



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Tartu kolledž

## **3DLASERI TOODETE SOBIVUS RINGMAJANDAMISEKS STUUDIOKLAASINA**

### **ASSESSMENT FOR 3DLASER ENGRAVED PRODUCTS TO BE USED AS STUDIO GLASS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mariliis Alev

Üliõpilaskood: 192471NAEM

Juhendajad: Jane Raamets, vanemlektor

Tallinn 2022

# 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.

“25” mai 2022

Autor: Mariliis Alev

/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“25” mai 2022

Juhendaja: Jane Raamets

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

“25” mai 2022

Kaitsmiskomisjoni esimees Egge Haiba

/allkirjastatud digitaalselt/

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

Mina, Mariliis Alev (sünnikuupäev: 09.06.1985 )

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "3Dlaseri toodete sobivus ringmajandamiseks stuudioklaasina", mille juhendaja on Jane Raamets,

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

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

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

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

---

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

(allkirjastatud digitaalselt) 25.05.2022

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Mariliis Alev 192471NAEM  
**Õppekava, peeriala:** NAEM06/18 - Tööstusökoloogia  
**Juhendaja(d):** vanemlektor, Jane Raamets, +372 6204806  
**Konsultant:** Tiina Sarapu, vabakutseline klaasikunstnik  
Helkse OÜ, tiina@glass.ee, +372 5536129

## Lõputöö teema:

3Dlaseri toodete sobivus ringmajandamiseks stuudioklaasina  
*Assessment for 3Dlaser engraved products to be used as studio glass*

## Lõputöö põhieesmärgid:

1. Tuvastada toodete keemiline koostis ja võrrelda seda tunnustatud sulatusklaasidega
2. Viia läbi sulatuskatsed ja hinnata nende kvaliteeti

## Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine ja katsetingimuste kirjeldamine	Jaanuar 2022
2.	Katsed, tulemuste analüüs, kirjanduse ja meetoodika kirjeldus	Mai 2022
3.	Tulemuste, järelduste ning arutelu kirjutamine ja töö vormistus	Mai 2022

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "25" mai 2022a

**Üliõpilane:** Mariliis Alev /allkirjastatud digitaalselt/ "25" mai 2022a

**Juhendaja:** Jane Raamets /allkirjastatud digitaalselt/ "25" mai 2022a

**Konsultant:** Tiina Sarapu /allkirjastatud digitaalselt/ "25" mai 2022a

**Programmijuht:** Jane Raamets /allkirjastatud digitaalselt/ "25" mai 2022a

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1. TEOREETILINE ALUS .....	10
1.1 Klaas.....	10
1.1.1 Klaasi sulatustehnoloogiad.....	12
1.2 Stuudioklaas.....	14
1.2.1 Klaasi taaskasutus stuudio keskkonnas .....	16
1.2.2 Kuuma klaasi stuudiod Eestis.....	18
1.3 Väärtust lisav disain.....	19
1.4 3Dlaseri tooted.....	19
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	21
2.1 Materjali keemilise koostise määramine .....	21
2.2 Sulatuskatsed.....	23
2.2.1 Terviktoote sulatus ilma vormita.....	24
2.2.2 Terviktoote sulatus kips-kaoliin vormi.....	25
2.2.3 Purustatud toodete segu lihtsas kips-kaoliinvormis.....	27
2.2.4 Purustatud toodete segu keerulises kips-kaoliin vormis.....	28
3. TULEMUSED JA ANALÜÜS.....	30
3.1 Klaasiproovide keemiline koostis.....	30
3.1.1 Klaasimoodustajate ( $\text{SiO}_2$ , $\text{NaO}$ , $\text{B}_2\text{O}_3$ ) võrdlus.....	30
3.1.2 Sulatusainete ( $\text{K}_2\text{O}$ , $\text{S}$ ) võrdlus .....	32
3.1.3 Täiteainete ( $\text{CaO}$ , $\text{Mg}$ , $\text{Zn}$ , $\text{Ba}$ , $\text{Pb}$ , $\text{Sb}$ ) võrdlus.....	32
3.1.4 Keemilise koostise analüüs.....	35
3.2 Sulatuskatsete tulemused .....	37
3.2.1 Terviktoote sulatus .....	38
3.2.2 Purustatud terviktoote sulatamine vormi .....	38
3.2.3 Purustatud klaasimassi sulatus lihtsasse vormi .....	38
3.2.4 Purustatud klaasimassi sulatus keerulisemasse vormi .....	39
3.2.5 Eksperdi hinnang sulatuskatsetele .....	44
4. JÄRELDUSED .....	45
KOKKUVÕTE .....	46
SUMMARY .....	47
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	50
LISAD	
Lisa 1 Tooteleht 1 .....	55
Lisa 2 Tooteleht 2.....	56
Lisa 3 Tooteleht 3.....	57
Lisa 3 Ekspertarvamus .....	58

# EESSÕNA

Käesolev magistritöö on Kujundlik OÜ tegevjuhi Mariliis Alevi algatus 3Dlaseri tegevussuuna - klaasist auhindade ja meenete - ringmajandusmudelile üleviimiseks. Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži tööstusökoloogia õppekava lõputöö on praktilise väärtusega sisendiks tootearendusse, uurides 3Dlaser toodete materjali sobivust kõrgema väärtusega toodete loomiseks klaasistuudio keskkonnas. Läbi tundmatu koostisega klaasi keemilise koostise uurimise, sulatuskatsete, uuritava materjali ja potentsiaalselt asendatava materjali kõrvutamise, võimaldab uurimuse tulemus tööstusökoloogia otsesest rakendamist ettevõttes, toormaterjali kokkuhoidu ja käitluskavata jäätme väärindamist läbi disaini.

Tänu TalTechi materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituudi füüsikalise keemia professorile Andres Trikkelile klaasi uurimisel õigete suundade kätte juhatamisel, Tartu Ülikooli geoloogia osakonna laboriinsenreile Jaan Aruvälile abi eest XRF analüüsi tulemuste tõlgendamisel. Suur tänu klaasikunstnikele Anne-Liis Leht, Eili Soon, Elle Lepik abi eest sulatuskatsete teostamisel. Klaasikunstnikele Tiina Sarapule ja Eve Kohale suurim tänu terminoloogia ja innustuse eest teemaga jätkata. Autor tänab ka juhendajat Jane Raametsa.

Võtmesõnad: klaas, ringmajandus, klaasisulatus, XRF, magistritöö

## SISSEJUHATUS

Iga klaasiga seotud teemaarendus tituleerib, et klaas on jätkusuutlik ja 100% ümbertöödeldav materjal. Ringne majandusmudel töötab vaid murdosal toodetud klaasist, peamiseks pakendiklaasi tootmisel ja tootmiste siseselt. ÜRO keskkonnaport toob välja, et klaasitööstus seisab lähitulevikus silmitsi väljakutsega, sest tööstusele sobiv, väheste lisanditega kvartslüüv saab otsa [1] [2].

Euroopas toodetakse aastas 36 miljonit tonni klaasi, millest pakendiklaas 22 miljonit tonni. Euroopa Pakendiklaasi föderatsiooni andmetel on pakendiklaasi ümbertöötlusesse jõudmise protsent 78%, ehk 17,5 miljonit tonni aastasest toodangust jõuab ehk ümbertöötusjaama [3]. Teistes klaasi sektorites praktiliselt puudub süstemaatiline kogumise ja käitluskava, mis tähendab, et 18,5 miljonit tonni klaasi aastasest toodangust jääb lihtsalt meie keskkonda ja oma esmase kasutuse järel ladustatakse või kasutatakse täitematerjalina [4]. Iga teemaarendus, mis selliselt lineaarselt skeemilt suunab materjali ringsele kasutusele on oluline.

Käesolev magistritöö lähtub autori isiklikust huvist oma ettevõtte toodangule leida jätkusuutlik uuskasutus kohalikus kontekstis rakendades väärtustavat disaini. Hüpootees, et 3Dlaseri toodetel on stuudioklaasina potentsiaali, toetub autori kogemusele töös klaasiga ja materjalitehnoloogia õpingute taustale. 3Dlaseri peamiste toodete - auhindade ja meenete - tootmiseks kasutatavad klaasitoorikud on kvaliteetsed, heade optiliste omadustega. Võttes arvesse, et graveering ei muuda klaasmaterjali kvaliteeti ja auhindadel puudub järelkäitlus, näeb autor potentsiaali muuta ladustatav problemaatiline jääde sisendiks kohalikule kõrgetasemelisele disainile. Tegemist on väga spetsiifilise tootevaldkonnaga, mille majandusmõju Eestis on väike, kuid tööst lähtuv tootearendusmudel on eskaleeritav sarnastele ettevõtetele kogu maailmas.

Magistritöö eesmärgiks on selgitada välja 3Dlaseri toodete sobivus kasutamiseks klaasistuudios sulatusklaasi toorme asemel. Eesmärgini jõudmiseks püstitati järgnevad uurimisülesanded:

- anda ülevaade klaasistuudiotest kasutatavast sulatusklaasi toormaterjalist,
- tuvastada uuritava materjali keemiline koostis ja võrrelda seda klaasistuudiotest kasutatava toormega,
- tuginedes koostise uurimise tulemustele viia läbi sulatuskatsete uuritava materjaliga,
- hinnata sulatuskatsete tulemuste kvaliteeti.

Klaasiteemalist teadustööd ja -kirjandust on rohkelt tööstuslike vannahjude tootmissüsteemide baasil, kuid ümbertöötlus väikestel kappahjude tasandil napib. Erandiks Delfti Tehnoloogiaülikooli uurimisrühm ReStruckt [5], kes oma mitmetesetmetes teadusartiklites rõhutavad klaasi ümbersulatuse meeletut potentsiaali, kuid standartiseeritud katsemetoodikate puudumist. [6][7][8][9] Kapp- ja kohverahjudes valuvormi põhimõttel sulatus toimub võrdlemisi madalatel temperatuuridel ja on seega oluliselt keskkonnasäästlikum kui vannahjude ülessulatus [6].

Töö metodoloogiliseks aluseks on Faidra Oikonomopoulou teadustöö "Vormivalu jäätme-klaasi struktuursete omaduste uurimine". Töös kasutatud sarnane meetodika klaasi koostise uurimiseks ja ümbersulatuseks [7]. Sulatuskatsete tulemuste kvaliteeti hinnati vaatlusel, otsides klaasivigu, klaasisiseseid pingeid ja eriala eksperthinnangu meetodil.

Uuritav materjal on Kujundlik OÜ 3Dlaseri tootmispraak. Uurimisobjektide elementkoostise määramine teostati Tartu Ülikooli laboris MAREK röntgenfluoresents-spektromeetria (XRF) seadmel ja Ettevõtluse Arendamise Sihtasutuse Innovatsiooniosaku toetusel. Klaasi sulatuskatseid teostati Eesti Kunstiakadeemia klaasiosakonnas, Hyti Design klaasistuudios ja Olustvere klaasikojas. Sulatuskatsete tulemused on ülespildistatud Kujundlik OÜ 3Dlaseri studios, polariseerimata ja ristpolariseeritud valgustingimustes.

Eesti Kunstiakadeemias koolitatakse klaasikunstnikke, Olustvere Teenindus- ja Maamajanduskoolis klaasipuhuja assistente. Teoreetiliselt on seega Eestis olemas kõrgemal tasemel klaasi-alased empiirilised teadmised. Ainuke klaasitootja OI Production Eesti, kuulub rahvusvahelisse kontserni ja on spetsialiseerunud, suletud uste taga, vaid kirka pakendiklaasi tootmisele. Viimane klaasitehnoloogiat käsitlev raamat on eesti keeles ilmunud 1987 aastal, juhendiks Tarbeklaasi töötajatele. Materjalitehnoloogia õppes käsitletakse klaasi põgusalt. Eestis on puudu klaasitehnoloogia alased teadmised ja praktika. Hüpoteesi tõestamisel ja valitud tulemusliku tehnoloogilise skeemi loomisel on väike, aga oluline panus selle tühimiku täitmisel.

Töö koosneb neljast osast. Esimeses peatükis defineeritakse kirjanduse põhjal studios kasutatav klaasitoore ja selle põhiomadused. Kirjeldatakse klaasisulatuse tingimused ja materjali taaskasutus klaasistuudiotest. Selgitatakse ringmajandusele liikumiseks olulise ökodisaini tootearenduse printsiibi - väärtust lisava disaini - rakendamise võimalust. Tutvustatakse 3Dlaseri tooteid.



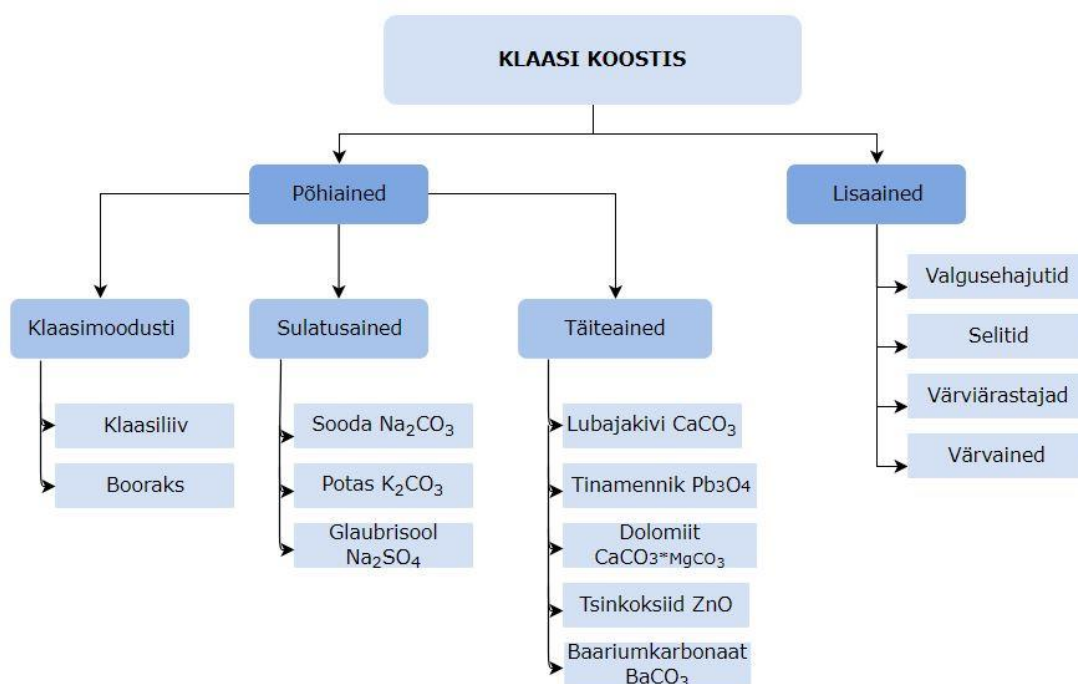
Teises peatükis on kirjeldatud eesmärgi saavutamiseks kasutatud materjalid ja meetodikad. On kirjeldatud klaasi keemilise koostise teada saamiseks valitud XRF seade Tartu Ülikooli MAREK laboris ja katsekehad – 3Dlaseri tooted ja tunnustatud sulatusklaaside proovid. Järgnevalt jõutakse 3Dlaseri toodete sulatuskatseteni, on kirjeldatud sulatuskatsete tingimused klaasistuudios ja katseobjektid. Kolmandas peatükis esitletakse ja analüüsitakse uurimise käigus saadud tulemusi. Saame teada, mis on uuritavate toodete ja sulatusklaasi koostised, kuivõrd sarnased need on. Sulatuskatsete tulemused ja hinnang kvaliteedile on esitatud kolmanda peatüki teises osas. Järeldused uurimistulemustest neljandas peatükis. Lisades on sulatusklaaside tootelehed ja eksperdi hinnang.

# 1. TEOREETILINE ALUS

## 1.1. Klaas

Klaasi on anorgaaniline amorfne materjal, mida ei defineeri selle koostis, vaid selle klaasitaolised omadused. Klaasi saamiseks on iseloomulik klaasimoodustaja kuumutamine sulamiseni ja viskoose massi allajahutamine. Inimese loodud klaasi moodustajaks on ränidioksiid ( $\text{SiO}_2$ ). Tavaliselt sisaldab klaasi segu veel teisi oksiide ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jt). Sõltuvalt klaasi kasutamise eesmärgist, muudab koostis klaasi füüsilis-keemilisi omadusi. [10]

Klaasi koostist kirjeldab joonis 1.1. Joonisest lähtub, et klaas koosneb põhiainetest ja lisaainetest. Põhiained jagunevad omakorda veel kolmeks: klaasimoodustaja, sulatusained ja täiteained. Klaasimoodustajana on kasutusel booraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) ja klaasiliiv. Sulatusainetena kasutatakse soodat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), potast ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) ja glaubrisoola ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Klaasi koostisesse kuuluvad ka erinevad täiteained – lubjakivi ( $\text{CaCO}_3$ ), tinamennik ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ), dolomiit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), tsinkoksiid ( $\text{ZnO}$ ) ja baariumkarbonaat ( $\text{BaCO}_3$ ). Lisaainetena on kasutusel valgusehajutid, selitid, värvivarastajad ja värvained.



Joonis 1.1 Klaasi koostis (Autori joonis)

Klaasi koostise ja kasutusvaldkonna järgi võib klaase jagada (Tabel 1): kvartsklaasiks, aknaklaasiks, pakendiklaasiks, laboriklaasiks, optiliseks klaasiks, klaaskiuks ja klaaskeraamikaks. Kvartsklaas, mille koostises on vähemalt 96% kvartsiiva, on äärmiselt tugev ja keemiliselt vastupidav - kasutatakse tiiglitena, optilistes -ja meditsiinilistes seadmetes. Naatrium-kaltsiumi sisaldusega klaase, milles 70-75% ränidioksiidi ja vastavalt 12-18% naatrium okside, 5-14% kaltsiumoksiidi, nimetatakse üldistavalt ka soodaklaasideks ja nende alla kuuluvad tavaliselt ka pakendi-, aknaklaasid ja klaasistuudiotel kasutusel olev klaasitoore. Kristallklaas sisaldab vähemalt 24% pliiühendeid, või moodsam pliivaba kristall samas mahus muid mineraalseid okside [11], mis tagab erilised optilised omadused ja pehmuse mehaaniliseks töötamiseks. Boorsilikaatklaasil on olematult väike joonpaisumistegur (*COE - Coefficient of Expansion*), mistõttu sobib see kuuma taluvate nõude valmistamiseks ja laboriklaasidesse [12].

