



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

# COST FP1303 JA IMPREST AS ERINEVALT TÖÖDELDUD PUITLAUDADE VÄLISKATSETUSED

COST FP1303 AND IMPREST AS VARIOUSLY TREATED WOOD PERFORMANCES  
IN AN OUTDOOR ENVIRONMENT

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Marii Heleen Ramjalg

Üliõpilaskood: 155591KAOB

Juhendaja: Heikko Kallakas,  
doktorant-nooremteadur

Tallinn 2018

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” ..... 2018

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“.....” ..... 2018

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....2018

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut**

**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Marii Heleen Ramjalg, 155591KAOB  
**Õppekava, peeriala:** KAOB02/14, puidu- ja tekstiilitehnoloogia  
**Juhendaja:** Doktorant-nooremteadur, Heikko Kallakas, 6202910

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud puidu väliskatsetused

(inglise keeles) COST FP1303 and Imprest AS variously treated wood performances in an outdoor environment

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Uurida väliskeskkonna (niiskus, temperatuur, päikesekiirgus) mõju erinevalt töödeldud puidule
2. Uurida mädanike, hallituste ja seente mõju puidu vastupidavusele
3. Uurida metallist kinnitusvahendite vastupidavust väliskeskkonnas erinevalt töödeldud puidus

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Teema valimine ja kinnitamine	04.10.2017
2.	Kirjanduse otsing	Jaanuar 2018 - Mai 2018
3.	Kava koostamine	13.11.2017
4.	Lõputöö kirjutamine	Jaanuar 2018 – Mai 2018
5	Katseline osa	20. oktoober 2017 – 04. mai 2018
6	Värvuse mõõtmine	Kord kuus (20. oktoober 2017 – 04. mai 2018)
7	Niiskuse ja temperatuuri mõõtmine	Kord kuus (20. oktoober 2017 – 04. mai 2018)

8	Pragude mõõtmine	Iga 3 kuu tagant (20. oktoober 2017 – 04. mai 2018)
9	Hallituse tekke uurimine	Iga 2 kuu tagant (20. oktoober 2017 – 04. mai 2018)
10	Seente tekke uurimine	Iga 2 kuu tagant (20. oktoober 2017 – 04. mai 2018)
11	Mädaniku tekke uurimine	Iga 3 kuu tagant (20. oktoober 2017 – 04. mai 2018)
12	Kruvide korrosiooni määramine	10.11.2017
13	Väliskeskonna andmete analüüs Harku ilmajaamast	Mai 2018
14	75% lõputööst on valmis	7. mai 2018
15	Lõputöö on valmis ning saadetud juhendajale kontrollimiseks	28. mai 2018
16	Eelkaitsmine	9. mai 2018
17	Töö on köidetud	4. juuni 2018
18	Kaitsmine	11. juuni 2018

**Töö keel:** eesti

**Lõputöö esitamise tähtaeg:**

“ 4 ” juuni 2018 a

**Üliõpilane:** Marii Heleen Ramjalg .....

“.....” .....2018 a

/allkiri/

**Juhendaja:** Heikko Kallakas .....

“.....” .....2018 a

/allkiri/



# SISUKORD

EESSÕNA.....	6
1. SISSEJUHATUS .....	7
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	8
2.1 Puidu vastupidavus väliskeskkonnas.....	8
2.1.1 Keskkonnafaktorite liigitus ja mõju puidule väliskeskkonnas .....	8
2.1.2 Päikesekiirguse mõju puidu vastupidavusele.....	9
2.1.3 Niiskuse mõju puidu vastupidavusele .....	10
2.2 Puiduliikide vastupidavus väliskeskkonnas .....	14
2.2.1 Harilik kuusk .....	15
2.2.2 Harilik tamm.....	16
2.3 Puidu töötamise mõju vastupidavusele väliskeskkonnas.....	18
2.3.1 Puidu termotöötlemine.....	19
2.3.2 Puidu immutamine.....	22
3. MATERJALID JA MEETODID .....	24
3.1 Materjalid.....	25
3.1.1 COST FP 1303 katsekehad .....	25
3.1.2 Imprest AS immutatud katsekehad.....	25
3.1.3 Katselaud.....	27
3.1.4 Kruvid.....	28
3.2 Meetodid.....	29
3.2.1 Eksponeerimise tingimused .....	29
3.2.2 Niiskusesisaldus ja temperatuur .....	30
3.2.3 Mädanike teke.....	31
3.2.4 Hallitus ja värvimuutvad seened .....	32
3.2.5 Värvimuutus .....	32
3.2.6 Kruvide korrosioon.....	33
3.2.7 Pragude teke .....	34
4. TULEMUSED JA ANALÜÜS .....	35
4.1 Niiskusesisaldus ja temperatuur .....	35
4.2 Mädanike teke.....	36

4.3	Hallitus ja värvimuutvad seened .....	37
4.4	Värvimuutus väliskeskkonna mõjul .....	39
4.5	Kruvide korrosioon .....	41
4.6	Pragude teke .....	43
	KOKKUVÕTE .....	45
	CONCLUSION .....	47
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	49
	LISAD .....	53
	Lisa 1 COST FP1303 ja Imprest AS ööpäeva keskmise puidu niiskusesisalduse (%) sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest (%) ja ööpäevasest sademete summast (mm) .....	54
	Lisa 2 COST FP1303 ja Imprest AS puidu temperatuuri sõltuvus õhu temperatuurist (°C).....	56
	Lisa 3 COST FP1303 katsekehade hinded hallitusele ja värvimuutvatele seentele.....	58
	Lisa 4 COST FP1303 ja Imprest AS värvuse algandmed.....	59
	Lisa 5 Katsekehade värvuse muutus .....	61
	Lisa 6 COST FP1303 ja Imprest AS kruvide korrosiooni visuaalse hindamise tulemused.....	62
	Lisa 7 Pildid kruvide korrosiooni laborikatsete käigust Tallinna Tehnikaülikoolis.....	64

## EESSÕNA

Bakalaureusetöö teema on sõnastatud Tallinna Tehnikaülikooli puidutehnoloogia labori doktorant-nooremteadur Heikko Kallakas poolt, kes oli ka käesoleva töö juhendaja. Bakalaureusetöö on inspireeritud COST FP1303 projektist ning uurimus teostatud Tallinna Tehnikaülikoolis. Põhilised algandmed saadi Harku ilmajaamast, Liisa Truusa bakalaureusetööst “Erinevatest puiduliikidest valmistatud laua vastupidavus väliskeskkonnas” ajaperioodil 15.09.2014-29.05.2015, Peeter Tubli magistriltööst “Immutatud puidu vastupidavus väliskeskkonnas” ajaperioodil 08.05.2016-03.05.2017, juhendaja Heikko Kallakas tehtud mõõtmistulemustest ajaperioodil 29.05.2015-20.10.2017 ja töö autori poolt läbiviidud mõõtmistest uurimisperioodil 20.10.2017-07.05.2018. Töö autor avaldab siirast tänu kõikidele inimestele, kes antud töö valmimisel abiks olid.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas. 28 teadusasutuses üle Euroopa toimuva COST FP1303 projekti “*Performance of bio-based building materials*” eesmärgiks on uurida erinevalt töödeldud ja erinevatest puiduliikidest puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas ning Tallinna Tehnikaülikoolis alustati projekti välikatsetega 2014. aasta sügisel. COST FP1303 projekti katselaud koosneb harilikust kuusest, termotöödeldud harilikust kuusest ja harilikust tammest tehtud katsekehadest. Imprest AS katselaud pandi püsti 8. mail 2016. aastal Peeter Tubli magistriltöö “Immutatud puidu vastupidavus väliskeskkonnas” (ingl. k. “*Impregnated wood performance in outdoor environment*”) raames ning koosneb erinevalt immutatud harilikust kuusest katsekehadest. Regulaarselt mõõdetakse Imprest AS ja COST FP1303 projekti Tallinna Tehnikaülikoolis asuval katselaua madanike, hallituse, värvimuutvate seente, pragude ja kruvide korrosiooni teket, värvuse muutust ning puidu niiskusesisaldust. Tulemusi võrreldakse Harku ilmajaama andmetega, analüüsitakse võimaluse korral varasemate tulemustega ning tehakse järeldused COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud katselaudade vastupidavuse kohta väliskeskkonnas.

Märksõnad: COST FP1303, Imprest AS, harilik kuusk, harilik tamm, väliskeskkond, puidu termotöötlemine, puidu immutamine, bakalaureusetöö

# 1. SISSEJUHATUS

Puit on üks vanemaid ja levinumaid ehitusmaterjale, mida hinnatakse tema kaalu ja tugevusomaduste suhte tõttu. Küllaltki kerge kaalu kohta on puit väga heade tugevusomadustega. Puidu puuduseks on aga tema vastupidavus väliskeskkonnas. Väliskeskkonnas halveneb puidu tugevus, esteetiline välimus ja vastupidavus päikesekiirguse, niiskuse (õhuniiskus ja sademed) ja mikroorganismide tõttu. Seetõttu puitu töödeldakse termiliselt või keemiliselt, et parandada tema ilmastikukindlust ja kasutusiga vähendades puidu niiskuspaisumist.

Antud töö aluseks on võetud COST FP1303 projekt "*Performance of bio-based building materials*", mis uurib erinevalt töödeldud ja erinevatest puiduliikidest puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas 28 teadusasutuses üle Euroopa. COST FP1303 projekt alustas oma tegevust 22. oktoobril 2013. aastal, kuid Eestis alustati katsega 2014. aasta sügisel Tallinna Tehnikaülikoolis ja Eesti Maaülikoolis. COST FP1303 projekti katselaud koosneb harilikust kuusest, termotöödeldud harilikust kuusest ja harilikust tammest katsekehadest. Imprest AS katselaud pandi püsti 8. mail 2016. aastal Peeter Tubli magistritöö "*Immutatud puidu vastupidavus väliskeskkonnas*" (ingl. k. "*Impregnated wood performance in outdoor environment*") raames ning koosneb erinevalt immutatud harilikust kuusest katsekehadest.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on võrrelda COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas. Eesmärgi täitmiseks mõõdetakse regulaarselt Imprest AS ja COST FP1303 projekti Tallinna Tehnikaülikoolis asuval katselauaüldmädanike, hallituse, seente, pragude ja kruvide korrosiooni teket, värvuse muutust ning puidu niiskusesisaldust. Tulemusi võrreldakse kohaliku ilmajaama andmetega, analüüsitakse võimaluse korral varasemate tulemustega ning tehakse järeldused COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud katselaudade vastupidavuse kohta väliskeskkonnas.

Antud töö on jaotatud kolme peatüki vahel: kirjanduse ülevaade, materjalid ja meetodid ning tulemused ja analüüs. Esimeses peatükis antakse kirjanduse ja artiklite ülevaade puidu vastupidavusest. Teises peatükis tutvustatakse kasutatud materjale ning uurimise teostamiseks vajalike meetodeid. Viimases peatükis analüüsitakse saadud tulemusi võrreldakse varasematega ja omavahel.

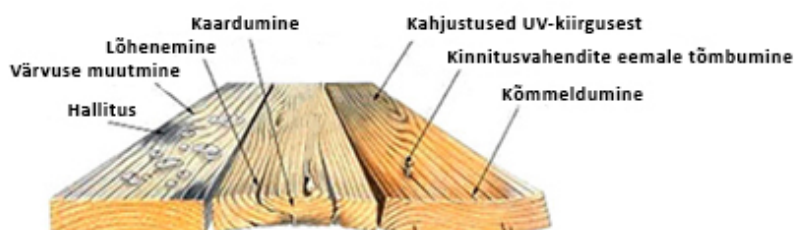
## 2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

### 2.1 Puidu vastupidavus väliskeskkonnas

#### 2.1.1 Keskkonnafaktorite liigitus ja mõju puidule väliskeskkonnas

Puitu mõjutavaid keskkonnafaktoreid võib jagada füüsilisteks-, keemilisteks- ja bioloogilisteks teguriteks. Füüsilised tegurid on päikesekiirgus, niiskus, hapnik, kuumus, külmus ja abrasioon. Keemilisteks teguriteks on atmosfääri saastavad ained ja erinevad kemikaalid ning bioloogiliste tegurite hulka kuulvad mikroobid, seened ja putukad. Füüsiliste keskkonnafaktorite tulemusena puidu pind kareneb, lõheneb ja kaardub ning võib tõmbuda kinnitusvahenditest eemale. Tuule, liiva või mustuse poolt põhjustatud abrasiooni tulemusena puidu pind kulub või saab koguni mehaaniliselt kahjustada. Mikroobide ja seente mõjul puit mädaneb, hallitab ja värvub, millega kaasnevad tugevusomaduste ja esteetilise välimuse halvenemine (vt. joonis 2.1). Nii füüsiliste kui ka bioloogiliste tegurite tõttu toimuvad muutused puidu keemilistes omadustes. [1]

Viimastel aastakümnetel on keemiliste tegurite osakaal aga suurenenud. Atmosfääri on lisandunud saasteaineid nagu väävel- ja lämmastikdioksiid, maapinnalähedase osooni tase tõuseb ja seetõttu jõuab UV-kiirgus maapinnani üha vähem. Vihmasel perioodil tuleb rohkem tähelepanu pöörata keemiliste tegurite ja niiskuse kaitsele ning suvel päikesekiirguse kahju ennetamisele. Kõige kahjustavamaks keemiliseks teguriks on happevihm, mille tulemusena tekib puidu pinnal erosioon ja kinnitusvahendite korrosioon. Erosiooni ja korrosiooni nagu ka teisi keskkonnafaktoreid on võimalik ära hoida puitu töödeldes. [1]



Joonis 2.1 Keskkonnategurite mõju puidule [2]

Nii füüsikalised-, bioloogilised- kui ka keemilised keskkonnafaktorid vähendavad puidu tugevusomadusi, kasutusiga ja välimust väliskeskkonnas. Kõige rohkem mõjutavad puitu aga valgusenergia ja niiskus, millest räägivad järgnevad peatükid 1.1.2 Päikesekiirguse mõju puidu vastupidavusele ja 1.1.3 Niiskuse mõju puidu vastupidavusele. Puidu vastupidavuse suurendamiseks töödeldakse ja viimistletakse puidu pinda, millest räägib lähemalt peatükk 2.3. Puidu töötamise mõju vastupidavusele väliskeskkonnas.

### **2.1.2 Päikesekiirguse mõju puidu vastupidavusele**

Valgusenergia on kõige kahjulikum väliskeskkonna faktor, mis vähendab puidu vastupidavust väliskeskkonnas. Valgusenergiaks loetakse UV-kiirgust (400-100 nm), nähtavat valgust (800-400 nm) ja infrapunakiirgust (800 nm - 1 mm), mis algatavad mitmeid erinevaid keemilisi reaktsioone puidupinnal. [1; 3]

Puidu peamisteks keemilisteks komponentideks on polüsahhariidid (tselluloos, hemitselluloos) ja polüfenoolid (ligniin), kus tselluloos moodustub 40-50%, hemitselluloos 25-35% ning ligniin 20-30% puidu koostisest. Tselluloos, hemitselluloos ja ligniin neelavad nähtavat valgust ja UV-kiirgust, mille tulemusena tekivad fotokeemilised ja oksüdatiivsed reaktsioonid. Puidu keemilised komponendid reageerivad ka infrapunakiirgusele ning seetõttu kasutatakse seda katsetes uurimaks valgusenergia mõju puidule mikrotasandil. Fotokeemiliste reaktsioonide tulemusel puidu värvus muutub ja puit laguneb. [1; 4]

UV-kiirgus moodustab ainult 5% valgusenergiast, kuid siiski põhjustab puidu mikrostruktuuri lagunemist. UV-kiirgus lainepikkusega 280-400 nm ajendab puidu pinnas fotokeemilisi reaktsioone, mis ulatuvad 0,05-2,5 mm sügavusele puidu pinnast. Päikesekiirgus depolümeeriseerib ligniini ja tselluloosi, mille tulemusena muutub puidu värvus ja struktuur. Valguslagunemisel muutuvad tumedamad pinnad heledamaks ja heledamad tumenevad, hiljem saavutavad niiskuse mõjul halli värvuse. Ligniini koguse vähenemine ja tselluloosi koguse suurenemine põhjustab ka mehaaniliste omaduste nagu näiteks tugevuse vähenemise. Puidu vastupidavust päikesekiirgusele saab suurendada kontrollides keemilisi reaktsioone, mida saavutatakse tavaliselt puidu pinda viimistledes. [1; 5; 4]

Lisaks valgusenergia kiirgusele mõjutab puitu ka valgusenergiast tulenev kuumus. Mida tumedam on puit, seda rohkem neelab ta valgust ja sellega kaasnevat kuumust. Kuumus põhjustab puidu lõhenemist, mis tuleneb liiga kiiresti eralduvast niiskusest puidust. Kuumus tekitab ja kiirendab fotokeemilisi ja oksüdatiivseid reaktsioone, mis viivad ligniini ja seega rakuseinte lagunemiseni. Praod aja möödudes suuremaks ei arene, kuid pragude tõttu on puit vastuvõtlikum seentele. [5]

Valgusenergia on oluline faktor puidu vastupidavusele väliskeskkonnas, mis põhjustab fotokeemiliste- ja oksüdatiivsete reaktsioonide teket. Kõik fotokeemilised reaktsioonid viivad enamasti puidu värvuse muutumiseni ja lagunemiseni, mis halvendavad puidu mehaanilisi omadusi ja välimust. Samuti mõjutab puitu kuumus, kus niiskuse kiirel eraldumisel võib puit lõheneda.

### **2.1.3 Niiskuse mõju puidu vastupidavusele**

Niiskus on üks kõige tähtsamaid aspekte arvestades puidu struktuuri ja omadusi. Puidu niiskusesisaldusest oleneb puidu tihedus, kaal, ruumala, pingete teke ja bioloogiliste tegurite vastuvõtlikkus. Seepärast tuleb puitu kasutades, töödeldes ja säilitades olla tähelepanelik niiskuse mõjust puidu vastupidavusele.

Puidu niiskus koosneb vabast ehk kapillaarsest ja seotud ehk hügrokoopsest niiskusest, kus kapillaarne niiskus eraldub puidust loomulikult kuivamisel õhu käes ja hügrokoopne niiskus eraldub täielikult puidu kuumutamisel üle 100°C. Niiskusesisalduse muutust põhjustavad puidu külmumine, soojenemine, niiskuse imendumine ja sulamine. Kuna vaba ja seotud niiskuse muutumise tõttu puit paisub ja kahaneb, siis tekivad puidus pinged. Pingete tulemusena võib puit kaarduda, lõheneda ja tõmbuda kinnitusvahenditest eemale. Puidu desorptsioonil kuivavad rakuseinad, mistõttu kahanevad puidukiud ja vähenevad puidu tugevus-, kõvadus- ja elastsusomadused. [4] Samuti võivad pragudesse sattuda väikesed osakesed nagu näiteks liivaterad, mis takistavad puidu pundumist ja kokku tõmbumist. Pragudesse sattunud väikeste osakeste tulemusel puidukiud nõrgenevad. [1]

Puidu niiskusesisaldusest sõltub ka metallist kinnitusvahendite korrosioon, mis on võimelised korrodeeruma ainult vee (elektrolüüdi) olemasolul. Selleks peab puidu niiskusesisaldus jääma vahemikku 15-20% ning õhu niiskusesisaldus olema ligikaudu 80%. Korrosiooni tekkimisel mängivad olulist rolli veel puidu tihedus, vee läbilaskvus, puiduliik ja viimistlusviis. Mida tihedam ja vähem

vett läbilaskev on puit, seda vähem metallist kinnitusvahendid korrodeeruvad. Kuna metallist kruvi käitub puidus nagu anood (annab ära elektrone), siis korrosiooni tekke vähendamiseks kasutatakse puidu töötlemisel ja viimistlemisel katoodina käituvaid konservante (nt. Cu). Samuti on tõestatud, et eelnevalt soolavees leotatud palgid tekitavad metallist kinnitusvahendite korrosiooni 2 korda rohkem kui töötlemata puit. Seetõttu kasutataksegi kinnituskohana lülipuitu ning valitakse vastav puiduliik ja viimistlusviis, et korrosiooni tekkimise tõenäosus väheneks. [6]

Töötlemata puit on niiskuse (vihm, lumi, kaste ja õhuniiskus) toimeel väliskeskkonnas vastuvõtlik ka bakteritele, putukatele ja seentele. Seeni jaotatakse mädanik- ja hallitusseenteks. Mädanikseened toituvad puidurakkudest kasvades hüüfide ehk seeneniitide kaudu ja/või eritades ensüüme. Niiskuse, soojuse ja hapniku koosmõjul saab võimalikuks nende püsimine ja arenemine. Enne kui mädanik on visuaalselt nähtav kahanevad juba puidu tugevusomadused. Mikroskoopilised mädanikseened lagundavad puidu bioloogilisi ja keemilisi komponente: tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini. Tulemuseks on rabe ja inetu välimusega puit. [1; 7]

Mädanikud jagunevad kolme alagruppi: pruun- (ingl. k. *brown rot*), valge- (ingl. k. *white rot*) ja pehmemädanik (ingl. k. *soft rot*) (vt. joonis 2.2). Pruunmädaniku tekitaja on näiteks majavamm, mis metaboliseerib tselluloosi ja hemitselluloosi. Seenhaigus levib peamiselt puithoonetes ning ligniini alles jäämise tõttu on mädanik pruuni värvusega. Valgemädanik nagu näiteks tuletael põhjustab puidus tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini lagunemist. Valgemädaniku tekke tulemusena puit pleegib ja lõppfaasis ka pehmeneb. Pehmemädanik peab erinevalt pruun- ja valgemädanikust vastu ka äärmuslikes oludes ning lagundab tselluloosi, hemitselluloosi ja mõned liigid ka ligniini. Pehmemädanik põhjustab puidupinna tumenemist, puit muutub pehmeks ja praguneb kuivamisel ruudukujuliselt. [8; 4]



Joonis 2.2 Vasakult: pruun- (ingl. k. *brown rot*), valge- (ingl. k. *white rot*) ja pehmemädanikuga (ingl. k. *soft rot*) nakatunud puit [9; 10]

