



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

LUBIKROHVIGA KAITSTUD PUITKONSTRUKTSIOONIDE SÖESTUMINE

CHARRING OF TIMBER STRUCTURES PROTECTED BY LIME PLASTER

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Meeri Nurk

Üliõpilaskood: 165138EAEI

Juhendaja: Alar Just, professor

Kaasjuhendaja: Johanna Liblik, doktorant

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.

"....." 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....201.... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Meeri Nurk

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Lubikrohviga kaitstud puitkonstruktsioonide söestumine,

mille juhendaja on Alar just,

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.

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

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Meeri Nurk 165138EAEI
Õppekava, peeriala: EAEI02/15 – Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine
Juhendaja: Professor Alar Just

Lõputöö teema:

Lubikrohviga kaitstud puitkonstruktsioonide söestumine

Charring of timber structures protected by lime plaster

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Ülevaade varem teostatud uuringutest krohvitud puitkonstruktsioonide käitumisest tules.
2. Katseplaani koostamine ja katsekehade valmistamine.
3. Koonuskuumuti katsed lubikrohviga katsekehadele.
4. Tulemuste analüüs.
5. Järeldused ja ettepanekud projekteerimisparameetrite osas Eurokoodeks 5-1-2 arvutusmeetodi jaoks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ülevaade varasematest uuringutest	1.09.2020
2.	Katseplaani ja katsekehade valmistamine	1.11.2020
3.	Koonuskuumuti katsed	15.1.2021
4.	Analüüs ja järeldused	15.5.2021
5.	Töö vormistamine	24.5.2021

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "24" mai 2021.a

Üliõpilane: Meeri Nurk ".....".....2021 a
/allkiri/

Juhendaja: Alar Just ".....".....2021 a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
SISSEJUHATUS	7
1 PUITKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE TULEKAHJUOLUKORRAS	8
1.1 Ehitiste projekteerimine tulekahjuolukorras	8
1.2 Puidu käitumine tulekahjuolukorras	9
1.3 Puitkonstruktsioonide tulepüsivuse arvutuseeskirjad vastavalt standardile EN 1995-1-2	11
2 LUBIKROHV.....	14
2.1 Lubikrohvi ajalugu	14
2.2 Lubikrohvi valmistamine.....	14
2.3 Lubikrohvimine	16
2.4 Lubikrohvi käitumine tulekahjuolukorras ja varasemad uuringud	19
3 KATSEMEETOD	20
3.1 Katseplaan	20
3.2 Koonuskalorimeetri tööpõhimõte	22
3.3 Ahjukatse ja koonuskuumuti katse erinevus	24
3.4 Katsekehade valmistamine	27
3.5 Katsemeetodi kirjeldus.....	31
4 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	33
4.1 Tähelepanekud	33
4.2 Temperatuurigraafikud ja söestumise algusaeg	34
4.3 Puidu söestumine krohvi taga ja kaitsetegur	41
4.4 Võrdlus varasemate lubikrohvi ahjukatsetega	46
4.5 Võrdlus savikrohviga.....	48
4.6 Võrdlus kipsplaadiga	52
4.7 Järeldused ja ettepanekud	56
5 EDASISED UURINGUD	57
6 KOKKUVÕTE.....	58
7 ABSTRACT	60
KASTUTATUD KIRJANDUS.....	62
LISA A	66
LISA B	68
Lisa C.....	72

EESSÕNA

Antud töö on jätk autori kaasjuhendaja J. Libliku magistritööle „*Protective effect of clay plaster for the fire design of timber structures*” ja sisendiks tema doktoritööle, kus uuritakse savi- ning lubikrohvi tulepüsivust edasi. Autor soovib tänada Liblikut juhendamise, pühendumuse ja kannatlikkuse eest. Lisaks soovib autor tänada oma juhendajat A. Justi kannatlikkuse, abivalmiduse ja toe eest.

Autor tänab lubikrohvi tootjad, kes olid nõus varustama autorit lubikrohviga antud töö tarbeks. Ühtlasi ettevõtte Saviukumaja krohvijaid, kes jagasid õpetussõnu lubikrohviga krohvimiseks.

Lisaks tänab autor Tallinna Tehnikaülikooli Puidutehnoloogia laboritöötajaid nende vastutulelikkuse ja abi eest katseperioodi ajal.

Tallinna linna Raestipendium on toetanud antud töö valmimist ja autor tänab neid tunnustuse eest.

Viimasena soovib autor tänada kõiki õppejõude, kes olid õpingute vältel abivalmid ja vastutulelikud. Lisaks ei saa mainimata jätta autori kursusevendi, kes olid õpingute ajal suuresti toeks autori erialasele arengule ja autor soovib tänada neid abi eest.

Võtmesõnad: lubi, krohv, puit, söestumine, tulepüsivus, koonuskalorimeeter

SISSEJUHATUS

Lubikrohvitud puitkonstruktsioone kohtab enamasti 20. saj alguspoole ehitistes. Ehitiste eluaja pikendamiseks ja kaasajastamiseks tuleb neid üldjuhul renoveerida, sealjuures peab täitma kaasajal sätestatud tuleohutusnõudeid. Puitkonstruktsioonide puhul on peamiselt levinud kaks valikut, kas kasutada kaasaegseid ehitusmaterjale, mille tulepüsivusomadused on teada, või jääda algsete materjalide juurde ning kasutada tuleohutuspäigaldisi (nt sprinkler). Ajaloolise väärtusega ehitise puhul ei pruugi tuleohutuspäigaldised kokku sobida interjööri.

Puitkonstruktsioonide tulepüsivuse tagamiseks eelistatakse tulekaitsematerjalina kasutada puit- või kipsplaate. Viimane variant on laialdaselt kasutuses, sest selle tulepüsivuse omadusi on uuritud ja rahvasuus on levinud teadmine selle heast tulepüsivusest. Vanemas kirjanduses on mainitud lisaks kipsile ka lubikrohvi head tulepüsivust. Siiani pole Euroopas reguleeritud lubikrohvi tulekaitsevõimet puitkonstruktsioonidele.

Taastamaks ehitise algset ilmet ja seejuures tagamaks tuleohutusnõudeid, siis tasub uurida ajaloolisi ehitusmaterjale puidu kaitseks tulekahjuolukorras. Käesolevas töös uuritakse lubikrohvi tulepüsivust koonuskuumutiga. Ahjukatsed on mahukad ja kallid, seetõttu kasutatakse antud töös väiksemamõõtmelist katseseadet. Uuritakse nelja Eesti turul levinumat lubikrohvi. Kaks neist on valmistatud traditsiooniliselt ja kaks tööstuslikult.

Antud töö eesmärk on uurida lubikrohviga kaitstud puidu söestumist, mis ajahetkel hakkab puit lubikrohvi all söestuma ja millise kiirusega. Sealhulgas uuritakse puidu paksuse, puidukiu suuna ja roomati mõju puidu söestumisele. Töö tulemusena esitatakse ettepanekud puidu söestumise algusaja t_{ch} ja lubikrohvi kaitseteguri k_2 leidmiseks.

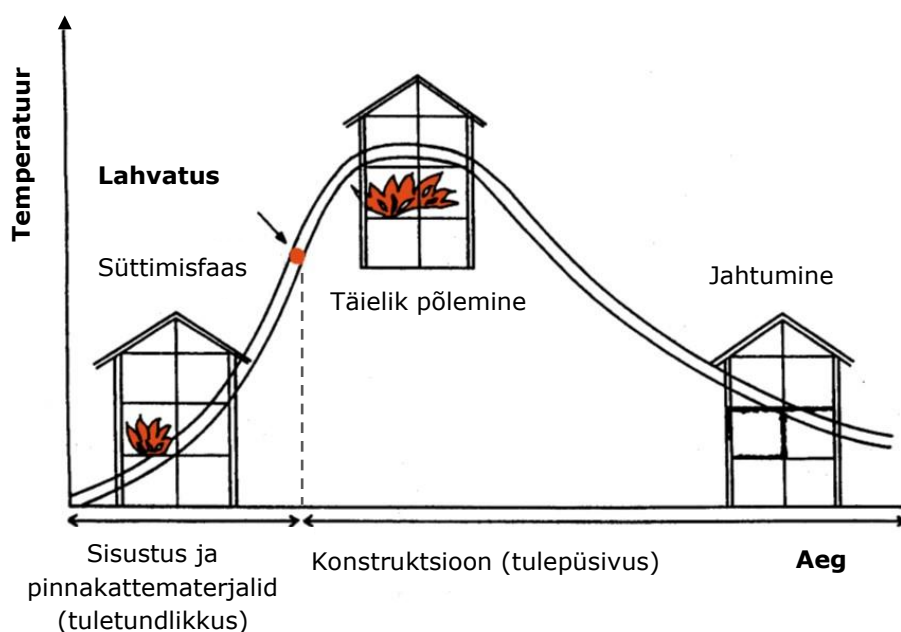
1 PUITKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE

TULEKAHJUOLUKORRAS

1.1 Ehitiste projekteerimine tulekahjuolukorras

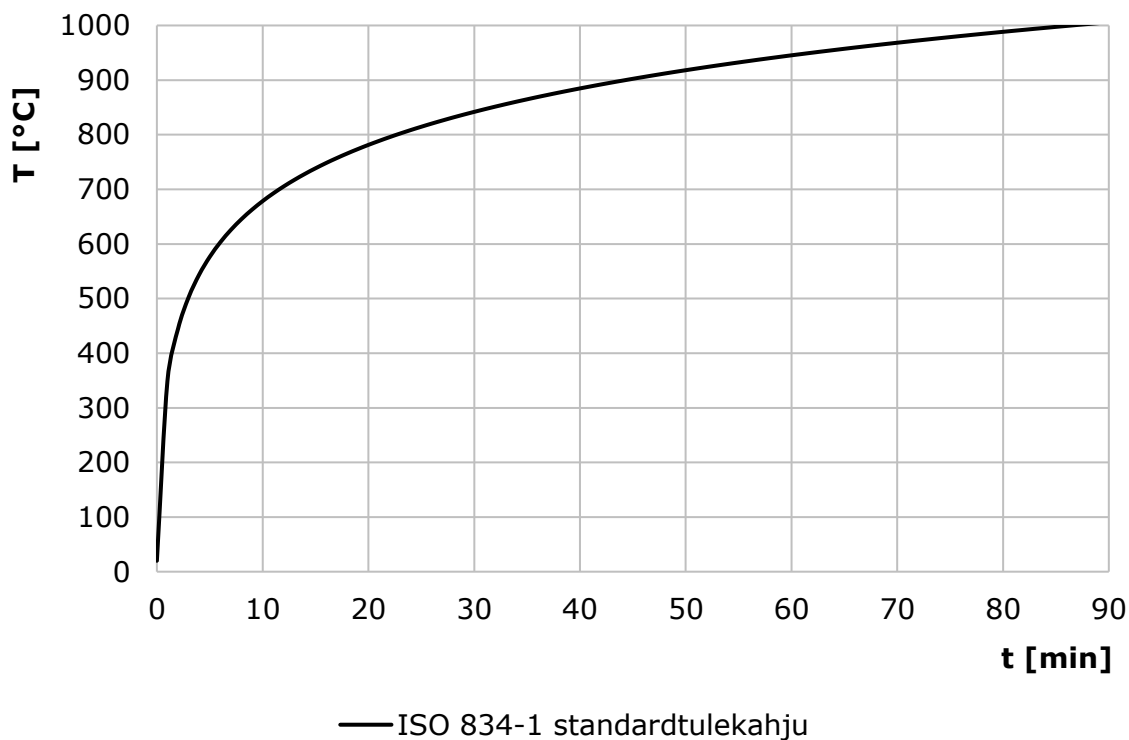
Euroopas kehtib CPR määrus (*ing k Construction Products Regulations*), mis sätestab ehitustoodetele nõuded. Neist üks on tuleohutus ja nõudele vastavust saab tõendada kahel viisil: 1) ehitustoote või ehituskonstruksiooni katsetamine; 2) projekteerimine järgides tuleohutuse arvutuseeskirju. [1] Ehitustoodete ja -konstruktsioonide tuleohutust puudutav klassifitseerimine toimub vastavalt standardile EN 13501-1 ja 13501-2 [2] [3]. Puitkonstruktsioonide projekteerimist tulekahjuolukorras kirjeldab standard EN 1995-1-2 [4].

Ehitise tulekahjuolukorras eristatakse peamiselt kahte faasi (vt *Joonis 1.1*), süttimisfaas ja täielik põlemine. Süttimisfaas esitab nõuded pinnakattematerjalide tuletundlikkusele, kus käsitletakse materjali üldist süttivust, suitsu ning põlevate tilkade teket. Tuletundlikkuse nõudeid kirjeldab standard EN 13501-1. Täieliku põlemise faas seab nõuded konstruktsioonelementide tulepüsivusele ning seda sätestab standard EN 13501-2. Konstruktsiooni tulepüsivus kirjeldab konstruktsiooni kandevõimet või tuletõkestusvõimet tulekahjuolukorras teatud kindla aja jooksul. Toimivuskriteeriumiteks on kandevõime R, terviklikkus E ja isolatsioonivõime I. Seda on võimalik tõendada arvutustega või katsetamise teel. [1] [2] [3]



Joonis 1.1 Tulekahju kaks peamist faasi: süttimisfaas ja täielik põlemine [1].

Kuna reaalsuses on iga tulekahju erinev, siis on võetud kasutusele nn standardtulekahju stsenaarium, mille alusel saab hinnata ja võrrelda erinevate konstruktsioonide tulepüsivust. Standardtulekahju (vt *Joonis 1.2*) imiteerib täieliku põlemise faasi ja see on kirjeldatud standardis ISO 834-1 ning EN 1363-1 [5] [6]. Antud kõver on aluseks võetud standardi EN 1995-1-2 põhiosa arvutusvalemite, st sealsed arvutusvalemid on leitud konstruktsioonide katsetamisega, kus tulekatses järgitakse standardtulekahju kõverat [7].

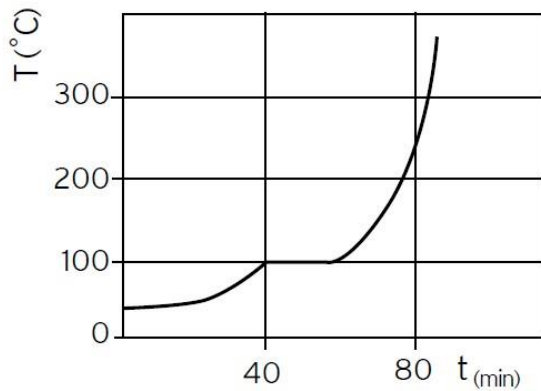


Joonis 1.2 ISO834-1 standardtulekahju kõver [6].

1.2 Puidu käitumine tulekahjuolukorras

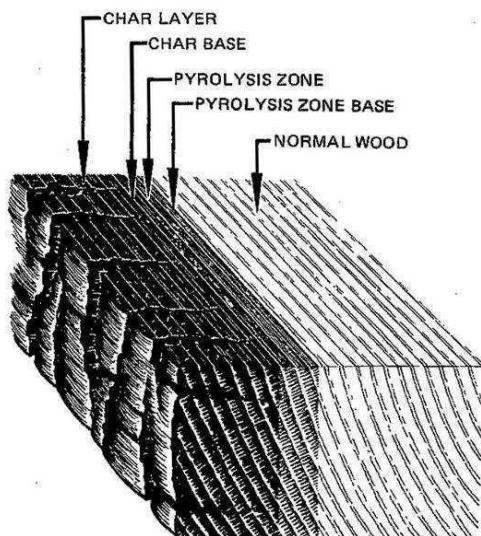
Puit on rakulise struktuuriga materjal, mille keemilise koostise moodustab põhiliselt süsinik, hapnik ja vesinik [8]. Suur süsiniku sisaldus teeb puidust põleva materjali, mis suure kuumuse ja hapniku olemasolul hakkab keemiliselt lagunema [9].

Kuumuse tõustes hakkab puidus olev vesi üle 100 °C aurustuma, liikudes puidu välispinnani ja eraldudes sealt. Kui temperatuur puidus langeb mingil ajahetkel alla 100 °C, siis osa veeaurust liigub vastassuunas ja kondenseerub uuesti. [1]



Joonis 1.3 Temperatuur puidus selle kuumenemisel [9].

Termiline lagunemine ehk pürolüüs algab u 200...300 °C juures ja põlemisel tekivad lenduvad ained, mis koosnevad gaaside ja tõrva põlevast segust. Antud ained moodustavadki söekihi ning seejuures kaasneb puidu massi- ja mahukadu, mis on põhjustatud pragude tekkest põlengu ajal ja lenduvate ainete segunemisest ümbritseva õhuga [1] [10]. Puidu tinglikuks söestumistemperatuuriks loetakse 300 °C, kuna siis algab intensiivsem pürolüüs [10]. Enne seda asetleidev termiline lagunemine on aeglane ja vaadeldav puidukiht pole täielikult kaotanud oma tugevust, st söestumisel kaotab puit täielikult oma elastsuse ning tugevuse [4] [10].



Joonis 1.4 Puidu füüsikalised muutused tule mõjul [9].

1.3 Puitkonstruktsioonide tulepüsivuse

arvutuseeskirjad vastavalt standardile EN 1995-1-2

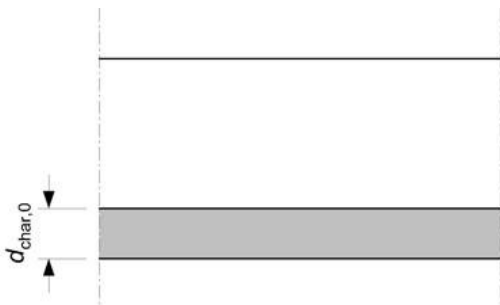
Eurokoodeks EN 1995-1-2 annab tulepüsivuse arvutusmeetodid puitkonstruktsioonidele tulekahjuolukorras. Konstruktsiooni tulepüsivuse arvutuseeskirjad põhinevad puidu söestumise ulatusel ning kandevõime arvutustes arvestatakse söestumata puidu ristlõiget. Vastavalt standardile loetakse söestumise algusajaks aega, mil tulele avatud ja kaitsmata puit hakkab söestuma 300 °C juures. Eristatakse ühe- ja kahemõõtmelist söestumist. Ühemõõtmelise söestumise korral on tulele avatud konstruktsiooni ainult üks külg, kahemõõtmelise korral aga kaks või enam külge, arvestades seejuures ümardunud nurki põlemise käigus. [4]

Antud uurimistöö käsitleb ühemõõtmelist söestumist ja järgnev teooria piirdub sellega.

Puidu söestumiskiirus sõltub puiduliigist, tihedusest ja/või tugevusklassist [1]. Standardis EN 1995-1-2 on võetud okaspuidu baassöestumiskiiruseks konstante suurus $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$, olenemata puidukiu suunast [4]. Ühemõõtmelise puitkonstruktsiooni söestumissügavus $d_{char,0}$ [mm] määratakse järgnevalt:

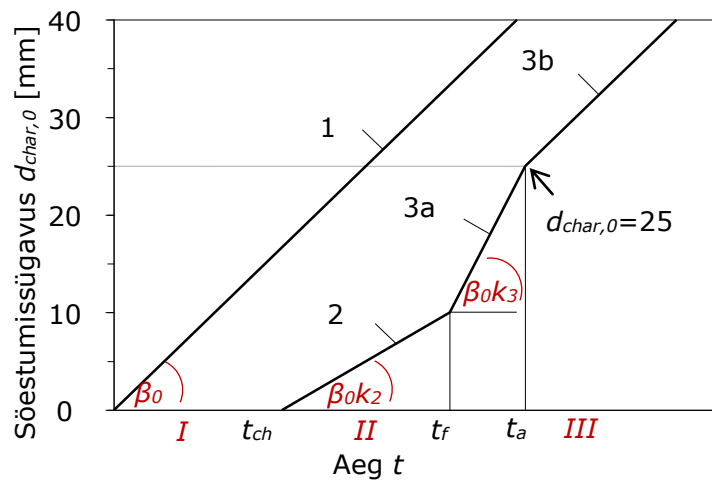
$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad (2.1)$$

kus β_0 on kaitsmata puidu baassöestumiskiirus [mm/min];
 t on tulekahju kestvus [min] [4].



Joonis 1.5 Suurte puitristlõigete ühemõõtmeline lineaarne söestumine [4].

Puidu söestumise algust on võimalik edasi lükata kasutades katteplaati või -kihti, tekitades kaitsekihi puidule tule eest. Kattekihi olemasolul algab puidu söestumine alles ajahetkel t_{ch} (vt Joonis 1.6) ja üldjuhul on söestumiskiirus kattematerjali taga aeglasem, kui algselt kaitsmata puidu puhul (vrd kõveraid 1 ja 2). [1]



Joonis 1.6 Söestumissügavus aja funktsioonina kattekihi olemasolul [4].

Ajahetkel t_f laguneb kattekiht või selle kinnitid täielikult ja kattekiht kukub konstruktsiooni eest ära. Võrreldes algselt kaitsmata puidu baassöestumiskiirusega β_0 , siis nüüd söestub kaitsmata puit edasi kahekordse kiirusega (vrd Joonis 1.6 kõveraid 2 ja 3a). Ajahetkel t_a , mil söekihi paksus saavutab 25 mm, söestub puit algse baassöestumiskiirusega β_0 (Joonis 1.6 vrd kõveraid 1 ja 3b). [4] Põhjuseks on söekihi soojuserijuhtivus, mis on madalam normaalse puidu soojuserijuhtivusest ja 25 mm paksuse söekihi juures väheneb kuumuse ligipääs normaalsele puidule [9].

Paremat ülevaadet puidu söestumisest kattekihi taga ja pärast selle ärakukkumist illustreerib Joonis 1.6. Antud joonisel kirjeldab kõver 1 algselt kaitsmata puidu lineaarset söestumist. Kattekihi olemasolul saab söestumise jagada kolme faasi:

- | | | |
|----------|-----------------------|--|
| I faas | $0 < t < t_{ch}$ | puit on normaalses olekus; |
| II faas | $t_{ch} \leq t < t_f$ | kaitsefaas; puit on kattekihi taga hakanud söestuma; |
| III faas | $t \geq t_f$ | järeلكaitsefaas; kattekiht on ära kukkunud. [1] |

Ajahetki, mil söestumise tendents muutub, nimetatakse järgnevalt:

- t_{ch} söestumise algusaeg [min];
- t_f kaitsekihi tõrketekkeaeg [min];
- t_a aeg, mil söestumissügavus saavutab 25 mm [min] [1].

Iga erineva kaitsekihi korral söestub puit erineva kiirusega. Söestumiskiirust kaitsekihi taga iseloomustab kaitsetegur k_2 [1]. Pärast tulekatset mõõdetakse puidu söestumissügavus ja teades söestumisaega arvutatakse söestumiskiirus $\beta_{0,2}$ [mm/min] järgnevalt:

$$\beta_{0,2} = \frac{d_{300}}{t - t_{ch}} \quad (2.2)$$

kus d_{300} on puidu söestumissügavus [mm];
 $t - t_{ch}$ on söestumise kestvus [min].

Söestumissügavuseks loetakse kaugust ristlõike pinnast kuni 300 °C samatemperatuurijooneni. Kaitsetegur k_2 hõlmab endas nii kaitsekihi kui ka puidu söestumiskiirust ning see leitakse järgnevalt:

$$k_2 = \frac{\beta_{0,2}}{\beta_0} \quad (2.3)$$

kus $\beta_{0,2}$ on puidu söestumiskiirus kaitsekihi taga [mm/min];
 β_0 on algselt kaitsmata puidu baassöestumiskiirus [mm/min].

Antud valem on rakendatav eelkõige üksikule katsekehale tulekatses, sest kahes eelnevas valemis sõltuvad söestumissügavus d_{300} ja söestumiskiirus $\beta_{0,2}$ kaitsekihi paksusest h_p . Puitkonstruktsioonide tuleohutuse arvutuseeskirjades on erinevate kattematerjalide jaoks väljatoodud kaitseteguri sõltuvus kaitsekihi paksusest või tihedusest, mis on leitud tulekatsete põhjal.

Teades kattematerjali kaitseteguri k_2 väärtust, on võimalik leida ühemõõtmelise puitkonstruktsiooni söestumissügavus (vt *Joonis 1.5*) tulekahju vältel, mil kaitsekiht pole veel ära kukkunud:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot k_2 \cdot t. \quad (2.4)$$

Järeלקaitsefaasis iseloomustab puidu söestumiskiirust järeלקaitsetegur k_3 , mis on sõltuvuses kaitsekihi tõrketekkeajaga t_f [4]. Antud töös uuritakse puidu söestumist kaitsefaasis.

Standard EN 1995-1-2 annab arvutuseeskirjad t_{ch} ja k_2 määramiseks kipsplaatidele, puitplaatidele ja mineraalvillale, kuid mitte krohvidele [4].

2 LUBIKROHV

2.1 Lubikrohvi ajalugu

Lubjakivi põletamine sai alguse enne meie aega, mil peamiselt kasutati põletamisest saadud lubimörti müüritises sideainena ja valge värvi saamiseks [11]. Keskajal kasutati lubimörti jätkuvalt müüritises, kuid selle valmistamise oskus oli aastasadadega hääbunud ja mört ise oli halva kvaliteediga. 15.-16. sajandil tõusis huvi antiiksete ehitusoskuste ja -materjalide vastu, sh lubimördi valmistamine ning selle kasutus suurenes taas. [12]

Alles 18. sajandi lõpus hakati uurima ja dokumenteerima lubikrohvi kui viimistlusmaterjali tulepüsivust kaitsmaks puitkonstruktsioone. Pärast paljulubavaid tulemusi ja lubikrohvi hea tulepüsivuse propageerimist langes 19. sajandi alguseks lubikrohvi kasutamine tulepüsivuse eesmärgil. Põhjuseks oli puitkonstruktsioonist teatrimaja põleng Londonis, mida eelnevalt peeti kõige tuleohutumaks teatriks, kus puitkonstruktsioone kattis peamiselt lubikrohv. Tulekahju ajal olid aga tulekahju kustutamiseks ettenähtud veereservuaarid tühjad ja esines muid puudjääke, mistõttu lõpuks ehitis varises täielikult. [13]

Tööstusliku tsemendi kasutuselevõttuga umbes 20. sajandi alguses hakati taas uurima lubikrohvi tulepüsivust, lisades krohvile väikeses koguses tsementi [14]. Algselt oli tsemendi lisamise eesmärk tõsta lubikrohvi ilmastikukindlust [15]. 20. sajandi keskel suurenes betoonkonstruktsioonide levik ja puitehitiste katmine lubikrohviga taandus, sh teadmine selle tulepüsivusest.

2.2 Lubikrohvi valmistamine

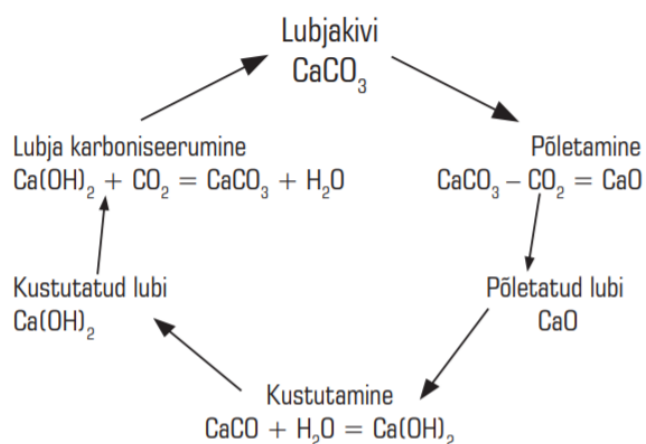
Lubikrohvi valmistamine on enne tööstuslikku arengut olnud aastatuhandeid sama, kuid ajapikku tööstuslikult valmistatud lubikrohvi tõrjus välja ajakulukama ja kallima traditsiooniliselt valmistatud lubikrohvi kasutamise [15].