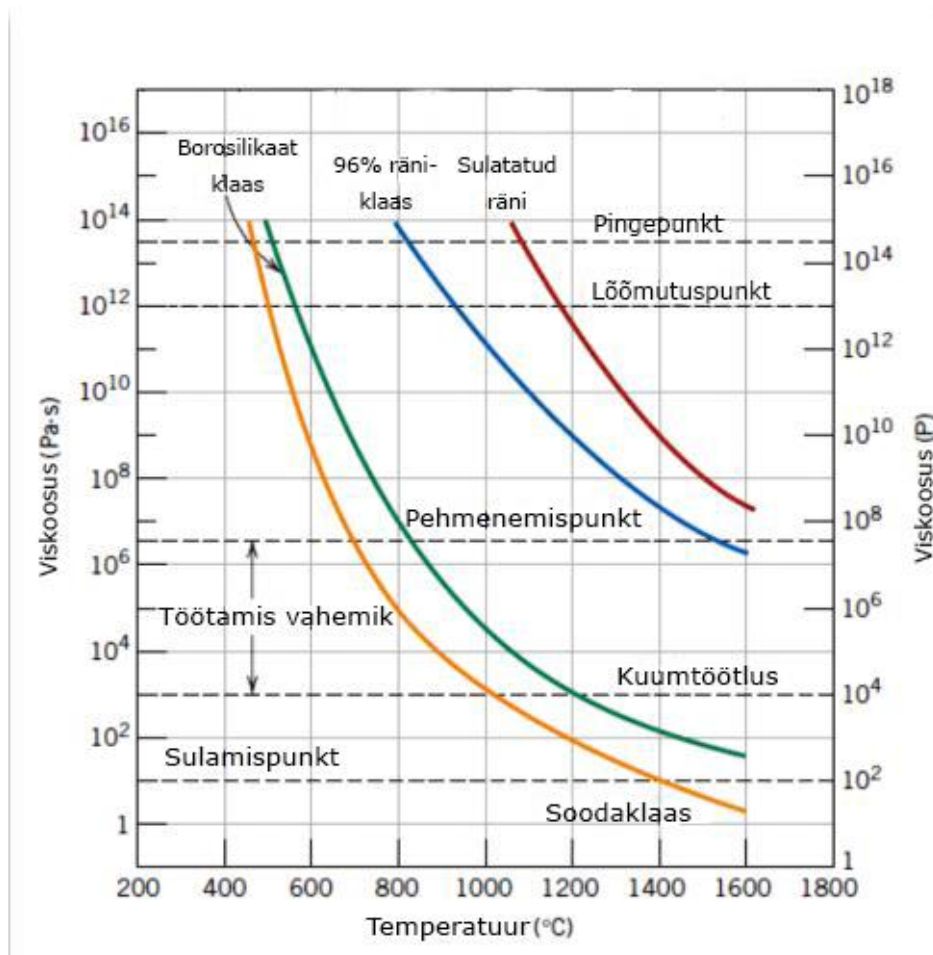
Valmistamisviisi järgi saab klaasesemeid liigitada - pressitud, puhutud või tõmmatud (sh floaatklaas)[13].

Tabel 1.1 Klaasi tüübid ja tüüpiline koostis [11]

Klaasi tüüp	SiO <sub>2</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	CaO %	K <sub>2</sub> O %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	Muud lisained
Sulatatud kvarts	>99,5							
Kvartsklaas	96					4		
Aknaklaas	71	16	5	0.02	1		5	
Naatrium-kaltsium klaas (e. soodaklaas)	70-75	12-18	5-14	1	0.5-3		0-4	
Pakendiklaas	75	13	12	0.2	1		1	
Kristall	60	14	>24 Asendatud PbO					
Boor-silikaat klaas	81	4			2	13		+H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
Klaaskiud	55		16		15	10	4	

Klaasi füüsikalistest omadustest olulised näitajad töös klaasiga on klaasistumistemperatuur, viskoossus ja joonpaisumistegur. Klaasi pehmenemistemperatuur kirjeldab momenti, kus klaasimass muutub rabedaks ja see on oluline kuumtöötlemisel. Viskoossus ehk sisehõõrdumine on aine omadus osutada

vastupanu [13]. Suurema viskoossusega on nõ "pikk" klaas, millel on pikem töötlemisaeg. Joonpaisumistegur kirjeldab materjali joonmõõtmel paisumist soojenemise ja jahtumise vältel [14]. Joonpaisumisteguri ja viskoossuse koosmõju määrab ära erinevate klaaside omavahelise sobivuse kuumtöötlusel [15]. Kui üks klaas jahtudes kaotab mõõtmeid ja viskoossust teisest oluliselt kiiremini, siis võib sulatus puruneda või jäävad sulamisse kriitilised pinged, ja klaas võib hiljem ka spontaanselt lõhkeda [16].



Joonis 1.2 Klaasi viskoossuse sõltuvus temperatuurist erinevatel klaasidel (Autori kohandatud W.D.Callister and Rethwisch, 2009 põhjal [13])

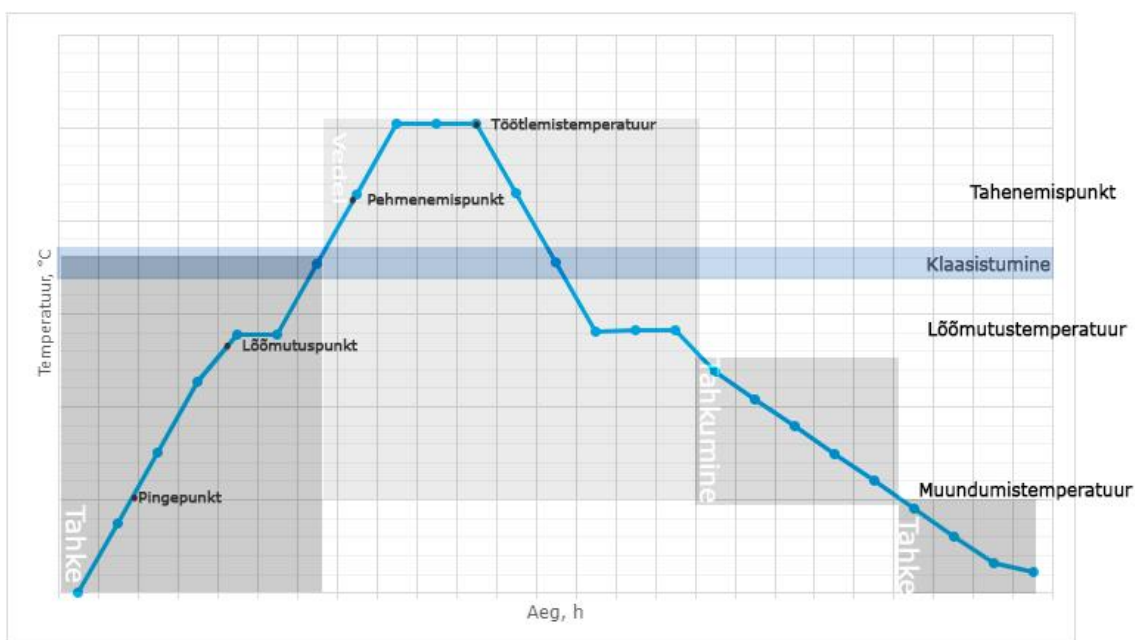
### 1.1.1 Klaasi sulatustehnoloogiad

Eestikeelse terminoloogia puudumise tõttu vajavad siinkohal mõned väljendid seletamist. Klaasi on võimalik sulatada toorainetest (liiv, kaltsium, sooda) vannahjudes temperatuuridel alates 1600°C- see on kvartsiiva sulamispunkt, mil räni kristallstruktuur muutub mitte kristalseks [15]. Klaasi on võimalik sulatada üles - eelnevalt klaasi moodustunud materjali sulatamine vannahjudes või pottahjudes 1425-

1600°C. Klaasi on võimalik sulatada kokku kohverahjudes või eest laetavates sulatusahjudes, mille töötemperatuurid jäävad vahemikku 700°C - 900°C .[10]

Klaasistuudio sulatusahjus kasutatakse peamiselt tehnikaid nagu kokku sulatamine, koolutamine, vormikoolitus, reljeefsulatus, venimine, viimistlemine, klaasivalu ja *pate de verre*. Uuritav materjal sobib peamiselt vormivalu tehnikaks ja sellepärast vaatleme lähemalt klaasivalu tehnikat puudutavaid aspekte.

Sulatusprotsess sõltub enim klaasi omavahelisest kokkusobivusest ja käitumisest sulatusprotsessides[14]. Sulatustsükkel on temperatuuri ja aja õigete kombinatsioonide tulemus, kus üldistatult järgneb õige kiirusega temperatuuri tõus ja langus.



Joonis 1.3 Ideaalne sulatustsükkel (Autori kohendus P.Beveridge põhjal)

Sulamise käigus toimuvat kirjeldab joonis 1.3 [14]. Esmalt toimub temperatuuri kiire tõus toatemperatuurilt pingepunktini. Temperatuuri tõus peab olema ühtlane, et vältida termilist šokki. Pingepunkti ja lõõmutuspunkti vahel kaovad klaasisisesed pinged. Lõõmutuspunktist maksimumtemperatuurini peab samuti toimuma kiire ja ühtlane tõus, et vältida kristalliseerumist. Selles etapis muutub klaas vedelaks. Maksimumtemperatuuri juures on klaas töödeldav või sulavad klaasitükid kokku, selles punktis on klaasi viskoossus kõige madalam. Maksimum temperatuurilt algab kontrollitud jahutamine, ehk lõõmutamine. Jahutamine lõõmutustemperatuurini peab toimuma ruttu, et vältida kristalliseerumist. Lõõmutustemperatuuril hoitakse

temperatuuri, et vältida klaasisiseste pingete tekkimist, ühtlustub klaasi ja ahju temperatuur. Kui kokku sulatatavates klaasides on erinevad pingepunktid tuleb lõõmutusaega vastavalt pikendada. Aeglase jahutamise etapis viiakse temperatuur vaikselt alla, võimaldades klaasil taheneda. Kui jahtumine toimub liiga kiiresti võib klaas puruneda. Viimases etapis jahutatakse klaas toatemperatuurini. [17]

Sulatustsükli etappide pikkuse ja temperatuuri määravad paljud asjaolud. Oluline on klaasi kogus, paksus, kasutatav tehnika ja soovitud lõpptulemus. Määrav võib veel olla sulatusahju tüüp, heakord, keskkond, soojuse jaotus. [17]

## 1.2 Stuudioklaas

Käesolevas töös kasutan terminit "stuudioklaas" üldistavalt tunnustatud toormaterjali kohta, mida klaasistuudiotest kuumtöötlemiseks kasutatakse. Stuudioklaasi termin ajalooliselt viitab kuumale klaasile kunstilise vahendina kasutamisele. Klaasitööstused on kasvanud suureks ja spetsialiseeruvad lokaalselt ühe spetsiifilise toote valmistamiseks. Näiteks ainuke klaasi tootja Eestis, Järvakandis paiknev O-I Production Estonia valmistab eranditult kirkast klaaspakendit) [18]. Mitmekülgsemalt tegeletakse klaasiga kunstnike stuudiotest. Klaasistuudiotest valmistatakse nii väiksemahulise tiraažiga disaintooted kui ainuüksnäidetest kunstiteosed.

Stuudioklaasi toodetakse mitmel pool maailmas. Näited allpool. Iga tootja on loonud oma standardid ja katsetanud värvide kokkusobivust oma toodangu või kindlate koostööpartnerite piires. Puhumisklaas ja sulatusklaas võivad, aga ei pruugi olla erinevate toodetena. Puhumiseks ja vormivaluks toodetakse enamasti klaasitoormeks helmeid ja sulatuseks lehtklaasi.

Järgnevalt on toodud suuremate sulatusklaasi tootjate tutvustused.

Oceanside on Ameerika Ühendriikide ettevõtte, mis toodab stuudioklaasi kaubamärki System96. Nende tootmine on viidud Mehhikosse. Tootevalikusse kuuluvad nii klaasmosaiigi elemendid kui klaas kunstnikele. Toodete sortimendis on klaasplokid, vardad, lehed, pulgad ja puru. Kirkas klaas sisaldab antimoni. Kirjanduse andmetel on joonpaisumistegur (COE) 95.8-96.8. Materjali täpsed koostised pole avalikustatud. [19] Tooteleht lisana manuses (Lisa 3).

Saksamaa tootja Cristalica toodab stuudioklaasi brändi nimega Premium Glass Nuggets 100. Tootelehe kohaselt on joonpaisumisteguri näitaja (COE) 96. Ränidioksiidi sisaldus jääb vahemikku 69-71,5%. Naatriumdioksiidi sisaldus vahemikus 12,5-12,9%. Kaaliumoksiidi sisaldus ulatuses 5-5,5%. Liitiumoksiide alla 1%. Kaltsiumoksiide vahemikus 4-4,5%. Baariumoksiidide sisaldus 2,5-3%. Tsinkoksiidide sisaldus vahemikus 0,6-1,3%. Alumiiniumoksiide sisaldus massis 1-1,5%. Boori okside ulatuses 1-1,5%. Antimoni ühendeid 0,2-0,5%. Väävli okside 0,2-0,3%. Erbiumoksiidide ühendeid klaasimassis võib esineda ulatuses 0,03-0,05%. [20]

Tooteleht lisana manuses (Lisa 1).

Rootsi klaasitootja Glasma turustab oma toodet kui plii-vaba kristalli. Toote täpne koostise info ei ole avalikustatud. [21]

Tšehhi klaasitootja Bomma, toodab kõrgelt hinnatud kirkusega klaasi graanuleid, mis sobivad sulatuseks ja vormivaluks. Nende toodang on plii-vaba ja pika vormimisajaga. Sulamistemperatuur 1250–1280°C kraadi, klaasivalule 850-900°C. Tootja lubab madalamatelt sulamistemperatuuridelt 30-40% energia kokkuhoidu võrreldes toormaterjalide ise segamisega. Tugineds ettevõtte väljatoodud näitajatele on joonpaisumisteguri 96. Klaasi erikaaluks on tootja andmetel 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Refraktsiooni indeksiks tootja andmetel on 1.5211. Sobib kokku sulatusklaasi värviliste sulatusklaaside tootjatega: Glasshütte Reichenbach, Gaffer Colours, Kugler glass. Sulatusklaasi mass koosneb 65-75% ulatuses ränidioksiidist, 5-15% mahus naatriumoksiidist, 5-15% kaaliumoksiidist, alla ühe protsendi on liitiumoksiide, 5-15% kaltsiumoksiide, 3-5% mahus baariumoksiide, 1-3% ulatuses tsinkoksiide, alla ühe protsendi alumiiniumoksiide ja magneesiumoksiide ning alla poole protsendi antimoniühendeid. [22] Tooteleht lisana manuses (Lisa 2).

Ameerika Ühendriikide ettevõtte Bullseye Glass Co. toodab Portlandis värvilist sulatusklaasi lehtedena, pulkadena, varrastena ja puruna. Koostiste andmed ei ole avalikult kättesaadavad. [23]

### **1.2.1 Klaasi taaskasutus stuudio keskkonnas**

Pakendiklaasi suuremahuline tootmine võimaldab toormassi sisse segada kuni 80% vanaklaasi [24], kui väiksemates kogustes on eri päritolu materjali kokkusulatamine keeruline. Kunstnikud stuudios taaskasutavad oma jääke ja praake – teades täpselt materjali päritolu. Jätkusuutlikumalt on klaasi taaskasutus Eestis vähene. Stuudio

keskkonnas on võimalik ühe eseme "übersulatus", et vältida erinevate koostisega klaaside sobimatust. Saab vaagnateks sulatada pudeleid, pokaalidest aluseid jne (T.Sarapu, E.Soon, E.Koha, A-L.Leht, vestlused klaasikunstnikega 2021).

Ideeklaas klaasistudio kunstnik Kalli Sein kasutab Tarbeklaasi toodangut emotsionaalse disaini taaskasutusprojektis EHE, valmistades nostalgilisest nõudest ehteid [25]. UStudios Läänemaal valmistatakse meeneid ja nõusid klaasi ülejääkidest [26]

Väljaspoolt Eestit on näiteid palju. On klaasistudiod, mis on pühendunud vaid jäätmeklaasist toodete valmistamisele [27]. Inspireerivaks näiteks Taani klaasikunstnik Permille Bülow, kes koostöös kohaliku meditsiiniettevõttega, taaskasutab laboratooriumiklaasi disaini kaudu väärtust lisaval moel [28]. Näide P.Bulow laboriklaasist ümber puhutud vaasist Joonisel 1.2.



Joonis 1.4 Permille Bülow laboriklaasist ümber puhutud anumad [28]

Antud töö kontekstis kõige tähelepanuväärsem 2018 Material District *New Material Award* auhinna nominant *Re3 glass* [29]. Delfti Tehnoloogia Ülikooli teadlased ReStruckt uurimisrühmast löid jäätmeklaasile modulaarse arhitektuurse rakenduse. Erinev jäätmeklaas sulatatakse orgaanilise vormiga ehitusplokkideks, mis ei vaja sidusainet ja hiilgab stuktuursete omaduste poolest. Projekti autorid on mõistnud, et klaasile ei ole omane olla täisnurkne tahukas [7]. Teadlaste katsetused on tehtud klaasistudiotest kasutusel olevatel kohverahjudes, sest võrdlemisi madalad töötemperatuurid 700-900°C tunduvad energia säästlikumad [9].



