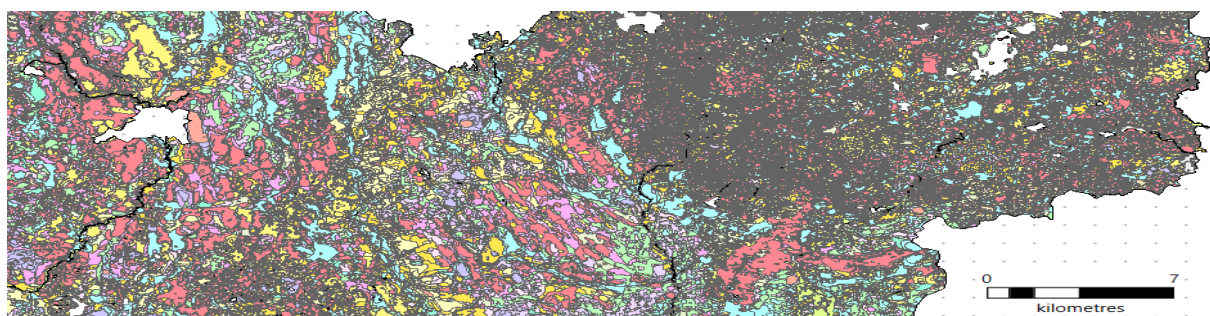
## 7.5 Metsaregistri kaardi töötlus

Omavahel seoti põhikaart ja metsaregistri eraldiste kaart ning leiti põhikaardile metsana märgitud kõlvikute ning metsaregistrisse metsaeraldistena kirjeldatud alad. Ootuspäraselt tuvastati pindalised erinevused: põhikaardile kantud metsamaa pindala oli 109 479,33 ha ja metsaregistris kirjeldatud eraldiste pindala 102 961,03 ha. Ehk kahe vaadeldud andmeallika põhjal oli andmete olemasolu erinevus **6 518,3 ha** ulatuses.

Erinevate kaardikihtide kokku liitmisel ning kaardiobjektide aja jooksul loomisel võib tekkida mitmesuguseid vigu. Väga tüüpilised on kaardiobjektide piiride mittekattuvused, mis väljenduvad näiteks erinevate kontuuride ülekattes ja on teadaolevalt omased just Metsaregistri kaardile kuivõrd seda „toodavad“ erinevatel aegadel erinevad isikud. Sellest tekkivate arvutusvigade vähendamiseks töödeldi metsaregistri kaardikihti nii, et samaliigiliste objektide ülekatted oleksid välistatud kattuvate kaardiobjekti osade eemaldamise teel. Konkreetne andmetöötlus teostati MapInfo's kasutades selleks *Spatial* menüüst leitavat *Fix/Clean* funktsiooni ning selle kaudu ülekattete eemaldamise lubavat käsklust.

## 7.6 Mullastiku kaardi töötlus

Võimaldamaks ennekõike põhikaardil metsamaana kujutatud ent metsaregistris metsana mitte kirjeldatud metsamaa kõlvikute ja neil kasvava metsa arvutuslikku hindamist seoti põhikaardiga ka mullastiku kaart. Mullastiku andmed loovad teaduslikult tuvastatud aluse prognoosimaks konkreetses asukohas teoreetiliselt kasvavaid puuliike ja ennekõike määramaks nende kasvupotentsiaali, sh aja jooksul saavutatavat kõrgust ja mahtu. Erinevad kaardikihid seoti nii, et lisati põhikaardilt välja lõigatud Valga metsamaa andmetabelisse veerg „sif1“, kuhu kanti üle mullatüübi (šifri) andmed mullastiku kaardi samanimelisest veerust. Alljärgneval illustratsioonil (joonis 7.1) on informatiivses mõttes toodud fragment Valgamaa mullastiku kaardist.

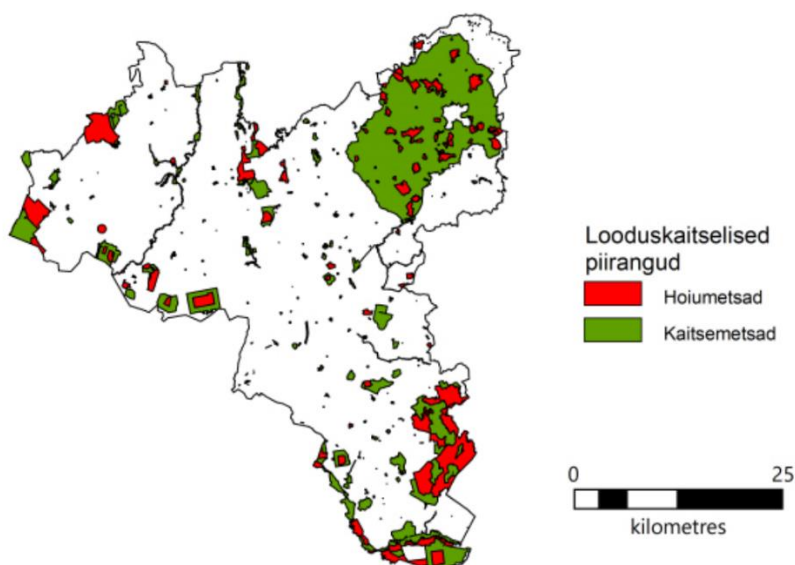


Joonis 7.1 Näitena fragment kasutamist leidnud Valgamaa mullastiku kaardist

Mullastiku kaart näitab mullastiku osas teatavaid lasumismustreid, samas on piisavalt fragmenteeritud andmekoosseisuga, mis muudab selle töötlemise aeganõudvaks ja mahukaks.

## 7.7 Looduskaitsete andmete kaardikihi töötlus

Metsade otsese energeetilise potentsiaali parimaks realiseerimiseks on vajalik metsade sihipärane ja looduslikesse protsessidesse sekkuv majandamine, ent arvestada tuleb ka tegevusele seatud piirangutega. Olulist tähendust omavad siinkohal just erinevad looduskaitsete piirangud. Selle arvestamiseks seoti looduskaitsete piiranguid kajastavad kaardikihid metsaregistri kaardi, põhikaardi ja mullastiku ühendkaardikihiga. Erinevate piirangute paremaks mõistmiseks ja esitlemiseks konsolideeriti looduskaitsete piirangutega alad peamistesse gruppidesse järgmiselt: a) Range kaitsega metsad; b) Kaitsemetsad. Ehkki selliseid määratlusi enam seaduse tasandil ei eksisteeri, on selline määratlus siiski jätkuvalt käibel ja antud juhul lihtsustab oluliselt andmetöötlust [33]. Neist esimesena nimetatud määratluse puhul on laias plaanis majandustegevus läbivalt keelatud ning teise puhul on majandustegevus võimalik, ehkki sel on mõningad piirangud. Kõik nimetatud määratluste alla mitte jäävad metsad kuuluvad majandamisele üldises korras, ehk metsaseaduses kehtestatud tingimustel. Eelkirjeldatud kaarditöötluse tulemuseks saadi kõikide Valgamaa metsade kaardikiht, mille andmetes on eristatavad ka majandustegevusele seatud piirangud. Järgmisel joonisel (joonis 7.2) on näitena toodud kõnealuse looduskaitsete piirangutega metsade kaardikihi graafiline väljund.



Joonis 7.2 Looduskaitsete piirangud Valgamaa puistutes erinevate kaitsekategoriate kaupa

Teades Valgamaa pindala võib jooniselt ainuüksi hinnanguliselt öelda, et looduskaitsepiirangud ei sea maakonna metsapuistute majandamisele läbivaid takistusi.

## 7.8 Kaugseire andmete töötlus

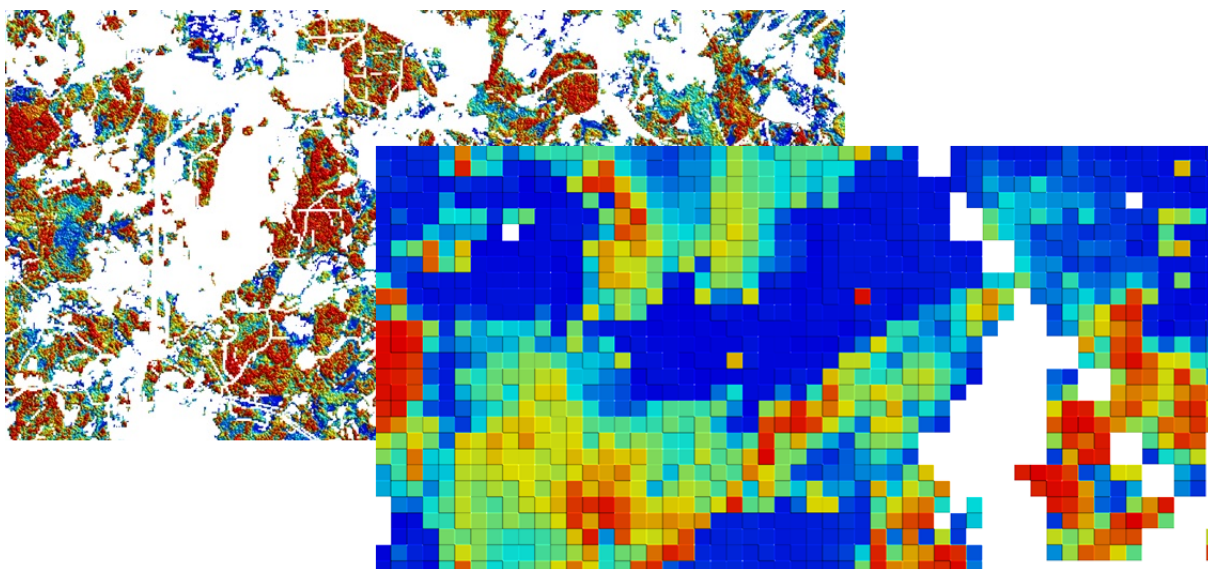
Käesoleva töö kirjanduse ülevaate osas on kirjeldatud kaugseire andmete töötlemise meetodika [42], mille puhul on Eesti Maaülikooli teadlased tuvastanud selle kasutamiskõlblikkuse. Sama meetodikat kasutades oli tuvastatud ka Valgamaast ajavahemikul 04.08.2015 kuni 07.05.2016 tehtud satelliidifotode põhjal puistute liigiline koosseis. Kuivõrd käesoleva töö eesmärk ei olnud sama meetodikat uuesti testida ega keskenduda massiivsele andmetöötlusele, siis võeti praeguse töö algandmetena põhiosas kasutusele juba eelnimetatud andmest. Saadud tulemus seoti Maa-ameti poolt korraldatud ja avaldatud 2017.a ülelennuga kogutud Lidar-kaardistuse andmetega ning kirjanduse ülevaates selgitatud viisil omistati satelliidifotodelt tuvastatud puistute ulatuses neile asjakohased kõrgus- ning mahuandmed.

Konkreetselt satelliidifotodelt saadud puistu liigilise koosseisu andmeid töödeldi enne lõplikku koosseisude fikseerimist MapInfo's nii, et konkreetsetes asukohtades ebatõenäoliselt esinevad ning puuliikide tuvastusalgoritmi poolt kuni 10% koosseisulise osakaaluga määratud puuliigid eemaldati. Samas mahus suurendati proportsionaalselt esindatusega enamuspuuliikide hulka kogu puistu andmetes. Tegevus on vajalik, kuivõrd algsete satelliidiantmete tõlgendamisel üritab puude liigilist koosseisu määrav algoritm enamuspuliikide juurde tekitada ka kõiki teisi puuliike, mida mudel on detekteerima määratud.

Maa-ameti avaldatud Lidarandmed tuli käesoleva töö geograafilise ulatuse – Valgamaa – terviklikuks katmiseks leida kahelt erinevalt kaardistuselt. See on tingitud ALS ülelendude planeeritud ajakavast ja geograafilisest katvusest, kus antud juhul Valgamaa lääneserva hilisem mõõdistus pärines 2017.aasta kevadisest ülelennust ning ülejäänud maakonna hilisem mõõdistus 2017.aasta suvisest ülelennust. Mõõdistuste aastaajaline erinevus tingis vajaduse kohaldada suvisele mõõdistusele seadistatud arvutusloogika vastavaks kevadistele mõõdistustingimustele kuivõrd nimetatud aastaegade vahel esineb oluline erinevus lehtpuude võra läbipaistvuses ja seega on teistsugune ka tagasipeegelduvate laserimpulsside muster. ALS andmetest puistu kõrguse ning tagavara andmete arvutused teostas Eesti Maaülikooli doktorant Tauri Arumäe.

Võimaldamaks erinevate eelkirjeldatud ruumiandmete omavahelist sidusust ning tagamaks objektiivset andmetöötlus- ja arvutusvõimalust jagati ruumiandmed nõ osadeks väiksemate kaardipikslite kaupa. Selle tarbeks võeti põhikaardi 5x5 km ruudustik, mille põhjal genereeriti

andmed jaotatuna 12,5x12,5 meetrisele kaardiruudustikule. Kaardi andmetabelisse loodi positioneerimiseks vajalikud ruudustiku nurgapunktide koordinaadid. Saadud andmemassiivile anti FoxPro tarkavara kasutades struktuur võimaldamaks nende andmete importi ning hilisemat sujuvat töötlemist MapInfo tarkvaraga. Loodi seosed satelliidiandmetelt saadud puistute [42] ja sealsete peapuuliikide ning aerolidariga leitud puistute kõrgus- ja mahuandmete vahel [50], [53]. Graafiline tulemus on kahes erinevas suurenduses toodud all joonisel (joonis 7.3) ja selle värviskaala iseloomustab erinevaid kõrgusmõõte, kus sinine on madalaim ning punane kõrgeim väärtus.



Joonis 7.3 Satelliidi ja aerolidari andmetest kombineeritud graafiline väljund puistute esinemisest ja nende kõrgustest. Parempoolsel joonisel piksli tasandile sisse suurendatud vaade (arvutus: Tauri Arumäe)

Eeltoodud joonisel esinevad ka valged alad, mis antud juhul tähistavad alasid, kus mets ei olnud tuvastatav. Ülejäänud värvide tähendused olid eelnevalt defineeritud ühtlase jagunemise põhimõttel kümne erineva vahemikuna.

