

**TARTU ÜLIKOOL
ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT
ZOOLOOGIA OSAKOND
LOODUSRESSURSSIDE ÕPPETOOL**

Artur Reila

Puistu struktuuri ja mikrokliima muutused loodusmetsafragmentides

Magistritöö
Bioloogia
30 EAP

(Töö vormistust on kaitsmise järgselt parandatud)

Juh. Kardi Runnel, PhD
Raul Roosenvald, PhD

TARTU 2022

Puistu struktuuri ja mikrokliima muutused loodusmetsafragmentides

Servamõju on kahe või enama külgneva ala piiril aset leidev abiootiline või bioloogiline muutus, mille tingib alade vaheline erinevus. Servamõjud võivad avaldada metsa ökosüsteemidele tugevat negatiivset mõju, seda eriti fragmenteerunud maastikes paiknevatele väikesemõõtmelistele metsafragmentidele. Uuringuobjektideks olid majandatavates metsamaastikes paiknevad loodusmetsafragmendid. Uuringalad külgnesisid 6 - 20 aastat tagasi teostatud lageraiega ning jaotusid männikute ja viljakad segametsade gruppidesse. Töö uuris puistu struktuuri ja mikrokliimat muutvate servamõjude esinemist, servamõjude seoseid raiutud alal kasvava noore puistuga, külgneva ala avatusega ja servasuunaga. Struktuuriuuringute tulemused viitasid pika ulatusega (>70 m) servamõjule viljakate segametsade fragmentides. Piirneval alal kasvava puistu kõrguse kasvuga puude hukkumine metsafragmentide servades vähenes. Raiutud ala kõrgem avatus suurendas puude surevust metsafragmentide servades. Metsafragmentide ja kontrollalade servades olid suvised temperatuurimaksimumid kõrgemad ja talvised temperatuurimiinimumid madalamad kui alade siseosades. Järeldati, et männimetsa fragmentide struktuur on servamõjude suhtes suhteliselt kõrge vastupidavusega kuid viljakate segametsade struktuur on tundlik. Töö leiab, et viljakate segametsa fragmentides esineb vajadus täiendavate kaitsemeetmete rakendamiseks, tagamaks loodusmetsade lähedase puistu struktuuri säilimine ja edasine areng.

Märksõnad: Servamõju, servaepekt, fragmenteerumine, VEP, loodusmets, puistu struktuur, mikrokliima.

CERCS kood: B430 Metsakasvatus, metsandus

Changes in forest stand structure and microclimate in natural forest fragments

Edge effect is a biological or abiotic change that occurs on the border of two or more neighboring areas. Edge effects can have a significant negative impact on forest ecosystems, notably on small forest fragments in fragmented landscapes. The objects of this survey were small natural forest fragments located in managed forest landscapes. The study areas bordered with clear-cuts created 6 - 20 years ago, that were split into scots pine dominated group and spruce deciduous mixed forests groups. This thesis studied the edge effects affecting forest stand structure and microclimate, the relationships between edge effects and bordering regeneration forests, adjacent area openness and edge aspect. The results of the forest stand structure survey suggested the presence of a long-distance (>70 m) edge effect in spruce deciduous mixed forests fragments. Increasing neighboring stand height decreased the mortality of the trees at the edges of forest fragments. An increase in the adjacent area openness increased the mortality of the trees at the edges. The edges of forest fragments and also controls exhibited increased temperature maxima during summer and decreased temperature minima during winter, as compared to forest interior. It was inferred that the stand structure of scots pine dominated fragments are relatively highly resistant to edge effects, while the spruce deciduous mixed forests stand structure is susceptible. The study finds that added protective measures are needed to ensure the preservation and continued development of a natural-like forest stands structure in spruce deciduous mixed forest fragments.

Key words: Edge influence, edge effect, fragmentation, natural forest, forest structure, microclimate.

CERCS code: B430 Sylviculture, forestry, forestry technology

Sisukord

1. Sissejuhatus.....	4
1.1 Servamõjud puistu struktuurile.....	5
1.2 Servamõjud puistu mikrokliimale.....	7
1.3 Magistritöö eesmärk.....	9
2. Materjal ja metoodika.....	11
2.1 Uuringudisain ja välitööd.....	11
2.2 Andmetöötlus.....	19
2.3 Andmeanalüüs.....	20
3. Tulemused.....	22
3.1 Puistu struktuur metsafragmentides.....	22
3.2 Raiutud ala mõjud struktuurile.....	24
3.3 Viljakate segametsade mikrokliima ja piirneva ala mõjud.....	27
4. Arutelu.....	30
4.1 Metsafragmentide siseosa ja serva struktuur.....	30
4.2 Külgneva ala noore puistu ja avatuse mõju servade struktuurile.....	31
4.2 Mikrokliima metsafragmentides ja kontrollalades.....	33
4.3 Külgneva ala noore puistu omaduste mõju servade mikrokliimale.....	34
4.4 Järeldused.....	35
5. Kokkuvõte.....	38
6. Summary.....	39
7. Tänuõnad.....	41
8. Kasutatud kirjandus:.....	41
9. Lisad.....	49

1. Sissejuhatus

Servamõju võib kirjeldada kui kahe või enama külgneva ala piirimaile aset leidvaid bioloogilisi või abiootilisi muutuseid, mis on tingitud alade vahelisest erinevusest. Servamõju (sünonüüm: servae efekt) on sageli esinev nähtus, mis võib mõjutada erinevaid organismirühmasid näiteks imetajaid (e.g. Larsen et al., 2019), linde (e.g. Cox & Thompson, 2012), putukaid (Magura & Lövei, 2020), soontaimi (e.g. Harper et al., 2005) või nende vahelisi interaktsioone (e.g. Kelch et al., 2016). Servamõju olemus sõltub vaadeldavast objektist (Aune et al., 2005), uuritavast alast ning serva määratlemisest (Cadenasso et al., 2003; Ries et al., 2004; Jansson et al., 2011).

Maastike fragmenteerumine ja muutumine on üks liikide hävinemise peamisi põhjuseid (Fischer and Lindenmayer, 2007). Üheks selle komponendiks on servamõju, mis võib muuta maastike ja alade omadusi, muutes külgnevate alade olusid ühetaolisemaks. Olud servas on tüüpiliselt segu külgnevatele aladele omastest oludest kuid võivad isegi olla nende oludest ekstreemsemad (Chen et al., 1995; Magnago et al., 2015). Muutunud oludega osa elupaigast kutsutakse liigi- või liigirühmapõhistes servamõju käsitlustes servaelupaigaks ning servamõjudest puutumata osa tuumalaks (Harper et al., 2005; Riutta et al., 2014).

Metsaökoloogias on kõige rohkem tähelepanu pööratud servamõjudele majandustegevusel tekkinud lagendiku ja raiumata puistu piiril (e.g. Chen et al., 1995; Burton, 2002; Didham & Ewers, 2014; Baker et al., 2016). Reeglina vaadeldakse loodusväärtuste hoiu eesmärgil raiutud ala mõju raiumata

metsale, kuigi mõjud võivad avalduda mõlemas suunas (Murcia, 1995; Burton, 2002). Servamõju võib muuta servaalade olud metsa ökosüsteemile ebaomasteks (Murcia, 1995) ja metsaelustikule ebasoosaks (Didham & Lawton, 1999). Servamõju ulatust hemiboreaalses ja boreaalses metsaökosüsteemis loetakse 2–3 puistu ülarinde puukõrgusele vastavat distantssi servast (Aune et al., 2005).

1.1 Servamõjud puistu struktuurile

Puude vorm on plastiline ja kujundatud keskkonna poolt. Metsas kasvavate puude vorm kujuneb tüüpiliselt läbi valguskonkurentsi ning vähese tuulemõju (MacFarlane & Kane, 2017). Võrreldes avamaa oludes kasvavate liigikaaslastega iseloomustab metsas kasvavaid puid kõrgem kasv, saledama tüvi, peenemad oksad ja laiem võrastik (MacFarlane & Kane, 2017). Seetõttu on lageraie tõttu avatud metsaservale eksponeeritud metsapuudel suurem tõenäosus tuulekahjustuste tekkeks kui avamaa oludes kasvanud puudel (Burton, 2002; Gardiner et al., 2016).

Servamõjud võivad muuta puistu struktuuri varieeruvatel viisidel:

- **Puude kahjustumine**, mille ilminguteks võivad olla suurenenud surnud puude, tuulemurru, tuuleheite ja lamapuidu hulgad (Harper & Macdonald, 2002; Harper et al., 2005; Mascarúa López et al., 2006; Jönsson et al. 2007), vähenenud eluspuude rinnaspindala (Powell & Lindquist, 2011; Harper et al., 2015; Magnago et al., 2015) ja vähenemine puude võrastiku katvuses (Harper & Macdonald, 2002; Mascarúa López et al., 2006; Harper et al., 2015).
- **Puude suurenenud järelkasv** (Burton, 2002; Bílek et al., 2018), millega võib kaasneda eluspuude arvu tõus servades (Powell & Lindquist, 2011; Meeussen et al., 2020).
- **Puukoosluste muutumine** võib servas leida aset läbi valguslembeste liikide (Hamberg et al., 2009) ja pioneerpuuliikide arvukuse suurenemise (Harper et al., 2005; Jönsson et al. 2007). Puistule ebaomased puuliigid (Harper et al., 2005). Struktuur võib muutuda homogeensemaks (Jönsson et al., 2007).
- **Puude elujõulisuse vähenemine**. Puistu puude kahjustused võivad tingida suurenenud riski edasiseks puude kahjustumiseks ja hukkumiseks (Jönsson et al., 2007; Wallentin & Nilsson, 2014) või stressiseisundisse langemiseks (Jönsson et al., 2007; Trouillier et al., 2020).

Puude vastuvõtlikkus tuulekahjustustele tõttu tekkinud muutustele on varieeruv. Valitsevatesse tuulesuundadesse avanevates servades on suurem tõenäosus puude kahjustumiseks või hukkumiseks (Burton, 2002; Jönsson et al., 2007). Puude haavatavust tuuleoludele mõjutab samuti puuliik ja juuresügavus (Gardiner et al., 2016). Näiteks peetakse boreaalsetes metsaökosüsteemides harilikku kuuske (*Picea abies* L. H. Karst) tuulemõjudele üheks haavatavamaks puuliigiks (Burton,

2002; Gardiner et al., 2016), seevastu harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.) on häiringutele kohandunud (Kuuluvainen, 2002). Lehtpuud võivad olla servatekke järgsetele oludele okaspuudest parema vastupidavusega ja kohanemisvõimega (Jönsson et al., 2007). Teistest puistu puudest suuremad mõõtmed suurendavad haavatust nii puistu servades (Mascarúa López et al., 2006) kui ka väljaspool servamõju konteksti (Laarman et al., 2009).

1.2 Servamõjud puistu mikrokliimale

Tuulekahjustuse tõttu tekkinud muutused metsaserva struktuuris võivad oluliselt mõjutada metsaserva mikrokliimat (Didham & Ewers, 2014). Ekstreemsed abiootilised tingimused võivad fragmentides tingida puude surevust (Magnago et al., 2015) ja suurenda puude haavatavust tuulekahjustusele (Teobaldelli et al., 2020). Puistu struktuuri-seoselised mikrokliima muutused võivad mõjutada organismide morfoloogiat, leviku- ja käitumismustritele (Tuff et al., 2016; Trouillier et al., 2020). Mikrokliima on ka üheks peamiseks serva ja siseosa taimestiku erinevusi tingivaks teguriks (Magnago et al., 2015). Mitmed organismirühmad, näiteks sammaltaimed (Hamberg et al., 2009; Harper et al., 2015) ja samblikud (Esseen & Renhorn 1998), võivad olla mikrokliimamuutuste suhtes tundlikud. Fragmentides võivad olla soositud liigid, mis taluvad kõrgemaid temperatuure ja suuremat temperatuuride kõikumist, samas kui kitsa temperatuurinišiga liikidel on oht fragmentidest kaduda (Tuff et al., 2016).

Raiutud aladele on tüüpiline suurem valgus- ja soojuskiirguse hulk ning intensiivsem aurumine kui metsas (Chen et al., 1993). Servaalade valgusrežiim võib olla kordades erinev metsa omast ja

muutus võib püsida pärast ligikaudu kahte aastakümnet (Renhorn et al., 1997). Eksponeeritus päikesele võib servaaladel tingida ka kõrgemad päevased õhutemperatuurid (Chen et al., 1993, Davies-Colley et al., 2000; Wright et al., 2010; Baker et al., 2016), suhtelise õhuniiskuse vähenemise (Matlack, 1993; Chen et al., 1995) ja pinnatemperatuuride suurenemise (Davies-Colley et al., 2000). Serva mikrokliimale omistatakse ka suuremat kõikumist (Baker et al., 2014).

Mikrokliima-muutuste ulatus sõltub metsa serva sulgumise astmest, st puude külgvõrastiku ja taimeistiku kasvu ja tihenemisest servas (Didham et al., 1999; Harper et al., 2005; Hamberg et al., 2009). Sulgunud metsaserv võib tugevalt vähendada mikrokliimaatiliste servamõjude ulatust ja tugevust (Matlack, 1993; Didham & Lawton 1999; Hamberg et al., 2009; Wright et al., 2010). Serva sulgumine on omakorda seotud teiste bioloogilistes servamõjude ulatusega, näiteks sõltub sellest alale ebaomaste putukate või taimede ligipääs metsaga alade siseossa (Magura & Lövei 2020; Hamberg et al., 2009).

