

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Ülari Lees

Sõiduki esiklaasi läbipainde modelleerimine LEM simulatsioonide abil

Magistritöö (30 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

PhD Vahur Zadin

Automaatikainsener Toivo Põld

Tartu 2017

Resümee/Abstract

Sõiduki esiklaasi läbipainde modelleerimine LEM simulatsioonide abil

Sõidukite esiklaasi tootmise juures on üheks kriitilisemaks etapiks klaasi painutamine ning selle korratavus. Korratavuse tagamist ei muuda lihtsamaks väikeseeriatootmisele omane lai tootepark ega ka asjaolu, et enamasti on painutusahjud orienteeritud masstootmisele. Käesoleva magistritöö põhiline eesmärk oli luua prototüüpmodel, mis võimaldaks LEM simulatsioonide abil hinnata klaasi lõpliku läbipainde sõltuvust ahju kambrites viibimise ajast. Klaasi vaadeldi viskoelastse materjalina, ning selle simuleerimiseks kasutati Zeneri materjalimudelit. Simulatsioonide tulemusena leiti, et klaasi lõplik läbipaine on tugevas sõltuvuses eelneva toote tsükliajast ning sellest tulenevalt pakuti välja ka painutusahju juhtloogika muutmise võimalus.

Võtmesõnad: Gravitatsioonitoimeline paindumine, viskoelastsus, Zeneri mudel, LEM, klaas, COMSOL Multyphysics.

Modelling of windscreen sagging with FEM simulations

In the production of windscreens one of the most critical process is the sagging of the windscreen. It is a challenging task to assure the repeatability of the process due to the fact that in low volume production the range of products is significantly varying. Also the production equipment is designed for mass production. The aim of the current thesis is to create a prototype simulation model on which it would be possible to analyse the final sag at different cycle times. Zener material model was used to describe the glass as a viscoelastic material. It was found that the final sag is highly correlated with the previous cycle time – the time that the glass spends in the second to last bending chamber. Based on the results a change of the furnace control logic was proposed.

Keywords: Gravitational sagging, viscoelasticity, Zener model, FEM, glass, COMSOL Multyphysics.

CERCS: T130, T125

Sisukord

Resümees/Abstract	2
Jooniste loetelu.....	5
1 Sissejuhatus	7
1.1 Klaasi painutamisesest.....	7
1.2 Töö eesmärk ja ülesehitus	8
2 Teoreetiline taust ja metoodika.....	10
2.1 Viskoelastsus.....	10
2.1.1 Viskoelastsed materjalimudelid.....	12
2.2 Temperatuurijaotuse simuleerimine.....	17
2.3 Lõplike elementide meetod	19
2.4 Materjalimudeli valik	20
2.5 Vaadeldav painutusahi	21
2.6 Klaasi läbipaine	22
2.7 Ahju kambrites eelnevalt viibinud klaasi mõju vaadeldava klaasi läbipaindele.....	23
3 Simulatsioonimudeli loomise metoodika	25
3.1 Kasutatud tark- ja riistvara	25
3.2 Lähteandmed ja vaadeldav toode	25
3.3 Modelleerimine	25
3.3.1 Materjalimudeli valideerimine.....	26
3.3.2 Simulatsioonides kasutatud geomeetriad.....	27
3.3.3 2D simulatsioonid	28
3.3.4 3D simulatsioonid	29
3.3.5 Võrgu tiheduse mõju hindamine simulatsioonitulemuste täpsusele	30
3.3.6 Lämpainde simulatsioonide võrdlus praktikaga	30

3.3.7	Painutusahju kambrite modelleerimine.....	31
3.3.8	Tsükliaja muutumise mõju klaasi läbipaindele.....	32
4	Tulemused ja järeldused	33
4.1	Materjalimudeli valideerimine	33
4.2	Võrgu tiheduse mõju hindamine	34
4.3	2D simulatsioonid	35
4.4	Klaasi 3D simulatsioonid	36
4.4.1	Klaasiplaadi paine 3D simulatsioonides	36
4.4.2	Klaasiplaadi temperatuurijaotus.....	37
4.4.3	Klaasi läbipaine reaalse klaasi temperatuuri juures	38
4.5	Vastavus eksperimentaalsete andmetega	39
4.5.1	Painutusahju kambrite simuleerimine.....	39
4.5.2	Tsükliaja muutumise mõju klaasi läbipaindele.....	39
4.6	Rakendamine praktikas	41
4.7	Edasised arendused	42
5	Kokkuvõte	43
	Viited.....	44
Lisa 1:	Näide painutusahju tsükliageadest.....	46
	Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	47

Jooniste loetelu

Joonis 1.1: Painutusvormil asetsev toorik.....	8
Joonis 1.2: Painutatud klaas.....	8
Joonis 2.1: Viskoelastse materjali elastsusmooduli sõltuvus temperatuurist.....	10
Joonis 2.2: Viskoelastse keha roome erinevatel konstantsetel pingetel.....	11
Joonis 2.3: Pinge relakseerumine.....	12
Joonis 2.4: Maxwelli viskoelastse materjali mudel	13
Joonis 2.5: Kelvin-Voigti viskoelastse materjali mudel	14
Joonis 2.6: Zeneri viskoelastse materjali mudel	15
Joonis 2.7: Burgeri viskoelastse materjali mudel	16
Joonis 2.8: Üldistatud Maxwelli viskoelastse materjali mudel.....	17
Joonis 2.9: Soojusvahetus klaasipainutusahjus.....	18
Joonis 2.10: Painutusahju kambrite paigutus. Sektsioonid on näidatud järgnevalt: kollane – eelkuumutus-, oranž – eelpainutus-, punane – painutus- ja sinine – jahutussektsioon.....	21
Joonis 2.11: Klaasi läbipainde mõõtmisel kasutatud mõõtepunktid ja mõõtejooned	23
Joonis 2.12: Keskmise mõõtejoone läbipainde graafik.....	23
Joonis 3.1: 2D simulatsioonides kasutatud geomeetria ja rajatingimused.....	28
Joonis 3.2: Paksu klaasi soojusjaotuse simuleerimisel kasutatud küttekehade paigutus ja soojuskiirguse suunad	28
Joonis 3.3: 3D simulatsioonides kasutatud klaasi geomeetriad ja sümmeetria rajatingimused	28
Joonis 3.4: Simulatsioonides kasutatud küttekehade ja klaasi omavaheline asetuse. Ühikud on toodud millimeetrites	29
Joonis 3.5: Näited kasutatud võrkudest	30
Joonis 3.6: Datapaq andmehõiveseadmega mõõdetud klaasipaari vaheline temperatuur ühe ahjutsükli vältel.....	31
Joonis 4.1: Materjaliomaduste hindamine eksperimentaalandmete põhjal.....	34
Joonis 4.2: Võrgutiheduse mõju arvutustulemustele	34
Joonis 4.3: Klaasiplaadi arvutuslik läbipaine kahemõõtmelises ruumis.....	35
Joonis 4.4: Klaasiplaadi maksimaalne arvutuslik läbipaine kahemõõtmelises ruumis.....	35
Joonis 4.5: Kümnekordse paksusega klaasiplaadi arvutuslik temperatuurijaotus kolme küttelemendiga küttesel	36

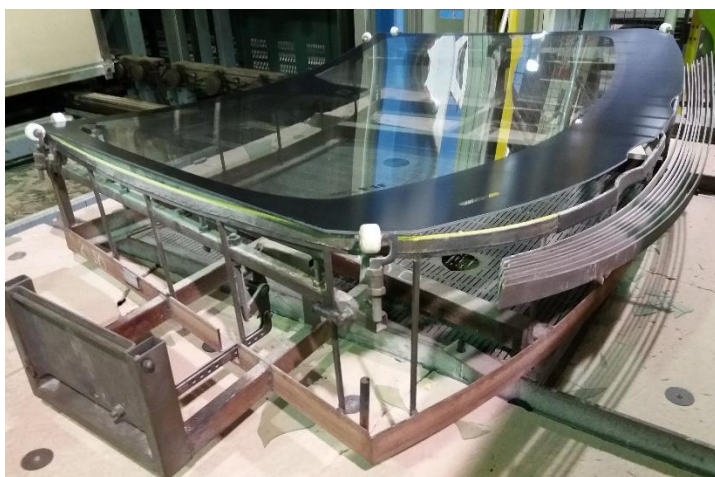
Joonis 4.6: Arvutuslik klaasiplaadi deformatsioon kahe fikseeritud servaga ning sümmeetria rajatingimusega. Ühikud toodud millimeetrites.....	37
Joonis 4.7: Arvutuslik klaasiplaadi deformatsioon nelja fikseeritud servaga ning sümmeetria rajatingimusega. Ühikud toodud millimeetrites, graafiliselt deformatsioon võimendatud 2 korda	37
Joonis 4.8: Klaasiplaadi ülemise pinna arvutuslik temperatuurijaotus reaalsete kütteelementide paigutuse korral, koordinaatide ühikud on toodud millimeetrites.....	37
Joonis 4.9: Klaasiplaadi alumise pinna arvutuslik temperatuurijaotus reaalsete kütteelementide paigutuse korral, koordinaatide ühikud on toodud millimeetrites.....	37
Joonis 4.10: Klaasiplaadi arvutuslik maksimaalne läbipaine mõõdetud keskmise temperatuuri juures.....	38
Joonis 4.11: Painutusahju küttekehade temperatuurid ning vastav klaasi keskmine temperatuur	39
Joonis 4.12: Simulatsiooni tulemusel leitud lõpliku läbipainde sõltuvus kambris viibitud ajast	40
Joonis 4.13: Simulatsiooni tulemustel leitud toote lõpptemperatuuri sõltuvus teises painutuskambris viibitud ajast	41
Joonis 4.14: Painutusahju juhtloogika muudatuste põhimõtteskeem	42

1 Sissejuhatus

Sõidukite esiklaaside kuju on viimastel aastatel muutunud järjest keerulisemaks [1] ning tõenäoliselt sarnane trend ka jätkub. Aerodünaamika parandamise seisukohalt on kasulikum, kui esiklaas on paigaldatud võimalikult väikese nurga all maapinna suhtes, mistõttu esiklaaside mõõtmed suurenevad. Juhi vaatevälja parandamiseks kasutatakse esiklaasi kuju juures suuremaid kumerusi [2]. Kuna isesõitvatel ning suurema ohutuse tagamiseks ka juhiga autodel kasutatakse eesolevate objektide kauguse hindamiseks stereokaameraid, mis tüüpiliselt on paigutatud auto salongi [3], on ka esiklaasi kujule esitatavad nõuded selliste autode puhul kõrgemad. Lisaks kasutatakse massi vähendamiseks ka järjest õhemaid klaase. Kõik see muudab sõidukite esiklaase tootva tehase tootepargi väga mitmekesiseks, mis omakorda paneb proovile painutusprotsessi korratavuse, eriti kui on tegemist väikeseeriatootmisega. Järgnevalt on põgusalt kirjeldatud gravitatsioonitoimelise painutusahju ehitust ja tööpõhimõtet, pakkumaks lugejale ettekujutust, kuidas sõidukite esiklaase painutatakse.

1.1 Klaasi painutamisest

Klaas liigub painutusahjus asetsedes horisontaalselt painutusvormil (Joonis 1.1), millele toetub ainult servadega. Klaasi kuumutamisel selle viskoossus väheneb [4] ning teatud temperatuuri ületades hakkab klaas gravitatsiooni mõjul painduma [5]. Vaadeldava painutusahju puhul toimub ahju juhtimine klaasi pinnalt mõõdetud temperatuuri järgi. Ahju tsükkel lõpeb hetkel, mil kõige kuumemas kambri (Joonis 2.10) oleva klaasi pinnal on etteantud lõpptemperatuur saavutatud. Painutuskambrite lagedes asub 180 kütteelementi. Toote õige läbipainde tagamiseks tuleb katse-eksitus meetodile ja varasemale kogemusele tuginedes määrata kütteprogrammis iga kütteelemendi rakendatav küttevõimsus. Lisaks ka iga kambri alg- ja lõpptemperatuur. Toote lõpptemperatuuri korrigeeritakse ahjuoperaatori poolt jooksvalt vastavalt saavutatud läbipaindele. Selline korrigeerimine nõuab operaatori pädevust ning ei pruugi olla täpne. Tulemusena võib suurel osal toodetud klaasidel olla ebasobiv läbipaine. Painutatud klaasi võib näha joonisel 1.2.



Joonis 1.1: Painutusvormil asetsev toorik



Joonis 1.2: Painutatud klaas

Käesoleva töö raames uuritakse klaasi läbipainet LEM simulatsioonide abil, kuna vastavad seadmed kontrollitud tingimustes katsetamiseks puuduvad. Samuti ei ole katseid võimalik läbi viia tootmises kasutatavas painutusahjus, kuna see on hõivatud tootmistellimuste täitmisega. Varasemalt on klaasi paindumise simuleerimisel vaadeldud klaasi nii viskoplastse vedelikuna [4] kui ka viskoelastse tahkisena [6, 7, 8, 5]. Motoušek jt [4] leidsid eksperimentaalseid katseid ja simulatsioone teostades, et klaasi paindumise kiirus on lineaarses sõltuvuses viskoossusega ja ruutsõltuvuses klaasi paksusega. Nende teostatud simulatsioonide ja eksperimendi tulemusena leitud klaasi deformatsioon erines vähem kui 1%. Boubaker jt [7] uurisid erinevaid reoloogilisi mudeleid klaasi gravitatsioonitoimelise paindumise simuleerimisel. Mudelid valideeriti eksperimendi tulemuste põhjal, mis on läbi viidud Duffrene'i jt [9, 10] poolt. Simulatsioonide tulemusena leiti, et Maxwelli mudel on piisav nihke simuleerimiseks, kuid tõmbe ja surve simuleerimiseks on vaja kasutada näiteks Zeneri või üldistatud Maxwelli mudelit. Üldistatud Maxwelli mudeli harude arv avaldas simulatsioonitulemuste täpsusele mõju ainult kohtades, kus klaas jõudis vormiga kontakti [7]

1.2 Töö eesmärk ja ülesehitus

Nagu eelnevalt kirjeldatud järeldeb on painutusahju juhtimine klaasi läbipainde suhtes kaudne. Klaasi paine ei sõltu mitte ainult saavutatud lõpptemperatuurist, vaid kogu temperatuuri ajaloost ning temperatuurijaotusest [11]. Tõenäoliselt on see ka üheks põhjuseks, miks klaaside ühtlase läbipainde tagamine on tootmises problemaatiline [11]. Probleem seisneb selles, et erinevate klaaside painutamiseks kuluv aeg ei ole konstantne. Kui näiteks klaasile, mille painutusaeg ahju viimases kambris on suur, järgneb klaas, mille painutamiseks kulub palju vähem aega, siis võib tekkida väikese painutusajaga klaasil ülepaine ja vastupidi. Klaaside ahju paigutamisel sellega küll arvestatakse, kuid siiski tekib

mudeli vahetusel palju vale läbipaindega klaase [11]. Vale läbipainde vältimiseks muudavad ahju operaatorid painutusahju kütteprogrammis mudelile määratud viimase painutuskambri lõpptemperatuuri väärtust – kui klaasil on alapaine, siis lõpptemperatuuri suurendatakse, kui esineb ülepaine, siis lõpptemperatuuri vähendatakse.

Käesoleva magistritöö eesmärk on luua prototüüpmodel, mille abil on võimalik lõplike elementide meetodit kasutades uurida, kui suurt mõju avaldab tsükliaja muutumine klaasi lõplikule läbipaindele, et saadud tulemuste põhjal oleks võimalik ennetavalt seadistada toote lõpptemperatuuri, et tagada klaasi õige läbipaine.