Puhas lubjakivi koosneb ainult kaltsiumkarbonaadist CaCO_3 , kuid lisaks sellele esineb tihti veel magneesiumoksüüde ja sellist lupja nimetatakse magneesiumlubjaks. Koostises võib esineda ka soovimatuid lisandeid nagu ränikivi või raudoksiid. [16]

Lubjakrohvi valmimine kujutab endast lubjakivi ringlust (vt *Joonis 2.1*) [17]. Pärast lubjakivi kaevandamist põletatakse lubi põletusahjudes, lubjakivi laguneb u 900 °C

juures süsihappegaasiks ja toorlubjaks CaO . Soovimatute lisandite korral võivad need kuumuse käes ühineda lubjaga ja moodustada kergesti sulavaid ühendeid, mis teevad kivi pehmeks ja katavad selle pinna tiheda klaasja kihiga, mis hiljem takistab lubja kustumist. [16]

Traditsiooniline ahi kujutab endast püstahju, kus lubjakivid pannaks ülevalt sisse, keskmises osas toimub nende põletamine küttekolde läheduses ja alla valgub jahtunud toorlubi [16]. 19. sajandi lõpus alanud tööstuslik lubjapõletamine on siiani levinud, põletamine toimub pöördahjudes, kus pikk ja natuke kaldu terastoru pöörleb aeglaselt. Ülevalt tuleb jahvatatud lubjakivi ja ahju pöörlemisega liigub see alla, kus see alumises osas on juba põletatud ja väljub toorlubi. [15]



Joonis 2.1 Lubikrohvi valmistamine - keemiline protsess [11].

Seejärel toimub põletatud lubja kustutamine, mis kujutab endast vee lisamist lubjale. Reaktsiooni käigus eraldub palju soojust ja vesi võib hakata keema ning osa sellest aurub. Seepärast nimetatakse antud etappi lubja kustutamiseks, kuna vee lisamine ja seejärel selle aurustumine meenutavad põleva eseme kustutamist. Eristatakse kahte kustutamiseviisi sõltuvalt kasutatavast veekogusest: märg- või kuivkustutamine. [15] Esimene on tavaks traditsiooniliselt valmistatud lubjale, kus vett lisatakse rohkem kui on massilt lubja ja lõpuks meenutab lubi märga taignamassi [18]. Teine meetod on kasutusel tööstuslikult valmistatud lubikrohvil, kus arvutuste kohaselt lisatakse minimaalselt vajaminev kogus vett lubjale, saaduseks on pulbriline ja kuiv kustutatud lubi [15].

Oluline nüanss on kustutamise kiiruses, mida kauem lubi kustub ja laagerdub, seda plastsem see on. Põhjuseks on vee tungimine ajapikku sügavamale, mis suurendab

kaltsiumhüdroksiidi kristallide teket, ühtlasi pikaajaliselt kustutatud lubja struktuur on pigem plaatjas ja mitte prismaatiline. [19] Kustutamise algul on lubja kristallid suuremad, ajaga kustuvad ehk lagunevad suuremad lubjatükid väiksemateks ja seeläbi väheneb poorsus, kuid suureneb plastsus [20]. Krohvi poorsuse vähenemine laagerdudes võtab kümneid aastaid, seega enamjaolt on tänapäeval kasutataval krohvil suur poorsus [19]. Magneesiumirikkad lubjakivid kustuvad aeglasemini [16]. Lubja laagerdamine on omane traditsiooniliselt valmistatud lubikrohville [15].

Lubi ise tõmbub kuivades ja karboniseerudes mahult kokku, seega lisatakse lubjale inertseid täiteaineid. Üldlevinud on liiva kasutamine, kuid leidub ka tõendeid muudest lisanditest peale liiva, nt tellisepuru, loomakarvad või õled [13]. Sarnaselt betooni valmistamisele peaks liiva terastikuline koostis varieeruma, et vältida tühimikke liivaterade ja sideaine lubja vahel. Eelistatakse nurkjaid liivateri, mis omavahel ei libise. [15]

Lubja madala veekindluse ja mehaaniliste näitajate parendamiseks hakati sajand tagasi lisama lubjale tsementi [15] [21]. Tsemendi lisamisega suureneb krohvimisel veevajadus, krohvi tihedus suureneb ja poorsus väheneb. Teoorias peaks suurema veekoguse juures lubikrohvi kuivamisel liigne vesi välja auruma ja krohvi poorsus olema võrdväärne lubikrohvi poorsusega ilma tsemendita, kuid katsed on näidanud vastupidist. Tsemendi lisamisel väheneb krohvi veeimavus ja suureneb survetugevus. [21] Samuti tardub tsemendiga krohv kiiremini ja tööaeg on lühem [15].

Eelnevalt oli kirjeldatud õhkclubja valmistamist, mida antud töös uuritakse. Lisaks sellele on olemas hüdrauliline lubi, mis saadakse savikast lubjakivi põletamist ning mida ei tohi veega kustutada [16]. Erinevalt õhkclubjast tardub ja kivineb see ka veel all [16].

2.3 Lubikrohvimine

Tehasekrohv või pooltootena tehases valmistatud krohvid peavad vastama paigaldusstandardile EN 13914, mis sätestab nõuded selle valmistamisele ja pealekandmisele. Standard jaguneb kaheks ja käsitleb välis- ning sisekrohvi eraldi, järgnevalt uuritakse sisekrohvi. [22] Standard annab ette üldsõnalised juhised krohvimiseks ja lubikrohvi tootjapoolsed juhised järgivaid neid, sh võivad nad anda omapoolsed lisajuhiseid.

Krohvi nakkeks konstruktsioonile on vaja kasutada krohvikandjat, mis on kinnitatud konstruktsiooni külge. Puitkonstruktsioonide puhul on vanimaks krohvikandjaks

puupunnid (vt *Foto 2.1*), mis löödi teatud tihedusega palkseina ja seejärel krohviti. Alternatiiv sellele olid naelad, mis paigaldati sama põhimõttega seina. Umbes samaaegselt leiutati puidust laastuvõrk, mis kujutas endast puitlaastude omavahelist seotist ja oli naeltega kinnitatud konstruktsiooni külge. Eelmise sajandi keskel tuli nn raabitsvõrk, mis oli roostevabast või tsingitud terasest seotud võrk. Kaasajal kasutatakse raabitsvõrgule sarnaselt plastmassist valmistatud võrku või roomatti, kus pilliroog on kokku seotud tsingitud terastraadiga. Krohvikandjate idee on kasutuses olnud paaril viimasel sajandil, enne seda krohviti peamiselt kivimüüritisi, kus krohv nakkus lookeva müüritise taha hästi ja puudus vajadus krohvikandja jaoks [13]. Eelnevalt mainitud Londoni teatrimaja korral puuduvad andmed krohvikandja kasutusest [13].

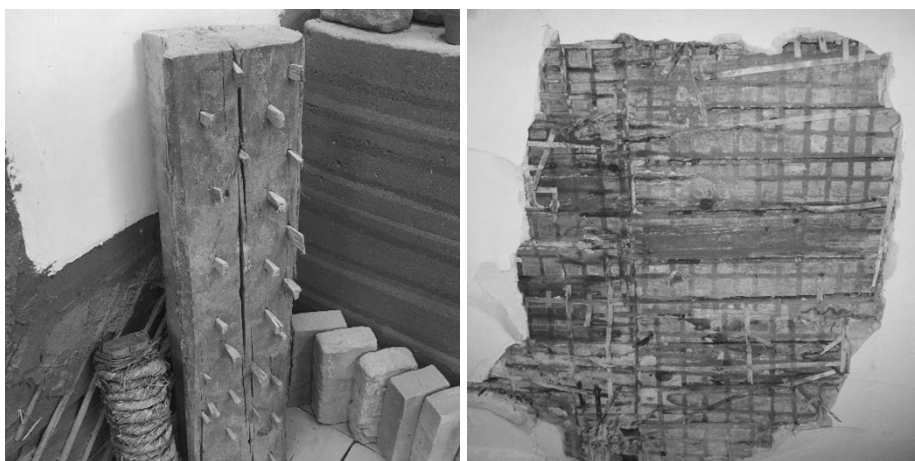
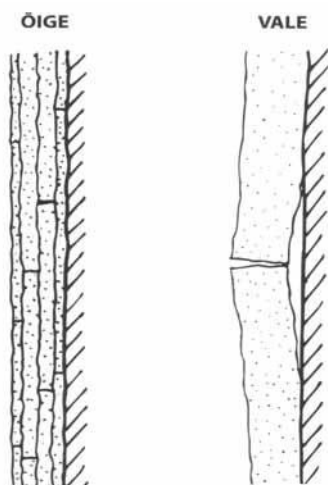


Foto 2.1 Krohvikandjad; vasakul puupunnid, paremal laastuvõrk.

Krohvimist on soovitatav teha temperatuurivahemikus $+5...+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, vältimaks krohvi jäätumist ja liiga kiiret kuivamist [22]. Lubikrohv on aluseline ja kokkupuutel nahaga võib tekitada nahaärritust, soovitatav on kasutada krohvimisel töökindaid ja -prille. Puitkonstruktsiooni puhul on tarvis aluspind esmalt niisutada, vältimaks krohvi pealekandmisel krohvis sisalduva vee kohest imbumist puitu ja kiiret krohvi kuivamist. [23] Kuivmeetodil valmistatud krohvile tuleb lubikrohvi segu saamiseks lisada vett ja hoolikalt segada. Olenevalt tootjast on ettenähtud veekogus antud või peab kasutaja seda vastavalt krohvi viskoossusele ise reguleerima. [24] [25]

Krohvi pealekandmist alustatakse aluskrohviga, kus täiteainete terasuurus on vahemikus 0...4 mm, seejärel lisatakse viimistluskrohv, mille terasuurus võib olla vahemikus 0...2 või 0...1 mm. Krohvida tuleb kihtide kaupa ja ühe kihipaksus ei tohiks ületada 10 mm, vastasel korral pärsitakse lubikrohvi karboniseerumist (vt *Joonis 2.1*) ja krohvi kuivamisel tekivad praod mahukahenemisest (vt *Joonis 2.2*) [18] [25]. Kihtide

omavahelise parema nakke tagamiseks võib eelnevasse kihti teha sälgud või karestada seda.



Joonis 2.2 Krohvikihide võrdlus, pealekantud mitmekihiliselt või ühe kihina [18].

Lubikrohv vajab kivinemiseks niiskust ja süsihappegaasi (vt *Joonis 2.1*, õigem oleks reaktsiooni lisada ka vesi H_2O , st niisutatakse krohvikihhi pinda selle kivinemise ajal). Kaltsiumhüdroksiidi reageerimist süsihappegaasiga nimetatakse karboniseerumiseks ja reaktsiooni tekkimiseks on vaja H_2O . Lubikrohvi karboniseerumine sõltub krohvikihhi paksusest, koostisest, ümbriseva keskkonna kliimast jms [26]. Liiga märjas keskkonnas lakkab krohvist vee väljaaurumine ja kivistumine pidurdub, teisalt kuivas keskkonnas lakkab karboniseerumise reaktsioon [15]. Kiire karboniseerumine kohe pärast lubikrohvi segu kokkupuudet õhuga ja seejärel selle aeglustumine on tingitud välimise krohvikihhi kivistumisega ja karboniseerumise käigus väljaaurustuva veega, mille tagajärjel aeglustub süsihappegaasi jõudmine alumiste kihtideni. Karboniseerumise käigus eraldub väiksel määral soojust, see soodustab vee välja aurumist krohvist ja keskkonna suhteline niiskus võib tõusta kuni RH 95%. Täheldatud on karboniseerumise aeglustamist fiibrile olemasolul ja mida kauem on lubjapasta laagerdunud, seda suurem on karbonisatsioonaste. Karboniseerumise protsess kestab kuni kõik vesi krohvist on välja aurustunud või kaltsiumhüdroksiidi osakesed on reageerinud süsihappegaasiga. Viimane on vähetõenäoline, sest uuringud on näidanud sajanditaguste lubikrohvide karboniseerumistasemeks 80...90% ning lähima aastakümnete krohvidel 40...60%. [26]

2.4 Lubikrohvi käitumine tulekahjuolukorras ja varasemad uuringud

Lubikrohvi vastab tuletundlikkuse klassile A1 (mittepõlev) ja tulekatsed on näidanud selle mahu- ning massipüsivust kõrgetel temperatuuridel [27] [28]. Mahu- ja massimuutused siiski toimuvad, kuid maksimaalselt 2% ulatuses võrreldes algsega. Suurim massikadu on 100...200 °C juures, mil krohvis seotud vesi aurustub. Sama temperatuuri juures poorse lubjakrohvi korral hakkab krohv vähesel määral pragunema, kuid seejuures tekivad lubja soovimatute lisandite tõttu soolakristallid lubja ja liiva kokkupuute pinnal või poorides ning tulemuseks ei ole mahumuutus märkimisväärne. Temperatuuri tõustes 400 °C-ni katkevad sidemed soolakristallide vahel ja praod võivad suurened. Vähem poorsemal krohvil ja soolakristallide puudumisel algab mikropragude teke krohvi pinnal u 600 °C juures, suurenedes temperatuuri tõusuga. 1000 °C juures laguneb poorne krohv pea täielikult, vähem poorne krohv püsib koos, kuid puudutamisel või kokkupuutel millegagi on pude ja laguneb. [28]

Ulatuslikud uuringud lubikrohvi tulepüsivuse kohta puuduvad. Vanemas kirjanduses mainitakse lubikrohvi tulepüsivust, kuid tulemused kehtivad konkreetse konstruktsiooni või tarindi kohta [14] [16]. Sama kehtib 21. sajandil tehtud tulekatsete kohta, kus on uuritud lubikrohvi tulepüsivuse omadusi koos tarindiga, lisaks sellele tulekatsete katsetingimused erinesid ettenähtud standardist EN 1363-1 [29] [30]. Antud uuringud ei võimalda kanda üle tulemusi ainult lubikrohvile, vaid on sõltuvad tarindist.

Autorile teadaolevalt on tehtud paar standardile vastavat ahjukatset autori kaasjuhendaja J. Libliku poolt ja antud töö tulemuste analüüsis lähtutakse Libliku katsearuannetest, mis hetkel ei ole avalikule kättesaadavad. Libliku katsed uurisid lubikrohviga kaitstud puitkonstruktsiooni söestumisaja algust, söestumiskiirust ja lubikrohvi tõrketekkeaega [31] [32]. Kokku on suuremamahulisi ahjukatseid lubikrohviga tehtud 7 korda [31] [32]. Väheste katsetuste tõttu ei saa põhjanevaid järeldusi teha ja antud töö üks eesmärk on anda sisend Libliku doktoritööle, sh täiendada lubikrohvi eksperimentaalset katseandmete baasi.

3 KATSEMEETOD

3.1 Katseplaan

Katsete eesmärk on uurida lubikrohviga kaetud puidu söestumist, määrata söestumise algusaeg t_{ch} ja kaitsetegur k_2 . Nende parameetrite leidmiseks kasutatakse antud töös koonuskuumutit.

Täismõõduliste ahjukatsete läbiviimine on mahukas ja kulukas, seepärast on viimastel aastakümnetel sagenenud materjalide tulepüsivuse uurimine väiksemamõõduliste tulekatsetega [33] [34]. Kui ahjukatses ulatuvad katsekeha või konstruktsiooni mõõtmed paari meetrini, siis väiksemamõõduliste katsete korral jäävad katsekeha mõõtmed alla meetri [33]. Väiksemamõõduliste tulekatsete korral on levinud koonuskalorimeetri (*ing k Cone Calorimeter*) kasutamine, mille peamine eesmärk on uurida ja määrata pinnakattematerjalide tuletundlikkust (vt ptk 1.1) [34] [35]. Antud töös kasutatakse koonuskalorimeetril ainult koonuskuumuti osa ja selle tööpõhimõte on seletatud peatükis 3.3.

Antud töös uuritakse puidukiu suuna mõju selle söestumisele. Enamik puitkonstruktsioone on avatud tulele jms ristikiudu, seetõttu puuduvad suuremad uuringud puidu käitumise kohta pikikiudu. Samas pole mõnes koonuskalorimeetri uuringus pööratud tähelepanu puidukiu suunale, mis seab eelduse, et puit käitub tule korral mõlemas suunas samamoodi [33] [36]. Katsetatav okaspuit on harilik kuusk (*Picea abies*).

Koonuskalorimeetri kasutamisel on vastava standardiga ettenähtud katsekeha paksus maksimaalselt 50 mm, kuid täismõõdulises ahjukatses on levinud puidu paksus vähemalt 100 mm [33] [35]. Töös uuritakse, kas lubikrohviga kaitstud puidu paksus mõjutab selle söestumisaja algust ja kaitsetegurit koonuskuumutiga katsetades.

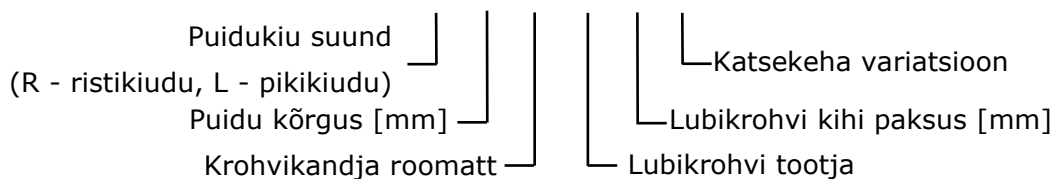
Lisaks uuritakse kahe erineva põhimõttega krohvikandjate mõju krohvi tulekaitsevõimele. Töös on osad katsekehad ilma krohvikandjata, imiteerides seeläbi puupunnidega kinnitatud krohvi, ja osad on roomatiga, mis on tänapäeval üks levinuimaid krohvikandjaid. Katsekehad on kuumusele avatud horisontaalses asendis ja krohvi nakkega ei pea arvestama.

Uuringu all on nelja erineva tootja lubikrohvid, pooled on valmistatud traditsiooniliselt (krohv A ja B) ja pooled tööstuslikult (krohv C ja D). Krohvidel A, B ja C on täiteaineks liiv terasuurusega 0...4 mm ja krohvil D liiv terasuurusega 0...1 mm ning see sisaldab

maksimaalselt 5% tsementi. Krohvi A ja B tihedus on tootejuhendi järgi 1700 kg/m³, krohvidel C ja D 1400...1450 kg/m³. Valitud krohvid on Eesti turul levinud ja mõlemad tööstuslikult valmistatud krohvid on oma hinna tõttu suurema kasutajaskonnaga, peamiselt ka seetõttu, et need on kättesaadavad ehituspoodides.

Söestumisaja algus ja kaitsetegur sõltuvad krohvikihhi paksusest, seetõttu katsetatakse puidu söestumist lubikrohvi kihipaksustega vahemikus 10...40 mm [36]. Antud paksuste vahemik kattub praktikas esinevate paksustega. Valikuliselt on tehtud korduskatsed (a ja b), et uurida tulemuste usaldusväärsust. Kokku on lubikrohviga katseid 64.

R50R.B10a



Joonis 3.1 Katsekehade tähistus.

Tabel 3.1 Lubikrohvi katseplaan.

PUIT			LUBIKROHV												
Kiu suund	Kõrgus	Roomatiga	Tootja	Kihi paksus											
				10		20		30		40					
Ristikiudu	50		A	R50.A10		R50.A20a		R50.A20b		R50.A30		R50.A40a		R50.A40b	
			B	R50.B10a	R50.B10b	R50.B20				R50.B30a	R50.B30b	R50.B40			
			C	R50.C10a	R50.C10b	R50.C20				R50.C30a	R50.C30b	R50.C40			
			D	R50.D10		R50.D20a		R50.D20b		R50.D30				R50.D40a	R50.D40b
	50	R	A	R50R.A10		R50R.A20				R50R.A30				R50R.A40	
			B	R50R.B10		R50R.B20				R50R.B30				R50R.B40	
			C	R50R.C10		R50R.C20				R50R.C30				R50R.C40	
			D	R50R.D10		R50R.D20				R50R.D30				R50R.D40	
	100		A	R100.A10						R100.A30					
			B			R100.B20								R100.B40	
			C			R100.C20								R100.C40	
			D	R100.D10						R100.D30					
Pikikiudu	50		A	L50.A10		L50.A20				L50.A30				L50.A40	
			B	L50.B10		L50.B20				L50.B30				L50.B40	
			C	L50.C10		L50.C20				L50.C30				L50.C40	
			D	L50.D10		L50.D20				L50.D30				L50.D40	

*Märkus: rohelisega tähistatud katsetel mõõdeti temperatuuri ka puidu all; antud tulemused on sisendiks ja kontrolliks krohvide tulepüsivuse arvutamiseks simulatsiooniga, millega tegeleb autori kaasjuhendaja J. Liblik.

Lisaks lubikrohvi katsetele tehti võrdluseks 12 katset savikrohviga ja 4 katset kipsplaadiga (vt Tabel 3.2 ja Tabel 3.3). Mõlemat materjali on eelnevalt uuritud nii koonuskuumutiga kui ka ahjukatsetes [31] [34] [36] [37]. See võimaldab võrrelda antud töö tulemusi varasemate savikrohvi ja kipsplaadi tulemustega, kui ka kontrollida lubikrohvi tulepüsivuse tulemuste usaldusväärsust koonuskuumutiga katsetades.

Tabel 3.2 Savikrohvi katseplaan.

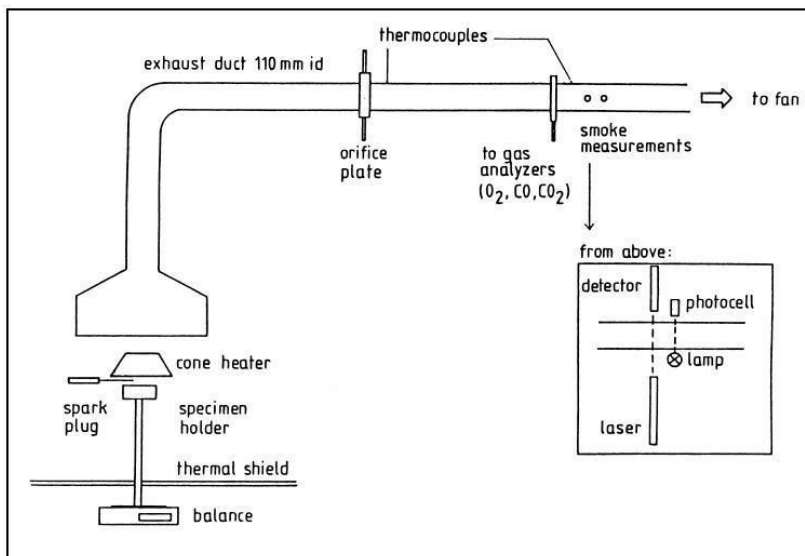
PUIT			SAVIKROHV				
Kiu suund	Kõrgus	Roomatiga	Tootja	Kihi paksus			
				10	20	30	40
Ristikiudu	50		E	R50.E10	R50.E20	R50.E30	R50.E40
	50	R	E	R50R.E10	R50R.E20	R50R.E30	R50R.E40
Pikikiudu	50		E	L50.E10	L50.E20	L50.E30	L50.E40

Tabel 3.3 Kipsplaadi katseplaan.

PUIT		KIPSPLAAT			
Kiu suund	Kõrgus	Tüüp	Plaadi paksus	Tootja	Variatsioon
Ristikiudu	50	A	12,5	G	R50.GN
	50	F	15	G	R50.GFa R50.GFb
Pikikiudu	50	F	15	G	L50.GF

3.2 Koonuskalorimeetri tööpõhimõte

Koonuskalorimeetrit kasutatakse eelkõige materjali tuletundlikkuse määramiseks, sh hinnatakse materjali süttivust, põlevust, suitsu ja seda sisaldavate toksiliste gaaside teket. Seade koosneb kaalust, koonusekujulisest küttekerisest ja süsteemist põlemisproduktide kogumiseks (vt Joonis 3.2). Antud töös kasutatakse ainult koonuskalorimeetri kütteseadme osa ja lubikrohvi tuletundlikkust ei määrata. Kütteseade toodab kuumuti ulatuses konstantset ja ühtlast soojusvoogu vahemikus 0...100 kW/m². [33] [35]



Joonis 3.2 Koonuskalorimeetri tööpõhimõte [33].

Katsekeha asetatakse horisontaalselt koonuskuumutist 25 mm allapoole metallraami sisse. Katsekeha külgmised mõõtmed peavad olema 100x100 mm ja paksuseks on standardi kohaselt soovitatav võtta 50 mm, kuid suurema metallraami korral on võimalik ka 100 mm katsekehasid katsetada [33]. Katsekehad peavad enne katsetamist olema minimaalselt ühe nädala konditsioneeritud kliimakambris tingimustega 23 ± 2 °C ja RH $50 \pm 5\%$. [35] [38] Kuna metallraam on suurem kui katsekeha mõõdud, siis kuumutamisel võib katsekeha ja raami vahel õhk ringleva hakata. Antud olukord võib mõjutada katsetulemusi, seetõttu tuleb selle vältimiseks katta katsekeha külgedelt, alt ja ülevalt kuumust taluva alumiiniumteibiga [35]. Suurema metallraami korral on raami kõrgus suurem kui katsekehal kõrgusega 100 mm, seega tuleb ülejäänud vaba ruum täita mittepõleva materjaliga ja antud töös kasutati selleks kivivilla.

Tagamaks usaldusväärsete katsetulemuste saamist, tuleb iga katsepäeva alguses koonuskalorimeetrit kalibreerida, sest iga kasutusega küttekeris vananeb [35] [36]. Küttekerise soojusvoo reguleerimine käib elektrooniliselt ja temperatuuri kaudu kasutades termopaari (Cr-Al, tüüp K) [33]. Termopaaride põhimõte seisneb takistuse mõõtmises kahe metalltraadi vahel. Mõlemad metalltraadid on isoleeritud ja mõõdetavas punktis isolatsioon eemaldatakse ning otsad keeratakse kokku. Teises otsas on metalltraadid ühendatud andmekogujaga ning andmekogujast saadetakse elektrivool, mis läbib traate. Mõõdetavas punktis toimib kuumus takistusena ja andmekogujasse saabunud elektrivool registreeritakse. Takistuskadu teisendatakse ümber temperatuuriks.

Kalibreerimisel kasutatakse voltmeetrit, millega tehakse kindlaks soojusvoo väärtused 50 kW/m^2 ja 75 kW/m^2 . See kehtib konkreetsele koonuskalorimeetri seadmele ja suhe

pinge ning soojusvoo väärtuste vahel leitakse kogu seadme kalibreerimisel. Katsekeha katsetades reguleeritakse temperatuur elektriseadmest vastavalt sellele, millist soojusvoogu katses kasutatakse.