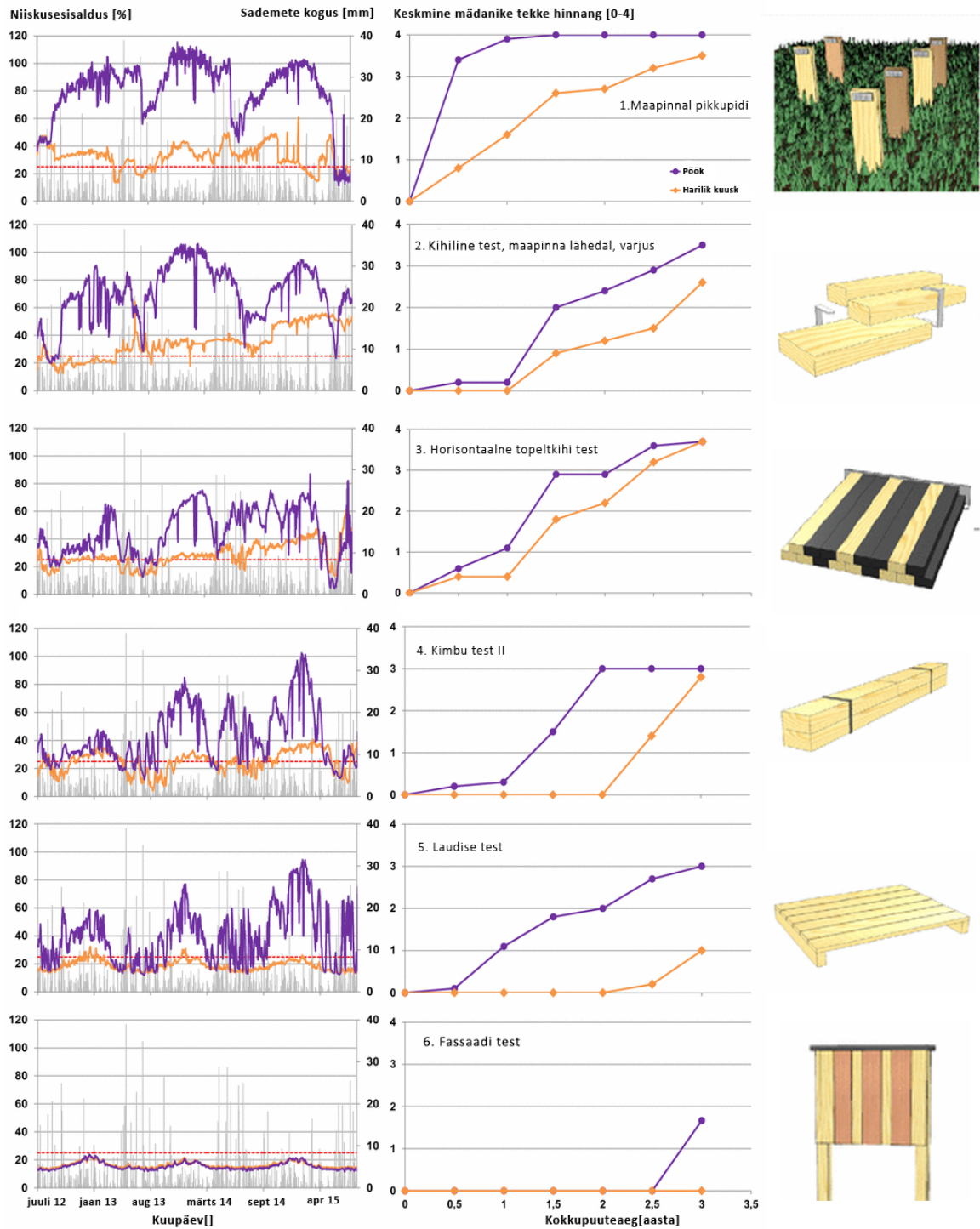


Erinevalt mädanikseentest hallituseened puitu ei lagunda, vaid muudavad selle värvi. Hallituseente eosed ehk spoorid levivad õhu kaudu ning soodsas keskkonnas on võimelised edasi arenema. Olenevalt hallituseene liigist muutub puit tavaliselt rohekas-pruuniks, sinakaks või mustaks. Hallituseened on inimeste tervisele kahjulikud, kuna nad toodavad palju eoseid. Seetõttu tuleb hallitus elimineerida puitu valgendades ja ennetada hallituse teket õhu niiskusesisaldust vähendades. [11]

Meyer-Veltrup et. al. viisid läbi uurimuse, kus nad testisid 24 erinevalt asetatud ja ühendatud viiest erinevast puiduliigist puitlauda vastupidavust väliskeskkonnas. Täpsemalt uurisid nad niiskuse mõju ja mädanike teket pöögile (*Fagus sylvatica L.*), harilikule tammele (*Quercus robur L.*), harilikule kuusele (*Picea abies Karst.*) ja hariliku männi (*Pinus sylvestris L.*) lüli- ja maltspuidule. Saadud katse tulemustest võib järeldada, et mida suurema niiskusesisaldusega ja maad ligi olid puitkonstruktsioonid, seda suurem tõenäosus oli mädanike tekkeks. Niiskusesisaldus võis sõltuda puitlaudade asetusest, kõrgusest maapinnast ja puiduliigist. Joonisel 2.3 on välja toodud pöögi ja hariliku kuuse niiskusesisalduse (%) ja sademete (mm) mõju mädanike tekkele puitlaudade erinevates asendites. Jooniselt 2.3 selgub ka, et pöögil on "kihilises testis" võrreldes kuusega suurem võimalus kuivada pärast suurt vihmasedu. Uurimuse tulemusel osutusid kõige vastupidavamateks horisontaalne topeltkihi-, kimbu- ja fassaadi-laudise lahendus. [12]

Lisaks mädanik- ja hallituseentele põhjustavad puidu lagunemist ka bakterid ja putukad. Bakterid ohustavad puitu ainult hapnikuvaeses keskkonnas ja mädanike lõppfaasis. Putukad seevastu söövad või närivad puitu oma käigud ning munevad sinna vastseid. Putukaid on mitmeid sugukondi, näiteks erinevad termiidid, mardikad, siklased, vaablased, sipelgad ja üraseklased. [4]

Niiskuse toimel saavad võimalikuks puidu kujumuutused, pragude-, korrosiooni-, hallituse- ja mädaniku teke. Küll aga on vastupanu väliskeskkonna teguritele puiduliigiti erinev, mistõttu on kasulik teada puiduliikide eripärasid (ptk. 2.2 Puiduliikide vastupidavus väliskeskkonnas).



Joonis 2.3 Pöögist (*Fagus sylvatica L.*) ja harilikust kuusest (*Picea abies Karst.*) erinevate puitlaudade asendite niiskusesisalduse (%) ja sademete koguse (mm) mõju mädanike tekkele 3 aasta jooksul puitlaudade erinevates asendites [12]

## 2.2 Puiduliikide vastupidavus väliskeskkonnas

Puiduliikide iseäralikud omadused võivad anda eeliseid või puudusi puidu vastupidavusele väliskeskkonnas. Puidu anotoomilisest ehitusest sõltub puidu ilmastikukindlus, töötlemine ja tehnilised omadused. Seetõttu võimaldab erinevate puiduliikide tundmine valida sobivat toormaterjali ja töötlemisviisi.

Puitu liigitatakse okas- ja lehtpuiduks, mida määratakse makroskoopiliste ja mikroskoopiliste tunnuste järgi. Makroskoopilised tunnused on näiteks malts- ja lülipuit, aastarõngaste nähtavus, aastarõnga kevad- ja sügisosa eristatavus, säskiired, sooned, vaigukäigud, säsikordused, värvus ja lõhn. Mikroskoopiline ehitus on okas- ja lehtpuidul aga erinev. Okaspuidule on iseloomulik vaigukäikude ja trahheiidide olemasolu, mille kaudu toimub veetransport ning sellepärast on nähtavad okaspuidu aastarõngad. Okaspuud on näiteks kuusk, mänd, lehis, nulg ja kadakas. Lehtpuidu mikroehitus on võrreldes okaspuiduga keerukam sisaldades mitmekesiseid anotoomilisi elemente ja nende üleminekuvorme nagu sooned, libriformkiud ja soontrahheiidid. Libriformkiud täidavad põhilist mehaanilist funktsiooni puidus ning soonte järjestuse järgi eristatakse rõngassoonelist (nt. tamm, harilik kastan ja saar), poolrõngassoonelist (nt. pähklipuu ja kirsipuu) ja hajusoonelist puitu (nt. kask, lepp, pärn, punapöök ja paju). [4]

K. K. Pandey võrdles okas- ja lehtpuidu keemilist koostist ning leidis, et ligniini moodustavad keemilised komponendid on neis erinevad. Lehtpuidus olev ligniin koosneb aromaatsetest alamühenditest G (ingl. k. *guayacyl*) ja S (ingl. k. *syringyl*), kuid okaspuit peamiselt G-ühenditest. Seepärast on okaspuit keemiliste komponentide lagunemisele vastupidavam kui okaspuit. Lisaks on okaspuidu ligniini sisaldus lehtpuidu omast suurem, vastavalt 25-28% ja 18-22%. [8; 13] Ligniini lagunedes muutub puidu värv, keemiline koostis ja vähenevad puidu mehaanilised omadused. [1]

Puiduliikide ühiseks jooneks on vastupidavuse suhe malts- ja lülipuidu vahel. Nimelt maltspuit on vähem vastupidav kui lülipuit, kuna viimane koosneb surnud rakkudest ja sisaldab ekstraktiivaineid. Seetõttu on lülipuidul väiksemad kahanemis-paisumismuutused ning enamus seened ja putukad ohustavad ainult maltspuidu osa. [4]

Antud töös uuriti nii töötlemata, töödeldud kui ka immutatud kuuse ja tamme puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas, mistõttu järgmised peatükid 1.2.1 Harilik kuusk ja 1.2.2 Harilik tamm annavad ülevaate eelnimetatud puiduliikide omadustest ja väliskeskkonna mõjudest.

## 2.2.1 Harilik kuusk

Harilik kuusk (*Picea abies*) on okaspuit, mis kasvab peamiselt Euroopas (v.a Lõuna-Euroopas) ja Venemaal. Harilikku kuuske kasutatakse laialdaselt tema isoleerivate ja mehaaniliste omaduste poolest ehitus-, konstruktsiooni-, mööbli- ja sisustusmaterjalina. Harilikku kuuske on kerge lõhestada, töödelda, kuivatada ja viimistleda, kuid omab väikest vastupidavust bioloogilistele teguritele. Skandinaavias kasvatavat kuuske (ja ka mäнди) loetakse üheks tundlikumaks puiduliigiks värvimuutuse suhtes. [4]

Harilikku kuuske ohustavad väliskeskkonnas enim mädanik- ja hallitusseened ning putukad. Võrreldes männipuiduga on niiskuse mõju kuusepuidule aeglasema toimega ning vähem tundlik sinetus- ja hallitusseentele. [4] Sellegipoolest kahjustavad hallitusseente liikidest kuusepuidu juuri *Trichoderma* liigid, tüveosa *Stereum sanguinolentum* ja *Amylostereum areolatum* liigid ning sinavust tekitav seen (ingl. k. *blue stain*). *Stereum sanguinolentum* ja *Amylostereum areolatum* liiki seened ilmnevad kollakaspunaste triipude kujul (ingl. k. *red streaking*) palgi lõikepinnal ja koorel. [14] Sinetusseen värvib puidu sinakaks, mustaks või pruuniks ning raskendab puidu kuivatamist ja soodustab teiste seentega nakatumist. Kõige soodsam keskkond sinavust tekitava seene arenguks on 30-70% niiskusesisalduse ja -3-40°C temperatuuri juures. Sinetusseen ja kollakaspunaseid triipe tekitavad seeneliigid tekivad tavaliselt märgade palkide hoiustamisel, eriti soojemas kliimas. [4]

Harilikku kuuske ohustavad ka *Armillaria* seeneliigid ehk teisisõnu külmaseened. Külmaseeni on üle maailma ligikaudu 40 erinevat liiki ja erinevalt enne mainitud seentest võivad *Armillaria* seeneliigid puidupinnast välja ulatuda makroskoopiliste seente kujul. Kuusepuidul võib esineda juure- ja tüve kahjustusi ning vaigu eritust. Peamiselt nakatuvad üksnes stressis puud, kuid võib esineda ka mädanikku. Lisaks on kuusepuit vastuvõtlik juurepessile (*Heterobasidion parviporum*), mis põhjustab juurte mädanemist, valge- ja punase mädaniku teket lagundades samal ajal ligniini. [14] Putukatest ohustavad kuusepuitu näiteks kuuse puidusikk (*Monochamus sutor*) ja majasikk (*Hylotrupes bajulus*). [4]

Lisaks bioloogilistele mõjutustele kahjustab kuusepuitu nagu ka teisi puiduliike kuiv suveperiood. Rosner et. al viisid läbi uurimuse teemal, kuidas Skandinaavia ekstreemne suvepõud mõjub kuuse maltspuidu hüdraulilistele ja mehaanilistele omadustele. Katses selgus, et päikesekiirgus, kuumus ja kuiv õhk lagundavad trahheiite, mille tulemusena tekivad ka praod. Hariliku kuuse sügispuidu trahheiidid on pärlilikult õhukeste seintega ning seetõttu lagunevad kergemini kui paljude teiste

puiduliikide omad. Õhukestest rakuseintest tulenevalt on ka kuusepuidu tihedus võrdlemisi väike (390-480 kg/m<sup>3</sup>). Praod seevastu tekivad vähesest niiskusesisaldusest ja puidu kahanemisest. [15]

Harilik kuusk on levinud puiduliik termotöötlemisel, kuid teda on raske immutada. Thalera et. al uurisid seentega eeltöötlemise mõju puidu immutamisele. Katsest selgus, et kuusepuit on kõige vastuvõtlikum valgele mädanikule (*Hypoxylon fragiforme*) võrreldes pruunmädaniku (*Antrodia vaillantii*) ja sinetuseenega (*Sclerophoma pithyophila*), mis suurendas immuti imendumist puitu. Sellegipoolest langesid 30 päeva möödudes kuusepuidu mass ja survetugevus valgemädaniku tõttu vastavalt 3,6% ja 20% ning pruunmädaniku tõttu 3,3% ja 33%. Sinetusseen seevastu survetugevusele mõju ei avaldanud. Kuusepuidu immutamiseks kasutati vask-etanoolamiin lahust ja polüetüleen vaha, mida immutati surve- ja/või vaakumperioodidega nii märjalt kui eelnevalt kuivatatult. Tulemuseks saadi, et 14 päeva valgemädanikuga kokkupuutel paranes vask-etanoolamiin lahusega märjalt immutades imenduvus  $126 \pm 23\%$  ning vaha emulsioonil  $325\% \pm 73\%$ . Kuivalt immutades paranes imenduvus vask-etanoolamiin lahusega aga  $138\% \pm 29\%$  ning polüetüleen vahaga immutades  $409\% \pm 121\%$ . Pärast immutamist survetugevus enam ei muutnud. Seega võib uurimusest järeldada, et vee-baasil lahustega vaakum- ja survetöödeldes eelnev kuivatamine annab kuusepuidule efektiivsema immuti imendumise tulemuse. Sellegipoolest tuleb harilikku kuuske mädanikuga eeltöödeldes arvestada tugevusomaduste langusega (v.a sinetusseene puhul). [16]

Saarman & Veibri õpikust "Puiduteadus" mainitud katsest selgus, et kuusepuit nagu ka mänd ja lehis on vastupidavad ammoniaagi (NH<sub>4</sub>OH) ja naatriumhüdroksiidi (NaOH) leeliselise mõjule (kontsentratsiooniga 5%). Olenemata kuusepuidu heast vastupidavusest väheneb paindetugevus ammoniaagilahuses 13% ja naatriumhüdroksiidis 40%. [4] Seega tuleb hariliku kuuse keemilisel töötlemisel ja kokkupuutel leelistega pöörata tähelepanu tema tugevusomadustele.

## 2.2.2 Harilik tamm

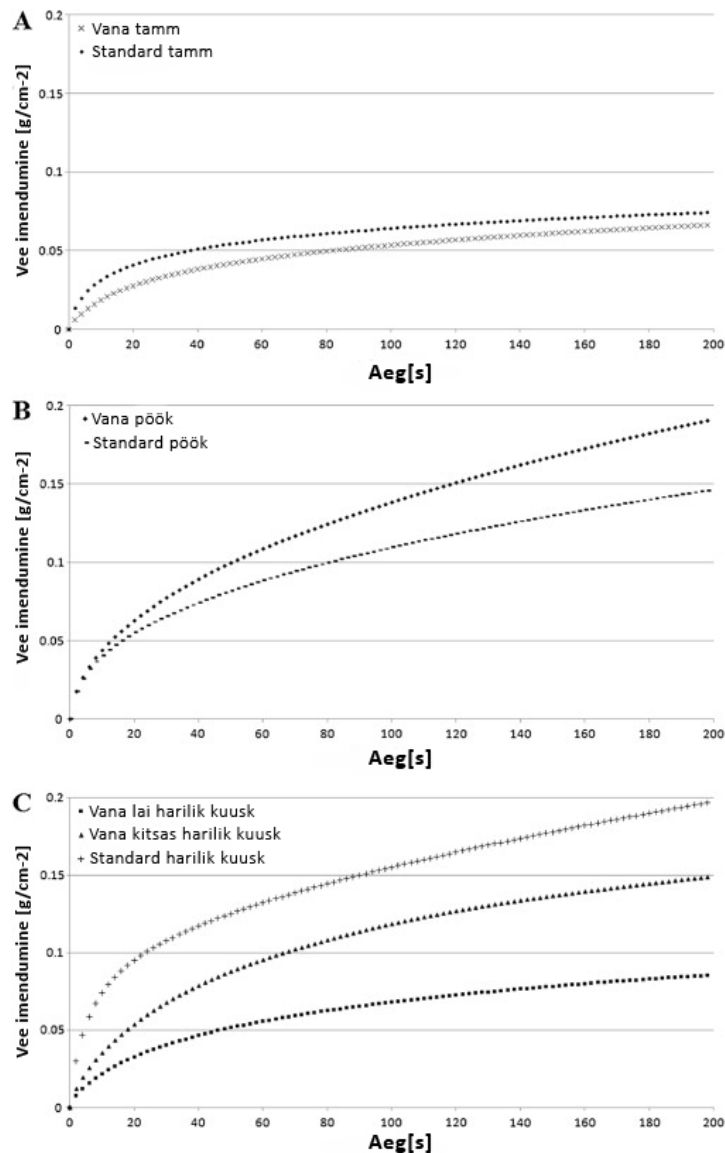
Harilik tamm (*Quercus robur*) on rõngassooneiline lehtpuit, mis kasvab peamiselt Põhja-Euroopas, allpool 60° põhjalaiuskraadi. Harilikku tamme kasutatakse peamiselt sise- ja välismööblina, parkettpõrandatena, paneelides, silla- ja vee-ehitistes, kaevandustes ja aiapostidena. Seda seetõttu, et harilik tamm on raske, kõva, heade tugevusomadustega ja suure tihedusega (õhukuivalt 690-700 kg/m<sup>3</sup>). Tamme on kerge lõhestada, töödelda (nt. painutada ja aurutada), kuid raske

kuivatada. Tamme lülipuit on üks vastupidavamaid põhjamaade puuliike, kuid maltspuitu võivad kahjustada putukad. Tammepuit on kulumiskindel, kuid pinna viimistlemisel tuleb arvestada tema jämedate soontega. [4]

Algselt on tammepuidu maltspuit kollaka värvusega ja lülipuit hallikaspruun. Niiskes keskkonnas tekivad aga tammepuidule rauast detailidega kokku puutudes sinakasmustad plekid. Vaatamata sinakasmustadele plekkidele on viimistlemata tammepuidu vastupanuvõime lagunemisele õhus kõige parem koos jalaka, seedri, küpressi, ebatsuuga, eebenipuu, jugapuu, lehise, robiinia, tiikpuu, must ja kreeka pähklipuu ja mõnede eukalüptiliikidega. Värvimuutust põhjustavad tammepuidule *Paecilomyces variotii* seeneliigid, mille tulemusel areneb hallitus ja pehmemädanik. *Paecilomyces variotii* seeneliigid ründavad tammepuitu enim puidu kuivamisel ja hoiustamisel, muutes tammepuidu kollaseks. Valgemädanikku põhjustavad nii kasvavale kui ka langenud tammele näiteks *Xylobolus frustulatus* ja *Trametes versicolor* liigid. Nagu ka kuusepuitu ohustavad tammepuit *Armillaria* seeneliigid. [14; 17]

Vaatamata tammepuitu ohustavatele bioloogilistele teguritele on tamm oluliselt vastupidavam kui kuusk, kusjuures värvi muutus toimub tammes aeglaselt ja raskemini. Hon ja Feist katsetasid ilmastiku ja UV-kiirguse mõju neljale lehtpuidule: punane-, valge tamm, kollane pappel ja ambrapuu. Uurimisel kaotasid kõik puiduliigid oma heledust ja muutsid värvi, kuid valge tamm koos ambrapuuga värvusid kõige aeglasemalt. [1] Thaler & Humar uurimusest aga selgus, et tamme (*Quercus sp.*) ja kuuse (*Picea abies*) mehaanilised omadused 100 aasta jooksul märgatavalt ei muutunud ega erinenud, kuid vastupanuvõime bioloogilistele teguritele vähenes. Lisaks selgus, et tamme puittalad imasid pikikiudu kõige vähem vett võrreldes kuuse ja pöögiga (*Fagus sylvatica*), kusjuures tamme 100 aasta vanune puittala imas neist kõige vähem vett (vt. joonis 2.4). [18]

Erinevalt kuusepuidust on tammepuidul leelistele väga nõrk vastupanuvõime. Pärast neljanädalast leelisega mõjutamist langes tamme paindetugevus ammoniaaklahuses 48% ja naatriumhüdrosiidis 69%, mis tähendab ligi 2 korda rohkem kui kuusel. [4] Tamme vastupidavust väliskeskkonnas nagu ka teiste puiduliikide oma saab parandada tammepuitu termotööteldes, immutamades või puidupinda viimistledes värvide või lakkidega. Termotöötlusega väheneb tammepuidu tiheduse kasvades selle kahanemine [19] ja tammepuidu immutamine pikendab tema vastupidavust väliskeskkonnas valgusenergiale ja niiskusele. [4]



Joonis 2.4 Lühiajaline tamme (*Quercus sp.*) (A), pöögi (*Fagus sylvatica*) (B) ja kuuse (*Picea abies*) (C) standard ning 100 aasta vanuste katsekehade vee imendumine pikikiudu [18]

## 2.3 Puidu töötamise mõju vastupidavusele väliskeskkonnas

Puitu töödeldakse, et parandada tema ilmastikukindlust, kasutusiga ja soojusisoleerivust vähendades puidu niiskuspaisumist. Puitu on võimalik töödelda termiliselt või keemiliselt (viimistlemine, immutamine ja keemiline modifitseerimine), kuid käesolevas töös on antud ülevaade ainult puidu termotöötlemisest ja immutamisest vastavalt uurimuses osalevatele katsekehadele.

