

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Botaanika osakond

Mihhail Brodski

# **Kliimamuutuste mõjud meie vööndi olulisematele lehtpuudele**

Bakalaureusetöö (12 EAP)  
Bioloogia ning elustiku kaitse eriala

Juhendaja: kaasprofessor Arvo Tullus

Tartu 2021

# **Infoleht**

## **Kliimamuutuste mõjud meie vööndi olulisematele lehtpuudele**

Bakalaureusetöö eesmärgiks on anda ülevaade sellest, kuidas lähitulevikuks ennustatavad kliimamuutused (temperatuuri, atmosfääri suhtelise õhuniiskuse ja CO<sub>2</sub> sisalduse tõusmine) mõjutavad meie kliimavööndi enamlevinuid lehtpuid (arukask, sookask, haab, hall- ja must lepp). Need on Eesti lehtpuude seas tähtsaimad puud nii ökoloogilises mõttes, sest moodustavad suurema osa lehtpuumetsadest, kui majanduslikus mõttes, sest nende puidu varud moodustavad Eesti metsade kogu puiduvarust üle 40%. Töös käsitletud uuringutest selgub, et ennustatavad kliimamuutused toovad nendele puuliikidele kaasa nii positiivseid tagajärgi, nagu produktiooni suurenemine ja pikem kasvuperiood kui ka potentsiaalseid probleeme, nagu kahjurite ja patogeenide laialdasem levik.

Märksõnad: lehtpuud, kliimamuutused, kask, haab, lepp

CERCS kood: B270 Taimeökoloogia

## **The impacts of climate change on the most important deciduous trees of our region**

The aim of this Bachelor's thesis is to give an overview of how the climate changes predicted for the near future (rising of temperature, relative atmospheric humidity and CO<sub>2</sub> concentration) will impact the most important deciduous trees of our region (silver and downy birch, trembling aspen, grey and black alder). These are the most important deciduous trees in Estonia in both ecological sense, because they form the vast majority of broad-leaved forests and economical sense, as the wood stock of these tree species form over 40% of total wood stock of Estonian forests. From the scientific literature analyzed in this thesis it can be concluded that the predicted climate changes will bring both positive impacts, such as higher productivity and a prolonged vegetation period and negative impacts, such as higher spread of pests and pathogens.

Key words: deciduous trees, climate change, birch, aspen, alder

CERCS code: B270 Plant ecology

## Sisukord

Infoleht.....	2
Sissejuhatus.....	4
Kliimamuutused.....	6
Kased.....	9
Haab.....	16
Lepad.....	21
Kokkuvõte.....	26
Summary.....	27
Kasutatud kirjandus.....	29
Lisad.....	34
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	36

## Sissejuhatus

Eesti asub boreaalsete okasmetsade ja parasvöötme lehtmetsade vahepealses segametsavööndis ning Eesti metsades domineerivad okaspuud, nagu ka mujal Põhja-Euraasias. Seetõttu on uuringutes, mis käsitlevad ennustatavate kliimamuutuste mõju meie regiooni metsadele kõige rohkem tähelepanu pööratud just okaspuudele. Kuid kliima soojenemise tõttu ennustatakse, et Eesti kliima muutub sarnasemaks praeguse parasvöötme lehtmetsade vööndi kliimaga ning seepärast tõuseb ka lehtpuude osakaal siinsetes metsades, seega peaks suurenema ka lehtpuidu kasutamine metsatööstuses.

Meie regiooni enamlevinud lehtpuud on arukask (*Betula pendula*), sookask (*Betula pubescens*), harilik haab (*Populus tremula*), hall lepp (*Alnus incana*) ja sanglepp (*Alnus glutinosa*). Need viis puuliiki moodustavad Eesti kogu metsatagavarast 2019. aasta andmetel 41,2% (Valgepea *et al.* 2020), millest poole moodustavad kaks kaseliiki, ning nende osakaal suureneb lähitulevikus vähehaaval. Võrdluseks, mänd ja kuusk moodustavad Eesti metsatagavarast kokku 54,8%. Kõikide teiste lehtpuuliikide tagavarad on hinnanguliselt alla viie miljoni kuupmeetri ja alla ühe protsendi metsa kogutagavarast ning need ei ole sama suure mõjuga majanduslikus mõttes, kuigi nende puit leiab samuti kasutust ja näiteks tamme puit on väga väärtuslik tarbepuiduna.

Metsade koosseis Eesti territooriumil ei ole alati olnud praegusega sarnane. Pärast jääaja lõppu, kui saabus subarktiline kliimaperiood ja metsad hakkasid siin alles tundra asemel tekkima, olid enamlevinud puud tüüpilised pioneerid kask ja mänd, vähemal määral lepp, kuid taimkate oli sel ajal veel suhteliselt hõre. Borealse kliimastaadiumi ajal, 7000-6000 aastat eKr, kui õhutemperatuurid olid võrreldavad praegustega, levisid kõige hoogsamini männikud, kaasikud olid enamasti seotud niiskete aladega ja madalikega. Borealse staadiumi lõpus hakkasid tekkima ka lepa enamusega lammimetsad. Atlantilise kliimastaadiumi ajal, 6000-3000 a eKr, kui Eesti kliima oli soojem ja niiskem kuid praegusel ajal, saavutasid maksimaalse leviku laialehised puud. Vähenes männikute pindala, suurenes lepa levik, kõrgema reljeefiga aladel Lõuna-Eestis olid valdavad lehtmetsad, kus domineerisid jalakas, pärn, tamm, saar. Põhja- ja Loode-Eesti õhukestel muldadel kasvasid siis hõredad ja valgusrikkad tamme-männi segametsad. Kuiv ja soe subboreaalne staadium, mis kestis kuni 500 eKr, tõi endaga kaasa kiire ja ulatusliku kuusikute levimise. Iseloomulikud olid kuuse-tamme segametsad ning kuusk kui varjutaluv ja konkurentsivõimelisem liik tõrjus suurtelt aladelt tamme välja. Sel perioodil oli kuuse levik Eestis maksimaalne. Hilisholotseenis, alates 500 eKr, kliima muutus sarnaseks praegusega, kuusikud hakkasid

vähehaaval taanduma ja suurenes taas lepa ja kase levik, metsad hakkasid muutuma sarnaseks praegustega. (Paal 1997)

Viiel tähtsaimal lehtpuuliigil on mitu sarnast omadust, mis aitavad seletada just nende lehtpuude laialdast levikut Eesti metsades. Nad kõik on kiirekasvulised, valguslembesed ja väga laia ökoloogilise amplituudiga, mis lubab neil konkureerida okaspuudega. Nad on samuti varasuktsessioonilised liigid ja on võimelised kiiresti metsastama lagedaid alasid, ka metsaraiesmikke, mis tagab, et neil on alati uut maad, kuhu oma populatsiooni levitada saab. Väga sobilikud on ka Eesti parajalt niisked ja mõõdukalt soojad kliimatingimused ja tüüpilised sobiliku mullastikuga kasvukohad, mis Eestis esinevad. Leidub suures hulgas nii kuiva viljakat mulda arukasele, vaesemat ja märga mulda sookasele ja märgasid üleujutatavaid alasid mida armastavad lepad.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on anda teaduskirjandusele tuginev ülevaade Eesti piirkonna olulisemate lehtpuude ennustatavast reaktsioonist tuleviku kliimamuutustele. Teaduskirjanduse otsimisel kasutasin eelkõige järgmiseid andmebaase: SCOPUS, EBSCO, Medline, Cyberleninka ja eelkõige kaasasin teadustöid, mis on ilmunud viimase paarikümne aasta jooksul.

## Kliimamuutused

Eesti kliima on üleminekuline mereliselt mandrilisele. Seda mõjutavad läänest Atlandi Ookean ja idast Euraasia manner. Euraasia poolt tulevad Eestisse tavaliselt kõrge rõhuga kuivad õhumassiivid, mis tingivad soojemat ilma kevadel ja suvel ja tugevamat külma talvel. Atlandi Ookeanilt tulevad madala rõhuga niisked õhumassiivid, mis on tingitud Põhja-Atlandil tekkivatest tsüklonitest. Need jahutavad õhku suvel ning soojendavad talvist temperatuuri. Mesokliimat kujundab Läänemeri, mille mõju on väga tugev Lääne-Eestis, kuid Ida-Eestis on see väheoluline. Mõju avaldavad ka kõrgustikud, mis tingivad veidi pikemat lumikatte püsimist kui Lääne-Eestis. (Paal 1997)

Tänapäevaseid kliimamuutusi käsitleb suur hulk teaduslikke uuringuid, millest paljud on aluseks ÜRO egiidi all tegutseva Valitsustevahelise Kliimamuutuste Nõukogu (IPCC) aruannetele. Kõige rohkem käsitletakse nendes töödes kliima soojenemist ja sellega kaasnevaid nähtusi. Peamine andmestik, mis käsitleb taime- ja loomade reaktsioone kliimamuutustele, on fenoloogiliste faaside alguse ja lõpu ajaline nihkumine. Satelliitidega alates 1982. aastast läbiviidavate vaatluste põhjal on parasvöötmes vegetatsiooniperiood pikenenud, sest kevadel on vegetatsiooniperioodi algus nihkunud varasemaks, ja sügisene vegetatsiooni lõpp on nihkunud hilisemaks. Nende andmete põhjal on vegetatsiooniperioodid viimaste kümnendite jooksul oluliselt muutunud. Näiteks, vahemikus 1982-2001 vegetatsiooni algus nihkus 5,2 päeva varasemaks ja lõpp nihkus 4,3 päeva hilisemaks; aga vahemikus 2001-2008 algus ja lõpp nihkusid vastavalt 0,2 ja 2,3 päeva võrra (Jeong *et al.* 2011). Selliseid trende kinnitavad ka teised uuringud: näiteks Rahvusvahelise Fenoloogiaühingu (IPG) andmetel on aastatel 1959-1996 lehtede puhkemine nihkunud 6,3 päeva ettepoole (0,21 päeva aastas) ja sügisene lehtede värvimuutus hilinenud 4,5 päeva võrra ehk 0,15 päeva aastas (Hajkova *et al.* 2019). On samuti välja selgitatud, et vahemikus 1992-2011 kasvas Euraasias keskmine kevadine temperatuur 0.0043 °C võrra aastas ja keskmine suvine temperatuur 0.0046 °C aastas. Sellega kaasnes keskmine vegetatsiooniperioodi pikenemine, milleks Euraasias määrati 0,4 päeva aastas. Varem on hakanud toimuma olulisteks peetavad fenoloogilised sündmused – kase lehtede lahtikeerdumine (kevadise kasvu algus parasvöötmes), toominga õitsemine (eelsuvine periood), pärna õitsemine (suvi) (Росгидромет, 2014). Eestis alates 1948. aastast teostatavad vaatlused on näidanud, et 85% taimedel algavad fenoloogilised etapid tänapäeval varem kui vaatluste algusperioodis, need muutused korreleeruvad suureneva õhutemperatuuriga. (Ahas & Aasa, 2006)

Aastaks 2100 ennustatakse, et Eesti kliimavööndis võib aasta keskmine temperatuur tõusta 3,5-5 kraadi võrra, suuremat temperatuuri tõusu eeldatakse talvede jaoks (4-7 kraadi), mis muudab talved

niiskemaks ja lumevaesemaks, suures osas sarnaseks 2019-2020 talvele, suvel prognoositakse väiksemat 3-4 kraadist tõusu. Sellised muutused pikendavad taimede kasvuperioodi, ning erinevate ennustuste järgi toovad need endaga kaasa puidu juurdekasvu suurenemise 8-22% võrreldes praegusega. Samas, pehmemad talved võivad vähendada puude vastupanu võimet tugevale külmale ning ebatavaliselt külmadel talvedel võib oluliselt tõusta külmakahjustuste hulk. Eeldatakse ka erinevate kahjurite, nagu lehtedest toituva liblika *Lymantria dispar* areaali levimist põhja poole ja punaka männivaablase (*Neodipron sertifer*) massilise leviku sagenemist vähema talvise suremuse tõttu. Pikem suvine kasvuperiood soosib ka mitmete patogeensete seente levikut, nagu kuusejuurepess (*Heterobasidion parviporum*) ja männi-juurepess (*Heterobasidion annosum*), teiselt poolt on ka seeni, nagu *Gremmeniella abietina*, mis eelistavad jahedamat ilma ning mille levikut kõrge suvine õhutemperatuur takistab. (Lidner *et al.* 2010)

Õhutemperatuuriga kaasnevalt ennustatakse ka sademete hulga tõusu. Aastaks 2100 ennustavad suurem osa kliimamudeleid, et aastane sademete hulk on võrreldes praegusega tõusnud 10-20%. Kuude lõikes ei olda sademete hulga muutuses nii kindlad. Üldjoontes ennustatakse, et külmadel kuudel tõuseb sademete hulk 10-50% ja suvekuudel võib muutus jääda 10% vähenemise ja 20% tõusu vahele. Seega suvekuudel võivad hoopiski sageneda põuaperioodid ja nendega kaasnev veepuudusest tulenevad taimede reaktsioonid nagu kasvu pidurdumine ja suurem suremus, kuigi praegusel ajal ei ole veepuudus Eestis tavaliselt probleemiks ja tugevad põuad on veel suhteliselt haruldased. Erinevad ka ennustused regionaalsete muutuste suhtes – osad mudelid ennustavad suuremat tõusu Lääne-Eestis, teised Ida-Eestis. Sademete hulgaga kaasneb ka väike pilvisuse tõus (kuni 2%) ja veeauru kontsentratsiooni tõus atmosfääris. Taimedele ei too selline muutus kase, sest vesi ei ole Eestis limiteerivaks faktoriks taimede kasvuks. Pigem toob see kaasa väikese kasvu pidurdumise, sest kõrgeenenud veeauru rõhu tingimustes väheneb taimede lehtedelt toimuv aurustumine ja sellega kaasneb aeglasem vee vool juurtest üles ja aeglasem toitainete omastamine ja transport. (Kont *et al.* 2003)

Ennustatavalt suureneb ka CO<sub>2</sub> kontsentratsioon atmosfääris, mis praegusel ajal on veidi üle 400 ppm (CO<sub>2</sub> osakest miljoni õhu osakese kohta). Selline muutus soodustab meil taimede biomassi toodangu suurenemist, sest parasvöötme taimedel on fotosünteesi küllastusplato oluliselt kõrgemal kui praegune CO<sub>2</sub> kontsentratsioon. Kõiki neid muutusi on juba täheldatud viimase sajandi jooksul läbi viidud ilmastiku vaatluste käigus välja joonistuva tendentsina.

