

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Aleksandr Gildi 201362

**VEEBIPÕHINE EHTUSFÜÜSIKA TÖÖRIISTAKAST
EHITUSINSENERIDELE**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Kalle Tammemäe
Tehnikateaduste doktor

Tallinn 2024

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Aleksandr Gildi

08.02.2024

Annotatsioon

[YOUR TEXT GOES HERE]

Lõputöö on kirjutatud [mis keeles] keeles ning sisaldab teksti [lehekülgede arv] leheküljel, [peatükkide arv] peatükki, [jooniste arv] joonist, [tabelite arv] tabelit.

Abstract

Building physics web toolbox for civil engineers

[YOUR TEXT GOES HERE]

The thesis is written in [language] and is [number of pages in main document] pages long, including [number] chapters, [number] figures and [number] tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

API	Rakendusliides (<i>Application Programming Interface</i>)
CPU	Keskseade (<i>Central Processing Unit</i>)
IDE	Integreeritud programmeerimiskeskkond (<i>Integrated Development Environment</i>)
IOT	Asjade Internet (<i>Internet Of Things</i>)
VM	Virtuaalmasin (<i>Virtual Machine</i>)

Sisukord

1	Sissejuhatus	8
2	Probleemi olemus	10
2.1	Probleemi uurimine	10
2.2	Olemasolevad lahendused ja turu analüüs	12
3	Arenduse metoodika	15
4	Kavandatava veebirakenduse analüüs	16
4.1	Nõuete defineerimine	16
4.2	Tehnoloogiate ja meetodite valik	16
4.3	Veebirakenduse arhitektuur	16
4.4	Andmebaasi projekteerimine	16
4.5	Kasutajaliidese disain	16
5	Veebirakenduse arendus	17
5.1	Andmebaas	17
5.2	Serveriosa	17
5.3	Kasutajaliides	17
6	Kokkuvõte	18
	Kasutatud kirjandus	19
	Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	19
	Lisa 2 – Something	20
	Lisa 3 – Something Else	21

Jooniste loetelu

1	<i>Kihilise konstruktsiooni näide</i>	10
2	<i>Arvutustabeli näide</i>	11
3	<i>Näide tulemuste esitamisest graafikul</i>	12
4	<i>Ubakus veebirakenduse ekraanitõmmis.</i>	13
5	<i>Ubakus: konstruktsiooni kihtide lisamine.</i>	13
6	<i>Ubakus: ehitusmaterjalide valik baasis.</i>	14

Tabelite loetelu

1. Sissejuhatus

Ehitusfüüsika on ehitusvaldkonna haru, mis käsitleb hoone toimivust füüsikaliste protsesside seisukohalt: soojus, niiskus, õhk, heli ja valgus, seetõttu võib väita, et ehitufüüsikaga puutub oma elus kokku igaüks. Ehitusfüüsika valdkonna projekteerimise peamised eesmärgid on:

- optimeerida hoone kütte ning jahutuskulud
- tagada hoones soojuslikku mugavust, niiskustingimusi ja sisekliima kvaliteeti tervikuna
- välistada mikrobioloogilist kasvu konstruktsioonides
- välistada veest ja niiskusest tekkivaid probleeme
- tagada hoonepiirete õhupidavust
- parandada akustilist kvaliteeti

Ehitusfüüsikavaldkond on oluline, sest see suures osas määratleb hoonete sisekliima kvaliteeti, teiste sõnadega tagab inimestele kvaliteetset elukeskkonda. Valesti projekteeritud hooned võivad muuhulgas avaldada negatiivset mõju inimeste tervisele või olla isegi ohtlikud. Seevastu õigesti projekteeritud hoone tagab kasutajale mugavusetunnet ja ka hoiab raha kokku minimeerides hoone kasutuskulusid.

Ressursside kallinemise olukorras sai ehitusfüüsikast eriti tähtis inseneriteaduse haru, sest muuhulgas see käsitleb hoone soojusliku toimivuse probleemi. See tähendab, et õigesti projekteeritud hoone talvel tarbib vähem energiat küttele ning suvel vastupidi – jahutusele.