Lisaks mõjutavad mikrokliima-muutuste ulatust tuuleolud ja serva avatuse suund. Tuul võib muuta temperatuuri- ja õhuniiskuseolusid (Davies-Colley et al., 2000; Chen et al., 1995; Wright et al., 2010) või tingida puistut kahjustades püsivamad muutused mikrokliimaatilistes oludes (Burton, 2002). Mikrokliima muutused on suurimad päikesele eksponeerituimas suunas, nt põhjapoolkeral metsa lõuna- või edelaservas (Matlack, 1993; Chen et al., 1995; Esseen & Renhorn, 1998). Selgetel päevadel võib vastavatele servadele langeda ligi kaks suurem päikesekiirguse hulk kui ida- või lääneservadele (Chen et al., 1993). See toob kaasa kõrgemad päevased keskmised temperatuurid ja kõrgemad maksimumtemperatuurid (Hofmeister et al., 2019). Õhuniiskuse muutustes esineb samuti

seos serva avatuse suunaga, enam päeval ja vähesel määral öösel (Chen et al., 1993, 1995). Valgusolude muutus, minimaalse mõjutatusega põhjasuunda avanevate servades piirdub peamiselt hajutatud ja peegeldunud valguse hulga suurenemisega (Chen et al., 1993).

1.3 Magistritöö eesmärk

Kaitstavate metsade pindala Eestis on viimastel aastakümnetel kasvanud (Korjus et al., 2012) samas on ligikaudu 10% kaitstavatest loodusmetsadest säilinud väikeste fragmentidena (<15 ha), mis on ümbritsetud majandatavatest metsamaastikest, põllu- või elamumaast (Lõhmus, 2016). Majandustegevus, eriti lageraie, mis tekitab tugevalt kontrastse serva, omab kõrget potentsiaali muuta loodusmetsafragmentide struktuuri ja mikrokliimat. Kuna loodusmetsafragmendid säilitavad ja levitavad loodusmetsades esinevatele oludele spetsialiseerunud organisme, võivad tekkivad muutused vähendada vastava elustiku säilimist. Näiteks ligi viiendik Eesti samblikest võivad olla vanametsa oludele kohastunud liigid (Lõhmus & Lõhmus, 2019).

Kaitstavate loodusmetsafragmentide (edaspidi metsafragmendid) seisukorda Eestis on vähe uuritud (Häkkilä et al., 2021). Samas on metsafragmendid haavatavad servamõju tõttu tekkinud muutustele ja kahjustustele. Mõju loodusmetsade struktuurile võib olla tugev, kuna vanade ja kõrgete metsade struktuur on tuulemõjudele eriti haavatav (Mayer et al., 2005; Valinger & Fridman, 2011; Zeng et al., 2009). Metsafragmentide mõjutatus võib olla ka ulatuslik, sest väikese ala puhul on serva poolt mõjutatud proportsioon suur (Ries et al., 2004). Näiteks on Rootsis ja Inglismaal leitud, et 45–81% sealsete metsafragmentide pindalast võib olla servamõjuline (Aune et al., 2005; Riutta et al., 2014).

Siinse magistritöö uuringueesmärkideks on: I) hinnata metsafragmentide struktuurilist ja mikrokliimaatilist seisukorda ning nende seoseid servamõjudega II) välja selgitada tegurid, mis servamõju suurendavad või vähendavad.

Uuring keskendub kahele erineva ökoloogiaga metsatüübile: liivmuladel männikud (edaspidi: männikud) ja viljakad kuuse segametsad (edaspidi: viljakad segametsad). Männi- ja kuuseenamusega metsad moodustavad üle 50% kaitstavate metsade kogupindalast (Keskkonnaagentuur, 2020). Lisaks esindab harilik mänd häiringutaluvuselt kõrge häiringutaluvusega ja harilik kuusk madala häiringutaluvusega puuliike.

Uuringu hüpoteesid on vastavad:

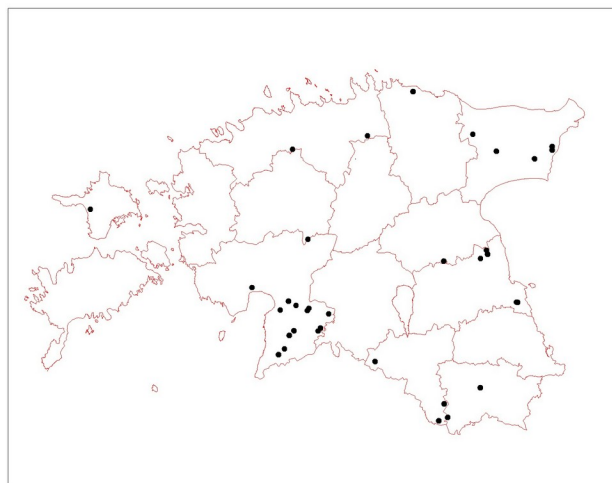
1. Puistu struktuuri muutva servamõju esinemine sõltub metsatüübist ning mõjutab viljakaid segametsi enam kui männikuid. Seda tulenevalt asjaolust, et mänd on üks kõrgema häiringu taluvusega puuliikidest ja viljakates segametsades levinud harilik kuusk üks madalama häiringutaluvusega puuliikidest meie kliimavööndis (Burton, 2002; Gardiner et al., 2016).
2. Külgneva ala puistu kõrguse ja tiheduse kasv suurendavad selle puhverdavat mõju. Hüpotees põhineb teadmisel, et servamõjude tugevus on seotud külgnevate alade vahelise (nt. biomassi) erinevusega (Harper et al, 2005; Esseen et al., 2016). Samas on leitud, et näiteks piirnevate alade vahelise kõrguserinevuse seosed puistuservade kahjustumisega ei ole väljaspool teoreetilisi mudeleid palju uuritud (Zeng et al., 2009).

3. Lääne- ja edelasuunas avatud servades on enam tuulekahjustusi kui teistes suundadega servades. Kõrgendatud kahjustuste hulka on seostatud servadega, mis avanevad peatuule suundadesse (Burton, 2002; Jönsson et al., 2007). Eestis valitsevad peamiselt lääne ja edela tuuled (Keskkonnaagentuur, 2019).

2. Materjal ja metoodika

2.1 Uuringudisain ja välitööd

Uuringualade valimisse kuulusid 36 ala Eestis (Joonis 1). Kuna siinne uuring moodustab alamosa suuremast teadusprojektist, valiti alad lähtuvalt selle projekti eesmärkidest ning peamiseks valikukriteeriumiks oli nende varasem uuritus metsaliikide osas.



Joonis 1. Uuringualade paiknemine kaardil

Uuritavad alad jagunesid kahte gruppi: viljakad segametsad (naadi, sinilille, angervaksa, tarna ja jänesekapsa-mustika, kasvukoha tüüpidest) ja männikud (mustika, pohla, jänesekapsa-pohla ja kanarbiku kasvukohatüüpidest). Mõlemad grupid koosnesid 18 alast, millest 12 olid metsafragmendid ja 6 kontrollala, mis paiknesid suurema metsa-ala sees. Ühte kontrollala männikute grupist analüüsisesse ei kaasatud, tulenevalt veekahjustustega seostatud struktuurimuutustest. Aladel kasvavate puistute vanused jäid vahemikku 90 – 214 aastat. Puistute keskmine vanus oli 136 aastat. Metsafragmendid esindasid rangelt kaitstavaid loodusmetsasid (Tabel 1), millest 22 olid vääriselupaigad. Tegemist oli 2 ha suuruste aladega või 2 ha suuruste osadega suurematest (kuni 15 ha) metsafragmentidest. Fragmentid paiknesid majandatavates metsamaastikes ja piirnesid vähemalt ühest küljest 6 – 20 aastat tagasi (lage)raiutud alaga, mis oli uuringu ajaks varieeruval määral uuenenud või uuendatud.

Tabel 1. Uuringualade iseloomustus

Viljakad segametsad								
Koordinaadid	Ala nr.	Ala tüüp	Vanim puurinne	Boniteet	KKT	KU %	Raie vanus	Mikrokliima
27.163825, 59.179969	1.	kt	134	II	ND	54	-	+
27.323963, 58.279327	2.	kt	205	II	ND	45	-	+
24.691718, 58.045237	3.	kt	142	III	AN	30	-	+
24.883046, 58.163019	4.	kt	152	II	JM	25	-	-
26.926896, 58.548560	5.	kt	156	III	JM	50	-	-
27.601987, 59.124132	6.	kt	104	I	JM	40	-	-
24.799980, 58.152119	7.	kt	112	I	ND	13	19	-
25.071410, 58.147700	8.	fr	145	I	JM	45	20	-
26.983189, 58.548782	9.	fr	109	II	ND	19	18	+
25.193383, 58.248986	10.	fr	142	la	TA	80	8	+
24.647796, 58.275741	11.	fr	122	III	jm	40	16	+
24.826665, 58.301007	12.	fr	162	II	JM	85	15	+
24.742207, 58.327263	13.	fr	132	III	JM	50	14	+
26.900621, 59.286374	14.	fr	114	II	ND	75	15	+
24.808073, 59.226697	15.	fr	105	II	SL	54	13	+
24.745315, 58.123911	16.	fr	154	III	AN	67	6	+
26.511299, 58.542446	17.	fr	126	II	ND	50	11	+
25.097702, 58.165647	18.	fr	130	II	JO	40	18	+
Männikud								
Koordinaadid	Nr.	Ala tüüp	Vanim puurinne	Boniteet	KKT	MÄ %	Raie vanus	
27.812345, 59.191503	19.	kt	174	IV	KN	100	-	
26.455440, 57.696400	20.	kt	183	II	JP	78	-	
26.999893, 58.596091	21.	kt	186	III	PH	100	-	
27.309714, 58.280563	23.	kt	214	III	MS	70	-	
26.225646, 59.553024	24.	kt	113	II	MS	55	-	
25.687997, 59.300065	25.	kt	158	III	JP	60	14	
27.009699, 58.572263	26.	fr	106	I	JP	46	8	
25.701724, 57.960579	27.	fr	190	II	JP	85	15	
26.863856, 57.784284	28.	fr	137	II	MS	70	10	
27.807678, 59.169794	29.	fr	93	II	PH	79	10	
26.489044, 57.616054	30.	fr	96	I	PH	97	9	
26.388179, 57.597513	31.	fr	149	I	JP	85	11	
24.972815, 58.283437	32.	fr	171	III	MS	59	20	
24.971176, 58.693153	33.	fr	160	III	MS	60	14	
22.484740, 58.866323	34.	fr	133	III	PH	70	12	
24.332378, 58.410172	35.	fr	172	II	MS	70	12	
25.680267, 59.298844	36.	fr	167	III	PH	75	9	

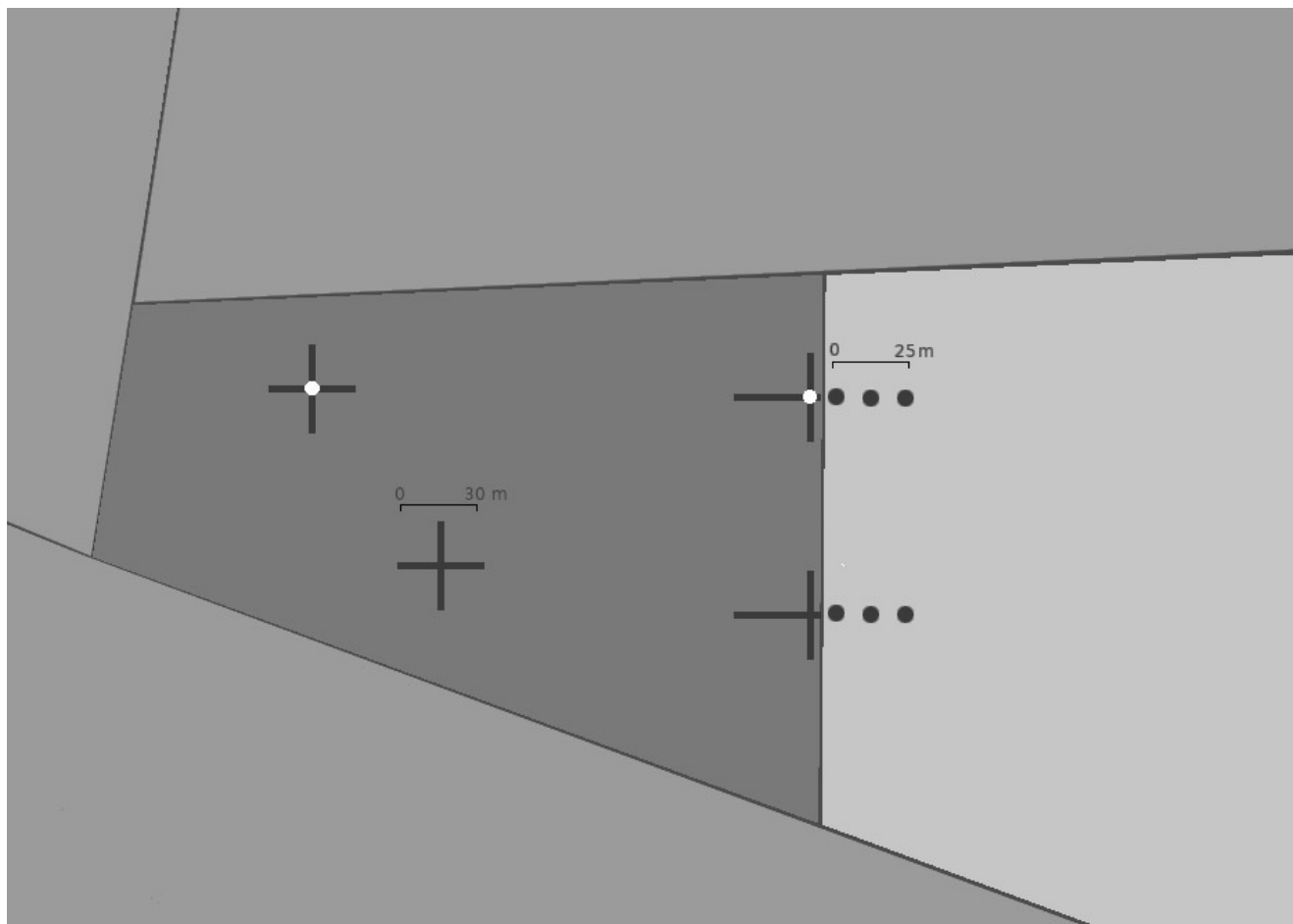
Lühendid: kt - kontrollala, fr - mentsafragment, KU % - kuuse protsent esimeses rindes, MÄ % - männi protsent esimeses rindes.
Kasvukohatüübid (KKT): PH - pohla, MS - mustika, JP - jänesekapsa-pohla, KN - kanarbiku, JM - jänesekapsa-mustika, ND - naadi, SL - sinilille, AN - angervaksa,
TA - tama-angervaksa, JO - jänesekapsa-kõdusoo

