



EESTI MAAÜLIKOOL
Tartu Tehnikakolledž

Mart Traagel

AASTARINGSSELT KASUTATAV AKVAPOONILINE
KASVUHOONE

YEAR-ROUND OPERATING AQUAPONIC GREENHOUSE

Lõputöö
Tehnotroonika õppekava

Juhendaja: Kaarel Soots, *PhD*

Tartu 2020

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Rakenduskõrghariduse lõputöö lühikokkuvõte	
Autor: Mart Traagel		Õppekava: Tehnotroonika	
Pealkiri: Aastaringsest kasutatav akvaponiline kasvuhoone			
Lehekülgi: 60	Jooniseid: 30	Tabeleid: 5	Lisasid: 13
<p>Osakond: Tartu Tehnikakolledž</p> <p>Uurimisvaldkond: ETIS 4.13. Mehhanotehnika, automaatika, tööstustehnoloogia</p> <p>Juhendaja(d): Kaarel Soots, PhD</p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2020</p>			
<p>Antud töö eesmärk on ettevõtte akvalabs OÜ jaoks projekteerida aastaringne akvaponiline kasvuhoone. Hoone peab osaliselt rahuldama viieliikmelise perekonna köögivilja aastatarbimise vajadused. Kasvuhoones kasvava toidu eesmärk pole olla odavam alternatiiv poest ostetud toiduainetele vaid garanteerida aastaringne ligipääs puhtale kõrgkvaliteetsele toidule, ning tuua toidu tootmine lõpptarbijale lähemale. Hoone peab töötama ka põhjamaises kliimas. Projekteerimise käigus valmis 18 ruutmeetrise põhjapindalaga kasvuhoone planeering, mille külgede pikkused on 3 meetrit ja 6 meetrit, kõrgusega 3 meetrit. Teoreetiline tootmisvõimekus on kombineeritult 400 kg lehtköögivilja ja marju aastas ning 100 kg kala aastas. Käesolevas töös valiti projekteeritavas kasvuhoones kasvavateks kaladeks karpkala (<i>Cyprinus carpio</i>). Köögiviljadeks valiti tomatid, lehtsalat, spinat, basiilik ja marjakasvatuseks maasikad.</p>			
Märksõnad: akvaponika, hüdroponika, akvakultuur, tark linn, asjade internet			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Professional Higher Education Thesis	
Author: Mart Traagel		Speciality: Technotronics	
Title: Year-round operating aquaponic greenhouse			
Pages: 60	Figures: 30	Tables: 5	Appendixes: 13
Department: Tartu Technology College Field of research: ETIS 4.13 Mechanical Engineering, Automation Technology and Manufacturing Technology Supervisors: Kaarel Soots, PhD Place and date: Tartu, 2020			
<p>The purpose of this final project is to design and plan the construction of a year-round aquaponic greenhouse for akvalabs OÜ, which is capable of partially satisfying the grocery needs of a 5 member family. The aim of this product is not to be a cheaper alternative to grocery shopping, but to guarantee access to clean and fresh, premium quality food throughout the year, even in cold climate. In the process, a greenhouse with 18 square meter surface area and 3 meters of height was designed. The theoretical production capability of this unit should be around 400 kg of vegetables per year in addition to 100 kg of fish throughout the year. For the purpose of this design, the common carp (<i>Cyprinus carpio</i>) was chosen. The vegetables chosen for being produced in this system are tomatoes (<i>Solanum lycopersicum</i>), lettuce (<i>Lactuca sativa</i>), spinach (<i>Spinacia oleracea</i>), basil (<i>Ocimum basilicum</i>) with the addition of strawberries (<i>Fragaria × ananassa</i>.)</p>			
Keywords: aquaponics, hydroponics, aquaculture, smart city, Internet of Things			

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. AKVAPOONILINE KASVUHOONE	7
1.1. Kirjanduse analüüs	7
1.2. Turul olevad analoogsed lahendused.....	7
1.3. Fotosüntees	9
1.4. Taimede kasvu mõjutavad vee parameetrid	10
1.4.1. Analüüs.....	10
1.4.2. Temperatuur	11
1.4.3. Vesinikeksponent	11
1.4.4. Toitainekontsentratsioon	11
1.4.5. Lahustunud hapnik, DO (<i>Dissolved Oxygen</i>).....	11
1.5. Taimede kasvuks vajalikud toitained	12
1.6. Taimede kasvuks vajalik valgus	12
2. MATERJAL JA METOODIKA	14
2.1. Lõpptarbija jaoks vajalikud parameetrid	14
2.1.1. Aastaringse akvapoonilise kasvuhoone tootlikkus.....	14
2.1.2. Energiatarve	15
2.2. Hoone ehituslikud parameetrid.....	16
2.3. Taimede jaoks vajalikud parameetrid.....	16
2.4. Kalade kasvatamiseks vajalikud parameetrid.....	19
2.4.1. Veeringlusel põhinev kalakasvatus	19
2.4.2. Temperatuur	20
3. TULEMUSED.....	23

3.1.	Akvapoonilise kasvuhoone hoone	23
3.2.	Taimekasvatuse lahendus	31
3.3.	Kalade kasvatuse lahendus	32
3.3.1.	Akvaarium	32
3.3.2.	Akvaariumi veepump	34
3.4.	Tehnilised kommunikatsioonid ja automaatika	35
3.4.1.	Akvapoonilise kasvuhoone hoone küte	35
3.4.2.	Andurid ja mõõdetavad suurused	35
3.4.3.	Vajaliku kontrolleri valik	36
3.4.4.	Elektrikilp	36
3.5.	Edaspidised arendustegevused	37
3.5.1.	Valgustuse automaatika	37
3.5.2.	Küttesüsteem	37
3.5.3.	Akvapoonikasüsteemi SCADA	37
KOKKUVÕTE		38
KASUTATUD KIRJANDUS		39
LISAD		43

SISSEJUHATUS

Huvi taimede kasvatamise vastu keskkonnas, mille tingimusi on võimalik kontrollida, on huvitanud inimesi ajalooliselt juba Rooma keisririigist alates. Keiser Tiberius (*Tiberius Caesar Divi Augusti filius Augustus*, 42 eKr. – 37 pKr.) nõudis enda toidulauale aastaringselt värskaid kõrvitsalisi, Plinius Vanema teostes viidatud kui *cucumis*'ele. Pole täpselt teada mis taimedega oli tegu, kuid on põhjust arvata, et tegu oli kas kurkmeloniga (*Cucumis melo* var. *flexuosus*), arbuusiga (*Citrullus lanatus*) või hariliku pudelkõrvitsaga (*Lagenaria siceraria*). Ehkki need taimed kasvavad vahemere lähedastel aladel hõlpsalt suveperioodil, on talvekuudel nende kasvatamine raskendatud, kui mitte võimatu. Kuid tolleaegsetel aednikutel ning inseneridel tuli välja mõelda lahendus, mis lubaks taimi ka talvel kasvatada. Lahenduseks osutus seleniidist ja õlitatud õhukesest riidest katustega (*specularibus*) kärud, mis lubas taimedel saada valgust, samaaegselt takistades soojusel lahkumist. Neid kärusid sai ööseks siseruumidesse veeretada, võimaldades taimede aastaringse kasvatuse. [1]

Eesmärk on ettevõtte akvalabs OÜ jaoks projekteerida aastaringne akvapooniline kasvuhoone.

Ülesanded töö eesmärgi saavutamiseks:

1. Turul olevate analoogsete lahenduste analüüs
2. Kirjanduse analüüs
3. Vajalike algandmete väljaselgitamine
4. Projektarvutused
5. Projekteerimine

Käesolev töö on üles ehitatud samas järjekorras, nagu on toodud lähteülesanded.

1. AKVAPOONILINE KASVUHOONE

1.1. Kirjanduse analüüs

Kasvuhoone projekteerimisel on lähtunud akvapoonilise tehnoloogia põhimõttest. Akvapoonika on tulnud kahe erineva valdkonna tehnoloogia kombineerimisest. Nendeks on hüdroponika ja akvakultuur ehk vesiviljelus. Hüdroponika on taimede kasvatamise meetod, milles kasvatatakse taimi toitainetega rikastatud veelahuses. Hüdroponikas toimub taimekasvatus mullavabalt, ning taimede juuri toetab inertne kasvumeedium – näiteks vermikuliit, perliit, kivivill, kergkruus, või neutraalse pHga kivimid. Hüdroponilise kasvatuse põhimõte on lubada taimedele otsene ligipääs hapnikule ja toitainetele – suurendades selle abil taimede kasvamise kiirust. Ajalooliselt rakendati hüdroponikat juba Vana-Hiinas ning arvatakse, et seda kasutati ka Babüloonis Semiramise rippaedade rajamisel [4].

Akvakultuuris ehk vesiviljeluses kasvatatakse erinevaid veeorganisme nagu kalu, veetaimi, vähke ja limuseid. Akvakultuur on üheks kiiremini kasvavaks toiduainetööstuse sektoriks, saavutades aastatel 1990-2009 7.5% aastase kasvukiiruse. Võrdluseks on seakasvatuse kasv alla 2.5% ja linnukasvatustel alla 5% samas ajavahemikus. [5]

Akvapoonika kui tehnoloogia põhineb kalakasvatusest tulnud jääkainete kasutamisel mullavabalt kasvatatud taimede väetamiseks. Kalajäägid annavad taimedele orgaanilise allika toitaineteks ning taimed puhastavad kaladele vajalikku vett. Maailma Terviseorganisatsiooni WHO andmetel peaks keskmine inimene tarbima päevas 375 .. 500 grammi köögivilju, puuvilju ja kaunvilju. [2]

1.2. Turul olevad analoogsed lahendused

Vajadus antud toote järele tekkis asjaolust, et turul olevad tooted ei sobi rahuldama viieliikmelise perekonna aastase tarbimise nõudlust. Olemasolevad tooted on kas tootmismahult liiga väiksed (joonis 1) või liiga suured (joonis 2), või eeldavad tootmisruumide olemasolu (joonis 3).



Joonis 1. Väiksemahuline akvapooniline süsteem, mis võimaldab väikses mahus toota lehtköögivilju. [6]



Joonis 2. Aastaringse akvapoonilise süsteemi akvakultuuri kasvatus. [7]

Joonisel 1 olev süsteem võimaldab toota mõned kilod kuus, ning joonisel 2 olev Nelson and Pade Inc. poolt pakutav kõige väiksem tööstuslik lahendus võimaldab toota 88 – 130 lehtsalati taime päevas, sõltuvalt valgustusest. Samuti toodab süsteem ligikaudu 860 kg tilaapiat aastas. Selline tootmiskaht on ühe perekonna jaoks kaugelki liiga suur.



Joonis 3. Nelson and Pade Inc. poolt pakutav lahendus perekonna toiduvajaduste osaliseks rahuldamiseks.

Samuti pakub ettevõtte Nelson and Pade Inc. lahendusi mõõdukas, mis rahuldaksid osaliselt ühe perekonna toiduvajadused, kuid see eeldab ruumi või hoonet, kuhu tootmine oleks võimalik paigutada, ning välitingimustes aastaringne tootmine poleks võimalik.

Ka on olemas erinevad lahendused mis võimaldavad kliendil luua ise tingimused toidu ja kala kasvatamiseks, kuid need lahendused eeldavad kliendilt suure koguse infoga tutvumisest. Sellega kaasneb suur õppekõver, ning tuleb investeerida palju aega. Antud töö käigus projekteeritud lahendus, olles pooluniversaal, ei eelda kliendilt rohkem kui baastadmisi. Hilisema töö käigus on planeeritud lahendused, mis aitavad kliendil tootmist planeerida vastavalt tarbimisele.

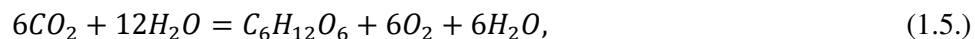
1.3. Fotosüntees

Õhu osakaal taime elus on suur, kuna enamus vajalikku energiat ja süsiniku tuleb just läbi õhu ja valguse. Protsessi, milles moodustatakse rohelistes taimedes veest (H_2O) ja süsihappegaasist (CO_2) orgaanilised ained, kutsutakse fotosünteesiks. Taimeraku energiaringlusel on kaks faasi, valgusstaadium ja pimedusstaadium. Valgusstaadiumis muudetakse juurte kaudu sisenev vesi

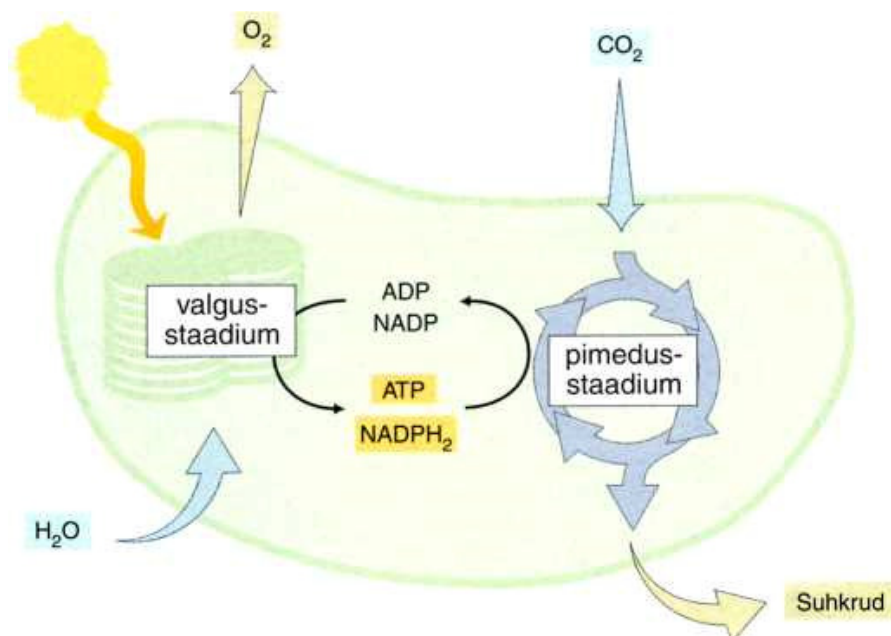
hapnikuks, taimes tekib vastav reaktsioon (valem 1.4.) ning vabanenud hapnik lahkeb läbi õhuavade ümbritsevasse keskkonda. [8]



Pimedusstaadiumis luuakse süsihappegaasi ja vee abil glükoos, mille kõrvalproduktideks on hapnik ja vesi (valem 1.5.)



Fotosünteesi kirjeldav skeem on nähtav jooniselt 4. Siit selgub, et süsihappegaasi tase kasvuhoones on taimekasvu soodustamiseks väga oluline.



Joonis 4. Fotosünteesi kirjeldav skeem taimerakus. [9]

1.4. Taimede kasvu mõjutavad vee parameetrid

1.4.1. Analüüs

Taimede kasvatus toimub vesilahuses, ning nende kasvutingimuste optimeerimiseks tuleb sooritada vee parameetrite analüüs. Olulised parameetrid mida on hüdroponikas vaja mõõta

on vee temperatuur, vee vesinikeksponent pH, toitainekontsentratsioon ja lahustunud hapnik.
[10]

1.4.2. Temperatuur

Süsteemis ringleva vee temperatuur sõltub suuresti ruumis oleva õhu temperatuurist, olles tavaliselt 1 – 2 °C madalama temperatuuriga. See temperatuurivahemik tuleneb aurustumiseks vajamineva energia arvelt.

1.4.3. Vesinikeksponent

Vesinikeksponent ehk pH näitab lahuses olevate vesinikioonide kogust. Mõõtmisüsteem on logaritmiline (\log_{10}), ehk iga n arvu vahel on ionide koguse erinevus 10 kordne. Oluline on teada, et pH skaala arvulised väärtused säilivad standardtingimustel, ehk pH arvuline väärtus muutub temperatuuri ja rõhu muutudes. Enamike taimede jaoks ideaalne pH on 5..6 vahemikus.
[10]

1.4.4. Toitainekontsentratsioon

Toitainekontsentratsioon määrab ära taimedele vajalike toitainete koguse vees. Seda esitatakse tavaliselt miljondikosana (ppm), solvaadina (TDS), või vee elektrijuhtivusena (kasutatakse ühikut EC, *electric conductivity*.) Tavaliselt mõõdetakse hüdroponikas vee elektrijuhtivust ning esitatakse tulemus kas ppm või TDS ühikuna. [10]

1.4.5. Lahustunud hapnik, DO (*Dissolved Oxygen*)

Lahustunud hapnik on gaasiline hapnik, mis on lahustunud vees. Kraanivees olev lahustunud hapniku tase on tavaliselt vahemikus 5..7 ppm. 20 °C juures on täieliku vee küllastumise puhul hapniku kogus vees ligikaudu 9 ppm. Vee temperatuuri tõustes selle võimekus hoida hapnikku väheneb. [10] Ideaalis tuleb hoida DO küllastumine 100% ligidal.

1.5. Taimede kasvuks vajalikud toitained

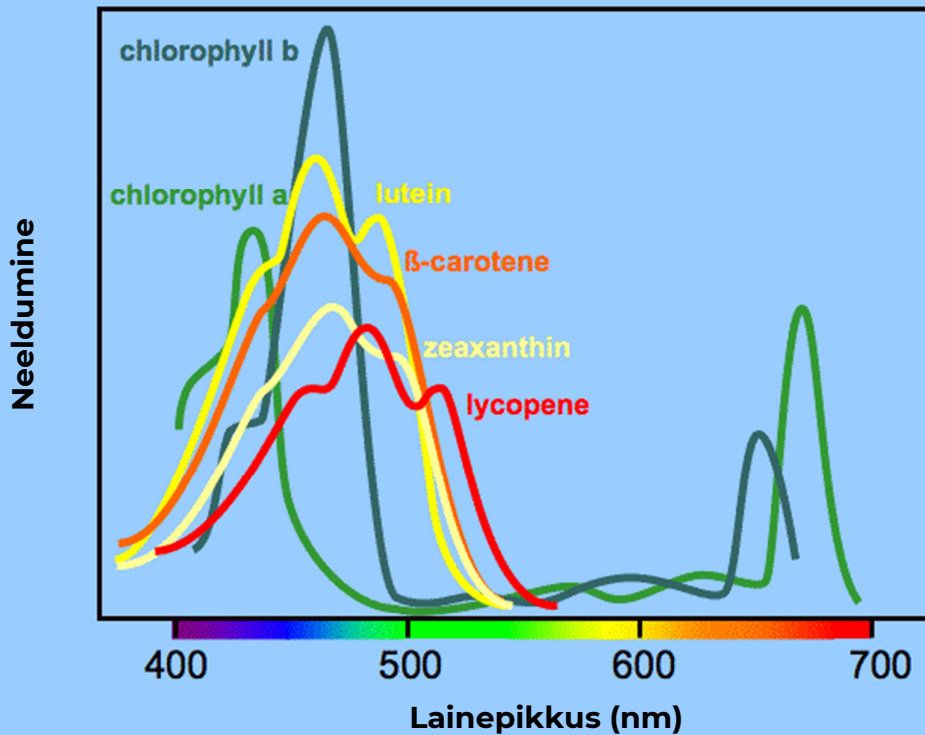
Lüua Metsanduskooli väetamisõpetuses andmetel on taimedes leitud üle 70 keemilise elemendi, millede enamuse funktsioonid on veel ebaselged. Taimede orgaanilise massi kuivaine sisaldab keskmiselt 45% süsinikku, 42% hapniku ja 6,5% vesinikku. Kuigi nende elementidele langeb 93,5% taimede kogu kuivainest, on nende tähtsus suhteliselt väiksem ja väetamisseisukohast lausa tühine, sest neid elemente omastab taim õhust süsihappegaasina ja mullast veena. [11]

Põhilised makrotoitained mida taimed vajavad on süsinik, hapnik, vesinik, lämmastik, fosfor, kaalium, kaltsium, magneesium ja väävel. (C, O, H, N, P, K, Ca, Mg, S) [11]. Peamiselt väetatakse aianduses lämmastiku, fosfori ja kaaliumi segudega.