Ehitusfüüsikaga peab arvestama hoone elutsükli igal etapil - kavandamine, projekteerimine, ehitamine ja haldamine. Hoone kavandamisel määratakse planeeritavaid energiakulusid ja energiaklassi. Hoone projekteerimise faasis peavad ehitusfüüsikaga arvestama arhitektid, konstruktorid ja ka tehnosüsteemide projekteerijad, kes valivad õigete omadustega materjalid ning hindavad nende materjalide koosmõju konstruktsiooni toimimisele. Ehituse faasis peab ehitusfüüsikaga arvestama ehitusjuhid - kuigi ehitatakse tavaliselt projekti järgi, paraku peab ehituses ka operatiivselt võtta keerulisi otsuseid jooksvatest muudatustest keset ehitusprotsessi. Ja viimaseks peavad ehitusfüüsikat meeles hoidma ka hoone haldamisega tegelevad inimesed.

Probleemi teine külg on ehitusvaldkonna madal digitaliseerumise tase (ja konservatiivsus

üldiselt). Viimastel aastatel on arendatud palju professionaalseid tarkvarasid projekteerimise ja ehitusjuhtimise tarbeks, kuid ehitusfüüsika valdkonna tarkvara arendused on olnud väga tagasihoidlikud. Turul on olemas mõned üksikud tooted, kuid need on liiga keerulised ja võrdlemisi ebamugava kasutajaliidesega - sellise tarkvara sihtgrupp on teadusvaldkond. Ehitusinseneride töö hõlmab väga palju erinevaid asju ning on tavaliselt ajaliselt väga piiratud, mistõttu keerulise kasutajaliidesega ja tööpõhimõttega tarkvara kasutamine ei ole parim variant.

Käesoleva töö eesmärk on välja töötada toodet, mis võimaldaks lahendada ehitusfüüsika valdkonna ülesandeid mugavalt ja operatiivselt. See võiks parandada olukorda, kus probleemide lahendamine jääb üldse erinevatel etapidel tegemata tarkvara või tarkvara kasutamise oskuste tõttu. See võiks olla ehitusinseneridele abivahendiks, mis ei vaja väga sügavat valdkonna tundmist, et teostada piisavas mahus arvutusi tagamaks ehitusprojekti või ehituse kvaliteeti ehitusfüüsika seisukohalt. Ehitusfüüsika valdkond on lai ning lahendusi on tarvis leida väga paljudele probleemidele. Käesoleva töö raames keskendutakse esialgu vaid ühe konkreetse probleemi lahendamisele, mis on ühtlasi ka kõige levinuim probleem - veeauru kondenseerumise riski hindamine ehituskonstruktsioonides.

2. Probleemi olemus

2.1 Probleemi uurimine

Ehitusfüüsika mõistes ehituskonstruksioon kujutab endast erinevate füüsikaliste omadustega kihtidest koosnevat struktuuri, mis eraldab kaks erinevat keskkonda (näiteks: hoone sees olev õhk ja õues olev õhk). Seejuures kõige olulisemad materjalide omadused on soojuserijuhtivus λ [W/mK] ja veeaurutakistus, mis võib olla väljendatud mitmel viisil (neid viise on palju, aga käesolevas töös keskendutakse ainult järgmistele, kuna need on kõige rohkem kasutatud nii raamatutes, kui ka materjalitootjate dokumentatsioonis): μ - diffusioonitakistustegur (materjali omadus), S_d [m] - suhteline diffusioonitakistus (kindla paksusega toote omadus).