Üldjoontes, kliimamudelid ennustavad 100 aasta pärast kliimatingimusi, mis sarnanevad ilmastikule, mis valitses atlantilisel kliimaperioodil, kui kliima oli soojem ja niiskem kui praegu. Selle kliimaperioodi metsi iseloomustas männimetsade taandumine, kuuse levimine ja laialehiste metsade ulatuslik levik ja ulatuslik rabade teke ja metsade soostumine (Kont *et al.* 2003, Paal 1997).

Metsad kui on eriti tundlikud kliimamuutuste suhtes, sest puude looduslik eluiga on päris pikk ning tüve ja juhtkudede struktuur on väga konservatiivse ehitusega ja seda ei saa puu elu jooksul kergelt muuta. See muudab puud järskude ilmastiku muutuste poolt haavatavamaks kui muud metsas kasvavad taimed, näiteks lühiealised rohttaimed.



## Kased

Eestis esineb looduses pärismaisete liikidena 4 liiki kask, neist peamised on arukask (*Betula pendula*) ja sookask (*Betula pubescens*). Arukask on keskmiselt 21-24 meetri kõrgune puu, Eesti kõrgeim 35 m. Arukask elab looduses maksimaalselt 250 aastat, keskmiselt kuni 120 aastat; heaks raievanuseks loetakse 50-80 aastat. Kask on kiirekasvuline ja valgusnõudlik pioneerliik, kaasikud reageerivad hästi lageraiele. Arukaasikud kasvavad kõige paremini viljakatel ja parasniisketel muldadel, kõige paremini naadi kasvukohatüübi muldadel (gleistunud leetjad ja leostunud mullad), nad on päris nõudlikud mulla viljakuse suhtes, kuid samas taluvad päris hästi ka keskkonnatingimuste muutusi. Pärast lageraiet uuenevad arukaasikud suuremas jaos alles jäetud puude seemnetest, vähemal määral kannuvõsudest. (Laas 2019)

Sookask on keskmiselt 12-16 meetri kõrgune puu, Eesti kõrgeim sookask kasvab Järveljal ja on 28 m kõrgune. Sookase eluiga on keskmiselt 90 aastat, vanimad isendid elavad kuni 150 aastat, raiutakse sookaske tavaliselt kuni 70 aasta vanuselt. Sookask on arukasest okslikum ning tema tüvi on sageli mingil määral kõverdunud, mistõttu tema puidul on natuke halvemad tehnilised omadused. Sookask on nooruses sama kiire kasvuga kui arukask, hiljem jääb tema kasv aeglasemaks. Sookask on ka vähem nõudlik mulla suhtes, mistõttu on ta veel sagedasem pioneerliik kui arukask ja kasvab laiema ökoloogilise amplituudiga paikades. Kahe kaseliigi tagavaraks Eesti metsades hinnatase 110,4 miljonit m<sup>3</sup>, mis on 22,9% kogu metsa tagavaradest, sellest majandatavates metsades 94,9 miljonit m<sup>3</sup>. Kaskede hektaritagavaraks majandatavatel maadel on 181 kuupmeetrit hektari kohta, see on kahe kase liigi peale kokku. Arukask on sookasest palju tootlikum, parimates arukaasikutes ulatub puidutagavara 300-340 kuupmeetri hektarilt (Valgepea *et al.* 2020).

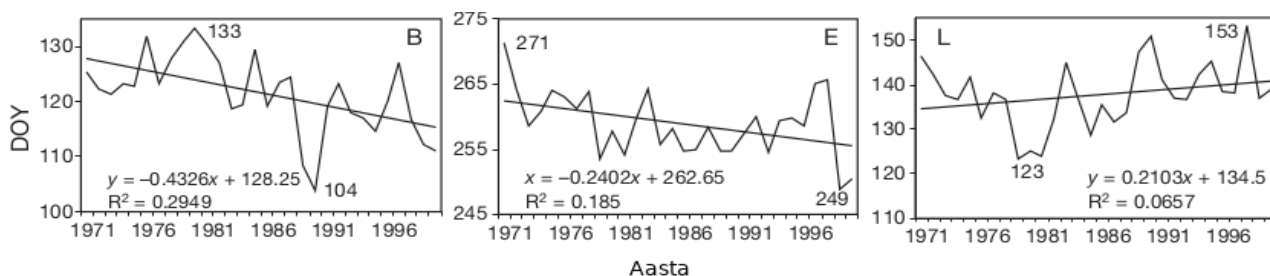
Eestis esinevad looduslikult ka vaevask (*Betula nana*), mis kasvab kuni 1 meetri kõrguseks, peamiselt siirdesoodes ja rabametsades. Samuti esineb Eestis madal kask, *Betula humilis*, mis kasvab põõsana kuni 2 meetri kõrguseks, enamasti põõsasniitudel ja soometsades. Arvatakse, et kaseliikide hübriidiseerumist esineb Eesti territooriumil vähe, arukase ja sookase hübriid kuldask (*Betula x auranta*) on looduses haruldane lähteliikide erineva ploidsuse tõttu (arukasel 28 kromosoomi, sookasel 56); sookase ja vaevakase hübriidid esinevad sagedamini, vaatamata sellele, et ka vaevakask on diploidne liik 28 kromosoomiga, kuid enamasti Eestist põhja pool, kõige rohkem Islandil (Laas 2019).

Kased alustavad Eesti kliimavööndis tolmllemist keskmiselt 11. mail. 20. sajandi varaseim kase tolmllemise algus Leningradi Oblastis on registreeritud 26. aprillil 1983. aastal, hiliseim tolmllemise algus oli 25. mail 1942. aastal (Федотова *et al.* 2017).

Kliima soojenemise tõttu jõuab kasele kasvuks sobiv temperatuurivahemik kätte varem ja kase vegetatsiooniperioodi algus, mida loetakse algavaks, kui keerduvad lahti esimesed lehed, nihkub mõne päeva võrra ettepoole. Samuti, esimeste lehtede puhkemise algus on Venemaa Geograafiaseltsi vaatluste alusel kasel nihkunud Novgorodi Oblastis 3-5 päeva ettepoole ja Leningradi Oblastis 4-7 päeva ettepoole, seda vahemikus 1970. aastatest 2010. aastani. Seega, ka Eestis algab kaskede vegetatsiooniperiood mõne päeva võrra varem. Liikudes lõuna poole, väheneb soojenemise mõju vegetatsiooniperioodi algusele, nt. 52. laiuskraadist lõuna pool on keskmine vegetatsiooniperioodi algus jäänud 1970-2010 aastate vahel sama kuupäeva peale. See võib olla tingitud asjaolust, et talvine puhkeperiood ei saa lõunapoolsetel puudel enam lühemaks muutuda, ilma et selle tõttu kannataksid teatud puu ellujäämiseks vajalikud protsessid, mis toimuvad selle talvitumise perioodi jooksul, samas kui põhja pool kasvavatele puudele ei mõju talvise rahuperioodi lühenemine kahjulikult (Minin & Voskova 2014). Põhja-Euraasias on soojenemise mõjul pikenenud vegetatsiooniperiood; 1981-1999 aastatel toimunud vaatluste järgi on vegetatsiooniindeksi dünaamiliste muutuste alusel järeldatud, et vegetatsiooniperiood on pikenenud 14-22 päeva võrra aastas, seejuures suurem osa muutusest on põhjendatud sellega, et lehed püsivad kauem puude küljes. On leitud korrelatsioon nende muutuste ja vegetatsiooniperioodi temperatuuride suurenemise vahel, ja ka sellega, et kevadel tõuseb temperatuur varem üle 0 °C ja sügisel püsib kauem üle 0 °C. Vegetatsiooniindeksi suurenemine toimub eelkõige lehtede massi suurenemise arvelt, soojenemisega adapteerumisel puudel suureneb lehtede mass palju kiiremini kui tüves ja juurtes olevate juhtkudede massi suurenemine (Lapenis *et al.* 2005). Venemaal Столбы looduskaitsealal on leitud, et kase lehtimine algab varem ja toimub kiiremini kui minevikus. Perioodil 1952-1989 algas seal kase lehtede kasv keskmiselt 22. mail ja kestis umbes 12 päeva, lõppedes 4. juunil. Perioodil 1990-2008 algas seal kaskede lehtede kasv 18. mail ja kestis 6 päeva, kased olid täielikult lehtinud 24. maiks. Seega, kase lehtimise algus oli muutunud 4 päeva ja täieliku lehtimise saavutamine 10 päeva varasemaks, lehtimise kestus oli muutunud 6 päeva lühemaks (Овчинникова *et al.* 2011).

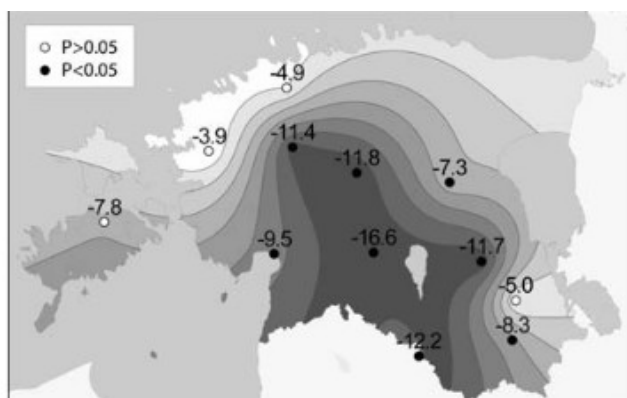
Ka Lätis ja Leedus on vegetatsiooniperiood viimaste aastakümnete jooksul pikenenud. 1971-2000 aastate vahel oli kase keskmiseks kasvuperioodi (lehtede puhkemise ja lehtede sügise värvimuutuse vahe) pikkuseks määratud 138 päeva. Kasvuperiood algas seal keskmiselt 1. ja 7. mai vahel, ja lõppes septembrist kuni 5. oktoobrini, keskmiselt 14.09. Kolmekümne aasta jooksul muutus kasvuperioodi algus 6-15 päeva võrra varasemaks, keskmiselt 4 päeva kümne aasta jooksul. Ka kasvuperioodi lõpp liikus seal varasema kuupäeva poole, 2000. aastal värvusid lehed kollaseks keskmiselt 2 päeva varem kui 1971. aastal. Vegetatsiooniperioodi algus oli suurema muutlikkusega kui vegetatsiooniperioodi lõpp; suurimad kõrvalekalded keskmisest faasi alguse kuupäevast olid 1990, kui kasvuperiood algas 18 päeva varem ja 1980, kui kevadine faas algas keskmiselt 11 päeva

tavalisest hiljem. Fenoloogiliste faaside juures leiti oluline statistiline seos eelnevate kuude keskmise õhutemperatuuri ja faasi alguse kuupäeva vahel. Nii, soojade ja lumevaeste talvede ja varase lume sulamisega aastatel algas kevadel kasvuperiood keskmisest varem, külma talve ja kevadega aastatel vastavalt hiljem. Kolmekümne vaatlusaastaga kokku muutus kase vegetatsiooniperiood keskmiselt 7 päeva võrra pikemaks, seda just varasema kevadise kasvu alguse arvelt (Kalvane *et al.* 2009) (Joonis 1).



Joonis 1. Kase vegetatsiooniperioodi trendid Lätis ja Leedus. Vasakpoolsel graafikul kevadine kasvu algus (DOY, päevad aasta algusest), keskmisel sügisene kasvu lõpp (päevad aasta algusest), paremal kasvuperioodi pikkus päevades (Kalvane *et al.* 2009).

