

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Ilmastiku ja inimtegevuse mõju hariliku männi
(*Pinus sylvestris* L.) radiaaljuurdekasvule Soontagal**

Liis Getliin Kala

Juhendaja: PhD Kristina Sohar

Tartu 2025

Annotatsioon

Ilmastiku ja inimtegevuse mõju hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) radiaaljuurdekasvule Soontagal

Puude kasv on mõjutatud nii abiootilistest kui ka biootilistest teguritest. Bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida ilmastikust, vaigutamist ning sõjakaevikute kaevamisest tulenevat mõju hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) radiaaljuurdekasvule. Töö käigus mõõdeti vaigutatud, vaigutamata ja kaevikupuude puurproovidelt aastarõngalaiused ning koostati keskmised juurdekasvu kronoloogiad. Standardiseeritud kronoloogiaid korreleeriti temperatuuri ja sademete andmetega ning analüüsiti dendrokliimatiliste seoste ajalisi dünaamikaid. Sarnaselt varasemate uuringutega leidis kinnitust, et hariliku männi jämeduskasv on peamiselt sõltuv veebruari, märtsi ja aprilli temperatuuridest. Vaigutamise ja kaevikute kaevamise järgselt ilmneb puudel häiringupoolsel tüveküljel lühiajaline kasvulangus.

Märksõnad: harilik mänd, dendroklimatoloogia, dendroökoloogia, puude vaigutamine, sõjakaevikud

CERS kood: P510 - füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Impact of weather and human activity on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Soontaga

Tree growth is influenced by both abiotic and biotic factors. The aim of the bachelor's thesis was to investigate the effects of weather, resin tapping, and war trench digging on the radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). During the study, tree-ring width samples were measured from tapped, untapped, and trench-affected trees, and average tree-ring width chronologies were compiled. Standardized chronologies were correlated with temperature and precipitation data and dynamics of growth responses were analysed. Consistently with previous studies, it was confirmed that the growth of Scots pine mainly depends on the temperatures of February, March, and April. After resin tapping and trenching, trees exhibit a short-term growth decline on the disturbed side of the stem.

Keywords: Scots pine, dendroclimatology, dendroecology, resin tapping, war trenches

CERS code: P510 - Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
2. Teooria	5
2.1 Dendrokronoloogiast.....	5
2.2 Puude kasvu mõjutavad tegurid	6
2.3 Puude vaigutamine	8
2.4 Harilik mänd uurimisobjektina	10
3. Materjal ja metoodika	12
3.1 Uurimisala kirjeldus.....	12
3.2 Ilmastiku andmed.....	14
3.3 Välitööd.....	15
3.4 Laboratoorsed tööd	18
3.5 Andmeanalüüs.....	19
4. Tulemused ja arutelu.....	22
4.1 Mändide aastarõngalaiuste kronoloogiad	22
4.2 Ilmastiku mõju männi radiaaljuurdekasvule.....	25
4.3 Kaevikute mõju männi radiaaljuurdekasvule.....	30
4.4 Vaigutamise mõju männi radiaaljuurdekasvule.....	33
5. Kokkuvõte.....	37
Summary.....	38
Tänuavaldused	40
Kasutatud kirjandus.....	41
Lisa 1.....	49
Lisa 2.....	50

1. Sissejuhatus

Puude kasvureaktsioonid kajastavad väärtuslikku teavet nii looduslike kui ka inimtekkeliste tegurite mõjust ökosüsteemile. Puude aastarõngaid on võimalik kasutada puitesemete dateerimiseks, kasvu mõjutavate keskkonnategurite väljaselgitamiseks kui ka minevikus aset leidnud sündmuste ja häiringute mõistmiseks. Eesti metsades avaldub inimõju muuhulgas ka varjekaevikute kaevamises kui ka puidusaaduste väärindamiseks läbiviidud vaigutamises. Tänapäeval võib sõjakaevikuid ning vaiguarmidega puid pidada vastavalt militaarse ja metsandusliku pärandkultuuri osaks.

Harilikud männid suudavad muutuvate kasvutingimustega kiirelt kohaneda ning on seega vastupidavad erinevatele häiringutele. Sellest lähtuvalt kasvavad paljud puud vanaks, pakkudes uurijatele pikaajalist teavet mineviku kliimaolude kohta. Teades pikaajalisi trende on võimalik prognoosida tulevase ilmaolusid, mis on eriti oluline kliimasoojenemise kontekstis.

Töö uudsus seisneb aga antropogeensete mõjude uurimises. Hetkel puuduvad varasemad sõjakaevikute kaevamise ja puude kasvu seoseid analüüsivad uuringud. Lisaks ei ole Eestis vaigutamise uurimisel palju tähelepanu pööratud puu radiaaljuurdekasvu muutustele.

Bakalaureusetöö eesmärk on anda ülevaade Soontaga harilike mändide radiaaljuurdekasvu seostest ilmastiku ja inimese poolt tekitatud häiringutega. Keskendutakse kahele uurimisala metsas leiduvale häiringule, täpsemalt uuritakse puude vaigutamise ja sõjakaevikute kaevamise mõju männi radiaaljuurdekasvule. Seejuures analüüsitakse sademete ja temperatuuri pikaajalisi seoseid ning nende ajalisi dünaamikat. Pööratakse tähelepanu ka puude häiringujärgsele kliimatundlikkusele. Lähtudes bakalaureusetöö eesmärgist keskendutakse töös kolmele järgnevale uurimisküsimusele:

1. Millised on hariliku männi radiaaljuurdekasvu ja ilmastiku vahelised seosed?
2. Kas ja kuidas on mõjutanud sõjakaevikute kaevamine hariliku männi radiaaljuurdekasvu?
3. Kas ja kuidas on mõjutanud puude vaigutamine hariliku männi radiaaljuurdekasvu?

2. Teooria

2.1 Dendrokronoloogiast

Dendrokronoloogia on teadusharu, mis hõlmab tänapäeval enamasti kõiki puude dateeritud aastarõngastega tehtud keskkonna- ja ajaloolaseid uuringuid, kuid algselt käsitles dendrokronoloogia kitsamalt puitsemete vanuse määramist aastarõngaste kaudu (Fritts, 1976; Schweingruber, 1996; Phipps & Yanosky, 2020). Lisaks vanuse kindlaks tegemisele suudetakse paljude puude aastarõngalaiuste ridade ehk kronoloogiate rist- ehk kattuvdateerimisel määrata puude kasvamise piirkond (Fritts, 1976). Dendrokronoloogia jaguneb mitmeks allharuks. Peamiseks harusid ühendavaks teguriks on puude dateeritud aastarõngaste struktuuris sisalduva keskkonnavalase informatsiooni uurimine (Fritts, 1976). Antud bakalaureusetöös käsitletakse uurimismeetoditena lähemalt dendroklimatoloogiat ja dendroökoloogiat.

Dendroklimatoloogia keskendub aastarõngaste ja ilmastiku vaheliste seoste uurimisele minevikus ja tänapäeval, kus puu kasvuks soodsate tingimuste korral tekivad laiemaid ning ebasoodsate puhul kitsamad aastarõngad (Fritts, 1976). Tulenevalt puude juurdekasvu tundlikkusest erinevatele keskkonnatingimustele on võimalik dendroklimatoloogiliste meetoditega saada teavet minevikus lühiajaliselt väldanud, aga suure mõjuga orkaanide, kui ka pikaajaliselt püsinud kliimatiliste tingimuste, nagu sademete ja temperatuuride, kohta (Speer, 2010). Lisaks on võimalik mineviku trende järgides ennustada klimatoloogiliste olude muutumist tulevikus (Fritts, 1976). Seejuures dendroökoloogias kasutatakse puude aastarõngaid laiemalt keskkonna ja ökoloogiliste probleemide uurimiseks (Phipps & Yanosky, 2020). Keskendutakse aastarõngastes kajastuva inim- ja keskkonnategurite lokaalse mõju uurimisele, kõrvutades häiringuid regionaalsete kliimaoludega (Amoroso *et al.*, 2017). Häiringuteks võivad olla näiteks putukarüüsted ja metsatulekahjud (Speer, 2010). Vaatamata sarnastele uurimismeetoditele, üritatakse dendroklimatoloogias peamiselt tuvastada puhas kliimasignaali, seevastu dendroökoloogiliselt seisukohalt võib kliima komponent osutada müraks, mida soovitakse puude juurdekasvuridadest eemaldada (Speer, 2010).

Dendrokronoloogias on peamiseks andmeallikaks puiduproovid. Puude uurimiseks kasutatavate puiduproovide kogumiseks on mitmeid viise. Eluspuudelt kogutakse proove juurdekasvupuuriga, surnud puudelt on võimalik uurimiseks lõigata saega terve ristlõikeketas (Schweingruber, 1988). Proovivõtu võimaluse puudumisel, näiteks muusikainstrumentide või

kunstiteoste dateerimisel, on võimalik aastarõngaid uurida vahetult mõõtluubi või mikroskoobi abil. Lisaks nimetatud meetoditele saab aastarõngalaiusi mõõta makro- (Myhr *et al.*, 2007) ja röntgenfotodelt (Okochi *et al.*, 2007). Sealhulgas on vajalikku andmestikku võimalik koguda ka eluspuude kasvu dendromeetriga seirates.

Dendrokronoloogia Ameerika koolkonna olulisimaks alusepanijaks on 19. sajandi lõpul Arizona osariigis teadlaskarjääri alustanud Andrew Elliott Douglas (Fritts, 1976; Robinson *et al.*, 1990). Douglas uuris päikeseplekkidest tulenevat ilmastiku mõju puude kasvule ning võttis kasutusele ristdateerimise (*crossdating*) põhimõtte (Robinson *et al.*, 1990). Rist- ehk kattuvdateerimine võimaldab puude aastarõngaridade sarnasuse järgi määrata nende täpse kasvamisaja ja luua üle üksikpuude eluea ajas tagasiulatuvaid aastarõngaste kronoloogiaid. Tõestades tehnika töökindlust pani Douglas aluse täiesti uuele dendrokronoloogilisele uurimismeetodile (Fritts, 1976). Pigem dendroklimatoloogia uurimissuunale keskendunud Douglas rajas Arizona Ülikoolis maailma esimese aastarõngaste uurimisele keskenduva labori, kus alustasid oma karjääri mitmed hilisemad dendrokronoloogid, nagu Waldo Sumner Glock ja Edmund Schulman (Fritts, 1976).

Euroopas arenesid algselt Lääne- ja Ida-Euroopa dendrokronoloogia koolkonnad eraldi Nõukogude Liidu isoleerituse tõttu (Läänelaid, 2002). Lääne-Euroopas oli 20. sajandi mitmel kümnendil eesrindlikuks dendrokronoloogiliste uuringute edasiarendajaks Bruno Huber, kes rakendas lisaks visuaalsele ristdateerimistehnikale ka statistilise sarnasuse testi (Schweingruber, 1988; Robinson *et al.*, 1990). Huber keskendus 19. sajandil vendade Theodor ja Robert Hartingu poolt välja arendatud dendroökoloogilise valdkonna uurimisele (Schweingruber, 1996). Ida-Euroopast pärinevad esimesed dendroklimatoloogilised uuringud 1882. aastast, kui Fjodor Švedov leidis seose puu aastarõngaste ja aastaste sademete hulkade vahel (Robinson *et al.*, 1990). Eestis teostas esimesena visuaalset dendrokronoloogilist dateerimist arhitekt Kalvi Aluve 1970. aastatel, kuid statistilise arvutianalüüsini dateerimisel jõudis praegune Tartu Ülikooli emeriitdotsent Alar Läänelaid (Läänelaid, 2002).

2.2 Puude kasvu mõjutavad tegurid

Puu kasv on mõjutatud ümbritsevast keskkonnast, mida kujutavad nii biotilised kui abiotilised tegurid. Häiringu tulemusena rikutakse puu radiaaljuurdekasvu korrapärast mustrit, mis väljendub kitsama, laiema või puuduva ehk formuleerumata aastarõngana (Fritts,

1976). Üha enam levinud häiringud puude kasvule tulenevad ülemaailmsetest kliimamuutustest, mille tulemusel esinevad kasvuperioodil soojemad temperatuurid või väheneb niiskuse kättesaadavus (Harvey *et al.*, 2020). Ülemaailmne keskmine temperatuur oli 2011–2020 ligikaudu 1,1 °C kõrgem kui ajavahemikus 1850–1900, mille tulemusel tõusis mereveetase vahemikus 1901–2018 0,2 meetri võrra (IPCC, 2023).

Lineaarse agregaatse kasvu mudeli (Cook, 1985; 1990) järgi sõltub lihtsustatult aastarõnga laius puu vanusest, ilmastikust, kasvukohasisestest ja -välistest häiringutest ning muudest juhuslikest teguritest. Puu nooruseas on üldiselt laiemad aastarõngad ning puu vananedes tekivad järk-järgult kitsamad aastarõngad, mis annab iga-aastaselt võrdse puidu mahu aina suurenevas silindrikujulises puutüves (Speer, 2010). Ilmastikutingimused mõjuvad kõigile puudele ühtemoodi suhteliselt suurel alal ehk sarnase kliimaga alal. Kui puu vanus ja ilmastik mõjutavad kõikide puude juurdekasvu pidevalt, siis häiringute mõju võib olla lokaalsem ja lühiajalisem või puududa sootuks. Kasvukohasiseseks häiringuks võib pidada näiteks tuulemurdu või -heidet ning konkurentsi valgusressursile, millel on mõju vaid üksikutele puudele. Samas kasvukohavälised häiringud nagu näiteks tulekahju, putukarüüste või õhusaaste mõjutavad enamikke kasvukoha puid (Cook, 1985; 1990).

Peamised puu kasvu piiravad ilmastikust tulenevad tegurid on temperatuur, valgus ja niiskus, seejuures mõjutavad kasvu ka juurte ning okste kahjustused ja kasvukeskkonna saaste (Schweingruber, 1996). Seejuures kehtib puu kasvu limiteeriva teguri printsiip, mille kohaselt määrab organismi kasvu kõige piiravam tegur (Speer, 2010). Limiteeriv tegur võib ajas muutuda – näiteks, kui varakevadine soe temperatuur soodustab kasvu, siis kuum kesksuvi võib osutuda pidurdavaks teguriks (Fritts, 1976). Lisaks tuleb arvestada, et puude juurdekasv allub autokorrelatsioonile, ehk soodsad kui ka ebasoodsad keskkonnaolud võivad mõjutada mitme järgneva aasta kasvu, kuna kasvuaastal toodab organism uusi rakke ja sünteesib eluks vajalikke toitaineid ka järgnevateks aastateks (Speer, 2010). Puurakkude moodustumine põhineb kambiumi tegevusel, seega määravad puu füsioloogilisi protsesse piiravad tegurid kasvuprotsessi toimumise (Fritts, 1976; Pärn, 2014).

Ühtlasi mõjutavad puude kasvutingimusi ka inimesed, kes kujundavad maapinda ümber endale kasulikul eesmärgil. Eestis on levinud praktikaks kuivenduskraavide kaevamine nii põldude, metsade kui ka turbarabade äärde. Kuivenduskraavide kaevamine on abiks maapinnas oleva liigse vee eemale juhtimiseks, mis soodustab läheduses (> 90 m) kasvavate puude radiaalkasvu (Läänelaid *et al.*, 2025). Lisaks kuivendamisele mõjutavad Eestis puude kasvu ka

allmaakaevandamisega seotud langatusalad, mis on tekkinud kunagiste põlevkivikaevanduste kohale. Kaevandamisega kaasneb puude juurestiku rebenemine ning puude kaldumine langala suunas (Läänelaid, 2010). Juurestiku kahjustuste tulemusel väheneb puude kasv ja lehtede gaasivahetus (Fini *et al.*, 2013). Puude kaldumise tagajärjel moodustub tüve ühele küljele reaktsoonipuit, mis mändide puhul väljendub tüve kaldealusel küljel survepuiduna (Kaz *et al.*, 2023; Läänelaid, 2010). See tähendab, et painutatud tüve alumisele küljele moodustavad laiemad aastarõngad, et puud püsti poole lükata (Kaz *et al.*, 2023). Kogu langatusest mõjutatud alal kasvavatel mändidel väheneb kahjustusele järgnenud viie aastaga jämeduskasv 6% võrra (Läänelaid, 2010). Juurekahjustused on igapäevaseks reaalsuseks ka erinevatel ehitustöödel, mis põhjustavad puude suuremat suremust (Hauer *et al.*, 1994). Maapinna üleskaevamisest tulenevate juurekahjustuste mõju uurimisel on Watson'i *et al.* (1998) uuringus leitud, et märkimisväärne negatiivne mõju radiaaljuurdekasvule väljendub alles siis, kui kahju tekitatakse puu kolmele küljele (kahanemine 33%–40%). Kaevetöödest tuleneva kahjustuse esinemisel ühel puu küljel olulist mõju kasvule ei oma (Watson, 1998).

Dendrokronoloogilisi meetodeid kasutades on võimalik paremat ülevaadet saada ka minevikus toimunud sõjategevusest ja selle mõjust keskkonnale. Antud uurimissuund ei ole aga laialdaselt levinud. Peamiselt keskendutakse kaevikusüsteemides kasutatud toestuspuidu liigi ja päritolu määramisele. Leitud on, et esimeses maailmasõjas kasutati läänerindel peamise toestusmaterjalina lähedastes metsades kasvavaid mände (*Pinu sylvestris* L.), kuuski (*Picea abies* (L.) H. Karst.) ja nulge (*Abies alba* Mill.) (Haneca *et al.*, 2018). Samas keskendutakse ka sõjaga kaasnenud keskkonnakahju uurimisele. Näiteks on sõjaajal kasutatud kattesuitsust tekkinud õhusaaste mõjul tuvastatud ümberkaudsete puude hüppelist kasvu kahanemist (Hartl *et al.*, 2019).