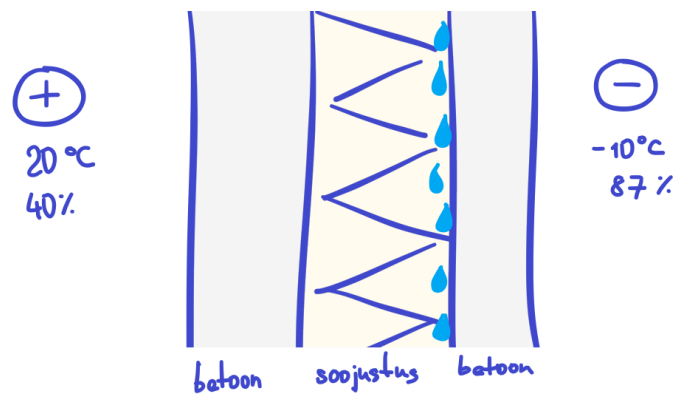


Figure 1. Kihilise konstruktsiooni näide

Teatud tingimustel võib tekkida olukord, kui konstruktsiooni sees on mingis punktis suhteline niiskus nii kõrge, et soodustab bioloogiliste kahjustuste või isegi kondensaadi tekkimist. Nimetatud olukord on ohtlik nii ehituskonstruksioonile, mis pikaajalise niiskuse mõjul lagunevad, kui ka inimese tervisele, sest konstruktsioonide sees olev hallitus on õhku sattuvate bakterite allikaks. Seda, kuidas konstruktsioon töötab soojus- ja niiskuse leviku seisukohalt nimetatakse konstruktsiooni niiskustehniliseks toimivuseks. Arvutust, mille eesmärgiks on hinnata kondenseerumise riski konstruktsioonis, nimetatakse konstruktsiooni niiskustehnilise toimivuse analüüsiks.

Tegemist on klassikalise ehitusfüüsika ülesandega, mille lehandamiseks peab ette võtma järgmiseid samme:

- konstruktsiooni kihtide soojustakistuse ja konstruktsiooni summaarse soojustakistuse

arvtus

- temperatuuri jaotuse määramine kihtides sõltuvalt sise- ja väliskeskkonna temperatuuridest ning soojustakistuste väärtustest
- konstruktsiooni kihtide veeaurutakistuse ja konstruktsiooni summaarse veeaurutakistuse arvutus
- veeauru küllastusrõhu jaotuse määramine lähtuvalt temperatuuri jaotusest
- veeauru osarõhu jaotuse määramine kihides sõltuvalt sise- ja väliskeskkonna parameetritest ning veeaurutakistuse väärtustest
- tulemuste esitamine graafiliselt diagrammil
- arvutuste kordamine erinevate sise- ja väliskeskkonna parameetrite kombinatsioonidega

Ülesande käsitsi lahendades, koostatakse tabelit, mille ridadesse pannakse kirja kihid ja veergudesse arvutatakse väärtused. Kuigi arvutused ise ei ole väga keerulised (tegemist on tavaliste füüsika valemitega), paraku käsitsi arvutamine võtab tohutult palju aega. Microsoft Excel võimaldab teatud määral protessi automatiseerida, kuid siiski mõned tegevused (näiteks uute kihtide lisamine, või kihtide järjekorra muutmine) jäävad suures osas käsitööks, mis võtab palju aega ja ka soodustab vea tegemist. Pildil 2 on toodud sellise tabeli näide.

Arvutustabel											
	Kihi paksus	Soojus-erijuhtivus	Kihi soojustakistus	Temp. muutmine	Temp. kihi piiril	Küllastusrõhk	Veeauru-erijuhtivus	Veeauru-takistus	Rõhkude erinevus	Veeauru osarõhk	
	d [mm]	λ_d [W/(mK)]	R [m ² K/W]	Δt [°C]	t [°C]	p_{sat} [Pa]	δ_v [kg/msPa]	Z_d [m ² sPa/kg]	ΔP [Pa]	P [Pa]	
Siseõhk											
Sisepind			0.13	0.5	23.0	2808					842.3
Krohv	5	0.570	0.01	0.0	22.5	2724	2.0E-11	2.5E+11	2.5E-01		842.3
krohv	5	0.57	0.01	0.0	22.5	2718	2.0E-11	2.5E+11	2.5E-01		842.1
Bauroc	150	0.11	1.36	5.3	22.4	2713	2.6E-11	5.7E+12	5.7E+00		841.8
Kile	1	0.17	0.01	0.0	17.2	1959	2.0E-15	5.1E+14	5.1E+02		836.2
Soojustus	200	0.035	5.71	22.0	17.2	1956	2.0E-10	1.0E+12	1.0E+00		326.1
Tsementkiudplaat	10	0.049	0.20	0.8	-4.8	407	3.7E-12	2.7E+12	2.7E+00		325.1
Krohv	5	1	0.01	0.0	-5.6	380	1.8E-11	2.7E+11	2.7E-01		322.4
Välispind			0.04	0.2	-5.6	380					322.1
Välisõhk					-5.8	375					322.1
Kokku			7.5					5.22776E+14			

