

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

07.02.2024

## **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

<b>1</b>	<b>Sissejuhatus</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Probleemi olemus</b>	<b>10</b>
2.1	Probleemi uurimine	10
2.2	Olemasolevad lahendused ja turu analüüs	12
<b>3</b>	<b>Arenduse metoodika</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Kavandatava veebirakenduse analüüs</b>	<b>15</b>
4.1	Nõuete defineerimine	15
4.2	Tehnoloogiate ja meetodite valik	15
4.3	Veebirakenduse arhitektuur	15
4.4	Andmebaasi projekteerimine	15
4.5	Kasutajaliidese disain	15
<b>5</b>	<b>Veebirakenduse arendus</b>	<b>16</b>
5.1	Andmebaas	16
5.2	Serveriosa	16
5.3	Kasutajaliides	16
<b>6</b>	<b>Kokkuvõte</b>	<b>17</b>
	<b>Kasutatud kirjandus</b>	<b>18</b>
	<b>Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks</b>	<b>18</b>
	<b>Lisa 2 – Something</b>	<b>19</b>
	<b>Lisa 3 – Something Else</b>	<b>20</b>

## Jooniste loetelu

1	<i>Homogeense ja mittehomogeense konstruktsiooni näide . . . . .</i>	10
2	<i>Niiskustehnilise toimivuse analüüsi tabeli näide . . . . .</i>	11
3	<i>Niiskustehnilise toimivuse analüüsi graafiku näide . . . . .</i>	12
4	<i>Ubakus veebirakenduse ekraanitõmmis. . . . .</i>	13
5	<i>Ubakus: konstruktsiooni kihtide lisamine. . . . .</i>	13
6	<i>Ubakus: ehitusmaterjalide valik baasis. . . . .</i>	13

## **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 lahendus 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 ehituskonstruktsioon kujutab endast erinevate füüsikaliste omadustega kihtidest koosnevat materjali. Kihid võivad olla homogeenised s.t. ühest materjalist koosnevad (näiteks: betoon, vahtpolüstüreen) ja mittehomogeensed s.t. mitmest materjalist koosnevad (näiteks: puitsõrestiksein, kus ühes kihis on nii soojusisolatsioon, kui ka teatud sammuga puitpostid). Homogeense ja mittehomogeense konstruktsiooni näited on toodud pildil 2.

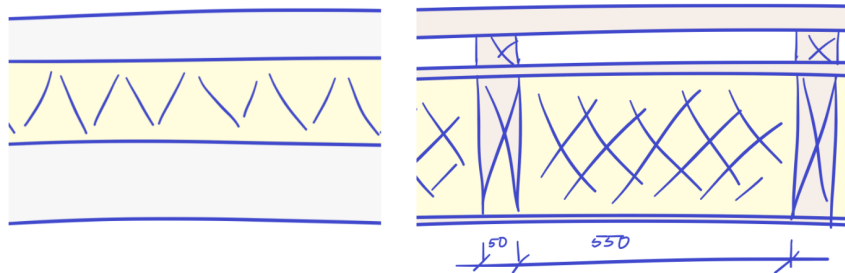


Figure 1. *Homogeense ja mittehomogeense konstruktsiooni näide*

**TODO: better illustration**

Ehitusfüüsika seisukohalt kõige olulisemad materjali omadused on soojusjuhtivus  $\lambda$  [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):  $\mu$  - diffusioonitakistustegur (materjali omadus),  $S_d$ [m] - suhteline diffusioonitakistus (kindla paksusega toote omadus).

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 kõrge niiskusest põhjustatud kahjustuste tekkimise) riski. Niiskustehnilise toimivuse analüüs hõlmab järgmisi tegevusi:

- konstruktsiooni kihtide soojustakistuse ja konstruktsiooni summaarse soojustakistuse arvutus
- temperatuuri jaotuse määramine kihtides sõltuvalt sise- ja väliskeskkonna temperatu-

uridest 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

Antud ülesannet lahendades käsitsi koostatakse tabelit, mille ridadele pannakse kirja kihid ja veergudele arvutatakse väärtused. Kuigi arvutused ei ole väga keerulised (tegemist on tavaliste füüsika valemitega), siis käsitsi arvutamine võtab tohutult palju aega. Kuigi Microsoft Excel võimaldab teatud määral protessi automatiseerida, siiski mõned tegevused (näiteks uue kihi lisamine) jäävad suures osas käsitööks, milles vea esinemine on väga tõenäoline. Pildil 2 on toodud sellise tabeli näide.

Arvutustabel											
	Kihi paksus d [mm]	Soojus-erijuhtivus $\lambda_d$ [W/(mK)]	Kihi soojus-takistus R [m <sup>2</sup> K/W]	Temp. muutmine $\Delta t$ [°C]	Temp. kihi piiril t [°C]	Küllastus-rõhk p <sub>sat</sub> [Pa]	Veeauru-erijuhtivus $\delta_v$ [kg/msPa]	Veeauru-takistus Z <sub>v</sub> [m <sup>2</sup> sPa/kg]	Rõhkude erinevus $\Delta P$ [Pa]	Veeauru osarõhk 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. Niiskustehnilise toimivuse analüüsi tabeli näide

Lõppkokkuvõttes analüüsi tulemused esitatakse graafiliselt diagrammi kujul, mille peale on kantud konstruktsiooni kihid, temperatuuri, veeauru küllastusrõhu ja veeauru osarõhu jaotuse graafikud (näide on toodud pildil 3). Selle tegevuse eesmärk on hinnata kondenseerumise riski konstruktsiooni kihtides. Veeauru osa- ja küllastusrõhu suhe on suhteline niiskus, vastavalt mida lähedam osarõhu graafiku joon küllastusrõhu joonele – seda kõrgem on antud konstruktsiooni kohas suhteline niiskus. Juhul kui mingis punktis osarõhu joon saavutab küllastusrõhu joont – tekib selles punktis kondensaat.