Eestis aastatel 1948-1999 läbi viidud vaatlused on näidanud, et Eesti kesk- ja lõunaosas on kase kasvuperioodi algus liikunud 10 kuni 16 päeva ettepoole, Eesti põhjaosas samal ajaperioodil 3-4 päeva ettepoole (Joonis 2). Sellised erinevused suhteliselt väikese territooriumi eri osades on tingitud erinevustest mikrokliimas, Põhja- ja Lääne-Eesti on kliima tugevalt mõjutatud Läänemere poolt ja mereäärne kliima on oluliselt stabiilsem kui sisemaa alade kliima. Muid olulisi looduslikke erinevusi, mis mõjutaksid fenoloogilisi sündmusi, erinevates Eesti piirkondades kasvavate kaskede vahel ei leidu (Ahas & Aasa 2006). Samas uuringus toodud andmete järgi on kevadine kasemahla voolamine 1999. aastal algamas 15 päeva varem kui 1948 ja lehtede kasvamine algab 13 päeva varem.



Joonis 2. Kase lehtede puhkemise alguskuupäeva muutused aastatel 1948-1999, mustad punktid tähistavad statistiliselt olulist ( $p < 0,05$ ) ja valged täpid mitte olulist ( $p > 0,05$ ) muutust (Ahas, Aasa 2006).

Temperatuuri tõusmise tõttu algab nüüd varem ka kase tolmlamise periood. Näiteks, Šveitsis Bazelis on alates 1969. aastast pidevalt tehtavate õietolmu mõõtmiste alusel läbi viidud uuring, mis käsitleb muuhulgas kaskede tolmlamise algust. Tulemusena leiti, et kaskede tolmlamine on vahemikus 1969-2018 nihkunud 10 päeva võrra ettepoole, keskmiselt aasta 97. päevast aasta 87. päevani; ning on leitud korrelatsioon aasta keskmise temperatuuriga, mis oli sellel perioodil samas piirkonnas vähesel määral tõusnud (Frei 2020). Samasuguseid suundumusi on kase tolmlamise jaoks leitud ka Lõuna-Saksamaal. Seal leiti, et viimase 10 aastaga on kask alustanud tolmlamist üks päev varem ning on leitud ka kindel seos kevadise temperatuuri tõusmisega (Rojo *et al.* 2021). Sarnastest temperatuuri trendidest Eestis võib järeldada, et ka Eesti piirkonnas liigub kase tolmlamine varasemaks.

Globaalne soojenemine toob kaasa ka atmosfääri CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni tõusu. Seejuures kaskede fotosünteesi küllastusplato on oluliselt kõrgemal kui praegune CO<sub>2</sub> kontsentratsioon atmosfääris, mis on veidi üle 400 ppm-i. *BangorFACE* katses Suurbritannias uuriti 580 ppm-ni suurendatud CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni mõju lehtpuude kasvule ja leiti, et 4-aastaste kaskede biomassi toodang suurenes 16% võrreldes kontrollpuudega kase monokultuuri istanduses. Seejuures oli mõju kõige suurem katse esimesel aastal, moodustades 27%; seejärel vähenedes ning neljandal aastal oli tõstetud CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni poolt tingitud produktsiooni suurenemine langenud 9%-ni. Sama katse polükultuursetes istandustes, kus peale kase kasvasid ka sanglepp (*Alnus glutinosa*) ja pöök (*Fagus sylvatica*), oli CO<sub>2</sub>-st tingitud produktsiooni tõus märgatavalt väiksem. Kase produktsioon oli sel juhul suurenenud 6% võrreldes kontrolliga. Selline muutus oli osaliselt tingitud liikidevahelisest konkurentsist, teisalt sellest, et polükultuurse katse kontrollistandustes oli puude produktsioon suurem kui monokultuurides (millele aitas kaasa lepa omadus siduda mullast lämmastikku). Katse lõpuks oli 32% võrra suurenenud ka lehtede pindala indeks, mis aitas samuti kaasa produktsiooni suurenemisele. (Smith *et al.* 2013)

Temperatuuri tõusu tõttu suureneb põhjapoolsetel kase populatsioonidel herbivoorsete putukate tekitatud kahjustuste hulk. Kuna enamuse putukate levikut põhja suunas takistab meie kliima võõndis just madal temperatuur, siis 2-3 kraadise suvise temperatuuri tõusu juhul ennustatakse, et põhjapoolsetes lehtmetsades putukate tekitatud kahju kaskedele kahekordistub. Kahjurputukate olemasolu pidurdab noortel kaskedel nii kõrgus- kui jämeduskasvu, samuti vähendavad kahjurputukad oluliselt alles kasvama hakanud kaskede ellujäävust. Uuringud Soome eri piirkondadest pärit kase genotüüpide võrdluskatses on kinnitanud hüpoteesi, et putukad eelistavad toituda puudest, mis on toodud põhjapoolt võrreldes puudega, mis on pärit samalt laiuskraadilt. Seega on võimalik, et põhja pool kasvavatel puudel on vähem kaitsemehhanisme herbivoorsete

putukate vastu ja lõuna poolt migreerivad putukad tekitavad tulevikus kaskedele oluliselt rohkem kahju. (Heimonen *et al.* 2015)

Kõrgenenud suhteline õhuniiskus vähendab noortel kasepuudel maapealsete taimeosade biomassi produktsiooni. FAHM katse kahe aasta mõõtmisandmed näitasid, et kunstlikult tõstetud suhtelise õhuniiskusega noored kased olid kahe aastaga kasvanud 14% võrra vähem biomassi kui need kased, mida kasvatati normaalse õhuniiskuse tingimustes. Kõrgenenud õhuniiskuse tingimustes on pidurdatud mineraalsete toitainete omastamine ja ka fotosüntees, mis omakorda vähendab biomassi toodangut. Mineraalsete toitainete omastamine on vähenenud efektiivsusega eelkõige seetõttu, et kõrgenenud õhuniiskuse tingimustes transpireerivad puud vähem vett kui tavalise õhuniiskuse juures. See omakorda vähendab mullas transpiratsioonist tingitud toitainete massivoolu juurteni. Kõrgenenud suhtelise õhuniiskuse tingimustes on vähenenud ka noore puu tüve puidu tihedus, mis vähendab tüve tugevust. Noortel kaskedel, mida kasvatatakse kõrgenenud õhuniiskuse tingimustes, on tüve kasv kõrgusesse pidurdatud rohkem kui tüve jämeduskasv, nii et tüved on suurema diameetri ja kõrguse suhtega, kui normaalse õhuniiskuse tingimustes kasvanud kaskedel. Samuti oli veidi suurem puukoore osakaal tüves (Sellin *et al.* 2014). Tüved olid suhteliselt jämedamad, sest pikkuskasvu periood oli katsete käigus kaskedel ühesugune nii normaalse kui ka kõrgenenud suhtelise õhuniiskuse tingimustes, aga tüvede jämeduskasv kestis kõrgemas õhuniiskuses kaskedel nädal kauem kui kontrollkaskedel. Selle tulemusena oli kuue aastastel niisutatud kaskedel keskmine kõrgus 5,01 meetrit, mis oli 11,1% väiksem kui keskmiselt 5,74 meetri kõrgustel kontrollkaskedel; samas tüvede läbimõõdus ei olnud olulist statistilist erinevust (Tullus *et al.* 2014). Muutus ka jämeduskasvu dünaamika. Kõrgema õhuniiskuse tingimustes oli jämeduskasv aeglasem juuni keskel, enne maksimaalset kiire kasvu perioodi, kuid see-eest kiirem augustis, enne kasvu hooaja lõppu (Rosenvald *et al.* 2020). Pärast nelja aastat kõrgema suhtelise õhuniiskuse juures kasvamist suutsid noored kasepuud mõningal määral uute tingimustega adapteeruda ja nende kasvu kiirus ei jäänud enam maha kaskedest, mis olid kasvanud normaalsetes tingimustes. Kõrge suhtelise õhuniiskuse juures kasvamisel hakkasid kased kasvatama rohkem peenjuuri, mille ülesanne on omastada mullast mineraalseid toitaineid. Muutused puudutasid ka kaskede lehti. Kõrgema suhtelise niiskuse tingimustes kasvavatel kaskedel muutus suuremaks lehtede eripind, mille tulemusel oli lehtedel biomassi ühiku kohta oluliselt suurenenud pindala, mis oli võimeline fotosünteesida. Ka lehtede eluiga muutus pikemaks – sügisene lehtede vananemine ja varisemine kestis kõrges õhuniiskuses olevatel kaskedel kuni 4 nädalat kauem kui tavalistes tingimustes kasvavatel kaskedel (Godbold *et al.* 2014). Tänu sellele suutsid katsealused kased sügisel pikemat aega fotosünteesida ja koguda orgaanilist ainet. Sügisel toodetud fotosünteesiprodukte kasutatakse väga vähe kasvuks ja paigutatakse rohkem varuaineteks, et järgmisel kevadel kasvamist alustada ja eluks vajalikud

protsessid taas käivitada, mis tähendab, et sellistel kasepuudel võib kevadine kasv olla isegi kiirem kui tavalistes tingimustes olevatel kaskedel (Rosensvald *et al.* 2014). Vaatluste tulemustel leiti, et hetk, millal pool puu lehtedest on maha varisenud, saabub kõrgema suhtelise õhuniiskuse tingimustes kasvavatel kaskedel keskmiselt kaks nädalat hiljem kui tavalisel niiskusel kasvavatel kaskedel. Samuti leiti, et 10. oktoobriks, kui tavalises õhuniiskuses olid kased peaaegu raagus, oli kõrges õhuniiskuses kasvavatel kaskedel veel alles kuni 20% lehtedest (Rosensvald *et al.* 2020).

Kõrgem suhteline õhuniiskus mõjutas lehtede lämmastiku ja fosfori sisaldust. Katsealustel kasepuudel oli lehtedes madalam lämmastiku ja fosfori sisaldus, kui kontrollpuudel. Muutus ka hooajaline dünaamika nende ainete sisaldusel lehtedes. Septembris oli lämmastiku ja fosfori sisaldus lehtedes kõrgem nendel puudel, mis kasvasid kõrgema suhtelise õhuniiskuse juures. Seda võib seletada asjaoluga, et kõrge õhuniiskuse juures oli septembriks puudelt varisenud ainult 20% lehtedest, samal ajal kui kontrollpuudel oli maha varisenud juba 60% lehtedest. Lehtede vananemisel toimus kõrgema õhuniiskuse juures lämmastiku tagastamine (retranslokatsioon) lehtedest kiiremini kui tavalistel puudel. Samuti muutus lämmastiku tagastamine efektiivsemaks, enne varisemist viidi varuks suurem osa lämmastikust kui kontrollpuudel. See on oluline adaptatsioon, sest lämmastiku omastamine mullast on kõrge suhtelise õhuniiskuse tingimustes aeglasem ja lämmastik on üks tähtsamaid toitaineid mille puudujääk võib olla noorele puule äärmiselt kahjulik. Suuremat osa lehtedest tagastatud lämmastikust säilitatakse puukooses, katsealuste puude suurem koore osakaal võib olla tähtis just lämmastiku säilitamise eesmärgil. Samal ajal, fosfori tagastamise efektiivsus vananevatest lehtedest ei olnud kõrgema õhuniiskuse juures suurenenud, vaid oli sarnane kontrollpuude võimekusega fosfori tagastamisel. Selline erinevus võis olla tingitud sellest, et lämmastikku on noorel puul vaja mitu korda rohkem kui fosforit ning lämmastiku puudujääk piiraks noore puu kasvu oluliselt tugevamini kui fosfori puudujääk (Rosensvald *et al.* 2020).

