EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Georg Muda

KOLDEMATERJALIDE SOOJUSTEHNILINE UURING

HEAT TECHNICAL STUDY OF FIREPLACE MATERIALS

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: lektor Mart Hovi, MSc

lektor Külli Hovi, MSc

Tartu 2017

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences
Tehnikainstituut
Institute of Technology

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Georg Muda		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Koldematerjalide soojustehniline uuring			
Lehekülgi: 39	Joonised: 13	Tabelid: 7	Lisasid: 1
Osakond: Energeetika osakond Uurimisvaldkond: 4.17 Energeetikaalased uuringud, T140 Energeetika Juhendaja(d): Mart Hovi, Külli Hovi Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2017			

Bakalaureusetöö peamiseks eesmärgiks on võrrelda erinevate koldematerjalide soojustehnilisi ja füüsikalisi näitajaid. Täiendav eesmärk on uurida Eestis väljatöötatud uut koldeelementi.

Töös analüüsitakse koldematerjalide soojuspaisumist, soojusmahtuvust, survetugevust ja tihedust. Statistiliselt leiti parameetrite vahelised seosed. Teema on aktuaalne, sest materjali tehnilised omadused on olulised, võimaldamaks teha täpseid arvutusi, millele toetudes saab luua efektiivsemaid ahjusid.

Suures plaanis jaotub töö kaheks osaks - teoreetiliseks ja eksperimentaalseks. Teoreetilises osas analüüsitakse ahjude arengut ja materjalide kasutamist, tuginedes direktiividele ja erialasele kirjandusele. Eksperimentaalne osa põhineb katsekehadega tehtud katsetel, mille tulemusena leiti materjalide omadused. Töös kasutati voltmeetrit, ahju P330, digitaalset nihikut, ahju CPR, elektroonilist kaalu ja hüdraulilist survestendi.

Märksõnad: Koldematerjalid, kolle, ahi, soojustehnika, koldeelement

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences
Tehnikainstituut
Institute of Technology

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor`s Thesis	
Author: Georg Muda		Speciality: Engineering	
Title: Heat Technical Study of Fireplace Materials			
Pages: 39	Figures: 13	Tables: 7	Appendixes: 1
Department: Energy Engineering Field of research: 4.17 Energetic Research, T140 Energy research Supervisors: Mart Hovi, Külli Hovi Place and date: Tartu 2017			

Bachelor's primary purpose is to compare the different materials of the furnace, and the physical characteristics in heat engineering. Another objective is to study a new furnace unit developed in Estonia.

Study analyses the furnace materials, thermal expansion, heat capacity, compressibility and density. Statistical links were found between the material parameters. The subject is topical because of the technical characteristics of the material are important to enable to make precise calculations upon which more efficient stoves could be built.

Study is divided into two parts - theoretical and experimental. Theoretical part analyses the development of the furnaces and the use of materials, on the basis of the directive and the relevant literature. The experimental part is based on tests with specimen, on which material properties were found. During the work, voltmeter, furnace P330, digital calliper, oven CPR, electronic weight and a hydraulic press were used.

Keywords: Furnace materials, furnace, oven, heat engineering, furnace element

SISUKORD

SISSEJUHATUS 6
1. AHIKÜTE 7
1.1 Ahjude areng 7
1.1.1 Pottsepaahi 7
1.1.2 Moodulahi 8
1.2 Pottsepatööde materjalid 8
1.3 Testahi 9
1.4 Tulevik Eesti ahju ehituses ehk Standard EN 15544 10
2. Mõõtmismetoodika ja kasutatud seadmed 11
2.1 Mõõtmismetoodika 11
2.1.1 Katsekeha mõõtmete määramine 11
2.1.2 Materjali kaalumine 12
2.1.3 Soojuspaisumise määramine 12
2.1.4 Soojusmahtuvuse määramine 13
2.1.5 Survekatse 14
2.2 Statistilise analüüsi meetodid 17
3. TESTITUD MATERJALID 18
4. TULEMUSED 19
4.1 Soojuspaisumine 19
4.2 Tihedus 19
4.3 Soojusmahtuvus 22
4.4 Survekatse 25
5. SOOVITUSED UURINGUTE JÄTKAMISEKS 30
5.1 Katsekehade standard 30
5.2 Poorsus 30
5.3 Veeimavus 30
5.4 Soojusjuhtivus 31
5.5 Termošokk 32
KOKKUVÕTE 33
KASUTATUD KIRJANDUS 34
LISAD 37
LISA 1. Tabel kõigi teostatud mõõtmistega 38

TÄHISED JA LÜHENDID

A – võimsus, W

c – erisoojus, J/(kg·K)

C – soojusmahtuvus, J/ºC

F_s – proovikeha survepind, mm^2

g_{imm} – materjali mass veega immutatult, kg

g_{kuiv} – kuiva materjali mass, kg

k_e – standardproovikeha kuju ja suuruse erinevust väljendav koefitsent

m – mass, kg

M – vee mass, kg

p' – summaarne maht absoluutsuurusena

P_{maks} – purustav survejõud, N/mm^2

Q – soojushulk, J

Q_a – algses kehas salvestunud soojushulk, J

Q_s – soojas kehas salvestunud soojushulk, J

R_{surve} – korrigeeritud surve standardile 150mm·150mm·150mm kuubile, N/mm^2

t_0 – algne temperatuur, °C

V_{br} – loomuliku struktuuriga materjali ruumala, kg/m^3

V_n – aine ruumala, kg/m^3

γ – erimass, kg/m^3

δ – materjali paksus, m

Δt – temperatuuri muutus, °C

λ – materjali soojusjuhtivus , W/(m·K)

φ – soojusvool, W/m^2

SISSEJUHATUS

Töö annab ülevaate uue koldeelemendi materjali omadustest võrreldes teiste kasutatavate materjalidega. Peamine erinevus teistest materjalidest on madal primaarenergia kulu tootmisel, mis tuleneb materjali mitte põletamisest. Töös võrreldakse koldematerjalide soojuspaisumist, soojusmahtuvust, survetugevust ja tihedust. Teema on aktuaalne, sest materjali tehnilised omadused on olulised, võimaldamaks teha täpseid arvutusi, millele toetudes saab luua efektiivsemaid ahjusid.

Töö põhieesmärgiks on analüüsida tuntud koldematerjalide soojustehnilisi näitajaid ja võrrelda neid uue koldematerjaliga. Võrreldakse materjalide soojusmahtuvust, soojusjuhtivust, ja soojuspaisumist ning survestendis mõõdetud materjali survetugevust. Võrreldakse mõõtmiste tulemusi koldematerjalidel ja analüüsitakse statistilisi seoseid materjalide omaduste vahel.
Eesmärkide saavutamiseks püstitati järgnevad ülesanded:

- Võrrelda uue materjali soojusmahtuvust katsekehadega, mille andmed on teada.
- Leida materjalide soojuspaisumine 25 °C ja 100 °C vahel.
- Leida materjalide survetugevus toatemperatuuril
- Uurida materjali omaduste vahelisi seoseid
    a. tihedus-survetugevus,
    b. tihedus-soojusmahtuvus

Suures plaanis jaotub töö kaheks osaks - teoreetiliseks ja eksperimentaalseks. Teoreetilises osas analüüsitakse ahjude arengut ja materjalide kasutamist, tuginedes direktiividele ja erialasele kirjandusele. Eksperimentaalne osa põhineb katsekehadega tehtud katsetel, mille tulemusena leiti materjalide omadused. Töös kasutati voltmeetrit, ahju P330, nihikut, ahju CPR, elektroonilist kaalu ja hüdraulilist survestendi.

Tänan juhendajaid Mart Hovi ja Külli Hovi. Lisaks soovin ära märkida Aleksander Ljubajevi firmast OÜ Tuli ja Suits, kelle koostöö osana antud materjale testiti. Krista Lõhmust, kelle kaasabil sai statistiliselt mõõtmistulemusi analüüsitud. Martti-Jaan Miljanit abi eest survekatsetel.

1. AHIKÜTE

1.1 Ahjude areng

Ahjud arenesid välja lahtiselt ruumis paiknenud tulekoldest, millele lisati aegade jooksul servadesse kive. Suurem hüpe ahjude arengus tuli seoses korstna kasutuselevõtuga, mis võimaldas veel rohkem soojust salvestada. Suitsugaasidest prooviti kätte saada võimalikult palju soojust, selleks ehitati pikad lõõrid. Maailma erinevates paikades ja üksteisest sõltumatult on ahjud ajapikku arenenud võrdlemisi sarnaseks. [1]

Eestis võib koldematerjalidest ahjud jagada kahte suurde rühma, milleks on moodulahjud ja eritellimusel ehitatud ahjud. Moodulahju montaaž on kiirem kui muudel meetoditel, kuid ei võimalda erilahendusi ega arvesta konkreetse ruumiga. Eritellimusel ahjude ehitamine võtab kauem aega, kuid võimaldab arvestada ruumi soojustuse, suuruse ja küttepuu pikkusega. Eritellimusel ahju ehitamiseks on vaja väljaõppinud pottseppa, kes oskab projekteerida ahju, millel oleks kõrge kasutegur. Välisviimistluse lahenduste osas on mõlemat ahjutüübil palju võimalusi, mis annavad ahjule omapära, kuid ei aita kaasa kasutegurile.