Igale uuringualale paigutati geinfosüsteemis 4 – 6 mõõtepunkti; punktid paigutati alade siseosasse ja hiljutise lageraiega piirnevasse serva (Joonis 2). Igal alal paiknes kaks punkti siseosas, servas asetsevate punktide arv varieerus kahest neljani kuna mõned alad omasid mitut hiljutise lageraiega piirnevat serva. Paigutamisel üritati tagada, et mõõtepunktid asetseksid üksteisest võimalikult kaugel ning, et siseosa mõõtepunkt asetseks võimalikult kaugel ala servadest. Siseosa uuringupunktid kaugus servast oli $68,5 \pm 31,5$ m (mediaan). Servapunkte asukoht täpsustati välitööde käigus alade füüsilisele servale põhinedes. Ala füüsiline serv defineeriti kui lageraiest puutumata puurinde liin. Väiksemate, looduslikult puudeta puistu osade esinemisel, loeti need serva osaks. Mõõtmised viidi läbi 2019 a. kesksuvest kuni hilissügiseni. Mõõtmised peamistel uuringualadel teostati transektmeetodil, kasutades kahte 30 m pikkust üksteisega ristuvat mõõtelin (Joonis 2). Servaosa liinide paigutus järgis alade serva. Üks liinidest asetses servaga paralleelselt, 5 meetri kauguselt servast, teine suundus servaga täisnurkselt ala siseosa suunas. Siseosa liinid paigutati ida–lääs ja põhi–lõuna suunaliselt.

Mõõtmiste käigus kirjeldati kahel pool transekti järgmiste struktuurielementide omadused: eluspuud, surnud puud (rinnasdiameeter: ≥ 10 cm), tüükad (murdunud ladvaga surnud puud, rinnasdiameeter ≥ 10 cm; $h \geq 1,3$ m), kännud (kõrgeim terviklik punkt ≥ 10 cm; $h < 1,3$ m;) ja tuuleheitejuurestikud (Lõhmus & Kraut, 2010). Eluspuid kirjeldati transektist 3 m raadiuses, kõiki teisi nimetatud struktuurielemente transektist 5 m raadiuses. Lisaks kirjeldati ka transektidega ristuva lamapuidu omadused (diameeter ≥ 10 cm ristumisel; püstised kaldus puud $< 45^\circ$). Kõigil objektidel määrati liik (kui võimalik) ja paiknemine. Püstistel puudel mõõdeti rinnasümberrõõr ja kändudel mõõt kõrgeimas terviklikus punktis. Tüügaste ja kändude puhul märgiti kõrgus. Surnud-

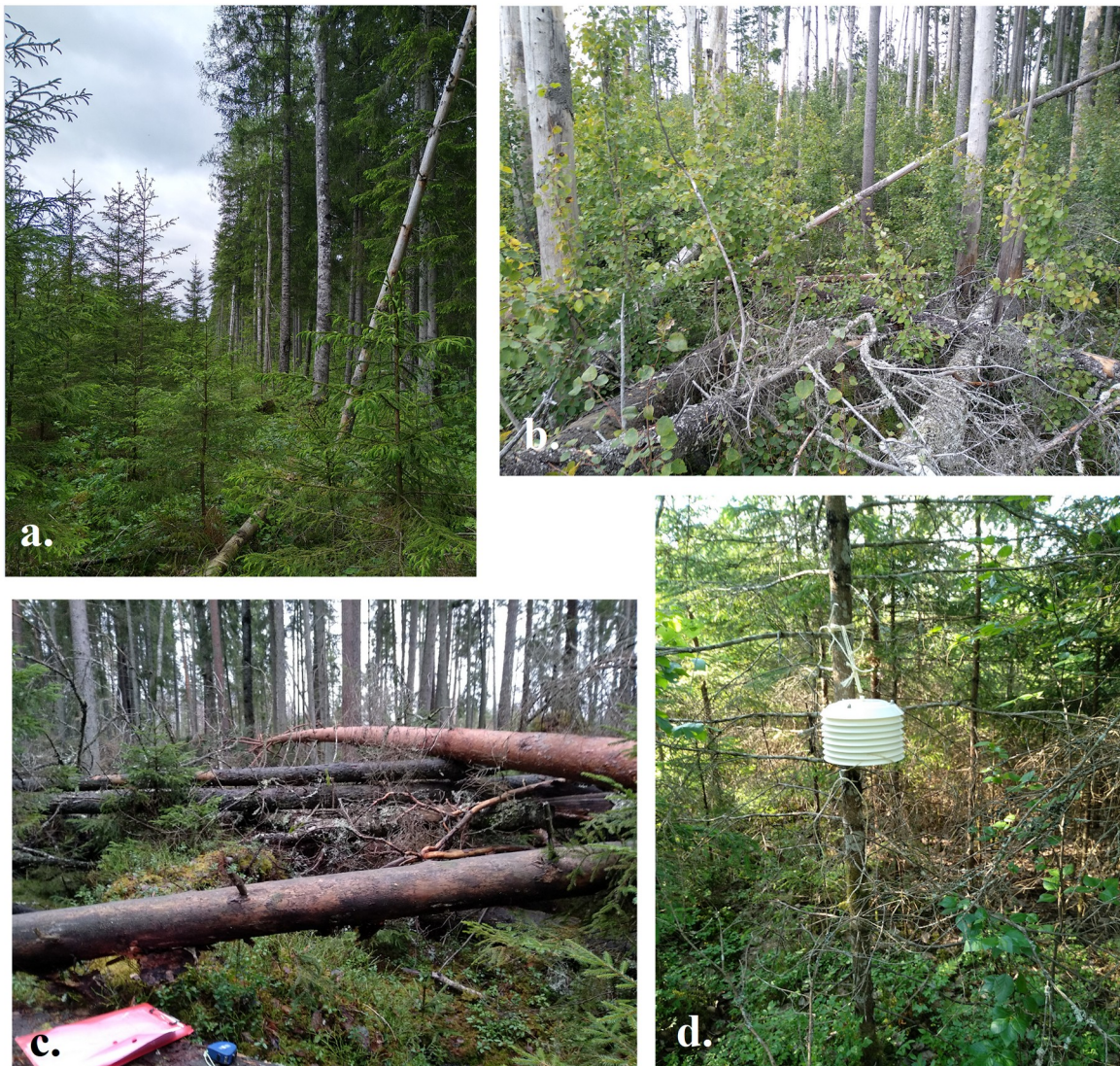
ja lamapuidu kõduastet hinnati noameetodil 5-klassilise hinnanguga (Renvall, 1995) (I: esineb lehti või okkaid, II: nuga läbistab 1–2 cm, III: nuga läbistab 3–5 cm, IV: nuga läbistab puidu kogu tera ulatuses, V: puit käega pudendatav). Eripärastele objektidele lisati vastavad märkused (raie, juuremädanik jms). Raiutud alade mõõtmised teostati kolmes mõõtekohas: 5, 15 ja 25 m kaugusel servast metsafragmendiga (Joonis 2). Igas punktis mõõdeti kümne kõige lähema ülarinde puu rinnasümbermõõt, märgiti liik ja viimase mõõdetud puu kaugus mõõtekoha algpunktist. Juhul kui puude kõrgus ei küündinud 1,3 meetrini, mõõdeti puude ümbermõõt kõrgeimast punktis. Kolmel, hinnatavalt keskmise kõrgusega puul, mõõdeti ka kõrgus, kasutades kõrgusemõõtjat Vertex IV-60 (Haglof).

Mikrokliima uuringud kestsid 2019 a. juuni algusest kuni 2020 a. aprillini. Uuring hõlmas 13 viljaka segametsa ala (Tabel 1), millest 10 olid raiega piirnevad alad ja ülejäänud kontrollalad. Uuringud viidi läbi kasutades temperatuuri ja õhuniiskuse mõõtejaamu Tinytag Plus 2 – TGP-4500 (Gemini Data Loggers), mõõtmise intervalliga üks tund. Mõõdeti intervalli õhutemperatuuride miinimum ja maksimum ning intervalli lõpus esinevat temperatuuri ning õhuniiskust. Enne aladele viimist, mõõtejaamad paigutati päikesekaitse ümbristesse. Igal alal paigutati üks mõõtejaam ala siseosa mõõtepunkti ja üks ala servas asetsevasse mõõtepunkti, orienteeruvalt 5 meetri kaugusele servast. Mõõtejaamad kinnitati paigaldamise lihtsuse kaalutlustel väikese kuni keskmise suurusega puude külge (30–50 cm rinnasümbermõõt), kõrgusele 1,3 meetrit.



Joonis 2. Transektmõõtmiste ja mikrokliima uuringute plaan.

Uuritava metsaga ala on esitatud tumedalt ja raiutud ala heledalt. Esitatud on mõõteliniid (must ristuv joon), mikrokliima mõõtjad (valge täpp) ja raiutud ala uuringupunktid (must täpp) ja nende paiknemised.



Joonis 3. Uuringualade fotod

- a) noorendiku ja vanametsa serv
- b) sumud püstpuudega ja järelkasvuga serv
- c) tuuleheitelised tüved
- d) mikrokliima mõõõtja tiheda noorendikuga piirneva loodusmetsa servas

2.2. Andmetöötlus

Puistustruktuuri analüüsideks arvutati erinevad alade struktuuri ja selle muutuseid kirjeldavad tunnused. Peamise kahjustustunnusena arvutati hukkunud puude koguhulk, mis oli esimeses kolmes kõduklassis esinenud surnud puude, tüügaste ja tuuleheite juurestike summa transektil. Värske kuni keskmiselt kõdunenud puit (I, II, III kõduaste) eeldati olevat tekkinud fragmentides peale lageraiet piirneval alal. Lisaks arvutati teised puistu struktuuri kirjeldamiseks esimeses kolmes kõduastmes tüügaspuude (arv/ha), tuuleheitejuurestike (arv/ha) ning lamapuidu hulgad (m^3/ha). Arvutati elus ja surnud püstise puidu (Padari, 2004, järgi) ning lamapuidu hulgad (m^3/ha). Puidutagavara arvutamiseks leiti puu liigi, mõõdetud rinnaspindala ja puistu boniteedi abil puu kõrgused. Lamapuidu tagavara arvutati Van Wagner (1968) valemiga.

Raiutud aladel arvutati seletava tunnusena puistu tihedus hektari kohta. Selleks kasutati kahte valemit 1) ringi pindala valemi põhjal pindala (m^2), milles asetses 10 lähimat puud: $S = \pi \times (r^2) / 10000$, kus r tähistas raadiust (kaugeima puu kaugust, cm). Pindala põhjal arvutati puistu tihedus (n/ha) kasutades valemit: $X = Y / S \times 10000$, millest Y oli raiutud alal loetletud puude arv - 1 ja S oli eelneva valemiga arvutatud pindala (m^2). Teiseks seletavaks raiutud puistu tunnuseks oli raiutud ala puude keskmine kõrgus. Raiutud ala puistut puudutavateks analüüsideks arvutati kõige kolme mõõtepunktide keskmised väärtused.