3.3 Ahjukatse ja koonuskuumuti katse erinevus

Materjali või konstruktsiooni tulepüsivuse määramiseks sooritatakse tulekatse ja üldjuhul peetakse selle all silmas täismõõtmelist ahjukatset, kus järgitakse standardtulekahju (vt ptk 1.1). Nagu eelnevalt mainitud, siis ahjukatsed on mahukad ja kulukad ning alternatiiviks sellele kasutatakse koonuskuumutit materjali söestumisaja ja kaitseteguri leidmiseks [33] [36]. Järgnevalt uuritakse kahe tulekatse erinevust.

Parema ettekujutuse mõlema tulekatse erinevusest annab *Foto 3.1*. Ahjukatses ulatuvad katsekeha mõõtmepaari meetrini, katsekeha saab katsetada vertikaalselt ja horisontaalselt (nt laekonstruktsioon). Katsekeha asub suletud ruumis ja antud ruumis kontrollitakse temperatuuri, järgides standardtulekahju kõverat, ning õhurõhku [39]. Olenevalt katseaja pikkusest t on ahjukatsega võimalik määrata konstruktsiooni kaitsekihtide söestumisaja algust t_{ch} , kaitsetegurit k_2 ja tõrketekkeagega t_f (vt ptk 1.3). Koonuskalorimeetri puhul on katsekeha külgmised mõõdud 100 mm piires, katsetatakse peamiselt horisontaalselt ja küttekeha alumine serv asub 25 mm kaugusel katsetava pinnast. Sellisel juhul ümbritseb katsekeha ruumitemperatuur ja võimaldatakse õhu juurdepääs.



Foto 3.1 Tulekatse, vasakul ahjukatse (foto autor J. Liblik) ja paremal koonuskuumuti.

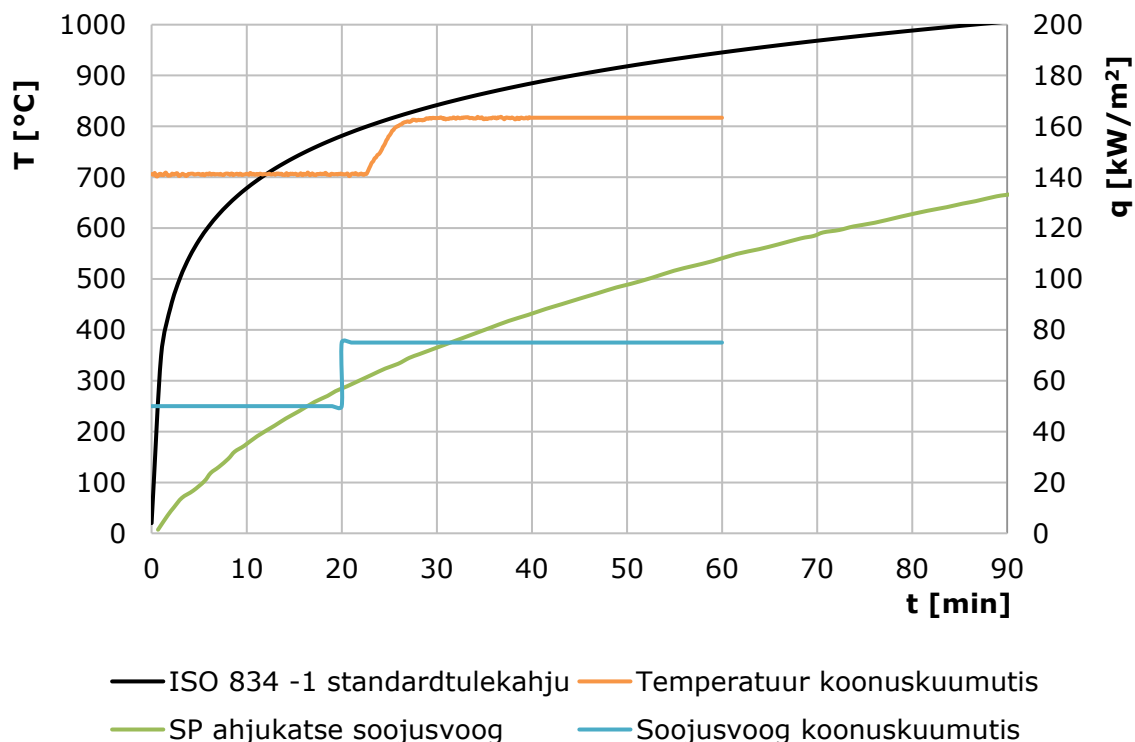
Koonuskuumuti meetodi kasutuselevõttuga on uuritud puidu söestumise erinevust ahjukatsel ja antud meetodi vahel [33]. Tulemuste võrdlemiseks on neid vaadeldud ühise näitaja alusel ning selleks kasutatakse enamasti soojusvoogu (vt Joonis 3.3).

Uuringud on näidanud, et söestumisaja leidmine koonuskuumutiga on sarnane ahjukatses leituga [33] [34]. Puidu söestumiskiirus aga erineb standardis etteantud baassöestumiskiirusest okaspuidule $\beta_0 = 0,65$ mm/min [4] [38]. Ainult puidu söestumist uurides koonuskuumutiga konstantsel soojusvool 50 kW/m² oli puidu söestumine sarnane ahjukatse omaga 32 min söestumisaja korral. Sellisel juhul oli koonuskuumutiga katsetades esimesel 16 min soojusvoog suurem ahjukatse omast ja seejärel järgneval 16 min väiksem. Enne 32 min mõõdetud söestumine oli suurem ahjukatse omast ja vastupidi. Seega sama söestumiskiiruse aluseks on puidu söestumine 30...40 min vahel, kuna ka ahjukatses võib varieeruda paar minutit soojusvoo 50 kW/m² ajaline saavutamine. Samuti uuriti puidu söestumist kahe erineva paksuse juures, 50 ja 145 mm, mõlemal juhul oli söestumiskiirus sama. [33]

Eelnevas uuringus vaadeldi puidu söestumise sõltuvust soojusvoost, kuid koonuskuumutiga katsetades on kuumutamise keskkond erinev ahjukatse omast. Õhu juurdepääs soodustab puidu põlemist, samuti on söestumine puidu tihedusest ja niiskussisaldusest. Mikkola uuringus konditsioneeriti okaspuu standardikohaselt (vt ptk 3.2) ja selle konstantsel kuumutamisel soojusvool 50 kW/m² saadi söestumiskiiruseks 0,81 mm/min. Samuti ilmnes, et söestumine sõltub soojusvoo võimsusest, nt 75 kW/m² korral oli söestumiskiirus ligilähedane 1,0 mm/min. [40] Puidu kiiremat söestumiskiirust

koonuskuumutiga kinnitab ka kolmas uuring, kus okaspuidu keskmiseks söestumiskiiruseks saadi 0,80 mm/min, kui seda kuumutati konstantsel soojusvool 20, 50 ja 75 kW/m². Vaadates katsetulemusi eraldi, mitte keskmist, siis 20 min puidu söestumise korral oli nii 50 kui ka 75 kW/m² soojusvoo korral puidu söestumiskiirus 0,95...1,2 mm/min. [38]

Antud töös võetakse aluseks baassöestumiskiirus $\beta_0=0,65$ mm/min.



Joonis 3.3 Ahjukatse ja koonuskuumuti soojusvood, võrdluseks ISO 834-1 ja koonuskuumuti temperatuur[6][41]. SP Technical Research Institute of Sweden [33].

Varasemad kattematerjalide tulepüsivuse uuringud on kasutanud soojusvoo väärtusi 50 kW/m² ja 75 kW/m². Soojusvoo tõstmine pärast 20. minutit imiteerib paremini ahjukatse soojusvoogu ja võimaldab saavutada sarnase tulemuse ahjukatsega. [33] [34] [36] Olenevalt ruumi sisekliimast võib temperatuur vastava soojusvoo juures kõikuda ± 5 °C. Ühtlasi soojusvoo ja temperatuuri üleminekule kulub paar minutit (vt Joonis 3.3). [41]

3.4 Katsekehade valmistamine

Katsekehade valmistamisel järgiti standardit ISO 5660-1 (vt ptk 3.2). Lubikrohvimisel ja selle kivistumisperioodil järgiti standardit EN 13914-2 ning lubikrohvi tootjate tootejuhiseid.

Puidust katsekehasid valides jälgiti, et kõik oleks samas tihedusvahemikus ja oksavabad, vähemalt mõõdetava punkti ümbruses. Vastavalt katseplaanile lõigati kolmes mõõdus katsekehi: 100x100x50 mm ristikiudu, 100x100x50 mm pikikiudu ja 100x100x100 ristikiudu. Kõik katsekehad kaaluti täpsusega 0,1 g ja tähistati vastavalt katseplaanile. Töös ei uuritud puidu niiskussisaldust ja massi muutust katse käigus. Varasema uuringu põhjal võib eeldada, et pärast katsekehade konditsioneerimist ISO 5660-1 järgi oli puidu niiskussisaldus 8...10% [40].

Seejärel paigaldati tulele avatud puidu pinna keskele (mõõdetav punkt) termopaar klammerdajaga. Termopaari ots kinnitati vastu puidu pinda ja vastavalt standardile EN 1363-1 samatemperatuurijoonel vähemalt 50 mm, tagades seeläbi termopaari usaldusväärse näidu. Valitud katsekehadele paigaldati roomatt klambritega. Krohvikandjana uuriti ainult roomati mõju puidu söestumisele, krohvikandjate kinniteid ei uuritud horisontaalse katse tõttu.

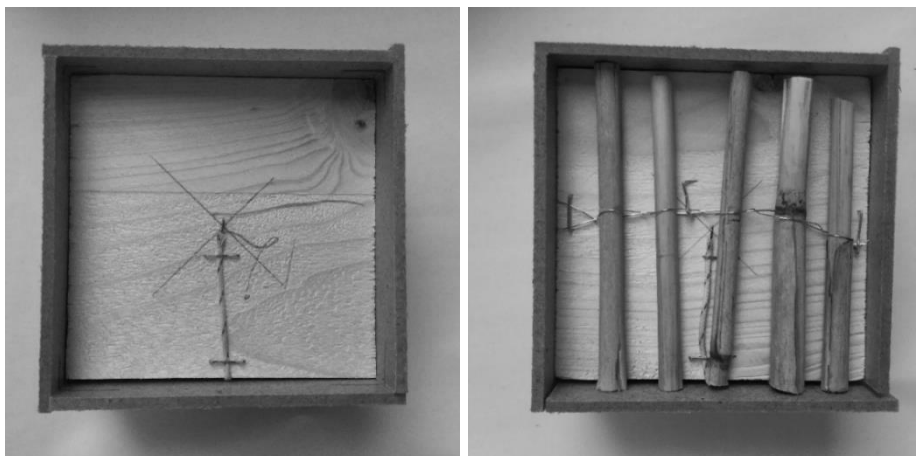


Foto 3.2 Puidust katsekehad valmis krohvimiseks koos termopaari ja raketisega, vasakul lisaks roomatt.

Järgmisena paigaldati puitkehale klammerdajaga vineerist raketis krohvimiseks. Enne lubikrohvimist niisutati puitkeha veega, et lubikrohv nakuks paremini puiduga ja samas puit ei imaks kohe lubjakrohvis sisalduvat vett endasse. Krohviti nädalaste vahedega, korraga oli ühe kihi paksus 10 mm ja krohvimisel tihendati krohvi pahtlilabidaga. Järgmise kihi paremaks nakkeks jäeti krohvipinnale sälgud sisse ja enne uue kihi pealekandmist niisutati eelmist kihti seni, kuni see läikis veest.



Foto 3.3 Krohvimise töövahendid.

Kogu krohvimisperioodi vältel niisutati katsekehi ja tuulutati ruumi kaks korda päevas. Niisutamise eesmärk oli krohvi kivistumist aeglustada, et vesi liialt kiiresti välja ei aurustuks, ja tuulutamisega soodustada lubikrohvi karboniseerumist (vt ptk 2.3). Ruumis mõõdeti ruumitemperatuuri ja suhtelist õhuniiskust elektrilise sensoriga. Lubikrohvi kivistumisperioodil oli ruumis temperatuur vahemikus 18...20 °C ja RH 75..80%. Esines kordi, mil temperatuur langes paariks tunniks või RH tõusis 85%-ni, kuid pikaajalist kivistumisperioodi see palju ei mõjutanud. Töös ei uuritud lubikrohvi tihedust ja selle karboniseerimisastet. Ühtlasi ei sisaldanud krohvid fiibreid.

Kui ettenähtud krohvipaksus oli saavutatud, siis lasti katsekehal samas keskkonnas nädal veel kivistuda. Seejärel transporditi katsekehad katsemajja, eemaldati vineerist raketis ja asetati vähemalt nädalaks kliimakambris tingimustega 23 ± 2 °C ning RH $50 \pm 5\%$. Katsepäeval dokumenteeriti katsekeha mõõdud ja paigaldati alumiiniumteip. Katsekeha küljed kaeti alumiiniumteibiga, lisaks ülevalt 3...5 mm ja alt u 15 mm.

Tabel 3.4 Lubikrohvi kivistumiseks ja karboniseerumiseks etteantud aeg.

<i>Krohvikihi paksus h_p</i>	<i>Krohvimisele kulunud aeg</i>	<i>Lisa kivistumisperiood</i>	<i>Konditsioneerimine kliimakambris</i>	<i>Kokku</i>
<i>[mm]</i>	<i>[nädal]</i>	<i>[nädal]</i>	<i>[nädal]</i>	<i>[nädal]</i>
10	1	1	1	3
20	2	1	1	4
30	3	1	1	5
40	4	1	1	6



Foto 3.4 Lubikrohvi katsekehad enne katset.

Krohvimisel täheldati krohvi C pidevat pragunemist. Krohvipragusid parandati, kuid tulemusteta.



Foto 3.5 Katsekehad pärast krohvimist, vasakul pragunenud krohv C ja paremal krohv B.

Tabel 3.5 Puidust katsekehade kaalud ja tihedused.

Katse nr.	Katsekeha tähis	Puidu kaal	Puidu tihedus
		[g]	[kg/m ³]
1	R50.A10	221,3	443,0
2	R50.B10a	217,1	434,5
3	R50.B10b	219,1	438,5
4	R50.C10a	218,7	437,5
5	R50.C10b	219,8	440,0
6	R50.D10	219,2	438,5
7	R50R.A10	202,6	405,5
8	R50R.B10	218,0	436,0
9	R50R.C10	214,4	429,0
10	R50R.D10	199,6	399,5
11	R100.A10	444,5	444,5
12	R100.D10	444,7	445,0
13	R50.A20a	223,1	446,5
14	R50.A20b	219,3	439,0
15	R50.B20	221,0	442,0
16	R50.C20	214,6	429,5
17	R50.D20a	213,7	427,5
18	R50.D20b	219,4	439,0
19	R50R.A20	216,9	434,0
20	R50R.B20	212,8	426,0
21	R50R.C20	205,4	411,0
22	R50R.D20	207,8	416,0
23	R100.B20	442,5	442,5
24	R100.C20	459,6	460,0
25	R50.A30	219,0	438,0
26	R50.B30a	222,8	446,0
27	R50.B30b	217,0	434,0
28	R50.C30a	210,5	421,0
29	R50.C30b	202,8	406,0
30	R50.D30	229,8	460,0
31	R50R.A30	206,3	413,0
32	R50R.B30	208,3	417,0
33	R50R.C30	210,7	421,5
34	R50R.D30	214,1	428,5
35	R100.A30	452,2	452,5
36	R100.D30	445,0	445,0
37	R50.A40a	206,7	413,5
38	R50.A40b	205,9	412,0
39	R50.B40	205,6	411,5
40	R50.C40	218,8	438,0
41	R50.D40a	208,0	416,0
42	R50.D40b	201,3	403,0
43	R50R.A40	218,8	438,0
44	R50R.B40	207,8	416,0
45	R50R.C40	211,5	423,0
46	R50R.D40	201,6	403,5
47	R100.B40	451,0	451,0
48	R100.C40	454,7	455,0
49	L50.A10	185,9	372,0
50	L50.B10	190,6	381,5
51	L50.C10	184,0	368,0
52	L50.D10	183,2	366,5
53	L50.A20	183,8	368,0
54	L50.B20	195,9	392,0
55	L50.C20	184,6	369,5
56	L50.D20	183,8	368,0
57	L50.A30	188,4	377,0
58	L50.B30	188,4	377,0
59	L50.C30	187,9	376,0
60	L50.D30	188,9	378,0
61	L50.A40	188,6	377,5
62	L50.B40	189,7	379,5
63	L50.C40	188,2	376,5
64	L50.D40	186,7	373,5

3.5 Katsemeetodi kirjeldus

Katsekehade ettevalmistamisel koonuskuumutiga katsetamiseks järgiti standardit ISO 5660-1. Antud töös rakendati esimesel 20. minutil soojusvoogu 50 kW/m^2 ja seejärel 75 kW/m^2 (vt Joonis 3.3). Maksimaalne katseaeg oli 60 min ja soojusvoog 75 kW/m^2 . Katsepäeva algul kalibreeriti seade (vt ptk 3.2).

Katse vältel mõõdeti termopaaridega temperatuuri iga 5 s järel krohvikihhi taga. Katseajad valiti lähtuvalt krohvikihhi paksusest (vt Tabel 3.6). Puidul lasti söestuda 20 min kõikide krohvipaksuste puhul (v.a. 40 mm puhul, kus söestumine jäi 10 min juurde). See võimaldas söestumiskiirusi krohvikihhi taga omavahel võrrelda.

Tabel 3.6 Katseaja sõltuvus krohvikihhi paksusest.

Krohvikihhi pakus h_p	Katseaeg t
[mm]	[min]
10	25...30
20	40...45
30	50...55
40	60

Kogu katse vältel jälgiti katsekehi ja tehti tähelepanekuid.

Tulekatse käik ja sellele järgnev protseduur:

- 1) katsekeha paigaldati ettevaatlikult metallraami, alla lisati täiteks kivivilla ja metallraam suleti kaane ning kruviga;
- 2) katsekeha metallraamiga asetati koonuskuumuti alla ja termopaari lahtine ots ühendati andmekogujaga;
- 3) katsekeha oli avatud konstantsele soojusvoole 50 kW/m^2 esimesed 20 min;
- 4) pärast 20. minutit tõsteti soojusvoog 75 kW/m^2 -ni;
- 5) pärast katseaja lõppu eemaldati termopaar andmekogujast ja katsekeha võeti koonuskuumuti alt ära. Seejärel jahutati katsekeha veega, selle käigus eemaldati metallraam ja alumiiniumteip;
- 6) jahtnud katsekeha dokumenteeriti, eemaldati lubikrohvi kiht ja metallharjaga söekiht. Puit saeti keskelt pooleks ja mõõdeti allesjäänud puidu kõrgus termopaaride asukohast.



Foto 3.6 Katseseade ja katsekeha paigutus koonuskuumuti all.



Foto 3.7 Katsekeha metallraamis enne ja pärast tulekatset.

4 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

4.1 Tähelepanekud

Katse käigus oli märgata paari krohvi mahumuutust otse koonuskuumuti all (vt Foto 4.1). Ei täheldatud regulaarsust kindla temperatuuri või krohvi puhul.

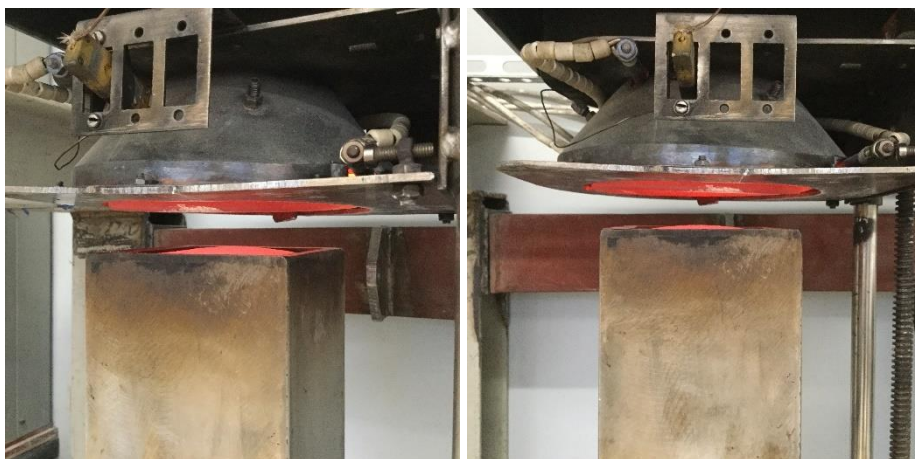


Foto 4.1 Krohvi paisumine kuumuse käes.

Lubikrohv ei põlenud ega muutnud värvi. Katse käigus süttinud puidu leek tuli teibi vahelt nähtavale ja ainult leegi olemasolul värvus lubikrohv pinnalt mustaks.

Katsekeha jahutamise käigus lagunes lubikrohv veega kokkupuutes, krohv murdus krohvikihitide puutepinnal. Mahajahtunud krohv kivistus taas ja ei olnud enam pude. Silmaga nähtavad praod tekkisid jahutamisel kokkupuutel veega ning järsul temperatuuri muutusel (vt Foto 4.2).



Foto 4.2 Lubikrohv pärast katset.

Kaks katset ebaõnnestusid, R50.B10a ja L50.C40, kuna koonuskuumuti ei saavutanud soovitud soojusvoogu. Nende katsete tulemustega ei arvestata.

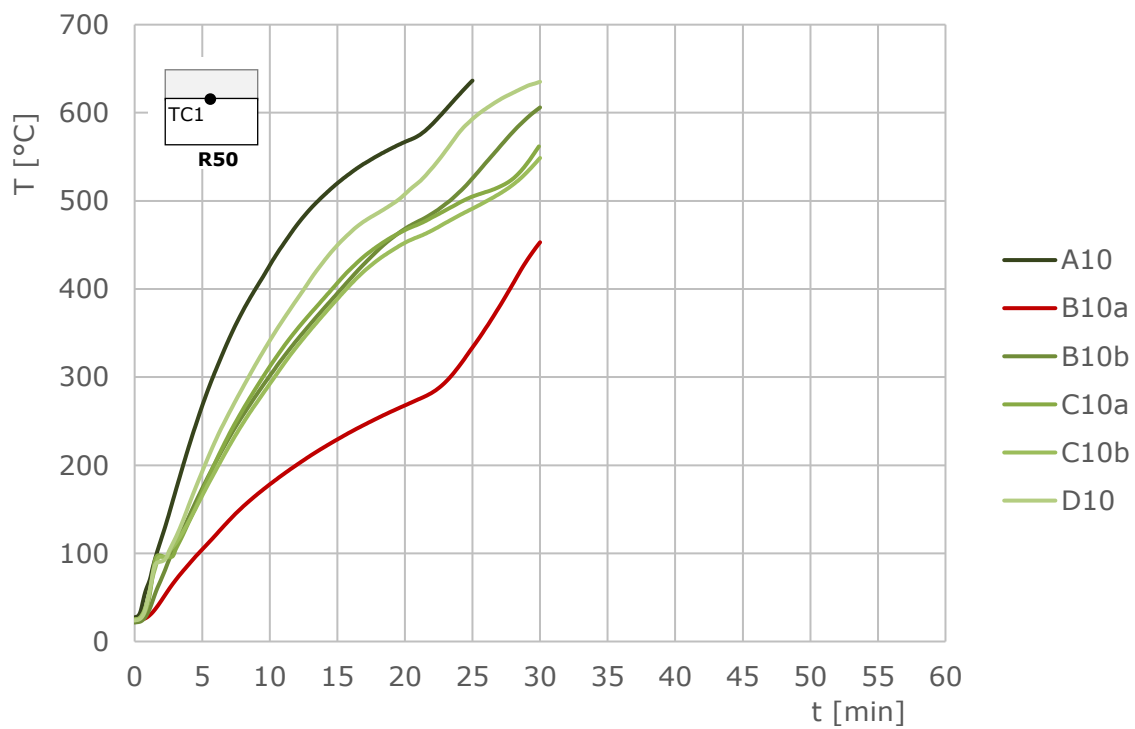
4.2 Temperatuurigraafikud ja söestumise algusaeg

Järgnevalt on väljatoodud lubikrohviga kaitstud puidu 64 tulekatse temperatuurikõverad, kaks katset ebaõnnestusid (R50.B10a ja L50.C40). Lisaks pole arvestatud katsetega R50R.D10, R50.B30a, R50.C30a ja R50.B40. Katse R50R.D10 korral oli puit madala tihedusega ja söestumiskiirus märgatavalt suurem võrreldes teiste katsetega sama krohvikihi paksuse juures. Ülejäänud kolmel katsel jäi puidu söestumisaeg alla 15 min või erines märgatavalt teistest (nt R50.B40). Kuna söestumissügavus katsel R50.B30a oli sama, mis teistel katsetel 20 min söestumisega, siis ilmselt algas antud katses puidu söestumine enne 300 °C-ni jõudmist.

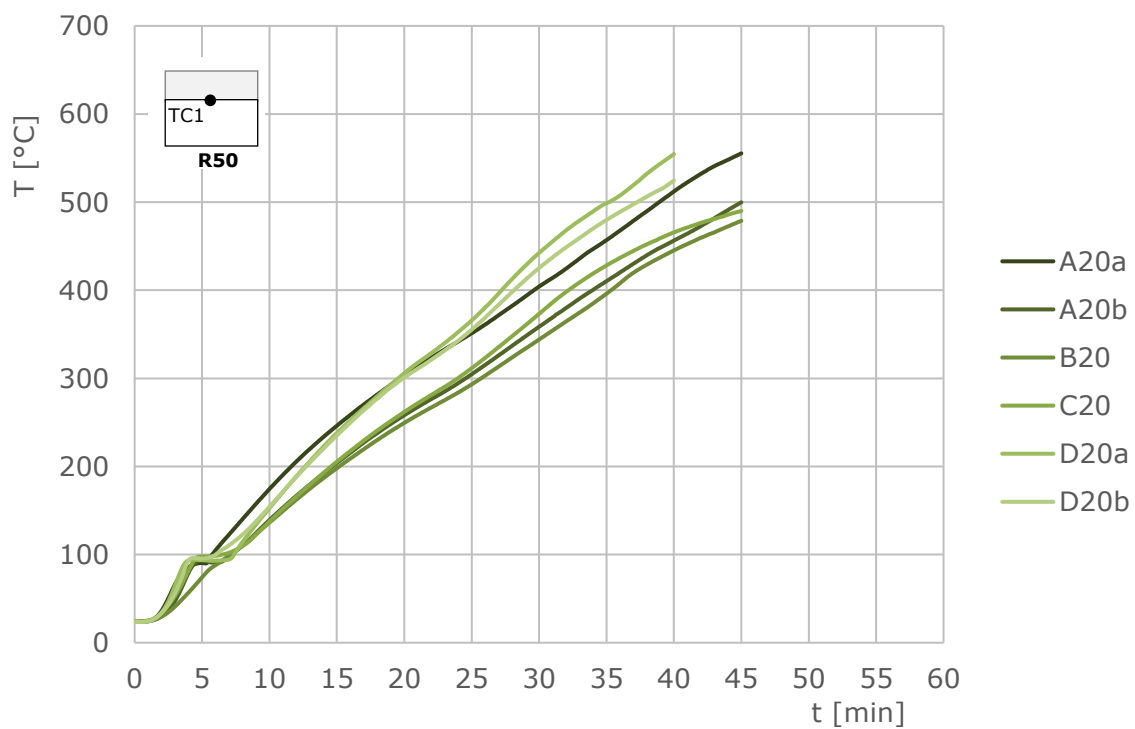
Lisaks tehti analoogselt lubikrohvide võrdluseks 12 katset savikrohviga ja 4 katset kipslaadiga, antud tulemused on kajastatud *LISA B* ja *C*.

