

Käsunduslepingu

4-1/22/38

aruanne

Sisukord

Ülevaade SMI-s ja LULUCF-is kasutatavatest meetoditest	3
Uuringu disaini meetodid.....	3
Mõõtemääramatus	4
Valimivea hindamine	4
Punkthinnangud	4
Tagavara hinnang	7
Valimi suuruse valik.....	8
Muutuse hindamise meetodid	10
Tagavara muutuse meetod	10
Kao-kasvu meetod	11
LULUCF metoodika analüüs.....	12
Mullasüsinik Yasso mudeliga	19
Biomassi mudelid	26
SMI metoodika 2024-2028 ettepanekud	30
Drooni ja skanneri kasutamine mõõtmistel	30
Proovitüki suurus	31
Traktide suurus ja paigutus.....	33
Proovitükkide kontrollmõõtmine	35
Kaugseire kasutamine SMIs	35
Tagavara hinnangute koostamine	37
Kirjandusviited.....	41

Ülevaade SMI-s ja LULUCF-is kasutatavatest meetoditest

Käesolev peatükk keskendub meetoditele, mis on aluseks SMI (Statistilise Metsainventuuri) ja LULUCF (maakasutuse, maakasutuse muutuse ja metsanduse) andmestike ning arvutuste koostamisel. On oluline mõista neid meetodeid, et paremini hinnata arvutuste tulemusi ja neist tulenevaid järeldusi.

SMI on loodud selleks, et anda nii ajakohaseid hinnanguid kui ka hinnata muutusi. Selle eesmärgi saavutamiseks kasutatakse nii ristlõikeuuringu kui ka pikilõikeuuringu elemente. Ristlõikeuuring annab hetkeolukorra hinnangu, samas kui pikilõikeuuring võimaldab jälgida muutusi ajas. SMI disainis on oluline tasakaalustada mõlema uuringu tüübi täpsust, kuna mõlemad on hinnanguite andmisel kriitilise tähtsusega.

Proovitükid on paigutatud strateegiliselt traktidena, mis aitavad optimeerida välitöid. See asetamine mõjutab andmete statistilist esinduslikkust. Lisaks tuleb arvestada, et iga füüsilise objekti mõõtmisel esineb teatud määramatust. Seega, SMI on keeruline statistiline ettevõtmine, mis nõuab mitmete statistiliste aspektide kaalumist, et tagada andmete usaldusväärsus ja täpsus.

Uuringu disaini meetodid

Ristlõikeuuring (*cross-sectional study*) on uurimismeetod, mille eesmärk on koguda ja analüüsida andmeid teatud hetkel. See meetod hõlmab eri osalejate või objektide uurimist samal ajal, et saada teavet nende omaduste, harjumuste, seisundite või käitumise kohta. Näiteks metsade hetkeseisu hindamiseks kasutatakse ristlõikeuuringut, kus on esindatud erinevas vanuses ja puuliikidega metsad. Uuring hõlmab juhuslikult valitud metsade ristlõikeid, mis peegeldavad erinevaid vanuseklasse ja puuliike. Välitööd, nagu inventuur, andmete kogumine ja uuringute läbiviimine, annavad teavet metsade omaduste, sealhulgas puude arvu, vanuse ja liikide kohta. Selle analüüs aitab mõista metsade hetkeseisu.

Ristlõikeuuringute eelised hõlmavad kiirust ja efektiivsust, mis võimaldavad kiiresti saada ulatuslikku teavet uuritava probleemi kohta. Need on ka kulusäästlikud, nõudes vähem ressursse kui teised uurimismeetodid. Lisaks võimaldavad need võrrelda erinevaid alampopulatsioone, avastades olulisi seoseid ja erinevusi.

Puudused sisaldavad raskusi põhjuslike seoste tuvastamisel ja ajaliselt muutuvate tegurite mõju jälgimisel, kuna andmed kogutakse ainult ühel hetkel. Samuti võib valimi esinduslikkus olla probleemne võrreldes pikilõikeuuringutega, kus osalejaid jälgitakse pikema aja jooksul.

Kokkuvõttes on ristlõikeuuring kasulik kiirete ülevaadete saamiseks ja erinevate rühmade võrdlemiseks, kuid on oluline arvestada selle piirangutega. Näiteks SMI proovitükkide hindamisel kasutatakse seda meetodit viie aasta jooksul, mõõtes igal aastal 20% valimist. Valimi asukoht igal järgneval aastal on sõltumatu, kuid võib olla mõjutatud aasta jooksul toimunud muutustest.

Pikilõikeuuring (*longitudinal study*) on teaduslik meetod, mis kogub ja analüüsib andmeid erinevatel ajahetkedel. See uurimisviis keskendub osalejate või objektide grupile, jälgides neid mitme ajaperioodi jooksul, et mõista nende omadusi, käitumist, seisundeid või muutusi ajas. Näiteks metsade uurimisel võimaldab see meetod jälgida puude kasvu, suremust ja raiete mõju. Protsess hõlmab kindlate metsaalade valimist, kus korduvate mõõtmiste abil jälgitakse ja registreeritakse puude omadusi ja ellujäämist.

Uuringu alguses kogutakse andmeid proovitükkidel olevate puude kohta, millele järgnevad perioodilised kordumõõtmised. See võimaldab analüüsida puude kasvu ja suremust ning mõista

nende ajalist dünaamikat. Lisaks metsade tervise hindamisele aitab see meetod jälgida looduslikke protsesse ja hinnata inimtegevuse mõju.

Pikilõikeuuringutel on mitmeid eeliseid, nagu võime tuvastada põhjuslikke seoseid, mõõta ajalisi muutusi ja jälgida individuaalseid erinevusi. Samas on neil ka puudusi, sealhulgas suur ajaline ja ressursiline nõue ja uurimisküsimuste muutumine uuringu käigus. Aja jooksul võivad tekkida täiendavad eesmärgid, aga tagasiulatuvalt ei ole võimalik neid kõiki andmetes rakendada.

SMI uurimismeetodite kombinatsioon sisaldab nii risti- kui pikilõikeuuringuid, kasutades erinevas suhtes nende elemente, et hinnata erinevaid muutusi ajutistes ja alalistes proovitükkides.

Mõõtemääramatus

Mõõtemääramatus viitab mõõtmisprotsessis esinevale veale, ebakindlusele või ebatäpsusele, mis võib mõjutada mõõdetava suuruse täpsust ja usaldusväärsust. See võib tuleneda mitmesugustest allikatest, sealhulgas mõõteseadmete ebatäpsusest, subjektiivsetest hinnangutest, mõõtmisprotsessi tingimustest või vaatluste mitmeti tõlgendamisest. Mõõtemääramatus on oluline tegur, mida tuleb arvestada erinevate uuringute puhul, et tagada kogutud andmete usaldusväärsus ja tulemuste tõlgendamise täpsus.

Ristlõikeuuringutes tuleb mõõtemääramatust arvestada mitmel moel:

- Andmete kvaliteet ja usaldusväärsus: mõõtmisprotsessi täpsus on otseselt seotud kogutud andmete kvaliteedi ja usaldusväärsusega. Oluline on tagada, et kasutatavad mõõtemetodid, seadmed ja protseduurid oleksid võimalikult täpsed ja usaldusväärsed, et minimeerida mõõtemääramatust.
- Mõõdetavate suuruste erinevused: ristlõikeuuringutes mõõdetakse sageli erinevaid suurusi või muutujaid. On tähtis mõista, et erinevad mõõdetavad suurused võivad kaasa tuua erinevaid mõõtemääramatuse tasemeid. Seetõttu tuleb analüüsi käigus arvestada eri suuruste mõõtmisvigadega.
- Võrdlused ja tulemuste tõlgendamine: mõõtemääramatuse mõju tuleb arvestada siis, kui võrreldakse erinevate ajahetkede või rühmade andmeid. Mõõtemääramatuse olemasolu võib muuta keeruliseks täheldatud erinevuste või suhete tõlgendamise ning mõjutada järelduste usaldusväärsust.
- Mõõtemääramatuse vähendamine: ristlõikeuuringute planeerimisel ja läbiviimisel on oluline keskenduda mõõtemääramatuse vähendamisele. See hõlmab kvaliteetsete mõõteriistade valikut, andmete hoolikat kogumist, kordusteste ning teisi meetodeid, mis tagavad mõõtmisprotsessi täpsuse ja korduvuse.

Valimivea hindamine

Punkthinnangud

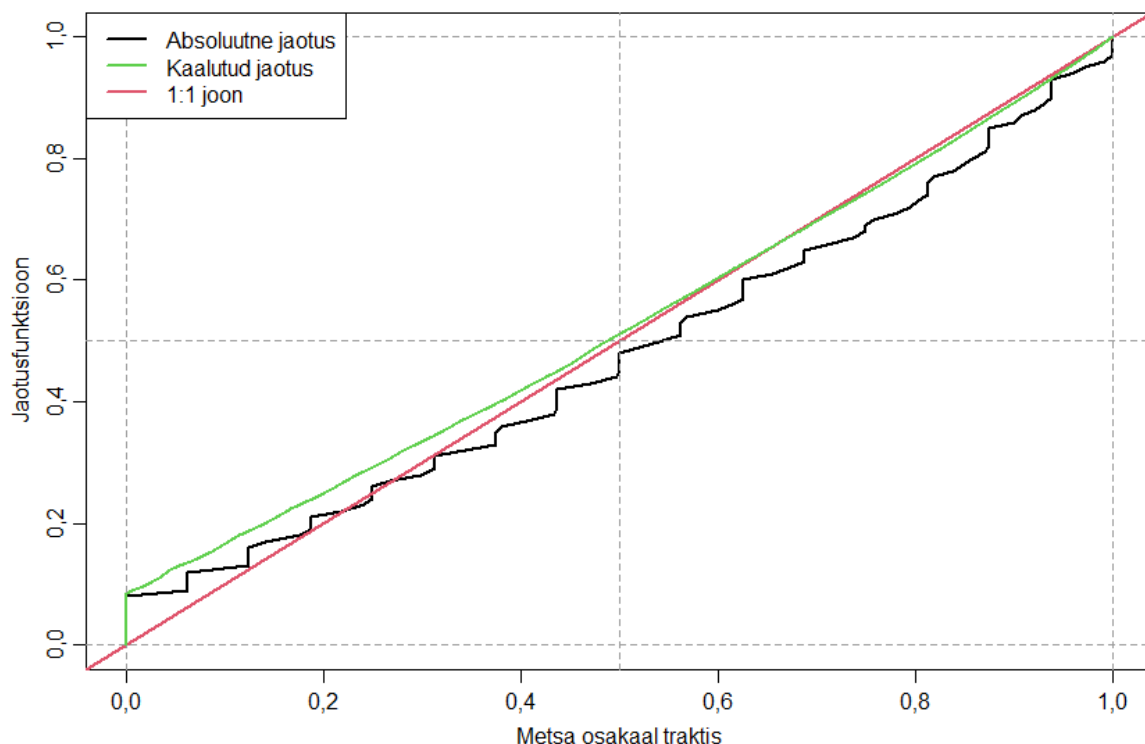
Valimivea hindamisel, kui uuringu disain on paigutatud hierarhiliselt: proovitükid asuvad gruppides ehk traktides, sellisel juhul tuleb arvestada nii üldise jaotuse kui ka lokaalse varieeruvuse mõjuga. Selles kontekstis on oluline mõista, kuidas proovitükkide grupiline paigutamine võib mõjutada tulemuste tõlgendamist.

Üldise jaotuse mõju tähendab, et tuleb arvestada, kuidas kogu uuritava ala jaotumine mõjutab valimi esinduslikkust. Kui erinevad traktid või grupid on väga erinevad, võib see suurendada kogu

valimiviga, kuna ühe trakti paiknemine mõjutab mitmeid proovitükke ning sellega mõjutada üldist tulemust.

Lokaalne varieerumine viitab sellele, kuidas proovide erinevused ühe grupi või trakti sees mõjutavad valimivea suurust. Kui trakti sees on suur varieeruvus, võib see samuti suurendada valimiviga. Lokaalne varieerumine on tingitud maastiku fragmenteeritusest. See võib olla tingitud nii maakategooriate vaheldumisest kui ka puistute vaheldumisest.

Seega, valimivea täpseks hindamiseks tuleb arvestada nii üldise jagunemise kui ka lokaalse varieeruvuse mõjuga. Seda saab teha statistiliste meetoditega, mis arvestavad hierarhilise proovivõtu eripärasid. Joonisel 1 on esitatud aastatel 2018 – 2022 mõõdetud traktide metsasuse jagunemine, sellest lähtub, et metsasus ei ole üleriigiliselt ühtlaselt jagunenud. Kui antud perioodil üks proovitükk esindab ca 156 hektarit, siis üks trakt ehk 16 proovitükki kokku annab hinnangu 2500 hektari kohta ning avaldab tulemustele suuremat mõju kui üks proovitükk. Täiendavalt tuleb arvestada sellega, et kõikides traktides ei ole täpselt 16 proovitükki, kuna need võivad paikneda kas riigi piiril või maismaa piiril ning trakt ei ole täielikult riigi maismaal. Absoluutne jaotus näitab lähtuvalt traktidest ilma selles olevate proovitükkide arvu järgi kaalumata ning kaalutud jaotuse puhul on arvestatud ka traktis olevate proovitükkide arvuga ning nende jagamisega. Absoluutse jaotuse puhul on joonisel näha 16 saki, mis on tingitud sellest, kas traktil on 1 – 16 proovitükki, mis on sattunud metsa ning „saki“ sisene kõikumine on tingitud proovitükkide jaotamisest osadeks. Nii absoluutse kui ka kaalutud jaotuse erinevus 1:1 joonest näitab, et traktid ei ole metsasuse osas proportsionaalselt ühtlaselt jaotunud ehk trakte, kus metsasus on nt kas 25% või 75% ei ole proportsionaalselt täpselt sama hulk, aga on siiski ligilähedased.



Joonis 1. Traktides metsa sattunud proovitükkide osakaal. Absoluutne jaotus lähtub iga trakti metsa sattunud proovitükkide osakaalust, kaalutud jaotus arvestab ka sellega, et kõikides traktides ei ole 16 proovitükki, kuna ca 10% traktidest asub kas riigipiiril või maismaapiiril.

Hierarhilise valimi puhul, kus proovitükid on paigutatud traktidesse, on kombineeritud statistiliselt kaks erinevat jaotust: traktide metsasus vastab pigem juhuslikule jaotusele (erinevad metsasused on enamvähem proportsionaalselt jagunenud) ning proovitükkide jaotus vastab binoomjaotusele. Joonisel 2 on esitatud simuleeritud punktide jaotust, mis vastab kogu proovitükkide arvule 25000 ning millest metsa sattunud proovitükkide osakaal on 50%. Simulatsioonis on lähtutud kahest erinevast paigutusest:

- kõik punktid on sõltumatud ning kogu jaotus vastab binoomjaotusele;
- punktid on jaotatud 16 proovitükiga traktidesse, sh traktide metsasus vastab juhuslikule jaotusele ning proovitükid vastavad binoomjaotusele.

Järgmiselt on simulatsioon, kus on tehtud vastavad binoomjaotuse erinevad lähenemised. R-skript toob välja kaks erinevat jaotust: üks, mis lähtub sellest, et kõik punktid on omavahel sõltumatud ja teine, mis lähtub sellest, et punktid on traktis ning erinevatest traktides on metsasus erinev ning see erinevus on jaotunud ühtlaselt metsasuse st null kuni 100%.

```
# Traktide ligikaudne arv
n.tr <- 1800
# proovitükkide arv traktid
n.prt <- 16
# teoreetiline metsasuse osakaal
metsasus <- 0.5

# teoreetiline proovitükkide arv, kui kõik traktid oleks täielikud
n.kogu <- n.tr * n.prt

# Tulemuste vektorid
# simulatsiooni iteratsioonide arv
n.iter <- 1000

# tulemuste väärtused
t.v1 <- numeric(n.iter)
t.v2 <- numeric(n.iter)

# arvutused
for(i in 1:n.iter){
  # juhuslikult paigutatud proovitükkide jaotus vastavalt binoomjaotusele
  t.v1[i] <- sum(rbinom(n.kogu, 1, metsasus))
  # traktidena paiknevate proovitükkide jaotus
  t.v2[i] <- sum(sapply(runif(n.tr, 0, n.prt), function(x) rbinom(n.prt, 1,
    x/n.prt)))
}

# jaotuse sisend vahemikul 0.02 kuni 0.98 sammuga 0.02
jada <- seq(0.02, 0.98, by = 0.02)
# Graafiku seadistamine
par(mar=c(4,4,1,1), mgp=c(2, 0.7, 0))

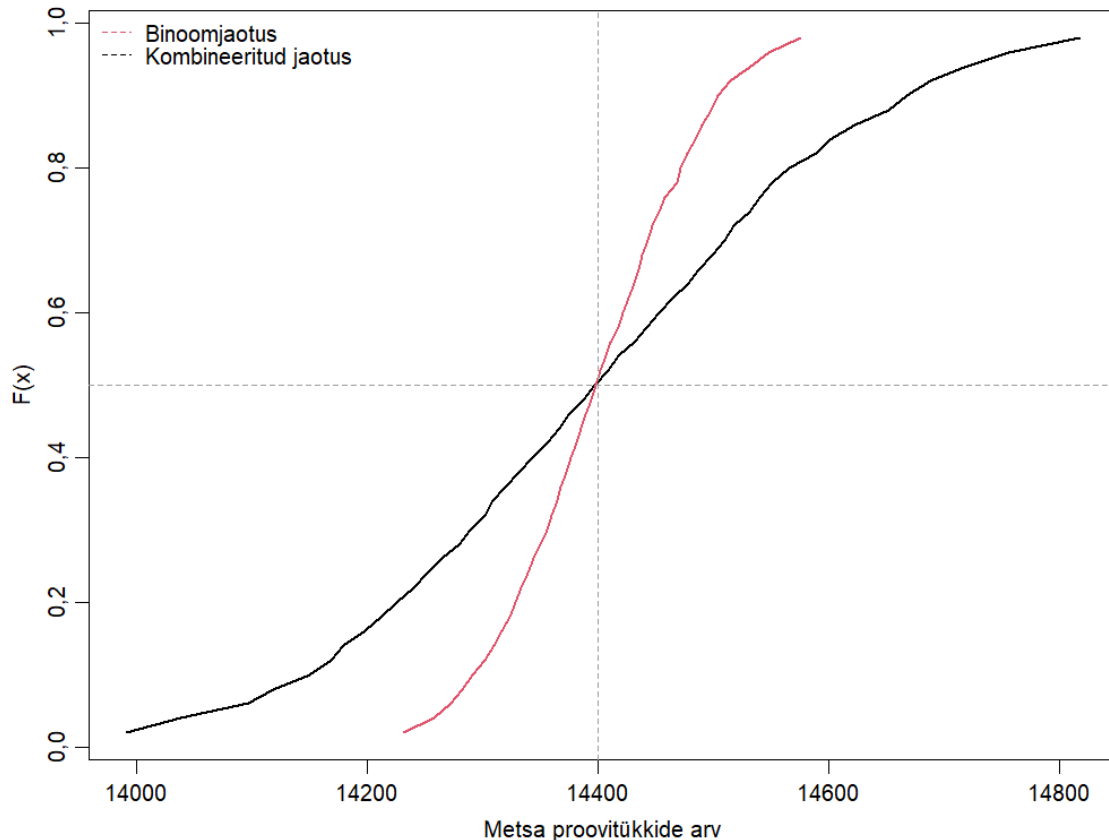
plot(quantile(t.v2, jada), jada,
     type = "l", lwd=2,
     xlab="Metsa proovitükkide arv", ylab = "F(x)")

lines(quantile(t.v1, jada), jada,
      lwd=2, col = 2)
```

```
legend("topleft", c("Binoomjaotus", "Kombineeritud jaotus"),
      lty = 2, col = 2:1, bty="n")
```

```
abline(h = 0.5, v = n.kogu * metsasus, col = 8, lty = 2)
```

Joonisel 2 on näha, et ainult binoomjaotusel vastava paigutuse alusel on usalduspiirid kitsamad ning kombineeritud jaotuse puhul (millele vastab SMI disain) on usalduspiirid laiemad. Seega on täpsust võimalik suurendada samade proovitükkide arvuga muutes traktide disaini, kus suurendatakse traktide arvu ning vähendatakse traktis olevate proovitükkide arvu (nt 16 asemel 8).