2.3 Puude vaigutamine

Lisaks inimese poolt tekitatud juurekahjustustele tekitatakse kahjustusi ka puude tüvedele. Levinud tüvekahjustuseks on vaigutusarmid. Vaigutamiseks nimetatakse kasvavate okaspuude pinna lõigetega kahjustamist vaigu saamise eesmärgil (Sharma *et al.*, 2018). Puu välise pinna kahjustamine toimub korrapäraselt läbi terve vegetatsiooni perioodi (Välja, 1981). Vaigutamise käigus kahjustatakse puu välimist koort ehk korpa, sisemist koort ehk niint ja kambiumit ehk algkudet, mis võimaldab jämeduskasvu (Chen *et al.*, 2015). *Pinus* alamperekonda kuuluvate mändide vaigukanalid paiknevad taimede primaarses ksüleemis, sekundaarses ksüleemis või mesofüllis (Wu & Hu, 1997).

Vaiku korjatakse okaspuudelt, kuna neil on välja arenenud vaigukäigud okastes, primaarses kooses ja puidus (Välja, 1981). Okaspuude vaiku on ajalooliselt kasutatud Vana-Egiptuse kultuuris mumifitseerimiseks (Abdel-Maksoud & Elamin, 2011). Alates 15. sajandist on töödeldud vaik laialdasemalt levinud laevade tõrvamise eesmärgil (Loewen, 2005; Sharma *et al.*, 2018). Eestis levinud keemiline ehk tööstuslik vaigutamine hakkas arenema 17. sajandil (Välja, 1981). Vaigutamist teostati keemiatööstuse komponentide tärpentini ja kampoli saamise eesmärgil (Välja, 1981; van der Maaten *et al.*, 2017). Kampoli ja tärpentini kasutatakse metallurgias, farmakoloogias, värvide tootmisel ning trüki-, tekstiili- ja parfümeeriatööstustes (Välja, 1981). Vaatamata vaigutamise praktika lõppemisele Eestis, on vaigutustehnikad jätkuvalt levinud puidusaaduste väärindamise viisiks (Loewen, 2005). Uute tehnoloogiate ja töövahendite tulemusena, on saavutatud efektiivne ja saastatusest hoiduv vaigu kinnistesse anumatesse kogumise tehnika (Rubini *et al.*, 2022).

Puude vaigutamise meetodid varieeruvad riigiti, kuid jaotuvad kahte suuremasse gruppi: mitte-keemiliseks ja keemiliseks vaigutamiseks. Mõlema meetodi korral kahjustatakse puu pinda, kuid keemilise vaigutamise puhul kantakse tüvele pasta või kontsentradi kujul keemilist ärritajat, mis suurendab puu vaigu eritamist (Välja, 1981; Papadopoulos, 2013). Keemilisteks ärritajatena toimivad väävelhape, kloorlubi ja sulfiitpiiritus kahjustavad kambiumit, niint ja vaigukäikude eraldusrakke, mille tulemusel jäävad vaigukäigud ajutiselt pikemaks ajaks avatuks (Välja, 1981; Papadopoulos, 2013). Metodoloogiliselt eristatakse ka rasket ja kerget vaigutust, kus esimene on intensiivsem ning viiakse läbi kuni viis aastat enne puu mahavõtmist, kuid kerget vaigutust teostatakse vahetpidamata terve puu eluaja vältel (Sharma *et al.*, 2018).

Esimesed katsetused vaigu kogumisel tehti Eestis 1924. aastal Järveljal, kuid intensiivsem tootmine algas peale esimest maailmasõda, saavutades hiilgeaja Nõukogude okupatsiooni ajal 1960. aastatel (Välja, 1981; Kusmin, 2019). Kusmini (2019) kogumiku andmetel vähenes vaigutamine 1970. aastatel raiemahu vähenemise ja ulatuslike tormikahjustuste tõttu (Kusmin, 2019). Kõige intensiivsem vaigutamine jääb perioodi 1950–1980, kui aastas koguti ühtekokku 500–800 tonni vaiku (Tarang, 2007). Vaigutamine viidi läbi männipuistutes tervetel ja vähemalt 20 sentimeetrise läbimõõduga puudel perioodil, mil keskmine õhutemperatuur ööpäevaringselt püsis üle seitsme soojakraadi (Välja, 1981). Männiliste sugukonnast toodavad enim vaiku just männi (*Pinus*) perekonda kuuluvad liigid (López-Álvarez *et al.*, 2023), mille hulka kuulub ka Eestis levinud harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.). Eestis kasutatud vaigutustehnika kohaselt eemaldati puu tüvelt esmalt korp, lõigati tüvele püstrenn ning uuristati

haagiga rennist kahele poole laskuvate ja tõusvate liigutustega kaldlõiked, alates 1956–1958 aastast lisati vaigutahkumise takistamiseks ka keemilised stimulaatorid (Välja, 1981; Kusmin, 2019). Vaik valgus koonusekujulisse kogujasse, kuhu igal kogumisel puhastati rennidesse jäänud vaik, vaigutamiseks tehtud lõikeid nimetatakse karrideks ning nende pinnalt korjatavat vaiku kaapevaiguks (Välja, 1981). Eestis levinud praktika kohaselt vaigutati puid, mis olid määratud raieks järgneva kolme kuni viieteistkümne aasta jooksul (Välja, 1981).

Varasemad uuringud on kinnitanud, et hariliku männi vaigutamine avaldab puu rinnakõrguselt mõõdetud radiaaljuurdekasvule positiivset mõju (Magnuszewski & Tomusiak, 2013; van der Maaten *et al.*, 2017). Seejuures on Kreekas ja Hiinas mitme teise männiliigi uurimisel leitud, et esineb kas ajutine või pidev radiaaljuurdekasvu vähenemine vaigutatud puudel (Papadopoulos, 2013; Zeng *et al.*, 2021). Lisaks täheldati Hiina teadlaste poolt läbiviidud uuringus ka vaigutamisest tulenevat puude asümmeetrilist kasvu, kus vaigutusarmipoolses tüveraadiuses kasvutempo vähenes, vastasraadiuses aga suurenes (Zeng *et al.*, 2021). Tulemuste varieeruvust võib põhjustada proovivõtukoht puul. Van der Maaten'i *et al.* (2017) uuringus võeti puiduproov vaigutusarmist teisele poole jäävast tüveosast, seejuures Zeng *et al.* (2021) kasutasid analüüsis nii vaigutusarmi poolt kui ka vastasküljelt võetud proove. Vaatamata erinevustele on mitme uuringuga kinnitatud, et vaigutusarmi peale enam uusi aastarõngaid ei moodustu (Choi *et al.*, 2020; Zeng *et al.*, 2021). Lõuna-Hiina näitel võib vaigutamisel esineda negatiivne mõju puu radiaaljuurdekasvule, seejuures ei ole kahjustatud puud enam nii vastuvõtlikud kasvu soodustavatele ilmastikuoludele (Chen *et al.*, 2015). Seejuures van der Maaten'i *et al.* (2017) uuringus ei leitud kliimatundlikkuse erinevusi vaigutatud ja vaigutamata puude vahel.

2.4 Harilik mänd uurimisobjektina

Harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.) kasvab suurel levialal, areaal ulatub Loode-Norrast kuni Põhja-Itaaliani, Lääne-Euroopast kuni Siberi idaosani (Sibul, 2014). Harilik mänd kuulub alamperekonna *Pinus* alamseksiooni *sylvestris*, ning on ainukeseks Eestis looduslikult kasvavaks männiliigiks. Liik on Eestis väga elujõuline ja kuulub koos kuuse (*Picea abies* (L.) H. Karst.) ning kaskedega (*Betula pendula* Roth. ja *B. pubescens* Ehrh.) ühe levinuma puuliigi hulka Eestis (Läänelaid & Eckstein, 2003). Riigimetsades moodustab mänd metsamaa pindalast ja tagavarast veidi alla poole, vastavalt 40,7% ja 45,4% (RMK, 2023). Eesti männirikkamateks piirkondadeks on Lääne-Eesti saared ning mandri loode-, põhja- ja kaguosa, samas tootlikkuse poolest asuvad kõrgeima boniteediga männid Kagu-Eestis (Sibul, 2014).

Liigi lai leviala tuleneb puu suutlikkusest kohaneda erinevate keskkonnatingimustega. Siiski enim leidub männikuid liivmuldadel ja lootaladel, kus esinevad pohla, mustika ja kanarbiku metsakasvukohatüübid (Sibul, 2014).

Männi vaik koosneb enamjaolt tõrvahapetest ja tärpentinõlist, sõltuvalt õlisisaldusest ja hilisemast töötlemisprotsessist eristatakse kolme vaigu sorti, millel on kollakas või hallikas värvus, kuid erinev struktuur (Välja, 1981).

Pikim Eesti männikronoloogia on peaaegu 900 aastat pikk. Kronoloogia hõlmab ajaperioodi 1113.–2006. aastani (Läänelaid *et al.*, 2012). Alla tuhande aasta pikkuseid männikronoloogiaid on loodud ka Eesti lähiriikides – Kagu-Soomes 908 (Helama *et al.*, 2005; *cit* Läänelaid *et al.*, 2012), Rootsis 543 (Bartholin, 1991; *cit* Läänelaid *et al.*, 2012) ja Leedus 516 (Vitas, 2006) kasvuaastat pikad. Samas on Põhja-Soomes ja Põhja-Rootsis loodud ekstreemselt pikki, vastavalt ligi 7500 ja 7400 aasta pikkuseid kronoloogiaid (Eronen *et al.*, 2002; Grudd *et al.*, 2002). Pikkade kronoloogiate alusel on tuvastatud, et lähiriikides esinevad sarnased kasvumustrid. Tulenevalt pikemaajalistest kliimamuutustest on Eesti männikronoloogia mitmetel sajanditel (14. ja 16. sajand) sarnanenud põhjanaabrite vastavate kronoloogiatega, aga alates 17. sajandist on kasvumustrid sarnasemad ida- ja läänesuunda jäävate puude keskmiste juurdekasvuridadega (Läänelaid *et al.*, 2012).

Männi aastane radiaaljuurdekasv sõltub rohkem valgusoludest ja kasvukoha tingimustest, mullaniiskuse suhtes on puud vähetundlikud (Pärn, 2014). Eesti mändide kasvuolusid mõjutavaks teguriks on eelkõige kevadised ja kõrged talvised õhutemperatuurid (Läänelaid & Eckstein, 2003; Henttonen *et al.*, 2014; Metslaid *et al.*, 2018), mis määravad lume sulamise aega ja kiirust. Tegur on oluline, kuna lumikatte sulamisest sõltub vegetatsiooniperioodi algus ja kasvuperioodi kestvus. Laiemalt Läänemere regiooni puude puhul mõjutavad puude kasvu enim varakevadised ja suvised ilmaolud, männi radiaaljuurdekasvul on suurim seos veebruari ja märtsi temperatuuridega (Harvey *et al.*, 2020). Seejuures on soojemaks muutuvatel jaanuarikuu keskmistel temperatuuridel ajas kasvav positiivne mõju okaspuude kasvule (Babst *et al.*, 2013), sealhulgas ka harilikule männile (Harvey *et al.*, 2020). Tulenevalt mändide vähesest tundlikkusest mullaniiskusele, ei ole ka sademed enamjaolt oluliseks mõju faktoriks kasvule (Läänelaid & Eckstein, 2003; Läänelaid *et al.*, 2009). Siiski mõjutavad Eesti mändide kasvu augustikuu sademed, Kagu-Eestis aga eelkõige veebruarikuu sademed (Hordo *et al.*, 2009).

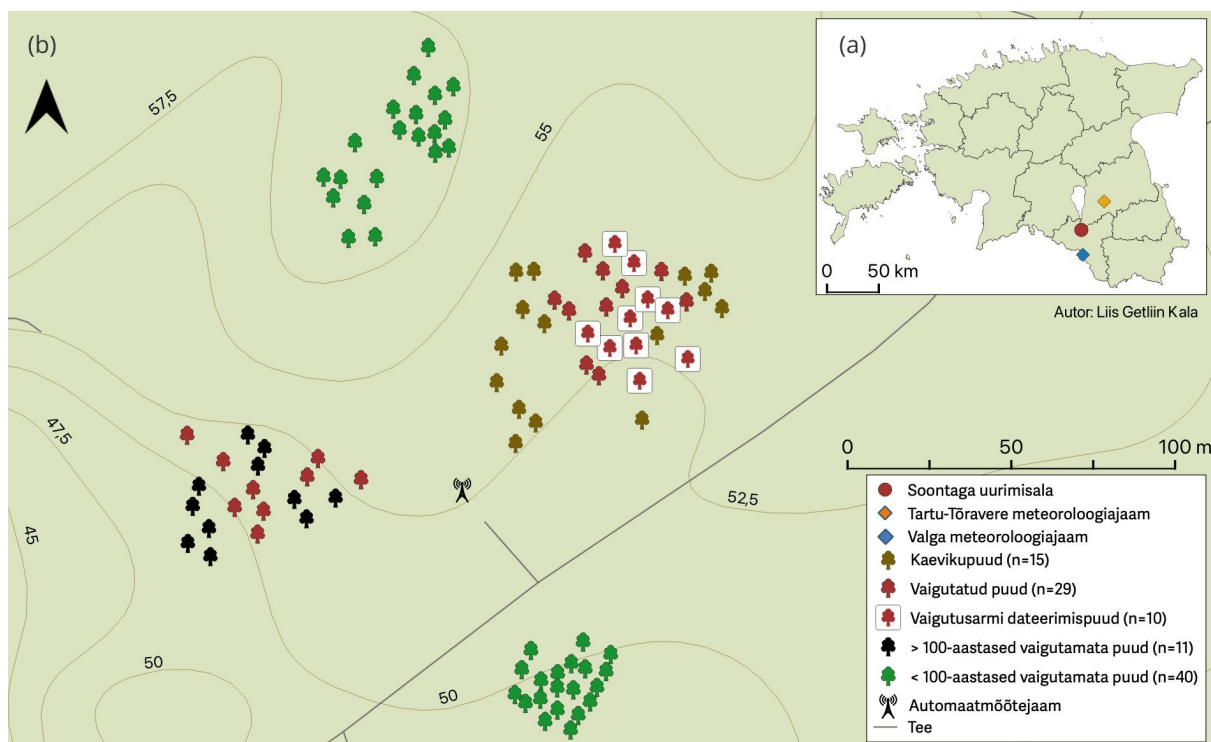
3. Materjal ja metoodika

3.1 Uurimisala kirjeldus

Uurimisalaks olev metsatükk asub Valgamaal Tõrva vallas Soontaga külas Tartu Ülikooli metsaökosüsteemi uurimisjaama aladel ($58^{\circ} 1' 24,667''$ N; $26^{\circ} 4' 14,638''$ E) (joonis 1). Uurimisala paikneb Soontaga looduskaitsealal, mis kuulub ka Natura 2000 kaitsealade hulka (Soontaga looduskaitseala kaitse alla võtmine ja kaitse-eeskiri, 2006). Kogu uurimisalaks olev mets asub riigi maal. Uurimisobjektiks olevad puud kasvavad valdavalt 45 kuni 60 meetri kõrgusel merepinnast (Maa- ja Ruumiamet, 2020). Uurimisalal on valdavalt levinud nõrgalt või keskmiselt leetunud leedeliivmullad (Maa- ja Ruumiamet, 2001). Tüüpprofiiliga O-Ea-Bhf-C muld on põuakartlik ja happeline (Soosaar *et al.*, 2014). Lõuna-Eestile omaselt asub uurimisala Kesk-Devoni punasest liivakivist aluspõhjal, liivakivi ulatub 40–45 meetri kõrgusele merepinnast (Tammekann *et al.*, 1932). Puurinde moodustavad peamiselt bakalaureusetöö uurimisobjektiks olev harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.) ja harilik kuusk (*Picea abies* (L.) H. Karst.). Hariliku männi genofondi säilitamine on üheks selle looduskaitseala olulisimaks eesmärgiks (Soontaga looduskaitseala kaitse alla võtmine ja kaitse-eeskiri, 2006). Valga nõos Väikese-Emajõe orundis paikneval uurimisalal on levinud palumetsade tüübirühma kuuluv pohla kasvukohatüüp (Soosaar *et al.*, 2014). Metsakasvukohatüübile kohaselt puudub põõsarinne, esineb välja arenenud puhmarinne ja pidev sambla-samblikurinne (Paal, 1999).

Ajalooliselt on kuulunud uurimisala Aakre metstkonda (tänapäeval osa Aakre metsandikust Valgamaa metstkonnas). Tegemist oli aktiivse nõukogudeaegse metsamajandustsooniga, kus teostati puude vaigutamist. Täpset vaigutamisaega pole teada, kuid tegevust kinnitavad uurimisala mändidel leiduvad vaigutusarmid (joonis 2).

Teise maailmasõja ajal jäi ala rindetsooni, mida ilmestavad endised sõjakaevikud ümbruskonna maastikus, sealhulgas ka uurimisala idaosas paiknevad ühemehekaevikud (joonis 3). Sõjategevuse jäljed pärinevad teisest maailmasõjast, kui toimusid Punaarmee ja Saksa armee kokkupõrked Väikese-Emajõe rindejoonel. Aktiivne lahingutegevus leidis aset 1944. aasta augustis ja septembris, peädides 14. septembril 1944. aastal alanud jõulise Punaarmee pealetungiga, mille järgselt Saksa väed Eesti aladelt taandusid (Mõtsküla, 1969; Laar, 1997).



Joonis 1. (a) Soontaga uurimisala ja kasutatud ilmastikuandmete meteoroloogiajaamade asukohad. (b) Loodusliku ja antropogeense mõjuga proovipuude paiknemine uurimisala. (Aluskaart: Maa- ja Ruumiamet, 2020)

Uurimisala asub Väikesest-Emajõest umbes 900 meetrit ida pool. Edela suunda jäävad Aakre Saeveski paisjärv ja Soontaga oja. Paisjärve kaldal asuvad RMK metsamaja ja lõkkeplats ning ümber järve kulgeb matkarada, mis ulatub Väikese-Emajõeni. Soontaga metsaökosüsteemi uurimisala keskmes paikneb Soontaga tulevalvetorn, millele on rajatud automaatmõõtejaama mast, kust mõõdetakse turbulentsse kovariatsiooni meetodil (*eddy covariance*) ökosüsteemi CO₂ ja H₂O vooge (Soosaar *et al.*, 2014). Lisaks teostatakse uurimisalal ka pimekambrimeetodil kasvuhoonegaaside mõõtmisi. Masti ümbruses paiknevatele puudele on paigaldatud ka dendromeetrid, millega mõõdetakse automaatselt pidevalt puude rinnasdiameetri kasvu.



