



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

# **RISTKIHTLIIMPUIDU LÕIKESERVA NIISKUSLEVI MODELLEERIMINE**

## **MODELLING OF CROSS-LAMINATED TIMBER MOISTURE SPREAD MAGISTRITÖÖ**

Üliõpilane: Kristjan Karik

Üliõpilaskood 122503

Juhendaja: Kristo Kalbe, ekspert

Kaasjuhendaja: Targo Kalamees, professor

Tallinn 2021

## **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.

"21." juuli 2021.

Autor: Kristjan Karik

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"21." juuli 2021.

Juhendaja: Kristo Kalbe

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202....a

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina \_\_\_\_\_ (autori nimi) (sünnikuupäev: ..... )

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

<sup>1</sup>Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

\_\_\_\_\_ (allkiri)

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

# TalTech ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Kristjan Karik 122503EAEI  
Õppekava, peeriala: EAEI ehitusmajandus ja juhtimine  
**Juhendaja:** Ekspert, Kristo Kalbe +372 620 2405  
**Kaasjuhendaja:** Targo Kalamees, professor  
Tallinna Tehnikaülikool, +372 620 2403,  
targo.kalamees@taltech.ee

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) RISTKIHTPUIDU LÕIKESERVA NIISKUSLEVI MODELLEERIMINE  
(inglise keeles) MODELLING OF CROSS-LAMINATED TIMBER MOISTURE SPREAD

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Koostada ja valideerida dünaamiline arvutusmudel ristkihtpuidu niiskuslevi modelleerimiseks.
2. Analüüsida niiskuslevi arvutusmudeliga reaalsel ehitusobjektil märgunud ristkihtpuit sõlme. väljakuivamise kestust erinevatel aastaaegadel.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjandus ülevaade, lõputöö struktuur	08.03.21
2.	Katsetoodika välja töötamine, materjali parameetrite arvutus	15.05.21
3.	Niiskuslevi arvutusmudeli koostamine ning selle kalibreerimine	05.07.21
4.	Kalibreeritud arvutusmudeliga reaalse olukorra läbi arvutamine	14.07.21
5.	Töö lõplik vormistamine	21.07.21

**Töö keel:** eesti      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "21" juuli 2021.a

**Üliõpilane:** Kristjan Karik      /allkirjastatud digitaalselt/      "21" juuli 2021.a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Kristo Kalbe      /allkirjastatud digitaalselt/      "21" juuli 2021.a  
/allkiri/

**Kaasjuhendaja:** Targo Kalamees      /allkirjastatud digitaalselt/      "21" juuli 2021.a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
Lühendite, tähiste ja mõistete loetelu .....	8
Lühendid ja tähised .....	8
1. SISSEJUHATUS.....	11
1.1 CLT ehitusmaterjalina ja selle niiskusturvalisus.....	11
1.2 Puidu omaduste sõltuvus keskkonnast.....	14
1.2.1 Puidu niiskussisaldus.....	14
1.2.2 Niiskuslevi puidus .....	15
1.2.3 Niiskusega seotud puidu kahjustused .....	16
1.2.4 Hallituse kasvu ajaline faktor .....	19
1.3 Eesti kliima .....	20
1.4 Varasemaid uuringuid Eestis CLT niiskuse ja niiskuslevi teemadel .....	22
1.4.1 Niiskuslevi arvutusmodeli aluseks olnud lõikeserva veeimavuse katse ning kaitsevahendite hindamine, Annuk 2020 .....	22
1.4.2 Ehitusniiskuse väljakuivamise võimekus ristkihtliimpuidust välispiiretes, Kukk 2019 .....	23
1.4.3 Ristkihtliimpuidu niiskus- ja soojuslevi iseloomustus ja modelleerimine .....	24
1.5 Magistritöö eesmärgid .....	25
2. MEETOD .....	26
2.1 Ristkihtliimpuidu kriitiline niiskussisaldus .....	26
2.2 Varasema magistritöö mõõtmistulemuste sobivus arvutusmodeli kalibreerimiseks .....	26
2.3 Puidu niiskussisalduse määramine .....	29
2.3.1 Elektritakistuse meetod .....	29
2.4 Niiskuslevi modelleerimise kirjeldus .....	30
2.4.1 Arvutitarkvara Delphin 5.9 lühikirjeldus .....	30
2.4.2 Tasakaaluvõrrandid.....	31
2.4.3 Dünaamilise arvutusmodeli konstruktsioonide loomine ja materjalidega sidumine.....	32
2.4.4 Arvutusmodelile kliima- ning ääritingimuste loomine ja algsete keskkonnatingimuste määramine .....	33
2.5 CLT kihtide veeimavuse määramine .....	37
2.6 Arvutusmodeli kalibreerimine .....	41
2.7 Kalibreeritud mudeli kasutamine reaalses olukorras .....	43

3.	TULEMUSED .....	46
3.1	Varasema magistritöö mõõtmistulemuste sobivus arvutusmudeli kalibreerimiseks .....	46
3.2	CLT kihtide veeimavus.....	47
3.3	CLT kihtide niiskussisalduse mõõtmine elektritakistuse meetodil .....	48
3.4	Kalibreerimise tulemused.....	49
3.4.1	Kuivamisperioodil laborikeskkond, kontaktpind avatud keskkonnale .....	50
3.4.2	Kuivamisperioodil laborikeskkond, kontaktpind vastu CLT-detali .....	54
3.4.3	Kuivamisperioodil väliskeskkond, kontaktpind keskkonnale avatud .....	60
3.4.4	Kuivamisperioodil väliskeskkond, kontaktpind vastu CLT-detali.....	64
3.5	Kalibreeritud arvutusmudeli tulemused Mäepealse tn 3 vahelae sõlme näitel ...	70
3.6	Tulemuste hindamine .....	72
3.7	Edasiste uuringute vajadus .....	73
3.8	Töö olulisus.....	74
4.	JÄRELDUS.....	75
	KOKKUVÕTE .....	77
	SUMMARY.....	79
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	81
	LISAD .....	84
	Lisa 1 Elektroodtakistusmõõturi kalibreerimistunnistus.....	84
	Lisa 2 Kaalu kalibreerimistunnistus.....	85

## EESSÕNA

Käesolevas magistritöös on keskendunud ristkihtliimpuitpaneelide niiskuslevi dünaamilise arvutusmudeli koostamisele ja kalibreerimisele. Arvutusmudeli kalibreerimiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis 2020. aastal koostatud magistritöö veeimavuse katse mõõtmisandmeid. Ristkihtliimpuidu materjaliomaduste täpsustamiseks teostati käesoleva magistritöö koosseisus täiendavaid mõõtmisi. Kalibreeritud arvutusmudelit kasutati reaalse ehitusobjekti näitel valitud tarindite liitekoha liigniiskuse väljakuivamise aja prognoosimiseks erinevatel aastaaegadel toimunud märgumise korral.

Kirjeldatud on esmaste simulatsioonide teostust, katse metoodikat ja käiku ning arvutusmudelite koostamise metoodikat. Tulemused on jagatud neljaks osaks: 2020. aasta veeimavuskatse analüüs, CLT-kihtide veeimavuskoeffitsiendi mõõtmine, arvutusmudeli kalibreerimine ning kalibreeritud arvutusmudeli rakendamine realsel ehitusobjektil niiskuse väljakuivamise hindamiseks.

Lõputöö koostamisele olid väga suureks abiks oma teadmiste ja nõuannetega juhendaja Kristo Kalbe ja kaasjuhendaja Targo Kalamees.

Võtmesõnad: CLT, ehitusniiskuse väljakuivamine, dünaamiline arvutusmudel, niiskusturvalisus

# Lühendite, tähiste ja mõistete loetelu

## Lühendid ja tähised

- CLT - ristkihtliimpuit
- MC - moisture content ehk niiskussisaldus
- RH - suhteline õhuniiskus, %
- $\mu$  - difusioonitakistustegur, -
- t - temperatuur, °C
- mm - millimeeter
- g - gramm
- kg - kilogramm
- m – mass, g või kg
- $m_{kuiv}$  - kuiva proovikeha mass, g või kg
- $m_{m\ddot{a}rg}$  - märgunud proovikeha mass, g või kg
- h - tund
- s - sekund
- kk - kuu
- pp - päev
- aa - aasta
- $\rho_{REV}^{m_w+v}$  - koguniiskuse (vedeliku ja veeauru) tihedus antud ruumalaühikus [kg/m<sup>3</sup>]
- $j_{conv}^{m_w}$  - vee konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/(m<sup>2</sup> x s)]
- $j_{conv}^{m_v}$  - veeauru konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/(m<sup>2</sup> x s)]
- $j_{diff}^{m_v}$  - difusiooni teel veeauru liikumise voog [kg/(m<sup>2</sup> x s)]
- $\sigma_{REV}^{m_w+v}$  - niiskuslisa või niiskuskadu antud ruumalaühiku kohta [kg/(m<sup>3</sup> x s)]
- $j_{conv}^{m_g}$  - konvektiivne gaasivoog [kg/m<sup>2</sup>s-]
- $C_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a+p_v} \cdot \frac{R_a}{R_v}$  - veeauru massi kontsentratsioon gaasis [kg/kg]



- $p_v$  - veeauru osarõhk [Pa]
- $p_a$  - õhurõhk [Pa]
- $R_a$  - universaalne gaasikonstant [J/(kg x K)]
- $R_v$  - veeauru gaasikonstant [J/(kg x K)]
- $D_{v,air}(T)$  - seisva õhu veeaurujuhtivus [m<sup>2</sup>/s]
- $\mu$  - difusioonitakistustegur
- $f(\theta_g)$  - funktsioon gaasi mahust ruumalaühiku kohta
- $\theta_g$  - gaasi maht ruumalaühikus [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- $\theta_{por}$  - materjali poorsus [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- $\theta_l$  - vee maht ruumalaühikus [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

### Mõisted

**Difusioon** - erinevate gaaside kontsentratsioonide segunemine, mis moodustab homogeense gaasisegu. Difusiooni teel liigub gaas kõrgemast kontsentratsioonist madalamale ehk suurema osarõhu poolt madalamale.

**Ehitusniiskus** – ehitusdetailidesse või -materjalidesse ehitamise käigus või vahetult enne seda sattunud konstruktsiooni või tarindi kasutusaegset tasakaaluniiskust ületav niiskus.

**Hügroskoopsus** – niiskusimavus ehk imamisvõime, materjali võime imada õhust endasse vett. Hügrokoopsete materjalide niiskussisaldus sõltub ümbritsevast keskkonnast. Ümbritseva keskkonna pikaajalise muutumise puudumisel saavutab materjal tasakaaluniiskuse.

**Kapillaarsus** – mittesegunevate keskkondade (vedela ja tahke faasi) kokkupuutel ilmnevad pindpinevusnähtused ehk märgumisega kaasnevad imendumisnähtused kapillaarides ja poorides

**Kapillaarne vee liikumine** – materjalide poorides vee liikumine seal tekkiva pindpinevuse mõjul ja poorides esineva kapillaarsuse toimel.

**Kondensatsioon ehk kondenseerumine** – aine üleminek gaasilisest olekust vedelasse ja gaasilisest tahkesse olekusse.

**Niiskuslevi** – niiskuse ülekandumine ühelt kehalt teisele.

**Niiskussisaldus** – niiskuse hulk materjali kogumassist või kogumahust. Materjali niiskussisaldus sõltub peamiselt ümbritseva keskkonna temperatuurist ja suhtelisest niiskusest.

**Sorptsioon** – aine või vedeliku neeldumine vedelikus või tahkes aines või kogunemine tahke aine pinnale.

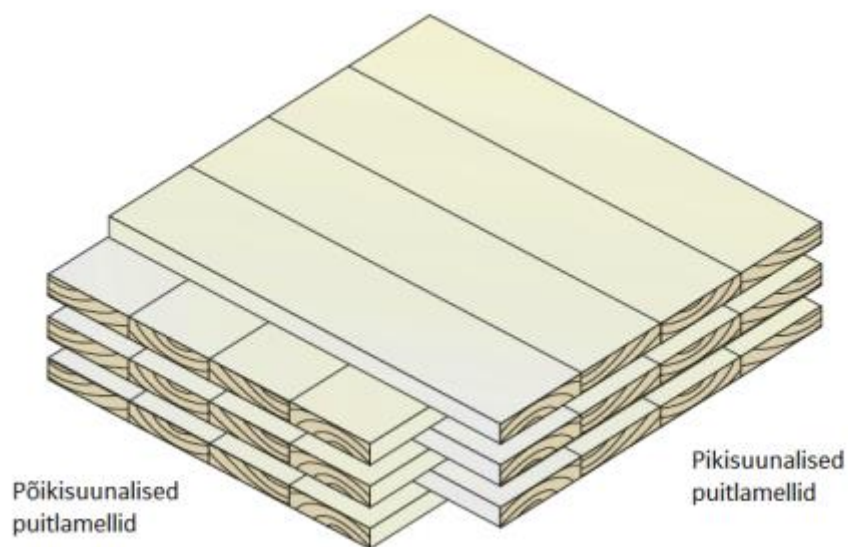
**Suhteline difusioonitakistus ehk veeauru difusioonitakistusega võrdne õhukihi paksus  $s_d$ , m** – seisva õhukihi paksus, millel on sama veeaurutakistus kui kindlal materjalikihil  $s_d = \mu \cdot d$

**Õhu suhteline niiskus** – õhus sisalduva veeauru protsentuaalne hulk antud temperatuuril ja rõhul õhus maksimaalselt võimaliku veeauru tiheduse suhtes.

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1 CLT ehitusmaterjalina ja selle niiskusturvalisus

CLT ehk ristkihtliimpuit on 1990ndatel välja arendatud ehitusmaterjal, mille uurimise taust pärineb 19. sajandi lõpust [1]. Eestisse jõudis see materjal esmakordselt ligi 10 aastat tagasi, kui ehitati esimene passiivmaja CLT paneelidest. Ristkihtliimpuit koosneb saematerjali kihtidest, mis on omavahel kokku liimitud. Kihtide arv on vähemalt kolm ning on üldjuhul paaritu. Ristkihtliimpuidu teeb eriliseks selle kasutusala varieeruvus – see on materjal, mida saab kasutada nii põrandate, seinte kui ka lagede konstruktsioonides. CLT detailid on tänu oma massiivsusele ja risti kihtide liimimise tehnoloogiale ka piisavalt stabiilne, et ehitada kõrghooneid [2]. CLT niiskusturvalisuse teemale on siiani pigem vähe rõhku pööratud, kuid seoses kasvavate mahtudega selles segmendis ning ka objektide keerukusest sõltuvalt pikeneva ehitusperioodiga on vaja seda teemat esile tuua.



Joonis 1 – Ristkihtliimpuit [3]

CLT mitmekülgst iseloomustavad:

- suur tugevus madala materjali kaalu juures;
- lihtne toota;
- hea stabiilsus;
- suur soojusmahtuvus;
- hea kandevõime tulekahju olukorras;
- võimalus toota kõveraid detaile;
- lihtsam ja odavam detailide transport [4].

Ristkihtliimpuidu mehaanilisi omadusi saab kõrvutada raudbetooni mehaaniliste omadustega [1]. Tänu kihilisele struktuurile on CLT-d võimalik kasutada mitmes konstruktsioonis alternatiivina betoonile või kivile. Lisaks on ristkihtliimpuit paneelid mitu korda kergemad kui betoon või teras – vastavalt 5 ja 16 korda. Need omadused lubavad projekteerida madalamaid vundamenditaldmikuid ja kiirendavad oluliselt ehitusprotsessi. Paneele saab monteerida kiiremini ja ka tehnoloogiliselt on töö lihtsam ja ei nõua nii palju eeltöid.

CLT on viimasel ajal sisenenud ka järjest rohkem Eesti ehitusturule ning tänaseks on valmis ehitatud kümneid hooneid. Eesti turule tuleb CLT-d nii kodumaiselt turult kui ka välismaalt, näiteks Põlvas tehtud esimese passiivmaja paneelid pärinevad juhendaja Kristo Kalbe sõnul Austriast. Ristkihtliimpuidu ja muude massiivsete puidust kandekonstruktsioonide tootjate ja tarnijate sõnul ei vaja ehitusmaterjal ehitusjärgus katmist ning kaitset ilmastiku eest [5]. Teisest küljest on aga läbi viidud uuring, mis väidab, et CLT paneelide niiskussisaldus ei muutunud märkimisväärselt kuni ajani, mil ehitusobjektidel eemaldati kaitsev kile ja paneel oli avatud ümbritsevale keskkonnale [6]. Ehitusfüüsikud ja teadlased soovivad puitkonstruktsioone ehitustegevuse käigus katta, et neid ilmastiku eest kaitsta. Suurim probleem on see, et mõningate hoonete mõõtmed on niivõrd suured, et nende kaitsmine ilmastikutingimuste eest võib osutuda keeruliseks [5]. Puit on aga oma olemuselt niiskustundlik materjal ning võrreldes teiste Eestis levinud konstruktsioonimaterjalidega vajab see niiskuse eest rohkem kaitset. On uuritud, kuidas käitub puit niiskusega kokkupuutel ja kui kaua ta peab kuivama, et ei tekiks soodsaid tingimusi bioloogiliste kahjurite, nagu mädaniku, hallituste ja seente tekkeks [5][7]. Projekteerides hoonete tarindeid ristkihtliimpuidust, siis tuleb juba projekteerimisfaasis arvestada niiskusturvalisust, sest puit ei talu niiskust ja niiskeid ilmastikuolusid nii hästi nagu näiteks betoon ja müüritis. Ehitusobjektidel konstruktsioonide ilmastiku eest mitte katmine ei tekita suuri komplikatsioone, kui on tegemist monoliitsete betoonkonstruktsioonide või kivikonstruktsioonidega, sest nad imavad küll niiskust, kuid see ei mõjuta nende tugevusomadusi. Puitkonstruktsioonide puhul on niiskusturvalisus hoopis tõsisem probleem. Puit on hügrokoopne materjal, millel on omadus ümbritsevast keskkonnast niiskust imada ning talletada oma kiududes. Puiduga seotud niiskustehnilised uuringud on näidanud, et puit talub hästi lühiajalist niiskuslikku koormust, näiteks hoovihma, eeldusel et see saab kohe välja kuivada ning ei imendu suurel määral puitu [7]. Pikemal kokkupuutel vee ning sademetega ja seejärel näiteks soojustusmaterjali või muu auru- ning õhutiheda materjaliga kattes on üpris kindel, et võivad levima hakata bioloogilised kahjurid, nagu näiteks mädanik, hallitus ja seened [7]. Puidu niiskussisaldusest omakorda sõltuvad puidu füüsikalised ning samuti ka tugevuslikud omadused [8].

Niiskuskulust aspektist kõige kriitilisemad kohad on just nimelt tarindite ühenduskohad, mis võivad jääda sademetele avatuks [9]. Kõige kriitilisemad sõlmed, kuhu liigniiskus võib talletuda on:

- sein ja vahelae sõlm;
- sein ja põranda sõlm;
- avatäited;
- paneelivuugid.

Ka CLT detailide puhul on need kõige kriitilisemad sõlmed [10]. Kristo Kalbe, Targo Kalamees ja Villu Kukk viisid läbi uuringu Eestisse ehitatava CLT kandekonstruktsioonidega hoone kohta. Selle raames tuvastati mitmed kriitilised sõlmed, kus CLT sattus pikemasse veekontakti. Puidu niiskussisalduseks mõõtepunktides tuvastati 26%, mis ületab rohkem kui 1,5-kordselt puidu bioloogiliste kahjurite tekkeks kriitilise niiskussisalduse [5][10]. Uuringu läbiviijate poolt tuvastati kõige kriitilisemad kohad just ristkihtliimpuit paneelide ja vundamendi liitumissõlmes. Vesi oli sattunud hüdroisolatsiooni (bituumenlint) ja seinakonstruktsiooni vahele ning toimus puitdetailide märgumine [10].

CLT detailide niiskusturvalisus peab olema tagatud juba tootmisprotsessi käigus. Tehases on võimalik sisekliimat kontrolli all hoida ja probleeme pole. Probleeme võib tekkida just CLT transportimisel ehitusobjektile. Et vältida tootja poolt etteantud niiskussisalduse muutumist tuleb valida kõige õigem transpordiviis, sest sõit objektile võib kesta ka mitmeid tunde või päevi. Parim lahendus on peale tootmisprotsessi tehases detail katta ning teha ilmastikukindlaks. Lisaks sellele soovitasid teadlased Kalamees, Kalbe ning Kukk kasutada detailide lõikeservadel vedelalt peale kantavat membraankatet ja horisontaalsetele pindadele näiteks isekleepuvat veekindlat membraankatet [10].

Ehitusobjektile tuleb CLT detailide montaaž sätida kevad-suvisesse perioodi, sest siis on sademete tõenäosus kõige väiksem. Ilmateatele muidugi ei saa kunagi 100-protsendiliselt tugineda, mille tõttu tuleb kindlasti peale montaaži hoone siiski katta. Rootsis, Norras ja mujal põhjamaades kasutatakse selleks tavaliselt tellingkonstruktsioone ehk „telke“ [5]. Materjalide ilmastiku eest kaitsmiseks on kasutatud ka veekindlaid materjali ladustamise punkte. Näiteks tuuakse detailid objektile ja neile ehitatakse ümber veekindel konstruktsioon [5]. Hoonete, mille lõppkõrgus jääb madalaks ja kõrgust on vaid mõni korrus, katmiseks on võimalik rajada ka ajutine ratastel liikuv telk, mida saab liigutada [11]. Sellised tellingkonstruktsioonid tekitavad aga väga suurt lisakulu. Sellega kannatab niiskusturvalisus, sest nähakse rahalist kokkuhoiu kohta. Babette Liseth Kuus töötas 2018. aastal oma magistritöös välja niiskusturvalisuse kava Viimsi riigigümnaasiumi ehituse näol, mis nägi ette, kuidas kaitsta CLT detaile liigniiskuse eest [12]. Tema võttis aluseks ByggaF niiskusturvalisuse

standardi [13] ning töötas välja, mida peab järgima, et puitdetailid ei saaks kahjustada liigniiskuse mõjul:

- iga detail pakendati eraldi kilepakendisse ja jäeti sinna võimalusel ka peale monteerimist;
- objektil ladustades hoida detaile määrdumise eest;
- elemendid ei tohi toetuda otse aluspinnale, vaid peavad olema postidel ning alt tuulduma;
- monteeritud elemendid katta;
- liigne vesi detailidelt või detaili süvenditest eemaldada niiskusimuritega [12].

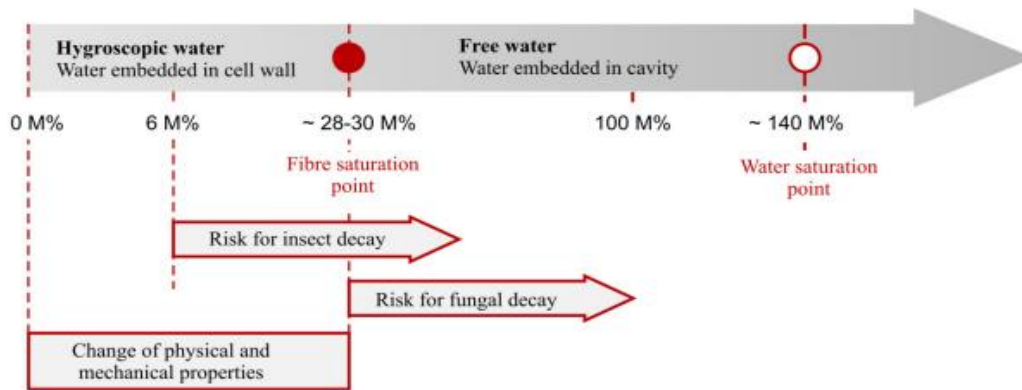
## 1.2 Puidu omaduste sõltuvus keskkonnast

### 1.2.1 Puidu niiskussisaldus

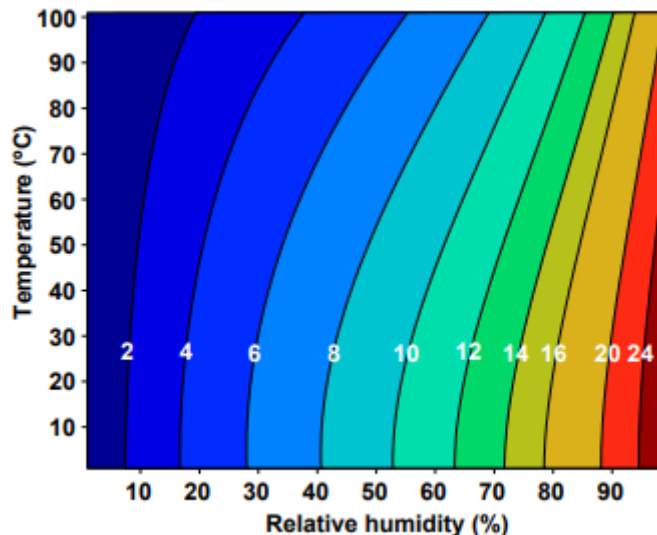
Puit on hügrokoopne. See tähendab, et nagu kõigil poorsetel materjalid on ka puidul võime ümbritsevast keskkonnast imada niiskust ning talletada seda enda kiududes ja rakkudes. Puidu niiskussisaldus sõltub ümbritsevast kliimast, täpsemalt suhtelisest niiskusest ja temperatuurist ning seda arvestatakse protsentides. Tavapäraseks puidu küllastunud niiskussisalduseks loetakse 30%. See tähendab, et 30% puidu massist on vesi [14]. Seda arvutatakse kuivatatud puidu proovikeha ( $m_{kuiv}$ ) ja sama proovikeha, mida on hoitud mingis kindlas keskkonnas ( $m_{m\ddot{a}rg}$ ), masside erinevuse kaudu.

Puidu niiskussisalduse arvutamise valem:  $MC = \frac{m_{m\ddot{a}rg} - m_{kuiv}}{m_{kuiv}} (100\%)$

Puidu niiskus jaguneb kolmeks: seotud vesi, vaba vesi ja vähesel määral ka veeaur [15]. Kuni 30% niiskussisalduseni toimub puidu rakuseinte küllastumine veega. Kui see küllastuspunkt on saavutatud, siis on puidu rakud täielikult täitunud veega – puit on saavutanud küllastuspunkti. Edasine niiskus hakkab täitma puidu rakkude vahelisi tühimikke. Jooniselt 2 on näha, et kuni puidu küllastuspunkti saavutamiseni toimuvad puidu füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste muutused. Nendeks on näiteks mahukahanemine, paisumine ja survetugevuse vähenemine. Edasi tekib juba tõsisem risk ja oht kahjuritele [14]. Puidu paisumine ja kahanemine toimub alati puidu aastaringide suunas [8].



Joonis 2 – Niiskuse jaotumine puidus ning riskid ja mõjutused puidu omadustele [14]  
 Puidu hoidmisel muutumatus keskkonnas, saavutab puit tasakaalulise niiskussisalduse. See tähendab, et kui suhteline õhuniiskus ja temperatuur on püsivad, siis on ka puidu niiskussisaldus püsiv [8][14]. Tasakaaluniiskused on välja toodud Joonisel 3.



Joonis 3 – Puidu tasakaaluline niiskussisaldus ja selle sõltuvus temperatuurist ja keskkonna suhtelisest niiskusest [8]

### 1.2.2 Niiskuslevi puidus

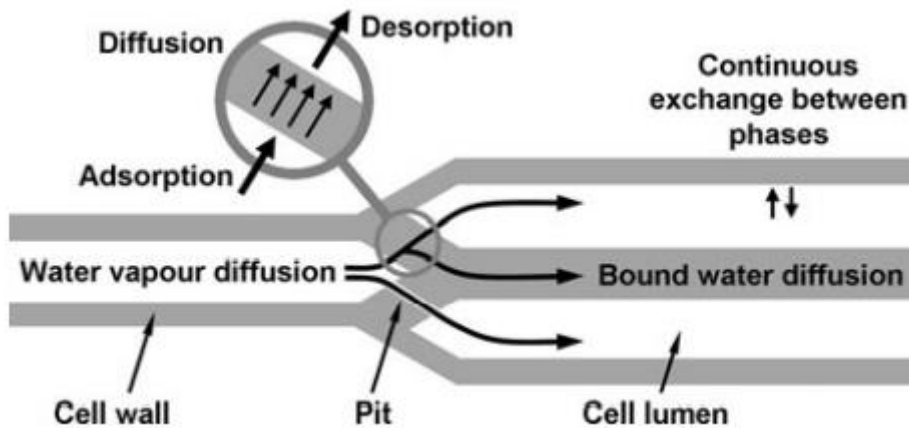
Niiskuslevi puidus tähendab vaba vee liikumist küllastuspunktist üleval pool ning seotud vee liikumist küllastuspunktis allpool. See protsess toimub kapillaarjõudude ja difusiooni toimel [16]. Puidu niiskuslevi on olulisem just küllastuspunktist allpool, sest selles vahemikus leiavad aset kõik puidus toimuvad füüsikalised ja mehaanilised muutused. Siis leidub puidus vaid seotud vett ehk hügrokoopset vett ja veeauru [15].

Olenemata sellest, kas puit on otseses kontaktis veega või mitte, leidub selle poorides ikka veeauru. Veeauru, niiskuse ning vaba vee liikumine puidus jaguneb kolmeks:

- veeauru difusioon poorses süsteemis;

- sorptsioon;
- seotud vee difusioon rakuseinas [17].

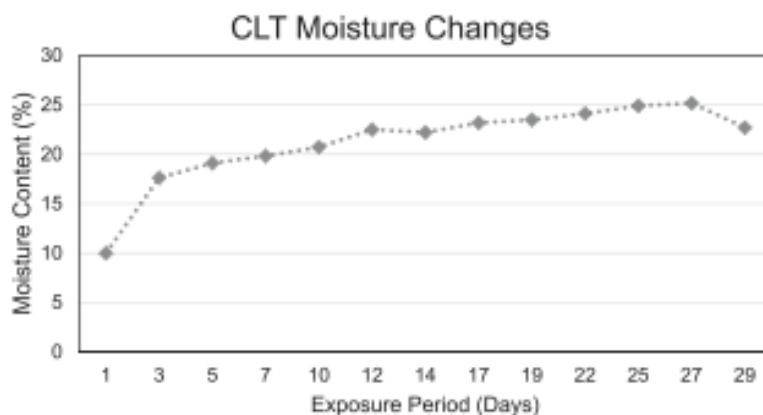
Difusioon puidus leiab aset, kui puidu niiskussisaldus on alla küllastuspunkti ehk alla 30%. Puidus, mis on avatud pooridega keskkonnast niiskust imav materjal, on vee liikumine keeruline nähtus [17]. Niiskuslevi puidus difusiooni teel on detailsemalt kirjeldatud Joonisel 4.



Joonis 4 – Niiskuslevi difusiooni teel puidus [17]

### 1.2.3 Niiskusega seotud puidu kahjustused

Puidu märgumine on väga ohtlik, sest niiskusel on võime väga kiirelt liikuda mööda puidu poore ja avasid. Näiteks USAs Oregoni osariigis kerkis CLT niiskussisaldus ühe vihmase kuu jooksul 12 protsendilt 27 protsendile. 5 päeva jooksul oli niiskussisaldus juba ligi 20%. Kuu aja jooksul oli puidu küllastusniiskusele lähedal ning tekkis oht seente ja hallituse arenguks [18]. Joonisel 3 on näha niiskussisalduse muutus ajas USAs Oregoni osariigis.



Joonis 5 – Kolmekihilise CLT niiskussisalduse muutus 1 kuu vältel kokkupuutel vihmaga 2018 [18]

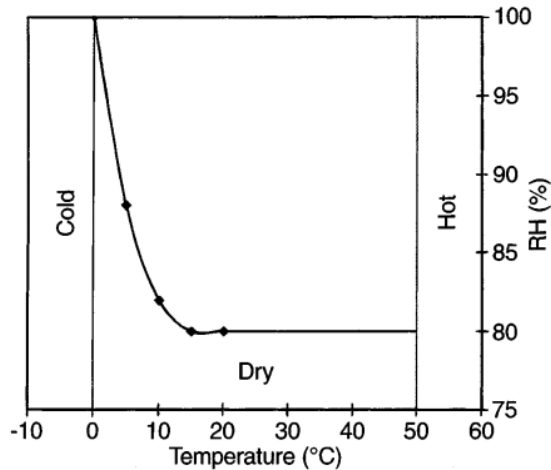


Ristkihtliimpuidu puhul on probleemseimaks kohaks mahumuutustest põhjustatud praod. Pragusid võib põhjustada CLT hoiustamine niiskes kliimas. Kuna CLT on veeauru difusiooni takistav materjal, siis on praod suur probleem, sest ristkihtliimpuit töötab tarindis ka auru- ning tuuletõkkena. Kui aga toimub keskkonnamuutusest põhjustatud pragunemine, kaotab ristkihtliimpuit oma difusioonitakistus- ja õhupidavusomadused [19]. 2017. aastal Tallinna Tehnikaülikooli teadurite poolt läbi viidud uuringu tulemustest selgub, et puidu niiskussisalduse kahanemine 11% pealt 7% peale põhjustas 0,27-0,38 mm suuruseid pragusid ning puidu niiskussisalduse kahanemine 17% pealt 7% peale põhjustas isegi kuni 2 mm suuruseid pragusid [19]. Oluline järeldus antud uuringu põhjal on see, et detailidel, mida hoiustati niiskes kliimas, tekkisid mahumuutustest kaks korda suuremad praod, kui detailidel, mida hoiustati kuivas kliimas [19]. Tekkinud mahumuutused on näha Joonisel 6.



Joonis 6 – Mahumuutustest põhjustatud praod piki lamelle ning lõikeservades [19]

Puidu jaoks on väga ohtlikud kahjurid seened, nagu näiteks mädanik ja hallitus. Seened vajavad kasvuks vaid piisavalt niisket keskkonda ning soojemat temperatuuri. Suhteline niiskus vähemalt 75-80% ning temperatuur vahemikus 0-50 kraadi [20]. Tavapärane nähtus on hallituse riski hindamine ainult õhuniiskuse baasil, kuid tegelikult on oluline hinnata ka temperatuuri, sest temperatuur on faktor, mis põhjustab biokeemilisi protsesse, mis mõjutavad hallituse kasvu ja kiirust [21]. Hallitus ei teki korruga igal pool, vaid pigem üksikutes punktides.