### 2.3.1 Puidu termotöötlemine

Puidu termotöötlemise protsessi etapid ja tingimused (hapniku või lämmastikuga aurutamine, kuiv või märg protsess, õlide kasutamine jne) võivad olla erinevad, kuid lõpptulemuseks lagundatakse puidus hemitselluloos kõrgetel temperatuuridel (160-260°C). Termotöötlus võib kesta 15 minutist kuni 24 tunnini sõltuvalt protsessi tüübist, puiduliigist, katsekeha mõõtmetest, algsest niiskusesisaldusest ja soovitud mehaanilisest omadustest, vastupanu võimest bioloogilistele teguritele ja katsekeha mõõtmete stabiilsusest. Mida kauem termotöödelda puitu, seda rohkem suureneb vastupanuvõime mädanikele ja puidu värv muutub. [7; 20]

Termotöötlemise protsesse on 5: ThermoWood-, Plato-, retifikatsiooni-, Le-bois perdure (eesti keeles "puidu kuumutamine auruga") ja OHT- (ingl. k. *oil-heat treatment*) protsess [21]. Nendest kõige levinum on Soome arendatud ThermoWood protsess, kus okas- ja lehtpuud on eraldi termotöötlemise astmetel põhinevatesse tooteklassidesse jaotatud. Okas- ja lehtpuude tooteklasside nimedeks on *Thermo-S* ja *Thermo-D*, kus "S" seisab stabiilsuse eest ning "D" vastupidavuse eest. Peamiselt kasutatakse *Thermo-S* klassi siseruumides ja *Thermo-D* klassi nii sise- kui ka välitingimustes [22]. Kõige rohkem termotöödeldakse mändi, kuuske, kaske ja haaba, kuid protsessi on võimalik rakendada kõikidele puiduliikidele [7].

Puidu termilisel töötlemisel vähenevad tasakaaluniiskuse, tihedus, tõmbe-, paindetugevus ja niiskusedeformatsioonid ning paranevad survetugevus, bio- ja ilmastikukindlus. Puidu värvus tumeneb, muutub puidu lõhn ja okaspuidul eraldub vaik. Biokindlus suureneb kuna enamuse seeneliigid ja putukad toituvad hemitselluloosist, mis lagundatakse puidu termilisel töötlemisel. Hemitselluloosi lagundamisega väheneb ka vett imavate hüdroksüülrühmade osakaal, mistõttu väheneb puidu tasakaaluniiskuse. Tasakaaluniiskuse vähenemise tulemusena puit imab vähem õhuniiskust, seega puit lõheneb ja pleegib vähem ning paraneb puidu mõõtmete püsivus. Termotöötlemisel suureneb aga metallist kinnitustahvrite korrosioon, kuna hemitselluloos toodab termilisel töötlemisel äädikhapet. Eelnevat fakti tõestas ka Jermer & Andersson katse, mille uurimusest selgus, et korrosioonile pidas vastu kõige rohkem roostevaba teras. Lisaks väheneb termotöötlemisel puidu mass, mis võib ulatuda kuni 30%-ni. Seepärast ei sobi termotöödeldud puitu kasutada ehitiste konstruktsioonides ja leiab otstarvet hoopis sise- ja välimööblina, põrandakattena, aknaraamidena, ustena, ja erinevate pindade katteks. [7; 22; 23; 24]

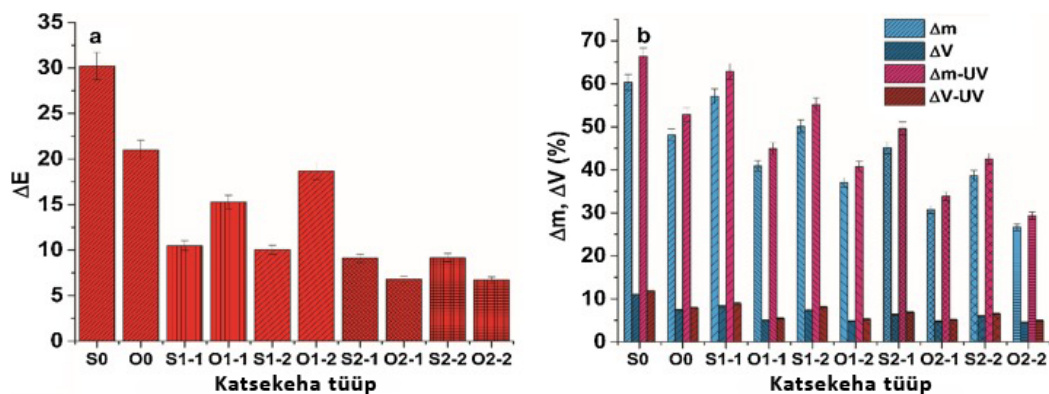
Croitoru et. al. uurisid termotöödeldud ja sõrmjätkatud kuuse (*Picea abies*) ning tamme (*Quercus robur L.*) paneelide UV-kiirguse ja niiskuse mõju puidule. Uurimusest selgus, et paneelide mõõtmised



püsisid stabiilsena, kuid UV-kiirguse mõjul muutus puitpindade värv. Termotöötlemisega tõusis paneelide vastupidavus päikesekiirgusele ning massi ja mahu muutustele. (vt. joonis 2.5 ja 2.6) Kusjuures paneelide molekulaarne struktuur püsis samasugusena nagu enne väliskeskkonda asetamist. [25]



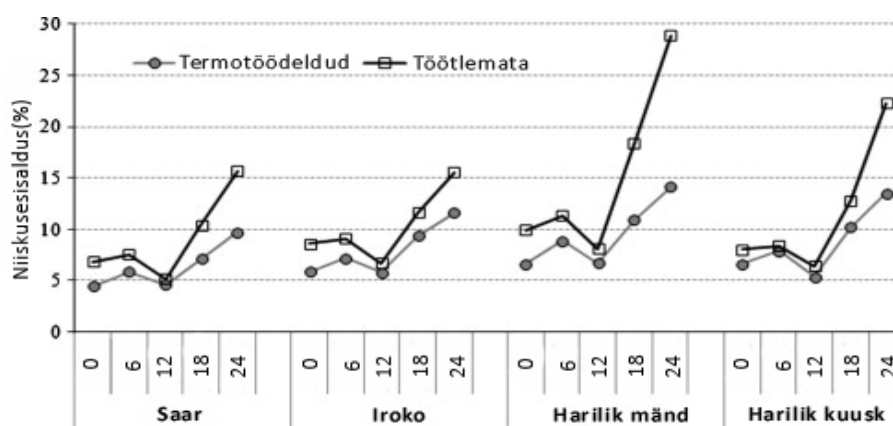
Joonis 2.5 Erinevates tingimustes termotööteldud hariliku kuuse (*Picea abies*) ja tamme (*Quercus robur L.*) värvi muutus enne (t=0) ja pärast (t=24) UV-kiirguse mõju: "S" tähistab harilikku kuuske ja "O" tamme, kus 0 on töötlemata puit, 1-1 ja 1-2 on termotööteldud puit 180°C juures vastavalt 3 ja 5 tundi, 1-3 ja 1-4 on termotööteldud puit 200°C juures vastavalt 3 ja 5 tundi [25]



Joonis 2.6 (a): Katsekehade värvi muutused UV-kiirguse ( $\Delta E$ ) mõjul; (b): massi ( $\Delta m$ ) ja mahu ( $\Delta V$ ) muutused katsekehade vette kastmisel (katsekehade märgistuste seletusi vt. jooniselt 2.5) [25]

Tomak. et. al uurisid termotööteldud männi (*Pinus sylvestris L.*), kuuse (*Picea orientalis L.*), saare (*Fraxinus excelsior L.*) ja iroko (*Chlorophora excels*) vastupidavust väliskeskkonnas. Täpsemalt

uurisid nad puidu niiskusesisaldust, värvi muutust, pinna lõhenemist, survetugevust pikikiudu ja elastsusmoodulit. Katse kestis 2 aastat ning katsekehadel sooritati mõõtmisi iga 6 kuu möödudes. Tulemuseks saadi, et termotöödeldud puidu niiskusesisaldus oli väiksem (vt. joonis 2.7) ning tugevusomadused, värvi stabiilsus ja pinna kvaliteet paremad kui töötlemata puidul. Termotöödeldud lehtpuude (saar ja iroko) värv muutus esialgu hallikaks ning väliskeskonna tegurite tulemusel pleekis hiljem. Termotöödeldud okaspuud (mänd ja kuusk) muutusid tumedaks esimese 18 kuu jooksul ning hiljem pleekisid samuti hallikaks. Kokkuvõttes muutus termotöödeldud lehtpuude värv vähem kui okaspuudel. Hallitus tekkis aga termotöödeldud katsekehadele juba esimese 6 kuuga ning praod olid suuremad töötlemata puidul kui termotöödeldud puidul. Kusjuures termotöödeldud okaspuudel esines rohkem pragusid ja lõhenemist kui termotöödeldud lehtpuudel. Sellegipoolest langesid mehaanilised omadused kõikidel katsekehadel. [20]



Joonis 2.7 Termotöödeldud ja töötlemata saare (*Fraxinus excelsior* L.), iroko (*Chlorophora excels*), männi (*Pinus sylvestris* L.) ja kuuse (*Picea orientalis* L.) niiskusesisalduse muutus väliskeskonna tegurite tulemusel 2 aasta jooksul [20]

Termotöödeldud puit säilitab esteetilise välimuse ning tume värv muudab puidu väljanägemise eksootilisemaks, kuid puit muutub rabedamaks. Massikao tõttu langevad puidu tugevusomadused, kuid mõnevõrra paraneb vastupanu niiskusele ja UV-kiirgusele. Siiski pole termotöödeldud puit mõeldud kasutamiseks kohtades, kus puit on pidevalt kontaktis veega, mistõttu parema efektiivsuse mädanike, hallituse ja putukatega toime tulemiseks annab puidu keemiline töötlemine. Keemiline puidupinna viimistlemine muudab ainult keerulisemaks asjaolu, et veebaasil olevad viimistlusvahendid ei imendu nii kergelt termotöödeldud puitu, mistõttu kasutatakse peamiselt õlisi ja värve. [7]

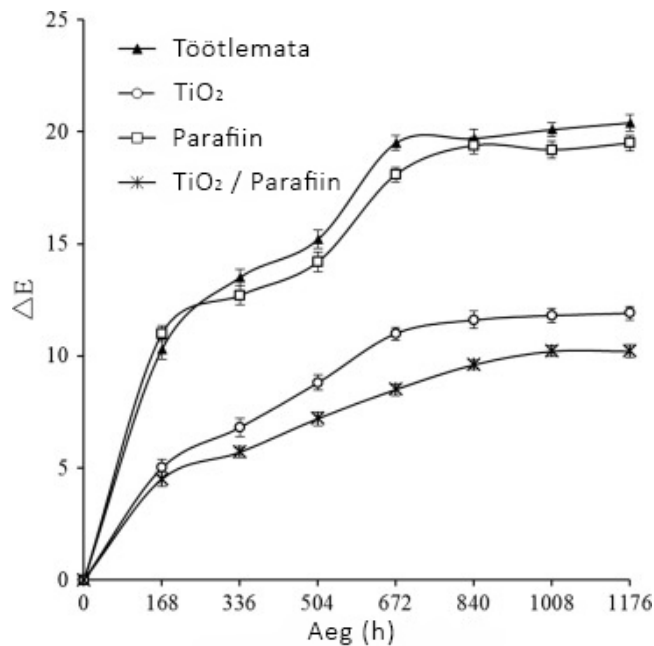
### 2.3.2 Puidu immutamine

Puidu immutamise eesmärk on anda puidule kaitset mädanike eest, suurendada vastupidavust eriti niisketes tingimustes ja parandada tulekindlust ning elektrijuhtivust. Puitu on võimalik immutada mitmel meetodil: surve all (täisrakuprotsess ja säästlik immutamine), vaakumis, difusioon- ja OPM-meetodiga. Surveimmutusmeetod võimaldab immutusvahendil küllaldaselt ja sügavalt puitu tungida, millest levinuim on täisrakuprotsess. Täisrakuprotsessis eemaldatakse kõigepealt rakuõõnsustest õhk, seejärel pressitakse immutusvedelik immutussilindris surve all puitu ning viimaseks kuivatatakse lühikest aega vaakumis. Raskesti immutatavale puidule tehakse puidupinnale väikesed sisselõiked, mille eesmärk on kergendada immuti sissetungimist. OPM-meetodis toimub immutamine korduvate surve- ja vaakumperioodidega. Antud meetodit kasutatakse näiteks kuusepuidu puhul, nagu ka käesolevas töös. [4]

Puidu immuteid võib jagada kolme erinevasse gruppi: vees lahustuvad (soola sisaldavad), õlis lahustuvad immutid ja kreosoot. Kõige tuntuim ja laialdaselt kasutatavaim vees lahustuv immuti on CCA-immutid, mis sisaldavad vaske, kroomi ja arseeni. Kuna CCA-immutid ohustavad keskkonda ja inimeste tervist, otsitakse alternatiivseid immutusvahendeid. Avastatud immutid põhinevad siiski vasel, kuid kroom ja arseen on asendatud muude komponentidega. Õlis lahustuvad puiduimmutid koosnevad erinevatest tärpentiinis lahustatud orgaanilistest ainetest. Õlis lahustuvad puiduimmutid ei tekita puitmaterjali mõõtude muutusi ja on tihti tugeva lõhnaga. Seetõttu kasutatakse neid peamiselt kohtades, kus immutatud puitmaterjalid inimestega tihedalt kokku ei puutu nagu näiteks sildade- ja tänavate postidena. Kreosooti valmistatakse kivisöe tõrvast ja kasutatakse postide, vaiade, liiprite ja teivaste immutamiseks. Kreosoodi kasutamine on väga levinud, kuna tagab puidule küllalt hea kaitse mitmesuguste puitu kahjustavate organismide vastu ning tõrjub vett. Negatiivsetest omadustest on kreosoodil spetsiifiline läbitungiv lõhn ja töötlemise tagajärjel võib puidu pind jääda kleepuvaks. [26; 4]

Shen et. al. uurimuse eesmärgiks oli parandada hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) vastupidavust väliskeskkonnas töödeldes katsekehi termiliselt, immutades TiO<sub>2</sub> kolloidlahusega ja/või parafiini emulsiooniga. 1176 tundi kestnud katse tulemuseks saadi, et TiO<sub>2</sub> kolloidlahusega immutatud ja eelnevalt termotöödeldud männipuit ei olnud veekindel, kuid lisades parafiini emulsiooni, vähenes niiskuse imavus märgatavalt. Küll aga pleekis männipuit TiO<sub>2</sub> kolloidlahusega immutades kõige vähem ning kokku muutis värvi kõige vähem mõlema immutiga puidupinna töötlemine (vt. joonis 2.8). Puidu keemiliste komponentide fotolagunemine UV-kiirguse toimele vähenes, mis tõestati infrapunaspetsroskoobi ja skaneeriva elektronmikroskoobi abil. [27] Töödeldes aga harilikku mändi

termiliselt ja vasel baseeruvate immutitega, saadi tulemuseks, et termotöötlus parandas puidu vastupidavust ning immuti lisas kaitsefunktsiooni ilmastiku eest. Sellisele tulemusele jõudsid Ahmed et. al., kes uurisid hallituse teket harilikule männile (*Pinus sylvestris* L.) töödeldes puitu eelnevalt mainitud meetoditega. Hallituse teke sõltus katsekeha algsest niiskusesisaldusest: mida suurem oli algne niiskusesisaldus, seda kergemini tekkis hallitus. Hallitusseeni oli kolme liiki: kerahallik ehk *Aspergillus*, *Rhizopus* ja *Penicillium*. Termotöötlus ei garanteerinud männipuidule biokindlust ning oli sama tõhus kui immutatud katsekeha, mis oli algsest madala niiskusesisaldusega. Keskmine hinnang hallituse arengule oli 3 (vt. tabel. 2.5), mis tähendab, et puitlaud olid endiselt kõlblikud kasutamiseks, kuid kaetud enamus osast hallitusega. Kõige efektiivsemaks viisiks osutus aga katsekehade kuivatamine topelt kihtidena, mis suunas toitained puitlaua servadesse ning seejärel servad hõõveldati. Katse lõpuks tekkis hallitus kõikidele katsekehadele, kuid viimane meetod oli neist 42 päeva jooksul kõige vastupidavam. [28]



Joonis 2.8 Töötlemata ja erinevalt immutatud hariliku männi (*Pinus sylvestris* L.) kogu värvi muutus ( $\Delta E$ ) väliskeskkonna tegurite mõjul [27]

Vastavalt puittoote asukohale ja nõuetele on võimalik õige meetodi valides parandada puidu vastupidavust väliskeskkonnas. Puidu immutamine võib kaitsta UV-kiirguse, niiskuse ja bioloogiliste tegurite eest rohkem kui puidu termiline töötlemine. Efektiivseima tulemuse saamiseks võib rakendada puidule ka mõlemaid meetodeid.

### 3. MATERJALID JA MEETODID

Käesoleva uurimuse eesmärgiks on võrrelda COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas. Antud töö aluseks on võetud COST FP1303 projekt “*Performance of bio-based building materials*”, mis uurib erinevalt töödeldud ja erinevatest puiduliikidest puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas 28 teadusasutuses üle Euroopa (vt. joonis 3.1). COST (ingl. k. *European Cooperation in Science and Technology*) on organisatsioon Euroopas, mis võimaldab riikliku rahastusega arendada ja viia läbi teadusuuringuid teaduse ja tehnoloogia vallas. COST FP1303 projekt alustas oma tegevust 22. oktoobril 2013. aastal, kuid Eestis alustati katsega 2014. aasta sügisel [29]. COST FP1303 projekti lõppeesmärgiks on võrrelda puitlaudade vastupidavust erinevates kliimatingimustes.



Joonis 3.1 COST FP1303 projektis osalevad Euroopa riigid [30]

Imprest AS on Baltimaade juhtiv ümarfreesitud ja süvaimmutatud puidust aiatoodete tootja ja turustaja [31], mille katselaud pandi püsti 8. mail 2016. aastal Peeter Tubli magistritöö “*Immutatud puidu vastupidavus väliskeskkonnas*” (ingl. k. “*Impregnated wood performance in outdoor environment*”) raames. Regulaarselt mõõdetakse mõlemal katselaual mädanike, hallituse, seente, pragude ja kruvide korrosiooni teket, värvuse muutust ning puidu niiskusesisaldust. Tulemusi võrreldakse kohaliku ilmajaama andmetega, analüüsitakse ning tehakse järeldused COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud katselaudade vastupidavuse kohta väliskeskkonnas.

## 3.1 Materjalid

### 3.1.1 COST FP 1303 katsekehad

COST FP1303 katsekehad asuvad Tallinna Tehnikaülikoolis (TTÜ) ja Eesti Maaülikoolis (EMÜ). Mõlema katselaua uurimused algasid 2014. aasta sügisel. TTÜ katselaual viidi läbi kõik eelnimetatud mõõtmised: mädanike, hallituse, seente, pragude ja kruvide korrosiooni teke, värvuse muutus ning puidu niiskusesisaldust ja temperatuuri. EMÜ katselaud toodi Tallinna Tehnikaülikooli, et teha laboris kruvide korrosiooni katse ning seejuures tehti korrapärased mõõtmised antud kuul.

COST FP1303 katselaud koosneb üheksast puitlauast mõõtmetega 490x49x24 mm. Puiduliikideks on harilik kuusk (*Picea abis*) ja harilik tamm (*Quercus robur*), millest 6 puitlauda on töötlemata ning 3 puitlauda on termotöödeldud kuusepuidust. Töötlemata puitlaudadest 3 on valmistatud harilikust kuusest ja 3 harilikust tammest. Termotöödeldud kuuse katsekehad valmistati termotöötlusel 3 tundi temperatuuril 230°C, mille tulemusel oli puidu massikadu ligikaudu 7%. TTÜ-s asuvad katsekehad tähistati vastavalt laua tähisele 14B, kus harilik kuusk on tähisega B1-B3, termotöödeldud harilik kuusk B4-B6 ja harilik tamm B7-B9. Katsekehad on radiaallõikes, välja arvatud katsekeha B9, mis on saagimise vea tõttu tangentsiaallõikes (vt. joonis 3.2).

### 3.1.2 Imprest AS immutatud katsekehad

Imprest AS katselaud pandi üles 8. mail 2016. aastal Tallinna Tehnikaülikooli katusele, mis on kõrvuti COST FP1303 projekti katselauaga. Katsekehadega varustas Imprest AS, millel põhines Peeter Tubli magistritöö “Immutatud puidu vastupidavus väliskeskkonnas” (ingl. k. “*Impregnated wood performance in outdoor environment*”). Uurimuse eesmärgiks oli katsetada Imprest AS erinevalt immutatud puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas. Katselaud saadi COST FP1303 projekti raames, mille tähiseks on 14C. Katsekehad on valmistatud harilikust kuusest (*Picea abis*), immutatud erinevate immutustsüklitega Impralit KDS-ga ja tähistatud numbritega 1/1-3/3. Kõik katsekehad olid saetud radiaallõikes (vt. joonis 3.2).