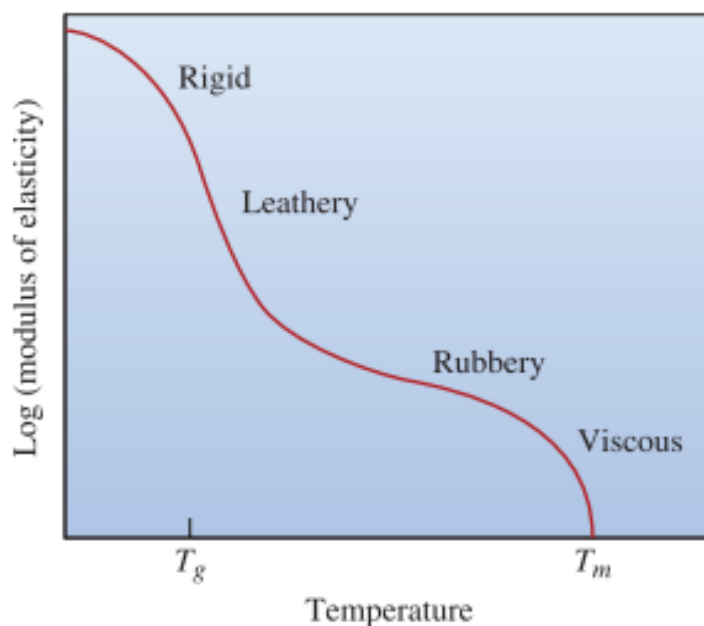
Käesolev magistritöö on jagatud viieks peatükiks:

- Peatükis 2 kirjeldatakse klaasi viskoelastseid omadusi, ning mudeleid, mille abil neid simulatsioonides kirjeldatakse. Lisaks räägitakse ka vaadeldava painutusahju ehitusest ja tööpõhimõttest.
- Peatükis 3 kirjeldatakse modelleerimisel läbitud etappe.
- Peatükis 4 kirjeldatakse töö käigus saadud tulemusi ning tehakse vastavad järeldused. Samuti seatakse eesmärgid edasisteks arendusteks.
- Peatükis 5 tehakse kokkuvõtte magistritöö raames saavutatust.

2 Teoreetiline taust ja meetodika

2.1 Viskoelastsus

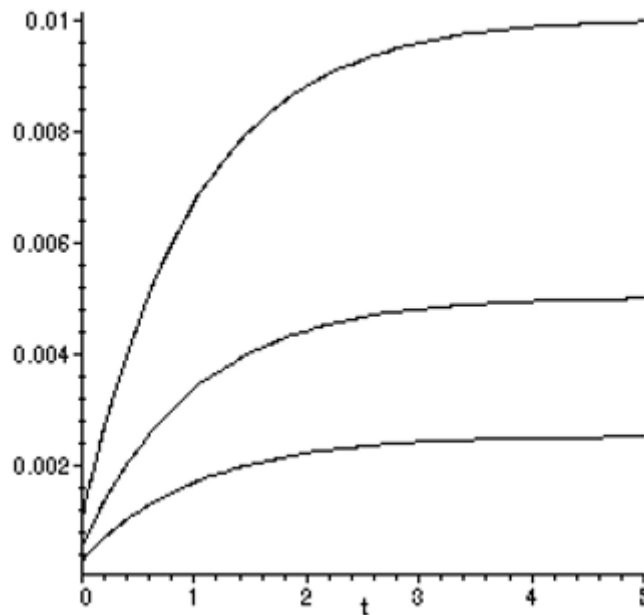
Klaasi paindumise simuleerimisel kasutatakse klaasi kirjeldamisel viskoelastse materjali mudelieid [6, 7, 8, 5]. Viskoelastseid materjale iseloomustab see, et üleminekul tahkest olekust vedelasse esineb viskoelastne tsoon, kus materjalil on samaaegselt nii tahke keha elastsed omadused kui ka vedeliku viskoossed omadused [12]. Joonisel **2.1** [13] on iseloomustatud viskoelastse materjali elastsusmooduli sõltuvust temperatuurist.



Joonis 2.1: Viskoelastse materjali elastsusmooduli sõltuvus temperatuurist

Kui temperatuur on oluliselt madalam kui klaasisiirdetemperatuur (joonisel T_g), siis käitub klaas hapra materjalina, ehk esineb väikeseid taastuvaid deformatsioone, kuid kui suhteline deformatsioon ületab kriitilise piiri, siis klaas puruneb hapralt. Klaasisiirde temperatuuri ümbruses langeb klaasi elastsusmoodul järsult ning hakkavad esinema suured viskoossed deformatsioonid [12]. Sõidukite esiklaasi painutamine toimub üldjuhul just nende temperatuuride juures. Kui klaasi temperatuuri veelgi suurendada, siis hakkab klaas käituma esialgu kumjana millele lõpuks järgneb täielik üleminek vedelasse faasi.

Viskoelastsete materjalide puhul on klaasisiirde temperatuuri ümbruses olulisteks fenomenideks roome ja pingete relakseerumine [12]. Roome all mõistetakse nähtust, kus katsekehal tekib konstantse pinge rakendamisel ajas kasvav deformatsioon (Joonis **2.2**). Joonise vertikaalteljel on näidatud suhtelist deformatsiooni [12].



Joonis 2.2: Viskoelastse keha roome erinevatel konstantsetel pingetel

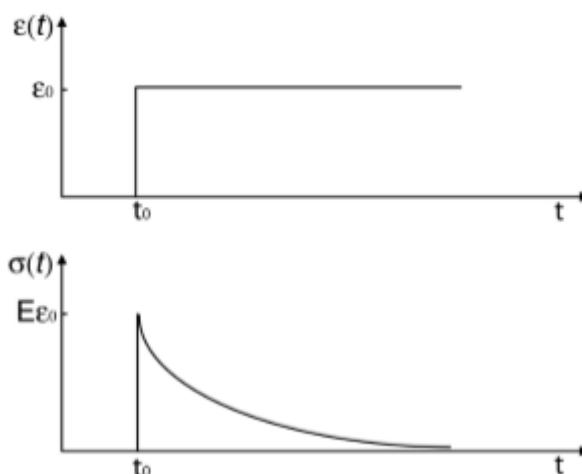
Joonisel **2.2** olevad kolm kõverat on saadud kolmel erineval pingel, kusjuures igal korral on pinge väärtust kahekordistatud [12]. Jooniselt võib näha, et pinge kahekordistamisel ka suhteline deformatsioon kahekordistub igal ajahetkel ehk tegemist on lineaarse viskoelastse materjaliga:

$$\epsilon(a\sigma) = a\epsilon(\sigma),$$

kus:

- a – konstant,
- ϵ – suhteline deformatsioon,
- σ – pinge [12].

Pinge relakseerumine on nähtus, kus konstantse deformatsiooni juures pinge ajas väheneb (Joonis **2.3**) [6]. Sõiduki esiklaasi painutamise puhul tuleb klaasi jahutamisel arvestada pingete relakseerumisega, et vältida sisepingeid. Kui klaasi liiga kiirelt jahutada, siis pingete relakseerumist ei toimu, kuna klaas läheb liialt kiirelt üle tahkesse („klaasjasse“) olekusse. Sisepingete vältimiseks painutatud klaase jahutatakse aeglaselt ehk lõõmutatakse [6]. Käesolevas magistritöös keskendutakse klaasi deformeerumisele ning sisepingeid põhjalikumalt ei uurita.



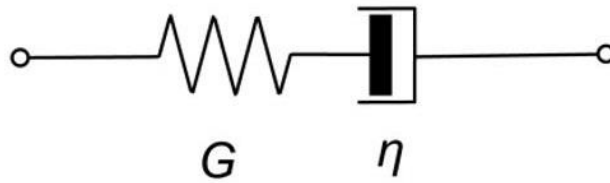
Joonis 2.3: Pinge relakseerumine

2.1.1 Viskoelastsed materjalimudelid

Klaasi gravitatsioonitoimelise painutamise kirjeldamiseks kasutatakse viskoelastsete deformatsioonide simuleerimist erinevate materjalimudelite (Maxwelli [6, 7], Kelvin-Voigti [6], Zeneri [7], Burgeri [6] ja üldistatud Maxwelli mudeli [6, 7, 8]) abil. Klaasi paindumise simuleerimiseks on enim kasutatud üldistatud Maxwelli mudelit, kuna see kirjeldab klaasi viskoelastseid omadusi kõige täpsemalt [7]. Samas annab ka Zeneri mudel küllaltki täpsed tulemused kohtades, kus ei ole kontakti painutusvormiga [7]. Kõikide mudelite puhul kirjeldatakse materjali vedrude ja summutite süsteemina. Vedrud kirjeldavad elastseid deformatsioone ja summutid viskoosseid deformatsioone.

Maxwelli mudel

Tegemist on kõige lihtsama mudeliga, mis koosneb vaid kahest komponendist: ühest vedrust ja ühest summutist. Vedru ja summuti on paigutatud jadamisi (Joonis 2.4) [6]. Maxwelli mudeli miinuseks on see, et see ei arvesta roomega üldjuhul korrektselt: konstantse pinge juures ei ole deformatsioon tõkestatud [12].



Joonis 2.4: Maxwelli viskoelastse materjali mudel

Maxwelli mudelis on komponentide pinge võrdne, mis on omakorda võrdne ka kogupingega:

$$\sigma_{kogu} = \sigma_s = \sigma_v,$$

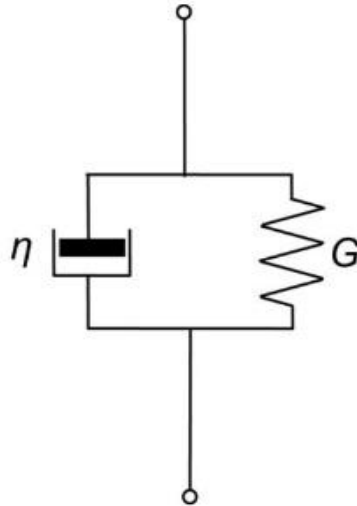
kus alaindeksid s ja v tähistavad vastavalt summutit ja vedru.

Kogu suhteline deformatsioon on võrdne komponentide suhteliste deformatsioonide summaga:

$$\epsilon_{kogu} = \epsilon_s + \epsilon_v$$

Kelvin-Voigti mudel

Sarnaselt Maxwelli mudelile koosneb ka Kelvin-Voigti mudel vaid kahest elemendist: vedrust ja summutist, kuid siin on need paigutatud paralleelselt (Joonis 2.5) [6]. See mudel küll kirjeldab roomet ja viskoosse deformatsiooni taastumist realistlikumalt kui Maxwelli mudel, kuid ei ole pinge relakseerumise kirjeldamises kuigi täpne, kuna koormuse eemaldamisel käitub mudel sarnaselt elastsele materjalile [14].



Joonis 2.5: Kelvin-Voigti viskoelastse materjali mudel

Kelvin-Voigti mudelis on komponentide suhteline deformatsioon võrdne, mis on võrdne ka kogu suhtelise deformatsiooniga:

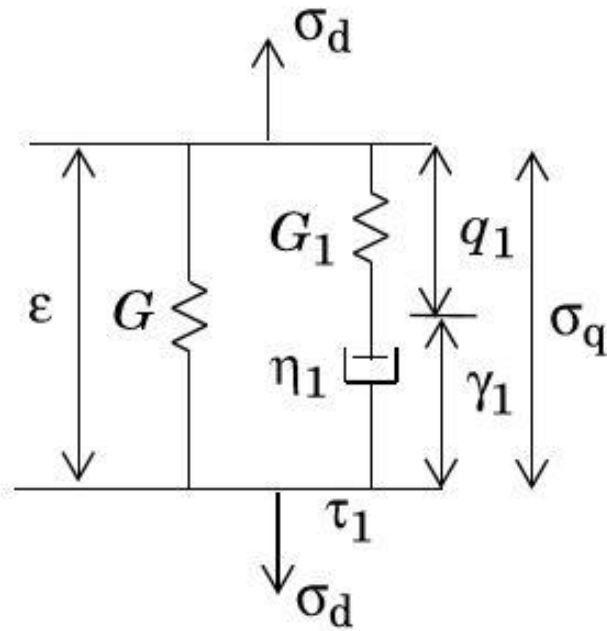
$$\epsilon_{kogu} = \epsilon_s = \epsilon_v$$

Kogu pinge on võrdne komponentide pingete summaga:

$$\sigma_{kogu} = \sigma_s + \sigma_v$$

Zeneri mudel

Zeneri mudel ehk *Standard Linear Solid* (SLS) mudel on kõige lihtsam mudel, mis kirjeldab viskoelastsete materjalide omadusi üldisemalt, st sellega on võimalik kirjeldada enamikke tüüpilisi viskoelastseid materjale [12]. Zeneri mudelit võib vaadelda kui mudelit, kus Maxwelli mudelile on lisatud üks vedru paralleelselt (Joonis 2.6) [15].



Joonis 2.6: Zeneri viskoelastse materjali mudel

Zeneri mudeli puhul saab joonisel näidatud parempoolse haru pinged ja suhtelised deformatsioonid arvutada sarnaselt Maxwelli mudelile. Kogu pinge on võrdne lisanduva vedru 1 pinge ja Maxwelli haru pingete summaga:

$$\sigma_{kogu} = \sigma_M + \sigma_{v1},$$

kus alaindeksid M ja v1 tähistavad vastavalt Maxwelli haru ja eraldiseisvat vedru.

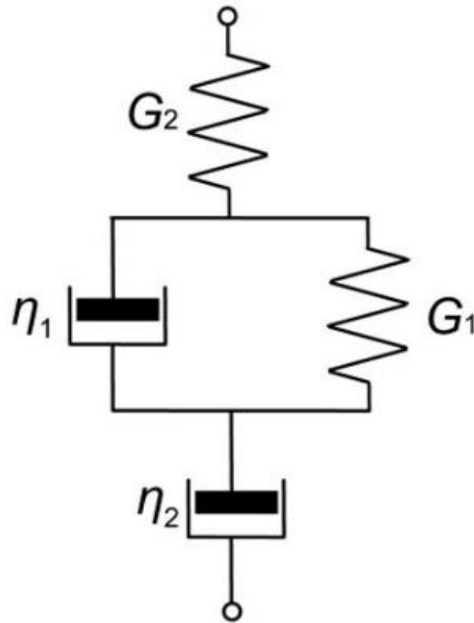
Kogu suhteline deformatsioon on võrdne üksikute harude suhteliste deformatsioonidega:

$$\epsilon_{kogu} = \epsilon_M = \epsilon_{v1}$$

Eraldiseisev vedru iseloomustab materjali omadusi tasakaaluolekus [12].

Burgeri mudel

Burgeri mudeli puhul on tegemist materjalimudeliga, kus Maxwelli ja Kelvin-Voigti mudelid on paigutatud jadamisi (Joonis 2.7) [6].



Joonis 2.7: Burgeri viskoelastse materjali mudel

Kui vaadelda, et Burgeri mudeli komponentideks on Maxwelli mudel ja Kelvin-Voigt mudel, siis saab öelda, et Burgeri mudeli komponentide pinge on võrdne, mis on võrdne ka kogupingega:

$$\sigma_{kogu} = \sigma_M = \sigma_{KV},$$

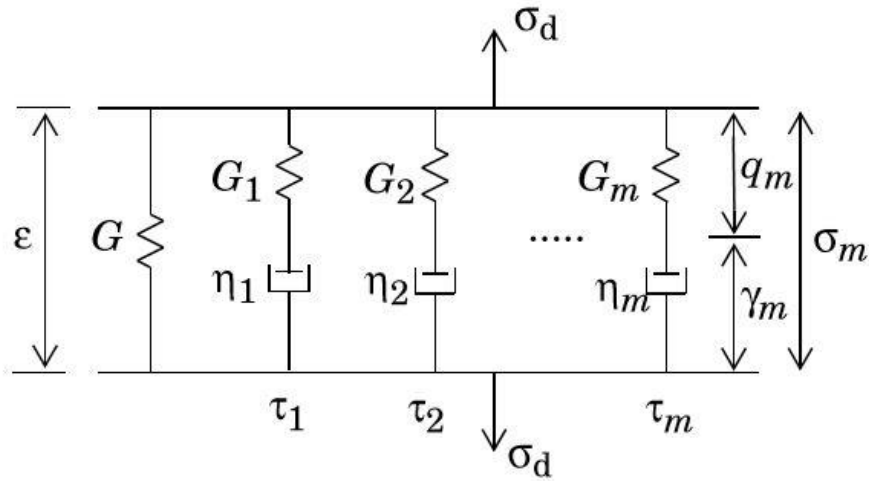
kus alaindeksid M ja KV tähistavad vastavalt Maxwelli ja Kelvin-Voigti mudelit.