Joonis 2. Vaigutusarm harilikul männil (autori foto).



Joonis 3. Ühemehekaevik (autori foto).

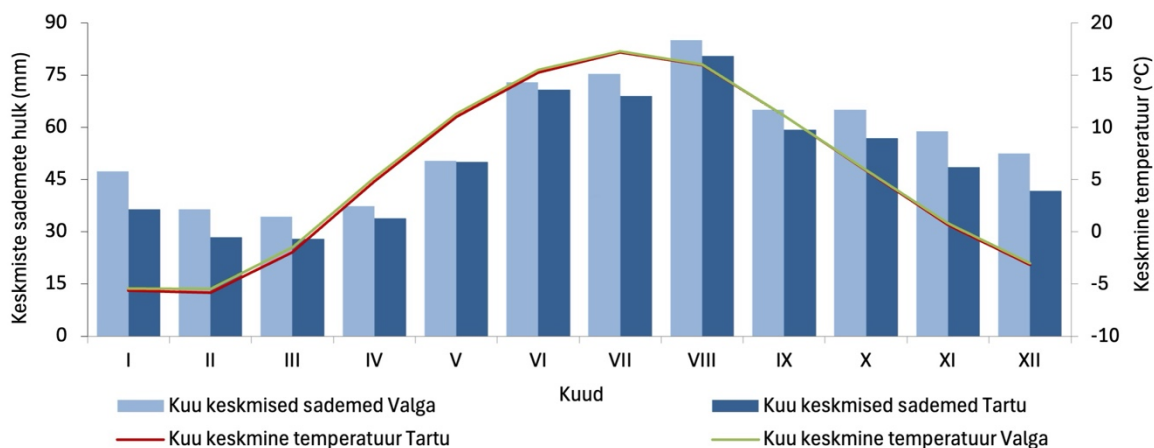
3.2 Ilmastiku andmed

Puudele avalduva ilmastiku mõju analüüsimiseks kaasati töösse lähikümbruses paikneva meteoroloogiajaama sademete ja temperatuuride aegread. Ilmastiku mõju avaldumist puu radiaaljuurdekasvule uuriti kahe lähima ilmastikku seirava meteoroloogijaama, Tartu-Tõravere ($58^{\circ} 15' 49''$ N; $26^{\circ} 27' 41''$ E) ja Valga ($57^{\circ} 47' 18''$ N; $26^{\circ} 2' 0''$ E) andmetel. Seirejaamad asuvad linnulennult vastavalt umbes 35 ning 26 kilomeetri kaugusel Soontaga uurimisalast (joonis 1a). Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam tegutses algselt Tartu linnas, kuid koliti 1960. aastatel ümber Tõravere, kus alustati täismahus mõõtmisi 1965. aastal (Keskkonnaagentuur, 2020). Nimetatud meteoroloogiajaamade töödeldud andmed on saadud TÜ klimatoloogia emeriitprofessorilt Jaak Jaaguselt.

Tartu-Tõravere jaama pidevad temperatuuri ja sademete andmed ulatuvad tänapäevast 1866. aastani. Valga jaama temperatuuri andmed algavad 1941. aastast. Perioodil 1941–1946 esinenud andmelüngad interpoleeriti Tartu vaatlusandmetest lineaarse regressiooni mudeli abil töö autori poolt. Kahe meteoroloogiajaama kuu keskmised temperatuurid on läbi aastate peaaegu samad, erinedes enim $0,4^{\circ}\text{C}$ võrra märtsis (joonis 4). Sademed on lokaalsemad ning erinevad seetõttu piirkonniti rohkem. Enam sademeid on Valgas, kus kuu keskmised sademed erinevad Tõravere jaama andmetest enim 11 mm detsembris. Perioodil 1947–2023 esines sademeid keskmiselt enim augustikuus, Valgas sadas siis keskmiselt 75 mm ja Tõraveres

81 mm. Lisaks augustile on sademerohked olnud ka ülejäänud kaks suvekuud. Sademevaeseimaks kuuks on märts, ilmajaamade andmeil sajab sellel kuul keskmiselt 28 kuni 34 mm sademeid. Aasta keskmised sademed jäävad vahemikku 600–700 mm. Eesti kliimale kohaselt jäävad kõrgeimad keskmised õhutemperatuurid suvekuudele (juuni 15,4 °C, juuli 17,2 °C, august 16 °C) ning madalaimad keskmised temperatuurid talvekuudele (detsember –3,1 °C, jaanuar –5,5 °C, veebruar –5,5 °C). Aasta keskmine temperatuur, mis on arvutatud kahe seirejaama andmetel, on 5,6 °C juurde.

Dendrokliimatilist analüüsi teostati mõlema jaama ilmastiku andmetega, kuid tulenevalt aastarõngalaiuste ja ilmastikuandmete aegridade erinevast ajalisest ulatusest, eelistati kasutada pikemaid Tartu-Tõravere jaama andmeid. Valikul võeti arvesse ka esmase dendrokliimatilise analüüsi sarnaseid tulemusi kahe erineva andmestikuga. Tulenevalt temperatuuri andmete väikesest erinevusest kahe jaama vahel, ei peetud Tartu-Tõravere jaama suuremat kaugust uurimisalast oluliseks. Seetõttu tugineb töös esitatud dendrokliimatiline analüüs Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama andmetel.



Joonis 4. Tartu-Tõravere ja Valga meteoroloogiajaama kuu keskmised temperatuurid ja sademed perioodil 1947–2023.

3.3 Välitööd

Käesoleva uurimistöo raames kasutatud puiduproovide kogumiseks teostati välitööd kolmel korral. 2020. aasta oktoobris ja novembris kogusid TÜ geograafia osakonna töötajad Kristina Sohar, Alar Läänelaid, Kaido Soosaar, Jaan Pärn ja Muhammad Kamil Sardar Ali 80 männilt puurproovid Soontaga automaatmõõdejaama masti ümbrusest neljast põhiilmakaarest (joonis 1b). Igalt proovipuult võeti kaks puurproovi – valdavalt tüve põhja- ja idasuunast.

Proovipuude hulka sattus ka vaigutusarmidega puid, kuid toona ei olnud nimetatud asjaolu oluliseks teguriks.

Inimmõju uurimiseks koguti lisaproove puudelt 2024. aasta oktoobris ja 2025. aasta märtsis (joonis 5). Need puud paiknesid endiste sõjakaevikute ääres või olid vaigutatud. Vaigutatud puudelt võeti lisaproove eesmärgiga dateerida vaigutamise toimumisaasta. Neid välitöid teostas antud töö autor koos kursusekaaslase Sander Terasega. Kõik antud töös kasutatud proovid koguti eluspuudelt.

2024. aasta oktoobris koguti proovid viieteistkümnelt üle 100 aasta vanuselt männilt, mis kasvasid kuni 180 cm kaugusel kaevikust (lisa 1). Kaeviku mõju uurimiseks võeti puudelt kaks puurproovi – üks tüve kaevikupoolsest raadiusest ning teine selle vastasraadiusest kaevikust eemal. Sellisel viisil proove kogudes on võimalik hinnata kaevikust tulenevaid puusiseseid kasvueripärasid. Kokku koguti 30 proovi, mis ulatusid puu koorest säsini või säsilähedaste aastarõngasteni. Ühtlasi olid kõik kaevikupuud vaigutatud. Vaatamata sellele ei ole kaevikupuud kaasatud vaigutatud puude gruppi, kuna puurproovi võtmise tehnika oli erinev. Edaspidi nimetatakse kaeviku mõju uurimiseks kasutatud puid kaevikupuudeks ja proove kaevikupuuproovideks.

2025. aasta märtsis koguti proovid kümnelt üle 100-aastaselt männilt, millel olid äratuntavad vaigutusarmid. Vaigutusarmiga puud valiti välja 2020. aastal puuritud ning vaigutusanalüüsi kaasatud 29 puu hulgast. Proovid võeti sellel korral vaigutusarmide pealt. Sellisel proovivõtu meetodil on võimalik dateerida puu vaigutamise aasta (Choi *et al.*, 2020; Zeng *et al.*, 2021). Vaigutusarmide kõrguse tõttu koguti proovid karride vaheliselt osalt armi alumisest servast. Edaspidi kasutatakse töös vaigutusarmi dateerimiseks võetud proovide puhul väljendit vaigutusarmi proovid.



Joonis 5. (a) Puidu puurproovi võtmine maapinnalt ja (b) vaigutusarmilt puurproovi võtmine, seistes pakul (Fotod: Sander Teras).

Puidu puurproovide võtmiseks kasutati 40 cm pikkust Haglöfi juurdekasvupuuri. Proovi võtmisel keeratakse spiraalsete teravate keermetega seest õõnes puur radiaalselt säsi suunas puutüvesse, mille tulemusena jääb puuri torru 5 mm läbimõõduga puidu puursüdamik ehk puurproov. Proovipuud olid enamasti suurema kui 125 cm ümbermõõduga, seega koguti igalt puult kaks puurproovi, mis ulatusid koorest puu keskosani, mitte üks proov kogu diameetri ulatuses (tabel 1; lisa 1). Puurides püüti tabada säsi, kuid kõigil puudel see ei õnnestunud, seega on osadel proovidel olemas vaid säsilähedased aastarõngad. Vaigutamise dateerimiseks koguti valikuliselt kümnel vaigutusarmiga puult lisaks üks puurproov, mis ulatus armist puu keskosani. Proovid võetakse tavapäraselt rinnakõrguselt (130 cm) puurides 90 kraadise nurga all, kuna nii on võimalik puurijal maksimaalselt jõudu rakendada (joonis 5) (Speer, 2010). Vaigutusarmid asusid puudel kõrgemal kui 135 cm (tabel 1), seega kasutati nende puude puurimisel pakku, mille peal puurimise ajal seisti (joonis 5b). Iga proovi võtmisel märgiti üles proovivõtu ilmakaar, puu ümbermõõt ning asukoha koordinaadid. Lisaks mõõdeti vastavalt vajadusele proovipuu kaugus kaevikust, vaigutusarmi kõrgus maapinnast ning vaigutusarmi mõõtmed.

3.4 Laboratoorsed tööd

2020. aastal kogutud 80 männi puurproovide aastarõngalaiused olid mõõdetud, sünkroniseeritud ja keskmistatud kronoloogiateks töö juhendaja poolt varem. 2024. ja 2025. aastal kogutud lisaproovide aastarõngalaiused on mõõdetud töö autori poolt, vajalikud kontrollmõõtmised teostas juhendaja Kristina Sohar. Kaevikupuude ja vaigutusarmide puurproovid on esitatud joonisel 6.



Joonis 6. Vaigutusarmide dateerimiseks (a) ja kaevikute mõju (b) uurimiseks kogutud puidu puurproovid (autori foto).

Peale proovide kogumist mõõdeti laboris joonlauaga üle metsamärgade toorproovide pikkused. Seejärel valmistati proovid ette mikroskoobiga mõõtmiseks. Esmalt kinnitati puurproovid sobiva pikkusega metallist proovihoidjatele. Seejärel lõigati puiduproovi ristpind žileti või kipsinoaga siledaks, rakendades tegevuse käigus pikki sujuvaid eemale lükkavaid liigutusi risti puidukiude. Aastarõngaste laiuste mõõtmiseks kasutati mõõtmisaparaati Lintab ja mikroskoopi Leica S4E. Igal proovil mõõdeti aastarõngalaiused säsist puukooreni ühikutes 1/100 millimeetrit. Aastarõngapiiride paremaks eristamiseks kanti mõõtmisprotsessi käigus

puiduproovile vett või kriiti. Mõõtmistulemused salvestati puude aastarõngaste uurimiseks loodud programmi TSAP-Win (Rinn, 2011).

Mõõtmistulemuste salvestamisel anti puiduproovile unikaalne kood, mis lähtus 2020. aastal kogutud proovide nimetamise seaduspärasest (Läänelaid, 2000). Kaeviku mõjuga puudele antud koodid jätkasid eelneva 80 puu nummerdussüsteemi, ning kannavad numbreid 81 kuni 95 (0epsnt81–0epsnt95). Vaigutamise aja määramiseks koguti lisaproovid juba 2020. aastal puuritud puude hulgast, seega anti neile samad koodid mis toona, varieerub vaid proovivõtu suunda näitav täht. Koodi alguses olev θ märgib, et tegu on puu mõõdetud raadiusega, kui kood algab numbriga 1, siis on tegu sama puu kahe raadiuse keskmistatud aegrega. Koodi järgnev osa *epsnt* sisaldab lühenditest koosnevat infot proovivõtu riigi (*e* ehk Eesti), proovipuu liigi (*p* ehk *Pinus sylvestris* L.) ja proovivõtuala (*snt* ehk Soontaga) kohta. Lühendile järgnev number näitab mitmes puu proovivõtu järjekorras oli. Viimasena numbritele järgnev täht tähistab ilmakaart, kust proov puuriti. Kui sellele järgneb veel täht *R* (ehk *resin scar*) on tegu puu vaigutusarmilt võetud prooviga (tabel 1). Mõõtmisprotsessi järgselt märgiti koodid ka proovidele ning vajadusel teibiti kokku lahti murdunud proovitükid (joonis 6).

Programmis TSAP-Win toimus mõõdetud aastarõngalaiuste ridade esmane visuaalne kontroll joongraafikute abil. Kontrollimisel võrreldi esmalt ühe puu eri raadiuste mõõtmisi omavahel ning seejärel teiste proovipuude juurdekasvuridadega. Täiendavalt kontrolliti mõõtmisi varem loodud 2020. aasta andmestikul põhinevate kronoloogiatega. Lisaks visuaalsele kontrollile teostati statistilise sarnasuse analüüs programmis COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Arvutiprogramm COFECHA võrdleb igat proovi juurdekasvurida teiste proovide keskmise juurdekasvureaga, kusjuures keskmine ei sisalda vaatluse all olevat puiduproovi. Programm arvutab vaadeldavate juurdekasvuridade vahelise korrelatsioonikoefitsiendi 50-aastase ajaperioodi jooksul iga 25 aasta tagant. Kontrolliks kasutatud meetodite abil leitud vead parandati, lisades puuduva aastarõnga puhul juurdekasvureale vajalikku kohta manuaalselt väärtuse 1. Seejuures tuleb mainida, et kahe kaevikupuu proove ei õnnestunud sünkroniseerida, seega lähtuti edasisel andmete analüüsil vaid 13 puu juurdekasvuridadest.

3.5 Andmeanalüüs

Hindamaks ilmastiku mõju puu kasvule, tuleb mõõdetud aastarõngalaiuste read standardiseerida (Fritts, 1976). Selleks kasutati tarkvaraprogrammi ARSTAN (Cook, 1985). Standardiseerimise eesmärgiks on vähendada müra aegreas ehk eemaldada vanusega seotud kasvutrend ja teised pikaajalised varieeruvused, et tugevdada signaali uuritava keskkonnamõju

suhtes (Speer, 2010). Antud töö kontekstis sooviti tugevdada ilmastikust tulenevat signaali. Eeldatakse, et ilmastikumõju avaldub aastarõngalaiuste kõrgsageduslikus kõikumises (Fritts, 1976). Standardiseerimisel eemaldatakse juurdekasvuridade trendid jagades iga aastarõngalaiuse väärtuse läbi tasandava trendijoone vastava väärtusega. Käesolevas töös prooviti kahte trendi eemaldamise meetodit – negatiivset eksponentsiaalfunktsiooni ning spline funktsiooni. Esimese puhul on tegu konservatiivsema standardiseerimise tehnikaga, mis eemaldab juurdekasvu aegreast vanusetrendi, samas kui spline on tükiti polünoomiaalne funktsioon, mis kohandub ja silub andmestikku paremini (Speer, 2010). Antud töös kasutati 30-aastast splinei. Kuna mõlema meetodi lõpptulemusena standardiseeritud aegreast ei erinenud oluliselt, kasutati edasises dendrokliimaatilises andmeanalüüsis spline funktsiooniga saadud juurdekasvuindekseid. Standardiseerimise käigus eemaldatakse andmerekast lisaks ka autokorrelatsioon ning keskmistatakse üksikud puud kronoloogiaiks. Standardiseeritud aastarõngalaiused on suhtelistes ühikutes ning nende keskmiseks väärtuseks on 1.

Juurdekasvu ja ilmastiku vahelisi seoseid analüüsiti vabavara R 4.4.2 R-Studio keskkonnas (R Core Team, 2024) *treeclim* paketi abil (Zang & Biondi, 2015). Dendrokliimaatiline analüüs viidi läbi standardiseeritud aegride ning nii Valga kui ka Tartu-Tõravere sademete ja temperatuuri andmetega. Tulenevalt kronoloogiate pikkusest otsustati töös esitada tulemused Tartu-Tõravere andmetega tehtud analüüsist. Korrelatsioonianalüüsi käigus arvutati standardiseeritud aegride ja ilmastiku andmete vahelised Pearsoni korrelatsioonikordajad (r) ning nende 95% usalduspiirid ($p < 0,05$) *bootstrap*-meetodil (Zang & Biondi, 2015). Seosed arvutati juurdekasvu ja 12 kuu keskmiste temperatuuride ja sademete summade vahel. Aastane ajaaken hõlmas kuid kasvuperioodile eelneva kalendriaasta oktoobrist kuni kasvuperioodile vastava kalendriaasta septembrini. Lisaks arvutati seosed summeeritult kuude kohta, mis olid järjestikku statistiliselt olulised ($p < 0,05$). Kõik korrelatsioonikordajad saadi arvutada 154-aastase perioodi (1867–2020) kohta, mille määras ära ilma vaatlus andmete algusaeg (1866) ning aastarõngalaiuste kronoloogiate lõpp (2020). Vaid alla 100-aastaste puude puhul oli analüüsi perioodiks aastad 1933–2020. Lisaks staatilisele analüüsile viidi läbi ka dünaamiline korrelatsioonianalüüs uurimaks seose püsivust ajas (Zang & Biondi, 2015). Selleks kasutati 30-aastast libisevat aja-akent 1-aastase sammuga. Dendrokliimaatilisi seoseid analüüsiti eraldi viies grupis: vaigutatud puud ($n = 29$), üle 100-aastased ($n = 11$) ja alla 100-aastased ($n = 40$) vaigutamata puud eraldi ning koos ($n = 51$), kõik puud koos ($n = 80$) olenemata vanusest ja vaigutatusest.