Joonis 2. Binoom- ja kombineeritud jaotus lähtuvalt sellest, et trakte on ca 1800 ja traktis proovitükke 16 ning metsasus ca 50%.

Tagavara hinnang

Hinnangute andmisel statistilistes uuringutes on oluline arvestada usalduspiiride määramisel konkreetse valimi jaotust. Eriti tähelepanuväärne on see metsa tagavara hindamisel, kus tulemused ei allu normaaljaotusele. See tähendab, et metsa tagavara jaotus on oma olemuselt mitmekesine, sõltudes mitmest olulisest tegurist.

Samaealistes sama enamuspuuliigiga puistutes võib täheldada, et jaotus läheneb normaaljaotusele. Siiski, arvestades asjaolu, et vanuse kasvades suureneb ka tagavara, muutub üldine jaotus ebahühtlasemaks ning ei vasta enam normaaljaotusele. See viitab sellele, et metsa tagavara hindamisel tuleb arvesse võtta mitte ainult puistute vanuselist struktuuri, vaid ka seda, kuidas see struktuur mõjutab tagavara jaotust. Vanuseline jagunemine puistutes mängib samuti olulist rolli, kuna see

mõjutab nii biomassi kogust kui ka jaotust. Seega on metsa tagavara hinnangute andmisel kriitiline mõista ja arvestada valimi jaotuse keerukust ja mitmekülgust, et tagada usaldusväärsete tulemuste saavutamine. Siin tuleb arvestada, et igal puuliigil on erinev pindala ning see on saadud hinnanguna proovitükkide alusel ja igal puuliigil on erinev vanuseline jagunemine ning tagavara sõltub vanusest erinevalt puuliigiti. Sellest tulenevalt on tagavara hinnangu koostamine suurem Monte Carlo meetodil simulatsioon, mis arvestab nende erinevate komponentide varieeruvusega.

Hinnangute koostamisel on üheks kriitiliseks aspektiks vajadus teha selge vahet sellel, kas esitatav võimalik viga on arvatud ühe vaatluse või valimi keskmise kohta. See eristamine on oluline, kuna see mõjutab otseselt hinnangu usaldusväärsust ja tõlgendamist.

Näiteks, kui arvutatakse keskmise tagavara viga (nt, üks tihumeeter hektari kohta), siis see tähendab, et kogu valimi keskmine tagavara hinnang erineb tegelikust väärtusest kuni ühe tihumeetri võrra hektari kohta. See viitab üldisele ebatäpsusele, mis on seotud valimi keskmise hinnanguga, ja peegeldab hinnangu keskmist usaldusväärsust.

Teisest küljest, kui öeldakse, et iga vaatluse puhul on võimalik viga üks tihumeeter hektari kohta, siis see viitab individuaalsele ebatäpsusele igas vaatluspunktis. Selline lähenemine rõhutab, et iga konkreetne mõõtmistulemus valimis võib erineda tegelikust väärtusest kuni ühe tihumeetri võrra hektari kohta.

Seega on oluline teadvustada ja selgelt väljendada, kas hinnangute vea suurus viitab keskmisele või individuaalsele mõõtmisele. See eristus aitab paremini mõista hinnangu usaldusväärsust ja selle rakendamise ulatust, olles seeläbi oluline element hinnangute koostamisel ja nende tulemuste tõlgendamisel. SMI puhul on üldiselt eeldus, et hinnang on keskmise tulemuse kohta – kogu tulemuse puhul on oluline, et meil on teada mingi grupi kohta keskmine hektaritagavara ning selle grupi kogu pindala, mis võimaldab anda hinnanguline kogu tagavara soovitud grupi kohta.

Valimivea määramisel on oluline valida jaotus, mis kõige paremini peegeldab uuritavat tunnust. Vale jaotuse valik võib põhjustada eksitavaid järeldusi. Iga jaotuse valik eeldab, et andmed vastavad teatud statistilistele omadustele, mistõttu tuleb jaotuse valimisel arvesse võtta andmekogumi eripärasid.

Valimi suuruse valik

Valimi suuruse määramine statistiliselt, kui valim vastab näiteks binoomjaotusele ning meil on teada soovitud hinnangu täpsus, hõlmab tõenäosusteooria ja statistiliste meetodite kasutamist. Kindlasti on oluline täpsustada tulemuse ootus.

Esmalt peame teadma binoomjaotuse parameetrid, mis on tõenäosus (p) ja valimi suurus (n). Tõenäosus p näitab sündmuse (nt edu või õnnestumise) tõenäosust ühes katseis ning valimi suurus n näitab katses tehtavate sõltumatute korduste arvu.

Valimi suurust määrates tahame saavutada teatud hinnangu täpsust. Täpsuse mõõtmise üheks levinumaks viisiks on piirviga (*margin of error*). See näitab hinnangu ja tegeliku väärtuse vahelist intervalli. Piirvea suurus sõltub valimi suurusest ja valimi proportsioonist.

Valimi suuruse arvutamiseks kasutatakse statistilisi valemeid. Kui soovime näiteks binoomjaotuse puhul määrata vajaliku valimi suuruse, kasutatakse tavaliselt valemit:

$$n = \frac{Z^2 * p * (1 - p)}{E^2} \quad (1)$$

Kus:

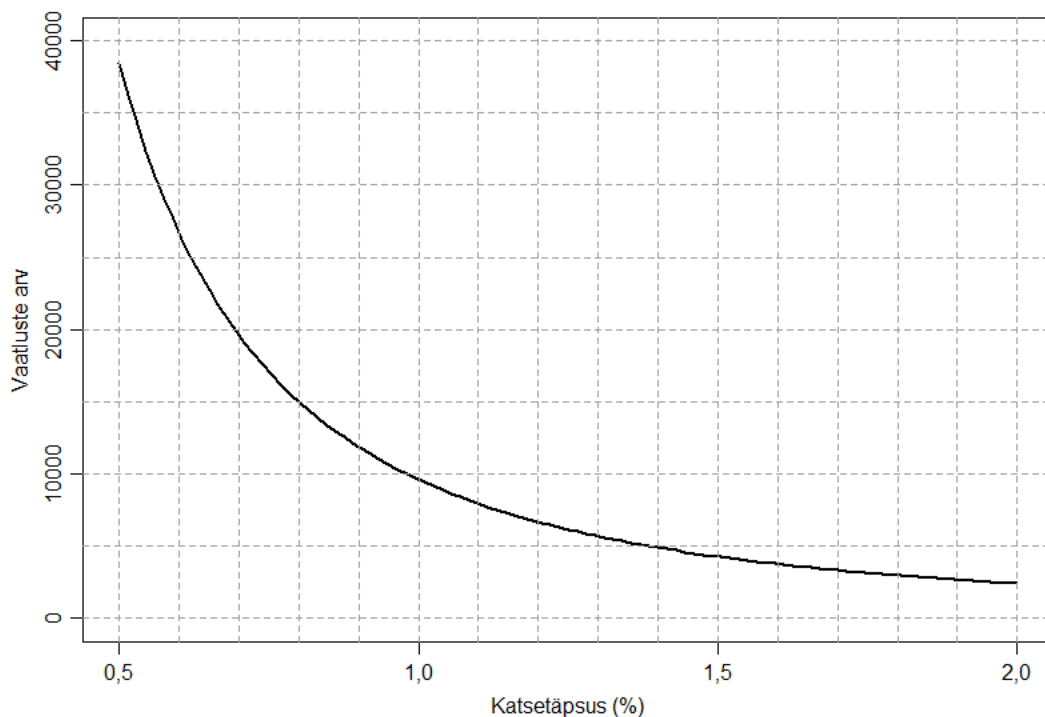
- n on vajalik valimi suurus,
- Z on normaaljaotuse kriitiline väärtus vastava usaldusnivooga jaoks (nt 1,96 usaldusnivooga 95%),
- p on valimi proportsioon (eelnevalt teada),
- (1-p) on valimi komplement (1 - p),
- E on soovitud hinnangu täpsus (piirviga), mis on antud tõenäosusena, sellel juhul tuleb arvestada, et saadav tulemus on valimi mitte soovitud hinnangu täpsus.

See lähtub eeldusest, et valim vastab täielikult binoomjaotusele. Kui aga valimi disain (nagu SMI) on hierarhiline, siis on vajalik juba kasutada erinevaid simulatsioonimeetodeid, mis võimaldavad täpsemalt konkreetse disaini puhul hinnata usalduspiire.

Hinnangu täpsuse puhul tuleb arvestada, kas eeldus on saada **absoluutne suhteline viga** või **proportsionaalne suhteline viga**. Valimi analüüsimisel tuleb arvesse võtta suhtelise vea kahte peamist arvutusviisi, mis määravad, kuidas viga mõõdetava tunnuse osakaalule suhestub. Esiteks, on olemas absoluutse suhtelise vea meetod, kus viga arvutatakse ja lisatakse või lahutatakse otse mõõdetava tunnuse protsendiosakaalust. Näiteks, kui tunnuse osakaal on 1% ja vea suurus on samuti 1%, siis viga käsitletakse absoluutselt, luues vahemiku, kus tegelik osakaal võib varieeruda 0-2% vahel. See lähenemine annab laiapõhjalise ülevaate vea suurusest kogu valimi ulatuses.

Teisalt, proportsionaalse suhtelise vea meetodis kohandatakse viga vastavalt tunnuse enda osakaalule. Sellisel juhul, kui tunnuse osakaal on 1% ja viga on 1% sellest osakaalust, arvutatakse viga proportsionaalselt, jäädes vahemikku 0,99–1,01%. See lähenemine keskendub rohkem tunnuse täpsele mõõtmisele, võttes arvesse selle spetsiifilist osakaalu valimis.

Mõlema vea arvutamise meetodi rakendamine sõltub uurimisküsimusest ja andmeanalüüsi eesmärkidest, pakkudes erinevaid perspektiive vea mõju hindamiseks valimi tunnuse osakaalu mõõtmisel.



Joonis 3. Vaatluste arvu sõltuvus katsetäpsusest (absoluutne suhteline viga) kui hinnatava tunnuse osakaal on 50% ning jaotus vastab binoomjaotusele.

Valemi (1) abil saame arvutada vajaliku valimi suuruse, et saavutada soovitud hinnangu täpsus, võttes arvesse binoomjaotuse parameetreid ja usaldusnivood. Kui oodatud täpsus jääb alla 1%, siis on vaja suurendada vaatluste arvu juba oluliselt (Joonis 3).

Kui meil esineb tunnuseid (näiteks maakasutuse kategooria muutus), mida esineb harva, siis selle suhteline viga on oluliselt suurem kui selle absoluutne viga.

Muutuse hindamise meetodid

Tagavara muutuse meetod

Tagavara muutuse (*stock-difference*) meetod on arvestusviis, mida kasutatakse metsa ja muude maakasutuse, maakasutuse muutuse ja metsanduse (LULUCF) sektorite süsinikuarude muutuste mõõtmiseks ja aruandmiseks. Selle meetodi puhul arvutatakse süsinikuarude muutus vaadeldava perioodi alguses ja lõpus olevate varude erinevusena. See võimaldab hinnata, kuidas tegevused maakasutuses on mõjutanud süsinikuringet ning aidata kaasa riikide ja rahvusvaheliste kohustuste täitmisele kliimamuutuste leevendamisel. Tagavara muutuse meetodi üksikasjalikum selgitus koosneb järgmistest sammudest:

- Mõõtmisala kindlaksmääramine: valitakse geograafiline ala, kus süsinikuarude muutusi mõõdetakse. See võib hõlmata teatud metsaalasid, põllumaid või muid maakasutuse kategooriaid.
- Alg- ja lõppvarude mõõtmine: alg- ja lõppvarud mõõdetakse vaadeldava perioodi alguses ja lõpus. See hõlmab tavaliselt puistu või muu biomassi, pinnase orgaanilise süsiniku ja muude süsinikuarude, nagu surnud orgaanilise aine, mõõtmist.

- Muutuste arvutamine: süsinikuvarude muutus leitakse, lahutades algvarudest lõppvarud. Positiivne tulemus näitab süsinikuvarude suurenemist, mis tähendab süsiniku sidumist, samas kui negatiivne tulemus näitab süsinikuvarude vähenemist ehk süsiniku emiteerumist atmosfääri.
- Täpsuse ja usaldusväärsuse tagamine: kuna mõõtmised võivad olla keerulised ja neid mõjutavad erinevad tegurid, nagu maakasutuse muutused ja looduslikud protsessid, on tähtis tagada andmete täpsus ja usaldusväärsus. See hõlmab standardiseeritud mõõtmisprotseduure, kvaliteedikontrolli ja -tagamise meetodeid ning vajadusel korrigeerimisi.
- Aruandlus: mõõdetud ja arvutatud süsinikuvarude muutused esitatakse aruandena rahvusvahelistele või riiklikele asutustele. Need aruanded aitavad jälgida ja aru anda riikide panusest kliimamuutuste leevendamisele.

Tagavara muutuse meetod on oluline tööriist LULUCF sektori mõjude mõõtmiseks ja aruandmiseks, võimaldades riikidel ja organisatsioonidel mõista ja juhtida oma mõju süsinikuringele. See aitab kaasa ka ülemaailmsetele jõupingutustele kliimamuutuste leevendamisel, pakkudes usaldusväärset ja läbipaistvat teavet süsinikuvarude muutuste kohta.

Kao-kasvu meetod

Kao-kasvu meetod on lähenemine, mida rakendatakse maakasutuse, maakasutuse muutuste ja metsanduse (LULUCF) valdkonnas. Selle eesmärk on hinnata, kuidas maakasutusega seotud tegevused mõjutavad süsinikdioksiidi emissioone ja neeldumist. Meetod keskendub kahele olulisele aspektile: *kao* ehk süsinikuvarude vähenemisele ja *kasvule* ehk süsinikuvarude suurenemisele.

Kadu võib tekkida erinevalt: raadamine ja metsade degradeerumine vähendavad metsade süsinikuvarusid, samas kui maakasutuse muutused (näiteks metsamaa muutmine põllumaaks) võivad samuti vabastada eelnevalt talletatud süsiniku. Teisalt, kasvu all mõistetakse protsesse, mis suurendavad süsinikuvarusid: uute metsade istutamine, looduslik uuenemine ja olemasolevate metsade kasv. Jätkusuutlik metsamajandamine omakorda võib veelgi tugevdada metsade võimet süsinikku siduda.

Kao-kasvu meetod aitab mõista süsinikutsükli toimimist erinevates maakasutuse stsenaariumites ja on oluline vahend poliitikakujundajatele ja teadlastele kliimamuutuste leevendamiseks ning metsade jätkusuutlikuks majandamiseks.

Oluline on mõista, et ristlõikeuringute andmed, mis kirjeldavad ainult kindlat ajahetke, ei ole piisavad kao-kasvu meetodi tõhusaks rakendamiseks. Need andmed ei paku teavet trendide ega protsesside dünaamika kohta. Seepärast on vajalik välja töötada mudelid, mis põhinevad pikilõikeuringutel, et jälgida ja prognoosida kadu ja kasvu üle aja. Sellised mudelid võimaldavad teha informeeritud otsuseid ja mõista keerukaid süsteeme, aidates seeläbi kaasa täpsele ja asjakohasele aruandlusele.

Lisaks, kui erinevate meetoditega kogutud andmeid kao-kasvu meetodi jaoks kombineeritakse, võib tekkida olukord, kus kombineeritakse nii tagavara muutuse kui ka kao-kasvu andmeid ning saadud tulemust võib nimetada „tagavara muudu – kao meetod⁴“. Näiteks, kui proovitükkide mõõtmistulemused kirjeldavad ainult hetkeseisu ja vaadeldakse ainult keskmisi näitajaid, siis sellisel juhul võib olla tegemist pigem tagavara muutuse meetodiga. Keskmised näitajad, nagu puude kõrgus ja diameeter, on mõjutatud nii puude kasvust kui ka kao protsessidest (suremus ja raied). Seega on oluline jälgida, milliste meetodite ja andmetega kao-kasvu meetodit rakendatakse, et tagada selle usaldusväärsus ja täpsus.

LULUCF metoodika analüüs

Süsinikvarude muutuste arvutamise metoodika hõlmab järgmisi etappe:

1. Ajahetkede valik: valitakse kaks ajahetke (näiteks t_1 ja t_2), mille vahelisi süsinikvarude muutusi hinnatakse.
2. Ala suuruse kontroll: veendutakse, et mõõdetava ala suurus oleks mõlemal ajahetkel sama, tagamaks võrreldavad tulemused.
3. Süsinikvarude muutuste arvutamine: arvutatakse iga-aastased süsinikvarude muutused alates t_1 kuni t_2 .
4. Summeerimine: liidetakse kokku kõikide aastate süsinikvarude muutused, tehes vahet ala suurusel ja maakasutuse muutustest tingitud muutustel ning nendel, mis mõjutavad atmosfääri heiteid või neeldumist.

Lisaks jagatakse metsamaa kolmeks alamgrupiks:

- Metsamaa, mis on püsinud metsamaana.
- Muu maakasutuse kategooria, mis on muutunud või muudetud metsamaaks.
- Metsamaa, mis on muutunud või muudetud muuks maakasutuse kategooriaks.

Andmete kogumiseks kasutatakse statistilise metsainventuuri (SMI) proovitükke, mille tsükkel kestab viis aastat, mõõtes igal aastal 20% Eesti pindalast. Proovitükkide paiknemine ja valim võivad tsükli jooksul erineda, mõjutades seega uuritava ala esinduslikkust ja tulemuste järjepidevust. Samuti kasutatakse proovitükke LULUCF aruandluses, hinnates muutusi viieaastase perioodi vältel, mille andmete põhjal koostatakse üleriigiline hetkeseisundi ülevaade.

Joonis 4. Mõõtmiste ja muutuste hindamise aastad esitatud visuaalselt. Kollasega aastad, millele on SMI perioodi erinevatel aastatel hinnatud muutus; roheline on SMI mõõtmise aasta ning punane on proovitüki mõõtmisele järgnevad aastad, mille kohta info puudub.