1.1.1 Pottsepaahi

Eritellimusel ahju ehitamisele eelneb arvutamine, kus võetakse arvesse:

- Ruumi suurus (m^2 ja m^3)
- Seinte/lae soojustus (välisseina soojustusmaterjal, soojustuse paksus (mm), seina konstruktsioon)
- Akende mõõdud ja soojapidavus
- Korstna mõõdud (lõõri mõõdud, korstna tüüp, korstna pikkus ühenduskohast korstnapitsi ülemise servani).
- Ventilatsioonilahendus (sundventilatsioon või mitte).

Paljudele andmetele tuginedes on võimalik luua individuaalseid ahjusid, millel on kõrge kasutegur ja optimaalne väljuva suitsugaasi temperatuur. Suitsugaasi temperatuur on oluline tagamaks ahjus piisavat tõmmet ja kastepunkti väljaviimist korstnast. [2]

1.1.2 Moodulahi

Moodulahi on eelnevalt valmistatud moodulitest monteeritav ahi. Reeglina koosnevad moodulahjud valatud plokkidest, mis tõstetakse üksteise otsa. Moodulahju ehitamiseks ei ole vaja pottseppa, kuid see on ikkagi tungivalt soovituslik, sest ainult pottsepp saab väljastada ahjupassi, milles on ära toodud ahju parameetrid. Ehitamine võtab aega 1-2 päeva. [3]

1.2 Pottsepatööde materjalid

Ahjude ehitamise kohta välja antud kirjandus on tihti aegunud. See tuleneb asjaolust, et raamatute kirjutamine on aeganõudev, mille tõttu ei jõuta anda edasi viimaseid trende ei materjalide ega meetodite osas. Tekkinud on kaks eristuvat koolkonda, millest üks võtab enda nö. pühakirjaks Arvo Veski "Ahjud, pliidid, kaminad" ja teine osa hoiab ennast kursis viimaste materjalide ja meetodite arenguga, et luua puhtama põlemisega ahjusid. [4]

Arvo Veski raamatus öeldakse:
„Tellisahjude, pliitide, korstnate ja lõõride ladumiseks kasutatakse järgmisi materjale:

- Ahjude põhimüüritise, korstnate ja seintes asuvate suitsulõõride, sealhulgas gaasiseadmete lõõride ladumiseks - harilikku savitellist;
- Sisevoodriks - rasksulavat ja tulekindlat tellist;
- Välisvoodriks - ahjupotte, katuse- ja kurdplekki;
- Tuldtõkestavaks isolatsiooniks ja voodri katikuteks - harilikku savitellist, tsement-soojusplaate, savimördis leotatud ehitusvilti, mineraalvatti ja sellest valmistatud plaate. Bituumensideainel mineraalvatt-tooteid tuletõkkeisolatsiooniks kasutada ei tohi."[1]

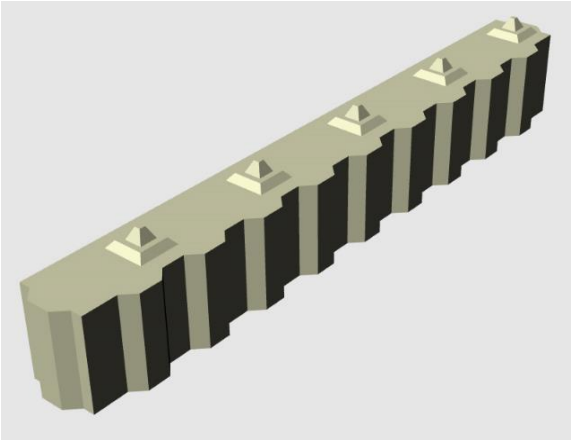
Pottsepamaterjalide arenguga kursis olemine on keerukas, sest igal tootjal on erinevate omadustega materjalid, mida täiustatakse aasta-aastalt. Materjali omadused muutuvad juba väikestest tooraine koguste suhete muutusest. Uute materjalide kasutuselevõtuga ei kao ka vanemad materjalid. Selle põhjuseks on vanemate ahjude parandamine, kus ei ole võimalik kasutada uudsed lahendusi. Restaureerimise koha pealt on vanem kirjandus aga hindamatu, andmaks aimu toonastest ehitusvõtetest.

1.3 Testahi

OÜ Tuli ja Suits koostöös Eesti Maaülikooliga ehitati EMÜ tehnikainstituudi katlalaborisse kolle, mis on joonisel 1. Kolle on projekteeritud võimsusele 60 kW, halupuude kogusele 20 kg, kolde põhjamõõt 0,5·0,45 m. Kolde tüüp on pilukolle, mis tähendab õhu juhtimist põlemistsooni kolde külgedelt ja tagaseinas olevate 6 mm laiuste õhuavade kaudu. Kolde müüritise moodustavad joonisel 2 kujutatud pilukolde moodulid, mille projekteerimisel on arvestatud alljärgnevaid asjaolusid: [5]

- pilude ja kandvate nuppude vahe tagab optimaalse põlemisõhu hulga
- elemendid on sobilikud ahjude ja kaminate kollete ehitamiseks 6-22 kg puidule
- ribitatud pind tagab puidule põlemisõhu juurdepääsu

Joonis 1. OÜ Tuli ja Suits poolt ehitatud testahi Eesti Maaülikooli katlalaboris



Joonis 2. OÜ Tuli ja Suits poolt välja töötatud koldeelemendi joonis [5]

1.4 Tulevik Eesti ahju ehituses ehk Standard EN 15544

Standard kehtestab nõuded kahhelahjude ja krohvitud pinnaga ahjude dimensioneerimiseks, mis põhinevad valmistaja poolt määratud nimivõimsusel. Standardit võib kasutada puuhalgudega köetavate kahhelahjude puhul, kui:

- ühekordne maksimaalne kütuse kogus on 10 kg kuni 40 kg
- salvestuskestus (nimikütteaeg) on 8 h kuni 24 h
- sisemine materjali tihedus on 1750 kg/m³ kuni 2200 kg/m³
- šamoti mahuline poorsus on 18% kuni 33%
- šamoti soojusjuhtivus on 0,65 W/(m·K) kuni 0,90 W/(m·K) (temperatuurivahemiku 20 °C kuni 400 °C puhul)
- külgmise põlemisõhu varustuse sissevoolu kiirus on 2 m/s kuni 4 m/s ja
- madalaima ava kõrgus on vähemalt 5 cm kõrgemal küttekolde põhjast. [6]

Eesti pottsepad käivad ennast täiendamas Kesk-Euroopas, kus ahjude põlemispuhtusele juba pikemat aega rõhku pannakse. Omandatud teadmistele tuginedes tagatakse ehitise tarbitava energiahulga vastavus ehitise asukoha klimaatilistele tingimustele ja otstarbele, mida nõuab ka ehitusseadus [7]. Kahjuks ei käi kõik antud alal töötavad meistrid ennast ehitusmaterjalide tootjate juures täiendamas, mille tõttu jõuavad nendeni uued materjalid ja tehnilised teadmised hilinemisega. [4]

2. Mõõtmismetoodika ja kasutatud seadmed

2.1 Mõõtmismetoodika

Ehitusmaterjalide iseloomustamiseks kasutatakse füüsikalis-mehaanilisi parameetreid. Parameetrite arvuline väärtus, mõõtmed jne. ei ole ainult sõltuvad materjali omadustest vaid ka katsetingimustest ja metoodikast. Sama materjali erinevate metoodikatega testides võivad tulemused tulla oluliselt erinevad, mille tõttu saab võrrelda ainult sama metoodikaga leitud näitajaid. [8]

Ehitusmaterjali, mis on toodetud teatud ajaperioodil või teatud kogusest toorainest nimetatakse partiiks. Liigitamine on vajalik, et anda materjali keskmised näitajad, sest partii siseselt võivad näitajad kõikuda. Juhuslikult võetud proovidega, mis on võetud väljakujunenud meetodi järgi, antakse materjali omaduste kõikumise piirid. [8]

Materjalid koosnevad enamasti mitmest erinevast ainest, mis ei segune omavahel täiesti ideaalselt. Väiksed koostise erinevused materjali osade vahel muudavad materjali omadusi. Mida ebaühtlasem on materjal, seda rohkem proove tuleb testida, et saada usaldusväärsed materjali piirid. Katsetamisel tuleb tähelepanu pöörata keskkonnatingimustele, millest olulisimad on temperatuur ja õhuniiskus. Materjali omaduste määramisel tuleb järgida normatiive, mis kehtestavad proovivõtu- ja katsetingimused. [8]

2.1.1 Katsekeha mõõtmete määramine

Katsekehadele määrati täht ja number, kus materjali tähistas täht ja number viitas katsekeha kordusele. Kõigile katsekehade külgedel märgiti punktid, eristamaks külgi, et mõõtmete määramine tehtaks samade külgede suhtes. Katsekehi mõõdeti kõikide külgede suhtes viis korda, tagamaks mõõtmise täpsust. Viie mõõtmise keskmisena saadi materjali keskmine paksus. Digitaalse nihiku täpsus oli 0,02 mm [9].