Joonis 7 – Hallituse kasvuks soodsad tingimused [20]

Lisaks hallitusele on teine peamine seene tüüpi kahjur mädanik. Puidus tekib mädaniku oht, kui puidurakkude vahelised tühimikud on täitunud veega ehk siis, kui puidus esineb vaba vett. Mädanikku on kolme tüüpi:

- pruunmädanik;
- valgemädanik;
- pehme mädanik [22].

Kuna pruun ning valge mädanik esinevad peamiselt veel töötlemata ja lõikamata puidul, siis ehituslikust vaatepunktist on kõige tähelepanuväärsem pehme mädanik. Kõige levinumad kohad, millega olen isiklikult kokku puutunud on märgunud konstruktsioonid ning ehitustehniliselt valesti ehitatud puidust põrandakonstruktsioonid pinnasel. Nimelt esineb antud mädaniku tüüp puidul, mida kasutatakse välitingimustes ja väga niisketes oludes. Selle mädaniku tekke eelduseks on pidev märgumine, kuni toimub täielik veega küllastumine [22]. Näiteid bioloogiliste kahjurite põhjustatud kahjustustest Joonisel 8.



Joonis 8 – Puitkajjustused tekkinud katuse ning fassaadi veeleketest vana puitkarkassil hoone kandvates seintes – Fotod: Kristjan Karik

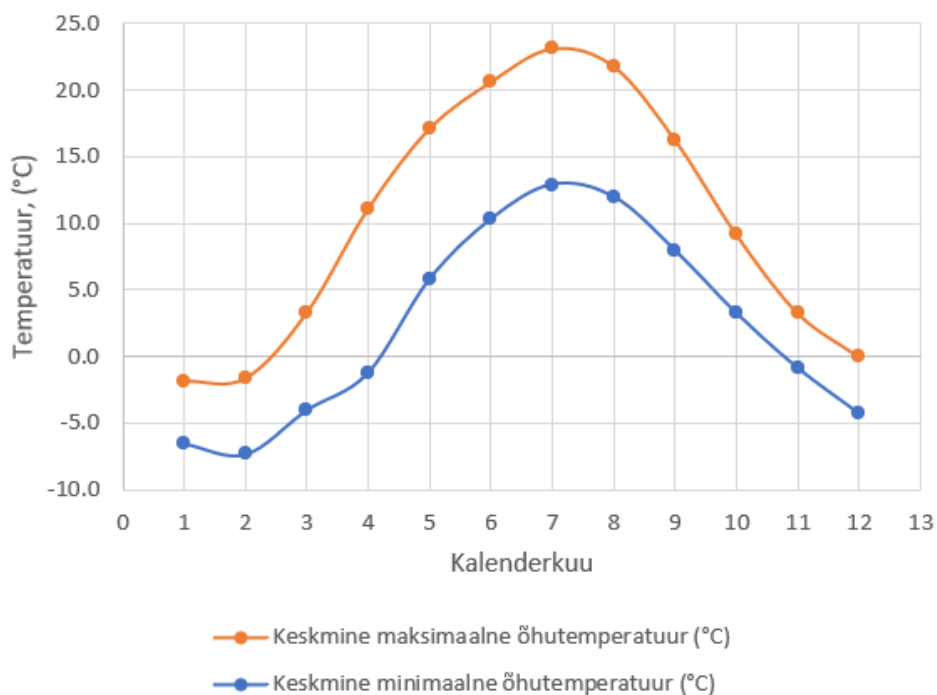
#### 1.2.4 Hallituse kasvu ajaline faktor

Hallituse kasvu määrab suuresti niiskusega kokkupuute periood. Mida kauakestvam on kontakt kõrge suhtelise niiskusega keskkonnaga või veega, seda tõenäolisem on hallituse teke [21]. Hallitus vajab arenguks konstantseid keskkonnatingimusi – kui temperatuur ja niiskussisaldus on muutuvad, siis ei toimu ka erilist hallituse arengut. [21]. Gradeci on oma 2017. aastal koostatud hallituse kasvu kriteeriumite uuringutes öelnud, et kui kõrge suhtelise õhuniiskusega periood kestab pikalt, siis on hallituse kasvuks väga soodsad tingimused, kuid kui on pikki kuivi perioode, siis on hallituse tõenäosus väga madal või olematu [21]. Hallituse kasvu ajaline faktor on oluline selle töö kontekstis, kui arvestada puidu väljakuivamiseks kuluvat aega veekontaktis olnud CLT-paneelidel. Mida pikem on ehitusniiskus väljakuivamise aeg, seda suurem on tõenäosus, et ehitusetapis algab mikroobide areng.

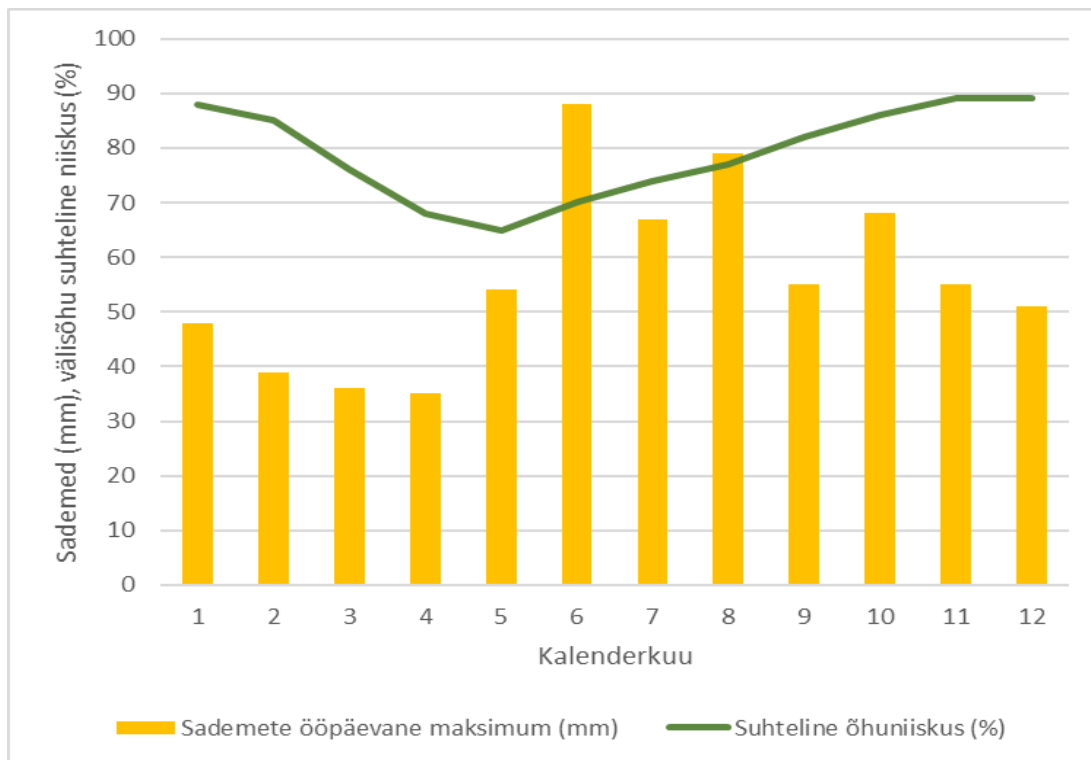
## 1.3 Eesti kliima

Ristkihtliimpuidu niiskuslevi on otseses seoses teda ümbritseva kliimaga. Antud lõputööga seotud katseandmete kogumise paik on Eesti. Joonistel 9 ja 10 on välja toodud andmed eelneva 30 aasta kohta:

- absoluutsed minimaalsed ja maksimaalsed õhutemperatuurid;
- keskmised minimaalsed ja maksimaalsed õhutemperatuurid;
- keskmiste sademete hulk;
- keskmised suhtelised õhuniiskused.



Joonis 9 - Eesti keskmine minimaalne ja maksimaalne õhutemperatuur aastatel 1991-2020 [23]



Joonis 10 – Eesti keskmine sademete hulk ja keskmine suhteline õhuniiskus aastatel 1991-2020 [23]

Võttes arvesse keskmiste õhutemperatuuride kliimaatilisi andmeid, siis on parima sobilikkusega ajad CLT elementidega ehitamiseks märtsist maini ning sügise algul septembris ja oktoobris. Neil kuudel on tegemist parimate sobilike temperatuuridega, mil pole sobilikke tingimusi seenkahjustuste tekkeks. Sademete ning suhtelise õhuniiskuse graafikule peale vaadates on kohe näha, et kõige õigem periood CLT detailidega töö tegemiseks on aprillist maini. Just siis on kõige vähem sademeid ning kõige väiksemad õhuniiskuse näitajad [23]. Ehitustegevus toimub aastaringelt, mis tekitab vajaduse analüüsida ehitusniiskuse väljakuivamise kestust erinevatel aastaegadel.

Targo Kalamees on 2004. aastal koostanud pikaajaliste mõõtmiste põhjal testaasta, mis kirjeldab veeauru kondenseerumise riski tarindisse ning hallituse kasvu riski. Oluline on, et see testaasta on koostatud arvestades kõige sagedamini esinevaid kriitilisi tingimusi [24]. Tulemused näitasid, et risk hallituse kasvuks ja veeauru kondenseerumiseks on kõige väiksem suvel ja näitab kasvutrendi sellele järgneval ajaperioodil [24].

## **1.4 Varasemaid uuringuid Eestis CLT niiskuse ja niiskuslevi teemadel**

Siin peatükis kirjeldatakse lühidalt juba läbi viidud uuringuid, mida saab kasutada võrdluseks saadavate tulemustega.

### **1.4.1 Niiskuslevi arvutusmudeli aluseks olnud lõikeserva veeimavuse katse ning kaitsevahendite hindamine, Annuk 2020**

Alvar Annuk teostas 2020. aastal oma lõputöö raames laboris katse, kus hindas ristkihtliimpuidu lõikeserva veeimavust ning erinevate niiskuskaitsevahendite toimivust. Katse esimeses faasis oli vaja katsekehad konditsioneerida, et luua võimalikult sarnased tingimused tehasesst niiskusturvalisuse põhimõtteid jälgides ehitusplatsile tarnimiseks. Kukk, Liisma ja Kalamees soovitasid samuti CLT detailide transporti objektile niiskuskindlalt pakendatuna [9]. Põhjuseks keskkonna muutumisel puidu tasakaaluniiskuse muutus. CLT detailid olid sademete eest kaitstud ning asusid välitingimustes, kus keskmine õhutemperatuur oli 1,5°C ja suhteline õhuniiskus 93,4%. Töötlemata katsekehi konditsioneeriti kaks nädalat [25].

Katse teise faasi jõudes kanti katsekehade kolmele lõikeservale (ülemine ja külgmised) vedelkumm veekaitse IKO MS Detail. Sellega loodi olukord, kus difusioon ja niiskuslevi oli võimalik ainult mööda alumist lõikeserva. Seejärel pandi töödeldud detailid tagasi välitingimustesse. Sellega loodi sarnased tingimused ehitusplatsiga ning katsedetaili sai võrrelda näiteks CLT seinadetailiga, mis on monteeritud ja külgedelt ning pealt kaetud [25]. Seejärel liiguti katsega edasi, et tekitada olukord kus toimus märgumine ning CLT seinadetaili alumine lõikeserv jäi veekontakti. See andis eeldused võrrelda töötlemata ja erinevate niiskustõketega töödeldud CLT seinadetaile veekontakti olukorras, et näha veeimavuse erinevusi.

Katse kolmas faas oli veekontakt. Veekontakti pikkuseks määrati 7 päeva labori tingimustes, kus veetase lõikeservast oli 1-3mm kõrgusel. Veekontakt imiteeris olukorda ehitusplatsil, kus toimus leke hoonesse ning vesi kogunes CLT-detaili lõikeserva alla. Niiskuslevi visualiseerimiseks oli vesi segatud tindiga [25].

Katse neljas faas oli peale veekontakti kuivamisperiood. Sellega loodi olukord, mida samastada ehitusobjektiga, kus ehitaja on avastanud veekahjustuse ning selle likvideerinud. Seejärel saab hakata märgunud detail kuivama [25]. Et mängida läbi võimalikult palju erinevaid stsenaariume, jagati nelja gruppi:

- Laborikeskkonnas lõikeserv avatud keskkonnale;
- Laborikeskkonnas lõikeserv kinnitatud vastu veeauru difusiooni takistavat pinda (vastu CLT detaili kinnitatult);
- Väliskeskkond lõikeserv avatud keskkonnale;

- Väliskeskond lõikeserv kinnitatud vastu veeauru difusiooni takistavat pinda (vastu CLT detaili kinnitatult) [25].

Selline jaotus võimaldab analüüsida erinevaid tarindite ühendussõlmi, nagu näiteks pöranda ja seina ühenduskoht ja seina ja vahelae ühenduskoht, kus katmata ning niiskuskaitsevahendiga töötlemata CLT lõikeserv satub veekontakti. Kuivatusetapi pikkus oli kaks nädalat ning selle tulemusena sai näha ristkihtliimpuidu kuivamisvõimet erinevates keskkondades [25].

Igal katsekehal oli kümme mõõtepunkti: viis punkti 5 mm sügavusel erinevatel kõrgustel ehk pealmises kihis ja viis punkti 50 mm sügavusel ehk sisemises kihis. Mõõtepunktide kõrgused olid 30 mm sammuga, vastavalt 30, 60, 90, 120 ja 150 mm [25]. Selliselt niiskussisalduse mõõtmine võimaldab näha, kuidas niiskuslevi ajas toimub.

Edasises töös viidates veeimavuskatsele, siis on tegemist just siin peatükis selgitatud katsega. See töö sobis mulle arvutusmodeli kalibreerimiseks just sagedaste mõõtmiste ja suure detailsuse tõttu. Samuti oli selle töö põhjal võimalik hinnata niiskuse väljakuivamise tulemusi, sest samasugune CLT ühendussõlme kuivamine väliskeskkonnas oli ka temal läbi katsetatud.

#### **1.4.2 Ehitusniiskuse väljakuivamise võimekus ristkihtliimpuidust välispiiretes, Kukk 2019**

Tallinna Tehnikaülikooli teadur Villu Kukk viis 2019. aastal läbi uuringu, kus määratles maksimaalset lubatud algniiskust CLT puhul nii väljast kui ka seestpoolt soojutatud välisseina korral [26]. See uuring haakub CLT lõikeserva veeimavuse modelleerimisega, sest arvestatakse võimaliku märgumise ja ka pikemaajalise veekontaktidega, mis võivad ristkihtliimpuidu algset niiskussisaldust tõsta. Selleks loodi labori keskkonnas 4 erinevat ristkihtliimpuidust välisseina tüüpi. Igale ühele paigaldati erinevat tüüpi soojustusmaterjale nii sise- kui ka välispindadele. Lisanduvalt loodi laboris vastavalt erinevaid ääritingimusi, et on võimalik arvesse võtta kõiki esinevaid aastaegasid, eesmärgiga hinnata niiskuse väljakuivamise võimekust terve aasta lõikes. Viidi läbi laboratoorses tingimustes katse, kus kõik erinevad seinakonstruktsioonid pidid läbi tegema sügisesed, talvised ning kevadised tingimused ning sisse paigaldatud anduritega mõõdeti suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri CLT ning seespoolse soojustuse piirilt [26]. Eesmärk oli mõõta hallitusindeksit CLT paneelide paigalduse algusaja kohta, et saada infot mis on parim aeg monteerimiseks ja mis on lubatud kõrgeim detaili algne niiskussisaldus. Selleks loodi Delphini tarkvara abil arvutusmodel, mis valideeriti laboratoorsete katsete tulemuste abil. Delphinis loodud mudel aitas mõõtetulemusi ära kasutada, et modelleerides näha tulemusi pikema aja vältel, milleks määrati viis aastat [26].

Mõõte- ning arvutustulemuste kohaselt leiti, et maksimaalne algniiskus, mis on lubatud CLT paneelides on:

- muutuva aurutakistusega seespoolse soojustusega välisseintes on  $M_c \leq 17\%$ ;
- aurutiheda seespoelsesoojustusega välisseintes on  $M_c \leq 15\%$  [26].

Mõõtetulemused kinnitasid, et kui katta ristkihtliimpuit aurutiheda seespoolse kihiga, siis on kõige suurem risk kui CLT algne niiskussisaldus on 20% juures [26]. Aurutiheda seespoolse soojustuse puhul on detailide monteerimisel iga algusaeg kriitiline, muutuva aurutakistusega soojustuse puhul on kriitiline monteerimistöde algusaeg detsember [26]. Igal juhul tehes tööd puitdetailidega on oluline, et niiskuse väljakuivamine on tagatud nii sisse- kui ka väljapoole [26]. Villu Kukk on lisaks sellele järeldanud, et puitkonstruktsioonidega töötades on väga oluline niiskusturvalisus:

- Niiskusturvalisus ja selle tagamine, juhendi koostamine ja kasutamine lõppkasutaja poolt;
- Puitkonstruktsioonide kaitse sademete ja liigse niiskumise eest;
- Ilmastikutingimuste jälgimine ja montaaž ilma sademeteta;
- Lekke või märgumise korral: lekkekohtade tuvastamine ning kontroll ja kaardistamine; puidu niiskuse korduv mõõtmine kuni ohutu niiskustaseme saavutamiseni [26].

### **1.4.3 Ristkihtliimpuidu niiskus- ja soojuslevi iseloomustus ja modelleerimine**

2020. aasta alguses viidi USA ehitusfüüsikute ning teadlaste poolt läbi uuring, mis koondas enda alla mitmeid laboratoorseid ning objektidel läbi viidud mõõdistusi ja ka mudelarvutusi ristkihtliimpuidu kasutamise ja soojusliku ning niiskustehnilise toimivuse kohta [6]. Mis seob antud uuringut lõputöö teemaga on uuringus kasutatud puuliigid, mis kõik olid okaspuud. Samuti olid kõik kasutatud CLT paneelid 5-kihilised. Uuringu sisu oli katseliselt kontrollida katsekehade veeimavust ning niiskuslevi ja seejärel võrrelda väljakuivamist erinevates tingimustes [6]. Katse ning modelleerimise käigus järeldati, et lisaks vedela vee imendumisele oli väga suur osakaal niiskussisalduse lisale ka veeauru difusioonil. Niiskustehniliselt väga põnev oli asjaolu, et CLT detailidele mõjus keskkond ja ilmastik niivõrd, et horisontaalpinnad olid võimelised saavutama puidu küllastuslikku niiskussisaldust [6].

Järeldused katsest:

- Veeauru imendumisel on märkimisväärne roll puidu niiskussisalduse kujundamisel vedela vee niiskuslevi kõrval;
- Veeimavuse hindamiseks kasutati uut meetodit, kus CLT paneel oli veeloigus. See näitas suuremat veeimavust, kui näiteks veega kastmine. Põhjuseks intensiivsem ja pikemaajalisem veekontakt;



- CLT kuivamine oli oluliselt aeglasem, kui märgunud pind kaeti vee- ning aurutiheda materjaliga;
- Mudelarvutused ning katsetulemused olid seostatavad;
- Lõpetuseks võrreldi simulatsiooniarvutusi mõõtetulemustega realselt ehitusobjektilt ning 9-kuulise ehituse katsetulemused jäid  $\pm 2\%$  niiskussisalduse piiresse. Erinevus oli suurem vaid ühel CLT kihil [6].

## **1.5 Magistritöö eesmärgid**

Sissejuhatuses kirjeldatu põhjal sai lõputöö eesmärgiks taustmaterjali põhjal välja töötada ristkihtliimpuidu lõikeserva veeimavuse arvutusmudel. CLT on veel ehitusturul üpris vähe kasutatav materjal ja vaja on täpsemaid andmeid selle märgumise ja kuivamise kohta. Oluline on edasi arendada teadmisi CLT niiskuslevi valdkonnas. Pärast mudeli välja arendamist ning valideerimist on eesmärk arvutusmudelit kasutada reaalse elulise olukorra hindamisel. Sellel on suur väärtus, et läbi mängida stsenaariume, mis võivad esile kerkida seoses puidu suure niiskussisaldusega. Näiteks nagu märgumise tagajärjel kõrge niiskussisalduse saavutanud CLT detaili korrektne kuivatamine. See annab CLT lõikeserva veeimavusele ja selle modelleerimisele suure praktilise väärtuse.

## **2. MEETOD**

### **2.1 Ristkihtliimpuidu kriitiline niiskussisaldus**

Ristkihtliimpuitu ei soovitata käsiraamatute ja juhendite kohaselt kasutada kasutusklassis 3. Kasutusklassi 3 kuuluvad välistingimustes ilmastiku mõjudele vastuvõtlikud, niiskes keskkonnas või vahetult vee poolt pikaajaliselt mõjutatud puitehitised. See on põhjustatud sellest, et antud kasutusklassi pidevad niiskuslikud näitajad on lihtsalt niivõrd kõrged, et need põhjustavad puidus mahumuutusi ja lokaalseid deformatsioone. Nendel omakorda on negatiivne mõju CLT kandevõimele ja liitekohtadele [4].

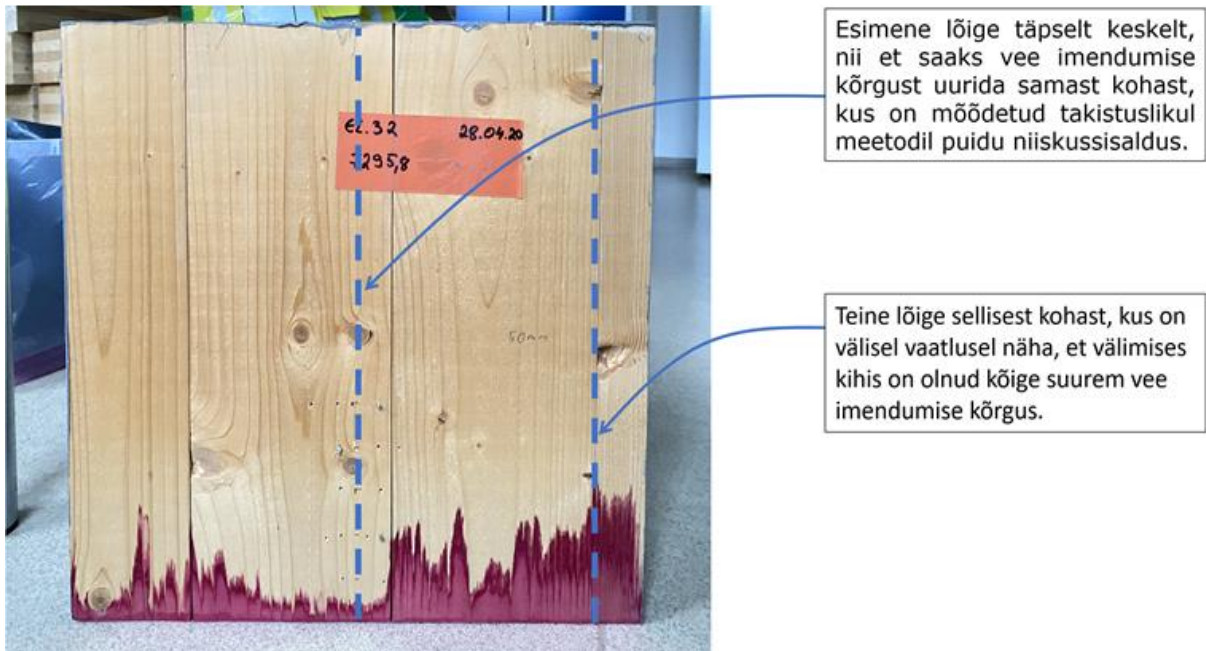
Ehitusobjektidel, kus kasutatakse töötlemata puitu on mõistlik puidu niiskussisaldust kindlate intervallidega mõõta. Näiteks, kui tuleb ette, et puit satub ehitustegevuse käigus veekontakti, siis tuleb mõõtmiste intervalli suurendada ning võtta päevas lugemid näiteks kord tunnis. Puidu ohtlik niiskussisaldus on saavutatud, kui puidu niiskussisaldus mistahes punktis ületab 16%. Puidu tasakaaluniiskus on 16% temperatuuril 15 kraadi ning õhuniiskusel 80%, mis on ideaalsed tingimused hallituse tekkeks [6]. Siis tekib ka esimene oht seenkahjurite tekkeks. Puidu tugevus hakkab vähenema, kui puidu niiskussisaldus on saavutanud 20% [27]. Väga ohtlik puidu niiskussisalduse piir algab üpris lähedal küllastusniiskusele, 25% juures. See tähendab, et puidus on olemas piisavalt suur niiskussisaldus, et oleks võimalik puidu kõdunemist soodustavate seenkahjurite tekkeks ning need võivad omakorda puidu täielikult hävitada [20].

Selleks, et liigniiskus ei jääks tarindisse on oluline enne puitdetailide katmist soojustusmaterjali või muu materjaliga mõõta niiskussisaldust. Tuulduvates konstruktsioonides peab puidu niiskussisaldus jääma kindlasti alla 17% ning suletud puitkonstruktsioonides on selleks piirmääraks 15%. Puidu õiges keskkonnas hoidmine aitab puidul säilida ning olla ajas kestev [28]. Selles töös käsitlen CLT eesmärgilise niiskussisaldusena >16% [27]. See on toimivuskriteerium, et arvestada ohtliku niiskuse väljakuivamise aega ristkihtliimpuit tarindist.

### **2.2 Varasema magistr töö mõõtmistulemuste sobivus arvutusmudeli kalibreerimiseks**

2020. aastal koostatud magistr töö [25] raames teostatud veeimavuskatse tulemuste sobivuse hindamiseks võtsin katses kasutatud CLT detailid ning lõikasin need tükkideks. Selleks töötasin välja meetodika, kuidas teha detailide lõiked. Üks lõige

elektritakistusega tehtud mõõtmisaukude tsentrist ning teine visuaalselt kõige kõrgema indikaatorvedeliku jälje nivoo kohalt. Lõiked tehti vertikaalselt ning paralleelselt vedelkummiga töödeldud külgedega. Lõikemetoodika on kirjeldatud Joonisel 11.

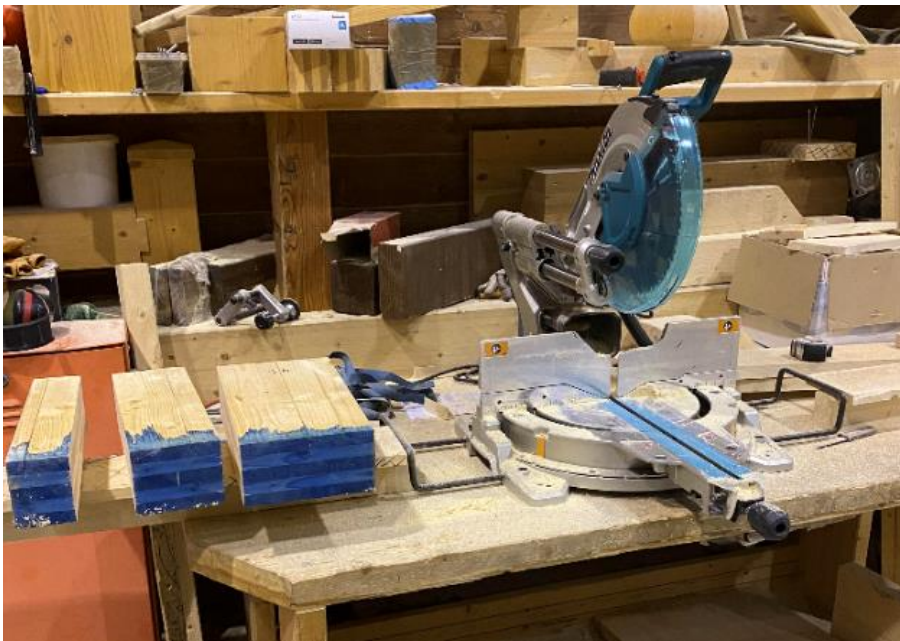


Joonis 11 – CLT katsedetailide lõikamise meetoodika

Katsedetailide lõiked toimusid tootja Arcwood OÜ tootmis- ning kvaliteedijuhi kontrollimisel Põlvas asuvas tootmiskompleksis. Lõikamised teostasid mina ise. Olles teinud ära esimese detaili soovituslikud lõiked, leidsin lähemal analüüsimisel, et oleks mõistlik teha ka lõiked saematerjali ühendusvuukides, sest seal oli näha kõige intensiivsemaid ja kõrgeima nivooaga indikaatorvedeliku jälgi. Kokku oli 4 erinevat tüüpi ilma niiskuskaitsevahendita detaili ning 4 erinevat tüüpi kaitsevahendiga töödeldud detaili. Igal detailil tehti vähemalt 1 lõige ja mõnel ka 3 lõiget. Peale lõigete teostamist märgistati detailid vastavalt lõikeserva veeimavuse uuringus tähistamisele, et seostada detaile. Täpsemat teostamist ja detailide lõikamisjärgset märgistamist on näidatud Joonis 12 ja Joonis 13.



Joonis 12 – Vertikaalselt lõigatud CLT detailid



Joonis 13 – Kasutatud saag detailide lõikamiseks

Detailide lõikamise eesmärk oli näha, et kui sügavale on vesi tunginud riskiitliimpuidu sisemistes kihtides ja kas on näha ka indikaatorvedelike jälgi. Samuti, et kas indikaatorvedeliku jälg detaili sees on korrelatsioonis mõõdetud niiskussisaldustega.

Lisaks sellele, et kas üldse leidub seoseid mõõtetulemuste ja visuaalse kontrolli vahel. Et analüüs oleks võimalikult punktuaalne, siis pildistati üles kõik uued lõikeservad ja analüüsiti indikaatorvedeliku jälgi CLT sees. Selleks kasutati joonlauda, statiivi ning telefoni kaamerat. Väga oluline oli, et taust oleks hästi valgustatud.

Katsedetailid on mõõtmetega 400x400 mm ning paksusega 100 mm. Ülemine ja külgmised lõikeservad töödeldud vedelkummiga ning alumine lõikeserv töötlemata või töödeldud vedelkummi, hermetiseerimislinde või veepõhise veetõkkevärviga. Vedelkumm on ehituses kasutatav hüdroisolatsioonimaterjal [29].

## **2.3 Puidu niiskussisalduse määramine**

### **2.3.1 Elektritakistuse meetod**

Puidu niiskussisaldust on võimalik mõõta elektritakistuse meetodil. Antud meetodit reguleerib standard EVS-EN 13183-2 ehk Saematerjali üksuse niiskussisaldus osa: Määramine elektritakistuse meetodil (inglise keeles: European Standard - Moisture content of a piece of sawn timber- Part 2: Estimation by electrical resistance method) [30]. Elektritakistuse meetodil mõõtmise jaoks on välja arendatud spetsiaalsed mõõteseadmed, mille tööpõhimõtted on, et niiskussisalduse muutumisel muutub ka proovikeha elektritakistus. Elektritakistuse meetod toimib puidu niiskussisaldustel vahemikus 7-30% [30]. Seade on üles ehitatud nii, et sama seadmega on mugav võtta ka lugemeid proovikeha sügavamatest kihtidest ning see toimub kahe elektrit juhtiva teraviku puidu sisse surumisel. Oodata tuleb 2-3 sekundit ning seade arvutabki välja proovikeha niiskussisalduse. Meetod on oluliselt lihtsam ja kiirem, kui kuivatusmeetod ning annab võimalusi minna mõõtetulemustega detailsemaks. Euroopa standard seab elektritakistuse meetodil ette ka mõned juhised, kuidas tuleb mõõtmisi läbi viia. Nimelt tuleb mõõtetulemused võtta vähemalt 300 mm kaugusel kõigist proovikeha servadest [30]. Kui proovikeha mõõtmed on alla 600 mm, tuleb mõõdistused teha keskpunktist [30]. Käesolevas töös kasutati puidu niiskussisalduse mõõtmiseks elektritakistuse meetodil põhinevat seadet Logica LG9-NG (Joonis 14).



Joonis 14 – Elektritakistuse meetodil niiskussisaldust mõõtev aparaat Logica LG9-NG

## 2.4 Niiskuslevi modelleerimise kirjeldus

Niiskuslevi arvestava mudeli loomiseks kasutatakse Delphin 5.9 arvutitarkvara. See on tarkvara, mis võimaldab joonistada lihtsustatud 2D mudeli detailist ning sellele anda mingi kindla materjali omadused, ääritingimused ja algtingimused. Kuna asja hinnatakse niiskustehnilisest aspektist, siis materjali peamised omadused on poorsus, tihedus, kiu suund ja kapillaarne veeimavus. Ääritingimused on temperatuur, suhteline õhuniiskus ning loomulikult kokkupuude veega ja selle lõpp. Algtingimusteks on proovikeha temperatuur ning niiskussisaldused detailide erinevates punktides. See peatükk kirjeldab täpsemalt kasutatud arvutitarkvara ning tööd, mida veeimavuse ja niiskustõkete toimivuse katsete modelleerimiseks tehti.