Kõrgenenud suhteline õhuniiskus mõjutab ka puidu keemilist koostist. Katsealuste noorte kaskede tüvedes oli kasvu peatumise perioodil umbes 15% suurem lämmastiku ja 10% suurem fosfori sisaldus kui kaskedel, mis olid kasvanud tavalistes tingimustes, samas kui kaaliumi sisaldus oli selliste puude tüvedes madalam kui tavalistes puudes. Samuti oli kõrges niiskuses kasvanud kaskedel 2,6% võrra madalam tselluloosi sisaldus; 7% oli kõrgem ligniini, ja kuni 20% oli suurem hemitselluloosi kontsentratsioon. (Tullus *et al.* 2014)

Suhtelise õhuniiskuse tõstmine mõjutab puu suurust ja kasvamise kiirust, kuid vähem puutüve anatoomilisi omadusi. Väheneb vaid tüve puidu füüsiline tihedus ja sellega kaasnevalt väheneb puidu mehaaniline tugevus. Ksüleemi omadusi tõstetud õhuniiskuses ei mõjuta, nagu selgus FAHM katsetest. Samasuguseks jäid juhtsoonte keskmine läbimõõt ja suurus, juhtsoonte paiknemise

tihedus tüves, ksüleemi proportsioon puidus ja ka juhtsoonte vee läbilaskevõime nii absoluutnumbrites (sest suures õhuniiskuses kasvav puu investeerib rohkem tüve jämedusse kui kõrgusesse) kui suhteline juhtivus ksüleemi pindala kohta. Muutusteta olid ka ksüleemi struktuuri erinevused puu eri osades: juhtsoonte keskmine läbimõõt on suurem tüve alumises osas ja väheneb ülespoole liikudes ning okstes on vastupidi, juhtsooned muutuvad laiemaks liikudes oksa otsa poole. See kõik on vastavuses tavatingimustes kasvavate puude ksüleemi omadustega. Järeldusena on pakutud, et ksüleemi struktuur on evolutsiooniliselt suhteliselt konservatiivne omadus ning ei muutu lühiajaliste välimiste tegurite mõju all, ksüleemi omadused on isenditevahelises võrdluses väikese varieeruvusega, ning ksüleemi omaduste märgatavaks muutumiseks on vaja väga pikaajalisi kasvamis keskkonna muutusi. Võib oletada, et 7% võrra suhtelise õhuniiskuse tõstmine FAHM katsealal on lihtsalt ebapiisav selleks, et ksüleemi struktuurseid omadusi mõjutada. (Alber *et al.* 2019)

FAHM katse näitas ka muutust kõrge õhuniiskuse juures kasvanud kaskede lehtede reaktsioonis õhu kuivamisele. Sellistel puudel esines põua korral kiirem lehtede vee ja veeauru juhtivuse langus, mis tulenes nõrgemast õhulõhede kontrollist. Õhulõhede sulgumise nõrk kontrollivõime tulenes sellest, et kui kasvav taim on pidevalt, ja eriti lehtede moodustumise ajal, kõrges õhuniiskuses, siis puudub lihtsalt suur vajadus õhulõhede sulgumiseks, sest aurustumine lehtedelt on niigi väike ja veepuudust nendes tingimustes tekkida ei saa, pigem võib tekkida väike toitainete puudujääk. Eelmainitud kahel omadusel on erinev mõju lehe talitlusele. Veeauru juhtivuse langus aitab taimel vähendada veekadu, takistab taime veepotentsiaali langust ja seega aitab taimel põuased ajad üle elada. Lehe veejuhtivuse langusel on vastupidine mõju, see vähendab lehe veevarustatust ja seega langeb lehe veepotentsiaal. Kontrollpuudega võrreldes langes eriti kiiresti just lehe veejuhtivus ning seega suurenevad eriti tugevasti just ohud, nagu lehe dehüdratsioon pikas põuas või tugeva kuumalaine korral (Sellin *et al.* 2014). Kõrgem õhuniiskus mõjutab samuti õist transpiratsiooni kaskedel. USAs läbi viidud Katses oli päevane õhuniiskus tõstetud, veeauru rõhkude erinevus õhu ja lehe vahel 42% väiksem kui kontrollis, õine veeauru rõhkude erinevus oli neil võrdne (Smith *et al.* 2013). Katse tulemusel leiti, et niiskes õhus kasvanud kaskedel ei sulgu ööseks õhulõhed nii suurel määral kui kontrollkaskedel ning et päeval niiskes hoitud puudel oli öösel oluliselt suurem veeauru juhtivus ja transpiratsiooni maht. Järeldati, et kask suudab reguleerida oma õist õhulõhede aktiivsust tuginedes päevastele tingimustele. Ennustuste kohaselt suureneb tulevikus soojade ööde arv ning seega õine transpiratsioon võib muutuda palju tähtsamaks teguriks puu kasvu mõjutajana kui praegu (Kupper *et al.* 2017).

Võib oletada, et niiskemaid kasvukohti eelistav sookask kohaneb kliimamuutustega paremini kui arukask ning seega võib aru- ja sookase osakaal muutuda rohkem sookase kasuks.

## Haab

Eesti ainus pärismaine paplite perekonna liik on harilik haab (*Populus tremula*). Harilik haab on keskmiselt 30-40 meetri kõrgune, Eesti suurim haab on 43,2 m kõrge (Ader 2021). Haava keskmine eluiga ulatub 70-80 aastani, maksimaalselt kuni 160 aastani. Haava majanduslikku raiet teostatakse kui puud on 30-50 aastat vanad, raiekõlblikku vanust otsustatakse kasvukoha kvaliteedi järgi, haava taastumine pärast raiet toimub enamjaolt juurevõsudest. Haavikud on enamasti sekundaarse tekkega, nad tekivad puistutele, mis on tugevalt häiritud kas põlengu või lageraie käigus. Haavikud kasvavad Eestis peamiselt leetunud, näivleetunud ja leetjatel muldadel, millel on parasniiske või gleistunud veerežiim. Haab on valgusnõudlik puuliik, haavikutes toimub tugev iseharvenemine ja nad reageerivad hästi ka harvendusraiatele (Laas 2019). Haava tagavara Eesti metsades hinnatakse 34,8 miljonit m<sup>3</sup>, mis on 7,3% kogu metsatagavarast, sellest majandataval maal on 28,6 miljonit m<sup>3</sup>. Haavikutes on puidu tagavara hektari kohta 235 kuupmeetrit, mis on suur näitaja ja jääb alla ainult männile (Valgepea *et al.* 2020).

Eestis kasvatatakse peale hariliku haava vähesel määral ka sissetoodud liiki, ameerika haaba (*Populus tremuloides*), mis on väga sarnane harilikule haavale nii morfoloogiliselt kui geneetiliselt. Metsandustes kasvatatakse ka nendevahelist kunstlikult saadud ristandit, hübriidhaaba (*Populus x wettsteinii*), millele on noores eas iseloomulik suurem kasvukiirus võrreldes lähteliikidega, kuid mis on veidi nõudlikum kasvukoha mulla suhtes (Tullus *et al.* 2012a). Istandustes esineb ka hõbehaaba, halli haaba, linnaparkides pappleid (Laas 2019).

Meie kliimavööndis hakkab harilik haab 20. sajandi vaatluste põhjal tolmlема keskmiselt aprilli II või III dekaadis. Varaseim haava õitsemise algus on registreeritud 30. märtsil 2007. aastal, hiliseim 16. mail 1941. aastal (Laas 2019, Федотова *et al.* 2017).

Muutuvad kliimatingimused mõjutavad haava fenoloogiat. Lätis 1970-2018 aastatel läbiviidud uuringus leiti, et haava õitsemine muutub keskmiselt 0,2 päeva aasta kohta varasemaks, kuid see muutus oli siiski statistiliselt ebaoluline ( $P > 0,05$ ). Haaval kui varasel õitsejal on sagedased päris suured erinevused kevadiste fenoloogiliste sündmuste alguse osas järjestikustel aastatel. Sama uuringu jooksul leiti, et sügisene lehtede värvumise ja mahalangemise aeg näitab haaval vastupidist tendentsi, jäädes iga kümnendi jooksul veidi üle 2 päeva hilisemaks, mis on ka statistiliselt oluline muutus ( $P < 0,05$ ) (Kalvāne, Kalvāns 2021). Kasvuhooaeg seega pikeneb vähesel määral, kuid seda just sügiseste fenoloogiliste sündmuste hilinemise arvelt, mitte kasvuhooaja varasema alguse tõttu. Puu kasv on aga sügisel enne lehtede langetamise algust suhteliselt aeglane võrreldes kevade ja suvega ning seega võib oletada, et see kasvuhooaja pikkuse muutus ei ole Läti haabade tootlikkuse



suurenemise jaoks kuigi oluline (Rosenvald *et al.* 2020). Haava kevadise fenoloogia suundumustes esinevad ka piirkondlikud erinevused. Näiteks, Venemaal Krasnojarski Kraisi asuval looduskaitsealal Столбы on määratud, et 28 aastaga (1980-2008) on haabade lehtimine nihkunud 6 päeva varasemaks, 28. mailt 1980. aastal 21. maile 2008. aastal. Kiiremaks muutus ka lehtimise protsess, keskmiselt kümnest päevast viieni ja puud olid varem täielikult lehtinud: 1980 oli keskmiseks kuupäevaks 7. juuni; 2008 oli see 26. mai, muutus 10 päeva. Need muutused leiti olevat statistiliselt olulised ( $P < 0,05$ ) ning on olemas korrelatsioon lehtimise alguskuupäeva ja aprillikuu keskmise temperatuuri vahel. Mainitud looduskaitsealal on samuti nagu ka Läti haabade õitsemise puhul oluline asjaolu, et kevadised fenoloogilised sündmused on sageli väga erinevad järjestikustel aastatel (Овчинникова *et al.* 2011).

Kõrgenenud temperatuuri tingimustes suudab harilik haab oma kasvamist kiirendada. Soomes läbi viidud katsete põhjal on leitud, et võrreldes väli tingimustega 2 kraadi võrra tehnilikult soojendatud kasvutingimustes oli kolme aasta möödudes haava isastaimede tüvede kõrguskasv 41% suurem, diameetri kasv 35% suurem kui tavatingimustes ja emastaimedel kõrguskasv 33% ja diameeter 14% suuremad. Tüvede üldine biomass oli katsealustel puudel suurenenud vastavalt 76% ja 36% võrreldes kontrollpuudega. Pungade mass oli soojendatud puudel emastel 50% ja isastel 29% suuremad. Lehtede biomass oli isaspuudel 65%, lehtede kogupindala 31% suuremad; emastel oli lehtede biomass suurem 29% ja pindala 17% suurem võrreldes tavatingimustes kasvavate isenditega. Emastel kontrollpuudel oli sageli suurem üldine biomass ja kasv, kuid temperatuuri tõstmisel hakkasid kiiremini kasvama just isastaimed. Fotosünteesi intensiivsust ja efektiivsust kõrgenenud temperatuur ei mõjutanud, fotosünteesi kogutoodang suurenes sel juhul suurema lehtede üldpindala tulemusena (Sivadasan *et al.* 2018). Sellisel reaktsioonil temperatuurile on omad piirid. Leedus tehtud üheaastase katse jooksul selgus, et kui päevast keskmist temperatuuri tõsta 25-40 kraadini, siis haabade kasv pidurdub võrreldes nende haabadega, mis kasvasid looduslikul temperatuuril (20-28 kraadi). Selline temperatuur on haava fotosünteesi optimumist kõrgem ja kasv hakkab juba vähesel määral aeglustuma. Kuivades tingimustes tekib sellise temperatuuri juures kiiresti põuastress ja puu kasv aeglustub veel rohkem. Samas, kuumas ja niiskes kasvanud isenditel oli maha langenud vähem lehti kui väli tingimustes olevatel puudel, mis aitas mõningal määral kompenseerida ebasoodsaid kasvutingimusi (Pliūra *et al.* 2018).

Kõrgem õhutemperatuur aitab noortel haabadel ka vigastustega paremini toime tulla. On näidatud, et kui nelja aasta vanuseid haavapuid kahjustada, eemaldades neilt kevadel 5% pungadest, siis haavad kompenseerivad neid kahjustusi, kiirendades oma kasvamise tempot, neil suureneb lehtede ja tüve biomass. Temperatuuri tõstmisel 2 kraadi võrra suurenes emastel isenditel tüve kõrgus 17-27% diameeter 40-74% ja kogu biomass 138-203% võrra rohkem kui nendel isenditel, kes kasvasid

loodusliku õhutemperatuuri juures. Isastel isenditel suurenesid temperatuuri tõstmisel: tüve pikkus 14-58%, diameeter 2-22% ja kogu biomass 83-92%. Kahjustatud puudel võib olla parem võimekus omastada süsinikku ja toitained tõusva õhutemperatuuri tingimustes. Sellistel puudel on varasemalt mõõdetud suurem veekasutuse ja fotosünteesi efektiivsus. (Sobuj *et al.* 2020)

Kõrge õhutemperatuur kutsub noortel haavapuudel esile talvituvate pungade moodustumise hilinemise. Soomes Joensuu läbi viidavate katsete tulemusena selgus, et temperatuuri tõstmisel 1,35 kraadi võrra hakkavad noored haavad pungasid moodustama hiljem kui loomuliku õhutemperatuuri tingimustes. Kõige tugevam korrelatsioon pungade moodustamise ajastamisel oli päeva maksimaalse temperatuuriga ja ööpäeva keskmise temperatuuriga. Esinevad ka mõningad sugudevahelised erinevused reaktsioonides tõstetud temperatuurile. Isastel taimedel jääb pikemaks ajaks ära roheliste pungade moodustumine kui emastaimedel, kuid pungade valmimine toimub isastaimedel kiiremini kui emastel ning tulemusena on pungade valmimise ajas erinevused minimaalsed. Samas, pikemat aega valmivates pungades on kõrgem tärklise sisaldus ja seda on seostatud parema kaitstusega külmumise eest (Lipavska *et al.* 2000). Talvituvate pungade moodustumine on vajalik apikaalse meristeemi ja ka lehtede primordiumi kaitseks talvise pakase eest ning kuna pungade hilisem moodustumine pikendab kasvuperioodi, siis võib see suurendada sügiseste külmakahjustuste esinemise tõenäosust. Selline olukord oleks eriti tõenäoline soojadel sügistel, kui meristeemid ei ole veel külma eest kaitstud ja õhutemperatuur langeb kiiresti ja ootamatult all nulli kraadi (Strømme *et al.* 2016). Selline temperatuuri tõstmine mõjutab ka kevadist pungadest puhkemise algust. Sügisel soojemas olnud puude pungad hakkasid järgmisel kevadel varem kasvama, muutused olid ka seekord suuremad isastel taimedel. Samas, emastaimede kasv algas varem kui isastaimedel nii nendel, keda soojendati, kui nendel, keda kasvatati välise õhutemperatuuri juures. Võimaliku põhjusena sellistele sugudevahelistele erinevustele tuuakse välja, et hormoonide regulatsioon ja metabolism võib isastaimedel olla temperatuuri suhtes tundlikum kui emastaimedel (Strømme *et al.* 2014).