Kogu suhteline deformatsioon on võrdne komponentide suhteliste deformatsioonide summaga:

$$\epsilon_{kogu} = \epsilon_M + \epsilon_{KV}$$

Üldistatud Maxwelli mudel

Üldistatud Maxwelli mudel on materjalimudelitest kõige keerulisem, seega on ta ka simuleerimisel kõige ressursinõudlikum. Tegemist on sisuliselt sama mudeliga, mis Zeneri mudel, kuid kui Zeneri mudelis oli vedruga paralleelselt üks Maxwelli mudeli haru, siis siin on harude arv m (Joonis 2.8) [15]. Tavaliselt ei kasutata rohkem kui 6 Maxwelli haru [8]. Mida rohkem harusid on mudelis, seda täpsemini on võimalik materjali kirjeldada. Mõistagi kasvab ka harude arvu suurenemisel mudeli komplekssus ja seega ka simulatsiooniaeg.



Joonis 2.8: Üldistatud Maxwelli viskoelastse materjali mudel

Kogu mudeli pinge on võrdne harude pingete summaga:

$$\sigma_{kogu} = \sum \sigma_i,$$

Kus σ_i tähistab i-nda haru pinget.

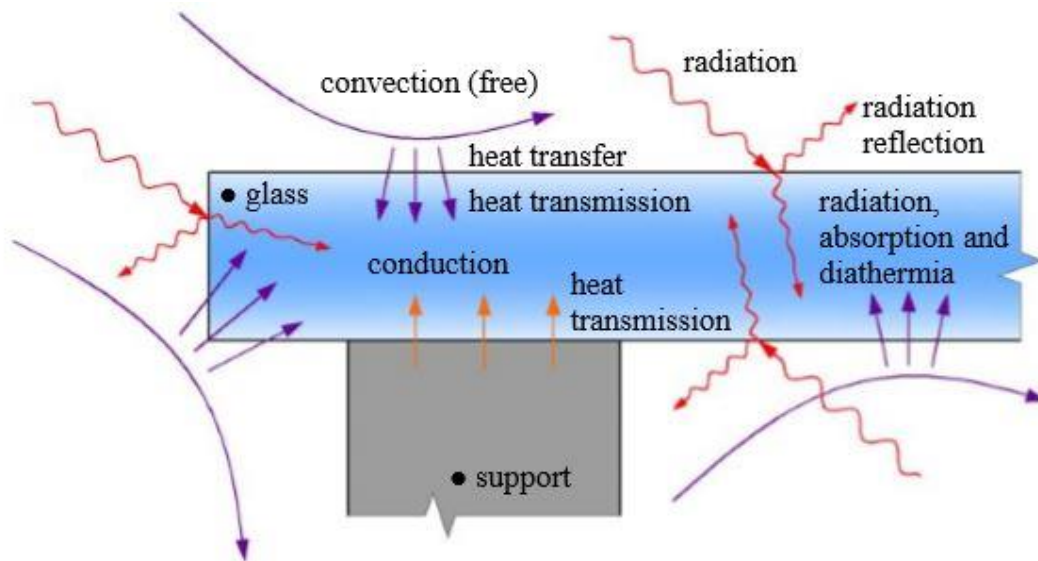
Suhteline deformatsioon on igas harus ja ka kogu mudeli kohta võrdne:

$$\epsilon_{kogu} = \epsilon_i,$$

kus ϵ_i tähistab i-nda haru suhtelist deformatsiooni.

2.2 Temperatuurijaotuse simuleerimine

Antud magistritöös arvestatakse temperatuurijaotuse simuleerimisel soojusjuhtivuse ja -kiirgusega. Klaasi kuumutatakse soojuskiirgusega ning klaasi sees levib soojus soojusjuhtivusega. Klaas on infrapuna- ja infrapunalähedase kiirguse suhtes poolläbipaistev ning soojuse levik kiirgusena on domineeriv, kui küttekeha temperatuur on kõrgem kui 500 °C [4]. Joonisel 2.9 on näha diagramm soojusvahetuse kohta painutusahjus [4].



Joonis 2.9: Soojusvahetus klaasipainutusahjus

Käesolevas magistritöös jäetakse arvestamata soojusvahetus klaasi ja painutusraami vahel, kuna painutusraami ja klaasi vaheline kontaktpind on küllalt väike võrreldes klaasi üldpinnaga ning samuti on raami ja klaasi temperatuuride erinevus eeldatavasti suhteliselt väike. Soojuskiirguse juures jäetakse arvestamata kiirguse neeldumine klaasi sees, sest klaas on liiga õhuke, et see omaks märkimisväärset mõju. Samuti eeldatakse, et klaasi läbiv kiirgusehulk on piisavalt väike, et selle võib jätta arvestamata.

LEM simulatsioonides lahendatav osatuletistega diferentsiaalvõrrand soojusjuhtivuse kohta on üldiselt järgmisel kujul [16]:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_{trans} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = -\alpha T : \frac{dS}{dt} + Q,$$

kus

- ρ – tihedus [kg/m^3],
- C_p – erisoojus konstantse rõhu juures [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$],
- T – absoluutne temperatuur [K],
- \mathbf{u}_{trans} – kiiruste vektor [m/s],
- \mathbf{q} – konduktiivne soojusvoog [W/m^2],
- \mathbf{q}_r – kiirguslik soojusvoog [W/m^2],
- α – soojuspaisumistegur [1/K],
- S – Piola-Kirchhoffi pingetensor [Pa],

- Q – muud soojusallikad [W/kg³].

Kuna antud töös soojuspaisumisega ei arvestada, siis võrrandi parempoolne esimene liige on võrdne nulliga. Muudeks soojusallikateks on painutusahju küttekehad. Kiirguslik soojusvoog küttekehadel on võrdeline küttekeha mustusastmega ja küttekeha absoluutse temperatuuri neljanda astmega [16]:

$$J = \epsilon e_b(T),$$

kus

- ϵ – mustusaste
- e_b – kiiratav võimsus, mis Stefan-Boltzmanni seaduse kohaselt on arvutatav järgneva valemiga:

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4,$$

kus

- n – materjali murdumisnäitaja,
- σ – Stefan-Boltzmanni konstant [16].

Klaasi puhul on kiiratav soojusvoog leitav neelduva ja väljuva kiirguse vahena:

$$q_r = \epsilon(G - e_b(T)),$$

kus G – klaasi pinnale mõjuv kiirgus [16].

2.3 Lõplike elementide meetod

Lõplike elementide meetod (LEM) on diferentsiaalvõrrandite lahendamiseks kasutatav numbriline meetod. LEM-i põhiliseks printsiibiks on see, et vaadeldav piirkond jaotatakse väiksemateks ehk lõplikeks elementideks ja füüsikalist probleemi kirjeldavad diferentsiaalvõrrandid aproksimeeritakse iga elemendi jaoks eraldi. Üldiselt on soovituslik jaotada piirkond elementideks selliselt, et kohtades, kus geomeetria või uuritav funktsioon muutub kiiresti on elementide suurus väiksem. Nii tagatakse enamasti, et elementide piires tehtud lähendustega ei kaasne märgatavat viga. Kui iga lõpliku elemendi jaoks on lahend leitud, siis kombineeritakse need teatud reeglite järgi kokku ning saadakse lahend kogu vaadeldava piirkonna jaoks [17].

2.4 Materjalimudeli valik

Materjalimudeli valikul tugineti varasematele simulatsioonidele. Kuna sõidukite esiklaaside tootmisel klaasi keskosa vormiga kokkupuutes ei ole, siis sobib nii nihke kui ka tõmbe ja surve simuleerimiseks Zeneri mudel [7]. Zeneri mudeli puhul on pinge ja suhtelise deformatsiooni vahelist seost aja domeenis keeruline kirjeldada, mistõttu tehakse seda sagedusruumis kasutades Laplace'i teisendust. Pinge ja suhtelise deformatsiooni vahelist seost kirjeldab järgnev diferentsiaalvõrrand [12]:

$$\bar{\sigma} = G\bar{\epsilon} + \frac{G_1 s}{s + \frac{1}{\tau}} \bar{\epsilon},$$

kus

- s – Laplace'i muutuja,
- $\bar{\sigma}$ – pinge Laplace'i domeenis,
- $\bar{\epsilon}$ – suhteline deformatsioon Laplace'i domeenis,
- G – eraldiseisva vedru nihkemoodul [Pa],
- G_1 – Maxwelli haru vedru nihkemoodul [Pa],
- τ – relakseerumise aeg [s].

Relakseerumise aeg on seotud vedru nihkemooduli ja summuti viskoossusega järgnevalt:

$$\tau = \frac{\eta}{G},$$

kus η – viskoossus [$Pa \cdot s$].

Klaasi viskoossuse sõltuvust temperatuurist võib kirjeldada VFT (Vogel-Fulcher-Tammann) mudeli abil:

$$\log\eta(T) = A + \frac{B}{T - T_0},$$

kus A ja B on materjali temperatuurikoefitsendid ja T_0 on referentstemperatuur [4]. Käesolevas magistritöös kasutatakse VFT mudeli parameetritena järgnevaid väärtusi: $A = -1,889$ °C, $B = 4018,5$ °C ja $T_0 = 269$ °C [7].

Zeneri mudeli puhul valitakse eraldiseisva vedru nihkemooduliks materjali nihkemoodul kumjas olekus ning Maxwelli haru vedru nihkemooduliks valitakse klaasja ja kumja oleku nihkemoodulite vahe [12]. Kirjandusest võib leida ka, et kui uuritakse klaasi paindumist

juhul, kui temperatuur on oluliselt kõrgem klaasisiirde temperatuurist, siis eraldiseisva vedru nihkemooduliks võetakse nihkemoodul tasakaaluolekus, mis klaasi puhul on vedel olek. Sellest tulenevalt ei esine klaasil tasakaaluolekus nihkedeformatsioone ehk materjalimudelil võib eraldiseisva vedru nihkemooduli võrdsustada nulliga [8, 18, 19].

2.5 Vaadeldav painutusahi

Vaadeldav painutusahi koosneb 34 kambrist [Joonis 2.10]. Kambrid paiknevad kahel korrusel, kummalgi korrusel on 17 kambrit. Ülemisel korrusel toimub kütmine ja alumisel jahutus. Jahutus ei ole üldjuhul juhitud, vaid toimub naturaalselt. Erandiks on eelviimase painutuskambri all asuv kamber, kus toimub klaaside äärte karastus. Küttekambrid on jagatud kolmeks sektsiooniks: eelkuumutus-, eelpainutus- ja painutussektsioon. Painutus- ja eelpainutussektsioonides on kummaski 3 kambrit, ülejäänud 11 kambrit on eelkuumutuse sektsioonis. Klaasid liiguvad kambrist kambrisse üksteise järel (joonisel 2.10 näidatud numbrite järjekorras) vagunitel, millele on paigutatud mudelile vastav painutusvorm. Klaas asetseb painutusvormil horisontaalses asendis ning toetub vormile ainult servadega. Klaas hakkab painutusahjus deformeeruma gravitatsiooni mõjul, kui temperatuuri tõustes on klaasi viskoossus piisavalt madala väärtuseni jõudnud. Masstootmises, mille jaoks on painutusahjud ka mõeldud, on kõikidesse vagunitesse laetud sama toode, kuid väikeseeriatootmises võib esineda olukord, kus igale vagunile on laetud erinev toode.



Joonis 2.10: Painutusahju kambrite paigutus. Sektsioonid on näidatud järgnevalt: kollane – eelkuumutus-, oranž – eelpainutus-, punane – painutus- ja sinine – jahutussektsioon.

Vagunid liiguvad painutusahjus tsirkuleerivalt: pärast klaasi laadimist vagunile liigub see ahju ülemisele korrusele esimesse eelkuumutuskambrisse. Ülemisel korrusel läbib vagun ükshaaval kõik eelkuumutus-, eelpainutus- ja painutuskambrid. Edasi liigub vagun alumisele korrusele, kus vagun liigub jahutuskambreid läbides tagasi laadimispositsiooni, kus toimub valmistoote mahalaadimine ja uue klaasi pealeladimine. Ahju tsükliajaks loetakse aega, mis kulub klaasi kuumutamisele või jahutamisele ühes kambris ja vaguni liikumisele järgmisse kambrisse. Keskmiselt võib arvestada, et ahju tsükliage on ligikaudu 75 s, mis jaguneb transpordiajaks (~25 s) ja painutusajaks (~50 s). Kuna ahjus on 34 kambrit, siis painutusprotsessis läbib vagun sama arvu tsükleid ja kokku on klaas painutusahjus ligikaudu 42,5 minutit. Ahju tsükliaja määrab ära viimases, kõige kuumemas painutuskambris oleva

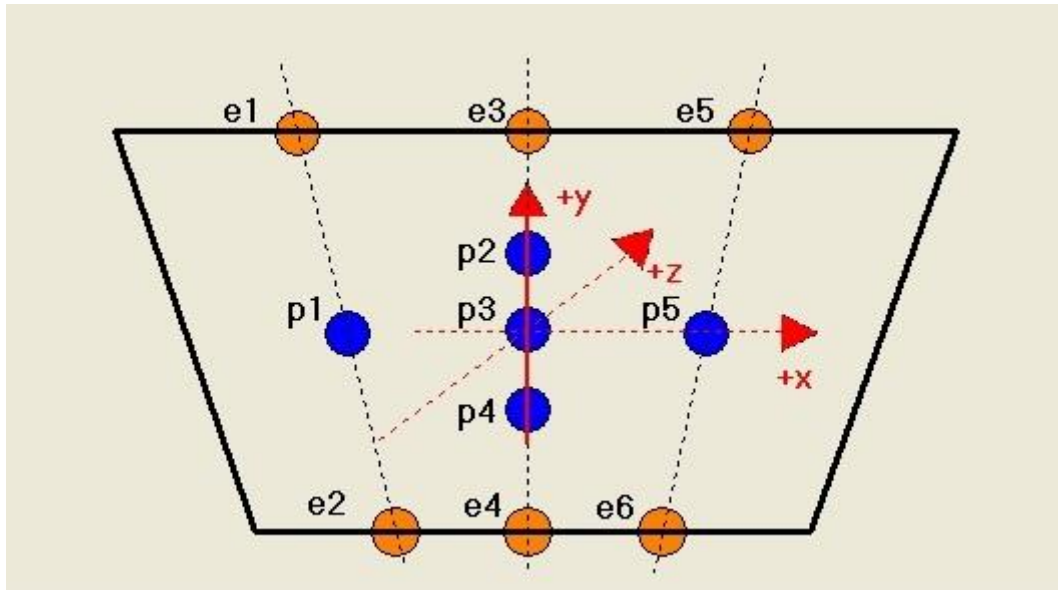
klaasi pinnalt mõõdetud temperatuur. Kui mudelile ette antud temperatuur on saavutatud, siis kütmine katkestatakse ja viimases painutuskambris olev vagun liigub alla (jahutusseksiooni) ning ülejäänud vagunid liiguvad samuti ühe kambri võrra edasi.

Painutuskambrite lagedes asuvad kütteelemendid 5x36, eelpainutuskambrites 3x28 ning eelkuumutuskambrites 1x16 või 1x18 maatriksina. Lisaks on kambrite külgedel 3 rida kütteelemente ning vaguni põhjal ka põhjakütteelement. Kütteelemente juhitakse türistorrelleede abil PWM signaaliga. Elementide küttevõimsust reguleeritakse PWM signaali pulsi laiuse muutmisega. Temperatuuri mõõtmiseks on painutusahjus kahte tüüpi andureid. Igas kambris mõõdetakse kambri õhutemperatuuri termopaariga, mis asub küttekehadega samal kõrgusel. Eelpainutus- ja painutuskambrites mõõdetakse lisaks ka klaasi pinnatemperatuuri püromeetriga. Püromeeter mõõdab klaasi pinnatemperatuuri klaasi vertikaalsest keskjoonest 500 mm kauguselt.