Edasises töös avati MapInfo's nii kirjeldatud kaugseireandmeid sisaldavad kaardiruudustikud kui ka Valgamaa kõikide metsaalade, seal leiduvate piirangute ja mullastikuandmete kaardikiht. Asjasse mittepuutuvate andmete eemaldamiseks ja andmetöötluskiiruse suurendamiseks eemaldati kaugseire andmetest kõik see, mis jäi väljapoole eelnimetatud põhikaardist töödeldud andmekihti. Seejärel rakendati MapInfo's *Split* funktsiooni, mille tulemusel jagati kaugseire andmete ruudustik mullaandmete, looduskaitseliste piirangute jmt. põhjal väiksemateks eristatavateks osadeks. Kokkuvõttes valmis kaardikiht, mis sisaldas endas kõiki olemasolevaid ja käesoleva töö teostamiseks vajalikke algandmeid. Jäänud andmetühimikud täideti arvutuslikult järgnevates peatükkides kirjeldatud viisil.

## 8. METSAMAJANDUSLIKE PÕHIANDMETE ANALÜÜS

Alljärgnevalt on välja toodud ülevaade käesoleva töö raames olulist tähtsust omavatest metsamajanduslike andmete arvutusloogikatest ja –valemitest ning nende kasutamisest. Põhiandmete arvutusetapid on nende eristatavuse huvides liigendatud alampeatükkidesse. Kõikide põhiandmete arvutustulemusi ei ole nende mahukuse tõttu käesolevas töös detailselt esitatud. Töö peamise uurimissuuna ehk Valgamaa puistute energeetilise potentsiaali peamised arvutustulemused on eristatavuse huvides toodud eraldi peatükis ning käesoleva töö lisa 4.

### 8.1 Metsaeraldise kõrgusindeksi leidmine

Üheks oluliseks metsamajanduslikuks näitajaks ning majandusotsuste teostamise baasteadmiseks, millele tuginevad mitmed muud arvutused on metsaeraldise kõrgusindeks, mida erialakirjanduses tähistatakse kui  $H_{100}$ . Sisuliselt on tegemist puistu kasvu kvaliteeti iseloomustava näitajaga, mis iseloomustab prognoositavat kõrgust 100 aasta vanusele puistule. Näitaja arvutatakse meetrites ning enamuspuuliigi valitsevale elemendile [54] ehk ühesuguse tekkeviisi ja vanusega põlvkonnale. Arvutamiseks on üldjuhul kasutatav esimese rinde peapuuliigi kõrgus ning vanus.

Kõrgusindeksi arvutamiseks on kasutusel järgmine valem (valem 8.1) [54]:

$$H_{100} = \frac{H_{50}}{[1+(\alpha+\beta \cdot H_{50}) \cdot (0,5^c - 1)]} \quad (8.1)$$

kus  $H_{50}$  – kõrgusindeks 50 aasta vanuses ja avaldatakse järgmiselt:

$$H_{50} = \frac{H \cdot \{1 + \alpha \cdot [(50/A)^c - 1]\}}{\{1 - \beta \cdot H \cdot [(50/A)^c - 1]\}} \quad (8.2)$$

kus  $H$  – enamuspuuliigi keskmine kõrgus, m,

$A$  – enamuspuuliigi keskmine vanus, a,

$\alpha, \beta, c$  – valemite kordajad vastavalt järgmisele tabelile:



Tabel 8.1  $H_{100}$  arvutusvalemi kordajad [54]

Puuliikide grupp	Kordaja		
	$\alpha$	$\beta$	c
Mänd ja kõvad lehtpuud	0,7283	-0,0109	1,3925
Kuusk ja teised okaspuud	0,7977	-0,0137	1,6116
Pehmed lehtpuud	0,7298	-0,0161	1,3460

Käesoleva töö koostamisel võeti  $H_{100}$  ja boniteedi väärtused esmalt metsaregistri andmetest. Kui metsaregistrist puudus  $H_{100}$ , ent oli olemas boniteedi määratlus kasutati seda, et arvutada  $H_{100}$  väärtus boniteediklassi arvutamise teisendatud valemi põhjal (valem 8.4). Kui metsaregistri andmetest ei olnud kumbagi otsitud parameetrit võeti  $H_{100}$  määramise alusmaterjal mullastiku kaardilt. Selleks leiti mullastiku kaardilt konkreetse asukoha mullatüübi määratlus (sif1) ja leiti samale mullatüübile selle levikupindalaga kaalutud keskmine  $H_{100}$  metsaregistris leiduvate andmete põhjal. Selle juures võeti arvestusse vaid need metsaeraldised, kus oli levinud ainult konkreetselt antud hetkel otsitav mullatüüp.

Arvutati boniteedi klass, tuginedes järgmisele põhivalemile (valem 8.3) [54]:

$$B = \frac{33,5 - H_{100}}{4} \quad (8.3)$$

Valemis tood väärtuste sisuline tähendus on lihtsustatult selles, et boniteediklassil 1A oleva puistu keskmine kõrguskasv on 33,5 meetrit ning arv neli markeerib nelja meetrist kõrguse vähenemist, mis kaasneb eelmisest ühe taseme võrra madalama boniteediklassiga. Antud töö raames kasutati valemit (valem 8.4) teisendatud kujul:

$$H_{100} = 33,5 - (4 \cdot B) \quad (8.4)$$

Arvutuste tulemusena oli kõikidele asjakohastele varem moodustatud pikslitele, kaardiruudustikule leitud kõrgusindeksi väärtused.

## 8.2 Puistu enamuspuuliigi määramine

Kuivõrd Lidar andmetest ei ole võimalik usaldusväärselt puistu erinevaid rindeid eristada, siis mõistame enamuspuuliigina antud töös puistu suurima tagavaraga puuliiki. Satelliidifotodelt saadi igale pikslile seal esinevate puuliikide osakaalud. Kuna aga satelliidifotode töötlemiseks kasutatavad mudelid annavad ka puhtpuistususe teistele puuliikidele mõneprotsendilised esinemised, siis eemaldati kõik alla 10% esinemisega puuliigid kui müra jagades nende osakaalu teiste puuliikide vahel proportsionaalselt nende osakaaluga. Tulemuse põhjal arvutati hiljem puistu vanused, mis on võimalike raiemahtude ja energeetilise potentsiaali ajalise realiseeruvuse määramisel üheks peamiseks aluseks.

## 8.3 Puistu vanuse leidmine

Puistu vanus  $A$  on üks oluline näitaja, mille kaudu on täna defineeritud näiteks lageraiete lubatavus. Antud töö raames kasutati puistu vanuse leidmisel eeltoodud kõrgusindeksi arvutusvalemi põhiloogikat ja sellest avaldatavat seost vanuse, puistu kõrguse  $H$  ja kõrgusindeksi  $H_{100}$  vahel. Selleks koostati Visual FoxPro-s programm, mille tööpõhimõtte seisnes puistu erinevate vanusevõimaluste ja kõrgusindeksi seoste eksperimentaalsel võrdlemisel ja neile vastava puistu vanuse leidmisel. Programmi kasutati ning leiti selle abil edasisteks arvutusteks vajalikud vanusnäitajad.

## 8.4 Puistu diameetri leidmine

Puistu diameetri all mõistetakse siinkohal konkreetse puistu puude ruutkeskmist diameetrit ja käesoleva töö raames leiti puistu diameeter igale koosseisu puuliigile. Tegevuse eesmärgiks oli moodustada sobilik andmestu teoreetiliselt saadava puidu sortimenteeringiseks. Diameetri arvutuste tegemiseks kasutati Maaülikoolis välja töötatud täpsustatud meetodikat ning arvutuste teostamiseks vabavaralist statistikatarkvara R v.3.2.0. Programmiga teostati dispersioonanalüüs kasutades selleks programmi funktsiooni „lm“ nii nagu on statistikameetodeid ja nende programmis R kasutatavust kirjanduses kirjeldatud [56].

Antud juhul teostati diameetri arvutus järgmist põhivalemit (valem 8.5) kasutades:

$$D = \exp(a_0) \cdot H^{a_1} \cdot \left(\frac{A}{A+1}\right)^{a_2} \cdot H_{100}^{a_3} \quad (8.5)$$

kus  $a_0$  – kasvukohatüübi põhine konstant,

$a_1, a_2, a_3$  – konstandid,

A – puistu vanus (aastat).

Sama valemi (valem 8.6) lineaarne kuju on järgmine:

$$\ln(D) = a_0 + a_1 \cdot \ln(H) + a_2 \cdot \ln\left(\frac{A}{A+1}\right) + a_3 \cdot \ln(H_{100}) \quad (8.6)$$

Valemis toodud sümbolite tähendused on samad eelmise valemiga.

Eeltoodud valem ja arvutusmetoodika ei ole sellisel kujul veel teaduskirjanduses avaldatud, ent Maaülikooli teadlaste eestvedamisel leiab see eelduslikult peatselt aset. Samas ei ole põhjust kahelda valemi asjakohasuses ning kasutuskõlblikkuses praeguse töö kontekstis (arvutatud olulisuse tõenäosus  $p < 0,001$  ja puuliikide kaupa leitud determinatsiooni kordaja  $R^2 = 0,860$  kuni  $0,912$ ).

## 8.5 Metsade raieküpsuse hindamine

Metsa majandamise eeskiri [57] annab täpse määratluse, kuidas selgitada metsade raieküpsust. Antud töö kontekstis on esmaselt võetud fookusesse lageraie lubatavuse selgitamine lähtuvalt puistu keskmisest vanusest. Arvutuste teostamisel on kasutatud mudeleid ja programme, mis kasutavad puistu vanuse määramiseks erinevaid metsa majandamise eeskirjas [57] defineeritud ja allpool kokkuvõtvalt käsitletud valemeid.

Kuivõrd lageraie on lubatud puistus, mille koosseisu ruuduga kaalutud esimese rinde keskmine vanus on võrdne või suurem puistu koosseisu ruuduga kaalutud esimese rinde keskmise

raievanusega, siis tuleb esmalt mõlemad nimetatud näitajad arvutuslikult leida. Konkreetse puistu esimese rinde keskmine vanus arvutatakse järgmise valemiga (valem 8.7) [57]:

$$A = \frac{(koef_{P11}^2 \cdot A_{P11} + koef_{P12}^2 \cdot A_{P12} + \dots)}{(koef_{P11}^2 + koef_{P12}^2 + \dots)} \quad (8.7)$$

kus  $A$  – puistu koosseisuga kaalutud vanus,

$koef_{P_l}$  – puistuelemendi koosseisukordaja protsentides,

$A_{P_l}$  – puistuelemendi vanus.

Puistu keskmine raievanus arvutatakse järgmise valemiga (valem 8.8) [57]:

$$AK = \frac{(koef_{P11}^2 \cdot Ak_{P11} + koef_{P12}^2 \cdot Ak_{P12} + \dots)}{(koef_{P11}^2 + koef_{P12}^2 + \dots)} \quad (8.8)$$

kus  $AK$  – puistu koosseisuga kaalutud raievanus,

$Ak_{P_l}$  – puistuelemendi (puuliigi) küpsusvanus.

Puistuelemendi (puuliigi) küpsusvanused on boniteediklasside kaupa kehtestatud metsa majandamise eeskirjaga [57] ning lihtsuse huvides leitavad ka käesoleva töö lisast 2.

On loogiline, teaduslikult tuvastatud ning väga paljude allikate poolt kirjeldatud puu kasvukiiruse, kasvukohatüübi ning mulla boniteedi omavahelised seosed. Üldistusena on Eesti metsade kohta keskmisena märgitud, et aastane kõrguskasv kuni 20 aastastes puistutes on umbes pool meetrit ning vanemates metsades umbes 0,3 meetrit [16].

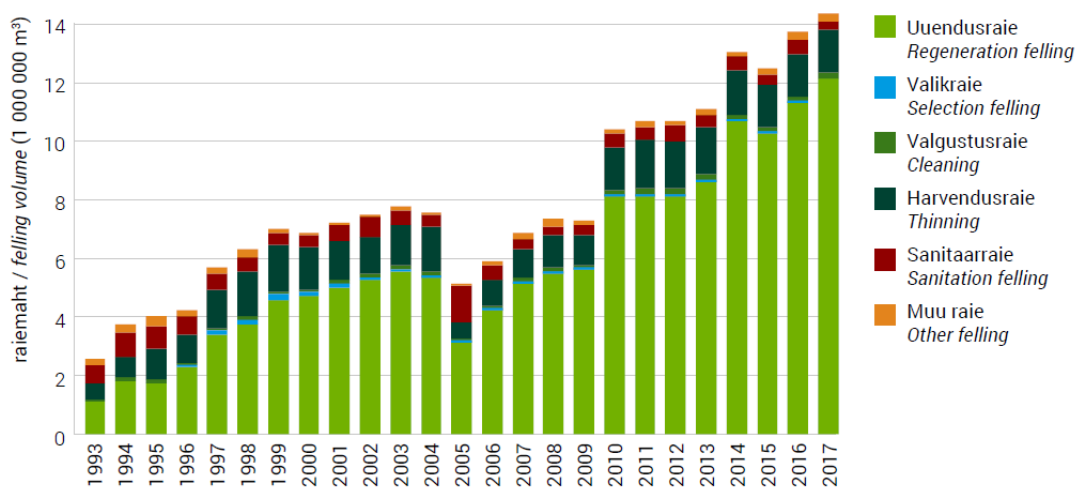
Seega teatud juhtudel saavutab puistu bioloogiliselt ja ka majanduslikult sobiva raieküpsuse eeltoodust vanusepõhisest määratlusest varem või ka hiljem. Arvestades nimetatud asjaolu on raievõimaluse täiendavaks reguleerimiseks kasutusel ka rinnasdiameetri põhine arvestus. Metsa majandamise eeskirja [57] kohaselt on eeltoodud vanusepõhisest jaotusest noorema männi, kuuse, kase, sanglepa ja haava enamusega puistu lageraie lubatud, kui konkreetse puistu enamuspuliigi keskmine rinnasdiameeter on saavutanud vähemalt õigusaktis „Metsa majandamise eeskiri“ märgitud küpsusdiameetri. Lihtsuse huvides on viidatud küpsusdiameetri jaotus ka käesoleva töö lisas 2.