Näiteks esimesel aastal mõõdetud proovitükkidel hinnatakse eelmise viie aasta muutusi, kuid järgmise viie aasta jooksul neile hinnanguid enam ei anta (Joonis 4). Kolmandal aastal võrreldakse muutusi esimese mõõtmise aastaga, arvestades kahe aasta nihet nii enne kui pärast seda aastat. Viimasel aastal keskendutakse ainult nendele aastatele, mis järgnevad esimese aasta mõõtmisele. Kuna piirkondlikud hetkeseisundid ja muutused võivad erineda, on keeruline anda täpset hinnangut ühele kindlale aastale.

Statistilise metsainventuuri käigus kasutatakse kahte liiki proovitükke: ajutisi ja alalisi. Alaliste proovitükkide puhul toimub mõõtmine iga viie aasta järel samas kohas, tagades andmete järjepidevuse. Ajutised kasvukoha proovitükid mõõdetakse küll samal koordinaadil, kuid nende asukoht võib GPSi täpsuse tõttu pisut erineda. Seetõttu võivad järjestikuste perioodide tulemused näidata nii tegelikku muutust kui ka erinevusi, mis on tingitud asukoha muutusest.

Alalised tagavara proovitükid moodustavad andmestikust ligikaudu 25%. Nende proovitükkide abil on võimalik hinnata muutusi enne ja pärast sündmust, vaadeldes nende ajalugu. Samas, ajutiste proovitükkide puhul saab anda hinnanguid ainult muutuste kohta, mis on toimunud mõõtmishetkeks.

LULUCF aruandluses on vajalik hinnata aasta jooksul toimunud muutusi metsades, jaotades need kolme gruppi: metsamaana püsinud ala, metsastunud ala ja raadatud ala. Selleks on vaja leida viis erinevat tagavara hulka – millest tuletatakse biomass ja süsinik –, arvestades, et ainult raadamise järgselt puudub alal biomass. Metsastumise korral on oluline arvestada, et erinevate maakateooriate algne tagavara varieerub, mõjutades seega metsastunud alade tagavara. Maakasutuse kategooria muutuste hindamine on keerulisem, eriti kui muutuse käigus eemaldatakse tagavara. Varasemates meetodikates arvestati, et raiutud tagavara on võrdne selle aasta keskmise hektaritagavaraga ning rohumaadel vastavalt rohumaade keskmise hektaritagavaraga. Käesolevas analüüsis hinnati alaliste proovitükkide põhjal hektaritagavarade muutusi enne ja pärast maakasutuse muutust, samuti erinevate maakasutuse kategooriate keskmist raiutud hektaritagavara.

Tuleb märkida, et proovitükkide arvu vähesuse ja tulemuste varieeruvuse tõttu ei saa neid tulemusi rakendada iga-aastaselt. Pigem kasutatakse neid keskmiste muutustena pikema perioodi kohta. See lähenemine annab täpsema ülevaate, arvestades maakasutuse kategooriate erinevaid kasvutingimusi. Kuigi mõnedes kategooriates ei pruugi erinevused olla märkimisväärsed, on looduslike kategooriate, nagu soode, turbakarjäärade ja rohumaade puhul erinevused kasvutingimustes ja puittaimestikis märkimisväärsed.

Varasemalt kasutatud meetod metsaresursside hindamisel põhines aastase keskmise hektaritagavara arvutamisel, mida seejärel korrutati metsa pindalaga. Selle meetodi peamine puudus seisneb pikema perioodi muutuste hindamisel, kuna igal aastal on kasutatav valim erinev. Statistilise metsa inventuuri (SMI) raames mõõdetakse viie aasta jooksul erinevates kohtades, mistõttu on eri aastate vahel erinevused, mis tulenevad nii piirkondlikust erisusest kui ka valimiveast.

SMI eesmärk on pakkuda ülevaadet kogu Eesti metsade olukorrast, kuid iga-aastane valim moodustab vaid 20% kogu perioodi valimist, mistõttu on aasta kohta saadud tulemused suurema statistilise veaga. Kuna metsades toimuvad muutused on ühe aasta jooksul tavaliselt väikesed, võib aasta jooksul toimunud muutuste suurus jääda väiksemaks kui nende muutuste statistiline viga.

SMI proovitükkide puhul on välja arvatud statistiline viga, mis näitab erinevuse suurust, mis võiks tekkida teise paigutusega proovitükkidega andmete kogumisel. Siiski, lisaks tuleb arvestada ka mõõtmisest tuleneva määramatusega, mida sellisel viisil statistiliselt välja arvutada ei ole võimalik. Mõõtmismääramatuse hindamiseks oleks vajalik objekti korduv mõõtmine ja selle põhjal määramatuse hinnangu andmine. Kuid selline protsess on väga ressursimahukas ja nõuaks oluliselt suuremat eelarvet kui SMI praegune eelarve.

On oluline märkida, et mõõtmismääramatuse korral võivad erinevate tunnuste mõõtmised olla kas samasuunalised või erisuunalised, mis mõjutab arvutatud tunnuste viga. Näiteks kui nii kõrgus kui vanus on hinnatud suuremaks kui tegelikult, võib kõrgusindeks jääda samaks, kuid kui üks neist on hinnatud suuremaks ja teine väiksemaks, võib erinevus olla märkimisväärsem.

Füüsikaliste suuruste mõõtmisel tuleb alati arvestada mõõtemääramatusega, kuna absoluutne täpsus on praktiliselt võimatu. Mõõtemääramatuse suurus sõltub mõõdetava objekti omadustest ja eeldatakse, et see järgib statistilist juhuslikkust, vastates normaaljaotusele. See tähendab, et suure hulga mõõtmiste korral on pooltel juhtudel tulemused tegelikust suuremad ja pooltel väiksemad. Kuid väikese mõõtmiste arvu puhul võib nende aritmeetiline keskmine erineda nullist, mis võib samade objektide korduval mõõtmisel põhjustada erinevusi.

Varasemalt kasutatud meetodika metsavarude hindamisel kasutas tagavarade silumist, et vähendada võimalikke kõikumisi, mis on tingitud valimiveast või mõõtemääramatusest. Selleks kasutati viieteist aasta andmete silumist, mis lähtus statistilisest eeldusest, et üle viie aasta toimuvad mõõtmised samal proovitükil. Kuna SMI tsükkel on viis aastat ja iga proovitükk mõõdetakse kolmel korral viieteistkümne aasta jooksul, annab see võimaluse keskmistada mõõtmiste juhuslikke kõikumisi.

Mõõtmistäpsuse osas tuleb arvestada, et kuigi puude diameetreid mõõdetakse ühe millimeetri täpsusega, võib isegi väike ümardamine mõjutada tulemusi, eriti kui teha üldistusi kogu riigi kohta, kus väike diameetrite erinevus võib vastata suurele tihumeetrite arvule. Eestis kasvab umbes viis miljardit puud ning puud suurenevad selle pindmise kihi (tüve pinnalaotuse) alusel, mida on summaarselt 8,7 miljardid ruutmeetrit, mille 0,114 mm paksune kiht moodustab ühe miljoni tihumeetrit puitu.

Analüüsi ka proovitükkide kasvatamise meetodit muutuste määramiseks. Selle lähenemise puhul arvutatakse aastane muutus, lisades proovitükkidele juurde kasvanud osa ja lahutades raied ning suremuse. Oluline on märkida, et raie ja suremus on osaliselt seotud – näiteks raiutakse sageli surnud puud ning keskealistes metsades võib tiheduse tõttu suureneada suremus, kui raieid ei teostata.

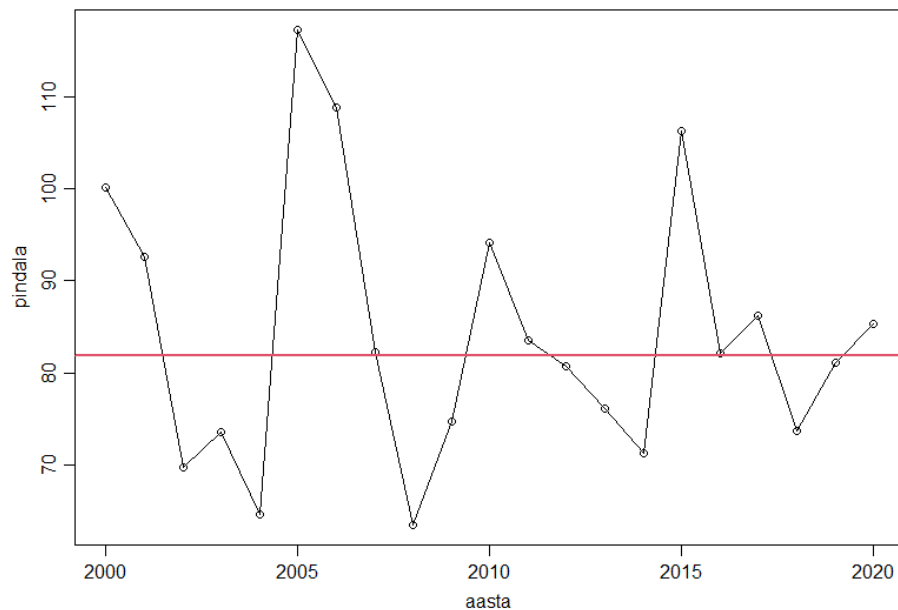
Käesolevas töös rakendati tagavara mudelit, mis hindab iga proovitüki teoreetilist tagavara. See mudel põhineb eeldusel, milline oleks konkreetse vanuse ja boniteediga puistu (metsaala) tagavara, arvestades selle peamist puuliiki. Mudel võtab arvesse puistu arengut, mis on tingitud raietest, suremusest ja kasvust. Mudeli abil saab arvutada, kui suur oleks metsa tagavara aasta pärast, eeldades puistu loomulikku arengut ilma lõppraieteta. See tähendab, et mudel näitab teoreetilist tagavara, mis oleks saavutatud, kui puistut ei raiutaks lõplikult maha.

Selle meetodiga on võimalik vähendada erinevate aastate valimite mõju, kuna hinnangud põhinevad samal valimil. Sisuliselt on tegemist lihtsustatud kao-kasvu meetodiga, kus iga vanuseklassi puhul on eraldi hinnatud muutust, mis arvestab nii juurdekasvu, suremust kui ka raieid. Tavaliselt eeldaks kao-kasvu meetod nende komponentide eraldi hindamist. Siiski, eraldi komponentide arvestamisel võib tekkida süstemaatiline viga, näiteks kui samal aastal surnud ja raiutud puud arvestatakse topelt kao hulka.

Lisaks on oluline märkida, et uuendusraied, milles raiutakse täielikult antud vanuses puistu, mõjutavad vanuselist jaotust. Seetõttu on vajalik saadud tulemusest maha arvata ainult lageraied, kuna SMI andmestikus kirjeldatakse tavaliselt turberaiete viimast järku kui lageraieid.

Füüsikaliste objektide mõõtmisel ja statistiliste valimite analüüsis tuleb arvestada, et ükski tulemus ei saa olla 100% absoluutne. Teoreetiliselt, kui SMI teise perioodi tulemust arvutatakse, lisatakse SMI esimese perioodi tulemusele viie aasta jooksul toimunud juurdekasv ja lahutatakse sellest maha raied ning suremus. Lisaks arvestatakse metsastunud ja raadatud alad. Sarnast meetodit kasutades erinevates perioodides peaksime saama kattuva aegrea iga tunnuse osas. Siiski tuleb arvestada mõõtemääramatuse ja statistilise veaga.

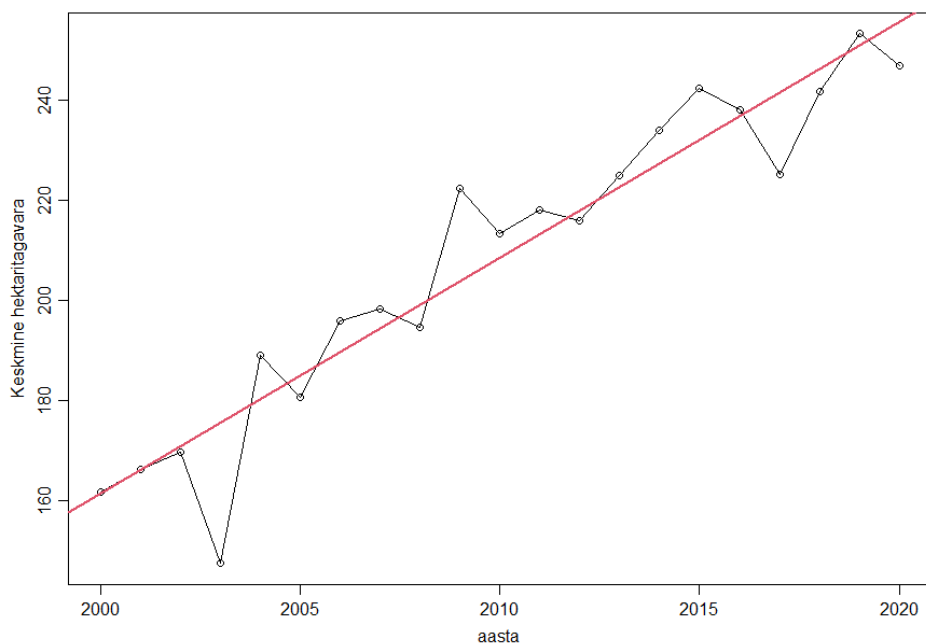
Kui aegreas ilmnevad kõikumised muutuste osas, võib neid statistiliselt tõlgendada kui mõõtemääramatust või valimiviga erinevatel perioodidel. Sellisel juhul ei peegelda need tegelikku muutust, vaid ainult statistilist erinevust. Näiteks joonisel 5 on kujutatud 45-55-aastaste männikute pindala varieeruvust 2010. aastal. Keskealiste metsade pindala ei ole mõjutatud raie poolt, vaid see võib väheneda ainult raadamise tagajärjel ning vähesel määral suureneeda metsastumise tulemusel kui rohumaal on üksikud suured puud, mis oma suurusega on saavutanud metsa kriteeriumid ning mis on metsastumise hetkel juba sellise vanusega (andmestikus esineb proovitükke, kus rohumaal kasvavad 50-aastased puud). Kõikidele SMI proovitükkidele tehti testimine, et määrata kindlaks, milline oleks iga puistu vanus 2010. aastal, ja arvatati välja, kui suur oleks 45-55-aastaste puistute pindala, lähtudes erinevate aastate andmetest.



Joonis 5. Arvutuslik 50-aastaste männikute pindala lähtuvalt erinevate aastate valimist.

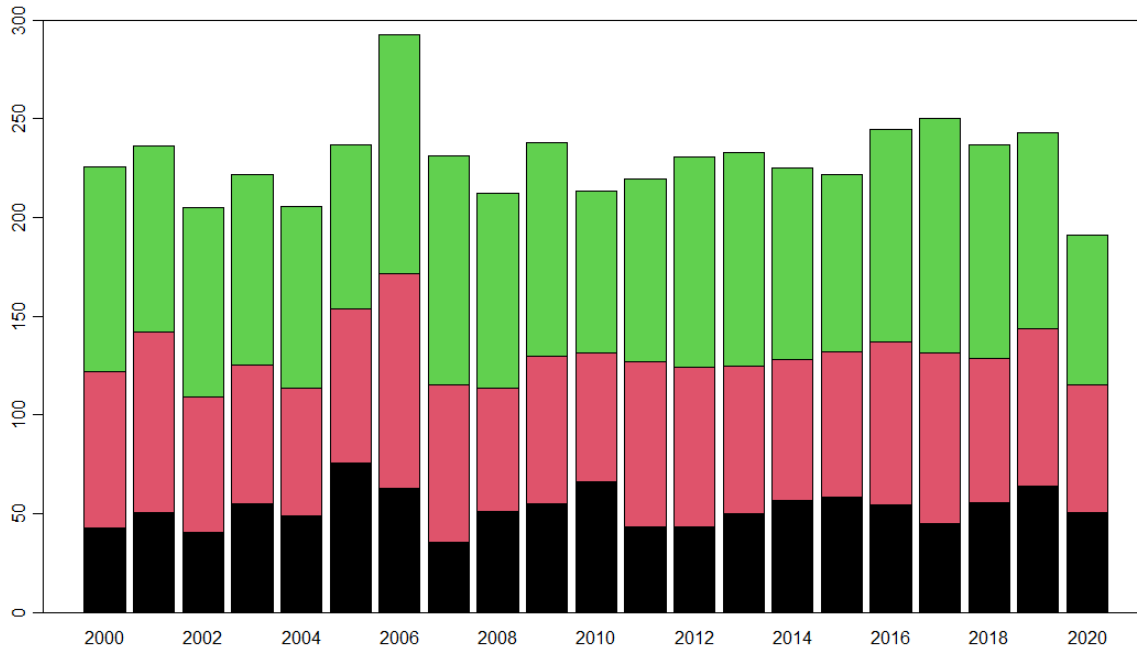
SMI andmetest tehti väljavõtte, kus on arvestatud iga aasta eraldi (mitte 5 aasta kaupa nagu tavaliselt aruandluses) ning leitud, kui suur peaks olema viiekümne aastaste männikute pindala konkreetse aasta valimi alusel. Joonisel 5 on esitatud need pindalad ning sellest on näha, kui palju varieerub valimi tulemus erinevatel aastatel. Need kõikumised ei ole tingitud pindalade muutumisest, vaid valimi juhuslikkusest ning näitab kui suurel määral võib väike grupp kogu suurest valimist varieeruda. Seetõttu ei saa väiksemate gruppide muutuste kohta teha põhjapanevaid järeldusi SMI andmete alusel.

Joonisel 6 on kujutatud 45-55-aastaste männikute keskmine hektaritagavara mõõtmise aastal, mis 2010. aastal oleks vastanud sellele vanusele ehk siis 2000. aastal on antud valimisse võetud need proovitükid, mille vanus on 10 aastat väiksem ehk vanuse vahemik 35-45 aastat. Ja iga järgneva aasta puhul aasta võrra vanemad. Sisuliselt näitab see seda, et aastal 2000 olevad puistud, mis on vanuses 35-45 aastat on aastaks 2020 saavutanud vanuse 55-65 ning nende keskmine tagavara on kasvanud vastavalt sellele. Kuna aga igal aastal on erinev valim, siis on see keskmine tagavara varieerumine tingitud sellest, et igal aastal on erinev valim. See näitab, kuidas erinevate aastate valimid võivad tagavaraliselt varieeruda. Kui vaadatakse kogu aegrida, ilmneb nende puistute tagavara tõusvat kasvutrendi. Siiski, iga üksiku aasta puhul võib võrreldes eelneva aastaga täheldada muutust, mis võib olla kas positiivne või negatiivne. Seega, sellised muutused ei pruugi tingimata kajastada tegelikku muutust metsa tagavaras, vaid võivad peegeldada valimi tingitud määramatust.



Joonis 6. Nende männikute keskmine hektaritagavara, mis aastal 2010 on vanuses 45-55 aastat.