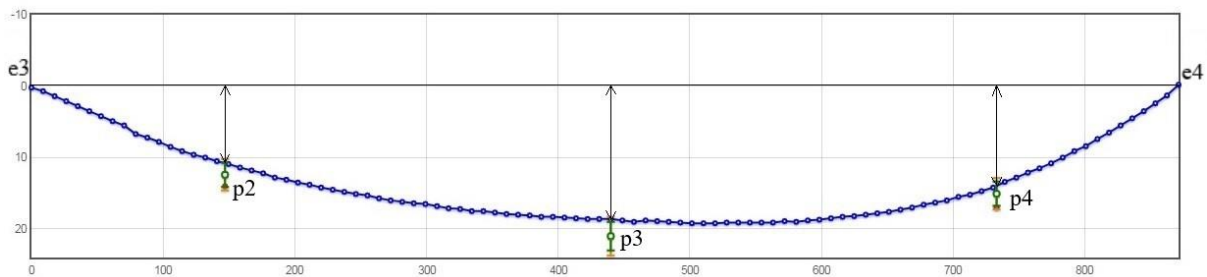
Toote juurutamisel määratakse katse-eksitusmeetodile ning eelnevale kogemusele tuginedes iga kütteelemendi küttevõimsuse protsentuaalselt. Lisaks määratakse ka iga kambri jaoks alg- ja lõpptemperatuur. Vähendamaks eelneva toote mõjusid kütteprogrammi koostamisel jäetakse juurutamise ajal eelnev vagun tühjaks. Ideaalis üritatakse igas kambris saavutada temperatuuri lineaarne kasv algtemperatuurist lõpptemperatuurini. Selleks kasutatakse kütteelementide juhtimisel hägusloogikat. Nagu eelnevalt öeldud, määrab tsükliaja ainult viimases painutuskambris oleva klaasi pinnalt mõõdetud temperatuur. Kuna väikeseeriatootmisel on samaaegselt painutusahjus palju erinevaid tooteid (erinevate klaasi pindalade, paksuste ja kujudega), siis ei saavutata igas kambris lõpptemperatuur samaaegselt. Sellest tulenevalt ei ole kambrite reaalsed alg- ja lõpptemperatuurid alati vastavuses kütteprogrammis määratutega.

2.6 Klaasi läbipaine

Klaasi läbipainde mõõtmiseks kasutatakse mõõterobotit, mis teostab mõõtmise piki kolme mõõtejoont, nagu on näidatud joonisel **2.11**. Antud töös keskendutakse läbipaindele punktis p3. läbipainet mõõdetakse mõõtejoone servapunktide suhtes – mõõtepunkti p3 puhul punktide e3 ja e4 suhtes (Joonis **2.12**).



Joonis 2.11: Klaasi läbipainde mõõtmisel kasutatud mõõtepunktid ja mõõtejooned



Joonis 2.12: Keskmise mõõtejoone läbipainde graafik

2.7 Ahju kambrites eelnevalt viibinud klaasi mõju vaadeldava klaasi läbipaindele

Teoreetiliselt võivad eelnevad tooted klaasi läbipainet mõjutada kahel viisil:

- erinevast küttepildist põhjustatud küttekehade jääksoojusega,
- tsükliaja ebahühtlusega.

Küttepildi all mõeldakse seda, millised küttekehad ja kui suure võimsusega on rakendatud ajal, mil antud toode asub kambris. Küttepilt sõltub sellest, millise paindega klaasi on vaja toota ja samuti ka sellest, millist tüüpi painutusraami kasutatakse. Erinevate küttepiltide mõju vähendamiseks on võimalik kasutada vagunite transpordi ajal nn inverteeritud kütmist – küttekehad rakendatakse transpordi ajaks tööle inverteeritud koormusega ehk kui klaasi kütmise ajal oli küttekeha rakendatud 90% võimsusega, siis transpordi ajal rakendatakse seda

küttekeha 10% võimsusega. Selliselt üritatakse saavutada olukord, kus uue klaasi jõudmisel kambrisse on kõikide küttekehade algtemperatuur võimalikult ühtlane.

Ebaühtlane tsükliäeg mõjutab klaasi painet seetõttu, et klaasi paine ei sõltu ainult klaasi lõpptemperatuurist, mille järgi ahju juhitakse, vaid kogu temperatuuri ajaloost. Eelkõige sellest, kui kaua ja kui palju on klaasi temperatuur üle kriitilise piiri, kus klaas deformeerub painutusahju tsükliäga jooksul oluliselt. Üldjuhul jääb see kriitiline temperatuur 550-600 °C ümbrusesse. Antud temperatuur saavutatakse üldjuhul viimases eelpainutuskambris või esimeses painutuskambris, seega võib eeldada, et uue tsükliäga toote lisamine ahju oluliselt mõjutada kuni kolme järgneva klaasi läbipainet.

3 Simulatsioonimudeli loomise metoodika

3.1 Kasutatud tark- ja riistvara

Simulatsioonide läbi viimiseks kasutatakse COMSOL Multyphysics 5.2 tarkvara. Esialgsete simulatsioonide läbiviimiseks kasutati arvutit, millel oli Intel Core i3-6100 protsessor, taktsagedusega 3,7 GHz ning muutmälu 16 GB. Aeganõudvamate simulatsioonide tarbeks kasutati arvutit, millel on kokku 20 Intel Xeon E5-2690 protsessorit, taktsagedusega 3,0 GHz ning muutmälu 256 GB. Antud töös kasutati simulatsioonide arvutamisel kahte protsessorit.

3.2 Lähteandmed ja vaadeldav toode

Käesolevas magistritöös kasutatakse lähteandmetena Datapaq DQ1860 andmehõiveseadmega mõõdetud klaasi temperatuuri, vaadeldava toote mõõtmeid ja nominaalset läbipainet. Lisaks ka küttekehade dimensioone ning paigutust klaasi suhtes. Kuna riknenud aku tõttu ei õnnestunud töö raames Datapaq andmehõiveseadmega mõõtmisi teostada, tuli vaadeldava toote valikul lähtuda sellest, milliste toodetega oli mõõtmisi varasemalt tehtud. Valituks osutus toode, millega teostatud temperatuurimõõtmise tulemused kirjeldasid kõige lähedasemalt ideaaltingimusi. Täpsemalt sai otsustavaks see, et küttesektsioonis oli igas kambris saavutatud lõpptemperatuur suurem eelmises kambris saavutatud lõpptemperatuurist. Antud töö raames kasutati lähteandmetena 2007. aasta veebruaris teostatud mõõtmisi, kus 3 andurit oli paigutatud klaasi keskjoonele klaaside vahele, üks klaasi ülemisele pinnale ja üks kambri õhu temperatuuri mõõtma. Täpsete andurite asukohtade kohta puudub dokumentatsioon. Kuna klaasi pinnale paigutatud andurite näitu võis mõjutada otsene soojuskiirgus küttekehadelt, siis kasutati ainult nende andurite näite, mis olid paigutatud klaasipaari vahele.

Vaadeldava toote geometriat lähendatakse trapetsiga, mille kõrguseks võetakse vaadeldava toote keskjoone kõrgus ning alusteks vastavalt toote maksimaalne ja minimaalne laius.

3.3 Modelleerimine

Mudeli ülesehitusel lähtutakse põhimõttest, et alustatakse lihtsamatest mudelitest, millega veendutakse, et simulatsiooni tulemused omavad füüsilist tähendust. Alustatakse viskoelastsete deformatsioonide ja soojusjuhtivuse uurimist eraldiseisvalt. Järk-järgult lisatakse keerukust ning kombineeritakse soojusjuhtivus mehaanikaga. Järgnevalt on toodud põhilised etapid, mis läbiti mudeli ülesehitamisel:

- 1) materjalimudeli parameetrite hindamine,
- 2) Võrgutiheduse mõju hindamine läbipainde ja temperatuurijaotuse simuleerimisel,
- 3) ristkülikukujulise klaasplaadi läbipainde uurimine 2D simulatsiooni kasutades,
- 4) paksu klaasi kiirgusega kütmise uurimine,
- 5) kahe fikseeritud servaga ristkülikukujulise klaasplaadi läbipainde uurimine 3D simulatsiooni kasutades,
- 6) nelja fikseeritud servaga ristkülikukujulise klaasplaadi läbipainde uurimine 3D simulatsiooni kasutades,
- 7) trapetsikujulise klaasplaadi läbipainde uurimine reaalse klaasi temperatuuri juures,
- 8) eelpainutus- ja painutuskambritele vastavate küttekehade temperatuuride leidmine,
- 9) **eelpainutus- ja painutuskambrites viibimise aja muutusest tingitud lõpliku läbipainde hälbimise uurimine.**

3.3.1 Materjalimudeli valideerimine

Mudeli valideerimiseks kasutatakse Duffrene'i jt poolt läbi viidud „roome-taastumise“ (*creep-recovery*) katseid [9]. Katsekehale rakendati teljesihilist tõmbepinget 10 MPa 572 °C juures. Koormus rakendati katsekehale ajahetkel $t = 10$ s ja eemaldati ajahetkel $t = 100$ s. Katse ajal mõõdeti järeleandvust ehk suhtelist deformatsiooni koormusühiku kohta. Mudeli parameetrite hindamiseks kasutati COMSOLi optimeerimismoodulit. Optimeerimisel minimeeritakse optimeerimiskriteeriumit arvestades hinnatavatele parameetritele seatud piiranguid [20]. Üldisel kujul on optimeerimisülesanne järgnev:

$$\begin{cases} \min_{\xi} Q(u(\xi), \xi) \\ L(u(\xi), \xi) = 0 \\ lb_P \leq P(u(\xi), \xi) \leq ub_P, \\ lb_{\Psi} \leq \Psi(\xi) \leq ub_{\Psi} \\ lb_b \leq \xi \leq ub_b \end{cases}$$

kus:

- $Q(u(\xi), \xi)$ – optimeerimiskriteerium,
- $L(u(\xi), \xi)$ – lahendatavast osatuletistega diferentsiaalvõrrandist diskreetimise tulemusel saadud võrrandite süsteem,
- $u(\xi)$ – uuritava osatuletistega diferentsiaalvõrrandi lahend,
- $P(u(\xi), \xi)$ – parameetritest ja lahendist sõltuv piirangufunktsioon (*performance constraints*),

- $\Psi(\xi)$ – parameetritest sõltuv piirangufunktsioon (*design constraint*),
- ξ – hinnatavad parameetrid.

Eksperimentaalsed andmed sisestati tabelina tarkvara COMSOL Multiphysics keskkonda ning optimeerimiskriteeriumina kasutati globaalset vähimruutkriteeriumit. Hinnatavaks parameetriks oli materjalimudeli summuti viskoossus. Optimeerimisülesande lahendamiseks kasutati Levenberg-Marquardti meetodit [20], mis on mõeldud vähimruutkriteeriumi lahendamiseks, mistõttu selle optimeerimismeetodi lahend koondub kõige kiiremini. Levenberg-Marquardti meetodi miinuseks on see, meetod ei võimalda piirangutega arvestamist. Optimeerimiskriteeriumiks on:

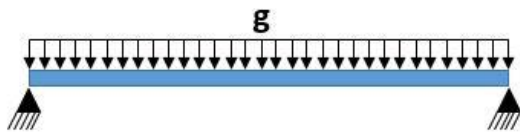
$$Q(\xi) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{J_m} \sum_{k=1}^{K_{jm}} w_{jm} f_{jm}^2(x_{jmk}, u_m(x, p_{jm}, \xi), \xi, C_m),$$

kus:

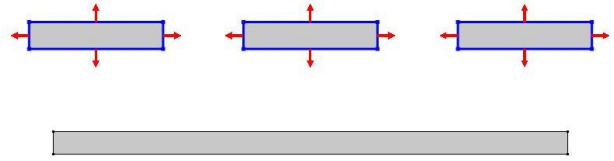
- M – mõõtmiskorduste arv,
- J_m – mõõtmiste arv,
- K_{jm} – punktide arv,
- w_{jm} – kaalufunktsioon,
- x – ruumikoordinaat,
- ξ – hinnatavad parameetrid,
- $u_m(x, p_{jm}, \xi)$ - uuritava osatuletistega diferentsiaalvõrrandi lahend,
- p – aeg (ajast sõltuvate osatuletistega diferentsiaalvõrrandite puhul),
- f_{jm} – mõõdetud suuruse ja arvutatud suuruse vahe.

3.3.2 Simulatsioonides kasutatud geomeetriad

Joonisel 3.1 on skemaatiliselt näidatud 2D läbipainde simulatsioonides kasutatud geomeetriad ja rajatingimusi. Klaasiplaadi kaks alumist nurka on fikseeritud ning kogu klaasiplaadile mõjub gravitatsioonijõud. Joonisel 3.2 on näidatud küttekehade paiknemist ja soojuskiirguse suunda paksu klaasi peal teostatud simulatsioonide juures.

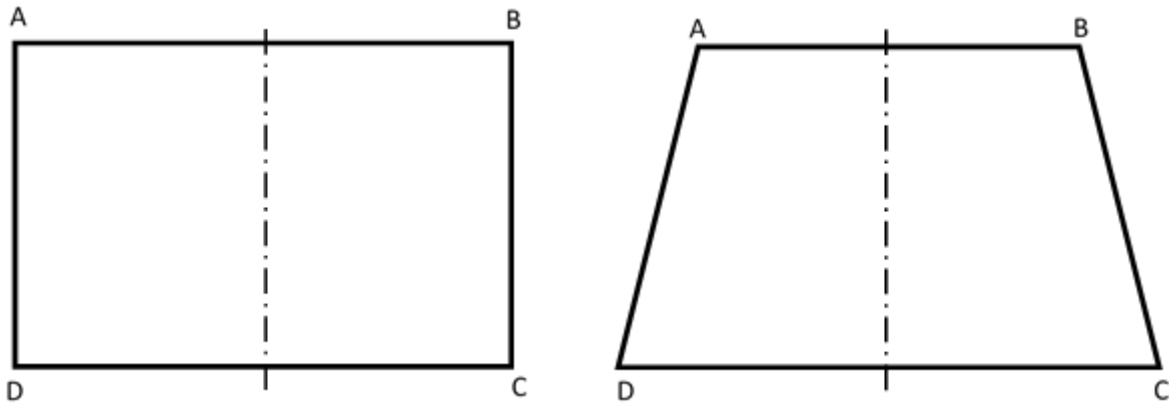


Joonis 3.1: 2D simulatsioonides kasutatud geometria ja rajatingimused



Joonis 3.2: Paksu klaasi soojusjaotuse simuleerimisel kasutatud küttekehade paigutus ja sojuskiirguse suunad

Joonisel **3.3** on näidatud 3D simulatsioonides kasutatud klaasi geometriat koos sümmeetria rajatingimusega. Ristkülikukujulise klaasiplaadiga teostatud simulatsioonides oli esimestes simulatsioonides fikseeritud servad AD ja BC. Edaspidi vaadeldi olukorda, kus nii trapetsi- kui ristkülikukujulisel klaasiplaadil olid fikseeritud kõik neli serva.



Joonis 3.3: 3D simulatsioonides kasutatud klaasi geometriad ja sümmeetria rajatingimused

3.3.3 2D simulatsioonid

Simulatsioone alustati lühema arvutusaja tagamiseks kahemõõtmelises ruumis. 2D simulatsioon on geometria sümmeetriaid rakendav erijuht 3D arvutustest ning nendes arvestatakse geometria paksusega matemaatiliselt ja rakendatakse sügavuse sihis integreerimist analüütiliselt – selliste simulatsioonide arvutusajad on väiksema vabadusastmete hulga tõttu oluliselt lühemad ning tulemuste tõlgendamine lihtsam kui üldise, 3D probleemi korral. Kahemõõtmelises ruumis teostatud simulatsioonide eesmärgiks oli veenduda, et viskoelastsete deformatsioonide simuleerimine toimub füüsikaliselt: klaasiplaadi koormamisel esineb lisaks elastsele deformatsioonile ka roome. Simulatsioonides oli temperatuur kogu klaasiplaadil ühtlaselt 620 °C ning simulatsiooniajaks 60 s.