Krohvikihi paksuse h_p suurenemisel lükatakse edasi puidu söestumise algusaega t_{ch} (vt Joonis 4.1...4.7). Puidu ristikiudu söestumine algab 10 mm krohvikihi juures u 5...10 minutil ja 40 mm korral 47...50 minutil (vt Joonis 4.5). Pikikiudu algab puidu söestumine 10 mm krohvikihi juures samas vahemikus, mis ristikiudu. 60 min katseaja vältel ei alanud 40 mm krohvikihiga puidu söestumine (vt Joonis 4.7).

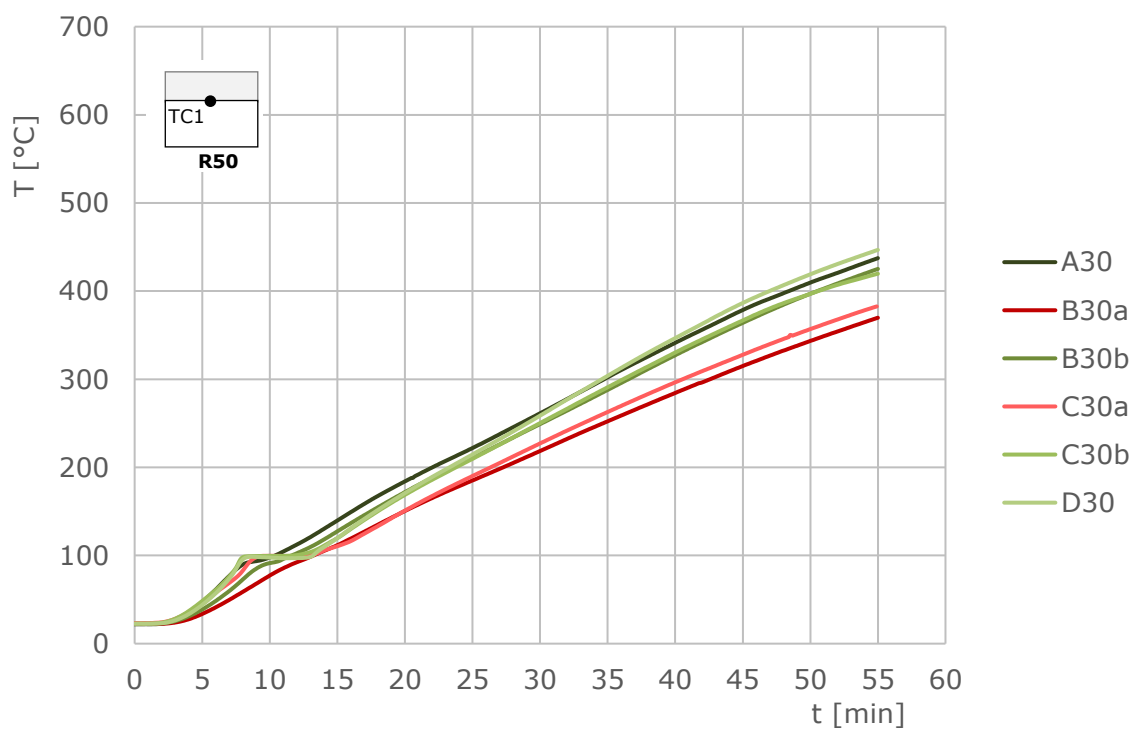
Õhema krohvikihi puhul aurustub puidus olev vesi kiiremini ja 100 °C juures olev platoo (vt Joonis 1.3) on lühem või puudub üldse. Krohvikihi paksuse suurenemisel platoo pikeneb, mis on eelkõige põhjustatud paksema krohvi suuremast vaba vee hulgast. Ristikiudu algas vee aurustumine 100 °C ümbruses, kuid pikikiudu täheldati vee aurumist juba 80 °C juures. Krohvil B ei tekkinud temperatuurigraafikul platood, mil temperatuur oleks püsinud konstantne puidu ja krohvi vahel. Olenemata platoo puudumisest hakkas krohvi B korral puit söestuma samas ajavahemikus, mis teistel krohvidel. Antul krohvil tõusis temperatuur puidu pinnal lineaarselt kogu katseaja vältel.



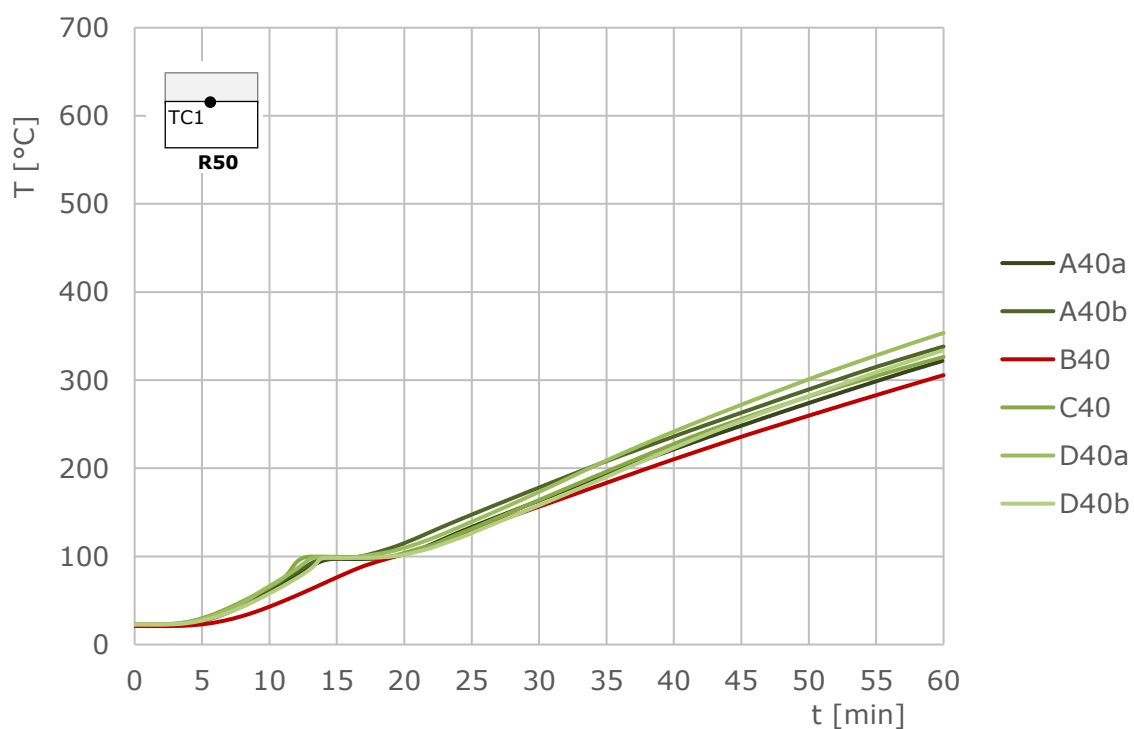
Joonis 4.1 Temperatuuri tõus 10 mm lubikrohvi taga, puit ristikiudu 50 mm.



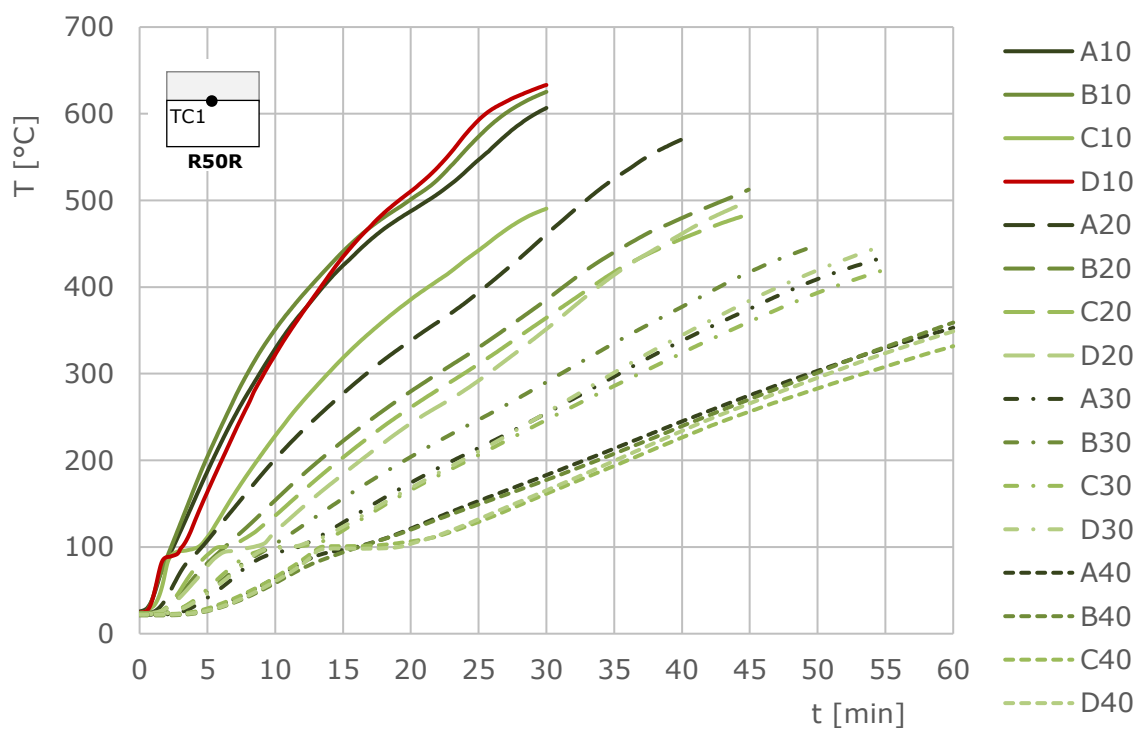
Joonis 4.2 Temperatuuri tõus 20 mm lubikrohvi taga, puit ristikiudu 50 mm.



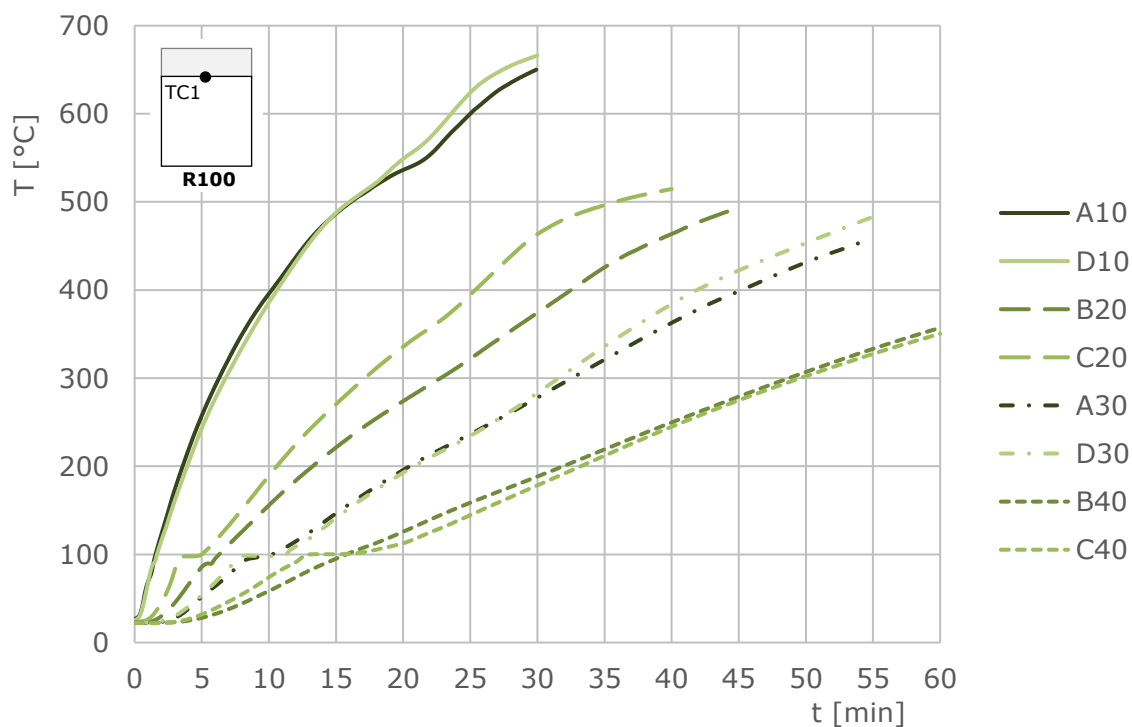
Joonis 4.3 Temperatuuri tõus 30 mm lubikrohvi taga, puit ristikiudu 50 mm.



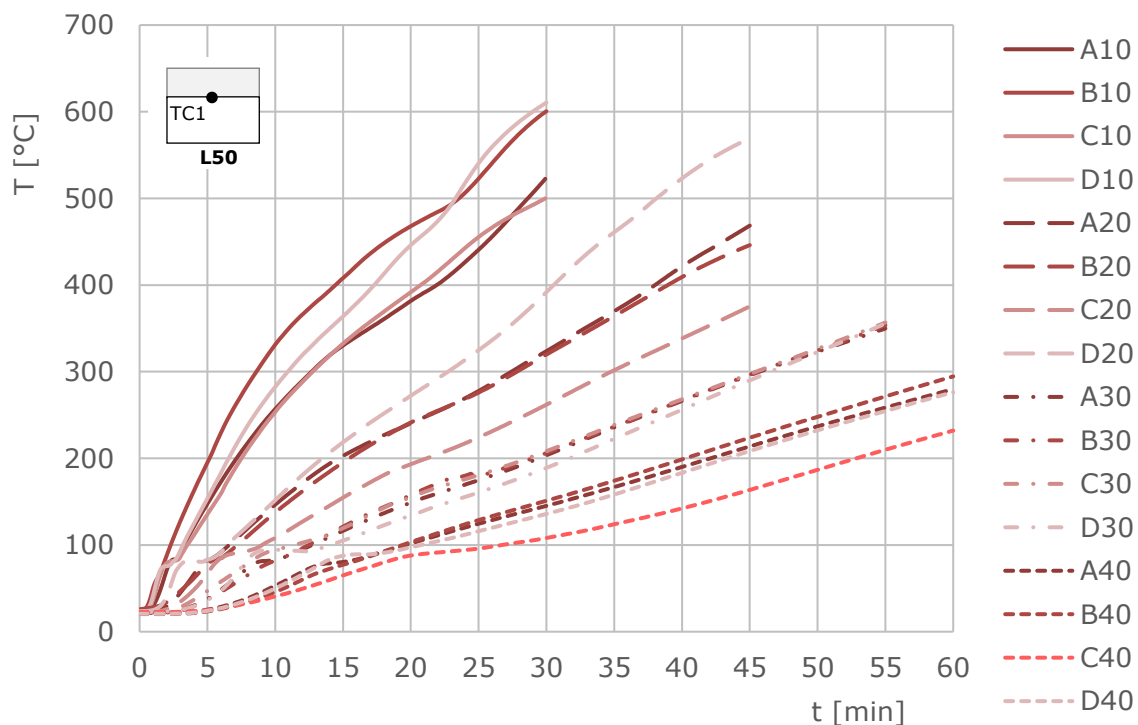
Joonis 4.4 Temperatuuri tõus 40 mm lubikrohvi taga, puit ristikiudu 50 mm.



Joonis 4.5 Temperatuuri tõus 10...40 mm lubikrohvi taga, puit ristikiudu 50 mm roomatiga.



Joonis 4.6 Temperatuuri tõus 10...40 mm lubikrohvi taga, puit ristikiudu 100 mm.



Joonis 4.7 Temperatuuri tõus 10...40 mm lubikrohvi taga, puit pikikiudu 50 mm.

Pikikiudu hilisemat söestumise algusaega ristikiust võib seletada asjaoluga, et vesi aurustub pikki kiude puidust lihtsamini välja kui ristikiudu. Veeauru jõudes puidu pinnale takerdub see krohvikihhi taha ja hoiab puidu pinnatemperatuuri all või kondenseerub taas puitu. Ristikiudu vee kondenseerumise korral tõuseb niiskussisaldus puidu pealmistes kihtides, kuid pikikiu korral liigub veeaur mööda kiude lihtsamini ja võib ulatuda sügavamale kui ristikiu korral. Lisaks võib krohvimisel imenduda lubjavesi puitu ja pärast katsekeha konditsioneerimist jäävad lubjaosakesed puitu ning suurendavad puidu tuletõkestusvõimet.

Erinevate krohvide koostis ja mikropragude olemasolu mõjutavad krohvi käitumist kuumuses rohkem õhemate krohvikihhtide puhul. Puidu põlemine võib krohvi mikropragude korral olla intensiivsem suurema hapniku juurdepääsu tõttu. 30...40 mm krohvikihhi puhul ühtlustuvad kõikidel krohvidel temperatuurikõverad (vrd *Joonis 4.1* ja *Joonis 4.4*, vt *Joonis 4.5*).

Osad katsed tehti kahes variatsioonis ja *Joonis 4.2* ilmneb sama krohvi käitumine erinevalt samas tulekatses. Erinevus on söestumisaja alguses, kus ühel variandil algab u 5 min hiljem puidu söestumine. Antud erinevuse võis põhjustada krohvikihhi paksuse määramatus ± 1 mm, aastaringide tiheduse erinevus vaadeldavatel katsekehadel või

termopaaride paigalduse täpsus. Krohvimisel võis tekkida olukord, kus krohv läks termopaari ja puidu vahele.

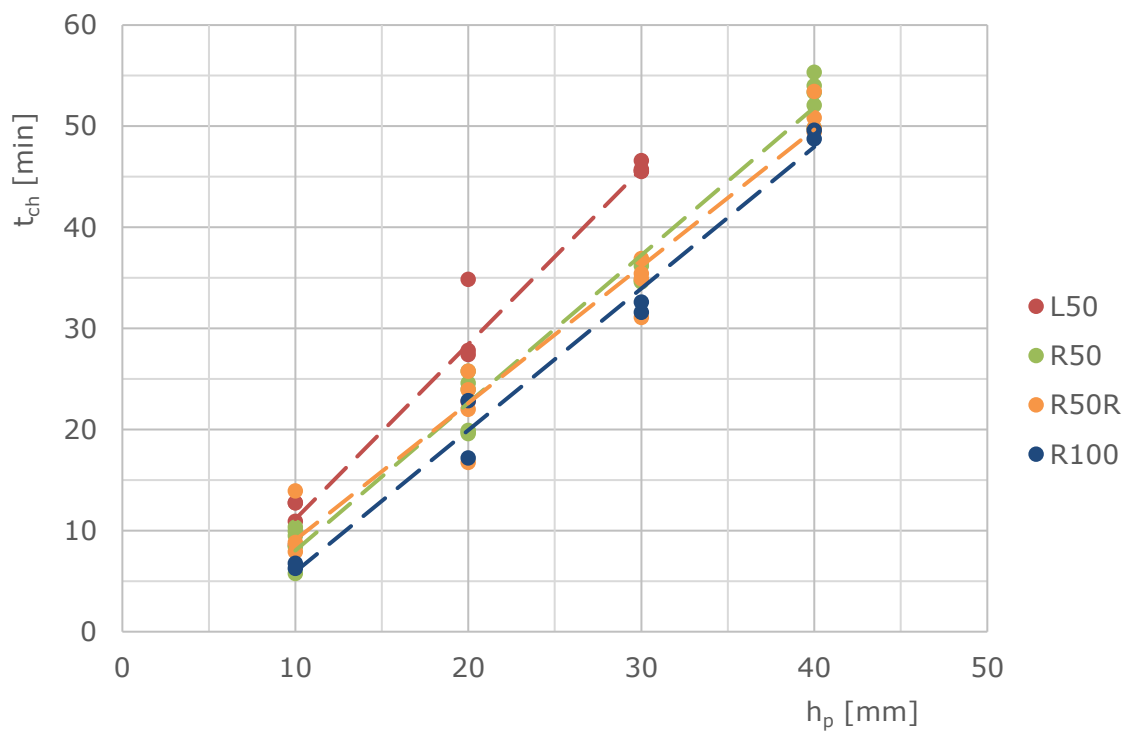
Krohv D, mis oli terasuurusega 0...1 mm ja tsemendisisaldusega kuni 5%, käitus tulekatses analoogselt traditsiooniliselt valmistatud krohvile A (vt Joonis 4.2 ja *Joonis 4.6*). Tsemendisisaldus krohvis 5% ulatuses ei näidanud paremat tulekaitse võimet puidule. Krohvimisel tekkinud kuivamispraod (vt ptk 3.4), mis ei ületanud praolaiust 1 mm, ei mõjutanud märgatavalt puidu söestumisaja algust võrreldes teiste krohvidega.

Antud töös mõjutas puidu paksus söestumisaja algust. 100 mm puidu korral algas söestumine varem kui 50 mm puidu korral (vrd Joonis 4.1...4.4 ja Joonis 4.6). Paksema puiduga hakkas puit keskmiselt 2...4 min varem söestuma. Tõenäoliselt põhjustas erinevuse puidu aastaringide tihedus või soojuse teistsugune ümberjaotumine puidus kui 50 mm puidu korral. Sama tendents esines roomatiga, mil puidu söestumine algas keskmiselt varem võrreldes olukorraga, kus puudus roomatt (vt Joonis 4.8). Vaadates keskmisi söestumisaja algusi hakkas kõige varem puit söestuma ristikiudu 100 mm paksuse korral, seejärel 50 mm roomatiga ja viimasena 50 mm (vt *Joonis 4.8*). Ainus erand on 10 mm krohvi puhul, kus esimesena hakkas söestuma roomatiga katseseeria. Antud paksusel moodustab roomatt suurema osa krohvist ja roog ise on põlev materjal, seetõttu soodustab puidu söestumist.

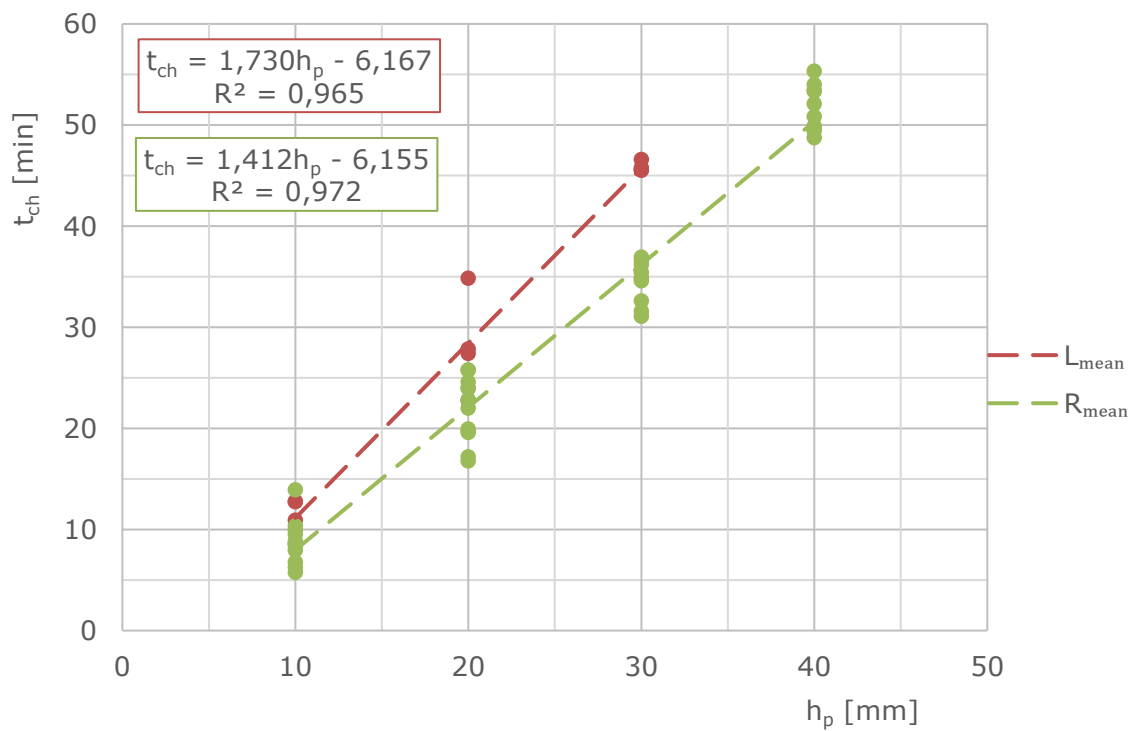
Katsetulemuste põhjal saab järeldada, et söestumise algusaeg varieerus, põhjuseks võib olla eelnevalt mainitud krohvikihi paksuse määramatus ja puidu aastaringide erinevus. Suurim kõikumine oli seerial R50, kuid see hõlmas endas ka rohkem katseid. Ristikiudu erinevad keskmised söestumise algusaja kõverad üksteisest maksimaalselt 5 min ja R50 ning R50R kõverad kattuvad mingis osas (vt *Joonis 4.8*), seetõttu võib leida ristikiudu puidu söestumise algusaja kõigi katsete keskmisena määramatusega 5 min (vt *Joonis 4.9*). Puidu söestumisaja alguse kõver põhineb ristikiudu 43 katsel ja pikikiudu 12 katsel.



Foto 4.3 Lubikrohvi katsekehad pärast katset.



Joonis 4.8 Lubikrohviga kaitstud puidu söestumisaja algus sõltuvalt krohvikihi ja puidu paksusest, kiu suunast ja roomatist.



Joonis 4.9 Lubikrohviga kaitstud puidu söestumisaja alguse sõltuvus krohvikihi paksusest.

4.3 Puidu söestumine krohvi taga ja kaitsetegur

Söestumissügavus määrati katsekehadel krohvi paksusega 10...30 mm. 40 mm krohvi puhul jäi söestumisaeg 10 min juurde ja selle aja jooksul tekkinud söekiht oli peaaegu olematu.