2.1.2 Materjali kaalumine

Materjali kaalumiseks kasutati kaalu WLC 6/A2/C/2 vahemikuga 0,1 kuni 6000 grammi [10]. Kaal asetati rõhtsale pinnale ja kalibreeriti nupuga “Cal”, 30 sekundit hiljem alustati kaalumist. Katsekehad kaaluti ükshaaval ja tulemused salvestati.

2.1.3 Soojuspaisumise määramine

Ahjudetailid seotakse omavahel kokku sideainete ja armatuuridega. Sideaine peab olema detailidega kas sama termilise joonpaisumisega või piisavalt elastne, vältimaks detailide vahelisi pragusid [11]. Soojenemisel tahked kehad, vedelikud ja gaasid paisuvad, jahtumisel aga kahanevad. Tahke keha joonmõõtmete suurenemist soojenemisel nimetatakse keha termiliseks joonpaisumiseks, mida väljendatakse harilikult, kas suhtarvuna või millimeetrites 1 m pikkuse kohta.

Ahju ehituseks kasutatavatest materjalides paisuvad kõige rohkem metallid. Soojenemisel 100 °C võrra pikeneb teras 1,1 mm, malm 1,0 mm ja vask 1,7 mm. Tellismüüritis paisub 0,95 mm ühe meetri kohta. Koldes kasutatud materjalide soojuspaisumist peab ahjude konstrueerimisel arvesse võtma. [1]

Soojuspaisumise määramiseks asetati proovikehad ahju KBC G-100/250, mis on seadistatud hoidma 100 °C temperatuuri. Lisaks sai temperatuuri kontrollitud multimeetriga, mille külge oli ühendatud termopaar. Enne mõõtmiste läbiviimist hoiti proove tund aega ahjus, et nad saavutaksid soovitud temperatuuri. Mõõtmised tehti võimalikult kiiresti, et vähendada jahtumisest tekkivat viga.

2.1.4 Soojusmahtuvuse määramine

Tahke keha või vedeliku soojendamiseks kulub seda suurem soojushulk, mida suurem on aine soojusmahtuvus. Temperatuuri tõusuga kasvab aatomite kineetiline energia ja temperatuuri langus vähendab kineetilist energiat. Soojushulk on arvutatav valemiga [12] :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \tag{1}$$

kus m on keha mass

c – aine erisoojus, J/(kg·K)

Δt – temperatuuri muutus, ºC

Soojusmahtuvuseks C nimetatakse aine massi ja erisoojuse korrutist [12] :

$$C = m \cdot c \tag{2}$$

Soojusmahtuvus näitab, kui suur soojushulk tuleb anda kehale, tõstmaks selle temperatuuri ühe kraadi võrra. Soojusmahtuvuse ühik on J/ºC. [11] Temperatuuri erinevused kehade kokkupuutepunktis hakkavad muutuma kokkupuute hetkel, kus kuumem keha annab energiat madalama energia nivooga kehale. Energia jäävuse seadusest tulenevalt on soojema keha poolt antud energia võrdne külmema keha poolt saaduga ehk [12] :

$$Q_a = Q_S \tag{3}$$

$$m \cdot c_K(t_{K0} - t_1) = M \cdot c(t_1 - t_0)$$

$$c_K = \frac{M \cdot c(t_1 - t_0)}{m \cdot (t_{K0} - t_1)}$$

kus Q_a on algse keha soojushulk, J

Q_s – sooja keha soojushulk, J

c_{K-} materjali erisoojus, J/(kg·K)

c – vee erisoojus, J/(kg·K)

t_1 – kehade tasakaalu temperatuur, ºC

t_0 – vee algne temperatuur, ºC

M – vee mass, g

t_{K0} – keha algne temperatuur, ºC

Soojusülekanne peatub kui saabub tasakaalupunkt ehk kehade temperatuurid on võrdsustunud. [12]

Soojusmahtuvuse määramiseks kasutati kalorimeetrit, voltmeetrit koos kahe termopaariga (joonis 3), millest ühega mõõdeti toatemperatuuri ja teisega kalorimeetris oleva vee temperatuuri muutust. Ahjuks kasutati Nabertherm P330 ahju, mille temperatuurivahemik on 30-3000 ºC kraadi [13]. Kivide temperatuuriks valiti 300 ºC kraadi, vastavalt kirjanduses antud temperatuuri vahemikele.

Joonis 3. Voltmeeter Agilent 34972A

2.1.5 Survekatse

Partiivead - keraamilise tellise põletamisahjus ei ole temperatuuri jaotus kunagi ühtlane. Seetõttu on ühes partiis nii alapõletuse kui ka ülepõletusega telliseid. [11]

Survetugevus on kõige sagedamini määratud suurus, sest selle tuginedes leitakse materjali püsivus. Survetugevus määratakse peamiselt hapratel materjalidel nagu looduskivi, keraamikatooted, betoon jms, mille purunemine toimub ilma nähtavate deformatsioonideta. Proovikehadel on kolm peamist kuju: kuup, silinder ja prisma. Kuupide servapikkuseks on ajapikku kujunenud 2,5; 5,0; 7,1; 10; 15; 20; 30 cm. [8]

Katsetamisel tuleb kasutada ainult tasapinnaliste survepindadega proovikehi, millele survejõud jaotud ühtlaselt. Samast materjalist ja survepinnaga katsekehad, mis erineva ainult kuju poolest ei ole võrdse survetugevusega. Survetugevus ei sõltu ainult kujust vaid ka suurusest. Väiksemal proovikehal on suurem survetugevus kui suurel. Seda seletatakse hõõrdejõudude mõjuga. Survepindade vahel tekivad katsetamisel hõõrdejõud, mis on suunatud survepinna keskpunkti. Need samad hõõrdejõud hoiavad materjali koos ega lase materjalil puruneda. [8]

Kui ei saa kasutada nõutud kuju ja suurusega proovikehi, tuleks edaspidi tulemused korrigeerida standardtingimustele vastavaks. Selleks kasutatakse empiirilisi koefitsiente. Materjali standardne survetugevus on väljendatud valemiga“ [8] :

$$R_{surve} = k_e \cdot \frac{P_{maks}}{F_s} \quad (4)$$

Kus R_{surve} – korrigeeritud surve standardsele 150·150·150 mm kuubile

P_{maks} – purustav survejõud, N/mm^2

F_s – proovikeha survepind, mm^2

k_e – standardproovikeha suhtes kuju ja suuruse erinevust väljendav koefitsient

Survekatsel kasutati pressi (tootja *ЗИМ*, mark *ПСУ*-10, number 1487), millega katsekehad purustati (joonis 4). Press oli kalibreeritud 21.12.2016 ja tunnistuse number oli ATLF-16/0672. Katsekeha asetati kahe pinna vahele ja fikseeriti. Masina sisse lülitamisel hakkas näidik liikuma ja peatus kui katsekeha purunes.

Joonis 4. Survestend Eesti Maaülikooli Metsamajas (tootja *ЗИМ*, mark *ПСУ*-10, number 1487)

2.2 Statistilise analüüsi meetodid

Tunnuste normaaljaotust kontrolliti Lillieforsi ja Shapiro-Wilki testidega. Kõigi materjalide tunnused olid normaaljaotusega. Iga materjali puhul arvutati aritmeetiline keskmine, aritmeetilise keskmise viga ja 95% usalduspiirid. Kontrolliti proovikehade ettevalmistamise täpsust. Leiti aritmeetilised keskmised, aritmeetilise keskmise vead ja suhtelised vead protsentides (suhteline viga = 100·keskmise viga / keskmine). Temperatuuri mõju soojuspaisumisele kontrolliti materjalide kaupa t-testiga sõltuvate tunnuste jaoks. Tiheduse ja soojusmahtuvuse ning tiheduse ja survetugevuse vahelise seose leidmiseks kasutati regressioonanalüüsi. Analüüsi eeldusi kontrolliti regressioonmudeli prognoosijääkide graafiku abil, prognoosijäägid olid normaaljaotusega. Materjalide tiheduse ja soojusmahtuvuse võrdlemiseks kasutati Kruskal-Wallise mitteparameetrilist dispersioonanalüüsi ja keskmiste astakute võrdlemist, sest parameetrilise dispersioonanalüüsi eeldused polnud täidetud (rühmadispersioonid polnud võrdsed). Andmete statistiliseks analüüsiks kasutati programmi Statistica 7.1 [14]. Kõigil juhtudel oli olulisuse nivoo $\alpha=0,05$ ehk 5 protsenti.

3. TESTITUD MATERJALID

Katsed tehti kuut liiki koldematerjalidega, mis lõigati 40 mm suurusteks kuupideks (joonis 5). Materjalist lõigati välja just 40·40·40 mm kuubikud, sest ühe materjali lühem külg oli 40 mm. Suurema mõõdu puhul ei oleks olnud võimalik luua ühtse suurusega kuubikujulisi katsekehi.