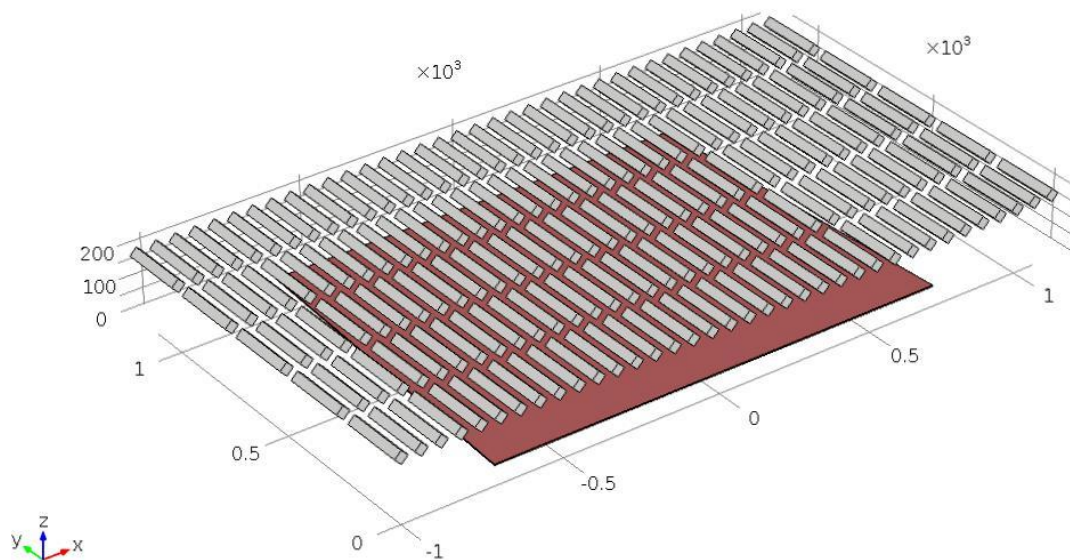
Klaasi kütmise uurimist alustatakse samuti kahemõõtmelises ruumis ning esialgu teostatakse simulatsioone 42 mm paksuse klaasiga, et oleks paremini näha soojuse levimist klaasi sees.

Klaasi kütmiseks kasutatakse kolme ristkülikukujulist kütteelementi. Kütteelementide temperatuur oli 1100 °C ning simulatsiooniaeg 600 s.

3.3.4 3D simulatsioonid

Kolmemõõtmelises ruumis alustati simuleerimist 2D simulatsioonides kasutatud mudelile võimalikult sarnase probleemipüstituse kohaselt, hindamaks kolmemõõtmelise mudeli tulemuste kattuvust 2D simulatsioonide tulemustega. Kui kahemõõtmelises ruumis oli fikseeritud kaks alumist klaasiplaadi nurka, siis kolmemõõtmelisel juhul fikseeritakse esialgu kaks klaasiplaadi alumist serva. Suurendamaks vastavust reaalsele olukorrale painutusahjus muudeti rajatingimusi nii, et kõik neli klaasiplaadi alumist serva olid fikseeritud. Sarnaselt 2D simulatsioonidele oli klaasi temperatuur 620 °C ning simulatsiooniaeg 60 s. Simulatsioonides kasutati arvutusaja lühendamise eesmärgil sümmeetria rajatingimust (Joonis 3.3).

Temperatuurijaotuse simuleerimisel kolmemõõtmelises ruumis võeti arvesse kütteekehade ja klaasi reaalset omavahelist paiknemist painutuskambrites (Joonis 3.4). Arvestati ainult kambri laes asuvate kütteelementidega. Kütteekehade temperatuur oli 900 °C ning simulatsiooniaeg 200 s.



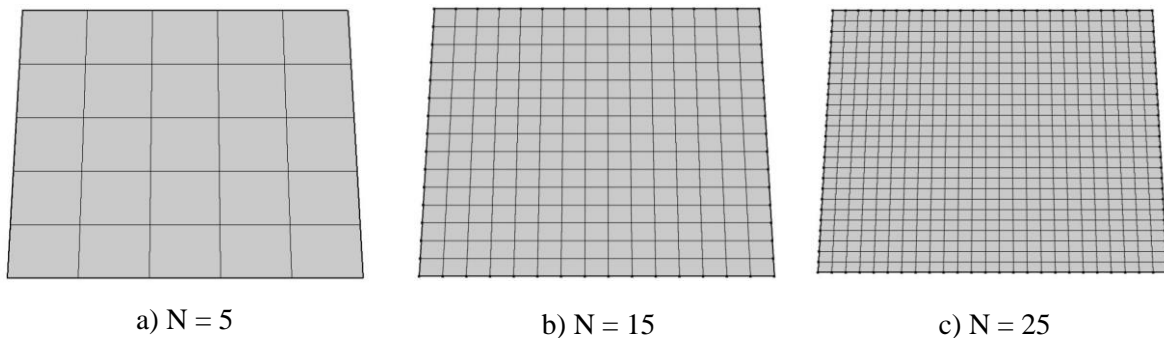
Joonis 3.4: Simulatsioonides kasutatud kütteekehade ja klaasi omavaheline asetus. Ühikud on toodud millimeetrites

Järgnevas simulatsioonides kasutati trapetsikujulist klaasiplaati, mis on reaalse esiklaasi kujule lähemal kui ristkülikukujuline klaas. Trapetsi aluste mõõtmed võeti võrdseks

vaadeldava toote vähima ja suurima laiusega ning trapetsi kõrguseks võeti vaadeldava toote keskjoone kõrgus.

3.3.5 Võrgu tiheduse mõju hindamine simulatsioonitulemuste täpsusele

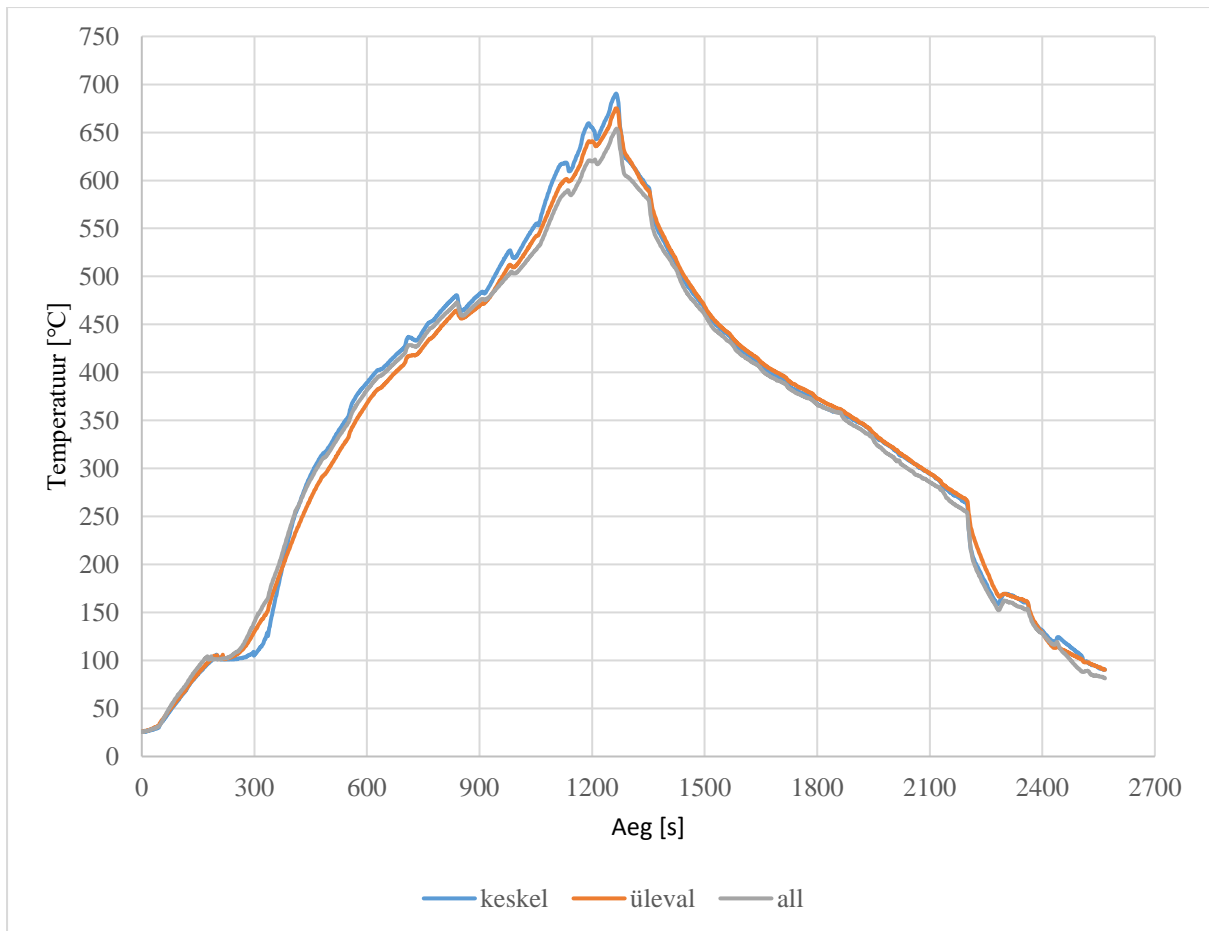
Selleks, et hinnata võrgu tiheduse mõju arvutustulemuste täpsusele, sooritati kaks eksperimenti, kus võrgusõlmede arvu N klaasiplaadi servadel muudeti vahemikus 5...25, sammuga 5. Simulatsioonis kasutati lõplike elementidena heksaheedreid. Klaasi paksuse suunas kasutati kolme elementide kihti. Näited kasutatud võrkudest on toodud alloleval joonisel 3.5. Esimesel juhul uuriti klaasiplaadi maksimaalse läbipainde sõltuvust võrgu tihedusest ning teisel juhul uuriti klaasiplaadi maksimaalse temperatuuri sõltuvust võrgu tihedusest.



Joonis 3.5: Näited kasutatud võrkudest

3.3.6 Läbipainde simulatsioonide võrdlus praktikaga

Simulatsiooni tulemusel leitud läbipainde võrdlemiseks tootmises esinevate painetega teostati järgnevalt simulatsioon Datapaq andmehõiveseadmega mõõdetud klaasi temperatuuri juures. Mudeli lihtsuse huvides võeti esialgu kogu klaasi temperatuur võrdseks mõõdetud temperatuuride aritmeetilise keskmisega. Joonisel 3.6 on näha lähteandmetena kasutatud temperatuuride muutust ajas. Kuna reaalselt kasutatava klaasiga ei olnud võimalik sooritada katseid viskoossuse määramiseks sõltuvalt temperatuurist, siis kasutati selleks kirjandusest leitud andmeid [7].



Joonis 3.6: Datapaq andmehõiveseadmega mõõdetud klaasipaari vaheline temperatuur ühe ahjutsükli vältel

3.3.7 Painutusahju kambrite modelleerimine

Järgnevalt on loetletud painutusahju kambrite modelleerimisel tehtud lihtsustused ja eeldused:

- arvestatakse ainult soojuskiirgusega soojendamise,ga,
- arvestatakse ainult kambri laes asuvate kütteelementidega,
- kõikide küttekehade temperatuurid igas kambris on võrdsed,
- küttekehade temperatuur on konstantne ajal, mil klaas on antud kambris,
- klaasi liikumise ajal ühest kambrist teise jääb küttekehade asetus muutumatuks.

Iga kambri küttekehade temperatuur leiti COMSOLi optimeerimismooduli abil, kasutades SNOPT meetodit [20]. Antud juhul otsustati selle meetodi kasuks, kuna see võimaldab ise defineerida optimeerimiskriteeriumit. Lisaks võimaldab SNOPT meetodi kasutamine seada hinnatavatele parameetritele piiranguid (näiteks maksimaalset ja minimaalset väärtust). Küttekehade temperatuuride hindamiseks kasutati järgnevat optimeerimiskriteeriumit:

$$Q(\xi) = \left(\bar{T} - \frac{T_{a1} + T_{a2} + T_{a3}}{3} \right)^2,$$

kus

- \bar{T} – klaasi keskmine temperatuur,
- T_{ai} – i-nda klaasipaari vahel asetsenud anduri mõõdetud temperatuur.

Kuna klaasi viskoelastne deformeerumine hakkab toimuma klaasiirdetemperatuurist kõrgematel temperatuuridel, siis piirduakse viimase eelpainutuskambri ja painutuskambrite ehk viimase nelja kambri simuleerimisega. Lisaks iga kambri küttekehade temperatuuri leidmisele, leitakse ka ekvivalentseid küttekehade temperatuurid, mis iseloomustavad klaasi jahtumist liikumisel ühest kambrist teise.

3.3.8 Tsükliaja muutumise mõju klaasi läbipaindele

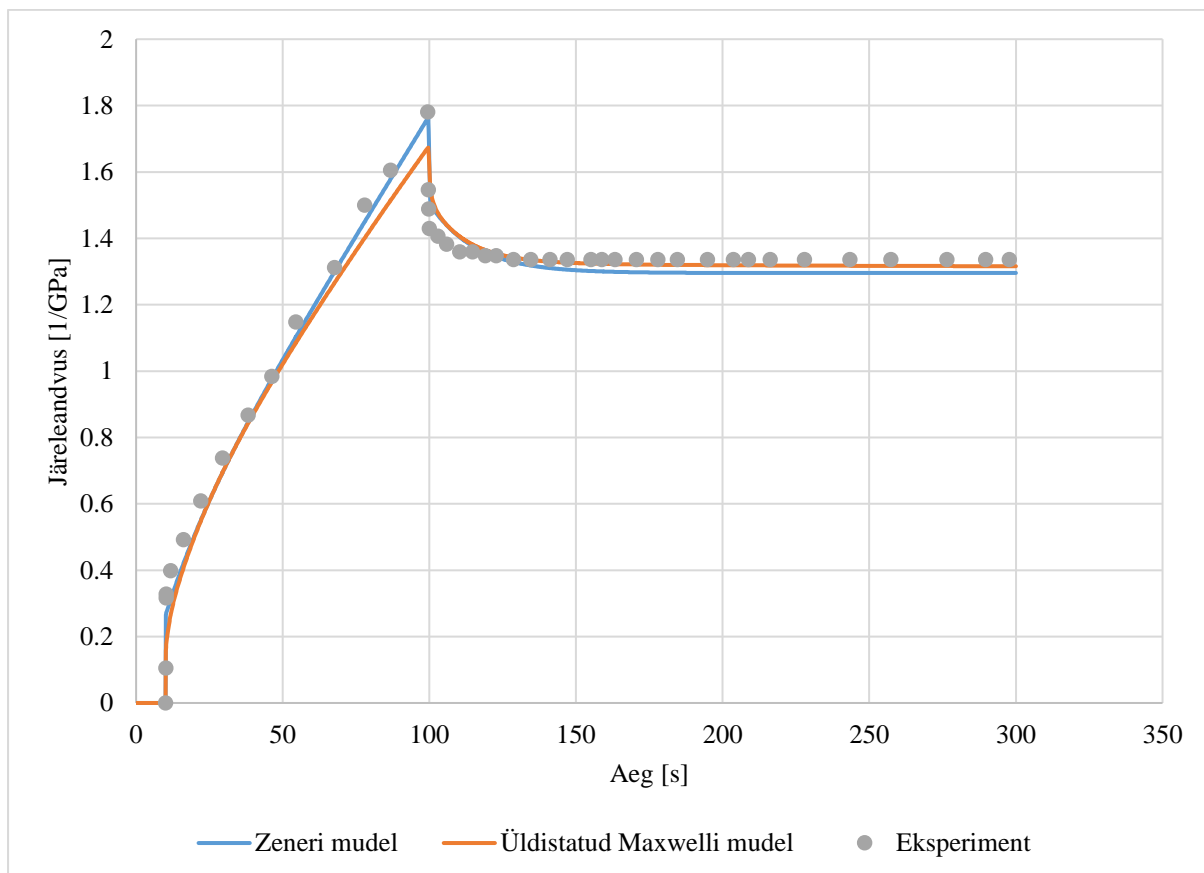
Kuna antud painutusahju puhul ei ole tsükliage konstantne, siis käesoleva töö raames uuritakse, kui palju mõjutab klaasi lõplikku läbipainet see, kui kaua viibib klaas igas simuleeritavas kambris. Lõplikuks läbipaindeks loetakse läbipainet hetkel, kui klaasi keskmine temperatuur on saavutanud etteantud temperatuuri. Selleks, et hinnata, kuidas ja kui palju mõjutab muutuv tsükliage klaasi lõplikku läbipainet teostatakse rida simulatsioone, kus muudetakse ükshaaval kambrites viibimise aega. Kambris viibimise aegu muudetakse vahemikus 30...80 s, sammuga 10 s. Antud vahemik on valitud lähtuvalt reaalsete tsükliegade väärtustest, mille kohta näidet on võimalik näha lisis 1.