1.6. Taimede kasvuks vajalik valgus

Kuna valgus on diskreetne ja koosneb footonitest on võimalik arvutada vajalik footonite kogus 1 grammi biomassi tootmiseks. See on ligikaudu 1 mool footoneid ($6,02 \cdot 10^{23}$) 1 grammi kuiva biomassi jaoks, mis on omakorda 0,5 grammi saaki. [12] Samuti kasutab taim fotosünteesi jaoks erineva lainepikkusega valgust, taimede poolt eelistatav valgusspektrum on näha jooniselt 5.

Fotosünteesilised pigmendid neelavad suure osa spektrumist



Joonis 5. Fotosünteesi jaoks vajaliku valguse tarbimine fotosünteesi poolt (lainepikkus - nm). [13]

Peamised parameetrid suunamaks kalade kasvu on temperatuur, pH, DO ja CO₂. Samuti kuna tegemist on veeringlusel põhineva süsteemiga, tuleb mõõta peamist kalade poolt toodetud jääkainet – lämmastik. Kalade poolt toodetud lämmastik on põhiliselt kujul ammoniaak (NH₃) ja ammoonium (NH₄⁺). Enne taime poolt tarbimist tuleb need ühendid lõhkuda nitraatideks. Nitrititseeerijad bakterid lõhuvad ammoniaagi ja ammooniumi nitrititeks, mis seejärel lõhutakse nitraatideks. [14] Seega on ka vajalik mõõta vees sisalduvate ammoniaagi ja ammooniumi koguseid.

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Lõpptarbija jaoks vajalikud parameetrid

2.1.1. Aastaringse akvapoonilise kasvuhoone tootlikkus

Projekteerimise algatamiseks on vaja välja selgitada akvapoonilise kasvuhoone mõningad parameetrid, ning need on jagatud nelja kategooriasse: kliendile olulised näitajad (tootlikkus, hind, jmt), akvapoonilise kasvuhoone hoone ehituslikud parameetrid, taimede vajadused ning kaladele vajalikud parameetrid.

Hoone projekteerimisel lähtuti lõpphinnast, mis on hetkel 25 000 €. Lõpphind leiti analoogsete turul olevate ühepereelamute lisahoonete hindu võrreldes, ning turu-uuringute käigus. Vajaliku tootlikkuse leidmisel tehti arvutused lähtudes viieliikmelise perekonna teoreetilisest toitumisvajadusest. WHO, Maailma Terviseorganisatsioonilt pärinevatele andmetele toetudes tuleks keskmisel inimesel tarbida päevas 375 kuni 500 grammi erinevaid köögivilju, kaunvilju, marju ja puuvilju. [2] Selle põhjal saab arvutada viieliikmelise perekonna aastase köögiviljavajaduse järgnevalt:

$$\frac{0,375 + 0,500}{2} \text{ kg} \cdot 5 \cdot 365 = 798,4 \text{ kg} \cong 800 \text{ kg} \quad (1.1.)$$

Valemi 1.1 tulemust arvestades saadi viieliikmelise perekonna aastaseks tarbimiseks 800 kg, ning eeldades et süüakse palju köögivilju (50%), võib arvestada aastaseks köögivilja tarbimiskoguseks 400 kg.

Kalade mahu arvutamiseks võeti kliendi soov saada kahel korral nädalas saaki, mõlemal korral 1 kg kala. 2 kg kala nädalas, 52 nädala juures teeb aastaseks tootmismahuks 104 kg. Kuigi kalade kasvatamine nädalase vanusevahega antud tingimustes pole võimalik, saab ligikaudset keskmist kaalu arvestades soovitud saagi kätte.

2.1.2. Energiatarve

Energiakulu arvutamiseks võeti elektri hind, millega töö autor töö kirjutamise ajal elektrit ostab. Arvestades elektri hinda 0,06 € kWh kohta, ning elektri edastust, taastuenergia tasu ja elektriaktsiisi summas 0,11 €, käibemaksuga 20% tuleb 1 kWh hinnaks 0,204 €. Konsulteerides väikemajade tootjatega on ühe ruutmeetri küttevajadus ligikaudu 50 W, seega 18 m² juures on kogu akvapoonilise kasvuhoone küttevajadus 900 W. Kasutades õhksoojuspumpa mille kasutegur kütmisel on 4.3 ja võimsus 930W (peatükk 3.4.1) võib määrata antud akvapoonilise kasvuhoone kütmiseks elektrivõimsuse tarbe talvekuudeks 216,3 W. Sellise küttevajaduse puhul on huvi ka kütmise peale kuluva rahalise väljamineku vastu, mis arvutatakse järgnevalt:

$$216,3 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} \cdot 30 \cdot \frac{0,204\text{€}}{\text{kWh}} = 31,77 \text{ €}, \quad (1.2.)$$

Antud arvutuste põhjal (valem 1.2.) elektrikulu eurodes on kütteperioodil 31,77 € kuus. Võimalik, et tegelik küttekogus on väiksem, kuna soojematel kuudel ei pea õhksoojuspump töötama täisvõimsusel.

Eelnevale isiklikule kogemusele põhinedes arvestati esmane taimede valgustite võimsuse vajadus 50 W ruutmeetri kohta. Võttes ühe ruutmeetri tootlikuseks 50 kg aastas, läheb 400 kg tootmiseks vaja 8 ruutmeetrit (põhjalikum käsitus peatükis 1.3) Arvestades lampide põlemisaega 14 tundi päevas, ning eelnevale arvutusele tuginedes 1 kWh hinnaks 0.204 €, leiame ka lampidele energiatarbele kuluva maksumuse, kasutades valemit 1.3.

$$0,050 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \cdot 8\text{m}^2 \cdot 14 \text{ h} \cdot 30 \cdot \frac{0,204\text{€}}{\text{kWh}} = 34,27\text{€}, \quad (1.3.)$$

Arvestades tööstuskontrolleri energiatarbeks 50W ja pumba võimsust 70W (peatükk 3.3.2.) leiame sarnase arvutuse tulemusel rahaliseks kuluks kuus vastavalt 7.34 € ja 10.28 €. Kliendi rahaline kulu elektrienergia ja kütte peale (küttes elektriga) on talvekuudel:

$$31.77 \text{ €} + 34.27 \text{ €} + 7.34 \text{ €} + 10.28 \text{ €} = 83.66 \text{ €}$$

2.2. Hoone ehituslikud parameetrid

Erinevate väikemajade tootjatega konsulteerides jõuti järeldusele, et hoone ehituskulu eelarve on 9000 €. Lähtudes ehitusseaduse § 26 lõige 4 alusel määratud aktist, Ehitise tehniliste andmete loetelu ja pindade arvestamise alused, pole ehitusaluse pinnaga 0 .. 20 m² ja kuni 5 m kõrge hoone puhul kohustuslik ehitusluba, ehitusprojekt ega ehitusteatis. Samuti pole vajadust vundamendi järele, kuna kasutatakse pinnasesse paigutatavaid kruvivaiasid. Hoone sisemus peab olema suures mahus vee ning niiskuskindel, ning kõik seadmed paiknevad ühes ruumis. Hoone on vaja ühendada ka madalpingevõrku.

Rahuldamiseks 20 ruutmeetrise pinnaga 400 kg aastas tootmisvajadus, on paigutatud kasvupinnad vertikaalselt. Vertikaalne taimekasvatuse kasutab pinda efektiivsemalt, lubades suurema tootlikkuse ja parema energiakasutuse. [3]

Kasvuhoone esimeseks suurust piiravaks teguriks on ehitusseaduse § 26 lõike 4 alusel määratud akt, Ehitise tehniliste andmete loetelu ja pindade arvestamise alused, mille põhjal pole ehitusaluse pinnaga 0..20 m² ja kuni 5 m kõrge hoone puhul kohustuslik ehitusluba, ehitusprojekt ega ehitusteatis. Puudub ka vajadus vundamendi jaoks, kuna akvapooniline kasvuhuone asetub pinnasesse paigutatud kruvivaiadele.

2.3. Taimede jaoks vajalikud parameetrid

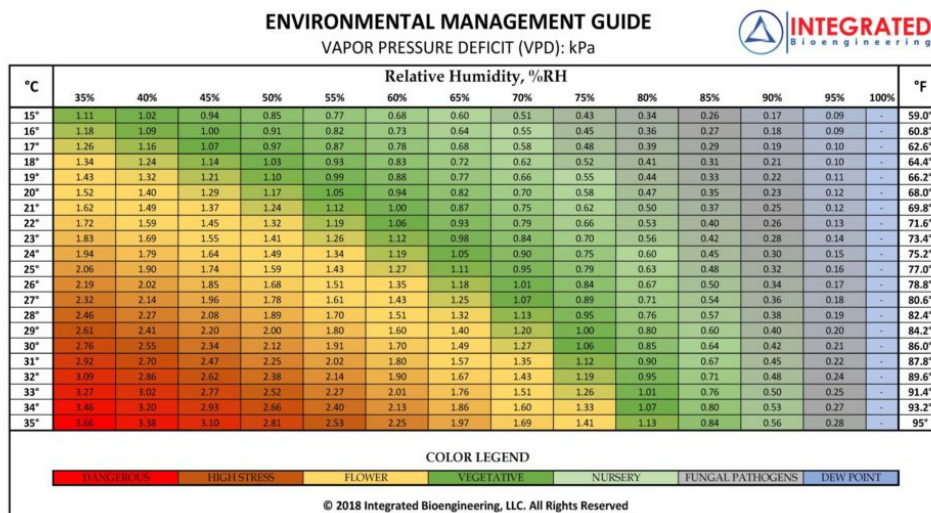
Kuna erinevate taimede keskkonnavajadused varieeruvad, on keeruline üldistavaid parameetreid välja tuua. Parameetrite valimisprotsessi lihtsustamiseks valisin välja mõned levinumad hüdroponikas kasvatatavad taimed, määrates neile ka osakaalu kogu tootmismahust. (Tabel 1)

Taimed, mis valiti näidistootlikuse arvutamiseks, on järgnevad: Tomatid (*Solanum lycopersicum*), lehtkapsas (*Lactuca sativa*), spinat (*Spinacia oleracea*), basiilik (*Ocimum basilicum*) ja maasikad (*Fragaria* × *ananassa*).

Tabel 1. Näide kasvuhoone keskmisest tootlikkusest aastas, koos taimesortide eelistustega [15] [16]

	Maasikad	Tomat	Lehtkapsas	Lehtsalat	Spinat	Basiilik	Kokku
Osakaal, %	10	35	10	15	10	20	100
Tootlikkus, kg/aastas	40	140	40	60	40	80	400
Tootlikkus, kg/kuus	3,3	11,7	3,3	5,0	3,3	6,7	33,3
Optimaalne Temperatuur, °C	20..29	19..24	16..21	15..19	15..18	24..28	

Kuigi eesmärk on anda kliendile suures jaos vabad käed seoses kasvatavate taimedega, on valitud taimed üpris populaarsed ning selle abil on võimalik välja valida vajalikke parameetreid. Peamised õhu parameetrid taimekasvu soodustamiseks on temperatuur, niiskus ja süsihappegaasi sisaldus. Tabeli 1 alusel võib akvapoonilise kasvuhoone sisetemperatuuriks määrata 21..23 °C, kuna enamus lehtkõõgililju kasvab optimaalselt selles temperatuurivahemikus. Samuti on see mugav keskkond ka kasvuhoone kasutajale. Õhuniiskuse optimaalses vahemikus hoidmine on oluline, kuna liiga madalal õhuniiskusel taime fotosüntees aeglustub, mis aitab kokku hoida taime energiat. Õhuniiskuse määramiseks kasutan aururõhu defitsiidi (*VPD – vapour pressure deficit*) graafikut joonisel 6.



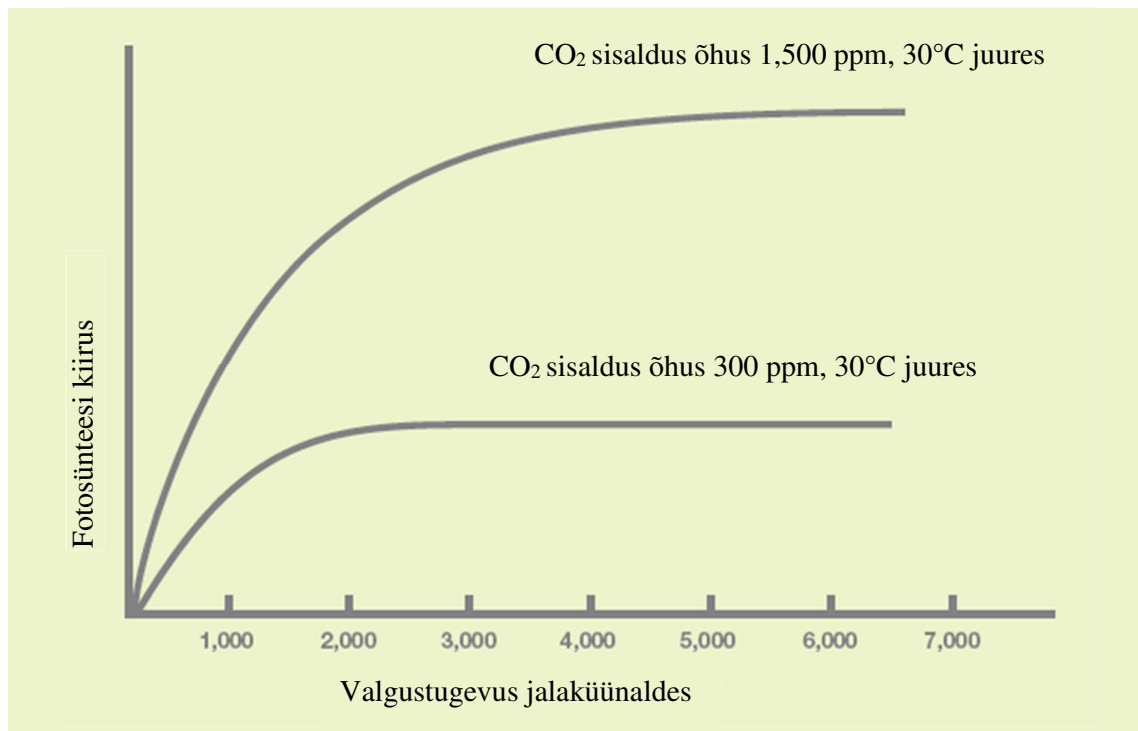
Joonis 6. Aururõhu defitsiidi graafik – VPD esitatud kPa seos temperatuuri (°C, °F) ja suhtelise niiskusega (%RH). [17]

VPD graafiku paremaks mõistmiseks on loodud tabel (tabel 2), mille järgi saab valida temperatuurile sobiva suhtelise niiskuse protsendi.

Tabel 2. Taimede eelistused VPD suhtes. [17]

Suhteline niiskus %	Temperatuur °C	Ligikaudne VPA kPa	VPD taime eelistus
50	10,00	0,62	Istutamine
50	15,56	0,85	Vegetatiivne kasv
50	21,11	1,32	Õitsemise
50	26,67	1,61	Kerge stressitase
50	32,22	2	Kõrge stressitase

Kuna suur osa planeeritud kasvuhoones kasvatatud taimedest on kõrge söödava biomassi protsendiga (lehtkõogiviljad), on eelistatav VPD taime eelistus vegetatiivne kasv, põhinedes soovil toota võimalikult palju biomassi. Selle abil võib jooniselt 6 võtta soovitud suhteliseks õhuniiskuseks vahemiku 60 .. 65 %. Kuigi CO₂ taseme tõstmisel kiireneb fotosünteesi kiirus (joonis 7) pole selles antud kasvuhoone iteratsioonis plaanis õhku süsihappegaasiga rikastada.



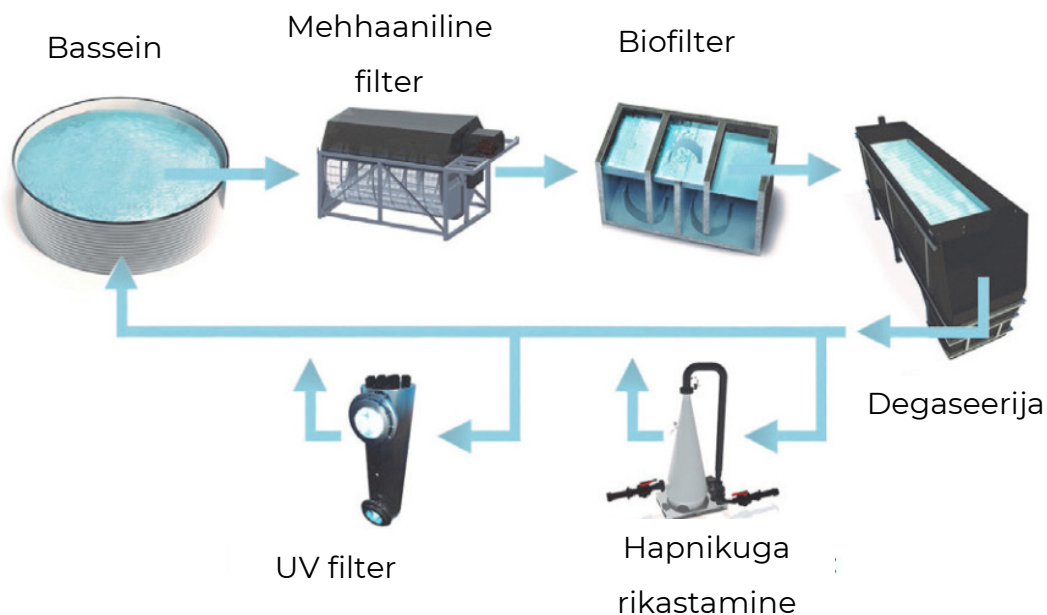
Joonis 7. Fotosünteesi sõltuvus CO₂ tasemest. [18]

Hetkel on süsteem planeeritud kasutama 50 W/m^2 võimsustarbega täisspekter LED valgusteid kaheksa ruutmeetri peale, ning süsteem ei reageeri valguse vajaduse muutudes. Seega valgusvoogu pole hetkel vaja mõõta.

2.4. Kalade kasvatamiseks vajalikud parameetrid

2.4.1. Veeringlusel põhinev kalakasvatus

Akvapooniline kalade kasvatamine võtab eeskju veeringlusel põhinevate RAS (*recirculating aquaculture system*) põhimõttest, mida kirjeldab joonis 8. Kalade basseinis olevat vett puhastatakse läbi mehaanilise filtri, biofiltri, degaseerija (eemaldamaks CO_2 veest), seejärel rikastatakse vesi hapnikuga ning saadetakse läbi UV filtri, milles kasutatakse UV-C kiirgust, et tappa patoloogilist mikrobioloogiat. Selle tulemusel kaob paremates süsteemides ainult aurustuv vesi, kehvemates tuleb vahetada ligikaudu 5% kogu veest päevas. RAS tüüpi kalakasvatuse eesmärk on vähendada mõju keskkonnale ning hoida kokku veetarbimisel.