Impralit KDS on krooni vaba puiduimmuti, mille eesmärgiks on ära hoida putukate kahjustusi (ka termiite), pehmemädanikku, seente põhjustatud lagunemist ning pakub lühiajalist kaitset sinetusseene ja hallituse eest. Immutit on võimalik puidule kanda ainult surve- ja vaakumimmutusega ning seda on lihtne hiljem veega maha pesta. Impralit KDS sisaldab 205,3 g/kg

(20,53%) vaskkarbonaati – vaskhüdrosiidi (1:1), 100,0 g/kg (10,00%) didetsüülpolüoetüülammooniumboraati (DPAB) ja 80,0 g/kg (8,00%) boorhapet. Impralit KDS kasutatakse ainult puidu töötlemiseks, mis vastavad kasutusklassidele 1-4. [32] 5 kasutusklassi on määratletud Euroopa standardiga EN 335-1 (2013), mida tuleb toodete immutamisel aluseks võtta, et tagada toodete vastupidavus:

- Klassi 1 kasutatakse, kui puit- või puidul põhinevad materjalid asetsevad konstruktsioonis ja on ilmastiku ning vettimise eest kaitstud.
- Klassi 2 kasutatakse, kui puit- või puidul põhinevad materjalid on katte all ja ilmastiku eest kaitstud, kuid vahel võib esineda vettimist.
- Klassi 3 kasutatakse, kui puit- või puidul põhinevad materjalid asetsevad maapinnast kõrgemal. Nad on pidevalt kaitsmata ilmastikutingimuste eest või varjatud ilmastiku eest, aga allutatud niiskusele.
- Klassi 4 kasutatakse, kui puit- või puidul põhinevad materjalid on maapinnal ja/või vees.
- Klassi 5 kasutatakse, kui puit- või puidul põhinevad materjalid on pidevalt kontaktis soolaveega. [33]

Katsekehad algsete mõõtmetega 490x49x24 mm (piki-, radiaal- ja tangentsiaalsuunas) töödeldi kolme immutustsükliga ja erineva ajaga, mis on toodud tabelis 3.1. Tabelis 3.2 on toodud lisainformatsioon Imprest AS katsekehade kohta enne ja pärast immutust. Esimese grupi (1/1-1/3) katsekehad on immutatud kõige kauem ning immuti kogus on ligikaudu 10 korda suurem tootja soovitatust. Seetõttu peaksid antud katsekehad olema kõige vastupidavamad erinevatele väliskeskkonna teguritele. Teise grupi (2/1-2/3) katsekehade immutustsükli pikkus oli küllaltki lühike ja kaal oli madalam pärast immutamist, mis pärast on võimalik, et ainult väike kogus immutit tungis puidu sisse. Kolmanda grupi (3/1-3/3) katsekehad sarnanevad Imprest AS toodetele, kusjuures immuti kogus on sama, mis ettevõtte toodetavatel toodetel [34].

Tabel 3.1 Imprest AS katsekehade immutustsükklid (min) ja kasutusklassid [34]

Katsekeha nr.	Immutustsükkel 12,8 bar			Kasutusklass
	Eelvaakum (min)	Surve (min)	Lõppvaakum (min)	
1/1	30	240	15	4
1/2				
1/3				
2/1	10	30	10	3
2/2				
2/3				
3/1	15	60	15	4
3/2				
3/3				

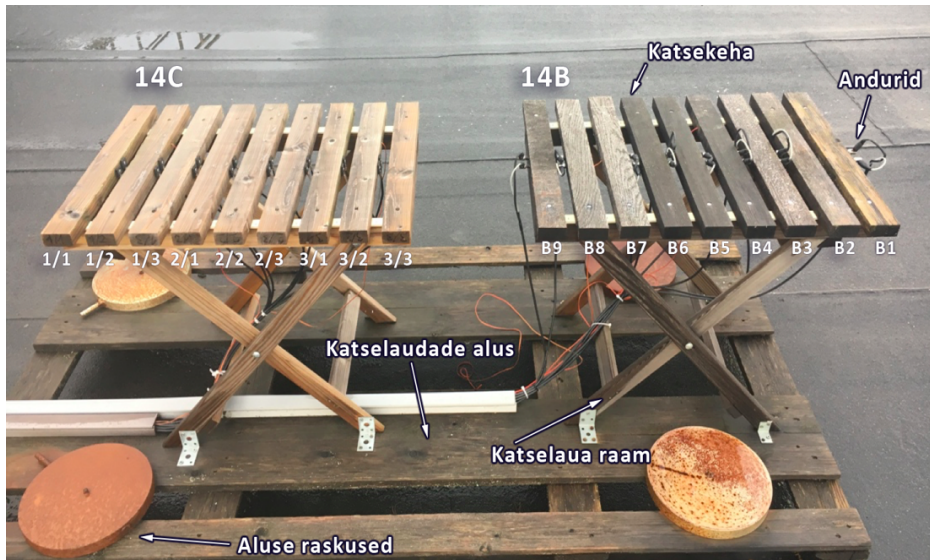
Tabel 3.2 Informatsioon Imprest AS katsekehade kohta enne ja pärast immutust [34]

Katsekeha nr.	Niiskusesisaldus (%)	Kaal (g)	Kaal pärast immutust (g)	Immutusvahe nd (kg)	Immutusvahe ndi hulk puidus (kg/m <sup>3</sup> )
1/1	26,7	322,0	400,0	0,078	127,3
1/2	28,4	314,0	400,0	0,086	140,4
1/3	24,5	314,0	390,0	0,076	124,1
2/1	34,0	376,0	370,0	-0,006	-9,8
2/2	39,8	480,0	472,0	-0,008	-13,1
2/3	38,7	376,0	396,0	0,020	32,7
3/1	36,8	338,0	344,0	0,006	9,8
3/2	35,0	336,0	350,0	0,014	22,9
3/3	34,0	328,0	334,0	0,006	9,8

### 3.1.3 Katselaud

COST FP1303 ja Imprest AS katselauad on saadud COST FP1303 projekti raames. Kokkuvolditav katsealus on mõõtmetega 640x490x550 mm ja valmistatud immutatud kuusepuidust. Mõlemal laaraamil asetsevad 9 katsekeha, mis on kinnitatud roostevabast või tsingitud terasest kruvidega ja ühendatud niiskust ja temperatuuri mõõtvate anduritega (vt. joonis 3.2 ja 3.3). Katselaua ja katsekehade vahel on plastikust isolatsiooniribad, mis väldivad niiskuse kogunemist katsekehade ja pinna vahele ning annavad täpsema tulemuse katsekeha vastupidavusele väliskeskkonnas.

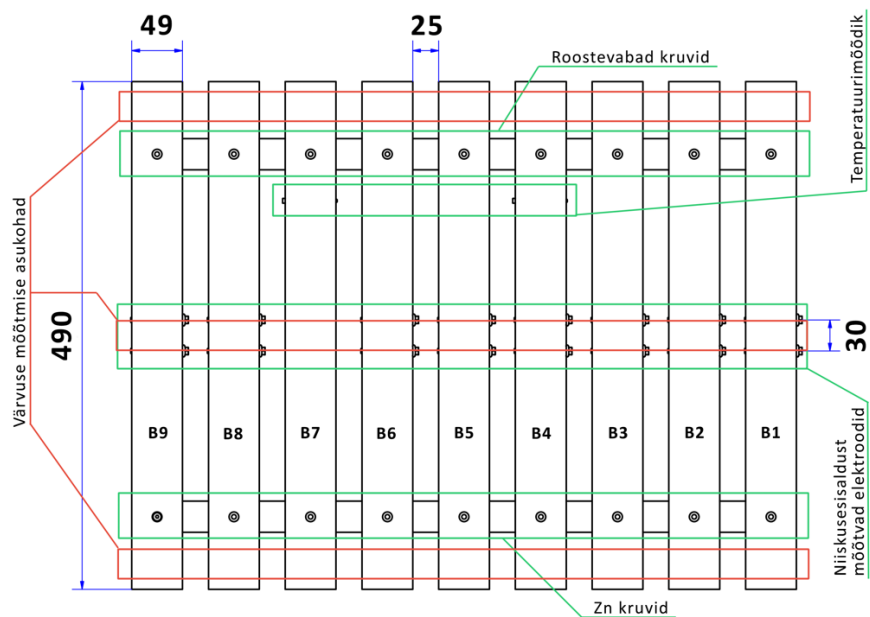




Joonis 3.2 Vasakul: Imprest AS katselaud; paremal: COST FP1303 katselaud

### 3.1.4 Kruvid

Katsakehad kinnitati katselauale ridade kaupa kahte eri tüüpi kruvidega: roostevabast- ja tsingitud terasest mõõtmega 4x50 mm (vt. joonis 3.3). Kruvidel hinnati korrosiooni teket nii visuaalselt kui ka laborikatsetes. Laborikatsetes toimusid TTÜ laboris ning nende eesmärgiks oli leida metallikadu (%) ja korrosiooni sügavus (%) (vt. pkt. 3.2.6 Kruvide korrosioon).



Joonis 3.3 COST FP1303 katselaua joonis pealtvaates

## 3.2 Meetodid

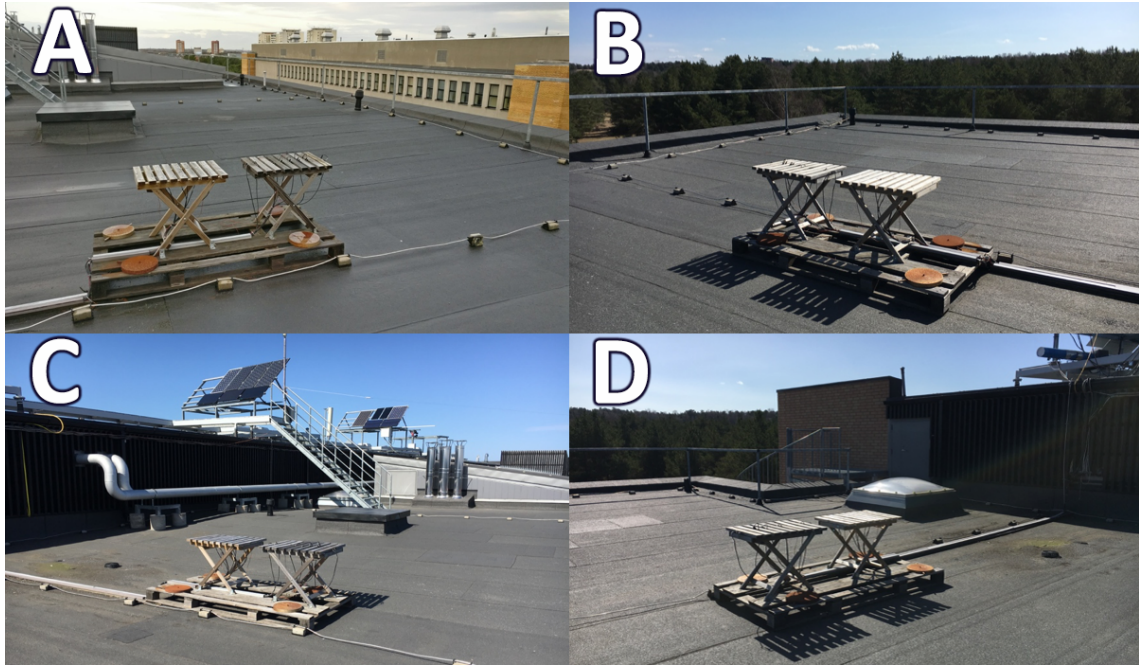
Katsekehadel mõõdetakse regulaarselt mädanike, hallituse, seente, pragude ja kruvide korrosiooni teket, värvuse muutust ning puidu niiskusesisaldust ja temperatuuri. Tulemusi võrreldakse kohaliku ilmajaama andmetega, analüüsitakse ning tehakse järeldused COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud katselaudade vastupidavuse kohta väliskeskkonnas. Tabelis 3.3 on toodud mõõtmiste ja hindamise ajakava, mille aluseks on COST FP1303 projekti juhend [35].

Tabel 3.3 COST FP1303 ja Imprest AS katsekehade mõõtmiste ja hindamise ajakava

Mõõdetav nähtus/suurus	Intervall
Mädanik	Iga 3 kuu tagant
Hallitus/ värvimuutvad seened	Iga 2 kuu tagant
Pragude teke	Iga 3 kuu tagant
Värvuse muutus	Kord kuus
Korrosiooni visuaalne hindamine	Iga 3 kuu tagant
Korrosiooni laborikatsed	10.11.2017
Niiskusesisalduse ja temperatuuri mõõtmine	Kord kuus

### 3.2.1 Eksponeerimise tingimused

Käesolevas töös uuritavad COST FP1303 ja Imprest AS katselaudade eksponeerimise tingimustele on aluseks võetud COST FP1303 projekti nõuded [35]. Uuritavad katselaud paiknevad Tallinna Tehnikaülikooli U06 korpuse katusel, mis on maapinnast 9,75 m ja merepinnast 43,75 m kõrgusel. Asukoha pikkus- ja laiuskraadid on 59°23'38.76'' ja 24°40'10.588''. Eesti Maaülikooli katselaud asub Tehnikamaja katusel, mille pikkus- ja laiuskraadid on 58°23'18.08'' ja 26°41'38.02''. Pildid katselaudadest põhja-, lääne-, lõuna- ja ida suunas on näidatud joonisel 3.4. Niiskusesisalduse ja temperatuuri andmelogerid on asetatud siseruumi, mis on ühendatud läbi seinaga ja mööda katusepinda turvaliselt katselaudadega. Lähim kohalik ilmajaam asub Harkus, kust saadi järgmised andmed: sademete hulk, õhutemperatuur (miinimum, keskmine ja maksimum), õhuniiskus (miinimum, keskmine ja maksimum), UV kiirgusintensiivsus, tuulekiirus ja tuule suund. Saadud ilmajaama andmeid võrreldakse katsekehade küljes olevate mõõdikute andmetega ning visuaalselt saadud katsetulemustega.



Joonis 3.4 COST FP1303 ja Imprest AS katselaudade vaade põhja (A), lääne (B), ida (C) ja lõuna (D) suunas TTÜ U06-korpuse katusel

### 3.2.2 Niiskusesisaldus ja temperatuur

COST FP1303 ja Imprest AS katselauad on ühendatud elektrodidega, mis mõõdavad katsekehade niiskusesisaldust ja temperatuuri. Niiskusesisaldust mõõtvaid elektroode on ühe katselaua kohta kokku 8, kus COST FP1303 katselaual on ühendamata jäänud üks hariliku tamme katsekeha B7 ja Imprest AS katselaual katsekeha 1/1. Temperatuuri mõõdikuid on mõlemal katselaual 2, kus COST FP1303 omad on ühendatud katsekehadega B4 ja B7 ning Imprest AS omad katsekehadega 1/2 ja 3/2 (vt. joonis 3.2 ja 3.3). Kõikide elektrodide andmed salvestati Scantronik Mugrauer GmbH Thermofox Universal andmelogerisse (vt. joonis 3.7), kust andmed töödeldi ja kopeeriti Softfox programmi abil MS Excelisse. Niiskusesisaldust mõõtvad elektroodid on märgistatud musta värvi kaabliga ja temperatuuri mõõdikud punase kaabliga. Katsekehadel mõõdetakse minimaalset, keskmist ja maksimaalset temperatuuri ning niiskusesisalduse elektroodid mõõdavad mõõtekanali Gigamooduli (vt. joonis 3.7) kaudu katsekehades elektrilist takistust ühikutes  $10\log\Omega$ . Seetõttu mõõdetakse niiskusesisaldus ainult katsekeha keskkohas.  $10\log\Omega$  arvutatakse MS Exceli programmis ümber protsentidesse (%) valemiga (3.1):

$$MC(R; T) = a \cdot T + b \cdot \exp((c \cdot T + d) \cdot R) + (e \cdot T + f) + (g \cdot R^2) + (h \cdot T) + i \quad (3.1)$$

kus  $MC$  – katsekeha niiskusesisaldus (%)

$R$  – elektritakistus ( $10\log\Omega$ )  
 $T$  – temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $a, b, c, d, e, f, g, h, i$  – muutujad [36]



Joonis 3.5 Scantronik Mugrauer GmbH Thermofox Universal andmeloger ja Gigamoodul

### 3.2.3 Mädanike teke

Mädanike teket hinnatakse visuaalselt hindamistabeli 3.4 ja *pick-testi* abil iga 3 kuu tagant. *Pick-testis* lükatakse terava otsaga tööriist diagonaalis katsekeha pinda ja seejärel kallutatakse tööriist alla, mille tulemusel katsekeha pind tõmmatakse üles ning puruneb. *Pick-testiga* hinnatakse puidupinna tugevust ja lõhenemise pikkust, millest järeldatakse mädanike olemasolu ja leviku suurus, kasutades standardit EN 252 (2014) [35; 37]. Mädanikuga nakatumata puit puruneb heliga ning üles tõmmatud puidu laastud on pikad. Mädanikuga nakatunud puit ei tekita laastu üles tõmmates heli ning murdub tööriista kohal pehmelt ja kergesti, sealjuures on laast lühike.

Tabel 3.4 Mädanike hindamistabel vastavalt standardile EN 252 (2014) [37]

Hinne	Klassifikatsioon	Definitsioon
0	Mädanik puudub	Pole ühtegi muutust peale värvimuutuse.
1	Kergelt mädanenud	Tajutavad muutused, kus mädanike intensiivsus, positsioon ja levik on piiratud. Muutused esinevad ainult puidupinnal ja puit võib olla pehmenenud.
2	Keskmiselt mädanenud	Selged muutused, kus puit on pehmenenud vähemalt 2 mm sügavusele ja 10 cm <sup>2</sup> ulatuses või vähemalt 5 mm sügavusele ja on alla 1 cm <sup>2</sup> lai.

Tabel 3.4 järg

Hinne	Klassifikatsioon	Definitsioon
3	Tugevalt mädanenud	Tõsised muutused, kus märgatav lagunemine ulatub vähemalt 3 mm sügavusele ja katab 25 cm <sup>2</sup> või on pehmenenud vähemalt 10 mm sügavusele kitsamas lauses.
4	Täielikult mädanenud	Täielikult lagunenu

### 3.2.4 Hallitus ja värvimuutvad seened

Hallitust ja värvimuutvate seente olemasolu katsekehadel hinnati visuaalselt 5 korda. Visuaalse hindamise klassifikatsioon vastab tabelile 3.5, mis on võetud standardist EN 152:2011 [38].

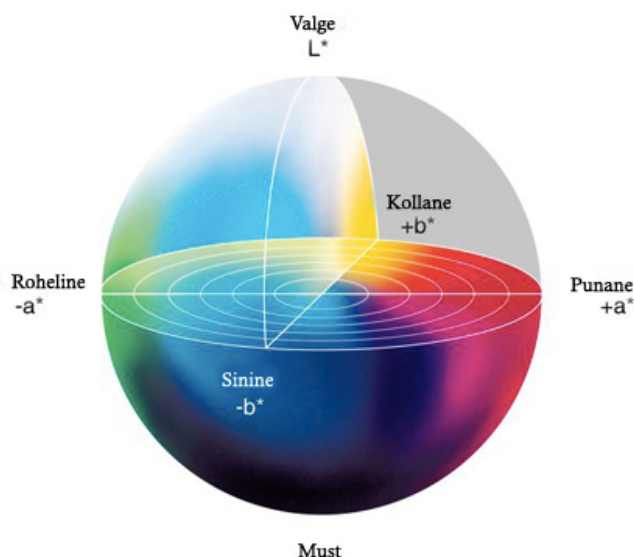
Tabel 3.5 Hallituse ja värvimuutvate seente hindamistabel vastavalt standardile EN 152:2011 [38]

Hinne	Klassifikatsioon	Definitsioon
0	Muutusteta	Visuaalselt pole puidupinnal toimunud ühtegi muutust.
1	Väike muutus	Muutused on toimunud ainult mõnes kohas väikeste kolooniatena, mis ei ole laiemad kui 1,5 mm ja 4 mm pikad.
2	Keskmine muutus	1/3 puidu pinnast on kaetud hallituse või seente kolooniatega.
3	Suur muutus	Rohkem kui 1/3 puidu pinnast on kaetud hallituse või seente kolooniatega.

### 3.2.5 Värvimuutus

Katsekehade värvuse muutust mõõdetakse tabeli 3.3 kohaselt iga 6 kuu tagant, kuid kuna uurimus kestis 8 kuud, mõõdeti värvust võimaluse korral korra kuus. Värvimuutuse tuvastamiseks kasutati CIE (pr. k. *Commission Internationale de l'Éclairage*) L\*a\*b koordinaate, kasutades Minolta CR-100/CR-110 kolorimeetrit. CIE L\* koordinaat determineerib heledust, a\* on kromaatileine koordinaat punase-rohelise teljel ning b\* on kromaatileine koordinaat kollase-sinise teljel (vt. joonis 3.5). Värvimuutust teostati katsekehal kolmes kohas: äärtest 30 mm kaugusel ja katsekeha pinna keskpunktis (vt. joonis 3.3). Saadud L\*a\*b koordinaatide põhjal arvutati iga koordinaadi värvuse muutused ( $\Delta$ ), mille põhjal arvutati kogu katsekeha värvuse muutus  $\Delta E$  [35]:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3.2)$$



Joonis 3.6 CIE L\*a\*b\*-värvimudel [39]

### 3.2.6 Kruvide korrosioon

Kruvide korrosiooni hinnati visuaalselt vastavalt 2-3 korda kasutades tabelit 3.6 ning viidi üks kord läbi katse TTÜ laboris. Katses osalesid EMÜ ja TTÜ COST FP1303 projekti katselaua kruvid. Katse eesmärgiks oli kalkuleerida metallikadu (%) ja korrosiooni sügavus (mm), mis viidi läbi järgmiselt:

1. Kruvisi hoiti 5 minutit Clark'I lahuses, mis koosneb kontsentreeritud vesinikkloriidhappest 20 g/l antimonooksiidi ja 20 g/l metüülkloriidiga
2. Puhastati 2 minutit kuumas vees
3. Lasti 10 sekundit nõrguda kuumas jooksvas kraanivees
4. Kuivatati puhta salvrätikuga
5. Kasteti 30 sekundit 96% etanoolis
6. Kuivatati puhta salvrätikuga
7. Kuivatati 24 tundi ahjus [35]

Korrosiooni tulemusel tekkinud kruvide metallikadu (%) arvutati järgmiselt:

$$MeL = \frac{(m_{alg} - m_{lõpp})}{m_{alg}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

kus  $MeL$  - metallikadu (%) (ingl. k. *metal loss*)

$m_{alg}$  - kruvide mass enne labori katse sooritamist (g)

$m_{lõpp}$  - kruvide mass pärast labori katset (g) [35]



Kruvide korrosiooni sügavust (mm) arutati järgmiselt:

$$d_{\text{korrosioon}} = \frac{1}{2} \cdot (\varnothing_{\text{alg}} - \varnothing_{\text{lõpp}}) \quad (3.4)$$

kus  $d_{\text{korrosioon}}$  – korrosiooni sügavus (mm)

$\varnothing_{\text{alg}}$  – diameeter enne labori katse sooritamist

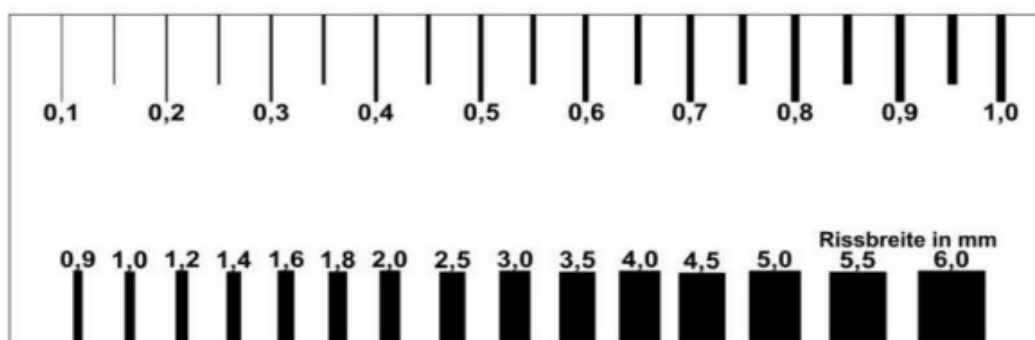
$\varnothing_{\text{lõpp}}$  – diameeter pärast labori katset [35]

Tabel 3.6 Kruvide korrosiooni visuaalse hindamise klassifikatsioon [35]

Hinne	Klassifikatsioon	Definitsioon
0	Korrosioon puudub	
1	Väike korrosioon	<5% pinnast on korrodeerunud
2	Kerge korrosioon	5-50% pinnast on korrodeerunud
3	Tõsine korrosioon	50-95% pinnast on korrodeerunud
4	Täielikult korrodeerunud	>95% pinnast on korrodeerunud

### 3.2.7 Pragude teke

Katsekehade pealispinnal mõõdetakse pragude pikkust, arvu ja keskmist laiust. Hiljem arvutatakse pragude keskmine pikkus, kogus, laius ja standardhälbed. Pragudeks loetakse lõhesi puidupinnal, mis ületavad pikkuse 5 mm. Pragude pikkust mõõdetakse tavalise joonlauaga ning laiust spetsiaalse joonlauaga, mis on kujutatud joonisel 3.6.