Raiutud aladele omaduste põhjal arvutati ilmakaaretunnus ja kaks raiutud ala avatustunnust. Ilmakaaretunnus arvutati, viies servade avanemise suund kraadimõõdustikust lineaarsele kujule

(McCune & Keon, 2002; Hofmeister et al., 2019). Mikrokliima mõjutatuse puhul eeldati maksimaalset mõjutatus lõunaservadel ja minimaalset mõju põhjaservadel. Arvutati kaks avatustunnust 1) koguavatus ja 2) lääne-edela suunaline avatus. Koguavatus leiti mööda pea- ja lisailmakaari ning lääne-edelasuunaline avatus vastava kahe ilmakaare summana, maksimaalselt 300 meetri ulatuses (Scott & Mitchell, 2005).

Mikrokliima analüüsideks valiti mõõteperioodil terviklikus ulatuses mõõdetud kuude seas kõige külmem ja kõige kuumem kuu, milleks olid vastavalt august 2019 ja veebruar 2020. Augustikuu mõõtudest analüüsiti kuu aja ööpäeva kõrgeimate temperatuuride keskmist ning kuu aja pärastlõunaste (kl. 13 - 17) õhuniiskuste keskmist, mis oli tüüpiline õhuniiskuse madalseisu periood. Veebruarikuu puhul kuu aja ööpäeva kõige külmemate temperatuuride keskmist. Uuriti fragmentide ja kontrollalade mikrokliimaatilisi erinevusi ja raiutud ala omadustega seonduvaid muutuseid mikrokliimas.

2.3 Andmeanalüüs

Andmeanalüüs teostati programmiga 'R' (ver. 4.0.5; The R Foundation) keskkonnas 'Eclipse' (ver. 4.16.0; Eclipse Foundation, Inc) lisandpaketiga StatET 4.1 (Stephan Wahlbrink). Analüüsid teostati kasutades üldisi lineaarseid mudeleid (GLM), segamudeleid (GLMM) ja täiendatud juhuslikustamistest (5000 permutatsiooni; Harper et al., 2011). Juhuslikustamistestide kasutus leidis aset juhtudel, kui lineaarsete (sega)modelite eelduste ei olnud täidetud. Analüüsides läbiviimisele eelnes eelduste kontroll. Selleks kasutati mudelite jääkide diagramme (histogramm,

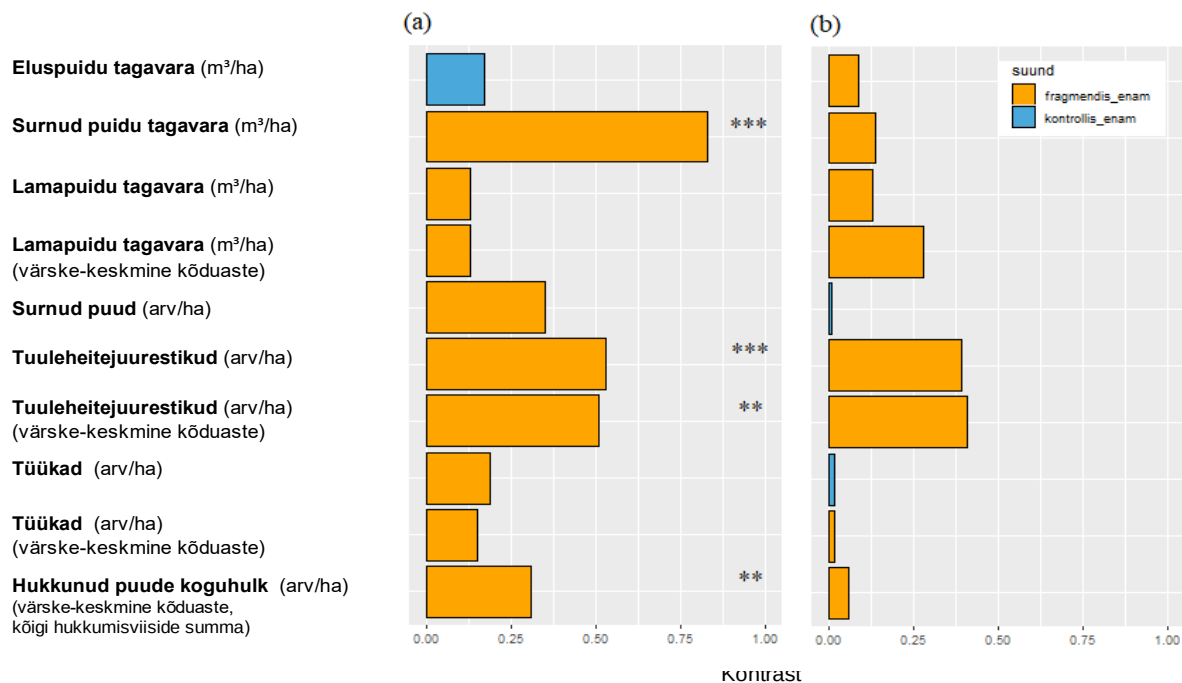
normaaljaotuse Q-Q plot, jäägid & fits plot) ning Shapiro-Wilk testi ($p < 0,05$). Mudelites kasutatud seletavaid muutujaid testiti kollineaarsuse suhtes (Spearmani korrelatsioon). Lineaarsete segamudelite puhul kaasati mudelitesse seletavate muutujate vahelised interaktsioonid, kuid kui interaktsioonid osutusid ebaoluliseks need eemaldati. Ka teised ebaolulised seletavaid muutujad eemaldati lõppmudelitest (trimmimine).

3. Tulemused

3.1 Puistu struktuur metsafragmentides

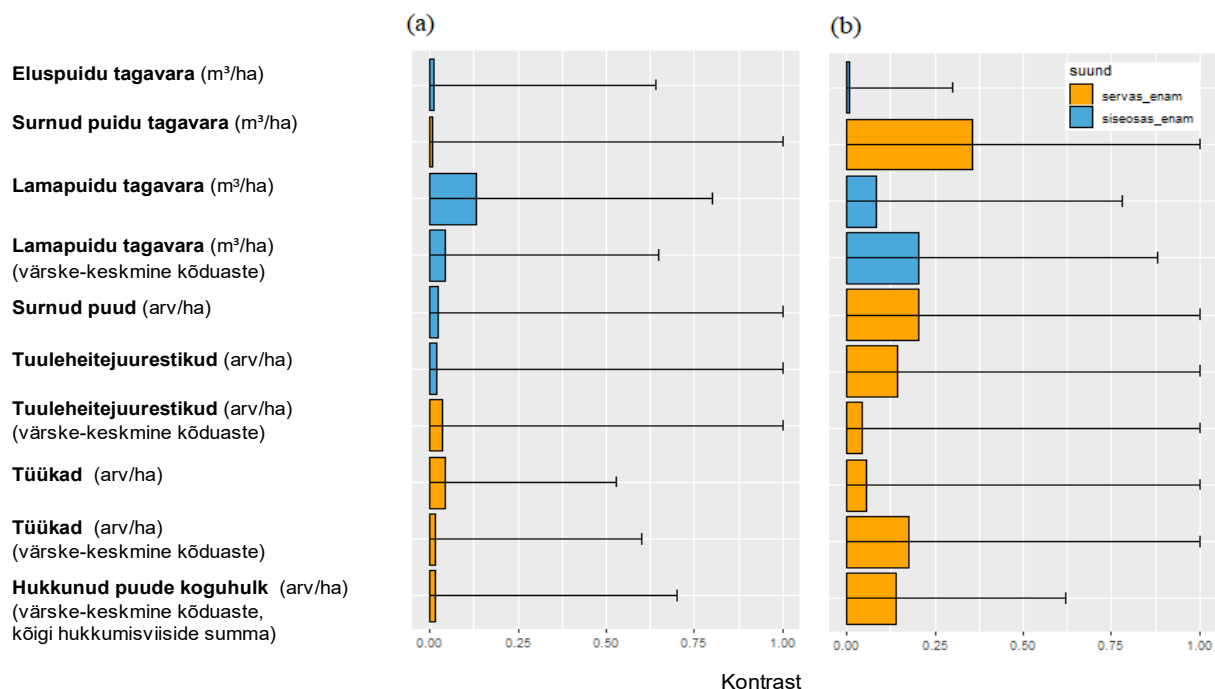
Viljakate segametsade metsafragmentide ja kontrollalade siseosad erinesid üksteisest mitme struktuuritunnuse osas, kuid männikutes erinevusi ei tuvastatud (Joonis 4a, b). Viljaka segametsa metsafragmentide siseosas oli suurem hukkunud puude koguhulk (Lisa: Tabel 2) ning samuti ka suurem surnud püstise puidu tagavara (Joonis 4a; Lisa: Tabel 2;). Fragmentide siseosas esines suurem tuuleheitejuurestike hulk (kõik kõduastmed) ning ka vähe kuni keskmiselt kõdunenud tuuleheitejuurestike hulk (Joonis 4a). Männikute puhul oli metsafragmentides tüüpiline mõnevõrra suurem tuuleheitejuurestike ja vähe kuni keskmiselt kõdunenud lamapuidu hulk kui kontrollaladel, kuid see erinevus ei osutunud statistiliselt oluliseks (Joonis 4b).

Metsafragmentide serva ja siseosa struktuuritunnuste vahel olulisi erinevusi ei tuvastatud, ei viljakate segametsade ega männikute puhul (Joonis 5a, b; Lisa: Tabel 3). Viljakate segametsade fragmentide struktuur oli läbivalt väga ühetaoline, st serva ja siseosa kontrastid olid väiksed (Joonis 5a). Männikutes olid kontrastid serva ja siseosa vahel suuremad, kuid jäid siiski statistiliselt ebaolulisteks. Lisaks olid erinevused männikute servade ja siseosade vahel kohati erisuunalised: nt puude suremus oli kõrgem servades, kuid lamapuidu hulk oli suurem siseosas (Joonis 5b).



Joonis 4. Metsafragmentide ja kontrollalade siseosde puistustruktuuri parameetrite võrdlus kontrastidena

(a) viljakates segametsades ja (b) männikutes. Tulbad tähendavad metsafragmenti ja kontrollala vahelist muutuja keskmist kontrasti, mis on arvutatud Harper et al. (2011) valemi $[(\text{fragment} - \text{kontroll}) / (\text{fragment} + \text{kontroll})]$ kohaselt. Tärnid tähistavad täiendatud juhuslikustamis testi (Harper et al., 2011) oluliseid väärtuseid: $p < 0,05$ *; $p < 0,01$ **; $p < 0,001$ ***



Joonis 5. Metsafragmentide siseosade ja servade puistustruktuuri parameetrite võrdlus kontrastidena

(a) viljakates segametsades ja (b) männikutes. Tulbad tähendavad metsafragmenti ja kontrollala vahelist muutuja keskmist kontrasti, mis on arvutatud Harper et al. (2011) valemi $[(\text{serv} - \text{siseosa}) / (\text{serv} + \text{siseosa})]$ kohaselt. Vurrud tähistava maksimaalset looduses esinenud fragmentisest kontrasti. Tärnid tähistavad täiendatud juhuslikustamis testi (Harper et al., 2011) oluliseid väärtuseid: $p < 0,05$ *; $p < 0,01$ **; $p < 0,001$ ***

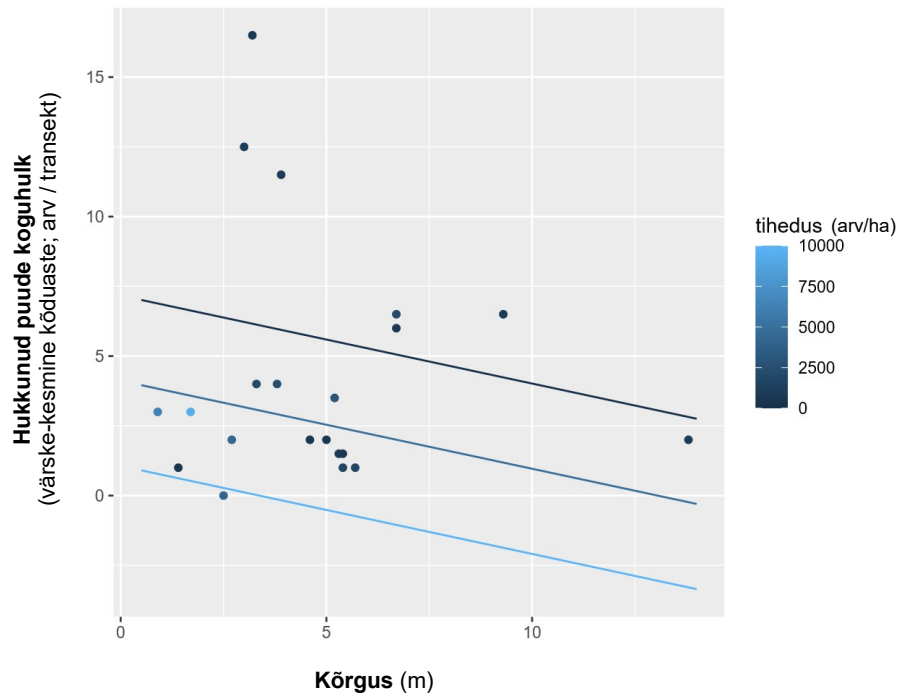
3.2 Raiutud ala mõjud struktuurile

Piirneval raicalal kasvava puistu mõju metsafragmendi serva struktuurile ilmnes männikute puhul, kuid mitte viljakates segametsades. Puistu kõrguse kasvuga vähenes männikutes vähe kuni keskmiselt kõdunenud hukkunud puude koguhulk servas (Joonis 6). Lisaks jäi piirneva raieala puistu tiheduse ja vähe kuni keskmiselt kõdunenud hukkunud puude hulga vaheline negatiivne seos napilt väljapoole olulisuspiiri (Lisa: Tabel 4). Viljakates segametsades selliseid seoseid ei tuvastatud (Lisa: Tabel 4).