Figure 2. Arvutustabeli näide

Analüüsi tulemused esitatakse graafiliselt diagrammi kujul, mille x telg on punkti asukoht konstruktsioonis ning y teljel on temperatuuri, veeauru küllastus- ja osarõhu väärtused vastavas punktis – näide on toodud pildil 3.

Graafik annab väga head visuaalset ülevaadet konstruktsiooni kihtides toimuvale. Täpsemalt öeldes peab vaatama veeauru küllastus- ja osarõhkude jaotuste graafikuid. Veeauru osa- ja küllastusrõhu suhe on suhteline niiskus. Mida lähedam osarõhu graafiku joon küllastusrõhu graafiku joonele, seda kõrgem on suhteline niiskus. Punkt, milles need jooned ristuvad on suhteline niiskus 100%, mis tähendab kondensaadi tekkimist – sellist punkti

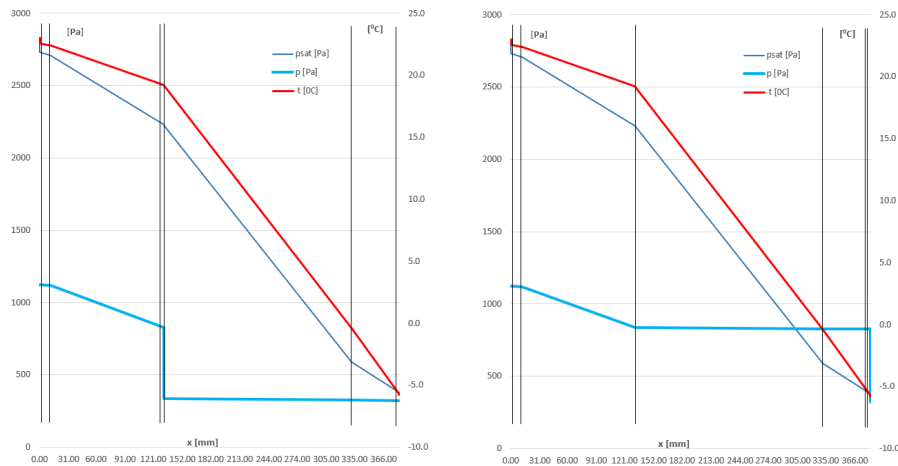


Figure 3. Näide tulemuste esitamisest graafikul

nimetatakse kastepunktiks. Näide on toodud pildil 3: vasakul on niiskustehniline olukord hea, kuna aurutõke asub õiges kohas, ning paremal paiknem konstruktsiooni külmemal pool veeaurupidav kiht, mistõttu läheb osarõhk kõrgeks ja ületab küllastusrõhu väärtust.

Kuigi probleem on üldiselt lahendatav näiteks *Microsoft Excel* vahenditega, paraku pole see kõige mugavam viis mitmel põhjustel:

- selline lähenemine vajab palju käsitööd kihtide lisamiseks või ümber paigutamiseks, mis on analüüsi lahutamata osa – proovitakse erinevaid materjale erinevates konstruktsiooni kohtades
- materjalide omadusi on siiski vaja leida ja TODO !

Kohalikul turul puudub tarkvara, millega oleks mugav teostada konstruktsiooni niiskustehnilise toimivuse analüüsi. Niiskustehnilise toimivuse analüüs on klassikaline ehitusfüüsika ülesanne, mille eesmärk on hinnata veeauru kondenseerumise (või ka kõrgest niiskusest põhjustatud kahjustuste tekkimise) riski.