Joonis 3.7 Spetsiaalne joonlaud pragude laiuse mõõtmiseks [35]

## 4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

COST FP1303 projekt on kestnud alates 2014. aasta sügisest ja Imprest AS katselaud pandi üles 8. mail 2016 ning katsekehade vastupidavuse uurimus väliskeskkonas jätkub ka edaspidi. Käesolevad tulemused on saadud perioodil 20.10.2017- 07.05.2018. Andmeid ja tulemusi on jälgitud iga kuiselt, seejärel analüüsitud, võrreldud varasematega ja omavahel. Antud uurimus kestab edasi, mistõttu on hiljem võimalik teha kontrastsemaid järeldusi.

### 4.1 Niiskusesisaldus ja temperatuur

COST FP1303 ja Imprest AS katsekehade niiskusesisaldust ja temperatuuri mõõdeti iga tunni aja tagant. Lisa 1 joonistelt on näha, et puiduliikide niiskusesisaldus muutub väikese hilinemisega vastavalt õhuniiskusele ja sademete kogusele. COST FP1303 ja Imprest AS puidu niiskusesisaldus jääb vastavalt vahemikku 10,7%-57,7% ja 4,7%-41,6%, kus suhteline õhuniiskus kõigub 39% ja 99% vahel. Katsekehade temperatuur muutub seevastu samamoodi nagu õhu temperatuur (vt. Lisa 2). COST FP1303 ja Imprest AS katsekehade temperatuur jääb vastavalt vahemikku -13,7°C-18,6°C ja -14,7°C -6,9°C, kus õhutemperatuur kõigub -17,5°C ja 20,3°C vahel. Tihti lähenesid katsekehade temperatuurid õhutemperatuuridele, mis tõestab puidu halba soojusjuhtivust. Antud töös olid kõige kõrgema temperatuuriga COST FP1303 termopuit ja Imprest AS esimese grupi immutatud harilikust kuusest katsekehad. Liisa Truusa bakalaureusetöös ületas termotöödeldud harilikust kuusest katsekehade temperatuur õhutemperatuuri koguni 7°C võrra [40].

COST FP1303 katsekehadest oli üldiselt kõige suurema niiskusesisaldusega harilikust tammest katsekehad ning kõige väiksema niiskusesisaldusega termotöödeldud harilikust kuusest katsekehad. Harilikust tammest katsekehad on üldiselt kõige suurema niiskusesisaldusega, sest tema tihedus on hariliku kuuse omast suurem ning soonte tõttu imab rohkem niiskust. Kõige kõrgema niiskusesisalduse saavutas aga harilikust kuusest katsekehad (57,7%) ning kõige madalama termotöödeldud kuusest katsekehad (10,7%). Hariliku kuuse maltspuidu osa imab hästi niiskust, mistõttu katsekehad on vastuvõtlikumad hallitusele ja/või värvimuutvatele seentele. Liisa Truusa bakalaureusetöö tulemustes olid harilikust tammest katsekehad samuti kõige suurema niiskusesisaldusega ning kõige madalamaga olid harilikust kuusest katsekehad [40]. Seega võib järeldada, et termotöötlus vähendab niiskuspaisumist pikema aja jooksul.



Imprest AS katsekehaded sõltus õhuniiskusest ja sademetest kõige rohkem 10 kordse puiduimmuutisaldusega esimese grupi katsekehad (1/1-1/3) ning kõige vähem teise grupi katsekehad (2/1-2/3), mida immutati kõige väiksemate immutustsüklitega. Saadud tulemus tõestab, et 10 kordne puituimmuutis kasutamine ei paranda hariliku kuuse vastupidavust väliskeskkonnas. Imprest AS teise grupi katsekehad olid ühtlasi kõige madalama niiskusesisaldusega katsekehad võrreldes kahte katselauda omavahel. Peeter Tubli magistr töö tulemustes oli aga selgelt kõige suurema niiskusesisaldusega kolmanda grupi katsekehad, mis olid immutatud Imprest AS nõuete kohaselt [34]. Saadud erinevus võib tulla seetõttu, et katsekehade vastupidavus niiskusele aja möödudes muutub.

## 4.2 Mädanike teke

Mädanike teket määrati visuaalselt hindamistabeli 3.4 ja *pick-testi* alusel. Kogu uurimisperioodi jooksul ei ilmnenud visuaalseid mädanike tekke tunnuseid, s.t kõiki katsekehi hinnati hindega “0 – mädanik puudub”. Ka Peeter Tubli magistr töö “Immutatud puidu vastupidavus väliskeskkonnas” viimasel mõõtmisel 05. mail 2017. aastal hinnati Imprest AS katsekehi hindega “0” [34]. Osadel COST FP1303 katsekehadel esines värvimuutust, kuid see oli tingitud puitu värvivatest seentest.

Mädanik tekib niiskuse, soojuse ja hapniku koosmõjul, mis tähendab, et antud kliimatingimustes jäi puudu niiskusest ja/või soojusest. Katsekehad olid asetatud katusepinnast kõrgemale lauaraamile, mis parandab katsekehade vastupidavust mädanikele. Esimesena peaks mädanikuga nakatuma töötlemata harilik kuusk, kuna töötlemata kuusepuit on kõige vastuvõtlikum erinevatele bioloogilistele teguritele. Kõige tugevama biokindluse peaks tagama puidu immutamine, kuna immutatud puidu hüdrofoobsuse tõttu ei saa mädanikud niiskuse toimel tekkida. Harilik tamm on seevastu vastupidavam mädanike tekkele kui harilik kuusk, kuid sellegipoolest oli ka harilik tamm töötlemata ning võib nakatuda mädanikega.

*Pick-test* sooritati COST FP1303 projekti katsekehadel B1 ja B2 ehk töötlemata harilikust kuusest katsekehadel, kuna mädanike tekke tõenäosus oli nendel katsekehadel kõige suurem. *Pick-testi* tulemusest võib järeldada, et ükski katsekeha ei olnud nakatunud mädanikuga. Kruvikeerajaga üles tõmmatud puitlaast oli pikk ning tekitas murdumise heli. Joonisel 4.1 on ka näha, et antud katsekeha B1 oli värvi muutnud, mida on tekitanud puitu värvivad seened.



Joonis 4.1 *Pick-testi* tulemus COST FP1303 projekti katsekehal B1

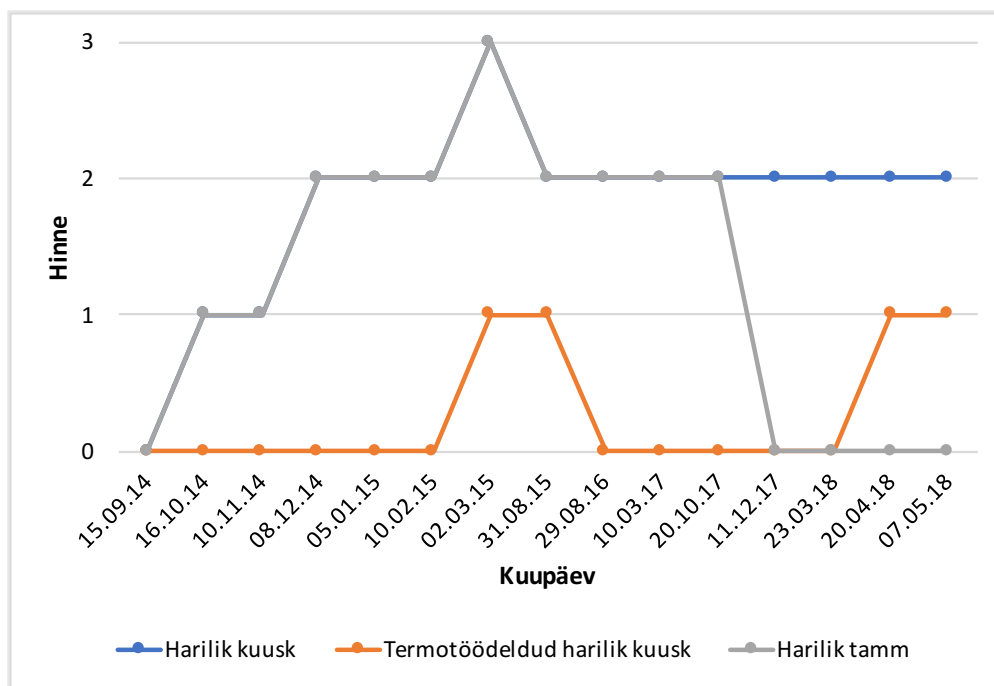
### 4.3 Hallitus ja värvimuutvad seened

Hallituse ja värvimuutvate seente teket hinnati visuaalselt käesoleva uurimuse perioodil 5 korda tabeli 3.5 järgi. Imprest AS katsekehadel ei esinenud hallitust ega värvimuutvaid seeni, mis hinnati hindegaga “0 - muutuseta”. Peeter Tubli magistritöös on Imprest AS katsekehad saanud samuti hindeks “0 - muutuseta” [34]. Seega ei ole Imprest AS katsekehadel tekkinud 2 aastaga värvimuutvate seente ega hallituse tekke tunnuseid.

COST FP1303 projekti katsekehad olid nakatunud nii hallituse kui ka rohevust ja sinavust tekitavate seentega. Lisas 3 on toodud COST FP1303 kõikide katsekehade hinded hallitusele ja värvimuutvatele seentele perioodil 11.12.2017 – 07.05.2017. Eesti Maaülikooli harilikust kuusest töötlemata katsekehad hinnati 24. oktoobril 2017. aastal hindegaga “3 – suur muutus” ning ülejäänud katsekehad hindegaga “2 – keskmine muutus”. Võrreldes EMÜ katselauda TTÜ omaga, siis EMÜ katselaud on kaetud suuremate kolooniate hallituse ja/või värvimuutvate seentega.

Jooniselt 4.4 selgub, et esimesel aastal on COST FP1303 katsekehad olnud rohkem nakatunud värvimuutvate seentega kui kolmandal aastal ehk antud uurimuses. Juba 4. nädalal ilmnisid töötlemata harilikule kuusele ja tammele värvimuutused ning 24. nädalal hinnati kõrgeima hindegaga “3”. Saadud tulemus tuleneb puidu suurest niiskusesisaldusest, mis harilikul tammel antud

uurimuses kahanes. Termotöödeldud harilikule kuusele ilmnesid esimesed muutused alles 24. nädalal [40]. Antud uurimuses olid harilikust kuusest katsekehad B1 ja B2 ainukesed, mis said pidevalt hindeid üle "0". 20. aprillil 2018. aastal ilmnesid esimesed muutused termotöödeldud harilikust kuusest katsekehal ning harilik tamm püsis muutusteta. Seesuguse erinevuse põhjuseks võib olla ilmastiku pidev muutumine. Mõni talv on olnud lumine, kuid mõni talv sajab rohkem vihma. Lumi ja jää võivad talvel pindmise hallituse maha nühkida, mistõttu võib saada erinevatel aastatel erinevaid tulemusi. Seetõttu nähtuvad graafikutelt talviti langused. Lume ja jää tõttu on saanud mehaaniliselt kashjustada ka harilikust tammest katsekeha B9. Lisaks on harilikul tammel raskem määrata hallitust ja värvimuutvaid seeni, kuna katsekeha pind on tekstuurne ja kiud väliskeskkonna tegurite tulemusel puidupinnal püsti.

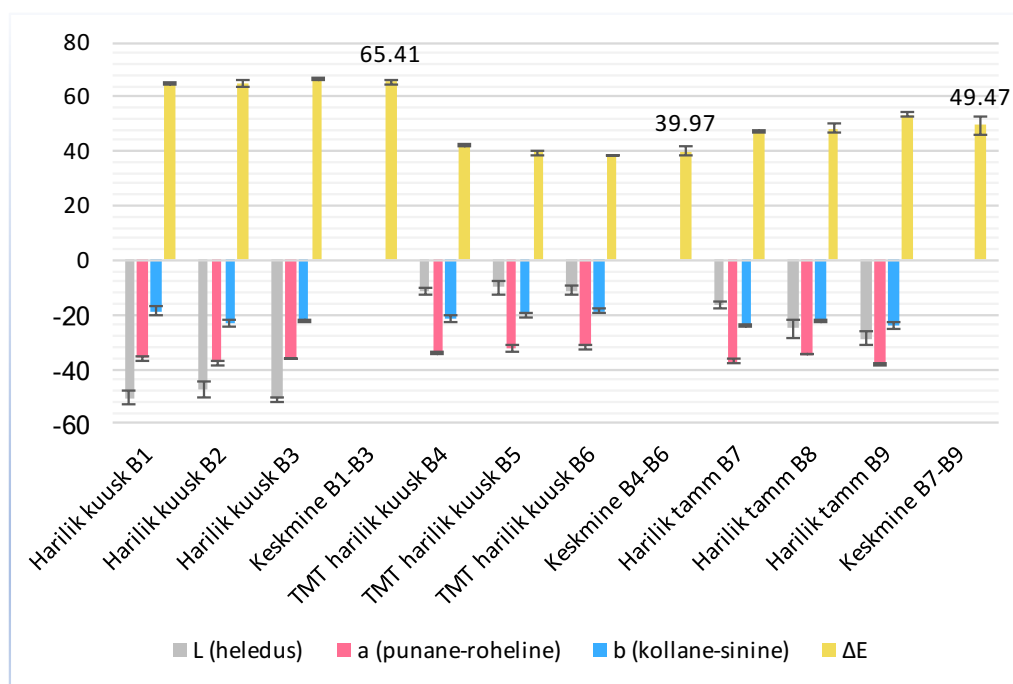


Joonis 4.2 COST FP1303 katsekehade hallituse ja värvimuutvate seente hinded 3 aasta jooksul

Katse tulemustest võib järeldada, et hallitusele ja värvimuutvatele seentele on kõige vastupidavam olnud immutatud harilik kuusk ja kõige madalam biokindlus on töötlemata harilikul kuusel. Termotöödeldud harilik kuusk on see-eest töötlemata harilikust kuusest vastupidavam. Harilik tamm olnud hallitustele ja värvimuutvatele seentele sama vastupidavam kui harilik kuusk, v.a kolmandal aastal, kus hallituse ega värvimuutvate seente teket ei ilmnenud. Põhjus tuleneb külmast ja jäisest talvest, mis on pindmise hallituse ja värvimuutuse maha nühkinud.

## 4.4 Värvimuutus väliskeskkonna mõjul

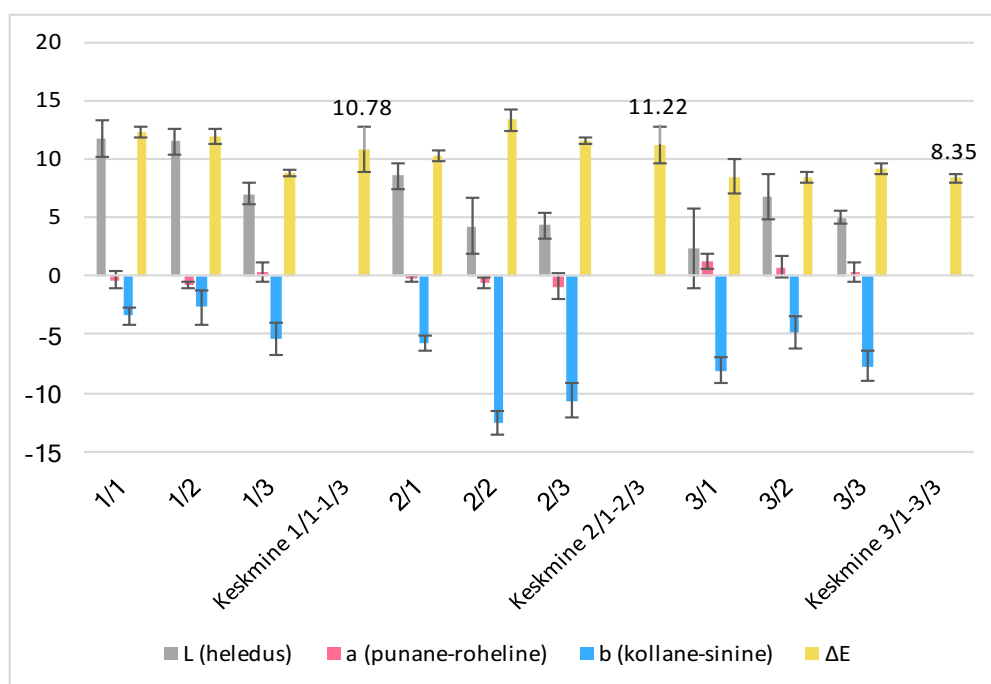
COST FP1303 ja Imprest AS katsekehade värvimuutust mõõdeti Minolta kolorimeetriga 6 korda kasutades CIE L\*a\*b koordinaate. Tulemused arvutati valemiga 3.2. Jooniselt 4.2 selgub, et COST FP1303 harilikust kuusest, termotöödeldud harilikust kuusest ja harilikust tammest katsekehade kogu värvimuutus ( $\Delta E$ ) on olnud vastavalt 65,4, 40 ja 49,5. Tulemus näitab mitme ühiku võrra on värvus koordinaatidel muutunud võrreldes algandmetega (vt. Lisa 4). Seega on kõige rohkem on värvi muutnud harilikust kuusest katsekehad ja kõige vähem termotöödeldud kuusest katsekehad. Samasuguse tulemuse on saanud ka Liisa Truusa oma bakalaureusetöös, kus ta mõõtis värvuse muutust 9 kuu jooksul pärast katselaua eksponeerimist. Samuti võib järeldada, et kõik puiduliigid tumenevad, kuid harilikust kuusest ja tammest katsekehad rohkem kui termotöödeldud harilikust kuusest katsekehad. Saadud tulemus kinnitab teooriat, et heledamad puiduliigid väliskeskkonnas pigem tumenevad ja tumedamad (nt. termotöödeldud puit) helenevad. Ülejäänud parameetrite ( $\Delta E$ , a, b) muutuse suurus on üldiselt kasvanud võrreldes antud tulemusi Liisa Truusa bakalaureusetöö tulemustega [40]. Lisas 5 on toodud COST FP1303 ja Imprest AS kogu värvuse muutus antud uurimisperiodil.



Joonis 4.3 COST FP1303 katsekehade kogu värvuse muutus katsekeha kohta ajaperioodil 15.09.2014-07.05.2018

Jooniselt 4.3 on näha, et Imprest AS katsekehadest on kõige rohkem värvust muutnud 2 aastaga immutatud harilikust kuusest katsekehad 2/1-2/3 ja kõige vähem 3/1-3/3, vastavalt 11,2 ja 8,4 ühikut. Peeter Tubli magistratöö viimasel mõõtmisel 3. mai 2017. aastal on saadud samasugune

edetabel, kuid teistsuguste väärtustega [34]. Saadud tulemustest võib järeldada, et kolmanda grupi katsekehad, mis olid immutatud Impralit KDS-ga nõuete kohaselt, on kõige vastupidavamad värvuse muutusele. Seevastu teise grupi katsekehad, mille immutustsüklid olid võrdlemisi lühikesed, on olnud kõige vähem vastupidavad. Lisaks ei aita harilikust kuusest katsekehade vastupidavusele kaasa puiduimmuuti koguse tõstmine, mida kasutati esimese grupi katsekehade puhul. Jooniselt 4.3 nähtub ka, et kõik katsekehad on tumenenud võrreldes Peeter Tubli viimaste mõõtmistulemustega [34]. Parameeter “a” on kõikide katsekehade puhul kasvanud, mis tähendab, et värvus on kaldunud rohkem punase kui roheline poole (vt. joonis 3.5). Lisaks on parameeter “b” oluliselt kahanenud, mis tähendab, et värvus on kaldunud rohkem sinise kui kollase poole.



Joonis 4.4 Imprest AS katsekehade kogu värvuse muutus katsekeha kohta ajaperioodil 08.05.2016-07.05.2018

Puidu värvus muutub värvimuutvate seente ja hallituse tõttu, mida on selgelt näha COST FP1303 harilikust kuusest katsekehadel. Samuti tekitab päikesekiirgus puidus fotokeemilisi reaktsiooni, mille toimel puidu keemiline koostis muutub ja värvus muutub. Pikema ajalise suurema puidu niiskusesisalduse tõttu saavutab puit hallika värvuse. Termotöötusega paraneb puidu vastupidavus värvimuutusele, mida tõestati eelnevalt toodud Croitoru et. al uuringus. [25] Kokkuvõttes muutuvad nii COST FP1303 kui ka Imprest AS heledamad katsekehad (harilikust kuusest ja harilikust tammest) ajaga tumedamaks ja tumedamad (termotöödeldud kuusest) katsekehad heledamaks. Kõige vastupidavamad värvuse muutusele on olnud Imprest AS immutatud harilikust kuusest katsekehad ja kõige vähem COST FP1303 töötlemata harilikust kuusest katsekehadel.