See tähendab, et kuigi üldine suundumus näitab kasvu, võib iga-aastane andmete variatsioon tuleneda valimi erinevustest ja ei pruugi täpselt peegeldada reaalseid muutusi puistute tagavaras. Selliste tulemuste tõlgendamisel on oluline arvestada mõõtmis- ja valimivea võimalikkusega, et saada terviklikum ja usaldusväärsem pilt metsade seisundist ja nende arengust aja jooksul.



Joonis 7. Männikute vanuseklasside (keskmise vanusega 40, 50 ja 60 aastat) pindalad aastal 2010 hinnatud erinevate aastate valimite alusel.

Joonisel 7 on kasutatud sama meetodit, mida joonisel 6, kuid see keskendub erinevatele vanuseklassidele männikutes: 35-45, 45-55 ja 55-65 aastastele puistutele, kus iga vanuseklass on eraldi, aga kogu tulba kõrgus on nende kolme summa. Sellisel esitlusel on oluline arvestada

statistilise juhuslikkuse mõjuga. Ühel aastal võib juhtuda, et ühte vanuseklassi sattub rohkem proovitükke kui teise, ja järgmisel aastal võib olukord olla vastupidine. See valimite jaotuse muutus mõjutab otseselt tagavara hinnanguid.

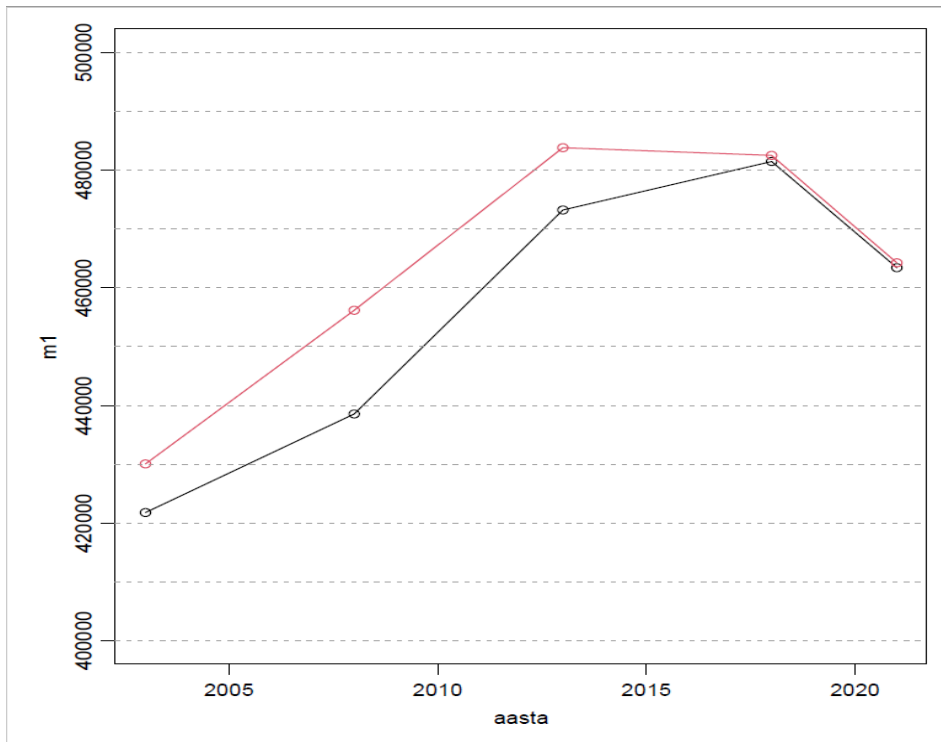
See tähendab, et erinevate aastate andmetes võib esineda varieeruvusi tingitud metsade heterogeensusest ning mis ei pruugi peegeldada tegelikke muutusi metsa vanusestruktuuris või tagavaras, vaid pigem on need tingitud heterogeense valimi jaotuse juhuslikkusest. Seega, kui analüüsitakse männikute pindalaid erinevates vanuseklassides, tuleb olla ettevaatlik aasta-aastalt esinevate erinevuste tõlgendamisel, kuna need võivad osutada statistilisteks variatsioonideks, mitte reaalseks muutusteks.

Iga SMI perioodi jaoks arvutati tagavara hinnangud, kasutades selle perioodi mõõtmisandmeid ja modelleerides tagavara perioodi lõpuks. Teoreetiliselt peaks iga perioodi lõpuks modelleeritud tagavara olema võrdne järgmise perioodi alguses mõõdetud tagavaraga, eeldusel, et vahepealsed raadamisid ei ole põhjustanud olulisi muutusi.

Joonisel 8 kujutatud andmed näitavad aga suuremat erinevust just SMI esimeste perioodide osas. Sel juhul on perioodi lõpus modelleeritud tagavara madalam kui järgmise perioodi alguses mõõdetud tagavara hinnang. See võib olla tingitud mitmest tegurist, sealhulgas valimiveast, mõõtmismeetodite erinevusest või teistest modelleerimisel kasutatud eeldustest.

Seega, kuigi teoreetiliselt peaksid erinevate perioodide lõpuks modelleeritud ja järgmise perioodi alguses mõõdetud tagavarad omavahel kattuma, näitavad joonisel 8 esitatud andmed, et praktikas võib esineda erinevusi, mis nõuavad täiendavat analüüsi ja tõlgendamist. Joonise 8 tõlgendamisel tuleb arvestada järgmiste aspektidega:

- Must joon on perioodi jooksul mõõdetud proovitükkide tagavara ehk aastaks 2003 on mõõdetud 1999-2003 proovitükid ning nendelt arvutatud tagavara on 2003. a musta joone punkt. Kõikidel proovitükkidel on mets muutunud (valdavalt kasvanud ning vähesel määral raiutud) mõõtmisele järgneva viie aasta jooksul. See tulemus on samadele proovitükkidele modelleeritud, milline peaks olema tagavara viie aasta pärast ning joonisele on see paigutatud samale aastale ehk on punase joone punkt aastal 2003, mis on esimese perioodi lõpus tagavara. See tulemus lähtub proovitükkidel paariviisilisest võrdlusest ning ei ole mõjutatud sellest, et järgmisel perioodil on ajutised proovitükid teise kohapeal ning muutus ei pruugi olla mitte tegelik muutus, vaid statistiline erinevus erinevast valimist tingituna. Tuleb arvestada, et modelleerimine arvestab juba metsamaa proovitükkidel tehtud raietega, mistõttu ei ole tegemist ainult kogujuurdekasvuga, mis on esialgsele seisule liidetud.
- Kui ühe perioodi lõpu modelleeritud tagavara ei ole identne järgmise perioodi alguse tagavaraga, siis võib sellel olla mitmeid põhjuseid, millest peamiseks on metsamaa pindala muutus. Perioodisese kasvu modelleerimisel on eelduseks, et metsamaa pindala on püsinud sama ehk iga metsamaal olev proovitükk on ka perioodi lõpus metsamaa. Kui järgmise perioodi alguses on aga tagavara suurem, siis on eelmise perioodi siseselt metsamaa pindala suurenenud ning seoses sellega ka kogu metsatagava on suurenenud.
- Kõikidel perioodidel on perioodi lõpus modelleeritud tagavara suurem perioodi alguse tagavaraga võrreldes, mis tähendab, et metsamaana püsinud proovitükkidel on puidu tagavara suurenenud.
- Kui järgmise perioodi alguses on tagavara väiksem kui eelmise lõpul, siis on uue perioodi alguses vähem proovitükke, mis on sattunud metsamaale ning see on tingitud kas raadamisest või on valimist tingitud määramatus.



Joonis 8. Tagavarade aegread SMI mõõtmisandmete alusel (must joon) ning modelleeritud tagavara perioodi lõpus (punane joon).

Antud tulemuste analüüsimisel on oluline arvestada, et kui ühel perioodil näitavad metsa tagavara hinnangud tõusu ja järgmisel langust, võib see olla tingitud valimi ja mõõtemääramatuse mõjust kogu tagavara hinnangule. Täpsuse saavutamine on keeruline, eriti arvestades, et näiteks saja-aastaste esimese boniteedi männikute hektaritagavara võib varieeruda vahemikus 150 kuni 700 tihumeetrit. Ühe tihumeetri täpsuse saavutamiseks oleks vaja teha ligikaudu 10 000 proovitükki ainult selles vanuse- ja boniteedigrupis, samas kui SMI raames tehakse kokku umbes 5500 proovitükki aastas. Seega mõjutab valimi suurus oluliselt muutuste hinnanguid. Kui keskmise hektaritagavara hinnang erineb vaid ühe tihumeetri võrra, võib kogu metsade tagavara erineda umbes 2,3 miljonit tihumeetrit.

Igal SMI proovitükil hinnatakse, kas viimase viie aasta jooksul on toimunud muutusi. Viimase kahe perioodi jooksul on aastas mõõdetud umbes 5500 proovitükki, kuid tuvastatud muutused on olnud alla saja proovitüki aastas. Seetõttu on muutustel suhteliselt suur statistiline viga, arvestades, et üksikul proovitükil on valimis suur kaal. Kuigi maakasutuse kategooriaid on kuus peamist ja üks alamkategooria, jagunevad muutused kokku 42 grupiks. Nendesse gruppidesse satub oluliselt vähem proovitükke, mistõttu on iga grupi valimi juhuslikkus suurem – keskmiselt satub igasse muutuste gruppi vaid kaks proovitükki. Seejuures mõjutab tulemust ka see, kas mingis kategoorias oli rohkem lisandunud või välja läinud proovitükke.

Muutuste hindamine on keerukam, eriti kui muutused maastikul on väikesemahulised või hajusalt paiknevad. Kuna üks proovitükk esindab umbes 150 hektarit, võib väikeste ja hajusate muutuste puhul tekkida olukord, kus muutused jäävad proovitükkidega mõõtmisel märkamatuks või hinnatakse neid üle. Seega on muutuste hindamine täpsem, kui maastikuelemendid on sarnase suuruse ja jaotusega.

Mullasüsinik Yasso mudeliga

Yasso mudel on mulla süsiniku tsükli simuleerimiseks loodud mudel, mida kasutatakse metsaökosüsteemide mulla orgaanilise süsiniku hulga ja selle muutuste hindamiseks. Yasso mudeli põhjal saab aru, kuidas erinevad tegurid, nagu kliima, taimestiku tüüp ja mullatöötlus, mõjutavad süsiniku sidumist ja vabanemist mullas.

Yasso mudeli põhimõtted:

- Lagunemine ja ümberjaotus: Yasso mudel põhineb eeldusel, et orgaaniline materjal laguneb teatud kiirusega, mis sõltub materjali omadustest ja keskkonnatingimustest (temperatuur, niiskus). Mudel jaotab orgaanilise materjali mitmeks fraktsiooniks, nagu lehed, oksad, tüved ja juured, millest igaüks laguneb eri kiirusega.
- Kliimafaktorid: mudel võtab arvesse kliima mõju, eriti temperatuuri ja niiskuse mõju orgaanilise aine lagunemiskiirusele. Soojem ja niiskem kliima kiirendab tavaliselt lagunemist.
- Materjali kvaliteet: erinevat tüüpi orgaanilisel materjalil on erinev koostis ja lagunemiskiirus. Näiteks ligniiniirikad materjalid lagunevad aeglasemalt kui need, mis on rikkad lihtsüsivesikute poolest.

Yasso mudel jaotab süsinikuühendid erinevatesse kategooriatesse vastavalt nende lahustuvusele ja lagunemiskiirusele. Need kategooriad peegeldavad orgaanilise aine lagunemist ja ringlust mullas. Yasso mudelis käsitletakse tavaliselt järgmisi peamisi süsinikuühendite rühmi:

- Vees lahustuvad ühendid (W): Need on kiiresti lagunevad ühendid, nagu suhkrud ja mõned aminohapped, mis lahustuvad vees kergesti. Nende ühendite lagunemine toimub suhteliselt kiiresti, kuna need on mikroorganismidele kergesti kättesaadavad.
- Etanoolis lahustuvad ühendid (E): Need hõlmavad rasvu, vahasid ja mõningaid rasvhappeid. Kuigi need ühendid on mikroorganismidele kättesaadavad, lagunevad nad aeglasemalt kui vees lahustuvad ühendid, kuna need on hüdrofoobsemad ja vähem lahustuvad.
- Happed lahustuvad ühendid (A): See rühm sisaldab peamiselt tselluloosi, mis on taimekudedes levinud polüsahhariid. Tselluloos laguneb aeglasemalt kui eelnevad rühmad, kuid süiski kiiremini kui järgmine kategooria.
- Mitte lahustuvad ühendid (N): Need on tavaliselt ligniini ja teatud tanniinide rühmad. Ligniin on taimedes leiduv keeruline polümeer, mis annab taimerakkudele struktuuri ja vastupidavuse. Happed lahustuvad ühendid on kõige vastupidavamad lagunemisele, mistõttu nad jäävad mullas püsima pikka aega ja moodustavad olulise osa stabiilsest süsinikust.

Tabel 1. Yasso mudeli süsiniku transformatsiooni maatriksi parameetrid.

	Yasso07				Yasso15			
	A	W	E	N	A	W	E	N
A		0,99	0,00	0,00		0,99	0,00	0,00
W	0,48		0,00	0,01	0,44		0,00	0,10
E	0,01	0,00		0,92	0,25	0,08		0,65

	Yasso07				Yasso15			
	A	W	E	N	A	W	E	N
N	0,83	0,01	0,03		0,92	0,01	0,07	

Yasso mudel kasutab neid erinevaid süsinikuühendite kategooriaid, et modelleerida, kuidas orgaaniline aine mullas laguneb ja muundub. Iga rühma lagunemiskiirus on määratud erinevate parameetritega, mis peegeldavad nende keemilist koostist ja interaktsioone mullakeskkonnaga, sealhulgas temperatuuri, niiskuse ja mikrobioloogilise aktiivsuse mõjusid.

Mulla süsiniku komponendid:

- Süsinikurikkad orgaanilised jäägid: see hõlmab surnud taimematerjali, nagu lehed, oksad, juured ja muu biomass, mis on mullapinnale langenud või mullasiseselt kogunenud.
- Mikroobne biomass: mikroorganismid mullas lagundavad orgaanilist materjali, muutes selle lihtsateks ühenditeks. Nende tegevus mitte ainult ei vabasta süsinikku, vaid on ka oluline toitainete ringluses.
- Huumus: see on stabiilne orgaaniline aine, mis on pikaajaline süsiniku allikas mullas. Huumus moodustub lagunemisprotsesside käigus ja on oluline mulla struktuuri, viljakuse ja veehoidmisvõime seisukohast.
- Dissotseerunud orgaanilised ained: need on väiksemad orgaanilised molekulid, nagu suhkrud ja aminohapped, mis võivad mullas liikuda ja on mikroorganismidele kergesti kättesaadavad.

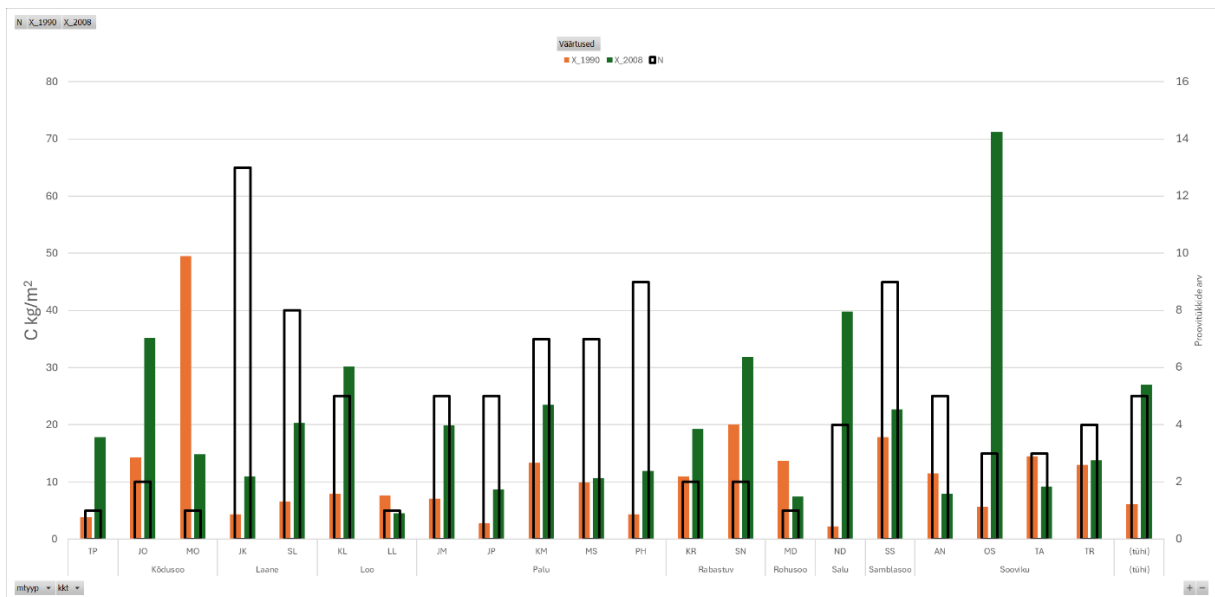
Yasso mulla süsiniku mudel, mis on välja töötatud ja kalibreeritud kasutades chronosequence meetodit, põhineb andmetel, mis on kogutud nii ristlõike- kui ka pikilõikeuuringute kaudu. Mudel tugineb kao-kasvu põhimõttele, mis tähendab, et süsiniku koguse muutused modelleeritakse algse seisundi muutustena, millele lisanduvad või millest lahutatakse protsesside poolt põhjustatud muutused. Vaatamata sellele, et Yasso mudel on võimeline andma täpseid prognoose lühema aja jooksul, võib selle täpsus väheneda pikemaajaliste prognooside puhul, eriti juhul, kui kõik kogutud andmed ei järgi mudeli aluseks olevat kao-kasvu põhimõtet. Mudeli täpsus sõltub suuresti sellest, kui hästi kogutud andmed vastavad mudeli aluspõhimõtetele ja kas need on piisavalt kõikehõlmavad, et esindada mulla süsiniku tsükli keerukust reaalses tingimustes.

Mullahingamise mõõtmisel tekib keerukus seetõttu, et varasemate varise sisendite ja lagunemiskiiruste kohta ei pruugi olla mõõtmishetkel täpset teavet. See tähendab, et mõõtmishetkel ei ole alati selge, milline on varasemate protsesside seis ja kuidas need mõjutavad hetkel toimuvat mullahingamist. Kui varise tekkimine on juhuslik protsess, siis mõõtmise hetkel on kaks võimalust, kas varasem varise kogus on väiksem kui mõõtmise hetkel või siis vastupidi. Seega satuvad mõõtmisel kokku kaks vastandlikku protsessi: 1) varasem varise kogus (näiteks eelmise kahe aasta jooksul) on suurem kui käesoleval aastal mõõdetav ning selle tulemusel on varasemat kogunenud varist rohkem, mis laguneb ja mullahingamine võib olla suurem; 2) varasem varise kogus on väiksem kui hetkel mõõdetav ning sellest tulenevalt võib olla mulla hingamine väiksem. Seega kui panna paarikaupa kokku mullahingamine ja varise kogused, siis on nendes autokorrelatsioon varasema perioodiga, mida ei pruugi olla mõõdetud ning statistiliselt ei saa seda autokorrelatsiooni tuvastada.