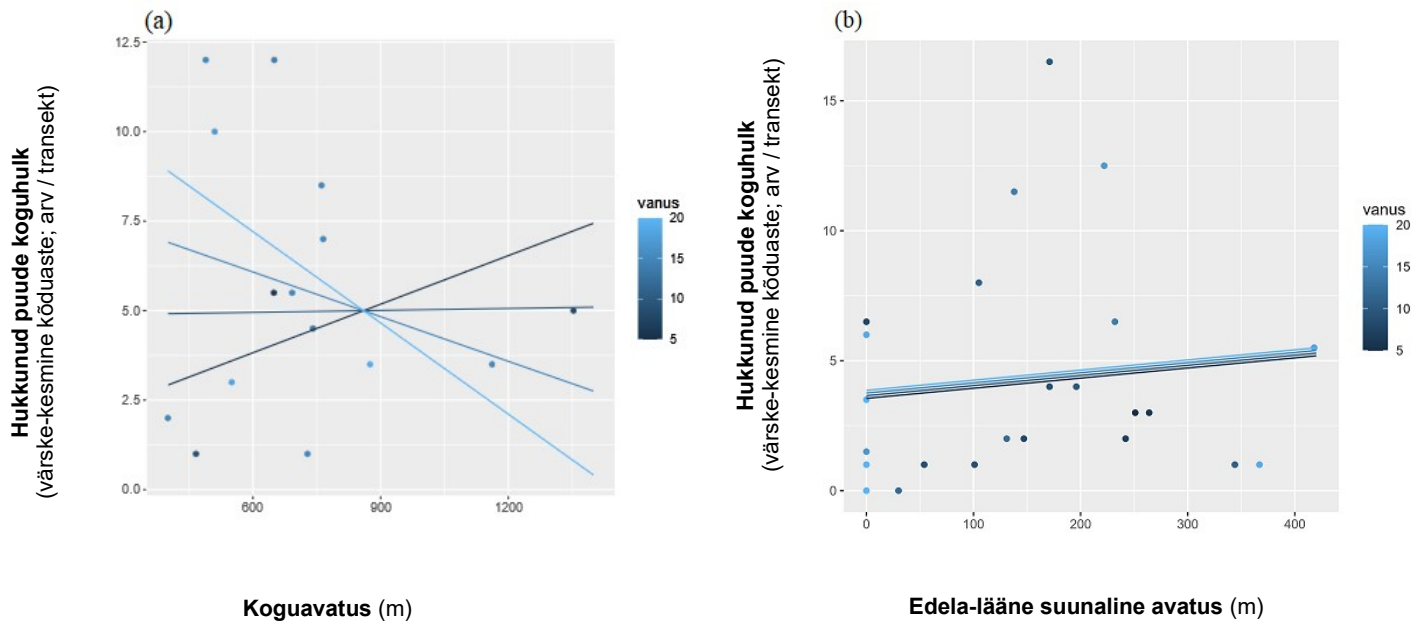
Serva avatus mõjutas vähe kuni keskmiselt kõdunenud hukkunud puude koguhulka servas nii kuusikute kui ka männikute puhul. Kuusikute puhul kaasnes suurema avatusega järsk serva kahjustumine, mille ilmingud ajas vähenesid (oluline vanuse ja avatuse interaktsioon; Joonis 7a, Lisa: Tabel 5). Seevastu väikesema avatusega servades suurenesid kahjustused serva vananedes (Joonis 7a). Männikutes suurenes värske kuni keskmises kõduastmes hukkunud puude koguhulk serva vananedes ning lääne-edela suunalise avatuse suurenedes (Joonis 7b)

3.3 Viljakate segametsade mikrokliima ja piirneva ala mõjud

Nii metsafragmentide kui kontrollalade servades esinesid siseosadest kõrgemad suvised maksimumtemperatuurid ja madalamad talvise miinimumtemperatuurid (Joonis 8a, b; Lisa: Tabel 6). Alade vahelisi õhuniiskuste erinevusi ei ilmnunud (Joonis 8c; Lisa: Tabel 6). Serva mikrokliimat mõjutasid serva avatuse suund ja raiutud alal kasvava noore puistu tihedus. Talvised

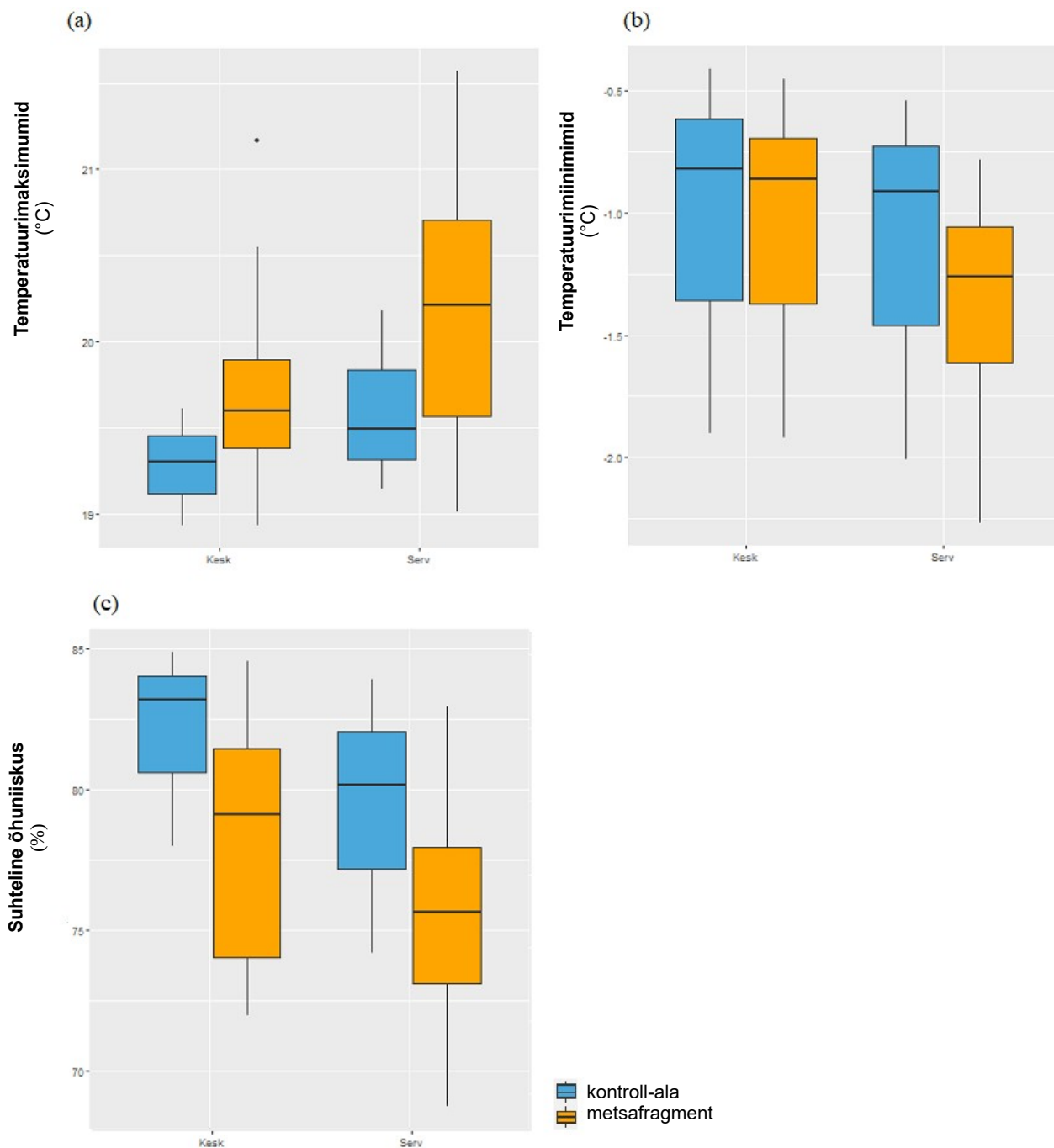


Joonis 6. Männikute servades esinenud värske-keskmises kõduastmes hukkunud puude hulga ja külgnenud alal kasvanud noore puistu kõrguse ja tiheduse vaheline seos. Hukkumine servas vähenes külgneval alal kasvanud noore puistu kõrguse kasvuga.

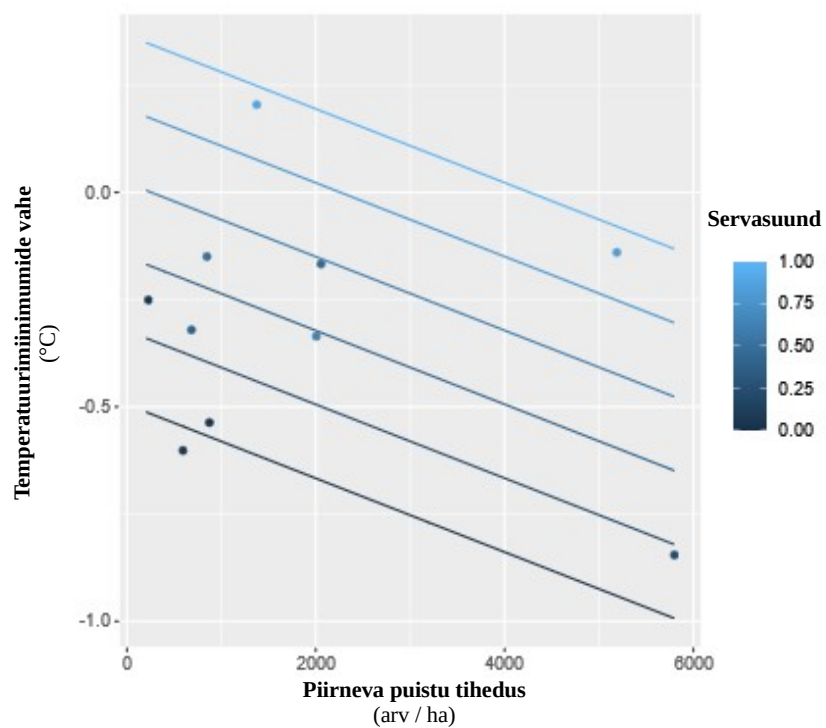


Joonis 7. Fragmentide servas hukkunud värske-keskmises kõduastmes puude hulga seosed piirneva ala avatuse ja vanusega (aastad). (a) Viljakates segametsades kasvas hukkunud puude hulk järsult ning vähenes ajas. Madalama koguavatusel servades hukkunud puude aegamööda kasvas. (b) Männikutes kasva servas hukkunud puude hulk koos edela-lääne suunalise avatuse suurenemisega.

miinimumtemperatuurid metsafragmentide servades olid seda madalamad, mida suurem oli piirneva noore puistu tihedus. Samuti olid miinimumtemperatuurid madalamad põhjapoolsetel servadel ning tõusid servade suurema lõunasuunalise avatusega (Joonis. 9; Lisa: Tabel 7). Suvistele temperatuurimaksimumidele ning pärastlõunasele õhuniiskusele serva avatuse suuna, piirneva puistu tiheduse ja kõrguse mõju ei ilmnenu (Lisa: Tabel 7).



Joonis 8. Metsafragmentide ja kontrollalade mikrokliima servades ja siseosades. Näidatud on (a) ööpäevased temperatuurimaksimumid (b) ööpäevased temperatuurimiinimumid ja (c) keskmine õhuniiskus suve pärastlõunal. Joonisel on näha metsafragmentide kui ka kontrollalade servades esinenud kõrgemad maksimumtemperatuurid ja madalamad miinimumtemperatuurid. Esitatud on mediaan, miinimumväärtus ja maksimumväärtused (vurrud) ning ekstreemseid väärtuseid tähistavad punktid.



Joonis 9. Miinimumtemperatuuride seos külgneva puistu tihedusega ja serva avanemise suunaga viljakate segametsade servades. Temperatuurimiinimumide vahe vähenes külgneva ala tiheduse kasvu ning serva põhjasuunalisusega. Temperatuurimiinimumide vahe on arvutatud kui serva ja siseosa päevaste mõõtude vahena. Servasuund on lineaarne tunnus põhi-lõuna teljel, madalamad väärtused tähistavad serva enamad põhjapoolset suunda. Põhjasuunda tähistab 0 ja lõunasuunda 1.

4. Arutelu

4.1 Metsafragmentide siseosa ja serva struktuur

Töö hüpotees, männikute vähesemast ja viljakate segametsade enamast servamõjulisest mõjutatusest leidis kinnitust. Männikutes ei tuvastatud metsafragmentide siseosades ega servades võrreldes kontrollaladega olulisi struktuurilisi erinevuseid, kuigi servades esines viiteid nõrgale servamõjule. Tulemus vastab üldisele teaduslikule arusaamale, mille kohaselt võivad struktuurilised servamõjude tekitatud muutused boreaalsetes metsades olla suhteliselt pehmed ega ulatu servast kaugemale (Mascarúa López et al., 2006; Harper et al., 2015). Tüüpiliselt hõredate puistutena, võivad tuulemõjud männikute servades olla küll ulatuslikud (orienteeruvalt 9 keskmise puistu puu pikkusele vastav distant servast; Dupont et al., 2011), kuid looduslikele häiringurežiimidele kohastunud boreaalseid metsasid seostatakse kõrgendatud vastupidavusega struktuurimuutuste suhtes (Mascarúa López et al., 2006; Harper et al., 2015).