## 4.5 Kruvide korrosioon

Kruvide korrosiooni hinnati visuaalselt COST FP1303 katsekehadel 3 korda ning Imprest AS katsekehadel 2 korda tabeli 3.6 järgi. Kruvide korrosiooni visuaalsel hindamisel selgus, et COST FP1303 ja Imprest AS kõik roostevabad kruvid on saanud alates katsekehade kinnitamisest laudaraamile hindeks "0 - korrosioon puudub". 20. aprillil läbi viidud mõõtmistel ilmnisid aga esimesed muutused COST FP1303 termotöödeldud puitu kinnitatud roostevabades kruvides ning said hindeks "1", mis tähendab, et <5% pinnast on korrodeerunud. Andersson & Jermer uurisid erinevatest terastest naelte ja kruvide korrosiooni teket termotöödeldud ning töötlemata harilikus kuuses ning jõudsid tulemusele, et termotöödeldud harilikus kuuses olevad kruvid lähevad kiiremini roostetama kui töötlemata harilikus kuuses [41]. Samale tulemusele jõuti ka antud uurimuses. Lisaks olid termopuitu puuritud avad läinud suuremaks ja rabedaks, mistõttu kruvid logisesid sees.

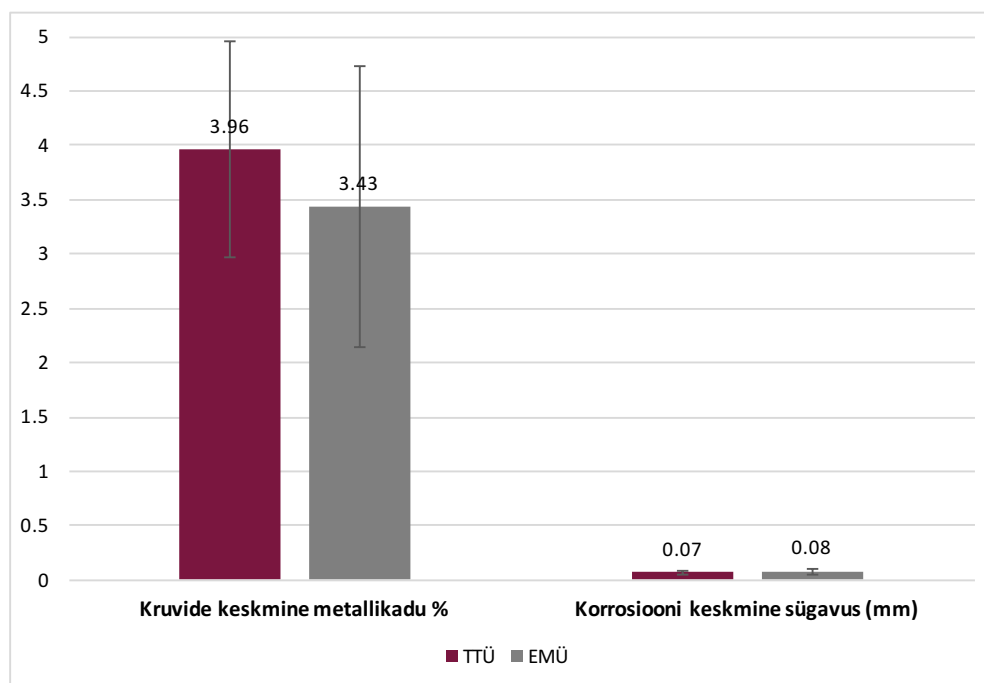
COST FP1303 projekti algsete tulemuste kohaselt Liisa Truusa bakalaureusetöös korrodeerusid tsingitud terasest kruvid juba 4 nädala möödudes ning sarnast tulemust on ka näha antud uurimuses, kus tsingitud terasest kruvid hinnati hindega "1-3" pärast 5 kuud peale kruvide vahetamist [40]. Sealjuures hakkasid harilikus tammes olevad kruvid kõige kiiremini roostetama, mistõttu pärast 5-te kuud hinnati katsekehad hindega "2" või "3" (vt. Lisa 6). Harilik tamm sisaldab tanniinhapet, mille tõttu rauast ja terasest kinnitusvahendid korrodeeruvad. Rauast või terasest kinnitusvahendid hakkavad eraldama oksiide, mis jätavad puidule tumedad plekid [42].

Antud katseperioodil 20.10.2017-20.04.2018 said kõik tsingitud terasest Imprest AS kruvid hindeks "4 - täielikult korrodeerunud", mis tähendab, et kruvid on kaetud üle 95% pinnast roostega. Võrreldes Imprest AS tsingitud terasest kruvisi COST FP1303 omadega, siis 2 aasta möödudes said sama kõrge hinde ainult COST FP1303 projekti harilikust tammest katsekehad. Teisi katsekehi hinnati pärast 2 aastat hindega "3" (vt. Lisa 6). Saadud tulemusest võib järeldada, et tsingitud terasest kruvide ja Impralit KDS-ga immutatud kuusepuidu vahel tekivad keemilised reaktsioonid, mis panevad kruvid kiiremini korrodeeruma. Joonisel 4.5 on näidatud võrdluseks Imprest AS täielikult korrodeerunud tsingitud terasest kruvisi ja korrodeerumata roostevabast terasest kruvisid.



Joonis 4.5 (Vasakul:) Imprest AS katsekehades korrodeerumata roostevabast terasest kruvid (hinne "0") ja (paremal:) täielikult korrodeerunud tsingitud terasest (hinne "4")

Tsingitud terasest kruvide korrosioonikatsetel saadi tulemuseks, et antud kruvide keskmine metallikadu on TTÜ kruvidel 3,96% ja EMÜ kruvidel 3,43%, mis saadi kasutades valemit 3.3 (vt. joonis 4.6). Korrosiooni keskmiseks sügavuseks oli TTÜ tsingitud kruvidel 0,07 mm ja EMÜ kruvidel 0,08 mm, mis saadi kasutades valemit 3.4. Tulemustest võib järeldada, et kuna TTÜ tsingitud kruvide diameeter kahanes vähem, aga mass rohkem kui EMÜ kruvidel, siis nihikuga diameetri mõõtmisel võib esineda mõõtmisvigu. Lisas 7 on toodud pildid katsekäigust.



Joonis 4.6 COST FP1303 projekti TTÜ ja EMÜ kruvide keskmine metallikadu (%) ja korrosiooni sügavus (mm)

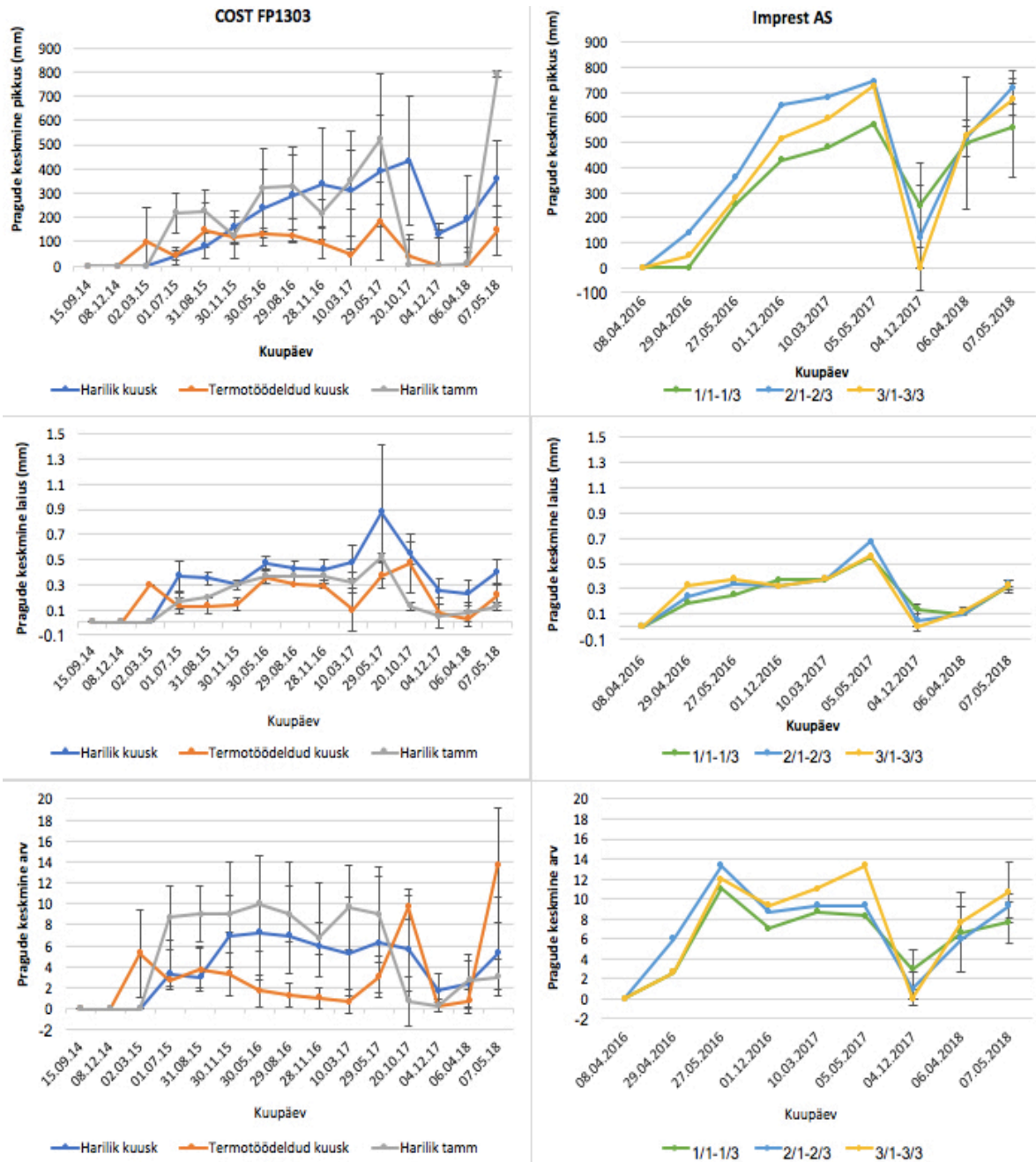
## 4.6 Pragude teke

Pragude pikkust, laiust ja arvu mõõdeti COST FP1303 katsekehadel 4 korda ja Imprest AS katsekehadel 3 korda. Mõlemal katselauaal algasid enamasti praod kinnitusvahendite puuritud avast või otspinnast. Võrreldes Imprest AS katselauda COST FP1303 omaga, võib kogu eksponeerimise ajast järeldada, et Imprest AS katsekehadel on pikemad, laiemad ja rohkem pragusi 2 aasta jooksul kui COST FP1303 katsekehadel 3 aasta jooksul (vt. joonis 4.7).

Jooniselt 4.7 peegeldub kõige selgemini 2017. aasta külm talv. Nii COST FP1303 kui ka Imprest AS katsekehade pragude arv, pikkus ja laius on oluliselt kahanenud. COST FP1303 projekti termotöödeldud kuuse ja hariliku tamme ning Imprest AS katsekehade 3/1-3/3 pikkus on kahanenud koguni nullini või nulli lähedale, mis tähendab, et antud grupi katsekehadel ei olnud pragusi võimalik määrata. Seda seetõttu, et lumi ja jää satuvad pragudesse, kogu niiskus puidus jääb ja praod külmuvad kokku. Antud fakti tõestavad ka Harku ilmajaama andmed, kust on näha, et 2017. aasta talv oli külmem ja kestus pikem kui eelnevatel aastatel. Kevadel on päikesekiirgust rohkem (vt. Lisa 5), niiskus eraldub, puidus tekivad pinged ja puit lõheneb. Seepärast on igal kevadel pikemad, laiemad ja rohkem pragusid. Kevadele järgneb soe ja kuiv suveperiood, kus pragusi tekib veelgi rohkem, mida on näha kõige paremini COST FP1303 katsekehade sügisest pragude rohkusest, pikkusest ja laiusest, mis on mõõdetud antud uurimisperioodi 20. oktoobril. Sügisel hakkab sadama rohkem vihma ning talvel külmub jällegi kogu niiskus puidus, mistõttu on pragude parameetrid kahanevad ja on raskem määrata.

Imprest AS katsekehade praod on olnud peaaegu kaks korda pikemad ja omanud rohkem pragusid, kui COST FP1303 katsekehad 2 aasta möödudes. Küll aga on Imprest AS katsekehade pragude keskmine kogu pikkus ja arv olnud väiksem kui 2017. aasta kevadel, mis tuleneb pragude ühenemisest. Viimasel mõõtmisel 7. mail 2018. aastal on COST FP1303 katsekehadest kõige laiemad praod harilikust kuusest katsekehadel, kõige rohkem pragusi termotöödeldud kuusest katsekehadel ning harilikust tammest pragude keskmine pikkus ületas Imprest AS katsekehade oma. Saadud tulemus on aga loogiline, sest COST FP1303 projekt on kestnud aasta kauem kui Imprest AS oma.





Joonis 4.7 COST FP1303 ja Imprest AS pragude pikkuse (mm), laiuse (mm) ja arvu võrdlus

Võrreldes antud tulemusi projekti algsete tulemustega Liisa Truusa bakalaureusetöös, on kahe aastaga COST FP1303 katsekehade praod arenenud pikemaks ja pragude arvukus on suurenenud [40]. Võrreldes Imprest AS saadud tulemusi Peeter Tubli magistriltöö tulemustega, siis on näha sama mustrit aastaegade mõjust pragudele, kuid erinevusi pragude pikkuses, arvus ja laiuses [34]. Pragude parameetrite erinevus võib tuleneda nii pragude ühinemisest kui ka mõõtjate erinevates mõõtmismetoodikates ja asjaolust, et antud uurimuses kõige pisemaid pragusi ei mõõdetud.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli võrrelda COST FP1303 ja Imprest AS erinevalt töödeldud puitlaudade vastupidavust väliskeskkonnas. COST FP1303 projekt alustas Eestis 2014. aasta sügisel ning katselaud koosneb harilikust kuusest, termotöödeldud harilikust kuusest ja harilikust tammest katsekehadest. Imprest AS katselaud pandi üles 8. mail 2016. aastal Peeter Tubli magistritöö “Immutatud puidu vastupidavus väliskeskkonnas” raames ning koosneb erinevalt immutatud harilikust kuusest katsekehadest. Katsekehad on kinnitatud roostevabast terasest ja tsingitud terasest kruvidega. Regulaarselt mõõdeti mädanike, hallituse, seente, pragude ja kruvide korrosiooni teket, värvuse muutust ning puidu niiskusesisaldust ja temperatuuri. Saadud tulemusi võrreldi Harku ilmajaama andmetega ning analüüsi varasemate tulemustega ja omavahel. Mõlema katselaua väliskatsetused jätkuvad, mistõttu tulemused pole lõplikud.

Puiduliikide niiskusesisaldus muutus väikese hilinemisega vastavalt õhuniiskusele ja sademete kogusele, kuid katsekehade temperatuur muutus vastavalt õhu temperatuurile. Kõige suurema niiskusesisaldusega oli COST FP1303 harilikust tammest katsekehad ning kõige madalamaga Imprest AS kõige väiksemate immutustsüklitega immutatud harilikust kuusest katsekehad (2/1-2/3). Tihti lähenesid katsekehade temperatuurid õhutemperatuuridele, mis tõestab ka puidu halba soojusjuhtivust. Kõige rohkem muutis COST FP1303 katsekehadest värvust harilik kuusk ning kõige vähem Imprest AS immutatud katsekehad, eriti kolmanda grupi katsekehad, mis olid immutatud puiduimmuti Impralit KDS-ga nõuete kohaselt. Saadud tulemused kinnitavad, et heledamad puiduliigid (harilik kuusk ja harilik tamm) pigem tumenevad ja tumedamad (termotöödeldud harilik kuusk) helenevad. Sarnaselt värvimuutusele olid hallitusele ja värvimuutvatele seentele kõige vastupidavamad Imprest AS immutatud harilikust kuusest katsekehad, mis ei olnud nakatunud hallituse ega värvimuutvate seentega. Kõige madalam biokindlus oli COST FP1303 harilikust kuusest katsekehadel, mis olid tugevalt nakatunud sinakat ja rohekat värvi tekitavate seentega. Hallituse ja värvimuutvate seente teke tuleneb suurest niiskusesisaldusest puidust, mis omakorda seletab suurt värvimuutust. See-eest puudusid nii COST FP1303 kui ka Imprest AS katsekehadel mädanike tekke tunnused, mis tähendab, et antud kliimatingimustes jäi puudu niiskusest ja/või soojusest.

Väliskeskkonnas sobib eelistatult kasutada roostevabast terasest kurvisi, mis COST FP1303 termotöödeldud harilikust kuusest katsekehadel läksid korrodeeruma pärast 3. aastat ning Imprest AS katsekehadel korrosioon puudus. Tsingitud terasest kruvid läksid mõlemal katselaual väliskeskkonnas korrodeeruma juba pärast 4. nädalat, kusjuures termiline ja keemiline töötlus ning

harilikus tammes olev tanniinhape panevad rauast ja terasest kinnitusvahendid kiiremini korrodeeruma. Tallinna Tehnikaülikoolis sooritatud laborikatsetest selgus, et COST FP1303 katsekehades olevate tsingitud terasest kruvide keskmine korrosiooni sügavus oli peaaegu 0,1 mm ning keskmine metallikadu 3,7%. Pragude seisukohalt on pikemad, laiemad ja rohkem pragusi Imprest AS katsekehadel, mille muutused on suuremad 2 aasta jooksul kui COST FP1303 katsekehadel 3 aasta jooksul. Termotöödeldud puidul olid kõige lühemad praod. Pragude teke tuleneb madalast niiskusesisaldusest ning lõhenemine saab üldjuhul alguse kruvide avast või otspinnast.

Käesoleva töö kõik eesmärgid said täidetud ning töö tulemused näitasid, et erinev töötlusviis ja puiduliik mõjutavad puidu vastupidavust väliskeskkonnas erinevalt. Imprest AS immutatud harilikku kuuske tuleks kasutada kui on oluline madal puidu niiskusesisaldus, mis tagab väiksema värvimuutuse, vastupidavuse hallitusele ja värvimuutvatele seentele. COST FP1303 kõik katsekehad on aga vastupidavamad pragude tekkele ja puidu temperatuuri muutustele (v.a termotöödeldud harilikust kuusest katsekehad). Paratamatult esines andmete kogumisel probleeme, nimelt COST FP1303 harilikust tammest katsekehade temperatuuri mõõdik oli katki ning Harku ilmajaama andmetes puudus keskmine UV-indeks jaanuarist aprillini. Samuti olid katselauad talviti jääs ja kaetud lumega, mistõttu ei saanud mõõtmisi sooritada. Edasiseks uurimuseks võiks sooritada katsed puidu tugevusele, mis annaks lõplikku ülevaate, milline neist katsekehadest sobiks ehitusmaterjaliks väliskeskkonnas.

## CONCLUSION

The purpose of this bachelor's thesis was to examine COST FP1303 and Imprest AS variously treated wood performance in an outdoor environment. The examination is inspired by COST FP1303 program which started in fall 2014. COST FP1303 specimens are made of Norway spruce, thermally modified Norway spruce and English oak. Imprest AS performance table was set up on May 8<sup>th</sup> 2016 as a result of Peeter Tubli master thesis "Impregnated wood performance in outdoor environment" and is made of differently impregnated Norway spruce specimens. All the specimens were attached with stainless steel and galvanized steel screws to the performance table. In this study, wood decay, fungal attack, mould, cracking, corrosion of wood fasteners, moisture content, temperature and discoloration were measured regularly. The collected results were compared with Harku weather station data, analysed with older results and against each other. Both projects are ongoing and thus the results are not final.

Moisture content of the wood species changed with a little delay according to the air moisture content and rainfall, whereas the temperature of the specimens changed exactly according to the air temperature. COST FP1303 Norway spruce specimens had highest moisture content and the lowest moisture content was in Imprest AS impregnated spruce 2/1-2/3, which had the shortest cycle of impregnation. Specimens' temperature often reached up to the air temperatures, which is the proof of woods' poor thermal conductivity. The most considerable colour change within COST FP1303 specimens appeared in Norway spruce and the lowest in Imprest AS specimens, especially in the third group of impregnated spruce impregnated according to Impralit KDS requirements. Obtained results of colour change confirm that lighter wood species tend to darken (Norway spruce and English oak), but the darker ones (thermally modified spruce) brighten. Similarly to the colour change results, the most durable to mould and fungal attack were all the Imprest AS specimens, where visually no surface disfigurements was detected. COST FP1303 Norway spruce specimens had lowest bio-resistance being infected with blue and green staining fungi. Mould and staining fungi is caused by high wood moisture content which explains remarkable colour change. However, both performance tables were not infected by any decay, which means than given climatic conditions lacked moisture and/or warmth.

Stainless steel screws are recommended to use in outdoor environment, because no visual corrosion was detected in Imprest AS specimens and first change in COST FP1303 thermally modified spruce specimens appeared after 3 years of exposure. Galvanized steel screws were

corroded already after 4 weeks of exposure, where thermal and chemical modification and content of tannic acid in English oak speed up the corrosion of fasteners. Laboratory tests performed in Tallinn University of Technology revealed that the depth of galvanized screws corrosion was almost 0,1 mm and average metal loss was 3,7%. However, the cracks in Imprest AS specimens occurred larger, longer and were more numerous in 2 years compared to COST FP1303 specimens in 3 years. As a matter of fact, the cracks in thermally modified wood were the shortest. Cracking is caused by low moisture content and starts usually from the screw holes or from the end face.