Joonis 8. RAS tüüpi kalakasvatuse põhimõtteskeem. [19]

Kasvuhoone projekteerimise lihtsustamiseks valin süsteemi kasvama karpkala (*Cyprinus carpio*), välimus näidatud joonisel 9. Karpkala on väga visa kala ning talub väga kehvi keskkonnatingimusi, juhul kui peaks tekkima süsteemis probleem mõne parameetriga. Hetkel on aastaseks kalade tootmismahuks valitud 100 kg. Erinevad uuringud on näidanud varieeruvaid tulemusi asustustihedusega. Levinud on asustustihedused 20..80 kg/m³, mida mõõdetakse saagi kaalu järgi. [20] Eelnevad prototüübid andsid karpkaladega tulemusi 50 kg/m³ asustustiheduse puhul. Tootmismahu 100 kg ja asustustiheduse 50 kg/m³ puhul on vajaliku süsteemi veemahuks 2 m³ ehk 2000 liitrit.



Joonis 9. Karpkala. [21]

2.4.2. Temperatuur

Karpkalad taluvad väga madalat lahustunud hapniku taset ning temperatuurivahemikku 4°C kuni 34°C. Ideaalne temperatuur on neile 25°C ja 30°C vahemikus. Looduses kasvavad karpkalad kuni 40 kg suuruseks ning kuni 1,2 meetri pikkuseks. Samas on turustatava karpkala tavaliseks pikkuseks 30..50 cm ja kaaluks ligikaudu 1,5 kg. [21]

Kuigi erinevad liigid eelistavad erinevaid pH tasemeid, on kaladele sobiv vahemik üldiselt 6,5..9,0. Karpkalad eelistavad pH-d mis jääb vahemikku 7,5..8,0. Vee küllastamine hapnikuga peab toimuma pidevalt, on hea kasutada vees lahustunud hapniku indikaatorina süsteemi tervise kohta. Samuti tuleb mõõta jooksvalt CO₂ taset süsteemis. Ammoniaagi ja ammooniumi anduripõhine mõõtmine aitab anda ülevaate süsteemi tervisest ning tuleks teha samuti jooksvalt.

Kalade toitmiseks luuakse eksponentsiaalne kasvumudel. See sõltub liigist ja kaalust ning vee temperatuurist ja toitmiskogusest.

Valem, mida kasutatakse kasvumudeli loomisel [19]:

$$K_n = K_0(1 + r)^n, \quad (1.6.)$$

kus n on päevade arv;

K_0 on kala kaal päeval 0;

K_n on kala kaal päeval n ;

r on kasvukiirus, %/päevas;

Vajadusel leida 100 grammise kala kaal 28 päeva pärast, kui toitmisjuhend ütleb kala kasvuks 1.2% päevas (näide 1).

Näide 1.

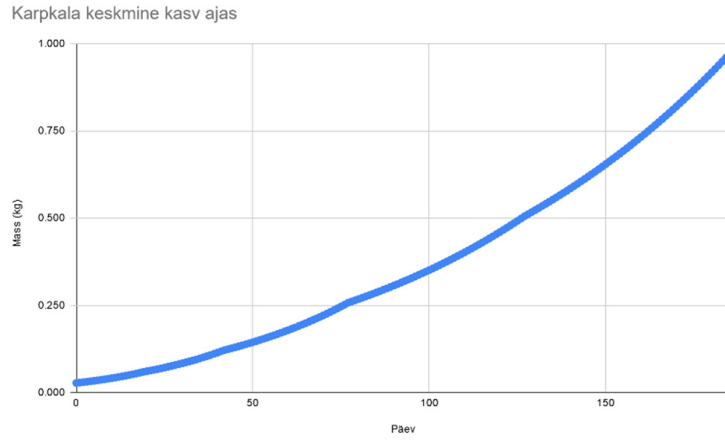
$$K_{28} = 100(1 + 0.012)^{28} = 139.7g \quad (1.7.)$$

Antud võrrandist näeme, et kala kasvas 28 päevaga massilt 100 grammi 139,7 grammini, ehk 39,7 g kasv biomassis. Antud mudeliga on välja arvatud, et kasutades Alltech Coppens'i karpkalasööta [22], peaksid karpkalad praeguse söötmiskava järgi temperatuuri 18°C juures saavutama keskmise massi 1 kg 180 päeva jooksul, alustades keskmiselt massilt 26 g. Antud arvutused said tehtud arvestades kasvukiiruseid tabelis 3. 100kg saagi jaoks, arvestades ühe kala massiks 1 kg, on vajaliku sööda kogus järgnev: 3 kg Intensiv 2 mm sööta, 22,7 kg Pond pellet 3 mm ja 96,305 kg Pond pellet 6 mm.

Tabel 3. Karpkala kasvukiirused 18°C juures kasutades Alltech Coppens'i karpkalasööta [22]

Mass, g	Kasvukiirus, %/päevas
26..59	1,041
60..119	1,032
120..249	1,022
250..499	1,014
500..1000	1,011

Toetudes sellele arvutusele, võib luua eksponentsiaalse graafiku karpkalade kasvumudeli kohta (joonis 10).



Joonis 10. Karpkalade kasvumudel.

Arvestades süsteemi temperatuuri 18°C, mis pole karpkalade jaoks ideaalne, kasvavad karpkalad 6 kuuga 26 grammi pealt ligi 1 kilogrammiseks, saavutades soovitud 100 kg saagi 6 kuuga.

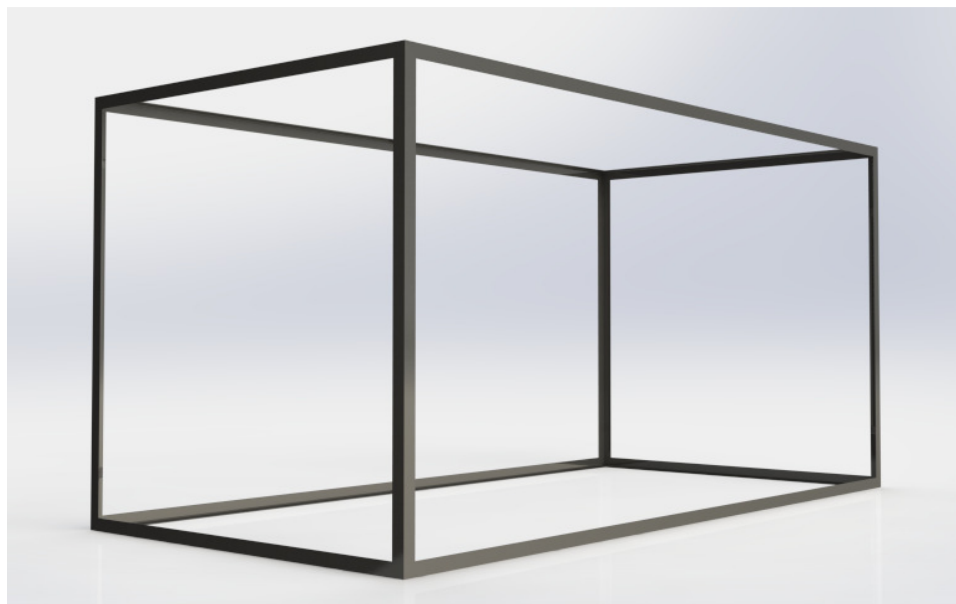
3. TULEMUSED

3.1. Akvapoonilise kasvuhoone hoone

Aastaringse kasvuhoone arendus ja projekteerimine on jagatud viieks osaks. Vajaliku hoone disainimine ja projekteerimine, taimekasvatus, kalakasvatus, tehnilised kommunikatsioonid ja automaatika, ning lisad.

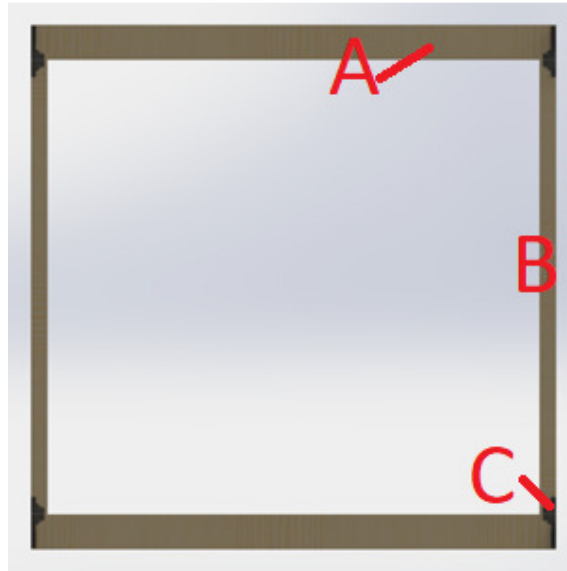
Disaini eeskuju võeti juba turul olevatelt väikehoonetelt, mis peaksid universaalselt sobima ühepereelamute hoovi. Raamiks valiti mõõtudega S235 terasest nurkraud, materjali pikkusega 6 m. Raami jaoks kasutati EN 10025-1/2 järgset 90 x 90 x 6 mm nurkrauda.

Kasutades antud materjali koostati 3 meetrit sügav ja kõrge ning 6 meetrit lai raam (joonis 11). Antud mõõdud saadi lähtudes müügis oleva materjali pikkusest, vähendades ehituseks vajalike operatsioonide arvu.



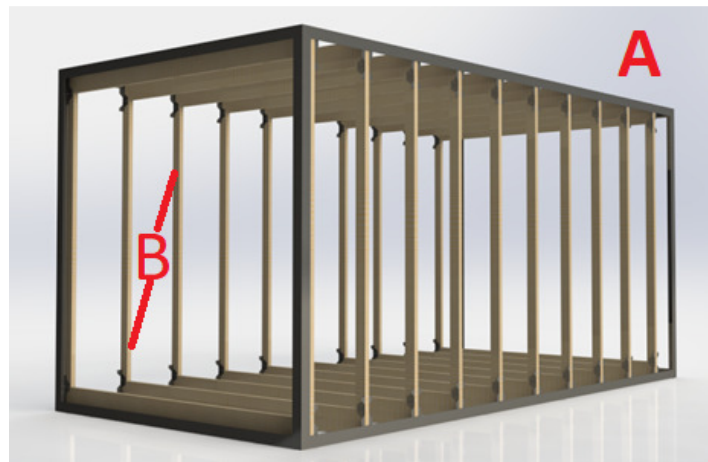
Joonis 11. Hoone välisraam.

Valminud raami külge keevitati prussikingad, mille abil kinnitati raami külge 45 x 95 mm immutatud ja hõõveldatud prussid seinadeks ning 45 x 200 mm mõõdus immutatud ja hõõveldatud prussid põrandaks ja laeks (joonis 12).



Joonis 12. Välisraami külge kinnituv puidust raam, kus A – 200 mm lai pruss, B – 95 mm lai pruss, C – prussikingad.

Seejärel paigutati terasest välisraami sisse 11 sellist raami, tsentrisammuga 600 mm (joonis 13). Antud tsentrisamm lubab paigutada vahedesse soojusisolatsiooni, mille standardlaius on 555 mm. Viimase raami tsentrisamm eelnevast raamist on 375.59 mm.



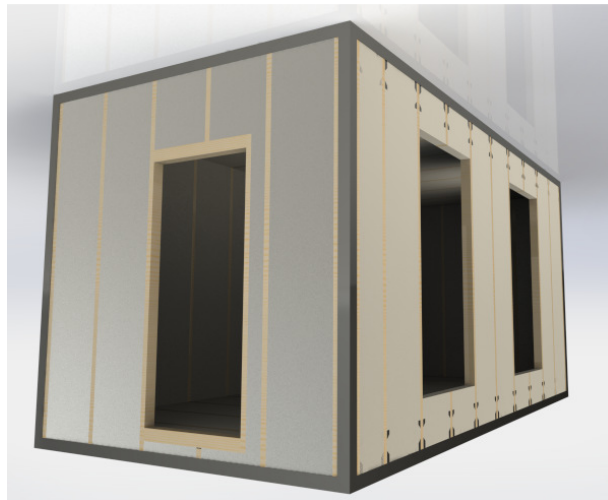
Joonis 13. Välisraam koos puidust siseraamidega, kus A – välisraam, B – siseraamid.

Järgnevalt paigaldati prussid hoone otsadesse, ning lõigati uste ning akende jaoks avad, ning paigaldati vastavad prussid (joonis 14). Akna avadeks sai valitud 1905 x 1155 mm mõõtudega avad, ning ukseava on mõõtudes 900 x 2000 mm.



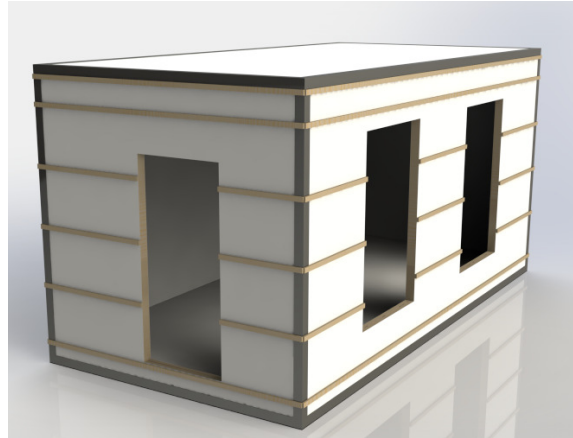
Joonis 14. Välisraam koos akende ja ustega.

Peale puidust raami valmimist projekteeriti soojustus (joonis 15). Soojustuseks valiti seinadele kivivill, olles sama laiusega nagu küljprussid, 95 mm. Kivivill valiti ka lakke, põranda soojustuseks valiti EPS vahtplast, laiusega 200 mm.



Joonis 15. Raam koos soojustusega.

Järgnevalt paigutati akvapoonilise kasvuhoone välisküljele tuuletõkkekile ning siseküljele niiskustõkkekile, kaitsmaks soojustust hoone sisese niiskuse eest. Tuuletõkkekilele paigutati välisseinal maapinnaga paralleelselt tuulutusliistud, mis lubavad õhul liikuda kasvuhoone seina ja voodrilaua vahel (joonis 16).



Joonis 16. Hoone raam koos soojustuse, väliskilede ja tuulutusliistudega.

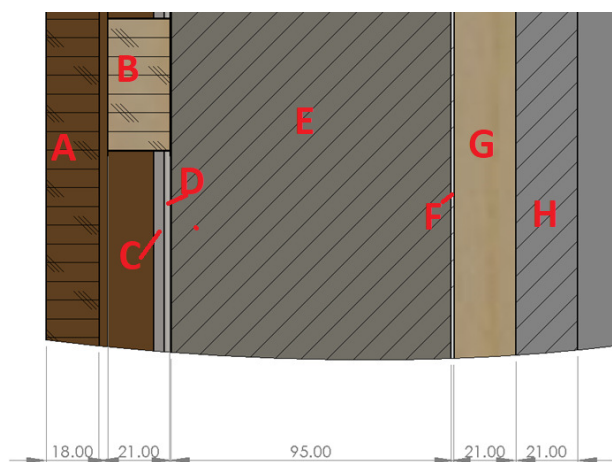
Projekteerimise järgmine etapp oli välisvoodri valimine ja paigaldus. Samuti paigaldati siseintele ja lakke prusside külge kinnituvad tuulutusliistud, paigutati põrandale 21 mm paksusega OSB plaat, ning seina 21 mm paksusega veekindel vineer. Seejärel paigutati põrandale 3mm paksune ja seintele 150 mm ülekatttega PVC põrand. Läbilõige hoonest joonisel 17.



Joonis 17. Läbilõige hoonest peale siseinte, lae ja põranda valimist.

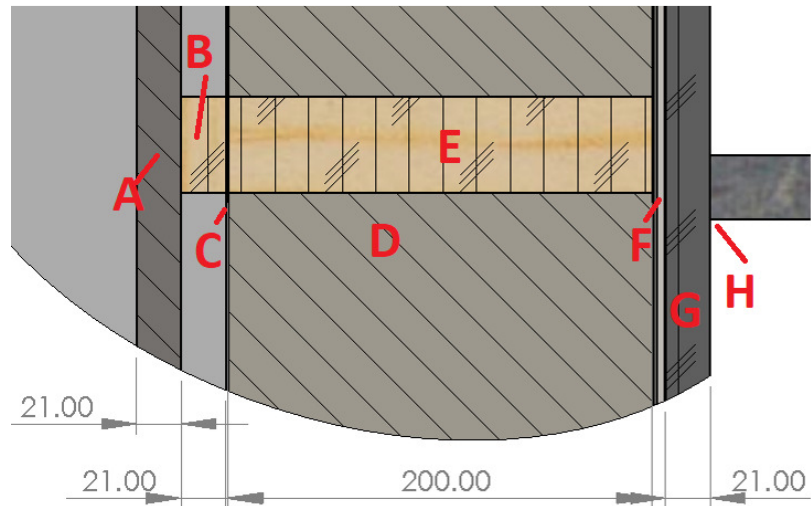
Hoonele lisati 21 mm paksusest niiskuskindlast vineerist katus, mis kaeti tõrvapapiga. Akvapoonilise kasvuhuone põhjaks valiti 12,5 mm lai tsementkiudplaat, millega kaeti ka kasvuhuone alumine välisperimeeter. Välisperimeeter kaeti tsementkiudplaadiga kõrguseni 150 mm. Samuti projekteeriti katusele taimede kasvulavad, piire ja trepp (joonis 20). Lisati pakettaknad ja uksepesasse sobiv uks. Katusele ja trassi kohale paigutati tsingitud räästaplekk.

Seina läbilõige näeb välja nagu kujutatud joonisel 18 ja koosneb väljast sissepoole tulles: 18 mm välilaudis, mis kinnitub 21 mm läbimõõduga tuulutusliistu külge, tuuletõkkemembraan, 95 mm kivivilla puitsõrestikus, niiskustõkkekile, mille peal on tuulutusliist ja seejärel 21 mm paksune vineerplaat.



Joonis 18. Seina läbilõige, kus A – välilaudis, B – tuulutusliist, C – nurkraud, D – tuuletõkkemembraan, E – kivivill, F – niiskustõkkekile, G – tuulutusliist, H – vineerplaat.

Joonisel 19 on näha hoone katuse läbilõige, kus on liikudes seestpoolt välja 21 mm vineerplaat, 21 mm tuulutusliist, niiskustõkkekile, 200 mm laiune pruss ja soojustus, tuuletõkkekile ja 21mm paksune vineerplaat, millele kinnitub tõrvapapp.