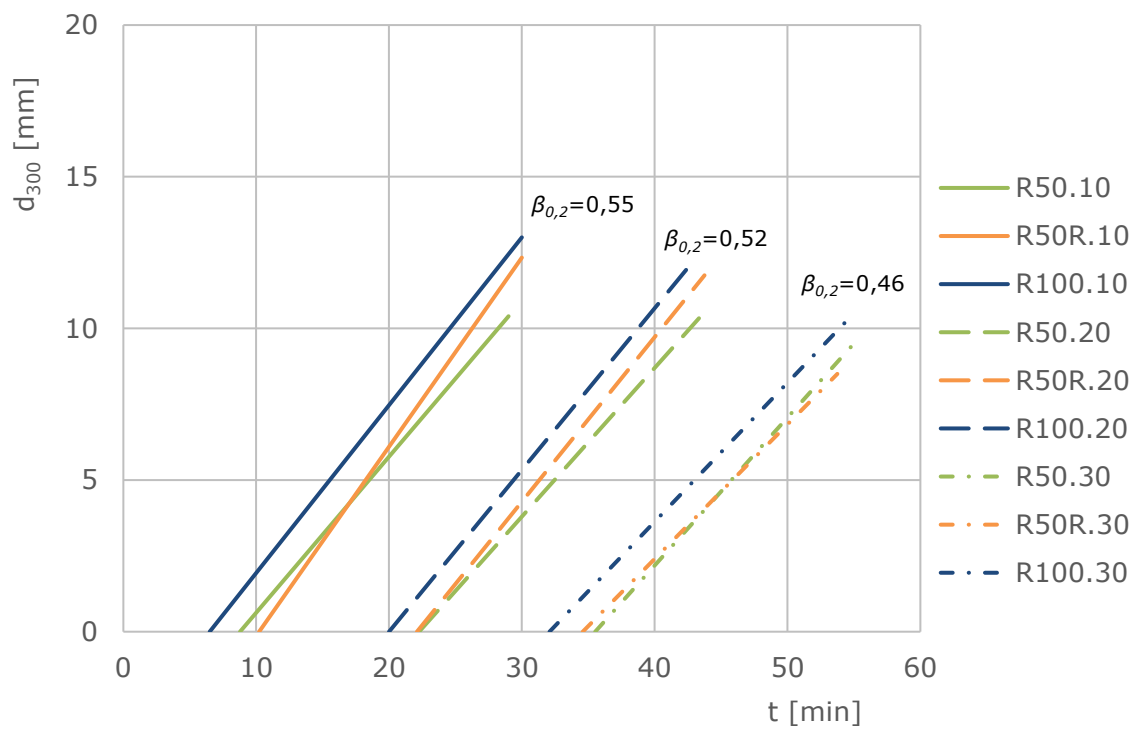


Foto 4.4 Lubikrohvi katsekehade jääkristlõige ja 40 mm krohvi puhul peaaegu olematu söekiht.

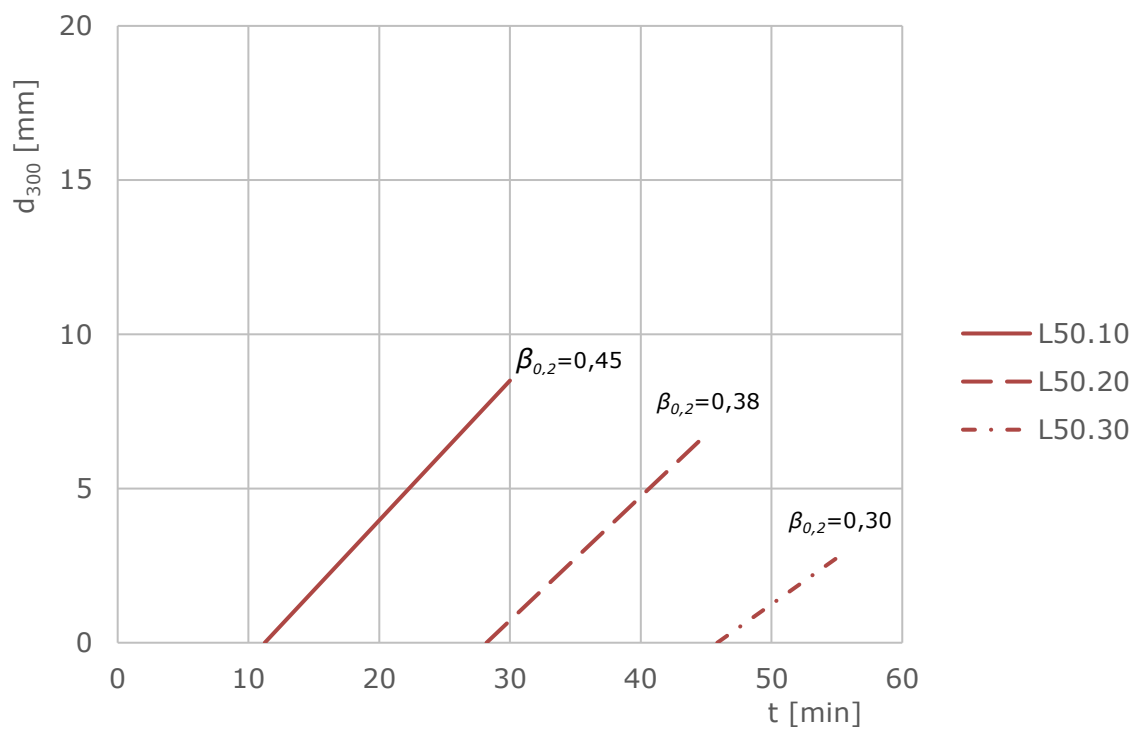
Eelnevas peatükis mainiti söestumisaja alguse sõltuvust puidu paksusest, kiu suunast või krohvikandja olemasolust. Joonis 4.10 on väljatoodud ristikiudu puidu keskmine söestumiskiirus erineva puidu paksuse korral ja krohvikandja mõju söestumiskiirusele. Sama krohvikihhi paksuse juures söestub puit olenemata eelnimetatud teguritest suhteliselt sarnase kiirusega. Kui ainult keskmisi söestumiskiirusi vaadata, siis paksema krohvikihhi korral söestub puit aeglasemini, kuid erinevus 10 ja 30 mm krohvikihhi vahel jääb alla 0,10 mm/min. Vaadates iga katse söestumiskiirusi eraldi ja sealjuures selle varieeruvust sama krohvikihhi juures (vt Tabel 4.1), siis ilmneb söestumiskiiruse (sh leitava kaitseteguri k_2) suur kõikumine. Üks põhjus on krohvide erinev käitumine õhemate kihtide korral (vt ptk 4.2).

Joonis 4.10 ja edaspidi pole arvestatud katse nr 10, 26 ja 28 söestumiskiirusi ning kaitsetegureid. Katse nr 10 korral oli põhjuseks puidu madal tihedus ning ülejäänud katsete korral jäi puidu söestumisaeg alla 15 min. Lisaks kahel viimasel erineb söestumiskiirus märgatavalt sama seeria tulemustest. Kuna söestumissügavus katsel nr 26 oli sama, mis teistel katsetel 20 min söestumisega, siis ilmselt algas antud katses puidu söestumine enne 300 °C-ni jõudmist.

Pikikiudu söestub puit krohvikihhi taga aeglasemalt kui ristikiudu (vt Joonis 4.11). Sarnaselt ristikiuga söestub puit pikikiudu aeglasemalt paksema krohvikihhi puhul, kuid vahe 10 ja 30 mm krohvikihhi korral on 0,15 mm/min. Võrreldes keskmisi söestumiskiirusi sama krohvikihhi juures, siis pikikiudu söestub puit ristikiust 1,2...1,5 korda aeglasemini (vrd Joonis 4.10 ja Joonis 4.11).



Joonis 4.10 Keskmised söestumiskiirused ristikiudu sõltuvalt puidu paksusest või krohvikandjast.



Joonis 4.11 Keskmised söestumiskiirused pikikiudu.

Tabel 4.1 Lubikrohviga kaitstud puidu söestumiskiirus ja kaitsetegur.

Katse nr.	Katsekeha tähis	Puidu kaal	Puidu tihedus	Krohvikihi paksus h_p	Katseaeg t	Söestumise algusaeg t_{ch}	Söestumise aeg $t-t_{ch}$	Söestumis-sügavus d_{300}	Söestumiskiirus $\beta_{2,0}$	Kaitsetegur k_2
		[g]	[kg/m ³]		[min]	[min]	[min]	[mm]	[mm/min]	
1	R50.A10	221,3	443,0	10	25	5,8	19,3	11	0,57	0,88
2	R50.B10a	217,1	434,5		-	-	-	-	-	-
3	R50.B10b	219,1	438,5		30	9,9	20,1	10	0,50	0,77
4	R50.C10a	218,7	437,5		30	9,5	20,5	10	0,49	0,75
5	R50.C10b	219,8	440,0		30	10,3	19,7	9	0,46	0,70
6	R50.D10	219,2	438,5		30	8,4	21,6	12	0,56	0,86
7	R50R.A10	202,6	405,5		30	8,8	21,2	13	0,61	0,94
8	R50R.B10	218,0	436,0		30	7,9	22,1	14	0,63	0,98
9	R50R.C10	214,4	429,0		30	13,9	16,1	10	0,62	0,96
10	R50R.D10	199,6	399,5		30	9,2	20,8	15	0,72	1,11
11	R100.A10	444,5	444,5		30	6,3	23,8	13	0,55	0,84
12	R100.D10	444,7	445,0		30	6,8	23,3	13	0,56	0,86
13	R50.A20a	223,1	446,5	20	45	19,8	25,3	11	0,44	0,67
14	R50.A20b	219,3	439,0		45	24,6	20,4	10	0,49	0,75
15	R50.B20	221,0	442,0		45	25,8	19,3	9	0,47	0,72
16	R50.C20	214,6	429,5		45	24,0	21,0	11	0,52	0,81
17	R50.D20a	213,7	427,5		40	19,6	20,4	11	0,54	0,83
18	R50.D20b	219,4	439,0		40	19,9	20,1	10	0,50	0,77
19	R50R.A20	216,9	434,0		40	16,8	23,3	13	0,56	0,86
20	R50R.B20	212,8	426,0		45	22,0	23,0	14	0,61	0,94
21	R50R.C20	205,4	411,0		45	23,9	21,1	10	0,47	0,73
22	R50R.D20	207,8	416,0		45	25,8	19,3	10	0,52	0,80
23	R100.B20	442,5	442,5		45	22,8	22,2	12	0,54	0,83
24	R100.C20	459,6	460,0		40	17,2	22,8	12	0,53	0,81
25	R50.A30	219,0	438,0	30	55	34,8	20,3	8	0,40	0,61
26	R50.B30a	222,8	446,0		55	42,6	12,4	8	0,64	0,99
27	R50.B30b	217,0	434,0		55	36,6	18,4	10	0,54	0,84
28	R50.C30a	210,5	421,0		55	40,6	14,4	7	0,49	0,75
29	R50.C30b	202,8	406,0		55	36,2	18,8	10	0,53	0,82
30	R50.D30	229,8	460,0		55	34,6	20,4	10	0,49	0,75
31	R50R.A30	206,3	413,0		55	35,4	19,6	9	0,46	0,71
32	R50R.B30	208,3	417,0		50	31,1	18,9	9	0,48	0,73
33	R50R.C30	210,7	421,5		55	36,9	18,1	8	0,44	0,68
34	R50R.D30	214,1	428,5		55	34,9	20,1	8	0,40	0,61
35	R100.A30	452,2	452,5		55	32,6	22,4	9	0,40	0,62
36	R100.D30	445,0	445,0		55	31,6	23,4	12	0,51	0,79
37	R50.A40a	206,7	413,5	40	60	55,3	4,7	-	-	-
38	R50.A40b	205,9	412,0		60	52,1	7,9	-	-	-
39	R50.B40	205,6	411,5		60	58,8	1,3	-	-	-
40	R50.C40	218,8	438,0		60	54,0	6,0	-	-	-
41	R50.D40a	208,0	416,0		60	49,8	10,2	-	-	-
42	R50.D40b	201,3	403,0		60	53,3	6,7	-	-	-
43	R50R.A40	218,8	438,0		60	49,4	10,6	-	-	-
44	R50R.B40	207,8	416,0		60	49,8	10,2	-	-	-
45	R50R.C40	211,5	423,0		60	53,4	6,6	-	-	-
46	R50R.D40	201,6	403,5		60	50,8	9,2	-	-	-
47	R100.B40	451,0	451,0		60	48,8	11,3	-	-	-
48	R100.C40	454,7	455,0		60	49,6	10,4	-	-	-
49	L50.A10	185,9	372,0	10	30	12,8	17,3	8	0,46	0,71
50	L50.B10	190,6	381,5		30	8,6	21,4	11	0,51	0,79
51	L50.C10	184,0	368,0		30	12,8	17,3	6	0,35	0,54
52	L50.D10	183,2	366,5		30	10,9	19,1	9	0,47	0,73
53	L50.A20	183,8	368,0	20	45	27,4	17,6	8	0,45	0,70
54	L50.B20	195,9	392,0		45	27,8	17,2	5	0,29	0,45
55	L50.C20	184,6	369,5		45	34,8	10,2	3	0,30	0,45
56	L50.D20	183,8	368,0		45	22,8	22,3	11	0,49	0,76
57	L50.A30	188,4	377,0	30	55	45,8	9,3	2	0,22	0,33
58	L50.B30	188,4	377,0		55	45,6	9,4	3	0,32	0,49
59	L50.C30	187,9	376,0		55	45,5	9,5	3	0,32	0,49
60	L50.D30	188,9	378,0		55	46,6	8,4	3	0,36	0,55
61	L50.A40	188,6	377,5	40	60	-	-	-	-	-
62	L50.B40	189,7	379,5		60	-	-	-	-	-
63	L50.C40	188,2	376,5		-	-	-	-	-	-
64	L50.D40	186,7	373,5		60	-	-	-	-	-

Söestumisaja alguses võib puidu söestumine koonuskuumutiga olla mittelineaarne ja seetõttu võib lühema söestumisaja juures kaitsetegur olla suurem (vt *Tabel 4.1* katse nr 9, vt *Joonis 4.11*). Antud töös on lähenetud söestumiskiirusele lineaarselt.

Joonis 4.10 on 10 mm krohvikihi puhul roomatiga söestumiskiirus suurem kui 30 mm krohvi puhul, seega võib eeldada, et roomati mõju söestumisele väheneb krohvikihi paksuse suurenemisel. Ühtlasi roomati osakaal krohvist on suurem õhemate krohvikihide korral ja kuna roomatt on põlev materjal ning pilliroo kesta on õhk, siis see soodustab puidu söestumist.

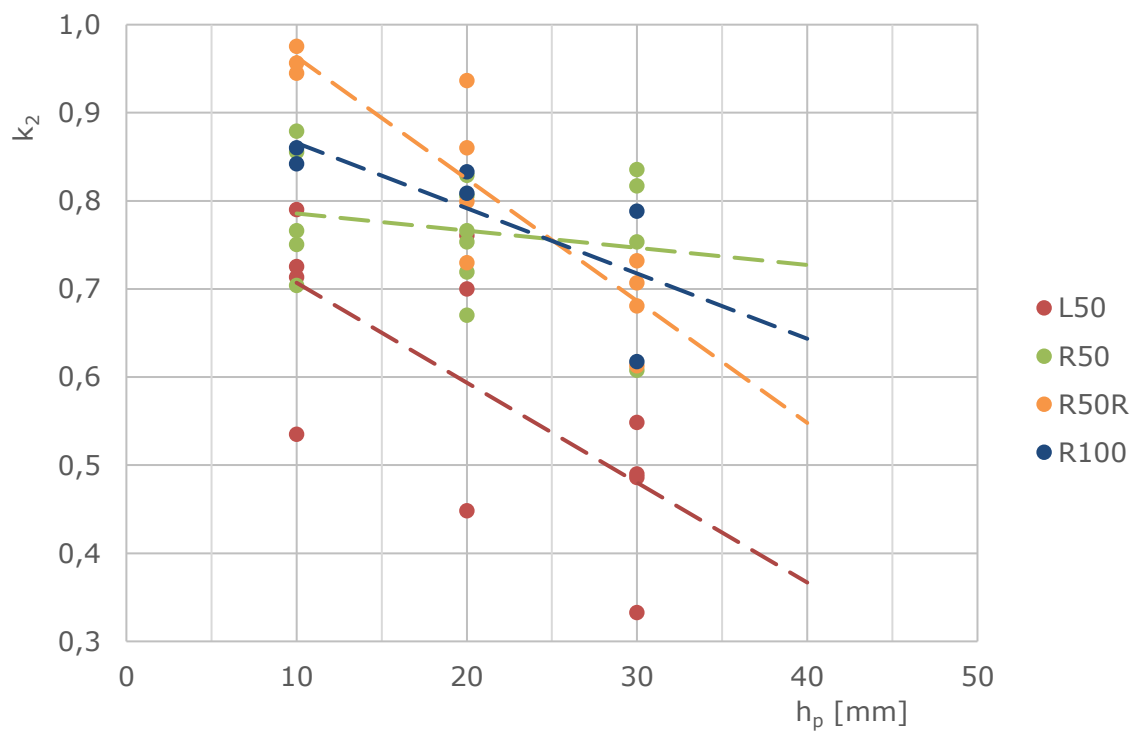
Roomatita olukorras oli seeriade R50 ja R100 söestumiskiirused *Joonis 4.10* erinevate krohvikihi paksuste juures peaaegu sama kaldega ehk kihi paksus ei mõjutanud märgatavalt puidu söestumiskiirust. Kõikide ristikiudu seeriade keskmised söestumiskiirused olid sarnased.

Kaitseteguri leidmisel ristikiudu puidu puhul vaadati esmalt erinevate katseseeriade keskmisi kaitsetegurite kõveraid (vt *Joonis 4.12*). Märgata on ristikiudu kõverate kokkulangevust u 25 mm krohvikihi juures, kus tulemuste põhjal tundub, et krohvikandja ja puidu paksus ei mõjuta selle söestumiskiirust. Kõige suurem kaitsetegurite kõikumine oli katseseerial R50, kuid antud seeriaga tehti ka kõige rohkem katseid. Olenemata suurest kõikumisest on märgata kaitseteguri langemise tendentsi krohvikihi paksenemisel. Seepärast leiti kõikide ristikiudu katsetulemuste põhjal keskmine kaitsetegur (vt *Joonis 4.13*).

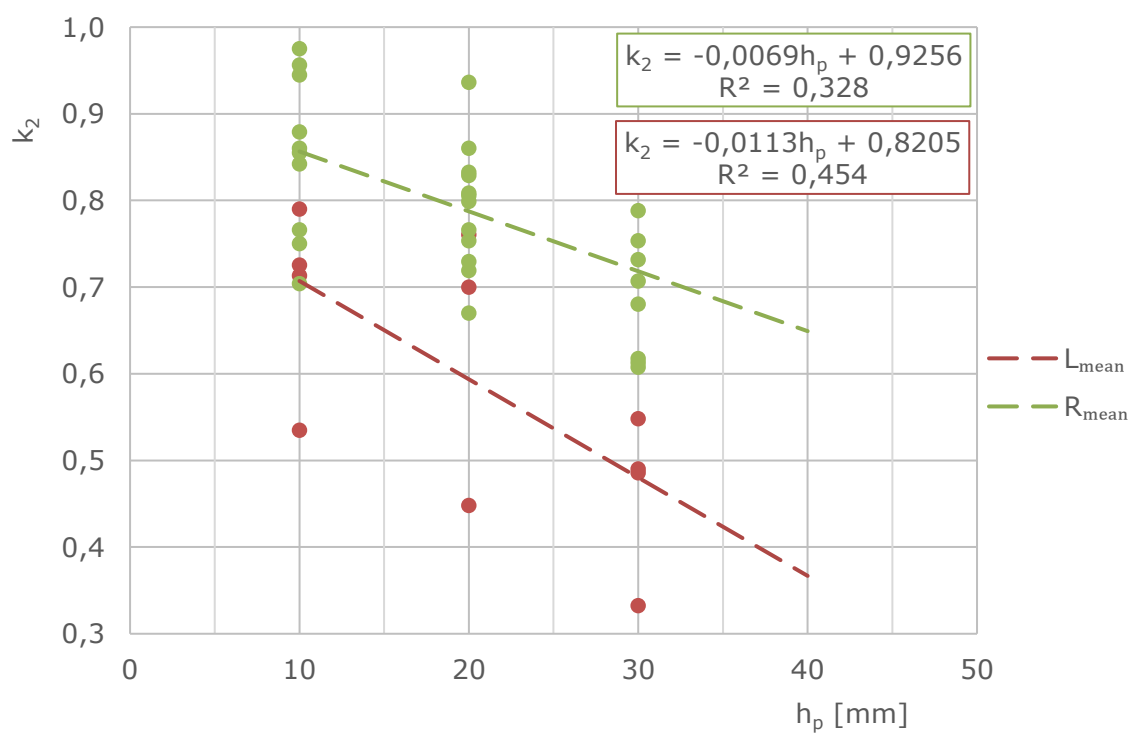
Erinevate katseseeriade söestumise algusaegade vahe oli väike (vt *Joonis 4.8*), kuid söestumise kõikumine oli suur. Suur kõikumine võib olla tingitud puidu enda omadustest. Antud töös valiti oksavabad ja samas tihedusvahemikus puitkehad, kuid nagu ilmneb, siis aastaringide erinevus, krohvi mikropraod või puidu söestumine enne 300 °C mõjutas märgatavalt puidu söestumist.

Pikikiudu kaitseteguri leidmisel arvestati kõikide katsetega. Õhemate krohvikihide korral kõiguvad söestumissügavused rohkem ja see tuleneb tõenäoliselt krohvide erinevusest.

Kaitseteguri arvutusvalem põhineb ristikiudu 32 katsel ja pikikiudu 12 katsel. Kaitsetegurite kõikumine on suur, seda kajastab ka kõverate determinatsioonikordaja R_2 madal väärtus.



Joonis 4.12 Keskmised lubikrohvi kaitsetegurid sõltuvalt krohvikihi ja puidu paksusest, kiu suunast ja roomatist.



Joonis 4.13 Lubikrohviga kaitstud puidu kaitseteguri sõltuvus krohvikihi paksusest.

4.4 Võrdlus varasemate lubikrohvi ahjukatsetega

Järgnevalt võrreldakse antud töö tulemusi 6 ahjukatsetega, kus katsekehade suurus oli 0,5x0,5 m ja neid katsetati vertikaalselt ehk seinakonstruktsioonina. Uurimise all oli kolm erinevat lubikrohvi ja krohvikandjana kasutati roomatti või raabitsvõrku. Kolmest lubjakrohvist kaks on uuritud ka antud töös (krohv B ja D). Ahjukatses uuriti krohvikihi paksusi 20 ja 30 mm. [31]

Visuaalselt käitus lubikrohv koonuskuumuti all ja ahjukatses samamoodi. Kuumuse käes ei muutnud lubikrohvi värv, kui siis ainult leegi olemasolul värvus mustaks. Kokkupuutel veega lagunes krohv erinevete krohvikihide puutepinnal. [31]

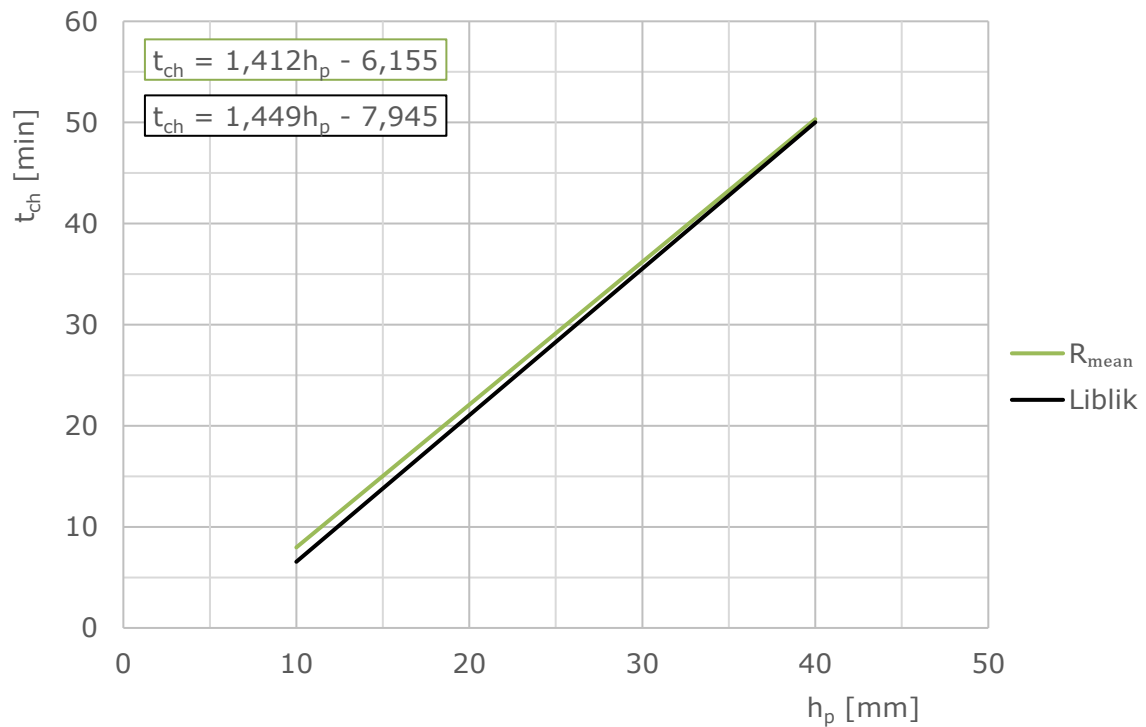
Ahjukatses leitud söestumise algusajad jäid samasse vahemikku ja determinatsioonikordaja R_2 oli 0,824 [31]. *Joonis 4.14* on näha antud töös leitud lubikrohvi söestumise algusaeg (joonistel viide R_{mean}) ja ahjukatse oma (joonistel viide *Liblik*). Erinevus koonuskuumuti ja ahjukatses tulemuses jääb alla 1,5 min, seejuures koonuskuumutiga hakkab puit hiljem söestuma. Ahjukatse ja koonuskuumuti tulemuste kokkulangevus on hea.

Eelnevalt sai mainitud koonuskuumutiga leitud kaitseteguri suurt kõikumist. Kaitseteguri väärtuse varieeruvus esineb ka ahjukatse tulemustes, kus söestumiskiirused ja kaitsetegurid varieerusid 0,20 ulatuses [31]. Ahjukatsetega leitud k_2 valemi determinatsioonikordaja R_2 oli 0,390 [31]. Ahjukatses leitud tulemuste kõikumist annab põhjendada asjaoluga, et ahjus on kinnine keskkond, kus soojusvoog liigub ruumi piires vabalt ringi. See võib tekitada erinevaid temperatuurikõikumise katsekeha pinnal. Lisaks võib täismõõdulise katse korral olla roomati mõju suurem puidu söestumisele, st õhk liigub piki roogu krohvi taga intensiivsemalt [31].