2.2 Olemasolevad lahendused ja turu analüüs

Üks populaarsematest analoogidest, mida kasutatakse sealhulgas ka Eestis, on Saksa päritoluga tarkvara **Ubakus**. Tegemist on veebirakenduse kujul kommertstarkvaraga, mille *demo*-versioon on saadaval tasuta (pilt 4).

Ubakus võimaldab teostada konstruktsiooni niiskustehnilist analüüsi. Kasutajaliides võimaldab mudeldada mitmest kihist koosneva konstruktsiooni, valides igale kihile paksust ja materjali, millest kiht koosneb. Tugev eelis on see, et tarkvaraga saab analüüsida ka

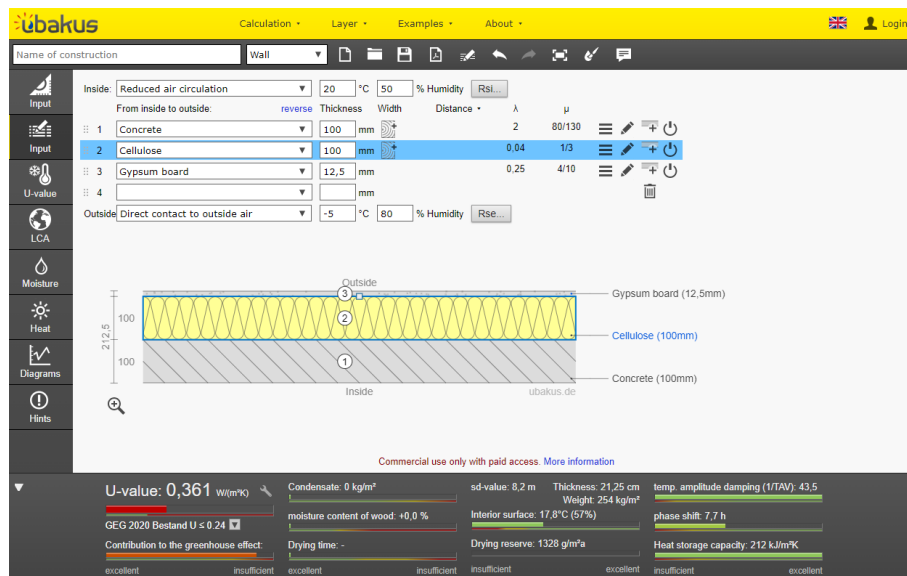


Figure 4. *Ubakus veebirakenduse ekraanitõmmis.*

mittehomogeensete (mitemest erinevast materjalist, nt puitsõrestiksein) kihtidega konstruktsioone - pilt 5

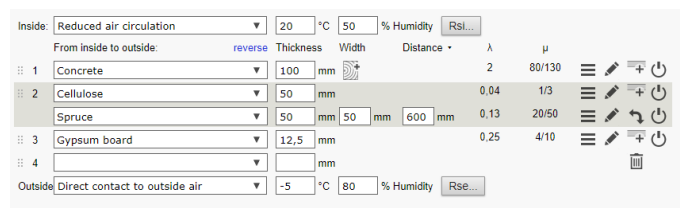


Figure 5. *Ubakus: konstruktsiooni kihtide lisamine.*

Ehitusmaterjalide valik, mida on võimalik konstruktsiooni mudeldamisel kasutada, on piisavalt lai (aga tasuta versioonis piiratud). Tasulises versioonis on samuti võimalik ka oma materjalide lisamine ja kasutamine. Puuduseks on see, et teatud osa baasis olevatest ehitusmaterjalidest on Saksamaal turustatavad materjalid, mistõttu selle tarkvara kasutades Eestis peab kas sisestama kõik vajalikud materjalid käsitsi, või kasutada Saksa analoogid ning arvestada sellest tulenevaarvutuste ebatäpsusega.