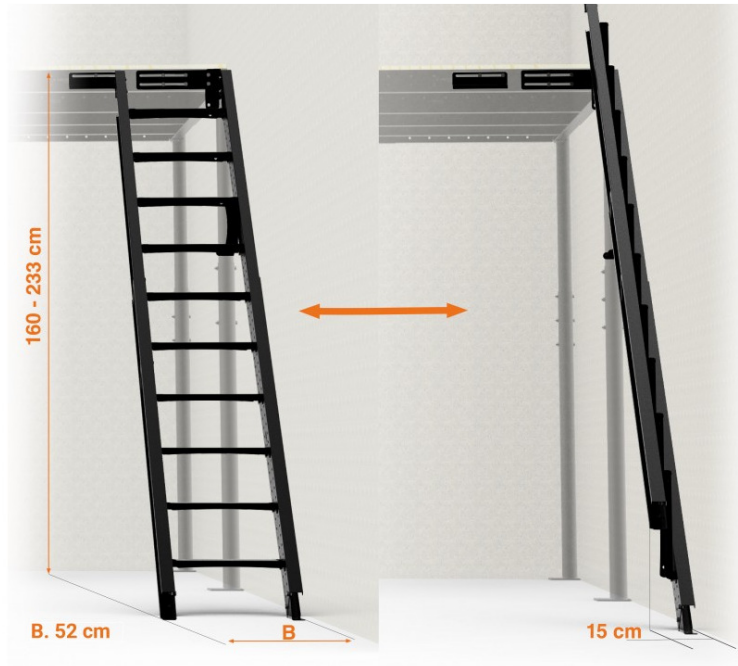


Joonis 19. Hoone katuse läbilõige, kus A - vineerplaat, B – tuulutusliist, C – niiskustõkkekile, D – kivivill, E – immutatud pruss, F – tuuletõkkekile, G – vineerplaat, H – tõrvapapp.



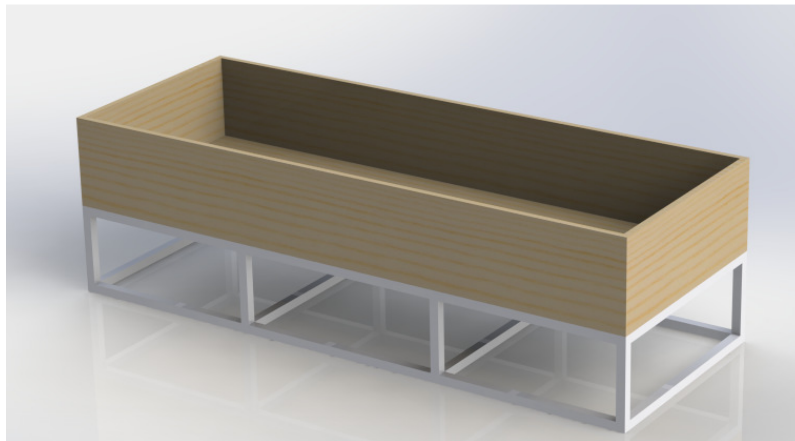
Joonis 20. Projekteeritud hoone välisvaade.

Kuna trepi lisamine suurendas hoone pindala suuremaks kui 20 m², ei saa antud lahendust kasutada, ning tuleb kasutada kas redelit või volditavat treppi (joonis 21).



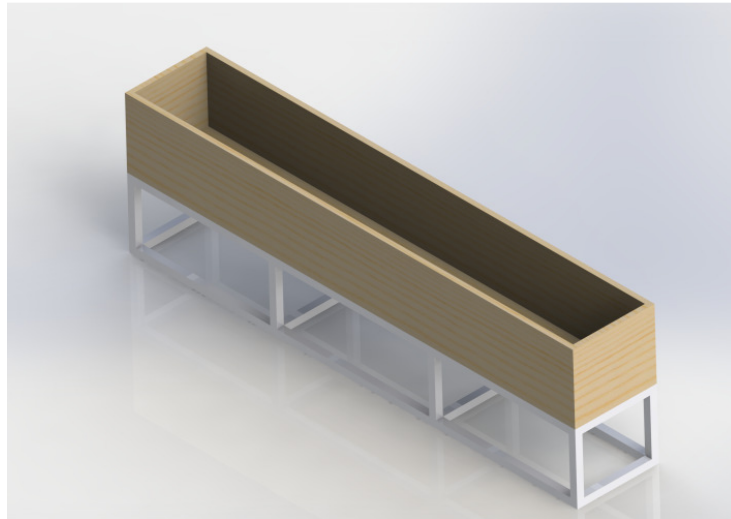
Joonis 21. Veebipoest ostetav volditav trepp. [24]

Katusele projekteeriti ka taimelavad, mis lubavad kasvatada ka mullas taimi (joonised 22 ja 23). Kasvulavad on kavandatud 30 x 30 x 2 mm seinapaksusega nelikanttorust ning 21 mm paksusega vineerist. Nelikanttoru tuleb katta korrosioonikindla värviga, takistades materjali hävimist välistingimustes.



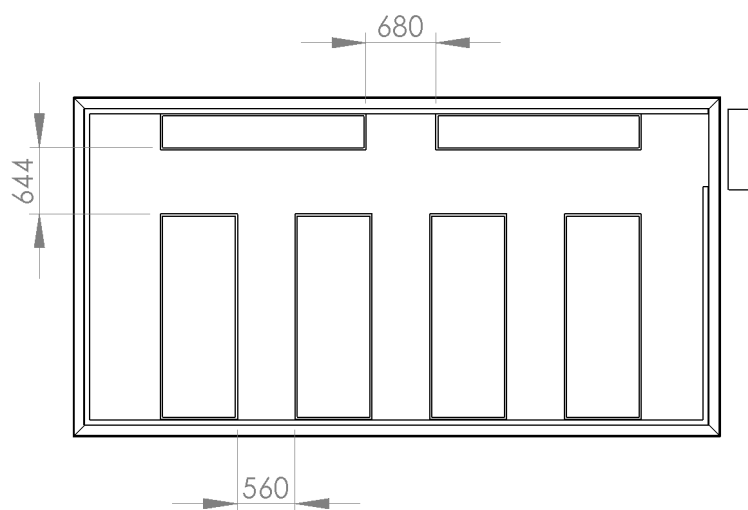
Joonis 22. Lai kasvulava.

Esimene idee on laiasid kasvulavasid paigutada katusele neli, tekitades nende vahele teeninduskäigud kõndimiseks. Kitsad kasvulavad paikneksid risti laiade kasvulavadega, katuse vastasküljel (joonis 23).



Joonis 23. Kitsas kasvulava.

Katustel paiknevates kasvulavades on võimalik suvel kasvatada erinevad ilutaimi kui ka söögitaime, esmase prototüübi jaoks on plaan paigutada sinna kasvama maasikad. Võimalik taimekastide paigutus on märgitud joonisel 24.



Joonis 24. Võimalik kasvulavade paigutus hoone katusel.

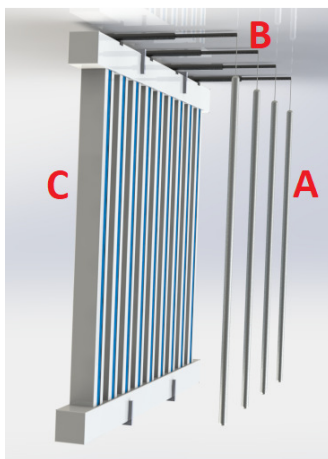
3.2. Taimekasvatuse lahendus

Taimed on paigutatud kasvama vertikaalsetele kasvulavadele sarnaselt joonisele 25, millest pumbatakse läbi akvaariumi vesi, mis seejärel uuesti akvaariumisse suunatakse. Samuti on süsteemi planeeritud üks hüdropooniline mangopuu. Valgusteid juhib mehaaniline 230 V, 16 A rele mis hoiab valgust sees 14 tundi päevas.



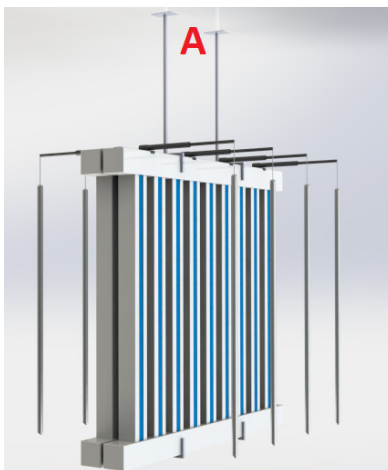
Joonis 25. Vertikaalsed kasvulavad. [25]

Sellistel vertikaalsetel kasvulavadel on kasvatatud edukalt erinevaid lehtköögivilju ja maitsetaimi. Antud kasvuhoonesse projekteeriti viis sellist kasvulava, iga koosneb üheksast 1266 mm pikkusest vinüülist nelikanttorust, mis on täidetud inertse polüuretaanvahust käsnaaga, millesse istutatakse kivivillas kasvavad ettekasvatatud taimed. Joonisel 26 on näha valgustite kinnitumine kasvulava külge.



Joonis 26. Vertikaalne taimkasvatustava koos valgustitega, kus A – ripuvad valgustid, B – teleskoopiline valgusti kauguse regulaator, C - kasvulava.

Joonisel 26 kujutatud taimelava kinnitus raamiga seina külge. Hoonesse on mõeldud ka kaks kasvulava mis kinnituvad lakke (joonis 27). Ühes sellises komplektis on kaheksateist 1266 mm pikkuse soonega kasvulava, mõlemal pool 9.

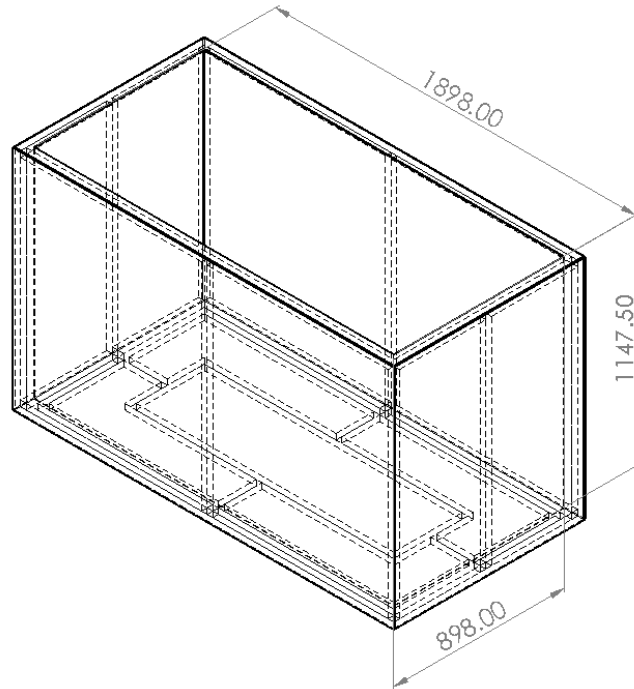


Joonis 27. Lakke kinnituv kasvulava, kus A – kinnitus kasvulava lakke riputamiseks.

3.3. Kalade kasvatuse lahendus

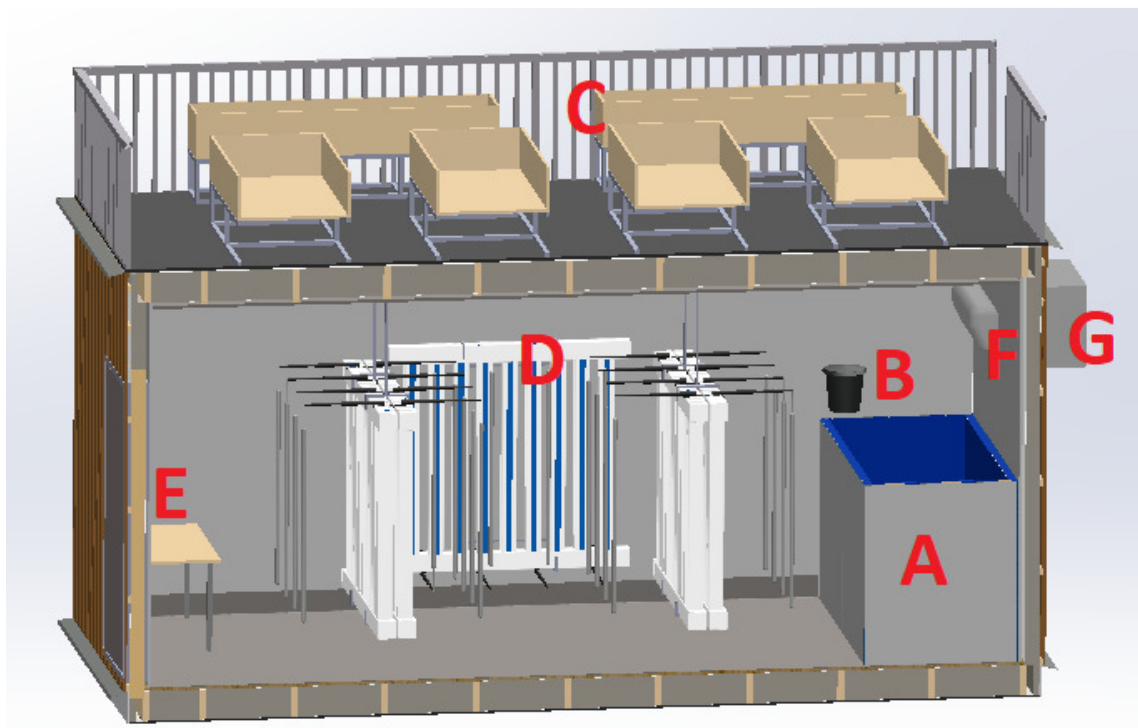
3.3.1. Akvaarium

Peatükis 2.4 tehtud analüüsi põhjal selgus, et süsteemis peab olema 2 m^3 ehk 2000 liitrit vett. Joonisel 28 on näha projekteeritud akvaariumi sisemised mõõtmed. Antud mõõtude põhjal mahutab akvaarium 1956 liitrit vett. Lisades sellele ringluses oleva vee, võib võtta veekoguse ligikaudseks 2 m^3



Joonis 28. Akvaariumi sisemised mõõdud.

Kalu toitma on valitud Fish Mate P7000 Automatic Pond Feeder [26], mis töötab patareidel. Toitja kinnitub seina külge kalade mahuti kohale, nagu on näha joonisel 28.



Joonis 29. Komponentide paigutus hoones, kus A – kalade mahuti, B – kalade toitja, C – katuse kasvulavad, D – hüdroponilised kasvulavad, E – töölaud, F – õhksoojuspump, G – õhksoojuspumba väline element.

3.3.2. Akvaariumi veepump

Pump valiti parameetritel, et vett on vaja tõsta vähemalt 2 meetrit ning vee ringlusmaht peaks olema võrdeline kogu süsteemi mahuga ühes tunnis. Ehk kahe tonnise akvaariumi puhul peaks pumba tootlikkus olema 2 t vett tunnis. Arvestades riskiteguriks 2, sobib süsteemile pump ECO EP 8 000 [27], mille voolukiirus 2 m vee tõstmise puhul on 4 kuupmeetrit tunnis.

Tabel 4. Veepumba ECO 8 000 olulised parameetrid.

Võimsus	Max. Tootlikkus	Max. Tõstevõime
70 W	8000 l / h	4.5 m

3.4. Tehnilised kommunikatsioonid ja automaatika

3.4.1. Akvapoonilise kasvuhoone hoone küte

Peatükis 1 tehtud analüüsisist näeb, et küttevajadus on hoonel 900 W. Selle vajaduse rahuldamiseks valiti õhksoojuspump Fuji Electric RSG12LUCA / ROG12LUC. Antud õhksoojuspumba kasutegur kütmisel (COP arv) on 4.3 ja jahutamisel (EER) on 3.87. Antud üledimensioneeritud valik garanteerib võimekuse ka ekstreemsete temperatuurimuutuste puhul.

3.4.2. Andurid ja mõõdetavad suurused

Eelnevalt analüüsiti süsteemi erinevaid parameetreid, ning milliseid suuruseid on vaja mõõta. Selle põhjal valiti välja sobivad andurid, ning nende väljundsuurused, mille põhjal on võimalik valida sobilik kontrollid. Andurid on esitatud tabelis 4.

Tabel 5. Süsteemi paigaldatavad andurid

	Nimetus	Väljund
Õhu temperatuur	EE181-L Air Temperature and Relative Humidity Sensor	0 .. 1 V dc
Õhu niiskus	EE181-L Air Temperature and Relative Humidity Sensor	0 .. 1 V dc
Õhu CO2	Honeywell Carbon Dioxide Sensor	0/2..10 V dc @ 5kΩ, 0/ 4..20 mA @ 500Ω
Vee temperatuur	DS18B20	3,3 V dc / 5 V dc
Vees lahustunud hapnik	Gravity: Analog Dissolved Oxygen Sensor	0..3.0 V dc
Vee elektrijuhtivus	Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor	0..3.4 V dc
Vee CO2	EIDUSA OEM Gas sensing ISE Electrode	2,5 V dc
Vee pH	EIDUSA OEM Gas sensing ISE Electrode	2,5 V dc

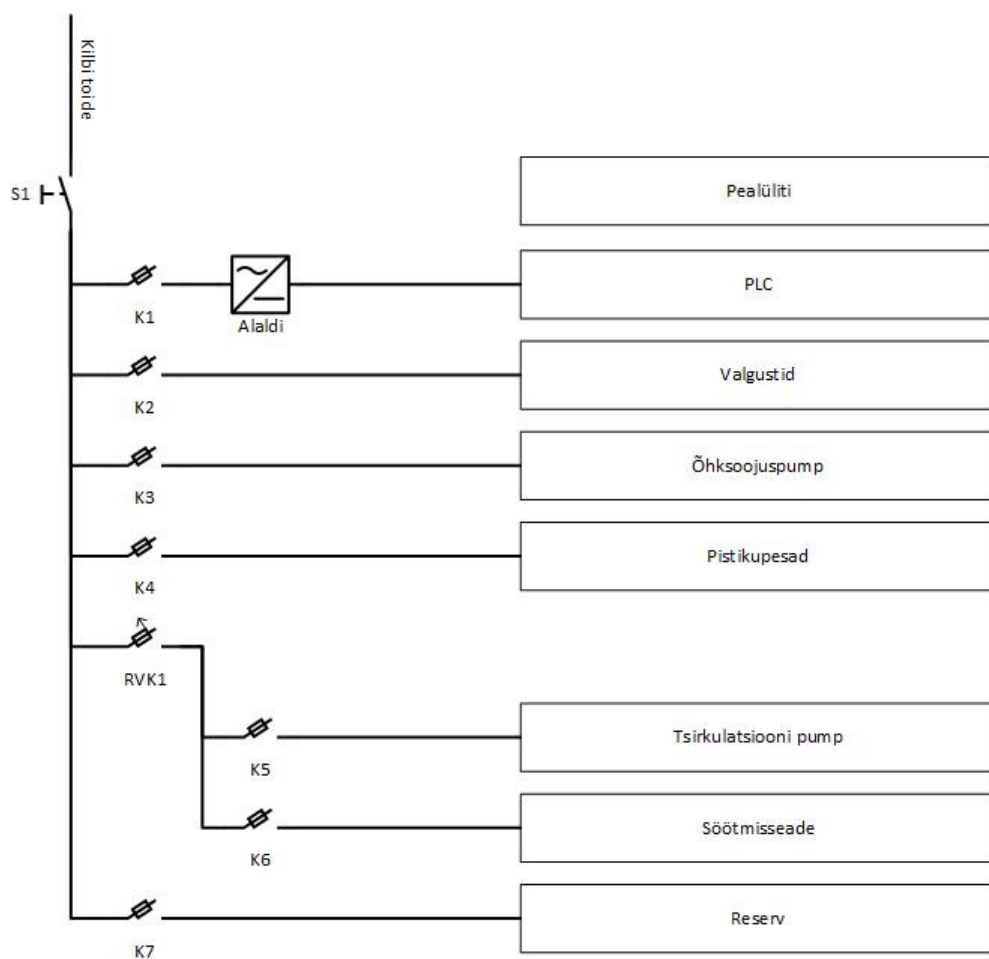
Käesolevas töös valiti sobiv tööstuskontroller andurite teadaolevate väljundsignaalide põhjal.