4 Tulemused ja järeldused

4.1 Materjalimudeli valideerimine

Materjalimudeli valideerimisel leiti COMSOLi optimeerimismooduli abil materjalimudeli summuti viskoossus ning võrreldi saadud tulemust kirjandusest leitud väärtustega. Hinnatavaks parameetriks valiti ainult materjalimudeli viskoossus, kuna klaasi nihkemoodul „klaasjas“ olekus ehk toatemperatuuril on kirjandusest leitav (25.4 GPa) ning eraldiseisva vedru nihkemooduliks valiti sarnaselt kirjandusega 0 Pa.

Ekspirimendi tulemuste ja arvutatud tulemuste võrdlust on näha joonisel 4.1. Optimeerimise tulemusena saadi materjalimudeli parameetriteks $\eta = 1,7369 \cdot 10^{11}$ Pa·s, mis suurusjärgult ühtib kirjandusest leitud väärtustega. Loomulikult sõltub viskoossus oluliselt klaasi keemilisest koostisest, mistõttu ei saagi erinevatest allikatest saadud väärtused täpselt kattuda. Allolevalt jooniselt on näha, et katsekeha koormamise ajal oli Zeneri mudelit kasutades kokkulangevus eksperimendiga parem kui kahe haruga üldistatud Maxwelli mudeli puhul.

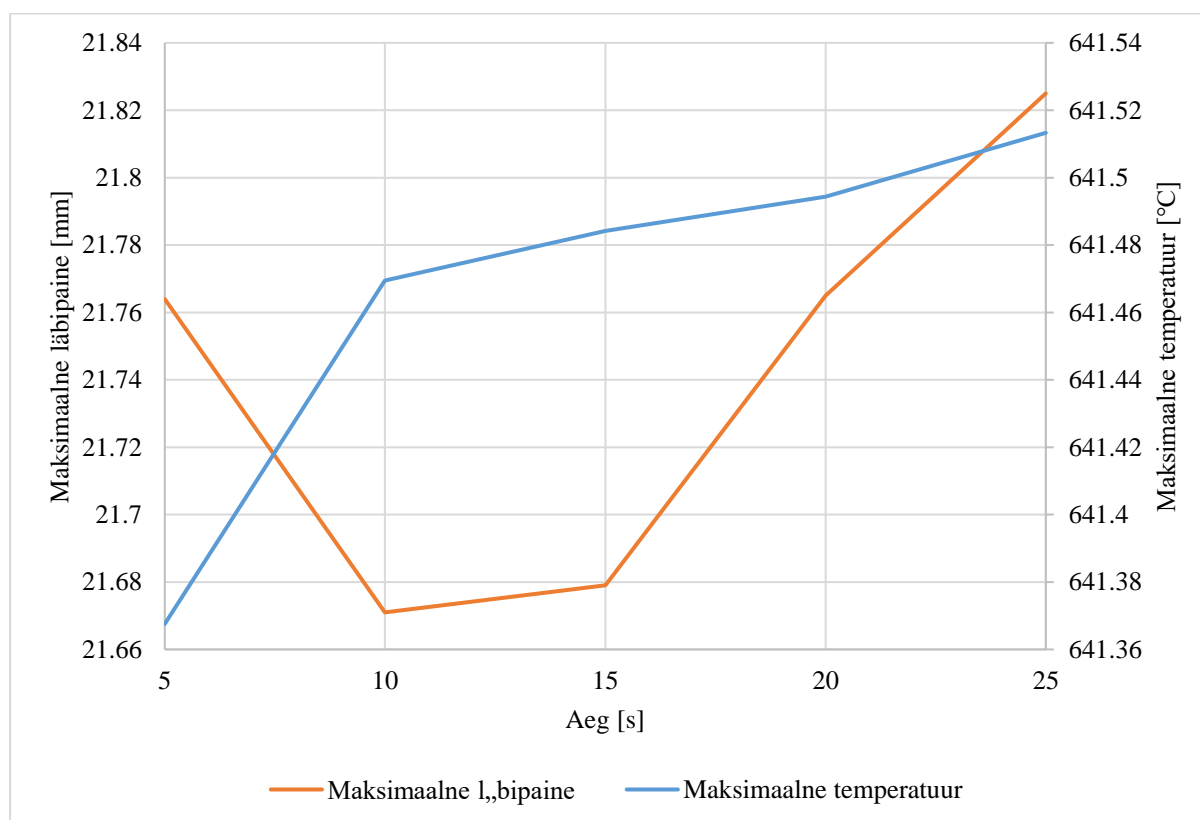


Joonis 4.1: Materjaliomaduste hindamine eksperimentaalandmete põhjal

Kuna klaasi viskoossus sõltub oluliselt temperatuurist, siis on antud katset vaja teostada vähemalt kolmel erineval temperatuuril. Seejärel on võimalik klaasi viskoossust temperatuurist sõltuvana kirjeldada VFT seaduse järgi.

4.2 Võrgu tiheduse mõju hindamine

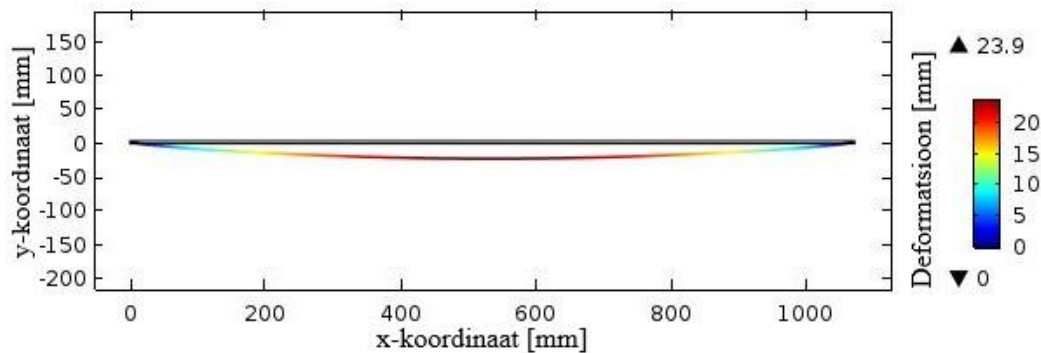
Võrgu tiheduse mõju hindamiseks sooritatud eksperimentide tulemused on näha joonisel 4.2. Tulemustest on näha, et nii maksimaalne läbipaine kui ka maksimaalne temperatuur muutuvad suhteliselt väikeses ulatuses: vastavalt 0,16 mm ja 0,14 °C. Sellest tulenevalt võib järeldada, et simulatsioonides sobib kasutamiseks ka võrk, millel on klaasiplaadi servadel 5 võrgusõlme, eriti arvestades asjaolu, et antud töö eesmärk oli välja töötada prototüüpmodel.



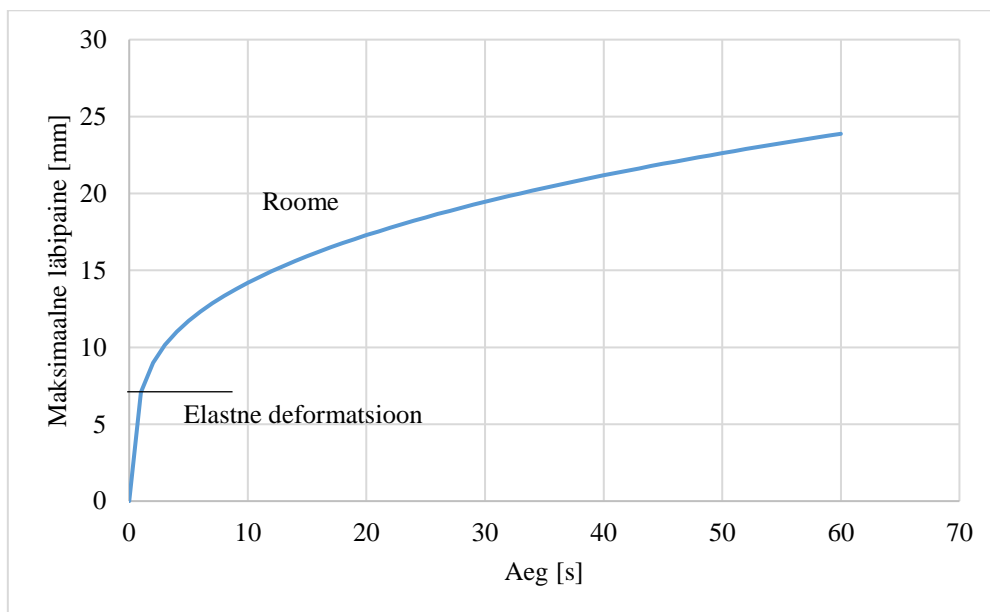
Joonis 4.2: Võrgutiheduse mõju arvutustulemustele

4.3 2D simulatsioonid

Kahemõõtmelises ruumis teostatud simulatsioonide tulemusi on näha joonistel 4.3 ja 4.4. Joonisel 4.3 on näha klaasiplaadi lõplik paine pärast 60 sekundit gravitatsiooni mõju all olemist. Maksimaalse deformatsiooni muutust ajas on näha joonisel 4.4. Klaasiplaadi temperatuur oli kogu simulatsiooni vältel ühtlaselt 620 °C.



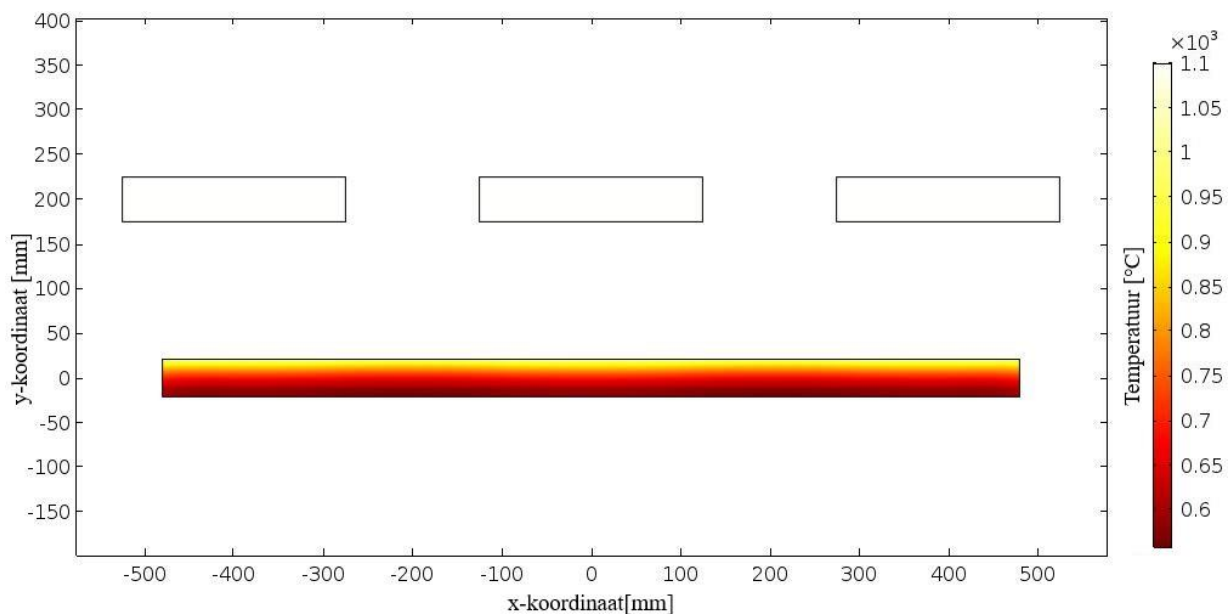
Joonis 4.3: Klaasiplaadi arvutuslik läbipaine kahemõõtmelises ruumis



Joonis 4.4: Klaasiplaadi maksimaalne arvutuslik läbipaine kahemõõtmelises ruumis

Vaadeldava toote maksimaalne läbipaine on 20 mm, arvutuslik maksimaalne läbipaine on 23,9 mm. Seega võib öelda, et arvutatud maksimaalne läbipaine on samas suurusjärgus reaalse esiklaasi läbipaindega. Kui vaadata maksimaalse painde muutust ajas, siis on selgelt võimalik eristada elastset deformatsiooni ja roomet. Antud simulatsiooni läbi viimiseks kulus 31 s, kasutades i3-6100 3,7 GHz protsessoriga arvutit.

Esiolguet simulatsiooni tulemust klaasiplaadi soojuskiirgusega kütmise kohta on näha joonisel 4.5. Antud simulatsioonist on selgelt näha, et soojuskiirgusega kütisel soojeneb klaasi ülemine pind oluliselt kiiremini kui alumine, ülemise ja alumise pinna temperatuur erineb ligikaudu 350 °C võrra. Antud simulatsioonis kasutati klaasiplaati paksusega 42 mm, reaalselt on klaasipaari paksus tüüpiliselt 4,2 mm. Jooniselt on näha ka, et kohas, kus otse klaasi kohal ei asu küttekeha, on klaasi temperatuur natukene madalam.



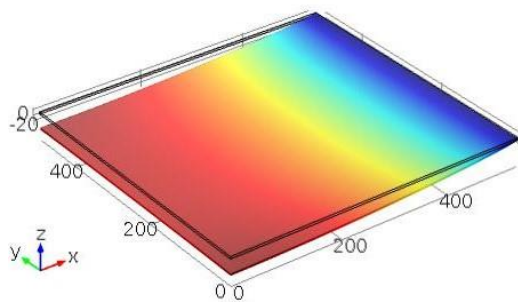
Joonis 4.5: Kümnekordse paksusega klaasiplaadi arvutuslik temperatuurijaotus kolme küttelemendiga kütisel

4.4 Klaasi 3D simulatsioonid

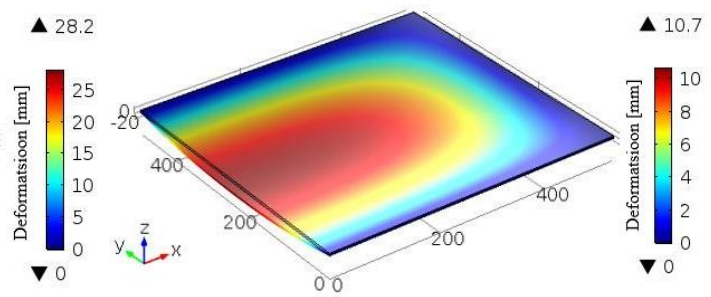
4.4.1 Klaasiplaadi paine 3D simulatsioonides

Kolmemõõtmelises ruumis teostatud simulatsiooni tulemusi, kus klaasiplaat oli fikseeritud kahest alumisest servast on näha joonisel 4.6. Simulatsioonis kasutati arvutusaja vähendamiseks sümmeetría rajatingimust. Maksimaalne läbipaine on 28,2 mm, mis on küll suurem kui kahemõõtmelises ruumis teostatud simulatsiooniga arvutades. Eeldatavasti tuleneb see kahemõõtmelises ruumis arvutamisel tehtud lihtsustustest. Sama arvutit kasutades, mida kasutati ka kahemõõtmelises ruumis simuleerimiseks oli simulatsiooniaeg 79 s. Seega suurenes simulatsiooniaeg võrreldes kahemõõtmelise juhuga 2,55 korda.