Oikonomopoulou on taastöödeldud klaasi omadusi uurides, katsetanud erinevate tavakasutusest kokku korjatud klaasmaterjalide sulatust stuudioahjudes, eesmärgiks luua modulaarseid arhitektuurseid ehitusplokke. Teadlase uurimistulemused on väga olulised, loodud katsetoodika ja empiiriliste tulemuste poolest. Käesoleva töö katseloogika on ehitatud üles sarnaselt Oikonomopoulou tööruhmale. Põhinedes tööle, milles uuriti vormivalu jäätmeklaasi struktuurset tugevust. Uuritakse klaase alates televiisori ekraanidest, akendest kuni kristallnõudeni. Katsetulemused näitavad, et ülimalt oluline on, et kokku sulatatakse vaid sarnase keemilise koostisega klaasi, klaasi fraktsioon oleks puhas soovimatutest lisanditest ja valitaks õige sulatus- ja lõõmutusrežiim. Artiklis jõutakse järeldusele, et struktuurset tugevuse määravad tuleks edasi uurida, kuid klaasi sulatamisel on võimalik klaasi vigu (kristalliseerumist, klaasimassi ebaühtlust, mullilisust) vältida, olles teadlik materjali koostisest ja selle omadustest. [30]



Joonis 1.5 Modulaarsete klaasist ehitusplokkide näidised [30]

Ameerika parimate praktikate ühendus (CWC) [31] soovib klaasi lokaalset ümbertöötlemist klaasistuudiotest, olenemata sellest, et stuudio toodangu lõpphinnast moodustab tooraine vaid murdosa. Kuid spetsialiseerumine lokaalsele ümbertöötlemisele on ressursside kokkuhoid suuremas plaanis.

## 1.2.2 Kuuma klaasi stuudiod Eestis

Eesti Klaasikunstnike Ühenduse nimekirja kuulub 2022 aastal 60 kunstnikku [32]. Klaasipuhumiseks sobiv sisseseade on Eestis vaid mõnes kohas ja pidevalt on ahi töös vaid Olustvere Teenindus- ja Maamajanduskooli klaasikojas. Šahtahjud on veel Katariina Gildi klaasikojas, Järvakandi klaasimuuseumis. Hooajaliselt ka Evald Okase muuseumis Haapsalus, Laugu klaasikojas Saaremaal ja Eesti Kunstiakadeemias Tallinnas. Väiksemad sulatusahjud on kasutusel erastuudiotel. Tegusamad sulatusklaasiga tegelevad klaasistuudiod/kunstnikud: Klaasiklubi, Eeva Käsper, HYTI Design, Kati Kerstna, Ideeklaas, Kunstipada, Katariina Gildi klaasikoda, Karin Mölder, Maria Tamm, Rait Päärts, Kairi Orgusaar, Nõmme Klaasi- ja Keraamikastuudio.

Klaasiklubi stuudios tegutsevad koos kolm kunstnikku Maret Sarapu, Kai Kiudsoo-Värv ja Tiina Sarapu. Kunstnikud on aktiivsed nii näitustel, tellimustööde valmistamisel kui klaasikunsti õpetamisel töötubades. Tiina Sarapu on tunnustatud klaasikunstnik, kunstnikupalga saaja, pikaajaline EKA klaasikunsti osakonna dotsent [33]. Tema töid iseloomustab hoolikalt läbi tunnetatud minimalism, mille saavutamiseks on vaja tehnilist täiuslikust.

Eeva Käsper on klaasikunstnik, kelle tegevus on kolinud Klaasiklubist Lõuna-Eestisse. Tema töid viivad Eestist koju PÖFFi filmifestivali, EFTA jpt, võitjad [34]. Käsperi tööde arhitektuurne ülesehitus nõuab samuti kunstnikult terve protsessi äärmist tehnilist täpsust.

HYTI Design on klaasikunstnik Anne-Liis Leht stuudio. HYTI looming on suures mahus ka disaini poodide riiulitel [35]. Tema loodud seeria toodetes, mis kannavad endas põhjamaist minimalismi nooruslikust vaatenurgast.

Ideeklaas on klaasistuudio Hiiumaal kus tegutsevad koos Kalli Sein ja Valev Sein. Kalli tegeleb lisaks klaasikunstile, auhindade loomise ja töötubade korraldamisega. Valev Seina loominguks on peamiselt vitraažid. [36]

Katariina Gildi klaasikojas tegutsevad klaasikunstnikud Kai Koppel ja Viivi-Ann Keerdo. Klaasikojas tegeletakse peamiselt klaasipuhumisega. Valmivad värvikad ja omanäolised klaasnõud. [37]

Klaasistuudiod on väga isiksusekesksed, kus stuudiotegevus koondub täielikult klaasikunstniku loomingu olemusest lähtuvalt. Stuudiotel tegeletakse tihti lisaks

vabaloomingule töötubade korraldamisega. Samuti on tellimustööde valmistamine üks võimalik väljakutse. Aina enam hakkab tekkima ka jätkusuutlikke võimalusi loomingu müümiseks ja sellest johtuvalt kujunevad klaasikunstnikel seeriad disainitud tarbeesemetest või sisustuselementidest, mis kunstniku käekirja kannavad.

### **1.3 Väärtust lisav redisain – upcycling**

Jäätmetel on kehtiva seaduse mõistes kolm võimalikku tulevikku: 1) Korduskasutus - Kasutatakse uuest esialgsel eesmärgil 2) Taaskasutus sh. ringlussevõtt - materjali kasutuselevõtmine viisil, mil see teisi materjale asendab esmasel- või uuel eesmärgil 3) Kõrvaldamine - ladustamine, põletamine ilma energiakasuta [38].

Ökodesain on lähenemine, mille lähteks on kogu olelusringi arvestav lähenemine. Esmalt on oluline, et tootest ei saa jäädet võimalikult kaua. Kui esmase kasutus eesmärk enam võimalik ei ole läheb toode ringlusesse. Täna on see üldiselt väärtust kaotav protsess, kus materjal muutub aseaineks. Ökodesaini printsiip "disainitud ümbertöötluks" luuakse toode väljavaatega jätkusuutlikuks uuskasutuseks, mille puhul ei kaota materjal oma omadusi, ega tekita omakorda ülejääke [39].

Ringmajanduse suunas liikudes tuleks materjalid viia suletud tootmissüsteemi, milles on läbi disainitud kogu toote olelusring [40]. Ringmajandus saab võimalikuks ainult ökodesaini printsiipe kasutades [41]. Veelgi parem - väärtust lisav uuskasutus. *Upcycling* on uuskasutus, mille puhul jäätmed, ülejäägid, kõrvaleheidetu muudetakse väärtuslikumaks tooteks. Parimaks näiteks Reet Ausi kaubamärk Upmade - mis on ümberlõikus jääkidest loodud tuntud ja rahvusvaheliselt tunnustatud kaubamärk [42].

### **1.4 3Dlaseri tooted**

3Dlaseri tehnoloogia võimaldab CAD mudeleid graveerida kolmes dimensioonis (3Ds) klaasi pinna sisse. Peamiselt leiab rakendust väärivate meenete, auhindade, personaalsete kingituste loomisel [43]. Klaasi sisese graveeringu tehnoloogia avastati tänu juhusele 1987 aastal vene teadlase Prof. M.J. Soileau poolt. Sajandivahetuse paiku andis tehnoloogia rakendusele uue hoo Hiinas valmistatud "soodsamad" rohelised

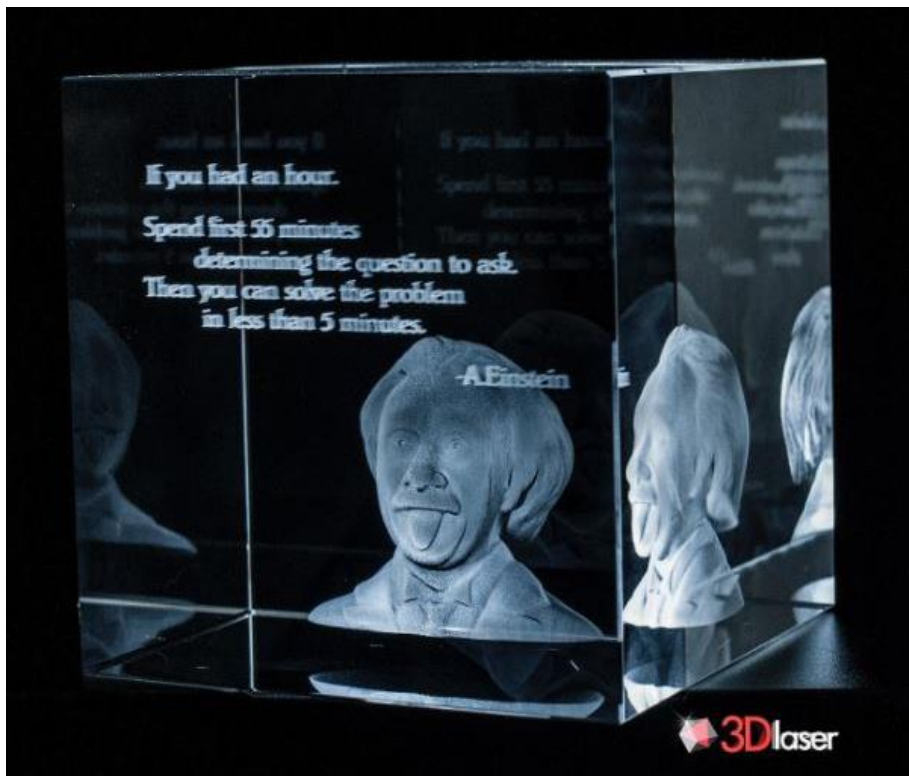
laserid [44]. Äripotentsiaali kasvatas valdkonnas Saksamaa ettevõtte *Cerion GmbH* valmistades lasereid lisades "saksa täpsuse" ja usaldusväärse tarkvara [45].

Klaastoorikuid 3D lasergraveermisega tegelevatele ettevõtetele turustatakse mitmete eksitavate nimedega – Kristallklaas, K9 klaas, kunst-kristall jne.

Pinnasest graveeringut (SSLA – *sub surface laser engraving*) saab teha vaid kõrge kvaliteediga klaasi toorikusse, mis peab vastama kindlatele tehnilistele tingimustele:

- pind peab olema väga sile,
- klaasi sees ei tohi olla voolamisest/ pressimisest viirge,
- refraktsiooniindeksiks  $\sim 1.5$ ,
- heade optiliste omadustega.

Võttes arvesse neid tingimusi, saab 3Dlaser graveeringuga toodetele omistada materjali kvaliteedi omadusi. See on käesoleva magistritöö hüpoteeside eelduseks, et 3D graveering on kvaliteedimärk klaasi materjali koostise osas.



Joonis 1.6 3Dlaseri valmistoode [43]

## 2. MATERJAL JA METOODIKA

Eesmärgi saavutamiseks oli vajalik tuvastada klaasi koostis ja võrrelda seda tunnustatud stuudioklaasi kaubamärkide toodanguga, et siis sulatuskatsete käigus, luua tulemuste maatriks, milles koostised ja sulatuskatsete tulemused on korrelatsioonis. Katseplaani loomise aluseks on Delfti Tehnoloogiaülikooli teadlaste Telesilla Bristogianni ja Faidra Oikonomopoulou uurimistöo valuvormi jääklaasi struktuurset tugevusest [7]. Käesoleva töö üheks uurimisülesandeks on leida konkreetse olemasoleva klaasi peamised näitajad ja võimalik uuskasutus, mille puhul füüsilised tugevusnäitajad pole esmaselt olulised. Eelmainitud uurimistöös katsetati paljude erinevate jäätmeklaasi sortidega ja sarnaselt käesoleva tööga, otsiti paljude seast parimaid tulemusi. Esmalt leiti klaasi keemiline koostis, mille järgi vastavalt otsustati parimad võimalikud sulatamisrežiimid, millele järgnesid visuaalsed ja laboratoorsed hinnangud.

### 2.1 Materjali keemilise koostise määramine

Uuritav klaas, 3Dlaseri toodete toorikud, mis läbi mitmete tarnijate tulevad Eestisse, on toodetud Hiinas ja selle koostis on teadmata. Selleks tuli esmalt leida võimalused määrata klaasi koostis. Kompetents ja tehnoloogia selleks on olemas Tartu Ülikooli ökoloogia ja maateaduste instituudi Maapõueressursside arenduskeskuse laboris MAREK.

MAREK labori seadmel röntgenfluoresents-spektromeetria (XRF) seadmel on võimalik määrata tahkete ainete keemilist koostist. Mõõdetud elemendid olid B – Mo ja Ag – U elementide järjekorranumbrite järgi. Mõõtmised tehti firma Rigaku lainedispersiivse röntgenspektromeetriga ZSX Primus II (Joonis 2.1), kasutades Rh-primaarkiirgust. Sisaldused arvutati standardivaba poolkvantitatiivse meetodiga (leitud elementide summa = 100%). Inseneripraktika põhjal olgu täpsustatud, et kergete elementide määramisel ei ole see meetoodika kuigi täpne. Liitiumi sisaldust määrata ei ole võimalik, kuid seda võib esineda klaasi koostistes kirjanduse põhjal kuni 1%. Boori määramisel võib esineda ebatäpsusi. Meetoodikast tulenevalt lisatakse määramata komponentide sisaldus ränidioksiidi protsentuaalsele osale.



Joonis

2.1 Rigaku ZSX Primus II TÜ laboris [50]

Analüüstiti nelja erinevat 3Dlaseri toodet (Joonisel 2.2, nr 1-4), viite tunnustatud stuudioklaasi kaubamärki (Joonisel 2.2, nr 5-10) ja üht kirkast floatklaasi proovi (Joonisel 2.2 nr 11). Proovid koguti 3Dlaseri stuudiost, Klaasiklubist ja Olustvere klaasikojast. Proovid töödeldi võimalikult tasapindseks, kohanduma proovinõudesse diameetriga 30, 20 või 10mm. Proovinõud ja proovid on kujutatud Joonisel 2.2.



Joonis 2.2 Klaasiproovid ja röntgenfluoresents-spektromeetria masina proovinõu (Autori fotod)

Uurimisalusteks on neli erinevat toodet 3Dlaseri toodete seast. Tegemist on tootmispraagiga. Stuudioklaasi kaubamärgid valiti Eestis klaasistuudiotest peamiselt

kasutatavate kaubamärkide seast, millega kohalikud klaasikunstnikud on tuttavad ja omadused praktiliselt läbi tunnetatud. Edaspidi saavad 3Dlaseri tooted nimetatud Proov 1, Proov 2, Proov 3, Proov 4. USA tootja sulatuslehtklaasi CEOga 96 nimetan edaspidi Proov 5, Rootsi sulatusklaasi Proov 6, Tsehhi sulatusklaasi COE näitajaga 97 Proov 7, kahte samast USA stuudioklaasi COE näitajaga 96 Proov 8 ja Proov 9, Saksamaa sulatusklaasi Proov 10 on COE98 ja Proov 11 floaatklaas Saksamaalt (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Proovide päriolu ja joonpaisumistegur (kui on teada)

<b>Proovi number</b>	<b>Päritolu</b>	<b>COE</b>
1	3Dlaser	n/a
2	3Dlaser	n/a
3	3Dlaser	n/a
4	3Dlaser	n/a
5	USA lehtklaas	96
6	Rootsi	-
7	Tsehhi	97
8	USA	96
9	USA	96
10	Saksamaa	98
11	Floaatklaas Saksamaa	n/a

## 2.2 Sulatuskatsed

3Dlaseri toodete omaduste uurimiseks klaasisulatusahjus teostati mitmeid katseid, samm-sammult liikudes eesmärgi - erinevate toodete kokku sulatamise - suunas. Kuna klaas võib partiide kaupa olla erineva koostisega ja seda on võimatu välisel vaatlusel hinnata, alustati sulatuskatseid vaid ühe tervik objekti (millel homogeene koostis) sulatamisega, et leida ahjule parimad sulatusprogrammid. Teisalt mängib rolli ka sulatusvormi keerukus ja sulatusvormi materjal. Sestap sulatati alustuseks esmalt klaasi ilma vormita, et välistada vormist tulevad pinged või soovimatu saaste.



Joonis 2.3 Sulatusahi Nabertherm SF240 HYTI Design klaasistuudios (Autori foto)

Sulatuskatseid sooritati Nabertherm SF240 kohverahjus HYTI Design klaasistuudios (Joonis 2.3). Sulatustsüklid on igale katsele eraldi määratud parimatele praktikatele toetudes ja kirjeldatud täpsemalt all järgnevalt katseobjektide juures. Sulatusvormid on valmistatud kips-kaoliini segust suhtes 1: 3. Klaasesemed purustati haamriga.