Inimtekkeliste häiringute ehk sõjakaevikute ja vaigutamise mõju mändide radiaaljuurdekasvule analüüsiti standardiseerimata aegridadega MS Excelis. Selleks kasutati kaevikupuude puhul kaevikupoolsete ja nende vastasraadiuste keskmisi juurdekasvuridu ning vaigutatud puude puhul vaigutatud ja vaigutamata tüveraadiuste keskmisi juurdekasvuridu. Siinkohal valiti kõigist vaigutatud puudest ($n = 29$) välja need puud, mille puhul oli olemas puurproovid nii vaigutatud kui vaigutamata tüveraadiusest ($n = 22$). Järgnevalt arvutati häiritud ja terve tüveraadiuse juurdekasvu vahe ning vahede aegrea mediaan. Seejärel järjestati vahe väärtused ning arvutati andmestikust 95. protsentiilide väärtused. Eesmärgiks oli eristada 5% äärmuslikest väärtustest ehk erakordsed aastad, mil erinevus kahe uuritava raadiuse vahel oli äärmiselt suur. Lisaks võrreldi kaevikupuude ($n = 13$) eri raadiuste juurdekasvu dünaamikat lähedal kasvavate üle 100-aastaste vaigutatud mändide ($n = 20$) juurdekasvuga ning vaigutatud puude ($n = 22$) eri raadiuste juurdekasvu üle 100-aastaste vaigutamata mändide juurdekasvuga ($n = 11$).

Vaigutusarmide dateerimiseks sünkroniseeriti vaigutusarmilt võetult proovi juurdekasvurida sama puu teiste raadiuste keskmise juurdekasvureaga. Armi pinda dateerides on võimalik määrata aasta, millal on vigastatud tüveosal kasv peatunud. Sama puu teise raadiuse kaudu proovide dateerimist on vaigutamisaaja määramiseks kasutatud ka Koreas (Choi *et al.*, 2020). Vaigutusarmide dateeringute statistilist usaldusväärsust hinnati T_{BP} , Glk ja CDI statistiliste sarnasusnäitajate abil. Student'i t-väärtus Baillie ja Pilcheri järgi (T_{BP}) arvutatakse korrelatsioonikordajast ning võrreldavate ridade pikkusest, väärtusi üle 3,5 või 4 peetakse oluliseks (Baillie ja Pilcher, 1973). Samasuunaliste juurdekasvumuutuste protsenti väljendavat Glk (*Gleichläufigkeit*) statistikut kasutatakse samaaegsete kasvutrendide sarnasuse võrdlemiseks (Eckstein & Bauch, 1969). Glk statistikut väljendatakse protsendiliselt, mis on summa kahe samasuunaliselt kasvanud aastatest (Speer, 2010). Kattuvdateerimiseindeks CDI (*cross date index*) kombineerib mitmeid sarnasusnäitajaid, sealhulgas Glk ja T_{BP} parameetreid (Rinn, 2011).

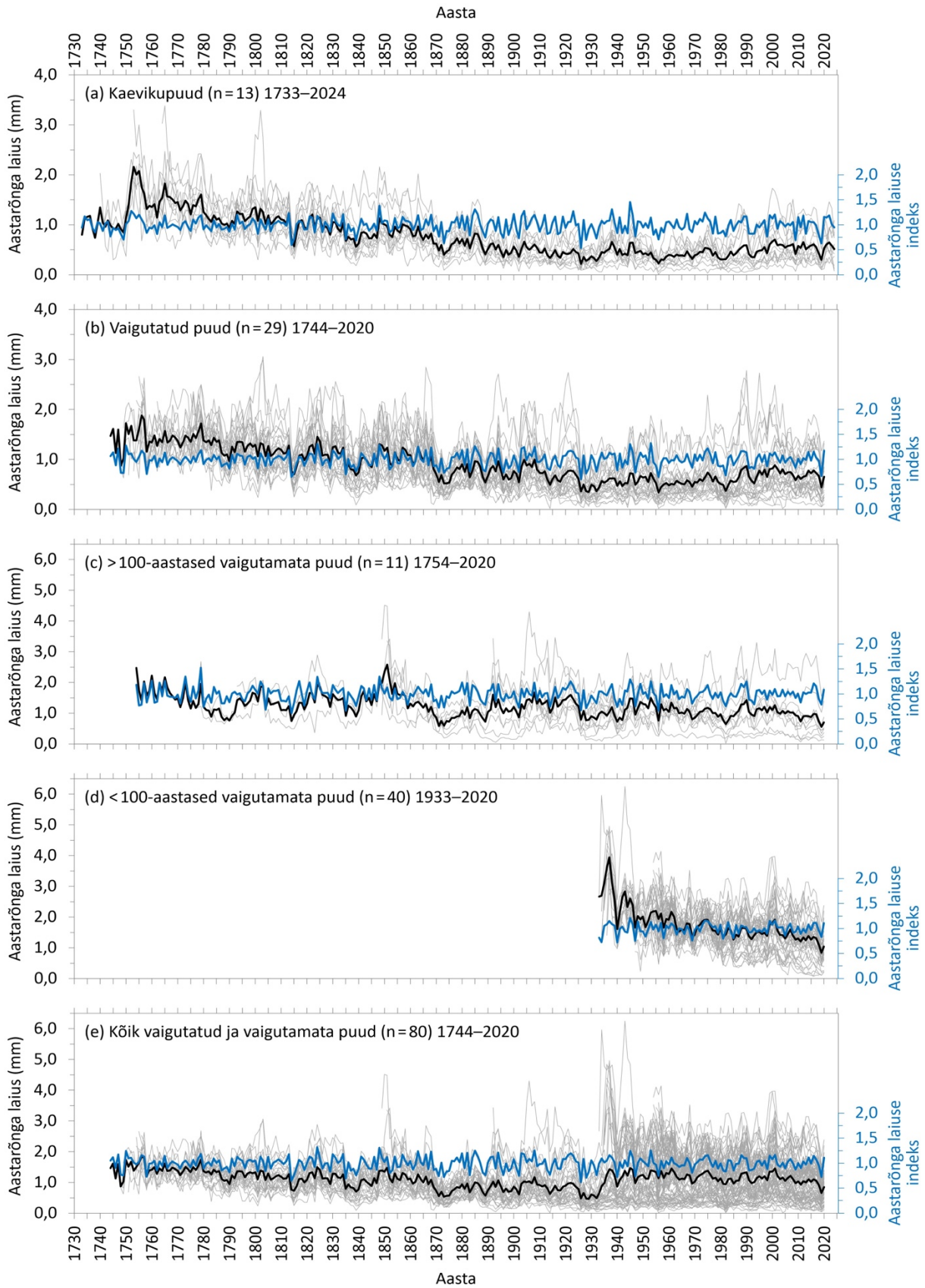
4. Tulemused ja arutelu

4.1 Mändide aastarõngalaiuste kronoloogiad

Vanimad puud Soontaga proovialal on peaaegu 300-aastased, ulatudes 1733. aastast 2024. aastani (joonis 7a). Pikimate juurdekasvuridadega puud kuuluvad kaevikupuude hulka. Enamik vaigutatud puudest on üle 250 aasta vanused (kronoloogia ulatus 1744–2020; joonis 7b). Proovikogumi vaigutamata mändidest on üle 100-aastaseid vaid 11 puud (kronoloogia ulatus 1754–2020; joonis 7c) ning alla 100-aastaseid 40 puud (kronoloogia ulatus 1933–2020; joonis 7d).

Kõikides valimi alagruppides on märgatav üksikute puude ja nende keskmistes juurdekasvuridades esinev sarnane vanuseline kasvutrend (joonis 7). Üldise suundumusena asendub puude noorusea kiire juurdekasv paarikümne aasta jooksul ühtlasema aeglasema kasvuga. Kõigi uuritud vaigutatud ja vaigutamata mändide ($n = 80$) kronoloogias on 1930. aastatel esinev aastarõngaste laienemine tingitud just samast asjaolust, kuna kronoloogias lisanduvad 40 noort puud (joonis 7e). Lisaks on nende puude juurdekasv keskmiselt terve kasvuperioodi jooksul suurem kui vanematel puudel. Selliste moonutuste tõttu ongi dendrokliimaatiliseks analüüsiks kasutatud standardiseeritud juurdekasvu kronoloogiaid (joonis 7).

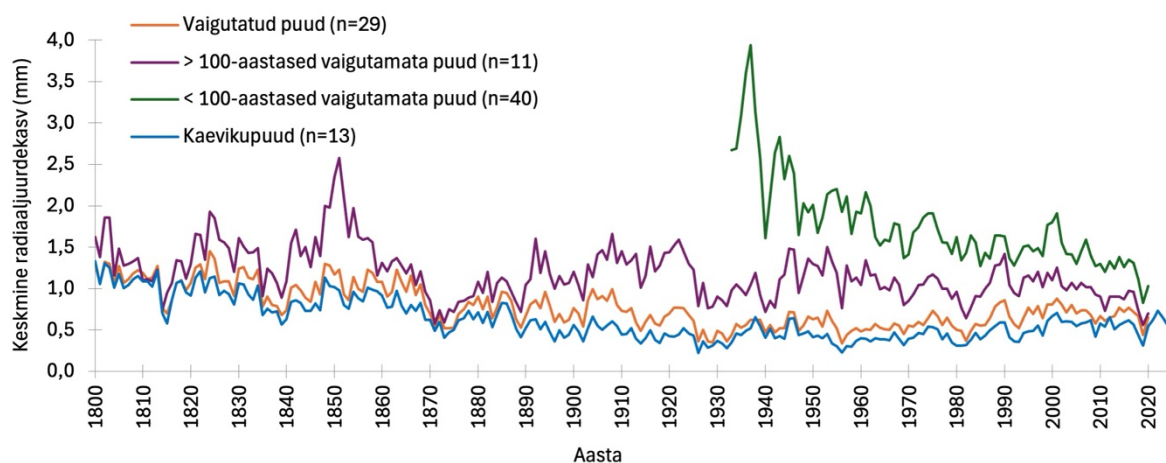
Välistamaks noorusea kiire kasvu mõju absoluutse juurdekasvu võrdlemisel puude gruppide vahel, on kronoloogiaid võrreldud ühtselt alates 1800. aastast (joonis 8). Sellest ajast esindavad kaevikupuude kronoloogiat kõik 13 puud, vaigutatud puude kronoloogiat vähemalt 25 puud ning vaigutamata üle 100-aastaste puude kronoloogiat vähemalt 3 puud. Vaigutamata alla 100-aastaste puude puhul ühtlustub juurdekasv umbes 1950. aastal, mil kronoloogiat esindab vähemalt 22 puud. Vastukaaluks pikale kronoloogiale on kaevikupuude ($n = 13$) keskmine aastane jämeduskasv kõige väiksem (0,62 mm). Kaevikupuudele sarnaselt on ka vaigutatud puude ($n = 29$) keskmine aastane juurdekasv tagasihoidlik, jäädes 0,78 mm. Üle 100-aastaste vaigutamata puude ($n = 11$) keskmine radiaaljuurdekasv on seevastu 1,18 mm aastas. Uurimisala noorimate (alla 100-aastased vaigutamata) puude keskmine aastane jämeduskasv on suurim (1,77 mm).



Joonis 7. Soontaga mändide juurdekasvuread (hallid jooned) koos nende keskmise (must joon) ja standardiseeritud (sinine joon) kronoloogiaga puudegruppide kaupa.

Üldiselt võib võrreldes teiste Eestis läbiviidud juurdekasvu uuringutega Soontaga eri männigruppide keskmist juurdekasvu pidada pigem väikeseks. Näiteks on leitud, et Kirde-Eesti ja Hiiumaa kuivadel ja liivastel kasvukohtadel on mändide aastane juurdekasv vastavalt 1,15 ja 1,45 mm (Hordo *et al.*, 2011). A. Läänelaid *et al.* (2025) on kirjeldanud, et metsapuude põhjal koostatud Eesti männikronoloogia keskmine aastarõnga laius perioodil 1900–2000 on 1,14 mm. Eesti lähiriikides alla tuhande aasta pikkuste männikronoloogiates on keskmine juurdekasv järgnev: Soomes 0,99...1,31 mm (Hordo *et al.*, 2011) ja Leedus 1,31 mm (Vitas, 2008). Samas on üle 7000 kasvuaastaga Põhja-Soome männikronoloogias keskmine radiaalkasv vaid 0,6 mm (Eronen *et al.*, 2002).

Mändide keskmise juurdekasvu dünaamikat erinevates puudegruppides ilmestab joonis 8. Nagu mainitud, on kaeviku- ja vaigutatud puudel keskmiselt väiksem juurdekasv kui häiringuta puudel. Samas ei saa kumbagi inimtekkelist häiringut pidada ainukeseks pikaajalise madala juurdekasvu põhjuseks, kuna intensiivne vaigutamine toimus Eesti metsades alles 1950.–1980. aastatel (Tarang, 2007) ning sõjakaevikud kaevati 1944. aastal Punaarmee ja Saksa armee kokkupõrkel Väikese-Emajõe rindejoonel (Mõtsküla, 1969; Laar, 1997). Pikki juurdekasvuridu võrreldes (joonis 8) selgub, et 18. ja 19. sajandil on kõik mändid kasvanud sarnaselt ning suurem lahknevus häirimata ja hilisemate häiringutega puude vahel algab juba 1890. aastatel. Osaliselt võib seda seletada vanade vaigutamata puude vähesusega valimis ($n = 11$) ning seetõttu pääsevad kronoloogias mõjule ka üksikud laiema juurdekasvuga puud. Veelgi enam, selle puudegrupi puud kasvavad enamasti nõlval (joonis 1), mistõttu nende juurdekasvus esineb puu kaldumise tõttu reaktsioonipuidule omaseid laiemaid aastarõngaid.



Joonis 8. Soontaga mändide keskmised aastarõngalaiuste kronoloogiad puudegruppide kaupa perioodil 1800–2020/24.

Aastarõngalaiuste kronoloogiate dünaamikas on märkimisväärne ka kõigi puude samaaegne järsk kasvulangus 1870. aastatel. Selle põhjuseks saab olla näiteks ilmastik või maastiku veerežiimi muutus, mis mõjutas kõiki puid samaaegselt. Soontaga uurimisala lähedal pole metsanduslikke kuivenduskraave, küll aga jääb uurimisalast 200 m kaugusele edelasse Saeveski paisjärv, mis võis ümbruskonna veerežiimi muuta. Paisjärve kohta on teada, et see rajati ilmselt millalgi niinimetatud tsaariajal ning see on mitmeid kordi tühjaks jooksnud ja uuesti paisutatud (Drenkhan, 2004). Näiteks, teise maailmasõja lahingute järgselt jooksis paisjärv tühjaks, misjärel see taastati 1960. aastate algul. 1987. aastal lagunes pais taas, mis sai taastatud tänapäevasel kujul (*ibid.*). Ka C. G. Rücker'i Liivimaa spetsiaalkaardil (1839) on juba Saeveski paisjärve (*Sagemühle*) kujutatud. Seega 1870. aastate mändide kasvulangus pole ilmselt seotud paisjärvega, vaid siiski ekstreemsete ilmastikuoludega. Näiteks Tartu-Tõravere pikaajase temperatuuri andmestiku põhjal oli 1870/71. aasta talv kogu vaatlusperioodi külmim. Keskmine temperatuur detsembrist veebruarini oli siis $-13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, võrdluseks selle andmestiku pikaajane (1866–2020) talvine keskmine temperatuur on $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Seega erakordselt külm talv võis kahjustada enamikel puudel kambiumi, mistõttu uusi puidurakke tekkis vähem ning 1871. aasta kasvuperioodil moodustus keskmisest kitsam aastarõngas. Külmemal talve tõttu võis ka kasvuperioodi algus hilineda. Madalamad temperatuurid võivad läbi puu füsioloogilise aktiivsuse (hormoonide, kasvuregulaatorite, toitainete madalama kontsentratsiooni) pärssida ka mitme järjestikuse aasta juurdekasvu (Fritts, 1976).