Pikaajaline CO<sub>2</sub> suurendamise katse ameerika haavaga (*Populus tremuloides*) näitas, et 7 aastat 560 ppm-ni suurendatud CO<sub>2</sub> sisaldusega õhuga kasvanud haabade biomass oli monokultuurses istanduses 25% suurem kontrollalade puudest. Tõstetud CO<sub>2</sub> mõju oli alguses väiksem ja suurenes aegamööda. CO<sub>2</sub> efekt oli selles katses suurem polükultuurides, haava ja paberikase (*Betula papyrifera*) istanduses suurenes biomass 46% ja haava-suhkruvaht (*Acer saccharum*) istandustes 60% võrra, kuid biomassi kogutoodang oli siiski kõige suurem haava monokultuuris liikidevahelise konkurentsi puudumise tõttu. (King *et al.* 2005)

FAHM katsealal läbiviidud uuringute tulemused on näidanud, et kõrgeõhuline õhuniiskus pidurdab hübriidhaava (*Populus tremula* L. x *P. tremuloides* Mitch.) kasvamist. Neli kuni kuus

aastat 7% võrra tõstetud õhuniiskuse tingimustes kasvatanud haabadel oli väiksem nii kõrgus kui ka tüve läbimõõt kui nendel haabadel, mida kasvatati normaalse õhuniiskuse tingimustes. Noored istutatud haavad ei suutnud esialgu kõrge õhuniiskusega kohaneda nii hästi kui kased samas katses. Vahe kasvus, mis tekkis erinevates tingimustes kasvavatel haabadel ei vähenenud aastate möödudes, vaid pigem suurenes. Haavad ei suutnud kõrgenenud suhteliselt õhuniiskusest tulenevat kasvu pidurdumist kompenseerida ei lehtede pikema elueaga ega ka intensiivsema peenjuurte kasvatamisega, nagu seda tegid kased (Rosenthal *et al.* 2014). Selle tulemusel oli pärast kuut aastat kasvamist, kui puud lõigati maha, kõrgema suhtelise õhuniiskuse tingimustes kasvanud haabadel keskmine kõrgus 9,4% väiksem ja keskmine tüve diameeter rinna kõrgusel 16,4% väiksem kui kontrollhaabadel (Tullus *et al.* 2014). Suurenenud õhuniiskus mõjutas hübriidhaava lehtede omadusi. Ühe lehe keskmine pindala oli niisketes tingimustes kasvanud haabadel 15-25% väiksem, lehe keskmine mass 25-30% väiksem ja lehtede pindtihedus umbes 5% väiksem kui haabadel, mis kasvasid loomulikus õhuniiskuses (Tullus *et al.* 2012). FAHM katse teises etapis, mis kestis samuti 6 aastat, kasvasid uued hübriidhaavad juure- ja kannuvõsudest ning võsutekkelistes puudes enam maapealse kasvu aeglustumist niiskes õhus ei täheldatud, mis viitab juurestiku tasemel toimunud kohanemisele, sest haavavõsud hakkavad kasvama vanempuude juurtest. Samuti selgus, et kõrgema õhuniiskuse juures väheneb võsude suremus kuivadel aastatel. (Tullus *et al.* 2020)

Suurendatud suhteline õhuniiskus mõjutas haabade tüvede keemiliste komponentide sisaldust. Niisutatud haabadel oli 15,6% kõrgem lämmastiku ja 22,2% kõrgem fosfori sisaldus tüves ja 13,8% madalam kaaliumi sisaldus kui kontrollhaabadel. On olemas korrelatsioon tüve lämmastiku sisalduse ja tüve hingamise vahel. Suurenenud hingamine tüves mõjub samuti pärssivalt puu biomassi toodangule, sest see suurendab puu tüve elutegevuse ülalpidamiseks vajalikku ressurside ja energia kulu. Niisutatud haabadel oli peale selle ka 5,2% kuni 9,2 % võrra kõrgem tselluloosi kontsentratsioon ja 7,3% madalam hemitselluloosi sisaldus. (Tullus *et al.* 2014)

FAHM katsealal läbiviidud katsed mahalõigatud hübriidhaava ühe aasta vanuste kannuvõsude peal on näidanud, et kõrgema suhtelise õhuniiskuse tingimustes kasvanud hübriidhaavade võsudel väheneb ksüleemi suhteline vee läbilaskmise juhtivus keskmiselt 11% võrra. Sellist muutust seostatakse kõrgenenud õhuniiskuse tingimustes vähenenud erinevusega atmosfääri veeauru ja lehesisese veeauru rõhuga (7% õhuniiskuse tõstmine võis vähendada õhu ja lehe vahelist veeauru rõhkude erinevust 15-25%), mis omakorda vähendab vee aurumist lehtedelt ja juurdevoolu lehtedesse. Efektiivsema vee transpordi süsteemi loomisega ei tule noored puud vähenenud aurumise tingimustes toime teiste keskkonna tegurite surve tõttu. Kõrge õhuniiskuse tingimustes noortel puudel ei muutu ksüleemi osakaal tüves, kuid vähesel määral muutub väiksemaks keskmine juhtsoone osakaal ja suuremaks muutub eelmisega pöördvõrdelises seoses olev juhtsoone

paiknemise tihedus. Vee transpordi efektiivsus selle tulemusel väheneb, sest ksüleemi tihedus mõjutab seda võrdeliselt, kuid juhtsoonte paksusel on transpordi mahuga eksponentsiaalne seos. Võimalikud mõjurid vee transpordi efektiivsusele on veel ka väiksemad membraanid ja avased juhtsoonte kokkupuute kohtades. Kõrgenenud õhuniiskusega ei kaasne aga ksüleemi veevoolu katkemise tõenäosuse suurenemist. Vähenenud veevool juhtsoontes ei toonud endaga kaasa nii suurt vee rõhu langust ksüleemis, et see rõhk langeks alla kriitilise taseme ja vesi hakkaks juhtsoontes sagedamini aurustuma ja tõkestama märkimisväärset osa juhtsoontest. Seega, tuleviku eeldatav tõus atmosfäärses õhuniiskuses ei peaks ohustama haava tüve funktsionaalset toimimist ja veevoolu stabiilsust. (Sellin *et al.* 2017)

Õhuniiskuse tõus mõjutab ka haava lehtede õhulõhede talitlust. FAHM katsealal kõrgemas õhuniiskuses kasvatatud puudel vähendati selle katse käigus suhtelist õhuniiskust 3-4% võrra võrreldes ümbritseva atmosfääriga, millega kaasnes õhu ja lehe veeauru rõhkude erinevuse muutus 5,1% võrra. Leiti, et lehtede õhulõhed muutuvad tundlikumaks rõhkude erinevuse muutuste suhtes. Kui hetkeline õhuniiskus alaneb, siis katsealustel puudel sulgusid õhulõhed kiiremini kui kontrollpuudel. Õhulõhede suurenenud tundlikkus aitab taimedel paremini toime tulla kergete põudadega, kuid tulevikuks ennustatava õhuniiskuse tõusmise korral, kui vee aurustumine lehtedelt niigi väheneb võrreldes praegusega, ei too selline muutus lehtede füsioloogias haabadele märkimisväärset kasu. Sellised muutused õhulõhede funktsioneerimisel iseenesest ei ole puu jaoks mingil määral kahjulikud, kuid tavalise õhuniiskuse režiimi järskudest ilmastikuoludest tingitud häiringud võivad kõrge õhuniiskuse juures kasvanud puu jaoks olla rohkem kahjulikud kui puul sulgub väga suur osa õhulõhedest ja ksüleemi veevool muutub väga aeglaseks. Õhulõhede suurust õhuniiskus ei mõjutanud, paiknemise tihedust mõjutas statistiliselt ebaolulisel määral, ning seost õhulõhede morfoloogia ja füsioloogia vahel ei leitud. (Niglas *et al.* 2015)

FAHM katses kasvanud haabade öise transpiratsiooni uuringus ei leitud kõrgest õhuniiskusest tulenevaid erinevusi lehestiku veeauru juhtivuses. Öö alguses ei esinenud erinevusi veeauru juhtivusel niisutatud ja kontrollpuudel, kuid koidiku eel avanesid õhulõhed kiiremini niiskes õhus kasvavatel haabadel, sellega suurenes ka nende juhtivus. Kontrollpuudel oli intensiivsem hingamine öö alguses ja keskpäigas, kuid langes oluliselt öö lõpuks tärglase otsasaamise tõttu. Niisutatud puudel oli öö alguses oluliselt madalam hingamine, kuid see tõusis koidiku eelsel ajal, tärgklis ei olnud nii suures mahus ära kasutatud, sest puu eelistas seda pigem varuda, selle asemel et kasutada energiaks. Suurenenud õhulõhede juhtivus võib seega olla stressireaktsiooniks sellisele süsinikuühendite metabolismi muutustele. Ka vee juhtivus oli niisutatud puudes suurem koidiku eelsel ajal, arvatavasti suurenenud aurustumise ja sellega kaasneva suurema veenõudluse pärast. (Rohula *et al.* 2017)

## Lepad

Lepad kuuluvad kaseliste (*Betulaceae*) perekonda, Eestis kasvab looduslikult kaks liiki leppasid: sanglepp ehk must lepp (*Alnus glutinosa*) ja hall lepp (*Alnus incana*). Sanglepp kasvab keskmiselt 17-22 meetri kõrguseks, Eesti kõrgeim sanglepp on 34,5 m kõrgune. Sanglepa maksimaalne vanus on 200 aastat, keskmine looduslik eluiga 80-150 aastat; sanglepa raievanus on alates 60-st aastast. Sanglepp eelistab kasvuks huumusrikkaid muldi kus ei ole veepuudust, kasvab ka liigniisketel muldadel ja talub hooajalisi üleujutusi, kuid väldib pidevalt seisva veega alasid. Ta on valgusnõudlik liik ja seega varasuktsessioniline, kasvab hästi raiutud aladel kui pioneerliik, reageerib hästi ka harvendusraidele. Sanglepikud kui taimestiku põhitüüp kasvavad niisketes ja märgades rohusoodes, kus on hästi lagunenenud õhuke turbakiht ja pealeuhtega luhamaadel, kus on Ca-rikas põhjavesi, nagu ojade ja jõgede kaldad. Peamised faktorid, mis määravad nende sanglepikute produktiivsuse on mulla niiskus- ja viljakustase. Sanglepp kasvab hästi ka märgades kasvukohtades, kus paljud teised puuliigid hästi kasvada ei suuda. Sanglepp võib metsastada ka jäätmaid, sest tema juurestikus elavad lämmastikku siduvad mügarbakterid. Metsa kuivendamine mõjub sanglepale halvasti ja kuivendatud metsades asendub ta vähehaaval kuusega (Laas 2019). Sanglepa tagavara Eesti metsades hinnati 2019. aastal 23,7 miljonile m<sup>3</sup>, mis on 4,9% kogu Eesti metsatagavarast, sellest majandatavates metsades 19,4 miljonit m<sup>3</sup>. Sanglepikutes on puidu tagavara hektari kohta 210 kuupmeetrit, mis on kõrge näitaja ja jääb lehtpuudest alla ainult haavikutele (Valgepea *et al.* 2020).

Hall lepp kasvab keskmiselt 18-22 meetri kõrguseks, Eesti suurim hall lepp on 29,5 m kõrge ja 1,9 m ümbermõõduga. Sanglepa keskmine eluiga on 50-60 aastat, maksimaalselt kuni sada aastat, kuid üle 75 aasta vanuseid isendeid esineb harva, sest tema tüvele tekivad tavaliselt juba 50. eluaastaks mädanikud. Hall lepp on kasvab väga kiiresti, esimesed 30 eluaastat kiiremini kui teised Eesti metsapuud. Halli leppa raiutakse tavaliselt 30-35 aasta vanuselt. Pärast lageraiet hakkab ta uuesti kasvama suuremas osas juurevõsudest. Hall lepp on samuti valgustundlik ja seega varasuktsessioniline, ta võib olla dominantseks puuliigiks noores metsas tänu kiirele kasvule, kuid asendub peagi kuusega. Hall-lepikud on seega ajutised metsad, mis moodustuvad üldjuhul jäätmaadele, mahajäetud haritavale maale ja raiestikele. Hall-lepikud võivad pikemaks ajaks püsima jääda orgudes vooluveekogude kallastel, kus ei ole teiste puuliikide jaoks kõige paremad kasvutingimused. Hall lepp võib kasvada väga mitmekesistel mullatüüpidel, kõige enam meeldivad talle lubjarikkad mullad. Halli lepa kogutagavara Eesti metsades on 29,4 miljonit m<sup>3</sup>, see on 6,1% kogu Eesti metsavarudest, sellest majandatavates metsades 28,3 miljonit m<sup>3</sup>. Hall-lepikute keskmine

produktiivsus on 153 kuupmeetrit hektarilt, mis on küll kõigist puuliikidest väikseim (Valgepea *et al.* 2020), kuid noores eas on lepad Eesti puuliikidest ühed produktiivsemad. Mõnikord esineb looduses ka sang- ja halli lepa ristumisel tekkinud hübriidlepp (*Alnus x pubescens*). Hübriidlepa puidukvaliteet on võrreldav sanglepa puidu kvaliteediga, ta kasvab kuni 35. eluaastani hallist lepast kiiremini, kuid hiljem tema kasv aeglustub. Ta on ka vastupidavam mädanike suhtes kui hall lepp (Laas 2019).