3.4.3. Vajaliku kontrolleri valik

Kontrolleri valikut mõjutas potentsiaalsete klientide soov teha süsteemile kaugseiret, ning kogu arendusprotsessi lihtsustaks tööstuskontroller, mis juba võimaldaks kohandatud veebilehekülgede tegemist ja nendes andmete uuendamist. Samuti määras kontrolleri valikut olemasolevate andurite väljundväärtused. Sobivaks valiti Siemensi SIPLUS S7-1200 CPU 1214FC DC/DC/RLY kontroller.

3.4.4. Elektrikilp

Vastavalt akvapoonilise kasvuhoone vajadustele projekteeriti ka kilp, mille skeemi on näha joonisel 30.



Joonis 30. Seadme kilbi skeem.

Lähtuti hetkel voolu tarbivatest seadetest, jättes ruumi ka uute tarbijate tarvis.

3.5. Edaspidised arendustegevused

3.5.1. Valgustuse automaatika

Kuna erinevate taimede elutsüklites on valgusvajadus erinev, ei ole soovitatav kasutada staatilist lahendust. Hetke lahendus töötab 14 tundi pideva valguse peal, ning on fikseeritud kaugusel taimedest. Kuna valgustugevus käitub pöördruutvõrdeliselt sõltuvalt valgusallika kaugusest pinnaga, millele valgus paistab, on energiasäästvam hoida madala võimsusega valgusallikas taimele võimalikult ligidal. See tähendab, et ka valgusallikast tulenev soojuskiirus ei tohiks kahjustada taime ning valgustugevus ei tohi olla taime jaoks liiga intensiivne.

3.5.2. Küttesüsteem

Hetkel valitud lahendus on valitud toetudes olemasolevate väikemajade lahendustest, ning analoogse küttevajaduse järgi, ligikaudu 50 W ruutmeetri kohta. Kuna projekteeritud hoones on tunduvalt kõrgem niiskus kui keskmises väikemajas, võib olla erinev lahendus vajalik.

Samuti, kuna on pidev õhuringlus, ehk vaja tuua sisse kas kõrgema CO₂ tasemega välisõhk, või sellega õhu rikastamine, näiteks biogaasi põletamise teel.

3.5.3. Akvapoonikasüsteemi SCADA

Antud töö raames ei käsitletud akvapoonikasüsteemi SCADA lahendust, ning sensoritel põhinevate andmete käsitlemist. On võimalik, et süsteemile peaks lisanduma ka otseülekanal põhinev kaugseire võimalus, samuti mobiilirakendus süsteemi parameetrite jälgimiseks.

KOKKUVÕTE

Antud töös projekteeriti akvapooniline kasvuhuone tootmismahuga 400 kg lehtköögivilja ja 100 kg kala aastas. Antud hoone suudab arvutuste põhjal rahuldada osa viieliikmelise perekonna igapäevasest toidunõudlusest. Töö käigus õppis autor väikemajade ehitusest ning arenes mõõdukalt ehitusinseneeria valdkonnas. Hoone eesmärk pole tagada odavamat alternatiivi köögiviljadele, vaid garanteerida aastaringne ligipääs värsketele ja puhtale kõrgkvaliteetsele toodangule. Projekteeritud akvapoonilise kasvuhuone poolne tootmine on võimalik ka põhjamaises kliimas. Kasvuhuone välised mõõtmed on ligikaudselt 3 meetrit korda 6 meetrit, jäädes põhjapinnaga alla 20 m². Kasvatamiseks valiti kaladeks karpkala (*Cyprinus carpio*). Köögiviljadeks valiti tomatid, lehtkapsas, spinat, basiilik ja nendele lisaks ka maasikad. Hoone karkass on metallraami külge kinnituv puitsõrestik. Hoone sisepind on kasutatav nii taimede ja kalade kasvatamiseks. Samuti on võimalik hooajasiseselt kasvatada erinevaid taimi ka katusel. Projekteeritud akvapooniline kasvuhuone on teisaldatav, ei vaja paigaldamisel ehituslubasid ega teatise. Olulisemad punktid, mis ootavad lahendust on valguse automaatika, akvapoonilise süsteemi SCADA arendus ning kütte automaatika, mis kõik kokku arvestaksid vajalikku tootlikkust, kasvavaid taimesorte ja kalaliike, ning võtaks arvesse taimede kasvufaasi.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] *The Cucurbits of Mediterranean Antiquity: Identification of Taxa from Ancient Images and Descriptions*. Janick, Jules, Paris, Harry S. ja Parrish, David C. 7, s.l. : Oxford University Press (United Kingdom), 2007. a., Kd. 100.
- [2] *Fruit, vegetable, and legume intake, and cardiovascular disease and deaths in 18 countries (PURE): a prospective cohort study*. Victoria Miller, BSc, et al. 10107, The Lancet, Kd. 390, lk 13.
- [3] *The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City*. Al-Kodmany, Kheir. 02. Mai 2018. a., Buildings.
- [4] *Sustainable Agriculture Reviews Vol. 14 (lk. 449-508)*. El-Ramady, Hassan, et al. s.l. : Springer International Publishing Switzerland, 2014/10/11. a., Kd-d Plant Nutrition: From Liquid Medium to Micro-farm.
- [5] *Aquaculture: a rapidly growing and significant source of sustainable food? Status, transitions and potential*. Little, David & Newton, Richard & Beveridge, Malcolm. 2016. a., Proceedings of the Nutrition Society., lk 274-286.
- [6] ECOLIFE Conservation ECO-Cycle Aquaponics Indoor Garden System with LED Light Upgrade . *ebay*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. May 2020. a.] https://www.amazon.com/Ecolife-ECO-Cycle-Aquaponics-Indoor-Upgrade/dp/B00LMMNVWO?ref_=fsclp_pl_dp_1.
- [7] Commercial Aquaponic Systems. *Nelson and Pade aquaponics*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 16. Mai 2020. a.] <https://aquaponics.com/aquaponic-systems/commercial-systems-3/>.
- [8] Triin Marandi, MSc. Fotosüntees. *Bioloogia õppematerjalid gümnaasiumile*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 4. May 2020. a.] <https://kodu.ut.ee/~triinm/bioloogia/fotosntees.html>.
- [9] Loodusained II, fotosüntees. *Pärnumaa Kutsehariduskeskus*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 8. Mai 2020. a.] https://www.hariduskeskus.ee/opiobjektid/loodusained/?RAKU%C3%95PETUS__T_AIME-_JA_LOOMARAKK__Fotos%C3%BCntees.

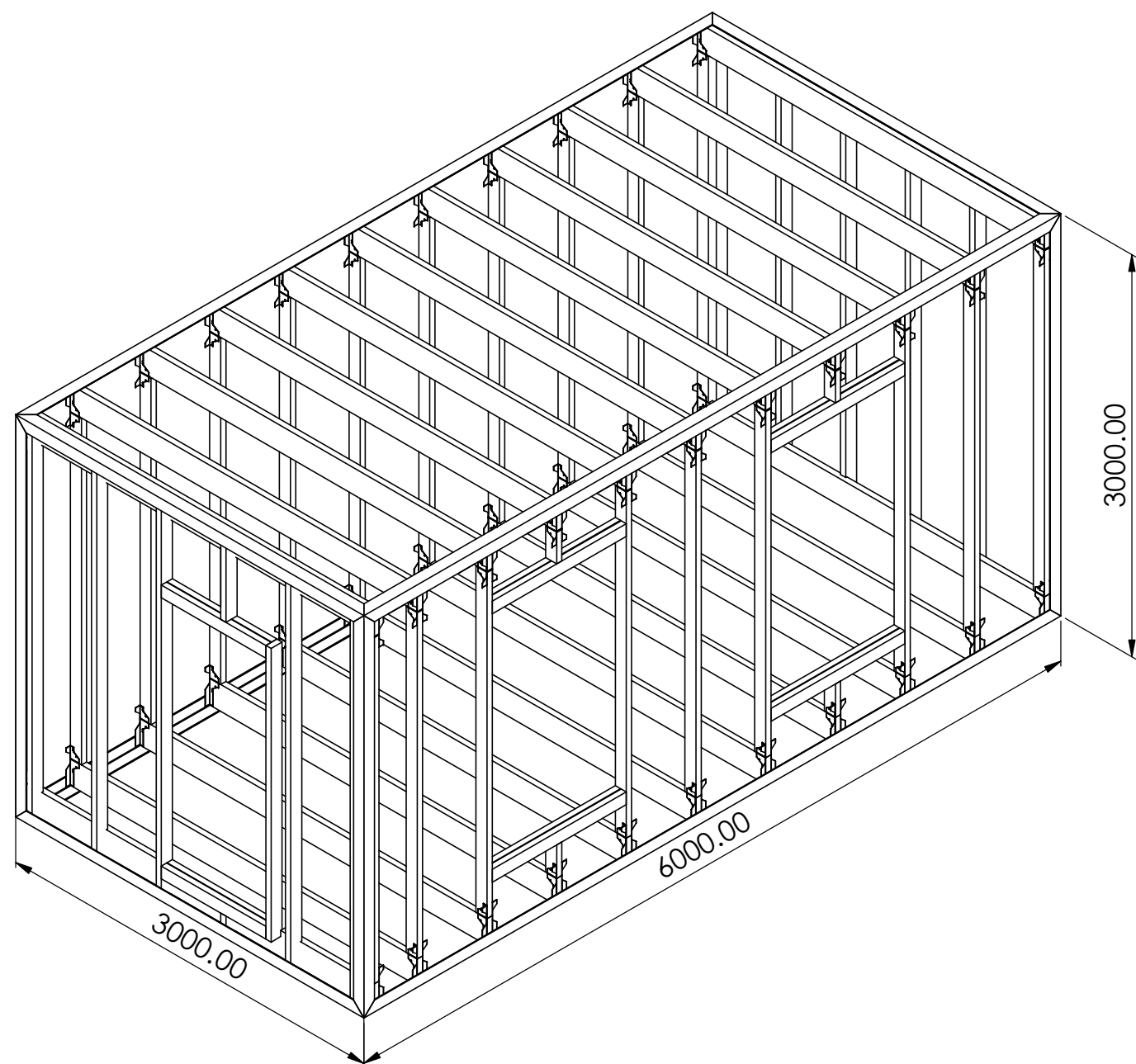
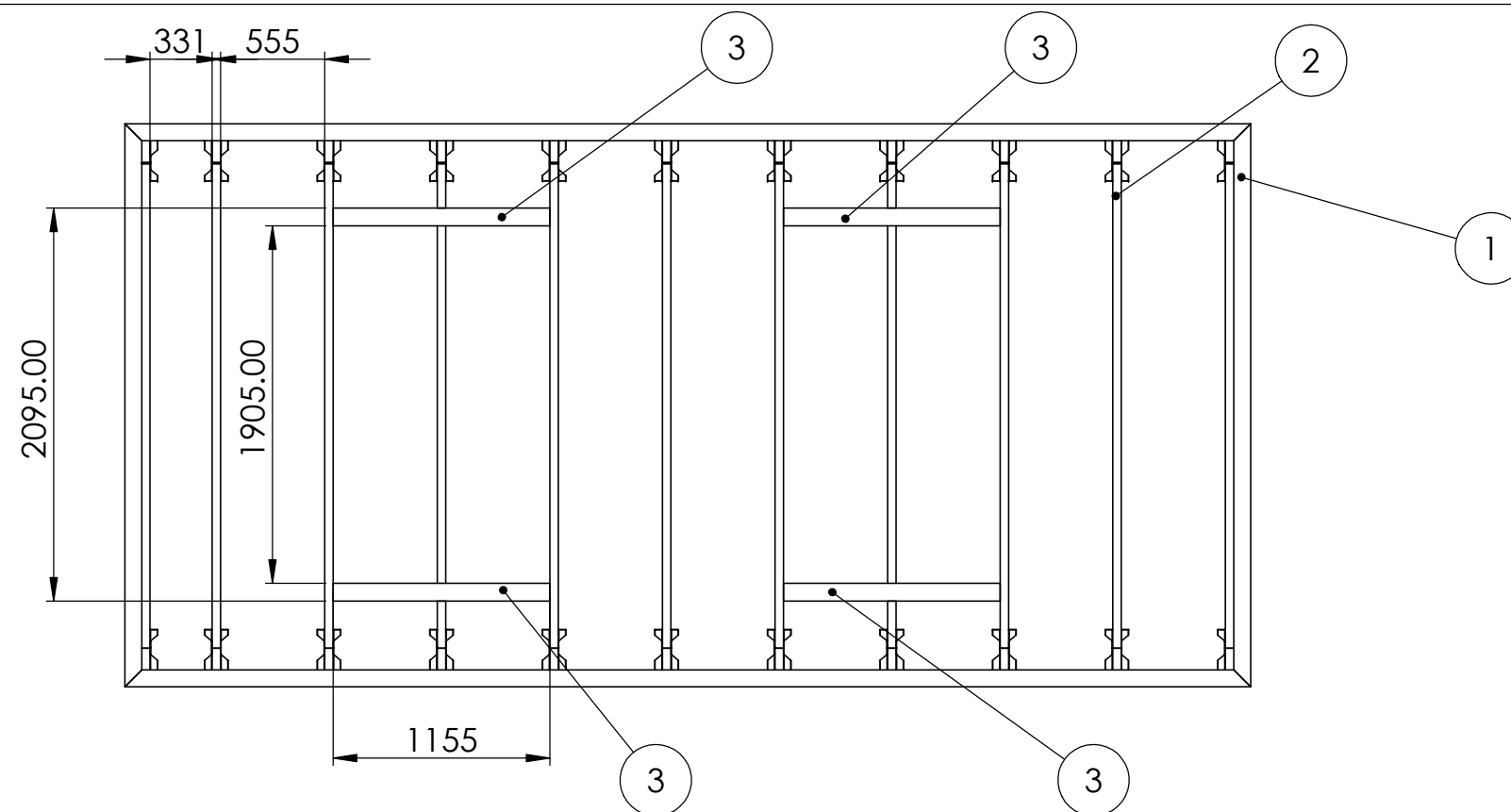
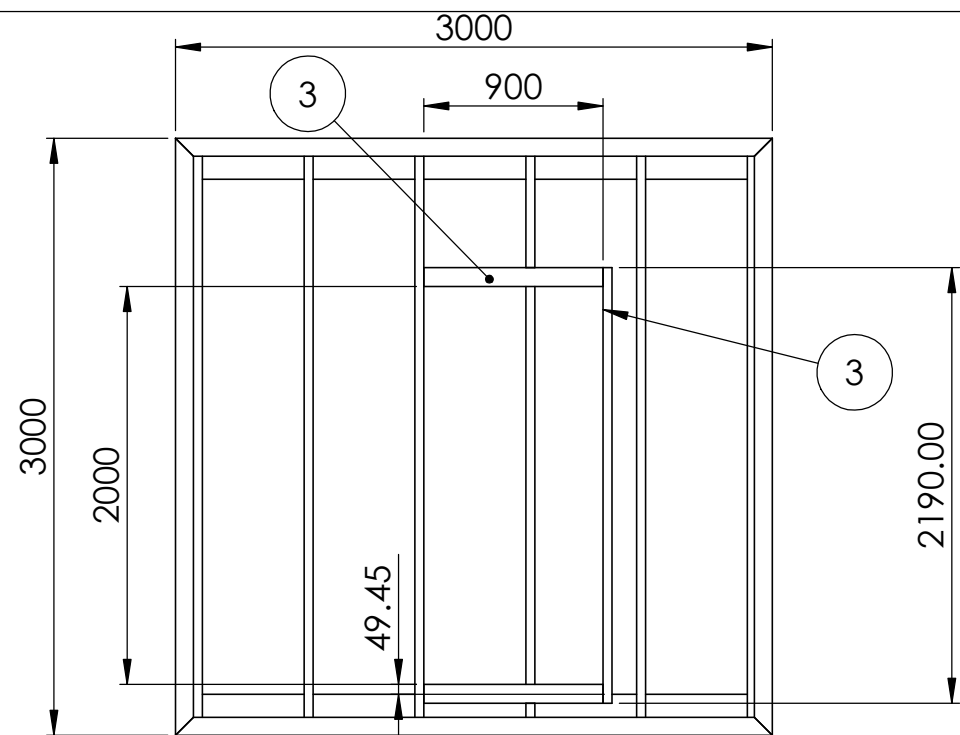
- [10] NUGL Media Group. Parameters for Hydroponic Nutrient Solutions. *Garden & Greenhouse*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 4. May 2020. a.] <https://www.gardenandgreenhouse.net/articles/december-2017/parameters-hydroponic-nutrient-solutions/>.
- [11] Otsus, Andro. Väetamisõpetus. *Luuu Metsanduskool*. [Võrgumaterjal] 2004. a. [Tsiteeritud: 14. Aprill 2020. a.] <https://www.luuu.ee/userfiles/oppetoo/oppematerjal/maastik/vaetamisopetus.pdf>.
- [12] *FROM ELECTRON TO BIOMASS: A MECHANISTIC MODEL TO DESCRIBE PHYTOPLANKTON PHOTOSYNTHESIS AND STEADY-STATE GROWTH RATES*. Kroon, Bernd M. A. ja Thoms, Sike. 42 593–609 (2006), s.l. : Phycological Society of America, 2006. a., Kd. J. Phycol. 0.1111/j.1529-8817.2006.00221.x.
- [13] Koning, Ross E. Light. *Plant Physiology Information Website*. [Võrgumaterjal] 1994. a. [Tsiteeritud: 12. Aprill 2020. a.] http://plantphys.info/plant_physiology/light.shtml.
- [14] Olli, Kalle. Lämmastikuringe. *Tartu Ülikooli Botaanika Osakond*. [Võrgumaterjal] 12. Jaanuar 2010. a. [Tsiteeritud: 9. Aprill 2020. a.] <https://moritz.botany.ut.ee/~olli/eutrdoc/RingeN.pdf>.
- [15] Crop Guide: Growing Strawberry. *Haifa Group*. [Võrgumaterjal] 2004. [Tsiteeritud: 9. May 2020. a.] <https://www.haifa-group.com/crop-guide/vegetables/strawberry-fertilizer/crop-guide-growing-strawberry>.
- [16] Plants. *QuickCrop*. [Võrgumaterjal] QuickCrop. [Tsiteeritud: 19. Aprill 2020. a.] <https://www.quickcrop.ie/learning/plants>.
- [17] An Introduction to Vapor Pressure Deficit . *Ceres Greenhouse Solutions*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 3. May 2020. a.] <https://ceresgs.com/an-introduction-to-vapor-pressure-deficit/>.
- [18] CO2 Enrichment. *Hydroponics - Indoor Horticulture*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 7. May 2020. a.] <https://www.hydroponicist.com/pages/p77-co2-enrichment.htm>.
- [19] Bregnballe, Jacob. *A guide to recirculating aquaculture*. s.l. : The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and EUROFISH International Organisation, 2015.
- [20] Ginter, Kai, et al. *Kalakasvatus - Perspektiivsed liigid*. Pärnu : Kalanduse teabekeskus, 2015.