### 2.2.1 Sulatuskatse nr 1. Terviktoote sulatus ilma vormita

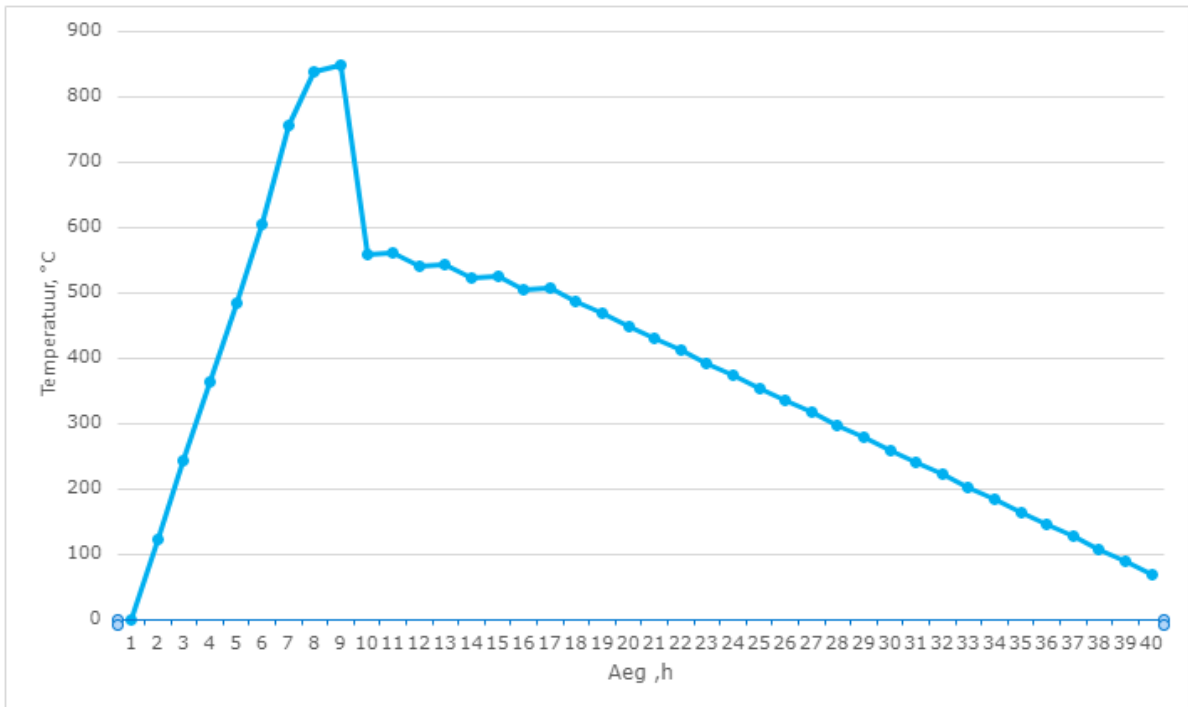
Esmalt, hindamaks klaasi sulamistemperatuuri ja viskoossust, sulatati ahjus üks lõhkumata klaasese (Joonis 2.4).



Joonis 2.4: Katseobjekt enne sulatust

Katseobjektiks on 3Dlaseri toode, klaasist kuup, mõõtudega 60x60x60mm ja kaaluga 535g.





Joonis 2.5 Katseobjekt nr 1 sulatustsükkel

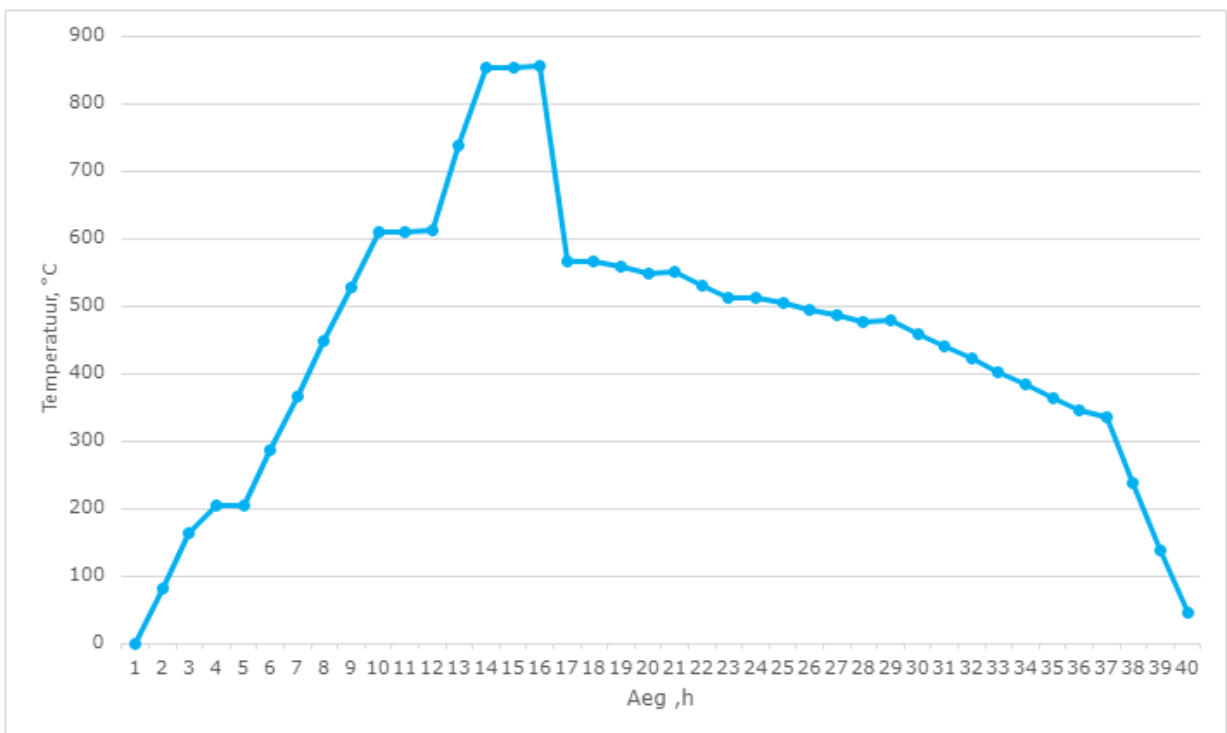
Sulatustsükkel (Joonis 2.5) on määratud kestma 40 tundi. Kõrgeim temperatuur 850°C, milleni jõuti sulatustsükli üheksandal tunnil, sellele järgnes kiire jahtumine lõõmutuspunktini 550°C ja sealt edasi temperatuuri alla toomine pingepunktini 520°C, ja edasi sammuga 20°C/h jahtumine toatemperatuurini.

### 2.2.2 Sulatuskatse nr 2. Terviktoote sulatus kips-kaoliin vormi

Sulatuskatse nr 2 on ühe purustatud toote sulatus kips-kaoliinvormi. Vormi kuju võimaldab uurida materjali käitumist vormis, näiteks seda millised pinged tekivad ekstreemsetes punktides või et kas õhumullid saavad vormist vabalt välja (Joonis 2.6). Kips-kaoliin vorm mõõtudega 115x70x30mm. Vorm on täidetud 508g purustatud klaasiga.



Joonis 2.6. Katseobjekt 2 vorm ja vorm klaasiga enne sulatust (A-L.Leht foto).



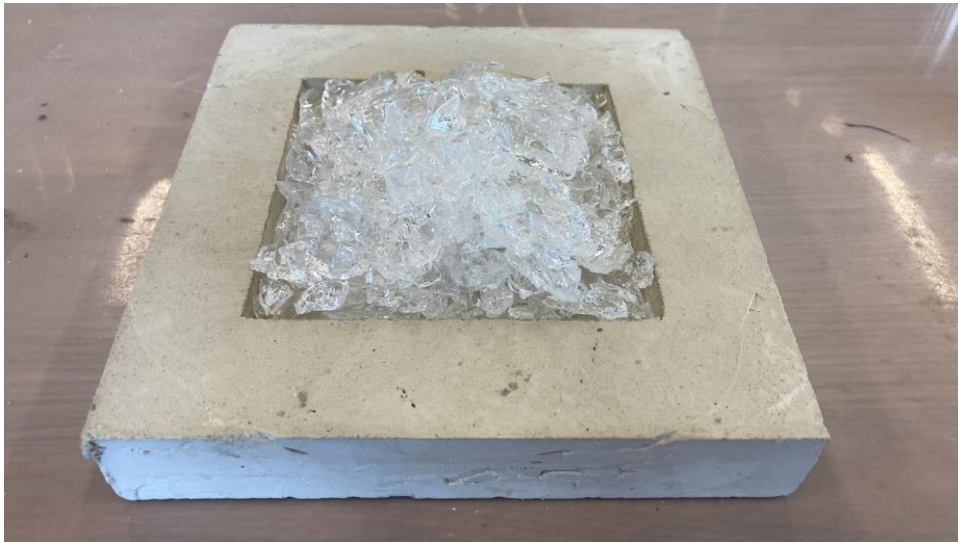
Joonis 2.7 Katseobjekt nr 2 sulatustsükkel

Sulatustsükli kestvus kokku 40 tundi, kõrgeimat temperatuuri 840°C hoiti 100 minutit, millele järgneb kiire jahtumine lõõmutuspunkti, edasi lõõmutus 20 tunni jooksul ja sealt temperatuuri alla toomine toatemperatuurini (Joonis 2.7).

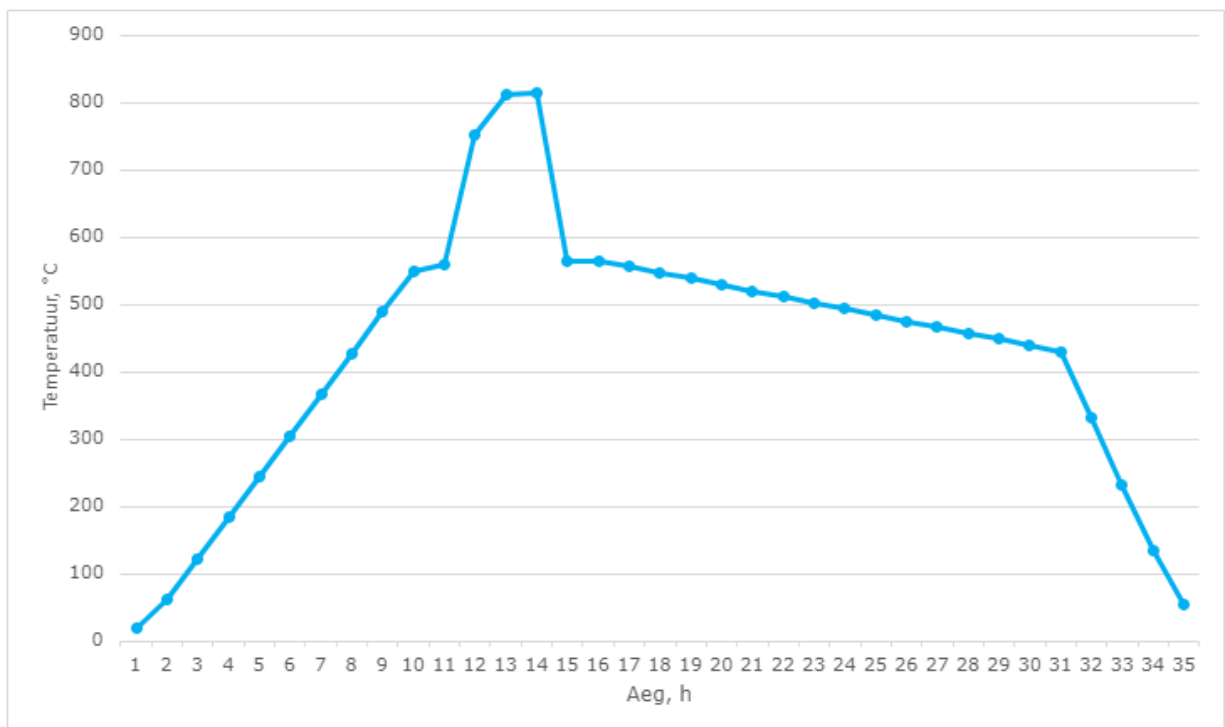
### 2.2.3 Sulatuskatse nr 3. purustatud toodete segu lihtsas kips-kaoliin vormis

Sulatuskatse nr 3 käigus sulatati lihtsast kips-kaoliin vormi purustatud peene fraktsiooniline 3Dlaseri purustatud toodete segu (Joonis 2.8)

Plaadi vormi mõõdud on 100x100x10mm ja see on täidetud 308g klaasipuruga.



Joonis 2.8. Katseobjekt 3 enne kokkusulatust (E.Kannike foto).



Joonis 2.9 Katseobjekt nr 3 sulatustsükkel

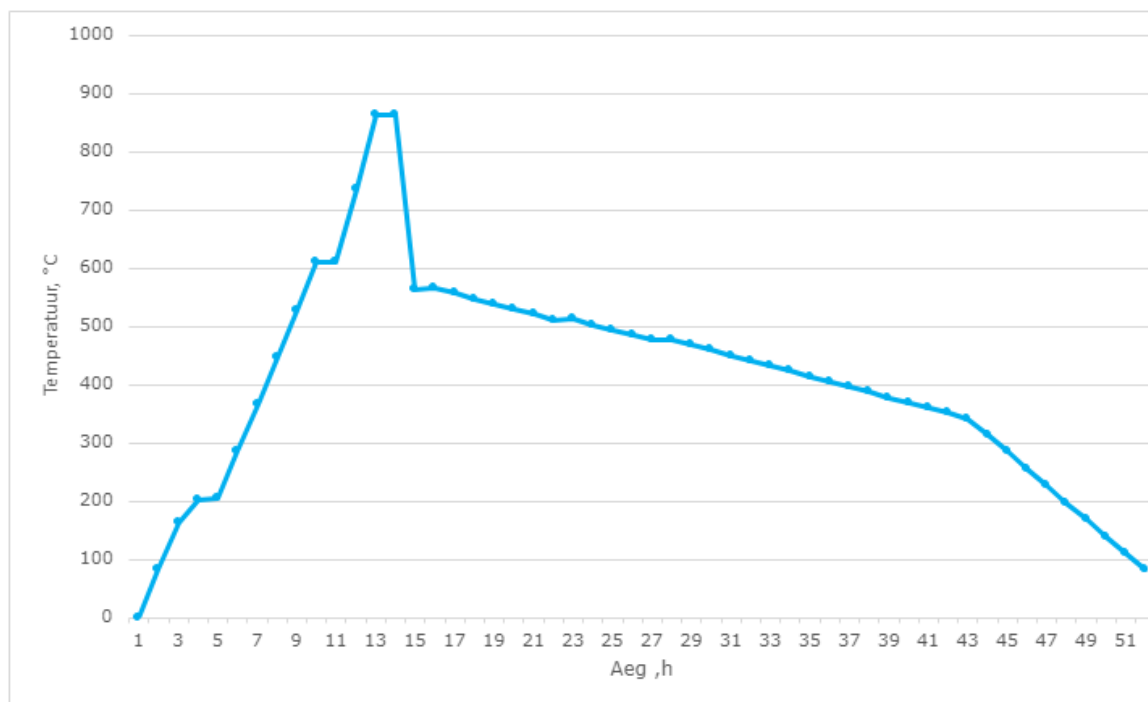
Sulatustsükli kestvus kokku 35 tundi. Kõrgeimal temperatuuril 800°C püsib 45 minutit, millele järgneb kiire jahtumine lõõmutuspunktini. Lõõmutusprotsess toimub järgneva 16 tunni jooksul, mille lõpuks on temperatuur 400°C, järgneb loomulik jahtumine toatemperatuurini (Joonis 2.9).

#### **2.2.4 Sulatuskatse nr 4. purustatud toodete segu keerulises kips-kaoliin vormis**

Sulatuskatse nr 4 käigus on kokku segatud mitmete klaasikuubikute purustatud graanulid. Kipsvormi tõmmis keerulisemast 3D prinditud objektist. Mitmetahuline, kuid negatiivsete pindadeta, õõnsuste ja suletud vormi pinnaga skulptuurne objekt. Eeldus on, et klaasi kättesaamiseks on vaja kipsvorm lõhkuda. Sulatatava objekti mõõdud on 185x120x30mm ja klaasikulu vormi kohta 710g (Joonis 2.10).



Joonis 2.10 Katseobjekt nr 4 enne sulatust(A-L.Leht foto).



Joonis 2.11 Katseobjekt nr 4 sulatustsükkel.

Sulatustsükkel kestis kokku 51 tundi, maksimum temperatuur 840°C saavutati üheteistkümnendal tunnil, millele järgnes kiire jahtumine lõõmutuspunktini ja sealt temperatuuri aeglane allatoomine toatemperatuurini (Joonis 2.11).

**Sulatuskatsete tulemuste hindamine.** Sulatuskatsete tulemuste kvaliteeti hinnati visuaalsel vaatlusel koos oma ala eksperdiga. Visuaalsel vaatlusel tuvastati vead klaasis. Klaasivigadeks on mullikolded, hägusused, viirud, võõrkehaded ja ebaühtlused klaasi pinnal [8]. Klaasisiseseid pingete tuvastamiseks pildistatud polariseeritud kilede vahel. Ristpolariseeritud valgus toob ilmsiks pinged, mida tavalises valguses ei näe. Polariseeritud kilede vahel näeme klaasisese erinevate tiheduste tõttu murduva valguse muutust värviliseks või valge häguna. Kui ühtlase konsistentsiga klaasi läbivad valgusekiired otse.

**Andmete analüüs.** Keemilise koostise analüüsi tulemused, sulatusprogrammide tingimused on graafiliseks esitluseks töödeldud tabelarvutustarkvaras. Andmetöötlemiseks, katsetingimuste ja -tulemuste visualiseerimiseks kasutatud Microsoft Excelit ja RawGraphs 2.0 beta tarkvara [48].

## 3. TULEMUSED JA ANALÜÜS

### 3.1 Klaasiproovide keemiline koostis

MAREK labori röntgenfluoresents-spektromeetria (XRF) seadmel määratud klaasiproovide keemiline koostis lainedispersiivse röntgenfluoresentsanalüüsi meetodil. Sisaldused arvutati standardivaba poolkvantitatiivse meetodiga (leitud elementide summa = 100%). Masin võimaldas määrata elemente B – Mo ja Ag – U. Tuvastati 26. elemendi esinemine klaasi koostistes (B, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Zr, Mo). Kui elemendi leiu sisaldus jääb alla 0,1% ja klaasides suuremaid anomaaliaid ei esine, siis neid tulemusi ei ole antud töös kirjaldatud.