## 8.6 Harvendusraie mahu leidmine

Metsakasvatustlikult on oluline kasvava metsa tihedus ning asjakohane on arvestada ka võimalike harvendusraiate mahu ning neist saadava metsamaterjaliga. Harvendusraie mahu leidmiseks on kirjeldatud meetodika, mida on olemuslikult kajastatud nii õigusaktis [58] kui ka metsanduslikes artiklites [59], [60].

Läbivalt on kasutusel metsa hõreduse termin eristades raie eelset ja järgset hõredust. Metsa hõreduse leidmiseks on õigusaktis kajastatud [58] ning kasutamist leidnud käsitlus, mis võtab esmalt vaatluse alla metsa raie-eelse ( $L_{re}$ ) ja raiejärgse ( $L_{rj}$ ) hõreduse. Seejärel leitakse juba puistus olevate puude arv ( $N_{sum}$ ) hektari kohta ning saadakse tegelik hõredus. Kui eeltoodud viisil leitud hõredus ( $L$ ) on väiksem või võrdne raie-eelse hõredusega ( $L_{re}$ ), siis teostatakse harvendusraie.

Käesolevas töös ei teostata eraldi täpsemaid harvendusraie mahtude arvutusi, sest reaalsete puistute vanuselisest struktuurist johtuvalt ning tegelikust raiepraktikast nähtuvalt on tänapäeval läbivalt domineerivad lageraied. Viimast kinnitavad ka aastaraamatus Mets 2017 avaldatud andmed planeeritud raieliikidest viimaste aastate lõikes nagu allolevalt graafikult (joonis 8.1) näha.



Joonis 8.1 Raiedokumentidega Eestis planeeritud raied erinevate raieliikide kaupa [33]

Eeltoodud graafikult on võimalik välja lugeda, et kõikidest viimastel aastatel planeeritud raietest on Eestis harvendusraiate osakaal umbes 20%. Tingituna puistute keskmisest vanusest ja arenguklassidest on ka loogiline lageraiete suur osakaal. Lihtsustatult võetakse ka käesolevas töös harvendusraiate ning sealt saadava puidu osakaaluks 20% lageraiete mahust. Muud seonduvad metsamajanduslikud algparameetrid kantakse üle lageraiete osas teostatud arvutuskäikudest.

## 8.7 Puitmaterjali sortimenteerimine

Puitmaterjali sortimenteerimise all peetakse siinkohal silmas ennekõike raiest saadava puitmaterjali kasutusotstarbe järgi klassidesse jagamist lähtuvalt saadava materjali kõige parema ja tõhusama ära kasutamise põhimõttest. Kuigi käesoleva töö peamiseks eesmärgiks on leida konkreetse maakonna puitse biomassi energeetiline potentsiaal, on ilmselge, et kvaliteetse ja töötlemisel teoreetiliselt suuremat lisandväärtust andva puidu kasutamine otseselt energia tootmiseks ei ole kõige mõistlikum lähenemine. Paremaid puidu kasutusviisi valikupõhimõtteid ja perspektiivi hinnanguid pakubki kindlatel alustel tehtud sortimenteerimine. Metsamaterjali osas on sortimenteerimise põhimõtted olnud aastakümneid kasutusel, sh on kasutusel olevat algoritmi kirjeldatud ka Vabariigi Valitsuse määruses [58]. Algoritm ise põhineb Ozolinši'i tüvemoodustaja valemil [61], mille siinkohal pikemalt lahti kirjeldamine ei ole töö mahu ja fookuse huvides asjakohane.

Käesoleva töö andmetes on puidu tagavara avaldatud tüvemahuna, mille juurde kuulub küll koort mitte puude ladvad ega oksad. Nende osakaalude leidmisel on lähtutud ajaloolisest metsataksaatori teatmikust [62] ja seal kirjeldatud arvestusalustest ning need on sortimenteerimise käigus arvestatud raiejätmete hulka.

Täiendavalt on Maaülikooli teadlaste poolt Keskkonnaagentuuri tellimusel 2017. aastal valminud uuendatud sortimenteerimise mudel, mida on kasutatud ka konkreetsetel käesolevas töös [63]. Mudeli alusel tehtud arvutuskäikudes võeti sortimentide pikkuseks palgi puhul 3,1 kuni 6,1 meetrit ning paber- ja küttepuidu puhul 3 meetrit. Sortimentidesse jagamist alustati tüvemoodustaja valemi alusel leitud tüve peenema otsa diameetrist. Sortimendi väljatuleku selgitamiseks teostati arvutustsükkel, kus sortimendi sammu võrra sortimendi pikkust suurendades leiti tüvediametrid kuni hetkeni, mil leitud diameeter osutus vaadeldava sortimendi minimaalsest diameetrist väiksemaks. Olukorra ilmnemisel võeti kasutusele viimasele arvutusele eelnenud diameetri arvutuses olnud sortimendi pikkus.

Lisaks arvutati puidu sortimentidest palkide ja paberipuidu osas välja nende koore osakaal kasutades selleks järgmist valemit (valem 8.9) [60]:

$$koor = \frac{a_1 \cdot \left( \frac{d + a_2}{d + a_2 + 1} \right)^{a_3}}{100} \quad (8.9)$$

kus  $koor$  – koore osakaal puu tüvest,

$d$  – puu diameeter, cm,

$a_1, a_2, a_3$  – valemi konstandid.

Eeltoodud valemi konstandid on puuliigiti varieeruvad ning need on leitud empiiriliselt Maaülikooli teadlaste poolt. Tüvemoodustajaga leitud diameetreid vähendati koore arvelt kasutades järgmist valemit (valem 8.10):

$$d_{k-ta} = \frac{d_{k-ga}}{\sqrt{1+koor}} \quad (8.10)$$

kus  $d_{k-ta}$  – tüve kooreta diameeter suvalisel kõrgusel, cm,

$d_{k-ga}$  – tüve koorega diameeter suvalisel kõrgusel, cm,

$koor$  – tüve koore osakaal.

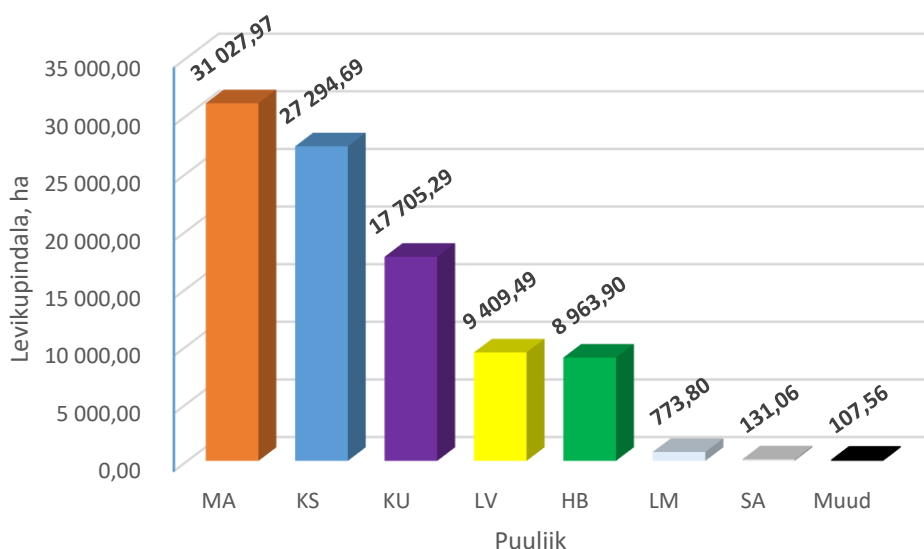
Eraldi arvestatud paberipuidu koore osas peame küll silmas pidama seda, et riigist välja veetakse see sortiment üldjuhul koorega. Samuti on teada, et suur osa koorest, mis eraldatakse kohalikes puidutööstustes leiab ka kohapealset kasutamist kütusena. Seega on käesolevas töös leitud, et sortimendi täpsuse huvides on mõistlik arvutada eraldi ka tekkiva koore kogus ent energeetilise potentsiaali hulka ei ole seda mõistlik lugeda. Täiendavad sortimenteerimisel arvestatud detailid ja arvutusloogikad on kirjeldatud eelviidatud uuendatud sortimenteerimismudelit kirjeldavas töös [63] ja nendel siinkohal pikemalt ei peatuta.

Täpsema arvutuse puhul on hea arvestada ka seda, et tüvepuidul võib esineda kahjustusi, mis tingivad selle lugemise näiteks küttepuidu hulka. Vabariigi Valitsuse 08.07.2004 määruse nr 242 [58] lisas 4 on antud valem, mille põhimõtted on juba leidnud arvestamist uuendatud ja siinkohal kasutatud sortimenteerimismudelil [63]. Seetõttu ei tooda siin eraldi välja ka viidatud määrusekohast valemit.

## 9. ANDMETÖÖTLUSE TULEMUSED JA RAIEMAHTUDE ARVESTUS

Ruumiandmete töötlemise tulemina oli otsesel või kaudsel viisil leitud Valgamaa puistuid iseloomustavad andmed, mis on eelduseks, et täita käesoleva töö peamist eesmärki ehk määrata kõnealuse maakonna puitse biomassi energeetilist potentsiaali. Summaarselt kokku eristati satelliidiandmete alusel Valgamaa puistute levikupindalaks **95 413,75 ha**. Toodud väärtus on väiksem kui mis iganes teistest vaadeldud allikatest saadav samanimeline arväärtus. Põhjuseid võib siin olla mitmeid. Alates teostatud raietest, mis satelliidifoto jaoks on jätnud lageda ala ilme kuni selleni, et andmetöötluks vajalike pikslite moodustamisel on maakonna piiriga lõigatud satelliidiandmete kiht selle servaaladel üksikute pikslite kaupa nende mitteterviklikkuse tõttu andmetest välja jäetud. Sellest hoolimata kasutame käesolevas töös eelnimetatud väärtust ja ei hakka seda erinevate väärtuste vahel keskmistama ega muul moel korrigeerima. Kaudselt on sel moel tagatud ka raiemahtude osas teatav positiivne puhver.

Ootuspäraselt tuvastati sealjuures erinevate puude liigilise esinemise varieeruvus nagu allolevalt Valgamaa puistutes esinevate peamiste puuliikide pindalalise jaotuse graafikult (joonis 9.1) võib välja lugeda.



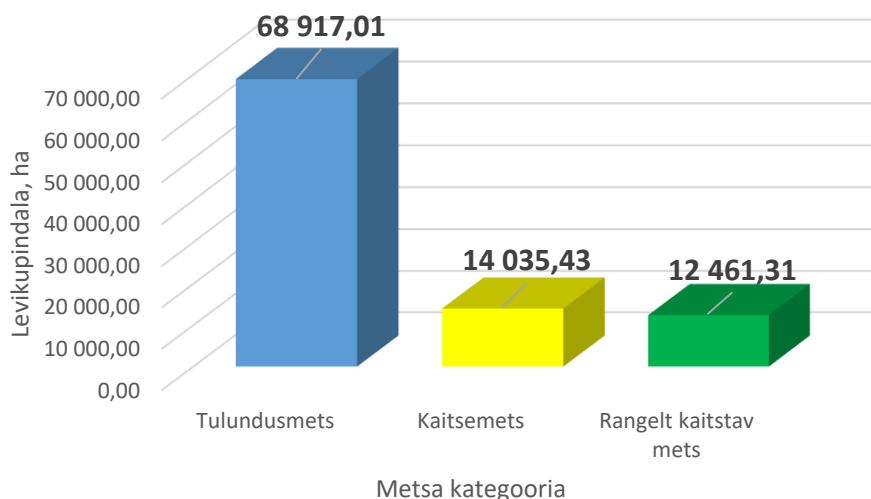
Joonis 9.1 Valgamaa puistutes levinud peamiste puuliikide levikupindalad, ha

Vaadeldav maakond ei erine puuliigi struktuurses koosseisus oluliselt Eesti keskmisest. Puuliikidena domineerivad männid, kased ja kuused.

Olles erineval viisil leidnud puistuid iseloomustavad andmed, peeti edasiste arvutuste teostamiseks vajalikuks tuua välja erinevate puuliikide lõikes nende levikupindalad kaitse eesmärgist lähtuvate kasutuskategooriate ja boniteediklasside kaupa. Mõlemad määravad antud juhul otseselt



kättesaadava puidu mahud ja kokkuvõttes energeetilise potentsiaali. Neist esimene küll raiete välistamise või piiramise ja teine kasvuheaduse kaudu. All graafikul (joonis 9.2) on välja toodud Valgamaal levinud metsade jagunemine kaitse eesmärgist lähtuva kasutuskategooriate kaupa.



Joonis 9.2 Valgamaa puistute jagunemine kaitse eesmärgist lähtuvate kasutuskategooriate kaupa, ha

Graafikult saame lugeda, et erinevate otsete looduskaitseliste piirangutega metsade osakaal ei ole väga suur ning tulundusmetsana on kogu metsadest täna käsitletav umbes kaks kolmandikku, täpsemalt 72%.

Igale kaardipikslile arvutati selles märgitud boniteediklassi järgi pindalaga kaalutud keskmised küpsusvanused kasutades järgmist valemit (valem 9.1):

$$AK_{keskm} = \frac{\sum(P \cdot AK)}{\sum(P)} \quad (9.1)$$

kus  $AK_{keskm}$  – pindalaga kaalutud küpsusvanus (a),

$AK$  – puistu küpsusvanus (a),

$P$  – puistu pindala.

Töödeldavate andmete mahu piiramiseks peeti mõistlikuks summeerida üksikud boniteediklassid kahte peamisse gruppi. Kokku liideti boniteediklassid 1A kuni 2 ja 3 kuni 5A ning lubatava raievanuse arvestamiseks võeti kasutusele vastavate puuliikide summeeritud boniteediklasside suurim õigusaktiga [57] seatud väärtus. Sellisel viisil grupeeritud boniteediklasside arvestuses kasvab

valdav osa Valgamaa metsi parimatel maadel, ehk kuni teise boniteediklassi maadel (81%). Ülejäänud metsad kasvavad boniteediklassilt kolmandas ja muudel vähemviljakamatel maadel.