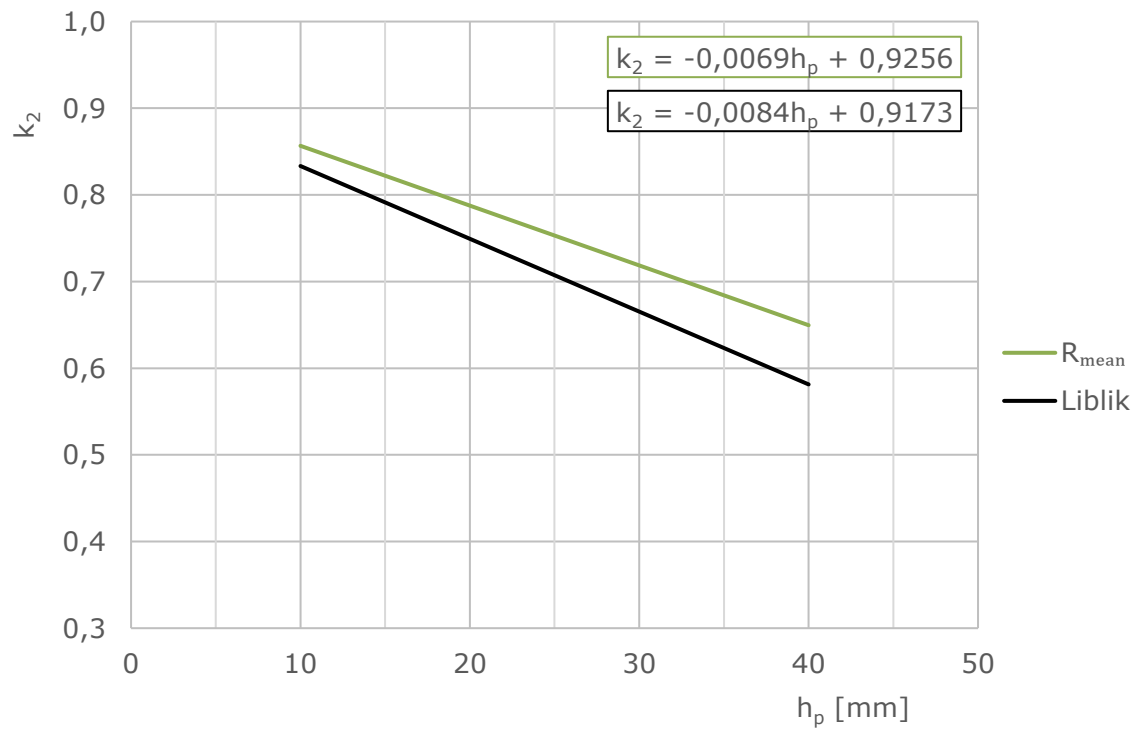
Võrreldes antud töö tulemusega, siis koonuskuumutiga ja ahjukatsetega leitud kaitsetegurite kõverad erinevad 0,07 ulatuses. Õhemate kihtide korral on erinevus väiksem. *Joonis 4.15* on kajastatud koonuskuumutiga leitud keskmine kaitsetegur, kuid oli ka tulemusi, mis jäid alla keskmise. Vaadates kõikide kaitsetegurite tulemusi (vt *Joonis 4.13*), siis on ahjukatse ja koonuskuumuti katsetulemused sarnased.

Ahjukatses ulatuvad temperatuurid kõrgemale kui koonuskuumutiga ja paksema krohvikihi korral jääb koonuskuumuti soojusvoost väheks, mõju söestumisele on väiksem. Samas koonuskuumutiga leitud k_2 on konservatiivsem ahjukatse omast. Puidu baassöestumiskiirus β_0 võib koonuskuumutiga katsetades olla suurem, kui 0,65

mm/min (vt ptk 3.3). Selle tulemusena võib koonuskuumuti ja ahjukatsetega leitud kaitsetegurite väärtuseid omavahel lähendada.



Joonis 4.14 Lubikrohviga kaitstud puidu söestumisaja algus koonuskuumutiga ja ahjukatsega [31].



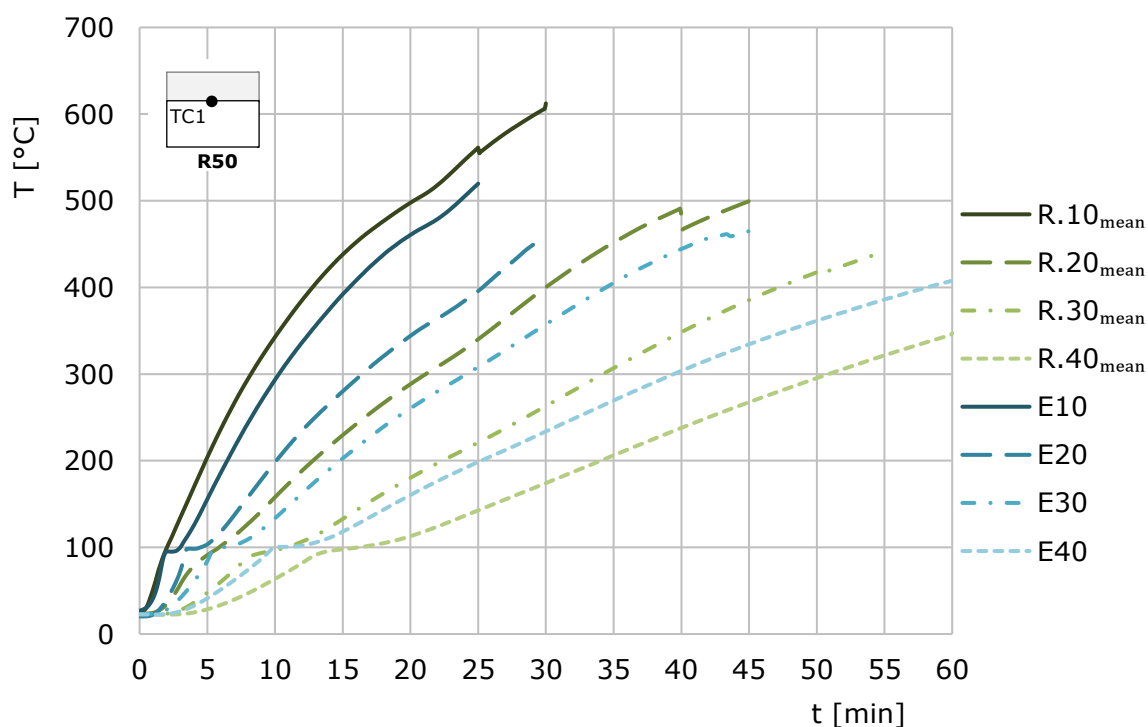
Joonis 4.15 Lubikrohvi kaitsetegur koonuskuumutiga ja ahjukatsega [28].

4.5 Võrdlus savikrohviga

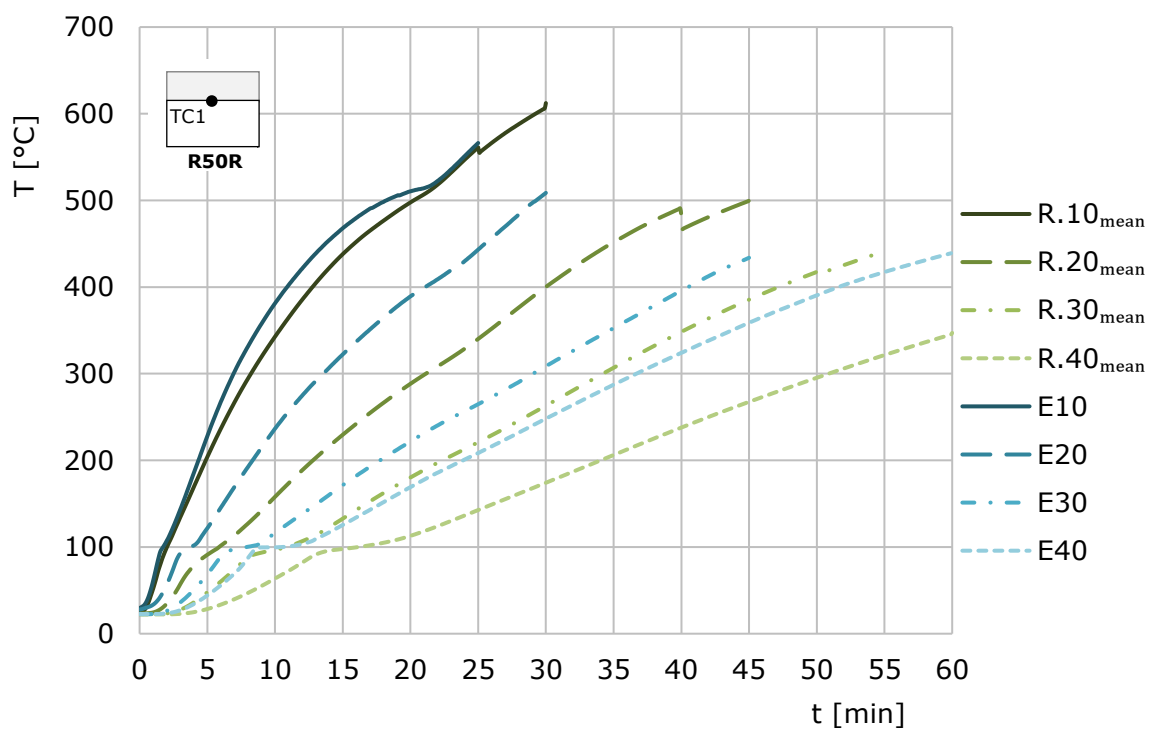
Lisaks lubikrohvi tulekatsetele tehti 12 katset savikrohviga (krohv E), sh 8 katset ristikiudu, kus pooltel oli roomatt ja 4 katset pikikiudu (vt Tabel 3.2). Kõikidel juhtudel oli puidu paksus 50 mm. Joonis 4.16...18 on toodud lubi- ja savikrohvi temperatuurikõverate võrdlus.

Söestumise algusaeg erineb savikrohvil roomatiga ja roomatita olukorras u 5 min (vt Joonis 4.16 ja Joonis 4.17). Sarnased tulemused on näha ka lubikrohvi puhul. R50 korral hakkab 10 mm lubikrohv enne söestuma kui savikrohv, ülejäänud juhtudel hiljem (vt Joonis 4.8). Antud erand võib tuleneda krohvide erinevast koostisest, kus õhema krohvi puhul on suurem mõju krohvi koostisel kui krohvihihi paksusel (vt ptk 4.2). Krohvihihi paksenemisel suureneb vahe lubi- ja savikrohvi söestumise algusaegades peaaegu 15 min. Seega lubikrohviga lükatakse puidu söestumise algust rohkem edasi kui savikrohviga, eriti paksemate krohvihihtide korral.

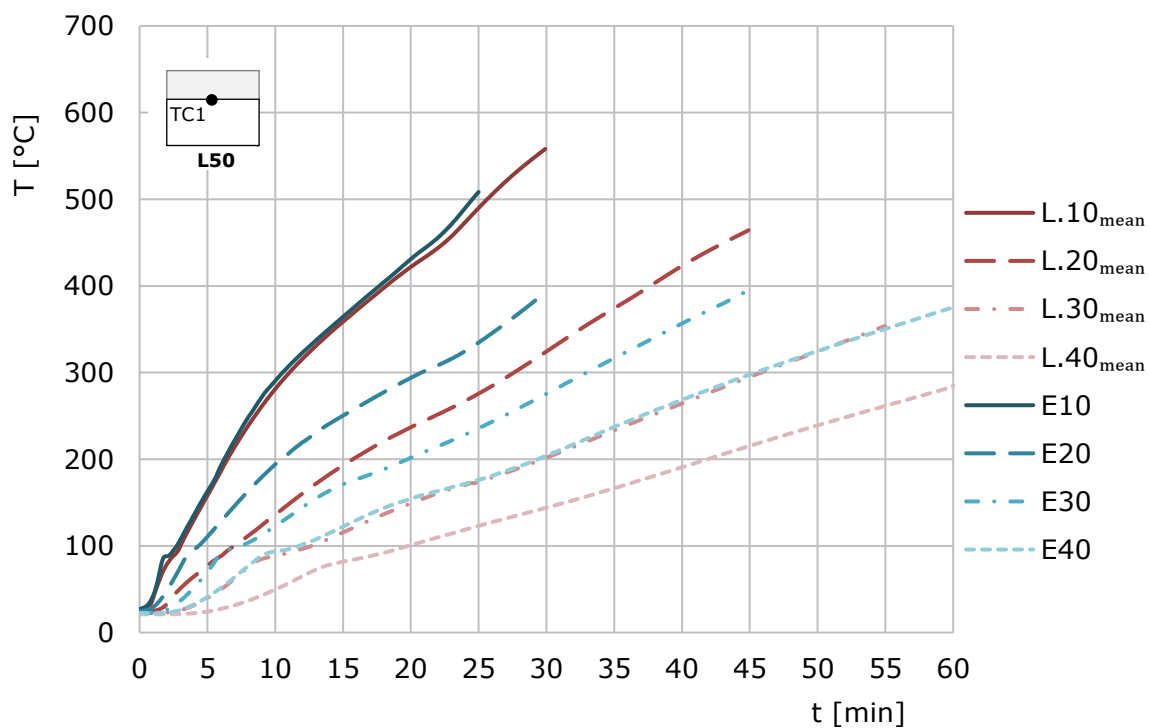
Pikikiudu käitub savi- ja lubikrohv analoogselt ristikiudu kirjeldatud versiooniga. Ainus erinevus ristikiuga on söestumise algusajas ja söestumiskiiruses. Savi- ja lubikrohvi korral hakkab pikikiudu puit söestuma u 5 min hiljem ristikiust ja söestub aeglasemalt (vrd Joonis 4.16, 4.17 ja 4.18; vt Joonis B.6).



Joonis 4.16 Lubi- ja savikrohviga (R ja E) kaitstud puidu keskmised temperatuurikõverad ristikiudu.



Joonis 4.17 Lubi- ja savikrohviga (R ja E) kaitstud puidu keskmised temperatuurikõverad ristikiudu roomatiga.



Joonis 4.18 Lubi- ja savikrohviga (R ja E) kaitstud puidu keskmised temperatuurikõverad pikikiudu.

Järgnevalt võrreldakse antud töö lubi- ja savikrohvi söestumise algusaegu ja kaitsetegureid varasema uuringutega, kus on uuritud savikrohvi tulekaitsevõimet koonuskuumuti all ning hilisemalt ahjukatses. Koonuskuumutiga katsetades olid kõik puidust katsekehad 100 mm paksud ja roomatiga ning krohvikihi paksused varieerusid vahemikus 10...40 mm (joonistel viide *Liblik*, 2015) [36]. Ahjukatsetes olid katsekeha maksimaalsed mõõtmed 1x1 m, krohvikandjana kasutati roomatti või -plaati ja krohvikihit varieerus vahemikus 16...44 mm (joonistel viide *Liblik*) [42].

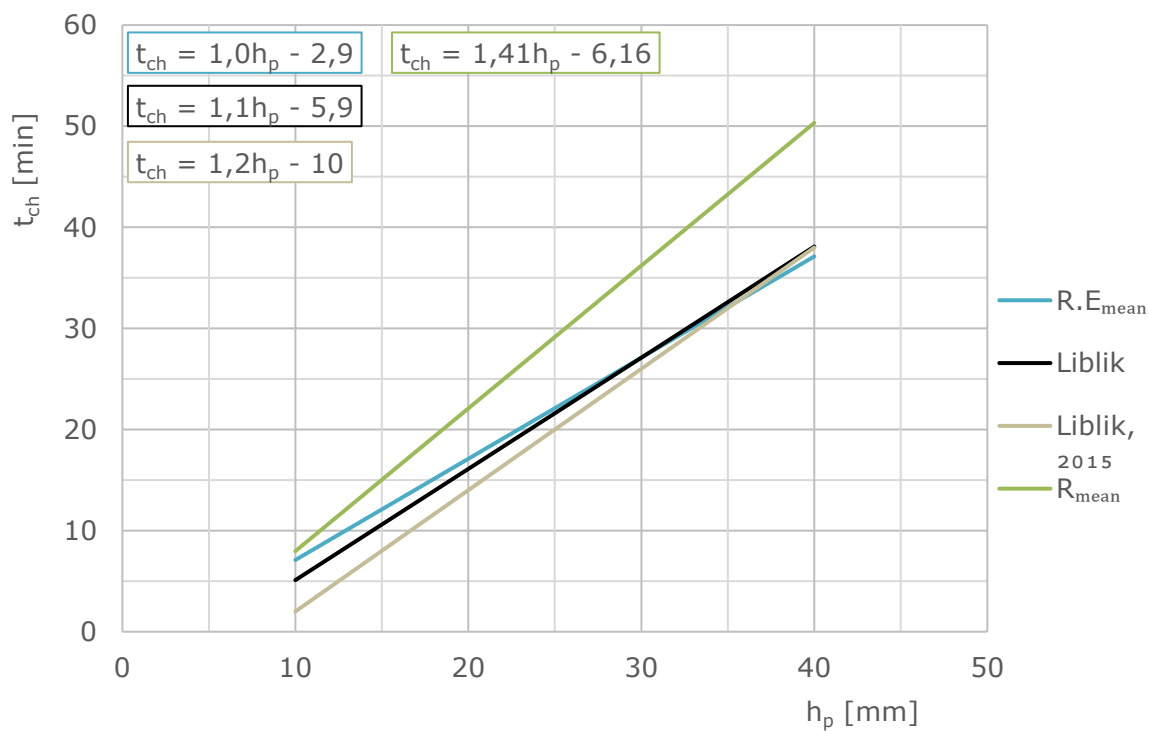
Antud töös leitud savikrohvi (roomatiga ja ilma) söestumise algusaeg (joonistel viide $R.E_{mean}$) langeb hästi kokku ahjukatse tulemustega (*Liblik*). Sama on varasemalt koonuskuumuti all leitud savikrohvi söestumise algusajaga (*Liblik*, 2015). See kinnitab eelmist väidet (vt ptk 4.4), et koonuskuumutiga leitud kaitsekihi söestumise algusaeg on üsna lähedane ahjukatses leituga.

Võrreldes antud töö lubikrohvi söestumise algusaega (joonistel viide R_{mean}) ahjukatses leitud savikrohvi omaga (*Liblik*), siis lubikrohviga kaitstud puit hakkab hiljem söestuma. Õhemate kihtide korral on vahe u 3 min, kuid 40 mm krohvikihi puhul algab lubikrohviga söestumine u 12 min hiljem savikrohvist.

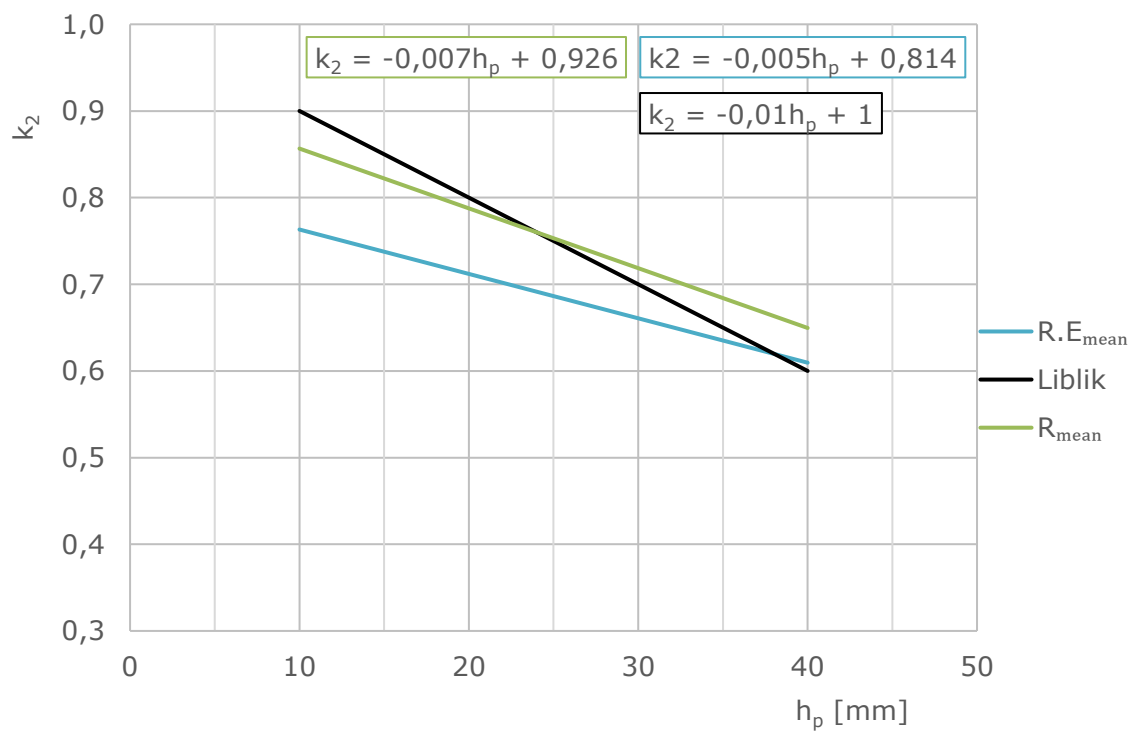
Kaitseteguri võrdluses ei vaadata varasemalt koonuskuumuti all leitud savikrohvi tulemusi (*Liblik*, 2015), kuna seal oli katseaeg kõikidel katsetel 60 min ja söestumisajad erinesid antud tööst. Lisaks oli puidu paksus 50 mm paksem käesolevast uuringust. [36]

Antud töös leitud lubikrohvi kaitsetegur (R_{mean}) erineb savikrohvi ahjukatse omast (*Liblik*) õhemate krohvikihitide korral märgatavalt ja 40 mm krohvikihi puhul on vahe alla 0,1 (vt *Joonis 4.20*). Vastupidiselt lubikrohvile on savikrohvi koonuskuumuti ja ahjukatse kaitseteguri erinevus suurem õhemate krohvikihitide korral (vrd *Joonis 4.15* ja *Joonis 4.20*).

Vaadates lubi- ja savikrohvi kaitsetegureid (*Joonis 4.20* vastavalt R_{mean} ja *Liblik*), siis u 24 mm krohvikihi juures on mõlemal krohvil kaitseteguri väärtus sarnane. Õhemate krohvikihitide korral on lubikrohvi kaitsevõime savikrohvist väiksem ja paksemate kihtide korral suurem.



Joonis 4.19 Lubi- ja savikrohvi söestumise algusajad [36] [42].



Joonis 4.20 Lubi- ja savikrohvi kaitsetegurid [42].

4.6 Võrdlus kipsplaadiga

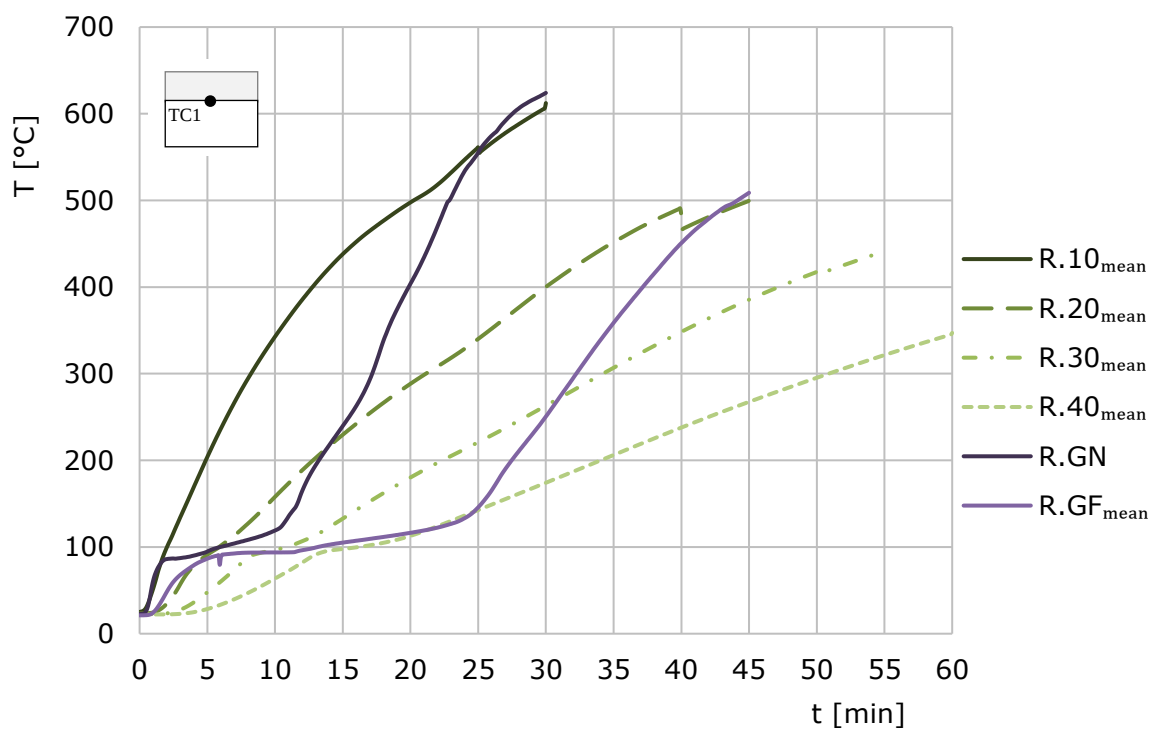
Lubikrohvi katsetele tehti lisaks 4 katset kipsplaadiga. Nendest üks oli 12,5 mm paksune nn standardplaat (tüüp A) ja kolm 15 mm paksust nn tuletõkke kipsplaati (tüüp F) [43]. Kolm katset olid ristikiudu (GN, GFa ja GFb) ja üks oli pikikiudu 15 mm kipsplaadiga (L.GF). Kõikides katsetes oli puidu paksus 50 mm. Katseplaani on väljatoodud *Tabel 3.3*.

Joonis 4.21 on väljatoodud lubikrohvi keskmised temperatuurikõverad erinevate krohvikihhi paksuste korral ja võrdluseks kipsplaadi omad. GN katses oli kipsplaadi paksus 12,5 mm ja GF puhul 15 mm. Kipsplaadi korral on 100 °C juures pikem platoo kui krohvidel (vt ptk 4.5). Lisaks vee aurustumisele puidust pikendab platood kipsplaadi veesisaldus, mis on suurem kui krohvidel.

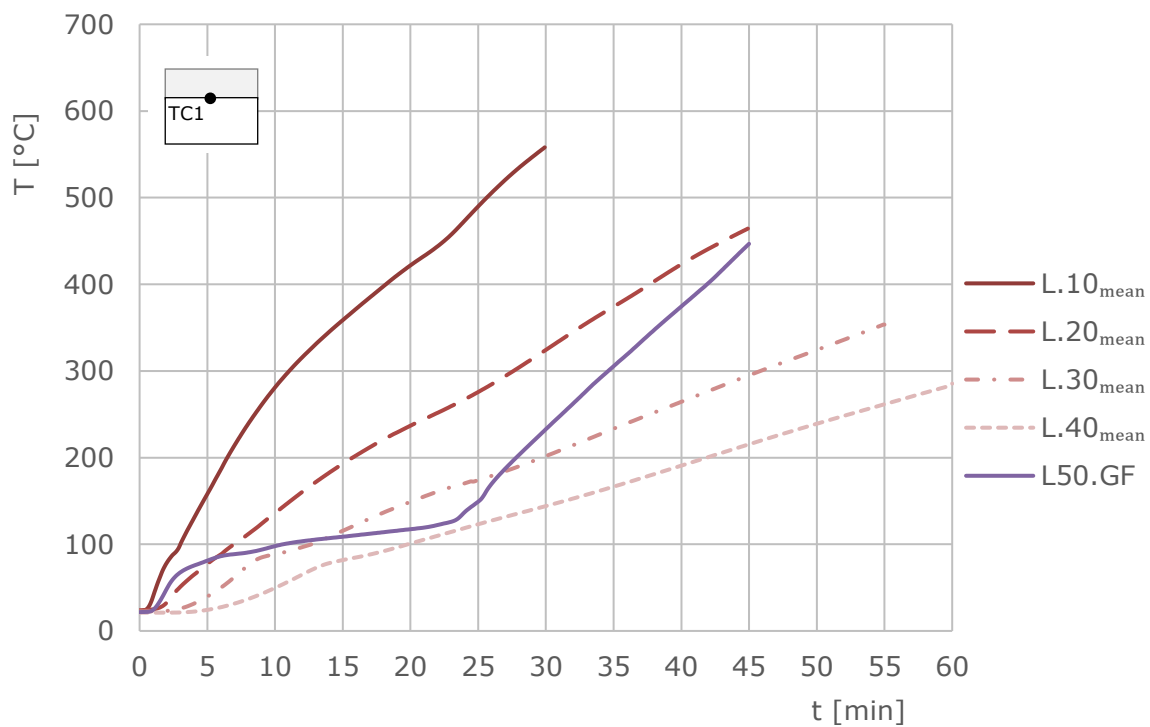
Vaadates 10 mm lubikrohvi ja 12,5 mm kipsplaadi temperatuurikõveraid, siis kipsplaadi taga hakkab puit söestuma kaks korda hiljem kui lubikrohvi puhul. Katseaja 30. minutil on temperatuur mõlema kaitsekihi taga sama (u 610 °C). Sama tendents esineb 15 mm krohvikihhi ja kipsplaadi korral. Kasutades t_{ch} valemist *Joonis 4.9* algab 15 mm lubikrohviga puidu söestumine 15. minutil, kipsplaadil sama paksuse juures 33. minutil. Siinkohal on aga kipsplaadi tagune temperatuur lähedane 20 mm lubikrohviga. Võib eeldada, et 15 mm krohvi puhul on temperatuur puidu pinnal sama katseaja vältel kõrgem kipsplaadist. 15 mm kipsplaadiga algab söestumine samaaegselt 30 mm lubikrohviga.