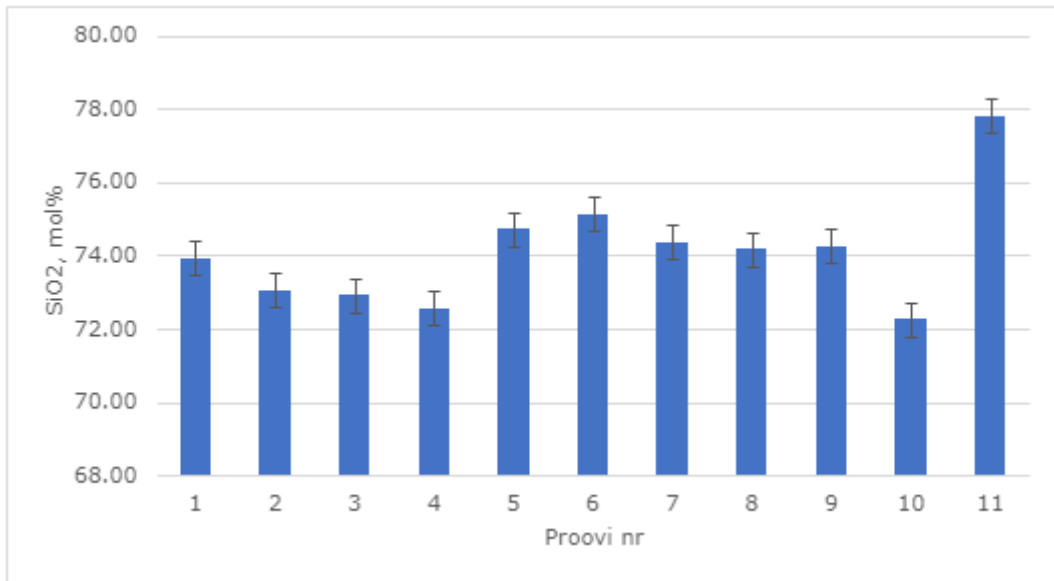
Keemiliste elementide kaupa on järkev informatsioon grupeeritud vastavalt esimeses peatükis välja toodud klaasi koostise joonisele: Klaasi moodustajad, sulatusained, täiteained ja lisaained.

#### 3.1.1 Klaasimoodustajate ( $\text{SiO}_2$ , $\text{NaO}$ , $\text{B}_2\text{O}_3$ ) võrdlus:

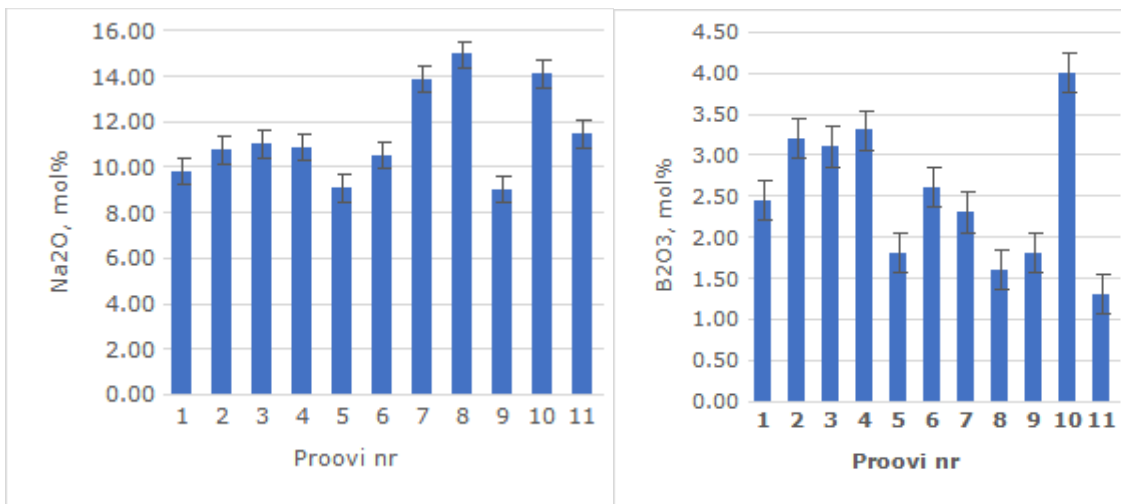
Peamist klaasi moodustajat - ränidioksiidi on proovides ülekaalukalt kõige rohkem 72-78 mol% (Tabel 3.1). Kui enamiku klaasiproovide räni sisaldus jääb vahemikku 72-74 mol%, mis vastab kirjanduses esitatud sulatusklaasi omadustele, siis selgelt eristub proov 11, mis on kirkas floaatklaas (Joonis 3.1). Ränidioksiidi sisaldus vastab kirjanduse põhjal kõigi klaaside puhul soodaklaasi koostisele [12].

Tabel 3.1 Räni, naatriumi ja boori ühendite sisaldus proovides (mol%)

Ühend	Proovi nr										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\text{SiO}_2$	73,94	73,05	72,91	72,57	74,73	75,12	74,36	74,17	74,26	72,27	77,82
$\text{Na}_2\text{O}$	9,80	10,76	11,02	10,87	9,07	10,5	13,87	14,96	9,00	14,11	11,45
$\text{B}_2\text{O}_3$	2,44	3,20	3,10	3,30	1,80	2,60	2,30	1,60	1,80	4,00	1,30



Joonis 3.1 Ränidioksiidi sisaldus proovides



Joonis 3.2 Naatriumoksiidi ja booroksiidi sisaldus proovides

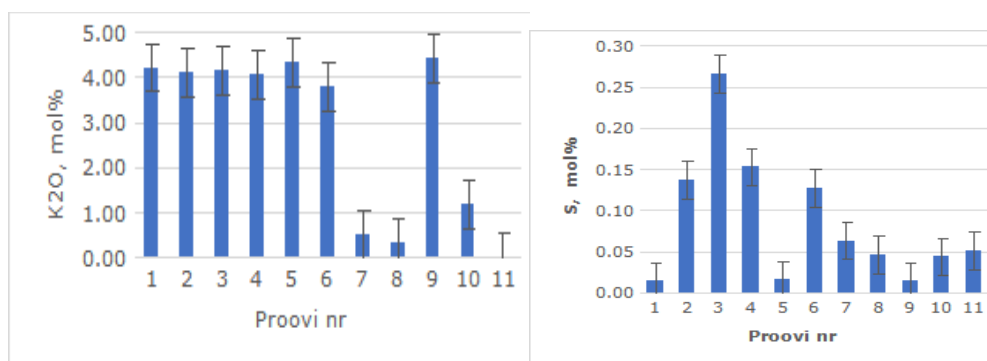
Booraksist pärit klaasimoodustajate naatriumi ja boori oksiidide sisaldused proovides jäävad vahemikku vastavalt 9-15 mol % ja 1-3,3 mol% (Tabel 3.1). Kui naatriumi sisaldused on üsna sarnased, siis booriühendite puhul on suuremas enamuses proov 10 (Joonis 3.2) ja kõige vähem floatklaasis. Siiski tuleb siinjuures arvestada, et analüüsi meetod on booriühendite tuvastamisel ebatäpne.

### 3.1.2 Sulatusainete (K<sub>2</sub>O, S) võrdlus:

Sulatusainetest, soodast, potasest ja glabrisoolast, on klaasi koostises kaaliumoksiide 0-4,4 mol% ja väevliühendeid 0-0,3 mol% (Tabel 3.2). Kaaliumi esinemisel torkab silma oksiidi vähene esinemine proovides 7,8 ja 11, kui ülejäänud proovides on sisaldus võrreldaval tasemel. (Joonis 3.3) Proovid sisaldasid väevliühendeid vähesel määral, neist suurim proov 3 näitaja 0,27 mol%.

Tabel 3.2 Kaaliumi- ja väevliühendite sisaldus proovides (mol%)

Ühend	Proovi nr										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4,21	4,09	4,15	4,05	4,34	3,80	0,50	0,35	4,40	1,2	0,02
<b>S</b>	0,01	0,14	0,27	0,15	0,02	0,13	0,06	0,05	0,01	0,04	0,05



Joonis 3.3 Kaaliumi ja väevliühendite sisaldus proovides

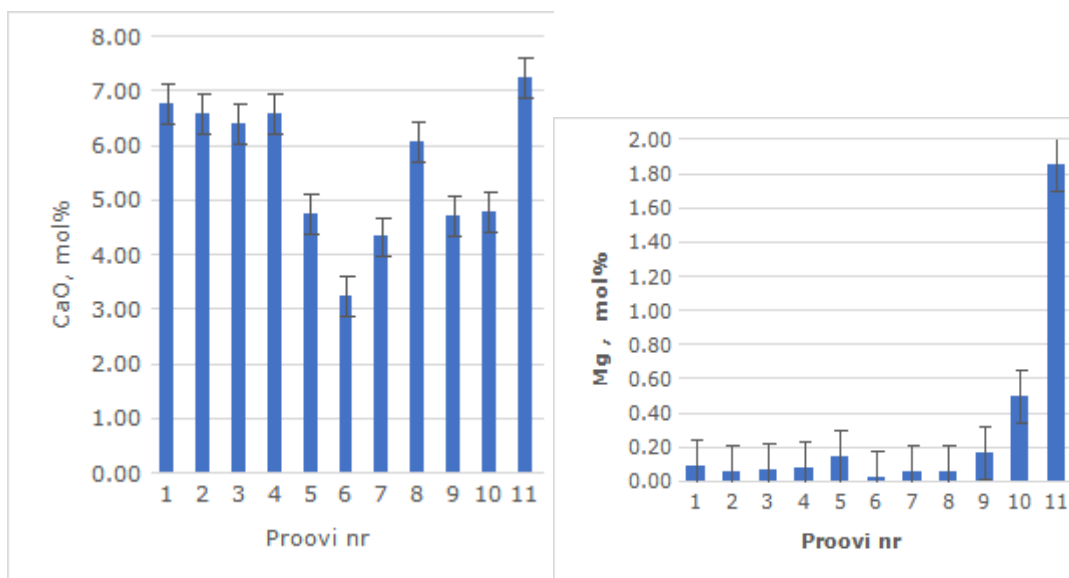
### 3.1.3 Täiteainete (CaO, Mg, Zn, Ba, Pb, Sb) võrdlus:

Dolomiidist ja lubjakivist pärit elementide kaltsiumi ja magneesiumi sisaldusi, vastavalt 4-7 mol% ja 0-2 mol% illustreerib joonis 3.4. Kaltsiumi sisaldus on kõige väiksem proovis 6 ja suurim proovis 10 (Tabel 3.3). Magneesiumit esineb küll kõigis proovides, aga väga vähesel määral, enim proovis 10, mille sisaldus on 1,85 mol%.



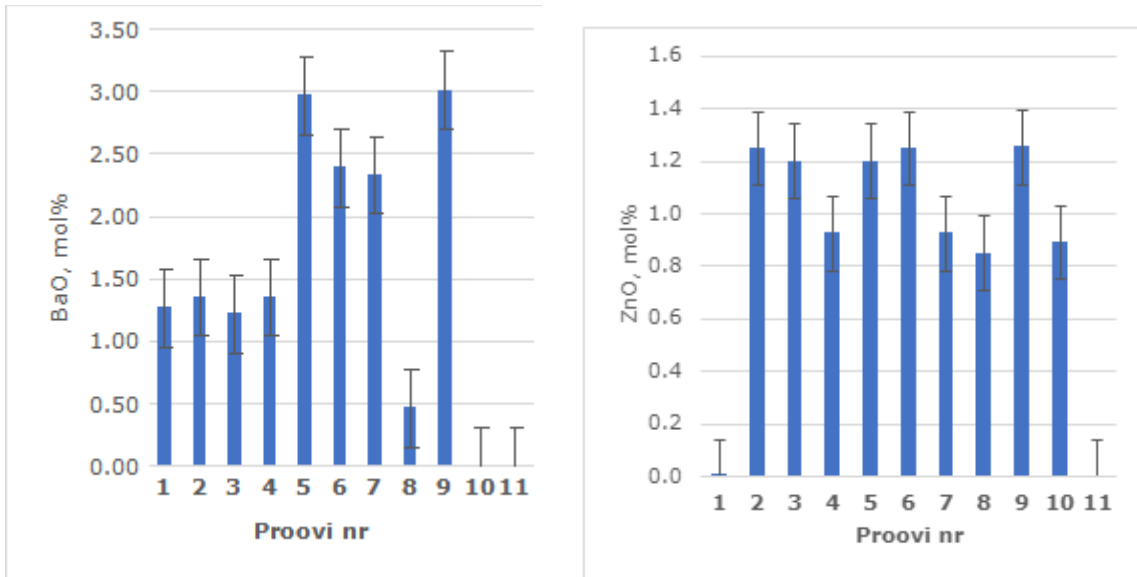
Tabel 3.3 Kaltsiumi, magneesiumi, tsingi, baariumi ja pliiühendite sisaldus proovides ( mol%)

Ühend	Proovi nr										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>CaO</b>	6,75	6,56	6,41	6,58	4,75	3,22	4,32	6,08	4,70	4,79	7,25
<b>Mg</b>	0,08	0,05	0,06	0,07	0,15	0,02	0,05	0,05	0,17	0,49	1,85
<b>Zn</b>	0,00	1,25	1,20	0,93	1,20	1,25	0,93	0,85	1,25	0,89	0,00
<b>Ba</b>	1,27	1,35	1,22	1,35	2,97	2,39	2,33	0,46	3,01	0,00	0,00
<b>Pb</b>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
<b>Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,13	0,22	0,38	0,22	0,49	0,39	0,13	0,13	0,54	0,16	0,00



Joonis 3.4 Kaltsiumi ja magneesiumi sisaldus proovides

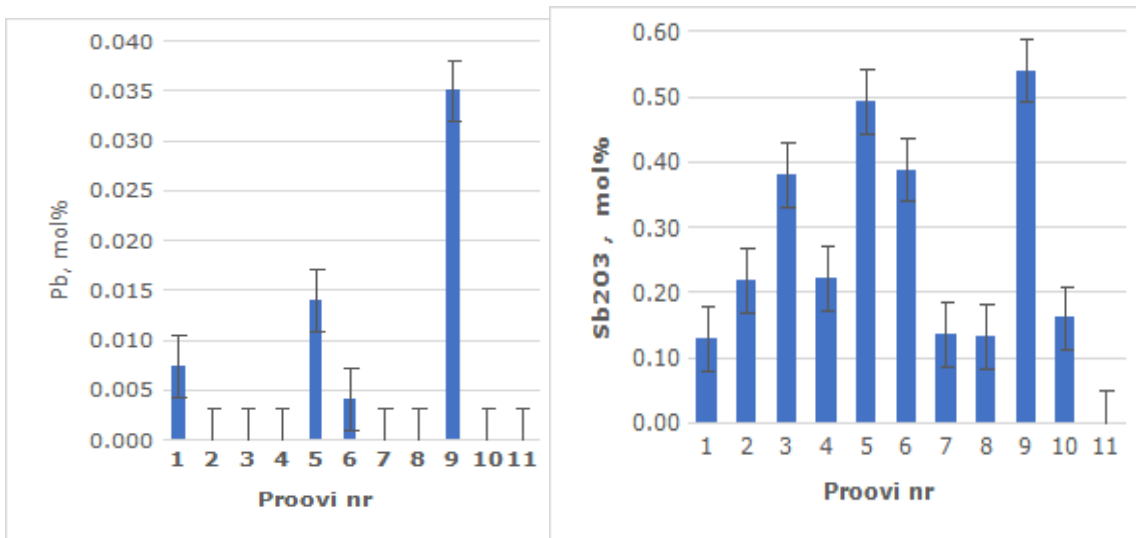
Baariumiühendite sisaldus proovides on üsna erinev, kõikudes 0-3 mol%. Kui proovides 10 ja 11 elementi ei tuvastatud, siis proovides 5 ja 9 oli selle sisaldus 3 mol%. Tsinki ei tuvastatud üldse proovides 1 ja 11. Ülejäänud proovides on tsingi sisaldus samane 0,9-1,2 mol%



Joonis 3.5 Baariumi ja tsingi sisaldus proovides

Kui 3Dlaseri toodete toorikuid turustatakse kui "kristalli", siis joonis 4.1.3.3 illustreerib selgelt, et tegelikult kristallklaasile omast raskemetalli, pliid, klaasiproovides praktiliselt ei esine. Proovides 2,3,4,7,8,10,11 ei tuvastatud üldse, proovides 1 ja 5 vaid 0,01 mol% ja kõige enam proovis 9 vaid 0,04mol%. Kristallklaas EL regulatsioonide kohaselt sisaldab vähemalt 24 mol% plii(II)oksiidi [49]. Seega on turul käibel olev nimi eksitav.

Üllatuslikult sisaldavad kõik proovid, välja arvatud proov 11, vähesel määral antimoni. Antimoni sisaldus jääb küll kõigis proovides alla 1 mol%, leiud vahemikus 0,1-0,6 mol%.