Mullahingamisega seotud protsessid, nagu orgaanilise aine lagunemine ja mikroobide aktiivsus, on dünaamilised ja mõjutatud mitmetest teguritest, sealhulgas temperatuurist, niiskusest, mulla omadustest ja varise kvaliteedist. Kui varise sisendid ja lagunemiskiirused ei ole teada või on ebatäpselt mõõdetud, võib see viia mulla süsiniku mudelite, nagu Yasso, prognooside ebatäpsuseni. Seega on oluline, et mullahingamise ja sellega seotud protsesside mõõtmisel püütakse saada võimalikult täpset ja ulatuslikku teavet, et suurendada mudeli prognooside täpsust ja usaldusväärsust.

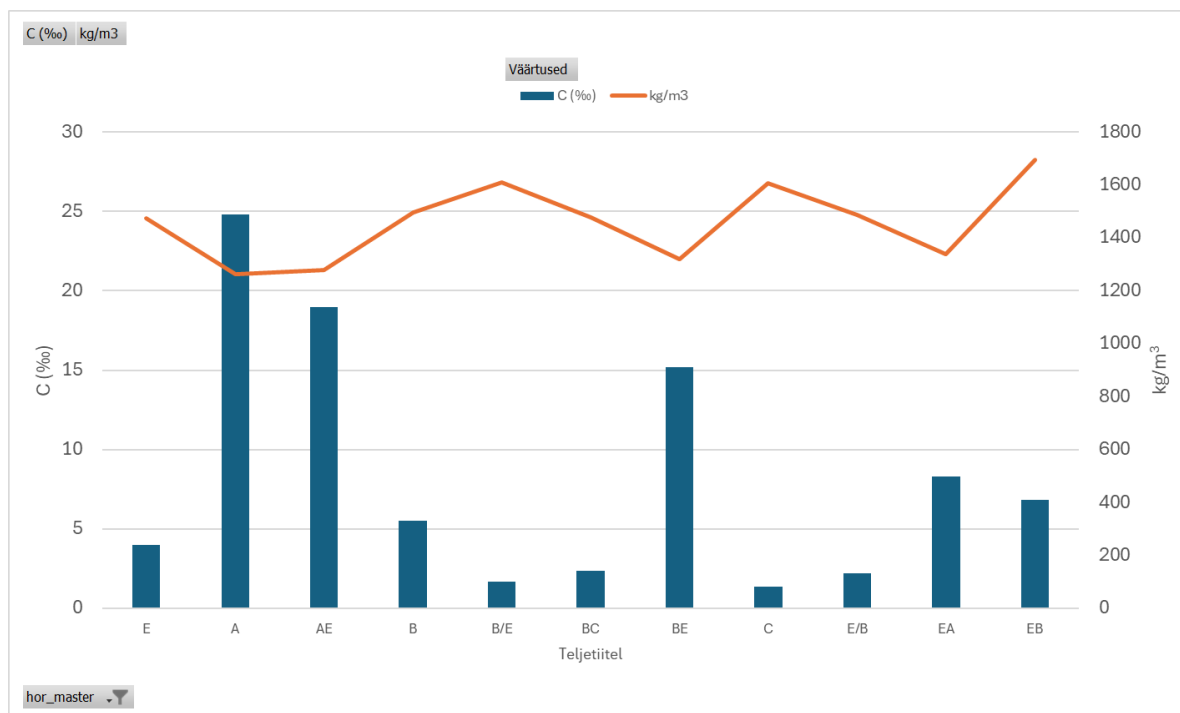
Yasso mudeliga mullasüsiniku dünaamika simuleerimiseks on vaja teada:

- 1) Mullas oleva süsiniku esialgseid koguseid süsinikuühendite rühmade kaupa (A, W, E, N).
- 2) Mulda lisanduva süsiniku koguseid maapealsest ja maa-alusest varisest.
- 3) Mudeli täpsuse hindamiseks on vajalik teada lagunemise kiiruseid erinevate rühmade kaupa



Joonis 9. IPC Forest projekti käigus kogutud mulla süsiniku tulemused kasvukohatüüpide kaupa erinevatel mõõtmisperioodidel.

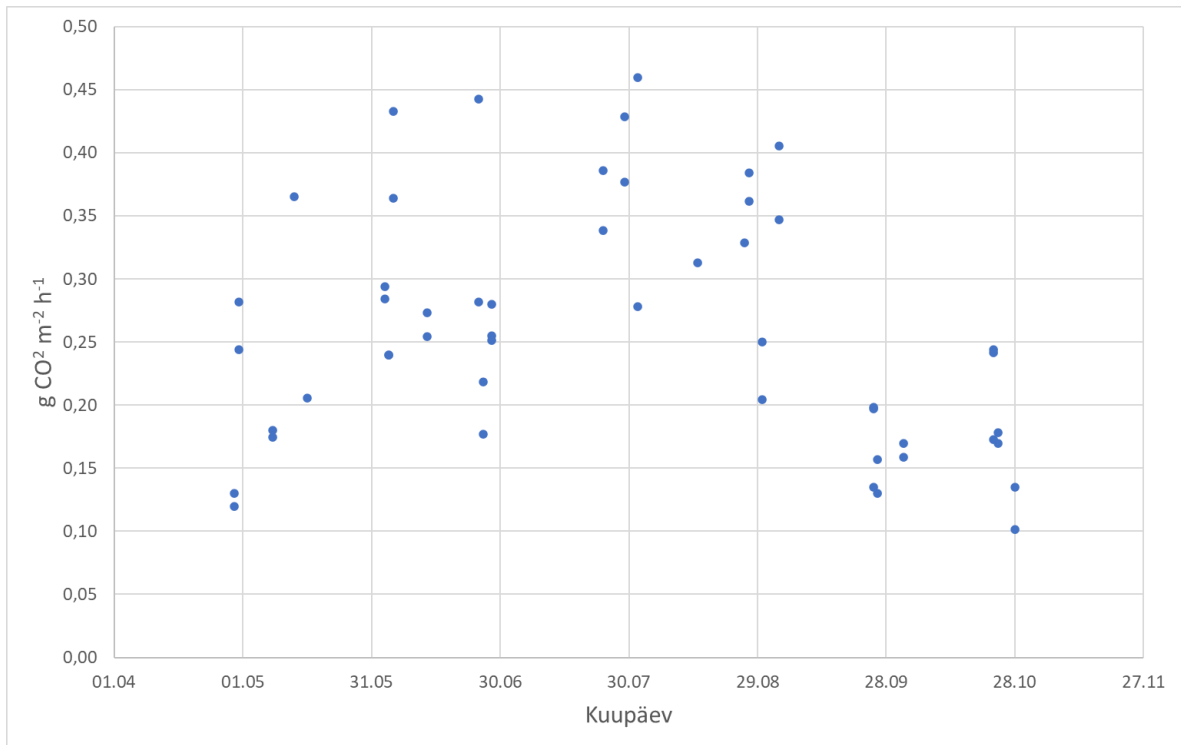
IPC Forest projekti raames on kogutud ligikaudu 100 metsa proovitüki mulla kohta, keskendudes mulla keemiliste elementide kvantitatiivsele analüüsile. Joonisel 9 esitab ülevaate keskmistest mulla süsiniku varu erinevates kasvukohatüüpides. Projekti käigus on uuritud mulla süsiniku varu nii kasvukohatüüpide kui ka mulla horisontide lõikes. Siiski tuleb märkida, et projekt ei hõlmanud Yasso mudeli jaoks vajalike süsinikuühendite rühmade proportsioonide analüüsi. Joonisel 9 on illustreeritud süsiniku varu varieeruvus eri kasvukohatüüpides, samuti selle erinevused võrreldes 1990ndate alguse ja 2006–2008 aasta inventuuride andmetega. Joonis sisaldab ka kvantitatiivset teavet proovitükkide arvu kohta erinevates kasvukohatüüpides.



Joonis 10. Mulla mineraalsete horisontide tihedused (kg/m^3) ja süsiniku osakaal (%) selles.

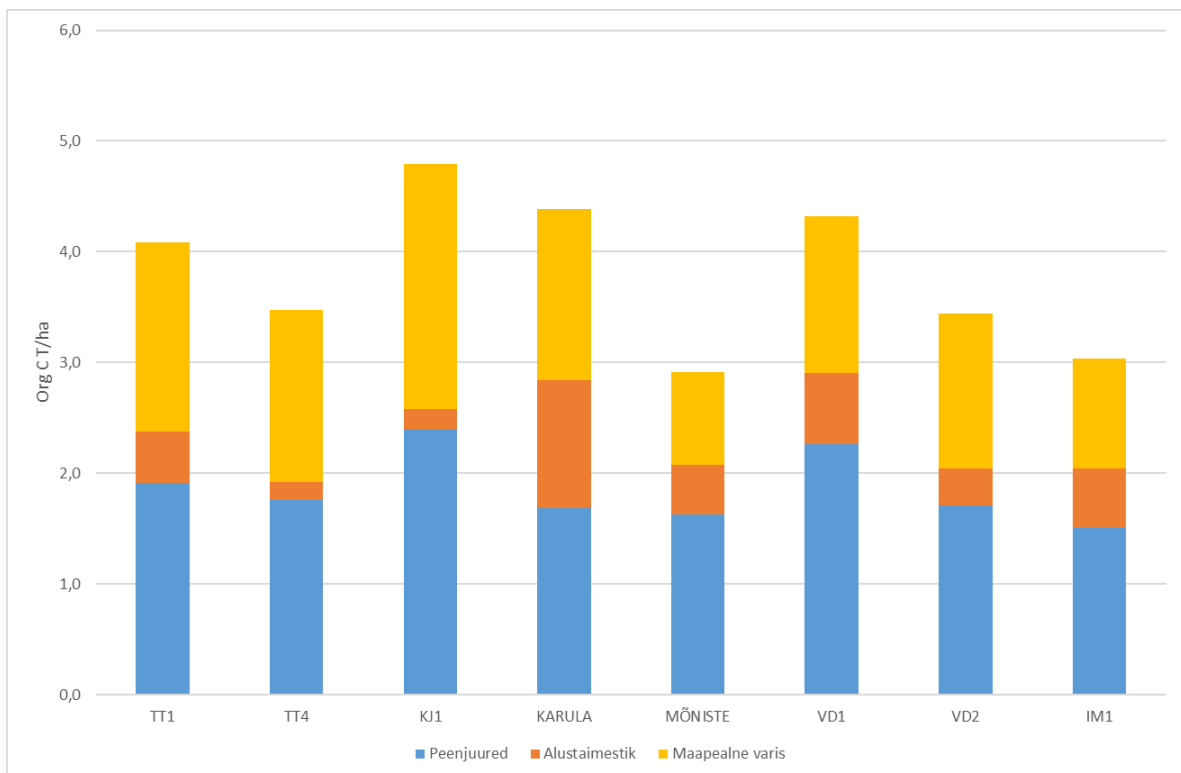
Joonisel 10 on esitatud erinevate mullahorisontide tihedused ja süsiniku osakaalud selles ICP Forest proovitükkidelt 1990ndal aastal mõõdetud. Sellest on näha, kui palju varieerub süsinik erinevates horisontides ning selle muutuse osakaalu üldistamisel võib pikaajaline simulatsioon anda nihkega tulemusi.

Eestis tehtud uuringute alusel (Uri et al, 2022) varieerub summaarne aastane heterotroofne mullahingamine (R_h) vahemikul $3,8 - 5,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Teisendades selle ühikule $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ võrdub $0,042 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), on keskmine R_h vahemikul $0,159 - 0,226 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. KIK projekti (KIK 2018 metsandusprogrammi projekt nr 14341) käigus vegetatsiooniperioodil tehtud R_h mõõtmiste tulemused on vahemikul $0,10 - 0,45 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Joonis 11) ning keskmine proovitükil varieerub $0,30 - 0,39 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kui modelleerida nende alusel aasta keskmine (arvestades, et mõõtmine toimus vegetatsiooniperioodil seitse kuu vältel), siis jääb tulemus vahemikku $0,12 - 0,15 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.



Joonis 11. KIK projekti (Asi jt. 2021) käigus kogutud mullabingamise (R_h) andmed.

KIK projekti (Asi, jt. 2021) käigus mõõdeti nii maapealse varise teket kui ka maa-aluse varise (puude ja taimede peenjuurte biomass) ja selles sisalduva orgaanilise süsiniku hulka (Joonis 12). Projekti käigus koguti andmeid aastase maapealse varise tekkimise kohta, aga maa-aluse kohta on kogutud vaid hetkeseis ehk seda, kui palju maa-alust biomassi aastas juurde tekib, infot täpselt teada ei ole.



Joonis 12. Orgaanilise süsiniku hulk maa-aluses biomassis ja maapealses varises KIK projekti käigus kogutud katsealadel.

Varise lagunemine on pikaajaline protsess, mille käigus peenjuurtest umbes 35% laguneb esimese aasta jooksul, viidates kolmeaastasele lagunemisperioodile. Projekti raames tehtud lagunduskatsete põhjal selgus, et maapealse varise lagunemine on kiirem, kus esimesel aastal lagunes ligikaudu 45%, mis viitab täieliku lagunemiseni kuluvale ajale pisut üle kahe aasta.

Mullasüsiniku dünaamika modelleerimisel on oluline arvestada mitmesuguste andmete kogumise faktoritega, arvestades, et varise moodustumine on jätkuv protsess ja seetõttu varieerub samaaegselt laguneva varise vanus. Mullahingamise mõõtmisel teatud hetkel tuleb arvesse võtta nii hiljuti tekkinud kui ka varasemat varist. See asjaolu võib andmete kooskõla mõjutada, kuna erinevad mullahingamise tasemed võivad olla tingitud nii jooksvatest temperatuuritingimustest kui ka varasemast varieeruvast varisest.

KIK projekti käigus analüüsiti maa-aluse biomassi koguseid ning nende lagunemise kiirust, aga puudu on maa-aluse varise tekkimise kiirus. Joonisel 12 on esitatud nii maapealse varise kui ka maa-aluse biomassi kogused. Sellest on näha, et maa-aluse biomassi hulk on oluline kogu süsinikuringes, mistõttu on vajalik täpsemalt teada ka selle aastast varise produktsiooni.

Eestis koostatud uurimused (Uri et al, 2022) on näidanud, et lageraie järgselt toimub mullast suurem süsiniku heide kui keskmisest metsast, kus muld on süsinikku siduv. Seega kogu metsa kohta üldistuste tegemisel tuleb arvestada ka sellega, aga antud juhul puudub selleks piisav andmestik, et Yasso mudelit sellele kalibreerida. Lageraie järgselt on metsa muld süsinikku heitev kuus kuni seitse aastat. Arvestades, viimase kuue – seitsme aasta jooksul on raiutud ca 10% metsadest, siis on need alad, kus toimub mullast süsiniku heide.

KIK projekti raames kogutud andmed näitavad, et aasta jooksul akumulereb varisest keskmiselt $3,81 \pm 0,24 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ süsinikku ja heterotroofse mullahingamise kaudu emiteeritakse $3,27 \pm 0,13 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Sellest tulenevalt on netosidumine keskmiselt $0,64 \pm 0,28 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Arvestades, et 10% metsadest on sellised raiete järgsed alad, kus toimub mullast süsinikuheide, on Eesti keskmine netosidumine veidi madalam, hinnanguliselt $0,45 \pm 0,28 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Käesoleva töö käigus kasutati varem kogutud andmeid ning uusi andmeid kogutud ei ole. Olemasolevad andmed võimaldavad anda hinnangu metsamuldade sidumise kohta ning antud analüüs näitas, et Eesti metsamuldade protsessid sarnanevad Rootsi tulemustega. Samas on kõikide protsesside kirjeldamiseks vähe andmeid, mis ei võimalda koostada täielikku simulatsiooni, mis kataks 100% nii muldade kui ka protsesside osas. Arvestades käesoleva projekti mahtu, siis antud töö käigus ei saanud koostada Yasso mudeli simulatsiooni, mis võimaldaks hinnata iga-aastaseid muutusi lähtuvalt SMI proovitükkidest. Samas saab projekti käigus tehtud analüüside alusel anda soovitusi. Praegu põhineb LULUCF aruandlus Rootsi mineraalse mulla süsiniku sidumise hinnangul (umbes $0,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), mis on Eesti tulemustega võrreldes sarnane, mis on annab alust eeldada, et Eestis kogutud andmed ja nende alusel koostatud hinnang on usaldusväärne. Statistiliselt on mulla süsiniku sidumise hinnangud küll kattuvad, aga Rootsi hinnang on Eesti hinnangu usalduspiiride alumise piiri lähedal (umbes $0,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ vs $0,45-0,28$ ehk $0,17 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), siis on alust eeldada, et Eesti mulla süsiniku sidumine on suurem kui Rootsi oma ning sellest tulenevalt on hetkel kasutatav tulemus konservatiivsem kui see tegelikult on ning soovituslik on kasutada Eesti andmete põhiseid mulla süsiniku sidumise hinnanguid.

Siiski, Eesti tulemuste täpsustamiseks ja kohandamiseks on vajalik jätkata uurimistööd, sealhulgas kordusmõõtmised ja uute metsaalade lisamine, eriti peale metsa majandustegevusi nagu hooldus- ja uuendusraied. Yasso mudeli täielikuks rakendamiseks LULUCF aruandluse jaoks on vajalik täiendavalt koguda andmeid, mida seni ei ole kogutud. Mudeli analüüsiks ja simulatsiooniks on vajalik olemasolevad andmed ka korralikult ja süstematiseeritult koguda ühtsesse andmebaasi, mis võimaldaks neid kõiki koos kasutada.

Tabel 2. Yasso mudeli täieliku simulatsiooni jaoks vajalikud ja puud olevad andmed.

Olemasolevad andmed	Täiendavalt vajalik
ICP Forest proovitükkide mulla süsiniku andmed, sh kordusmõõtmised, mis võimaldavad pikema perioodi tulemusi kontrollida.	Süsinikühendite osakaalud erinevates orgaanilistes mullahorisontides, mis näitavad algseisu süsiniku lagunemisel. Vajalik teada, kuna lagunemise protsessid on pooleli.
Maapealse varise aastased vood, süsiniku kogused ühendite rühmade kaupa ja nende lagunemise kiirused.	
Maa-aluse biomassi kogused ja lagunemise kiirused.	Maa-aluse varise tekkimise aastased kogused.
Erinevates kasvukohtades läbi viidud mullahingamise katsed, mis võimaldavad hinnata ja kontrollida mulla süsiniku heite koguseid mudelis.	

Varasemalt on tehtud analüüs (Kriiska, 2015), kus on simuleeritud Yasso mudelit, milles sisendiks kasutati SMI andmeid ning nendest tuletatud mudeli sisendid. Antud simulatsiooni tulemuseks saadi mineraalsete muldade stabiilseks süsiniku varuks 78 t/ha. Samas on Kõlli jt (2004) saanud kuivemate mineraalmuldade süsiniku varuks 72,5 t/ha ja märjemate mineraalmuldade süsiniku varuks 130,3 t/ha, mille kaalutud keskmine tulemus on 108 t/ha. Seega on antud simulatsioon oluliselt alla hinnanud süsiniku varu võrreldes teaduskirjanduses saadud tulemustega. Vaadates ICP Forest projekti käigus kogutud tulemusi kasvukohatüüpide kaupa (Joonis 9), siis on nende tulemused valdavalt isegi suuremad kui eelnevalt mainitud 108 t/ha (ehk 10,8 kg/m²).