4.2 Ilmastiku mõju männi radiaaljuurdekasvule

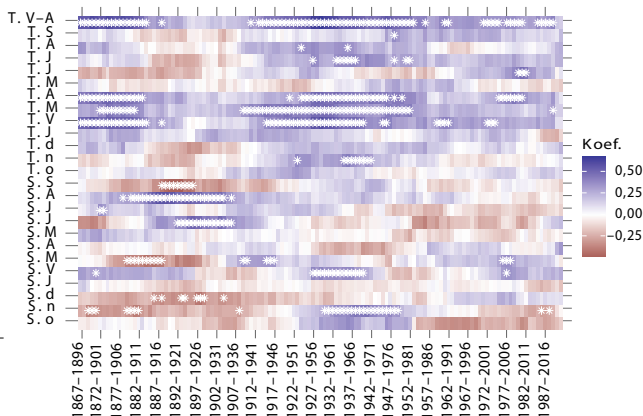
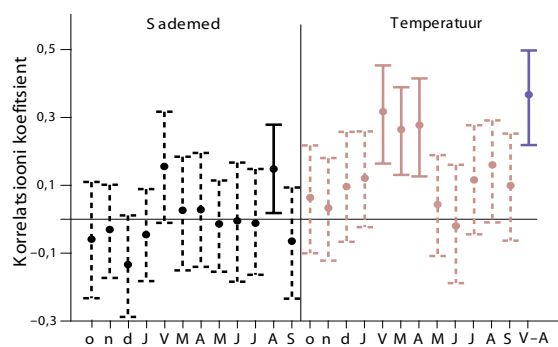
Vaigutatud puude ($n = 29$) standardiseeritud kronoloogiatel esineb statistiliselt oluline positiivne korrelatsioon ($p < 0,05$) kasvuaasta veebruari ($r = 0,32$), märtsi ($r = 0,27$) ja aprilli ($r = 0,28$) temperatuuridega ning augusti ($r = 0,15$) sademetega (joonis 9a). Juurdekasvu ja kolme olulise mõjuga kuu keskmise temperatuuri vahel on kogu ajaperioodi korrelatsioon $r = 0,37$ ($p < 0,05$). Veebruari–aprilli keskmised temperatuurid mõjutasid kasvu tugevamalt peamiselt kahel pikemal perioodil, vaatlusperioodi algusest kuni 1888.–1917. aastat hõlmava ajaaknani ning uuesti perioodide 1912–1941 ja 1953–1982 vahemikus. Terve esimese mõjuperioodi ulatuses mõjutavad kasvu veebruari ja aprilli temperatuurid, märts muutub oluliseks kasvu mõjutajaks veidi hiljem. Teise perioodi alguses ilmneb koheselt märtsi temperatuuride positiivne mõju ning hilisemalt lisandub veebruari ja aprilli temperatuuride efekt. Kahe perioodi vahele jäävatel aastatel on suurimateks puude kasvu mõjutajateks juuni, augusti ja septembri sademed. Peamiseks kasvu soodustavaks teguriteks on viimase sajandi

jooksul olnud eelnimetatud veebruari, märtsi ja aprilli keskmised temperatuurid, kuid seos nõrgeneb alates 1950. aastatest ning on statistiliselt oluline vaid periooditi (joonis 9a).

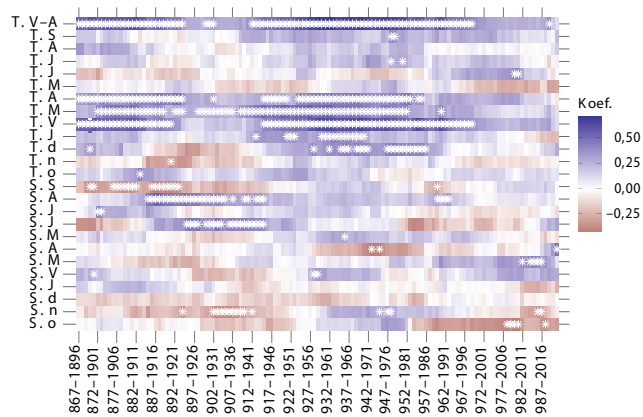
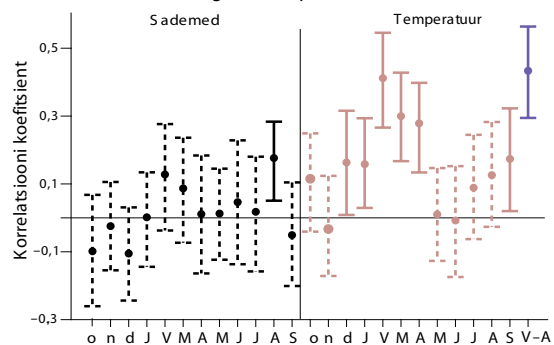
Üle 100-aastaste vaigutamata puude ($n = 11$) juurdekasv korreleerub samuti positiivselt ($p < 0,05$) kasvuaasta veebruari ($r = 0,41$), märtsi ($r = 0,30$) ja aprilli ($r = 0,28$) temperatuuridega ning augusti ($r = 0,18$) sademetega (joonis 9b). Lisaks ilmneb oluline positiivne seos ($p < 0,05$) kasvu ja talviste temperatuuride (nii detsembris kui jaanuaris $r = 0,16$) ning kasvuperioodi lõpu temperatuuride (septembris $r = 0,17$) vahel. Veebruari–aprill keskmise temperatuuri ja juurdekasvu vahel on korrelatsioon 0,43 ($p < 0,05$). Vaadeldes nende kuude temperatuuride ühismõju muutumist ajas, esinevad vaigutatud puudele sarnaselt kaks pikemat mõjuperioodi. Veebruari–aprilli keskmine temperatuur on osutanud tugevat mõju vaatlusperioodi algusaastatel, mõju lõppeb 1894–1923 hõlmava ajaaknaga. Teine mõjuperiood algab seitsmeteistkümnelt 30-aastase ajaakna jagu hiljem. Veebruari mõju ühtib üldjoontes täielikult nimetatud perioodidega. Samuti kattub aprilli temperatuuride mõju nimetatud perioodidega, kuid teise perioodi puhul muutub kuu oluliseks kümme aastat hiljem. Märtsi temperatuuride ja puude kasvu vahel esineb tugev positiivne korrelatsioon kuni 20. sajandi teise pooleni. Veebruari ja aprilli temperatuuride mõju vähenedes 19. ja 20. sajandi vahetusel tõusevad esile märtsi temperatuurid koos augusti ja juuni sademetega. Viimasel sajandil on küll veebruari, märtsi ja aprilli temperatuurid omanud positiivset mõju puude kasvule, kuid olulisi seoseid ei leidu (joonis 9b).

Alla 100-aastaste vaigutamata puude ($n = 40$) puhul jääb enim puude kasvu mõjutanud periood võrreldes teiste puudegruppidega kuu võrra varasemasse ajajärku (joonis 9c). Statistiliselt olulised positiivsed korrelatsioonid ($p < 0,05$) ilmnevad juurdekasvu ja jaanuari ($r = 0,27$), veebruari ($r = 0,27$) ning märtsi ($r = 0,30$) temperatuuridega. Aprilli temperatuurid korreleeruvad ka noorte puude jämeduskasvuga positiivselt ($r = 0,18$), kuid seos jääb ebaoluliseks ($p > 0,05$) (joonis 9c). Kokkuvõtvalt on keskmise temperatuuri ja juurdekasvu vaheline korrelatsioon perioodidel veebruar–aprill 0,33 ning jaanuar–märts 0,36 ($p < 0,05$). Staatilise korrelatsioonianalüüsi tulemusel ühegi kuu sademed olulist positiivset korrelatsiooni ei väljenda. Dünaamilise korrelatsioonianalüüsi tulemusel esineb jaanuari, märtsi ja veebruari temperatuuride oluline positiivne mõju kogu vaatlusperioodi esimeses pooles. Aprilli temperatuuri tugevam mõju puude kasvule lisandub ajaaknas 1952–1981. Vaatlusperioodi lõpus mõjutavad puude kasvu positiivselt enim märtsi, aprilli ja juuli temperatuurid. Seejuures jaanuari temperatuuride mõju olulisus ajas väheneb ning muutub negatiivseks (joonis 9c).

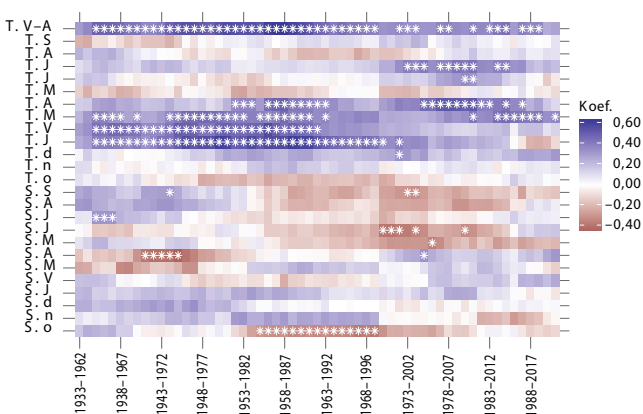
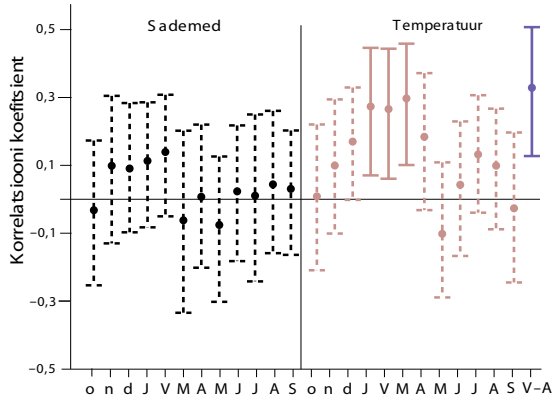
(a) Vaigutatud puud (n=29)



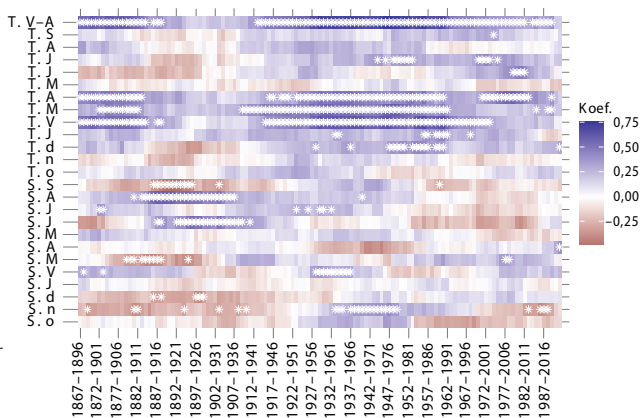
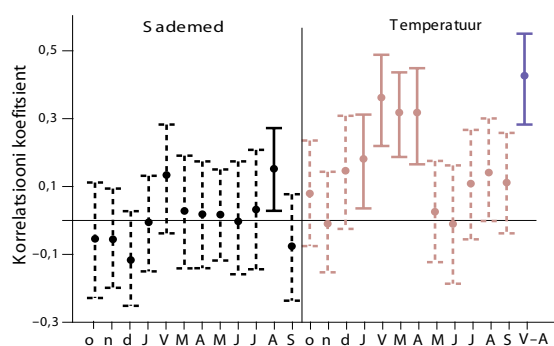
(b) > 100-aastased vaigutamata puud (n=11)



(c) < 100 aastased vaigutamata puud (n=40)



(d) Vaigutatud ja vaigutamata puud (n=80)



Joonis 9. Soontaga mändide radiaaljuurdekasvu korrelatsioon kuu sademete summaga ning kuu ja perioodi (veebruar–aprill) keskmiste temperatuuridega puudegruppide kaupa. Väikesed kuude esitähed (oktoober–

detsember) tähistavad kasvuperioodile eelneva ja suured (jaanuar–september) kasvuperioodiga sama kalendriaasta kuusid. Vasakul: staatilised korrelatsioonid perioodide 1867–2020 (a, b, d) ja 1933–2020 (c) kohta; statistiliselt oluliste korrelatsioonikordajate ($p < 0,05$) 95% usalduspiirid on toodud pideva joonega vurrudega. Paremal: libisevad korrelatsioonid 30-aastases ajaaknas; statistiliselt olulised korrelatsioonikordajad ($p < 0,05$) on tähistatud tärnidega; temperatuur (T) ja sademed (S) on märgitud esitähedega.

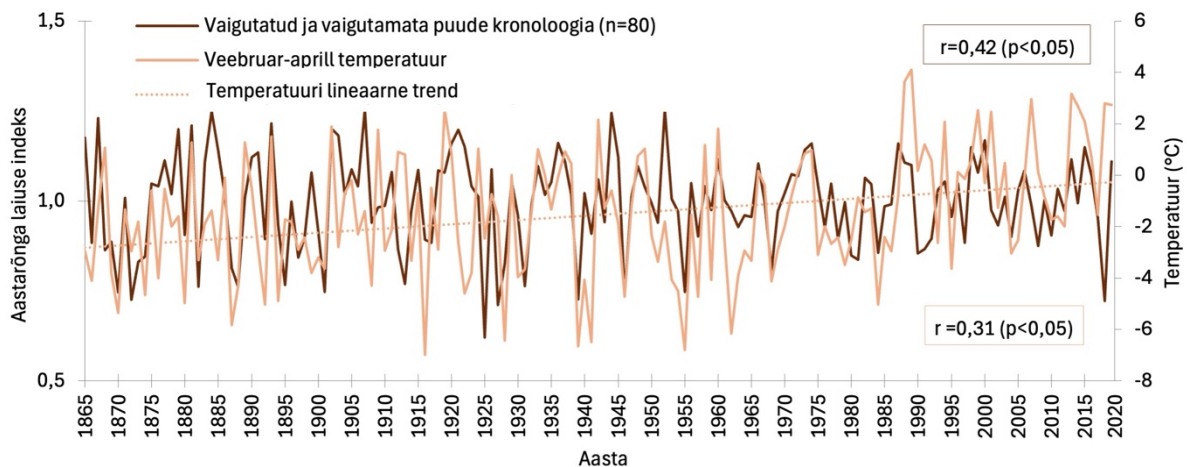
Vaadeldes vaigutamata puid ühe suure grupina ($n = 51$), esinevad olulised positiivsed korrelatsioonid ($p < 0,05$) juurdekasvu ja temperatuuri vahel viiel kuul (lisa 2). Enim mõjutavad vaigutamata puid veebruari ($r = 0,37$), märtsi ($r = 0,33$) ja aprilli ($r = 0,30$) temperatuurid, kuid statistiliselt olulised seosed esinevad ka jaanuari ($r = 0,21$) ning kasvuaastale eelnenud detsembri ($r = 0,17$) näitude vahel. Kokkuvõtvalt on veebruari–aprilli keskmise temperatuuriga korrelatsioon 0,43 ($p < 0,05$). Tulenevalt alla 100-aastaste puude suurest osakaalust vaigutamata puude kronoloogias ei ilmnenud selle puudegrupi staatilises korrelatsioonianalüüsis olulisi seoseid sademetega. Võrreldes kõigi vaigutamata puude ja ilmastiku seoste muutumist ajas, esineb oluline positiivne korrelatsioon veebruari, märtsi ja aprilli temperatuuridega. Libiseva ajaaknaga korrelatsiooni graafikult ilmneb, et nende kuude temperatuuridega esineb nõrgem seos vaatlusperioodi esimesel poolel jäädes ajaakende 1894–1923 ja 1911–1940 vahele (lisa 2). Nimetatud ajaakende vahemikus domineerib novembri, juuni ja augusti sademetest tulenev mõju. Ülejäänud vaatlusperioodi vältel väljendavad need temperatuurid üldiselt pidevat olulist positiivset mõju puude kasvule. Vaatlusperioodi algul mõjutavad puude kasvu oluliselt veebruari ja aprilli temperatuurid. Märtsi tugev mõju lisandub veidi hiljem, kestes 20. sajandi teise pooleni. Veebruari ja aprilli mõju vahepeal puudub, kuid väljendub uuesti sama sajandi esimeses pooles. Jaanuari ja detsembri temperatuuride mõju ilmneb vaatlusperioodi teises pooles. Viimse sajandi alguses on mändide kasvu enim mõjutanud kasvuaastale eelnenud detsembri ja kasvuaasta aprilli temperatuurid (lisa 2).

Kõiki uuritud mände olenemata vanusest ja vaigutatusest koos analüüsid (n = 80), esinesid statistiliselt olulised positiivsed korrelatsiooninäitajad ($p < 0,05$) juurdekasvu ning jaanuari ($r = 0,18$), veebruari ($r = 0,36$), märtsi ($r = 0,31$), aprilli ($r = 0,31$) temperatuuride ja augusti ($r = 0,15$) sademete vahel (joonis 9d). Kolme olulise kuu (veebruar–aprill) temperatuuri koosmõju on tugev ($r = 0,42$, $p < 0,05$; joonised 9d ja 10). Libiseva ajaaknaga korrelatsioonanalüüsist selgub, et nende kuude keskmiste temperatuuride mõju on kogu ajaperioodi vältel positiivne. Nõrgemad seosed ilmnevad vaid esimesel poolel, alates ajaaknast 1913–1942 esinevad pidevad positiivsed korrelatsioonid. Vaatlusperioodi algul mõjutavad

kasvu peamiselt veebruari ja aprilli temperatuurid, sarnaselt väiksematele puugruppidele avaldub märtsi temperatuuri oluline mõju hiljem. Alates 20. sajandi lõpust osutuvad puude kasvule positiivset mõju aprilli ja märtsi temperatuurid. 19. sajandi lõppu ja 20. sajandi algusesse jääva temperatuuride nõrka mõju kompenseerivad juuni ja augusti sademed, millel on sel perioodil tugev seos puude kasvuga. Seejuures väljendub samal ajaperioodil septembrikuu sademete ja puu kasvu vahel tugev negatiivne korrelatsioon (joonis 9d).

Dendrokliimaatilise analüüsi tulemusest selgub, et häiringust mõjutatud puude kliimasignaal on veidi nõrgem kui pika kronoloogiaga vaigutamata puudel. Nii vaigutatud kui vaigutamata vanade puude kasv on enim mõjutatud veebruari–aprilli keskmistest temperatuuridest, mille tulemusel on vaatlusperioodi esimesel poolel puude kasvustrid sarnased. Kasvu mõjutavate tegurite erinevus tekib 1950. aastatel, kui vaigutatud puude sõltuvus kolme kuu keskmisest temperatuurist väheneb, kuid vaigutamata puude puhul oluline seos püsib (joonis 9a ja b). Varasemalt Saksamaal läbi viidud uuringu põhjal ei ole vaigutamisejärgselt vaigutatud puude kliimasignaali erinevust võrreldes vaigutamata puudega tuvastatud (van der Maaten *et al.*, 2017).

Ilmastiku andmeid analüüsidest ilmneb ka kasvu enam mõjutanud kuude (veebruari–aprill) soojemaks muutumine (joonis 10). Soontaga uurimisala männid on muutusele reageerinud negatiivselt ning puude kasvu ja temperatuuride seosed on nõrgenenud (joonis 9).



Joonis 10. Soontaga mändide ($n = 80$) standardiseeritud kronoloogia ja Tartu-Tõravere veebruari–aprilli keskmine temperatuur perioodil 1866–2020 ning nendevaheline korrelatsioon $r = 0,42$ ($p < 0,05$). Temperatuuri aegreas on lineaarne trend $r = 0,31$ ($p < 0,05$).