## 9.1 Metsakasutuse erinevad stsenaariumid

Valikuvõimaluste tagamiseks ning käesoleva töö lõpptulemi paremaks esitlemiseks otsustati konstrueerida erinevad arengustsenaariumid võttes aluseks Metsa korraldamise juhendi [54] lisas 18 toodud arvestuslangi arvutamise valemeid ja nendega seotud põhimõtteid. Õiguslikult on arvestuslangi põhimõtete kasutamine kohustuslik küll vaid enam kui 1 000 ha riigimetsa majandajal. Siinkohal annab aga arvestuslangi põhimõtete kasutusele võtmine hea aluse erinevate arengustsenaariumite konstrueerimiseks. Ühtlasi on arvestuslangi põhimõtte kasutusele võtmine tingitud soovist tagada metsade majandamise jätkusuutlikkus jagades seadusega raiuda lubatud metsade raiemahtu ajas lähtuvalt puistute vanuselisest struktuurist ja küpsuskriteeriumitest. Stsenaariumid ehk antud juhul teoreetiliselt võimalikud aastased raiemahud arvutati viidatud juhendi [54] ühtlase kasutuse langi, küpsuslangi, I ja II vanuslangi valemite põhjal. Olgu siinkohal toodud baasvalemina ühtlase kasutuse langi valem (valem 9.2):

$$L_y = \sum \frac{P_i}{AK_i+5} \quad (9.2)$$

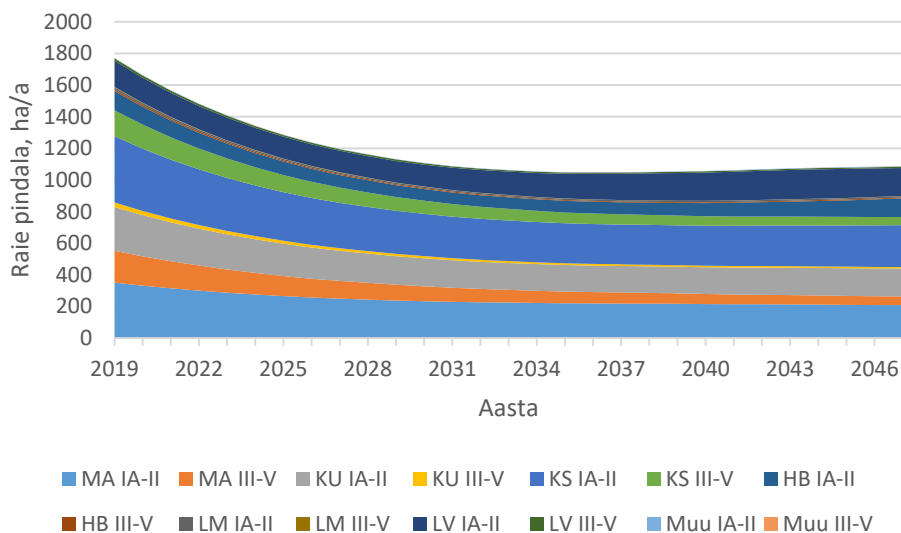
kus  $P_i$  – eraldise pindala,

$AK_i$  – puistu küpsusvanus i-ndas eraldises.

Valemisse lisatud arv „viis“ tähistab võimalikke lisa-aastaid raie teostamiseks alates küpsusvanuse saabumisest. Nagu valemi nimigi ütleb, taotleb see konkreetne valem aastate lõikes puidu ühtlast kasutust. Samas, arvestades puistute reaalselt vanuselist struktuuri ja koosseisu on selge, et ühtlase kasutuse põhimõtte kohene rakendamine ei ole alati võimalik. Teisisõnu on loogiline, et ühtlase kasutuse tulemuslikule rakendamisele võiks eelneeda muu kasutusmudel, mille käigus saavutatakse puistute vanuselise ja koosseisulise jagunemise parem diferentseeritus. Küpsus- ja erinevate vanuslankide arvutamisel jagatakse põhimõtteliselt summeerimistingimustele vastavate puistute pindala 10-30 aastale.

Eelkirjeldatud viisil teostati arvutused piiranguteta tulundusmetsade kohta. Kuivõrd sel viisil teostatud arvutused osutusid ootuspäraselt väga mahukaks, on järgnevalt välja toodud vaid arvutustulemite graafiline esitus näitena küpsuslangi (joonis 9.3) kohta. Kõikide konstrueeritud

stsenaariumite graafilised esitused on tervikuna toodud käesoleva töö lisan 3 ja nende põhjal saab hea ülevaate stsenaariumite vahelistest erinevustest. Graafikute loetavuse huvides on kasutatud lühendeid – puuliikide puhul nende metsanduslikke lühendeid [54] ning nende järel olevad rooma numbrite ja tähtede kombinatsioonid indikeerivad erinevate boniteediklasside vahemikke. Vertikaaltelje skaala tähistab võimalikku tulundusmetsade lageraiete pindala.



Joonis 9.3 Võimalik Valgamaa tulundusmetsade raiete pindala küpsuslangi korral, ha/a

Koostatud graafikud ilmestavad ja vastavad ka eelnevalt välja toodud statistiliste andmetele. Küpsuslangi põhimõtete ellu pööramisel on Valgemaal lähiaastatel võimalik suurel pinnal teostada raied, ent peatselt pärast seda hakkab võimalik raiete pind tuntavalt vähenema. Stabiliseerumine selles osas hakkab aset leidma aastatel 2033-2035.

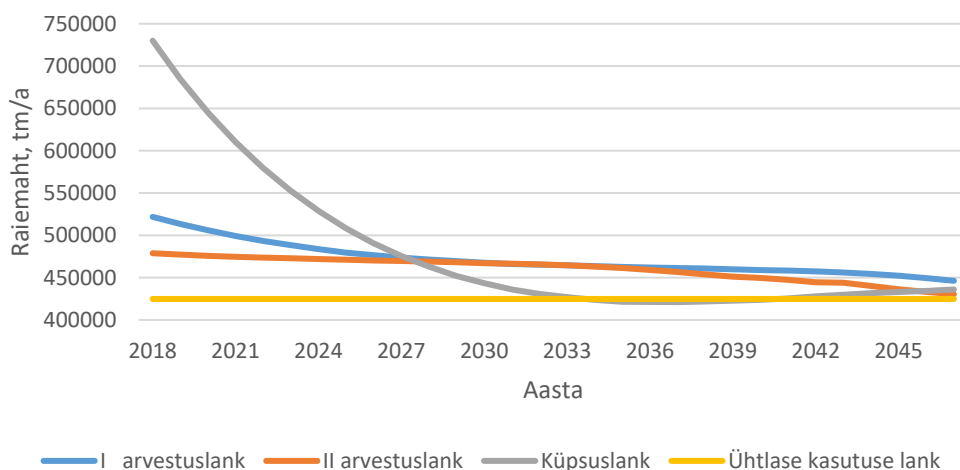
## 9.2 Võimalikud raiemahud

Käesoleva töö teoreetilises osas kirjeldatud viisil ning eelpool kirjeldatud moel saadud andmete alusel teostati arvutused raietest saadava puidu mahu leidmiseks ning sortimenteerimiseks. Majandamispiirangutega metsade puhul arvestati, et rangete piirangutega puistute majandamine, sh metsaraied on välistatud. Ülejäänud piirangutega puistute puhul leiti, et nende vähese pindalalise osakaalu ning erinevate raiekombinatsioonide varieeruvuse tõttu ei ole mõistlik nende raiemahte eraldi kõigi tulundusmetsas kasutatud stsenaariumite ja kasutusviiside kaupa läbi arvutada. Küll aga peeti vajalikuks koostada indikatiivne arvestus ning selleks võeti eeldus, et piirangutega metsade raiemahust võrreldes samalaadsete tulundusmetsadega on realiseeritav 50%. Sellise osakaalu kasutusele võtmisel tugineti 2011.aastal tehtud ning metsamajandusele

kaitsealade laiendamise mõju analüüsinud teadustööle [60]. Selle juures ei eristatud piirangutega metsade raietest saadud puidukoguste arvutamisel erinevaid võimalikke raiestsenaariume ning kõikide raiemahu stsenaariumite juures arvestati piirangutega metsadest saadavaid puidukoguseid ühtlase kasutuse stsenaariumi alusel leitud puidukogusena.

Täiendavalt leiti eelkirjeldatud alustel ehk lihtsustatud viisil harvendusraietega saadava puidu osakaal. Nimetatud raieliigist saadavad puidukogused sortimenteeriti käesoleva töö teoreetilises osas kirjeldatud moel ning samadel alustel nagu seda tehti tulundusmetsade puhul.

Raietest saadava puidu summaarsete arväärtustega tabelid kogu vaadeldud perioodi kohta on leitavad käesoleva töö lisan 4. Siinkohal toome välja vaid indikatiivse graafiku (joonis 9.4), kuhu on kombineeritud erinevate stsenaariumite võimalikud raiemahud vaadeldaval perioodil.



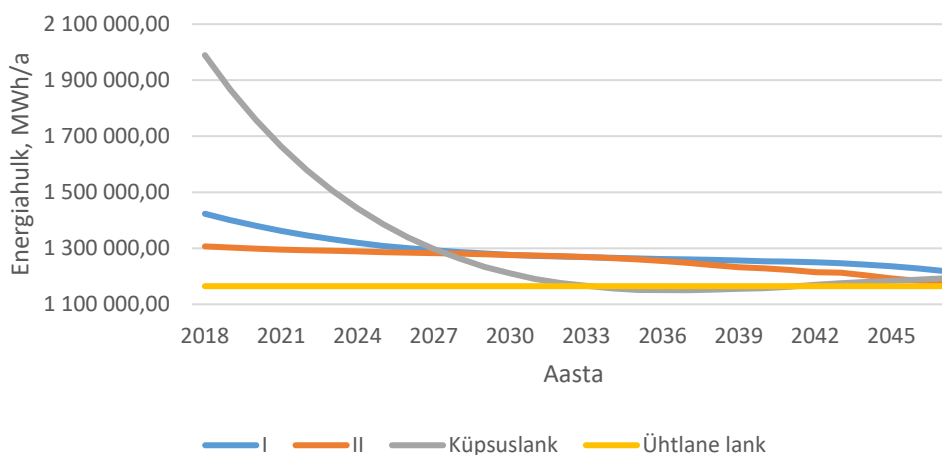
Joonis 9.4 Võimalikud raiemahud erinevate stsenaariumite korral, tm/a

Eeltoodud graafik on vastavuses varem leitud teabega, mille kohaselt erineb teistest oluliselt küpsuslanki stsenaarium, võimaldades koheselt suurt raiemahtu, ent viies tuntava raiemahu langemiseni lähiaastatel. Näiteks on aastal 2019 ühtlase kasutuse stsenaariumi puhul võimalik raiuda kuni 424 767,5 tm/a samas kui küpsuslanki stsenaariumi puhul on sama näitaja 684 617,0 tm/a. Ent juba aastaks 2034 on küpsuslanki stsenaariumi puhul võimalik raiemaht langenud väiksemaks kui võimalik samal ajal ühtlase kasutuse puhul rakendada. Sealjuures saabub väiksem võimalik raiemaht küpsuslanki stsenaariumi puhul aastaks 2037, jäädes suurusesse 421 065,1 tm/a ja püüdes sellises suurusjärgus veel mitmeid järgnevat aastaid. Arvutuslikult võib küpsuslanki stsenaariumi võimalikku raiemahtude suurenemist ja ühtlase kasutuse võimalike mahtude ületamist oodata alles aastal 2041.

## 10. VALGAMAA PUISTUTE ENERGEETILINE POTENTSIAAL

Erinevate stsenaariumite rakendamisele leitud raiepindalade ja teiste varem leitud andmete alusel leiti võimalikud raie mahud, mis võeti aluseks Valgamaa puistute energeetilise potentsiaali arvutamisel. Sealjuures peeti vajalikuks avaldada kogu saadava puitse biomassi energeetiline potentsiaal kahel viisil – absoluutse maksimaalsena ja realistlikuna. Neist esimese puhul võeti arvesse kogu raietega saadav puitne biomass sõltumata raietüübist ja sortimendist. Ainukese limiteeriva faktorina võeti arvesse raiemahtude ja –viiside lubatavust, sh looduskaitselisi piiranguid. Teisel juhul võeti arvesse nii piiranguid, käesolevas töös kirjeldatud suundumusi kui puidu parimal viisil kasutamise eesmärki ning avaldati Valgamaa puistute energeetiline potentsiaal läbi raie käigus tekkinud raiejäätmete ja küttepuidu sortimendi.

Absoluutselt maksimaalne Valgamaa metsadest saadav energiahulk ühes aastas on arvutuslikult 1 989 340,10 MWh. Tegemist on lühiajaliselt võimaliku tulemiga. Kolmekümne aasta keskmise väärtusena on sama näitaja 1 313 081,16 MWh. Tegemist on maksimaalse võimaliku energeetilise potentsiaaliga, mis on realiseeritav seaduse piires tegutsedes ent mille realiseerimine ei ole vastutustundlik. Järgmine graafik (joonis 9.5) ilmestab kirjeldatud tulemusi.

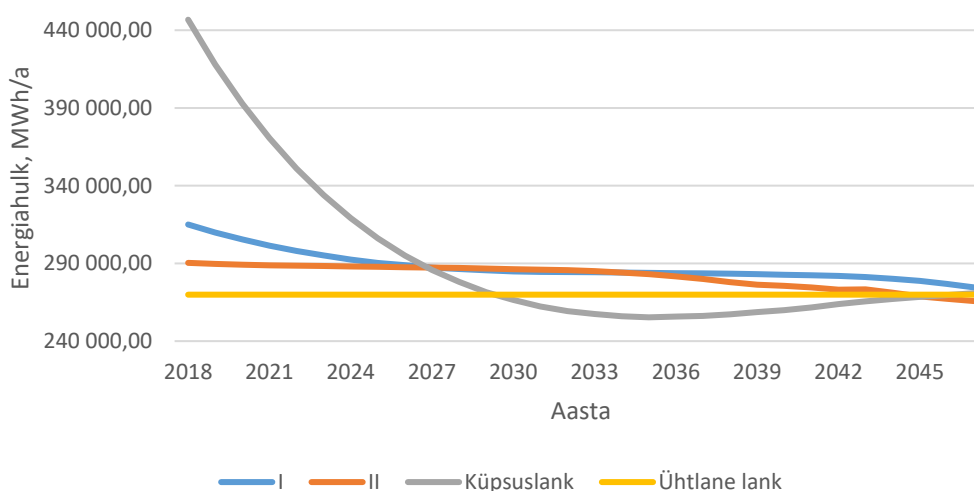


Joonis 9.5 Valgamaa puistute maksimaalne energeetiline potentsiaal erinevate stsenaariumite kaupa

Graafik korreleerub otseselt raiemahtude muutusega ning ka siin on ootuspärane saadava energiakoguse stabiliseerumine ca kümne aasta pärast. Olgu märkusena öeldud, et graafiku koostamisel ei ole arvestatud võimalike muutustega keskkonnapoliitilistes suundumustes.