Yasso mudeli simulatsioonid põhinevad proportsionaalsetele muutustele ning sellest tulenevalt on sisendandmetel suur mõju nende omavahelisele kooskõlale. Nii nagu protsent-arvutustel tekib ka siin sama mõju: kui 100%-st väheneb tulemus 20%, siis on tulemus 80%, kui aga see sama suureneb uuesti 20%, siis on tulemuseks 96% (mitte enam 100% nagu algselt). Seega, kui simulatsioon panna kokku erinevatel andmetel põhinevatel hinnangutel, mis ei ole omavahel kooskõlas, võib tulemuses toimuda kas süstemaatiline heide või sidumine, kuna simulatsioon toimub kumulatiivselt ehk eelmise perioodi lõpu tulemus on järgmise perioodi alguse tulemus ning kui tulemuses on sees süstemaatiline viga, siis iga järgmise iteratsiooniga seda süstemaatilist viga järjest võimendatakse.

Biomassi mudelid

Biomassi laiendustegurite loomise eesmärk on saada koefitsiendid, mille abil teisendatakse puistu tagavara puude summaarseks biomassiks, mis sisaldab kogu puud, sh oksad, koor jms. LULUCF meetodika alusel toimub tagavara jaotamise gruppidesse vastavalt tagavara kogusele (tm/ha) ning gruppide on ülemised piirid on järgmised: 0, 20, 50, 100, ∞. Igale grupile luuakse omad koefitsiendid ning iga puuliik jaotatakse eraldi gruppi.

Projektis analüüsiti biomassi laiendustegureid, tuginedes varasemalt kogutud andmetele (Uri, 2020) analüüsipuude kohta, mille puhul oli mõõdetud nii maa-alune kui ka maapealne biomass koos puude mõõtmetega. Uuring keskendus peamiselt mändide, kuuskede ja kaskede biomassi mudelitele, kuna nende puuliikide kohta oli Eestis kogutud piisavalt andmeid. Kuna teiste puuliikide kohta Eestis piisavalt andmeid ei olnud, kasutati analüüsis naaberriikide mudeleid, võrreldes Soome, Läti ja Rootsi biomassi mudeleid, et leida Eesti oludele kõige sobivamad.

Biomassi mudelid on tavaliselt koostatud sõltuvalt puu diameetrist ja kõrgusest. Käesoleva töö käigus loodi projekti „Eesti puistute biomassi mudelite väljatöötamine 2017-2020“ käigus kogutud andmete alusel üksikpuu maapealse biomassi mudelid valemiga (2) ning selle parameetrid on toodud tabelis 3.

$$\ln(BM) = a1 + a2 * \left(\frac{dbh}{dbh + b1}\right) + a3 * \left(\frac{h}{h + b2}\right) \quad (2)$$

Kus a1-a3 ja b1, b2 on mudeli parameetrid, dbh on rinnasdiameeter (cm) ja h on puu kõrgus (m) ning BM on biomass (kg).

Tabel 3. Eesti üksikpuu maapealse biomassi mudeli (2) parameetrid.

Puuliik	Parameeter	Hinnang	St. viga	Pr(> t)
Mänd	a1	-0,5033	0,6551	0,4435
	a2	8,0165	0,4809	<0,01
	a3	2,8638	0,3734	<0,01
	b1	18,7632	4,4995	<0,01
Kuusk	a1	-0,7629	1,3885	0,5837
	a2	8,1072	0,9441	<0,01
	a3	3,1749	0,4924	<0,01
	b1	17,8778	7,9964	0,0272
Kask	a1	-0,7344	0,6036	0,2263
	a2	8,0119	0,3829	<0,01
	a3	4,0597	0,511	<0,01
	b1	21,2352	5,2967	<0,01

Eestis ei ole piisavalt kogutud biomassi kohta teiste puuliikide osas ning seetõttu kasutati selleks Lätis (Liepins et al, 2018, 2021) koostatud mudelit erinevatele puuliikidele, mille valem on (3) ning parameetrid tabelis 4.

$$\ln(BM) = a1 + a2 * \left(\frac{dbh}{dbh + b1}\right) + a3 * h + a4 * \ln(h) \quad (3)$$

Kus a1-a4 ja b1 on mudeli parameetrid, dbh on rinnasdiameeter (cm) ja h on puu kõrgus (m) ning BM on biomass (kg).

Tabel 4. Läti üksikpuu maapealse biomassi mudeli (3) parameetrid (Liepins et al, 2018, 2021).

PL	a1	a2	a3	a4	b1	R ²	St. viga
MA	-1,4480	8,7399	0,0000	0,5624	16	0,989	22,4
KU	-0,5244	8,8563	0,0000	0,3879	19	0,982	26,5
KS	-2,1284	9,3375	0,0221	0,2838	11	0,987	19,0
HB	-1,9430	9,7510	0,0337	0,0000	11	0,984	17,4
LV	-2,2207	9,7183	0,0336	0,0000	10	0,991	7,7
LM	-1,6846	9,3412	0,0221	0,2489	14	0,994	19,0

Üksikpuu biomassi mudelitest koostati puistu kohta biomassi laiendusfaktorid. Selleks tehti esmalt SMI andmetest väljavõte päringuga (kõik elusad puud proovitükkidel, mis on jagamata):

```
klupp <- dbGetQuery(con, "select k.*, o.pindala from aklupp k, aproovitykkosa
o where o.aproovitykk_id = k.aproovitykk_id and o.osa_nr = k.osa_nr and
arv_grp = 'ES' and maakategooria in ('M','MM') and o.osa_nr = 0"
```

Kõikidele puudele arvutati biomassid mudelitega

```
# mdl.bm on funktsioon valemist (1)
klupp$bm_kg_ee <- with(klupp, mdl.bm(arv_d13, arv_korgus))
```

Arvutati ühele puuliigile korruga summaarsed biomassid proovitüki kohta ning seejärel grupeeriti tulemused tagavara gruppide kaupa ning saadi iga grupi keskmine BCEF.

```
PL = "MA"
kl.pl <- subset(aggregate(cbind(
  m_pl = arv_tagavara/pindala*1E4,
  bm_pl_ee = bm_kg_ee/pindala*1E4
)~aproovitykk_id+osa_nr+puuliik, klupp, sum), puuliik == PL)

kl.prt <- aggregate(cbind(m_tot =
  arv_tagavara/pindala*1E4)~aproovitykk_id+osa_nr, klupp, sum)

# valimisse võetakse ainult need proovitükid, milles enamuspuuliiki on üle 90%
kl.k <- subset(merge(kl.pl, kl.prt), m_pl > m_tot * 0.9)
kl.k$m_grp <- cut(kl.k$m_pl, c(0, 20, 50, 100, Inf), include.lowest = T)
bcef <- with(kl.k, tapply(bm_pl_ee, m_grp, sum))/with(kl.k, tapply(m_tot,
  m_grp, sum))
```

Eraldi tehti BCEF väärtused Eesti mudelite alusel ning võrdluseks Läti mudelitega männi, kuuse ja kase kohta ning täiendavalt Eestil puuduvate puuliikide (haab ja lepad) kohta.

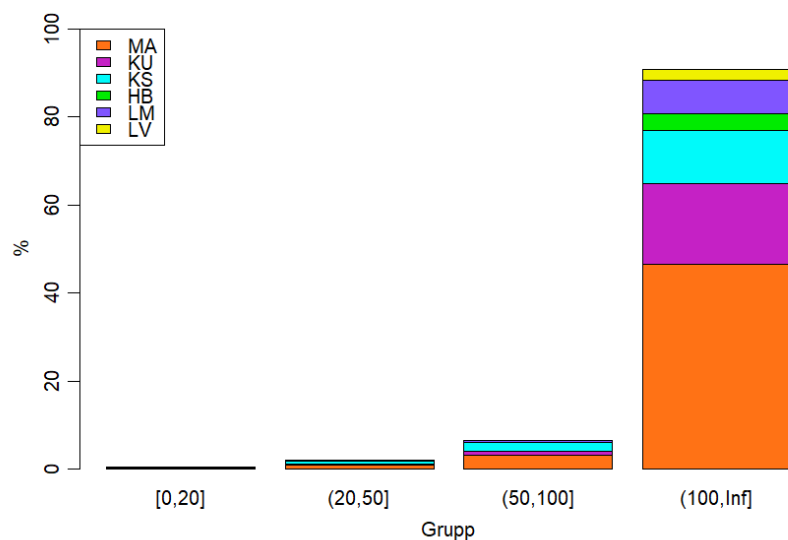
Tabel 5. Eesti mudelite (2)alusel loodud BCEF väärtused SMI proovitükkide põhjal.

Puuliik	[0,20]	(20,50]	(50,100]	(100,Inf]
MA	0,6057	0,5587	0,5429	0,5056
KU	0,5714	0,5455	0,5321	0,5055
KS	0,7085	0,6321	0,6148	0,5992

Tabel 6. Lätti mudelite (3) alusel loodud BCEF väärtused SMI proovitükkide põhjal.

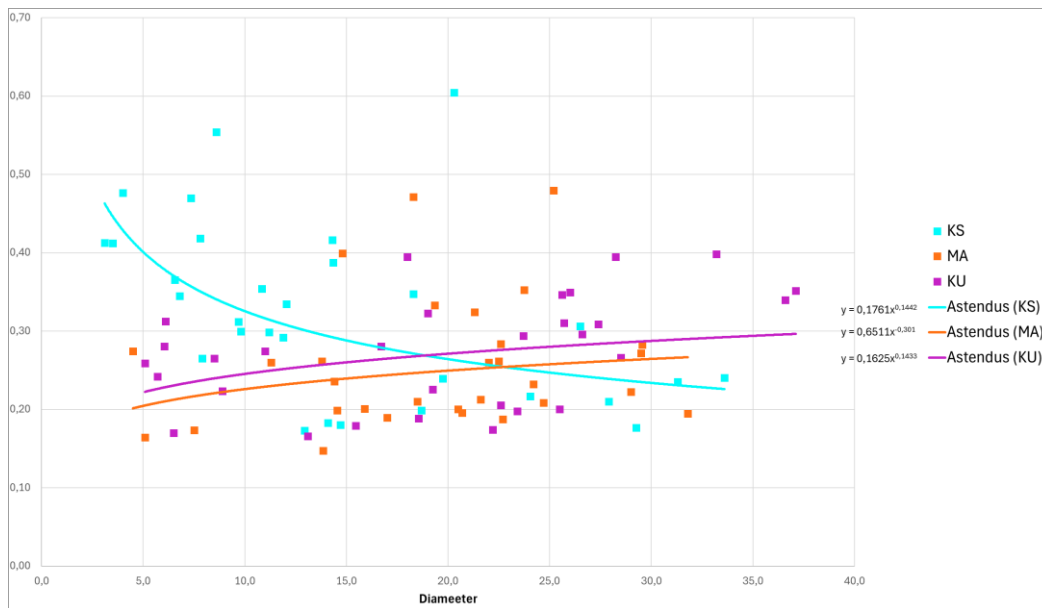
Puuliik	[0,20]	(20,50]	(50,100]	(100,Inf]
MA	0,5863	0,5692	0,5649	0,5307
KU	0,6962	0,6383	0,6106	0,5523
KS	0,6262	0,6010	0,5928	0,5762
HB	0,4246	0,4383	0,4179	0,4365
LV	0,4045	0,4181	0,4313	0,4395
LM	0,4281	0,4669	0,4768	0,4844

Eestis on okaspuudel BCEF väärtused pisut väiksemad kui Lätis, aga kasel on see suurem. Joonisel 13 on esitatud tagavarade jaotus vastavalt puuliigile ja tagavara grupile. BCEF väärtuse võimalikult täpseks saamiseks on võetud andmebaasist enamvähem puhtpuistud (puuliigi osakaal üle 90%) ning kuna männikutes on mändide osakaal kõige suurem, siis sellest tulenevalt on ka männikuid kõige rohkem sellises andmestikus. Teisel puuliikidel on kaaspuuliike rohkem ning sellest tulenevalt on ka proovitükkide osakaal väiksem. Samas on vajalik antud juhul saada võimalikult täpne konkreetse puuliigi puistu laiendusfaktor, mistõttu ei saa mudeli koostamisel kasutada segapuistute proovitükke. Samas saab tulemust hiljem rakendada segapuistutele, kus BCEF väärtuste aluseks on puistu kogutagavara (mitte üksiku puistuelemendi tagavara) ning parameetrid kaalutakse vastavalt tagavara osakaalule läbi.



Joonis 13. Tagavara jagunemine puuliikide ja tagavara gruppide järgi.

Maapealse ja maa-aluse biomassi suhe on sõltuv puu diameetrist ning on väga varieeruv (Joonis 14). Suhtarvu puhul tuleb arvestada, et suurematel puudel on suurem kaal summaarsel tulemusel. Analüüsipuude kaalutud keskmine suhtarv on männil $0,26 \pm 0,01$, kuusel $0,30 \pm 0,01$ ja kasel $0,24 \pm 0,02$.



Joonis 14. Maa-aluse ja maapealse biomassi subtarv.

SMI metoodika 2024-2028 ettepanekud

SMI proovitükke mõõdetakse kahel erineval eesmärgil: hinnata hetkeseisu ja muutusi. Tulemuste saamiseks kasutatakse kahte erinevat tüüpi proovitükke: ajutised ja alalised, sh on täiendavalt jaotatud tagavara- ja kasvukohaproovitükid.

Täiendavalt on vajalik hakata SMI-d siduma kaugseire andmetega. Kaugseire eeldab täpseid maapealseid andmeid, milleks on sobilikud SMI proovitükid, kuna need on esinduslikult paigutatud üle riigi. SMI metoodika koostamisel ei olnud proovitükkide andmed selle eesmärgiga rajatud ning seetõttu on vajalik täiendavalt metoodikat kohandada, et proovitükid täidaksid ka seda eesmärki.

Drooni ja skanneri kasutamine mõõtmistel

Käesoleva töö eesmärgiks oli analüüsida SMI proovitükkide mõõtmist drooni ja maapealse laserskanneriga. Katseks mõõdeti kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustikus 30 proovitükki. Igal proovitükil tehti mõõtmisi kolme erineva seadmega: 1) maapealne laserskanner Leica RTC 360; 2) aeropildistamine drooniga DJI Mini Pro stereofotogramm-meetriliseks andmetöötluseks ning 3) aerolaserskaneerimine drooniga DJI M300RTK ja skanneriga Yellowscan Mapper.

Stereofotogramm-meetria on meetod, mis võimaldab mõõta ja tõlgendada ruumilisi objekte, kasutades kahte või enam fotot, mis on tehtud erinevatest vaatenurkadest. See protsess hõlmab mitut etappi ja põhimõtet, mida kasutatakse ruumiliste objektide mõõtmete määramiseks:

- Kahepunktivaatlus (stereoskoopia): stereofotogramm-meetria põhineb stereoskoopial, mis tähendab kahe üksteisega kergelt nihutatud fotograafilise kujutise vaatamist, et luua kolmemõõtmeline efekt. See efekt tekib, kuna iga silm näeb veidi erinevat vaadet objektile, jäljendades inimese loomulikku binokulaarset nägemist.
- Fotode jäädvustamine: objektidest tehakse kaks või enam fotot erinevatest asukohtadest. Oluline on, et iga foto jäädvustaks objekti erineva nurga alt, tagades piisava katvuse ja ülekatte objekti erinevate osade vahel.
- Orientatsioon ja kalibreerimine: enne mõõtmiste tegemist tuleb fotod orienteerida ja kalibreerida. See tähendab kaamera asendi, nurga ja kauguse täpset määramist objekti suhtes, samuti kaamera enda parameetreid, nagu fookuskaugus ja objektiiv moonutused, arvestamist.
- Tie-punktide tuvastamine: mõõtmisprotsessis tuvastatakse ja vastendatakse samad punktid (tie-punktid) mõlemal fotol. Need punktid võimaldavad arvutada objekti täpse asukoha ruumis.
- Parallaksi mõõtmine: parallaks on vaatlusnurkade erinevusest tulenev näiva asukoha nihkumine. Mõõtes parallaksi kahe foto vahel, saab arvutada objekti kauguse ja asukoha.
- Kolmemõõtmeline modelleerimine: kogutud andmete põhjal luuakse objektist kolmemõõtmeline digitaalne mudel. See mudel võimaldab analüüsida objekti kuju, suurust ja muid ruumilisi omadusi.

Stereofotogramm-meetria on kasulik mitmes valdkonnas, sealhulgas topograafias, arhitektuuris, inseneriteaduses ja metsanduses, pakkudes täpset ja üksikasjalikku ruumilist teavet objektide ja maastike kohta. See võimaldab spetsialistidel teha täpseid mõõtmisi ja analüüse ilma objektidega otseselt kokku puutumata.

Drooniga pildistamine ei andnud soovitud tulemust proovitükkide stereofotogramm-meetrilisel mõõdistamisel, kuna täpset mõõtmist sellest läbi viia ei saa, sest puud ei ole stabiilselt paigal. Drooni pildistamist kasutatakse stabiilsete objektide kaardistamiseks, kus objektist on võimalik teha 3D

kujutist kombineerides erinevatest suundadest pilte ehk stereofotogramm-meetria abil. Kuna puud tuule käes kõikumise tõttu ei ole paigal, siis sellisel juhul stereofotogramm-meetrilised meetodid ei ole nende puhul rakendatavad.