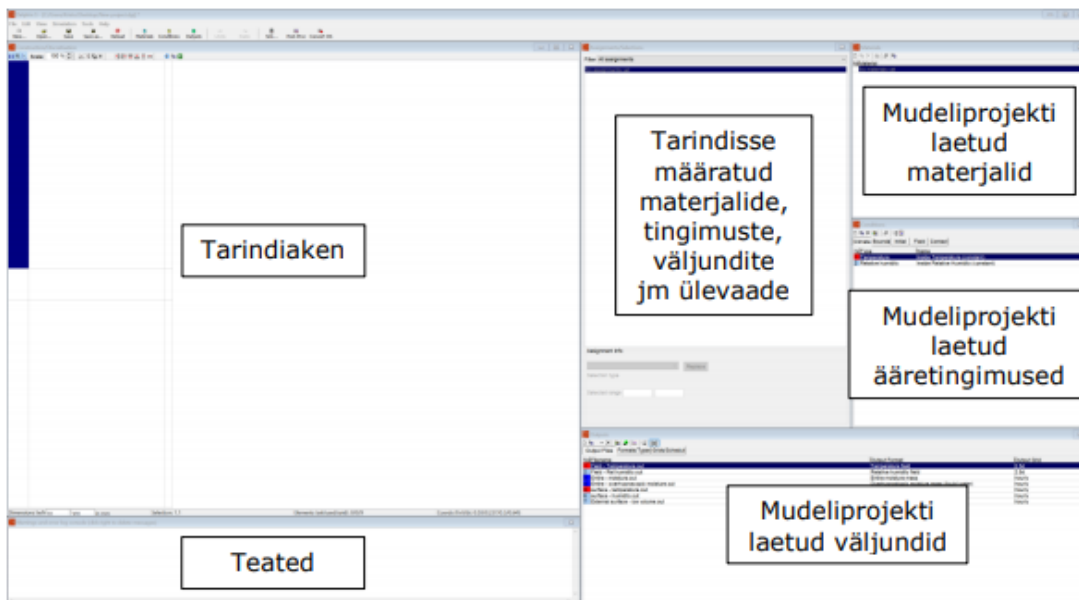
### 2.4.1 Arvutitarkvara Delphin 5.9 lühikirjeldus

Delphin 5.9 arvutitarkvara on konstruktsiooni soojus- ja niiskustehnilist toimivust analüüsiv tarkvara, mis võtab arvesse muutuvat keskkonda ja materjali ning selle omaduse sõltuvust keskkonnatingimustest. Arvutusmodelite koostamiseks kasutatava tarkvara on välja töötanud Dresdeni Tehnikaülikooli teadlased Andreas Nicolai, John Grunewald ja Heiko Fechner. Delphini programmil on palju väljundeid ka õhu liikumise ja tarindite soojapidavuse kohta, kuid kasutan antud tarkvara, et hinnata CLT niiskuse väljakuivamise probleeme ja nende ennetamist. [31]

Töö Delphinis algab konstruktsioonitüübi seadistamisega. Esmalt tuleb joonistada soovitud konstruktsioon valmis, eraldades materjalikihid. Edasi toimub Delphinis töö kuues erinevas aknas:

- Tarindiaken – konstruktsiooni kujutis, kus saab selle kihtidele materjale ja tingimusi määrama hakata;
- Käskluste aken – nimekiri määratud materjalidest, ääritingimustest ja väljunditest;
- Materjalide aken – projektis kasutatavate materjalide nimekiri;
- Tingimuste aken – siin on kirjas kliimafailid, ääritingimused, mudelile määratud algingimused;
- Väljundite aken – projektist välja arvutatavate suuruste ja nende asukohtade nimekiri ehk siis kõik väärtused, mida mudel peab arvutama, koos määratud asukohtadega konstruktsioonis;
- Teadete aken – info ja veateated.

Lisaks avakuvale on Delphin 5.9 programmile koostatud ka väga informatiivne ja sisukas Delphin Help kataloog. See sisaldab informatsiooni kõigi toimingute ja tegevuste kohta, mida see arvutitarkvara võimaldab.



Joonis 15 – Delphin 5.9 kuvaekraan

## 2.4.2 Tasakaaluvõrrandid

Delphini tarkvaral on väljatöötatud erinevad tasakaaluvõrrandeid, et lahendada temale antud käsklusi ja ülesandeid:

Lihtsustamaks tasakaaluvõrrandit, siis eeldatakse, et:

- kehtib Kelvini võrrand poorirõhu ja suhtelise niiskuse kohta;
- faaside vaheline rõhuerinevus ja vee difusioon on tühised, seega neid ei arvestata;
- rõhkude tasakaal esineb kõikide faaside vaheline rõhuerinevus;
- tahkete materjalide deformatsioone ei võeta arvesse, sest need on väikesed;

- jääd ei teki. [31]

Võttes arvesse need lihtsustused, siis avaldub **niiskuse massi tasakaalu võrrand** järgmisel kujul:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_w+v} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v} \right] + \sigma_{REV}^{m_w+v}$$

**Veeauru konvektiivne liikumise voog:**

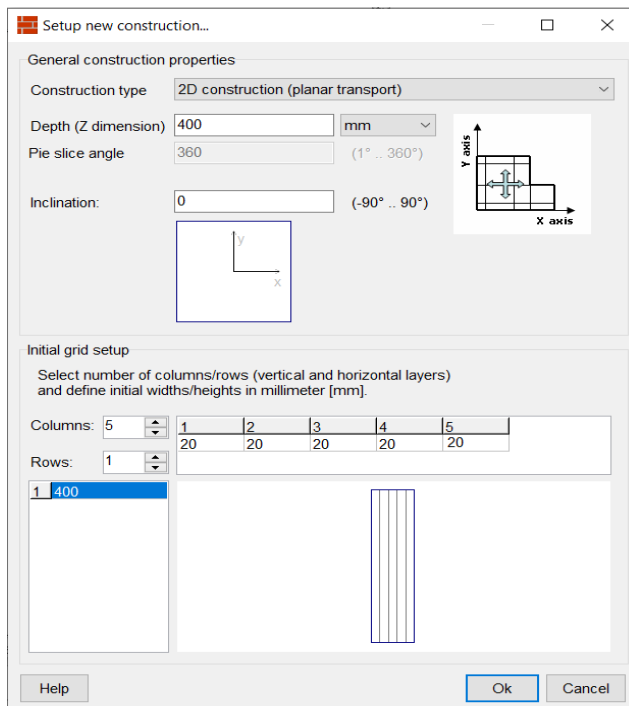
$$j_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} \cdot j_{conv}^{m_g}$$

**Difusiooni teel liikuv veeaur:**

$$j_{diff}^{m_v} = - \frac{D_{v,air}(T)}{\mu R_v T} f(\theta_g) \frac{\partial p_v}{\partial x}$$

### 2.4.3 Dünaamilise arvutusmudeli konstruktsioonide loomine ja materjalidega sidumine

Töö Delphini programmis hakkab CLT katsedetaili ristlõike ülesjoonistamisega. Ära tuleb määratleda detaili mõõtmed ning kihid. Katses kasutati 400x400x100 mm detaile.

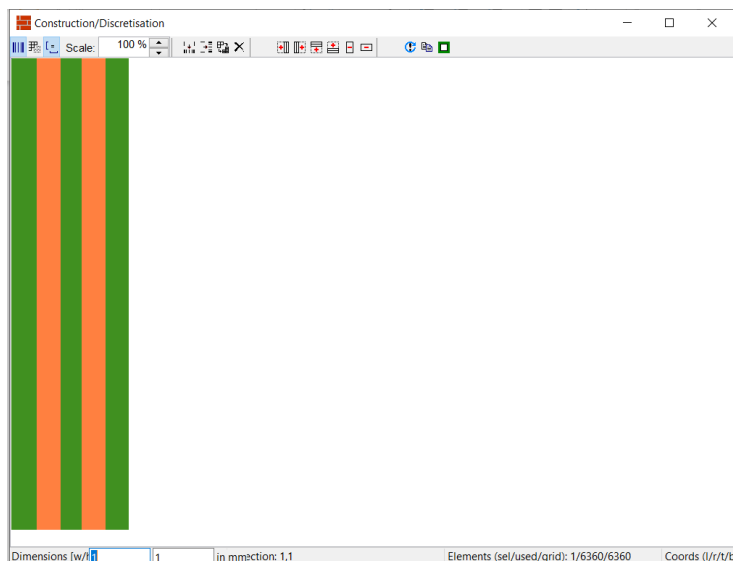


Joonis 16 – Delphin 5.9 konstruktsiooni lõike üles joonistamine

Kui konstruktsioon modelleerimise jaoks on valmis skitseeritud, siis on mõistlik igale kontuurile määrata iseloomulikud materjalid koos vastavate omadustega. Katsedetailide puhul on tegemist Arcwoodi osaühingust tarnitud ristkihtliimpuit paneelidega, mille saematerjal on kuusepuust. Seega valin materjalidest välja kuusepuidu ning vastavalt



kihtidele lisan piki-kiu suunaga puidu materjali ning risti-kiu suunaga puidu materjali mudelise. Igale materjalile seotakse külge teada iseloomustav värvus.



Joonis 17 – Kuvatõmmis Delphini konstruktsiooniaknast määratud materjali kihtidega

#### **2.4.4 Arvutusmodelile kliima- ning ääritingimuste loomine ja algsete keskkonnatingimuste määramine**

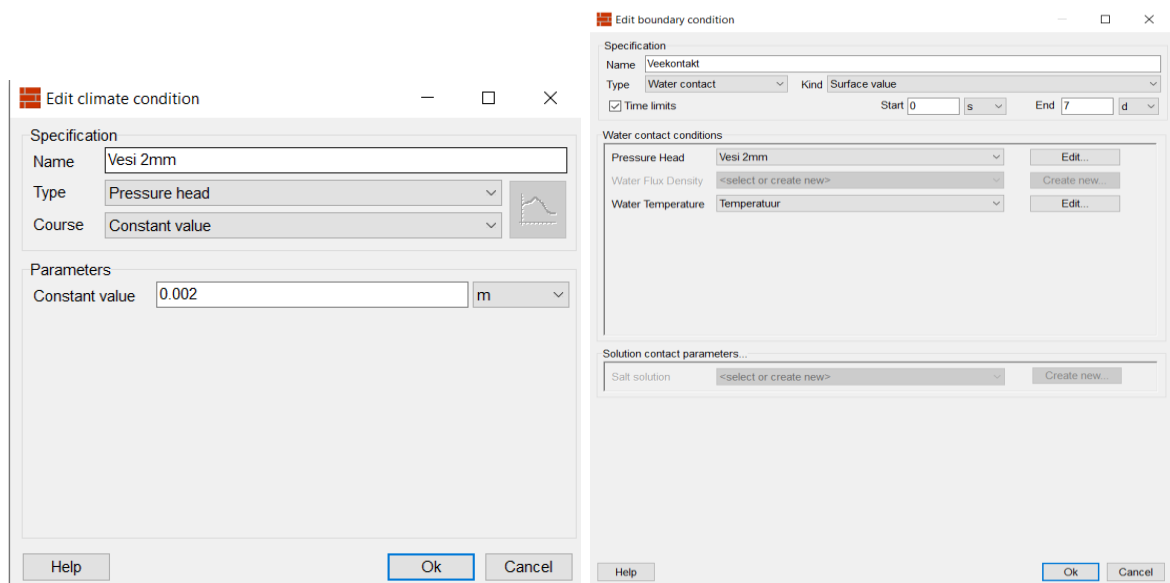
Enamik mudelile antavatest ääritingimustest on seotud otseselt kliimaga, milles detail katse käigus viibib. Seega tuleb alustada kliimafailide loomisest. Selleks võtsin aluseks ristkihtliimpuidu lõikeserva veeimavuse katse käigus mõõdetud temperatuurid ja suhtelised õhuniiskused [25]. Kliimafailide loomiseks tuleb võtta lugemid, kus on korra tunnis võetud temperatuuri ning suhtelise õhuniiskuse näidud. Nende põhjal luuakse Notepadis tekstifail, kus esimene veerg näitab päeva, teine veerg kellaega ning kolmas veerg vastavalt siis temperatuuri või suhtelise õhuniiskuse näitu. Delphini kliimafailide puhul on oluline, et komakohad on tähistatud punktiga ning õhuniiskuse näidud kümnendmurruna. Õige vormistuse korral saab programm täpselt aru, millise antud ajalise väärtusega on tegemist ning oskab seda seostada kuupäevaga. Selleks tuleb kuupäeval anda numbriline väärtus, kus 0 tähistab 1.jaanuari ning 364 tähistab 31.detsembrit. Kokku 365 päeva, nagu tavalises aastas. Lisakommentaaridena sai kliimafailidesse veel ära määratud asukoht; kliimafaili tüüp, kas temperatuur või suhteline õhuniiskus ja vastavalt tüübile mõõtühik.

1	#			1	#		
2	# TARTU, ET			2	# TARTU, ET		
3	# Type: Temperature			3	# Type: Relative humidity		
4				4			
5	TEMPER	C		5	RELHUM	---	
6				6			
7	31 13:51:03	22.709		7	31 13:51:03	0.29705	
8	31 14:06:03	22.35		8	31 14:06:03	0.28935	
9	31 14:21:03	22.158		9	31 14:21:03	0.28583	
10	31 14:36:03	22.158		10	31 14:36:03	0.27943	
11	31 14:51:03	22.158		11	31 14:51:03	0.27706	
12	31 15:06:03	22.158		12	31 15:06:03	0.27774	
13	31 15:21:03	22.158		13	31 15:21:03	0.27774	
14	31 15:36:03	22.158		14	31 15:36:03	0.27909	
15	31 15:51:03	22.35		15	31 15:51:03	0.28733	
16	31 16:06:03	22.493		16	31 16:06:03	0.28947	
17	31 16:21:03	22.278		17	31 16:21:03	0.28154	
18	31 16:36:03	22.11		18	31 16:36:03	0.2804	
19	31 16:51:03	22.015		19	31 16:51:03	0.27898	
20	31 17:06:03	21.991		20	31 17:06:03	0.28233	
21	31 17:21:03	22.11		21	31 17:21:03	0.27635	
22	31 17:36:03	22.206		22	31 17:36:03	0.27372	
23	31 17:51:03	22.278		23	31 17:51:03	0.27175	
24	31 18:06:03	22.373		24	31 18:06:03	0.29879	
25	31 18:21:03	22.23		25	31 18:21:03	0.29867	
26	31 18:36:03	21.943		26	31 18:36:03	0.30178	
27	31 18:51:03	21.823		27	31 18:51:03	0.30235	
28	31 19:06:03	22.015		28	31 19:06:03	0.31522	
29	31 19:21:03	22.206		29	31 19:21:03	0.32207	
30	31 19:36:03	22.302		30	31 19:36:03	0.33347	
31	31 19:51:03	22.541		31	31 19:51:03	0.35822	
32	31 20:06:03	22.254		32	31 20:06:03	0.35364	
33	31 20:21:03	21.943		33	31 20:21:03	0.35763	
34	31 20:36:03	21.823		34	31 20:36:03	0.35686	
35	31 20:51:03	21.728		35	31 20:51:03	0.35083	
36	31 21:06:03	21.728		36	31 21:06:03	0.34818	
37	31 21:21:03	21.704		37	31 21:21:03	0.35245	
38	31 21:36:03	21.656		38	31 21:36:03	0.35867	
39	31 21:51:03	21.584		39	31 21:51:03	0.36518	
40	31 22:06:03	21.561		40	31 22:06:03	0.3714	
41	31 22:21:03	21.513		41	31 22:21:03	0.37496	
42	31 22:36:03	21.513		42	31 22:36:03	0.37365	
43	31 22:51:03	21.537		43	31 22:51:03	0.37957	
44	31 23:06:03	21.537		44	31 23:06:03	0.38153	
45	31 23:21:03	21.489		45	31 23:21:03	0.39714	
46	31 23:36:03	21.441		46	31 23:36:03	0.40165	
47	31 23:51:03	21.417		47	31 23:51:03	0.40292	
48	32 00:06:03	21.417		48	32 00:06:03	0.412	

Joonis 18 – Delphini tarbeks loodud kliimafailid: 1.veerg päev, 2.veerg kellaeg, 3.veerg väärtus; 1. tabel on temperatuur, 2.tabel on suhteline õhuniiskus

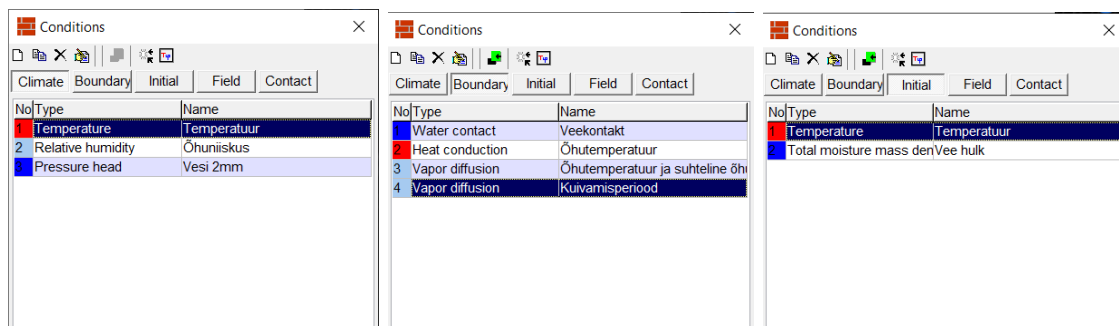
Lisaks kliimale tuleb Delphinis luua ka veekontakt, kus detail on alumise küljega 2 mm ulatuses veekontaktis. Veekontakti ääritingimuse loomisel sain abi Delphin programmiga kaasnenud dokumentatsioonist. Kuna Delphini näol ongi tegemist niiskuslevi programmiga, siis on peamine ääritingimuse tüüp „veekontakt“ seal juba valikus olemas. Tuleb ainult täpsustada, et tegemist on mingi pinna väärtusega ning määrata veekontakti kõrgus kliimatingimusega. Ka see on lihtne protsess, milleks tuleb luua Delphinis kliima alla veesurve tingimus ning määrata selle kõrguseks 2 mm. Selle kliimatingimuse seon ära ääritingimusega ning vastavale detaili küljele seda ääritingimust määrates on tekkinud olukord, kus katsedetail on paigutatud 2 mm

kõrguse vee sisse. Ääritingimusele lisatakse ka ajaline tingimus, kestusega 7 päeva. Veekontakti pikkus on sätestatud 7 päeva vastavalt mudeli koostamise aluseks olnud veemavuse katsele.



Joonis 19 – Veekontakti määramine Delphinis

Järgmiseks sätestan mudelis joonistatud konstruktsioonile ääritingimused. Need on otseselt seotud ennem üle kantud ja loodud kliimafailidega. Ääritingimusteks on veekontakt alumises küljes, vedelkumm pealmises küljes ning õhutemperatuur ning õhuniiskusest tingitud keskkonna veeaururõhk külgedel ja peal. Kuivamisperiodil lisandub veel siia ka difusioonitakistav CLT kiht alumises küljes. Ääritingimused rakenduvad ainult detaili välimistele kihtidele. Selleks tuleb need detailile määrata. Detaili ja tema kihid diskreeditakse ehk jaotatakse ära mahult väiksemateks fragmentideks ehk osadeks. Seejärel tuleb iga ääritingimuse jaoks ära märgistada vastavad ruudud. Viimaks, et korrektne keskkond ja detaili niiskusomadused paika saada, tuleb lisada ka detaili esialgsed keskkonnatingimused, mis antud näitel on siis temperatuur ja niiskussisaldus ehk vee hulk katsedetailis.



Joonis 20 – Delphin 5.9 kliimafailide ning ääritingimuste aken

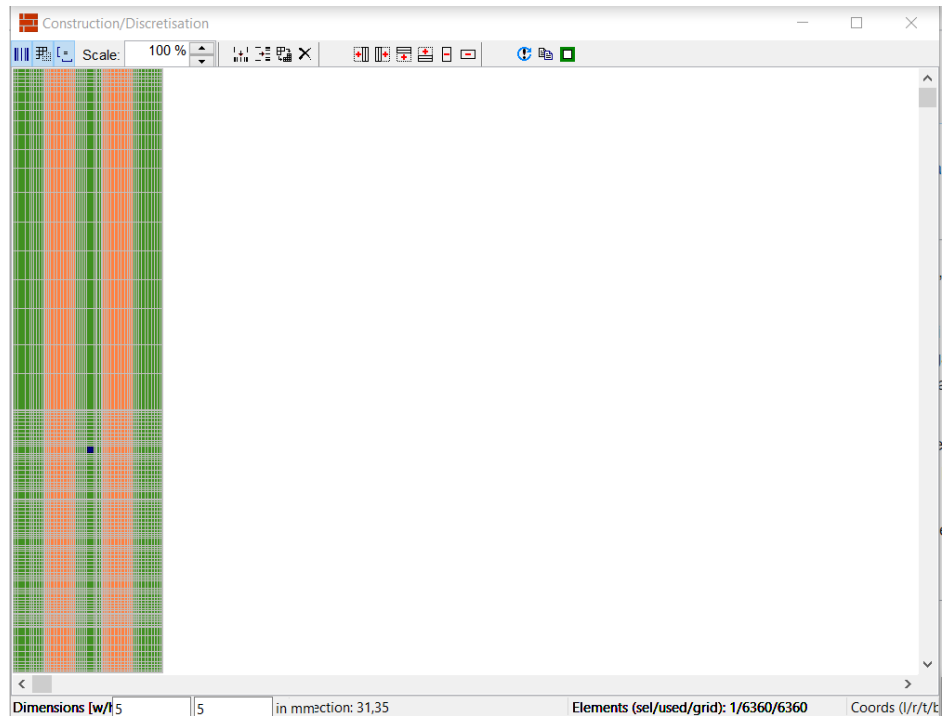
Nüüd kus detaili ümber paiknev keskkond on kliimafailide ja ääretingimuste vahel paika pandud, tuleb asuda märkima mudeli väljundeid. Väljundi (ingl.k output) on punkt mudelis, mille kohta arvutatakse vajalikud näitajad. Katse baasil oli igale katsekehale kokku kümme mõõtepunkti – viis tükki erinevatel kõrgustel 5 mm sügavusel ja viis tükki erinevatel kõrgustel 50 mm sügavusel. See tähendab programmis iga mõõtepunkti kohta nelja väljundit:

- Vee osakaal – mitu kg/m<sup>3</sup> on puidus vett
- Temperatuur
- Vee hulk – mitu % proovikehast on vesi
- Suhteline niiskus mõõtepunktis

Väljundite lisamise juures on oluline nende võimalikult täpne asukoht, sest muidu on raske mudelit valideerida, kuna realselt mõõdetud tulemus võib asuda hoopis teises kohas. Selleks on Delphini tarkvaral võimalik konstruktsioon muuta väikesete fragmentidega osakesteks. Seda protsessi nimetatakse diskreetimiseks. Seejärel on vaja mõõta välja täpselt aluskatses kasutatud mõõtepunktide asukohad ning muuta väljundpunktide suurused sümmeetrilisteks ruutudeks. Autor ja juhendaja leppisid kokku, et kõige täpsema tulemuse saab kasutades 5x5 mm väljundpunkte. Tarkvaras väljundpunktide fragmentide mõõtude muutmisel muutub vastavalt ka kogu konstruktsiooni mõõt. Seega tuli muutunud mõõt teiste fragmentide pealt tagasi kanda, et konstruktsiooni enda mõõtmed jääksid samaks, mis katsedetailil.

1	Vee osakaal h-30mm, sügavus 5mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
2	Temperatuur h-30mm, sügavus 5mm.out	Temperatuur	Temperatuur
3	Vee hulk h-30mm, sügavus 5mm.out	Vee hulk	Vee hulk
4	Suhteline niiskus h-30mm, sügavus 5mm.out	Suhteline niiskus	Vee osakaal
5	Vee osakaal h-60mm, sügavus 5mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
6	Temperatuur h-60mm, sügavus 5mm.out	Temperatuur	Temperatuur
7	Vee hulk h-60mm, sügavus 5mm.out	Vee hulk	Vee hulk
8	Suhteline niiskus h-60mm, sügavus 5mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus
9	Vee osakaal h-90mm, sügavus 5mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
10	Temperatuur h-90mm, sügavus 5mm.out	Temperatuur	Temperatuur
11	Vee hulk h-90mm, sügavus 5mm.out	Vee hulk	Vee hulk
12	Suhteline niiskus h-90mm, sügavus 5mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus
13	Vee osakaal h-120mm, sügavus 5mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
14	Temperatuur h-120mm, sügavus 5mm.out	Temperatuur	Temperatuur
15	Vee hulk h-120mm, sügavus 5mm.out	Vee hulk	Vee hulk
16	Suhteline niiskus h-120mm, sügavus 5mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus
17	Vee osakaal h-150mm, sügavus 5mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
18	Temperatuur h-150mm, sügavus 5mm.out	Temperatuur	Temperatuur
19	Vee hulk h-150mm, sügavus 5mm.out	Vee hulk	Vee hulk
20	Suhteline niiskus h-150mm, sügavus 5mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus
21	Vee osakaal h-30mm, sügavus 50mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
22	Temperatuur h-30mm, sügavus 50mm.out	Temperatuur	Temperatuur
23	Vee hulk h-30mm, sügavus 50mm.out	Vee hulk	Vee hulk
24	Suhteline niiskus h-30mm, sügavus 50mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus
25	Vee osakaal h-60mm, sügavus 50mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
26	Temperatuur h-60mm, sügavus 50mm.out	Temperatuur	Temperatuur
27	Vee hulk h-60mm, sügavus 50mm.out	Vee hulk	Vee hulk
28	Suhteline niiskus h-60mm, sügavus 50mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus
29	Vee osakaal h-90mm, sügavus 50mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
30	Temperatuur h-90mm, sügavus 50mm.out	Temperatuur	Temperatuur
31	Vee hulk h-90mm, sügavus 50mm.out	Vee hulk	Vee hulk
32	Suhteline niiskus h-90mm, sügavus 50mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus
33	Vee osakaal h-120mm, sügavus 50mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
34	Temperatuur h-120mm, sügavus 50mm.out	Temperatuur	Temperatuur
35	Vee hulk h-120mm, sügavus 50mm.out	Vee hulk	Vee hulk
36	Suhteline niiskus h-120mm, sügavus 50mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus
37	Vee osakaal h-150mm, sügavus 50mm.out	Vee osakaal	Vee osakaal
38	Temperatuur h-150mm, sügavus 50mm.out	Temperatuur	Temperatuur
39	Vee hulk h-150mm, sügavus 50mm.out	Vee hulk	Vee hulk
40	Suhteline niiskus h-150mm, sügavus 50mm.out	Suhteline niiskus	Suhteline niiskus

Joonis 21 – Väljundite aken Delphin 5.9



Joonis 22 – Diskreeditud katsedetail, ära märgitud õiges suuruses väljundpunkt, mida on näha joonisel kokku kümme

## 2.5 CLT kihtide veeimavuse määramine

Kuna Delphini mudelis arvestan piki kiudu ja risti kiudu kihte, siis veeimavuskoefitsiendi määramiseks eraldasid detailist saematerjali kihid. Selleks kasutati Jõgevamaal, Kadrinas saekaatriis asuvat lintsaagi. Selle tulemusena sain piisava koguse mõlemat tüüpi saematerjali kihte katsetamiseks.



Joonis 23 – Detailide kihtide eraldamine

Detailid saeti läbi vertikaalselt, et kätte saada algse tooraine kihid – saematerjali lipid. Saagimissuund sai valitud just niiskuslevi suuna tõttu ning CLT kihid on kokku liimitud just selles suunas. Sellega sain kätte igast detailist 9 piki kiudu katsekeha ning 3 risti kiudu katsekeha. Peale saagimist viisin detailid katselaborisse.

Standardi EVS kohaselt peab katsekeha saavutama tasakaaluniiskuse, seega esmalt viidi katsekehad laborisse aklimatiseeruma. Standardi EVS-EN ISO 15148:2003 kohaselt ei tohi katsekeha mass muutuda 24 tunni jooksul rohkem kui +/- 0,1% proovikeha massist. [32]

Katsekehad ei olnud kaua laborist välja olnud, seega ei vajanud aklimatiseerumiseks rohkem kui 1 päev. Kasutasin kaalumiseks Kern DS30 K0,1L kaalu, mille kalibreerimistunnistus on näidatud Lisas 2. Olles detailid üle kaalunud, tuli veeimavuse katse ettevalmistamiseks katta kõik vedelkummiga detaili küljed peale tema veekontakti mineva külje, et niiskuslevi toimuks ainult kas piki kiudu või risti kiudu ning et vältida keskkonnast niiskuse imendumist. Oluline oli detail katta paraja kihiga, et see imenduks ka puidu pealmistesse kiududesse. Detailid kaaluti peale vedelkummi lisamist uuesti.



Joonis 24 - Detailid kaetuna vedelkummiga – vastu puitu katmata külg

Peale vedelkummiga katmist töötasin välja süsteemi, kuidas kahte liiki saematerjali katsekehad panna veekontakti. Risti kiudu katsetatavad detailid toetasin katseanuma põhja plastikkandurite abil ning piki kiudu katsetatavad detailid kinnitasin sirge prussi külge, mille sai toetada katseanuma külgedele. Niimoodi oli tagatud ühtlane veenivoo kõigile katsedetailidele. Veenivoo kõrguseks sai valitud 2 mm, sest niimoodi oli ka algses katses. Veenivoo stabiilsena hoidmiseks tuli seda kaalumiste vahel ka jälgida ning aeg-ajalt vett lisada.



Joonis 25 - Katsedetailid veekontaktis

Standard EVS-EN ISO 15148:2003 kohaselt kestab kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramise katse vähemalt 24h. [32] Kuna tegemist oli üpris väikese kontaktpinnaga, siis sai katse kestus pikendatud 48h pikkuseks, et saada kätte modelleerimiseks võimalikult täpne tulem. Kui detailid said pandud veekontakti, siis tuli hakata mõõtma aega ning kaaluma proovikehasid. Kaalumised toimusid esmalt tihemini ja mida aeg edasi, seda suuremaks läks kaalumiste vaheline aeg. Kaalumised toimusid 5 ja 20 min järel ning seejärel 1h, 2h, 5h, 8h, 24h ja 48h järel. Katsekeha eemaldati veest, kuivatati üleliigne vesi lapi või käsnaaga ning seejärel kaaluti detailid ja märgiti üles katsekeha mass ajahetkel t. Nende andmete põhjal arvutasin katsekeha detaili massi kasvu kontaktpinna kohta, kasutades valemit:

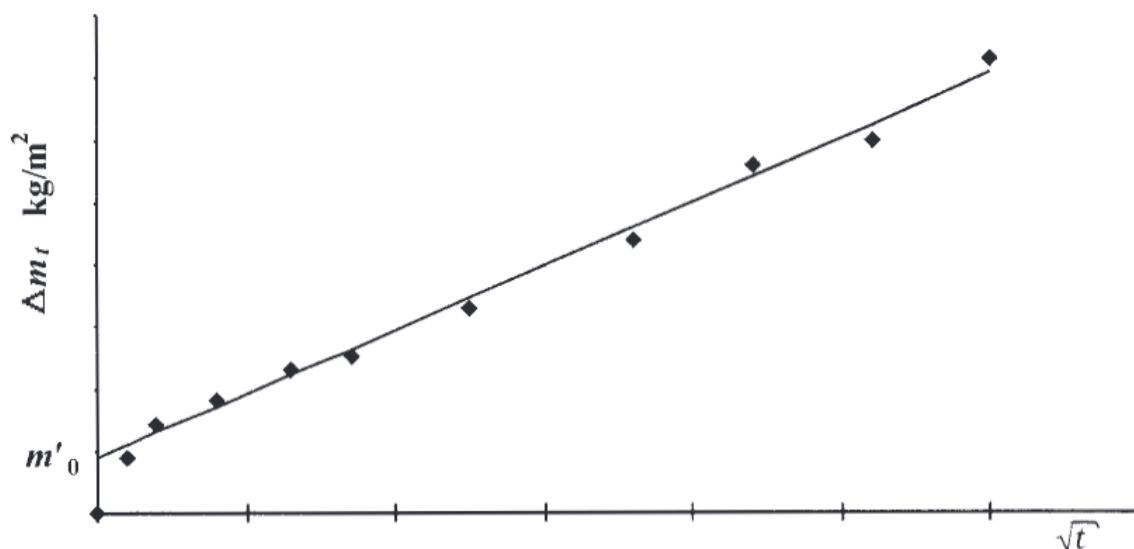
$$\Delta m_t = (m_t - m_i)/A$$

$m_t$  – katsekeha mass ajahetkel t

$m_i$  – katsekeha mass enne veekontakti

A – katsekeha kontaktpindala

Nende andmete alusel sai koostada graafiku, mille abil leida valemi viimane puuduolev väärtus, milleks on niiskuse tõusujoone lõikumine massi muudu teljega.



Joonis 26 - Veeimavuse graafik

Seejärel olid käes kõik vajalikud andmed, et arvutada välja suurus  $A_w$ , mida nimetatakse kapillaarse veeimavuse koefitsiendiks. Selle arvutamiseks kasutasin valemit:

$$A_w = \frac{\Delta m'_t - \Delta m'_0}{\sqrt{t_t}}$$

$A_w$  – kapillaarne veeimavuskoefitsient



$\Delta m'_{tr}$  – katsekeha massi muutus veekontakti pindala kohta

$\Delta m'_0$  – kapillaarse niiskuse tõusujoone lõikumine massi muudu teljega

$t_r$  – aeg sekundites  $\sqrt{t}$

Peamine põhjus, miks katse sai läbi viidud oli probleem arvutusmodeli veekontaktiga. See ei haakunud katse tulemustega ning näitas kohati vastakaid tulemusi. Laboratoorse katse läbiviimise järel järeldasin, et tõepoolest oli Delphinis esindatud kuusepuidu materjali veeimavuskoeffitsient mitu korda suurem kui minu arvatud väärtus. Tänu sellele katsele sain oma arvutusmodelit täiendada katseliselt tõestatud arvudega.

Veeimavuskatse lõpus tekkis idee elektroodtakistusmõõturiga mõõta ka katsedetailide niiskussisaldust peale veekontakti. Eesmärk oli näha, et kas veekontakti tulemusena on ületatud ka kriitiline niiskussisaldus katsedetailides.