Joonis 5. Testitud katsekehad

Tabel 1. Katsekehade tähised ja nimetused

Katsekeha tähis	Nimetus	Tihedus kg/dm^3	Survetugevus N/mm^2	Värvus
K	ahjušamott	2,26	39	punakas
L	ahjušamott	1,95	10	kollane
R	šamottplaat Hart Keramik Aglt [15]	1,85±0,1	25	valge
S	ahjutellis	1,89	18	punane
U	uuritav materjal	2,02	25	hallikas
V	ahjušamott	2,11	39	oranž

Kõigil materjalidel jäi mõõtmetel (proovikehade külgede) aritmeetilise keskmise suhteline viga alla poole protsendi. Suurem oli ta materjalidel U ja L, kus viga oli üle ühe protsendi. Tabelis 1 on välja toodud materjalide andmed.

4. TULEMUSED

4.1 Soojuspaisumine

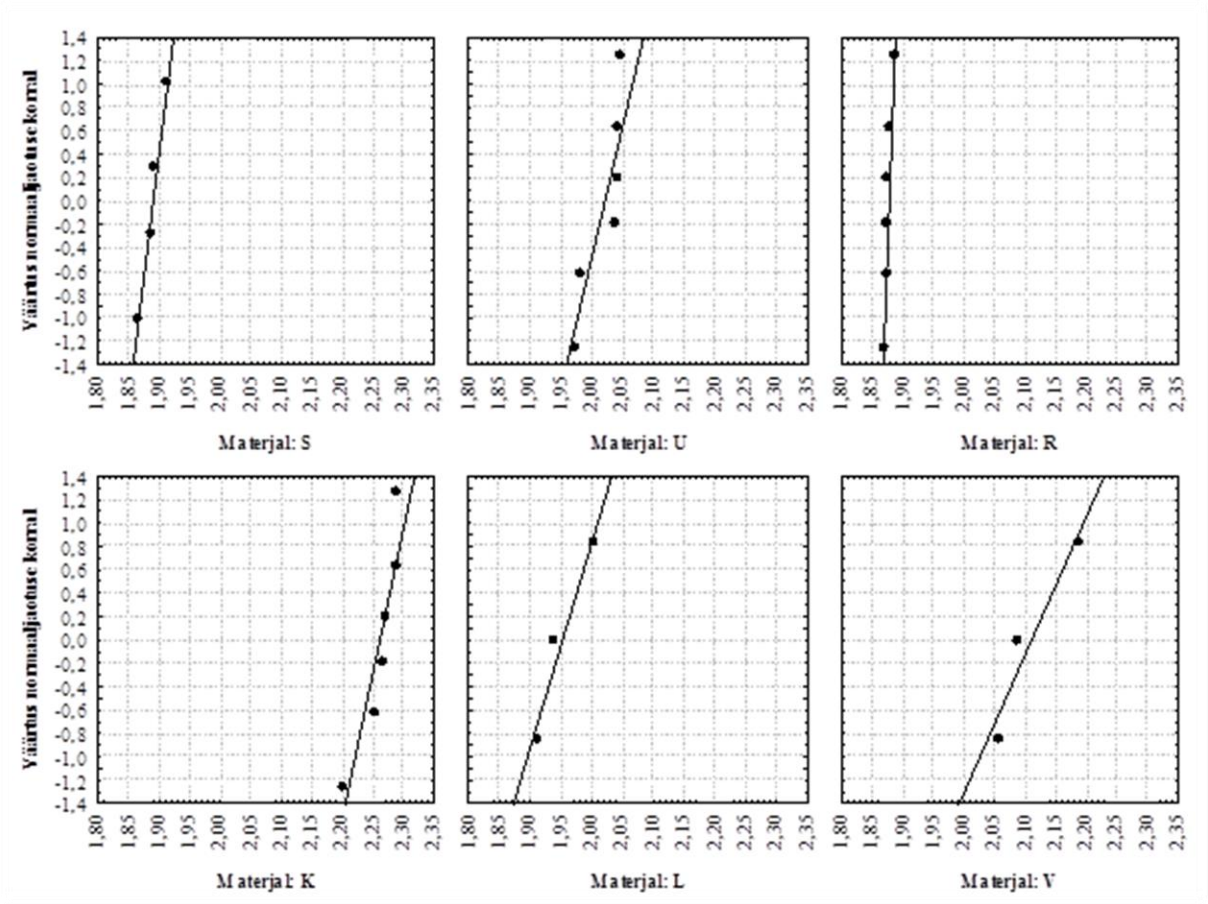
Soojuspaisumist mõõdeti kõigi katsekehade puhul. Toatemperatuurilt 25 °C asetati proovid ahju, mis hoidis 100 °C temperatuuri. Katsete oodatav tulemus oli 0,95 mm paisumist 100 °C kraadi soojenemise kohta ehk antud juhul 0,71 mm meetri kohta, sest temperatuuride vahe oli 75 °C. Antud meetodil ei olnud võimalik leida usaldusväärset seost temperatuuri ja soojuspaisumise vahel, sest mõõtmisviga oli liiga suur. Mõõtmiste põhjal oleks nagu tegemist paisumiste ja kahanemistega. Tabelis 2 on näha kahesuunaline muutus. Seose kinnitamiseks oleks pidanud toimuma ainult paisumine.

Tabel 2. Soojuspaisumise aritmeetilise keskmise suhteline viga (%)

Temperatuur 25 °C			Temperatuur 100 °C			Muutus		
K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3
0,39	0,56	0,30	0,42	0,48	0,32	0,03	-0,07	0,02
1,08	1,13	1,13	1,08	1,11	1,22	0,00	-0,01	0,09
0,23	0,18	0,49	0,26	0,22	0,43	0,04	0,04	-0,06
0,65	0,46	0,94	0,64	0,45	0,93	-0,01	0,00	-0,01
1,14	0,57	2,50	1,01	0,54	2,39	-0,13	-0,03	-0,12
0,77	0,39	1,18	0,71	0,84	1,64	-0,06	0,45	0,46

4.2 Tihedus

Kõigi materjalide tihedused jäid vahemikku 1878 kg/m^3 kuni 2261 kg/m^3. Uuel uuritaval materjalil oli tiheduseks 2,022±0,007 kg/m^3. Kõige suurem oli materjali tihedus proovikehadel K (Tabel 3). Materjalide tihedused olid normaaljaotusega, sest mõõtmiste punktid asetsesid trendijoonte lähedal (joonisel 5).



Joonis 5. Materjalide tihedused olid normaaljaotusega

Tiheduse ja soojusmahtuvuse puhul ei olnud rühmadispersioonid homogeensed. Seega parameetrilise dispersioonanalüüsi eeldused ei olnud täidetud. Materjalide tiheduse võrdlemisel kasutati Kruskal-Wallise mitteparameetrilist dispersioonanalüüsi. Materjal S oli vähima tihedusega ja materjal K suurima tihedusega. Kruskal-Wallise keskmiste astakute võrdlemise testiga saadi usaldusväärne erinevus materjalide S ja K ($p<0,001$) ja materjalide R ja K vahel ($p<0,01$).

Tabel 3. Materjalide tihedused (kg/m^3)

Materjal	Keskmine tiheduse	Katsete arv	Tiheduse viga	Suhteline viga %
S	1890	4	0,010	0,53
U	2022	6	0,014	0,71
R	1878	6	0,002	0,13
K	2261	6	0,013	0,59
L	1953	3	0,027	1,38
V	2111	3	0,039	1,87

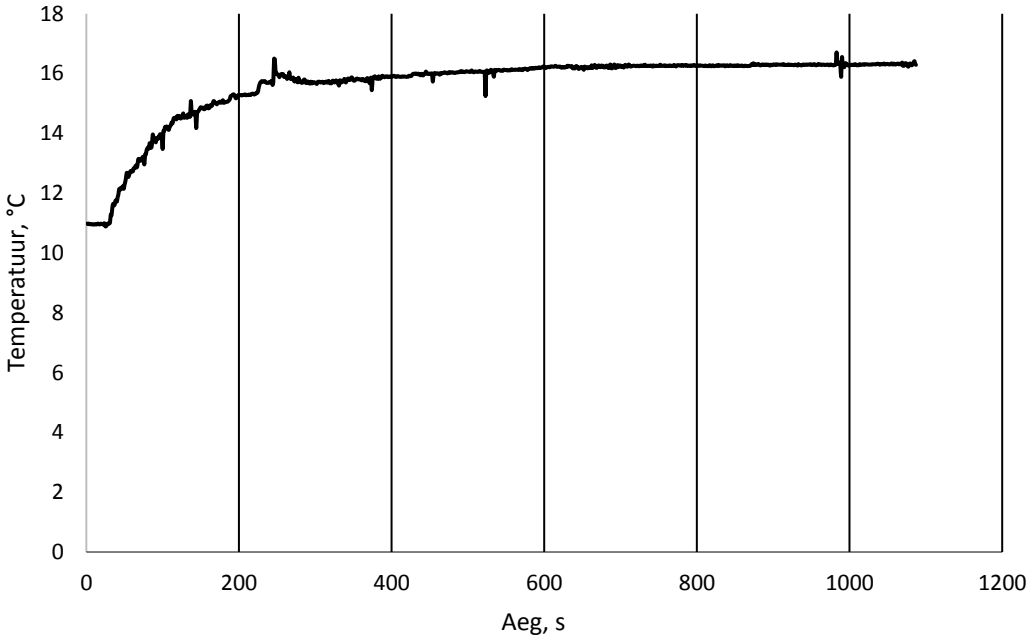
Koldematerjali K tihedus oli usaldusväärselt suurem kui materjalidel S ja R (Tabel 4)