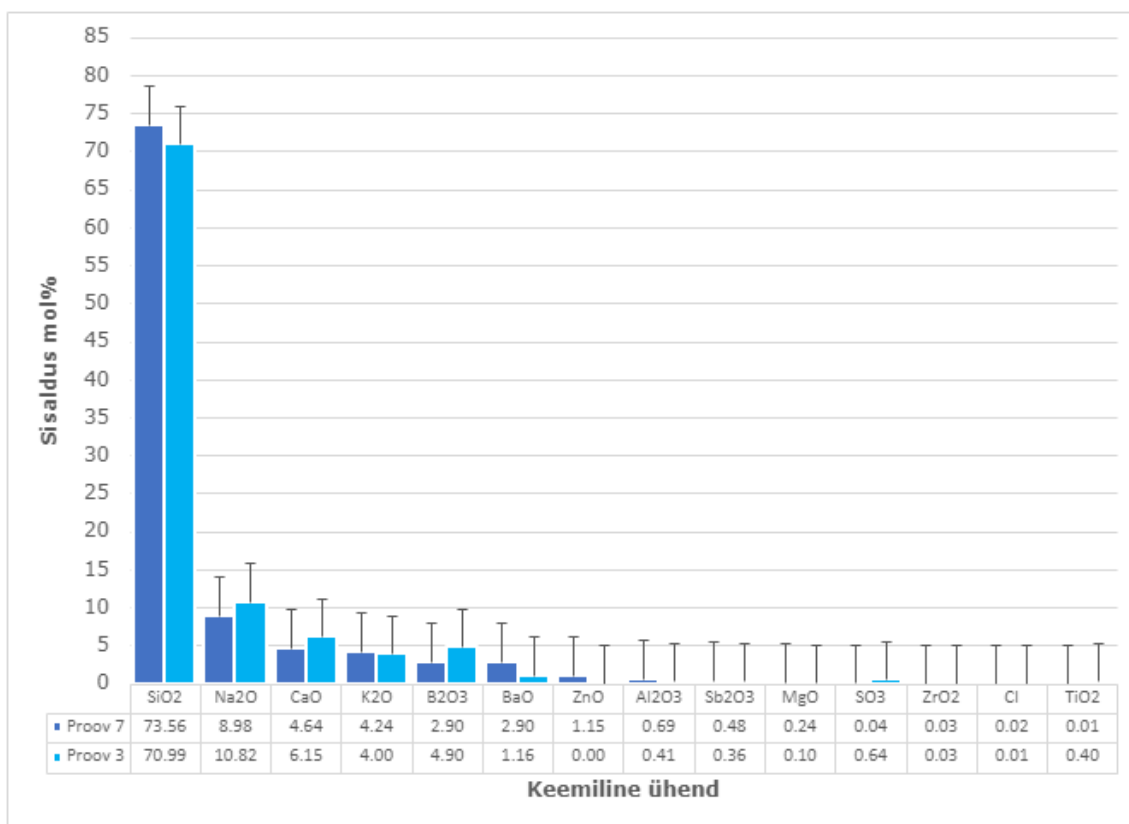
Joonis 3.6 Plii ja antimoni sisaldus proovides

### 3.1.4 Keemilise koostise analüüs

Koostisi analüüsides selgub, et kõik uuritavad klaasid on erineva koostisega, isegi sama tootja sama klaasi erinevates seeriates esineb koostises erinevusi (Proov 8 ja 9). Selgub ka, et 3D laseri erinevates toodetes on elementide sisalduse kontsentratsioonid erinevad.

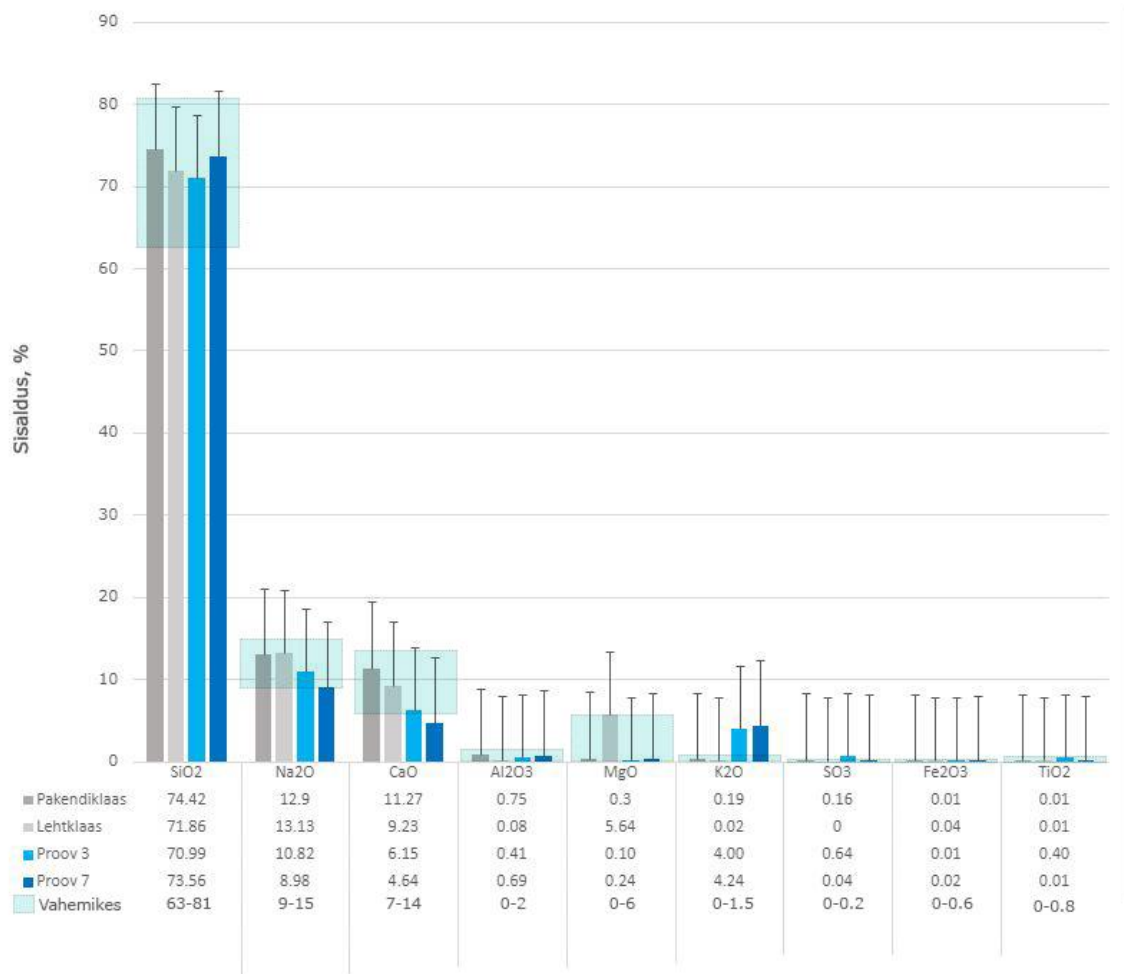
Proovid 1-4 on 3Dlaseri tooted, kuid neist selgelt eristub proov 1. See on eristuvalt lihtsama, floaatklaasile iseloomulikuma koostisega. Proovid 2-4 on võetud samaväärsetest toodetest, kuid erinevused esinevad on juba klaasi koostise põhiainetes (Na, Ca). Tugevalt eristub ka proov nr 6 - Rootsi pliivaba kristall (Joonis 3.4).

Edasi võrdleme lähemalt 3Dlaseri toodetest proovi nr 3 ja Tšehhi päritolu stuudioklaasi, proov nr 7, lähemalt. Neil kahel roovil on lisaainete leidude osas suuremad sarnasused (Joonis 3.7). Edasised koostiste sisaldused on, võrreldavuse huvides, viidud üle massiprotsentidele.



Joonis 3.7 Proovide 3 ja 7 omavaheline võrdlus

Võrreldes saadud tulemusi esitatud "tüüpilise" pakendi või aknaklaasi koostitega [12], näeme, et ei ole väga erinevad (Joonis 3.8). Kõik neli kuuluvad naatrium-kaltsium ehk soodaklaasi tüübi alla. Kui soodaklaasi kirjeldatud ränidioksiidi sisaldused jäävad vahemikku 63-81%, siis kõik mõõdetud väärtused jäävad vahemikku. Naatriumoksiidi kirjeldatud sisalduste vahemiku 9-15%, piiri alla jääb proov 7 sisaldusega 8,98%. Kaltsiumoksiidi sisalduse vahemik soodaklaasides kirjanduse põhjal jääb vahemikku 7-14%, siis mõõdetud tulemused proovides on sellest napilt väiksemad (6% ja 4%). Kaltsium satub klaasi koostisesse peamiselt lubjakivist ja vähendab klaasi viskoossust. Kõik mõõdetud alumiiniumoksiidi sisaldused jäävad kirjeldatud väärtuste vahemikku. Magneesiumoksiidi sisaldus soodaklaasides võib ulatuda 0-6% ja kõik väärtused sobivad vahemikku. Kui kirjanduse andmetel on kaaliumoksiidi sisaldus 0-1,5%, siis mõõdetud tulemustes on kaaliumi osakaal 4%. Kaaliumit kasutatakse klaasitööstuses reflaktsiooniindeksi tõstmiseks ja klaasi optiliste omaduste parandamiseks. Need näitajad on stuudioklaasil kindlasti olulisemad kui pakendiklaasi puhul. Väaveldioksiidi mõõdeti proovis 3 natuke rohkem kui kirjanduses leitav vahemik. Raua oksiidide leiud vastasid kirjandusele. Titaaniumoksiidide leiud samuti vastasid kirjanduse andmetele. Küll peab välja tooma, et pakendi klaas üldiselt ei sisalda boori ühendeid kuid kõigis analüüsitud proovides, nii 3D-laseri toodetes kui sulatusklaasides, esines boorioksiide 1-4%. Seega ei ole nad samaväärsed pakendiklaasiga ja pakendi klaasi ringluses, kus ümbertöötamiseks ei sobi boori sisaldusega klaas.



Joonis 3.8 Proov 3, Proov 7, tavalise pakendiklaasi ja lehtklaasi koostiste võrdlus

Keemilise koostiste võrdlus lubab eeldada, et 3Dlaseri toodete materjali võib käsitleda sarnaselt proov 7 tootja välja pakutud sulatusklaasi töötlemise tingimustele (Lisa 1- Tooteleht).

## 3.2 Sulatuskatsete tulemused

Sulatuskatsete tulemused vastavalt koostatud katsete kavale on kirjeldatud järgnevalt. Et veenduda purustatud toodetest skulpturaalsete vormide sulatamise sobivust liiguti selle suunas samm-sammult. Esmalt sulatati terviktoode vabavormiliselt, et hinnata valitud sulatusrežiimi sobivust. Teiseks sulatati üks purustatud toode vormi, et hinnata klaasi vormilist käitumist. Kolmandaks sulatati purustatud toodete segu lihtsasse vormi, et hinnata eri toodetest pärit toorme kokku sulamist. Neljandaks sulatati purustatud toodete segu keerulisemasse vormi, et hinnata materjali käitumist ekstreemsemate vormide saavutamisel.

### 3.2.1 Terviktoote sulatus

Terviktoote sulatus kulges väga õnnestunult (Joonis 3.9). Klaaskuubik sulas ühtlaselt, oodatud mahus ja defektideta. 60mm küljepikkusega kuubist sulas 145 mm diameetriga 10mm paksusega ring. Kristallatsiooni võib täheldada vähesel määral proovitüki servades. Vastu valgust vaadates võib näha sulatusproovis algse klaaskuubiku pinnavormi. Ristpolariseeritud valguses sulamisest tekkinud kriitilisi pingeid ei ole. Pildil nähtavad pinged on sulamise järgselt teostatud 3Dlaser graveeringust, mille liigsed pinged tekitasid klaasi sisse mõra.



Joonis 3.9 Terviktoote sulatus ilma vormita 3D lasergraveeringuga. Tavalisest ja ristpolariseeritud valguses. (Autori fotod)

### 3.2.2 Purustatud terviktoote sulatamine vormi

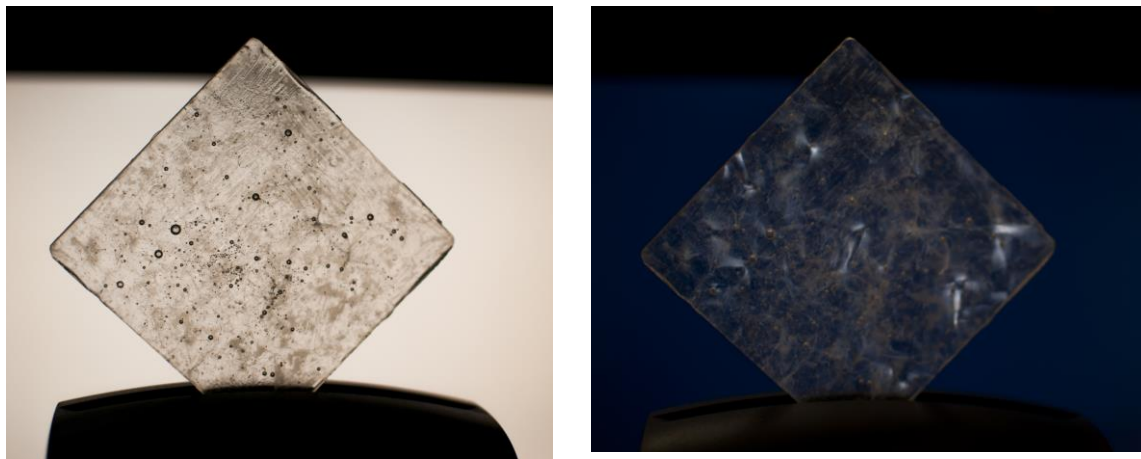
Katsekeha 2 (Joonis 3.10) valmistamiseks purustatud klaas on ebaühtlase fraktsiooniga ja pesti, et vähendada juhuslike lisainete sattumist massi. Tulemus on kirkas, väheste õhumullidega ja ainult aimatavate hägusustega. Katsekeha servades esineb väga vähesel määral kristalliseerunud pinda. Ristpolariseeritud valguses on näha vormi loogikast tulenevaid pingeid, mis ei ole kriitilised ega ohusta klaasi terviklikkust.



Joonis 3.10 Katsekeha 2 tavalises ja ristpolariseeritud valguses. Pealt ja kõrvalt vaates (Autori pildid)

### 3.2.3 Purustatud klaasimassi sulatus lihtsasse vormi

Katsekeha 3 (Joonis 3.11) sulas vormi ühtlaselt 100x100x10mm. Pealispind on sile. Reaktsioonis vormi jäljendi määrdeainega on katsekeha pind hägune. Katsekehas esineb õhumulle, mis on klaasis jaotunud ebaühtlaselt ja suurusega kuni 3mm. Ristpolariseeritud valguses ei paista kriitilisi sisepingeid, kuid on siiski vormist sõltumatud ebaühtlused tõenäoliselt suuremate klaasikillu fraktsioonide vahel tekkinud pinge.



Joonis 3.11 Katsekeha 3 tavalises ja ristpolariseeritud valguses. (Autori pildid)

### 3.2.4 Purustatud klaasimassi sulatus keerulisemasse vormi

Erinevad purustatud tooted segati kokku ja sulatati eelnevalt 3Dprinditud skulptuuri kipsist jäljendisse. Vormil on piisavalt keerukust, et välja tuua segumassi nõrkused. Klaas oli kipsvormis kõvasti kinni ja katsekeha kättesaamiseks tuli kipsvorm lõhkuda.

Katsekeha 4 (Joonis 3.12) Sulamisel on klaasikillud vormi ülemisele serval jätnud teravaid jääpurika-taolised väljaulatuvad osad. Klaasimass on läbipaistev, esineb vähesel määral pigem suuremaid õhumulle, mõningal määral viirude tekkimist. Esineb mõningaid hägusaid alasi, mis tunduvad olevat jäänud 3D graveeringutest. Katsekeha pealispinna välisservades on märgata kristalliseerumist. Klaasimass on olnud piisava viskoossusega, et täita vormi detailsed süvendid ja kiri skulptuuril on loetav. Ristpolariseeritud valguses on näha, et katsekehas esineb pingeid, pigem nurga-lähedastes alades.



Joonis 3.12 Katsekeha 4. Tavalises ja ristpolariseeritud valguses ( Autori fotod)



### **3.2.5 Eksperti hinnang sulatatud katsekehadele**

Klaasikunstnik Tiina Sarapu, kellel klaasi sulatamise kogemust juba kolmkümmend aastat, hindab sulatuskatsete tulemusi positiivselt. Ta rõhutab, et klaasikunstnikud otsivad võimalusi teise toorme kasutamise ja keskkonnahoidlik aspekt on oluline ka kunstiringkondades. Kui esimese kahe sulatuskatse tulemuses on ta täiesti veendunud, et ühe homogeense koostisega toote ümbersulatus on kindla peale minek, siis kokku segatud toodetest ümbersulatus vajab veel katsetamist, et selles veenduda. Ekspert näeb potentsiaali materjali rakendamisel väiksemate seeriade tootmiseks, kus see on samaväärne esmase sulatusklaasi toormega. Samuti toob ta välja, et teise materjali päritolu ühest allikast, suurendab usaldusväarsust toodete kokkusobivuse osas. (Ekspertarvamus Lisa 4).

## 4. JÄRELDUSED

Uuritav tundmatu koostisega materjal osutus keemilise koostise analüüsi tulemusel sulatusklaasidega väga sarnaseks. Kuigi kõigil mõõdetud proovide tulemused olid erinevad, olid siiski 3Dlaseri põhilistest toodetest, massiivsetest klaasplokkidest võetud proovid, samaväärsete koostistega. Lähemaks vaatluseks võetud proov 3 ja sarnaste lisaainete esinemisega sulatusklaasi proov 7 vastasid mõlemad soodaklaasi kirjeldatud koostisele, kuid on soodaklaasi enimkasutatud pakendiklaasist erinev, sest neis mõlemas leidub booriühendeid. Booriühendid välistavad klaasi ümbertöötamise pakendiklaasile loodud kaitlussüsteemides.

Sulatuskatsete tulemused olid väga head. Ühest tootest ümbersulatatud katsekehad olid mõningal määral paremate näitajatega - kirkam ja pingevabam. Nii klaasi vigade vaatlusel, klaasisiseste pingete analüüsile kui eksperdi arvamusele põhinedes vajaks kokku segatud toodetest klaasivalu vormi sulatamine veel vaid edasist uurimist, kuna segatud klaasitoormest valmistatud vormid olid pretensioonikamad ja tulemusi selles osas keerulisem hinnata. Sulatuskatsete tulemuste põhjal jätkub katsetamine klaasistuudiotest, et leida parimad sulatustsüklid ja temperatuurid parimate tulemuste saamiseks.