Lepad on väga tähtsad puud jõeäärsetes ökosüsteemides. Leppade juurestikus elavad lämmastikku fikseerivad bakterid *Frankia alni*, ning seega lepad tekitavad palju lämmastikurikast orgaanilist jääkainet, mis muudab mulla oluliselt viljakamaks. Peale selle on lepad ka olulised mulla stabiliseerijad, takistades mulla ärakannet veevoolu poolt. Ka loomad, nii vees kui maapeal leiavad lepa juurestikus endale sobilikke elupaiku. Kliima muutumine niiskemaks ja soojemaks võiks iseenesest olla leपालe kui niiskust armastavale liigile olla kasulik tekitades juurde sobilikke elupaiku. Teiselt poolt, mitmes Euroopa riigis on viimase 30 aasta jooksul täheldatud lepa taandumist seene *Phytophthora alni* poolt tekitatud mädaniku poolt (Bjelke *et al.* 2016).

Tõusev temperatuur võib musta lepa areali põhjapiiri nihutada põhjapoole Skandinaavias ja Soomes ja kirde poole Venemaal. Musta lepa levikule panevad piiri talvekülmad, mis on teatud laiuskraadidest lepa jaoks liiga tugevad ja pikaajalised, talvede muutumisel pehmemaks on lepp võimeline koloniseerima põhjapoolsemaid piirkondi (Hemery *et al.* 2009).

Hall lepp on varakult õitsev puu, Eestis alustab tolmlenemist aprilli keskel. Leningradi Oblastis alates 1903. aastast teostatavate vaatluste põhjal on halli lepa keskmiseks tolmlenemise alguse kuupäevaks leitud 16. aprill. Varaseim tolmlenemise algus on sellel vaatlusperioodil olnud 26. märtsil (1961), hiliseim 6. mail 1955. aastal (Федотова *et al.* 2017).

Leedus 2010-2018 läbi viidud uuringute põhjal on leitud oluline korrelatsioon kevadise temperatuuri ja lepa õietolmu koguse vahel, mis on õhus lendlemas. Lepa õietolmu kontsentratsioon õhus oli kõrgem aastatel mil keskmine õhutemperatuur kevadel tolmlenemise ajal oli kõrgem. Korrelatsioon oli õietolmul ka maksimaalse temperatuuriga – soojadel päevadel oli tolmu kontsentratsioon õhus kõrgem kui jahedamatel päevadel. Kuna lepa õietolm on üks tugevaid allergilise reaktsiooni tekitajaid inimesel, siis võivad soojad kevaded ja eriti soojad päevad kaasa tuua allergilisi haiguseid põdevate inimeste arvu suurenemise. Sama uuringu järgi lepa tolmlenemisel puudub oluline korrelatsioon teiste atmosfääri meteoroloogiliste parameetritega, nagu suhteline õhuniiskus, sademete hulk, osooni kontsentratsioon, samuti ei ole korrelatsiooni õhu kvaliteediga, mida mõõdeti näiteks SO<sub>2</sub> ja NO<sub>2</sub> sisalduse kaudu (Sauliene *et al.* 2019). Sarnased tendentsid on olemas ka mujal Euroopas. Poolas 2003-2013 läbi viidud õhus lenduva õietolmu uuringutes leiti, et keskmiselt algab lepa tolmlenemise periood 1. märtsil ja lõpeb 31. märtsil. Uuringu aastatel leiti

oluline seos talvise ja kevadise temperatuuri ja lepa tolmlamise perioodi alguse kuupäeva ja pikkuse vahel. Soojemate talvedega aastatel algab tolmlamine varem, külmematel hiljem. Uuringu kestus ei võimaldanud leida pikaajalisi trende lepa tolmlamisperioodi ajastuse kohta, kuid üksikud andmed eelmisest sajandist ütlevad, et 1950. aastatel algas lepa tolmlamine keskmiselt hiljem kui praegusel ajal, samuti oli siis madalam keskmine õhutemperatuur. Samas võib varakevadine lepa tolmlamine aasta-aastalt tugevasti varieeruda. Siiski, võib eeldada, et lepa tolmlamise algus nihkub veidi aasta alguse poole (Malkiewicz *et al.* 2016).

*BangorFACE* katses leiti, et atmosfääri süsihappegaasi kontsentratsiooni tõstmine 400ppm-lt kuni 580 ppm-ni suurendab musta lepa biomassi toodangut. Nelja aasta möödudes oli katsealustel puudel monokultuuris maapealne biomass 24% suurem kui kontrollpuudel, mis on suurem kui vastav reaktsioon arukasel, samuti ei nõrgenenud leppade reaktsiooni vanuse kasvades. Selline reaktsiooni tugevus oli arvatavasti tingitud sellest, et sanglepa juurestikus elavad sümbiontsed mügarbakterid mistõttu sanglepp on paremini varustatud lämmastikuga kui kask. Puu diameeter oli seejuures 14% suurem, kõrgus 3% suurem. Polükultuurses istanduses oli biomassi toodangu tõus väiksem (nagu ka kasel), moodustades 10%. (Smith *et al.* 2013)

Leppasid kõige enam kahjustav seenpatogeen on *Phytophthora alni*, mis esmakordselt avastati Lõuna-Inglismaal 1993. aastal. Arvatakse, et see seen tekkis suhteliselt hiljuti kahe teise *Phytophthora* perekonna liigi hübriidiseerumisel (Bjelke *et al.* 2016). Selle seenega nakatumise sümptomiteks on tavaliselt lehtede väiksem kogus, väiksem suurus ja kollane värvus, pidurdub puu kasv, samuti juurestiku, tüve ja koore kudede nekroos (võivad esineda punakaspruunid keelekujulised laigud, mis algavad tüve allosast ja muud kahjustused, vt. Lisa 1), kaasa arvatud juhtkudede hävimine, mis võib tekitada veepuuduse. See nakkus sageli tapab puu mõne aastaga ning nakkuse suhtes eriti vastuvõtlikud on noored puud. Puud, mis suudavad nakkuse üle elada on tavaliselt väga tugevate juure ja tüve kahjustustega, nendel on sageli leitavad põletiku jäljed. See seen levib zoosporidega, mis liiguvad jõevee kaudu ning nakatumine toimub läbi juurte, seent võib levitada ka inimene, istutades puud, mis on pärit istandustest, kus seen esineb. *Phytophthora alni* on tänapäeval olemas peaaegu kõigis Kesk- ja Lääne-Euroopa veekogudes ning viimasel ajal on seda leitud ka Põhja-Ameerikast. See seen vajab zoosporide tekitamiseks ja uute peremeespuude leidmiseks vee temperatuuri vähemalt 5 kraadi. Temperatuuri tõus võib pikendada selle seene zoosporide leviku perioodi ja ka areaali piiri põhja poole nihutada (Hemery *et al.* 2009). *P. alni* on mitmes riigis väga oluline faktor, mis mõjutab leppade kasvumist. Näiteks, Prantsusmaal on see seen olnud üheks peamiseks põhjuseks, miks lepa populatsioon ja osakaal metsades on vähenenud. Sealset *P. alni* poolt tekitatud leppade taandumist on samuti seostatatud kliima soojenemisega. Minevikus oli selle seene esinemist piiranud eelkõige suhteliselt kõrge spooride suremus talvel.

Viimastel aastatel, kui Prantsusmaa talved on muutunud soojemaks ja niiskemaks, suurenes märgatavalt *P. alni* talvitumise edukus ja sellega on kaasa tulnud oluliselt suuremad kahjustused, mida see seen leppadele tekitab. Mingil määral piiravad selle seene levikut ka kuumad suved, mis on samuti sagedasemaks muutumas, kuid seene üldine levik on siiski suurenenud (Aguayo *et al.* 2014). Ka teistes Euroopa riikides on see seen tekitanud kahju leppapuistutele. Tšehhis leiti see seen esimest korda 2001. aastal riigi loodeosas, kuid lepa taandumist mitmes riigi piirkonnas täheldati eelmise sajandi 80. aastatest alates. Hiljem seostati seda *P. alni* levikuga, kui ellujäänud puudel leiti infektsioonijäljed. 2010. aastaks oli seen avastatud suuremas osas Tšehhi lääneosast ning iseloomulikke leppade massilist suremust täheldati juba ka riigi idaosas (Černý & Stranadová *et al.* 2010). Poolas avastati see seen esimest korda 2001. aastal Lublini piirkonnast ning sajandi algusest on täheldatud leppade taandumist ja piirkondade laienemist, kus esineb nakkus. Uuringus leiti seent kõige enam alla 10 aasta vanustel puudel, vähem kuni 30 aastastel ning ei leitud ühtegi üle 60 aastase nakkusega puu, täiskasvanud puudel on ilmselt tugevam vastupanuvõime kahjuritele (Oszako 2005). Seent on väikeses koguses leitud ka Eestist (Sabas, 2015), enamasti hallil lepal, kuid lepa taandumist või massilist suremist ei ole Eestis täheldatud. Seene levikut põhja takistab eelkõige tema talumatus külma vastu. Tšehhis tehtud katse käigus leiti, et laboritingimustes elavad kõik seened üle  $-2,5^{\circ}\text{C}$  külma 28 päeva jooksul ning nende nakkamisvõime ei vähene,  $-5^{\circ}\text{C}$  külmaga jäävad kõik seened ellu, kuid neil on 90% väiksem nakkamisvõime,  $-7,5^{\circ}\text{C}$  kraadiga surevad kõik seened kolme nädalaga ja  $-10^{\circ}\text{C}$  juures surevad kõik seened juba kahe päevaga (Černý *et al.* 2012). See seletab *P. alni* väiksemat levikut Baltimaades, kuid sellest tuleneb ka potentsiaalne ohutegur Eesti leppadele tulevikus. Ennustatava kliima soojenemise korral muutuvad talved Eestis pehmemaks (nagu 2019/2020 talv) ja suureneb ka anomaalselt soojade talvede hulk. See toob kaasa *P. alni* talvise ellujäämise võimaluste suurenemise ja nakkuse ulatuslikuma leviku Eestis.

Lepa taandumisel on tugev mõju vooluveekogude kallaste ökosüsteemidele. Kõige pealt väheneks kiiresti lagunevate lämmastikurikaste lehtede hulk, mis on väga oluline osa vooluveekogude ökosüsteemide toiduahelatest, olles toiduks nii mullas kui vees elavatele lagundajatele, nende kaudu edasi teistele loomadele või taimedele. Järgnev lämmastiku sisalduse vähenemine mullas vähendab mulla viljakust, sest orgaanilise lämmastiku kättesaadavus on sageli limiteerivaks faktoriks taimede kasvamisel. Peale selle kaoks jõeäärne puistu või muutuks puistu dominantne liik. Puistu kadumisel kaob vee kohalt vari, seetõttu suureneb vetikate produktsiooni maht ning muutub veekogu troofiline tase, intensiivistub ka jõekallaste erosioon (Lisa 1). Jõekallaste erosiooni suurenemist *P. alni* põhjustatud lepa taandumisel on juba täheldatud Tšehhis. Puistu säilimisel võivad uueks dominantseks puuliigiks olla teised märga taluvad liigid, harilik saar (*Fraxinus excelsior*), kuid sagedamini on see remmelgas (*Salix* spp.), ning kumbki neist ei seo anorgaanilist lämmastikku.



Saare lehed lagunevad kiiresti, kuid sisaldavad vähe lämmastikku ning tal puudub sama suur veelune juurestikusüsteem, kus veeloomad elada saavad, peale selle on saar vastuvõtlik saaresurmale (*Hymenoscyphus pseudoalbidus*), mis on mitmel pool põhjustanud saare massilist suremist, seega saare laialdasem levik tulevikus on vähetõenäoline (Drenkhan *et al.* 2012). Rimmelga lehed lagunevad kaua ning on samuti toitainetevaesed. Rimmelga juured ulatuvad suurel hulgal vette ning pakuvad palju elupaiku loomadele ja on võimelised isegi jõesängi ahendama. Rimmelgatel ei ole täheldatud ka massilist seenpatogeenidest tingitud suremist, seega *P. alni* edasisel levikul võiks suurenedagi just rimmelga osakaal lammimetsades, kui mitte Eestis, siis Kesk-Euroopas (Bjelke *et al.* 2016).