Tabel 4. Koldematerjalide tiheduse võrdlus Kruskal-Wallise testiga. Veergude päises on materjali nime all rühmakeskmine astak. Tabelis on esitatud materjalide võrdlemisel saadud olulisustõenäosused p, erinevus on usaldusväärne kui $p<0,05$

Materjal	S	U	R	K	L	V
	R:7,0000	R:16,167	R:4,6667	R:25,500	R:12,333	R:21,000
S		1,000000	1,000000	**0,007407**	1,000000	0,387864
U	1,000000		0,231897	0,740841	1,000000	1,000000
R	1,000000	0,231897		**0,000173**	1,000000	0,074767
K	0,007407	0,740841	0,000173		0,353963	1,000000
L	1,000000	1,000000	1,000000	0,353963		1,000000
V	0,387864	1,000000	0,074767	1,000000	1,000000	

4.3 Soojusmahtuvus

Soojusmahtuvuse mõõtmisel leiti, et temperatuuri muutumise kiirus oli seda suurem, mida suurem oli temperatuuride erinevus ehk Δt. Temperatuuride vahe vähenemisel aeglustus soojusülekande kiirus katsekehalt vette, mille tõestust näeme jooniselt 6. Joone hüplikud kohad on tingitud vee liigutamisest kalorimeetris, mille tulemusena liikus andur erinevatele kaugustele katsekehast. Kokkuvõttes ei ole see oluline, sest kui katsekeha ja vee temperatuur on ühtlustunud ning kihistumist pole tekkinud, on kogu vesi anumas sama temperatuuriga.



Joonis 6. Katsekeha U3 vette asetamise järel tekkinud vee temperatuuri muutus ajas

Kõigi katsekehade soojusmahtuvuse miinimum oli 85,85 J/ºC ja maksimum oli 139,22 J/ºC. Materjali K soojusmahtuvus oli usaldusväärselt suurem kui materjalil S (Tabel 5).
Materjalide soojusmahtuvuse võrdlemiseks kasutati Kruskal-Wallise keskmiste astakute võrdlemise testi. Leiti usaldusväärne materjalide S ja K soojusmahtuvuse erinevus ($p=0,011$) aga ilmnes ka tendents, et materjali R soojusmahtuvus oli väiksem kui materjalil K ($p=0,054$).

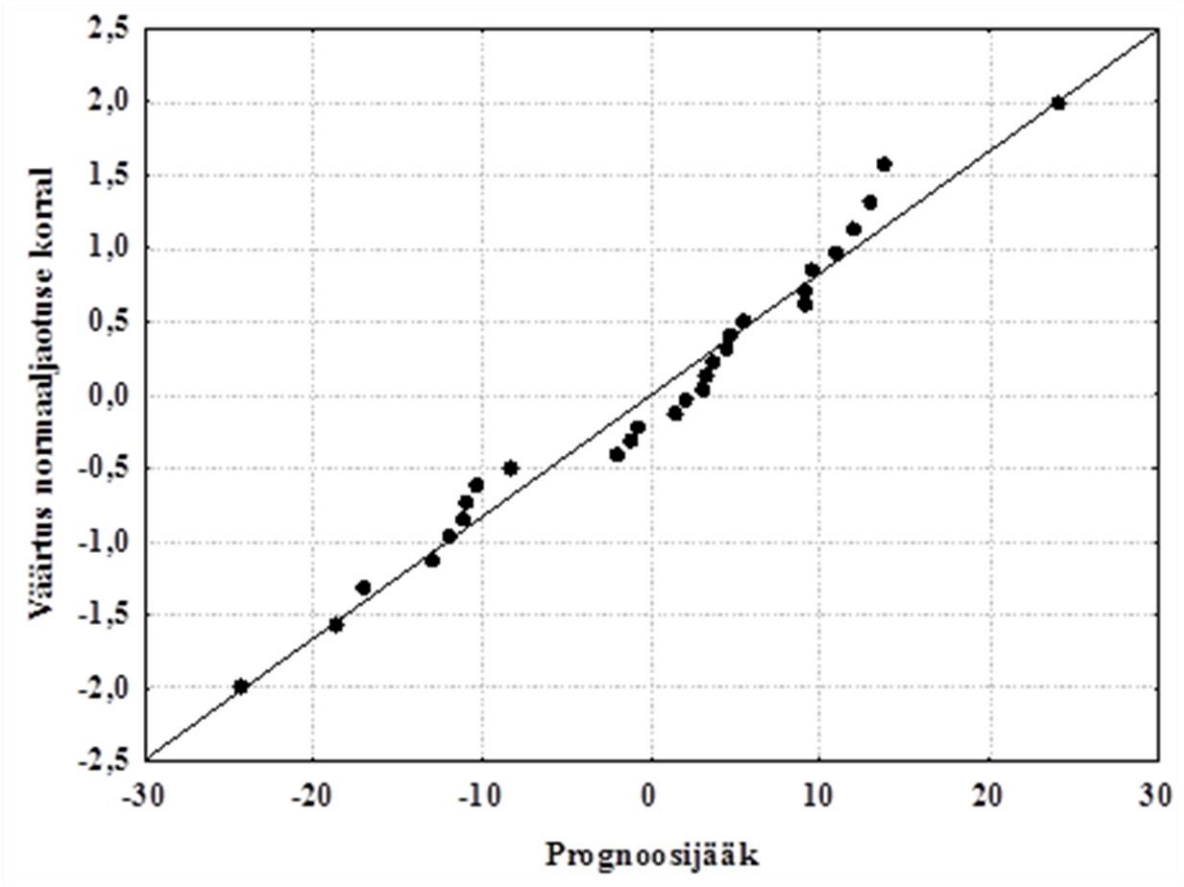
Tabel 5. Soojusmahtuvuse võrdlus materjalide lõikes Kruskal-Wallise testiga. Veergude päises on materjali nime all rühmakeskmine astak. Tabelis on esitatud materjalide võrdlemisel saadud olulisustõenäosused p, erinevus on usaldusväärne kui p<0,05, mis on märgitud paksus kirjas

Materjal	S	U	R	K	L	V
	R:6,2500	R:12,000	R:10,333	R:24,167	R:15,333	R:18,667
S		1,000000	1,000000	**0,011103**	1,000000	0,721763
U	1,000000		1,000000	0,156198	1,000000	1,000000
R	1,000000	1,000000		0,053743	1,000000	1,000000
K	0,011103	0,156198	0,053743		1,000000	1,000000
L	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000
V	0,721763	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	

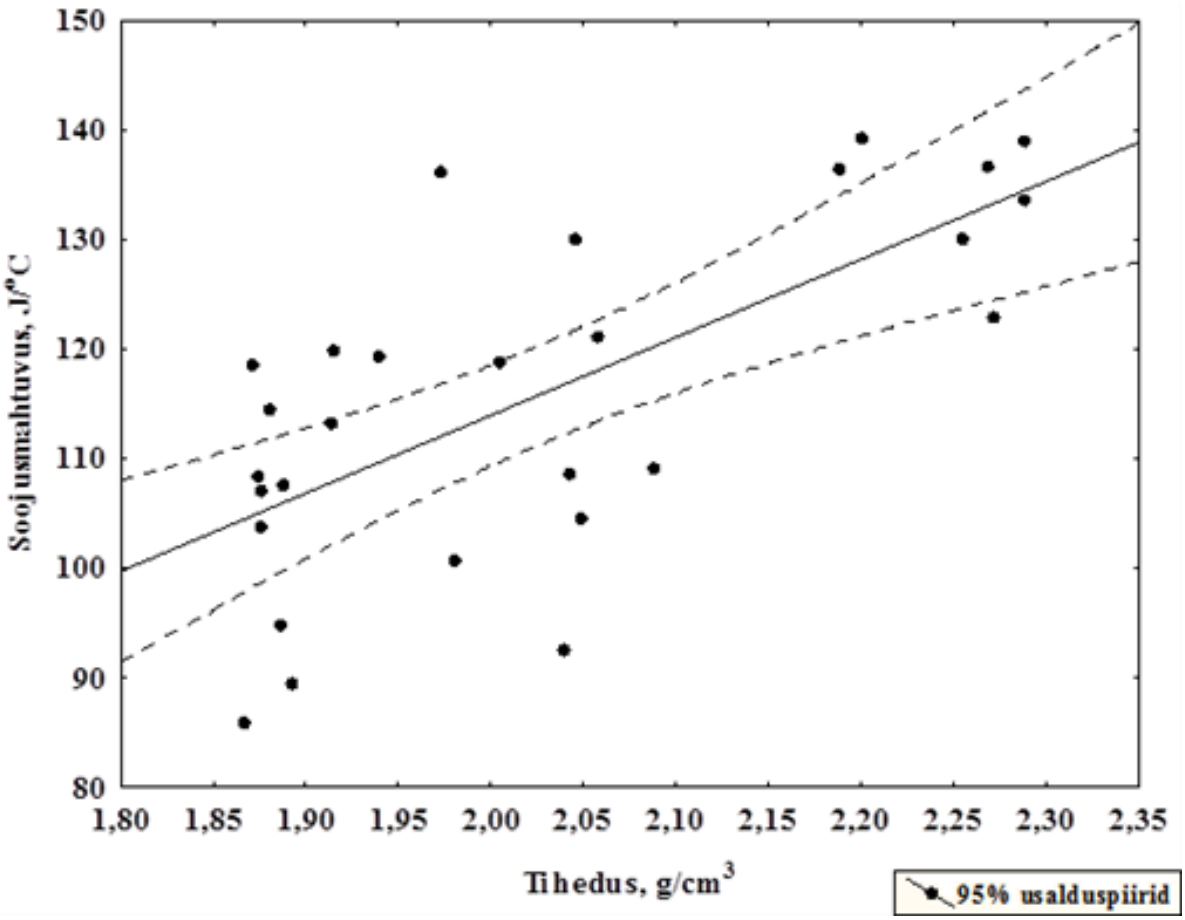
Tabel 6. Materjalide soojusmahtuvus (J/ºC)