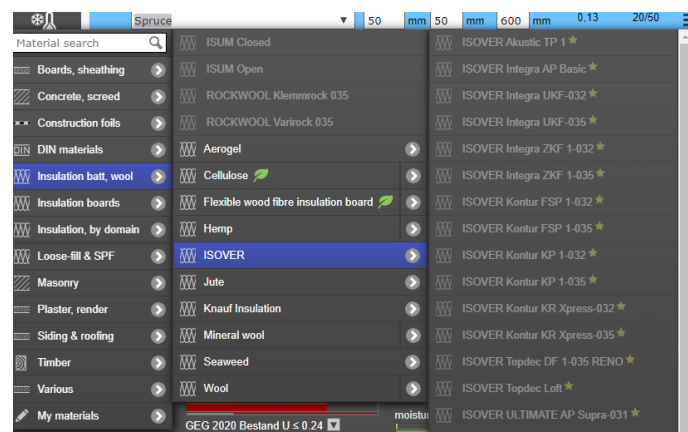


Figure 6. *Ubakus: ehitusmaterjalide valik baasis.*

3. Arenduse metoodika

TODO: Metoodika on protseduur, kuidas jõutakse probleemist probleemi lahenduseni. Näiteks meil on probleem, millised sammud peab ette võtma, et probleem saaks lahendatud: probleemi olemuse analüüs, nõuete defineerimine, probleemi lahenduseks vajalike töövahendite valik (programmeerimisvahendid). Vt ka analoogsed tööd Digikogust.

4. Kavandatava veebirakenduse analüüs

Lõputöö analüütiline osa peab sisaldama visiooni kirjeldust ja skoobi määramist põhjendusega. Metoodikat, kuidas kõige edukamalt lõpptulemuseni jõuda. Missuguseid võimalusi on teada selle probleemi lahendamiseks. Määrata funktsionaalsed ja mitte-funktsionaalsed tingimused. Selle alusel kirjeldada kasutajalood või siis teha tegevuse plokkskeem. Leida töövahendid põhjendatult: milliste kriteeriumite alusel tuleb valik teha, milline lahendus valitakse selle töö puhul, kindlasti põhjendada.

Analüüs peab sisaldama vastuseid küsimustele:

1. visiooni kirjeldust ja skoobi määramist põhjendusega
2. missuguseid lahendusi te teate oma probleemi lahendamiseks
3. milliste kriteeriumite alusel tuleb valik teha
4. millise lahenduse valisite teie ja põhjendage seda

4.1 Nõute defineerimine

Nõute määramine rakendusele.

4.2 Tehnoloogiate ja meetodite valik

Osa, kus käsitletakse tehnoloogiaid ja arendusmetoodikate valikut.

4.3 Veebirakenduse arhitektuur

Osa, kus käsitletakse kavandatava rakenduse arhitektuuri planeerimist.

4.4 Andmebaasi projekteerimine

Osa, kus käsitletakse andmebaasi projekteerimist.

4.5 Kasutajaliidese disain

Osa, kus käsitletakse kasutajaliidest ja selle kavandamist

5. Veebirakenduse arendus

Veebirakenduse arendamise osa

5.1 Andmebaas

Andmebaasi tehnoloogia valik, projekt, püstipanek ja seadistamine

5.2 Serveriosa

Rakenduse serveriosa tehnoloogia valik, arhitektuur, koodi näited, deployment protsess, SSL

5.3 Kasutajaliides

Kasutajaliidese tehnoloogia valik, arhitektuur, koodi näited, deployment (Apache, proxy requests to backend)

6. Kokkuvõte

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Aleksandr Gildi

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose “Veebipõhine ehitusfüüsika tööriistakast ehitusinseneridele”, mille juhendaja on Kalle Tammemäe
 - 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.

08.02.2024

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Lisa 2 - Something

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<body>

<h1>Example Title </h1>

<p>Some text here </p>

</body>
</html>
```

Lisa 3 – Something Else

Pythagorean theorem

$$x^n + y^n = z^n \quad (1)$$

Normal distribution

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2)$$