Leppade olulist taandumist on Euroopas välja kaevatud õietolmu hulga vähenemise läbi täheldatud ka minevikus, 600. aasta paiku vara-keskajast ning see kestis umbes 300 aastat (Lisa 2). Pärast seda, 1000. aastaks taastusid lepa populatsioonid suures osas oma arealist samale tasemele või mõnes kohas veel kõrgemale. Samal ajal teiste puude õietolmu hulk selle aja lasundites ei langenud ning seega taandusid just leppapuistud. Erinevad autorid on sellele pakkunud erinevaid seletusi, näiteks inimõju või järsku kliimamuutust, mõlema teooria peamiseks puuduseks on teiste puuliikide populatsioonitaseme püsimine. Tõenäolisem tundub mõne lepa patogeeni või tugeva põua toime, kuid kahjuks otsesid tõestusi ühelegi teooriale ei ole leitud (Strivins *et al.* 2017).

Leppadel on kogu Euroopas väga levinud kahjur mardikas leppapõõs (*Agelastica alni*), kes toitub peaaegu eranditult lepa lehtedest. Erinevalt *P. alni*-st on ta ka Eestis tekitanud olulisi kahjustusi leppikutes, kuigi ta ei ole võimeline surmama tervet mitmeaastast puud. Kliima soojenemine võib suurendada selle putuka poolt tekitatavaid kahjustusi. Katsetuste käigus selgus, et 50% putukatest võib hukkuda kui temperatuur nende talvitumiskohas langeb alla -10 kraadi rohkem kui 72 tunniks. Mardikad ei talvitu vabas õhus, vaid lähevad peitu näiteks puukoore alla, nii et tõenäosus, et see talvel reaalselt juhtub on meie laiuskraadidel üsna väike. Keskmise õhutemperatuuri tõusmise korral muutub mardikate talvise külmumise tõenäosus veel väiksemaks, suureneb nende ellujäävus ja see võib kaasa tuua suuremaid kahjustusi (Hiiesaar *et al.* 2018).

## Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli anda teaduskirjandusele põhinev ülevaade sellest, kuidas lähitulevikuks ennustatavad kliimamuutused mõjutavad meie kliimavööndi enamlevinuid lehtpuid (arukask, sookask, haab, hall- ja must lepp)

Kaskede ja haabade kasvu kiirus ja produktioon peaksid meie regioonis ennustuste järgi kliima soojenemise tagajärjel suurenema. Selle üheks peamiseks põhjuseks on puude kasvuperioodi pikenemine. Prognoositav suhtelise õhuniiskuse tõus muudab puude produktiivsuse suurenemise määra väiksemaks, nagu on näidanud vastavad katsed. Samas, arukask on samade katsete jooksul näidanud head aklimatiseerumisvõimet õhuniiskuse muutustega ning haaval on leitud adaptatsioone teise põlvkonna puudel, mis kasvasid istutatud puude raie järel nende kannuvõsudest. Need katsed on läbi viidud noorte puudega ning seetõttu ei ole võimalik tõusva õhuniiskuse pikaajalisi mõjusid puude kasvule ja toodangule veel väga täpselt ette ennustada. Leppadega ei ole muudetud õhuniiskusega katseid läbi viidud, kuid oletatavasti reageerivad nad tuleviku kliimamuutustele sarnaselt kaskedele, sest nad on samuti kaseliste sugukonna esindajad. Samuti võib oletada, et niiskemaid kasvukohti eelistav sookask kohaneb niiskemaks muutuva kliimaga paremini kui arukask ning seetõttu võib sookase osakaal meie regioonis suurenedada.

Lehtpuude areaalide piirid nihkuvad soojemaks muutuva kliima tulemusel põhja poole. Samuti võib oodata haava, halli lepa ja kaskede taandumist areaali lõunapiiridelt, mis nendel liikidel kulgevad lääne pool Lõuna-Euroopas ja ida pool enamasti Hiina põhjapiiri lähedal (sookasel ja lepal) või Hiina keskosas (arukasel ja haaval). Areaali lõunaosas leiduvad need puud niigi enamasti mägedes, kus on jahedam ilmastik, näiteks halli lepa areaal piirdub Itaalia põhjaosas Alpi mägedega. Põhja poole on kõige rohkem võimalik levida arukasel, mis puudub osas Skandinaavia ja Soome sisemaast. Teised kolm liiki on olemas kogu Skandinaavia alal, kuigi hall lepp on praegu haruldane Koola poolsaarel, ning nende liikide põhja poolne levimise võimalus on Venemaal, kui tundralad hakkavad metsastuma.

Must lepp on Eesti tähtsamatest lehtpuu liikidest kõige soojalembesem ning tema areaal ulatub kõige kaugemale lõunasse, mõnes kohas Põhja-Aafrikani välja. Ta puudub suuremas osas Skandinaavia ja Soome sisemaadelt, Venemaal Onega järvest põhja pool, ning ka temal on põhjas ulatuslik potentsiaalne koloniseerimise ala. Arvatakse, et leppadele toovad ennustatavad kliimamuutused kaasa ka olulise negatiivse mõju patogeense seene *Phytophthora alni* leviku näol. Selle seene levikut põhja poole takistab seni ainult tema madal külmataluvus. See seen on juba tekitanud suuri kahjusid Kesk- ja Lääne Euroopa leppapuistutele ning on näidanud võimet kiiresti levida jõgede kaudu.

## Summary

### **The impacts of climate change on the most important deciduous trees of our region**

The aim of this Bachelor's thesis was to give an overview of how the climate changes predicted for the near future will impact the most important deciduous trees of our region (silver and downy birch, trembling aspen, grey and black alder). The thesis was compiled based on scientific literature. The growing speed and productivity of birch and aspen in our region should increase as a result of climate warming. One of the main reasons for this is the elongation of vegetation period of these trees. The predicted increase of relative air humidity will decrease the increment in productivity, as experiments have shown. However, silver birch has shown good acclimation ability to increasing air humidity in these experiments, and aspen has shown adaptations in second generation trees which had grown from stump sprouts after harvest of planted trees. These experiments have been carried out with young trees and therefore, it is not yet possible to precisely predict the long-term impacts of growing air humidity on growth rates and production of trees. There have been no air humidity manipulation experiments with alder, but it can be speculated that they will react to predicted climate changes similarly to birches, as belong to the same family (*Betulaceae*). It can also be assumed that downy birch, who prefers more humid growing conditions will adapt to wetter climate better than silver birch and will make up a larger portion of the total birch population in future.

The ranges of deciduous trees will shift northwards as a result of warming climate. It can be assumed, that aspen, gray alder and birches will retreat from the southern borders of their range, which are in Southern Europe in west and in the east near the northern border of China (for downy birch and gray alder) or middle part of China (silver birch and aspen). In the southern parts of their range these trees grow mostly in mountains as the climate is cooler there, for example, the southern border of gray alders range is in the Alps in northern Italy. Silver birch will have the biggest opportunity of them to expand north, as it is absent from parts of inland Scandinavia and Finland. The other three species are present in the whole of Scandinavia, although gray alder is rare in Cola peninsula; the expanding opportunities for these species are in Russia, when tundra starts to become forested.

Black alder is the most thermophilic of the main deciduous trees in Estonia and its range extends the farthest southward, reaching North Africa in some places. It is absent from most of inland Scandinavia and Finland, north of Lake Onega in Russia and therefore it has a large area in the north for potential colonisation. It is assumed that the predicted climate changes will have the

biggest negative impact on alders due to the spread of the pathogenic fungus *Phytophthora alni*. The northward spread of this fungus is currently limited by its very low resistance to the winter colds. This fungus has already caused large damages to alder stands in Central and Western Europe and has shown an ability to quickly spread to new areas through rivers.

## Kasutatud kirjandus

- Ader, S. RMK töötajad avastasid riigimetsast Eesti kõrgeima haavapuu. <https://www.rmk.ee/organisatsioon/pressiruum/uudised/uudised-2021/rmk-tootajad-avastasid-riigimetsast-eesti-korgeima-haavapuu>
- Aguayo, J, Elegbede, F, Husson, C, Saintonge, F-X, Marcais, B – Modelling climate impact on an emerging disease, the *Phytophthora alni*-induced alder decline. (2014) *Global Change Biology* 20, 3209-3221, DOI:10.1111/gcb.12601
- Ahas, R, Aasa, A – The effects of climate change on the phenology of selected Estonian plant, bird and fish populations. *International Journal of Biometeorology* (2006), 51: 17-26 DOI:10.1007/s00484-006-0041-z
- Alber, M, Petit, G, Sellin, A – Does elevated air humidity modify hydraulically relevant anatomic traits of wood in *Betula pendula*? *Trees* (2019) 33:1361-1371 DOI:10.1007/s00468-019-01863-0
- Bjelke, U, Boberg J, Oliva, J, Tattersdil, K, Mckie, B G – Dieback of riparian alder caused by the *Phytophthora alni* complex: projected consequences for stream ecosystems. *Freshwater Biology* (2016) 61:565-579 DOI:10.1111/fwb.12729
- Černý, K, Stranadová, V – *Phytophthora* Alder Decline: Disease Symptoms, Causal Agent and Its Distribution In The Czech Republic. *Plant Protection Science* (2010) 46: 12-18 DOI:10.17221/43/2009-PPS
- Drenkhan, T, Drenkhan, R, Hanso, M – Sauresurma tekitaja on hoopis teine, invasiivne kottseen. *Eesti Loodus* (2012) 10 [http://eestiloodus.horisont.ee/artikkel4855\\_4822.html](http://eestiloodus.horisont.ee/artikkel4855_4822.html)
- Frei, T – Climate change in Switzerland: Impact on hazel, birch and grass pollen on the basis of half a century of pollen records (1969-2018). *Allergologie select* (2020), Vol. 4 (69-75) DOI:10.5414/ALX02180E
- Heimonen, K, Valtonen, A, Konttunen-Soppela, S, Keski-Saari, S, Rousi, M, Oksanen, E, Roininen, H – Insect herbivore damage on latitudinally translocated silver birch (*Betula pendula*) – predicting the effects on climate change. *Climatic Change* (2015) 131:245-257 DOI:10.1007/s10584-015-1392-4
- Hemery, G E, Clark, J R, Aldinger, E, Claessens, H, Malvolti, M E, O'Connor, E, Raftoyannis, Y, Savill, P S, Brus, R - Growing scattered broadleaved tree species in Europe in a changing climate: a review of risks and opportunities. *Forestry*, Vol. 83, No. 1, 2010. DOI:10.1093/forestry/cpp034

Hiisaar, K, Kaart, T, Williams, I H, Luik, A, Metspalu, L, Ploomi, A, Kruus, E, Jõgar, K, Mänd, M – Dynamics of Supercooling Ability and Cold Tolerance of the Alder Beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environmental Ecology* (2018) 47(4) 1024-1029 DOI:10.1093/ee/nvy075

Jeong, S-J, Ho, C-H, Gim, H-J, Brown, M E - Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. *Global Change Biology* (2011) 17, 2385–2399, DOI:10.1111/j.1365-2486.2011.02397.x

Kalvāne, G Kalvāns, A – Phenological trends of multi-taxonomic groups in Latvia, 1970-2018. *International Journal of Biometeorology* (2021) DOI:10.1007/s00484-020-02068-8

Kalvane, G, Romanovskaja, D, Briede, A, Bakšiene, E – Influence of climate change on phenological phases in Latvia and Lithuania. *Climate Research* (2009), Vol. 39:209-219 DOI:10.3354/cr00813

Kont, A, Jaagus, J, Aunap, R – Climate change scenarios and the effect on sea-level rise in Estonia. *Global and Planetary Change* (2003) 36: 1-15 DOI:10.1016/S0921-8181(02)00149-2

Kupper, P, Rohula, G, Inno, L, Ostonen, I, Sellin, A, Söber, A – Impact of high daytime air humidity on nutrient uptake and night-time water flux in silver birch, a boreal tree species. *Regional Environmental Change* (2017) 17:2149-2157. DOI:10.1007/s10113-016-1092-2

Laas, E – *Dendroloogia ja pargindus*. Kirjastus Atlex OÜ, 2019 ISBN:978-9949-492-83-1

Lapenis, A, Shvidenko, A, Shepashenko, D, Nilsson, S, Aiyyer, A – Acclimation of Russian forests to recent changes in climate. *Global Change Biology* (2005), 11, 2090-2102, DOI:10.1111/j.1365-2486.2005.01069.x

Lidner, M, Maroschek, M, Netherer, S, Kremer, A, Barbati, A, Garcia-Gonzalo, J, Seidl, R, Delzon, S, Corona, P, Kolström, M, Lexer, M J, Marchetti, M – Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* (2010) 259: 698-709. DOI:10.1016/j.foreco.2009.09.023

Lipavská, H, Svobodová, H, Albrechtová, J - Annual dynamics of the content of non-structural saccharides in the context of structural development of vegetative buds of Norway spruce. (2000) *Journal of Plant Physiology* 157:365–373 DOI:10.1016/S0176-1617(00)80021-8

Malkiewicz, M, Drzeniecka-Osiadacz, A, Krynicka, A – The dynamics of *Corylus*, *Alnus*, and *Betula* pollen seasons in the context of climate change (SW Poland). *Science of the total environment* 573 (2016) 740-750 DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.08.103