Võttes arvesse nõ realistliku lahenduse ehk kasutades otseselt energeetilisel eesmärgil vaid raiejäätmeid ja küttepuidu sortimenti leiti, et maksimaalne aastas saadav energiahulk avalduks küpsuslangi stsenaariumi korral selle esimestel rakendusaastatel. Näiteks aastal 2019 oleks sel viisil

saadav energiahulk 417 937,68 MWh. Sama näitaja ühtlase kasutuslangi stsenaariumi puhul on 269 887,41 MWh. Esimese ja teise kasutuslangi vastavad väärtused positioneeruvad kahe nimetatud arvvaartuse vahele. Pikaajalise keskmisena on küpsuslangi stsenaariumi puhul saadav aastane energiahulk 292 692,12 MWh. See on suurem, kui kõikide teiste stsenaariumite sama näitaja. Seega võiks kokkuvõttes järeldada, et metsade vanuselisest struktuurist lähtuvalt on nende säästliku ja parima majandusliku kasutamise kombinatsioonis mõistlik leppida lähiaastate suurema raiete osakaaluga, mis viib meid peatselt väiksemate raiemahtude stabiliseerumisele. Täpsemad Valgamaa puistute energeetilise potentsiaali arvutuste tulemused on esitatud käesoleva töö lisades 6-7. Järgnev graafik (joonis 9.6) ilmestab Valgamaa puistute realistlikku energeetilist potentsiaali.



Joonis 9.6 Valgamaa puistute raiest saadud küttepuidu ja raiejäätmete energeetiline potentsiaal aastate lõikes erinevate stsenaariumite kaupa

Graafikult näeme, et erinevad stsenaariumid käituvad osalt sarnaselt, ent lühikeses perioodis on erinevused tajutavalt suured. Arvestades, et aastal 2017 oli Valgamaal soojusenergia tarbimine suurusjärgus 210 GWh/a ning arvestades, et raiejäätmetest ja küttepuidust on Valgamaal küpsuslangi stsenaariumi pikaajalise keskmisena võimalik toota 292,6 GWh/a energiat, võime järeldada, et Valgamaa metsapuistute säästliku majandamise juures on maakonnast varutava puitse biomassiga võimalik täielikult katta maakonna soojusenergia vajadus. Selle juures jääb arvestatav kogus raiejäätmeid ja küttepuitu veel ülegi, mida on võimalik jätta lankidele või kasutada muul otstarbel, näiteks eksporditava kütuse tootmiseks.

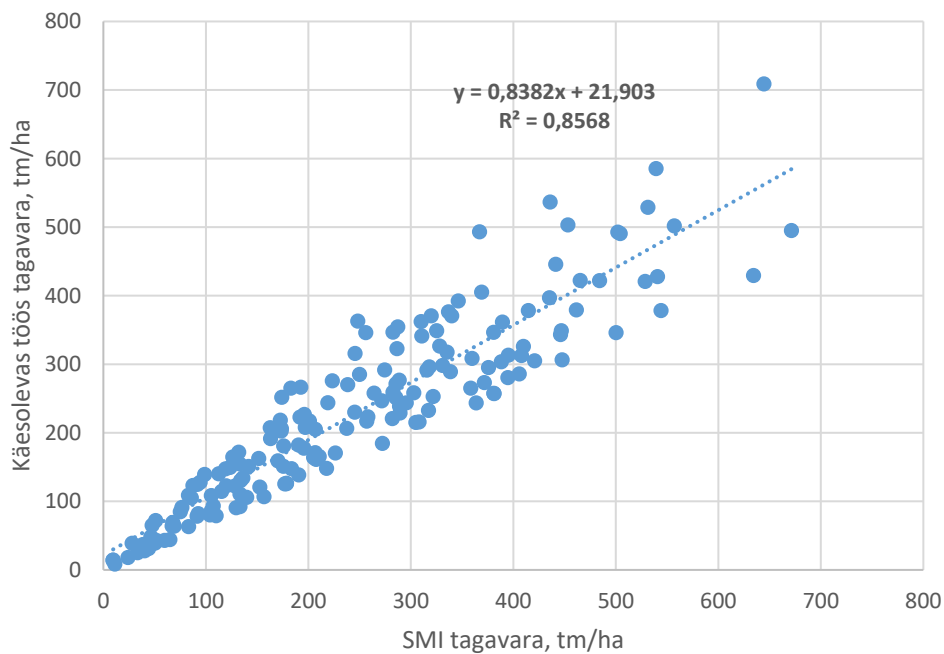
## 11. ANDMETE KORRELEERUVUS

Käesoleva töö raames kasutati erinevate allikate, nendevahelistest seostest tuletatud ning arvutuslikul teel leitud andmeid. Juba töö algetapil ilmnisid ootuspäraselt lahknevused erinevates andmekogudes olevate andmete vahel. Erinevused näiteks metsa tunnustele vastavate koosluste pindala ja metsamaa pindala vahel on loomulikud, kuivõrd definitsiooni järgi ei kaota metsamaa sellekohast määratlust ka pärast lageraie teostamist. Ka muus osas olid andmetöötuse käigus täheldatavad mõningad pindalalised erinevused. Enamjaolt on see selgitatav kaardikihtide korrigeerimise ning nende töötlemisel ja omavahelisel seostamisel tekkinud ebatäpsustega. Näiteks kui põhikaardil oli maa-ala märgitud terviklikult metsamaaks, ent tegelikkuses läbis seda tõenäoliselt metsa mitte kandev joonobjekt (nt: tee), siis lõigati konkreetne joonobjekt metsamaa pinnaarvestusest välja. Lisaks tekkisid pindalalised hälbed kindlasti pindobjektide piirialadel, kus määravaks sai arvutuste jaoks defineeritud piksli suurus ja selle piiride kattuvus muude kaardikihtide pindobjektide piiridega.

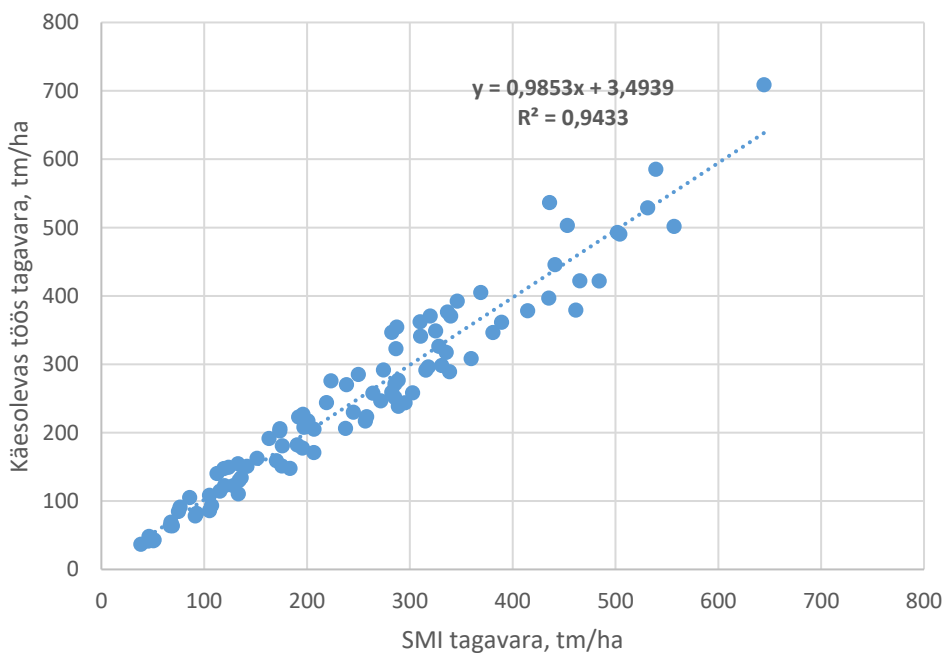
Üks osa käesoleva töö lõppjäreldest tehti puidu tagavara järgi. Hälbed selles võivad olla tingitud ALS kaardistuse täpsusest kui ka sellest, et kasutati kahte erinevat ja erineval aastaajal teostatud kaardistust. Viimane asjaolu tingis andmemudeli konfiguratsiooni muutmise vajaduse ja osalt oli kasutusel vähem testitud lahendus.

Kuivõrd riigi metsanduses omab olulist kaalu SMI, siis teostati võrdlus SMI 2014-2018.aasta välitööde ning käesoleva tööga leitud andmete vahel. Selleks seostati SMI proovitükkide andmed siin töös koostatud kaardikihtidega ning võrreldi leitud puistu tagavara (M) väärtusi. Selle juures haarati valimisse esmalt teadaolevalt metsas paiknevad proovitükid ning võrdluse teostamisel eemaldati diametraalselt suured erinevused. Vaadeldava alaga seondus algelt 349 SMI proovitüki andmekirjet. Neile tuginedes teostati kaks andmevõrdlust, millest esimene haaras endasse ca 50% ja teine ca 25% SMI proovitükkide andmekirjetest.

Oluline on korrata seda, et kaardikihtide seostamisel on tõenäoline eelkirjeldatuga sarnaste vigade tekkimine. Lisaks on ka SMI iseenesest statistiline valikmeetod, mille proovitükkide pindalad on väikesemõõdulised ning kolmandaks, ent kõige olulisemaks peab siinkohal tunnistama SMI välitöö ja ALS mõõdistusaegade vahet. Nimelt on väga võimalik, et nende kahe teostamise vahel on toimunud raie, millest tingituna on ALS mõõdistuse väärtused SMI omadest väiksemad. Andmete võrdlust ja korrelatsiooni ilmestavad graafikud (joonised 11.1 ja 11.2) on toodud järgnevalt.



Joonis 11.1 Puistu hektaritagavara (M) võrdlus käesoleva töö ja SMI 2014-2018 perioodi 171 andmekirje vahel



Joonis 11.2 Puistu hektaritagavara (M) võrdlus käesoleva töö ja SMI 2014-2018 perioodi 95 andmekirje vahel

Joonistelt ning nende aluseks olnud andmetelt võime selgelt välja lugeda andmete vastuvõetava korrelatsiooni, mille põhjal võime öelda, et käesolevas töös kasutatud meetodika puistu tagavara hindamiseks on realselt kasutatav. Samas näeme, et suuremate tagavarade juures suureneb hälve andmete korrelatsioonis ning arvutusmudeli täpsuse edasi arendamiseks on veel piisavalt ruumi.



## KOKKUVÕTE

Kui tavapäraselt selgitatakse metsade olem vahetule mõõdistamisele tugineva või osaliselt sellele toetuva statistilise inventeerimise teel, siis käesoleva töö eesmärgiks oli selgitada metsade olem kaudsel viisil. Selleks kasutati enamasti üksikute komponentidena välja töötatud ja teaduskirjanduses kajastatud kaugseireliste andmehõive meetoditega kogutud andmete ning metsanduslike mudelite ja arvutusmetoodikate kombineeritud lahendust. Sellisel viisil saadud andmed kirjeldasid piisavalt metsa olemit, et arvutuslikult avaldada selle energeetiline potentsiaal arvestades looduskaitselisi piiranguid ning keskkonnapoliitilisi suundumusi. Praktilise väljundi tagamiseks kasutati reaalseid andmeid ning andmetöötlusmahu ohjeldamiseks limiteeriti uuritava ala Valga maakonnaga.

Esimese etapina pärast töö eesmärgi määratlust selgitati eesmärgi saavutamiseks vajalikud ressursid, sh arvutuste ja adekvaatsete järelduste tegemiseks nõutavad andmekoosseisud. Püstitati hüpotees, mille kohaselt kõik vajalikud andmed ametlikest registritest kas puuduvad, on seal ebapiisavas mahus või nende mitmes andmekogus säilitamise korral erinevad omavahel. Andmehõive teostamisel leidis hüpotees kinnitust juba varases faasis. Ainuüksi uuritava ala metsamaa pindala osas varieerusid põhikaardi kõlvikulise määratluse, metsaregistri, statistilise inventuuri ja kaugseire teel tuvastatud pindalaandmed vahemikus ca 95 – 115,9 tuh.ha. Kuivõrd kõikide viidatud andmeallikate puhul on samanimelise määratluse tekkimisloogika ja –tehnika mõnevõrra erinev, ei ole ka sellistes erinevustes midagi dramaatilist. Olulisi vajakuid või andmeerinevusi võis leida ka metsapuistute kvalitatiivses ning kvantitatiivses andmerekas.

Töö eesmärgist lähtuvalt võeti primaarseks kaugseire teel saadud andmed ning andmehõive või –töötuse käigus tekkinud tühimikud täideti sarnaste nimitunnustega andmehulkade baasandmete ülekandmise, kohaldamise või arvutuslikul teel. Arvutustesse kaasati muuhulgas mullastiku kaart ja sellega seotud andmestik, millelt tuletati konkreetsetes asukohtades valitsevad kasvutingimused ja oodatav puistu kasv. Tulemuseks oli satelliidifotodelt tuvastatud metsa osas selle liigilist koosseisu ja mahtu kirjeldav andmestu, mida oli võimalik võtta aluseks metsakasvu ja selle raievõimaluste selgitamiseks lähimate aastakümnete perspektiivis.