Joonisel 4.7 on näha klaasiplaadi läbipainet, kui kõik neli alumist serva on fikseeritud. Nagu võis ka eeldada, on sellisel juhul maksimaalne läbipaine oluliselt väiksem: 10,7 mm.



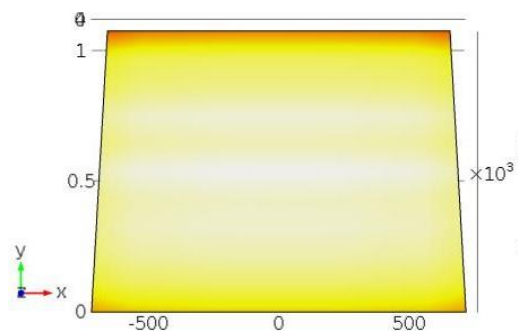
Joonis 4.6: Arvutuslik klaasiplaadi deformatsioon kahe fikseeritud servaga ning sümmeetria rajatingimusega. Ühikud toodud millimeetrites



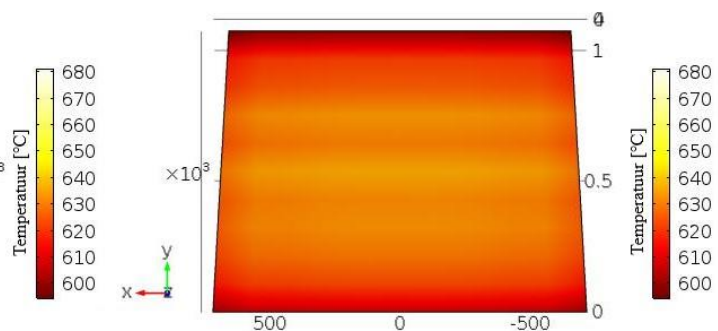
Joonis 4.7: Arvutuslik klaasiplaadi deformatsioon nelja fikseeritud servaga ning sümmeetria rajatingimusega. Ühikud toodud millimeetrites, graafiliselt on deformatsioon võimendatud 2 korda

4.4.2 Klaasiplaadi temperatuurijaotus

Joonistel 4.8 ja 4.9 on näha vastavalt klaasiplaadi ülemise ja alumise pinna temperatuurijaotus. Nagu oli näha ka joonisel 4.5, on klaasi alumine pind madalama temperatuuriga kui ülemine. 4,2 mm klaasi puhul on erinevus küll ainult ~5%, kuid täpsemate tulemuste saamiseks tuleks siiski arvestada ka kambri põhjas oleva kütteelemendiga. Joonistelt on selgelt näha ka, et kohtades, kus klaasi kohal ei asu kütteelementi, on temperatuur madalam kui otse kütteelementide all. Samuti on ülemine ja alumine serv madalama temperatuuriga, kuna selles suunas ei ole klaasi servast kaugemal enam kütteelemente. Kuna antud töö eesmärk ei olnud eelkõige võimalikult täpsete tulemuste saamine, vaid prototüüplahenduse välja töötamine, siis jäetakse põhjaküte siiski arvestamata.



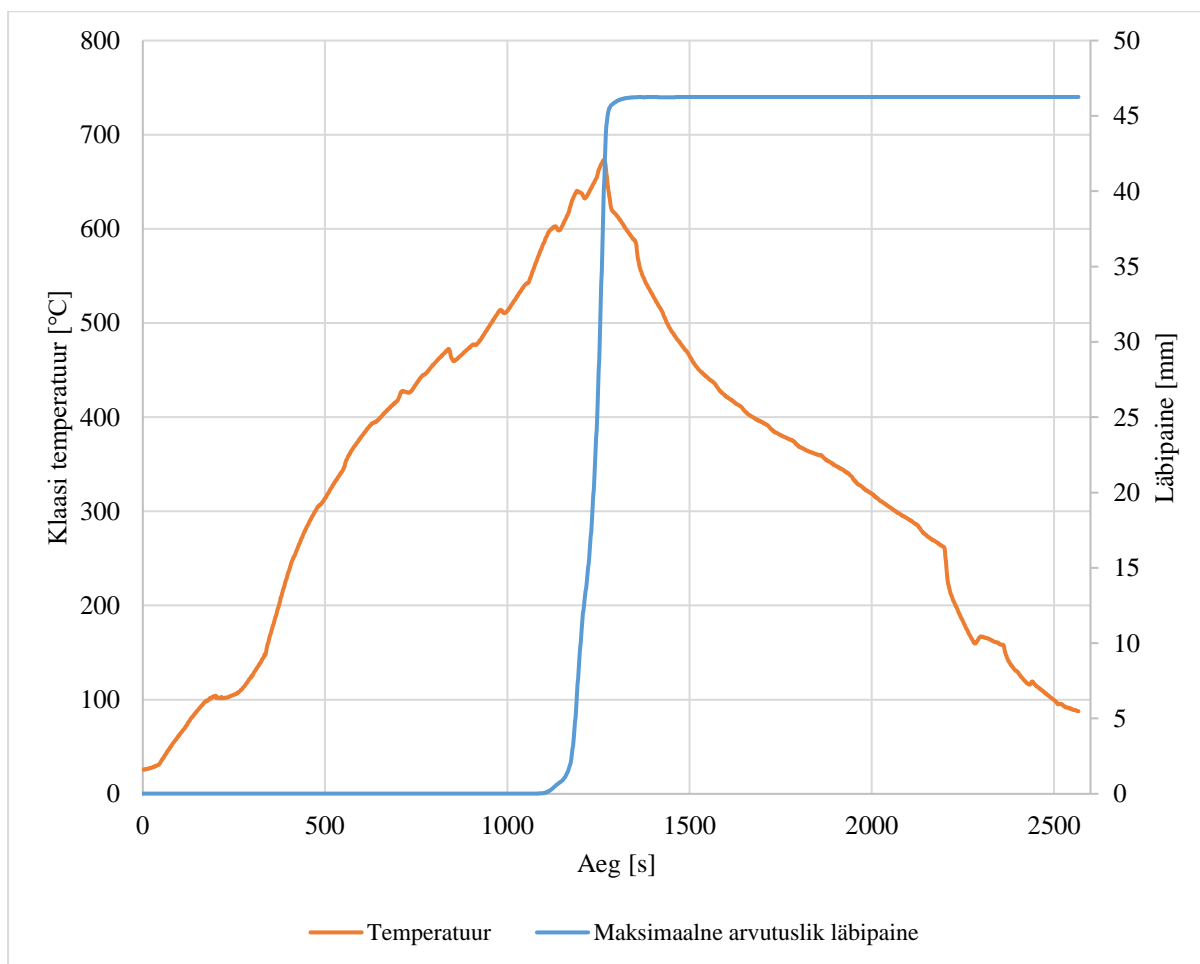
Joonis 4.8: Klaasiplaadi ülemise pinna arvutuslik temperatuurijaotus reaalsete kütteelementide paigutuse korral, koordinaatide ühikud on toodud millimeetrites



Joonis 4.9: Klaasiplaadi alumise pinna arvutuslik temperatuurijaotus reaalsete kütteelementide paigutuse korral, koordinaatide ühikud on toodud millimeetrites

4.4.3 Klaasi läbipaine reaalse klaasi temperatuuri juures

Simulatsioonitulemusi, kus uuriti klaasiplaadi läbipainet mõõdetud klaasi temperatuuri juures, on toodud joonisel 4.1. Joonisel on näha, et klaas hakkab märgatavalt painduma alles painutuskambrites, st hetkel, kui klaasi temperatuur ületab 585 °C piiri, sest siis on klaasi viskoossus piisavalt madal. Sellest tulenevalt uuritakse edaspidi ainult painutuskambrites ja lisaks ka viimases eelpainutuskambris (kambris „eelpainutus 3“) toimuvat. Jooniselt on näha, et arvutuslik läbipaine on reaalse klaasi temperatuuri juures 46,2 mm. See on 2,3 korda suurem kui vaadeldava toote nominaalne läbipaine. Erinevus tuleb materjalimudeli parameetrite mittevastavusest vaadeldava klaasiga. Kuna aga võimalused parameetrite hindamiseks puudusid, siis antud töö raames kasutati samu parameetreid ka edaspidi.

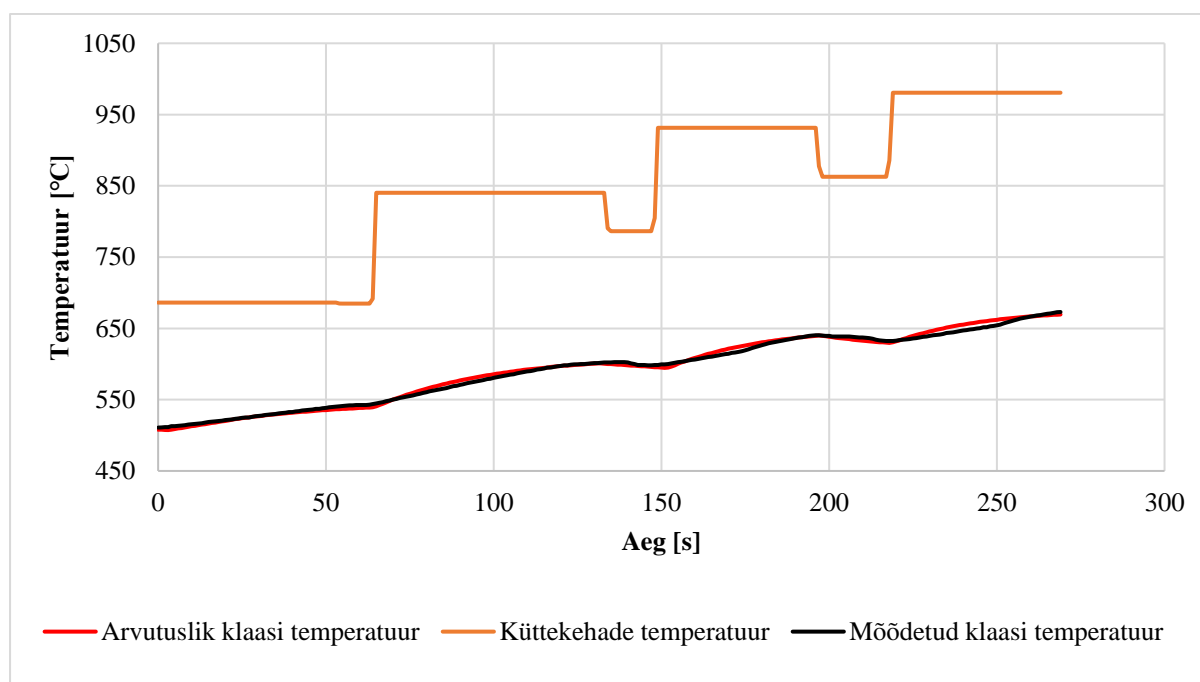


Joonis 4.10: Klaasiplaadi arvutuslik maksimaalne läbipaine mõõdetud keskmise temperatuuri juures

4.5 Vastavus eksperimentaalsete andmetega

4.5.1 Painutusahju kambrite simuleerimine

Joonisel 4.11 on näha lihtsustatud painutusahju mudelis kasutatud küttekehade temperatuure ja mudeli järgi leitud klaasi keskmist temperatuuri. Võrdluseks on toodud ka Datapaq andmehõiveseadmega mõõdetud keskmine klaasi temperatuur. Üldiselt on arvutusliku ja mõõdetud temperatuuri vahel näha suhteliselt head kattuvust, suurim viga jäi alla 1,5%, mis prototüüpmodeli jaoks on piisavalt väike. Erinevuseks on see, et kui mõõdetud temperatuur kasvab kambrisiseselt lineaarselt, siis arvutusliku temperatuuri kasv on kambrisiseselt pigem logaritmilise kujuga. See viga tuleneb eeldusest, et küttekehade temperatuur on kambris konstantne, mis tegelikkuses on vale. Kuna aga küttevõimsustega arvestamisel on suur roll ka näiteks kambri seinte isolatsioonil ning kiirguse peegeldumisel, siis mudeli lihtsuse huvides piirduti antud töös konstantsete küttekehade temperatuuride eeldusega.

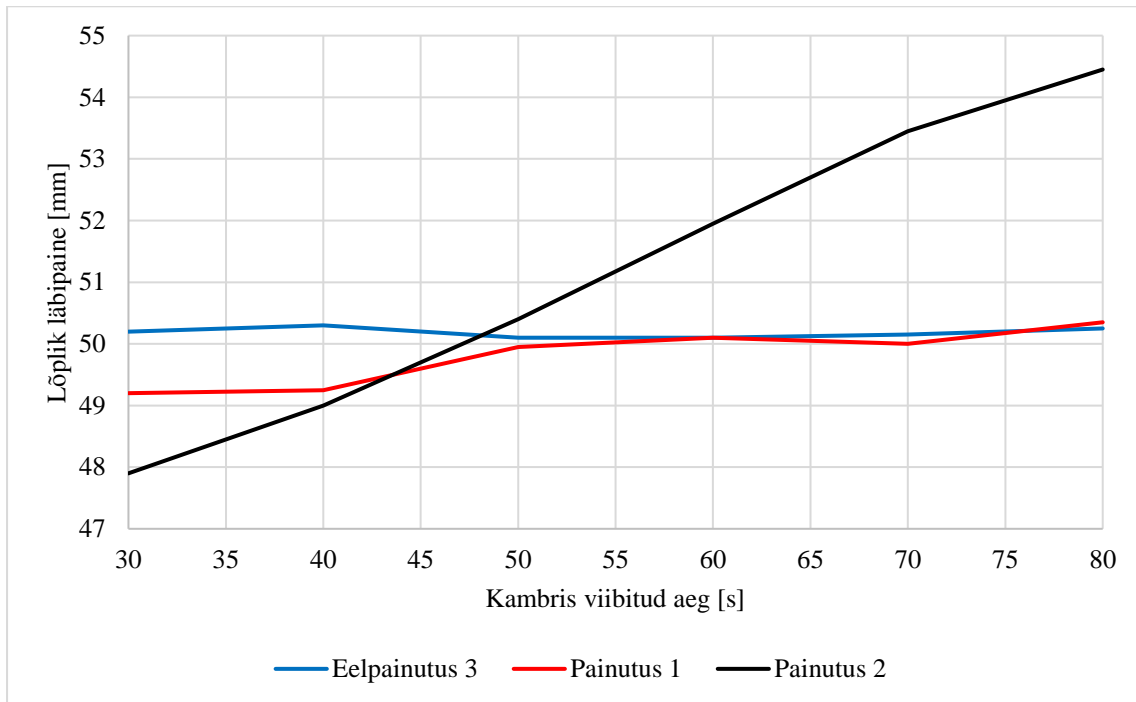


Joonis 4.11: Painutusahju küttekehade temperatuurid ning vastav klaasi keskmine temperatuur