Niglas, A, Alber, M, Suur, K, Jasinska, A K, Kupper, P, Sellin, A – Does increased air humidity affect stomatal morphology and functioning in hybrid aspen? *Botany* (2015) Vol 93 N° 4 DOI:10.1139/cjb-2015-0004

Paal, J – Eesti taimkatte kasvukohatüüpide klassifikatsioon. Tartu Ülikooli Botaanika ja Ökoloogia instituut. Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus, 1997 ISBN:9985907280

Pliūra, A, Jankauskiene, J, Lygis, V, Suchockas, V, Bajerkevičienė, G, Verbulaite, R – Response of juvenile progeny of seven forest tree species and their populations to simulated climate-change related stressors, heat, elevated humidity and drought. *Iforest* (2018) 11:374-388 DOI:10.3832/ifor2340-011

Rohula, G, Tulva, I, Tullus, A, Sõber, A, Kupper, P – Endogenous regulation of night-time water relations in hybrid aspen grown at ambient and elevated humidity. *Regional Environmental Change* (2017) 17:2169-2178 DOI:10.1007/s10113-016-1024-1

Rojo, J, Picornell, A, Oteros, J, Werchan, M, Werchan, B, Bergmann, K-C, Smith, M, Weischenmeier, I, Schmidt-Weber, C, Buters, J – Consequences of climate change on airborne pollen in Bavaria, Central Europe. *Regional Environmental Change* (2021) 21:9 DOI:10.1007/s10113-020-01729-z

Rosenvald, K, Lõhmus, K, Rohula-Okunev, G, Lutter, R, Kupper, P, Tullus, A – Elevated atmospheric humidity prolongs active growth period and increases leaf nitrogen resorption efficiency of silver birch. *Oecologia* (2020), 193:449-460. DOI:10.1007/s00442-020-04688-8

Rosenvald, K, Tullus, A, Ostonen, I, Uri, V, Kupper, P, Aosaar, J, Varik, M, Sõber, J, Niglas, A, Hansen, R, Rohula, G, Kukk, M, Sõber, A, Lõhmus, K – The effect of elevated air humidity on young silver birch and hybrid aspen biomass allocation and accumulation – Acclimation mechanisms and capacity. *Forest Ecology and Management* (2014) 330:252-260 DOI:10.1016/j.foreco.2014.07.016

Oszako, T – Alder Decline in Poland. *Communicationes Instituti Forestalis Bohemicae* (2007) 23:129-138 ISBN:978-80-86461-74-8

Sabas, S – *Phytophthora* spp. leidudest puudel ja veekogudes Eestist. *Eesti Maaülikool* (2015) 53 p.

Sauliėnė, I, Sukiėnė, L, Kazlauskienė, V – The assessment of atmospheric conditions and constituents on allergenic pollen loads in Lithuania. *Journal of environmental management* (2019) 250:109469 DOI:10.1016/j.jenvman.2019.109469

Sellin, A, Alber, M, Kupper, P – Increasing air humidity influences hydraulic efficiency but not functional vulnerability of xylem in hybrid aspen. *Journal of Plant Physiology* (2017) 219: 28-36. DOI:10.1016/j.jplph.2017.09.006

Sellin, A, Niglas, A, Õunapuu-Pikas, E, Kupper, P – Rapid and long term effects of water deficit on gas exchange and hydraulic conductance of silver birch trees grown under varying atmospheric humidity. *BMC Plant Biology* (2014) 14:72 DOI:10.1186/1471-2229-14-72

Sellin, A, Rosenvald, K, Õunapuu-Pikas, E, Tullus, A, Ostonen, I, Lõhmus, K – Elevated atmospheric humidity affects hydraulic traits and tree size but not biomass allocation in young silver birches (*Betula pendula*). *Frontiers in Plant Science* (2015), 6:860 DOI:10.3389/fpls.2015.00860

Sivadasan, U, Chenhao, C, Nissinen, K, Randriamanana, T, Nybakken, L, Julkkunen-Tiitto, R – Growth and defence of aspen (*Populus tremula*) after three seasons under elevated temperature and ultraviolet-B radiation. *NRC Research Press* (2018) 48: 629-641 DOI:10.1139/cjfr-2017-0380

Smith, A, Lukac, M, Hood, R, Healey, J R, Miglietta, F, Godbold, D – Elevated CO<sub>2</sub> enrichment induces a differential biomass response in a mixed species temperate forest plantation. *New Phytologist* (2013) Vol 198, 156-168 DOI:10.1111/nph.12136

Sobuj, N, Virjamo, V, Nissinen, K, Sivadasan, U, Mehtätalo, L, Nybakken, L, Peltola, H, Julkkunen-Tiitto, R Responses in growth and phenolics accumulation to lateral bud removal in male and female saplings of *Populus tremula* (L.) under simulated climate change. *Journal of the Total Environment* (2020) 704 135462 DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135462

Strivins, N, Buchan, M S, Disbrey, H R, Kuosmanen, N, Latalowa, M, Lempinen, J, Muukkonen, P, Slowiński, M, Veski, S, Seppä, H – Widespread, episodic decline of alder (*Alnus*) during the medieval period in the boreal forest of Europe. *Journal of Quaternary Science* (2017) 32:903-907 DOI:10.1002/jqs.2984

Strømme, C B, Julkkunen-Tiitto, R, Olsen, J E, Nybakken, L – High daytime temperature delays autumnal bud formation in *Populus tremula* under field conditions. *Tree Physiology* (2016) 37, 71-81 DOI:10.1093/treephys/tpw089

Tullus, A, Kupper, P, Sellin, A, Parts, L, Söber, J, Tullus, T, Lõhmus, K, Söber, A, Tullus, H – Climate Change at Northern Latitudes: Rising Atmospheric Humidity Decreases Transpiration, N-Uptake and Growth Rate of Hybrid Aspen. *PloS ONE* (2012) Volume 7(8) e42648 DOI:10.1371/journal.pone.0042648

Tullus, A.; Rosenvald, K.; Lutter, R.; Kaasik, A.; Kupper, P.; Sellin, A. Coppicing improves the growth response of short-rotation hybrid aspen to elevated atmospheric humidity. *Forest Ecology and Management* (2020) 459, 117825, 1–11 DOI:10.1016/j.foreco.2019.117825

Tullus, A, Sellin, A, Kupper, P, Lutter, R, Pärn, L, Jasinska, A.K, Alber, M, Kukk, M, Tullus, T, Tullus, H, Lõhmus, K, Söber, A – Increasing air humidity – a climate trend predicted for northern latitudes – alters the chemical composition of stemwood in silver birch and hybrid aspen. *Silva Fennica* (2014), Vol 48 no. 4 article id 1107. DOI:10.14214/sf.1107

Valgepea, M, Raudsaar, M, Sims, A, Timmusk, T, Pärt, E, Suursild, E, Matson, T – Aastaraamat Mets 2019, peatükk 1. Metsavarud. Keskkonnaagentuur, 2020



Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Москва 2014

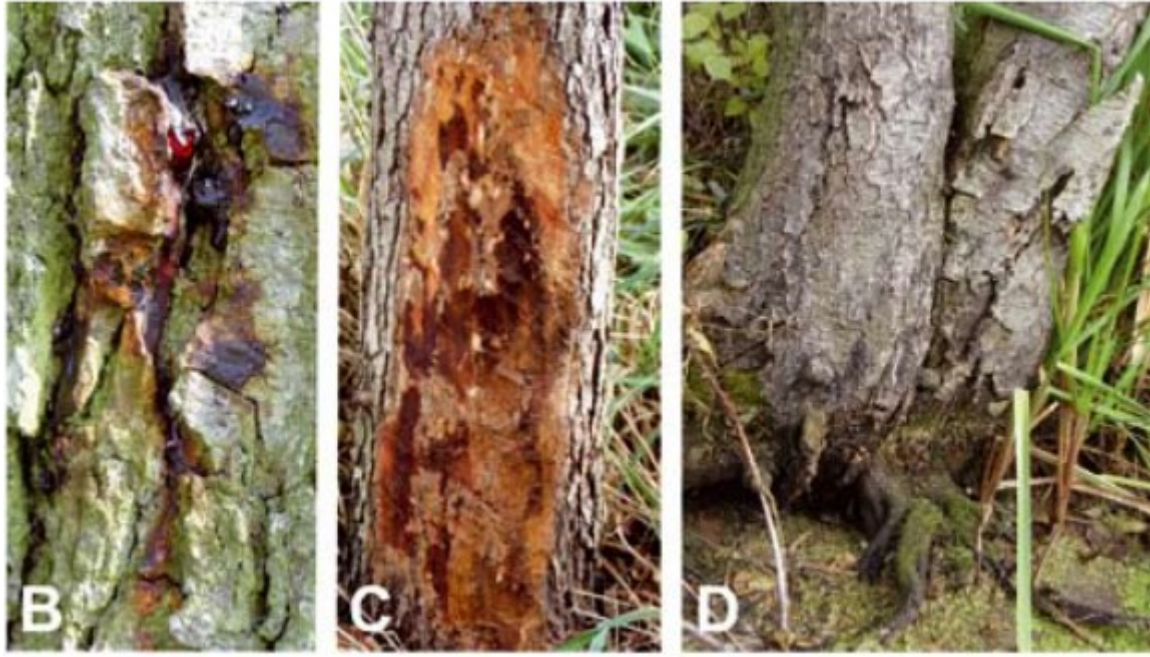
Федотова, В Г, Достоевская, Л П, Лебедев, П А – Фенология аллергенных растений Санкт-Петербурга и Ленинградской Области. Биосфера, 2017, vol. 9 Number 2.

Минин, А А, Воскова, А В – Гомеостатические реакции растений на современные изменения климата: пространственно-фенологические аспекты. ОНТОГЕНЕЗ, 2014, том 45, No 3, с. 162–169

Овчинникова, Т М, Фомина, В А, Андреева, Е Б, Должковая, Н П, Суховольский, В Г – Анализ изменений сроков сезонных явлений древесных растений заповедника Столбы в связи с климатическими факторами. Хвойные бореальной зоны, XXVIII, No 1 - 2, 2011. УДК (UDC) 630.181.22; 630.181.65

## Lisad

Lisa 1: *Phytophthora alniga* nakatunud puud



B – iseloomulik tume eritis koorepragudes

C – iseloomulik punakaspruun keelekujuline nekroos puutüvel

D – tugevasti kahjustatud puu, intensiivne mädanik tüves ja juurtel, koor on eraldumas (Černý & Stradanova 2010)



G – suur hulk surnud puud jõe ääres

H – jõesängi muutus kohas, kust kadus suurem osa leppasid Tšehhis (Černý & Stradanova 2010)

Lisa 2: lepa õietolmu osakaalu järsk vähenemine 600. aasta paiku

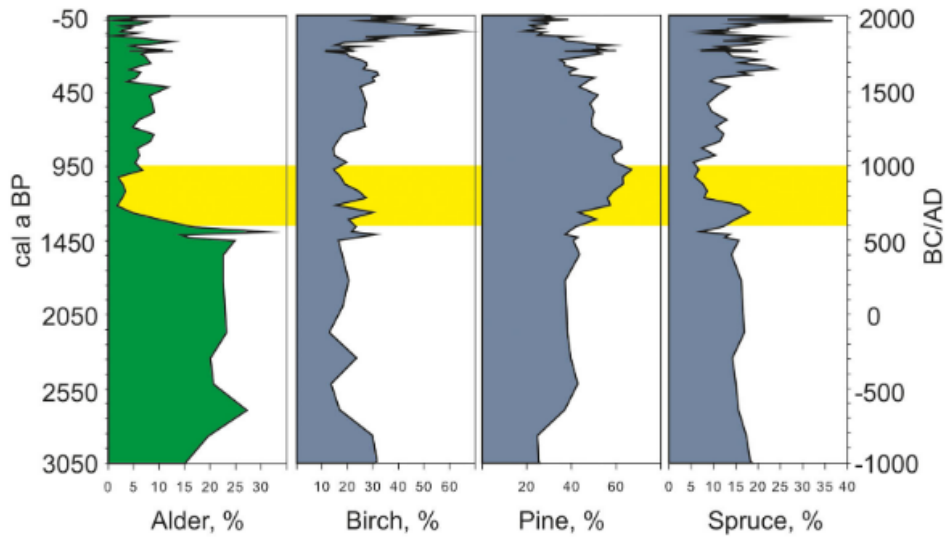


Figure 3. Main tree pollen variability in Naava hollow (%).

Vasakpoolsel graafikul näha lepa õietolmu osakaalu järsku langust 600. aasta paiku Naavas, samal ajal kui kasel, männil ja kuusel selliseid muutusi ei esinenud. Aastaarvud graafikust paremal (Strivins *et al.* 2017).

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Mihhail Brodski,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose  
Kliimamuutuste mõjud meie vööndi olulisematele lehtpuudele,

mille juhendaja on kaasprofessor Arvo Tullus,

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 3.0, 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.

*Mihhail Brodski*

**25.05.2021**