All targets of this thesis were completed and the results showed that different treatment and wood species have different effect to woods' durability in outdoor environment. Imprest AS impregnated spruce specimens should be used when low moisture content of wood is important to ensure less colour changes and resistance to mould and staining fungi. All COST FP1303 specimens, on the other hand, are more resistant to cracking and wood temperature changes (except thermally modified spruce specimens). Inevitably there were problems during data collection, particularly temperature meter of COST FP1303 English oak specimens was out of order and average UV-index from January to April was missing from the data of Harku Weather Station. During winters the performance table was frozen and covered with snow therefore measurements were not performed. Further studies should contain tests on wood durability resulting with outcome, which of these specimens is suitable construction material in outdoor environment.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] W. C. Feist, „Outdoor Wood Weathering and Protection,“ American Chemical Society, Madison, 1990.
- [2] „Wood 101“. <https://treatedwood.com/wood-101/> (Viimati kasutatud 30. märts 2018).
- [3] „The wavelength range of optical radiation.“ <https://light-measurement.com/wavelength-range/> (3. aprill 2018).
- [4] E. Saarman ja U. Veibri, Puiduteadus, Tallinn: Vali Press OÜ, 2006, lk. 17-233.
- [5] P. Kaila, „Sunshine - the worst enemy of wooden facades,“ *Old cultures in new worlds*, 8, Washington, 1987, lk. 1175.
- [6] S. L. Zelinka, „Corrosion of Fasteners in Wood Treated with Newer Wood Preservatives,“ General Technical Report (GTR), 2013.
- [7] A. Chen, „Comparisons of Heat Treated Wood to Chemically Treated and Untreated Wood in Commercial Usages,“ The University of British Columbia, 2014.
- [8] J. N. Stokland, J. Siitonen ja B. G. Jonsson, Biodiversity in dead wood, New York: Cambridge University Press, 2012, lk. 12-21.
- [9] M. Henry, „Ancient Forest Exploration & Research,“ 30. september 2015. <http://www.ancientforest.org/giving-thanks-for-forest-fungi/>. (Viimati kasutatud 30. märts 2018).
- [10] S. Anagnost, „Wood Decay, Fungi, Stain and Mold,“ SUNY College of Environmental Science and Forestry, New York, 2011.
- [11] C. Clausen, „Mold and Mildew on Wood: Causes and Treatment,“ *TechLines*, II-4, lk. 51-55, juuli 1999.
- [12] L. Meyer-Veltrup, C. Brischke ja B. Källander, „Testing the durability of timber above ground: evaluation of different test methods,“ *European Journal of Wood and Wood Products*, 75 (3), lk. 291-304, mai 2017.
- [13] R. R. N. Mvondo, P. Meukam, J. Jeong, D. D. S. Meneses ja E. G. Nkeng, „Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species,“ *Results in Physics*, 7, lk. 2096-2103, 2017.

- [14] O. Schmidt, *Wood and Tree Fungi*, Berlin: Springer, 2006, lk. 326.
- [15] S. Rosner, N. Gierlinger, M. Klepsch, B. Karlsson, R. Evans, S.-O. Lundqvist, J. Světlík, I. Børja, L. Dalsgaard, K. Andreassen, S. Solberg ja S. Jansen, „Hydraulic and mechanical dysfunction of Norway spruce sapwood due to extreme summer drought in Scandinavia,“ *Forest Ecology and Management*, 409, lk. 527-540, veebruar 2018.
- [16] N. Thaler, B. Lesar, M. Kariž ja M. Humar, „Bioincising of Norway spruce wood using wood inhabiting fungi,“ *International Biodeterioration & Biodegradation*, 68, lk. 51-55, märts 2012.
- [17] C. Brischke, C. J. Behnen, M.-T. Lenz, K. Brandt ja E. Melcher, „Durability of oak timber bridges e Impact of inherent wood resistance and environmental conditions,“ *International Biodeterioration & Biodegradation*, lk. 115-123, 21. august 2012.
- [18] N. Thaler ja M. Humar, „Performance of oak, beech and spruce beams after more than 100 years in service,“ *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, lk. 305-310, 13. august 2013.
- [19] T. Sinković, S. Govorčin ja T. Sedlar, „Comparison of physical properties of heat treated and untreated hornbeam wood, beech wood, ash wood and oak wood,“ Croatia, 2012.
- [20] E. D. Tomak, D. Ustaomer, S. Yildiz ja E. Pesman, „Changes in surface and mechanical properties of heat treated wood during natural weathering,“ *Elsevier*, 53 (Measurement), lk. 30-39, juuli 2014.
- [21] H. Militz, „Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art,“ *Enhancing the Durability of Lumber and Engineered Wood Products*, lk. 1-3, 13. november 2002.
- [22] „RT 21-10823et juhenditeatmik,“ mai 2004. .  
<http://www.rakennustieto.fi/rtnet/10823ee/>. (Viimati kasutatud 28. märts 2018).
- [23] „ThermoWood“. <https://www.thermowood.fi/1> (Viimati kasutatud 15. märts 2018).
- [24] J. Jermer ja B.-L. Andersson, „Corrosion of fasteners in heat-treated wood – progress report after two years’ exposure outdoors,“ Stockholm, 2005.

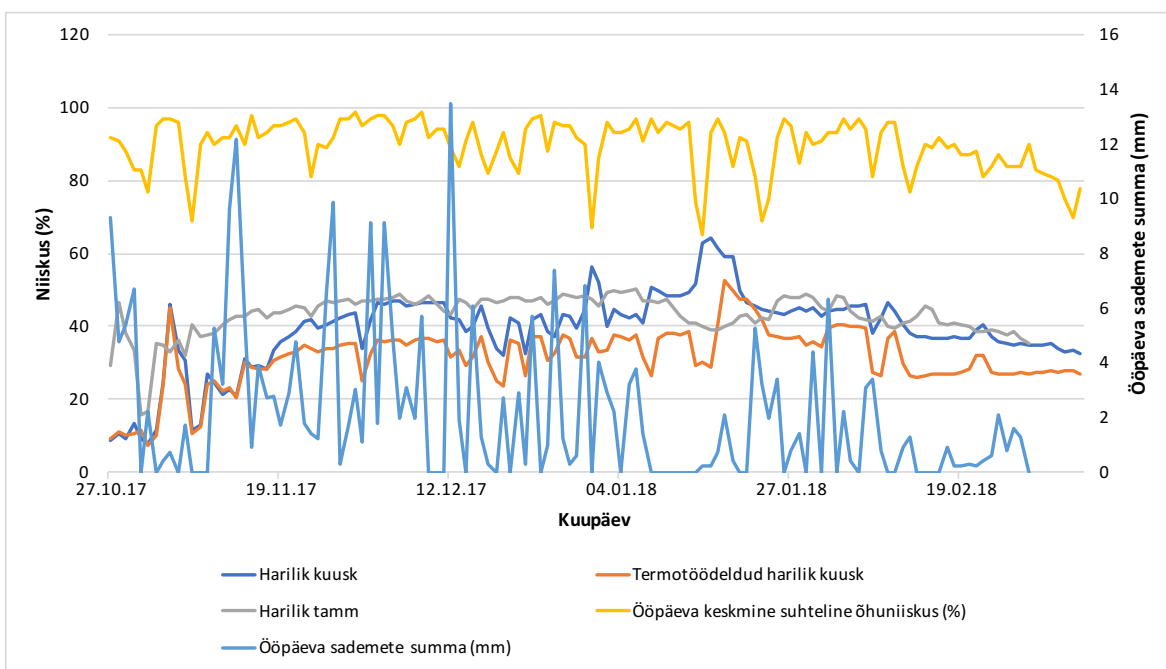
- [25] C. Croitoru, C. Spirchez, A. Lunguleasa, D. Cristea, I. C. Roata, M. A. Pop, T. Bedo, E. M. Stanciu ja A. Pascu, „Surface properties of thermally treated composite wood panels,” *Applied Surface Science*, 438, lk. 114-126, 30. aprill 2018.
- [26] J. C. F. Walker, *Primary Wood Processing*, 2nd ed. Dordrecht: Springer, 2006, lk. 309.
- [27] H. Shen, S. Zhang, J. Cao, J. Jiang ja W. Wang, „Improving anti-weathering performance of thermally modified wood by TiO<sub>2</sub> sol or/and paraffin emulsion,” *Construction and Building Materials*, 169, lk. 372-378, 30. aprill 2018.
- [28] S. A. Ahmed, M. Sehlstedt-Persson ja T. Morén, „Mould susceptibility of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood: Impact of drying, thermal modification, and copper-based preservative,” *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, lk. 284-288, november 2013.
- [29] „COST FP1303 Performance of bio-based building materials.” <http://www.costfp1303.com/en/Sidor/default.aspx>. (Viimati kasutatud 3. mai 2018).
- [30] „COST FP 1303 Cooperative Performance Test - Status update,” oktoober 2014. [https://www.researchgate.net/publication/267538192\\_COST\\_FP\\_1303\\_Cooperative\\_Performance\\_Test\\_-\\_Status\\_update](https://www.researchgate.net/publication/267538192_COST_FP_1303_Cooperative_Performance_Test_-_Status_update). (Viimati kasutatud 28. mai 2018).
- [31] „Imprest”. <http://www.imprest.ee/>. (Viimati kasutatud 30. märts 2018).
- [32] Impralit, „Impralit® -KDS,” Mannheim, 2012.
- [33] EVS-EN 335:2013, „Durability of wood and wood-based products – Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products,” Tallinn, 2013.
- [34] P. Tubli, „Impregnated Wood Performance in Outdoor Environment,” magistritöö. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2017.
- [35] C. Brischke, M. Humar, L. Meyer, S. Bardage ja J. Van den Bulcke, „COST Action FP 1303 – Cooperative Performance Test,” 2014.
- [36] C. Brischke ja S. C. Lampen, „Resistance Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood,” *European Journal of Wood and Wood Products*, 72 (2), lk. 289-292, märts 2014.
- [37] EVS-EN 252:2014, „Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact,” Tallinn, 2014.



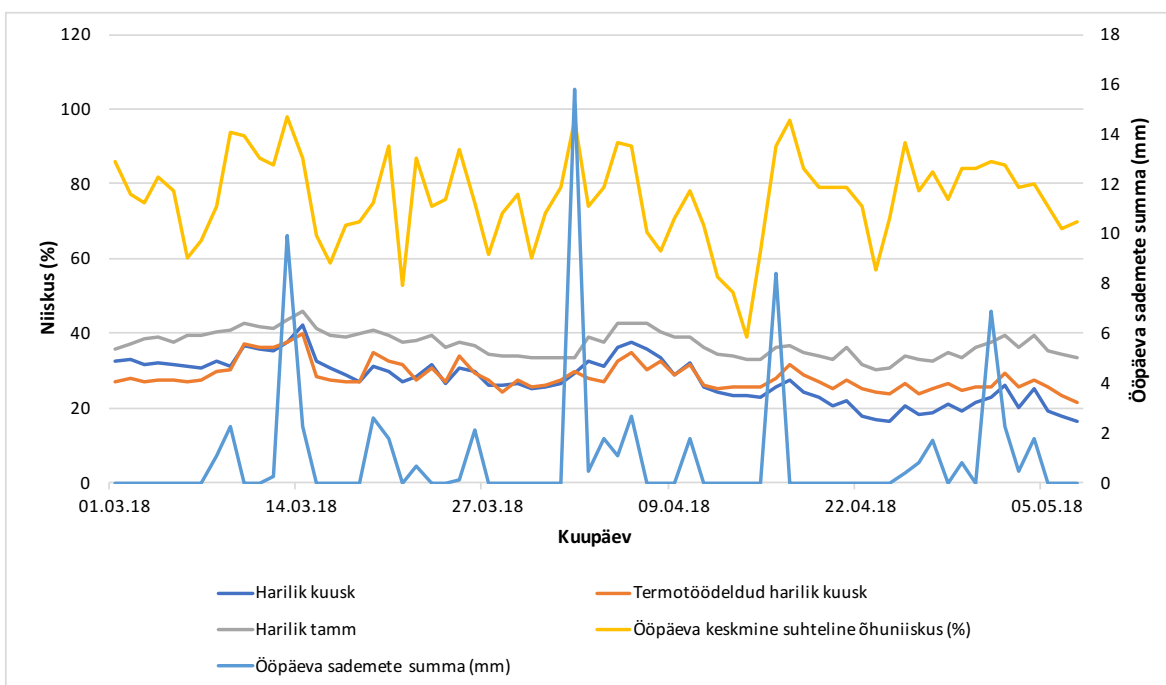
- [38] EVS-EN 152-2011, „Determination of the protective effectiveness of a preservative treatment against blue stain in wood in service - Laboratory method,“ Tallinn, 2011.
- [39] M. Tammert, „CIELAB-värvimudel,“ Tallinna Polütehnikum, 2013.  
[http://opiobjektid.tptlive.ee/Varviop/VT\\_Varvikorrastus\\_Varvimudelid3.htm](http://opiobjektid.tptlive.ee/Varviop/VT_Varvikorrastus_Varvimudelid3.htm).  
(Viimati kasutatud 18. aprill 2018).
- [40] L. Truusa, „Erinevatest puiduliikidest valmistatud laua vastupidavus väliskeskkonnas,“: bakalaureusetöö. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015.
- [41] J. Jöran ja B.-L. Andersson, „Corrosion of fasteners in heat-treated wood – progress report after two years’ exposure outdoors,“ Bangalore, India, 2005.
- [42] J. Young, „What screws do you use in oak?,“ 21. veebruar 2017.  
[http://www.ehow.co.uk/info\\_8345050\\_screws-do-use-oak.html](http://www.ehow.co.uk/info_8345050_screws-do-use-oak.html). (Viimati kasutatud 3. mai 2018).

**LISAD**

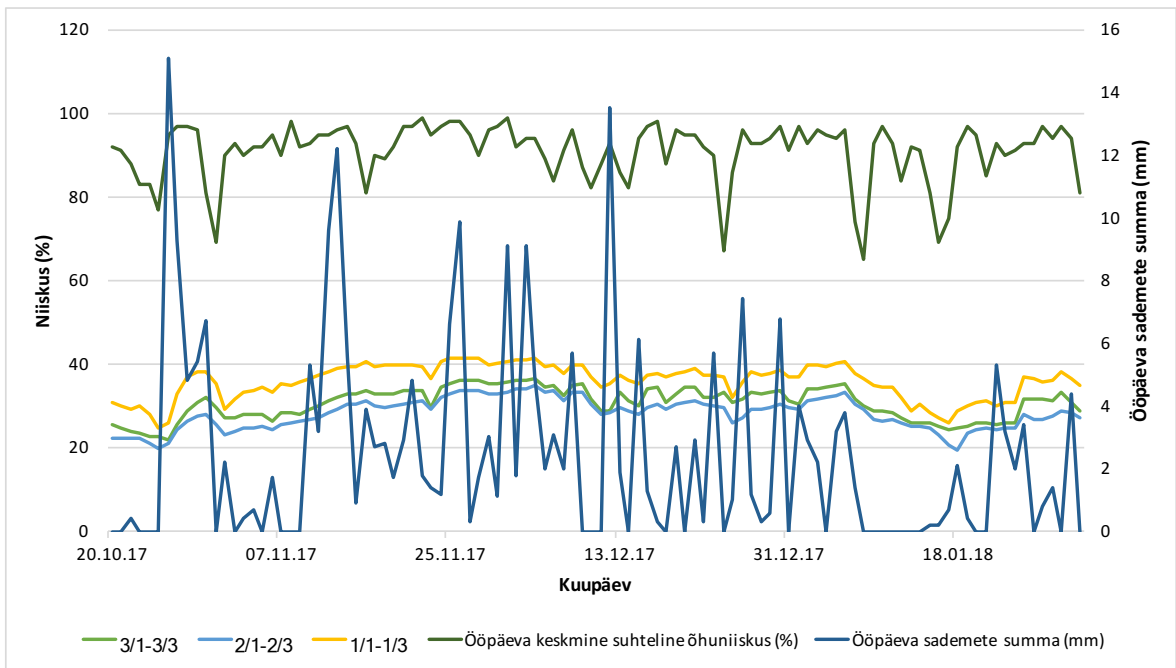
**Lisa 1 COST FP1303 ja Imprest AS ööpäeva keskmise puidu niiskusesisalduse (%) sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest (%) ja ööpäevasest sademete summast (mm)**



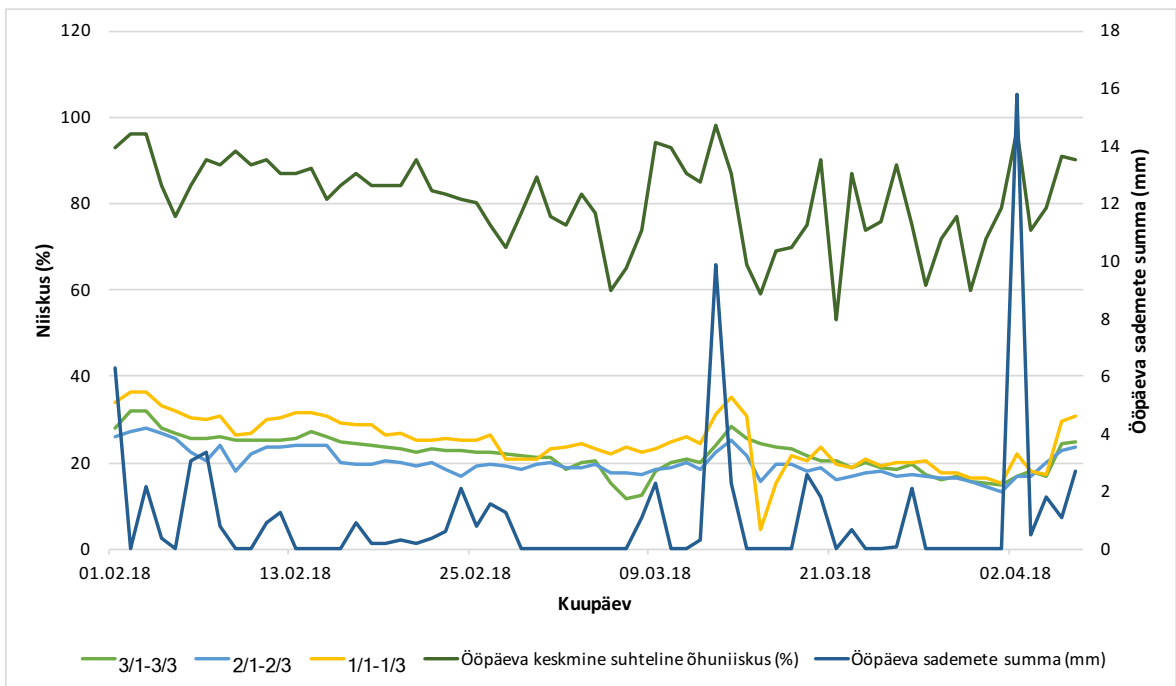
Joonis L1.1 COST FP1303 ööpäeva keskmise puidu niiskusesisalduse (%) sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest (%) ja ööpäevasest sademete summast (mm) ajaperioodil 27.10.2017-28.02.2018



Joonis L1.2 COST FP1303 ööpäeva keskmise puidu niiskusesisalduse (%) sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest (%) ja ööpäevasest sademete summast (mm) ajaperioodil 01.03.2018-07.05.2018

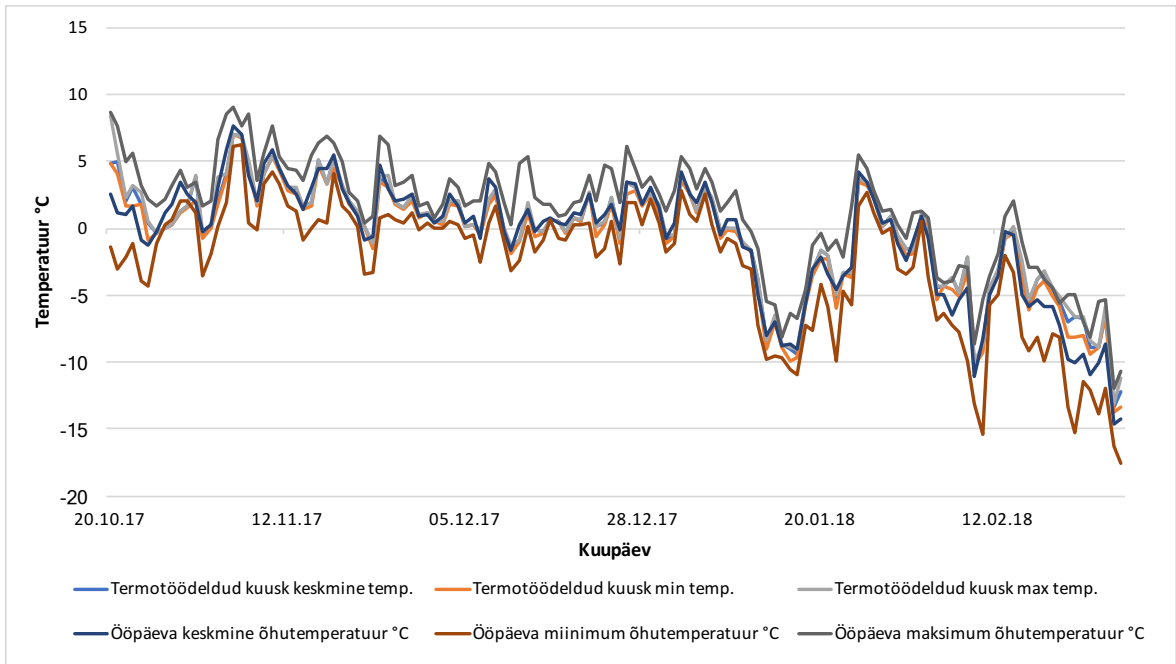


Joonis L1.3 Imprest AS ööpäeva keskmise puidu niiskusesisalduse (%) sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest (%) ja ööpäevasest sademete summast (mm) ajaperioodil 20.10.2017-31.01.2018

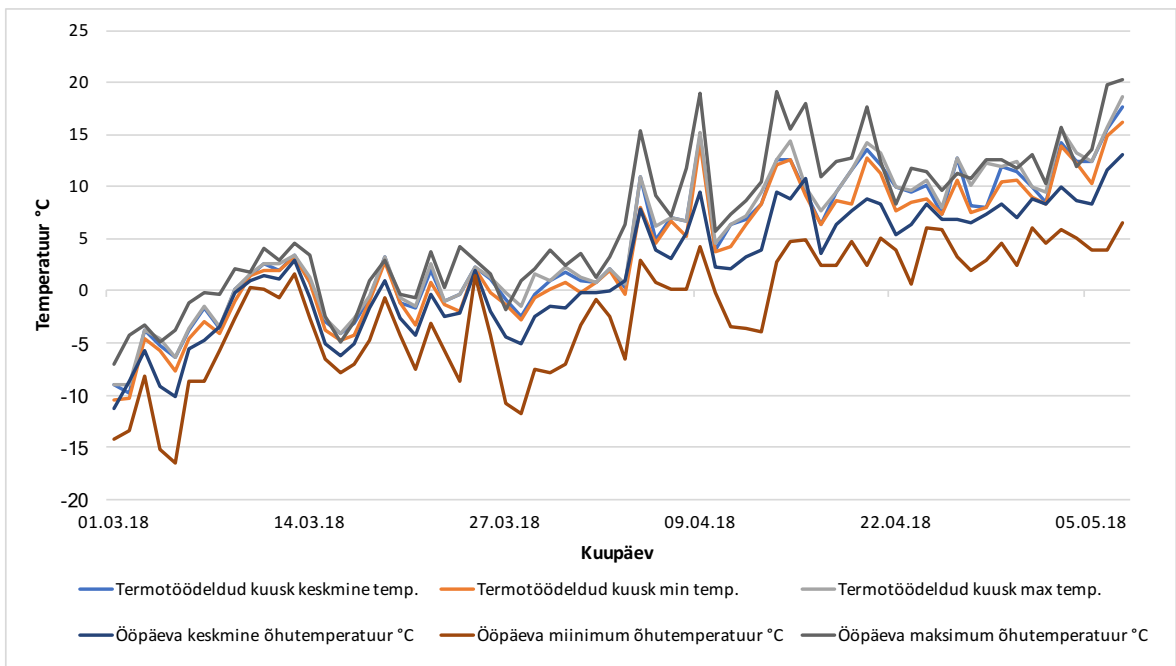


Joonis L1.4 Imprest AS ööpäeva keskmise puidu niiskusesisalduse (%) sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest (%) ja ööpäevasest sademete summast (mm) ajaperioodil 01.02.2018-06.04.2018