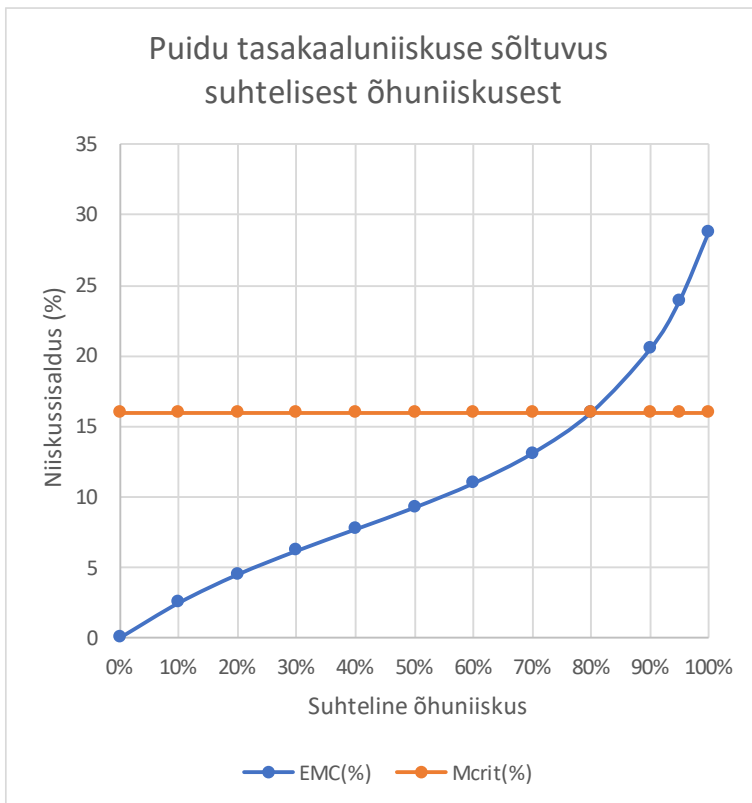
## 2.6 Arvutusmodeli kalibreerimine

Arvutusmodeli kalibreerimise eesmärk on mudel, mis sarnaneb võimalikult palju oma tulemuste poolest katseliselt mõõdetud tulemustega. Arvutusmodeli kalibreerimiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis 2020. aastal koostatud magistritöö veeimavuse katse mõõtmisandmeid. Kalibreeritud arvutusmodeliga teostati arvutused, et näha niiskuslevi ja niiskussisalduse muutumist ajas ristkihtliimpuidust detailides. Arvutusmodelid said koostatud vastavalt 2020. aastal koostatud magistritöö veeimavuskatsele ja neid on kokku neli tükki (sise- ja väliskeskkonnas kuivamisel avatud keskkonnal ning sise- ja väliskeskkonnas vastu difusiooni takistavat pinda, siin ristkihtliimpuit). 7-päevase veekontakti vältel olid katsekehad kõik samades tingimustes. Kitsamatelt külgedelt ja pealt kaetud vedelkummiga, et imiteerida seinaelementi ning alumine külg kahe millimeetri kõrguse veesambaga kokkupuutes. Täpsem jaotus toimus kuivamisperioodi vältelt. Detailid jagunesid laborikeskkonnas siseruumis ning väliskeskkonnas kontaktpinnaga avatud keskkonnale ning kontaktpind kaetud difusiooni takistava ristkihtliimpuit detaili 400x400 mm küljega. Selliste parameetrite ja tingimuste alusel said mudelid loodud. Kliimatingimused olid mõõdetud veekontakti ja kuivamisperioodi vältel mõlemas keskkonnas andurite abiga. Arvutusmodeli täpsust hinnati vastavalt mõõtepunktides elektritakistusmõõturiga mõõdetud niiskussisaldustele. Katsemõõtmised olid tehtud 5 mm ja 50 mm sügavuselt detaili seest ning omakorda 30, 60, 90, 120 ja 150 mm kõrguselt. Samamoodi määrasin arvutusmodelile väljundid neisse punktidesse ning võrdlesin arvutustulemusi 2020. aastal koostatud magistritöös teostatud veeimavuskatse mõõtetulemustega. Kuna puit on materjal, mille rakkude ja kiudude jaotus on igas detailis erinev, siis ka mõõtetulemused ei olnud konkreetseid, vaid asusid mingis vahemikus vastavalt detailile. Selle tõttu sai ka mudelile antud vastav varieeruvus, kasutades kahte erinevat

puitmaterjali – ühte varasema teadustöö tarbeks kasutatud kuusepuitu ning Delphini materjalivalikus olevat kuusepuitu. Modifitseerisin materjalide parameetreid vastavalt arvutustele, õppematerjalidele ning laborikatsetele. Näiteks sai korrigeeritud veeimavuskoefitsienti, difusioonitakistustegurit ja materjalide tihedusi. Suurem eesmärk oli koostada võimalikult täpne arvutusmodel, mis oleks seoses katsetulemustega. Kuna katsetulemused varieerusid ka päris suurtes vahemikes, siis niiskuslevi täpsemaks uurimiseks koostasin kaks erinevat mudelit iga kuivamiskeskonna kohta. Erinevus seisnes arvutatava detaili materjalide parameetrites. Eesmärk oli kahe mudeli põhjal luua niiskuslevi kohta arvutustulemused tagavara kasuks ning tagavara kahjuks. Tagavara kasuks tähendab, et arvutustulemused on halvemad (suurem niiskussisaldus) kui reaalne olukord ning tagavara kahjuks on arvutustulemused paremad (väiksem niiskussisaldus) kui reaalne olukord.

Tabel 1 - Arvutusmudelil kasutatud puidu omadused

Materjali omadused (põhiväärtused ideaaltingimustes)	Delphini algne materjal	Materjal 1 kuusepuit	Materjal 2 kuusepuit
Tihedus kg/m <sup>3</sup>	520	410	500
Poorsus m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.695	0.678	0.695
Efektiivne küllastumine m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.69197	0.678	0.69197
Veeimavuse koefitsient kg/m · s <sup>0,5</sup> (piki kiudu/risti kiudu)	0.043211	0.013808	0.013808
Veeauru difusioonitakistustegur (piki kiudu/risti kiudu) -	5/478	50/230	50/230
Veejuhtivus kg/(m · s · Pa)	1.73E-09	6.33E-15	1.77E-10



Joonis 27 - Puidu tasakaaluniiskuse graafik 21,1°C temperatuuri korral

Arvutusmudel häälestati nii, et see modelleeriks katsekeha täpselt samasugustel tingimustel, nagu seda tehti laboris. Selle jaoks olid koostatud kliimafailid katse ajal keskkonna temperatuuri ja õhu suhtelise niiskuse kohta. Koostasin nende baasil Delphini jaoks kliimafailid. Kalibreeritud mudeli abil sain hinnata niiskuse välja kuivamist CLT-paneelist Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse tn õppe- ja laborihoone juurdeehitusel.

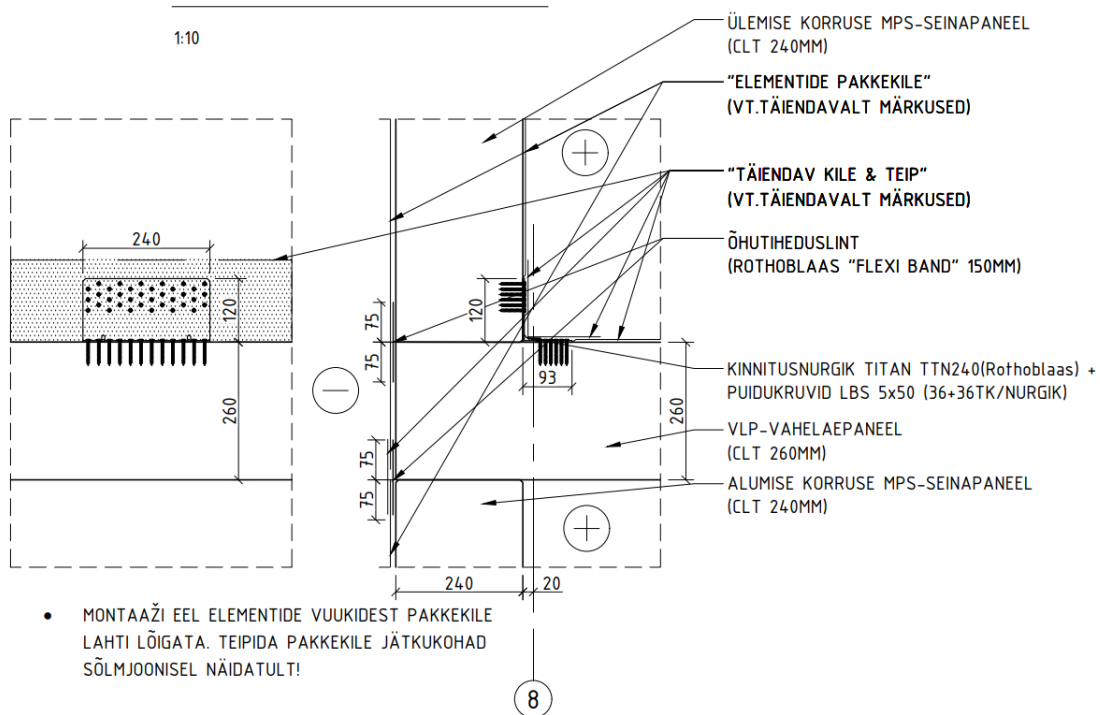
## 2.7 Kalibreeritud mudeli kasutamine analoogses olukorras

Võtsin olukorraks Mäepealse 3, Tallinn asuva õppehoone uue osa välisseinte kandekonstruktsioonide vahelae ja seina liitumise sõlmlahenduse (Joonised 28 ja 29). See sõlmlahendus osutus valituks, sest on analoogne juba koostatud arvutusmudeliga, kus märgunud CLT kontaktpind kinnitati teise CLT detaili külge. Nendes kasutati CLT-paneele, mis toodi objektile pakituna kilesse. Eesmärk oli monteerida detailid kiirelt ning seejärel pakkekile uuesti kinnitada. Ehituses on üpris tavaline, et kõik ei lähe nii nagu peab ning tõrgeteta ei möödunud ka nende CLT-paneelide montaaž. Probleem kerkis esile, kui niiskusturvalisuse ringkäigul avastati märgumise jäljed vahelae ja välisseina liitekohas. Kaks kuud hiljem olid endiselt näha, et paneel on märg. Otseselt ei olnud näha, nagu detail oleks juurde märgunud, sest vahelae pind oli kuiv. Siiski olid

möödetud niiskussisaldused väga suured. Seejärel pandi hoone ümber püsti telling ja saadi jälile märgumise peamisele põhjusele. Vesi oli pääsenud väljastpoolt CLT-detaili pakkekile vahele ning liikus sealt vahelae paneelile, mis kahjuks oli umbes 5-10 mm väljaulatuv. Niimoodi tekkis olukord, kus detail on täielikult märgunud ja vastu teist CLT-detaili. Siit ka eesmärk, hinnata arvutusmudeli põhjal, mis aja vältel möödetud niiskussisaldus detailist välja kuivab, kui detail asub väliskeskkonnas. Eesmärk oleks näha, et kui pikka aega vajab erinevatel aastaegadel sellise sõlmlahenduse niiskussisalduse taastumine allapoole kriitilist niiskussisalduse taset. Tasakaaluniiskuse graafikult Joonis 27 nähtub, et puidu niiskussisaldus on 16%, kui ümbritseva keskkonna temperatuur on umbes 15-20 kraadi ja õhuniiskus umbes 80%. Need on väga soodsad tingimused bioloogiliste kahjurite tekkeks [20]. Andsin Delphinis käsu modelleerida kalibreeritud mudelit Eesti 95-96 kondensaadi testaasta kliimatingimustega. See tähendab, et nüüd kasutasin kliimafaile, mis sisaldasid infot Eesti kondensaadi testaastal tehtud mõõtmiste kohta. Täpsemalt siis temperatuur ja suhteline õhuniiskus. Eesmärk oli kaardistada olukorrad kogu aasta vältel, seega valisin kevade, suve, sügise ning talve algused nendeks kuupäevadeks, millal algas möödetud liigniiskus tarindist välja kuivama. Eesmärk oli mudelist vaadata, mismoodi mõjutab ümbritsev kliima niiskuse välja kuivamist märgunud sõlmest. Talvel on niiskuse väljakuivamise potentsiaal väike, sest külmem õhk ei suuda siduda nii palju niiskust. Suvel vastupidi on väljakuivamise potentsiaal suurem, sest soe õhk suudab siduda paremini niiskust ja veeauru. Mudeli ajaliseks kestuseks sai võetud 365 päeva ehk 1 aasta. Sean hüpoteesiks, et kolme kuuga kuivab igal juhul niiskus CLT kriitilise niiskussisalduse tasemeni 16%. Keskkonna ääritingimustena kasutan 1995-96 aasta kliimaandmeid. Tegemist on kondensaadi testaastaga, mida Kalamees ja Vinha 2004. aastal täpsemalt uurisid ja selle kohta koostasid kliimafailid. Algniiskused detaili määrان vastavalt Kristo Kalbe fotole (Joonis 29). Kõige alumisse punkti ( $h=30$  mm) seadsin algseks niiskussisalduseks 37%.

### MASSIIVPUITSEINASÕLM MPSS-03

1:10



Joonis 28 - Mäepealse tn 3 seina/vahelae CLT liitekohta konstruktiivne sõlm

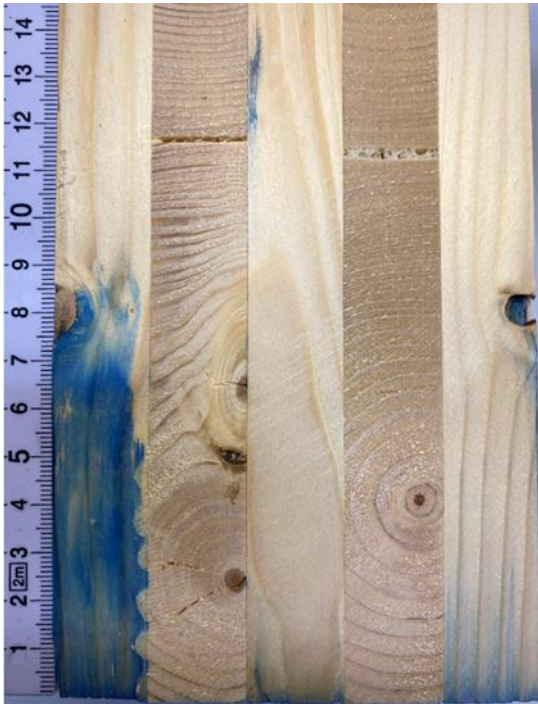


Joonis 29 - Märgunud CLT-detailid Mäepealse 3 ehitusobjekttil pildistatuna tellingult

### 3. TULEMUSED

#### 3.1 Varasema magistritöö mõõtmistulemuste sobivus arvutusmudeli kalibreerimiseks

Joonisel 30 on näha lõigatud ristkihtliimpuit detaili pinda, kus on indikaatorvedeliku jäljed. Tegemist on saematerjali vuugist tehtud lõikega.



Joonis 30 - lõigatud CLT-detail indikaatorvedeliku jälgedega

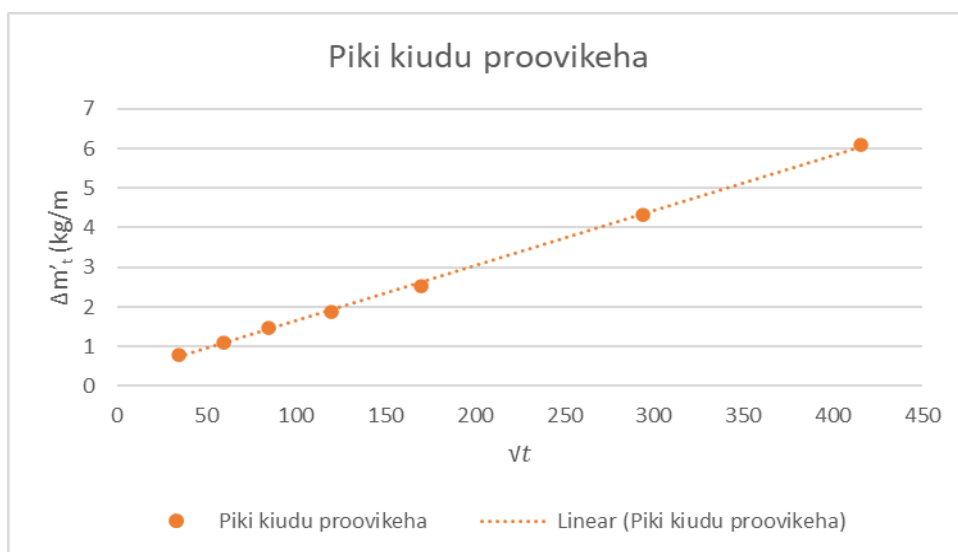
Peale 21 detaili tükideks lõikamist ning piltide ja niiskussisalduste mõõdistusandmete läbi töötamist leidsin mõned läbivad seosed. Võttes arvesse detailid, mille lõikeservad ei olnud töödeldud ning viidi läbi veekontakti katse. Juba esialgne pilk enne lõikamist detailidele viitas, et ilma niiskustõkketa detailide külgedel olevad indikaatorvedeliku jäljed polnud nii intensiivsed ja kõrged kui seda olid niiskustõkkega töödeldud detailide omad. See näitab seda, et töötlemata lõikeserv on niiskusele vastuvõtlikum ja seega ei toimunud nii intensiivset niiskuslevi mööda detailide külgi.

Analüüsi tulemusena selgus, et tint indikaatorvedelikuna võib-olla vale materjal. Pigment lahustub vee osakestes ebaühtlaselt või siis imendub materjalides erinevalt. See tähenda, et enamus pigmenti jäi pidama kas detailide töötlemata servadele või imendus puiduga kokkupuutel esimestesse kontaktpindadesse ja kaugemale ei liikunudki. Sellest tulenevalt selgus, et indikaatorvedeliku jälgi me arvutusmudeli kalibreerimisel kasutada ei saa. Siiski oli varasem magistritöö teostatud piisavalt

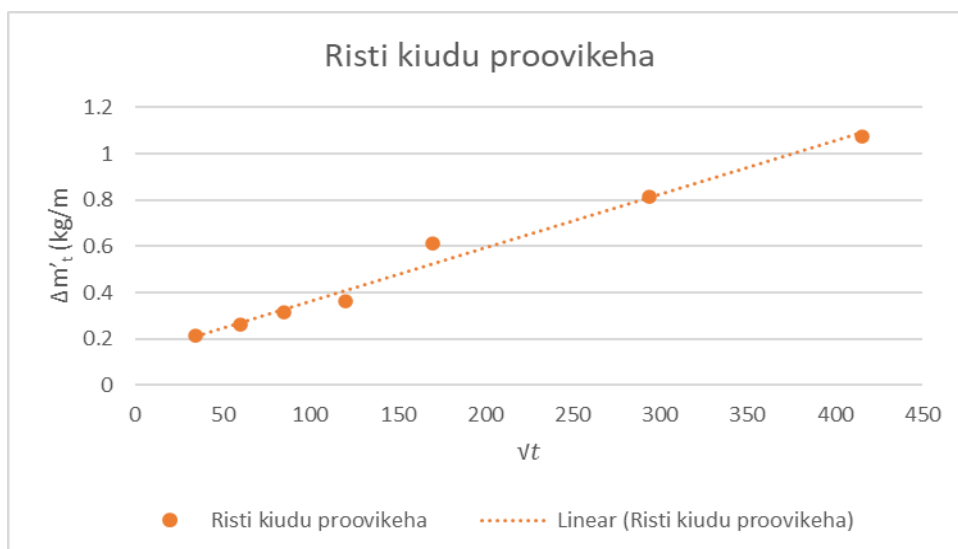
detailselt ning mõõtmistega vähemalt kord päevas. Seega sai kasutada neid tulemusi arvutusmodeli kalibreerimisel.

### 3.2 CLT kihtide veeimavus

Arvutuse tulemusena sain piki kiudu katsekeha kapillaarse veeimavuse väärtuseks  $0,0138 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$  ning risti kiudu katsekeha kapillaarse veeimavuse väärtuseks  $0,0023 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ . Kirjanduse kohaselt võin hinnata tulemusi usaldusväärseteks, näiteks on saadud piki kiudu väärtuseid vahemikus  $0,005\text{-}0,016 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$  ja risti kiudu vahemikus  $0,0019\text{-}0,003 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$  [6] [33]. Proovikehade veeimavusgraafikud on Joonistel 31 ja 32.



Joonis 31 – Piki kiudu proovikeha veeimavusgraafik, mille alusel saab valida valemiga kapillaarse veeimavuskoeffitsiendi arvutamiseks



Joonis 32 – Risti kiudu proovikeha veeimavusgraafik, mille alusel saab valida valemiga kapillaarse veeimavuskoeffitsiendi arvutamiseks

### 3.3 CLT kihtide niiskussisalduse mõõtmine elektritakistuse meetodil

Elektritakistumõõdistuse kohaselt kõik piki kiudu katsedetailid ületasid kriitilise niiskussisalduse kuni 20 mm kõrgusel kontaktpinnast, kus rekordtulemusena fikseerisin 37% niiskussisalduse. See tähendab juba puidu küllastumist veega. Enam kui kolmandik piki kiudu katsedetailidest saavutas rohkem kui 15% niiskussisalduse 30 mm kõrgusel kontaktpinnast. Kõrgemates mõõtepunktides vastas niiskus igati normidele ning nõuetele, millega võib CLT-detaile tehasest välja transportida. Risti kiudu katsekehade puhul ületati kriitiline niiskussisaldus vaid 10 mm kõrgusel kontaktpinnast ning ka seda kolmandikul detailidest. Selle järelendusena võib öelda, et risti kiudu niiskuslevi ei ole ohtlik, küll aga kujutab puidule ja tema omadustele ohtu piki kiudu toimuv niiskuslevi, sest kahe ööpäevase veekontakti tulemusena suutis kriitiline niiskus levida 30 mm kõrgusele detaili. Järjekordse kahe ööpäeva möödumise järel käisin uuesti mõõtnas niiskussisaldust ning mõõtmised näitavad, et enamus katsekehad suutsid selle perioodi vältel taastada ristkihtliimpuidu tavapärase niiskussisalduse 12-14%. Täpsemad mõõtetulemused on kirjas Tabelites 2 ja 3.

Tabel 2 - Elektritakistusega niiskussisalduse mõõtmine peale veekontakti piki kiudu proovikehade lõikes

	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm
PK2	22.10%	16.60%	12.70%	10.60%	9.40%	8.20%	7.50%	7.10%
PK4	22.90%	16.60%	13.50%	11.20%	9.80%	8.00%	7.90%	7.10%
PK5	32.20%	19.70%	16.60%	13.80%	11.50%	9.80%	6.40%	6.00%
PK6	22.50%	16.30%	13.90%	12.60%	11.60%	10.30%	9.90%	9.00%
PK8	36.40%	18.10%	14.10%	12.20%	10.20%	9.10%	7.90%	7.50%
PK10	22.10%	16.20%	12.20%	10.00%	9.50%	8.30%	7.00%	6.30%
PK11	24.40%	16.30%	12.40%	11.60%	10.20%	9.40%	8.60%	8.00%
PK13	22.20%	17.00%	13.80%	11.80%	9.50%	8.70%	8.00%	7.80%
PK15	37.00%	22.10%	15.00%	11.60%	8.70%	7.80%	7.70%	7.10%
PK16	26.50%	15.70%	13.70%	11.00%	9.50%	8.60%	7.80%	7.50%
PK17	22.70%	16.60%	14.60%	12.50%	11.70%	9.50%	8.80%	8.40%
PK19	22.80%	15.40%	12.30%	11.00%	9.50%	8.60%	7.70%	7.10%
PK23	22.10%	16.60%	14.60%	12.50%	11.20%	10.30%	9.40%	8.70%



Tabel 3 - Elektritakistuse meetodil niiskussisalduse mõõtmine peale veekontakti risti kiudu proovikehade lõikes

	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm
PK3	14.20%	10.20%	7.80%	7.00%	6.30%	5.80%
PK7	16.20%	8.70%	7.80%	7.00%	6.80%	6.30%
PK12	14.50%	8.30%	7.50%	7.10%		
PK18	15.30%	8.70%	7.60%	6.10%		
PK21	15.00%	7.90%	7.50%			
PK24	14.00%	8.70%	7.50%	7.00%		

### 3.4 Kalibreerimise tulemused

Tabel 4 - 2020. aasta veemavuskatse proovikehade keskkonnad detailide lõikes [25]

	Kontaktpind avatud keskkonnale	Kontaktpind vastu CLT
Sisekeskkond	Detailid 13-15	Detailid 16-18
Väliskeskkond	Detailid 19-21	Detailid 22-24

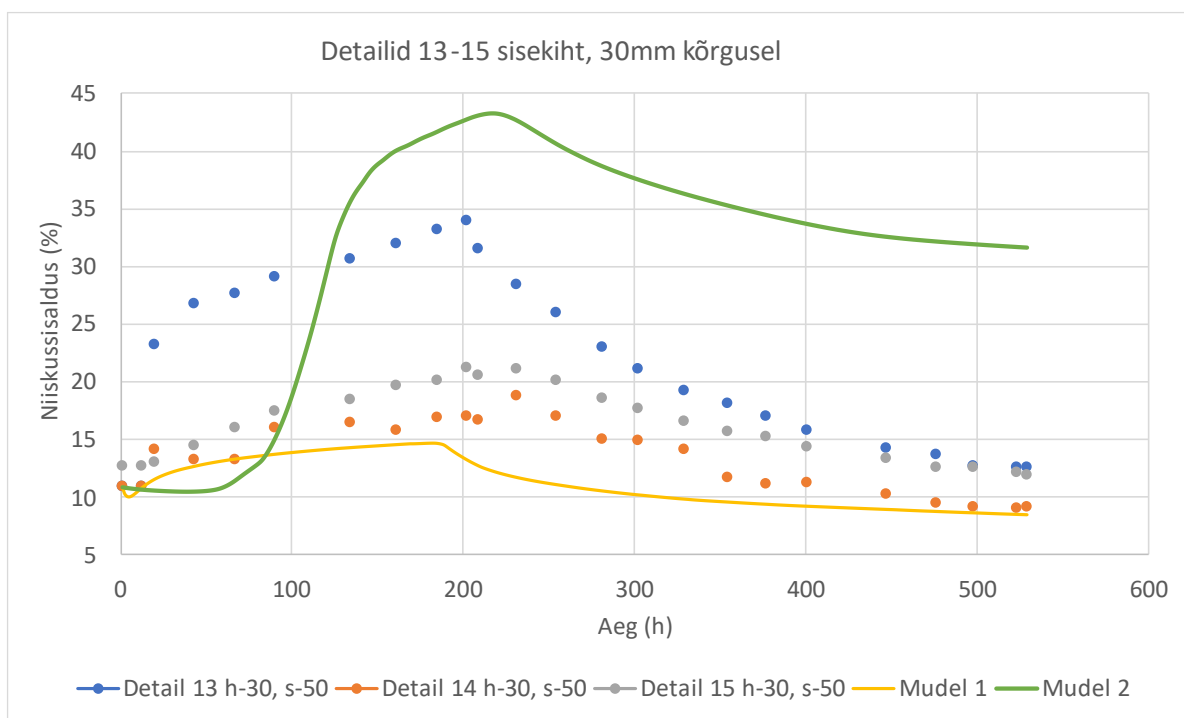
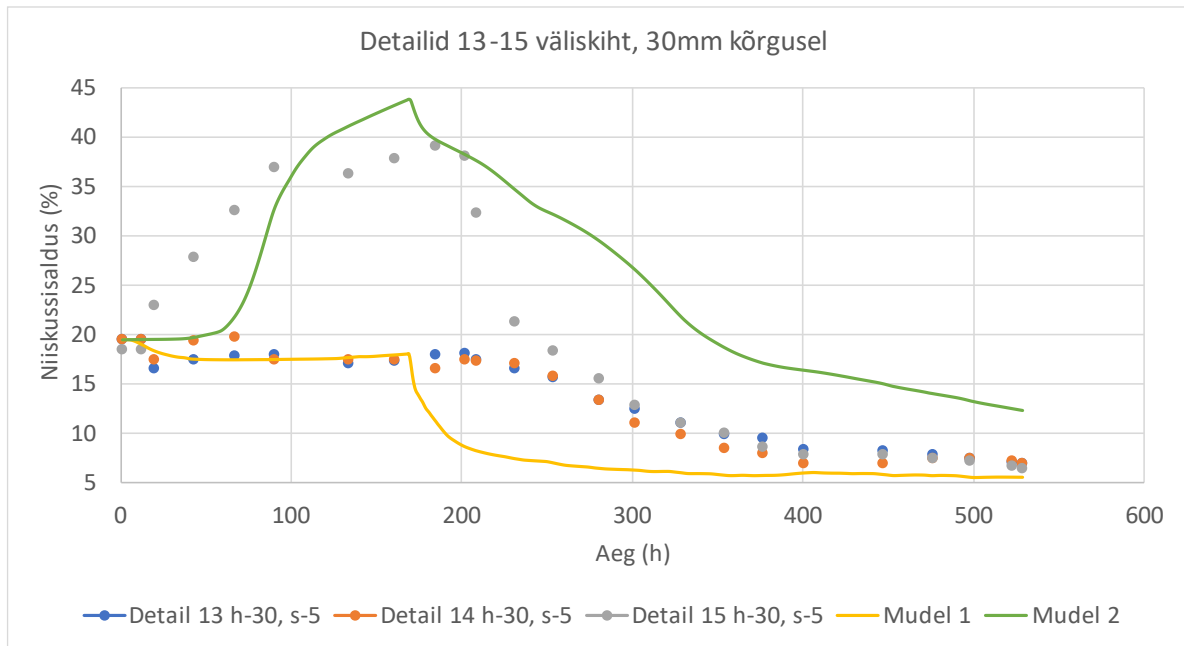
Tabel 5 - Kalibreerimistulemuste hindamistabel

	Mõõtepunkt	Veekontakt 168 tundi, h - 30 mm	Veekontakt 168 tundi, h - 60 mm	Veekontakt 168 tundi, h - 90 mm	Veekontakt 168 tundi, h - 120 mm	Veekontakt 168 tundi, h - 150 mm	Kuivamisperiood 120 tundi, h - 30 mm	Kuivamisperiood 120 tundi, h - 60 mm	Kuivamisperiood 120 tundi, h - 90 mm	Kuivamisperiood 120 tundi, h - 120 mm	Kuivamisperiood 120 tundi, h - 150 mm	Kuivamisperiood 240 tundi, h - 30 mm	Kuivamisperiood 240 tundi, h - 60 mm	Kuivamisperiood 240 tundi, h - 90 mm	Kuivamisperiood 240 tundi, h - 120 mm	Kuivamisperiood 240 tundi, h - 150 mm	Kuivamisperiood 360 tundi, h - 30 mm	Kuivamisperiood 360 tundi, h - 60 mm	Kuivamisperiood 360 tundi, h - 90 mm	Kuivamisperiood 360 tundi, h - 120 mm	Kuivamisperiood 360 tundi, h - 150 mm
		Mudel 1 sisekeskkonnale avatud	5 mm																		
	50 mm																				
Mudel 2 sisekeskkonnale avatud	5 mm																				
	50 mm																				
Mudel 1 sisekeskkond CLT kontakt	5 mm																				
	50 mm																				
Mudel 2 sisekeskkond CLT kontakt	5 mm																				
	50 mm																				
Mudel 1 väliskeskkonnale avatud	5 mm																				
	50 mm																				
Mudel 2 väliskeskkonnale avatud	5 mm																				
	50 mm																				
Mudel 1 väliskeskkond CLT kontakt	5 mm																				
	50 mm																				
Mudel 2 väliskeskkond CLT kontakt	5 mm																				
	50 mm																				

Legend: Roheline – arvutustulemused klapiavad mõõtmistulemustega  
 Kollane – arvutustulemused ei klapi, aga on tagavara kasuks  
 Punane – arvutustulemused ei klapi, aga on tagavara kahjuks

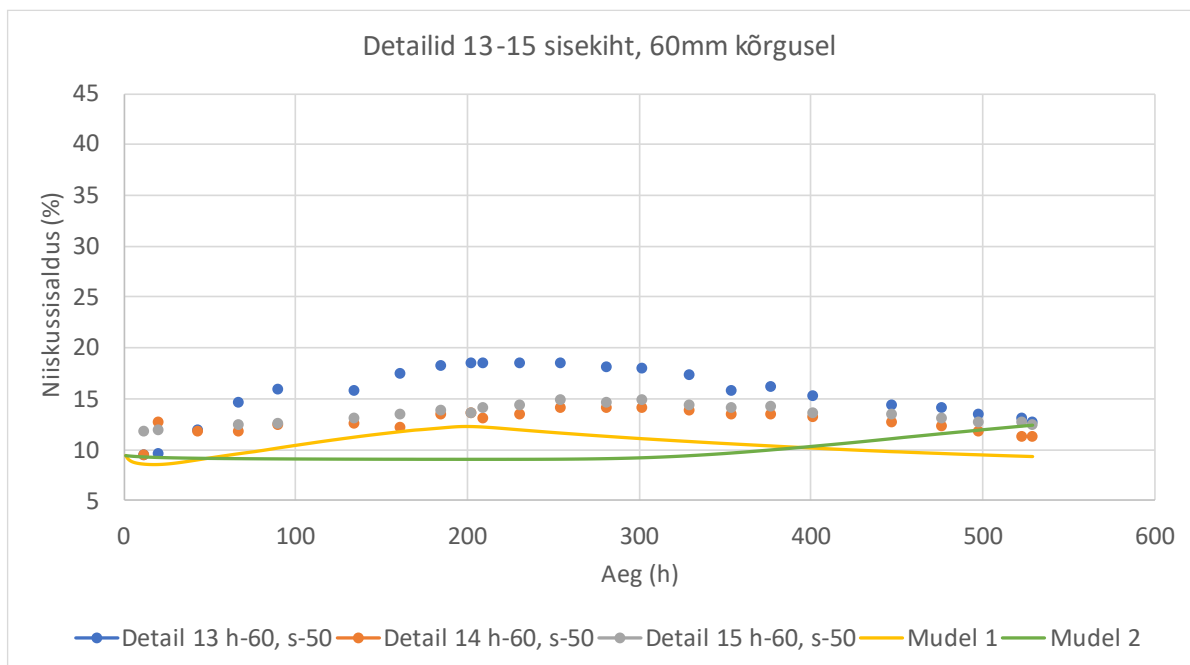
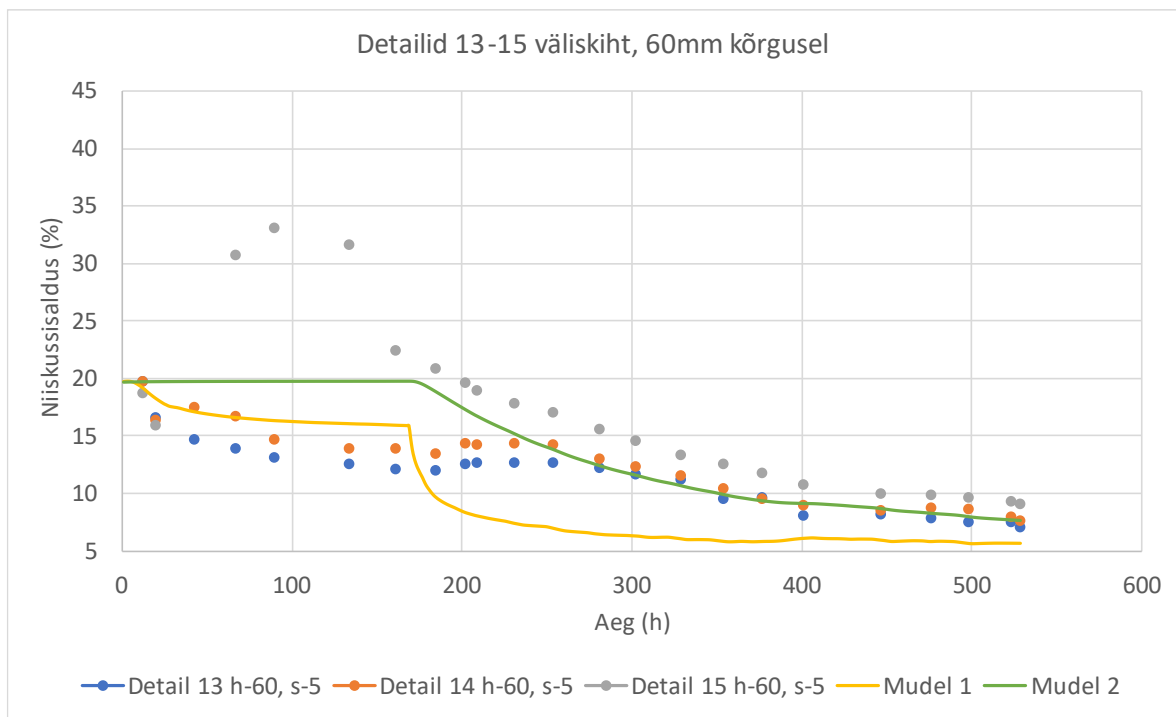
### 3.4.1 Kuivamisperioodil laborikeskkond, kontaktpind avatud keskkonnale

Katsedetailid 13-15 olid veekontaktis 7 ööpäeva ning seejärel läksid sisekeskkonda kuivama 15 päevaks. Veega kokku puutunud kontaktpind oli ümbritsevale keskkonnale avatud. Vastavalt teostatud katsele, said mudeli väljundpunktid pandud samuti 30 mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm ja 150 mm kõrgustele veekontaktis olnud pinnast.