Nagu nimetatud, arvutati saadud andmetelt Valgamaa metsade raievõimalused kasutades selleks nelja erinevat stsenaariumit. Nende seas ka ühtlase kasutuse ning küpsuslangi põhimõtteid arvestades ja looduskaitselisi ning regulatiivseid nõudeid aluseks võttes. Kuivõrd aastaid kestnud praktika kohaselt on domineerinud lageraied, võeti see aluseks ka stsenaariumitega seotud arvutuste teostamisel. Viimaste aastate hinnangulise keskmise järgi arvestati harvendusraiete mahuks 20% lageraietest. Looduskaitselisi piiranguid jagati neist tulenevate raiepiirangute järgi

kahte gruppi, millest ühes välistati raievõimalus täielikult ning teise puhul võeti raiete võimaluseks 50% sellest, mis oleks võimalik sama puistu tulundusmetsas asumisel. Nii harvendusraiate kui looduskaitseliste piirangutega alade võimalikud raied võeti üldise raiemahu arvestusse kõikide läbi arvatud stsenaariumite puhul. Tulemusena leiti, et ühtlase kasutuse stsenaariumi puhul on võimalik aastal 2019 raiuda kuni 424 767,5 tm/a samas kui küpsuslangi stsenaariumi puhul on sama näitaja 684 617,0 tm/a. Ent juba aastaks 2034 on küpsuslangi stsenaariumi puhul võimalik raiemaht langenud väiksemaks kui võimalik samal ajal ühtlase kasutuse puhul rakendada. Kokkuvõttes saab järeldada, et intensiivse raie korral hakkavad võimalikud raiemahud juba lähiaastatel vähenema. Samas peame pikemalt ette ja taha vaatama ning nentima fakti sellest, et metsade vanuseline struktuur iseenesest tingib täna kirjeldatud olukorra. Sellest johtuvalt ning arvestades valitsevaid suundumusi on autori hinnangul mõistlik küpsuslangil põhineva stsenaariumi rakendamine. Seda enam, et paarikümne aasta pärast tagab see keskmiselt siiski suurema raievõimaluse kui ühtlase kasutuse stsenaariumi rakendamine.

Saadud raiemahtude ja puistuandmete põhjal teostati metsamaterjali parima kasutuse põhimõtetest lähtuv sortimenteerimine uuendatud meetodika alusel. Nõnda selgus otseselt energiakasutuseks sobiva metsamaterjali hulk. Saadud tulemuste põhjal arutati saadud andmete, sh puuliikide eripärasid arvestades välja kogu Valgamaa puistute energeetiline potentsiaal. Selle väärtuseks saadi pikaajalise keskmisena küpsuslangi stsenaariumi puhul aastas 292 692,12 MWh. Statistiliste andmete põhjal võime järeldada, et sellise energiakogusega on võimalik katta tänane Valgamaa soojusenergia tarve ning metsamaterjali jääb veel ülegi näiteks eksporditavate kütuste tootmiseks.

Töö käigus arutati välja ka kogu Valgamaa raiutava metsamaterjali võimalik energeetiline potentsiaal, ent juba arvutuste juures nimetati seda teoreetiliseks ja ebareaalseks kuivõrd oma olemuselt läheb selline metsamaterjali kasutusviis igasuguste parima praktika põhimõtete ning kliimapoliitiliste suundumustega selgelt vastuollu.

Töö autor on seisukohal, et töö teostati vastavalt lõputöö ülesandele ning sellele seatud eesmärgid said täidetud.

## SUMMARY

On regular basis relevant data of forest is defined through on site measuring or depending statistical inventory, but the objective of current work was to elaborate forest data through indirect methods. For that the combined data from remote sensing methods described in relevant scientific literature as well calculations by forestry specific models were used. This formed a solid basis to express the energetic potential of forest taking into account also nature protection restrictions and trends in environment policy. In order to secure the practical output of the work and limit the data management need real location based forest data from Valga county was used.

As a first stage of current work the resource allocation and necessary datasets were defined. A hypothesis of limited availability or dissimilar data was raised and it was confirmed already in the early phase of relevant data allocation. Exclusively the area of forest differed between several data sources in the range of 95-115,9 hectares. Still, at that we have to bear in mind the fact that different data sources allocate the same data by variety of methods and for different purposes which might deliver their needs. Remarkable variety was noticed in forest specific data as well.

Following the objective of current work the data from remote sensing was taken into use and all the appeared gaps in necessary data were fulfilled through sampling and matching of similarities and by appropriate calculations. The last involved also the soil map and its data that was explicitly used to define the growth conditions of forest stands and their expected growth rate in time. As a result a dataset describing the composition of different tree species in a stand and the volume of forest stands was created in order to define the felling possibilities for the future.

Four different scenarios for felling intensity were tested by calculations. Among them scenario of homogenous use and felling scenario based on forest stand maturity. Thinning intensity was accounted as 20% and nature protection restrictions on mildly protected areas were considered to limit felling rate by 50% comparing to the felling without those restrictions while on most restrictive areas the felling possibility was excluded totally. As a conclusion it was found that in the year 2019 it would be possible to harvest 424 767,5 m<sup>3</sup>/y if following the scenario of homogenous forest use while the scenario on forest maturity allows to harvest as much as 684 617,0 m<sup>3</sup>/y forest. With that we have to take into account that the last mentioned scenario's possible material outcome from forest felling has fallen already by the year 2034 to level that is below the felling possibility of homogenous use scenario. Still, it should be considered natural as directly affected by the current age structure of our forest stands. After few decades we should see the trend turning around and forest felling by stand maturity delivers better wood outcome again.

Based on the previously described data the assortment of possibly harvested wood was made in order to secure the most appropriate use of materials and follow best practices on that. The outcome as well as the specific physical characteristics of different tree species were used to calculate the energetic potential of Valga county forests. As a yearly average it was found to be 292 692,12 MWh which is more than current yearly heat consumption in the same county. With that we may conclude saying that sound management of Valga county's forests can supply enough energy to cover the needs of the same county leaving remarkable wood volume for other uses like the production of woodchips for export.

The author estimates the outcome of current work to fulfil all the objectives defined in the outline compiled on early stage of the same work.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Valitsustevaheline kliimamuutuste paneel (IPCC), „Special Report on Global Warming of 1.5°C,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [2] SEI Tallinn, 2018. [Võrgumaterjal]. „Kas Eesti täidab Pariisi kliimakokkulepet?,“ Saadaval: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2018/11/kas-eesti-t%C3%A4idab-pariisi-kliimakokkulepet-23.11.pdf>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [3] Vabariigi Valitsuse 20.10.2017 korraldus nr 285, „Energiamajanduse arengukava,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak\\_2030.pdf](https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [4] Euroopa Komisjon, COM(2018) 773 final, „Puhas planeet kõigi jaoks Euroopa pikaajaline strateegiline visioon, et jõuda jõuka, nüüdisaegse, konkurentsivõimelise ja kliimaneutraalse majanduseni“, teatis erinevatele EL institutsioonidele, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2018/ET/COM-2018-773-F1-ET-MAIN-PART-1.PDF>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [5] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrus (EL) 2018/842, milles käsitletakse liikmesriikide kohustust vähendada kasvuhoonegaaside heidet aastatel 2021–2030, millega panustatakse kliimameetmetesse, et täita Pariisi kokkuleppega võetud kohustused, ning millega muudetakse määrust (EL) nr 525/2013, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0842&qid=1556556326822&from=ET>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [6] Riigikogu otsus „Kliimapoliitika põhialused aastani 2050,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.envir.ee/sites/default/files/362xiii\\_rk\\_o\\_04.2017-1.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/362xiii_rk_o_04.2017-1.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [7] Eesti Maaülikool, „Metsaressursi analüüs süsiniku sidumise maksimeerimiseks,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.envir.ee/sites/default/files/susiniku\\_sidumine\\_aruanne\\_final.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/susiniku_sidumine_aruanne_final.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [8] Karu, H., magistritöö „Süsiniku akumulatsioon Narva karjääri männikultuuride aegreas,“ 2005. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dspace.ut.ee/handle/10062/738>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [9] Keskkonnaministeerium, „Metsanduse arengukava aastani 2030“ alusmaterjal „Metsade roll süsinikuringes,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval:

- [https://www.envir.ee/sites/default/files/5\\_metsade\\_roll\\_susinikuringes2.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/5_metsade_roll_susinikuringes2.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [10] Eesti Maaülikool, KIK metsanduse programmi 2014.a. projekt nr. 8988 „Süsinikubilanss kuuse-kase segametsade vanuseraas“ lõpparuanne, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.kik.ee/et/projekt/susinikubilanss-kuuse-kase-segametsade-vanuseraas>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [11] Valdner, R., magistritöö „Maapealse süsiniku varud kuuse-kase segapuistute vanuseraas,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/2557?locale-attribute=en>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [12] Lang, M., Arumäe, T., Nikopensius, M., „Puistute biomassi ja süsiniku hulga hindamine kaugseire abil“, Kaugseire Eesti 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dea.digar.ee/cgi-bin/dea?a=d&d=JVtartobservat201705.2.22.2>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [13] Eesti Maaülikool, „Metsaressursi analüüs süsiniku sidumise maksimeerimiseks,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.envir.ee/sites/default/files/susiniku\\_sidumine\\_aruanne\\_final.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/susiniku_sidumine_aruanne_final.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [14] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrus 2018/841 EL, millega lisatakse maakasutusest, maakasutuse muutusest ja metsandusest tulenev kasvuhoonegaaside heide ja sellest tulenevate kasvuhoonegaaside sidumine 2030. aasta kliima- ja energiapoliitika raamistikku ning millega muudetakse määrust (EL) nr 525/2013 ja otsust nr 529/2013/EL, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0841&qid=1556515270666&from=ET>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [15] European Commission Joint Research Centre, „LULUCF contribution to the 2030 EU climate and energy policy,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [file:///sise.envir.ee/Kasutajad\\$/KAUR/37906305218/Downloads/lb-na-28025-en-n%20\\_%20one\\_file\\_20%20\(1\).pdf](file:///sise.envir.ee/Kasutajad$/KAUR/37906305218/Downloads/lb-na-28025-en-n%20_%20one_file_20%20(1).pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [16] Keskkonnaministeerium, „Information on LULUCF actions in Estonia. Progress report under LULUCF Decision 529/2013/EU Art 10. Submission to the European Commission,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.envir.ee/sites/default/files/information\\_on\\_lulucf\\_actions\\_in\\_estonia\\_-\\_progress\\_report.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/information_on_lulucf_actions_in_estonia_-_progress_report.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].

- [17] Keskkonnaministeerium, „National Forestry Accounting Plan 2021-2025,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.envir.ee/sites/default/files/national\\_forestry\\_accounting\\_plan\\_2021-2025\\_estonia.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/national_forestry_accounting_plan_2021-2025_estonia.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [18] Riigikogu otsus „Kliimapoliitika põhialused aastani 2050,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.envir.ee/sites/default/files/362xiii\\_rk\\_o\\_04.2017-1.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/362xiii_rk_o_04.2017-1.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [19] Adermann, V., Padari, A., Sirgmetts, R., Kosk, A., Kaimre, P., „Järvselja looduskaitseala potentsiaalse puidutootlikkuse ja puistutes oleva süsiniku rahalise väärtuse hindamine,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Forestry Studies/Metsanduslikud Uurimused, Vol. 63, Pages 29–43. Saadaval: [http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2015/63/FSMU-2015-volume63\\_02\\_paper.pdf](http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2015/63/FSMU-2015-volume63_02_paper.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [20] Searchinger, T., Lucht, W., „Why ‘sustainable forest management’ does not make wood a good climate alternative to fossil fuels“. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.euractiv.com/section/climate-environment/opinion/why-sustainable-forest-management-does-not-make-wood-a-good-climate-alternative-to-fossil-fuels/>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [21] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv (EL) 2018/2001, 11. detsember 2018, taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise kohta, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [22] International Energy Agency, „Key World Energy Statistics 2016,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://elearning.humnet.unipi.it/pluginfile.php/101860/mod\\_resource/content/0/IEA%20KeyWorldEnergyStatistics2016.pdf](https://elearning.humnet.unipi.it/pluginfile.php/101860/mod_resource/content/0/IEA%20KeyWorldEnergyStatistics2016.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [23] World Bioenergy Association, „WBA Global Bioenergy Statistics 2018,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://worldbioenergy.org/uploads/181203%20WBA%20GBS%202018\\_hq.pdf](https://worldbioenergy.org/uploads/181203%20WBA%20GBS%202018_hq.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [24] Raudsaar, M., SA Erametsakeskus, 2018, „Puidubilanss. Ülevaade puidukasutuse mahtudest 2016 ja 2019,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.eramets.ee/wp-content/uploads/2017/01/Puidubilanss\\_2016\\_ja\\_2019.pdf](https://www.eramets.ee/wp-content/uploads/2017/01/Puidubilanss_2016_ja_2019.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].