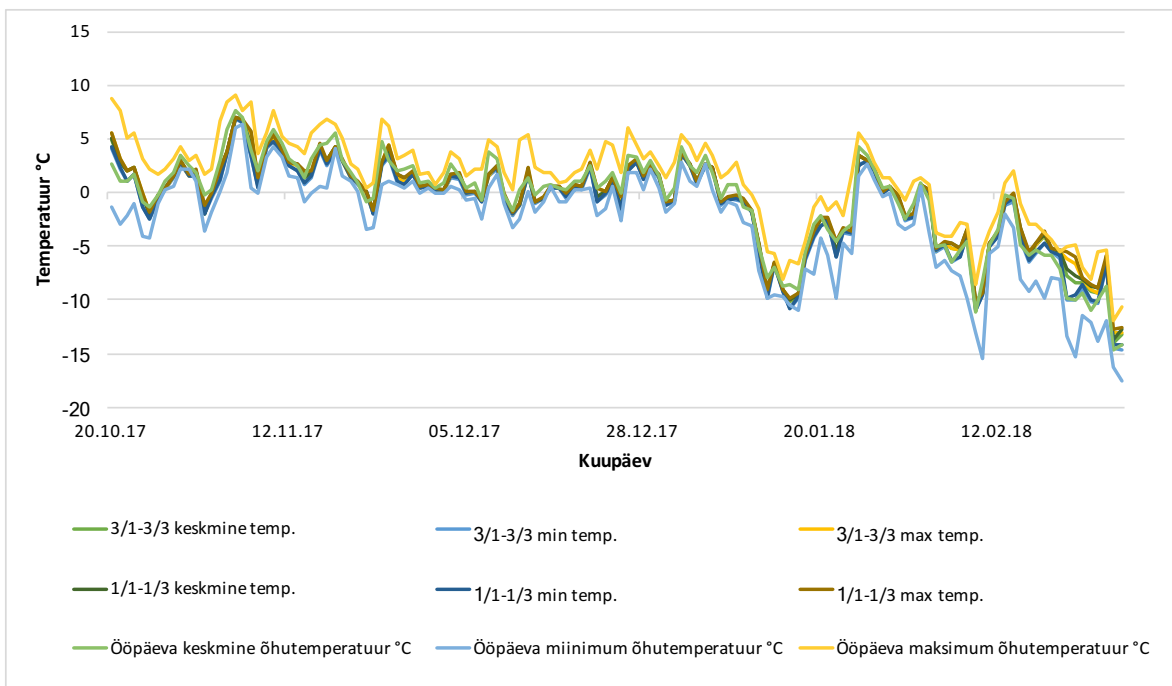
Lisa 2 COST FP1303 ja Imprest AS puidu temperatuuri sõltuvus õhu temperatuurist (°C)



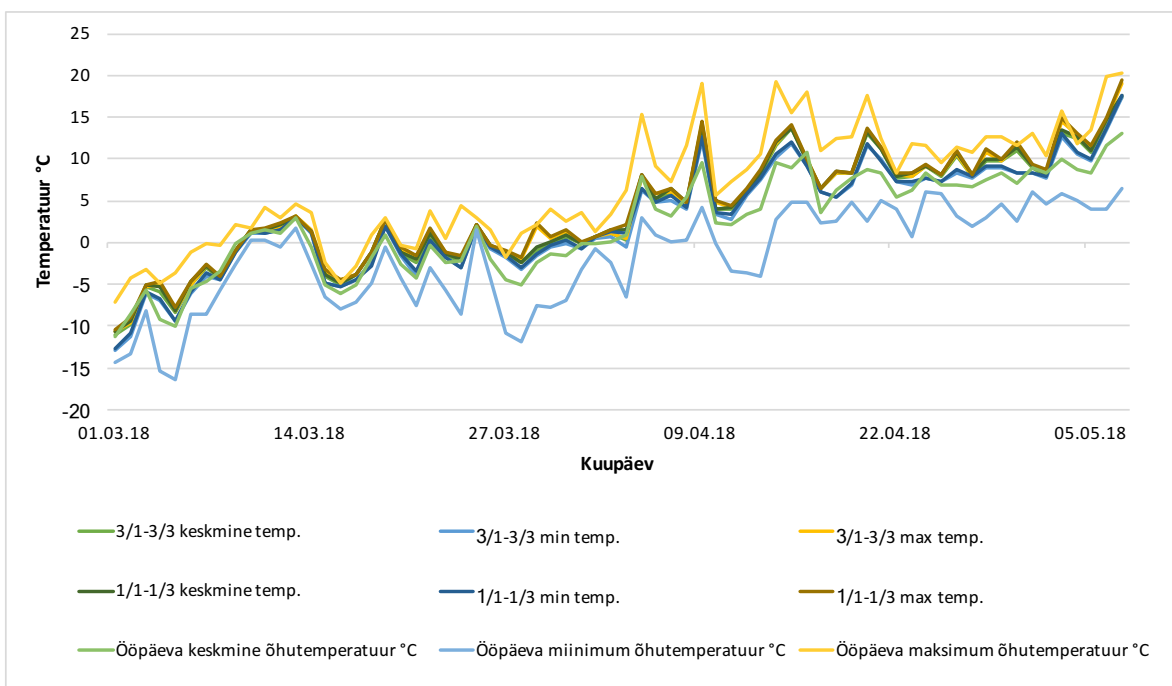
Joonis L2.1 COST FP1303 termotöödeldud kuuse temperatuuride (°C) sõltuvus õhutamperatuurist (°C) ajaperioodil 20.10.2017-28.02.2018



Joonis L2.2 COST FP1303 termotöödeldud kuuse temperatuuride (°C) sõltuvus õhutamperatuurist (°C) ajaperioodil 01.03.2018-07.05.2018

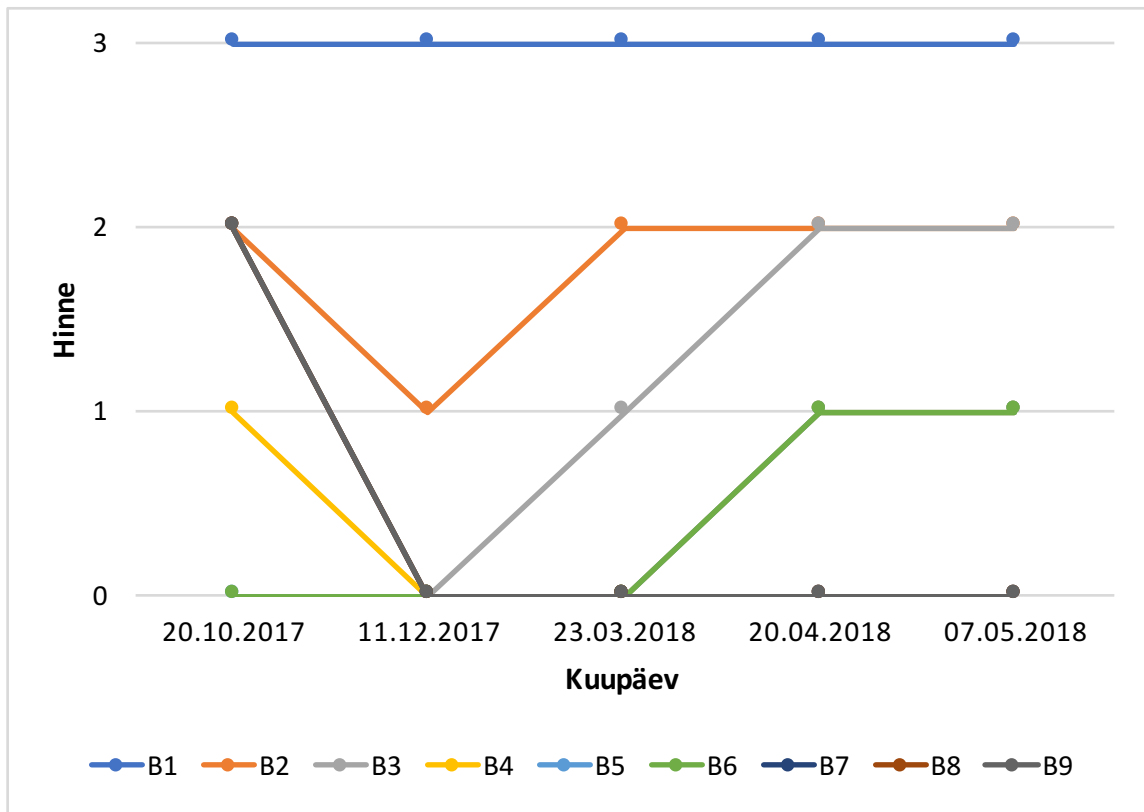


Joonis L2.3 Imprest AS immutatud hariliku kuuse esimese (1/1-1/3) ja kolmanda grupi (3/1-3/3) temperatuuride (°C) sõltuvus õhutemperatuurist (°C) ajaperioodil 20.10.2017-28.02.2018



Joonis L2.4 Imprest AS immutatud hariliku kuuse esimese (1/1-1/3) ja kolmanda grupi (3/1-3/3) temperatuuride (°C) sõltuvus õhutemperatuurist (°C) ajaperioodil 01.03.2018-07.05.2018

Lisa 3 COST FP1303 katsekehade hinded hallitusele ja värvimuutvatele seentele



Joonis L3.1 COST FP1303 katsekehade hinded hallitusele ja värvimuutvatele seentele: B1-B3 tähistab harilikust kuusest, B4-B6 termotöödeldud harilikust kuusest ja B7-B9 harilikust tammest katsekehasid

#### Lisa 4 COST FP1303 ja Imprest AS värvuse algandmed

Tabel L4.1 COST FP1303 värvuse algandmed eksponeerimise kuupäeval 15.09.2014

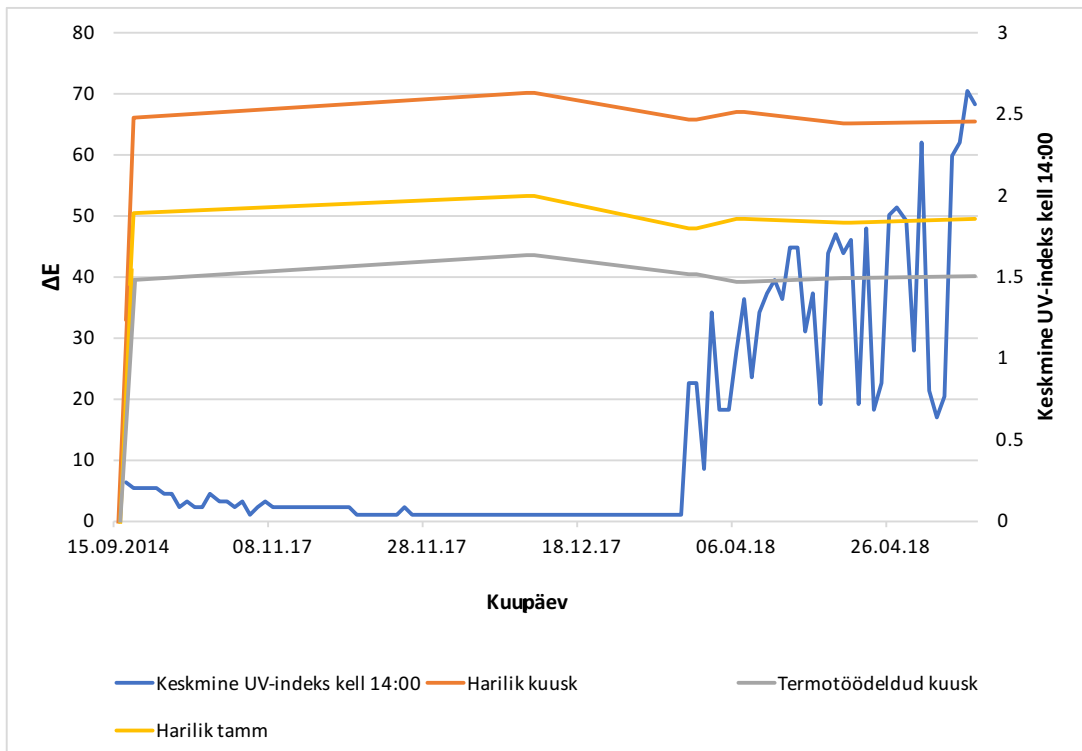
Katsekeha nr.	L*	a*	b*
B1	98,8	34,5	25,8
	95,7	33,9	27,1
	97,5	35,6	27,2
B2	99,2	35,8	28,5
	98,0	35,8	28,2
	94,2	37,5	30,5
B3	97,2	35,0	27,5
	97,3	34,9	27,1
	96,6	35,2	28,3
B4	77,2	33,6	28,5
	74,9	34,3	28,7
	72,4	34,5	29,4
B5	78,0	33,6	27,6
	76,5	33,0	26,9
	72,1	32,6	26,6
B6	79,0	37,2	31,1
	77,6	35,7	29,3
	79,2	36,3	27,5
B7	55,6	31,7	24,8
	58,2	32,5	26,7
	54,6	32,8	27,5
B8	56,6	30,8	25,3
	55,6	32,6	26,2
	52,2	29,8	23,9
B9	56,3	31,5	25,8
	53,3	30,2	23,4
	52,0	28,6	23,4



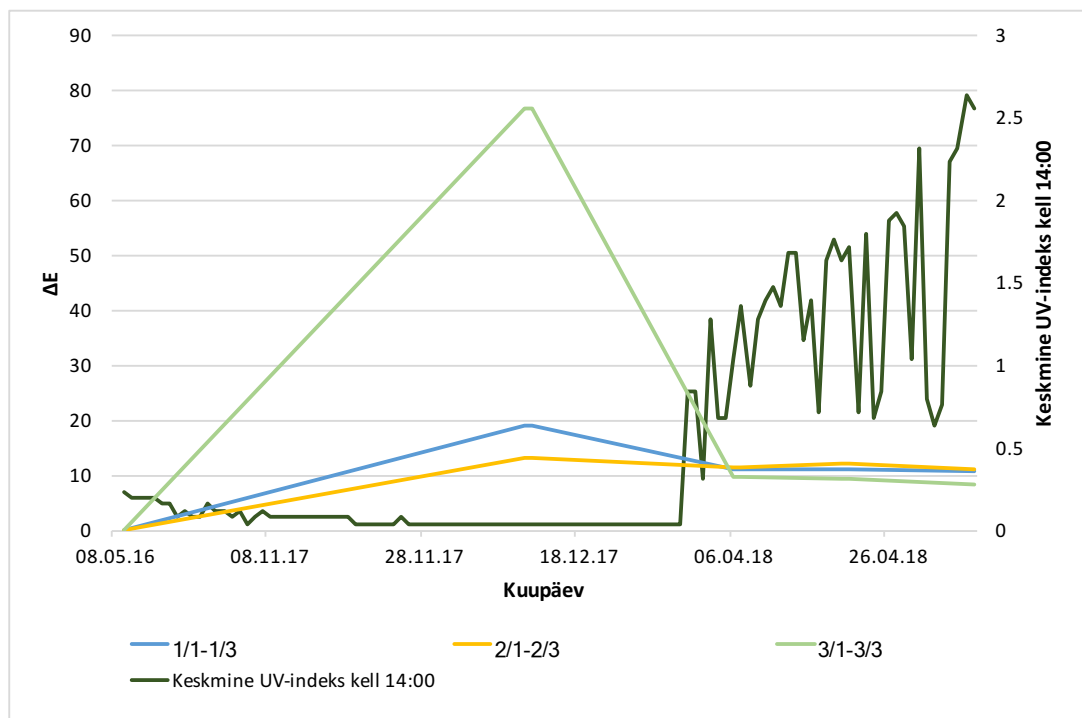
Tabel L4.2 Imprest AS katsekehade värvuse algandmed eksponeerimise kuupäeval 08.05.2016

Katsekeha nr.	L*	a*	b*
1/1	48,7	-0,7	13,2
	47,7	-0,1	11,6
	47,0	-1,6	11,5
1/2	46,2	-0,6	8,6
	46,7	-0,2	10,8
	48,0	-0,9	12,1
1/3	52,6	-0,6	13,6
	52,7	-2,8	13,0
	52,6	-1,8	11,7
2/1	50,4	-0,9	12,5
	49,1	-0,5	13,3
	49,3	-1,1	14,6
2/2	52,5	0,3	18,9
	56,0	-0,8	18,3
	51,2	-0,3	16,8
2/3	51,9	0,9	19,0
	52,1	-1,5	17,4
	51,2	-1,0	16,3
3/1	47,7	-1,7	11,4
	55,4	-2,4	13,8
	52,2	-2,9	15,0
3/2	49,3	-2,9	11,5
	48,6	-2,5	13,0
	44,9	-0,1	10,7
3/3	52,3	-3,2	13,1
	51,3	-1,1	16,3
	52,0	-1,1	14,0

Lisa 5 Katsekehade värvuse muutus



Joonis L5.1 COST FP1303 katsekehade värvuse muutuse sõltuvus keskmisest UV-indeksist kell 14:00 antud uurimisperiodil 20.10.2017-07.05.2018



Joonis L5.2 Imprest AS katsekehade värvuse muutuse sõltuvus keskmisest UV-indeksist kell 14:00 antud uurimisperiodil 20.10.2017-07.05.2018

## Lisa 6 COST FP1303 ja Imprest AS kruvide korrosiooni visuaalse hindamise tulemused

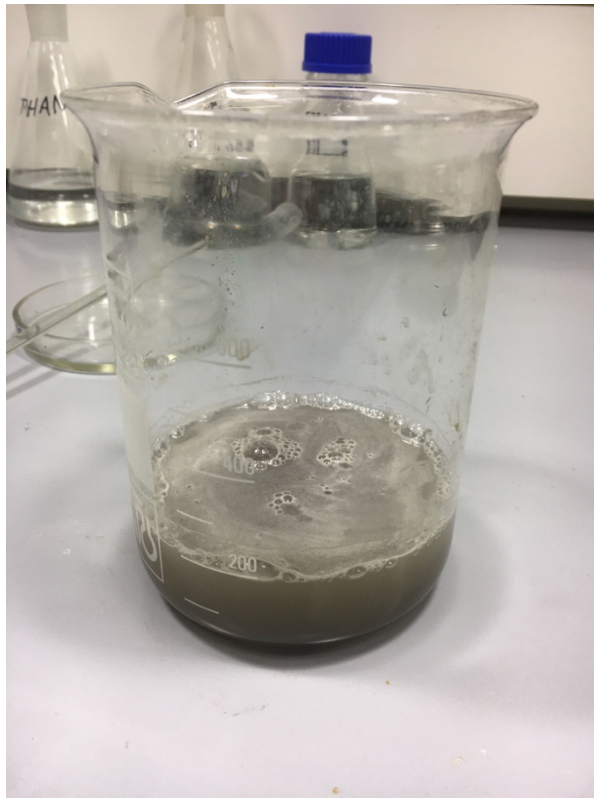
Tabel L6.1 Imprest AS kruvide visuaalse hindamise tulemused 2 aasta jooksul

<b>Tsingitud terasest kruvid</b>	<b>08.05.16</b>	<b>29.04.16</b>	<b>16.09.16</b>	<b>10.03.17</b>	<b>05.05.17</b>	<b>23.03.18</b>	<b>20.04.18</b>
1	0	2	3	4	4	4	4
2	0	2	4	4	4	4	4
3	0	2	4	4	4	4	4
4	0	2	4	4	4	4	4
5	0	2	3	4	4	4	4
6	0	2	3	4	4	4	4
7	0	2	4	4	4	4	4
8	0	2	4	4	4	4	4
9	0	2	4	4	4	4	4
<b>Roostevaba terasest kruvid</b>							
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0

Tabel L6.2 COST FP1303 kruvide korrosiooni visuaalse hindamise tulemused 3 aasta jooksul

<b>Tsingitud terasest kruvid</b>	<b>15.09.2014</b>	<b>02.03.2015</b>	<b>31.08.2015</b>	<b>29.02.2016</b>	<b>29.08.2016</b>
1	0	2	3	3	3
2	0	2	3	3	3
3	0	2	3	3	3
4	0	2	3	3	3
5	0	2	3	3	3
6	0	2	3	3	3
7	0	3	4	4	4
8	0	3	4	4	4
9	0	3	4	4	4
<b>Roostevabast terasest kruvid</b>					
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
<b>Tsingitud terasest kruvid</b>	<b>10.03.2017</b>	<b>20.10.2017</b>	<b>27.11.2017</b>	<b>23.03.2018</b>	<b>20.04.2018</b>
1	3	3	0	3	3
2	3	3	0	1	1
3	3	3	0	1	1
4	3	3	0	1	1
5	3	3	0	1	1
6	3	3	0	1	1
7	4	3	0	2	2
8	4	3	0	3	3
9	4	3	0	3	3
<b>Roostevabast terasest kruvid</b>					
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0

**Lisa 7 Pildid kruvide korrosiooni laborikatsete käigust Tallinna Tehnikaülikoolis**



Joonis L7.0.1 Kruvide hoidmine Clark'i lahuses



Joonis L7.0.2 Kruvi pärast hoidmist Clark'i lahuses



Joonis L7.0.3 Kruvide puhastamine kuumas vees



Joonis L7.4 Salvrätikus kuivatatud kruvid pärast kastmist 96% etanoolis