Joonis 33 - Detailide märgunud serv sisekeskkonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 30 mm kõrgusel märgunud servast.

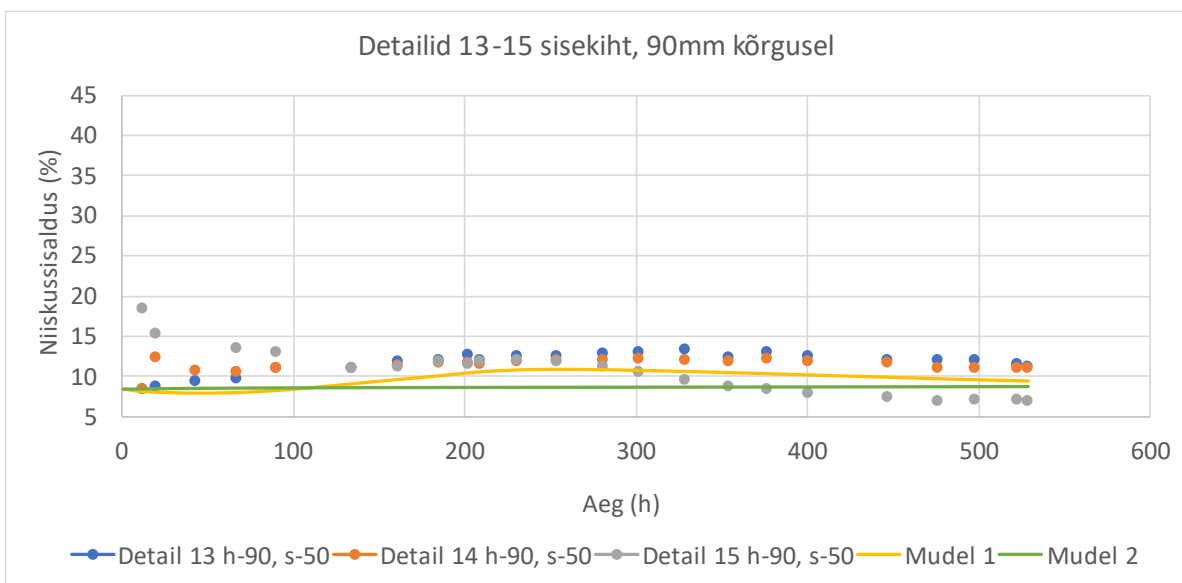
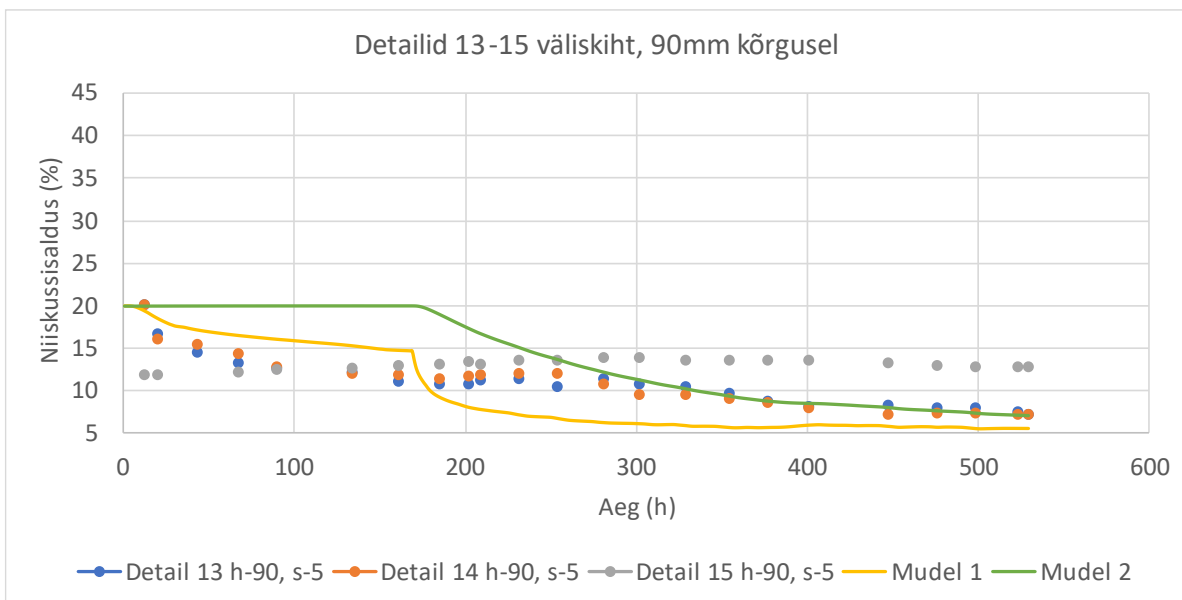
Nagu graafikutelt näha, siis 30 mm kõrgusel teostatud mõõtmiste ja arvutuste järgi on näha, et kahe erineva materjaliga läbi arvatuna saan tulemused, mis jäävad oma tulemustelt üpris suurde vahemikku. Üks materjal näitab väga suurt veeimavuse potentsiaali ja ei kuiva eriti hästi välja, kuid samas teine materjal ei ima endasse nii palju vett ja kuivab mõistlikult välja. Ka mõõtmistulemused varieerusid sarnaselt.



Joonis 34 - Detailide märgunud serv sisekeskkonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 60 mm kõrgusel märgunud servast.

Võrreldes 60 mm kõrgusel saadud katsetulemusi arvutustulemustega, siis võib hinnata tulemused igati loogiliseks. Küll aga on näha, et nüüd kõrgemas punktis on mõlema

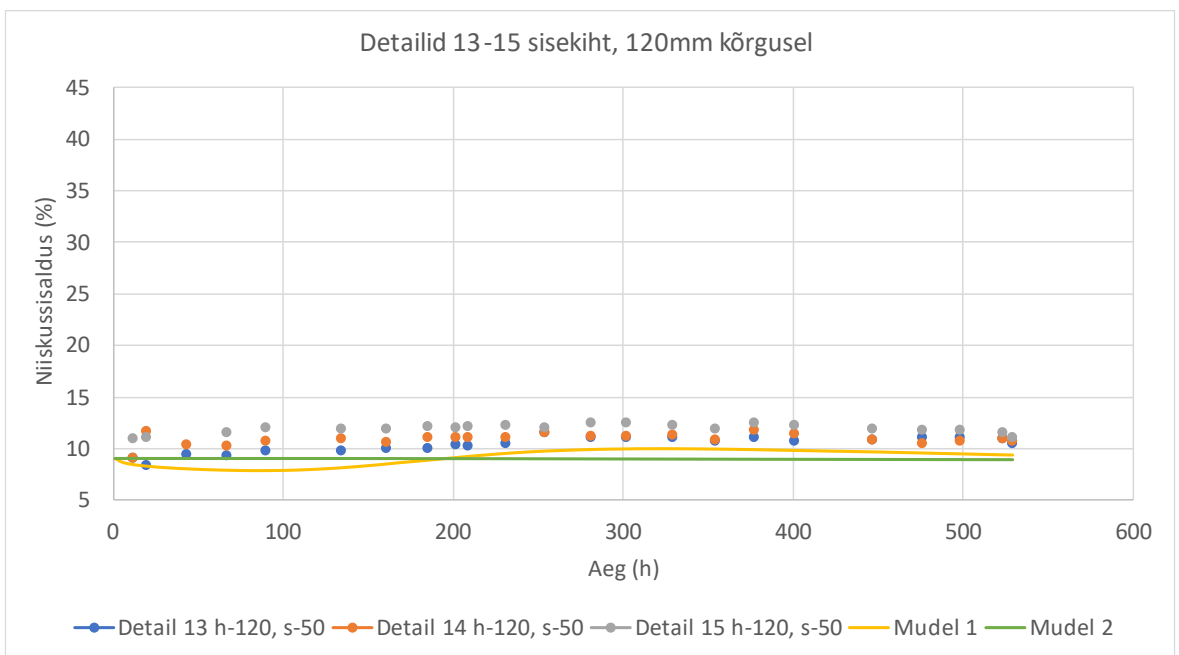
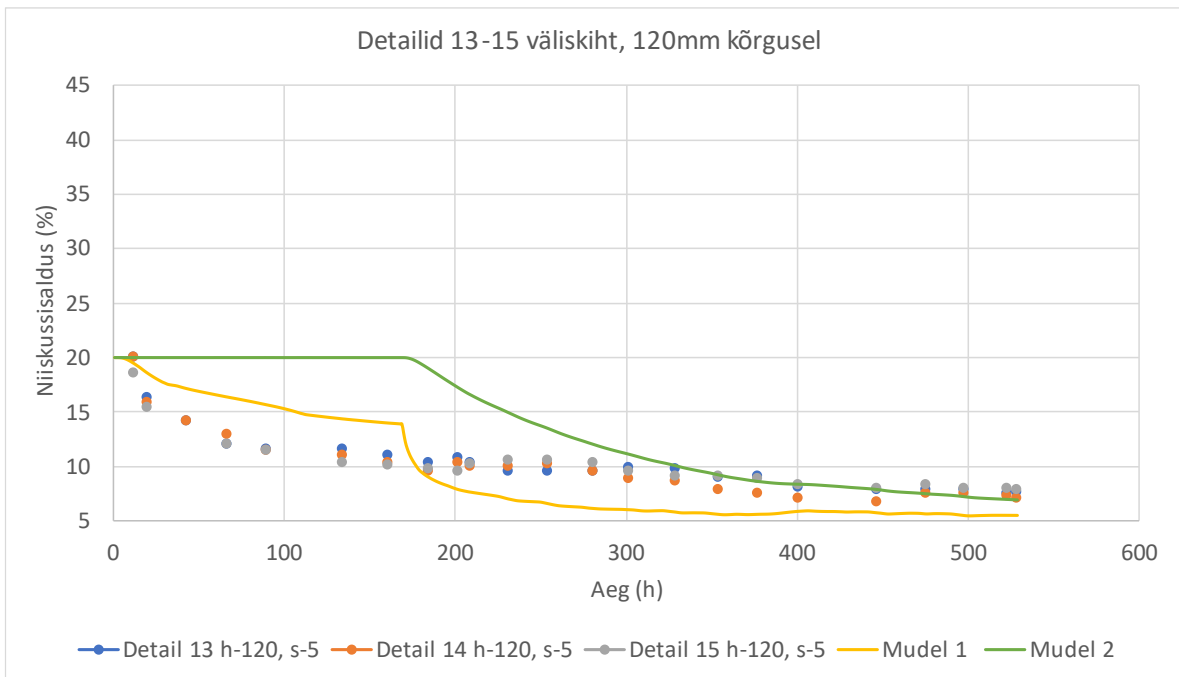
materjaliga teostatud arvutustulemused pigem tagavara kahjuks. Tundub, et arvutusmudeli arust ei toimu küll niivõrd suurt niiskussisalduse kasvu, kuid kuivamisperioodi lõpuks on kõik graafikud koondunud siiski samasse vahemikku. Kindluse mõttes tuleks arvutustulemusi võtta siiski väga kriitiliselt ning realses olukorras anda lisanduv ajaline puhver, et saavutada kriitiline niiskussisaldus.



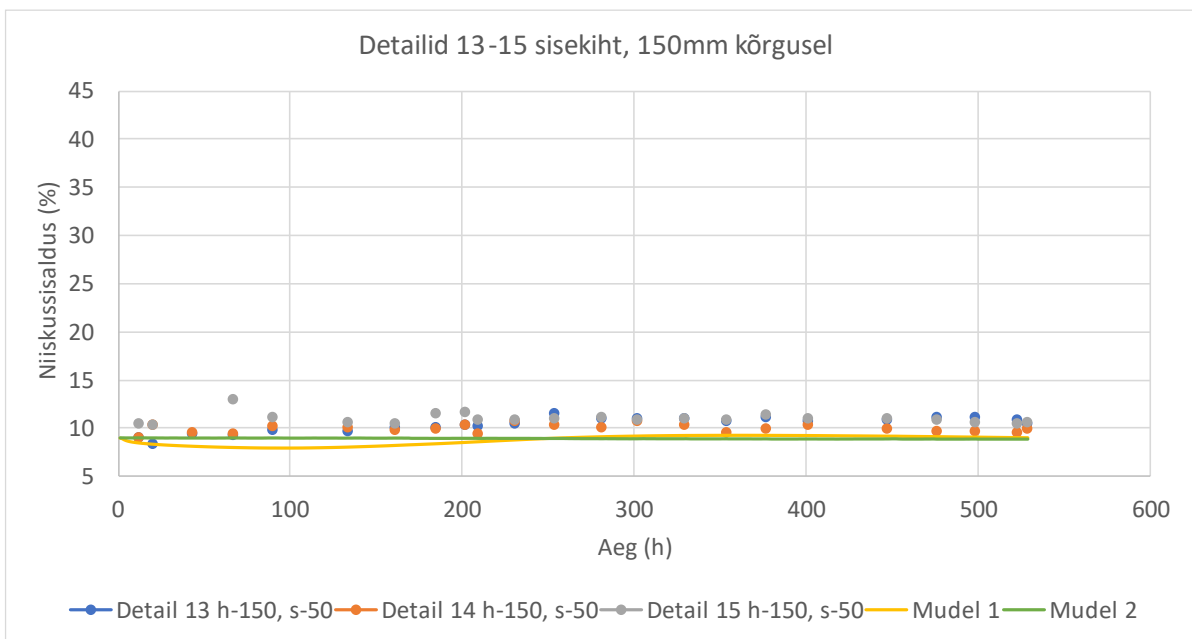
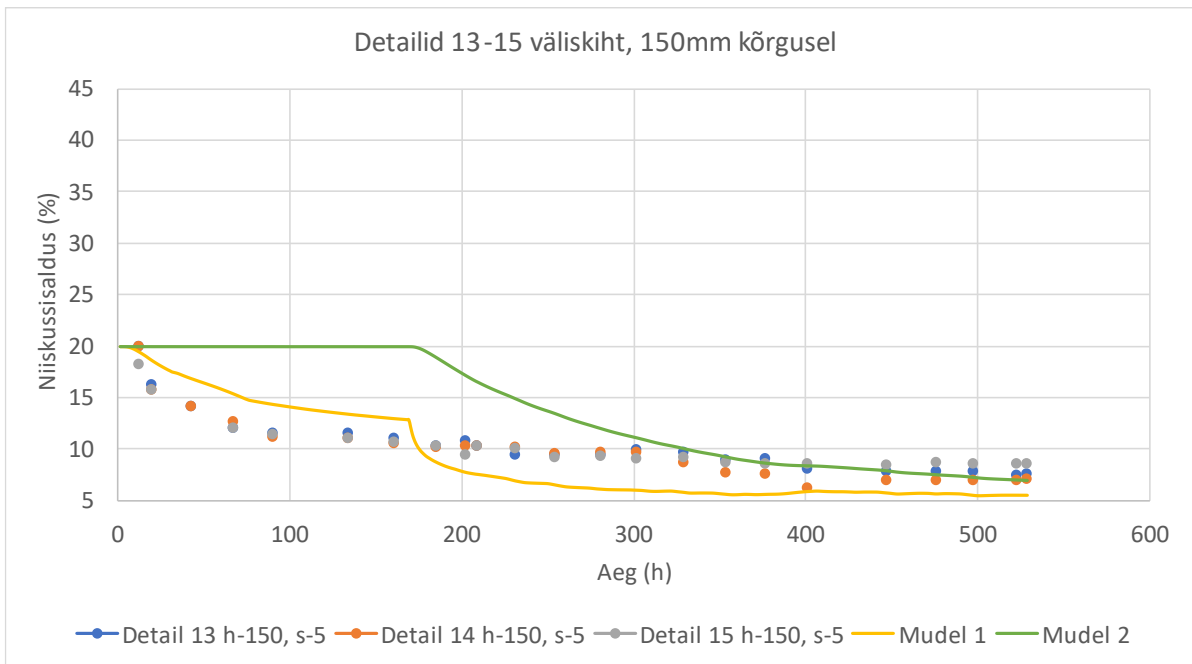
Joonis 35 - Detailide märgunud serv sisekeskkonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 90 mm kõrgusel märgunud servast.

Mõõtmiste ja arvutamiste ülemistes väljundpunktides on tulemused sarnastes vahemikes. Välimises kihis on kahe arvutusmudeli vahele jääva alaga kaetud peaaegu kogu katsetulemuste vahemik ning kuivamisperioodi lõpul on tulemused samad. Sisemises kihis arvab mudel kahjuks niiskussisaldust tagavara kahjuks ning klapi ühe

detailiga väga hästi. Kuna arvutustulemused on siiski veidi tagavara kasuks, siis kindluse mõttes tuleb arvutust kontrollida reaalsete mõõtmistega.



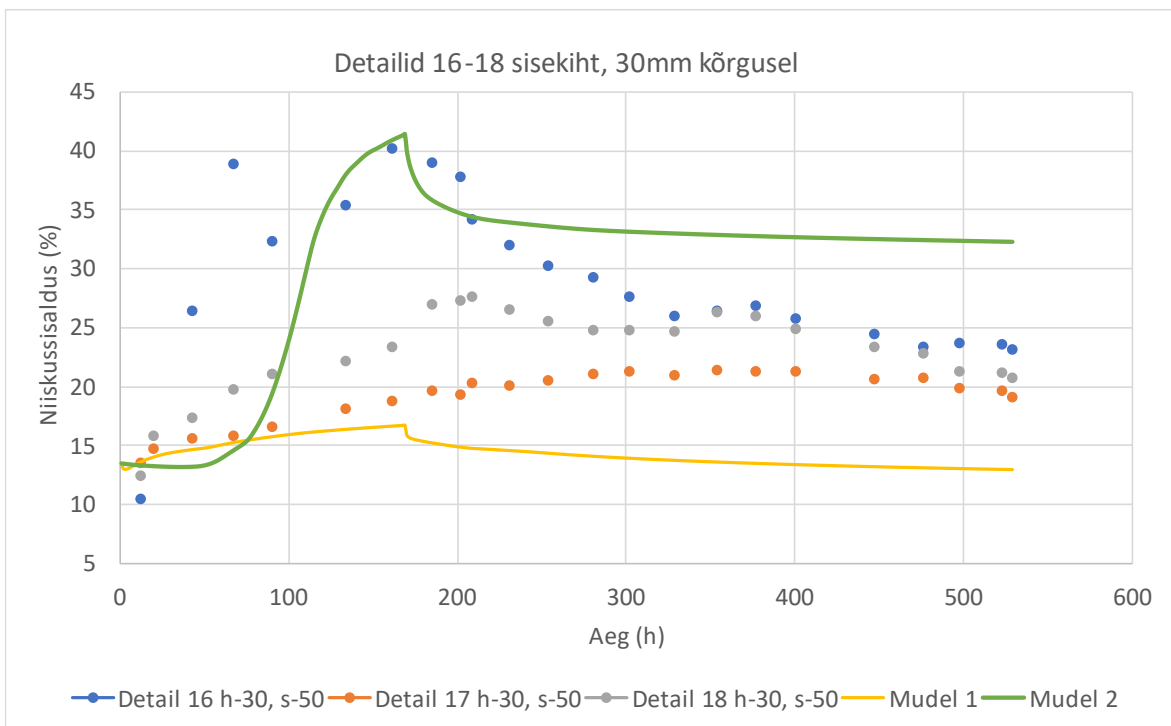
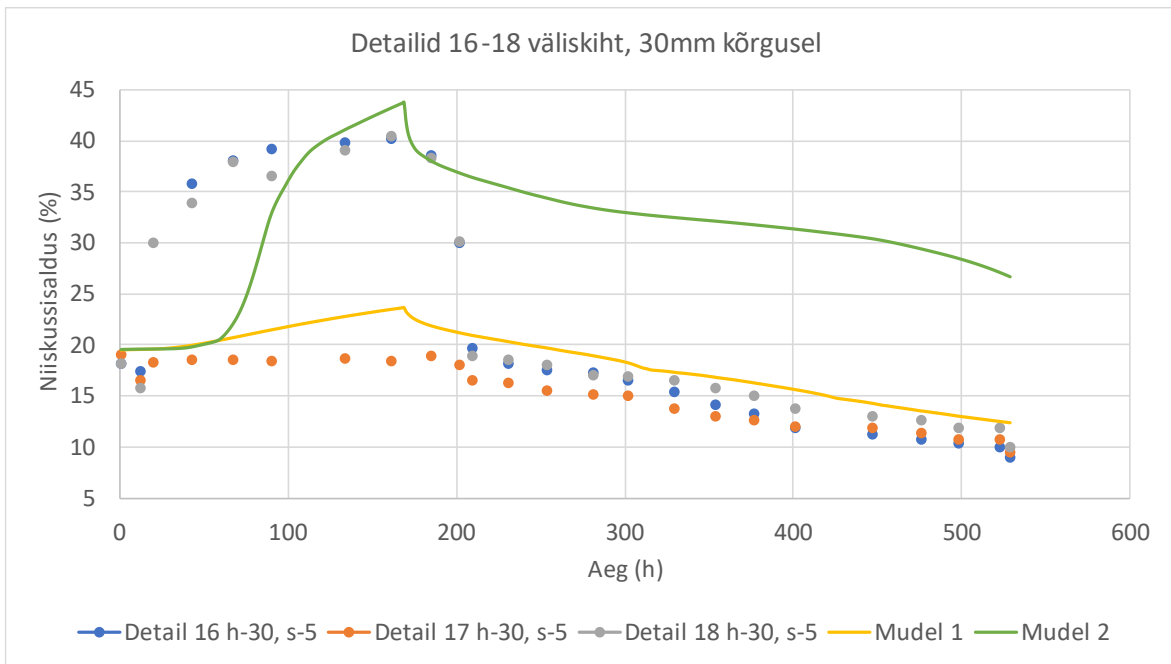
Joonis 36 - Detailide märgunud serv sisekeskkonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 120 mm kõrgusel märgunud servast.



Joonis 37 - Detailide märgunud serv sisekeskkonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 30 mm kõrgusel märgunud servast.

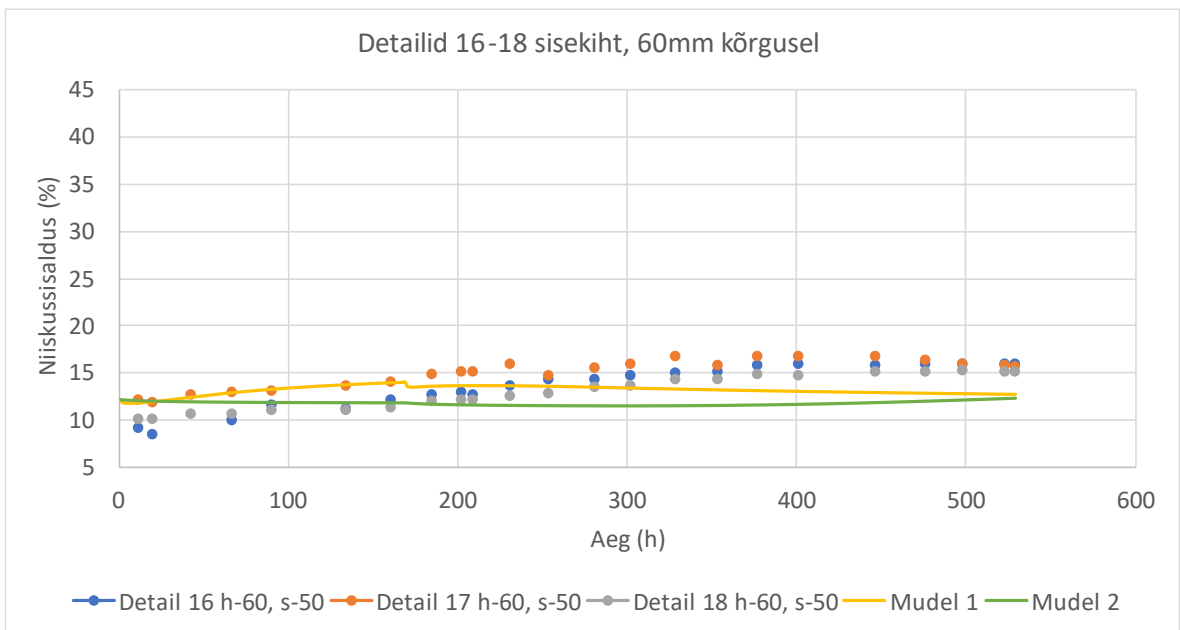
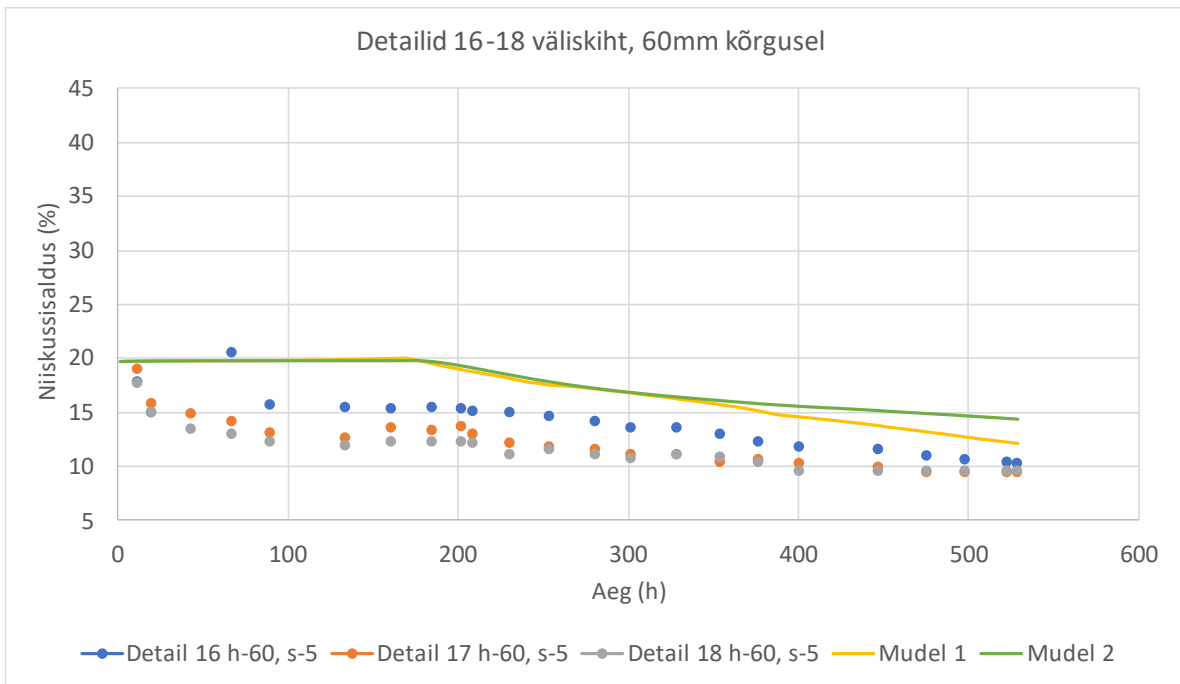
### 3.4.2 Kuivamisperioodil laborikeskkond, kontaktpind vastu CLT-detaili

Katsedetailid 16-18 olid veekontaktis 7 ööpäeva ning seejärel läksid sisekeskkonda kuivama 15 päevaks. Veega kokku puutunud kontaktpind oli vastu CLT pinda. Vastavalt teostatud katsele, said mudeli väljundpunktid pandud samuti 30 mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm ja 150 mm kõrgustele veekontaktis olnud pinnast.



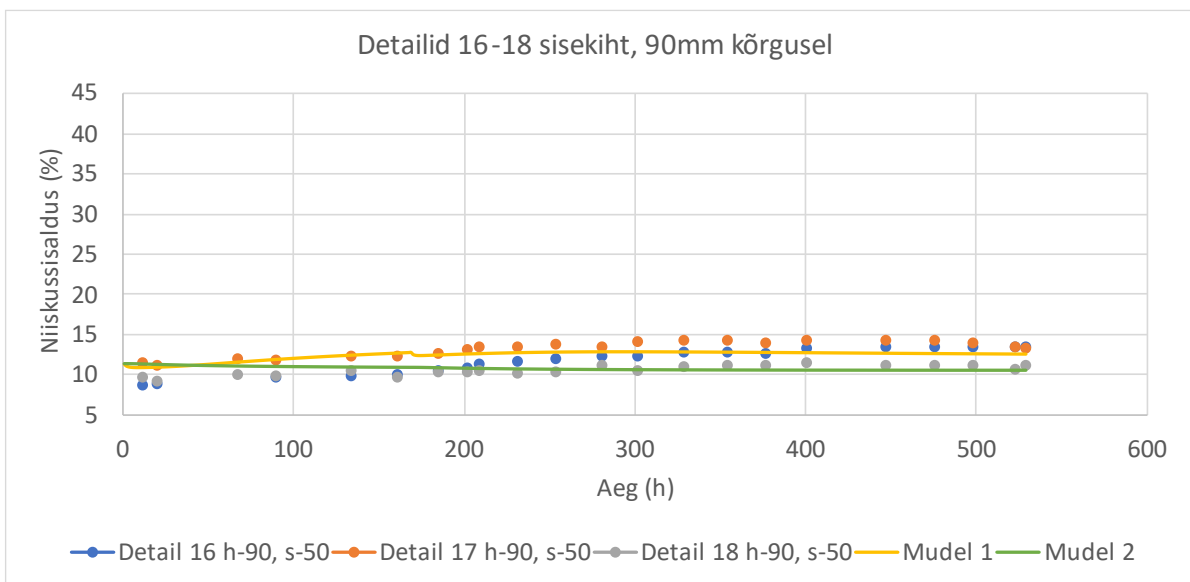
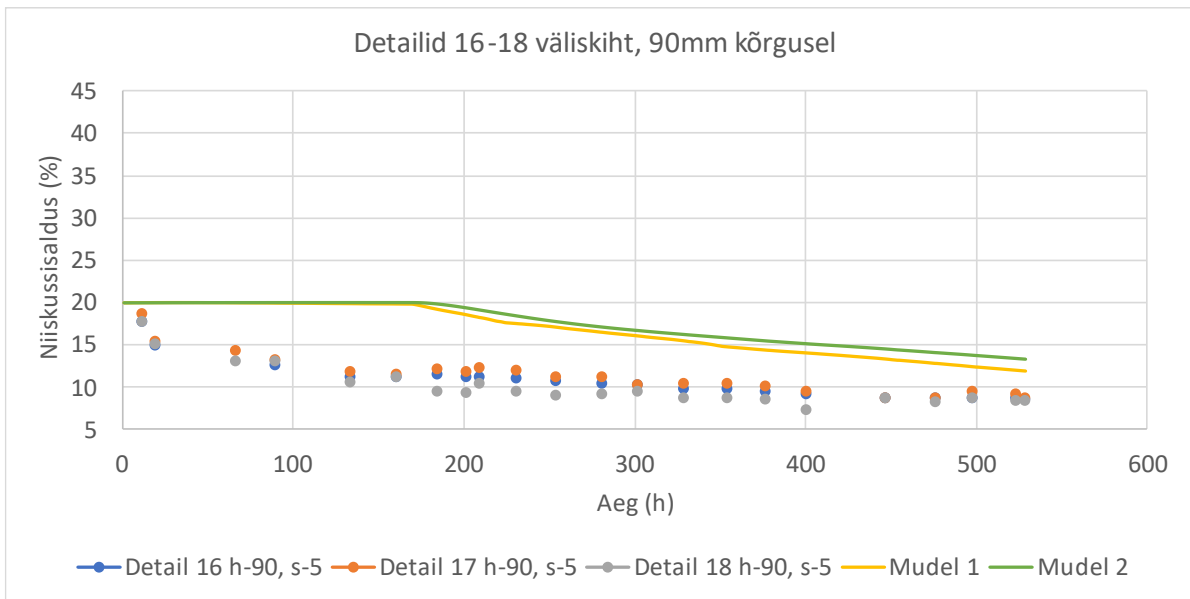
Joonis 38 - Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine sisekeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 30 mm kõrgusel märgunud servast.