Võttes arvesse saadud infot keemilise koostise analüüsist, empiirilisi tulemusi sulatuskatsetustest ja eksperdi arvamust võib hinnata 3Dlaseri tooted sobivaks sulatusmaterjali toormeks klaasi studios tunnustatud sulatusklaaside asemel. Kuigi studios ei tehta ainult kirkast klaasist tooteid, vajab edasist uurimist kokkusobivus värvilise klaasi toormaterjalidega, siis autori lähtekoht, jõuda ringmajandatavate kohalikult ümbertööteldavate tootearenduse tehnoloogiliste skeemideni, ei eelda värvi lisamist. Graveering ei muuda materjali kvaliteeti ja omadusi, kuid võimaldab anonüümse klaaseseme teha personaalseks ja visuaalselt atraktiivseks. Klaas sealjuures oleks sama kvaliteediga ja 100% ümbertööteldav.

## KOKKUVÕTE

Klaas, materjal mis meid ümbritsevas keskkonnas on nii tavaline, muutub seda põnevamaks, mida lähemalt vaadata. Käesoleva magistritöö suuremaks ülesandeks sai tõestada tundmatu koostisega, kuid 3Dlasergraveeringu näol kvaliteedimärgiga klaasist toodete sobivus klaasistuudiotele sulatusklaasi toorme asemel. See on väike, aga oluline kogus materjalivoost, mida saab prügimägedele ladustamisese asemel muuta kõrgema väärtusega disainitooteks klaasistuudiotest.

Eesmärgi - veenduda 3Dlaseri toodete sobivuses kasutamiseks klaasistuudios sulatusklaasi toorme asemel - saavutamiseks kirjeldati esimeses peatükis klaasi ümbersulatamise sisendid ja keskkond. Anti ülevaade klaasmaterjali omadustest, klaasi sulatuse põhilistest aspektidest, kuuma klaasiga töötavatest klaasistuudiotest Eestis ja klaasi taaskasutamisest stuudiotest, väärtust lisava ümbertöötamise mõistest ja 3Dlaseri tegevusest.

Püstitati ülesanne saada teada tundmatu klaasi koostis ja võrrelda seda tunnustatud sulatusklaasidega. Selleks teostati Tartu Ülikooli Maapõueressursside arenduskeskuse laboris lainedispersiivse röntgenfluoressentsanalüüs 3Dlaseri toodetele ja tunnustatud sulatusklaasi kaubamärkidele. Põhiliste klaasimoodustajate, lisa - ja täiteainete elementide võrdlemisel selgus, et 3Dlaseri toodete koostis vastab soodaklaasi tüübile, sarnaselt sulatusklaasi toormega. Mõõdetud sisaldused ränioksiididel 72-74 mol%, naatriumoksiididel 9-15 mol%, kaaliumoksiididel 0-4 mol%, kaltsiumoksiididel 4-7 mol% ja baariumiühenditel 0-3 mol%, kuid erinevalt defineeritud tüüpilisest soodaklaasist, sisaldasid boori kuni 4 mol%. Sellega sai kinnitatud ka kahtlused toodete käibenimedele - 3D kristall (viitab pliiklaasile) või K9 (viitab borosilikaat klaasile) õigsuse osas. Määratud koostite põhjal võrreldi lähemalt ühte 3Dlaseri toodet ja ühte tunnustatud sulatusklaasi kaubamärki, millel elementide esinemine oli kõige sarnasem. Saadud sarnased tulemused keemilises koostises kinnitavad hüpoteesi, et 3Dlaseri tooted võivad asendada sulatusklaasi tooret.

Keemilise koostise sarnasuse põhjal jätkati katsetusi sulatusahjudes toetudes tunnustatud sulatusklaasi tootjapoolsete juhenditele ja rakendades seda 3Dlaseri toodetel. Teostati neli sulatuskatset, mille tulemusi hinnati visuaalsel vaatlusel, sisepingeid rist-polariseeritud valguses ja arvamust avaldas ekspert. Esimesega hinnati terviktoote sulamist vabavormiliselt. Tulemus oli ilus, kirkas, kristalliseerumata ja klaasi konsistentsi vigadeta, mis võimaldas proovis isegi katsetada ka 3D lasergraveerimis tehnoloogiat. Teises sulatuskatses sulatati üks purustatud terviktoode lihtsamasse

sulatusvormi. Katse õnnestus hästi ja tulemuseks oli kirgas, väheste mullidega, heade vormiliste omadustega. Kolmandas katses sulatati lihtsasse vormi mitu kokku segatud purustatud toodet, et hinnata ka võimalikke koostise erinevustest tingitud konflikte klaasis. Ka kolmas katse õnnestus kenasti ja tulemuseks oli juba küll mõningate sisepingete ja mullidega, aga heade vormiomadustega katsekeha. Neljandas katses sulatati keerulisemaks skulptuuriks mitmest purustatud tootest segatud klaasi fraktsioon. Tulemus oli samaväärne tunnustatud sulatusklaasist valmistatud esemega. Esines vormist tulenevaid klaasisiseseid pingeid, mõningal määral õhumulle ja hägusust. Sulatuskatsed kinnitasid hüpoteesi, et 3Dlaseri tooted sobivad klaasistuudios sulatusklaasi toormeks.

Klaasi ümbertöötlemist klaasistuudio tingimustes on teaduslike meetoditega uuritud vähe ja puuduvad standardiseeritud meetodid. Kuid selle potentsiaali avastanud Delfti Tehnoloogiaülikooli teadlased ReStruckt uurimisrühmast, kes muuhulgas on uurinud ka mitmete jäätmeklaaside ümbersulatust. Võttes arvesse, et klaasitööstus seisab silmitsi tooraine nappusega ja tootmist pitsitab energiakriis, on klaasi modulaarne ümbertöötlus sulatusahjudes kokkuhoid mitmel tasandil ja leiab lähitulevikus käsitlemist ka teadusmaastikul.

Käesoleva uurimuses identifitseeritud soodaklaas on ka ReStruckt uurimisrühma teadlaste töödes väljatoodud kui ümbertöötluks sobivaim ja struktuursete omaduste poolest parimate näitajatega jäätmeklaasi tüüp. Seda tõestasid ka sooritatud sulatuskatsed, mille tulemused olid väga head ja samaväärsed tunnustatud kaubamärkidest sulatatud klaasesemetega.

Uurimusküsimused said eesmärgi toetava vastuse. 3DLaseri tooted sobivad kasutamiseks klaasistuudios kirka sulatusklaasi toorme asemel. Edasist uurimist jätkub mitmel suunal. Parimate sulatustulemuste saamiseks tuleks sulatusrežiime timmida - pikema lõõmutustsükliga ja leida just kasutatava ahju jaoks õigeim maksimumtemperatuur. Temperatuuri ja aja matriksis saab vähendada klaasisiseseid pingeid, mullikoldeid ja viirge sulamis. Kindlasti vajab edasist katsetamist klaaside kokkusobivus, mõõdetud keemilisi koostisi on võimalik edasi analüüsida, et leida ka sobivad värviliste sulatusklaaside tootjad.

3D lasergraveerimisega tegelevaid ettevõtteid, auhinnatootjaid, kunstnikke leidub maailmas veel palju ja uurimistulemused on eskaleeritavad kõigile, kes kasutavad samu klaasitoorikuid. Kuna 3D lasergraveeringuga toode on äratuntav ja eristatav võimaldab see ka kasutusjärgse kogumissüsteemi korraldamist, et mitte ükski väärt materjali

kilogramm ei peaks raisku minema. Sellest lähtub ka üks võimalik tootearenduse suund, kuidas teha kasutusjargsetest klaasesemetest klaasistuudios kohe kasutatav toode.

Autor hindab uurimistöö tulemusi kõrgelt ettevõtte tootearenduse edendamisel. Ettevõtte on juba leidnud loodud tehnoloogilisele skeemile rakenduse ja kaasanud klaasikunstnikud tootearendusse ringmajandatavate auhindade ja toodete valmistamiseks. Uurimistulemuste tuginedes on 3Dlaseri praaktooded võetud kasutusele ka õpilastööde valmistamiseks Eesti Kunstiakadeemias klaasikunstiosakonnas.

# SUMMARY

## ASSESSMENT FOR 3DLASER ENGRAVED PRODUCTS TO BE USED AS STUDIO GLASS

Mariliis Alev

The aim of this thesis is to assess 3D laser engraved products to be used as substitutes for specially produced melting cullets in a hot glass studio. Glass may look the same and carry the label to be sustainable and 100% recyclable, but reality is that only a fraction of glass products are remelted. That usually applies in the container glass industry where there are standards for compositions and recycling loops in order. Glass industry is facing a challenge of shortage in supply. Though silica is the most abundant mineral in Earth's crust, the pure quartz, needed to make clear glass, is running out. Every effort to remit valuable material to be reused is important. Estonia has only one industrial glass producer, a small subsection of a worldwide corporation, but a vibrant glass artist scene and a vivid history of world class glass design.

Author is an owner of a 3Dlaser engraving business, and the starting point for this thesis is to apply industrial ecology tools and methods to turn the business into a circular economy model. At this point there is no waste management for glass awards. Engraving does not change the properties of material but is a way to change an anonymous glass block into a personal trophy, keepsake, souvenir. So how to reuse discarded products that still carry all the good values of clear optical glass? To achieve that, a series of questions needed to be investigated. How to research glass? Who could remelt glass in an environmentally friendly way? Would remelting glass products be good quality?

To answer that and assess 3D laser engraved products to be used studio glass the thesis has four research tasks:

- to give an overview of raw glass material used in glass studios,
- chemical composition of researched material and comparison with recognized trademarks used in hot glass studios,
- fuse 3D laser engraved products in glass kilns,
- assess the fused test pieces for quality defects.

First, we learn that glass physical characteristics vary due the chemical composition, altering properties for glass used in different applications. Glass used in kilns fusing is

usually soda-lime glass. Fusing is a glass melting process, happening in relatively low temperatures (compared to glass melting in industrial furnaces), between 700-1000°C. Fusing in a kiln has compulsory stages where time/ temperature ratio has significant effects on the outcome. Heating up speed, maximum temperature and annealing time and temperature being the most important ones. In Estonia there are over 60 active glass artists, fusing being used in at least 12 glass studios. Already some are committed to recycling glass as emotional or practical input. Where 3D engraved products have the potential to be upcycled into valuable design products or awards developed for circularity by eco-design principles.

The chemical composition of investigated products and trademarked studio glass are measured by X-ray fluorescence (XRF) analyses and compared. Most of them (except floatglass examples) are identified as soda-lime glass. All fall within the defined range consisting of 72-74 mol% silica oxides, 9-15 mol% sodium oxides, 0-4 mol% potassium oxides, 4-7 mol% calcium oxides and 0-3 mol% barium oxides. From 12 identified examples one 3D laser product and one trademarked studio cullet was compared to general soda-lime glass compositions. It was confirmed that due the similar chemical compositions 3D laser engraved products could be a good substitute for studio cullets. Along the way a myth was busted – glass blanks for 3D laser engravings are marketed as crystal or K9 glass. First of them refers to lead glass (consisting at least 24% lead) and latter to borosilicate glass.

Based on the results of chemical compositions a fusing schedule was chosen and a series of fusing experiments done. To assess the mixed and mashed products to be used to make sculptural forms the experiments started by melting one whole glass product. Then one crushed product was fused to a more complex mould. Next crushed and mixed products were melted to a simple mould. Finally crushed and mixed products were fused into a more complex mould. All experiments succeeded - forming smooth clear fused glass, with minimal glass defects, like crystallization or air bubbles. Examples were also estimated in cross-polarized light to reveal the tensions within glass. Although there were some tensions it can be assumed there would be similar tensions when using trademarked cullets and it could be fixed by choosing a longer annealing period. Also, an expert, glass artist practicing fusing for over 20 years, evaluated the fused results and approved material for open mould casting in kilns as a valuable resource. Based on the fusing experiments 3D laser engraved products are suitable replacement for trademarked cullets in hot glass studio.

Recycling glass in kilns has not really been standardized or used much in scientific research, with a strong exception of the ReStruct research group from Delft University of Technology. This thesis used methods described in the article "Structural cast glass components manufactured from waste glass: Diverting everyday discarded glass from the landfill to the building industry." Kiln casting can eliminate many problems in glass recycling – batch control, contaminants, energy efficiency etc.

As a conclusion the hypothesis of 3D laser engraved products to be a good substitute for specially produced glass cullets was confirmed. Products doomed to be landfilled could be upcycled to valuable glass design and recycled to bespoke awards. All the tests and experiments affirm similar chemical composition and characteristics to studio glass. Further research should be done to find the perfect firing schedule, to assess the compatibility with coloured glass and whether the material would also be used for glassblowing. Although it is a specific research question, with minimal economic impact, it is a reliable source for upcycling and to practice eco-design principles in the glass field.



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Zhong, X., Deetman, S., Tukker, A. et al. "Increasing material efficiencies of buildings to address the global sand crisis". *Nat Sustain* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00857-0>
- [2] UNEP 2022. Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland  
Production : UNEP/GRID-Geneva URL (optional) : <https://unepgrid.ch/en/resource/2022SAND>
- [3] The European Container Glass Federation veebileht. Record collection of glass containers for recycling hits 78% in the EU, 2021 [Online]. [https://feve.org/glass\\_recycling\\_stats\\_2019/](https://feve.org/glass_recycling_stats_2019/) Kasutatud: 02.04.2022
- [4] Recovery – Recycling Technology Worldwide ajakirja veebileht. Glass recycling – Current market trends, 2018 [Online]. [https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends\\_3248774.html](https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends_3248774.html)  
Kasutatud: 02.04.2022
- [5] ReStruct – Sustainable Architectural Materials & Structures. [Online]. <https://www.restructgroup-tudelft.nl/> Kasutatud: 02.04.2022
- [6] Bristogianni, T., Oikonomopoulou, F. & Veer, F.A. "On the flexural strength and stiffness of cast glass". *Glass Struct Eng* 6, p. 147–194, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s40940-021-00151-z>
- [7] Bristogianni, T., Oikonomopoulou, F., Yu, R., Veer, F.A., Nijse, R.: "Investigating the flexural strength of recycled cast glass". *Glass Struct. Eng.*, 2020, Doi: <https://doi.org/10.1007/s40940-020-00138-2>
- [8] Bristogianni, T., Oikonomopoulou, F., Justino de Lima, C.L., Veer, F.A., Nijse, R.: "Structural Cast Glass Components Manufactured from Waste Glass: Diverting Everyday Discarded Glass from the Landfill to the Building Industry". *Heron* 63 (1/2 Special issue: Structural Glass), 2018 [Online] <http://heronjournal.nl/63-12/4.html>  
Kasutatud: 08.04.2022

- [9] Oikonomopoulou, F. "Unveiling the third dimension of glass: Solid cast glass components and assemblies for structural applications." *A+BE | Architecture and the Built Environment*. 2019 doi: <https://doi.org/10.7480/abe.2019.9>
- [10] T.Kase *Klaasiõpik* Tallinn: Valgus 1987
- [11] The Properties of Glass, 2016 [Online]. Loetud aadressil: <https://go.koppglass.com/properties-of-glass-ebook> Kasutatud: 09.03.2022
- [12] A.Fluegel Glass Properties veebileht. *Glass Composition, Glass Types* 2007 [Online]. Loetud aadressil: <https://glassproperties.com/glasses/> Kasutatud: 20.02.2022
- [13] W.D. Callister Jr. *Material Science and Engineering*. An introduction. John Wiley & Sons Inc., 2003
- [14] P. Beveridge, I. Domenech, E.Pascual *Klaasi. Sulatustehnikad*. Tallinn: Tormikiri, 2004
- [15] T. Brown, E. Theodore, B. Bursten *Chemistry: The Central Science*. Upper Saddle River, NJ.: Prentice Hall, 2000
- [16] D.W.Scherer *Technotes. Compatibilty of Glasses Bullseye*. A Technical Supplement. Portland: Bullseye Glass Co 2013
- [17] K. Cummings *Kiln- formed glass*. London: A&C Black Publishers 1997
- [18] *140 aastat klaasitootmist Eestis*. Ettevõtte brošüür. OI Järvakandi, 2019
- [19] Oceanside veebileht. *Glass and tile. Safety Data Sheets for Oceanside Products*. 2020 [Online]. Loetud aadressil: <https://oceansidecompatible.com/pages/sds-page> Kasutatud: 01.02.2022
- [20] Cristalica. *Infosheet: Cristalica Studio Glass 100* 2021 [Online]. Loetud aadressil: [https://www.kutaglass.com/\\_files/ugd/054ff1\\_0ae868be481b44429a9491ed088ecac7.pdf](https://www.kutaglass.com/_files/ugd/054ff1_0ae868be481b44429a9491ed088ecac7.pdf) Kasutatud: 01.02.2022

- [21] Glasma. *Crystal lead-free glass* 2021 [Online]. Loetud aadressil: <https://glasma.com/crystal-lead-free-glass/> Kasutatud: 02.02.2022
- [22] Bomma. *Bomma cullet. Technical information sheet* 2022 [Online]. Loetud aadressil: <https://www.bomma.cz/cullet> Kasutatud: 02.02.2022
- [23] Bullseye Glass Co. *About our glass. Clear transparent* 2018 [Online]. Loetud aadressil: <http://www.bullseyeglass.com/clear-transparent.html> Kasutatud: 02.02.2022
- [24] Keskkonnaministeerium. *Pakendid. Klaas* 2022 [Online]. <https://envir.ee/ringmajandus/ringmajandus/pakendid> Kasutatud: 12.02.2022
- [25] Klaasistudio Ideeklaas. *TARBEKLAAS kui EHE EESTI ASI, kohalik ja kohendatav.* [Online]. Loetud aadressil: <https://ideeklaas.ee/blog-1/tarbeklaas-kui-ehe-eesti-asi> Kasutatud: 01.02.2022
- [26] U-Studio Klaasikoda. *U-Stuudiost* 2022 [Online]. Loetud aadressil: <http://ustudio.ee/u-stuudiost/> Kasutatud: 02.02.2022
- [27] Recycled glassworks. *About Recycled Glassworks* 2018 [Online]. Loetud aadressil: <https://recycledglassworks.com/> Kasutatud: 02.02.2022
- [28] Pernille Bülow A/S. *ReUse collection* 2022 [Online]. Loetud aadressil: <https://pernillebulow.com/collections/reuse> Kasutatud: 02.02.2022
- [29] Material District. *Re3 glass blocks from waste glass can be dry-stacked.* 2018 [Online]. Loetud aadressil: <https://materialdistrict.com/article/re3-glass-blocks-waste-glass/> Kasutatud: 02.02.2022
- [30] F. Oikonomopoulou, T. Bristogianni, L. Barou, F.A. Veer, R. Nijse, "The potential of cast glass in structural applications. Lessons learned from large-scale castings and state-of-the art load-bearing cast glass in architecture", *Journal of Building Engineering*, Vol 20, p 213-234, 2018 doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.07.014>