- [25]Lauri, P., Havlik, P., Kindermann, G., Forsell, N., Böttcher, H., obersteiner, M., „Woody biomass energy potential in 2050,“ [Võrgumaterjal]. Energy Policy 66 (2014) 19–31. Saadaval: [www.elsevier.com/locate/enpol](http://www.elsevier.com/locate/enpol). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [26]EUROSTAT taastuvate energiaallikate kasutuselevõtu andmed, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [27]Eesti Taastuvenergia Koda, „Taastuvenergia aastaraamat 2016,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.taastuvenergeetika.ee/wp-content/uploads/2017/06/TEK\\_aastaraamat\\_2016\\_A4\\_5mmBleed\\_31.05.2017-1.pdf](http://www.taastuvenergeetika.ee/wp-content/uploads/2017/06/TEK_aastaraamat_2016_A4_5mmBleed_31.05.2017-1.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [28]Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Eesti riiklik energia- ja kliimakava (REKK 2030) eelnõu,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.osale.ee/konsultatsioonid/files/consult/299\\_REKK%202030.pdf](https://www.osale.ee/konsultatsioonid/files/consult/299_REKK%202030.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [29]Tartu Ülikool jt, „Eesti võimalused liikumaks konkurentsivõimelise madala süsinikuga majanduse suunas aastaks 2050,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.envir.ee/sites/default/files/loppraport\\_2050.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/loppraport_2050.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [30]Statistikaamet, Statistika andmebaasi andmestu „KE07: Kütuse tarbimine kütuse liigi ja maakonna järgi,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://andmebaas.stat.ee>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [31]Statistikaamet, Statistika andmebaasi andmestu „KE062: Kütuse tarbimine tegevusala ja kütuse liigi järgi,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://andmebaas.stat.ee>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [32]Statistikaamet, Statistika andmebaasi andmestu „KE07: Kütuse tarbimine kütuse liigi ja maakonna järgi,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://andmebaas.stat.ee>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [33]Keskkonnaagentuur, Aastaraamat „Mets 2017,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.keskkonnaagentuur.ee](http://www.keskkonnaagentuur.ee). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [34]Pärt, E., Keskkonnaagentuur, „Puidutootmiseks kasutatava metsavaru analüüs,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.eramets.ee/wp-content/uploads/2018/12/Puidutootmiseks-kasutatava-metsavaru-analu%CC%88u%CC%88s-2018.pdf>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [35]Pärt, E., Keskkonnaagentuur, Metsanduse arengukava raames koostatud eksperthinnang „Mets tulevikus,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval:



- [https://www.envir.ee/sites/default/files/e\\_part\\_-\\_uuendusraie\\_arvutus\\_eesti\\_riikliku\\_metsanduse\\_arvestuskava\\_koostamise\\_toetamiseks.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/e_part_-_uuendusraie_arvutus_eesti_riikliku_metsanduse_arvestuskava_koostamise_toetamiseks.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [36] Rosendvald, R., Rosendvald, K., „Metsade majandamise ja puidu kasutamise viiside mõju süsiniku sidumisele, kliimamuutusele ning elurikkusele,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Forestry Studies/Metsanduslikud Uurimused, Vol. 67, Pages 37–49. Saadaval: [http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2017/67/FSMU%2067\\_03.pdf](http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2017/67/FSMU%2067_03.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [37] Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia Instituut, “Õppeaines MST0120 ettekanne „Puitkütusest,“” [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://staff.ttu.ee/~akonist/sti/MST0120\\_files/Puitku%CC%88tusest.pdf](http://staff.ttu.ee/~akonist/sti/MST0120_files/Puitku%CC%88tusest.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [38] Erametsakeskuse veebilehel avaldatud materjal puidu karakteristikutest, 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.eramets.ee/wp-content/uploads/2013/02/2.\\_puit.pdf](https://www.eramets.ee/wp-content/uploads/2013/02/2._puit.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [39] Saarman, E., Veibri, U., Eesti Metsaselts, Tartu 2006. „Puiduteadus“.
- [40] Riigikogu 07.06.2006 seadus, „Metsaseadus“, RT I, 13.03.2019, 61, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/113032019061>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [41] Keskkonnaagentuur, „Statistiline metsainventeerimine. Arvutusmetoodiline juhend,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/smi\\_arvutusmetoodiline\\_juhend\\_2018.pdf](https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/smi_arvutusmetoodiline_juhend_2018.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [42] Lang, M., Kaha, M., Laarmann, D., Sims, A., „Construction of tree species composition map of Estonia using multispectral satellite images, soil map and a random forest algorithm,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Forestry Studies/Metsanduslikud Uurimused, Vol. 68, Pages 5–24. Saadaval: [http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2018/FSMU%2068\\_01.pdf](http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2018/FSMU%2068_01.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [43] Astola, H., Hame, T., Sirro, L., Molinier, M., Kilpi, J., „Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Remote Sensing of Environment 223 (2019) 257–273. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719300252>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].

- [44]Dang, A.T.N., Nandy, S., Srinet, R., Luong, N., V., Ghosh, S., Kumar, A., S., „Forest aboveground biomass estimation using machine learning regression algorithm in Yok Don National Park, Vietnam,” [Võrgumaterjal]. *Ecological Informatics* 50 (2019) 24–32. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954118301894>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [45]Lang, M., Arumäe, T., Lükk, T., Sims, A., „Estimation of standing wood volume and species composition in managed nemoral multi-layer mixed forests by using nearest neighbour classifier, multispectral satellite images and airborne lidar data,” 2014. [Võrgumaterjal]. *Forestry Studies/Metsanduslikud Uurimused*, Vol. 61, Pages 47–68. Saadaval: [http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2014/FSMU61\\_art4.pdf](http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2014/FSMU61_art4.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [46]Lang, M., Arumäe, T., „Assessment of forest thinning intensity using sparse point clouds from repeated airborne lidar measurements,” 2018. [Võrgumaterjal]. *Forestry Studies/Metsanduslikud Uurimused*, Vol. 68, Pages 40–50. Saadaval: [http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2018/FSMU%2068\\_04.pdf](http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2018/FSMU%2068_04.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [47]European Commission Joint Research Centre, „Implementing an EU System of accounting for ecosystems and their services,” 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC107150/jrc107150\\_jrc107150\\_jrc\\_report\\_ecosystem\\_services\\_accounts\\_final\\_pubsy.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC107150/jrc107150_jrc107150_jrc_report_ecosystem_services_accounts_final_pubsy.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [48]Wittke, S., Yu, X., Karjalainen, M., Hyyppä, J., Puttonen, E., „Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with threedimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest,” [Võrgumaterjal]. *Int J App/Earth Obs Geoinformation* 76 (2019) 167–178. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243418309462>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [49]Nilsson, M., Nordkvist, K., Jonzén, J., Lindgren, N., Axensten, P., Wallerman, J., Egberth, M., Larsson, S., Nilsson, L., Eriksson, J., Olsson, H., „A nationwide forest attribute map of Sweden predicted using airborne laser scanning data and field data from the National Forest Inventory,” [Võrgumaterjal]. *Remote Sensing of Environment* 194 (2017) 447–454. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425716303947>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [50]Arumäe, T., Lang, M., „Aerolidarilt puistu tüvemahu hindamise mudelid ning võrdlus takseeritud tagavaraga“ 2016. [Võrgumaterjal]. *Forestry Studies/Metsanduslikud*

- Uurimused, Vol. 64, Pages 5–16. Saadaval:  
<http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2016/FSMU%2064-art1.pdf>.  
[Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [51]Lang, M., Kardakov, A., Lükk, T., Arumäe, T., Korjus, H., „Metsanduslik andmehõive ajas, ruumis ja pildis,“ [Võrgumaterjal]. Eesti Mets 4/2011. Saadaval:  
[http://vana.loodusajakiri.ee/eesti\\_mets/artikkel1211\\_1200.html](http://vana.loodusajakiri.ee/eesti_mets/artikkel1211_1200.html). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [52]Kuusk, A., Lang, M., Märdla, S., Pisek, J., „Tree stems from terrestrial laser scanner measurements,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Forestry Studies/Metsanduslikud Uurimused, Vol. 63, Pages 44–55. Saadaval:  
[http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2015/63/FSMU-2015-volume63\\_03\\_paper.pdf](http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2015/63/FSMU-2015-volume63_03_paper.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [53]Lang, M., Arumäe, T., Laarmann, D., Kiviste, A., „Puistute kõrguskasvu muutuse hindamine,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Forestry Studies/Metsanduslikud Uurimused, Vol. 67, Pages 5–16. Saadaval:  
[http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2017/67/FSMU%2067\\_01.pdf](http://mi.emu.ee/userfiles/instituudid/mi/MI/FSMU/2017/67/FSMU%2067_01.pdf).  
[Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [54]Keskkonnaministri 16.01.2009 määrus nr 2, „Metsa korraldamise juhend,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/13124148>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [55]Eesti Maaülikool, „Metsaressursi analüüs süsiniku sidumise maksimeerimiseks,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval:  
[https://www.envir.ee/sites/default/files/susiniiku\\_sidumine\\_aruanne\\_final.pdf](https://www.envir.ee/sites/default/files/susiniiku_sidumine_aruanne_final.pdf).  
[Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [56]Crawley, M.J. 2007, „The R Book. John Wiley Sons LTD“
- [57]Keskkonnaministri 27.12.2006 määrus nr 88, „Metsa majandamise eeskiri“, RT I, 15.12.2017, 17, [Võrgumaterjal]. Saadaval:  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/115122017017>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [58]Vabariigi Valitsuse 08.07.2004 määrus nr 242, „Kaitstavat loodusobjekti sisaldava kinnisasja riigi poolt omandamise ja ettepanekute menetlemise kord ning kriteeriumid, mille alusel loetakse ala kaitsekord kinnisasja sihtotstarbelist kasutamist oluliselt piiravaks, ning kinnisasja väärtuse määramise kord ja alused“, RT I, 22.02.2017, 17, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/122022017017>. [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].

- [59]Korjus, H., „Hooldusraiate mudelitest“, EPMÜ Metsandusteaduskonna toimetised nr.32, 1999 „Pidev metsakorraldus“.
- [60]Padari, A., Muiste, P., Mitt, R., Pärn, L., „Estimation of Estonian Wood Fuel Resources“ 2009. [Võrgumaterjal]. Baltic Forestry, 15 (1). Saadaval: [https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF\\_Articles/2009-15\[1\]/BF09%2015\(1\)%20p%2077\\_85.pdf](https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2009-15[1]/BF09%2015(1)%20p%2077_85.pdf). [Kasutatud ajavahemikus 01.03.-01.05.2019].
- [61]Ozolinš, R., 2002. "Forest stand assortment structure analysis using mathematical modelling", Metsanduslikud uurimused XXXVII: 33-42.
- [62]Krigul, T., Eesti Põllumajanduse akadeemia 1971, „Metsataksaatori teatmik“.
- [63]Padari, A., 2017, „Uuendatud sortimenteerimise mudeli koostamine“, lõpparuanne Keskkonnaagentuurile.
- [64]Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. Maa-amet. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html>. [30.04.2019]

# LISAD

## Lisa 1 Puistute keskmine hektaritagavara Valgamaal ja Eestis tervikuna

Tabel Lisa 1.1 Puistute keskmine hektaritagavara Valgamaal ja Eestis tervikuna [33]

Maakond	Omandivorm	Enamuspuuliik									
		Mänd	Kuusk	Lehis	Tamm	Saar	Kask	Haab	Sang- lepp	Hall lepp	Kokku kesk- miselt
		Puistu hektaritagavara, (m <sup>3</sup> /ha)									
Valgamaa	Riigimets	252	198	316	227	201	188	196	225	164	221
	Jur.isik eramets	221	173	218	154	180	137	107	161	128	153
	Füüs.isik eramets	251	213	319	168	166	175	169	190	152	195
	Kokku	249	198	314	198	180	169	161	202	145	200
Eesti kokku	Riigimets	211	180	242	179	177	162	198	200	156	188
	Jur.isik eramets	190	175	270	131	135	122	116	139	110	141
	Füüs.isik eramets	221	205	210	140	147	154	166	182	132	177
	Kokku	210	186	240	154	155	150	165	180	128	176

**Lisa 2 Lageraie võimaluse määramisel kasutatavad seosed puuliikide, boniteediklasside ja rinnasdiameetri vahel. Väljavõte „Metsa majandamise eeskirjast“ [57]**

Tabel Lisa 2.1 Raievanused puuliikide<sup>1</sup> ja boniteediklasside viisi [57]

Puuliik	Boniteediklass					
	1A	1	2	3	4	5; 5A
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

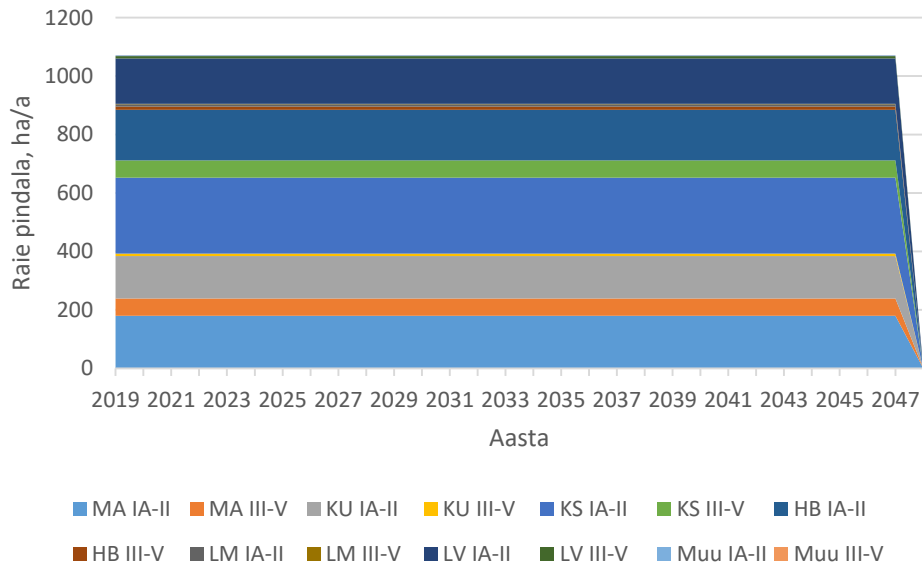
Tabel Lisa 2.2 Lageraie lubatavus sõltuvalt puistu enamuspuuliigi rinnasdiameetri ja kasvukohatüübi boniteediklassist [57]

Enamuspuuliik	Boniteediklass					
	1A	1	2	3	4	5; 5A
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
Sanglepp	24	24	22	22	18	16
Harilik haab	20	20	18	18	18	18

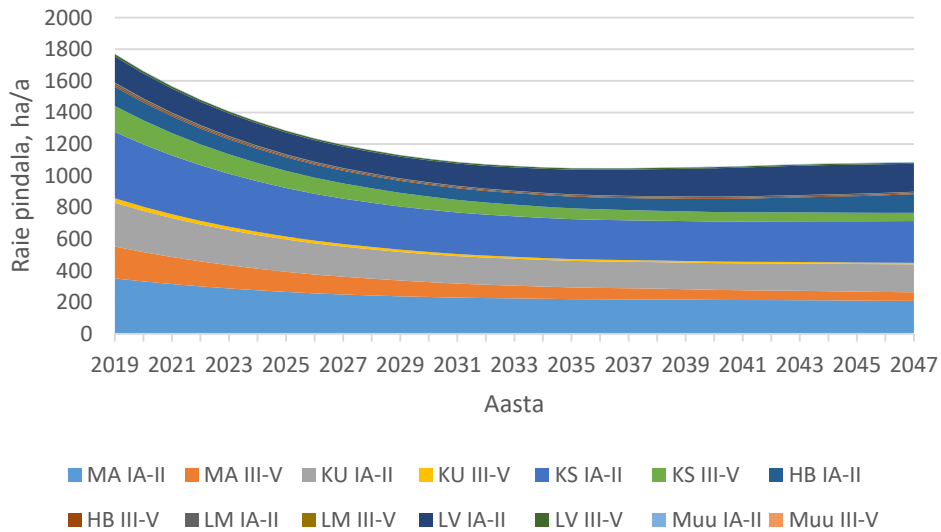
<sup>1</sup> Kui puistu enamuspuuliigiks on eeltoodud tabelis viitamata puuliik, on lageraie lubatud igas vanuses. Kui sama puuliik ei ole puistu enamuspuuliik, siis kasutatakse selle puhul kaalutud küpsusvanuse leidmisel kokkuleppelist raievanust 30 aastat [57]