Detaili alumistes väljundpunktides on näha, et katselised tulemused jäävad arvutustulemuste vahemikku. Kuna mõõdetulemused ise juba varieeruvad üpris suurtes vahemikes samas keskkonnas olnud detailide kohta, siis on ka loogiline, et arvutustulemused jäävad sellesse vahemikku.

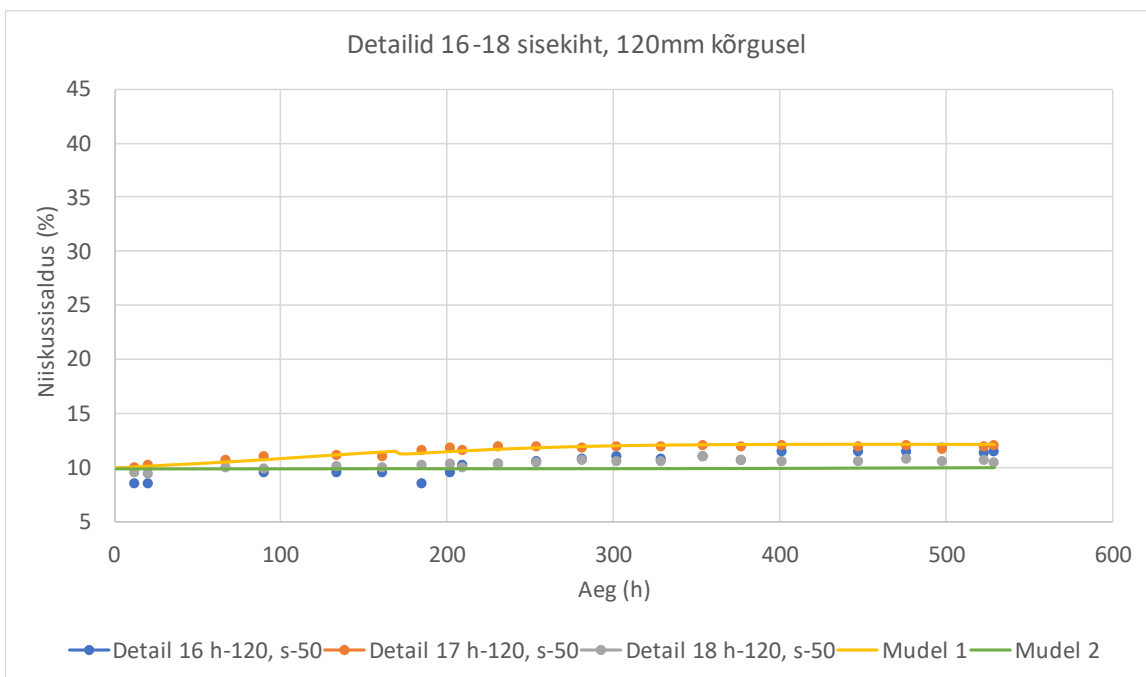
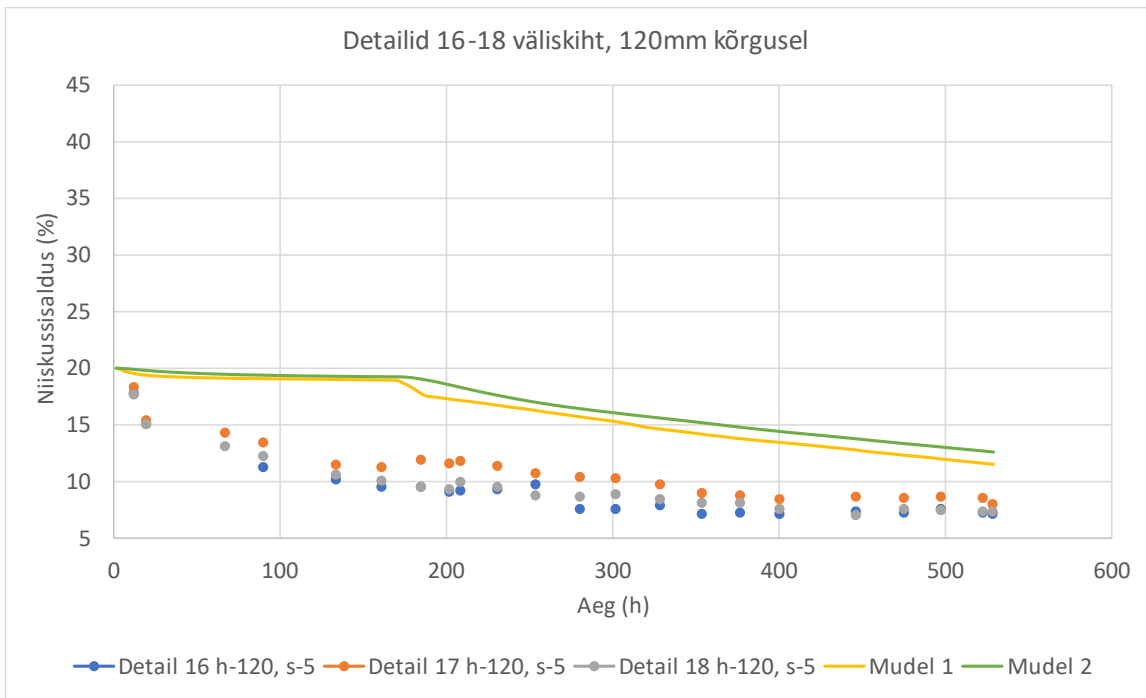


Joonis 39 - Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine sisekeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 60 mm kõrgusel märgunud servast.

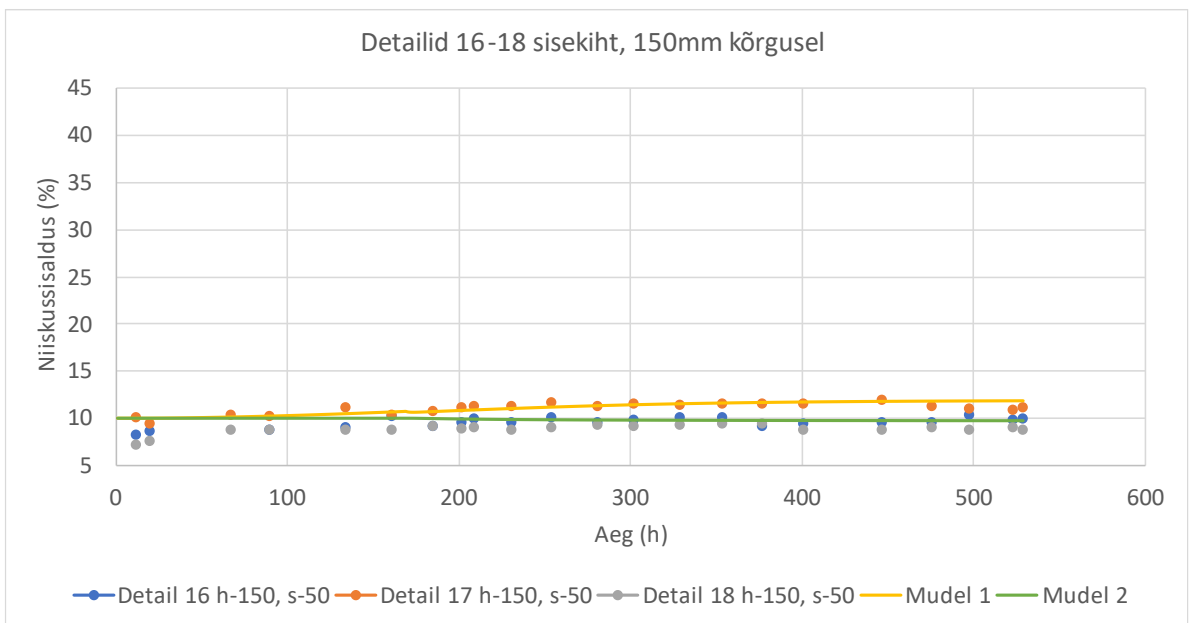
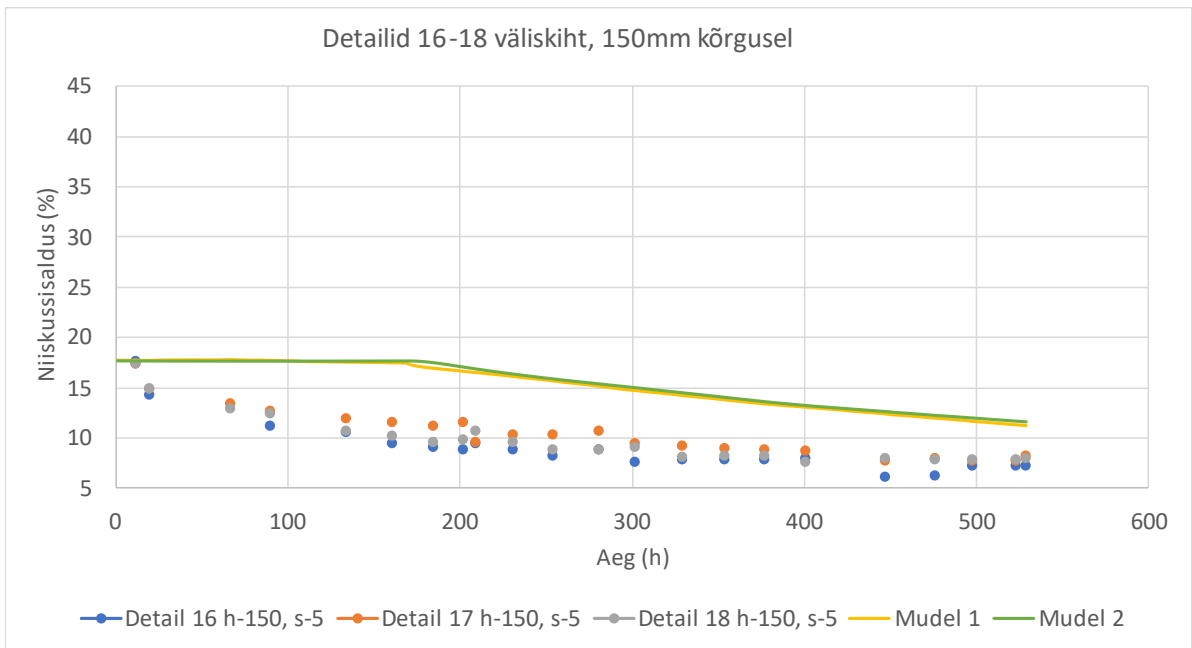




Joonis 40 - Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine sisekeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 90 mm kõrgusel märgunud servast.



Joonis 41 - Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine sisekeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 120 mm kõrgusel märgunud servast.

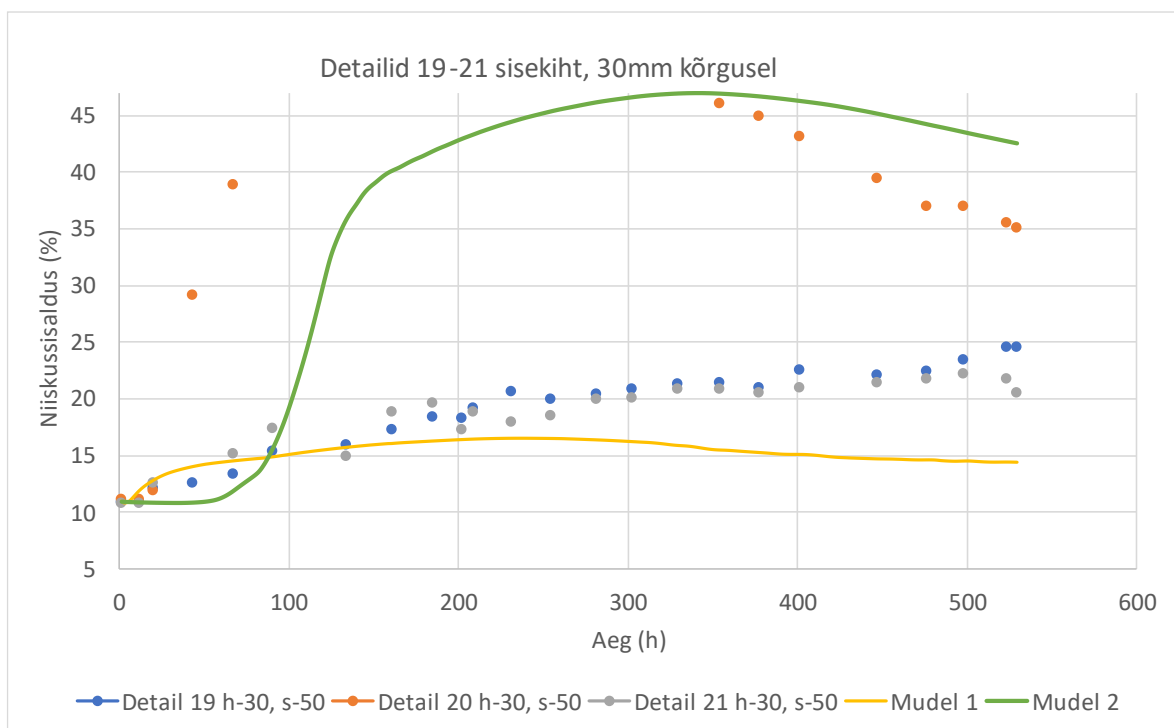
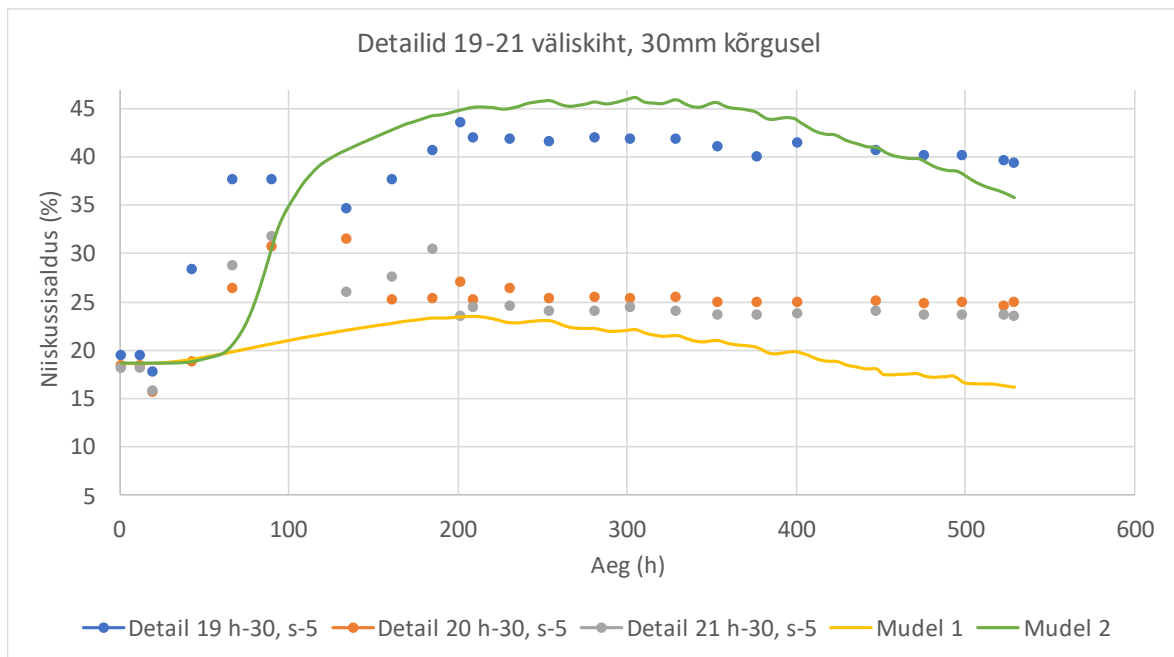


Joonis 42 - Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine sisekeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 150 mm kõrgusel märgunud servast.

Antud detailide puhul paistab, et 60 mm kõrgusel tehtud mõõtmised ja arvutused, kus arvutusliku mudeli niiskussisaldus jääb veidi tagavara kahjuks, seega peaks arvestama jällegi lisanduva ajalise puhvriga kuivamise kindlustamiseks. Muudel juhtudel on nii välimises kihis kui ka sisemises kihis arvutustulemused tagavara kasuks või samas vahemikus.

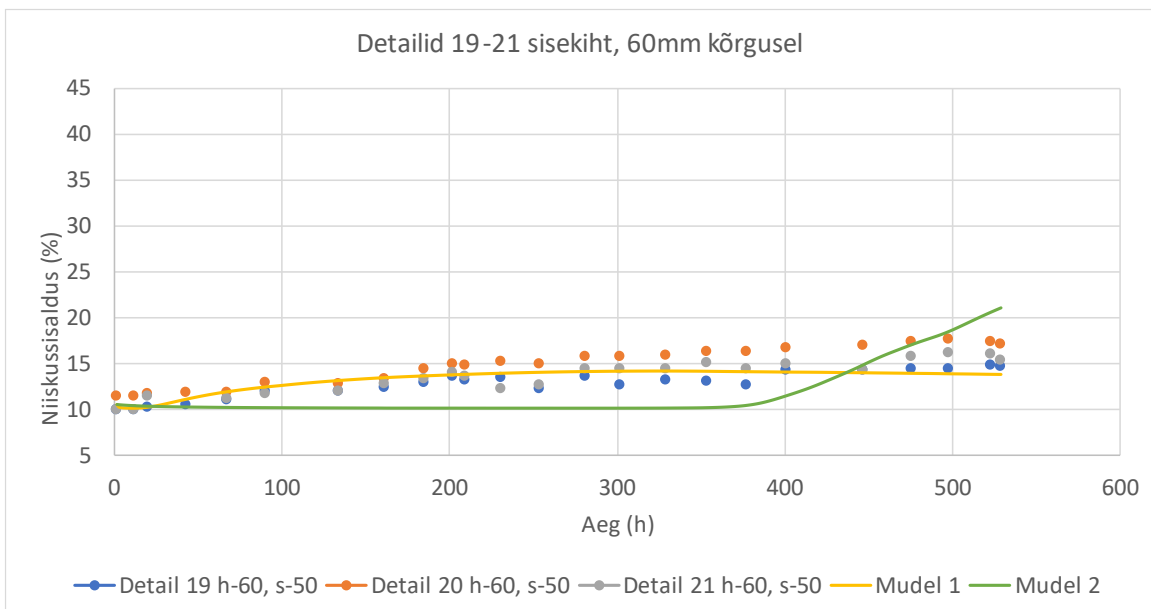
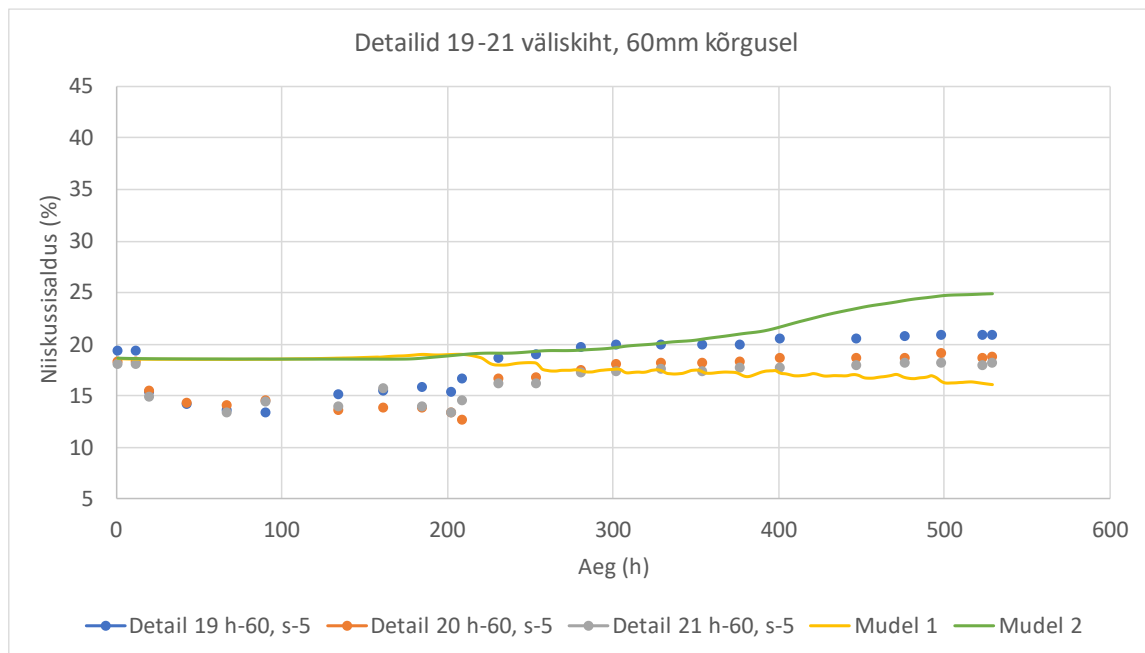
### 3.4.3 Kuivamisperioodil väliskeskond, kontaktpind keskkonnale avatud

Katsedetailid 19-21 olid veekontaktis 7 ööpäeva ning seejärel läksid väliskeskonda kuivama 15 päevaks. Veega kokku puutunud kontaktpind oli ümbritsevale keskkonnale avatud. Vastavalt teostatud katsele, said mudeli väljundpunktid pandud samuti 30 mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm ja 150 mm kõrgustele veekontaktis olnud pinnast.



Joonis 43 – Detailide märgunud serv väliskeskkonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 30 mm kõrgusel märgunud servast.

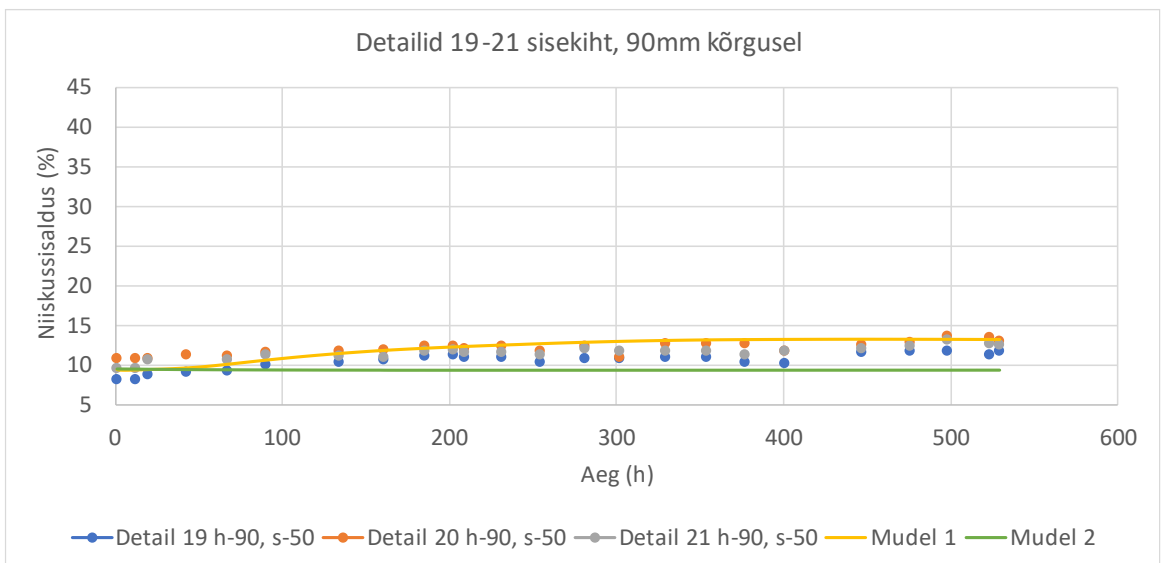
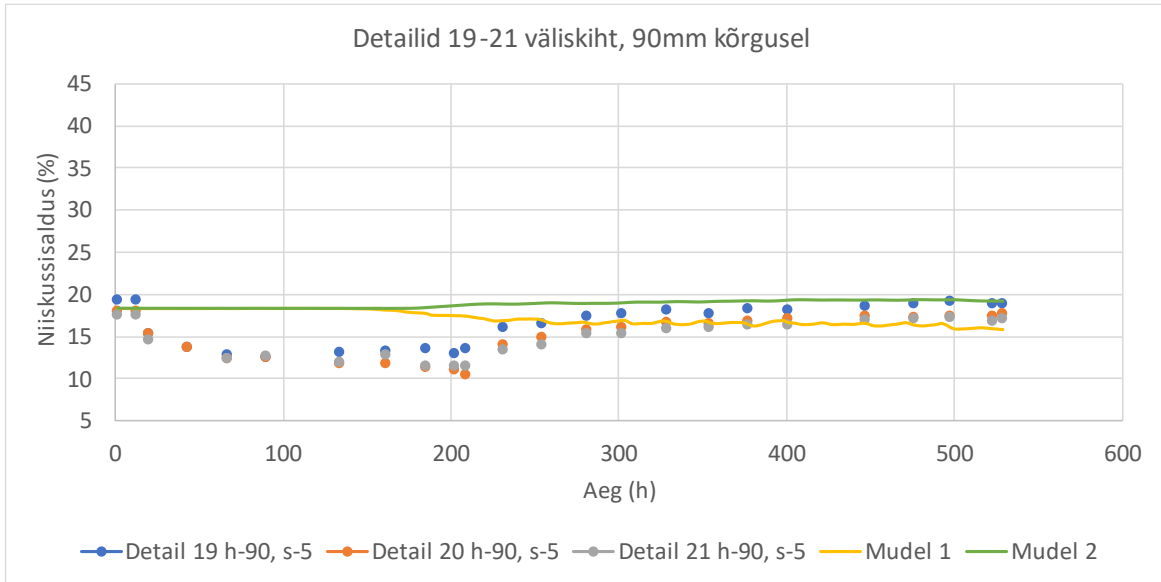
30 mm kõrgusel saadud katsetulemuste välimise kihi vahemiku põhjal saab mudeli usaldusväärsust lugeda pigem heaks. 2/3 tulemustest jäävad täpselt vahemikku ning kõige kõrgem niiskussisaldus on veidike tagavara kahjuks, kuid peaks ilusti välja tooma olukorra võimaliku kriitilisuse. Sisemises kihis on nii mõõte- kui ka arvutustulemused samas vahemikus. Arvutustulemuste hindamisel lähtuaksin pigem tagavara kasuks jäävatest tulemustest, sest siis on piisav väljakuivamine tagatud.



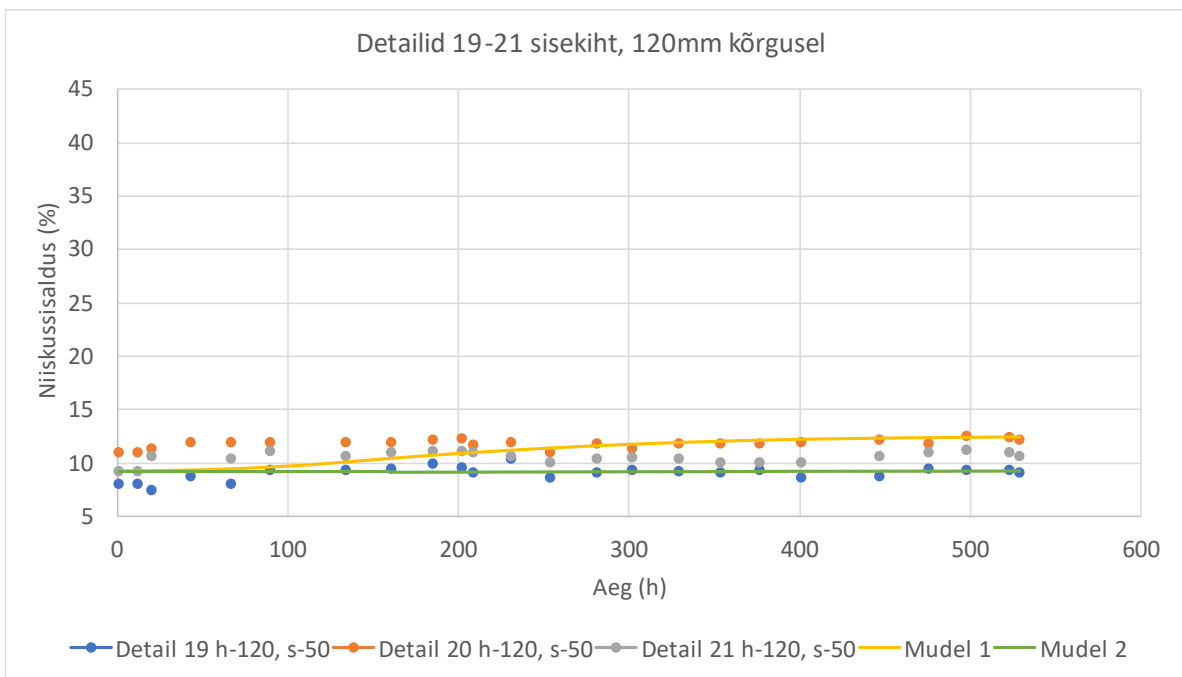
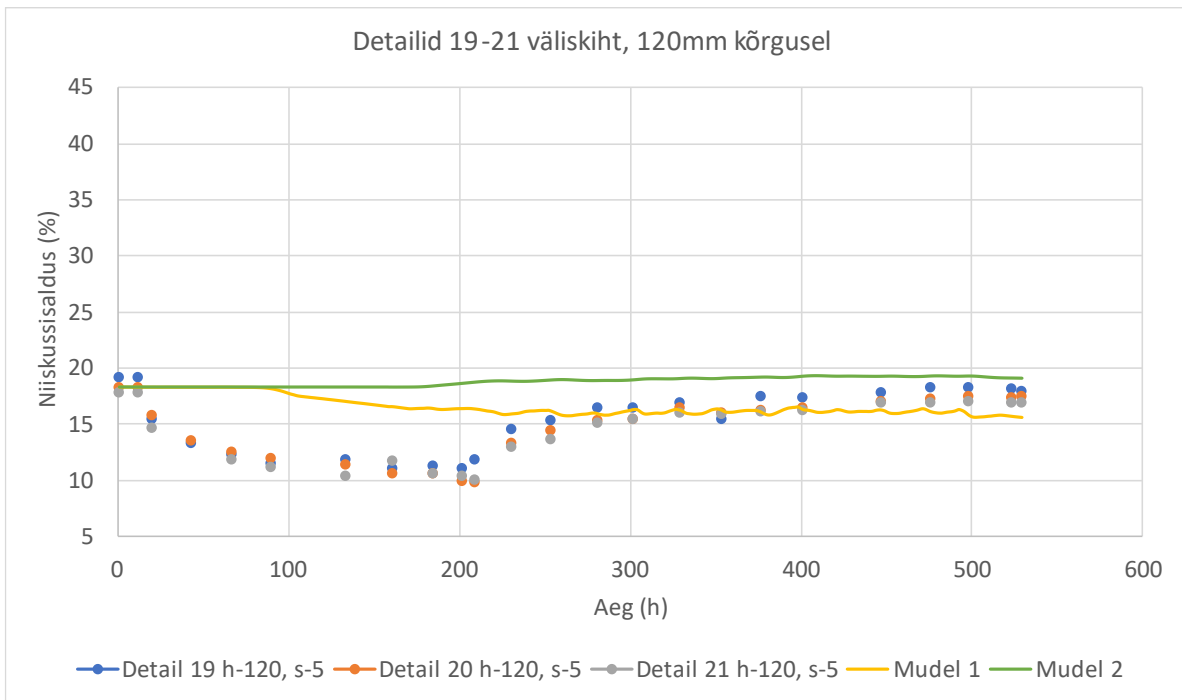
Joonis 44 - Detailide märgunud serv väliskeskkonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 60 mm kõrgusel märgunud servast.

60 mm kõrgusel on kuivamisperioodi lõpus olevad niiskussisaldused samas vahemikus ning nende kaetused tagavara kasuks mudelarvutuste poolt. Minu arvates on see

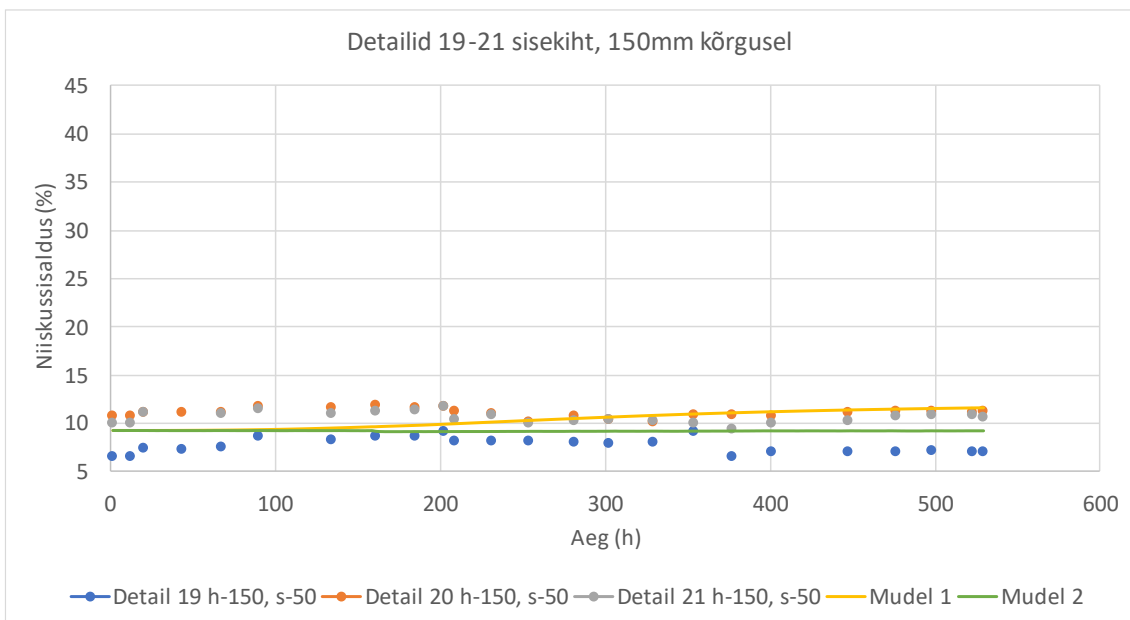
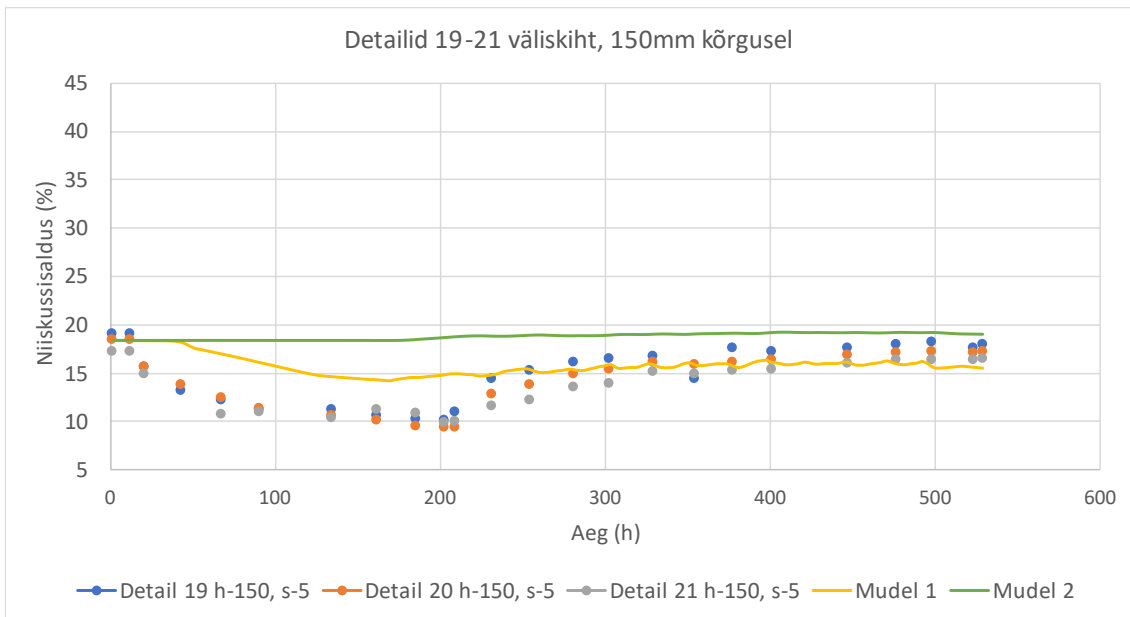
loogiline, sest kui alumises punktis saavutati niiskussisalduse haripunkt, siis hakkas 60 mm kõrgusel niiskussisaldus kas tõusma või jäi stabiilseks. See näitab hästi niiskuslevi piki kiudu puidus. Samuti on katse- ning arvutustulemused selges seoses ning sarnaselt muutuvad.