Erinevalt männikutest viitavad viljakate segametsade struktuurianalüüsid sellele, et metsafragmentides esinevad vahetust servast kaugemale metsa siseossa ulatuvad servamõjud. Töö tulemused viitavad servamõjude ulatusele üle 70 m kaugusele raieservast (fragmendi siseosade punktide mediaan kaugus servast oli 69 ± 32 m või enam). Servamõju väljendus suuremates tuuleheite hulkades ja surnud puidu tagavaras. Metsafragmentide siseosas olid suuremad nii vähe kuni keskmiselt kõdunenud tuuleheitejuurestike hulgad kui ka summaarsed tuuleheite hulgad, selle alusel võib eeldada tuulemõjulist puude hukkumist serva tekkele järgnenud perioodil. Tuvastatud servamõju ulatus on mõnevõrra suurem, kuid siiski üldjoontes kokkukäiv varasemates teadustöödes

tuvastatud servamõju ulatusega. Näiteks Kanada okaspuumetsades on kirjeldatud kõrgendatud tuuleheite hulkade ulatust kuni 30 m (Mascarúa López et al., 2006) ning 55 m raieservast (Burton, 2002). Täielikult ei saa välistada samuti võimalikke alternatiivseid seletusi nagu näiteks alade erinev ajalugu, häiringurežiimide erinevused või inimõju.

Viljakate segametsade fragmentides ei ilmnenud, et struktuur vahetus metsaservas oleks rohkem servast mõjutatud kui fragmendi siseosad. Ehkki servamõju tugevust peetakse kauguse funktsiooniks servast (Murcia, 1995) ning metsade mõjutatust kõige intensiivsem serva vahetus läheduses (e.g. Meeussen et al., 2020), võivad mõjud metsafragmentide struktuurile olla samuti heterogeensed (Teobaldelli et al., 2020). Näiteks on võimalik puude fenotüübi põhiline mõjutatus. Burton (2002) on leidnud, et suure kõrguse ja tüvediametri suhtega puud on servamõjude poolt haavatavamad ja hukuvad sagemini. Kaudset viidet segametsade ühtlasest mõjutatusest võib pakkuda kontrastide puudumine segametsade puhul samas kui nõrgad kontrastid esinevad männikute servades (Joonis 5a, b).

4.2 Külgneva ala noore puistu ja avatuse mõju servade struktuurile

Käesolev katse leidis, et külgneva ala noore puistu kõrguse kasv võib vähendada hukkunud puude hulka männikute servas kuid ei leidnud seda kuusikute puhul. Zheng et al. (2009) on leidnud, et madalate noorte puistutega (< 5 m) külgnevates servades omab harilik kuusk kõrgendatud tuulekahjustuste riski, samas kui 7,5 m ja 9,5 m kõrgused noored puistud võivad olla piisavad, et olulist tuulekahjustuste riski harilikul männil ja harilikul kuusel vastavalt ei esineks. Käesoleva töö

tulemus pakub välja, et keskmiselt 5,2 m kõrgune piirnev puistu võib olla piisav kõrgus muutmaks servamõjude tugevust männikute servades. Viljakate segametsade puhul on võimalik, et keskmiselt 7 m kõrgune piirnev puistu pakub üheskoos puude kohanemisega piisava kaitse edasiste hukkumise vähenemiseks või on ebapiisav, et servamõjude esinemist viljakates segametsades muuta. Kuigi piirnemine hõredate naaberpuistutega võib soodustada servades kahjustuste teket (Scott & Mitchell, 2005; Zeng et al., 2010), ei leidnud käesolev katse külgneva ala puistutihedus mõju. Tiheduse mõju uurimist võisid segada raiealadel teostatud valgustusraied.

Puude hukkumine tuulemõjule haavatavamate puistute servades (segapuistud) suureneb piirneva ala koguavatus suurenemisega ning tuulemõjule vastupidavamates puistutes (männimetsad) peatuulesuunalise avatuse suurenemisega. Tulemus on ootuspärane, kuna harilikku kuuske võivad kahjustada isegi madalad tuulekiirused, samas kui harilik mänd kahjustub eelkõige kõrgete tuulekiirustega tulemusena (Zeng et al., 2004). Kõrgete tuulekiirustega tormid on sagedasemad domineerivates tuulesuundadest. Katsetes on leitud, et avatuse kasv suurendab tuulekahjustuste hulka (Scott & Mitchell, 2005; Beese et al., 2019) ning mõju võib olla puuliigist sõltuv (Burton, 2002).

4.2 Mikrokliima metsafragmentides ja kontrollalades

Nii metsafragmentide kui ka kontrollalade servasid iseloomustasid siseosadest kõrgemad maksimumtemperatuurid ja madalamad miinimumtemperatuurid. Metsaservades esinevad siseosadest kõrgemad suvised temperatuurid ja madalamad talvised temperatuurid on servamõjude puhul tüüpiline (Wright et al., 2010; Hofmeister et al., 2019). Servade mikrokliima muutlikus nii metsafragmentides kui kontrollides ei ole ootuspärane. Seda võib ilmselt seletada kontrollalade suure struktuurilise heterogeensusega ja suhteliselt väikese kontrollalade hulgaga mikrokliimamõõtmiste puhul (3 kontrollala ja 6 mõõtejaama). Ramos & Santos (2006) on hinnanud, et suure heterogeensusega metsade mikrokliima täpne kirjeldamine võib vajada suhteliselt suurt mikrokliima mõõtejaamade hulka. Lokaalsel skaalal sõltuvad mikrokliima ja selle dünaamika kõikidest maasiku komponentidest (sh. koridorid, teed, ojad, elektriliinid, avavused jne) (Chen et al., 1999). Täielikult ei saa välistada vastavate mõjude esinemist kontrollaladel. Nt esines kahel kontrollalal kolmest orienteeruvalt 15–20 m kaugusel servast metsasiht ning kuivenduskraav. Suurenenud õhutemperatuuridega kaasneb sageli õhuniiskuse vähenemine (e.g. Matlack, 1993; Chen et al., 1995; Burton, 2002). Käesolevas uuringus aga olulisi õhuniiskuse erinevusi, servade ja siseosade vahel ei tuvastatud, ehkki õhuniiskuse profiil peegeldas maksimumtemperatuuri oma (Joonis 8a, c).

Käesoleva töö tulemused näitavad, et mikroklimaatilised servamõjud võivad viljakates segametsades esineda isegi aastakümme või enam pärast raiet (uuritud raieservade keskmine vanus oli 13. a). Selliste metsade servasid iseloomustab tüüpiliselt tihe järelkasv ja potentsiaalselt kiire

servade sulgumine. Analoogselt käesoleva tööga, on Chen et al. (1995) kirjeldanud muutunud mikrokliimat 15–20 aasta vanustes lageraieservades. Matlack (1993) on kirjeldanud muutunud mikrokliimat 5 aastastes servades, ning mikrokliimaatiliste mõjude hääbumist serva külgvõrastiku arenguga.

4.3 Külgneva ala noore puistu omaduste mõju servade mikrokliimale

Metsafragmentide mikrokliima võib olla mõjutatud piirneva ala omadustest. Tulemus, et talvised miinimumtemperatuurid metsafragmenti servas langesid külgneva ala puistu tiheduse kasvades ei olnud ootuspärane. See ei olnud ootuspärane, kuna külgnevate alade biomasside kontrastsuse vähenemine reeglina vähendab ka mikrokliimaatilist erinevust (Harper et al., 2005; Aragón et al., 2015; Esseen et al., 2016). Samas on võimalik, et tihedam noor puistu muudab servas keskkonna tuulevaiksemaks ning tekivad paiksed õhumassid, mis võisid antud juhul tingida õhutemperatuuri languse tihedamate metsafragmentide servas (e.g. Chen et al., 1993; Saunders et al., 1999; Davies-Colley et al., 2000; Wright et al., 2010). Alternatiivselt võis tulemus olla seotud päikese mõjuga. Burton (2002) on hinnanud, et noored okaspuud (8–20 a.) võivad muuta ala valgusrežiimi. Samuti on Meeussen et al. (2021) arutlenud, et paikeseekiirguse hulk võib olla tegur, mis tingib talviste õhu- ja pinnatemperatuuride muutuse metsa servas. Uuringu tulemus, et temperatuur oli madalam suhteliselt suurema põhjapoolse avatusega servades vastab mitmetes varasemates teadustöödes leitud (e.g. Chen et al., 1993; Saunders et al., 1999).

Piirneva raiutud ala omaduste mõju esinemine talvel, aga mitte suvel võib olla viide hooajaliselt erinevale servamõju dünaamikale maastiku skaalal. Meeussen et al. (2021) on leidnud, et erinevatel aastaaegadel võivad puistu servade ja siseosade vahelisi mikrokliima-erinevusi tingida erinevad tegurid. Sarnased asjaolud ilmnesid käesoleva uuringu tingimustes ka noore puistu omadusi kaasavates mudelite tulemustest. Talvine mudel omas kõrget seletusvõimet (R^2 koh. 0,769) samas kui suviste mudelite seletusvõime oli väga madal (R^2 koh. -0,086; -0,101; Tabel 7). On võimalik, et suvised mikrokliima tingimused metsafragmendi servas on määravad teise tegurite poolt nagu näiteks servapuistu võrastik ja selle seisukord (Chen et al., 1999).

4.4 Järeldused

Töö tulemuste põhjal võib järeldada, et Eesti metsamaastikul on männikute metsafragmentide struktuur servamõjude suhtes vastupidavam kui viljakate segametsade metsafragmentide struktuur. Männikute fragmentides ei ilmnenud olulisi servamõjusid metsastruktuurile. Viljakate segametsade metsafragmentides ilmnes mitme uuritud tunnuse põhjal, et metsa struktuur on raieservadest häiritud isegi 70 m või enam servast eemal. Samuti võib tulemustest järeldada, et piirneva ala noorendikud puhvedavad servamõju (vähendavad servakahjustuste riski) männikute servades alates kõrgusest 5 m. Sellest võib järeldada, et metsafragmentide servas tasuks soodustada kiirekasvulisi puuliike.

Uuringus tuvastati, et nii metsafragmentide kui kontrollalade servad erinesid alade siseosades mikrokliima poolest. Kõigi uuringualade servad olid talvel külmemad ning suvel kuumemad kui

siseosad, kusjuures metsafragmentide servade miinimumtemperatuurid olid madalamad oludes kui serv piirnes tihedama noore puistuga ning miinimumtemperatuurid kahanesid põhjapoolsema avatusega servades. Need tulemused kinnitavad varasemates uuringutes selliste mõjude leevendamiseks soovitatud mõnekümne meetri laiuste puhveralade rajamise vajadust (Davies-Colley et al., 2000; Mascarúa López et al., 2006; Aragón et al., 2015). Välja on pakutud lisaks ka varjataluvate puuliikide soosimist, mis võiksid tekitada tiheda serva (Meeussen et al., 2020) ja segametsadele servadele avalduvaid servamõjusid vähendada.

5. Kokkuvõte

Servamõju on külgnevate alade servades aset leidv bioloogilise või abiootiline muutus.

Metsafragmentide puhul võivad servamõjud muuta ulatuslikku osa metsafragmentide pindalast ja vähendada nende kaitseefektiivsust. Käesolev magistritöö uuris majandatavates metsamaastikest ümbritsetud väikesemõõtmelisi (<15 ha) loodusmetsafragmente, mis jaotusid kahte gruppi - viljakad segametsad ja männikud. Uuringu sihiks oli (1) hinnata metsafragmentide struktuuri ja mikrokliima olusid ning nende seoseid servamõjudega; (2) uurida servamõju esinemist mõjutavaid tegureid.

Leiti, et viljakate segametsade metsafragmentides esinevad vahetust servast kaugemale metsa siseossa ulatuvad servamõjud. Männikute fragmentides puistu struktuuri mõjutava servamõju esinemist ei leitud. Külgneva ala omadused mõjutasid puude hukkumist metsafragmentide servades. Männikutega külgneva ala puistu kõrguse kasvuga servades hukkunud puude hulk vähenes ja külgneva ala avatuse kasvuga servades hukkunud puude hulk kasvas. Nii viljakate segametsade metsafragmentide kui kontrollalade servades esinesid suvel siseosast kõrgemad temperatuurimaksimumid ja talvel madalamad temperatuurimiinimumid. Põhjapoolsemate ja tihedama külgneva alaga piirnevate metsafragmentide servades esinesid madalamad talvised miinimumtemperatuurid. Käesoleva töö tulemused viitavad vajadusele täiendavate kaitsemeetmete rakendamiseks, et tagada loodusmetsade lähedase puistustruktuuri säilimine ja edasine areng viljakate segametsade fragmentides.

6. Summary

Changes in forest stand structure and microclimate in natural forest fragments

Edge effect is a biological or abiotic change that occurs on the border of neighboring areas.