Dendrokliimaatilised tulemused sarnanevad ka teiste Eesti metsadele keskenduvate uuringutega (Läänelaid & Eckstein, 2003; Henttonen *et al.*, 2014; Metslaid *et al.*, 2018). Nii Metslaidi *et al.*

(2018) kui ka Läänelaidi ja Ecksteini (2003) uurimised kinnitavad positiivseid seoseid männi kasvu ja kõrgete talviste ja kevadiste temperatuuride vahel. Metslaidi *et al.* (2018) andmetel esineb Kagu-Eesti mändide kasvul positiivne seos detsembri, jaanuari ja veebruari temperatuuridega ($r=0,21\dots0,54$). Sarnaselt antud bakalaureusetöö tulemustega esinevad tugevad seosed märtsi ja aprilli temperatuuridega (Metslaid *et al.*, 2018). Samuti kinnitavad mustrit ka Läänelaidi ja Ecksteini (2003) ja Henttoneni *et al.* (2014) uuringud teistes Eesti piirkondades. Lisaks esineb mitmete tööde andmetel augusti sademete olulisus männi kasvule (Hordo *et al.*, 2009; Metslaid *et al.*, 2018). Samas ilmneb Hordo *et al.* (2009) uuringus, et Edela-Eesti mändide kasv on tugevalt positiivselt mõjutatud kasvuaasta veebruari sademetest. Soontaga mändide puhul siiski tugevat seost veebruari sademetega ei ilmnenu, kuid veebruari sademed olid kõigi puugruppide juures positiivse mõjuga. Seejuures täheldatakse Soontaga mändidele sarnaselt Metslaidi *et al.* (2018) uurimuses pohla kasvukohatüübi puhul ka ajalist kasvutegurite varieeruvust, veebruari ja märtsi temperatuuride mõju nõrgemist ja augusti sademete mõju suurenemist.

Seega on võimalik järeldada, et harilike mändide radiaaljuurdekasvu mõjutavad enim veebruari, märtsi ja aprilli temperatuurid. Samas omavad teatavat positiivset kasvumõju ka detsembri ja jaanuari temperatuurid. Sademete positiivne mõju harilike mändide kasvule on tagasihoidlikum, väljendudes vaid vanemate puude augustikuu sademetega kuni 20. sajandi esimese pooleni.

4.3 Kaevikute mõju männi radiaaljuurdekasvule

Kaevikupuude vastasraadiusi omavahel võrreldes ilmneb sarnane kasv kuni 1942. aastani. 1940. aastatel toimunud lahknemine avaldab suuremat mõju järgneva kümnekonna aasta (1942–1953) jooksul. Sellel perioodil sarnaneb kaevikupoolsete raadiuste keskmine 68% ja kaeviku vastasraadiuste keskmine 99% ulatuses lähedal kasvavate teiste üle 100-aastaste puude ($n = 20$) kronoloogiaga (joonis 11a). Seejuures varasemalt esinenud ühtlane kasv mõlemas raadiuses täielikult ei taastugi. Suurim kaevikupuude kahe raadiuse erinevus esineb 1945. aastal, kui kaevikupoolsete raadiuste keskmine väärtus on vastasraadiuste keskmisest 0,34 mm kitsam (joonis 11b). Peale 1961. aastat kaevikupoolse raadiuses kasvukiirus aga hoogustub, sarnanedes edaspidi rohkem kontrollkronoloogiaga. Kümme aastat (1935–1944) enne kaevikute kaevamist oli keskmine radiaaljuurdekasv kaevikupoolsel küljel 0,44 mm ja vastasraadiusel 0,52 mm aastas. Häiringu järgsel perioodil (1945–1954) kahanes kaevikupoolne radiaaljuurdekasv, olles keskmiselt 0,38 mm, ja vastasraadiuse

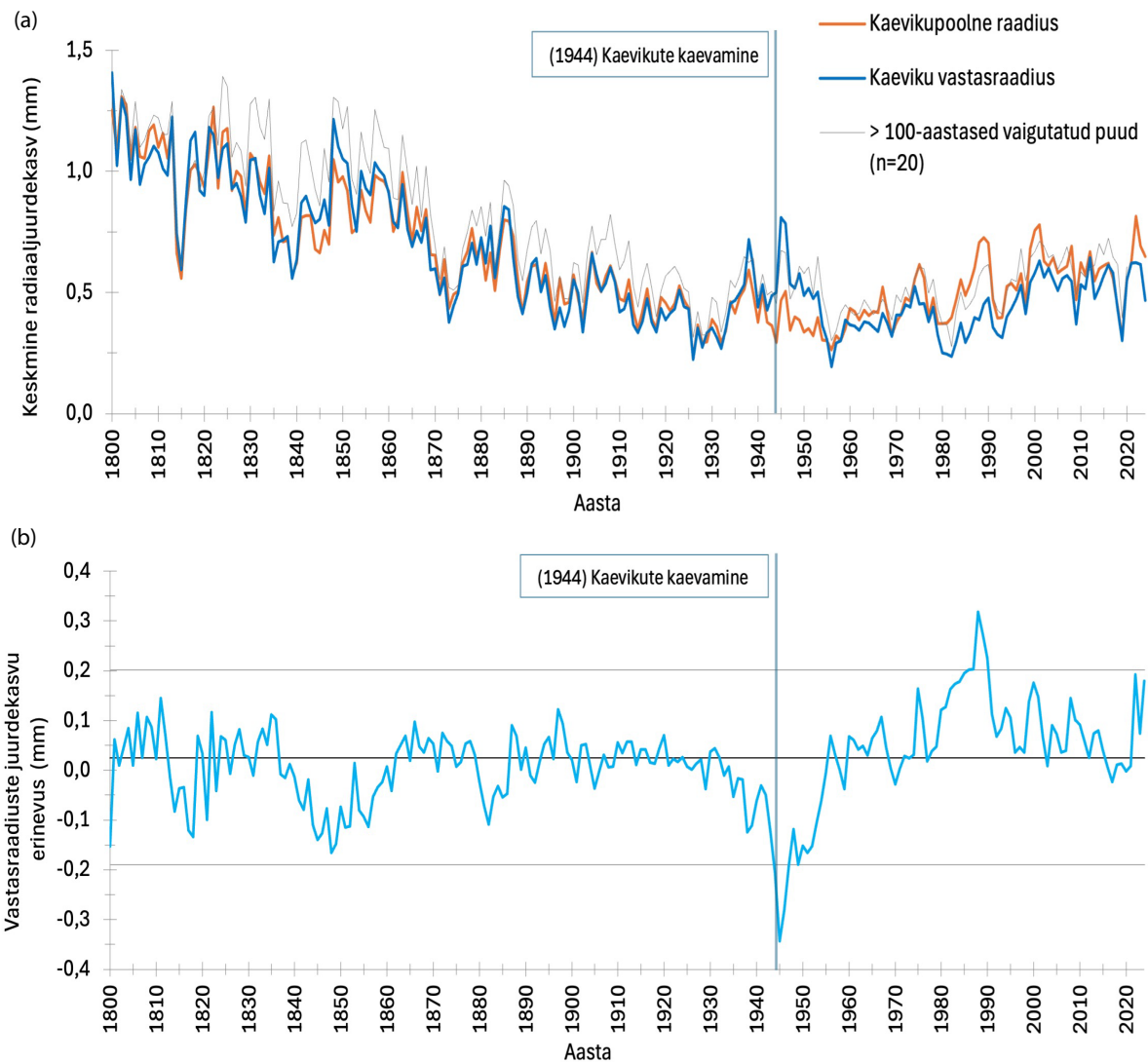
radiaaljuurdekasv suurenes, olles keskmiselt 0,56 mm aastas. Esinenud radiaalkasvu erinevused võivad olla põhjustatud tüveraadiuste erinevast kliimatundlikkusest. 1940. aasta talv on tuntud enda äärmiselt külmade temperatuuride poolest, sellest aastast pärineb ka Jõgeval mõõdetud külmarekord ($-43,5\text{ °C}$) (Kallis & Tarand, 2013). Külmale talvele järgnes ka tavapäraselt külmem kevad, veebruarist aprillini oli keskmine õhutemperatuur Tartus $-6,7\text{ °C}$ (võrdluseks pikaajaline keskmine perioodil 1866–2020 oli $-1,5\text{ °C}$). Lisaks väljendusid mitmed külmad kevaded ka kümnendi hilisematel aastatel, 1941. ($-4,1\text{ °C}$), 1942. ($-6,5\text{ °C}$) ja 1947. aastal ($-4,7\text{ °C}$) (joonis 10). Külmade temperatuuride mõju kajastub ka mitme järgneva aasta kasvus. Kui puu halvenenud kasvutingimustele lisada häiring, on tõenäoline kaevikupoolse raadiuse kasvu vähenemine.

Järgmine suurem puusisene kasvuerinevus esineb 1980. aastatel. Ekstreemse kasvuga aastaks on 1988, millal kaevikupoolsetel raadiustel esinevad vastasraadiustest keskmiselt 0,32 mm laiemad aastarõngad (joonis 11a). Perioodil 1980–1991 sarnaneb kaevikupoolsete raadiuste keskmine kasv 85% ja kaeviku vastasraadiuste keskmine kasv 74% ulatuses üle 100-aastaste vaigutatud ja vaigutamata puude kronoloogiaga. 1980. aastate kasvu erinevused raadiuste keskmistes juurdekasvuridades on tingitud peamiselt kolme puu suurest radiaaljuurdekasvu erinevusest lähiminevikus. Hilises kasvueas tekkinud raadiuste kasvuerinevused võivad olla tingitud puude kaldumisest kaevikute poole, mille tulemusena on puule tekkinud reaktsioonipuit (Läänelaid, 2010; Kaz *et al.*, 2023).

Võrreldes kaevikupuude vastasraadiuste juurdekasvu, jääb umbes 95% aastatest kasvu erinevus vahemikku $-0,19...0,202\text{ mm}$ (joonis 11b). Ekstreemsemad radiaalkasvu erinevused esinevad kümnel aastal, mis jäävad eelmainitud 1940. ja 1980. aastatesse. Kogu ajaperioodi (1800–2024) kasvu erinevuste mediaan on 0,03, mis viitab sellele, et keskmiselt on kaevikupoolsed juurdekasvurõngad veidi laiemad.

Kokkuvõtvalt mõjutab kaevikute kaevamine puude kasvu vaid kaevikupoolisel tüveraadiusel ja lühiajaliselt kaevetööde järgselt 5–9 aastat (1945–1953) (joonis 11). Selle häiringu pikaajalist mõju juurdekasvule tuvastada ei õnnestunud. Mändidel on hästi arenenud juurestik nii sügavuti kui laiuti, võrreldes näites kuuse pinnalähedase peajuurestikuga (Schweingruber, 1993), mis võimaldab kiiret taastumist kaevamisest põhjustatud juurekahjustustest. Viieaastast radiaaljuurdekasvu ajutist vähenemist on täheldatud ka mändidel kaevandusalal langatuse järgselt (Läänelaid, 2010). Samas kraavide mõju uurimisele keskendunud töös (Watson, 1998) on tammede puhul leitud, et ühele poole tekitatud juurekahjustuste korral puu kasvule mõju ei

ilmne. Seega võib järeldada, et üldiselt peaksid puude kasvule maapinnaga toimunud muutused mõjuma väikesel määral. Juurekahjustused võivad radiaaljuurdekasvu mõned aastad peale häiringu toimumist pidurdada, kuid mõju ei ole pikaajaline. Siiski võib kaevikute mõjutusel puudele moodustuda reaktsioonipuit, mis toob kaasa okaspuudel kaldealusel raadiusel suurema jämeduskasvu.



Joonis 11. (a) Kävikupuude kävikupoolsete ja vastasraadiuste keskmiste radiaaljuurdekasvude võrdlus läheduses kasvavate > 100-aastaste vaigutatud puudega. (b) Kävikupuude vastasraadiuste radiaaljuurdekasvu vahe väärtused (helesinine joon) ning nende mediaan (must horisontaaljoon) ja 95. protsentiilid (halled horisontaaljooned).

Sõjategevuse järgi aastarõngastes pole teadaolevalt Eestis varem põhjalikult uuritud. Samas on Alar Läänelaid uurinud Elvas (Kesk tn 31) kasvavatel mändidel nende tänavapoolseid arme, mille dateerimisel selgus, et kasv on katkenud nendes tüveraadiustes 1944. aasta kasvuaasta

järel. Teadaolevalt pandi sõja ajal süütekuulidega põlema üle tänava asunud vastasmaja ning tulekahjus said männid niivõrd kahjustada, et selles tüveraadiuses kasv peatus (Alar Läänelaiidi avaldamata andmed). Seega on bakalaureusetöös käsitletud kaevikupuude analüüs esmakordne sõjategevuse dendrokronoloogiline uuring Eestis.

4.4 Vaigutamise mõju männi radiaaljuurdekasvule

Vaigutusarmide pealt kogutud proovidest 90% dateerusid 1950. aastatesse (tabel 1), mis ühtib vaigutamise tegevuse toimumisajaga Eestis (Välja, 1981; Tarang, 2007; Kusmin, 2019). Üks puurproov dateerus aga paarkümmend aastat varasemasse perioodi, mis võib tuleneda mingisugusest lisa kahjustusest, mille tagajärjel on osa aastarõngaid armi pinnalt hävinud. Lisaks on võimalus, et varasemaks dateerunud proov koguti ekslikult vaigutusarmi süvendatud osast. Antud proovi puhul jääb *ca* 3 mm puidu puudumisel mõõtmata 20 aastarõngast. Armiproovide ja sama puude keskmiste juurdekasvuridade omavahelised sarnasusnäitajad on kõrged (tabel 1) ning kinnitavad dateeringute usaldusväärsust. Seega võib vahemikku 1951–1956 paigutada Soontaga metsas aset leidnud vaigutamistegevuse. Dateerimise tulemusel on võimalik tõestada vaigutamistegevuse toimumist proovivõtu puudel armi alumises osas antud ajaperioodil, kuid laiemaid üldistusi terves Aakre metskonna toimunud vaigutamise kohta ei ole võimalik teha. RMK 1985. aastast pärinevate arhiivimaterjalide andmetel oli uurimisala hõlmavas Aakre metskonna kvartalis nr. 30 eraldises nr. 13 vaigutamine lõpetatud ja metsa seisund hea (ENSV metsamajanduse ja looduskaitse ministeerium, 1985). Arvestades Aakre metskonna matsamajandamise projekti sissekandega ja arusaamaga, et Eestis vaigutati puid eeldatavalt kuni 15 aastat enne raiet (Välja, 1981), sobituvad arvatava vaigutustegevuse aastad (1951–1956) perioodi, mil võis vaigutamine aset leida. Uuritaval alal kasvavad vaigutatud puud aga raieni ei jõudnud, ning Eesti taasiseseisvumise järel vaigutamine hääbus. Tänapäeval on Soontaga looduskaitseala üheks eesmärgiks hariliku männi genofondi säilitamine (Soontaga looduskaitseala kaitse alla võtmine ja kaitse-eeskiri, 2006).

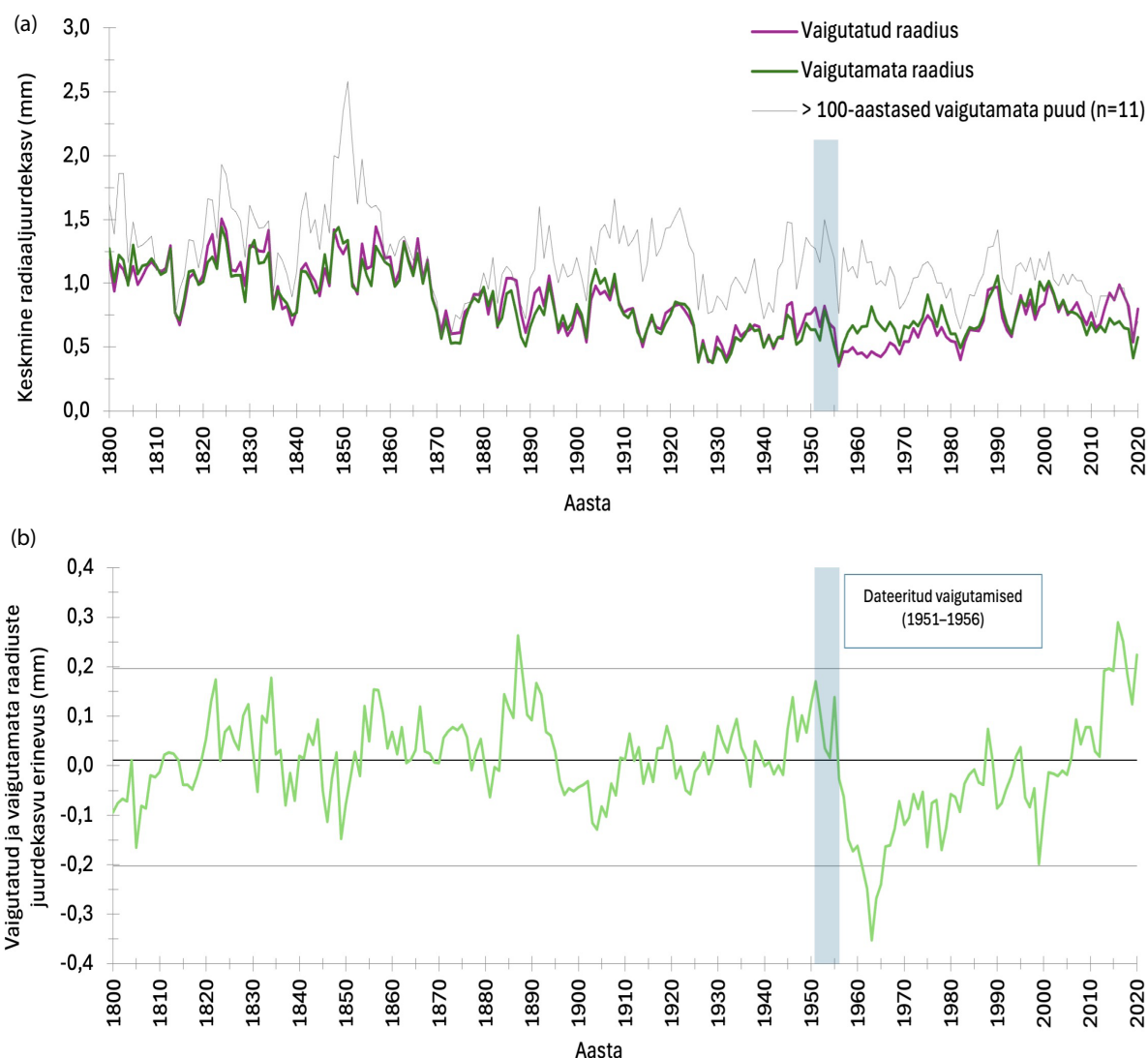
Vaigutamise mõju hindamiseks juurdekasvule kasutati 22 puu aastarõngalaiuste aegridu, mille puhul oli kahest puurproovist üks võetud teadaolevalt vaigutusarmipoolsest tüveraadiusest.