Joonis 45 - Detailide märgunud serv väliskeskkonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 90 mm kõrgusel märgunud servast.



Joonis 46 - Detailide märgunud serv väliskeskonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 120 mm kõrgusel märgunud servast.



Joonis 47 - Detailide märgunud serv väliskeskonnale avatud, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 150 mm kõrgusel märgunud servast.

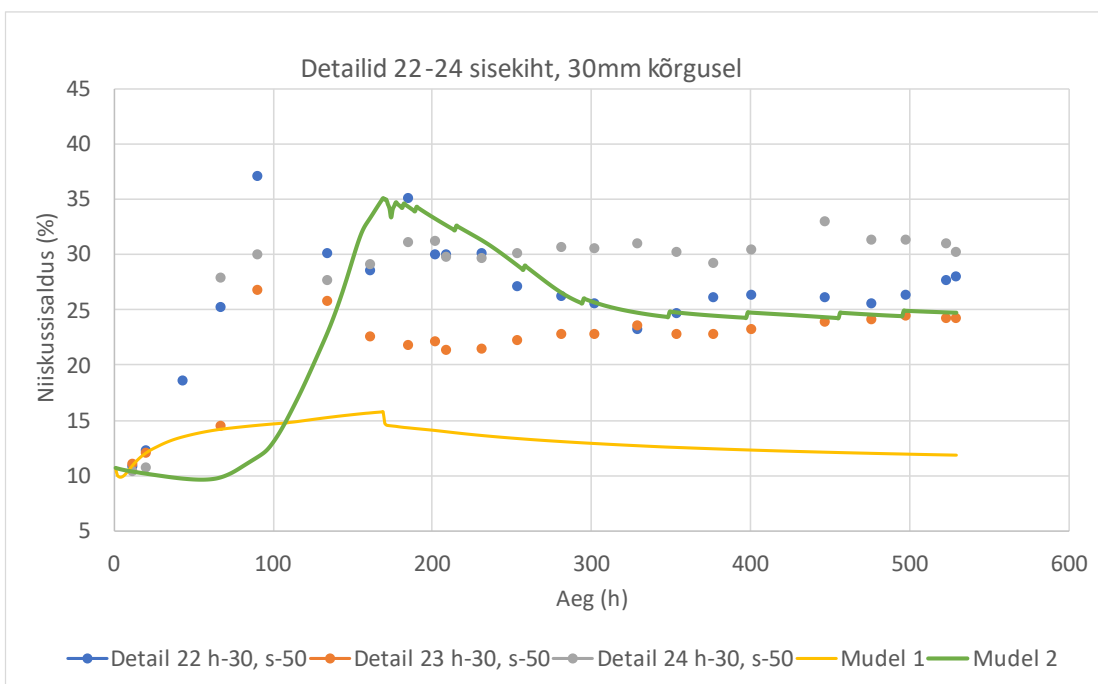
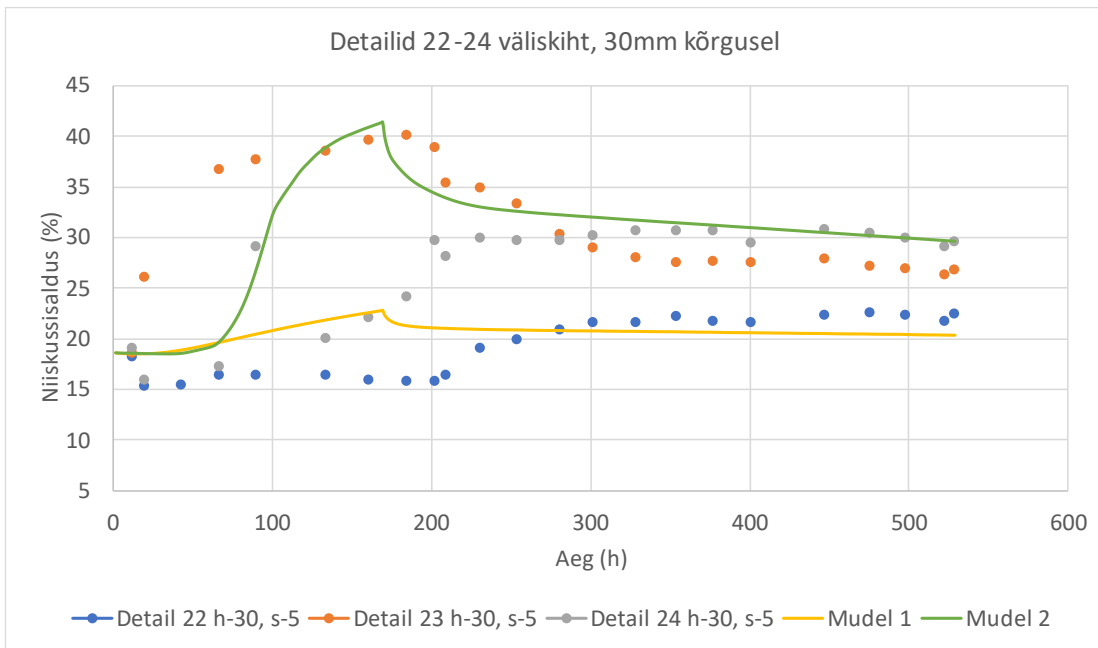
Edasine pilt alates 90 mm ja kõrgemal näitab pigem stabiilset joont. Arvutustulemuste vahemik on samas vahemikus katseliste tulemustega.

### 3.4.4 Kuivamisperioodil väliskeskond, kontaktpind vastu CLT- detaili

Katsedetailid number 22-24 olid katse vältel laborikeskkonnas veekontaktis 7 ööpäeva vältel ning seejärel läksid väliskeskonda kuivama järgnevas 15 päevaks. Kuivamine toimus nii, et veega kokku puutunud kontaktpind oli kinnitatud CLT-detaili 400x400 mm



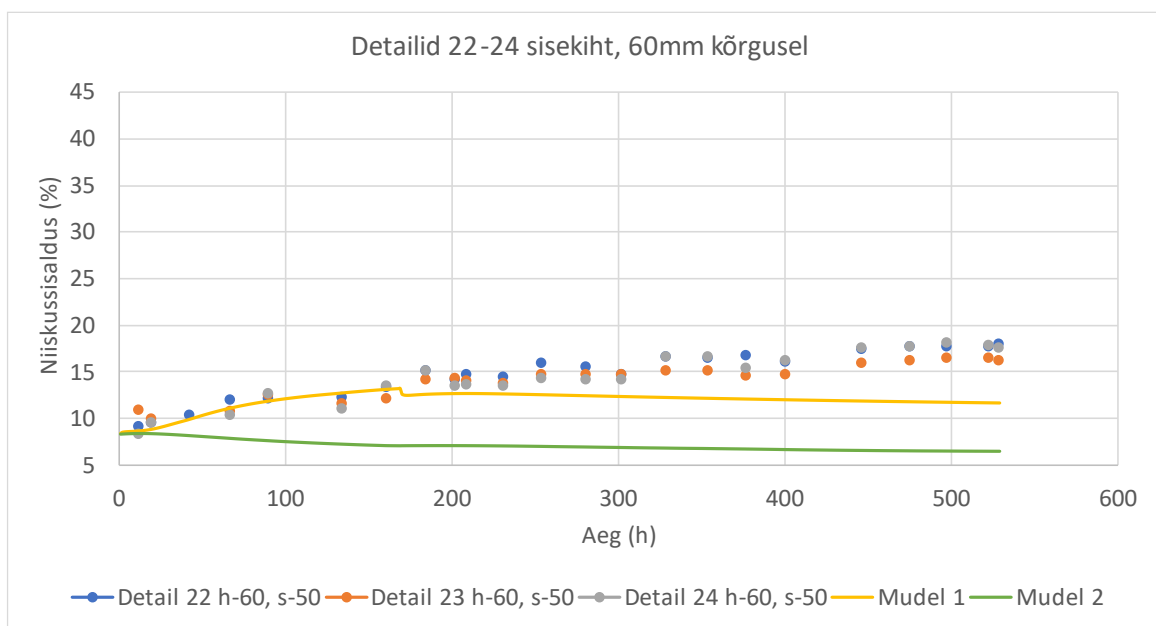
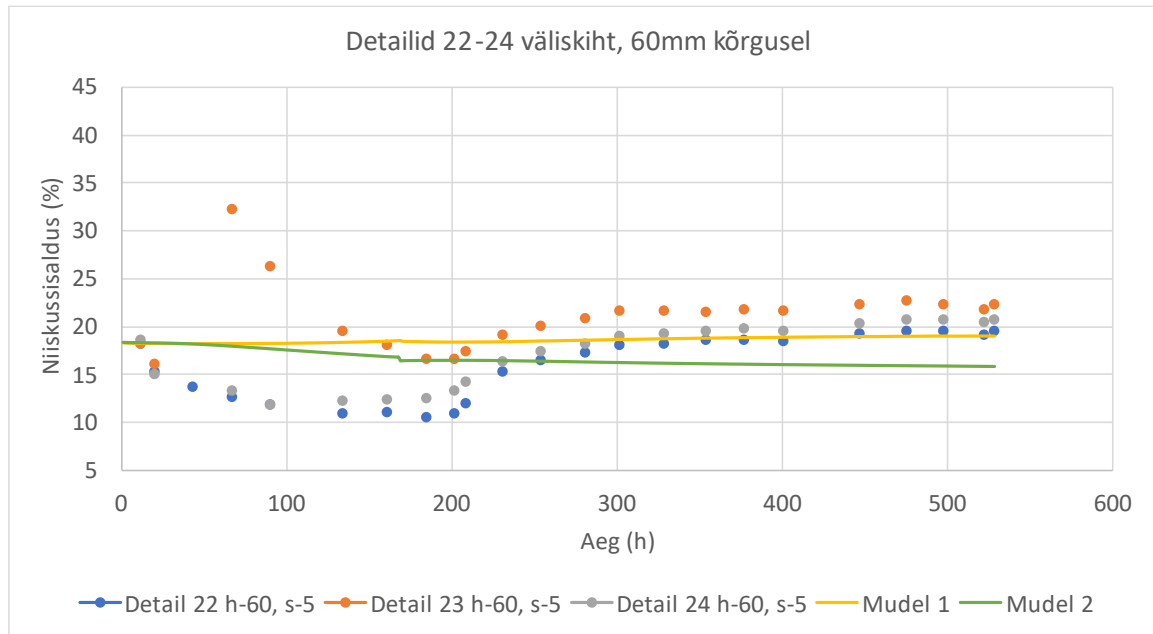
külje külge. Vastavalt teostatud katsele, said mudeli väljundpunktid pandud samuti 30 mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm ja 150 mm kõrgustele veekontaktis olnud pinnast.



Joonis 48 – Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine väliskeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 30 mm kõrgusel märgunud servast.

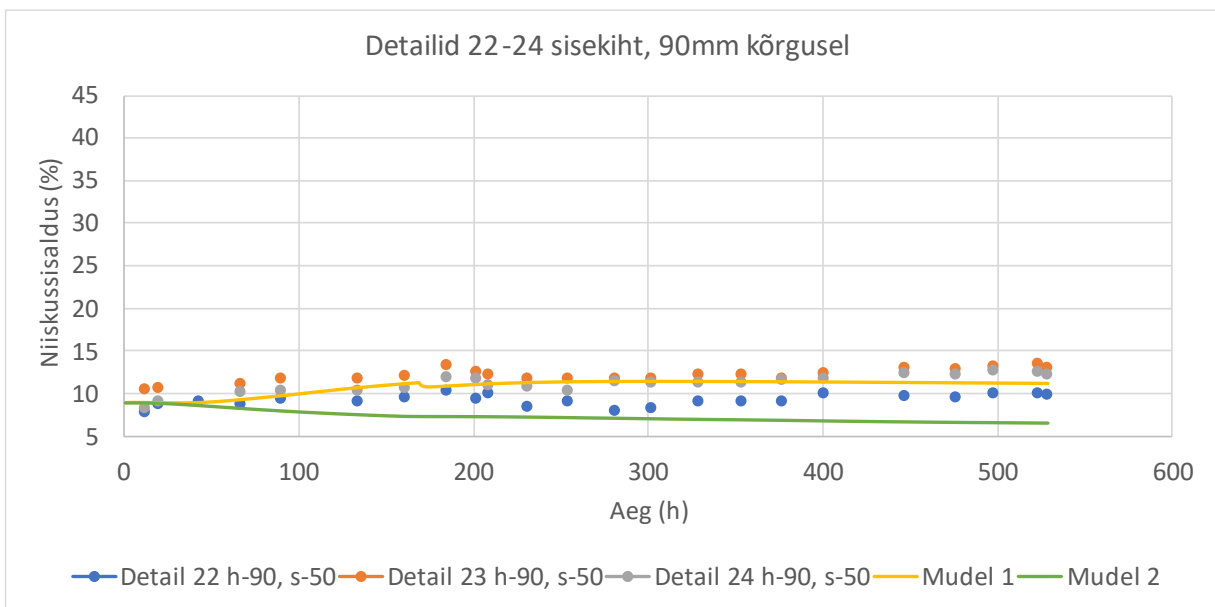
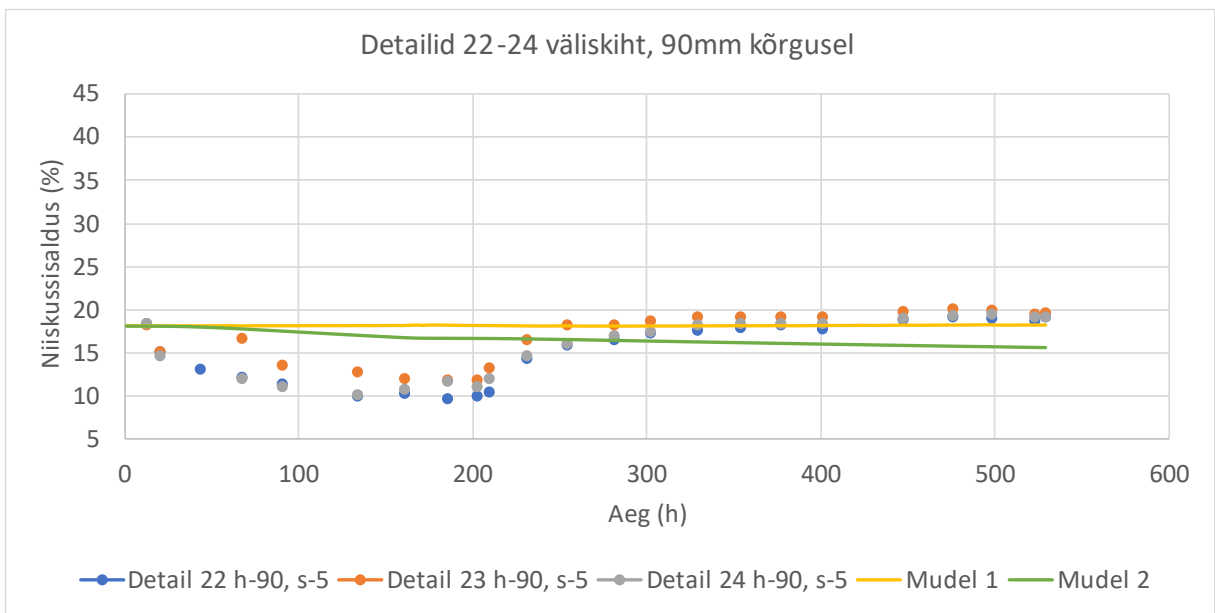
Väliskeskkonnas difusiooni takistava CLT külge kinnitatud detailide puhul on näha aeglasemat väljakuivamise tendentsi. 5 mm sügavusel toimuv niiskuslevi on ilusti õigetes vahemikes ja korrelatsioonis, kuid 50 mm sügavusel paistab mudel olevat küllaltki optimistlik. Võrreldes katseliselt mõõdetud tulemustega on siin tagavara kahjuks ja reaalsuses tuleb ilmselt lasta sellistes olukordades detailil kuivada kauem,

kui arvutus ette näitab. Samuti järeldub eriti siin, kuid ka kõigi teiste katsekehade graafikutel vajadus täpsustava uuringu järel märgunud CLT-paneelide kuivamise osas, sest arvutusmodel ja reaalne olukord võiksid siinkohal natuke rohkem haakuda.

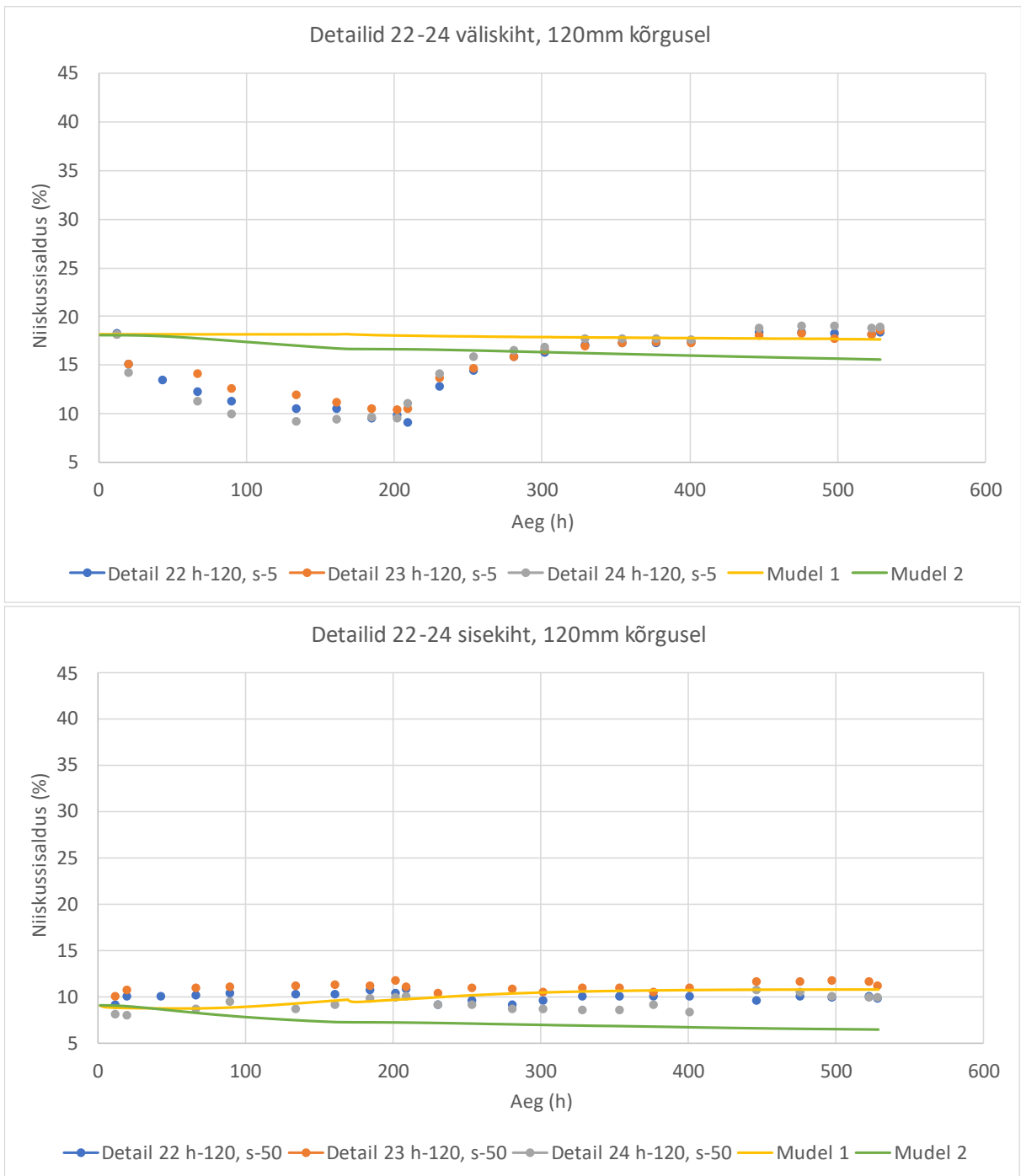


Joonis 49 - Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine väliskeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 60 mm kõrgusel märgunud servast.

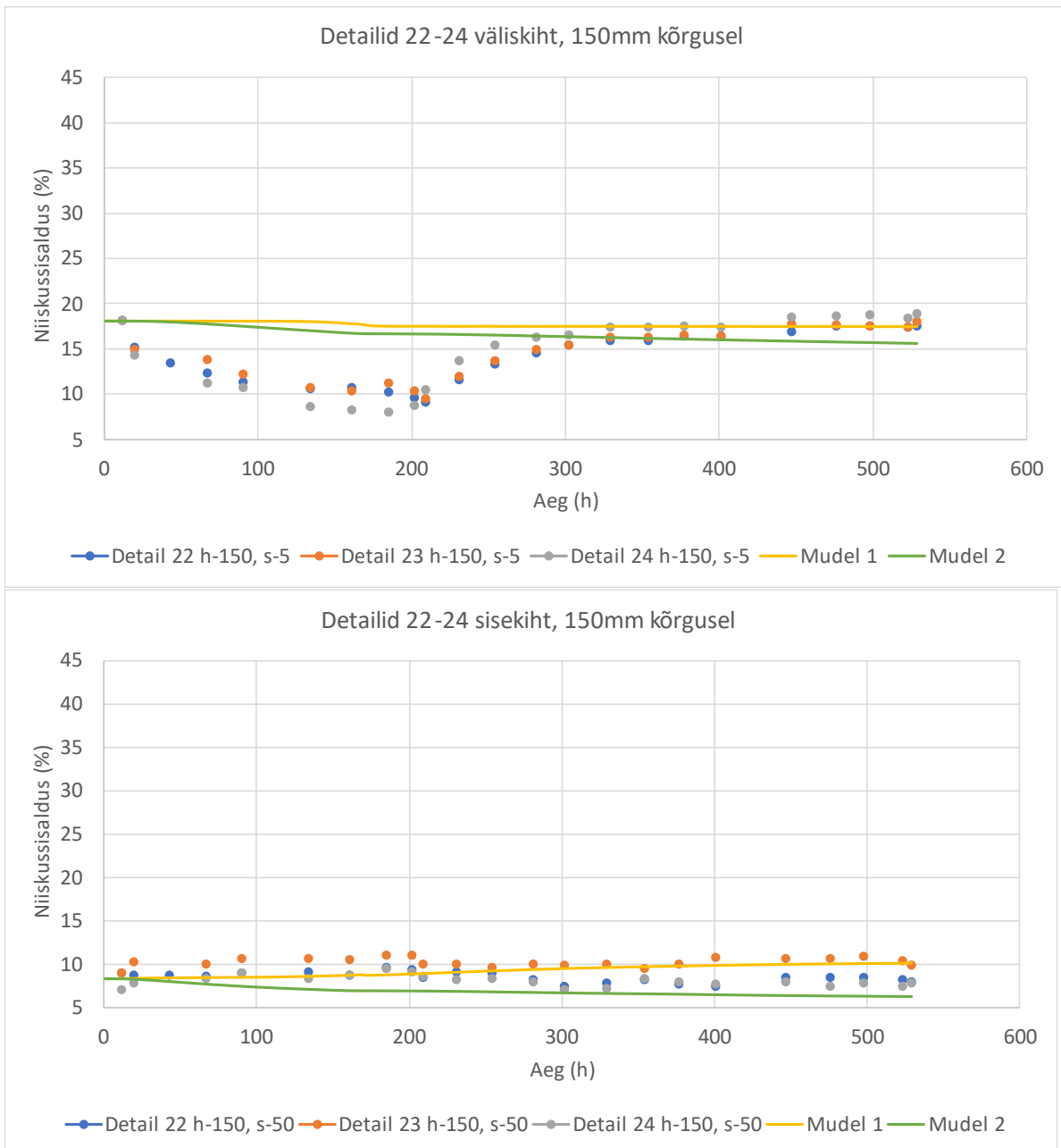
CLT-katsekeha välises kihis on natuke küll tagavara kasuks, kuid on usaldusväärne. Igal juhul tuleb anda ajaline puhver ja kontrollida arvutust jooksvalt. Natuke suurem on niiskussisalduse tagavara kahju aga sisemistes kihtides. Küll aga ei paista siin katse käigus väga suurt kriitilise niiskuse ületamist.



Joonis 50 – Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine väliskeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 90 mm kõrgusel märgunud servast.



Joonis 51 - Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine väliskeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 120 mm kõrgusel märgunud servast.

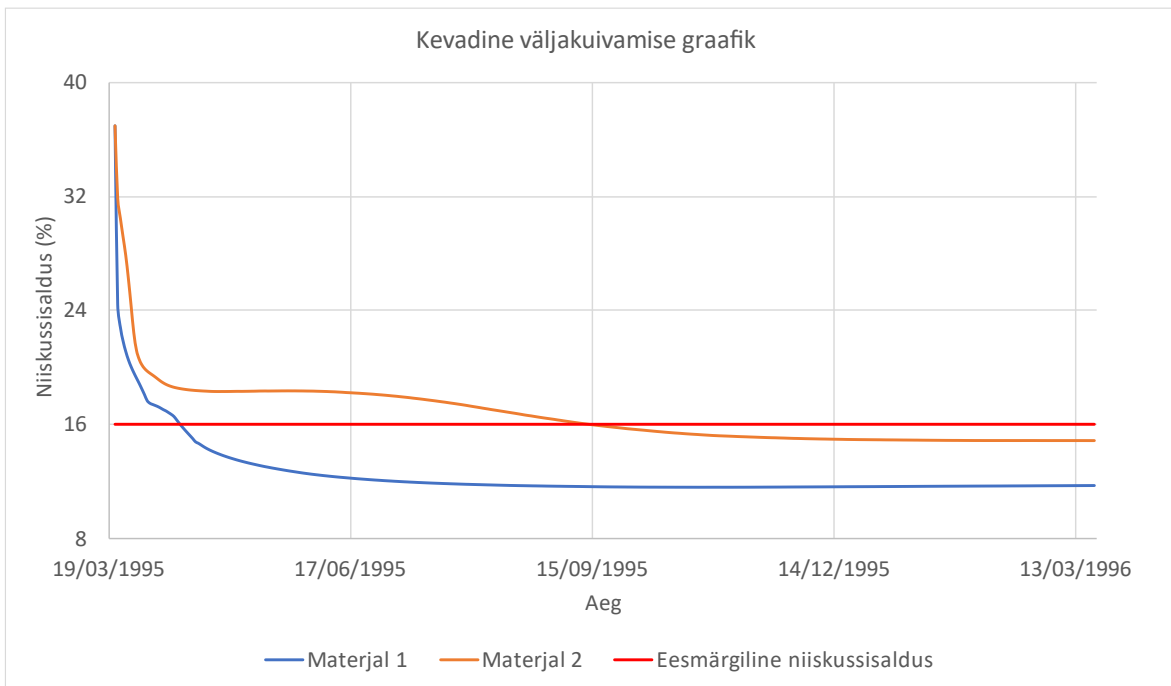


Joonis 52 - Detailide märgunud serv vastu CLT pinda, kuivamine väliskeskkonnas, mõõdetud ja modelleeritud niiskussisaldus 150 mm kõrgusel märgunud servast.

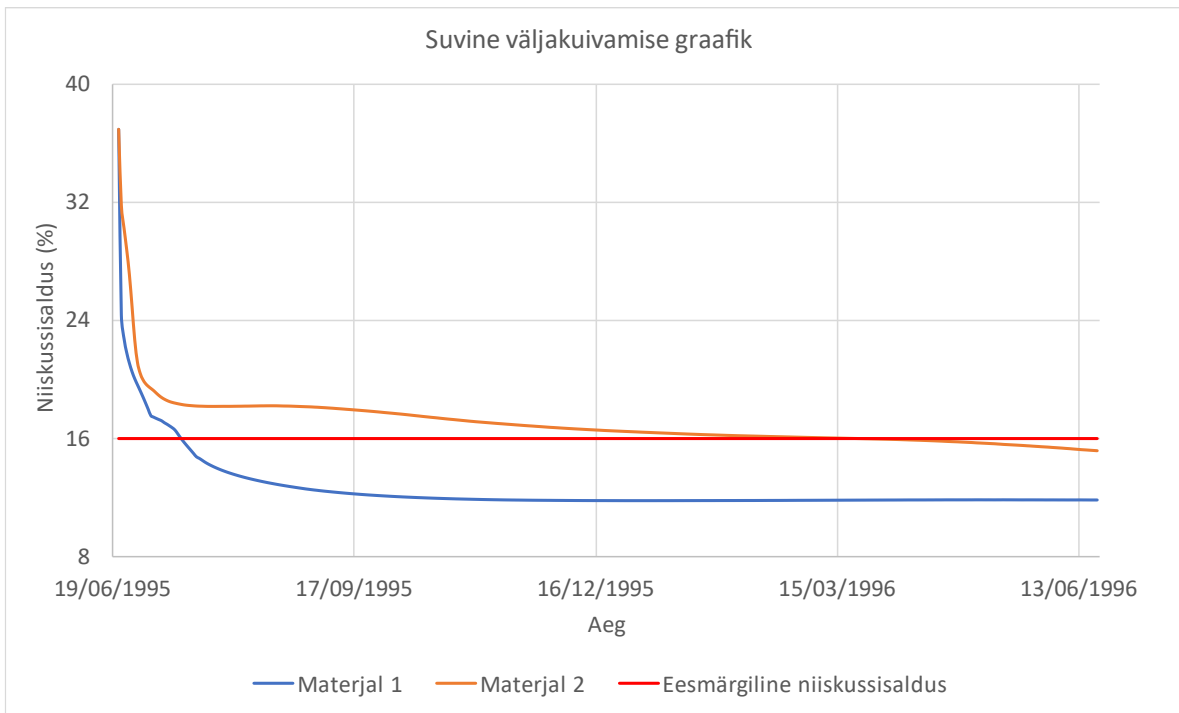
Kõrgemates kihtides on arvutuste ja katsetuste seosed olemas ja loogilised. Lõplikud niiskussisaldused kuivamisperioodi lõpus jäävad mõlemas samasse vahemikku. Ka siit on näha, et mudeli jaoks on täpsemalt vaja katsetada ja uurida CLT-paneelide kuivamist, sest need ei klapi veel täielikult.