Materjal	Miinimum	Maksimum	Keskmine	Tiheduse viga	Suhteline viga %
S	85,85	119,90	97,51	7,70	7,89
U	92,50	136,24	112,13	7,05	6,29
R	103,85	118,70	110,58	2,25	2,03
K	123,04	139,22	133,61	2,56	1,91
L	113,25	119,27	117,13	1,94	1,66
V	109,06	136,44	122,18	7,92	6,49

Kontrolliti kõigi materjalide tiheduse ja soojusmahtuvuse vahelist seost. Prognoosijäägid regressioonanalüüsil olid normaaljaotusega (Joonis 7), seega olid regressioonanalüüsi eeldused täidetud.



Joonis 7. Kõigi materjalide soojusmahtuvuse ja tiheduse vahelise seose prognoosijääkide normaaljaotuse test.



Joonis 8. Koldematerjalide soojusmahtuvuse ja tiheduse seos

Soojusmahtuvus sõltus tihedusest usaldusväärselt, olulisustõenäosus $p<0,01$, kuid tihedus kirjeldas vaid 56,9% soojusmahtuvuse varieeruvusest (Joonis 8):

Soojusmahtuvus = 4,5 + 57 x tihedus, R^2= 56,9%, $p<0,01$.

4.4 Survekatse

Survekatsetel leiti materjalide survetugevus. Kõigi materjalide purunemine algas väikeste pragude tekkimisega katsekeha pinnale, millele järgnes pragude suurenemine kuni proovikeha enam survet ei talunud. Purunenud katsekeha K on enne puhastamist näha joonisel 9. Ähmaselt

on näha tekkinud püramiidjas purunemise jälg, mis on suunatud materjali keskpunkti. Püramiid joonistub paremini välja peale lahtise materjali eemaldamist Joonisel 10.

Joonis 9. Katsekeha peale survekatset ilma lahtise materjali eemaldamiseta

Joonis 10. Katsekeha peale lahtiste tükkide eemaldamist

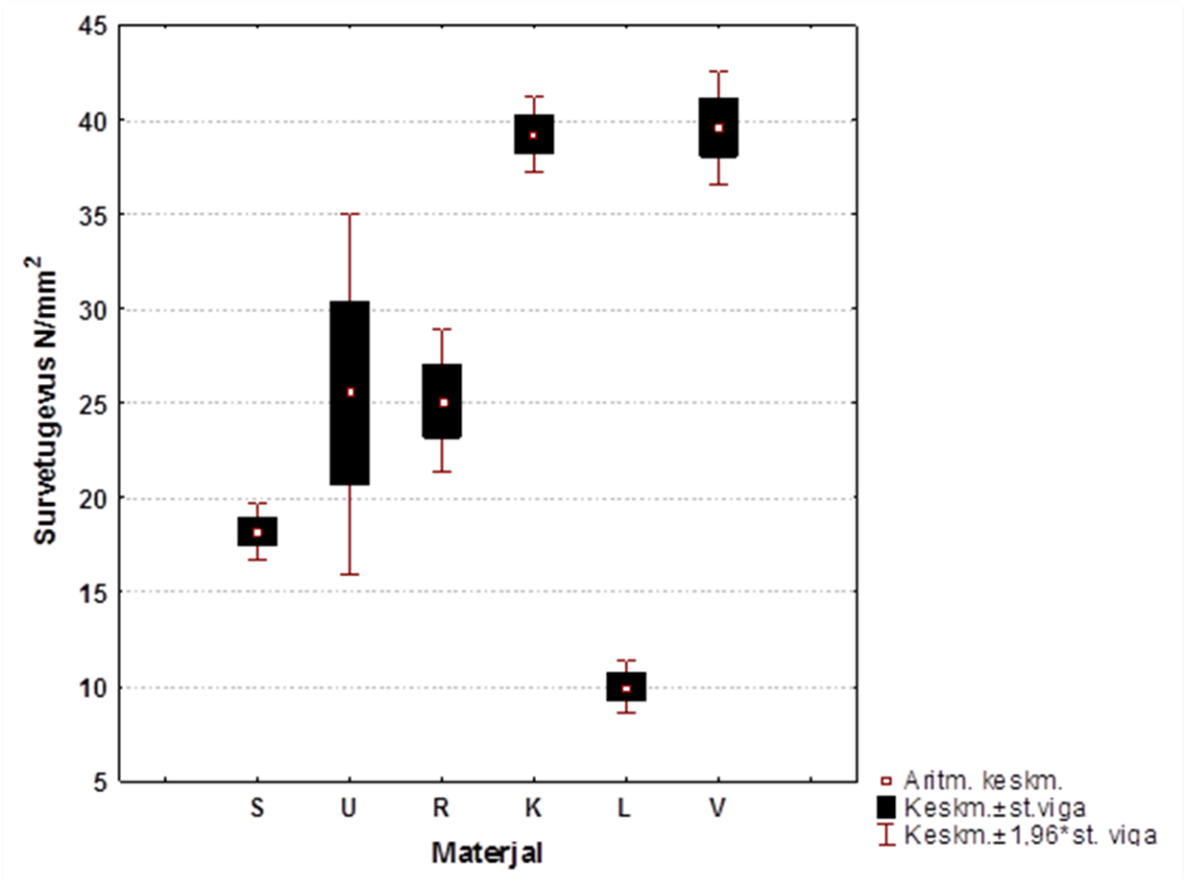
Materjalide purunemise käigus oli võimalik täpsemalt näha materjali koostisosi. Kõigil materjalidel peale U olid homogeensused. U puhul oli näha, et materjal on kokku pressitud mitmest erinevast materjalist. Joonisel 11 on selgelt näha, et helehallis massis on nii tumedamat halli ja musta värvi tükke, mis viitavad materjali madalale homogeensusele. Tegemist on mitme materjali seguga nii isoleeriva, soojust salvestava kui ka siduva materjaliga. See on ka loogiline tulemus võrreldes põletatud šamotiga, mis sisaldab jahvatatud šamotti ja lisana tugevuseks nt Al_2O_3. Materjalide survetugevused on esitatud tabelis 7.

Joonis 11. Katsekeha U purustuskatse tulem

Tabel 7. Materjalide survetugevus (N/mm^2)

Materjal	Miinimum	Maksimum	Keskmine	Survetugevuse viga	Suhteline viga %
S	17,47	18,96	18,22	0,75	4,11
U	17,88	39,75	25,51	4,86	19,07
R	23,17	27,03	25,10	1,93	7,69
K	37,68	41,08	39,21	1,00	2,54
L	9,27	10,72	10,00	0,72	7,24
V	38,02	41,09	39,56	1,53	3,87