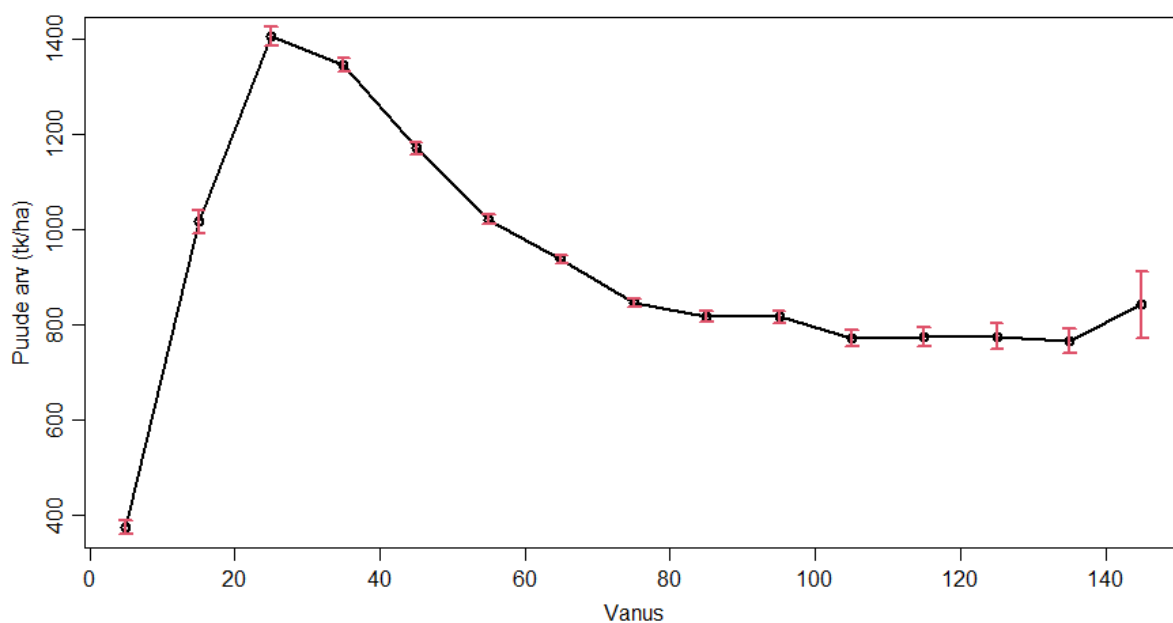
Maapealse laserskanneriga saab mõõta tuulevaiksel ajal. Skanneriga tehakse mõõtmisi erinevatest kohtadest, et oleks mõõdistatud puude erinevad küljed ning tuulisema ilma korral ei ole puud stabiilselt paigal, mida eeldab jälle laserskanner. Samuti takistavad skaneerimist alusmetsa liigid, kuna halvendavad nähtavust. Kohati esines proovitükkidel sarapuud, mis oli takistuseks puude ülemiste osade mõõdistamisel. SMI proovitükke mõõdetakse aga igapäevaselt, mistõttu ei ole see rakendatav igapäevasel mõõtmisel. Sellest tulenevalt on otstarbekam viia eraldi läbi proovitükkide mõõtmine ja nende andmete analüüs, mille käigus koostatakse uued puu ja puistu mahumudelid.

Eesti Maaülikool on esitanud KIK-ile projekti taotluse „Puu ja puistu tagavara mudelite koostamise meetodika loomine ja mudelite kaasajastamine“, mis sai positiivse rahastusotsuse. Eesmärk on projekti käigus mõõdistada ca 420 SMI proovitükki maapealse laserskanneriga ning nende andmete alusel luua uued puu ja puistu mahumudelid, mida edaspidi rakendatakse SMI proovitükkidel klupitud puudele. Antud projekti käigus loodame koostööle Keskkonnaagentuurile, et kasutada olemasolevat maapealset laserskannerit ning mõõdetud proovitükkide andmeid. Antud projekt annab võimaluse ka hinnata mõõdetud proovitükkide tagavara täpsust, mis on olnud viimastel aastatel oluliseks avaliku arutelu objektiks. Antud 420 proovitükki on piisav proovitükkide hulk, mida võib nimetada sõltumatuks mõõtmiseks ning kuna mõõdetakse täpisseadmega, siis võib ka tulemust pidada usaldusväärseks.

Hinnanguliselt on nende 420 proovitüki andmetöötluses andmete maht 20 TB. Proovitükid on vajalik teha oluliselt suuremad kui on SMI klupitud proovitükid, kuna puude ladvaosa mõõtmiseks tuleb puud vaadata külgsuunas ning selleks on vajalik proovitükk mõõta raadiusega vähemalt 20 m. Tavaliselt proovitükki mõõtes, kus puud klupitakse proovitüki sees ning nende puude kõrguse mõõtmiseks läheb mõõtja proovitükist välja, et näha puude latvasid, siis skanneriga on vajalik samuti keskpunkti kaugemalt mõõta, et ka keskpunktis olevad puud oleksid mõõdetud ka ladvast.

Proovitüki suurus

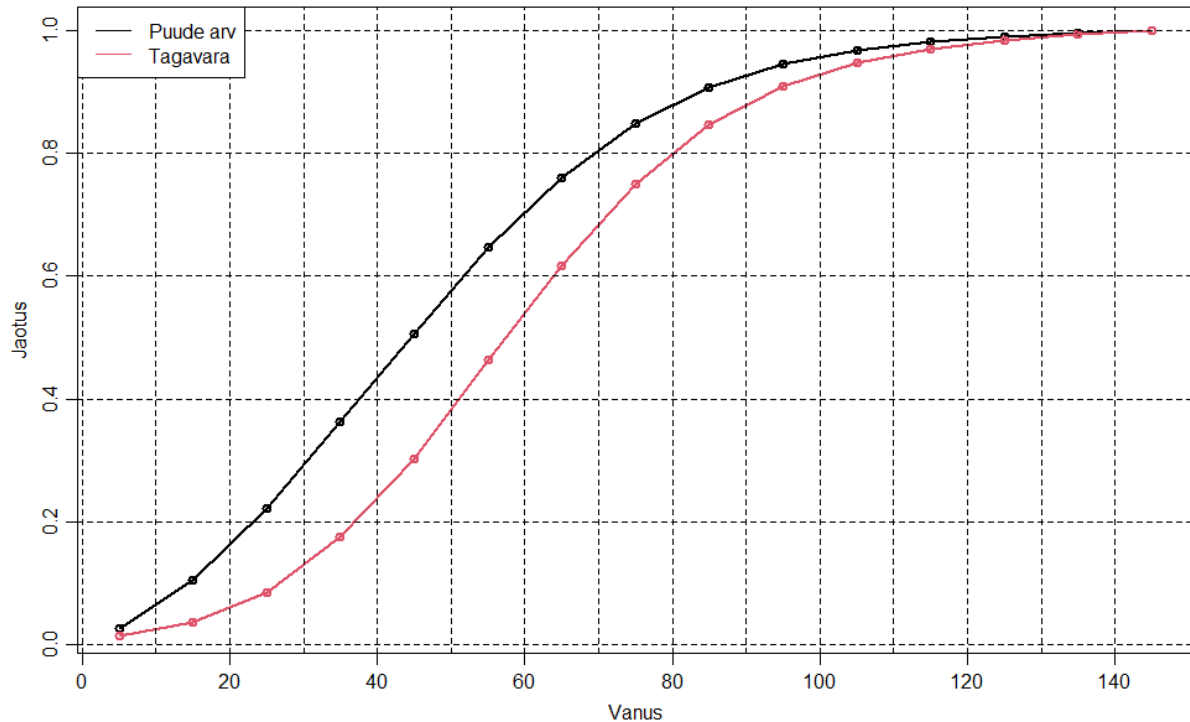
Proovitüki suuruse juures tuleb arvestada, et erinevas vanuses on puud erineva suurusega ja nende hulk proovitükil on erinev (Joonis 15). Sellest tulenevalt on vajalik proovitüki suuruse valikul lähtuda ka seal olevate puude alusel saadavatest karakteristikutest. Vanemas metsas on puud suuremad ja neid on vähem, samas aga on puude suremus oluliselt erinev, kas arvestatakse puude arvu või nende mahtu. Nooremas metsas on ühe puu suremisel väiksem kaal kogu puude arvu kui vanemas metsas, samas vanemas metsas ühe puu maht on aga tunduvalt suurem, mistõttu ühe puu suremisega suureneb surnud puude maht oluliselt rohkem kui nooremas metsas. Kui vanemas metsas on proovitükk väike siis, satub ka sinna vähem puid. Vanemas metsas on suremus puude arvuliselt väiksem kui nooremas metsas, seetõttu statistiliselt on väiksem tõenäosus, et surev puu satub proovitükile. Näiteks kui vanas metsas sureb aastas hektari kohta neli puud, siis ühe puu hinnangu saamiseks peaks proovitükk olema vähemalt veerand hektarit. Kuna surevad puud ei paikne metsas ühtlaselt, on ka suremuse hinnang vanemas metsas suurema statistilise veaga. Kuna vanemates metsades on vanuseklassi kohta vähem metsa pindala, satub nendesse ka vähem proovitükke ning sellest tulenevalt on ka nende hinnangutes suuremad statistilised usalduspiirid. Modelleerimisel tuleb arvestada, et tulemus lähtub vaatluste arvust ning kui keskealistes metsades on rohkem proovitükke, siis hinnangute koostamisel on nendel ka suurem mõju hinnangu tulemustele.



Joonis 15. Mõõdetud puude arv bektari kohta.

Proovitüki suuruse määramisel on vaja lähtuda sellest, et tagavara hinnang oleks võimalikult täpne. Kui proovitüki kohta antavad keskmised hinnangud lähtuvad kahekümne meetri raadiusest, mis koostatakse silmamõõduliselt, siis mõõdetavate tunnuste puhul lähtutakse mõõdetava proovitüki suuruselt. Üldistamisel antakse iga tunnuse kohta ka sellel statistiliselt usalduspiirid. Takseeritavate tunnuste puhul on oluline eristada, kas tunnus on juba silmamõõduliselt hinnatud keskmine väärtus või on see mõõdetud üksikväärtuste abil nende summeerimise või keskmistamise kaudu. Näiteks, keskmine diameeter hinnatakse silmamõõduliselt kahekümne meetri raadiuses proovitükil aga üksikud puud mõõdetakse 10 meetri raadiuses. Viimaste alusel tehakse üldistus puistu tagavara kohta. Proovitükk mõõdetakse kindla raadiusega eesmärgiga saada täpsemad tulemused proovitükil mõõdetavate tunnuste kohta. Nendeks tunnusteks on tagavara ja raied. Täiendavalt hinnatakse proovitükkide andmete alusel ka juurdekasvu ja suremust. Selle puhul on oluline teha kordusmõõtmisi, sest tegemist on protsessiga ning ühekordse mõõtmisega seda hinnata ei saa.

Juurdekasvu ja suremuse puhul kasutatakse alalisi proovitükke, ning kuna see muutus on väike ühe aasta kohta, siis on oluline teha selle tunnuse jaoks rohkem mõõtmisi, et vähendada hinnangu viga. Sellest lähtuvat ei saa kasutada alalistel proovitükkidel samasugust suurust nagu on ajutistel, mille eesmärgiks on saada ainult hetkeseis.



Joonis 16. Puude arvu ja nende mahu jagunemine vanuse järgi.

Traktide suurus ja paigutus

Hinnangute täpsus sõltub nii proovitükkide arvust kui ka traktide arvust. Juhuslikkuse tagamiseks on oluline paigutada traktid üle riigi ühtlaselt. Traktide kaugus ühe aasta sees on kindla vahega. Juhuslikkuse tagamiseks võiks antud koordinaadile lisada täiendava asukoha juhuslikkuse ehk iga trakti keskkoha x ja y koordinaadile liita juurde juhuslik kaugus sellest, mille ulatus on vahemikul pluss-miinus pool traktide vahelisest kaugusest. Näiteks:

```
# Näite R-i koodist
# Olgu juhuslikult trakti keskkoha koordinaadid järgmised
x <- 500000
y <- 6400000

# Näites toodud kaugus traktide vahel on 2 km ehk 2000 m
kaugus <- 2000
xi <- runif(1, -kaugus/2, kaugus/2)
yi <- runif(1, -kaugus/2, kaugus/2)

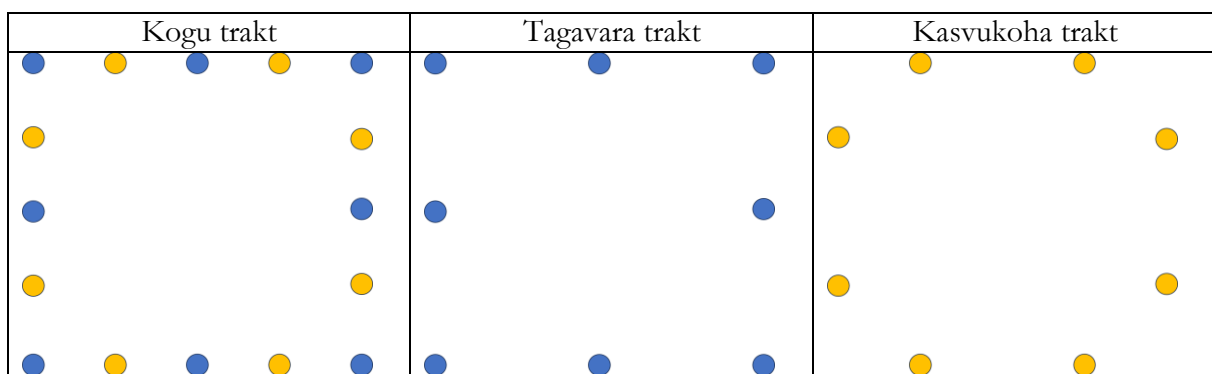
# uus trakti keskkoha juhuslik koordinaat
xu <- x + xi
yu <- y + yi
```

Maastiku fragmenteeritusest sõltub lähestikku paiknevate proovitükkide korrelatsioon. TÜ MSI poolt läbi viidud analüüs näitas, et lähimate proovitükkide osas oli korrelatsioon suurem kui kaugematel. Ning arvestades, et sama proovitükkide arvu, aga suurema arvu traktide puhul on tulemuste statistilised hinnangud täpsemad, võiks kaaluda ka võimalust jaotada proovitükid traktidesse nende tüübi järgi: eraldi traktid, kus on tagavara proovitükid ning eraldi traktid, kus on

kasvukoha proovitükid. Transpordi kulu on küll sellisel juhul suurem, aga kasvukoha proovitükide trakte on võimalik teha üksi ja kiiremini, kuna sellisel juhul ei toimu üksikpuude mõõtmist.

Joonisel 17 on esitatud kolm erinevat trakti skeemi:

- Trakt senise meetodika alusel, kus iga 200 m järel on proovitükk ning tagavara ja kasvukoha proovitükid on vaheldumisi;
- Trakt, kus on ainult tagavara proovitükid, mis paiknevad nii nagu tagavara proovitükid traktis paiknevad ehk 400 ja 800 m kaugusel nurgast;
- Trakt, kus on ainult kasvukoha proovitükid, mis paiknevad nii nagu kasvukoha proovitükid traktis paiknevad ehk 200 ja 600 m kaugusel nurgast.



Joonis 17. Traktide paigutused: hetkel kasutusel (kogu trakt), soovituslik tagavara trakt ja kasvukoha trakt.

Sellist paigutust võiks kasutada nii ajutistel kui ka alalistel traktidel, kuna seniste alaliste traktide kasvukoha proovitükid erinevad tagavara proovitükkidest on paiknemise põhimõttelt: kordusmõõtmine ei pea toimuma samal kohal ning selles tulenevalt võib esineda ka olukord, kus ühel mõõtmisel oli tegemist näiteks põllumaaga, järgmisel korral sattus GPS-i alusel teisele maakategoriale, näiteks metsa, mille viis aastat tagasi maakategooria oli rohumaa ja siis viie aasta pärast jälle satutakse põllumaale. Sellised olukorrad teevad analüüsi statistiliselt keerulisemaks, kuna muutused on tingitud nii mõõtemääramatusest kui ka paigutuse juhuslikkusest. Kui igal korral on trakt erineva kohapeal, siis on tegemist paigutuse juhuslikkusest ning kui teoreetiliselt peaks sattuma samasse kohta, aga koht on erinev, siis on tegemist asukoha määramise mõõtemääramatusega. Sellest tulenevalt võib oma paigutuselt hetkel jaotada proovitükid kolmeks:

- Alalised tagavara proovitükid: paigutus süstemaatiline - mõõdetakse samal kohal sama proovitükki;
- Ajutised proovitükid: paigutus juhuslik – mõõdetakse igal korral erinevat kohta;
- Alalised kasvukoha proovitükid: paigutus küll süstemaatiline, aga samal kohal mõõtmisi ei tehta, tulemus sõltub asukoha mõõtmise mõõtemääramatusest.

Viimane mõjutab statistiliselt muutuste hinnanguid võrreldes esimese kahega, kuna need on mõjutatud vaid ühest nendest aspektidest.

Proovitükkide kontrollmõõtmine

Tulemuste täpsus sõltub mõõtmise täpsusest. Seetõttu on oluline testida mõõtjate oskusi. Kontrollimisel tuleb arvestada sellega, mida kontrollitakse. Kui eesmärgiks on testida maakategooria hindamise täpsust, siis ei saa piirduda ainult metsas olevate proovitükkidega. Mõõtmised toimuvad traktidena ning seetõttu käib ka kontrollimine traktide kaupa. Hindamistulemus sõltub sellest, kui palju on antud traktid proovitükke, mis asuvad metsas. Seetõttu ei saa valik põhineda ainult juhuslikul valikul, mille käigus valitakse välja mõned traktid ilma eelteadmista.

Kontrollmõõtmised võivad toimuda kahel erineval viisil. Üheks võimaluseks on läbi viia spetsiaalseid testimisi, kus mõõtjatele antakse ette samad objektid mõõta, mis on eelnevalt täpsemate seadmete mõõdetud. Seni on seda meetodit kasutatud igal kevadel treeningtakseerimisena. See annab võimaluse võrrelda mõõtjate tööd.

Teiseks võimaluseks on üle kontrollida igapäevane mõõtmine. Siin tuleb arvestada, et hinnatavateks tunnusteks on nii üksipuude andmed kui ka proovitüki tasemel tulemused. Tunnuste puhul tuleb ka hinnata, mida on võimalik hinnata kameraalselt, et vähendada välitööde mahtu ning sellega suurendada traktide ja proovitükkide hulka, mida kontrollitakse. Mõõdetavate tunnuste puhul on oluline teha mõõtmised proovitükil kohapeal ning sellisel juhul peaksid sattuma valimisse sellised traktid, kus metsas olevate proovitükkide osakaal on suur.

Kontrollmõõtmistel peaks tegema mõõtmisi ka täpsemalt. Näiteks kluppimisandmete kontrollimisel ühe diameetri mõõtmise asemel teha kaks teineteisega risti mõõtmist ehk kokku kaks lugemist ühelt puult. See võimaldab edaspidi ka hinnata täpsemalt, kui suur on võimalik täpsus puude diameetrite mõõtmisel. Senised analüüsid on näidanud, et kahe mõõtmise keskmisest võib erinevus olla kuni 5% (nt 20 cm puu puhul 1 cm), mis on tingitud sellest, et puu ei ole ristlõikelt absoluutne ring. Seega on kontrollmõõtmistel tulemustele hinnangu andmisel oluline mõista, kas erinevus on tingitud mõõtmise täpsusest või objekti võimalikust dimensioonist. Üksikobjektide mõõtmisel täiendavalt hinnata, kas nende alusel saadud üldistus (nt keskmine diameeter) erineb oluliselt kontrollmõõtmise tulemusest. Üksikpuude mõõtmisel võib olla küll suurem juhuslik viga, aga kogu tulemus ei pruugi sellest olla süstemaatilise veaga.

Kontroll mõõtmised võiksid olla ca 3-5% kogu valimist ning saadud tulemuste võrdlemisel (juhusliku ja süstemaatilise võimalike vigade analüüs) ning oodatava täpsuse alusel saab juba täpsemalt otsustada, milline võiks olla mõõtjate kaupa kontrollmõõtmistega tehtavate tööde hulk. Võimalusel rohkematel traktidel üksikud proovitükid kui vähestel traktidel kõik proovitükid – käiakse läbi traktile kergelt ligipääsetavatel üksikutel proovitükkidel, mis võimaldab väikse vaevaga käia ühe päevaga mitmed sellised traktid.