Tabel 1. Vaigutamise dateerimiseks kasutatud puurproovide andmed: puurproovi kood, puu koordinaadid, vaigutusarmi mõõtmed (kõrgus × laius; cm), vaigutusarmi allosa kõrgus maapinnast (cm), puu rinnasümbermõõt (P_{130} ; cm), puurproovi dateering (aastad), samasuunaliste muutuste protsent (Glk), kattuvdateerimis indeks (CDI), t-väärtus (T_{BP}).

Puu kood	Koordinaadid	Armi kõrgus × laius (cm)	Armi kõrgus maapinnast (cm)	P_{130} (cm)	Proovi dateering	Glk (%)	CDI	T_{BP}
0epsnt22nR	58° 1' 26,350" N 26° 4' 17,710" E	62 × 23	146	147	1776–1953	72,9	84	11,2
0epsnt23nwR	58° 1' 25,979" N 26° 4' 18,005" E	70 × 30	145	160	1759–1955	79	82	11,7
0epsnt25nR	58° 1' 26,134" N 26° 4' 17,638" E	65 × 24	140	193	1739–1955	66,4	73	12,9
0epsnt27eR	58° 1' 26,332" N 26° 4' 17,501" E	34 × 15	174	184	1775–1953	76,3	103	14,9
0epsnt28nR	58° 1' 26,130" N 26° 4' 18,743" E	65 × 24	140	167	1770–1953	78,4	124	15,1
0epsnt29eR	58° 1' 26,519" N 26° 4' 17,987" E	64 × 23	150	149	1746–1954	67,5	47	7,8
0epsnt32wR	58° 1' 26,530" N 26° 4' 18,404" E	71 × 30	142	210	1768–1956	68,9	65	9,5
0epsnt36eR	58° 1' 26,339" N 26° 4' 17,774" E	67 × 19	136	136	1757–1932	72,8	63	9,4
0epsnt37eR	58° 1' 26,821" N 26° 4' 17,947" E	73 × 27	143	187	1771–1951	74,6	88	11,7
0epsnt39neR	58° 1' 27,232" N 26° 4' 17,663" E	51 × 18	158	205	1754–1953	76,9	110	13,9

Võrreldes vaigutatud puude kahe raadiuse kasvu, ilmneb sarnane kasv kuni 1956. aastani (joonis 12a). Vaigutamisest tulenevalt on 12 aasta jooksul (aastatel 1957–1968) avaldunud suured juurdekasvu erinevused kahe raadiuse vahel. Sarnast vaigutamise järgset hüppelist radiaaljuurdekasvu vähenemist vaigutusarmi poolisel tüveküljel on täheldatud ka Hiinas (Choi *et al.*, 2020). Antud perioodil moodustab vaigutamata raadiuste keskmine juurdekasv 59% üle 100-aastaste vaigutamata puude kronoloogia keskmisest juurdekasvust, samas kui vaigutatud raadiuste keskmine kasv vaid 42%. Suurim raadiuste keskmine juurdekasvu erinevus esineb 1963. aastal, kui vaigutatud tüvepoole keskmine juurdekasv on 0,35 mm võrra kitsam vaigutamata tüveraadiusest (joonis 12b). 1963. aastal võib kahjustuse poolne radiaalne juurdekasv olla mõjutatud ka tavapärasest külmemast kevadest, millal veebruari, märtsi ja aprilli kuude keskmine temperatuur oli Tartus $-6,2$ °C (joonis 10). Kahe raadiuse kasvus eristub selgelt ka viieaastane periood 2013–2018, millal laiema kasvuga on vaigutatud tüveraadiuse aastarõngad (joonis 12a). Sellel perioodil on vaigutatud raadiuse keskmiseks aastarõnga laiuseks 0,89 mm ja vaigutamata raadiuse puhul 0,67 mm. Vaigutatud raadiuste

keskmine aastarõngalaius moodustab sellel perioodil üle 100-aastaste vaigutamata puude kronoloogia keskmisest 99%, vaigutamata raadiuste keskmine aga vähem ehk 75%. Kogu kronoloogia ulatuses on vaigutamata raadiuste keskmine aastarõngalaius suurem (0,94 mm) kui vaigutatud raadiuste sama näitaja (0,88 mm). 21. sajandi teisel kümnendil esinenud tüveraadiuste erinevused on tingitud samuti paari puu suurest radiaalkasvu erinevustest puu eri külgedel. Samas suuremal osal puudest ekstreemset kasvuerinevust antud perioodil ei esine.



Joonis 12. (a) Vaigutusarmipoolsete ja vaigutamata raadiuste radiaaljuurdekasvude võrdlus läheduses kasvavate > 100-aastaste vaigutamata puudega. (b) Vaigutatud ja vaigutamata tüveraadiuste radiaaljuurdekasvu vahe väärtused (heleroheline joon) ning nende mediaan (must horisontaaljoon) ja 95. protsentiilid (hallid horisontaaljooned).

Vaigutatud puude tüveraadiuste võrdlusel langevad 95% sisse aastad, kui kahe raadiuse juurdekasvu erinevus jääb vahemikku $-0,202...0,197$ mm (joonis 12b). Ekstreemsemad

radiaalkasvu erinevused esinevad 10 aastal. Nendest viiel aastal (1961–1965) on vaigutatud tüveraadiustes juurdekasv väiksem kui vastasraadiustes ning on seotud eelpool kirjeldatud vaigutamistegevusega. Vastupidine olukord on aastatel 1887, 2014, 2016, 2017 ja 2020. Kahe tüveraadiuse juurdekasvude erinevuste mediaan on kogu vaatlusperioodi (1800–2020) ulatuses 0,01 mm ehk pikaajaliselt kahe tüveraadiuse juurdekasvus märkimisväärset erinevust pole.

Kokkuvõtvalt saab öelda, et vaigutatud puude juurdekasv on olnud väiksem kogu vaatlusperioodi jooksul ning ei ole otseselt tingitud inimtekkelistest häiringutest. Küll aga esineb vaigutatud puudel tüvesisene erinevus radiaaljuurdekasvus, kus vaigutusarmipoolne raadius on väiksema juurdekasvuga 12 aasta jooksul (1957–1968), pikaajalisemat kasvu kahenemist ei esine (joonis 12). Häiringu mõju pikaajalist puudumist on täheldatud ka Hiina uuringus, kus on vaigutatud puude standardiseeritud kronoloogiates väiksema kasvuga aastarõngaid vaid kahel vaigutamise järgsel kasvuaastal (Zeng *et al.*, 2021). Samas van der Maaten'i *et al.* (2017) uuring täheldab vaigutatud puudel vastupidiselt kasvu suurenemist ligi 30-aastaselt perioodil peale häiringut. Samuti kinnitab kasvu suurenemist Magnuszewski ja Tomusiaki (2013) uuring, kuid nende uurimisala puhul peale häiringut vaigutatud ja vaigutamata puude radiaalkasv 130 cm kõrgusel maapinnast hiljem ei ühtlustugi. Seega võib järeldada, et üldiselt mõjutab puude vaigutamine mingil määral radiaaljuurdekasvu, kuid ei ole võimalik teha üldistusi kindla mõju suuna kohta. Bakalaureusetöös vaadeldud vaigutatud puudel tuvastati küll puusisene juurdekasvu erinevus vaigutatud tüveraadiuse kasvu lühiajalise languse näol, kuid vigastatud puudele tervikuna häiring märkimisväärset keskmise juurdekasvu muutust ei põhjusta.

5. Kokkuvõte

Soontaga uurimisalal on mets eriilmeline ja mitmeti inimtegevuse poolt mõjutatud. Soontaga lähiümbruse metsades on peetud nii teise maailmasõja lahinguid kui ka Nõukogude ajal teostatud intensiivset mändide vaigutamist. Tulenevalt põnevast ajaloost leidub metsas tänapäevani sõjakaevikuid kui ka vaigutusarme puudel. Töö eesmärgiks oli anda ülevaade Soontaga metsa harilike mändide radiaaljuurdekasvu seostest ilmastikuga ja nimetatud antropogeensete häiringutega. Lisaks uuriti vaigutamisest tulenevat mõju puu kliimatundlikkusele. Selleks mõõdeti uurimisala kaevikupuudelt, vaigutatud ja vaigutamata mändidelt kogutud puurproovide aastarõngalaiused, sünkroniseeriti aegread ning koostati erinevate puudegruppide standardiseeritud kronoloogiad, mida korreleeriti temperatuuri ja sademete andmetega.

Soontaga uurimisalal kasvavad kahe vanusegrupi puud. Pikim kronoloogia on peaaegu 300 aasta ning lühim alla 100 aasta pikkune. Keskmised aastarõngalaiused varieeruvad 0,62...1,77 mm sõltuvalt puudegrupist. Väiksema juurdekasvuga on kaeviku- ja vaigutatud puud, mis on ühtlasi ka vanemad, ning suurema juurdekasvuga on vaigutamata puud, millest enamik on alla 100-aastased mändid. Uurimisalal kasvavate mändide radiaaljuurdekasv on peamiselt mõjutatud temperatuurist. Veebruari–aprilli keskmise temperatuuri ja juurdekasvu vahel esineb kõigis puudegruppides positiivne korrelatsioon, mida kinnitavad ka varasemad uuringud. Vanemate puude ehk üle 100-aastaste mändide radiaalkasvu soodustavad ka augusti sademed. Seejuures dendrokliimaatilised seosed ajas muutuvad ja erinevad vähesel määral puudegrupiti. Vaigutamisest mõjutatud puude kliimasignaal on veidi nõrgem kui vaigutamata mändidel.

Soontaga vaigutusarmide dateeringud kinnitavad mändide vaigutamise toimumist uurimisalal vähemalt perioodil 1951–1956. Selline puude tüvede vigastamine avaldab peamiselt negatiivset mõju vaigutatud tüveraadiuse aastarõngalaiustele, kuid madalama juurdekasvu kestvus on vaid kümnekond aastat võrreldes vastasraadiusega.

Sarnaselt vaigutamisele mõjub ka sõjakaevikute kaevamine negatiivselt 5–10 aasta jooksul vaid häiringupoolse tüveraadiuse radiaaljuurdekasvule. Hilisemas ajaperioodis kaevikupoolse tüveraadiuse aastarõngalaiuste suurenemine on ilmselt põhjustatud puu kaldumisel tekkinud reaktsioonipuidust. Bakalaureusetöös käsitletud kaevikupuude analüüs on teadaolevalt esmakordne sõjategevuse dendrokronoloogiline uuring Eestis.

Summary

Impact of weather and human activity on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Soontaga

Liis Getliin Kala

Tree rings record historical growth conditions. Most of changes in conditions are weather-related but growth patterns of trees under direct human impacts also reflect cultural legacies. The dry boreal pine forest in Soontaga, Estonia has experienced human impacts such as World War II trenches next to the trees, and pine resin tapping during the Soviet period since the 1950s. The resin tapping removed the bark and cambium and stopped growth at the scar while the rest of the stem stayed alive and continued to grow. The growth patterns of the former resin-tapped stands and overgrown trenches depict the landscape dynamics in Soontaga. Current preservation of Scots pine gene pool is a conservation goal in the area.

This bachelor's thesis focuses on the investigation of both natural and anthropogenic influences on tree growth. The aim was to provide an overview of the relationships between radial growth of Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) and weather conditions in Soontaga, as well as the impact of war trenches and resin tapping on the growth of pines.

To assess the effects of weather, samples from 80 trees collected during a previous research project were used. For a more detailed analysis of anthropogenic impact, additional samples were taken from 15 and 10 trees affected by war trenches and resin extraction, respectively. Tree-ring widths were measured, dated and standardised chronologies were built to analyse their climate-growth relationships and dynamics of growth responses. Precipitation and temperature data from the Tartu-Tõravere meteorological station, spanning from the present day back to 1866, were used in the dendroclimatic analysis. The impact of human-induced disturbances, such as resin extraction and trenching, was assessed using non-standardized tree-ring data by comparing radial growth between disturbed and undisturbed sides of the stem. Resin tapping was dated using tree-ring core samples from the resin scars and unaffected radii. The oldest trees in the Soontaga study area are among the trench-affected trees, with growth series extending nearly 300 years. Most of the resin-tapped trees were dated as around 250 years old. The group of undisturbed trees included both older and younger than 100-years old trees. Depending on the tree group, average annual growth rates ranged between 0.62 mm and 1.77 mm.

Consistently with previous dendroclimatic studies, it was confirmed that growth of pines is most strongly affected by temperatures of February, March, and April. It means all studied trees benefit from warm springs. In addition, older trees have been depended positively on precipitation in August. Climate sensitivity of resin-tapped trees slightly weakened during the resin tapping period.

Based on dendrochronological dating, the resin tapping took place at least between the years 1951 and 1956. The results of the disturbance analysis indicate that the mechanical stem and root damages are reflected in changes in radial growth within the tree. After resin tapping and military trenching, trees exhibit a short-term, up to ten years, growth decline only on the disturbed side of the stem. The maximum difference in average radial growth between the disturbed and undisturbed stem radii reached 0.34 mm and 0.35 mm in the two respective groups.

The bachelor's thesis gave the first-ever insights to warfare dendrochronology in Estonia. The results presented here improve our knowledge on the climatic responses of hundreds of years old disturbed pine trees.

Tänuavaldused

Täna juhendaja Kristina Soharit pühendunud juhendamise eest, asjaliku tagasiside ning tehnoloogiliste oskuste jagamise eest. Samuti soovin tänada Jaak Jaagust ilmastiku andmete jagamise ning Sander Terast proovikogumisel abistamise eest.

Täna Kaido Soosaart, kelle algatusel toimus Soontagal puidu puurproovide kogumine 2020. aastal ning kõiki tol perioodil osalenud välitöölisi. Samuti tänan geograafia osakonna inimesi, kes jagasid oma teadmisi Soontaga uurimisala ajaloo kohta ning RMK töötajaid Sirle Saaret, Kristo Kokka ja Rein Kukke vaigutamise ajaloo valgustamisel.

Kasutatud kirjandus

- Abdel-Maksoud, G., El-Amin, A., 2011. A review on the materials used during mummification processes in Ancient Egypt. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 2 (11): 129–150.
- Amoroso, M. M., Daniels, L. D., Baker, P. J., Daniels, L. D., Camarero, J. J., 2017. Introduction. In: M. M. Amoroso, L. D. Daniels, P. J. Baker, L. D. Daniels, J. J. Camarero (Ed.), *Dendroecology: Tree-Ring Analyses to Ecological Studies*. Springer International Publishing, pp 1–12.
- Babst, F., Poulter, B., Trouet, V., Tan, K., Neuwirth, B., Wilson, R., Carrer, M., Grabner, M., Tegel, W., Levanić, T., Panayotov, M., Urbinati, C., Bouriaud, O., Ciais, P., Frank, D., 2013. Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography*, 22 (6): 706–717. DOI: 10.1111/geb.12023.
- Baillie, M. G. L., Pilcher, J. R., 1973. A Simple Crossdating Program for Tree-Ring Research. *Tree-Ring Bulletin*, 33: 7–14.
- Bartholin, T. S., 1991. Dendrokronologi – og metodens anvendelsesmuligheder indenfor bebyggelseshistorisk forskning. *Bebyggelseshistorisk Tidsskrift* 19: 43–61.
- Chen, F., Yuan, Y., Yu, S., Zhang, T., 2015. Influence of climate warming and resin collection on the growth of Masson pine (*Pinus massoniana*) in a subtropical forest, southern China. *Trees*, 29(5): 1423–1430. DOI: 10.1007/s00468-015-1222-3.
- Choi, E.-B., Kim, Y.-J., Park, J.-H., Park, C.-R., Seo, J.-W., 2020. Reconstruction of Resin Collection History of Pine Forests in Korea from Tree-Ring Dating. *Sustainability*, 12(21): 9118. DOI: 10.3390/su12219118.
- Cook, E. R., 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. PhD Dissertation. University of Arizona, p 171.
- Cook, E. R., 1990. A conceptual linear aggregate model for tree rings. In: E. R. Cook, L. A. Kairiukstis (Ed.), *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 98–104.