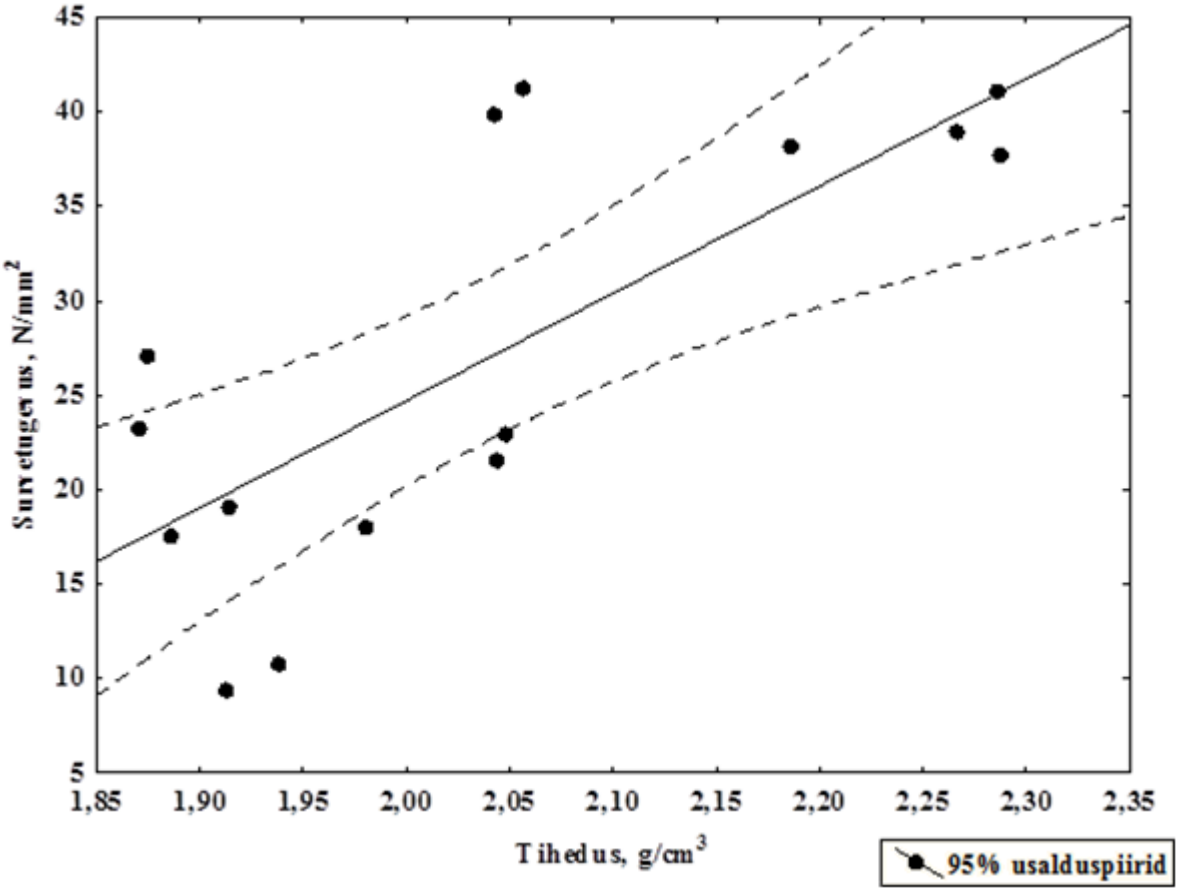
Materjalide survetugevused kõikusid väga suurel määral (joonis 12). Katsekeha U survetugevuse kõikumine oli suurim. Selle põhjuseks võib olla materjali väiksem homogeensus. Materjal U erineb teistest veel selle poolest, et tootmise käigus ei põletata elementi vaid see valmib keemilise reaktsioonina kivistumise käigus. Peale täielikku kuivamist on materjal valmis kasutamiseks temperatuuril kuni 1350 °C. Materjali U survetugevuse suure varieeruvuse teine põhjus on materjali lõikamisel tekkivad mikropraod, mis tekivad peamiselt lõikamisel suure hambaga kettaga, mis põhjustasid katsekehade purunemise. Teada saamaks täpsemat materjali survetugevust tuleks katseid suuremas mahus korrata.



Joonis 12. Materjalide survetugevuse aritmeetilised keskmised, aritmeetilise keskmise vead ja 95%-lised usalduspiirid

U ja R on samas survetugevuse vahemikus ja K ja V jagavad ühisosa. Teiste materjalide survetugevused erinesid (Joonis 12).

Survetugevuse ja materjali tiheduse vahel oli usaldusväärne seos (Joonis 13)



Joonis 13. Survetugevuse ja materjali tiheduse vahelised usalduspiirid

5. SOOVITUSED UURINGUTE JÄTKAMISEKS

5.1 Katsekehade standard

Materjali lõikamisel tekkiv vibratsioon võis kahjustada survetugevuse katse tulemusi, mille tõttu tuleks katsekehad vormide vastavasse mõõtu, mis oleks soovituslikult 100·100·100 mm, sama meetodit kasutatakse betooni testimisel. See võimaldaks teha täpsemaid survekatseid, tehes arvutused mugavamaks ja vähendades hälbeid, mis võivad väiksema katsekehaga tekkida. Sama katsekeha standardiga on võimalik lihtsalt testida ka soojuspaisumist. 10 dm^3 katsekeha paisumise mõõtmisega saadakse kohe suhtarv kui ka arvutamine 1 m kohta on lihtsustatud.
Keha soojusmahtuvuse mõõtmiseks sobiks standard väga hästi, sest vähendaks väliskeskkonna mõjutust. Suuremate katsekehade mõõtmisega väheneb viga, mis tekib väliskeskkonna mõjust.

5.2 Poorsus

Poorsus ehk urbsus on pooride esinemine tahkes kehas ruumala ühiku kohta.
Pooride summaarne maht absoluutsuurusena p' on arvutatav loomuliku struktuuriga materjali ja selles oleva tiheda aine mahtude vahena [8] :

$$p' = V_{bn} - V_n \tag{5}$$

kus p' on summaarne maht absoluutsuurusena

V_{br} – loomuliku struktuuriga materjali ruumala, m^3

V_n – tihendatud aine ruumala, m^3

5.3 Veeimavus

Veeimavuseks nimetatakse kapillaarjõudude toimel materjalisse imendunud vee hulka. Osa materjali pooridest on tavaliselt suletud ning seetõttu veega ei täitu ning liiga suurtes poorides vesi ei püsi, vaid nõrgub välja, siis on materjali imendunud vee maht väiksem materjali pooride kogumahust. Materjali imendunud vee hulka väljendatakse %-des materjali kuivkaalu suhtes. [11]

$$\omega_h = \left(\frac{g_{imm} - g_{kuiv}}{g_{kuiv}}\right) \cdot 100\% \quad (6)$$

kus ω_h on veeimavuse suhtarv

g_{imm} – veega immutatud materjali mass

g_{kuiv} – kuiva materjali mass

Meetod tuleb valida vastavalt materjalile. Veeimavus on oluline ahju ehitamise juures, et ei tehtaks liiga kuiva segu, mille tulemusena kuivab mört praguliseks. Veeimavus on oluline näitaja, sest õhuniiskuse tulemusena võtab koldematerjal endasse vett. Selle vee välja kütmine on põhjus, miks peale pikemat ahju kütmata seismist on vaja alustada rahulikuma kütmisega, et mitte ahju rikkuda.

5.4 Soojusjuhtivus

Soojusjuhtivuseks nimetatakse soojuse levikut kehade mikroosakeste vahetu kontakti teel. [16] Soojusvoo tekkeks on vaja keha erinevates punktides temperatuuri erinevus. Soojusjuhtivus on aine soojustehniline näitaja, mis näitab aine soojusläbilaskvust. Soojusjuhtivusteguri määramiseks ei veel leitud usaldusväärset teoreetilist lahendust, mis tõttu tuleb teostada eksperimentaalsed katsed. Soojusjuhtivus on paljudel ainetel lineaarne, millest tulenevalt ei ole vaja teostada katseid paljude erinevate temperatuuri erinevustega. [17]

Fourier-i valem soojus [17] :

$$\varphi = A \cdot \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t \quad (7)$$

kus φ on soojusvool W/m^2

A – võimsus, W

λ – materjali soojusjuhtivus , W/(m·K)

Δt – temperatuuri erinevus, °C

δ – materjali paksus, m

5.5 Termošokk

Termošokk imiteerib kiirendatult ahju pikemaajalist paisumist ja kokkutõmbumist, mis toimub temperatuuri vaheldumisel. Kasutatava metoodika puhul asetatakse 900-1000 °C kraadised kivid külma vette ja oodatakse nende jahtumist. Peale kivi jahtumist kuivatatakse katsekeha ja korratakse kogu katsetsüklit. Selle tulemusel leitakse, mitme tsükli järel toimub materjali lagunemine. [18]

KOKKUVÕTE

Eesti Maaülikooli ja OÜ Tuli ja Suits koostöö raames, uuriti kuut erinevat koldematerjali,. Materjalide soojusmahtuvused mõõdeti ja tulemusi võrreldi statistiliselt, millest tulenes, et materjalid K ja S on usaldusväärselt üksteisest erinevad. Materjalide soojuspaisumist määrati temperatuuridel 25 °C ja 100 °C. Mõõtmistel näis, et materjali paisumist ei suudetud registreerida, sest mõõteviga oli samas suurusjärgus teoreetilise paisumisega. Kohati näis, et materjal on kokku tõmbunud, kuid šamoti puhul võiks seda anomaaliaks lugeda. Lisaks materjali soojustehnilistele näitajatele mõõdeti ka survetugevust. Survetugevuse mõõtmiste tulemustest selgus, et katsekehad U ja R ning K ja V olid omavahel usaldusväärselt sarnased. Kõige suurema survetugevuse kõikumisega oli uuritav materjal U, mis eeldatavasti tulenes materjali valmistamise meetodist, mis ei hõlma endast materjali põletamist. Materjali U puhul oli tegemist ka madala homogeensusega materjaliga, sest purustamisel ilmnesid erinevat värvi tükid.

Materjali omaduste vaheliste seoste analüüsimisel uuriti seoseid tiheduse-survetugevuse ja tiheduse-soojusmahtuvuse vahel. Mõlemal juhul jäi seose tugevus alla 60%. Töös toodi välja soovitused järgnevateks uuringuteks. Anti ülevaate oluliste parameetrite määramisest.