### 3.5 Kalibreeritud arvutusmodeli tulemused Mäepealse tn 3 vahelae sõlme näitel

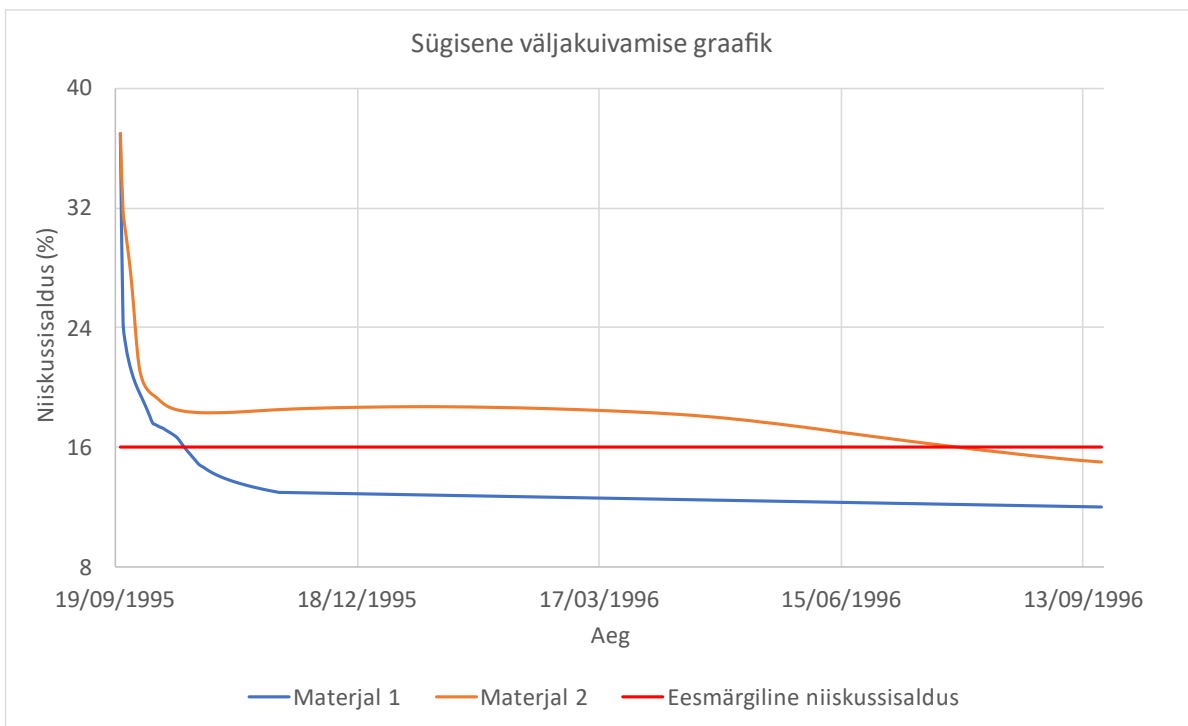
Tulemusi analüüses tuli välja, et püstitatud hüpotees ei ole korrektne ning peale kolme kuud kõrvalise abita kuivamist ei suuda olenemata aastaajast üksi detail välja kuivada. Minimaalne aeg, mille vältel on kriitiline niiskus välja kuivanud, on 178 ööpäeva. Sellisel juhul on kuivamisperioodi algus kevad. Maksimaalne aeg, mille vältel on saavutatud eesmärgiline niiskussisaldus välja kuivanud, on 311 ööpäeva. Sellisel juhul on kuivamisperioodi algus sügis. Suvel kuivama hakates kulub aega 268 ööpäeva ning talvel kuivama hakates kulub aega 247 ööpäeva.



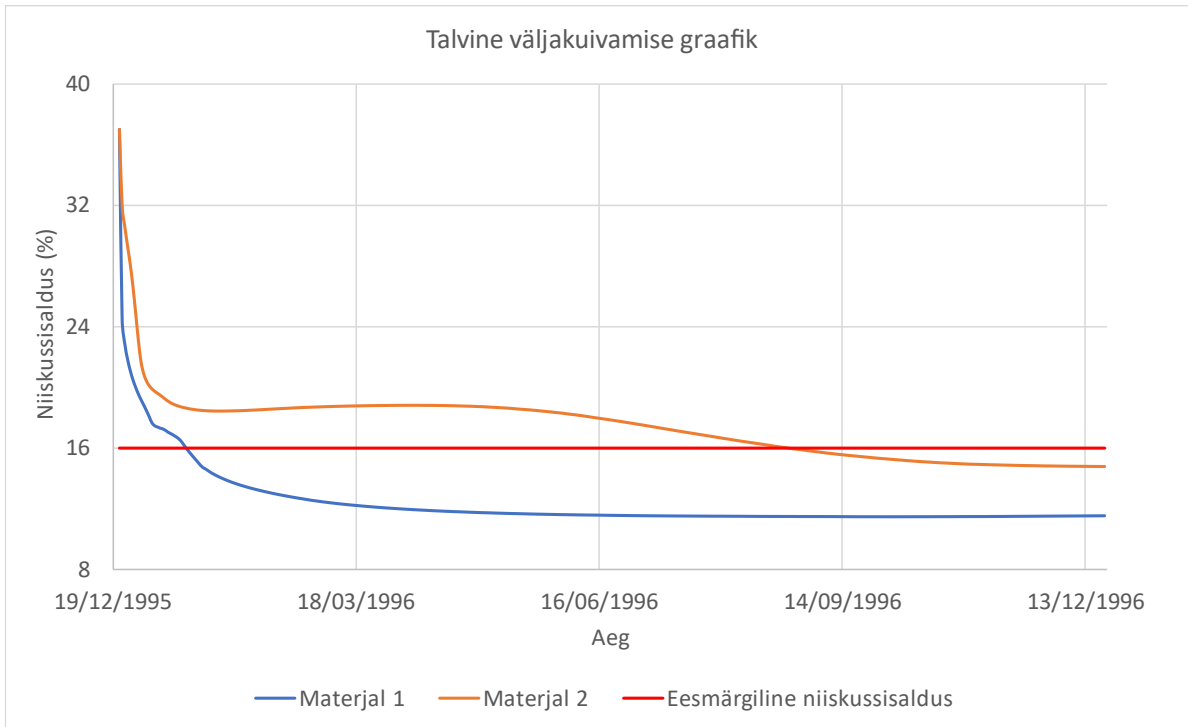
Joonis 53 - Kevadine niiskuse väljakuivamise graafik 1995-1996. aasta kondensaadi testaasta kliimas



Joonis 54 - Suvine niiskuse väljakuivamise graafik 1995-1996. aasta kondensaadi testaasta kliimas



Joonis 55 - Sügisene niiskuse väljakuivamise graafik 1995-1996. aasta kondensaadi testaasta kliimas



Joonis 56 - Talvine niiskuse väljakuivamise graafik 1995-1996. aasta kondensaadi testaasta kliimas

### 3.6 Tulemuste hindamine

Raina Lipand viis oma 2021. aastal koostatud magistritöös läbi veeimavuskatse CLT paneelidega. Ta kasutas eosiiniga punaseks toonitud vett indikaatorvedelikuna, et hinnata niiskuslevi CLT detailis (veekontakti oli asetatud CLT tasapind, erinevalt CLT servast, mille kaudu märgumise uurimine on selle töö fookuses). Ka tema töö järeldas, et indikaatorvedelik näitas ainult osa niiskuslevist. Tema järeldusena oli detailide katki lõigates indikaatorvedeliku jälgi näha 1-3 mm kõrgusel risti kiudu ning kuni 10-30 mm kõrgusel piki kiudu. Tegelikult mõõdeti niiskussisalduse kasvu ka kõrgemates kihtides. Ka antud töö käigus järeldati, et indikaatorvedelik ei näita kogu vaba vee levimist ning ei näita niiskuslevi veeauru teel [34]. Need järeldused korreleeruvad ka käesoleva töö tulemustega.

Saematerjaliga koostatud veeimavuse katse sooritamist võib hinnata usaldusväärseks. Kirjanduse kohaselt on saadud piki kiudu väärtuseid vahemikus  $0,005-0,016 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$  ja risti kiudu vahemikus  $0,0019-0,003 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$  [6] [33]. Minu katses saadud tulemused jäävad sellesse vahemikku - piki kiudu  $0,0138 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$  ning risti kiudu  $0,0023 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ .



Lõputöö eesmärgina koostatud arvutusmudel on võimeline näitama kahe materjali põhjal õiget niiskussisalduse vahemikku, kuid vajab siiski täiendavat uurimist kuivamise kohta. Lõplikud niiskussisaldused korreleeruvad ja vahemikud on enamasti samad. Mudeli 1 arvutustulemustega klapi 60% reaalistest niiskussisaldustest ning mudeli 2 arvutustulemustega klapi 40% reaalistest niiskussisaldustest. Siiski on vaja uurida kumma mudeli tulemuste esinemine on tõenäolisem, kuna mudelite koostamise aluseks olnud mõõtmiste arv oli väga väike ja valimi juhusliku kõrvalekalde mõju võib olla suur.

Kasutades arvutusmudelit realses olukorras, kus tarind on märgunud, siis on ilmingimata vaja kõrvale teha ka kontrollmõõtmisi ja need dokumenteerida. Puit ei ole standardse koostisega materjal, vaid iga detail on sisult erinev (raku suurus, kiu suurus jms). Arvutusmudeli tulemuste põhjal leidsin, et parim aeg CLT montaažiks on hilistalv või kevad. Eesti kliimaandmete põhjal on ka temperatuuride ja sademete alusel parim periood CLT montaažiks kevad. Seda on oma 2019. aastal teostatud ristkihtliimpuidu ehitusniiskuse väljakuivamise uuringus kinnitanud ka Villu Kukk [26], kus ta järeltas, et kriitiline paigalduse algusaeg on detsember. Kuna väljakuivamise aeg loomulikult teel on väga pikk, siis on igal aastaajal CLT märgumine kriitiline ning seda tuleb vältida.

### **3.7 Edasiste uuringute vajadus**

Esmase analüüsi põhjal soovitatakse teha CLT lõikeserva veeimavuse katse uuesti läbi, kasutades uut tüüpi indikaatorvedelikku. Selle põhjal saab täpsemalt hinnata varem kasutatud tindi ja värvi toimivust indikaatorvedelikenähtena.

Tuginedes arvutusmudeli tulemustele ja veeimavuse teemal sooritatud uuringutele, tuleb teostada täiendavaid kuivamiskatseid CLT-detailidele ning eraldi veel CLT-detailide kokkupanekul kasutatavatele saematerjalidele. Praegune arvutusmudel näitas, et väljakuivamine toimus kiiremini, kui katseliselt mõõdetud tulemuste põhjal. Seega on väga oluline detailsemalt uurida CLT-detailide kuivamist ning tulemuste maksimaalseks täpsuseks soovitaksin tulevases uuringus välja töötada vähemalt kaks meetodikat.

Tulemuste põhjal ei ole teada, kui palju realselt esineb turul puitmaterjali 1. mudeli parameetritega ning kui palju 2. mudeli parameetritega. Seega on vajadus viia läbi täiendav uuring ning teha palju mõõtmisi, et teada saada kumma mudeli tulemuste täpsus on tõenäolisem.

Tulemustest selgub, et sõltumata CLT märgumise aastaajast on niiskuse väljakuivamise aeg väga pikk ning selliseid seisakuid ehitustegevuse käigus võimalik teha ei ole. Seega

oleks tuleviku tarbeks vaja uurida erinevate ehitusniiskuse kuivatusvahendite prognoositavat väljakuivamise aega.

### **3.8 Töö olulisus**

Magistritöö tulemusena töötasin välja dünaamilise arvutusmudeli, mis näitab niiskuslevi ning niiskuse väljakuivamist puidus. Selle põhjal sai hinnatud liigniiskuse väljakuivamist tarindist reaalse Eesti kliimas ehitatud ehitusobjekti põhjal. Selle mudeli alusel on võimalik arvutada välja, kui palju vajab tarind kuivamist, et saavutada uuesti niiskussisaldus, mis ei ole kriitiline. See võimaldab ehitusobjektidel töid koordineerida vastavalt ning arvutuste abil protsessi kiirendada erinevate kuivatamistehnikatega. Lisaks sellele avastasin lisanduvate uuringute vajaduse, milleks on puitdetailide kuivamiskatse ja erinevate kuivatamistehnikate toimivuskatse. Need aitaks täpsustada mudelit ja materjali parameetreid veelgi.

## 4. JÄRELDUS

Arvutustulemused sõltuvad täielikult mudelile esitatud materjalide parameetritest. Magistritöö kirjutamisel sai nii teooria kui ka katsetuste põhjal välja töötatud võimalikult täpsed kuusepuidu parameetrid Delphinis modelleerimiseks. Mudel sai vastavalt varasematele katsetele kalibreeritud ja valideeritud. Esines küll erinevusi, kuid peamiselt näitas uuring, et tulemused on täpsed või tagavara kasuks. Ühe mudeliga ei olnud võimalik kõikide mõõtmistulemustega klappivaid tulemusi saada. Seetõttu oli vajalik teha kaks mudelit ning väljakuivamist analüüsides kasutada mõlemaid, sest praegusel hetkel puudub parem lahendus. Kuna puit on looduslik materjal, siis on iga proovikeha erinev. See tähendab, et ei saa olla ühte õiget vastust ning pigem saab olla õigete tulemuste vahemik. On oluline, et arvutusmudeli kasutamisel arvestataks juurde ka tagavara, sest kunagi ei ole võimalik kätte saada kogu infot modelleeritava sõlme/tarindi kohta. Samuti kuulub kindlasti selliste arvutuste juurde objektile reaalse olukorra mõõtmine ning dokumenteerimine. Vastasel juhul võib tekkida eksimus ja puit saab kahjustada.

Rakendasin arvutusmudelit Mäepealse 3, Tallinnas asuval ehitusobjektile tehtud niiskusturvalisuse ringkäikudel kogutud info põhjal. Modelleerides eeldasin, et rohkem niiskust peale ei tule ning toimub loomulik välja kuivamine. Arvutuste tegemisel lõin hüpoteetilised olukorrad, kus ristkihtliimpuit on ilmastikule avatud kevadel, suvel, sügisel ja talvel ning on vastaval aastaajal märgunud niiskussisalduseni 37% ja kuivamisperiood algab vastavalt aastaaja algusele. Arvutuste põhjal võib järeldada, et kui ristkihtliimpuit detail märgub ehitusel, siis väljakuivamiseks kriitilise niiskussisalduse piirini kulub aega kõige vähem kevadisel perioodil 178 päeva ning kõige rohkem sügisel perioodil 311 päeva. Kui tugineda üksnes loomulikule kuivamisele, siis erinevatel aastaegadel on oodatav väljakuivamise aeg väga erinev. Mitte ühelgi aastaajal ei ole oodatav väljakuivamise aeg nii lühike, et saaks ehitustegevuse peatada ja niiskuse välja kuivamist ootama jääda. Liigniiskuse välja kuivamine on väga oluline sest tarind kaetakse soojustus- või viimistlusmaterjaliga ja kui sinna alla jääb liiga niiske puit, siis on mõne aasta möödudes juba oht hallitusele ning muudele puidukahjuritele ja sellega seoses terviseprobleemidele hoone lõppkasutajatel. Kindlasti ei ole mõistlik lasta lihtsalt loomulikult teel niiskusel välja kuivada, vaid tuleks kasutada ka niiskusimureid ja soojapuhureid, et väljakuivamist kiirendada. Kuivamisperioodi vältel tuleb kindla intervalliga märgunud konstruktsiooni niiskussisaldust mõõta ning tulemid ka üles kirjutada.

Magistritöös tehtud arvutuste põhjal saan öelda, et puidu märgumine on väga tõsine probleem. Saime teada, et kõige paremal juhul on puidu loomulikuks väljakuivamise ajaks ligi 6 kuud ja see aeg on väga pikk. Esiteks on niiskusega seotud alati suur oht kahjuritele ja seentele. Piisab vähesest, et tarindisse pidama jäänud niiskuse ja soodsate tingimuste korral tekib hallitus või mädanik. Mida pikem on ehitusniiskuse väljakuivamise periood, seda suurem on tõenäosus, et ehitusetapis algab mikroobide areng. Teiseks, isiklik kogemus ütleb, et isegi 7-päevane seisak ehitusplatsil on väga halb ning võib kogu ülejäänud ajagraafiku paigast lüüa. See tähendab ka juba rahalisi kohustusi. Seega järelتان, et CLT-detailidega ehituse puhul tuleks alati sihtida montaažiks hilistalvist või kevadist perioodi. Seda kinnitavad ka varasemad uuringud. Igal juhul oleks vajalik, et CLT-detailid on tehtud täielikult ilmastikukindlaks ja kaitstuks sademete ning muude veelekete eest. Ehitusperioodiks tuleks alati katta ja kaitsta ka põrandatena kasutatavad elemendid, sest ka ehitusobjektile töötavad inimesed käivad ka väliskeskkonnas ning võivad pahaaimamatult sisse tuua vett ja niiskust. Samuti on siseviimistlustööd väga niiskusmahukad ning võivad põhjustada liigniiskuse sattumist puittarindisse. Väliskeskkonna eest kaitsmiseks on parim variant kilega kaetud ning katusega telling. Sisekeskkonnas tuleks kasutada OSB-tahvleid ja tugevamaid presente või kilesid, mille peal on võimalik ka kõndida ja töötada. Väga oluline on, et niiskusturvalisust jälgitaks ka juba elemente tootvas tehases ning, et CLT oleks kontrollitud niiskussisaldusega, mis jääb 12-13% piirimaile. Detail peab olema ilmastikukindlalt pakendatud transpordiks objektile. Korrektnedetailide ehitusaegne kaitse niiskuse eest tagab ka selle, et ei ole vajadust hakata detaile kuivatama. Lisaks katmisele oleks mõistlik lõikeservade töötlemine niiskustõketega. Näiteks soovitaksin, et detailide lõikeservad võiks enne monteerimist katta vedelkummiga IKOPro MS Detail, mis oli kõige paljulubavam katsetatud niiskustõketest [25]. Küll aga on peamine järelتان, et üksinda detailide töötlemisest ning katmisest ei piisa ja oluline on ka jälgida täiendavalt niiskusturvalisust ehitusobjektile. See taandub juba projekteerimise faasi, kus projekteerija, kes valib kandvaks konstruktsiooniks CLT, kirjutab seletuskirja sisse ka ettepanekud, kuidas detaile montaaži- ning ehitusperioodi vältel katta. Järgmisena tuleb objektimeeskonnal ehitusperioodil projekteerija juhiseid täita ning vajadusel määrata niiskusturvalisuse ekspert. Sedasi saame vältida CLT-detailide märgumist ja sellega kaasnevat kuivatamist.

## KOKKUVÕTE

Antud lõputöö raames anti ülevaade ristkihtliimpuidust ning koostati arvutusmudel CLT-detailide lõikeserva veeimavus ning liigniiskuse väljakuivamisest erinevates keskkondades. Eesmärgiks oli välja töötada kalibreeritud arvutusmudel, millega oleks võimalik prognoosida märgunud CLT-detailide liigniiskuse väljakuivamist lubatud tasemele. Kalibreerimine toimus 2020. aastal tehtud veeimavuskatse tulemuste põhjal.

Et mudel võimalikult täpseks saada, tuli läbi viia ka CLT-detaili kihtideks kasutatava saematerjali veeimavuskatse, et välja arvutada veeimavuskoefitsient. Kalibreeritud arvutusmudelit kasutati, et modelleerida liigniiskuse väljakuivamist Mäepealse tn 3, Tallinn asuval objektil, kus vesi pääses CLT-seinaelemendi kattekile vahele ning liikus mööda seda vahelae peale, põhjustades vahelae- ning seinapaneeli ühendussõlmes 37% niiskussisaldust. See niiskussisaldus on väga kõrge ja ületab veega küllastunud puudu niiskussisalduse. Eesmärk oli mudeliga välja arvutada, et kui kaua kulub aega antud niiskussisalduse väljakuivamiseks allapoole kriitilise niiskussisalduse 16% näitajat.

Mudeli kalibreerimise käigus jõudsin järeldusele, et täiendavad uuringud märgunud või veekontaktis olnud CLT-detailide kuivamise kohta on vaja kindlasti läbi viia. Väljakuivamise tendentsid oleks vaja kuivamiskatsete põhjal üle vaadata. Mudel sai sellegipoolest kalibreeritud, sest mõõtetulemused ja arvutustulemused jäid samasse vahemikku. Arvutusmudeli koostamisel ja kalibreerimisel oli vaja koostada iga olukorra kohta sama mudel kahe erineva materjaliga, sest sellisel juhul sai hinnata kõige paremini niiskussisalduste arvutuslike tulemusi ning kalibreerida mudeli. Kahte mudelit sai kasutatud ka reaalse ehitusobjekti väljakuivamise arvutamisel.

Kalibreeritud mudeliga Mäepealse tn 3 objekti vahelae sõlme väljakuivamist modelleerides järeldasin, et seinatarindist niiskuse väljakuivamine on kõige edukam hilistalvel ja kevadel. Üldiselt võib järeldada, et kevadisel perioodil märgudes vajab CLT-detail 37% niiskussisalduses väljakuivamiseks 16% piirile aega vähemalt 178 päeva. See on juhul, kui kõrvalist abi ei kasutata. Kindlasti oleks rangelt soovituslik puidul mitte lasta lihtsalt kuivada, vaid tuleks kasutada ka niiskusimureid ja soojapuhureid, et kuivamist kiirendada. Täiendavad uuringud erinevate kuivatusvahendite prognoositava väljakuivamise aja kohta on vaja läbi viia.

Minu hinnangul täidab lõputöö väga hästi püstitatud eesmärgid. Koostasid kalibreeritud arvutusmudeli, millega hinnata niiskuskahjustuse tõsidust väljakuivamise alusel.

Ehitusobjekti niiskusturvalisuse ekspert saab võtta niiskussisalduste väärtused CLT-tarindist vastavalt mudelile ning sisestada mudeli algtingimused. Seejärel on vaja vaid oodata, et mudel arvutaks välja niiskussisaldused teatud aja möödudes. Ajaline määratlus on võimalik ise valida. Praegu kulus 178 päeva, sest peale seda oli välitingimustes puidu tasakaaluniiskus juba saavutatud [8]. Mudelis on väga lihtne muuta simulatsiooni aega ning simulatsiooni alguskuupäeva. Kindlasti on vaja tulevikus koostada CLT-detailidega katseid kuivamise ning erinevate kuivatamismeetodite ajalise prognoosimise kohta. Delphini programm suutis küll õigesti näidata lõplikku niiskussisaldust, kuid graafikute tõusud katseliste ja arvutuslike tulemuste puhul erinesid. Sellega saab antud arvutusmudelit omakorda veel täpsustada.

## SUMMARY

This thesis gives an overview of cross laminated timber and combines a dynamic calculation model for cross laminated timber moisture spread and the drying out of critical moisture in different environments. The purpose was to create a calibrated calculation model which helps to evaluate the drying out of CLT-details to a none-critical level. The calibration was done on the base of a laboratory water-uptake test which was done in 2020. To get the model as accurate as possible, another laboratory test was done to calculate the water uptake coefficient. After the calculation model was calibrated, it was used to calculate the drying out of critical moisture at the Mäepealse 3 building in Tallinn. Water found its way into the plastic cover of the CLT-detail and moved to the ceiling-element, where it caused water contact. The moisture content of the wall-element was more than 37%. That is a very high number and is even bigger than the saturation moisture content of timber. The purpose was to use the model to calculate how much time it takes before the moisture content of the detail is under 16%.

During the calibration of the model I came to a conclusion that additional research is needed to the details of moisture content drying out. The model was calibrated nicely but the tendencies were not too accurate. All in all the final measured and calculated moisture contents were in the same interval. Two different materials were used to create an accurate model as otherwise it would not have been possible to calibrate the model. I used the same logics when using the model in a real life situation – 2 timber materials with different material parameters.

The calibrated model calculated that the best time for drying out of moisture in CLT is spring. Then it takes at least 178 days from moisture content of 37% to moisture content of 16%. I also recommend to use humidifiers to help and dry out the moisture content.

I believe that the thesis completes its goals well. I created a calibrated calculation model to help and evaluate the time of drying out of critical moisture content. A moisture expert can measure the moisture content of a detail and set the model its initial conditions. Then only time is needed until the model evaluates the moisture contents of the outputs. Now it took 178 days, but that is too much. No construction can handle a delay like that. It is easy to change the duration and starting date of the simulation. Additional drying-tests of cross laminated timber is needed. Delphin could calculate the

eventual moisture content, but the tendencies were not quite right. Those additional tests can help and make the model even more accurate.



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, and A. Thiel, "Cross laminated timber (CLT): overview and development," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 74, no. 3, pp. 331–351, 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0999-5.
- [2] O. Espinoza, V. R. Trujillo, M. Fernanda, L. Mallo, and U. Buehlmann, "Cross-Laminated Timber: Status and Research Needs in Europe," vol. 11, pp. 281–295, 2016.
- [3] G. Sylvain and C. Pirvu, "CLT Handbook: Cross-laminated Timber - Google Books," 2011.  
[https://books.google.ee/books/about/CLT\\_Handbook.html?id=8W3BZwEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ee/books/about/CLT_Handbook.html?id=8W3BZwEACAAJ&redir_esc=y) (accessed Apr. 03, 2021).
- [4] RISE Research Institutes of Sweden, "The CLT Handbook," *Swedish Wood*, 2019.
- [5] K. Mjörnell and L. Olsson, "Moisture Safety of Wooden Buildings – Design, Construction and Operation," *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 29–35, 2019, doi: 10.5755/j01.sace.24.1.23230.
- [6] S. Kordziel *et al.*, "Hygrothermal characterization and modeling of cross-laminated timber in the building envelope," *Build. Environ.*, vol. 177, no. January, p. 106866, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106866.
- [7] L. Olsson and K. Mjörnell, "Laboratory investigation of sills and studs exposed to rain," 2012.
- [8] S. V. Glass and S. L. Zelinka, "Moisture Relations and Physical Properties of Wood Chapter 4," no. April 2010, 2015.
- [9] E. Liisma, B. L. Kuus, V. Kukk, and T. Kalamees, "A case study on the construction of a clt building without a preliminary roof," *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 53–62, 2019, doi: 10.5755/j01.sace.25.2.22263.
- [10] K. Kalbe, V. Kukk, and T. Kalamees, "Identification and improvement of critical joints in CLT construction without weather protection," *E3S Web Conf.*, vol. 172, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017210002.
- [11] J. Öberg and E. Wiege, "Moisture risks with CLT-panels subjected to outdoor climate during construction-focus on mould and wetting processes Fuktrisker på KL-trä som utsätts för yttre klimat under produktion-fokus på mögel och uppfuktning," p. 84, 2018, [Online]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1222631/FULLTEXT01.pdf>.
- [12] B. L. Kuus, "NIISKUSTURVALISUSE TAGAMINE CLT ELEMENTIDEGA MOISTURE SAFETY OF CROSS-LAMINATED TIMBER BUILDING : THE CASE," 2018.
- [13] K. Mjörnell and T. Gustavsson, "Industry standard ByggaF – method for

- moisture safety of the construction process," vol. 1, no. 24, pp. 1–24, 2013.
- [14] P. Dietsch, S. Franke, B. Franke, A. Gamper, and S. Winter, "Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts," *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 5, no. 2, pp. 115–127, 2015, doi: 10.1007/s13349-014-0082-7.
- [15] K. Krabbenhøft, *Moisture Transport in Wood*. 2003.
- [16] Standardikeskus, "EVS-EN 15026:2007 Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus: niiskuslevi hindamine numbrilise modelleerimisega.," 2007.  
<https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=55820&language=EstonianLanguage> (accessed Apr. 08, 2021).
- [17] E. T. Englund, L. G. Thygesen, S. Svensson, and C. A. S. Hill, "A critical discussion of the physics of wood-water interactions," *Wood Sci. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 141–161, 2013, doi: 10.1007/s00226-012-0514-7.
- [18] J. Cappellazzi, M. J. Konkler, A. Sinha, and J. J. Morrell, "Potential for decay in mass timber elements: A review of the risks and identifying possible solutions," *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 15, no. 6, pp. 351–360, 2020, doi: 10.1080/17480272.2020.1720804.
- [19] V. Kukk *et al.*, "Impact of cracks to the hygrothermal properties of CLT water vapour resistance and air permeability," *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 741–746, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.019.
- [20] A. Hukka and H. A. Viitanen, "A mathematical model of mould growth on wooden material," *Wood Sci. Technol.*, vol. 33, no. 6, pp. 475–485, 1999, doi: 10.1007/s002260050131.
- [21] K. Gradeci, N. Labonnote, B. Time, and J. Köhler, "Mould growth criteria and design avoidance approaches in wood-based materials – A systematic review," *Construction and Building Materials*, vol. 150. Elsevier Ltd, pp. 77–88, Sep. 30, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.204.
- [22] W. Rot, "Wood Rot," *Wood Tree Fungi*, vol. 2, pp. 135–159, 2006, doi: 10.1007/3-540-32139-x\_7.
- [23] E. Riigi Ilmateenistus, "Eesti kliima," 2021. [Online]. Available: <http://www.ilmateenistus.ee>.
- [24] T. Kalamees and J. Vinha, "Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations," *J. Build. Phys.*, vol. 27, no. 3, pp. 199–220, 2004, doi: 10.1177/1097196304038839.
- [25] A. Annuk, "RISTKIHTLIIMPUIDU VEEIMAVUS JA LÕIKESERVA KAITSEVAHENDITE TOIMIVUS MOISTURE UPTAKE OF CLT END-GRAIN AND PERFORMANCE ASSESSMENT OF PROTECTION MEASURES," 2020.

- [26] V. Kukk, "Ehitusniiskuse väljakuivamise võimekus ristkihtliimpuidust välispiiretes," 2019.
- [27] M. S. Dogett, "Wood Moisture | The Building Enclosure," 2013.  
<https://builtenv.wordpress.com/2013/12/06/wood-moisture/>.
- [28] V. Kukk, A. Külaots, J. Kers, and T. Kalamees, "Influence of interior layer properties to moisture dry-out of CLT walls," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 46, no. 11, pp. 1001–1009, 2019, doi: 10.1139/cjce-2018-0591.
- [29] "IKO MS Detail vedelkumm," 2019. [www.iko.com](http://www.iko.com).
- [30] R. T. Sataloff, M. M. Johns, and K. M. Kost, "European Standard -Moisture content of a piece of sawn timber- Part 2: Estimation by electrical resistance method," pp. 1–7, 2002.
- [31] J. Grunewald and A. Nicolai, "Delphin 5 User manual and program reference.," 2015.
- [32] "EVS-EN ISO 15148:2003 - Veeimavus," 2002. Accessed: Jun. 20, 2021.  
[Online]. Available:  
<https://www.evs.ee/Download/ViewBrowsingServiceSubscription?productId=31906&language=EnglishLanguage>.
- [33] R. T. M. Lepage, "Moisture Response of Wall Assemblies of Cross- Laminated Timber Construction in Cold Canadian Climates," p. 125, 2012, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10012/6569>.
- [34] R. Lipand, "Department of Materials and Environmental Technology CAPILLARY MOVEMENT OF WATER IN A RADIAL CROSS-SECTION OF CLT PANEL," 2021.

# LISAD

## Lisa 1 Elektroodtakistusmõõtuuri kalibreerimistunnistus



Teaduspargi 8, 12618 Tallinn  
Tartu labor, Teaduspargi 11, 50411 Tartu

### KALIBREERIMISTUNNIUSTUS

Calibration Certificate

Kalibreerimistunnistus nr Calibration Certificate No.	Kuupäev Date	Leht Page
<b>KTRC-19/0099</b>	<b>25.09.2019</b>	<b>1(3)</b>
Tellija Customer	<b>Tallinna Tehnikaülikool</b>	
Address Address	<b>Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn</b>	
Mõõtevahend Measuring instrument	<b>Puiduniiskusmõõtur</b>	
Valmistaja Manufactured by	<b>Logica H&amp;S snc</b>	
Tüüp Type	<b>LG9-NG</b>	
Number Serial number	<b>02508</b>	
Kalibreeritud Date of calibration	<b>25.09.2019</b>	
Lehti Number of pages	<b>3</b>	<a href="#">Dokument on kinnitatud elektroonselt Metroserdi digitempliga.</a> <small>Taivo Hirsnik kinnitas/approved 25.09.2019 10:53.09 Armin Zoo kinnitas/approved 25.09.2019 11:51.35</small>
Lisad Documents attached	<b>Lisa A ühel lehel</b>	<b>T. Hirsnik</b> Kalibreeris Calibrated by

Kalibreerimistunnistust võib paljundada tema täies mahus. Kalibreerimistunnistuse osaline paljundamine on lubatud ainult tunnistus väljastava labori kirjalikul loal.

This Certificate may only be reproduced in full, except with the prior written permission by the issuing Laboratory.

Metroserdi dokumentide elektroonilise kinnitamise kohta vaata lisainfot aadressil <http://www.metroserd.ee/et/digitempel>.  
For additional information about digital stamps used in Metrosert see <http://www.metroserd.ee/en/digitalstamp>.

# Lisa 2 Kaalu kalibreerimistunnistus



Teaduspargi 8, 12618 Tallinn  
Tartu labor, Teaduspargi 11, 50411 Tartu



## KALIBREERIMISTUNNIUSTUS

Calibration Certificate

Kalibreerimistunnistus nr Calibration Certificate No.	ATR-19/0350	Kuupäev Date	16.08.2019	Leht Page	1(3)
Tellija Customer	Tallinna Tehnikaülikool				
Address Address	Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn				
Mõõtevahend Measuring instrument	Mitteautomaatkaal				
Valmistaja Manufactured by	Kern & Sohn GmbH				
Tüüp Type	DS 30K0.1L				
Number Serial number	W1934704				
Kalibreeritud Date of calibration	16.08.2019				
Lehti Number of pages	3	<a href="#">Dokument on kinnitatud elektroonselt Metroserdi digitempliga.</a> Rando Anni kinnitas/approved 16.08.2019 14:00:58 Andre Ustav kinnitas/approved 16.08.2019 14:05:01			
Lisad Documents attached	-	A. Üstav Mõõtmiste eest vastutav isik Person responsible for measurements	R. Anni Kalibreeris Calibrated by		

Akrediteeritud kalibreerimislabor AS Metrosert kalibreerib mõõtevahendeid ja väljastab kalibreerimistunnistusi Eesti Akrediteerimiskeskuse (EAK) akrediteerimisotsuse ulatuses ning sellele vastavates mõõtemääramatuse piirides. Käesolevas kalibreerimistunnistuses antud mõõtetulemused on jälgitavad rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi (SI) ühikuteni. EAK on Euroopa Akrediteerimisalase Koostööorganisatsiooni (EA) liige ja on ühinenud EA liikmete vahelise vastastikuse tunnustamise leppega (MLA).

The measurements carried out and the Certificates of Calibration issued by an Accredited Laboratory comply with the measurement ranges and uncertainties approved by the Estonian Accreditation Centre (EAK). The measurement results issued by the Laboratory are traceable to the units of International System of Units (SI). EAK is a Member of EA (European co-operation for Accreditation) and a signatory to the EA MLA (Multilateral Agreement).

Kalibreerimistunnistust võib paljundada tema täies mahus. Kalibreerimistunnistuse osaline paljundamine on lubatud ainult tunnustust väljastava labori kirjalikul loal.

This Certificate may only be reproduced in full, except with the prior written permission by the issuing Laboratory.

Metroserdi dokumentide elektroonilise kinnitamise kohta vaata lisainfot aadressil <http://www.metrosert.ee/et/digitempel>.

For additional information about digital stamps used in Metrosert see <http://www.metrosert.ee/en/digitalstamp>.

EESTI METROLOOGIA KESKASUTUS