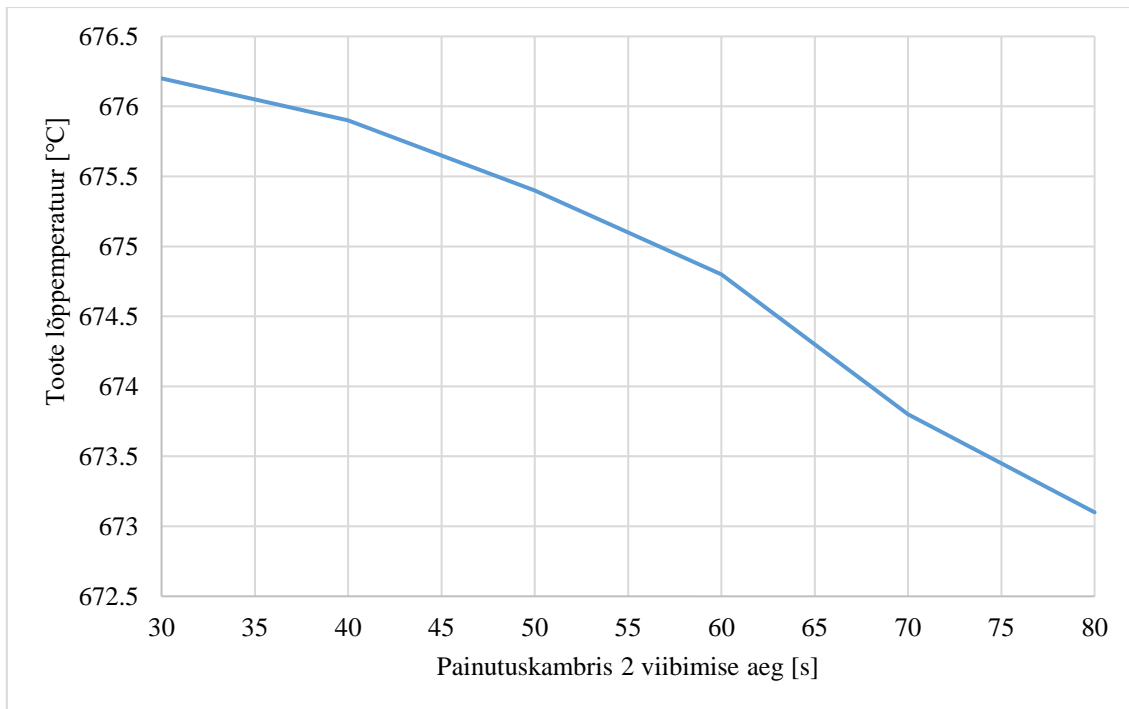
4.5.2 Tsükliaja muutumise mõju klaasi läbipaindele

Lõpliku läbipainde sõltuvust kambrites „Eelpainutus 3“, „Painutus 1“ ja „Painutus 2“ viibitud ajast on näha joonisel 4.12. Jooniselt on näha, et lõplik läbipaine on sisuliselt sõltumatu kolmandas eelpainutuskambris viibimise ajast. Esimeses painutuskambris viibimise aeg mõjutab vähesel määral lõplikku läbipainet : 80 s puhul on lõplik läbipaine 1 mm ehk ~2% võrra suurem kui 30 s puhul. Selget seost on aga näha teises painutuskambris viibitud aja ja

lõpliku läbipainde vahel: 30 s puhul on lõplik läbipaine 47,9 mm ja 80 s puhul 54,4 mm. Kõikumine antud mudeli järgi arvatatud nominaalse läbipainde (50 mm) suhtes on -4,2%...+8,8%. Nominaalse läbipainde arvutamisel oli teises painutuskambris viibimise aeg 49 s.



Joonis 4.12: Simulatsiooni tulemusel leitud lõpliku läbipainde sõltuvus kambris viibitud ajast. Selleks, et saavutada teises painutuskambris muutuva viibimisaja juures nominaalset läbipainet, tuleks muuta viimase painutuskambri jaoks määratud lõpptemperatuuri (toote lõpptemperatuuri). Muuta võiks ka viimase painutuskambri küttevõimsust, kuid siinkohal vaadeldakse lõpptemperatuuri muutmist sellepärast, et antud parameetrit muudetakse ahju operaatorite poolt õige läbipainde tagamiseks igapäevaselt. Joonisel **4.13** on näha, milline peaks olema toote lõpptemperatuur, et lõplik läbipaine oleks mistahes teises painutuskambris viibimise aja juures võrdne nominaalsega (50 mm).



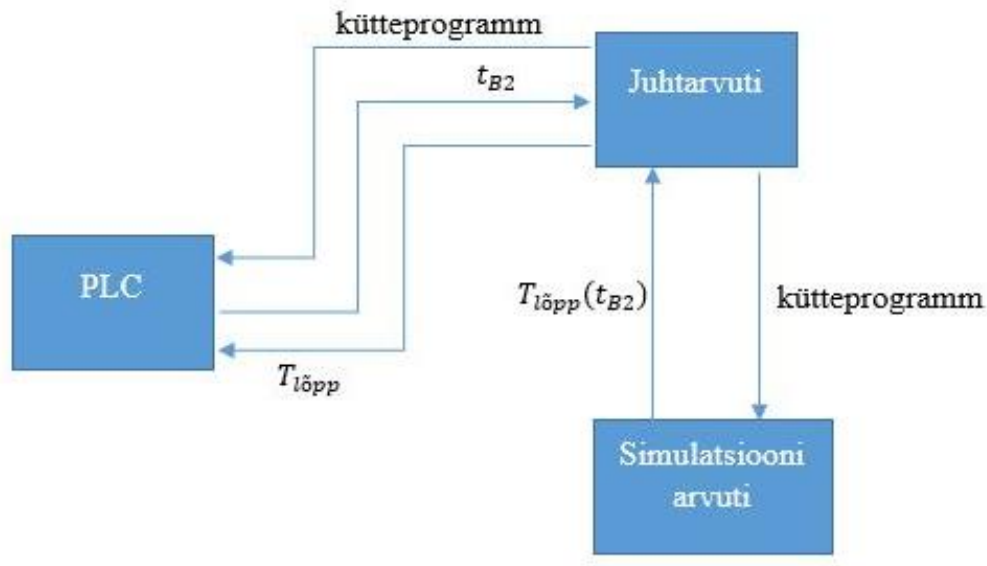
Joonis 4.13: Simulatsiooni tulemustel leitud toote lõpptemperatuuri sõltuvus teises painutuskambris viibitud ajast

4.6 Rakendamine praktikas

Eelnevalt leitud seostele tuginedes pakutakse ideetasandil välja, kuidas muuta painutusahju juhtloogikat nii, et klaasi lõplik läbipaine ei sõltuks teises painutuskambris viibitud ajast. Idee põhimõtteskeem on toodud joonisel 4.14. Joonisel on tähistatud toote lõpptemperatuur ja teises painutuskambris viibitud aeg vastavalt $T_{lõpp}$ ja t_{B2} tähistega. Muudatuse rakendamiseks oleks vastavalt juurutaja poolt loodud kütteprogrammile vaja simulatsioonitarkvara kasutades leida toote lõpptemperatuuri sõltuvus teises painutuskambris viibitud ajast (sarnaselt joonisele 4.13). Simulatsiooni tulemusel saadud sõltuvus tuleb lisada toote kütteprogrammi ning reaalajas pole simulatsioone tarvis läbi viia. Painutusahju juhtarvuti ja tööstuskontrolleri (PLC) vahelist andmevahetust tuleb muuta selliselt, et PLC-le edastatav toote lõpptemperatuur oleks vastav PLC poolt mõõdetud toote teises painutuskambris viibimise ajaga.

Arvestades, et antud töös kasutatud simulatsioonimudelite puhul kulus kahe Intel Xeon E5-2690 protsessori kasutamisel simulatsioonide läbiviimiseks keskmiselt 7,5 tundi ning eeldades, et täpsema mudeli puhul võib see aeg olla kordades suurem, ei ole mõistlik simulatsioone läbi viia suhteliselt kehva jõudlusega painutusahju juhtarvutis. Simulatsiooni läbiviimiseks kuluvat aega on lahendusalgortimide optimeerimise teel küll võimalik

vähendada, kuid töökindluse seisukohalt on siiski otstarbekam ahju juhtarvuti ressursi hoida ahju juhtimise tarbeks.



Joonis 4.14: Painutusahju juhtloogika muudatuste põhimõtteskeem

4.7 Edasised arendused

Kuna antud magistritöö raames välja töötatud prototüüpmodeli koostamisel tehti suhteliselt palju lihtsustavaid eeldusi, siis on tulemuste praktikas rakendamiseks vaja luua simulatsioonimudel, mis kirjeldaks reaalselt olukorda painutusahjus täpsemini. Järgnevalt on loetletud, mida tuleks arvestada täpsema mudeli koostamisel:

- painutusvormi geomeetria ning sellest tulenevad toereaktsioonid,
- kambrite seinte isolatsioon ning kiirguse peegeldamine,
- kambri õhutemperatuur,
- kütteprogrammis määratud kütteelementide kasutatav võimsus,
- täpsem klaasi geomeetria,
- eelneva toote kütmisest tulenev jääksoojus kambris.

Lisaks täpsemale mudelile on kindlasti vaja teostada tootmises kasutatavate klaaside omaduste määramine, seejuures on eriti tähtsal kohal viskoelastse materjalimudeli parameetrite määramine temperatuurist sõltuvalt. Samuti tuleks kaaluda vajadusel üldistatud Maxwelli mudeli kasutamist Zeneri mudeli asemel.

5 Kokkuvõte

Sõidukitele seatavate aerodünaamika, massi ja disaini nõudmiste tõttu paneb üha laienev tootepark sõidukite esiklaase tootvas tehases proovile painutusprotsessi korratavuse, eriti kui tegemist on väikeseeriatootmisega tegeleva tehasega. Ühtlase läbipainde tagamist ei tee lihtsamaks ka asjaolu, et painutusahjude juhtimine on klaasi läbipainde suhtes kaudne, mis on küll sobiv masstootmises, kuid mitte väikeseeriatootmises.

Käesolevas magistritöös vaadeldakse klaasi viskoelastse materjalina, mille omadused on tugevasti sõltuvuses temperatuurist. Klaasisiirdetemperatuuri ümbruses esinevad viskoelastsed deformatsioonid, mille simuleerimiseks kasutati Zeneri viskoelastse materjali mudelit, mille sobivust näidati arvutuslike ja eksperimentaalsete tulemuste võrdluses. Lisaks läbipaindele simuleeriti käesolevas magistritöös ka klaasiplaadi kiirgusega kütmist.

Painutusahju kambrite simuleerimiseks töötati välja prototüüpmodel, mille järgi oli arvutuslik klaasi keskmine temperatuur küllalt hästi vastavuses mõõdetud keskmise klaasi temperatuuriga. Väljatöötatud prototüüpmodeli peal teostati rida simulatsioone, millega hinnati toote lõplike läbipainete sõltuvust kolmandas eelpainutuskambris ning esimeses ja teises painutuskambris viibitud ajast. Simulatsioonide tulemusena leiti, et lõplik läbipaine ei sõltu kolmandas eelpainutuskambris viibitud ajast. Küll aga leiti, et esimeses painutuskambris 80 s viibinud klaasi lõplik läbipaine oli 2% suurem kui seal 30 s viibinud klaasil. Teises painutuskambris viibimise aega muutes leiti, et 30 s ja 80 s puhul oli lõpliku läbipainde erinevus võrreldes nominaalse teises painutuskambris viibimise ajaga (49 s) vastavalt -4,2% ja +8,8%.

Saadud tulemustele tuginedes tehti ideetasandil soovitus painutusahju juhtloogika muutmiseks nii, et küttesprogrammis määratud toote lõpptemperatuur sõltuks klaasi teises painutuskambris viibimise ajast. Vastav sõltuvus tuleks leida sarnaselt käesolevas magistritöös sooritatud LEM simulatsioonide alusel. Kuna aga prototüüpmodeli koostamisel tehti palju lihtsustusi, siis leiti, et muudatuse praktikas rakendamiseks on kõigepealt vaja simulatsioonimudelit täiendada ning arvestada ka teiste muutujatega (näiteks eelneva toote kütmisest tuleneva jääksoojusega).

Viited

- [1] M. H. Parsa, M. Rad, M. R. Shahhosseini ja M. H. Shahhosseini, „Simulation of windscreen bending using viscoplastic formulation,“ *Journal of Materials Processing Technology*, kd. 170, pp. 298-303, 2005.
- [2] M. Clawson, „Trends in Automotive Glass,“ 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <http://projects.nfstc.org/trace/2009/presentations/4-clawson-glass.pdf>. [Kasutatud 08 05 2017].
- [3] A. Hanel, L. Hoegner ja U. Stilla, „Towards the Influence of a Car Windshield on Depth Calculation with a Stereo Camera System,“ %1 *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Prague, 2016.
- [4] I. Matoušek ja M. Stary, „Numerical Simulation Of 3D Glass Sagging Process,“ %1 *Engineering Mechanics*, Svratka, 2012.
- [5] A. Y. Yi, L. Su ja P. He, „Investigation of glass thickness effect on thermal slumping by experimental and numerical methods,“ *Journal of Materials Processing Technology*, kd. 211, pp. 1995-2003, 2011.
- [6] L. Su, *Experimental and Numerical Analysis of Thermal Forming Processes for Precision Optics*, 2010.
- [7] M. B. Boubaker , B. Le Corre, Y. Meshaka ja G. Jeandel, „Finite element simulation of the slumping process of a glass plate using 3D generalized viscoelastic Maxwell model,“ *Journal of Non-Crystalline Solids*, kd. 405, p. 45–54, 2014.
- [8] F. Béchet, N. Siedow ja D. Locheignies, „Two-dimensional finite element modeling of glass forming and tempering processes, including radiative effects,“ *Finite Elements in Analysis and Design*, kd. 94, pp. 16-23, 2015.
- [9] L. Duffrene, R. Gy, H. Burlet ja R. Piques, „Viscoelastic behavior of a soda–lime–silica glass: inadequacy of the KWW function,“ *J. Non-Cryst. Solids*, kd. 215, p. 208–217, 1997.

- [10] J. M. Pelletier, J. Perez ja L. Duffrene, „Mechanical Response of an Oxide Glass to Mechanical Loading-Shear and Volume Relaxation Effects: Physical Analysis,“ *Acta mater*, kd. 48, pp. 1397-1408, 2000.
- [11] Saint-Gobain Glass Estonia , *Tehniline tootmisinfo*, 2017.
- [12] D. Roylance, *Mechanics of Materials*, Cambridge, 2000.
- [13] D. R. Askeland, P. P. Fulay ja W. J. Wright, *The Science And Engineering of Materials Sixth Edition*, Stanford: Cengage Learning, 2012.
- [14] J. Vincent, „Basic Elasticity and Viscoelasticity,“ %1 *Structural Biomaterials Third Edition*, Princeton University Press, 2012, pp. 1-28.
- [15] COMSOL, *Structural Mechanics Module User's Guide*, 2015.
- [16] COMSOL, *Heat Transfer Module User's Guide*, 2015.
- [17] H. Kasemägi, *Kompuuterfüüsika II*, Tartu, 2009.
- [18] L. Duffrène, R. Gy, J. E. Masnik, J. Kieffer ja D. J. Bass, „Temperature Dependence of the High-Frequency Viscoelastic Behavior of a Soda–Lime–Silica Glass,“ *Journal of the American Ceramic Society*, kd. 81, nr 5, pp. 1278-1284, 1998.
- [19] A. Y. Yi ja A. Jain, „Numerical Modeling of Viscoelastic Stress Relaxation During Glass Lens Forming Process,“ *Journal of the American Ceramic Society*, kd. 88, nr 3, pp. 530-535, 2005.
- [20] COMSOL, *Optimization Module User's Guide*, 2015.

Lisa 1: Näide painutusahju tsüklaegadest

Vagun	Toode	Tsüklaeg [s]
1	1	58
2	2	36
3	2	50
4	2	56
5	3	54
6	3	64
7	4	57
8	4	46
9	4	43
10	5	58
11	6	36
12	7	28
13	7	32
14	7	26
15	8	57
16	9	44
17	9	50
18	9	54
19	10	72
20	10	68
21	11	48
22	11	40
23	11	38
24	0	45
25	12	46
26	13	74
27	13	57
28	14	29
29	14	65
30	14	58
31	15	66
32	15	62
33	15	64
34	1	65

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ülari Lees,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
“**Sõiduki esiklaasi läbipainde modelleerimine LEM simulatsioonide abil**”,

mille juhendajad on Vahur Zadin ja Toivo Põld,

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil,
sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse
tähtaja lõppemiseni;
1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu,
sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu 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.

Tartus, **17.05.2017**