- [21] Euroopa Komisjon. Karpkala. *Euroopa Komisjon*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. Mai 2020. a.]
https://ec.europa.eu/fisheries/marine_species/farmed_fish_and_shellfish/carp_et.
- [22] Carp Fish Feed. *Alltech Coppens*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 2. May 2020. a.]
<https://www.alltechcoppens.com/en/industrial/carp>.
- [23] Dimensions of Angle steel Equal NEN-EN 10025-1/2. *Wermac*. [Võrgumaterjal]
 Wermac. [Tsiteeritud: 6. Mai 2020. a.]
http://www.wermac.org/steel/dim_angle_eq.html.
- [24] Folding stairs to wall 45° S. *Mezzanines Hong Kong*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud:
 16. Mai 2020. a.] <https://www.mezzanineshongkong.com/folding-stairs-to-wall-45-s>.
- [25] Clean smooth plastic channel Appearance&Color and Zip grow channel Other name hydroponic systems tower . *alibaba*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17. Mai 2020. a.]
https://www.alibaba.com/product-detail/Clean-smooth-plastic-channel-Appearance-Color_62445833295.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.176d1628a9bLZW.
- [26] FISH MATE P7000 AUTOMATIC POND FOOD FEEDER HOLIDAY NEW AUTO. *ebay*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 8. May 2020. a.]
https://www.ebay.com/itm/FISH-MATE-P7000-AUTOMATIC-POND-FOOD-FEEDER-HOLIDAY-NEW-AUTO/161946829555?_trkparms=aid%3D1110007%26algo%3DHOMESPLICE.DIS%26ao%3D1%26asc%3D20200220090753%26meid%3D3ff2e89bfccd420d948edb8dc0fc458e%26pid%3D100009%26rk%3D1%26rkt%3D1%.
- [27] *happet.eu*. *Pump-ECO-EP 8000*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 16. Mai 2020. a.]
<http://happet.eu/pompy-pompa-energooszczedna-eco-ep-8000,c6,p81,o1,s1001,en.html>.
- [28] Somerville, C., et al. Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. *Food and Agriculture Organization of the United nations*. [Võrgumaterjal] 2014. a. [Tsiteeritud: 12. April 2020. a.] <http://www.fao.org/3/a-i4021e.pdf>. 978-92-5-108532-5.
- [29] Cheung, Professor Peter Y. K. Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College of London. *Introduction to Electronic Circuits, Sensors & Mechatronics*. [Võrgumaterjal] 2020. a. [Tsiteeritud: 7. Aprill 2020. a.]
http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf.

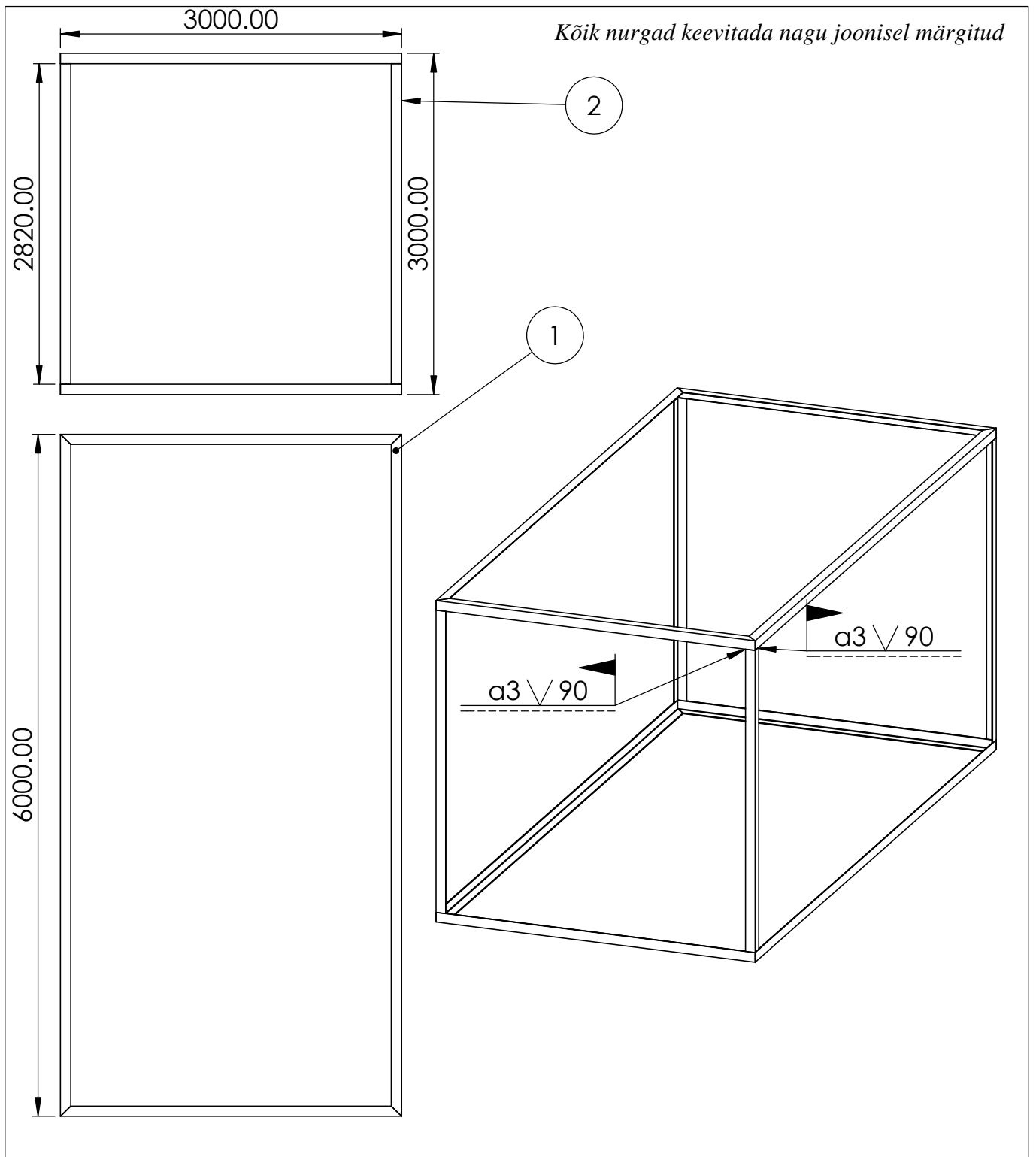
[30] ECOLIFE Conservation ECO-Cycle Aquaponics Indoor Garden System with LED Light Upgrade . *ebay*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. May 2020. a.] https://www.amazon.com/Ecolife-ECO-Cycle-Aquaponics-Indoor-Upgrade/dp/B00LMMNVWO?ref_=fsclp_pl_dp_1.

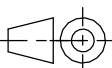

LISAD

LISA A

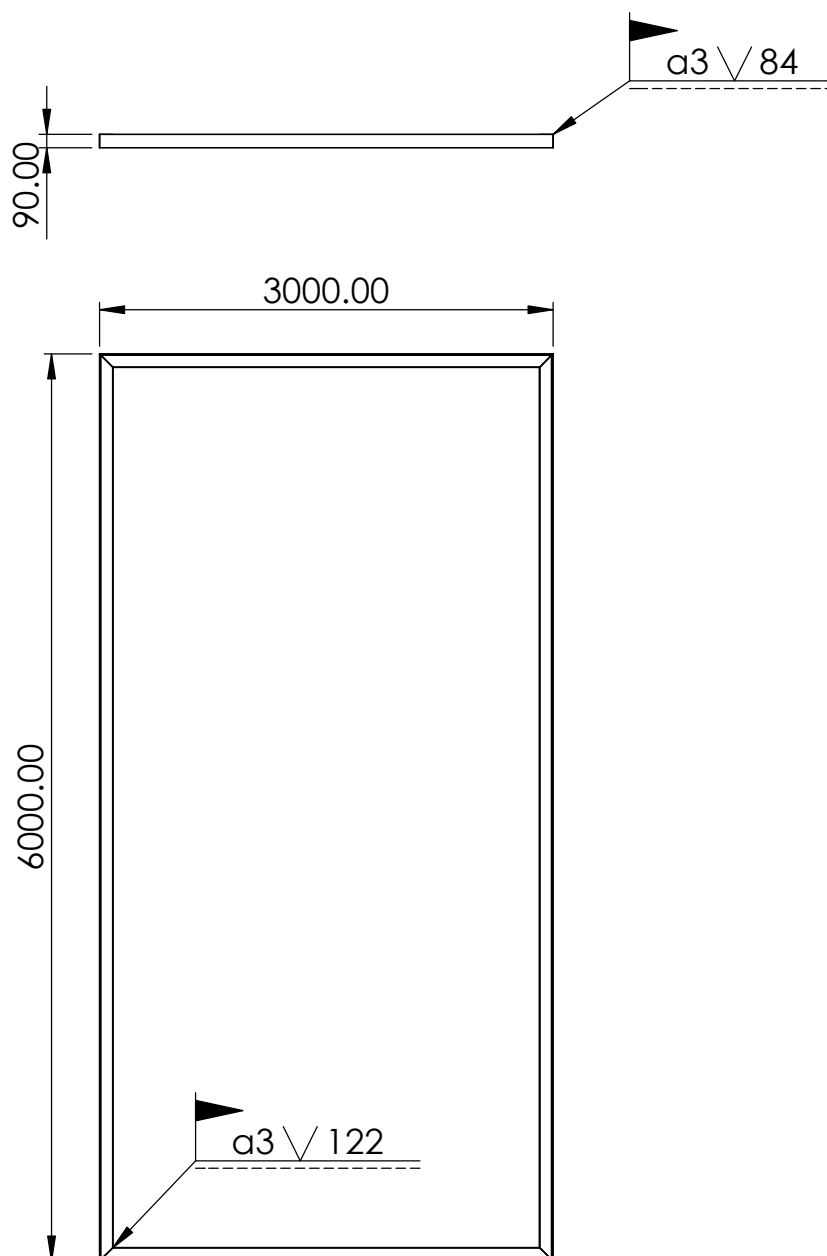


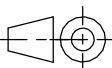

3	45 x 95 Hõõveldatud ja immutatud pruss	Ostukomponent	13		
2	Prussidest raam	TN 20 / 150214 A 03 00 K	11		
1	Nurkrauast raam	TN 20 / 150214 A 02 00 K	1		
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal: Erinevad	Näitamata piirhälbed: DIN ISO 2768 m	Mass: 760 kg	Mõõt: 1:38
Teostas	Mart Traagel	Nimetus: Akvapoonilise kasvuhoone hoone raam koos prussidega			
Kontrollis	Kaarel Soots				
Kinnitas	Kaarel Soots				
		Leht: 1	Tähis: TN 20 / 150214 A 01 00 K		

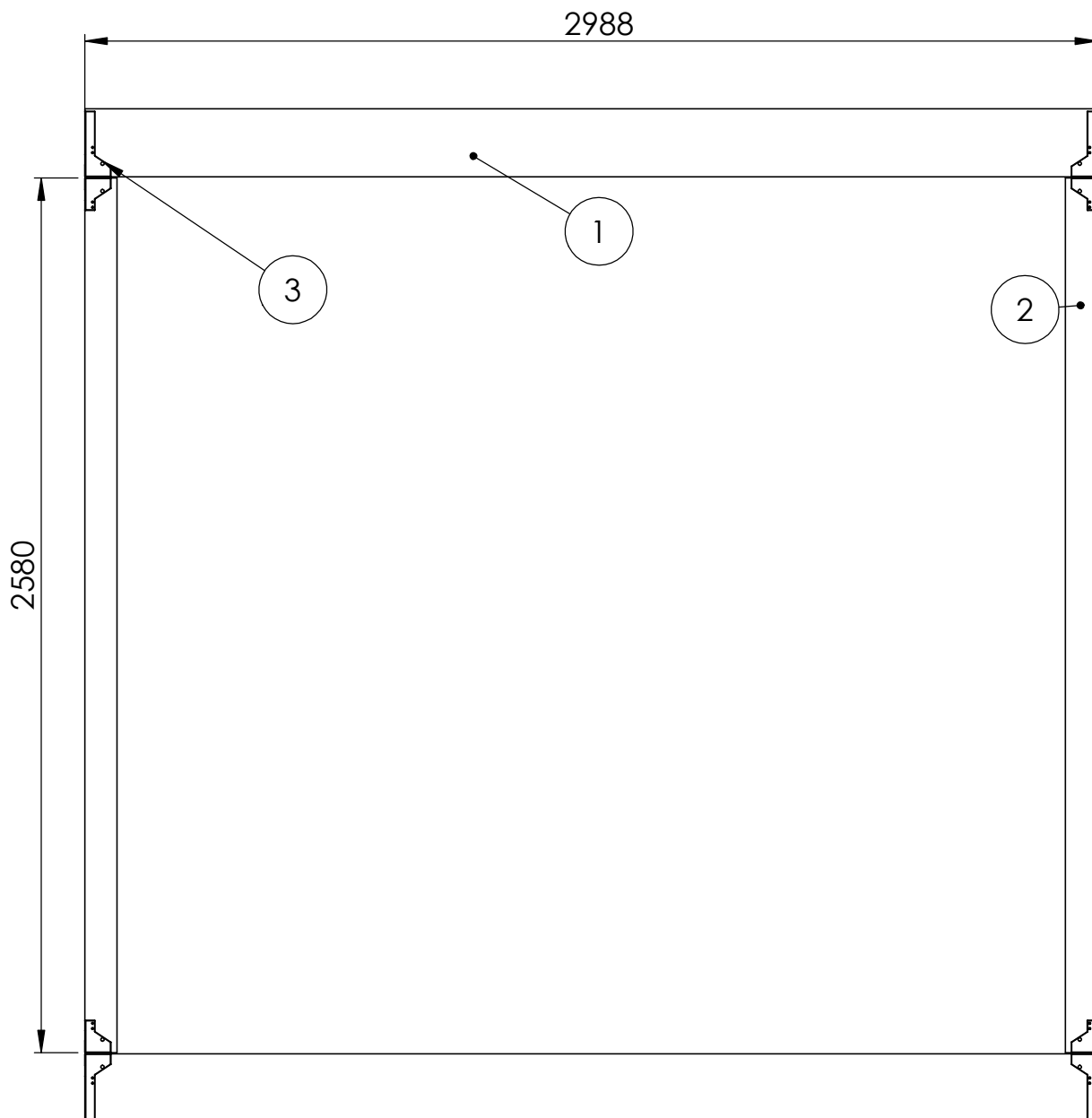


2		90 x 90 x 6 nurkraud, EN 10056, l=2,82 m	ostukomponent	4	otsad 45° nurga all
1		Keevitatud 3 x 6 m raam	TN20/150214 A 02 01 K	2	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal: S235 ehitusteras	Näitamata piirhälbed: DIN ISO 2768-1 v	Mass: 382 kg	Mõõt: 1:50
Teostas	Mart Traagel	Nimetus: 3 x 3 x 6 m nurkrauast raam			
Kontrollis	Kaarel Soots				
Kinnitas	Kaarel Soots				
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tartu Tehnikakolledž Terza Technology College		Leht: 1	Tähis: TN20/150214 A 02 00 K		

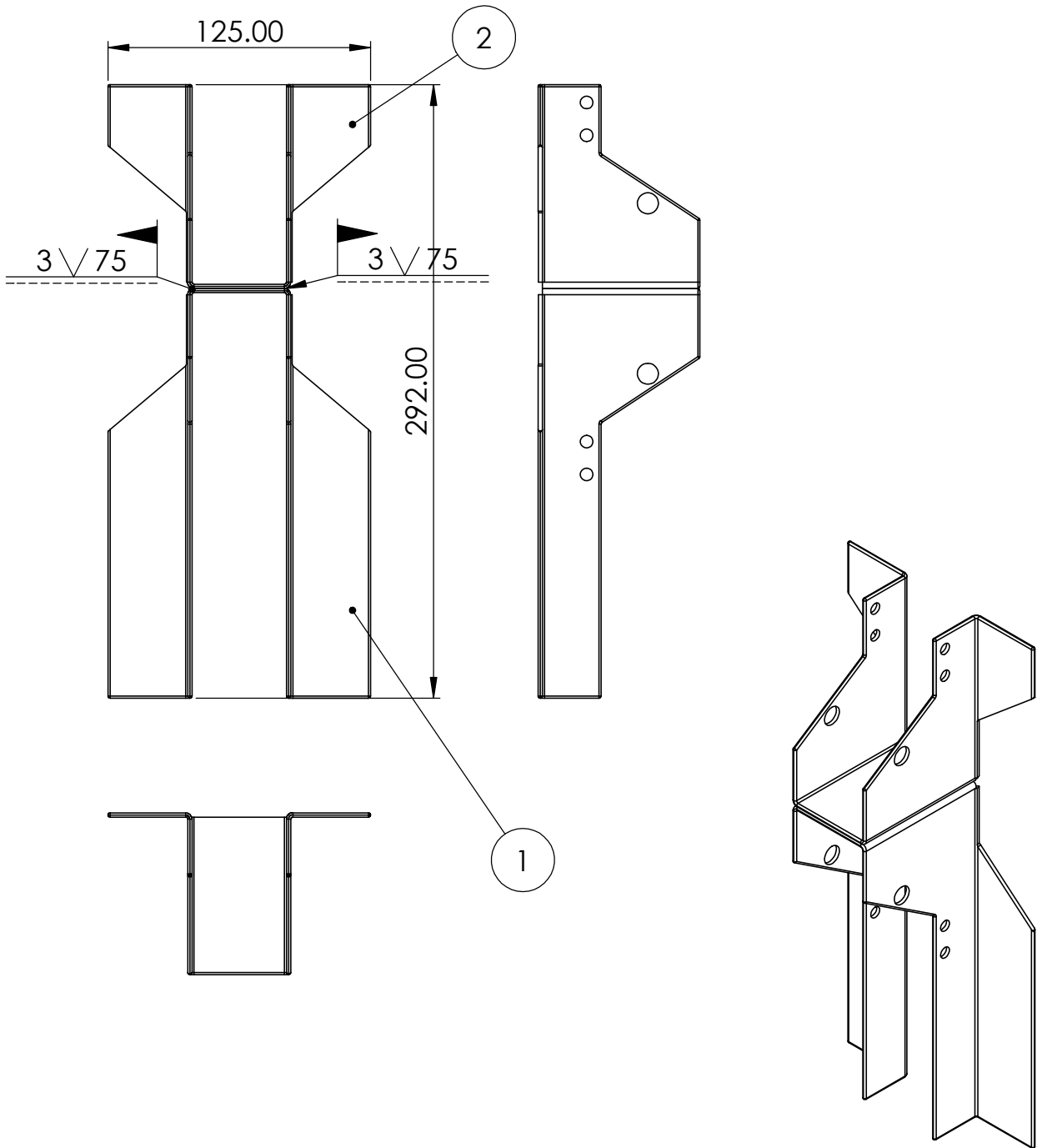
Kõik nurgad keevitada nagu joonisel märgitud