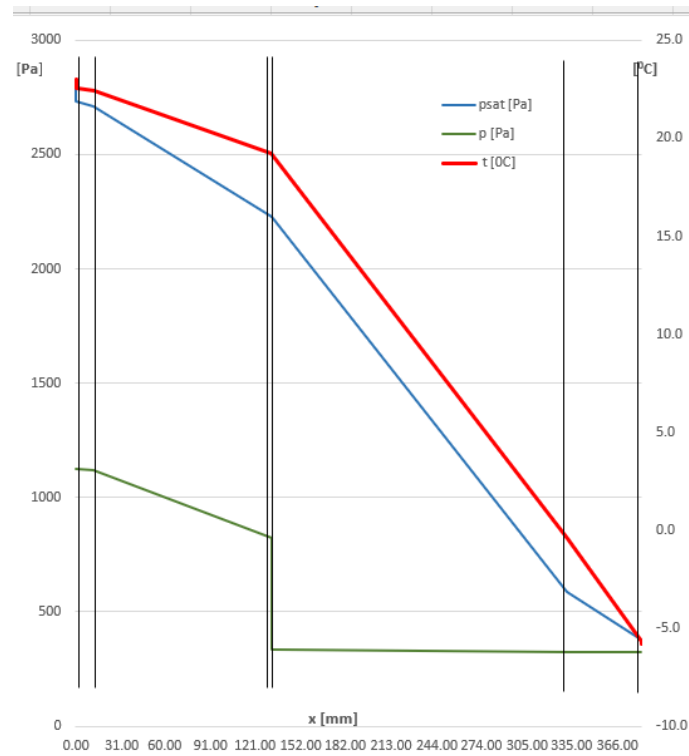


Figure 3. Niiskustehnilise toimivuse analüüsi graafiku näide

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

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.

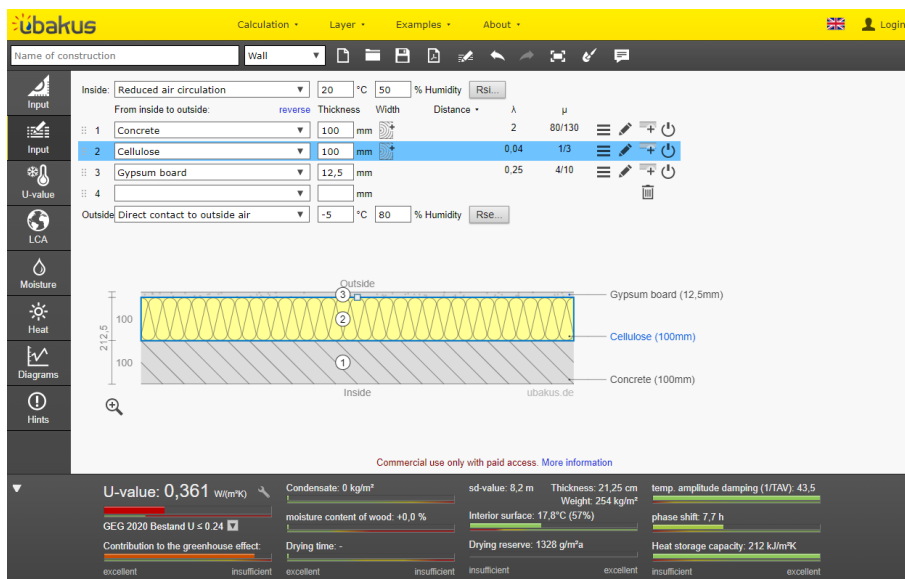


Figure 4. Ubakus veebirakenduse ekraanitõmmis.

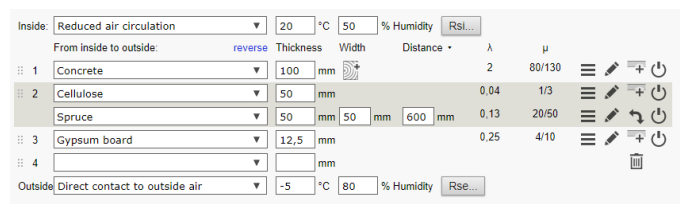


Figure 5. Ubakus: konstruktsiooni kihtide lisamine.

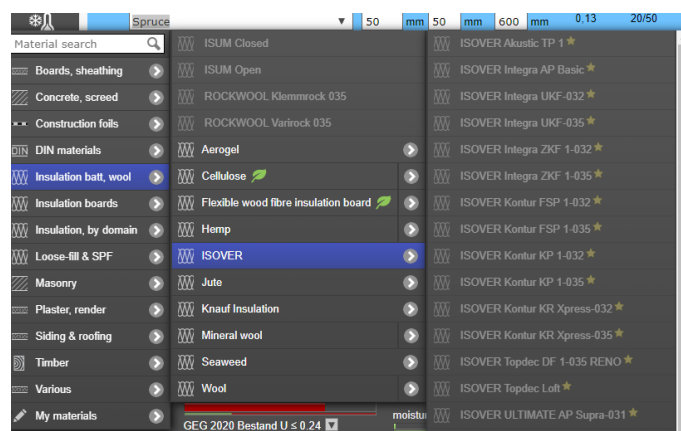


Figure 6. Ubakus: ehitusmaterjalide valik baasis.

### **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 tegemiseks<sup>1</sup>**

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.

07.02.2024

---

<sup>1</sup>Lihtlitsents 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**

$$x^n + y^n = z^n \tag{1}$$

**Normal distribution**

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