Kui mõõtja teeb ühe päevaga trakti, siis selle trakti mõõtmistulemus sõltub ka osaliselt selle päeva ilmast (nt ultrahelikaugusmõõtja sõltuvus temperatuurist jms). Seetõttu võib kontrollimise hinnangus olla trakti põhine autokorrelatsioon. Valim suurusega 5% moodustab ca 6 trakti mõõtja kohta aastas ning seetõttu võib ühel traktil olla suur mõju kontrollmõõtmise tulemusele.

Kaugseire kasutamine SMIs

Kaugseire andmeid on võimalik kasutada kahel viisil SMI-ga koos. Üks on andmete jaotuste analüüs lähtuvalt proovitükkide andmetest võrreldes kaugseire andmetega. Teine on kaugseire andmetest

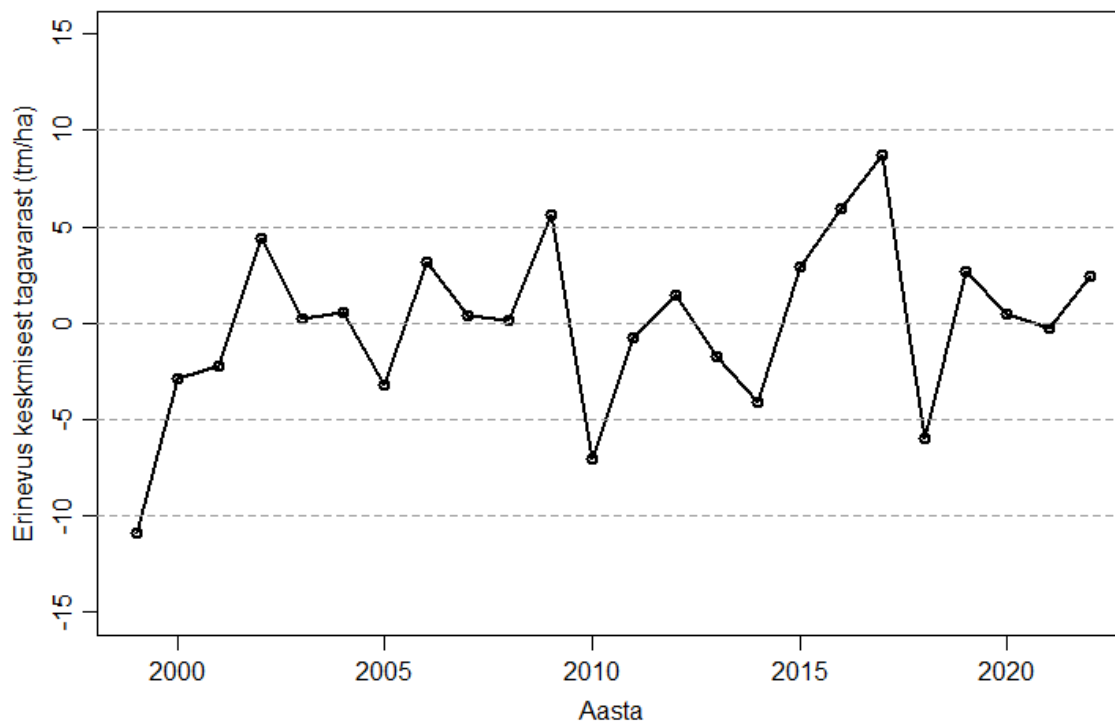
tulemuskaartide koostamine, kus SMI proovitükid on maapealsed andmed, mis on vajalikud kaugseire andmete rakendamiseks.

SMI andmete usaldusväärsuse ja esinduslikkuse kontrollimiseks saab kasutada kaugseire andmeid jaotuste võrdlemisel. LiDARi andmete alusel on võimalik koostada erinevate meetrikute kaarte. Näiteks kasutatakse metsa kõrguse kaardi loomiseks kõrguspunktide 80-protsentiili ehk 10x10 m piksli kohta leitakse kõrgus, millest 80% punktidest jääb madalamale ning arvestatakse ainult neid punkte, mis on maapinnast üle kahe meetri kõrgusel. Kui kogu Eesti kohta koostada selline kaart, siis on võimalik leida, milline on kõikide nende pikslite väärtuste jaotus. Kui SMI proovitükkide koordinaatide alusel teha päring sellelt kaardilt, siis see jaotus peab vastama kogu Eesti metsades olevate pikslite jaotusele. Kui jaotus on erinev, siis järelikult on ka proovitükkide paigutus erinev ning tulemust ei saa pidada enam usaldusväärseks.

EMÜ-s koostati metsade tagavara kaart 2018. aastal ning edaspidi on RMK koostanud oma tarbeks igal aastal tagavara ja kõrguse kaardi. Selle kaardi loomiseks koostati mudel proovitükkide andmete alusel ning selleks kasutati SMI proovitükkide alusel arvatud meetrikuid. Sellest lähtuvalt võib väita, et SMI tagavara hinnang peabki olema ligilähedane kaugseirega saadud tulemusega, aga siin saab analüüsida just proovitükkide esinduslikkust. Kui nende kahe andmestiku tulemus on ligilähedane, siis on järelikult ka SMI proovitükid esinduslikult paigutatud. Kui nt SMI proovitükid oleks sattunud rohkem vanematesse metsadesse (juhul kui omanik tahtlikult ei raiu proovitükil), siis oleks ka SMI tulemus oluliselt kõrgem, sest sellisel juhul oleks kaugseirega esindatud rohkem ka need alad, mis on juba raiutud ning mille tagavara on väiksem. **Seega antud tagavara kaardi hinnangu alusel saab väita, et SMI proovitükid on paigutatud esinduslikult ning sellest tulenevalt on hinnangud asjakohased.**

Käesoleva töö käigus koostati erinevaid simulatsioone, mis põhinesid 10 m piksliga kõrgusjaotuse 80-protsentiili kaardil, et hinnata proovitükkide paigutust. Teoreetiliselt paigutati traktid ning võrreldi neid kogu kaardi pikslite jaotusega. Selline simulatsioon võimaldab hinnata nii proovitükkide paigutuse vastavust kui ka erinevate aastate vahel teha võrdlusi.

Näiteks, joonisel 18 on esitatud tagavara keskmine erinevus. Selleks koostati simulatsioon, mille aluseks on sama tagavarakaart. See näitab ühe hetke kindlat seisust ning mille tulemus on meile teada. SMI andmetest kasutati iga aasta proovitükke eraldi ning viie aasta tulemusi kokku ei liidetud. Iga aasta kohta tehti kaardipäring lähtuvalt konkreetse aasta proovitükkide asukohast ning saadud tulemuse alusel koostati hinnangud kõikidele aastatele ning leiti kui palju iga konkreetne aasta erineb üldisest keskmisest. Teoreetiliselt peaksid kõik tulemused olema nullid, aga lähtuvalt proovitükkide paigutusest on erinevate aastate tulemused erinenud isegi üle 5 tm/ha.



Joonis 18. Keskmise tagavara võrdlus vastavalt proovitükkide paigutusele erinevatel aastatel.

See näitab, kui palju aastate vaheline erinevus on tingitud proovitükkide paigutusest. SMI ühe perioodi (viie aasta) jooksul on iga aasta ruumiliselt erineval kohal, sellest tulenevalt on naaberaastate erinevus tingitud pigem ruumilisest paiknemisest, mitte muutustest. Antud juhul on aga tegemist ühe kindla fikseeritud kaardiga ning seega ei saa erinevust pidada enam ajaliseks muutuseks vaid valimist tingitud erinevuseks.

Teine oluline väljund on kaugseire andmetest SMI proovitükkide andmete alusel erinevate kaartide koostamine. Selleks on oluline, et proovitükkide asukohad oleks täpselt paigas, vastasel korral ei esinda proovitükk kaugseire andmetes õiget kohta ning tulemus ei pruugi olla täpne. SMI proovitükkide paremaks ära kasutamiseks võiks andmebaasi tekkida täiendav tunnus, millega antakse hinnang, kas antud proovitükk oleks kvaliteetne õpetusandmestiku jaoks ning võimalusel ka milliste tunnuste osas. Näiteks, proovitükk võib paikneda eraldise piiri lähedal ning sellisel juhul võib tekkida olukord, kus proovitüki asukohavea tõttu paikneb see vales eraldises ning maapealne andmestik ei lähe kokku proovitüki kirjeldusega ning meetod, millega andmeid analüüsitakse tekitab mitte korrektseid seoseid.

Tagavara hinnangute koostamine

SMI on kasutusel kahesuguseid proovitükid tagavara hinnangute mõttes. Tagavara proovitükkidel klubitakse puud, mille alusel koostatakse hektari tagavara mudel, mis lähtub enamuspüüligist, puistu vanusest ja kõrgusindeksist. Nende andmete alusel koostatakse kõikidele proovitükkidele tagavara, mille alusel on võimalik koostada ülevaateid väiksemate proovitükkide gruppide kohta.

Mudeli loomine on vajalik selleks, et vähendada väiksemate gruppide tagavara hinnangute viga. Kui grupp on piisavalt väike, siis ei pruugi olla sellesse sattunud tagavara proovitükke, mille alusel anda mõõdetud andmete põhjal hinnangut. Lisaks tuleb arvestada, et üldhinnang lähtub eeldusest, et suure hulga proovitükkide jagunemine vastab mingile jaotusele ning sellele vastavalt leitakse ka

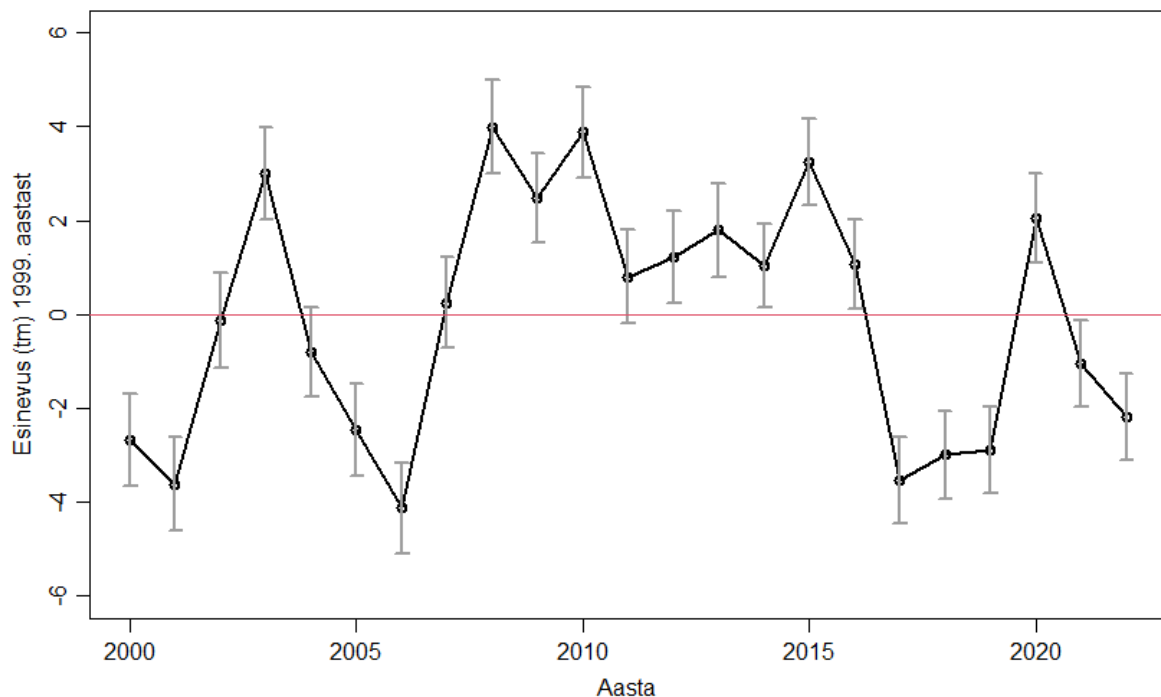
üldhinnangu usalduspiirid. Kui aga antud valim jaotada väiksemateks gruppideks, siis iga väiksema grupi siseselt on aga vaatluste hulk väiksem ning see ei vasta enam jaotusele, mille alusel on võimalik usaldusväärset hinnangut anda. Selleks, et iga grupi kohta anda ainult mõõdetud proovitükkide andmete alusel hinnang, peab ka selle grupi sisene jaotus olema esinduslik.

Käesoleva töö eesmärgiks on analüüsida kui pika aegrea põhjal on usaldusväärne koostada mudeleid (kõrguskõver ja tagavara), mida rakendatakse andmetele. Mudelite koostamine lähtub kahest valimi aspektist:

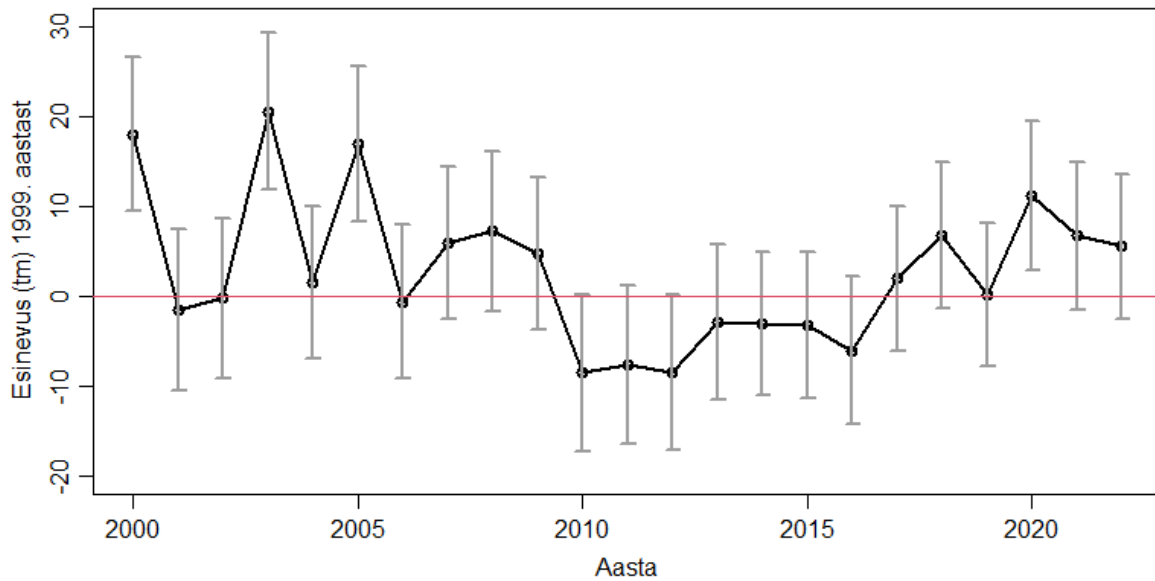
- Vaatluste hulga suurenemisega paraneb mudeli täpsus;
- Pikema aegrea puhul hakkavad tekkima ajalised trendid.

Modelleerimisel kasutati segamudelite modelleerimise meetodit R-i paketi lme4 funktsiooni nlmer, millega koostati kõrguskõver, aga täiendavalt hinnati aasta efekti.

Ajalise trendi tekkimiseks saab mudelisse täiendavalt lisada ka aasta. Sellest lähtuvalt analüüsiti, milline on aasta mõju nii kõrguskõvera kui ka tagavara mudelis. Mõlema mudeli puhul hinnati, kui palju erineb konkreetne aasta referentsaastast, milleks on esimene mõõtmise aasta 1999. Antud ei ole oluline, milline on referentsaasta, kuna erinevused teiste aastate puhul on konstantsed. Joonistel 19 ja 20 on esitatud nii kõrguskõver (19) kui ka tagavara (20) mudelis aasta mõju. Mõlema mudeli puhul on näha, et aastad on küll varieeruvad, aga kindlasuunalist trendi sellest täheldada ei saa.



Joonis 19. Üldisest määndide kõrguse mudelist erinevus võrreldes 1999. aasta tulemusega.



Joonis 20. Üldisest männikute tagavara mudelist erinevus võrreldes 1999. aasta tulemusega.

Aruandluses, kus kasutatakse pikemat aegrida korruga (LULUCF), võivad muutused tekkida ka mudelite erinevusest, kui erinevatel aastatel arvutatakse tulemus erinevate mudelite alusel. Seega on muutuste tõlgendamisel väga oluline jälgida, kas muutused on tegelikud muutused või on need meetodikast tingitud muutused. Kuigi meetodika võib olla arvutuslikult sama, siis mudelile uute parameetrite arvutamine erinevatel aastatel on sisuliselt uue meetodikaga arvutuste tegemine. Tuleb arvestada, et iga mudel lähtub modelleeritavatest andmetest ning mudel on hinnang koos veapiiridega.

Konsultatsioon

Projekti käigus konsulteeriti TÜ MSI töötajaid, kes vaatasid üle ja hindasid SMI metoodika statistilisi aluseid. Töö sisuks oli selgitada metoodikas seni tehtud valikuid ning anti tagasisidet projekti käigus tehtud töödele. Konsultatsiooni kogumahuks oli 10 tööpäeva.

Projekti käigus konsulteeriti Keskkonnaagentuuri töötajaid SMI infosüsteemi tehnilistes küsimustes. Töö sisuks olid SMI veebiinfosüsteemi täiendamine, andmebaasi struktuuri ja sisu selgitamine ning andmebaasi täiendamine ja koondhinnangute koostamise tööprotsessi selgitamine. Konsultatsiooni kogumahuks oli 20 tööpäeva.

Projekti käigus toimusid koosolekud ja konsultatsioonid vaheetappidena, mille käigus tutvustati uusi arvutusskriptide ning selgitati nende koostamise statistilisi ja sisulisi aluseid ning skriptid esitati tööversioonidena testimiseks. Konsultatsioonide kogumahuks oli 5 tööpäeva.

Kirjandusviited

- Asi, E., Karu, H., Sims, A., Timmusk, T., 2020. „Kasvuhoonegaaside heitkoguste inventuuri uuringud riikliku aruandluse täitmiseks metsamulla süsinikuvaru aastase muudu osas“. KIK 2018 metsandusprogrammi projekt nr 14341.
- Jānis Liepiņš, Andis Lazdiņš & Kaspars Liepiņš (2018) Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. and European aspen in Latvia, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33:1, 58-70, DOI: 10.1080/02827581.2017.1337923
- Jānis Liepiņš, Kaspars Liepiņš & Andis Lazdiņš (2021): Equations for estimating the above- and belowground biomass of grey alder (*Alnusincana* (L.) Moench.) and common alder (*Alnusglutinosa* L.) in Latvia, *Scandinavian Journal of Forest Research*, DOI: 10.1080/02827581.2021.1937696
- Uri, V. 2020. Eesti puistute biomassi mudelite väljatöötamine 2017-2020. Riigihanke 191205.
- Uri, V.; Kukumägi, M.; Aosaar, J.; Varik, M.; Becker, H.; Aun, K.; Lõhmus, K.; Soosaar, K.; Astover, A.; Uri, M.; Buht, M.; Sepaste, A.; Padari, A. (2022). The dynamics of the carbon storage and fluxes in Scots pine (*Pinus sylvestris*) chronosequence. *The Science of The Total Environment*, 817, ARTN 152973. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.152973.