Pikikiudu hakkab puit kipsplaadi taga söestuma u 3 min hiljem kui ristikiudu (vrd *Joonis 4.21* ja *Joonis 4.22* katse GF). Kuni vee aurustumise platoo lõpuni langevad ristikiu ja pikikiu temperatuurikõverad enamjaolt kokku (vt *LISA C Joonis C.1*), seega sinnamaani käitub puit samamoodi olenemata kiu suunast. Pikikiudu hakkab puit söestuma 15 mm kipsplaadi taga 35. minutil, sellele võrdväärne lubikrohvi paksus oleks 25 mm (vt *Joonis 4.9 L_{mean}*).

Temperatuur puidu pinnal katseaja 45. minutil on 15 mm kipsplaadiga sarnane 20 mm lubikrohvi puhul, seega eelnevalt toodud näite eeskujul oleks 25 mm lubikrohviga temperatuur puidu pinnal sama ajaga madalam. Kattematerjali ära kukkumine muudab söestumiskiirust oluliselt suuremaks ja seda ei ole antud töös uuritud.



Joonis 4.21 Lubikrohviga ja kipsplaadiga kaitstud puidu keskmised temperatuurikõverad ristikiudu.



Joonis 4.22 Lubikrohviga ja kipsplaadiga kaitstud puidu keskmised temperatuurikõverad pikikiudu.

Joonis 4.23 ja *4.24* on võrreldud lubikrohvi (joonistel viide R_{mean}) ja kipsplaadi (joonistel viide $EC5\ G$) arvutusvalemeid tulekaitsematerjalina. Kipsplaadile kehtivad arvutusvalemid on võetud standardist EN 1995-1-2 ja kehtivad nii kipsplaadi tüübile A kui ka F, kuid ainult ühekihilisele plaadile.

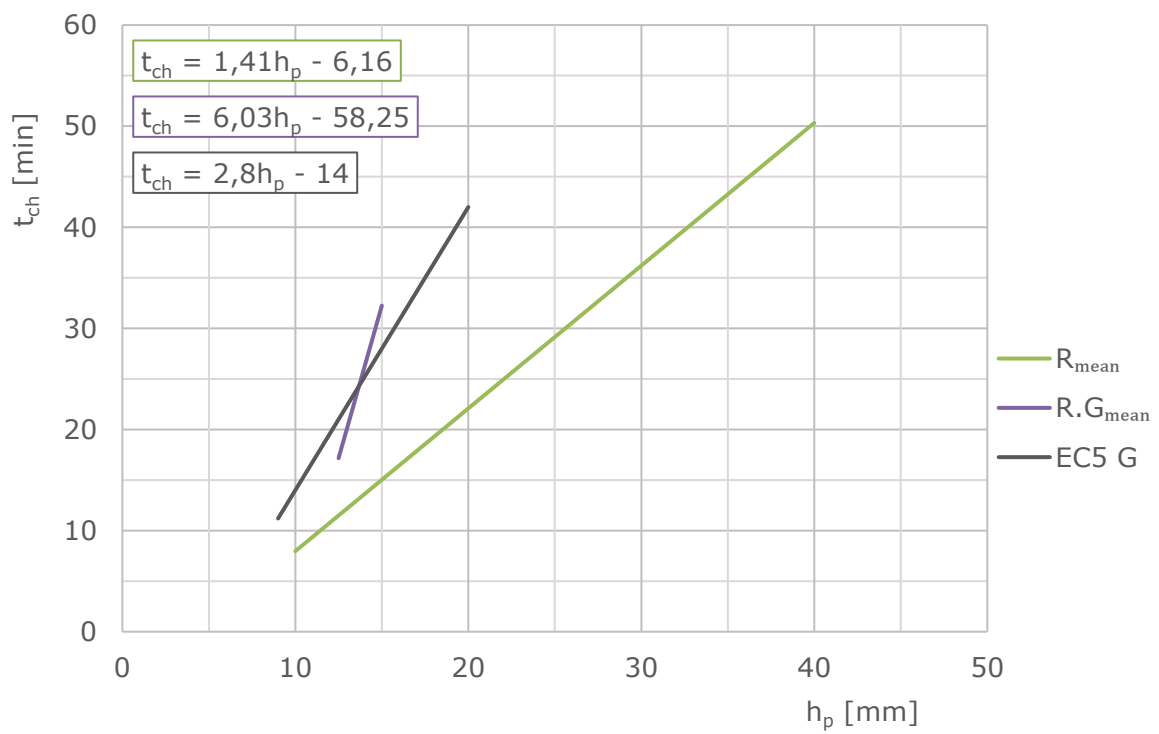
Vaadates söestumise algusaegade valemid lubikrohvide ja kipsplaadile (vt *Joonis 4.23*), siis vahe on ligikaudu kahekordne. Saavutamaks sama t_{ch} -d peab lubikrohv olema ligikaudu 10 ± 3 mm paksem kipsplaadist. Kipsplaadile parema t_{ch} annab selle veesisaldus, mis pikendab vee aurustumisele kuluvat aega ja seeläbi lükkab edasi söestumise algusaega.

Antud töös leitud kipsplaadiga puidu söestumise algusajad (joonistel viide $R.G_{mean}$) koonuskuumuti all erinevad standardist kuni 5 min võrra (vt *Joonis C.1* või *Joonis 4.23*) [4]. Tüüp F korral hakkas kipsplaadi taga puit söestuma hiljem võrreldes standardis antud arvutusvalemiga ja tüüp A korral varem.

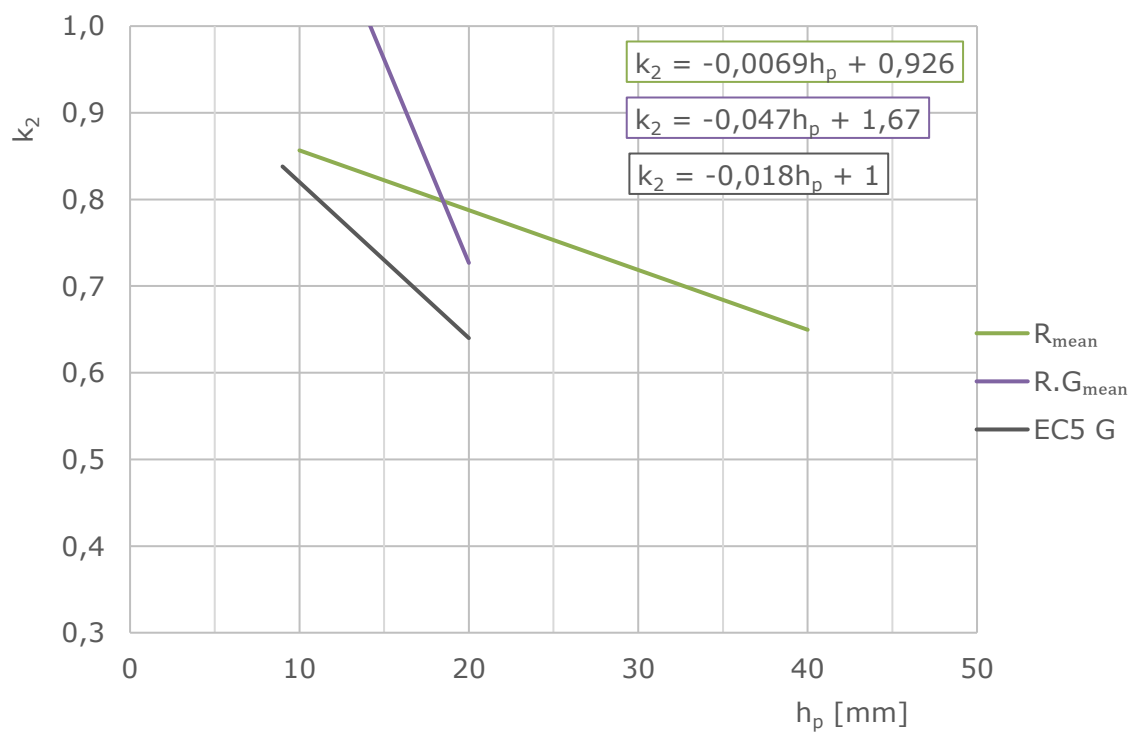
Joonis 4.24 on väljatoodud lubikrohvi ja kipsplaadi kaitsetegurite kõverad. Lubikrohvi puhul on kõver laugem kui kipsplaadil, seega kihi paksuse suurenemisel avaldab see kipsplaadiga võrreldes vähem mõju puidu söestumisele. Sama k_2 juures peab lubikrohv olema kipsplaadist 8...18 mm paksem, vahe suureneb väiksema k_2 puhul ja on väärtuse 0,68 juures u kahekordne.

Antud töös leitud seos kipsplaadi kaitseteguri ning plaadi paksuse vahel erineb standardi arvutusvalemist (vt *Joonis 4.24*, vrd $R.G_{mean}$ ja $EC5\ G$). Koonuskuumutiga leitud seos põhineb kolmel katsel ja on standardi omast konservatiivsem. Võib oletada, et koonuskuumutiga leitud kattematerjali kaitseteguri väärtused on ahjukatsetega sarnased, kui arvestada suuremat baassöestumiskiirust β_0 koonuskuumuti korral (vt ptk 3.3).

Võrreldes kipsplaadiga algab sama krohvikihi paksuse korral lubikrohvi taga söestumine varem, kuid söestumine on aeglasem. Aeglasem söestumine on juhul, kui koonuskuumutiga katsetades võtta suurem puidu baassöestumiskiirus.



Joonis 4.23 Lubikrohvi ja kipsplaadi söestumise algusajad [4].



Joonis 4.24 Lubikrohvi ja kipsplaadi kaitsetegurid [4].

4.7 Järeldused ja ettepanekud

Antud töös teostatud katsete tulemuste põhjal võib anda soovitusel lubikrohvi kaitstud puidu söestumise algusaja t_{ch} ja kaitseteguri k_2 leidmiseks.

Töös käsitletud krohvid olid järgnevate parameetritega: 1) krohvil A, B ja C oli liiva terasuurus 0...4 mm, krohvil D 0...1 mm; 2) krohvil C ja D oli tihedus tootjajuhiste järgi 1400...1450 kg/m³ ning krohvil A ja B 1700 kg/m³; 3) krohv D sisaldas kuni 5% tsementi.

Õhemate krohvikihide korral mõjutab puidu söestumise algusaega lisaks krohvi paksusele enim krohvi koostis, roomati olemasolu ja puidukiu suund. Paksemate krohvikihide korral mõjutab söestumise algusaega lisaks krohvi paksusele enim puidukiu suund. Pikikiudu hakkab puit söestuma ristikiust u 5 min hiljem.

Kaitsetegurite kõikumine on suur, mis võib peamiselt olla tingitud puidu enda omadustest, kuna söestumise algusajad näitasid head kokkulangevust. Puidukiu suund mõjutab puidu söestumist. Pikikiudu söestub puit ristikiust aeglasemalt tõenäoliselt vee aurustumise protsesside erinevuse tõttu.

Järgnevalt on esitatud ettepanekud lubikrohvi kaitsevõime arvutamiseks ristikiudu puidu puhul. Pikikiudu katsete arv oli väike ja seetõttu nende arvutusvalemeid esitatud ei ole, lisaks kaitsetegurite kõikumine oli suur.

Söestumise algusaeg t_{ch}

Ristikiudu t_{ch} [min] leidmiseks on soovitatav kasutada järgnevat lineaarset seost, mis põhineb ristikiudu 43 katsel ja on illustreeritud *Joonis 4.9*:

$$t_{ch} = 1,4 \cdot h_p - 6,2$$

kus h_p on lubikrohvi paksus mõõdetuna puidu pinnalt [mm].

Kaitsetegur k_2

Ajavahemikus $t_{ch} \leq t < t_f$ on ristikiudu k_2 leidmiseks soovitatav kasutada järgnevat lineaarset seost, mis põhineb ristikiudu 32 katsel ja on illustreeritud *Joonis 4.13*:

$$k_2 = 0,93 - 0,007 \cdot h_p$$

kus h_p on lubikrohvi paksus mõõdetuna puidu pinnalt [mm].

5 EDASISED UURINGUD

Lubikrohvi tulepüsivuse omadusi on soovitatav edasi uurida. Katsetulemuste usaldusväärsuse tõstmiseks tuleks suurendada lubikrohvi eksperimentaalset katseandmete baasi.

Antud töö hõlmas Eesti turul müüdavaid lubikrohve. Katsetulemuste standardiseerimiseks/valideerimiseks Euroopas tuleks uurida ka teiste riikide lubikrohvide tulepüsivust.

Tuleks uurida krohvi tiheduse mõju tulepüsivusele ja lubikrohvi tõrketekkeagega t_f ning erinevaid krohvikandjaid. Lisaks sellele tuleb põhjalikumalt uurida puidu söestumist pikikiudu krohvikihhi taga.

Krohvide tulepüsivusomaduste määramine peaks viima nende termomodelleerimiseni.

Peatükis 4.3 vaadeldi puidu söestumist kaitsekihi all lineaarselt. Katsed koonuskuumutiga võivad viidata puidu mittelineaarsele söestumisele. *Joonis 4.10* ja *4.11* on lühema söestumisaja puhul söestumiskiirus $\beta_{0,2}$ väiksem kui pikema söestumisaja puhul (vrd *Joonis 4.11* kõveraid *L.20* ja *L.30*). Soovitatav on analoogselt uuringule [38] uurida lubikrohviga kaetud puidu söestumist koonuskuumuti all, kui sama krohvikihhi paksuse juures söestumisajad erinevad. Vaadelda, kas seos söestumissügavuse ja söestumisaja vahel on lineaarne. Samuti teha võrdluskatsed kaitsmata puiduga.

6 KOKKUVÕTE

Antud töös uuriti lubikrohviga kaitstud puidu söestumist. Töö eesmärk oli leida arvutusvalemid puidu söestumise algusaja t_{ch} ja lubikrohvi kaitseteguri k_2 määramiseks. Tulekatsed teostati koonuskuumutiga (ISO 5660-1) [35]. Kokku tehti lubikrohviga 64 katset. Lisaks tehti võrdluseks 12 katset savikrohviga ja 4 katset kipslaadiga.

Antud töös oli katsetatavaks puiduks valitud harilik kuusk (*Picea abies*). Puidust katsekehade paksused olid valitud 50 mm ja 100 mm. Töös uuriti puidu paksuse mõju söestumiskiirusele. Lisaks uuriti puidukiu suuna mõju puidu söestumisele. Osade katsekehade puhul kasutati puidu ja krohvi vahel roomatti. Eesmärk oli uurida roomati mõju lubikrohvi tulekaitsevõimele.

Magistritöös katsetati nelja Eesti turul levinumat lubikrohvi (krohvid A, B, C ja D). Krohvikihi paksused varieerusid vahemikus 10...40 mm. Krohvid A, B ja C sisaldasid liiva terasuurusega 0...4 mm ning krohv D terasuurusega 0...1 mm. Lisaks sisaldas krohv D kuni 5% tsementi. Krohvide A ja B tootjapoolne tihedus oli 1700 kg/m³ ning krohvidel C ja D 1400...1450 kg/m³.

Katse tähelepanekutest ja katsetulemustest võib järeldada järgnevat:

- 1) tulekahjuolukorras lubikrohv ei põle;
- 2) leegi olemasolul värvub krohv mustaks, ilma leegita krohv värvi ei muuda;
- 3) krohvi jahutamisel veega laguneb krohv kihtide puutepinnalt;
- 4) kuni 5% tsemendisaldus krohvis ei mõjuta märkimisväärselt krohvi tulekaitsevõimet;
- 5) krohvipraad kuni 1 mm ei mõjuta märkimisväärselt lubikrohvi käitumist tulekahjus;
- 6) erinevate krohvide koostis, roomati ja mikropragude olemasolu mõjutavad puidu söestumist rohkem õhemate krohvikihide puhul ning vähem paksemate krohvide puhul;
- 7) puidu söestumist krohvi taga mõjutab puidukiu suund. Pikikiudu hakkab puit söestuma hiljem kui ristikiudu ja söestumiskiirus on võrreldes ristikiuga sama krohvikihi paksuse juures väiksem;
- 8) 100 mm puidu paksusega katsekehad hakkasid keskmiselt 4 min varem söestuma kui 50 mm puidu paksusega katsekehad. Tõenäoliselt põhjustas erinevuse puidu aastaringide tihedus või soojuse teistsugune ümberjaotumine puidus kui 50 mm puidu korral;

- 9) roomatiga lubikrohvi puhul hakkasid katsekehad varem söestuma kui roomatita lubikrohvi puhul. Roomatt vähendab lubikrohvi paksust ja seeläbi krohvi tulekaitsevõimet puidule. Lisaks on roomatt põlev materjal ja soodustab puidu söestumist;
- 10) võrreldes kipsplaadiga algab sama krohvikihi paksuse korral lubikrohvi taga söestumine varem, kuid söestumine on aeglasem. Võrreldes savikrohviga algab lubikrohviga kaitstud puidu söestumine hiljem.

Lubikrohviga kaitstud puidu söestumise algusaja t_{ch} ja lubikrohvi kaitseteguri k_2 leidmiseks on käesolevas magistritöös pakutud välja arvutusvalemid sõltuvalt krohvikihi paksusest h_p .

Katsetulemuste standardiseerimiseks/valideerimiseks Euroopas tuleks suurendada lubikrohvi eksperimentaalset katseandmete baasi ja uurida teiste riikide lubikrohvide tulepüsivust.

7 ABSTRACT

This study focused on the charring performance of timber protected with lime plaster. The aim was to determine the start time of charring of timber t_{ch} and the protection factor k_2 of lime plaster. The fire tests were performed with a cone heater of a Cone Calorimeter (ISO 5660-1) [35]. A total of 64 tests with lime plaster were performed. In addition 12 tests with clay plaster and 4 tests with gypsum plasterboard were performed.

The fire tests performed in this study were carried out with spruce (*Picea abies*). Timber specimens of 50 mm and 100 mm in thickness were selected to investigate their charring performance. In addition, the effect of timber grain direction to the charring performance was investigated in this study. Some specimens were covered with reed mat between timber and plaster to investigate its effect on the fire resistance of lime plaster.

Four most common lime plasters (plasters A, B, C and D) used in Estonian market were examined in this study. The thicknesses of the plaster layers varied between 10 to 40 mm. Plasters A, B and C contained sand with a grain size of 0-4 mm and plaster D with a grain size of 0-1 mm. In addition, plaster D contained up to 5% cement. The density of plasters A and B by the manufacturer was 1700 kg/m³ and for plasters C and D 1400-1450 kg/m³.

The following conclusions can be drawn from the test observations and results:

- 1) in the event of fire, lime plaster does not burn;
- 2) in the presence of a flame the plaster turns black, without a flame the plaster does not change colour;
- 3) when the plaster is cooled down with water, the plaster breaks from the contact surface of the plaster layers;
- 4) up to 5% cement content in plaster does not show an effect on the fire protective performance of plaster;
- 5) cracks in plaster up to 1 mm do not significantly affect the behavior of lime plaster in fire;
- 6) the composition of plasters and the presence of micro-cracks affects more thinner plasters than thicker plasters;
- 7) grain direction of wood affects the charring of timber behind plaster. For the same plaster thickness, charring starts later and the charring rate is slower in the longitudinal grain direction compared to radial grain direction;

- 8) 100 mm timber specimen started to char 4 minutes earlier, in average, compared to 50 mm timber specimen. The difference was probably due to the difference in density of annual rings or different heat transfer with thicker timber specimen;
- 9) timber protected with lime plaster and covered with reed mat started to char earlier than timber without reed mat. Reed mat reduces plaster thickness and thus the fire protection ability of plaster. In addition, reed mat is a combustible material and evokes the charring of timber;
- 10) compared to gypsum plasterboards with the same thickness as lime plaster, the start time of charring with lime plaster is shorter, but charring is slower. Compared to clay plaster, the charring of timber starts later with lime plaster.

Equations depending of the plaster thickness h_p have been proposed in this study to calculate the start time of charring t_{ch} and the charring rate k_2 for timber structures protected with lime plaster.

In order to standardize/validate the test results in Europe, the experimental database of lime plasters should be increased and the fire resistance of lime plasters from other countries should be investigated.

KASTUTATUD KIRJANDUS

- [1] Östman, B., Mikkola, E., Stein, R., König, J. and others. (2010) Fire safety in timber buildings – Technical guideline for Europe. SP report 2010: 19. SP Technical Research Institute of Sweden: Stockholm, Sweden.
- [2] EN 13501-1:2019 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- [3] EN 13501-2 Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- [4] EN 1995-1-2:2004 Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- [5] EN 1363-1:2020 Fire resistance tests - Part 1: General requirements. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- [6] ISO 834-1 (1999) Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. International Organization for Standardization: Genève, Switzerland.
- [7] Vassart, O., Zhao, B., Cajot, L. G., Robert, F. and others. (2014) Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design. Publications Office of the European Union: Luxembourg.
[DOI:10.2788/85432](https://doi.org/10.2788/85432)
- [8] (2016) Design of Timber Structures. Volume 1. Swedish Wood: Stockholm, Sweden.
- [9] Blass, H. J., Aune, P., Choo, B.S., Görlacher, R. and others. (1995) Timber Engineering STEP 1. Centrum Hout: The Netherlands.
- [10] Bartlett, A. I., Hadden, R. M., Bisby, L. A. (2018) A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. *Fire Technology*, volume 55, issue 1, January 2019, pages 1–49.
- [11] Meriloo, J. (2004) Lubimõrdist ja -krohvist läbi ajaloo. Muinsuskaitseamet, Tallinn, Eesti. [Online]
<https://www.digar.ee/arhiiv/et/raamatud/59800> (13.06.2021)
- [12] A Brief History of (Lime) Plasters. [Online]
<https://www.coreconservation.co.uk/why-roman-lime-plasters/> (20.07.2021)
- [13] Chorlton, B., Gales, J. (2020) Fire performance of heritage and contemporary timber encapsulation materials. *Journal of Building Engineering*, volume 29, May 2020, article 101181.
[DOI:10.1016/j.job.2020.101181](https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101181)

- [14] Jürgenson, L. (1939) Tulekindlatest tarindusviisidest. Tallinna Tehnikaülikool: Tallinn, Eesti.
- [15] Kaila, P. (1997) Majatohter II osa. Ehitame: Tallinn, Eesti.
- [16] Jürgenson, L. (1949) Elamuehitus I. Teaduslik Kirjandus: Tartu, Eesti.
- [17] Tooming, K. Lubi I. Ajalugu, valmistamine ja kasutamine. Muinsuskaitseamet: Tallinn, Eesti. [Online]
<https://www.muinsuskaitseamet.ee/et/lubi-i-ajalugu-valmistamine-ja-kasutamine-0> (12.06.2021)
- [18] Åkesson, K. (2003) Lubimört I. ECS-Teknik AB: Rootsi.
- [19] Brito, J., Ball, R. J., Allen, G. C. and others. (2013) Microstructural Changes of Lime Putty during Aging. *Journal of Materials in Civil Engineering: volume 25, October 2013, issue 10, pages 1524-1532.* DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000687
- [20] Balksten, K. (2007) Traditional Lime Mortar and Plaster. Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden.
- [21] Setina, J., Vitina, I., Gulbe, L. (2017) The influence of cement on properties of lime mortars. *Elsevier Procedia Engineering: volume 172, 2017, pages 325-332.*
- [22] EN 13914-2:2016 Design, preparation and application of external rendering and internal plastering - Part 2: Internal plastering. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.
- [23] Safrani traditsioonilise lubikrohvi tootejuhend. [Online]
https://static1.squarespace.com/static/5044730ee4b0991b726b4df3/t/5714db4820c647082b835048/1460984648637/Traditsiooniline+lubikrohv+_2015_.pdf (20.07.2021)
- [24] Sakreti traditsioonilise lubikrohvi HML-4 tootejuhend. [Online]
<http://www.sakret.ee/product/hml-4-traditsiooniline-lubikrohv/> (20.07.2021)
- [25] UKU lubi-aluskrohvi tootejuhend. [Online] <https://uku.eu/wp-content/uploads/2021/03/Lubi-0-4.pdf> (20.07.2021)
- [26] Despotou, E., Shtiza, A., Schlegel, T., Verhelst, F. (2014) Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars. *9th International Masonry Conference: 7-9 July 2014, Guimarães, Portugal.*
- [27] Sakreti traditsioonilise lubikrohvi HML-4 toimivusdeklaratsioon. [Online]
<http://www.sakret.lv/wp-content/uploads/2015/08/HML-4-toimivusdeklaratsioon.pdf> (20.07.2021)
- [28] Pachta, V., Triantafyllaki, S., Stefanidou, M. (2018) Performance of lime-based mortars at elevated temperatures. *Elsevier Construction and Building Materials: volume 189, November 2018, pages 576-584.*
- [29] Wachtling, J., Hosser, D., Zehfuß, J. (2013) Fire protection of multi-storey straw bale buildings. Technische Universität Braunschweig: Braunschweig, Germany

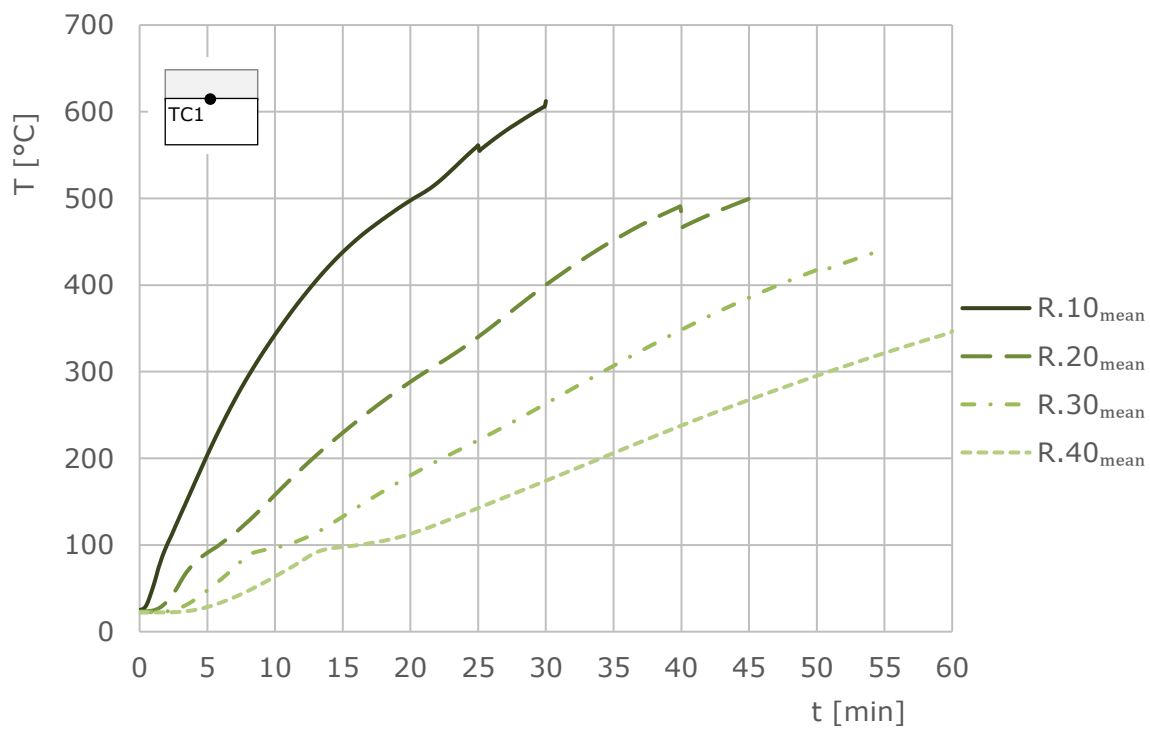
- [30] Schmid, J. (2014) Estimation of the fire protection ability of plaster in a historic building – Stockholm central station. SP Technical Research Institute of Sweden: Stockholm, Sweden.
- [31] Liblik, J. (2019) Test Report BS201905
- [32] Liblik, J. (2019) Test Report BS201902
- [33] Östman, B. A.-L., Tsantaridis, L. D. (1998) Charring of Protected Wood Studs. *Fire and Materials: volume 22, March/April 1998, issue 2, pages 55-60.*
- [34] Tiso, M. (2014) Charring behavior of cross laminated timber with respect to the fire protection. SP Technical Research Institute of Sweden: Stockholm, Sweden.
- [35] ISO 5660-1 Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate. International Organization for Standardization: Genève, Switzerland.
- [36] Liblik, J. (2015) Protective effect of clay plaster for the fire design of timber structures. Tallinna Tehnikaülikool: Tallinn, Eesti.
- [37] Liblik, J. (2019) Test Report 5P08165
- [38] Xu, C., Chen, L., Harries, K. A., Zhang, F. and others. (2015) Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Elsevier Construction and Building Materials: volume 96, October 2015, pages 416-427.*
- [39] Tsantaridis, L. D. (2003) Reaction to fire performance of wood and other building products. KTH – Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden.
- [40] Mikkola, E. (1991) Charring of Wood Based Materials. *Fire Safety Science 3: 8-12 July 1991, pages 547-556. DOI:10.3801/IAFSS.FSS.3-547*
- [41] Liblik, J., Nurk, M., Just, A. The contribution of lime plaster to the fire design of timber structures. *Fire and Materials: special issue 2021. [manuscript currently in process, to be published in 2021]*
- [42] Liblik, J., Just, A., Küppers, J. (2020) Properties of clay plaster for the fire design of timber structures. *LEHM 2020 - International Conference on Building with Earth: Germany.*
- [43] EN 520:2005 Gypsum plasterboards - Definitions, requirements and test methods CONSOLIDATED TEXT. European Standard. European Committee for Standardization, Brussels.