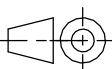



2		90 x 90 x 6 nurkraud, EN 10056, 6m	ostukomponent	2	otsad 45° nurga all
1		90 x 90 x 6 nurkraud, EN 10056, 3m	ostukomponent	2	otsad 45° nurga all
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal: S235 ehitusteras	Näitamata piirhälbed: DIN ISO 2768-1 v	Mass: 145 kg	Mõõt: 1:50
Teostas	Mart Traagel	Nimetus: Metallraami põhi ja lagi			
Kontrollis	Kaarel Soots				
Kinnitas	Kaarel Soots				
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tartu Tehnikakolledž Terza Technology College		Leht: 1	Tähis: TN20/150214 A 02 01 K		

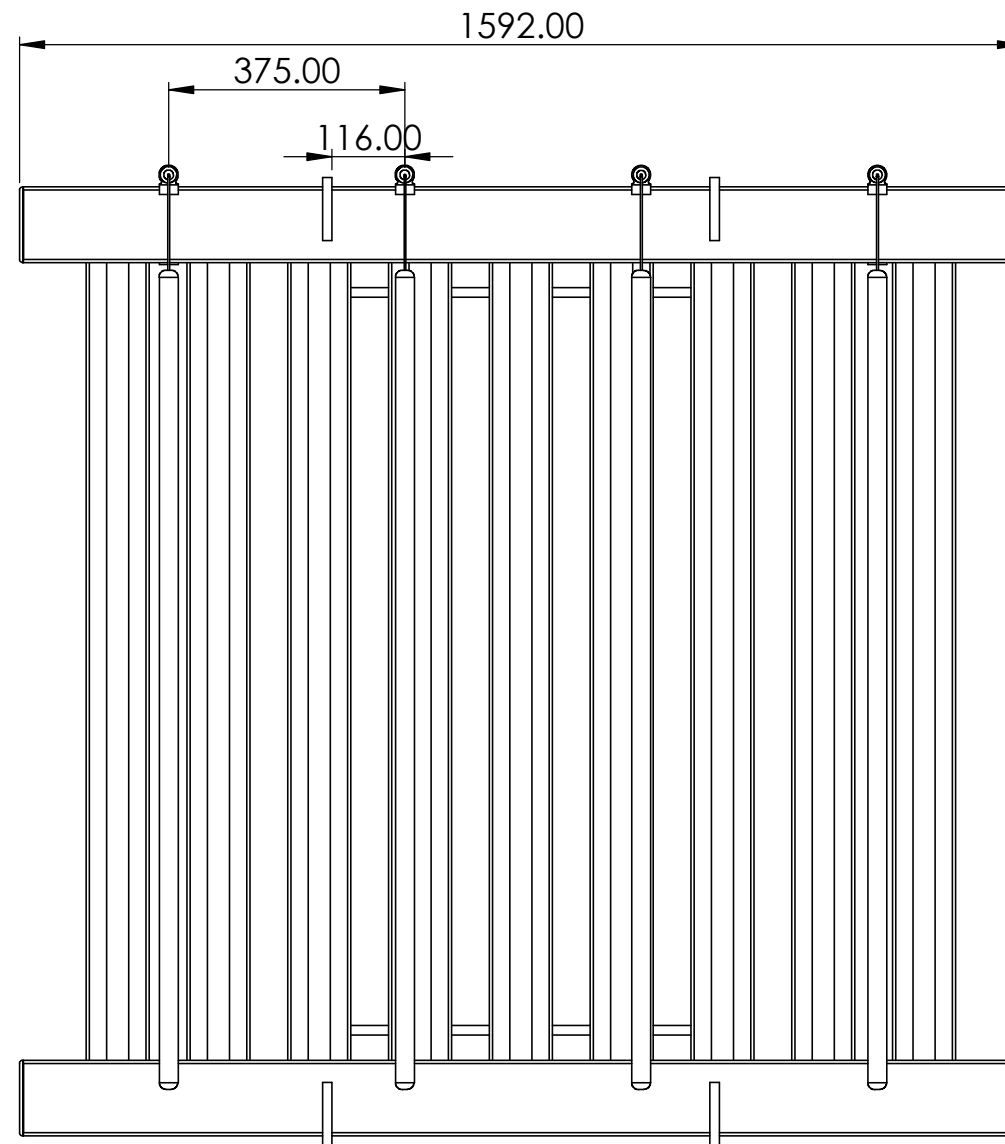
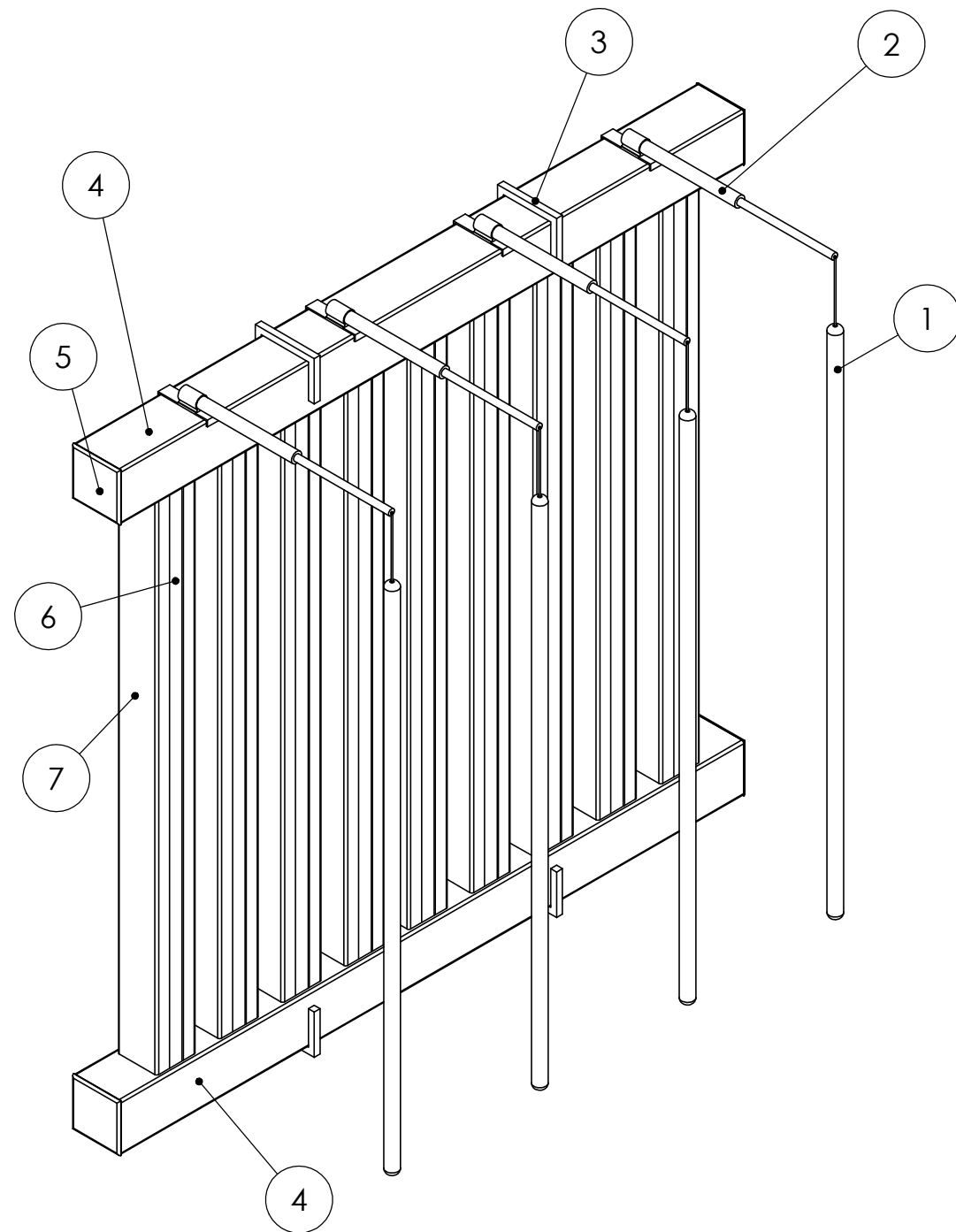



3		<i>Keevitatud prussikingad</i>	<i>TN20/150214 A 03 01 K</i>	4	
2		<i>45x90 mm immutatud pruss, l=2580 mm</i>	<i>ostukomponent</i>	2	
1		<i>45x200 mm immutatud pruss, l=2988 mm</i>	<i>ostukomponent</i>	2	
<i>Osa</i>	<i>Väli</i>	<i>Nimetus, materjal</i>	<i>Tähis</i>	<i>Hulk</i>	<i>Märkus</i>
		<i>Materjal:</i> <i>erinevad</i>	<i>Näitamata piirhälbed:</i> <i>DIN ISO 2768-1 v</i>	<i>Mass:</i> <i>28 kg</i>	<i>Mõõt:</i> <i>1:20</i>
<i>Teostas</i>	<i>Mart Traagel</i>	<i>Nimetus:</i> <i>Prussidest raam</i>			
<i>Kontrollis</i>	<i>Kaarel Soots</i>				
<i>Kinnitas</i>	<i>Kaarel Soots</i>				
		<i>Leht:</i> <i>1</i>	<i>Tähis:</i> <i>TN20/150214 A 03 00 K</i>		

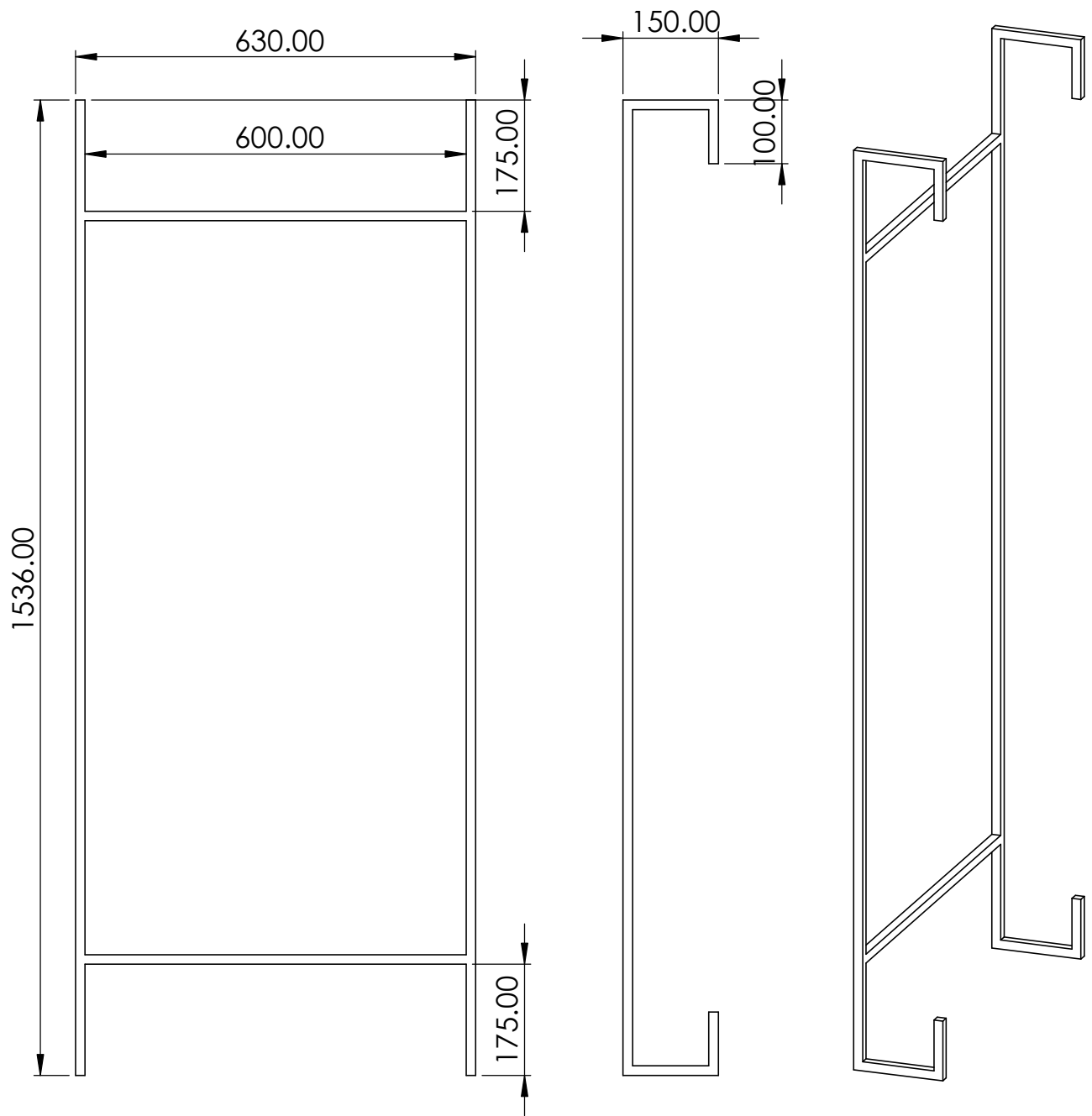


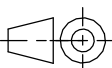

2		45x90 mm prussiking	ostukomponent	1	
1		45x200 mm prussiking	ostukomponent	1	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
	Materjal: Roostevaba teras, CE DoP9		Näitamata piirhälbed: DIN ISO 2768-1 v	Mass: 642 g	Mõõt: 1:3
Teostas	Mart Traagel		Nimetus: Keevitatud prussikingad		
Kontrollis	Kaarel Soots				
Kinnitas	Kaarel Soots				
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Tartu Tehnikakolledž Terza Technology College			Leht: 1	Tähis: TN20/150214 A 03 01 K	

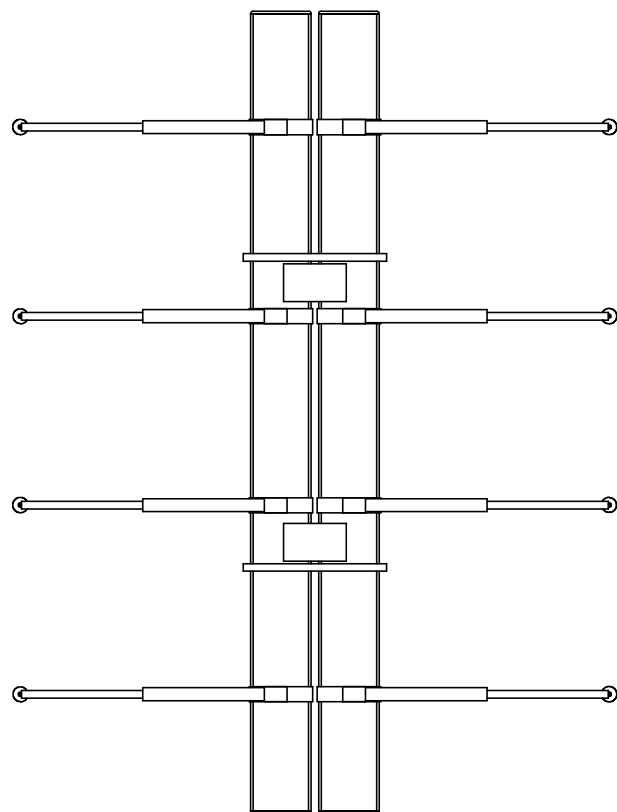
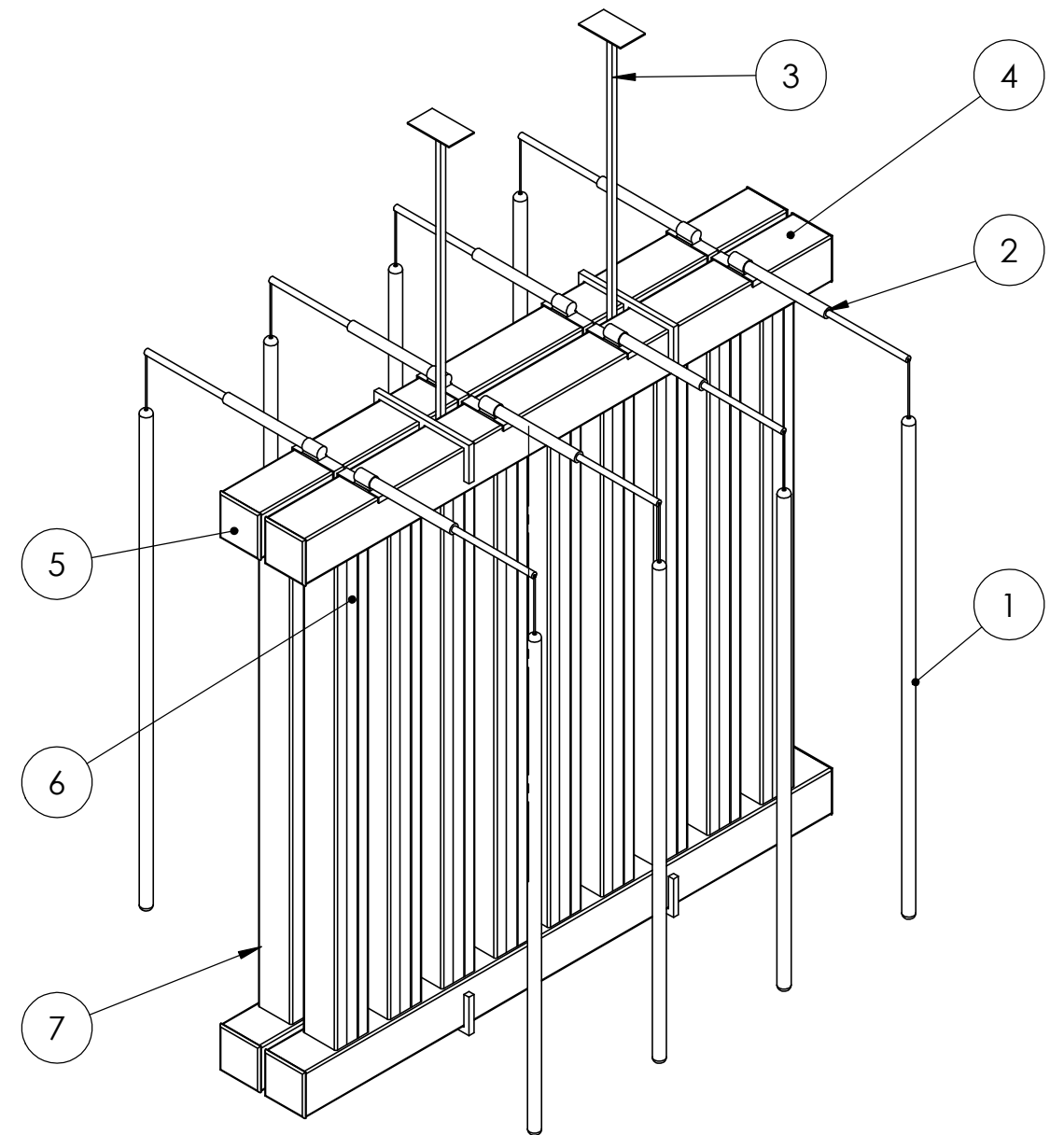
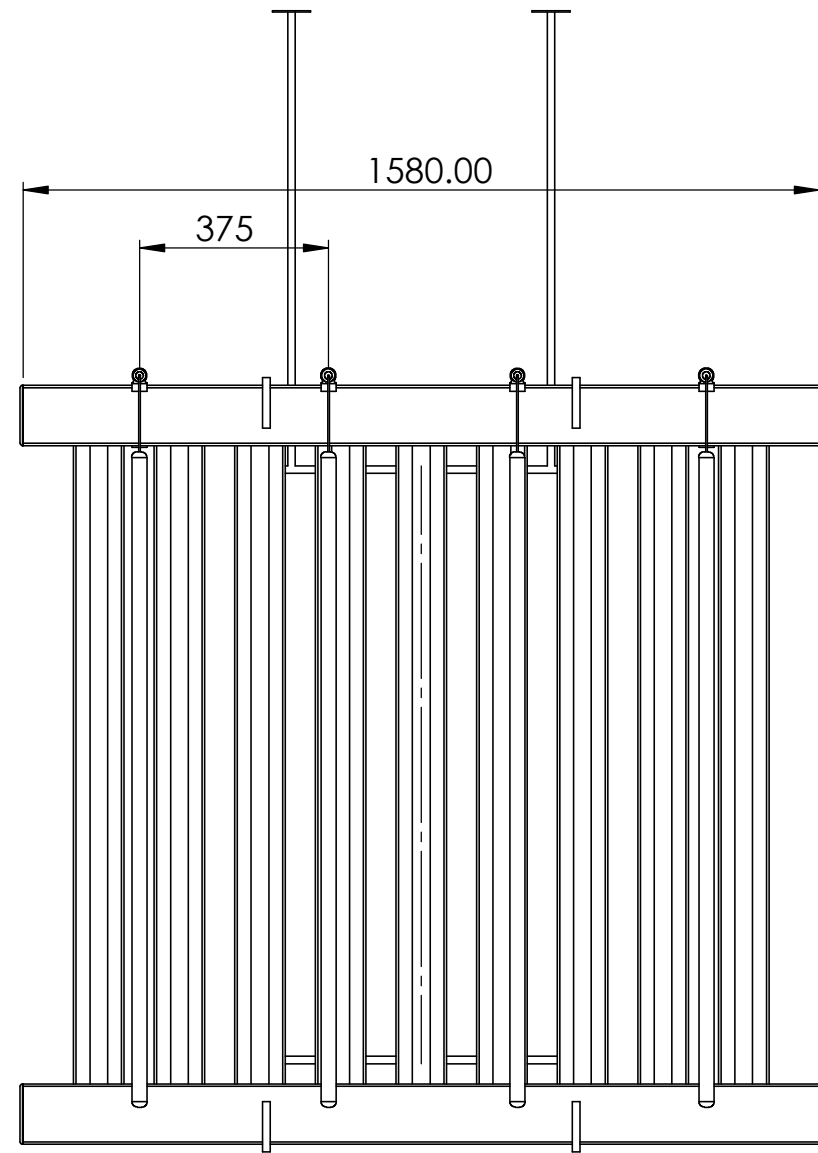
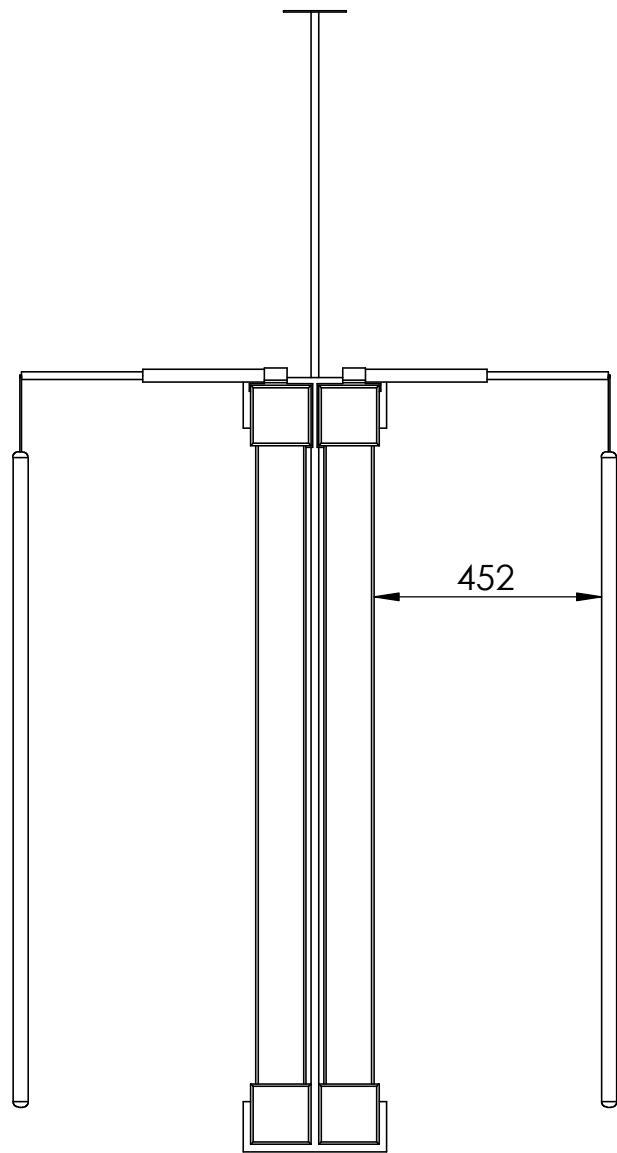
LISA B