This study focused on small (<15 ha) protected fragments of natural forest in managed forest matrix. Edge effects can alter a large proportion of area in such fragments and, hence, reduce their effectiveness to protect forest biodiversity. This thesis studied two types of forest fragments: spruce-deciduous mixed forests on fertile soils and pine dominated forests. The aims of this study were to (1) assess the state of forest structure and microclimate in forest fragments, and their relatedness to edge effects; (2) distinguish the factors mitigating edge effects.

I documented an edge effect associated changes in the structure of spruce-deciduous mixed forests. In pine dominated forests no influence of forest edges forest structure could be detected. The characteristics of the clearcut area affected tree mortality at the edges of forest fragments: the tree mortality at the edges decreased with increasing height of a young trees on clearcut area, and increased openness increased the mortality of trees at the edges. The edges of both forest fragments and controls exhibited (compared to their central parts) increased temperature maxima during summer and decreased temperature minima during winter. Northness and the increased density of young trees growing on neighboring area decreased the winter temperature minima at the edges of forest fragments. The results of the thesis imply that added protective measures are required to ensure the preservation and continued development of a natural-like forest stands structure in spruce deciduous mixed forest fragments.

7. Tänuõnad

Täna Kadrit ja Rauli töö juhendamise eest. Ema ja kõiki, kes tööde teostamisel abiks olid nimeliselt Annabeli, Geilit, Gertrudi ja Mihtlit.

Välitöösid rahastas RMK finantseeritud projektist "Kaitstavate metsafragmentide eesmärgipärasuse suurendamine". Stipendiumiga toetas IUT 34-7; Eesti Teadusagentuur.

8. Kasutatud kirjandus

Aragón, G., Abuja, L., Belinchón, R., Martínez, I., 2015. Edge type determines the intensity of forest edge effect on epiphytic communities. *European Journal of Forest Research* 134, 443–451.

Aune, K., Jonsson, B.G., Moen, J., 2005. Isolation and edge effects among woodland key habitats in Sweden: Is forest policy promoting fragmentation? *Biological Conservation*, 124, 89–95.

Baker, T.P., Jordan, G.J., Baker, S.C., 2016. Microclimatic edge effects in a recently harvested forest: Do remnant forest patches create the same impact as large forest areas? *Forest Ecology and Management*, 365, 128–136.

Baker, T.P., Jordan, G.J., Steel, E.A., Fountain-Jones, N.M., Wardlaw, T.J., Baker, S.C., 2014. Microclimate through space and time: Microclimatic variation at the edge of regeneration forests over daily, yearly and decadal time scales. *Forest Ecology and Management*, 334, 174–184.

Beese, W. J., Rollerson, T. P., Peters, C. M., 2019. Quantifying wind damage associated with variable retention harvesting in coastal British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 443, 117–131.

- Bílek, L., Vacek, Z., Vacek, S., Bulušek, D., Linda, R., Král, J., 2018.** Are clearcut borders an effective tool for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) natural regeneration? *Forest Syst*, 27, e010.
- Burton, P., 2002.** Effects of clearcut edges on trees in the sub-boreal spruce zone of Northwest-Central British Columbia. *Silva Fennica*, 36, 329–352.
- Cadenasso, M.L., Pickett, S.T.A., Weathers, K.C., Jones, C.G., 2003.** A Framework for a Theory of Ecological Boundaries. *BioScience*, 53, 750.
- Chen, J., Franklin, J.F., Spies, T.A., 1993.** Contrasting microclimates among clearcut, edge, and interior of old-growth Douglas-fir forest. *Agric. For. Meteorol.*, 63, 219–237
- Chen, J., Franklin, J.F., Spies, T.A., 1995.** Growing-Season Microclimatic Gradients from Clearcut Edges into Old-Growth Douglas-Fir Forests. *Ecological Applications*, 5, 74–86.
- Chen, J., Saunders, S. C., Crow, T. R., Naiman, R. J., Brosofske, K. D., Mroz, G. D., Brookshire, B. L., Franklin, J. F., 1999.** Microclimate in forest ecosystem and landscape ecology: variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *BioScience*, 49, 288–297.
- Cox, W.A., Thompson, F.R., Faaborg, J., 2012.** Landscape forest cover and edge effects on songbird nest predation vary by nest predator. *Landscape ecology*, 27, 659–669.

- Davies-Colley, R. J., Payne, G. W., Elswijk, van M., 2000.** Microclimate gradients across a forest edge. *New Zealand Journal of Ecology*, 24, 111–121.
- Didham, R.K., Ewers, R.M., 2014.** Edge Effects Disrupt Vertical Stratification of Microclimate in a Temperate Forest Canopy. *Pacific Science*, 68, 493–508.
- Didham, R.K., Lawton, J.H., 1999.** Edge Structure Determines the Magnitude of Changes in Microclimate and Vegetation Structure in Tropical Forest Fragments1. *Biotropica*, 31, 17–30.
- Dupont, S., Bonnefond, J. M., Irvine, M. R., Lamaud, E., Brunet, Y., 2011.** Long-distance edge effects in a pine forest with a deep and sparse trunk space: in situ and numerical experiments. *Agricultural and forest meteorology*, 151, 328–344.
- Esseen, P. A., Hedström Ringvall, A., Harper, K. A., Christensen, P., Svensson, J., 2016.** Factors driving structure of natural and anthropogenic forest edges from temperate to boreal ecosystems. *Journal of vegetation science*, 27, 482–492.
- Esseen, P.-A., Renhorn, K.-E., 1998.** Edge Effects on an Epiphytic Lichen in Fragmented Forests. *Conservation Biology*, 12, 1307–1317.

- Fischer, J., Lindenmayer, D.B., 2007.** Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global ecology and biogeography*, 16, 265–280.
- Gardiner, B., Berry, P., Moulia, B., 2016.** Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, 245, 94–118.
- Hamberg, L., Lehvävirta, S., Kotze, D.J., 2009.** Forest edge structure as a shaping factor of understorey vegetation in urban forests in Finland. *Forest Ecology and Management*, 257, 712–722.
- Harper K. A, Macdonald S.E, 2002.** Structure and composition of edges next to regenerating clear-cuts in mixed-wood boreal forest. *Journal of Vegetation Science*, 13, 535–546.
- Harper, K.A., Macdonald, S.E., Burton, P.J., Chen, J., Brosofske, K.D., Saunders, S.C., Euskirchen, E.S., Roberts, D.A.R., Jaiteh, M.S., Esseen, P.A., 2005.** Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscapes. *Conservation biology*, 19, 768–782.
- Harper, K.A., Macdonald, S.E., Mayerhofer, M.S., Biswas, S.R., Esseen, P.-A., Hylander, K., Stewart, K.J., Mallik, A.U., Drapeau, P., Jonsson, B.-G., Lesieur, D., Kouki, J., Bergeron, Y., 2015.** Edge influence on vegetation at natural and anthropogenic edges of boreal forests in Canada and Fennoscandia. *J Ecol*, 103, 550–562.

Harper, K. A., S. E. Macdonald, 2011. Quantifying distance of edge influence: A comparison of methods and a new randomization method. *Ecosphere*, 2 (8).

Hofmeister, J., Hošek, J., Brabec, M., Stráalková, R., Mýlová, P., Bouda, M., Pettit, J.L., Rydval, M., Svoboda, M., 2019. Microclimate edge effect in small fragments of temperate forests in the context of climate change. *Forest Ecology and Management*, 448, 48–56.

Häkkilä, M., Johansson, A., Sandgren, T., Uusitalo, A., Mönkkönen, M., Puttonen, P., Savilaakso, S., 2021. Are small protected habitat patches within boreal production forests effective in conserving species richness, abundance and community composition? A systematic review. *Environ Evid*, 10, 2.

Jansson, K.U., Nilsson, M., Esseen, P.A., 2011. Length and classification of natural and created forest edges in boreal landscapes throughout northern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 262, 461–469.

Jönsson, M.T., Fraver, S., Jonsson, B.G., Dynesius, M., Rydgård, M., Esseen, P.-A., 2007. Eighteen years of tree mortality and structural change in an experimentally fragmented Norway spruce forest. *Forest Ecology and Management*, 242, 306–313.

- Kelch, N. S., Neves, F. S., Fernandes, G. W., Wirth, R., 2016.** Mechanisms driving galling success in a fragmented landscape: synergy of habitat and top-down factors along temperate forest edges. *PLoS One*, 11, e0157448.
- Korjus, H., Laarmann, D., Kiviste, A., 2012.** Analysis of the Estonian Forest Conservation Area Network. *Journal of Environmental Science and Engineering*, B 1.6B: 779.
- Kuuluvainen, T., Mäki, J., Karjalainen, L., Lehtonen, H., 2002.** Tree age distributions in old-growth forest sites in Vienansalo wilderness, eastern Fennoscandia. *Silva Fenn*, 36, 169–184.
- Köster, K., Voolma, K., Jõgiste, K., Metslaid, M., Laarmann, D., 2009.** Assessment of Tree Mortality After Windthrow using Photo-Derived Data. *Annales Botanici Fennici*, 46, 291–298.
- Laarmann, D., Korjus, H., Sims, A., Stanturf, J.A., Kiviste, A., Köster, K., 2009.** Analysis of forest naturalness and tree mortality patterns in Estonia. *Forest Ecology and Management*, 258, 187–195.
- Larsen, T. A., Nielsen, S. E., Cranston, J., & Stenhouse, G. B., 2019.** Do remnant retention patches and forest edges increase grizzly bear food supply? *Forest Ecology and Management*, 433, 741–761.
- Lõhmus, A., 2016.** Eesti rangelt kaitstavate metsade tüpoloogiline analüüs.

- Lõhmus, A., Kraut, A., 2010.** Stand structure of hemiboreal old-growth forests: Characteristic features, variation among site types, and a comparison with FSC-certified mature stands in Estonia. *Forest Ecology and Management*, 260, 155–165.
- Lõhmus, P., Lõhmus, A., 2019.** The Potential of Production Forests for Sustaining Lichen Diversity: A Perspective on Sustainable Forest Management. *Forests*, 10, 1063.
- MacFarlane, D.W., Kane, B., 2017.** Neighbour effects on tree architecture: functional trade-offs balancing crown competitiveness with wind resistance. *Funct Ecol*, 31, 1624–1636.
- McCune, B., & Keon, D., 2002.** Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of vegetation science*, 13, 603–606.
- Magnago, L.F.S., Rocha, M.F., Meyer, L., Martins, S.V., Meira-Neto, J.A.A., 2015.** Microclimatic conditions at forest edges have significant impacts on vegetation structure in large Atlantic forest fragments. *Biodivers Conserv*, 24, 2305–2318.
- Magura, T., Lövei, G.L., 2020.** The Permeability of Natural versus Anthropogenic Forest Edges Modulates the Abundance of Ground Beetles of Different Dispersal Power and Habitat Affinity. *Diversity*, 12, 320.

- Mascarúa López, L.E., Harper, K.A., Drapeau, P., 2006.** Edge influence on forest structure in large forest remnants, cutblock separators, and riparian buffers in managed black spruce forests. *Écoscience*, 13, 226–233.
- Matlack, G.R., 1993.** Microenvironment variation within and among forest edge sites in the eastern United States. *Biological Conservation*, 66, 185–194
- Mayer, P., Brang, P., Dobbertin, M., Hallenbarter, D., Renaud, J. P., Walthert, L., Zimmermann, S., 2005.** Forest storm damage is more frequent on acidic soils. *Annals of Forest Science*, 62, 303–311.
- Meeussen, C., Govaert, S., Vanneste, T., Calders, K., Bollmann, K., Brunet, J., Cousins, S.A.O., Diekmann, M., Graae, B.J., Hedwall, P.-O., Krishna Moorthy, S.M., Iacopetti, G., Lenoir, J., Lindmo, S., Orczewska, A., Ponette, Q., Plue, J., Selvi, F., Spicher, F., Tolosano, M., Verbeeck, H., Verheyen, K., Vangansbeke, P., De Frenne, P., 2020.** Structural variation of forest edges across Europe. *Forest Ecology and Management*, 462, 117929.
- Meeussen, C., Govaert, S., Vanneste, T., Bollmann, K., Brunet, J., Calders, K., ... & De Frenne, P., 2021.** Microclimatic edge-to-interior gradients of European deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 311.
- Keskkonnaagentuur, 2019.** 100 aastat Eesti ilma (teenistust).

Keskkonnaagentuur, 2020. Aastaraamat Mets 2019.

Murcia, C., 1995. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 10, 58–62.

Padari, A. 2004. Metsahindamisprogramm "RaieWin". Unpublished master thesis. Estonian Agricultural University. Tartu. 42 (in Estonian).

Powell, A.S., Lindquist, E.S., 2011. Effects of Power-Line Maintenance on Forest Structure in a Fragmented Urban Forest, Raleigh, NC. *Southeastern Naturalist*, 10, 25.

Ramos, F. N., & Santos, F. A. M., 2006. Microclimate of Atlantic forest fragments: regional and local scale heterogeneity. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 49, 935–944.

Renhorn, K.-E., Esseen, P.-A., Palmqvist, K., Sundberg, B., 1997. Growth and vitality of epiphytic lichens. *Oecologia*, 109, 1–9.