LISAD

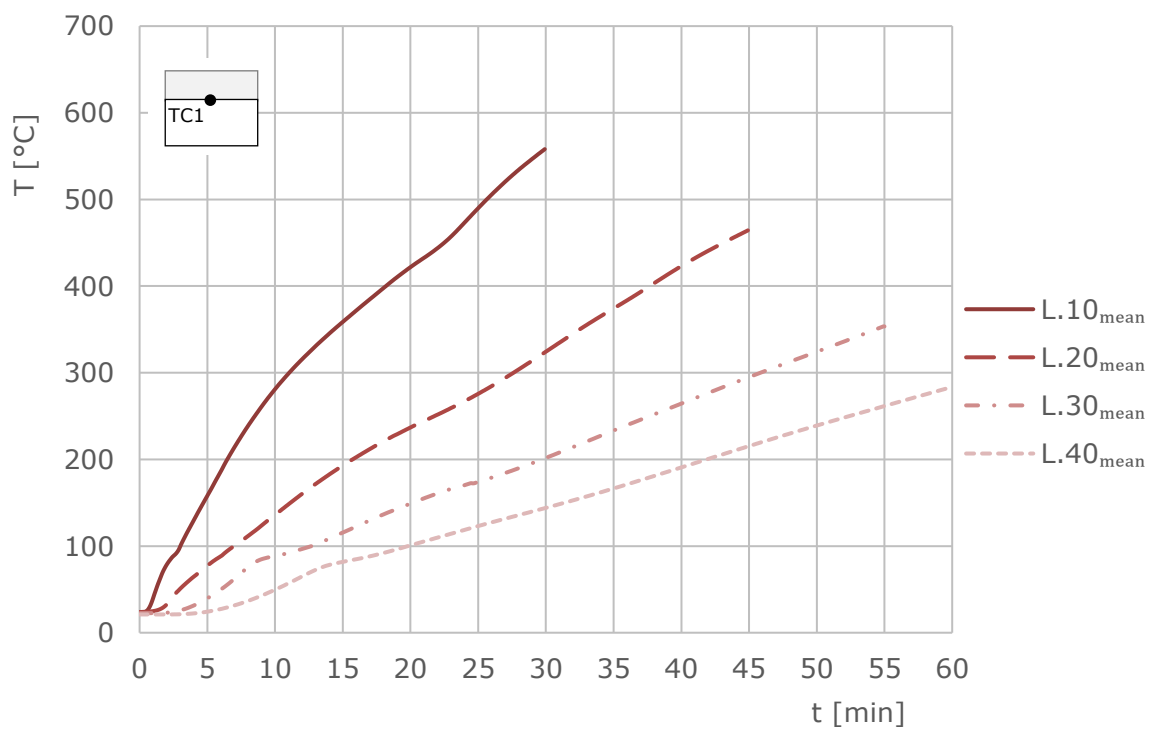
LISA A



Foto A. 1 Lubikrohvi katsekehad pärast katset.



Joonis A.1 Lubikrohviga kaitstud puidu keskmised temperatuurikõverad ristikiudu.

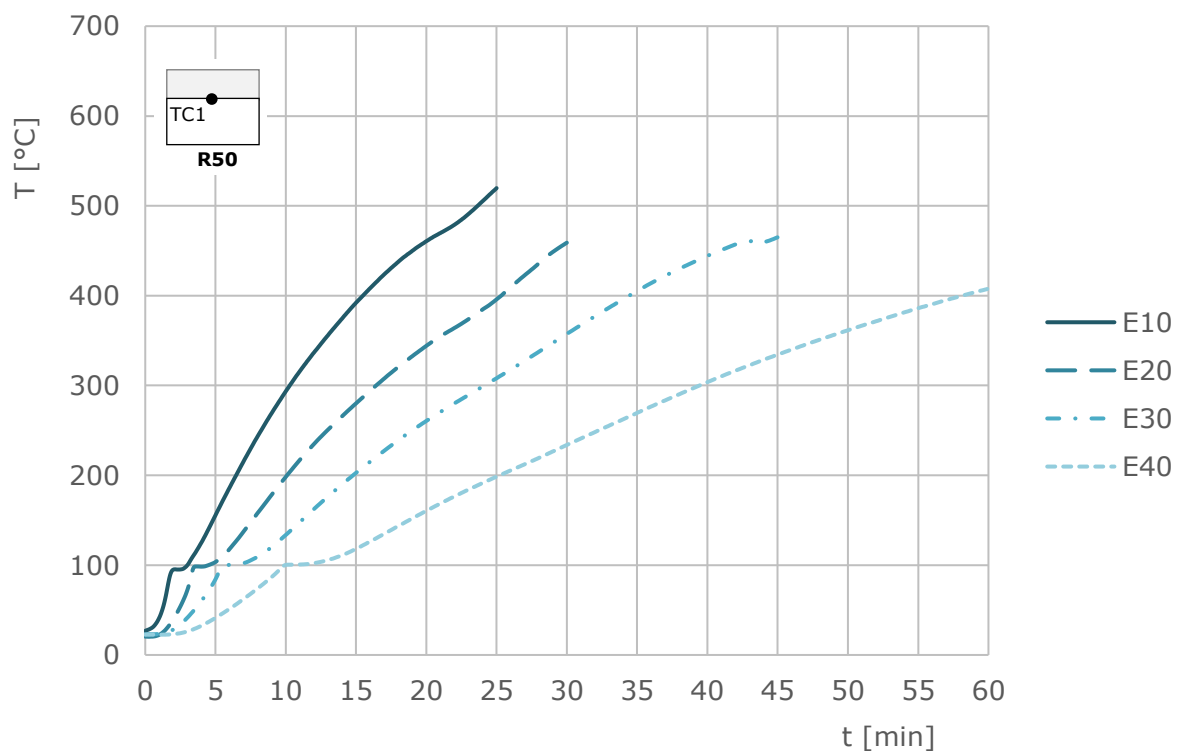


Joonis A.2 Lubikrohviga kaitstud puidu keskmised temperatuurikõverad pikikiudu.

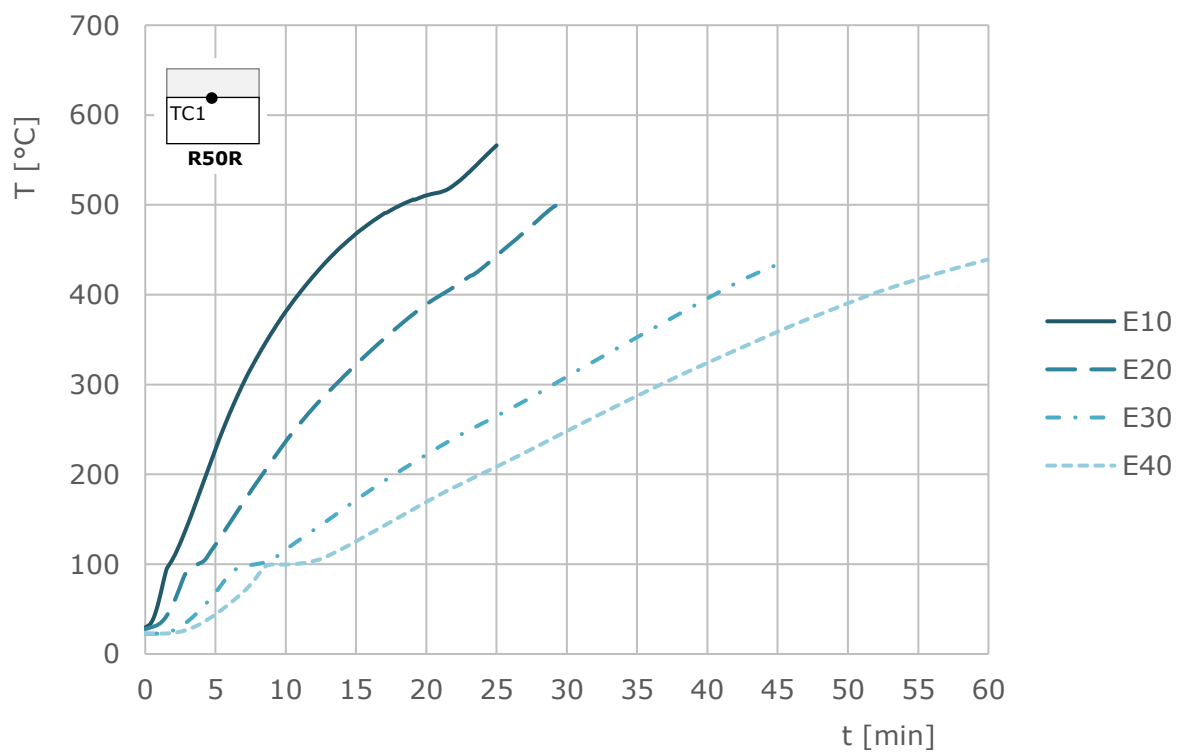
LISA B



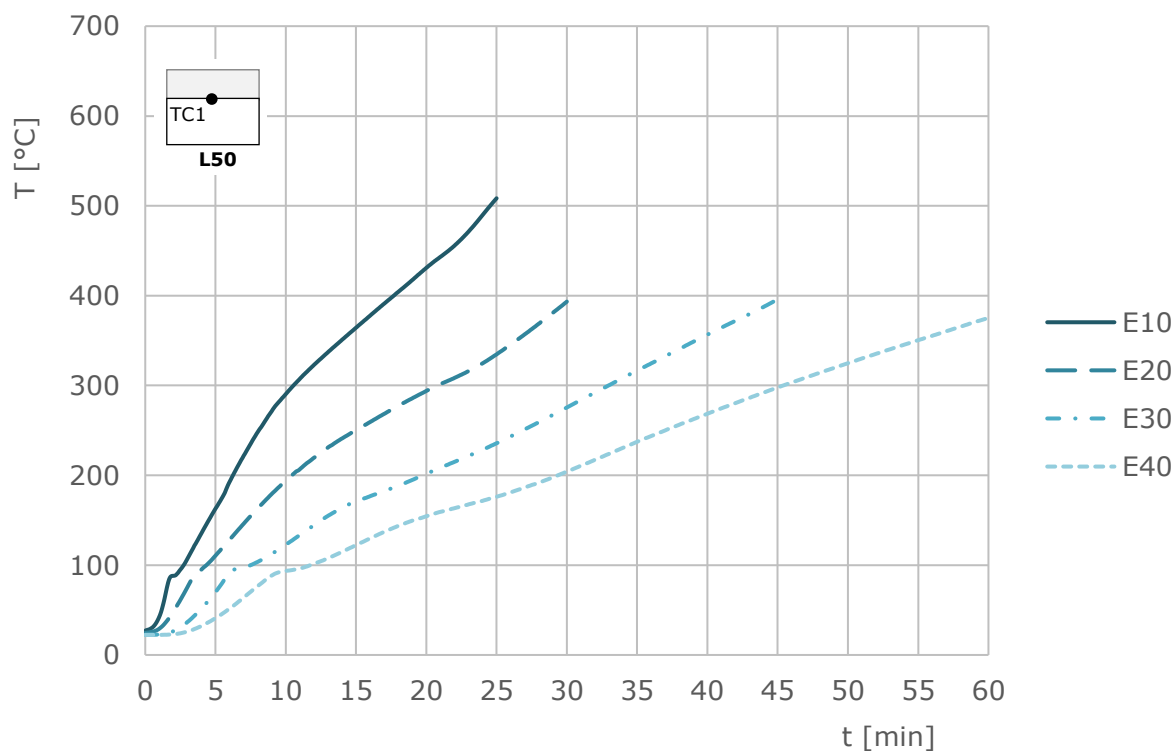
Foto B.1 Savikrohvi katsekehad enne ja pärast katset.



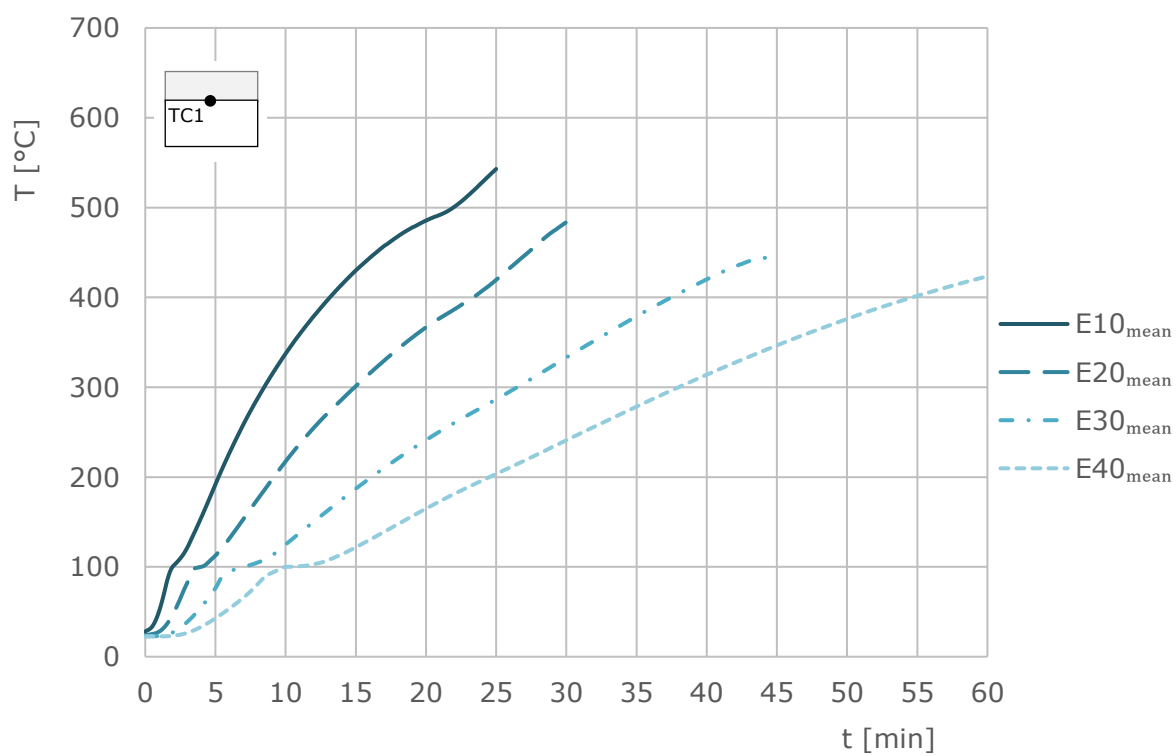
Joonis B.1 Temperatuuri tõus 10...40 mm savikrohvi taga, puit ristikiudu 50 mm.



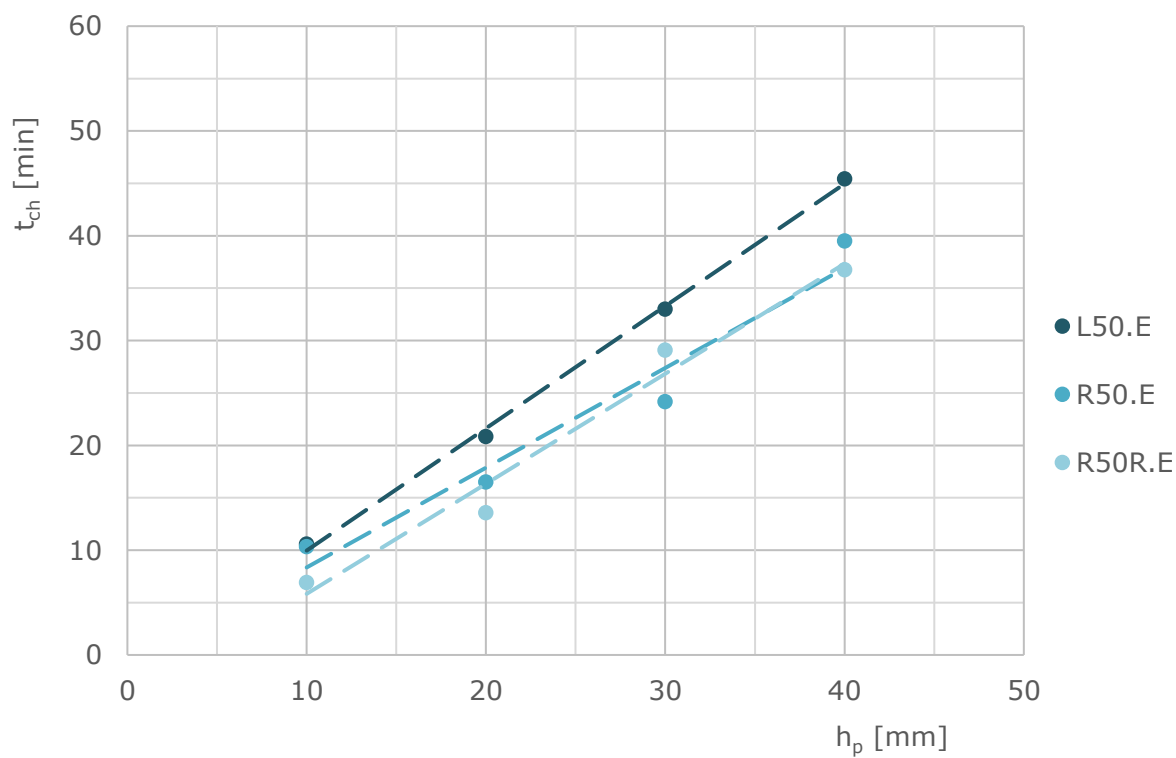
Joonis B.2 Temperatuuri tõus 10...40 mm savikrohvi taga, puit ristikiudu 50 mm roomatiga.



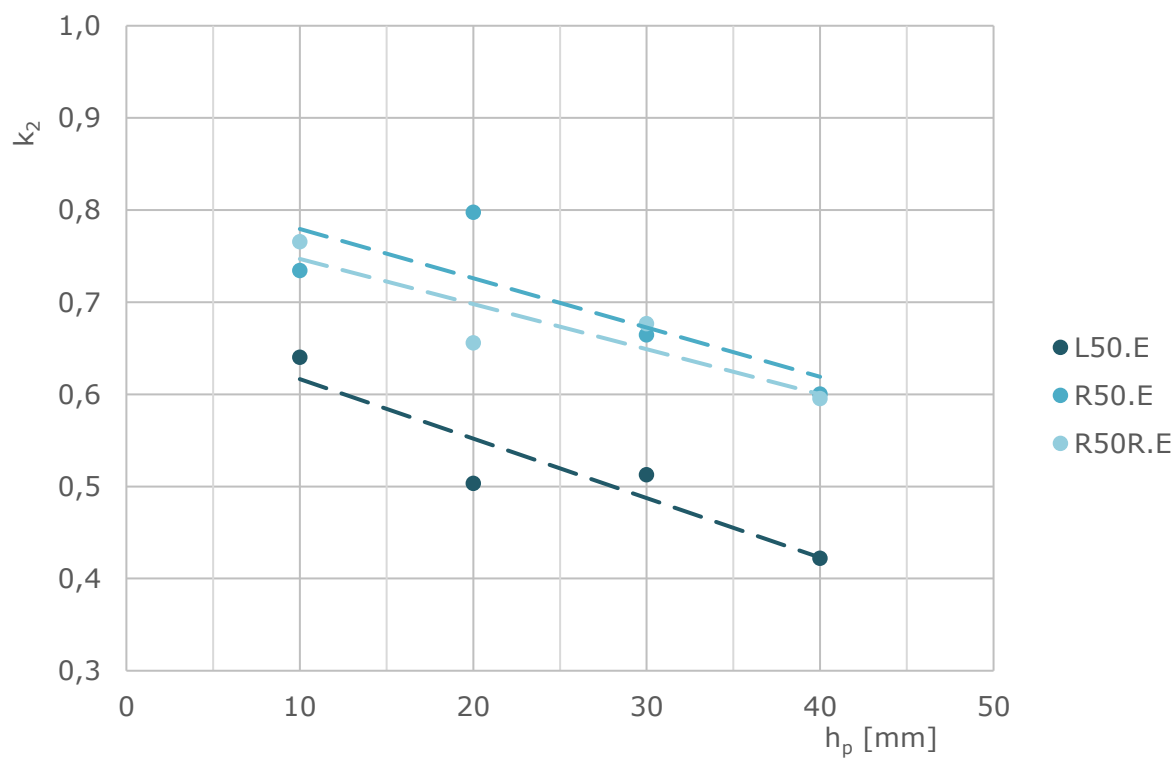
Joonis B.3 Temperatuuri tõus 10...40 mm savikrohvi taga, puit pikikiudu 50 mm.



Joonis B.4 Savikrohviga kaitstud puidu keskmised temperatuurikõverad ristikiudu.



Joonis B.5 Savikrohviga kaitstud puidu söestumisaja algus sõltuvalt puidukiu suunast või krohvikandja olemasolust.

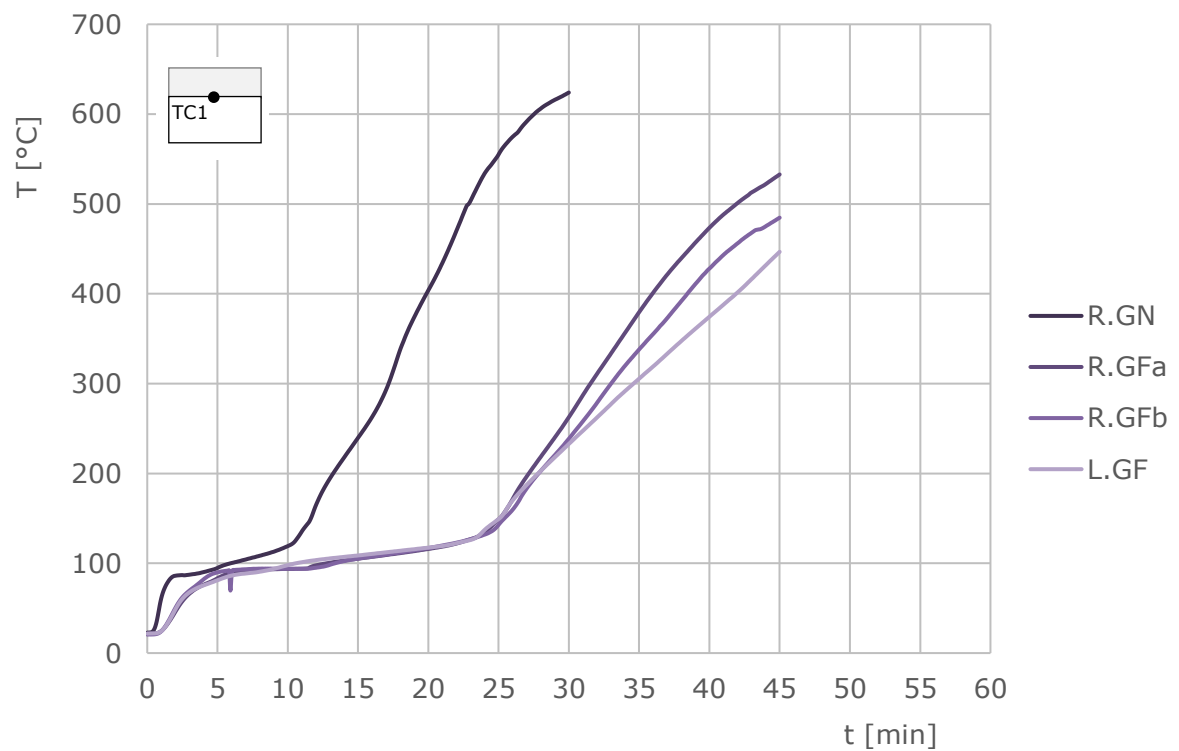


Joonis B.6 Keskmised savikrohvi kaitsetegurid sõltuvalt puidukiu suunast või krohvikandja olemasolust.

LISA C



Foto C.1 Kipsplaadi katsekehad enne ja pärast katset.



Joonis C.1 Kipsplaadiga kaitstud puidu temperatuurikõverad risti- ja pikikiudu.