- Drenkhan R, 2004. Soontaga looduskaitseala kaitsekorralduskava aastateks 2006–2015. Metsahoiu Sihtasutus, <https://infoleht.eelis.ee/getdok/-2116755162> (viimati vaadatud 21.05.2025).
- ENSV metsamajanduse ja looduskaitse ministeerium, 1985. Aakre metskonna metsamajandamise projekt I.
- Eronen, M., Zetterberg, P., Briffa, K. R., Lindholm, M., Meriläinen, J., Timonen, M., 2002. The supra-long Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland: Part 1, chronology construction and initial inferences. *The Holocene*, 12 (6): 673–680.
DOI: 10.1191/0959683602hl580rp.
- Fini, A., Ferrini, F., Frangi, P., Piatti, R., Amoroso, G., 2013. Effects of roof severance by excavation on growth, physiology and uprooting resistance of two urban tree species. *Acta Horticulturae*, 990: 487–494. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.990.63.
- Fritts, H. C, 1976. *Tree Rings and Climate*. The Blackburn Press, Caldwell, p 567.
- Grissino-Mayer, H. D., 2001. Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 2 (57): 205–221.
- Grudd, H., Briffa, K. R., Karlén, W., Bartholin, T. S., Jones, P. D., Kromer, B., 2002. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: Natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales. *The Holocene*, 12(6): 657–665.
DOI: 10.1191/0959683602hl578rp.
- Haneca, K., Van Daalen, S., Beeckman, H., 2018. Timber for the trenches: A new perspective on archaeological wood from First World War trenches in Flanders Fields. *Antiquity*, 92(366): 1619–1639. DOI: 10.15184/aqy.2018.172.
- Hartl, C., St. George, S., Konter, O., Harr, L., Scholz, D., Kirchhefer, A., Esper, J., 2019. Warfare dendrochronology: Trees witness the deployment of the German battleship Tirpitz in Norway. *Anthropocene*, 27: 100212. DOI: 10.1016/j.ancene.2019.100212.
- Harvey, J. E., Smiljanić, M., Scharnweber, T., Buras, A., Cedro, A., Cruz-García, R., Drobyshev, I., Janecka, K., Jansons, Ā., Kaczka, R., Klisz, M., Läänelaid, A., Matisons, R., Muffler, L., Sohar, K., Spyt, B., Stolz, J., van der Maaten, E., van der Maaten-Theunissen, M., Vitas, A., Weigel, R., Kreyling, J., Wilmking, M., 2020. Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern

- temperate forests. *Global Change Biology*, 26 (4): 2505–2518. DOI: 10.1111/gcb.14966.
- Hauer, R., Miller, R., Ouimet, D., 1994. Street Tree Decline and Construction Damage. *Arboriculture & Urban Forestry*, 20(2): 94–97. DOI: 10.48044/jauf.1994.017.
- Helama, S., Lindholm, M., Meriläinen, J., Timonen, M., Eronen, M., 2005. Multicentennial ring-width chronologies of Scots pine along north-south gradient across Finland. *Tree-Ring Research*, 61 (1): 21–32.
- Henttonen, H. M., Mäkinen, H., Heiskanen, J., Peltoniemi, M., Laurén, A., Hordo, M., 2014. Response of radial increment variation of Scots pine to temperature, precipitation and soil water content along a latitudinal gradient across Finland and Estonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198–199: 294–308. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.09.004.
- Holmes, R. L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 69–78.
- Hordo, M., Henttonen, H., Mäkinen, H., 2011. Annual growth variation of Scots pine in Estonia and Finland. *Baltic Forestry*, 17 (1): 35–49.
- Hordo, M., Metslaid, S., Kiviste, A., 2009. Response of Scots Pine (*Pinus sylvestris L.*) Radial Growth to Climate Factors in Estonia. *Baltic Forestry*, 15 (2): 195–205.
- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Switzerland, p 184.
- Kallis, A., Tarand, A., 2013. Erakordsed nähtused. Rmt: A. Tarand, J. Jaagus, A. Kallis (Toim.), Eesti kliima minevikus ja tänapäeval. Tartu Ülikooli kirjastus, lk 455–496.
- Kaz, S., Külçe, T., Ateş, S., 2023. Comparison of Reaction Wood and Normal Wood of Some Commercial Tree Species. *Drvna industrija*, 74 (4): 437–445. DOI: 10.5552/drvind.2023.0123.
- Keskkonnaagentuur, 2020. Tartu-Tõravere ilmajaama virtuaalne ekskursioon, <https://www.ilmateenistus.ee/2020/05/tartu-toravere-ilmajaama-virtuaalne-ekskursioon/> (viimati vaadatud 21.05.2025).
- Kusmin, T., 2019. Sada aastat metsa lugu. RMK, Tallinn, lk 259.

- Laar, M., 1997. Isamaa ilu hoieldes. Spånga Tryckeri, Stockholm, lk 228.
- Loewen, B., 2005. Resinous Paying Materials in the French Atlantic, AD 1500-1800. History, Technology, Substances. *International Journal of Nautical Archaeology*, 34 (2): 238–252. DOI: 10.1111/j.1095-9270.2005.00057.x.
- López-Álvarez, Ó., Zas, R., & Marey-Perez, M., 2023. Resin tapping: A review of the main factors modulating pine resin yield. *Industrial Crops and Products*, 202: 117105. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117105.
- Läänelaid, A., 2002. Tree-ring dating in Estonia. PhD Dissertation. University of Helsinki, Helsinki.
- Läänelaid, A., 2010. Maapinna langatuste mõju metsale. Rmt: E. Kaar, K. Kiviste (Toim.), Maavarade kaevandamine ja puistangute rekultiveerimine Eestis. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut, lk 271–289.
- Läänelaid, E., Eckstein, D., 2003. Development of a Tree-ring Chronology of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) for Estonia as a Dating Tool and Climatic Proxy. *Baltic Forestry*, 9 (2): 76–82.
- Läänelaid, A., Eckstein, D., Seo, J.-W., 2009. Impact of Underground Mining of Oil Shale in Northeastern Estonia on Scots Pine and Norway Spruce Growing Thereon. *Oil Shale*, 26 (1): 73–83. DOI: 10.3176/oil.2009.1.08.
- Läänelaid, A., Helama, S., Kull, A., Timonen, M., Jaagus, J., 2012. Common growth signal and spatial synchrony of the chronologies of tree-rings from pines in the Baltic Sea region over the last nine centuries. *Dendrochronologia*, 30 (2): 147–155. DOI: 10.1016/j.dendro.2011.08.002.
- Läänelaid, A., Sohar, K., Erikson, K., & Kull, A., 2025. Detecting drainage events and drainage affected zone: A dendrochronological study at Tellissaare raised bog, Estonia. *Baltic Forestry*, 31(1): 768. DOI: 10.46490/bf768.
- Maa- ja Ruumiamet, 2001. Mullastiku kaart, <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/mullakaart> (viimati vaataud 21.05.2025).
- Maa- ja Ruumiamet, 2020. Eesti põhikaart, <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo> (viimati vaadatud 21.05.2025).

- Magnuszewski, M., Tomusiak, R., 2013. Effect of resin-tapping on the radial increment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) – case study of a stand from Lidzbark Forest District. *Forest Research Papers*, 74 (3): 273–280.
- Metslaid, S., Hordo, M., Korjus, H., Kiviste, A., Kangur, A., 2018. Spatio-temporal variability in Scots pine radial growth responses to annual climate fluctuations in hemiboreal forests of Estonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252: 283–295. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.01.018.
- Mõtsküla, P., 1969. Nad läksid rinde paremal tiival. Eesti Raamat, Tallinn, lk 72.
- Myhr, K., Thun, T., Hytteborn, H., 2007. Dendrochronological Dating of Wooden Artefacts using Photography. *Norwegian Archaeological Review*, 40 (2): 179–186. DOI: 10.1080/00293650701708909.
- Okochi, T., Hoshino, Y., Fujii, H., & Mitsutani, T., 2007. Nondestructive tree-ring measurements for Japanese oak and Japanese beech using micro-focus X-ray computed tomography. *Dendrochronologia*, 24 (2–3): 155–164. DOI: 10.1016/j.dendro.2006.10.010.
- Paal, J., 1999. Eesti taimkatte kasvukohatüüpide klassifikatsioon. Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus, Tallinn, lk 200.
- Papadopoulos, A. M., 2013. Resin Tapping History of an Aleppo Pine Forest in Central Greece. *The Open Forest Science Journal*, 6 (1): 50–53. DOI: 10.2174/1874398601306010050.
- Phipps, R., Yanosky, T., 2020. *Dendroecology: Principles and practice*. J.Ross Publishing, p 242.
- Pärn, H., 2014. Männi radiaalkasvu ja kliima vahelised seosed. Rmt: M. Kurm (Toim.), Mänd Eestis. Eesti Maaülikool, Tartu, lk, 296–313.
- R Core Team, 2024. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Rinn, F., 2011. *TSAP-Win: Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications*. Versioon 4.64.5.
- RMK, 2023. *Aastaraamat 2023*. Riigi Metsamajandamise Keskus, https://media.rmk.ee/files/RMK_aastaraamat_2023.pdf (viimati vaadatud 21.05.2025).

- Robinson, W. J., Cook, E. R., Pilcher, J. R., Eckstein, D., Kairiukstis, L. A., Shiyatov, S., Norton, D. A., 1990. Some Historical Background on Dendrochronology. In: L. A. Kairiukstis, E. R. Cook (Ed.), *Methods of Dendrochronology: Application in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 1–21.
- Rubini, M., Clopeau, A., Sandak, J., Dumarcay, S., Sandak, A., Gerardin, P., Charrier, B., 2022. Characterization and classification of *Pinus* oleoresin samples according to *Pinus* species, tapping method, and geographical origin based on chemical composition and chemometrics. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 42: 102340. DOI: 10.1016/j.bcab.2022.102340.
- Rücker, C. G., 1839. Liivimaa spetsiaalkaart. Maa- ja Ruumiamet, <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/ajalooline> (viimati vaadatud 21.05.2025).
- Schweingruber, F. H., 1988. *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, p 276.
- Schweingruber, F. H., 1993. *Trees and Wood in Dendrochronology: Morphological, Anatomical, and Tree-Ring Analytical Characteristics of Trees Frequently Used in Dendrochronology*. Springer-Verlag, Berlin, p 402.
- Schweingruber, F. H., 1996. *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, p 609.
- Sharma, S. C., Prasad, N., Pandey, S. K., & Giri, S. K., 2018. Status of Resin Tapping and Scope of Improvement: A Review , *Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*, 29 (3): 16–26.
- Sibul, I., 2014. Männi üldiseloomustus. Rmt: M. Kurm (Toim.), *Mänd Eestis*. Eesti Maailikool, lk 18–55.
- Soontaga looduskaitseala kaitse alla võtmine ja kaitse-eeskiri. Vastu võetud 27.07.2006, RT I, 2006, 37, 279. Viimane reduktsioon, RT I, 05.07.2023, 176.
- Soosaar, K., Mander, Ü., Lõhmus, K., Uri, V., Rannik, K., Ostonen, I., Uuemaa, E., Järvoja, J., Läänelaid, A., Maddison, M., Muhel, M., Teemusk, A., 2014. Ökosüsteemi süsinikdioksiidi bilanss, mullahingamine ja netoprimaarproduktioon Soontaga

- boreaalses männikus. Rmt: E. Tammiksaar, T. Pae, Ü. Mander (Toim.), Uurimusi eestikeelse geograafia 95. aastapäeval. Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis 111, lk 352–362.
- Speer, J. H., 2010. Fundamentals of Tree-Ring Research. The University of Arizona Press, Tucson, p 333.
- Zang, C., Biondi, F., 2015. treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38 (4): 431–436. DOI: 10.1111/ecog.01335.
- Zeng, X., Sun, S., Wang, Y., Chang, Y., Tao, X., Hou, M., Wang, W., Liu, X., Zhang, L., 2021. Does resin tapping affect the tree-ring growth and climate sensitivity of the Chinese pine (*Pinus tabuliformis*) in the Loess Plateau, China? *Dendrochronologia*, 65:125800. DOI: 10.1016/j.dendro.2020.125800.
- Tammekann, A., Luha, A., Kant, E., 1932. Valgamaa: Maadeteaduslik, tulunduslik ja ajalooline kirjeldus. Eesti Kirjanduse Selts, Tartu, lk 599.
- Tarang, L., 2007. Metsanduslik pärandkultuur. Eesti metsades leiduva pärandkultuuri olukorrast ja hoiust. Rmt: L. Tarang, K. Hellström, R. Kaljuvee, J. Kusmin, T. Neljandik, M. Raid (Toim.), Väike pärandkultuuri käsiraamat. Eesti Loodusfoto, Tartu, lk 9-13.
- van der Maaten, E., Mehl, A., Wilmking, M., van der Maaten-Theunissen, M., 2017. Tapping the tree-ring archive for studying effects of resin extraction on the growth and climate sensitivity of Scots pine. *Forest Ecosystems*, 4(1): 7. DOI: 10.1186/s40663-017-0096-9.
- Vitas, A., 2006. Sensitivity of Scots pine trees to winter colds and summer droughts: dendroclimatological investigation. *Baltic Forestry*, 12 (2): 220–225.
- Vitas, A., 2008. Tree-Ring Chronology of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) for Lithuania, *Baltic Forestry*, 14 (2): 110–115.
- Välja, A., 1981. Vaigutamise ja puidu keemiline töötlemine: I osa. Vaigutamise bioloogilised ja tehnilised alused. Eesti Põllumajanduse Akadeemia, Tartu, lk 100.
- Watson, G., 1998. Tree Growth after Trenching and Compensatory Crown Pruning. *Arboriculture & Urban Forestry*, 24 (1): 47–53. DOI: 10.48044/jauf.1998.007.

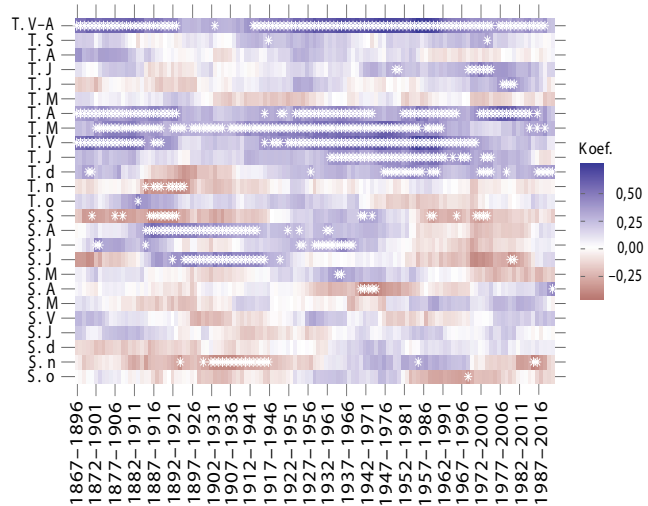
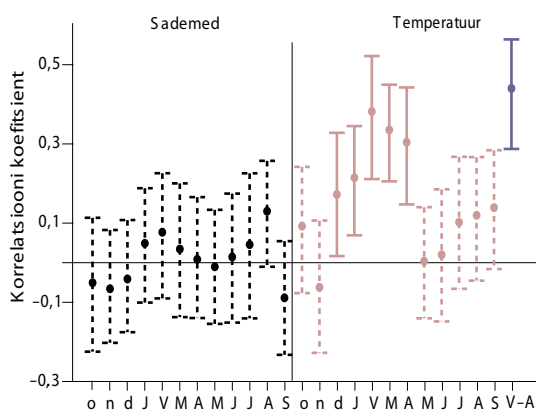
Wu, H., Hu, Z., 1997. Comparative anatomy of resin ducts of the *Pinaceae*. *Trees*, 11(3): 135–143. DOI: 10.1007/s004680050069.

Lisa 1. Kaevikupuude puurproovide andmed (vasakult paremale): puurproovi kood, proovipuu koordinaadid, proovipuu rinnasümbermõõt (P_{130} ; cm), proovipuu kaugus kaevikust (cm), puurproovi ajaline ulatus (aastad), puurproovi võtmise suund ning selle asukoht kaeviku suhtes (kaevikupoolne/kaeviku vastast).

Puu kood	Koordinaadid	P_{130} (cm)	Kaugus kaevikust (cm)	Proovi ajaline ulatus	<u>Kaevikupoolne</u> / kaeviku vastast
0epsnt81	58° 1' 25,176" N 26° 4' 15,442" E	196	70	1756–2024 1783–2024	<u>E</u> W
0epsnt82	58° 1' 25,486" N 26° 4' 16,086" E	165	35	1766–2024 1769–2024	<u>E</u> W
0epsnt83	58° 1' 25,626" N 26° 4' 15,784" E	142	135	1749–2024 1755–2024	<u>E</u> W
0epsnt84	58° 1' 25,896" N 26° 4' 15,384" E	143	45	1761–2024 1739–2024	<u>E</u> W
0epsnt86	58° 1' 26,612" N 26° 4' 15,910" E	145	–	1740–2024 1754–2024	<u>E</u> W
0epsnt87	58° 1' 26,987" N 26° 4' 16,140" E	155	–	1758–2024 1774–2024	<u>S</u> N
0epsnt88	58° 1' 26,983" N 26° 4' 15,809" E	160	110	1776–2024 1764–2024	<u>SW</u> NE
0epsnt89	58° 1' 26,465" N 26° 4' 16,306" E	110	180	1782–2024 1774–2024	<u>N</u> S
0epsnt90	58° 1' 26,360" N 26° 4' 18,656" E	153	50	1733–2024 1733–2024	<u>E</u> W
0epsnt91	58° 1' 26,710" N 26° 4' 18,940" E	158	80	1775–2024 1760–2024	<u>S</u> N
0epsnt93	58° 1' 26,616" N 26° 4' 19,336" E	165	80	1794–2024 1749–2024	<u>S</u> N
0epsnt94	58° 1' 26,850" N 26° 4' 19,156" E	135	155	1753–2024 1769–2024	<u>SW</u> NE
0epsnt95n	58° 1' 25,482" N 26° 4' 18,066" E	192	70	1794–2024 1814–2024	<u>N</u> S

Lisa 2. Vaigutatud ja vaigutamata mändide radiaaljuurdekasvu korrelatsioon kuu sademete summaga ning kuu ja perioodi (veebruar–aprill) keskmiste temperatuuridega. Väikesed kuude esitähed (oktoober–detsember) tähistavad kasvuperioodile eelneva ja suured (jaanuar–september) kasvuperioodiga sama kalendriaasta kuusid. Vasakul: staatilised korrelatsioonid perioodi 1867–2020 kohta; statistiliselt oluliste korrelatsioonikordajate ($p < 0,05$) 95% usalduspiirid on toodud pideva joonega vurrudega. Paremal: libisevad korrelatsioonid 30-aastases ajaaknas; statistiliselt olulised korrelatsioonikordajad ($p < 0,05$) on tähistatud tärnidega; temperatuur (T) ja sademed (S) on märgitud esitähedega.

Vaigutatud ja vaigutamata puud (n=51)



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Liis Getliin Kala,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Ilmastiku ja inimtegevuse mõju hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) radiaaljuurdekasvule Soontagal,

mille juhendaja on Kristina Sohar,

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.

Liis Getliin Kala

22.05.2025