Lisa 3 Arvestuslankide põhimõtte alusel leitud

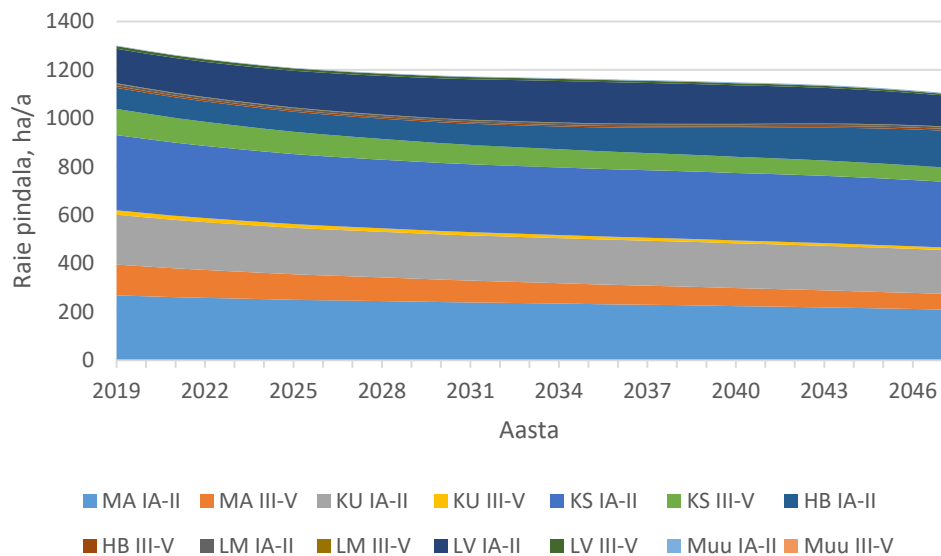
võimalikud lageraiete pindalad Valgamaa tulundusmetsades aastate lõikes



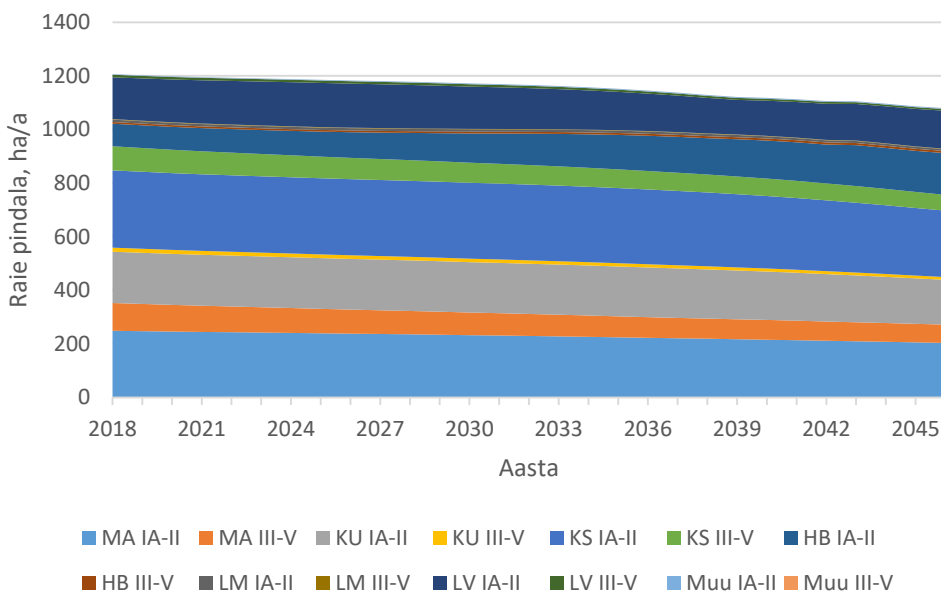
Joonis Lisa 3.1 Võimalik Valgamaa tulundusmetsade raie pindala ühtlase kasutuse langi põhimõtete rakendamisel, ha/a



Joonis Lisa 3.2 Võimalik Valgamaa tulundusmetsade raie pindala küpsuslangi põhimõtete rakendamisel, ha/a



Joonis Lisa 3.3 Võimalik Valgamaa tulundusmetsade raie pindala I vanuslangi põhimõtete rakendamisel, ha/a



Joonis Lisa 3.4 Võimalik Valgamaa tulundusmetsade raie pindala II vanuslangi põhimõtete rakendamisel, ha/a



**Lisa 4 Võimalik raiemaht Valgamaal aastate lõikes**

**erinevate raiestsenaariumite rakendamisel**

Tabel Lisa 4.1 Võimalik raiemaht Valgamaal aastate lõikes erinevate raiestsenaariumite rakendamisel

Aasta	Võimalik raiemaht kokku, tm/a			Ühtlase kasutuse lank
	I arvestuslank	II arvestuslank	Küpsuslank	
2018	521 786,71	478 761,24	730 046,77	424 767,48
2019	513 282,00	477 182,88	684 616,98	424 767,48
2020	505 977,06	475 662,09	645 169,25	424 767,48
2021	499 146,93	474 490,53	610 297,02	424 767,48
2022	493 318,03	473 683,05	579 504,71	424 767,48
2023	488 345,31	472 825,13	552 560,90	424 767,48
2024	483 611,21	471 966,44	528 918,85	424 767,48
2025	479 497,01	471 083,63	508 275,08	424 767,48
2026	476 489,97	470 278,40	490 422,38	424 767,48
2027	473 645,28	469 640,91	475 494,78	424 767,48
2028	471 384,47	468 929,21	463 039,22	424 767,48
2029	469 383,80	468 083,97	451 909,52	424 767,48
2030	467 490,60	467 108,70	443 436,73	424 767,48
2031	466 150,70	466 456,16	436 020,81	424 767,48
2032	465 361,57	465 607,32	430 678,10	424 767,48
2033	464 481,84	464 496,01	426 995,39	424 767,48
2034	463 618,73	463 041,74	423 673,56	424 767,48
2035	462 710,81	461 319,55	421 440,59	424 767,48
2036	461 908,52	459 164,67	421 240,58	424 767,48

Järg Tabelile Lisa 4.1

<b>2037</b>	461 383,17	456 679,77	421 065,14	424 767,48
<b>2038</b>	460 724,22	453 785,65	421 800,59	424 767,48
<b>2039</b>	459 866,81	451 184,35	422 762,43	424 767,48
<b>2040</b>	458 813,42	449 559,33	423 634,28	424 767,48
<b>2041</b>	458 246,28	447 420,67	425 338,62	424 767,48
<b>2042</b>	457 382,96	444 592,38	427 834,53	424 767,48
<b>2043</b>	456 121,70	443 876,11	429 827,91	424 767,48
<b>2044</b>	454 367,12	440 213,35	431 565,95	424 767,48
<b>2045</b>	452 219,99	436 222,61	432 951,03	424 767,48
<b>2046</b>	449 446,86	433 221,53	434 346,47	424 767,48
<b>2047</b>	446 204,72	430 335,68	436 025,53	424 767,48

**Lisa 5 Valgamaa puistute maksimaalne energeetiline**

**potentsiaal aastate lõikes erinevate stsenaariumite kaupa**

Tabel Lisa 5.1 Valgamaa puistute maksimaalne energeetiline potentsiaal aastate lõikes erinevate stsenaariumite kaupa

	<b>Maksimaalne energiahulk kõikidest raietest ja puidu sortimentidest, MWh</b>			
<b>AASTA</b>	<b>I arvestuslank</b>	<b>II arvestuslank</b>	<b>Küpsuslank</b>	<b>Ühtlase kasutuse lank</b>
<b>2018</b>	1 423 181,78	1 306 703,52	1 989 340,10	1 164 662,30
<b>2019</b>	1 400 104,63	1 302 486,56	1 865 836,05	1 164 662,30
<b>2020</b>	1 380 296,66	1 298 437,40	1 758 544,24	1 164 662,30
<b>2021</b>	1 361 790,29	1 295 323,98	1 663 707,90	1 164 662,30
<b>2022</b>	1 345 985,34	1 293 192,08	1 579 987,27	1 164 662,30
<b>2023</b>	1 332 507,15	1 290 925,50	1 506 719,93	1 164 662,30
<b>2024</b>	1 319 716,44	1 288 665,95	1 442 466,71	1 164 662,30
<b>2025</b>	1 308 626,21	1 286 339,30	1 386 377,35	1 164 662,30
<b>2026</b>	1 300 518,95	1 284 208,16	1 337 896,12	1 164 662,30
<b>2027</b>	1 292 843,29	1 282 532,47	1 297 346,74	1 164 662,30
<b>2028</b>	1 286 770,31	1 280 644,68	1 263 531,26	1 164 662,30
<b>2029</b>	1 281 436,88	1 278 405,35	1 233 355,49	1 164 662,30
<b>2030</b>	1 276 409,53	1 275 832,40	1 210 414,79	1 164 662,30
<b>2031</b>	1 272 865,18	1 274 092,74	1 190 361,46	1 164 662,30
<b>2032</b>	1 270 804,29	1 271 843,03	1 175 902,38	1 164 662,30
<b>2033</b>	1 268 499,53	1 268 851,70	1 165 951,71	1 164 662,30
<b>2034</b>	1 266 252,29	1 264 922,64	1 157 056,35	1 164 662,30
<b>2035</b>	1 263 880,61	1 260 257,87	1 151 146,63	1 164 662,30
<b>2036</b>	1 261 770,93	1 254 393,68	1 150 704,83	1 164 662,30

<b>2037</b>	1 260 413,26	1 247 614,73	1 150 302,63	1 164 662,30
<b>2038</b>	1 258 674,25	1 239 701,16	1 152 409,06	1 164 662,30
<b>2039</b>	1 256 415,39	1 232 614,06	1 155 190,09	1 164 662,30
<b>2040</b>	1 253 651,34	1 228 266,56	1 157 749,80	1 164 662,30
<b>2041</b>	1 252 142,14	1 222 510,57	1 162 524,29	1 164 662,30
<b>2042</b>	1 249 864,06	1 214 868,02	1 169 417,17	1 164 662,30
<b>2043</b>	1 246 461,29	1 213 041,33	1 174 946,38	1 164 662,30
<b>2044</b>	1 241 709,76	1 203 094,53	1 179 804,88	1 164 662,30
<b>2045</b>	1 235 878,79	1 192 262,25	1 183 692,93	1 164 662,30
<b>2046</b>	1 228 313,30	1 184 155,34	1 187 558,97	1 164 662,30
<b>2047</b>	1 219 447,47	1 176 360,62	1 192 191,28	1 164 662,30

**Lisa 6 Valgamaa puistute raiest saadud küttepuidu ja**

**raiejäätmete energeetiline potentsiaal aastate lõikes erinevate stsenaariumite kaupa**

Tabel Lisa 6.1 Valgamaa puistute raiest saadud küttepuidu ja raiejäätmete energeetiline potentsiaal aastate lõikes erinevate stsenaariumite kaupa

	<b>Energiahulk küttepuidust ja raiejäätmetest, MWh</b>			
<b>AASTA</b>	<b>I arvestuslank</b>	<b>II arvestuslank</b>	<b>Küpsuslank</b>	<b>Ühtlase kasutuse lank</b>
<b>2018</b>	315 023,20	290 349,22	446 788,39	269 887,41
<b>2019</b>	309 826,43	289 699,59	417 937,68	269 887,41
<b>2020</b>	305 440,46	289 108,48	392 780,36	269 887,41
<b>2021</b>	301 408,96	288 710,11	370 590,49	269 887,41
<b>2022</b>	297 971,91	288 516,85	351 051,23	269 887,41
<b>2023</b>	295 112,77	288 289,25	333 976,62	269 887,41
<b>2024</b>	292 480,67	288 053,33	319 085,73	269 887,41
<b>2025</b>	290 304,82	287 795,79	306 180,51	269 887,41
<b>2026</b>	288 815,01	287 524,28	295 070,44	269 887,41
<b>2027</b>	287 355,07	287 339,52	285 782,64	269 887,41
<b>2028</b>	286 334,97	287 059,51	278 118,25	269 887,41
<b>2029</b>	285 561,38	286 706,52	271 419,36	269 887,41
<b>2030</b>	284 880,14	286 302,38	266 489,18	269 887,41
<b>2031</b>	284 500,77	286 013,32	262 309,09	269 887,41
<b>2032</b>	284 424,83	285 635,05	259 349,20	269 887,41
<b>2033</b>	284 281,25	285 008,67	257 494,67	269 887,41
<b>2034</b>	284 131,86	284 146,42	255 999,14	269 887,41
<b>2035</b>	283 944,54	283 082,06	255 297,54	269 887,41
<b>2036</b>	283 717,94	281 669,25	255 829,36	269 887,41

*Järg Tabelile Lisa 6.1*

<b>2037</b>	283 640,05	279 997,33	256 193,70	269 887,41
<b>2038</b>	283 398,29	277 968,45	257 270,77	269 887,41
<b>2039</b>	283 056,40	276 262,80	258 630,49	269 887,41
<b>2040</b>	282 629,75	275 603,51	259 959,92	269 887,41
<b>2041</b>	282 377,99	274 586,23	261 694,73	269 887,41
<b>2042</b>	281 990,68	273 094,49	263 818,04	269 887,41
<b>2043</b>	281 230,62	273 295,74	265 590,97	269 887,41
<b>2044</b>	280 132,06	271 153,52	267 162,63	269 887,41
<b>2045</b>	278 737,75	268 812,05	268 476,07	269 887,41
<b>2046</b>	276 840,23	267 261,45	269 590,95	269 887,41
<b>2047</b>	274 572,29	265 775,00	270 825,58	269 887,41