Renvall, P., 1995. Community structure and dynamics of wood-rotting Basidiomycetes on decomposing conifer trunks in northern Finland. *Karstenia*, 35, 1–51.

- Ries, L., Fletcher Jr, R.J., Battin, J., Sisk, T.D., 2004.** Ecological responses to habitat edges: mechanisms, models, and variability explained. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 35, 491–522.
- Riutta, T., Slade, E.M., Morecroft, M.D., Bebbier, D.P., Malhi, Y., 2014.** Living on the edge: quantifying the structure of a fragmented forest landscape in England. *Landscape ecology*, 29, 949–961.
- Saunders, S.C., Chen, J., Drummer, T.D., Crow, T.R., 1999.** Modeling temperature gradients across edges over time in a managed landscape. *Forest Ecology and Management*, 117, 17–31.
- Scott, R. E., Mitchell, S. J. 2005.** Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 218, 193–209.
- Zeng, H., Garcia-Gonzalo, J., Peltola, H., Kellomäki, S, 2010.** The effects of forest structure on the risk of wind damage at a landscape level in a boreal forest ecosystem. *Annals of Forest Science*, 67, 111.
- Zeng, H., Peltola, H., Talkkari, A., Venäläinen, A., Strandman, H., Kellomäki, S., Wang, K., 2004.** Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges. *Forest Ecology and Management*, 203, 77–88.

- Zeng, H., Peltola, H., Väisänen, H., Kellomäki, S., 2009.** The effects of fragmentation on the susceptibility of a boreal forest ecosystem to wind damage. *Forest Ecology and Management*, 257, 1165–1173.
- Teobaldelli, M., Cona, F., Stinca, A., Saulino, L., Anzano, E., Giordano, D., Migliozi, A., Bonanomi, G., D’Urso, G., Mazzoleni, S., Saracino, A., 2020.** Improving resilience of an old-growth urban forest in Southern Italy: Lesson(s) from a stand-replacing windstorm. *Urban Forestry & Urban Greening*, 47, 126521.
- Trouillier, M., van der Maaten-Theunissen, M., Scharnweber, T., Wilmking, M., 2020.** A Unifying Concept for Growth Trends of Trees and Forests – The “Potential Natural Forest”. *Front. For. Glob. Change*, 3, 581334.
- Tuff, K.T., Tuff, T., Davies, K.F., 2016.** A framework for integrating thermal biology into fragmentation research. *Ecol. Lett.*, 19, 361–374.
- Valinger, E., Fridman, J., 2011.** Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 262, 398–403.
- Van Wagner, C.E., 1968.** The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science*, 14, 20–26.

Wallentin, C., Nilsson, U., 2014. Storm and snow damage in a Norway spruce thinning experiment in southern Sweden. *Forestry*, 87, 229–238.

Wright, T.E., Kasel, S., Tausz, M., Bennett, L.T., 2010. Edge microclimate of temperate woodlands as affected by adjoining land use. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1138–1146.

9. Lisad

Tabelid

Tabel 2. Metsafragmentide ja kontroll-alade siseosade struktuuri mõõdud viljakates segametsade ja männikutes (keskmine $\pm$ standardhälve).

	Viljakad segametsad		Männikud	
	fragment	kontroll	fragment	kontroll
eluspuidu tagavara (m ³ / ha)	315,6 $\pm$ 47,9	449,2 $\pm$ 16,0	423,4 $\pm$ 39,6	350 $\pm$ 31,1
surnud puidu tagavara (püstine puit; m ³ / ha)	18,2 $\pm$ 21,8	1,65 $\pm$ 1,6	7,5 $\pm$ 2,3	6,4 $\pm$ 1,2
lamapuidu tagavara (m ³ / ha)	174,1 $\pm$ 19,0	134,2 $\pm$ 18,4	74,1 $\pm$ 9,4	56,9 $\pm$ 12,2
lamapuidu tagavara (värske-keskmine kõduaste; m ³ / ha)	71,4 $\pm$ 10,7	54,7 $\pm$ 10,7	39,6 $\pm$ 8,1	22,3 $\pm$ 5,1
surnud puud (arv / transekt)	1,4 $\pm$ 0,4	0,7 $\pm$ 0,2	1,1 $\pm$ 0,3	1,1 $\pm$ 0,2
tuuleheitejuurestikud (arv / transekt)	4,1 $\pm$ 0,3	1,3 $\pm$ 0,3	2,0 $\pm$ 0,6	0,9 $\pm$ 0,2
tuuleheitejuurestikud (värske-keskmine kõduaste; arv / transekt)	2,0 $\pm$ 0,4	0,7 $\pm$ 0,2	1,2 $\pm$ 0,3	0,5 $\pm$ 0,1
tüükad (arv / transekt)	3,3 $\pm$ 0,3	2,3 $\pm$ 0,3	1,6 $\pm$ 0,5	1,5 $\pm$ 0,2
tüükad (värske-keskmine kõduaste; arv / transekt)	2,4 $\pm$ 0,3	1,8 $\pm$ 0,3	1,2 $\pm$ 0,2	0,9 $\pm$ 0,2
hukkunud puude koguhulk (värske-keskmine kõduaste; arv / transekt)	5,8 $\pm$ 0,7	3,1 $\pm$ 0,6	3,2 $\pm$ 0,7	2,8 $\pm$ 0,2

Arvud on esitatud 500 m² transektipindala kohta

Tabel 3. Metsafragmentide servade ja siseosade struktuurimõõdud viljakates segametsade ja männikutes (keskmine $\pm$ standardhälve).

	Viljakad segametsad		Männikud	
	serv	siseosa	serv	siseosa
eluspuidu tagavara (m ³ / ha)	309,6 $\pm$ 36,7	315,6 $\pm$ 47,1	417,9 $\pm$ 39,6	423,4 $\pm$ 39,6
surnud puidu tagavara (püstine puit; m ³ / ha)	18,4 $\pm$ 6,6	18,2 $\pm$ 6,3	14,4 $\pm$ 4,1	6,8 $\pm$ 2,3
lamapuidu tagavara (m ³ / ha)	133,6 $\pm$ 19,6	174,1 $\pm$ 18,4	62,8 $\pm$ 14,0	74,1 $\pm$ 9,4
lamapuidu tagavara (värske-keskmine kõduaste; m ³ / ha)	65,6 $\pm$ 12,6	74,4 $\pm$ 10,7	26,3 $\pm$ 6,5	39,6 $\pm$ 8,1
surnud puud (arv / transekt)	1,3 $\pm$ 0,3	1,4 $\pm$ 0,4	1,6 $\pm$ 0,5	1,1 $\pm$ 0,3
tuuleheitejuurestikud (arv / transekt)	3,9 $\pm$ 0,6	4,1 $\pm$ 0,7	2,7 $\pm$ 0,8	2 $\pm$ 0,6
tuuleheitejuurestikud (värske-keskmine kõduaste; arv / transekt)	2,2 $\pm$ 0,5	2 $\pm$ 0,4	1,3 $\pm$ 0,5	1,2 $\pm$ 0,3
tüükad (arv / transekt)	3,6 $\pm$ 0,5	3,3 $\pm$ 0,3	1,7 $\pm$ 0,4	1,5 $\pm$ 0,5
tüükad (värske-keskmine kõduaste; arv / transekt)	2,5 $\pm$ 0,4	2,4 $\pm$ 0,3	1,3 $\pm$ 0,4	0,9 $\pm$ 0,2
hukkunud puude koguhulk (värske-keskmine kõduaste; arv / transekt)	6 $\pm$ 0,8	5,9 $\pm$ 0,7	4,2 $\pm$ 1,1	3,2 $\pm$ 0,7

Arvud on esitatud 500 m² transektipindala kohta

Tabel 4. Raiutud alal kasvava puistu omaduste mõju metsafragmentide värske-keskmises kõduastmes hukkunud puude koguhulgale (surnud puud, tüükad, tuuleheitejuurestikud) servas.

	R^2 GLMM (M) / (C)	hinnang	standardviga	vabadusastmed	t väärtus	p väärtus (> t)
a) Viljakad segametsad						
hukkunud puude koguhulk (arv / transekt)	0,215 / 0,215					
vabaliige		11,01	2,67	13	4,12	0,001 **
tihedus		-0,0005	0,0005	13	-1,01	0,33
kõrgus		-0,511	0,277	13	-1,84	0,088
b) Männikud						
hukkunud puude koguhulk (arv / transekt)	0,022 / 0,847					
vabaliige		9,22	1,98	17,5	4,65	< 0,001 ***
tihedus		-0,0006	0,0003	8,7	-2,09	0,068
kõrgus		-0,65	0,228	8,8	-2,85	0,019 *

Tabel 5. Serva koguavatuse ja lääne-edelasuunalise avatuse mõjud värske-keskmises kõduastmes hukkunud puude koguhulgale (surnud puud, tüükad, tuuleheitejuurestikud).

	R^2 GLMM (M) / (C)	hinnang	standardviga	vabadusastmed	t väärtus	p väärtus (> t)
a) Viljakad segametsad						
hukkunud puude koguhulk (arv / transekt)	-0,012 / 0,868					
vabaliige		-9,16	5,87	10	-1,6	0,15
vanus		1,34	0,413	8,2	3,2	0,012 *
avatus kõik suunad		0,019	0,005	3,1	3,9	0,028 *
vanus*avatus kõik suunad		-0,002	0,0004	3,3	-4,3	0,019 *
avatus lääs-edel						
b) Männikud						
hukkunud puude koguhulk (arv / transekt)	-0,104 / 0,917					
vabaliige		0,91	1,81	20,6	0,5	0,62
vanus		0,25	0,079	8,6	3,2	0,012 *
avatus lääs-edel		0,007	0,003	8,7	2,5	0,033 *
avatus kõik suunad						

Tabel 6. Mikrokliima metsafragmentides ja kontrollalades

	$R^2_{GLMM (M) / (C)}$	hinnang	standardviga	vabadusastmed	t väärtus	p väärtus (> t)
a) Temperatuurimaksimumid						
	0,158 / 0,638					
vabaliige		19,3	0,38	12,2	50,7	< 0,001 ***
transektipunkti paiknemine (serv)		0,38	0,18	12	2,2	0,0498 *
töötlus (fragment)		0,51	0,42	11	1,2	0,25
b) Temperatuurimiinimumid						
	0,076 / 0,872					
vabaliige		-0,96	0,31	11,3	-3,1	0,0097 **
transektipunkti paiknemine (serv)		-0,28	0,07	12	-3,7	0,003 **
töötlus (fragment)		-0,11	0,35	11	-0,311	0,76
c) Õhuniiskus						
	0,218 / 0,355					
vabaliige		82,1	2,1	14,4	39,3	< 0,001 ***
transektipunkti paiknemine (serv)		-2,7	1,5	12	-1,8	0,095
töötlus (fragment)		-3,9	2,2	11	-1,8	0,11

p < 0,05 *; p < 0,01 **; p < 0,001 ***

Tabel 7. Serva koguavatuse ja lääne-edelasuunalise avatuse mõjud

	R ² kohandatud	vabadusastmed	hinnang	standardviga	t väärtus	p väärtus (> t)
a) Temperatuurimaksimumid						
	-0,086	7				
vabaliige			0,95	0,539	1,76	0,12
suund			-0,02	0,901	-0,02	0,99
kõrgus			-0,08	0,085	-0,98	0,36
tihedus						
b) Temperatuurimiinimumid						
	0,769	7				
vabaliige			-0,52	$8,05 \cdot 10^{-2}$	-6,5	< 0,001 ***
suund			0,87	0,159	5,5	< 0,001 ***
tihedus			$-8 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	-3,2	0,016 *
kõrgus						
c) Õhuniiskus						
	-0,101	7				
vabaliige			-3,2	3,53	-0,9	0,40
suund			5,5	6,97	0,78	0,46
tihedus			-0,001	0,001	-0,96	0,37
kõrgus						

Analüüside koodid

Raiutud ala avatuse mõju struktuurile

Kahjustustunnus * $\sim$ vanus + summaarne avatustunnus + lääne-edela avatustunnus + (1|Alanr)

* Kahjustustunnuseks on värske-keskmises kõduastmes puude summa, kõik hukkumisviisid

Raiutud ala mõju struktuurile - raiutud ala puistu mõju fragmentide struktuurile

Kahjustustunnus $\sim$ kõrgus + tihedus + serva avanemise suund (volditud) + (1|Alanr)

Mikrokliima - fragmentide ja kontrollide mikrokliima

Kliimatunnus $\sim$ transektipunkt (serv/kesk) * ala tüüp (kontroll/fragment) + (1|Alanr)

- 1) Temperatuurimaksimum
- 2) Temperatuurimiinimum
- 3) Suhteline õhuniiskus pärastlõunal

Raiutud ala puistu mõju fragmentide mikrokliimale (lineaarmudel)

Kliimatunnus $\sim$ kõrgus + tihedus + serva avanemise suund (volditud)

- 1) Temperatuurimaksimum
- 2) Temperatuurimiinimum
- 3) Suhteline õhuniiskus pärastlõunal

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Artur Reila

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose: Puistu struktuuri ja mikrokliima muutused loodushaiguste fragmentides

mille juhendajad on Kadri Runnel ja Raul Roosenvald

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Artur Reila
25.05.2022