Peamine probleem, mis koldematerjalide testimise juures kerkib, on vajaliku katsekeha ettevalmistamine. Ehitamiseks vajalikest moodulitest ei ole võimalik lõigata piisavalt suuri testkehi, et leitud tulemusi saaks universaalselt kasutada. Sellest tulenevalt soovitati luua koldematerjalide testimise standardkatsekeha 1 dm^3. See lihtsustaks arvutamist ja ka katsete läbiviimist.

Saadud tulemusi on võimalik kasutada materjalide võrdlemiseks suhtarvude tasandil. Absoluutarvude osas tuleb olla natuke skeptilisem, sest iga mõõtemeetodiga võivad tulemused kõikuda.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Veski, A.** (2005). Ahjud, pliidid, kaminad. Tallinn: Tormikiri. 212 lk.
2. **Ljubajev.A.** (2013) Austria ahjude arvutusmetoodika e. Ahi teie vajadustele! [WWW] http://www.korstnaphkija.ee/austria-ahjude-arvutusmetoodika-e-ahi-tapselt-teie-vajadustele/ 12.05.2017)
3. Ahja mooduahi. Koduleht [WWW] http://www.moodulahi.ee (18.05.2017)
4. **A.Andresson., M.Hovi.,** (2016), Taastuvate Energiaallikate Uurimine ja Kasutamine (TEUK) 16 konverentsi kogumiskust: Tahkel kütusel töötavate kohtkütteseadmete seisukoht ja areng Eestis ning naabruses [WWW] https://energiatalgud.ee/img_auth.php/7/7d/TEUK._kogumik_XV.pdf (30.05.2017)
5. Euroopa Liidu Intellektuaalomandi ameti (EUIPO) poolt välja antud Euroopa Ühenduse tööstusdisainilahenduse tunnistus nr 003753599-0001.
6. Eesti Standardikeskus. Standard EN 15544 [WWW] https://www.evs.ee/tooted/evs-en-15544-2009 (30.05.2017)
7. Ehitusseadus. (vastu võetud 15.05.2002, jõustus 01.01.2003). – Riigi Teataja [WWW] https://www.riigiteataja.ee/akt/728982 (28.05.2017)
8. **Otsman.R.** (1976) Ehitusmaterjalid. Tallinn: Valgus. 596 lk.
9. Electronic digital caliper parameters [WWW] https://www.diverseelectronics.com/upload/documents/PD-151.pdf (12.05.2017)
10. Radwag WLC/A2/C/2 electronic scale overview [WWW] http://radwag.com/en/wlc-6-a2-c-2-precision-balance,w1,WP7,101-102-108#1 (12.05.2017)
11. **Aun. P.** (2003). Pottseparaamat. Kohtla-Järve: Mark ja Partnerid. 316 lk.
12. **Visk.U,.**(2008) Ettevalmistus füüsikaolümpiaadiks:Soojus, Tartu Ülikooli Teaduskool [WWW] http://www.teaduskool.ut.ee/sites/default/files/teaduskool/oppetoo/fys_soojus.pdf (12.05.2017)
13. Nabertherm furnace P330 manual [WWW] http://www.toma.nl/manuals/diversen/Nabertherm%20Controller%20Manual.pdf (12.05.2017)
14. Statistica 7.1, (2002) STATISTICA for Windows [Computer program manual]. [WWW] http://www.statsoft.com (30.05.2017)
15. Hart Keramik Aglt Schamotte produktinformation [WWW] http://www.hart-keramik.de/go/hartkeramik/_ws/mediabase/downloads/Produktprogramme/Produktprogramm%20Hafner%20Schamotte%202016.pdf (12.05.2017)
16. **T.A.Kõiv., A.Rant.** (2013) Hoonete küte. Tallinn: TTÜ kirjastus. 404 lk.

17. **A.Ots.**, (2011), Soojustehnika algkursus: Termodünaamika. Põlemine. Soojusülekanne. Tallinn: TTÜ kirjastus. 816 lk.

18. **T.J.Lu., N.A.Fleck.,** (1997) The Thermal Shock Resistance of Solids [WWW] http://www-mech.eng.cam.ac.uk/profiles/fleck/papers/96.pdf (28.05.2017)

SUMMARY

Over the course of the work six different hearth materials were studied in cooperation between the Estonian University of Life Sciences and OÜ Tuli ja Suits. The thermal capacities of the materials were measured and compared statistically, which resulted in materials K and S being reliably different from each other. The thermal expansion of the materials was measured at temperatures of 25 °C and 100 °C. The testing resulted in the incapability of registering the thermal expansion due to the measuring error being in the same order of magnitude with the theoretical expansion. It sometimes appeared as if the material had compressed, but in the case of chamotte it can be considered an anomaly. In addition to the indicators of thermal properties the compressive strength of the materials was also measured. The results of the measuring revealed that test bodies U-R and K-V were reliably similar to each other. Material U had the highest variation in compressive strength, which presumably derived from the method of preparing the material, since it doesn't involve the burning of the material. Material U turned out to also be a homogeneous material, since in the process of crushing the material pieces of different colors were discovered.

During the analysis of relationships between the materials' properties the relationships between density-compressive strength and density-thermal capacity were analyzed. In both cases the intensity of the relationships was below 60%. The thesis brought out recommendations for future tests, giving an overview of determining different parameters that can be considered important for hearth materials.

The main problem that occurs during the testing of hearth materials is the preparation of a suitable test specimen. It is not possible to cut suitably sized test bodies for universal use of the testing results from the modules necessary for construction. Due to this it was suggested to create a standard test body of 1 dm^3 for the testing of hearth materials. This would simplify calculations and conducting experiments.

The results found in the theses can be used to compare the materials on the level of ratios. With absolute numbers skepticism is advised due to the variations in results when using different test methods.

LISAD

LISA 1. Kõik eksperimentaalsed andmed

Tähis	Külg 1	Külg 2	Külg 3	Mass	Tihedus	Külg 1 (100 °C)	Külg 2 (100 °C)	Külg 3 (100 °C)	Kivi erisoojus	Soojusmah tuvus
S1	39,646	39,806	40,332	118,780	1,866	39,766	39,804	40,254	722,789	85,853
S2	39,338	40,266	39,746	119,180	1,893	39,286	40,142	39,666	749,588	89,336
S3	40,042	39,234	40,080	118,820	1,887	40,038	39,272	40,154	798,959	94,932
S4	39,884	40,046	40,038	122,470	1,915	39,932	40,024	40,040	979,038	119,903
U1	39,712	38,328	39,288	122,160	2,043	39,790	38,326	39,284	890,312	108,714
U2	41,816	39,170	40,428	135,690	2,049	41,804	39,176	40,400	770,341	104,528
U3	39,200	39,028	41,946	131,220	2,045	39,130	39,090	42,138	991,751	130,138
U4	41,162	40,872	38,984	129,910	1,981	41,158	40,998	38,946	774,983	100,678
U5	41,764	38,242	39,234	127,780	2,039	41,754	38,434	39,180	723,874	92,497
U6	40,704	40,430	39,822	129,260	1,972	40,586	40,392	39,666	1053,967	136,236
R1	39,676	40,568	40,244	121,520	1,876	39,692	40,540	40,184	881,267	107,092
R2	39,570	40,066	40,474	120,280	1,874	39,512	39,946	40,296	900,542	108,317
R3	39,332	40,356	40,698	121,440	1,880	39,254	40,240	40,614	943,134	114,534
R4	39,734	40,338	40,238	120,700	1,872	39,702	40,326	40,182	983,403	118,697
R5	40,010	40,328	39,598	119,870	1,876	40,030	40,374	39,528	866,373	103,852
R6	39,712	40,506	39,486	119,950	1,888	39,718	40,520	39,602	896,092	107,486
K1	38,178	39,676	40,354	138,840	2,271	38,126	39,772	40,366	886,224	123,043
K2	39,200	39,290	38,436	130,220	2,200	38,924	39,024	38,486	1069,138	139,223
K3	37,914	39,428	39,486	133,040	2,254	38,004	39,456	39,502	976,792	129,952
K4	39,154	39,774	39,976	141,170	2,268	39,172	39,776	39,892	968,928	136,784
K5	39,452	38,542	37,972	132,060	2,287	39,584	38,672	37,952	1011,759	133,613
K6	38,672	39,500	39,112	136,690	2,288	38,698	39,458	39,124	1017,046	139,020
L1	39,816	39,220	39,332	123,100	2,004	39,612	39,058	39,340	965,667	118,874
L2	39,708	39,334	42,140	125,970	1,914	39,682	39,338	41,998	919,993	113,251
L3	38,422	39,940	38,952	115,930	1,939	38,456	39,786	38,950	1028,809	119,270
V1	39,644	39,248	39,280	127,580	2,087	39,562	39,146	39,292	854,852	109,062
V2	40,514	39,670	37,912	125,340	2,057	40,476	39,678	38,072	948,656	121,029
V3	39,552	39,178	39,292	133,180	2,187	39,704	40,302	40,296	1024,465	136,438

LIHTLITSENTS

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Georg Muda,
sünniaeg 26.12.1992
1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
KOLDEMATERJALIDE SOOJUSTEHNILINE UURING,

mille juhendaja on Mart Hovi, Külli Hovi,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
allkiri

Tartu, 31.05.2017

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____
(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)

_____ _____
(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)