- [31] Center for Workplace Compliance. *Best Practices in Glass Recycling* 1996 [Online].  
Loetud aadressil: <https://www.glassnotes.com/resources/pdf/Recycle-glass.pdf>  
Kasutatud: 02.02.2022
- [32] Eesti Klaasikunstnike Ühenduse veebileht. *Liikmed*. 2022 [Online].  
[https://klaasikunst.ee/?page\\_id=154](https://klaasikunst.ee/?page_id=154) Kasutatud: 02.02.2022
- [33] Tiina Sarapu veebileht. *Endast* 2021 [Online]. <https://tiinasarapu.ee/endast-tiinasarapu/> Kasutatud: 02.02.2022
- [34] Eeva Käsperi veebileht. *About* 2022 [Online].  
<http://eevakasper.squarespace.com/about> Kasutatud: 03.02.2022
- [35] HYTI design veebileht. *Brändist* 2022 [Online].  
<http://www.hytidesign.com/aksessuaarid> Kasutatud: 03.02.2022
- [36] Klaasistudio Ideeklaas. *Meist studio kunstnikud Kalli ja Valev Sein*. 2021  
[Online]. <https://ideeklaas.ee/meist> Kasutatud: 03.02.2022
- [37] Katariina Gildi veebileht. *Klaasikoda* 2020 [Online].  
<https://www.katariinagild.eu/klaasikoda/> Kasutatud: 02.02.2022
- [38] Jäätmeseadus. (2004) [Online]. Loetud aadressil:  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/114062013006> Kasutatud: 02.02.2022
- [39] K. Doorselaer. "The role of ecodesign in the circular economy" *Circular Economy and Sustainability*, Vol.1, Chapter 12, 2022 Elsevier Inc. doi:  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819817-9.00018-1>
- [40] McDonough, W., Braungart, M. *Cradle to Cradle: Remaking the Way we Make Things*. New York: North Point Press 2002
- [41] B.Bridgens, M.Powell, G.Farmer, C.Walsh, E.Reed, M.Royapoor, P.Gosling, J.Hall, O.Heidrich. "Creative upcycling: Reconnecting people, materials and place through making" *Journal of Cleaner Production*, Vol. 189, p. 145-154, 2018. doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.317>

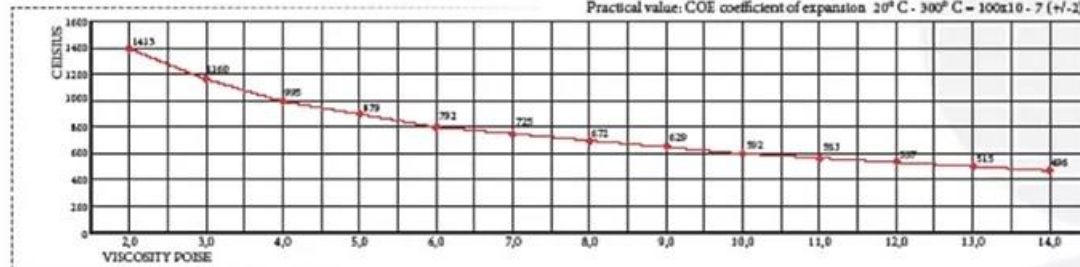
- [42] Aus, R., Moora, H., Vihma, M. et al. "Designing for circular fashion: integrating upcycling into conventional garment manufacturing processes." *Fash Text* vol. 8, 34 ,2021, doi: <https://doi.org/10.1186/s40691-021-00262-9>
- [43] 3Dlaser veebileht. *Tehnoloogia* 2020 [Online]. <https://www.3dlaser.ee/tehnoloogia/> Kasutatud: 01.01.2022
- [44] J.S. Spence, "A Look at 3D Subsurface Laser Engraving" *The Engravers Journal* vi 45, nr 6, 2019 [Online]. <https://www.engraversjournal.com/articles/online/a-look-at-3d-subsurface-laser-engraving> Kasutatud: 02.04.2022
- [45] Cericom Crystal veebileht. *Discover the world of laser crystal!* 2022 [Online]. <https://www.cericom-crystal.de/> Kasutatud: 02.01.2022
- [46] A. Fluegel Glass Properties veebileht. *Optimization (Reversed Glass Modeling)* 2007 [Online]. <https://glassproperties.com/optimization/> Kasutatud: 02.01.2022
- [47] A. Fluegel, D.Earl, A. Varshneya, T. Seward "Density and Thermal Expansion Calculation of Silicate Glass Melts From 1000°C to 1400°C." *Physics and Chemistry of Glasses - European Journal of Glass Science and Technology* Part B. 49. 245-257. 2008 [Online]. [https://www.researchgate.net/publication/233600153\\_Density\\_and\\_Thermal\\_Expansion\\_Calculation\\_of\\_Silicate\\_Glass\\_Melts\\_From\\_1000C\\_to\\_1400C](https://www.researchgate.net/publication/233600153_Density_and_Thermal_Expansion_Calculation_of_Silicate_Glass_Melts_From_1000C_to_1400C) Kasutatud: 02.04.2022
- [48] M. Mauri, T. Elli, G. Caviglia, G. Uboldi, M. Azzi. "RAWGraphs: A Visualization Platform to Create Open Outputs." *In Proceedings of the 12th Biannual Conference on Italian SIGCHI* Chapter (p. 28:1–28:5). 2017 New York, NY, USA: ACM. doi: <https://doi.org/10.1145/3125571.3125585>
- [49] Nõuded kristallklaasist toote märgistamisele ja kristallklaasist toote omaduste määramise meetodid (2004) [Online]. <https://www.riigiteataja.ee/akt/738025> Kasutatud: 02.01.2022
- [50] TÜ Maapõueressursside Arenduskeskuse veebileht. *Geokeemilised uuringud* 2020 [Online]. <https://marek.ut.ee/geokeemilised-uuringud> Kasutatud: 01.01.2022

# CRISTALICA®

## Premium Studio Glass 100

Chemical Analysis	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	BaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	69,0% - 71,5%	12,5% - 12,9%	5,0% - 5,5%	4,0% - 4,5%	2,5% - 3,0%	1,1% - 1,5%
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	SO <sub>2</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> O	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	1,0% - 1,5%	0,6% - 1,3%	0,21% - 0,31%	0,2% - 0,5%	0,06% - 0,10%	0,03% - 0,05%

Theoretical value: COE coefficient of expansion 96x10<sup>-7</sup> (+/-2)  
 Practical value: COE coefficient of expansion 20° C - 300° C = 100x10<sup>-7</sup> (+/-2)



Viscosity	log 10 viscosity POISE	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,6	8,0	9,0	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	13,3	14,0	14,5
	CELSIUS	1413	1271	1160	995	879	792	725	692	672	629	593	543	550	537	515	508	495	495
		Hotting Point			Working Point				Leitton Point				Softening Point			Higher Annealing Point			Lower Annealing Point

**Reheating or Melting**

Cristalica100 is pre-molten, which means you do not need to bring the glass to a very high temperature in order to obtain a clear glass. The working temperature, based on the products that you are creating, will be adapted to a level between 1130-1160 degrees Celsius. After you have finished work you can directly place the glass cullet into the furnace. Keep the glass over night at a temperature of 1150-1200 degrees. In some furnaces, it is recommended to reduce the temperature to 1050 degrees, after which you may raise it up again to your working temperature. You can fill up the crucible in one inlay or divide the amount into three equal parts. This choice depends on the total amount used, as well as on the type of furnace you have. We recommend a daily fill-up of the furnace with the total amount you need to use the following day. In the case that you want to add glass cullet from your own production, please introduce it in the furnace with the first inlay of studio glass, because the cullet will create small air bubbles when melted, which will not rise to the surface as fast as the larger air bubbles from in between our studio glass.

**A typical "reheating" scheme**

Temperature	Time	
Minimum	Maximum	
1100	1150	16:00 Working temperature
1150	1190	17:00
1150	1190	18:00
1150	1190	19:00
1150	1190	20:00
1150	1190	21:00
1150	1190	22:00 Remelt temperature
1150	1190	23:00 can be same as
1150	1190	0:00 Working temperature
1150	1190	01:00
1150	1190	02:00
1150	1190	03:00
1100	1150	04:00
1050	1100	05:00 Possibly squeeze the glass under 1050
1050	1100	06:00
1100	1150	07:00 Raise temperature slowly

**A typical annealing scheme**

Celsius	Minutes per step	Degrees down from last temperature	Degrees per Hour
510	30	HOLD	0
476	90	34	22,66667
416	180	94	31,33333
336	120	80	40
180	180	160	53,33333
	600		

Suitable for blown glass up to 25mm

Any technical questions are welcome, we intend to answer within 12 hours, do not hesitate to contact us.

# Lisa 2 Tooteleht 2

## Technical Information

Alfa:	9,6 (20 - 300 °C)	Melting temperature:	1250 – 1280 °C (2282 - 2336 °F)
Specific weight:	2.5455 g/cm <sup>3</sup>	Working temperature	1150 - 1250 °C (2102 - 2282 °F)
Index of refraction:	1.5211	Flow point	898 °C (1648 °F)
Yield rate:	100 %	Softening point	702 °C (1297 °F)
		Annealing points:	518 °C (964 °F)
		Transformation temperature	511 °C (952 °F)
		Strain point:	488 °C (910 °F)

## Compatibility:

Basic compatibility:	Glasshütte Reichenbach, Gaffer Colours, Kugler glass
Advanced compatibility:	The compatibility is generally based on Alfa with a limited tolerances (+/- 0.2 based on experience with Reichenbach and Gaffer Colors. It is always highly recommended to test your specific application before launching into full production with any design or color application or combination. Cadmium colors, Cadmium-Selenium colors, should be tested based on application.

## Melting:

Before first melting Bomma Cullet, we recommend cleaning your furnace to avoid contamination from any old material. When using Bomma Cullet continuously, it is recommended to charge again when there is a minimum of 1/3 of the furnace capacity remaining.

---

Start melting a single layer of the Bomma Cullet at a temperature between 1250 - 1280 °C (2282 - 2336 °F) (depending on the type of furnace).

---

When the charge is melted, add another layer of the Cullet. Repeat until the requested amount of melted glass is ready.

---

To start working, adjust the temperature for the product that you are going to create.

---

Enjoy the longworking Glass.

## Cooling down

The annealing oven should start at 525°C (977 °F)

Pieces under 10 mm of thickness			
15 min 525°C (977 °F)	90 min until 410 °C (770 °F)	90 min until 200°C (392 °F)	
Pieces 10-40 mm of thickness			
30 min 525°C (977 °F)	200 min until 410 °C (770 °F)	200 min until 200°C (392 °F)	
Pieces 4 - 9 cm of thickness			
45 min 525°C (977 °F)	330 min until 410 °C (770 °F)	330 min until 200°C (392 °F)	110 min down to 30°C (86 °F)
Pieces 9-15 cm of thickness			
60 min 525°C (977 °F)	540 min down to 410 °C (770 °F)	540 min down to 200°C (392 °F)	180 min down to 30°C (86 °F)

# Lisa 3 Tootleht 3



## Oceanside Compatible™ Studio Nuggets® Annealing Guidelines: 1/2"-8" (12mm - 203mm)

### Annealing & Cooling

Target Temps	Step 1		Step 2		Step 3		Step 4	
	Ramp Rate (per hour)	Hold (minutes)	Ramp Rate (per hour)	Hold (minutes)	Ramp Rate (per hour)	Hold (minutes)	Ramp Rate (per hour)	Hold (minutes)
1/2" 12 mm	966 ° F 519 ° C	None	100 ° F 55 ° C	10	200 ° F 111 ° C	10	250 ° F 139 ° C	0
3/4" 19 mm	None	180	50 ° F 28 ° C	10	100 ° F 55 ° C	10	200 ° F 111 ° C	0
1" 25 mm	None	240	25 ° F 14 ° C	10	45 ° F 25 ° C	10	150 ° F 83 ° C	0
1.5" 38 mm	None	360	12 ° F 6.7 ° C	45	24 ° F 13 ° C	10	75 ° F 42 ° C	0
2" 51 mm	None	480	7 ° F 3.9 ° C	60	14 ° F 7.8 ° C	10	42 ° F 23 ° C	0
3" 76 mm	None	720	3 ° F 1.7 ° C	120	5.4 ° F 3.1 ° C	30	18 ° F 10 ° C	0
4" 102 mm	None	960	1.5 ° F 0.8 ° C	300	3 ° F 1.7 ° C	45	9 ° F 5 ° C	0
5" 127 mm	None	1200	1.2 ° F 0.7 ° C	375	2.4 ° F 1.3 ° C	60	7.2 ° F 4 ° C	0
6" 152 mm	None	1440	0.8 ° F 0.4 ° C	450	1.3 ° F 0.76 ° C	150	4.5 ° F 2.5 ° C	0
7" 178 mm	None	1680	0.6 ° F 0.3 ° C	525	1.0 ° F 0.58 ° C	225	3.4 ° F 1.9 ° C	0
8" 203 mm	None	1920	0.4 ° F 0.2 ° C	600	0.76 ° F 0.42 ° C	300	2.4 ° F 1.3 ° C	0

Technical Data	
Strain Point	898 °F
	481 °C
Anneal Point	966 °F
	519 °C
Softening Point	1270 °F
	688 °C





## Lisa 3 Ekspertarvamus

Mariliis Alev "3Dlaseri toodete sobivus stuudioklaasina"

Mariliis Alev on alustanud olulise tegevusega 3D lasergraveerimistehnoloogias kasutatavate klaastahukate ringmajandamiseks. Nimetatud klaastahukad on valmistatud väga puhtast värvusetust klaasimassist ja selleks on kulutatud palju ressursi. Tahukad on tehnoloogiliselt kõrgkvaliteetsed ja visuaalselt väga atraktiivsed.

Klaasikunstnike ja -disainerite potentsiaalne huvi puhta ja erinevates klaasi sulatustehnikates (sulatus avatud ühe- mitmeosalistesse vormidesse, ahjuvalu, *pate de verre* jne) kasutatava klaasmaterjali vastu on suur.

Mariliis Alevi katsed näitavad, et nimetatud klaas sobib suurepäraselt lihtsamate vormita või avatud vormides valmistatavate objektide loomiseks. Keerukama vormiga ja/või komplitseeritumat sulatusrežiimi vajavate objektide loomiseks on nimetatud klaas eeldatavasti samuti sobilik, ent see vajaks veel katsetamist.

Kindlasti sobib sulatada ühest kompaktselt teise ringi klaastahukast uus klaasobjekt, nt skulptuur, meene, auhind. Mitmest väiksemast teise ringi esemest ühe suurema klaasobjekti loomine on juba riskantsem. Kui on võimalik garanteerida, et teise ringi klaas pärineb samast partiist, siis on risk väga madal, erinevatest partiidest, erineval ajal või ka erinevas kohas toodetud esemete kasutamine ühe uue klaasobjekti loomiseks, on aga suhteliselt riskantne. Väliselt täiesti sarnased klaastahukad võivad siiski olla erineva koostisega, mistõttu ka nende joonpaisumiskoeffitsendid on suure tõenäosusega erinevad, mis võib põhjustada pingeid sulatatud klaasesemes ka optimaalse sulatusrežiimi (eelkõige jahutamisrežiimi) korral.

Järeldada võib, et lihtsamat tüüpi objektide valmistamiseks on 3D lasergraveerimiseks kasutatavad klaasplokid võrdväärne materjal võrreldes teiste nõ sulatusklaasidega. Klaasikunstnikud ja -disainerid, kes oma stuudioses ise uusi objekte loovad, oleksid potentsiaalsed ostjad seda tüüpi teise ringi klaasile. Väikeste objektide suhteliselt väikestes tiraažides tootmiseks on seda tüüpi klaasil kõik eeldused olemas juba praegu ja seda on vaja lihtsalt praktiseerima hakata. Vähesel määral ja kunstnike huvist igasuguse turul liikuva klaasmaterjali vastu, on 3D lasergraveeritud plokkide varemgi katsetatud, ent see info ei levi ja süstemaatilist tegevust selles vallas ei ole.

Mariliis Alevi idee tugevus seisneb suuresti ka selles, et kui ta suudab koguda ja säilitada informatsiooni iga enda poolt graveeritud eseme tooriku päritolu kohta, siis suudab ta edaspidi ka garanteerida madala riski neist samadest toodetest uute sulatamiseks isegi juhul kui soovitakse ühe suurema klaasobjekti sulatamiseks kasutada mitmeid teise ringi esemeid.

Olen veendunud, et kindla taustaga teise ringi klaasmaterjali kasutamise vastu on kunstnike hulgas huvi küllalt suur, seda nii majanduslikel kui ka eetilistel põhjustel. Tunnustan Mariliis Alevit olulise teemaga tegelemise eest ja soovin talle edu töoga jätkamisel!

Tiina Sarapu  
(klaasikunstnik, EKA klaasikunsti osakonna dotsent 2003–2017)  
5536129  
tiina.sarapu@gmail.com  
tiinasarapu.ee