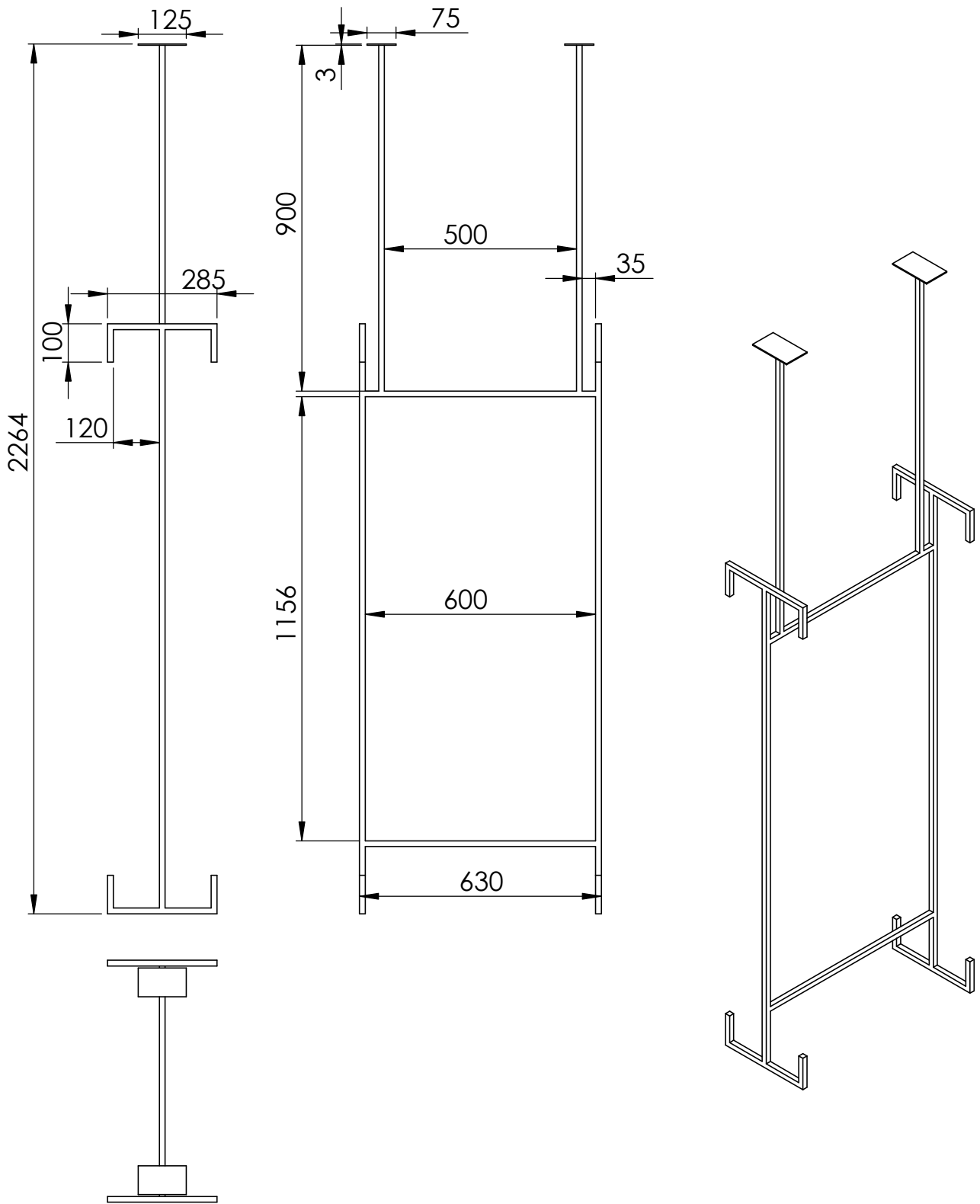
7	100 x 100 x 1500 mm, soonega nelikanntoru	Ostukomponent	9		
6	Poliüuretaanvahtust filter	Ostukomponent	9		
5	120 x 120 otsakork	Ostukomponent	4		
4	120 x 120 x 1580 mm, avadega nelikanntoru	Ostukomponent	2		
3	Raam seina külge kinnitamiseks	TN20/150214 B 01 01 K	1		
2	Teleskooporu valgusti reguleerimiseks	Ostukomponent	4		
1	120 cm T8 täisspekter LED toru 12.5 W	Ostukomponent	4		
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal: Erinevad	Näitamata piirhälbed: DIN ISO 2768 m	Mass: 8 kg	Mõõt: 1:12
Teostas	Mart Traagel	Nimetus: Seinale kinnituv taimekasvatustava			
Kontrollis	Kaarel Soots				
Kinnitas	Kaarel Soots				
			Leht: 1	Tähis: TN 20 / 150214 B 01 00 K	



	Materjal: S235JR, 15 x 15 nelikanterras EN 10059	Näitamata piirhülbed: DIN ISO 2768-1 m	Mass: 1159 g	Mõõt: 1:10
Teostas	Mart Traagel	Nimetus: Seinä külge kinnituva kasvulava raam		
Kontrollis	Kaarel Soots			
Kinnitas	Kaarel Soots			
		Leht: 1	Tähis: TN20/150214 B 01 01 K	

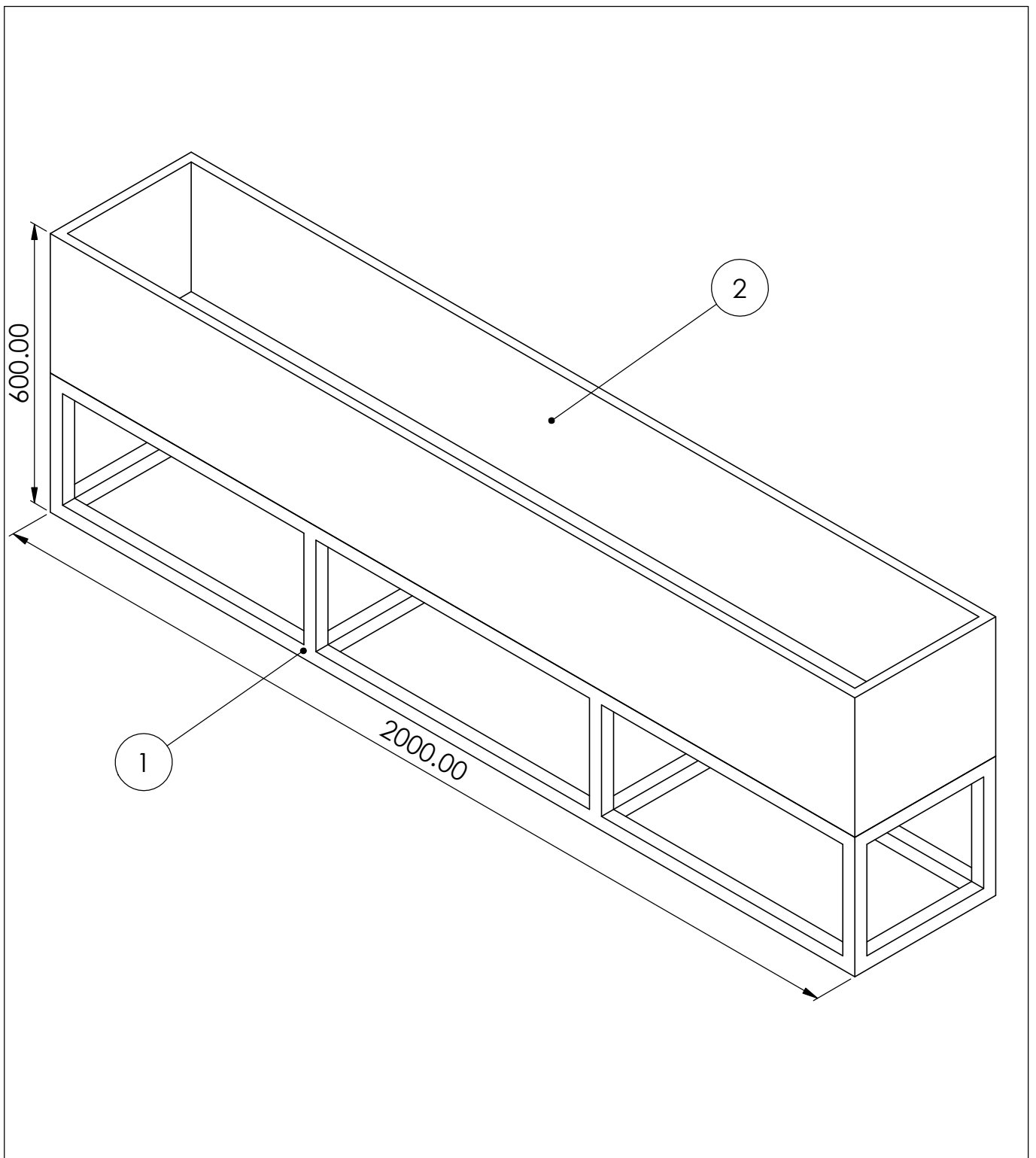


7	100 x 100 x 1500 mm, soonega nelikanttoru	Ostukomponent	18		
6	Poliüuretaanvahtust filter	Ostukomponent	18		
5	120 x 120 otsakork	Ostukomponent	8		
4	120 x 120 x 1580 mm, avadega nelikanttoru	Ostukomponent	4		
3	Raam seina külge kinnitamiseks	TN20/150214 B 02 01 K	1		
2	Teleskooptoru valgusti reguleerimiseks	Ostukomponent	8		
1	120 cm T8 täisspekter LED toru 12.5 W	Ostukomponent	8		
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal: Erinevad	Näitamata piirhälbed: DIN ISO 2768 m	Mass: 16 kg	Mõõt: 1:15
Teostas	Mart Traagel	Nimetus: Lakke kinnituv taimekasvatustalav			
Kontrollis	Kaarel Soots				
Kinnitas	Kaarel Soots				
		Leht: 1	Tähis: TN 20 / 150214 B 02 00 K		

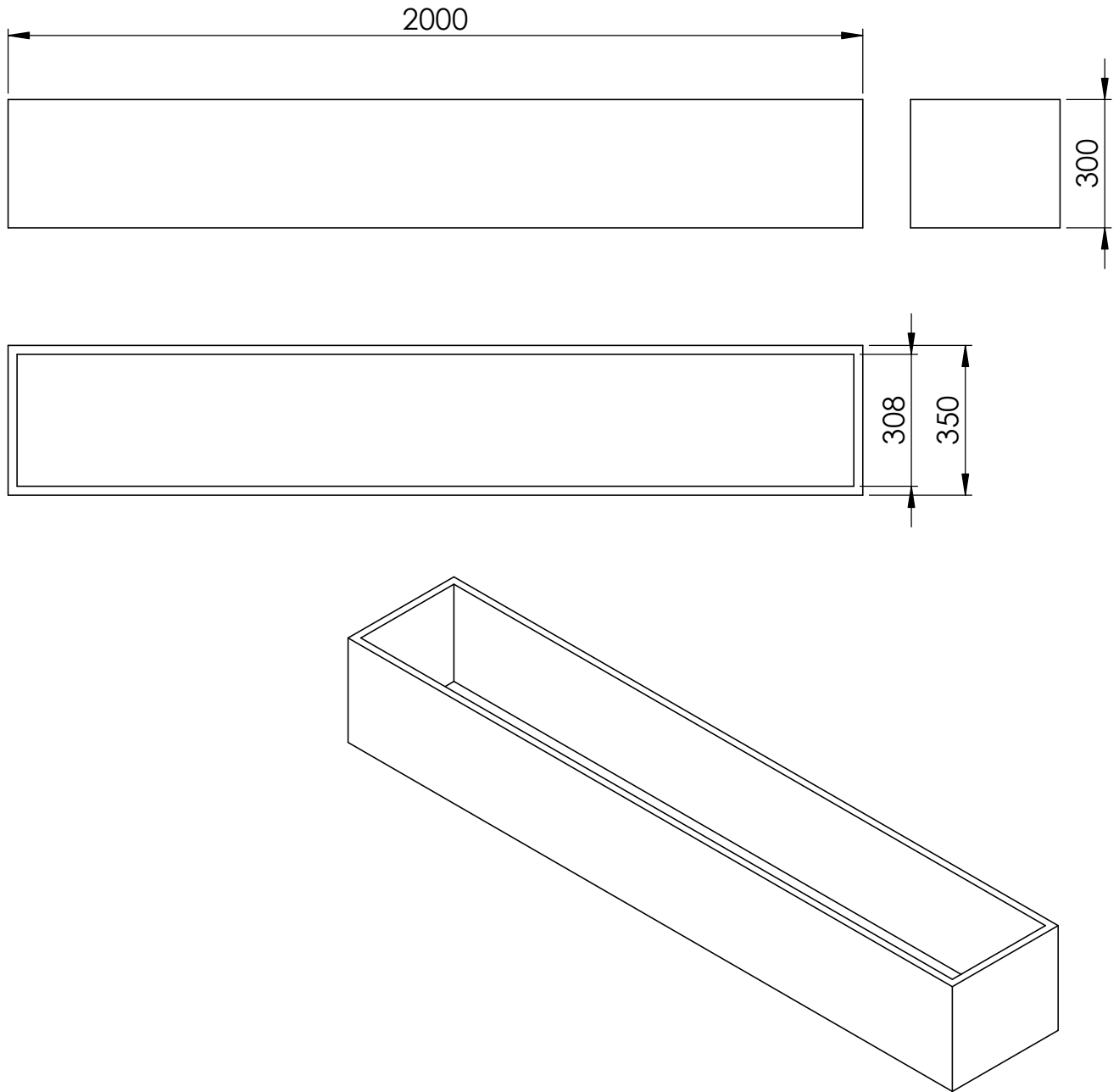


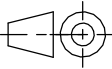

	<i>Materjal:</i> S235JR, <i>15 x 15 nelikanterras EN 10059</i>	<i>Näitamata piirhülbed:</i> <i>DIN ISO 2768-1 m</i>	<i>Mass:</i> <i>1818 g</i>	<i>Mõõt:</i> <i>1:15</i>
<i>Teostas</i>	<i>Mart Traagel</i>	<i>Nimetus:</i> <i>Lakke kinnituva kasvulava raam</i>		
<i>Kontrollis</i>	<i>Kaarel Soots</i>			
<i>Kinnitas</i>	<i>Kaarel Soots</i>			
		<i>Leht:</i> 1	<i>Tähis:</i> TN20/150214 B 02 01 K	

LISA C

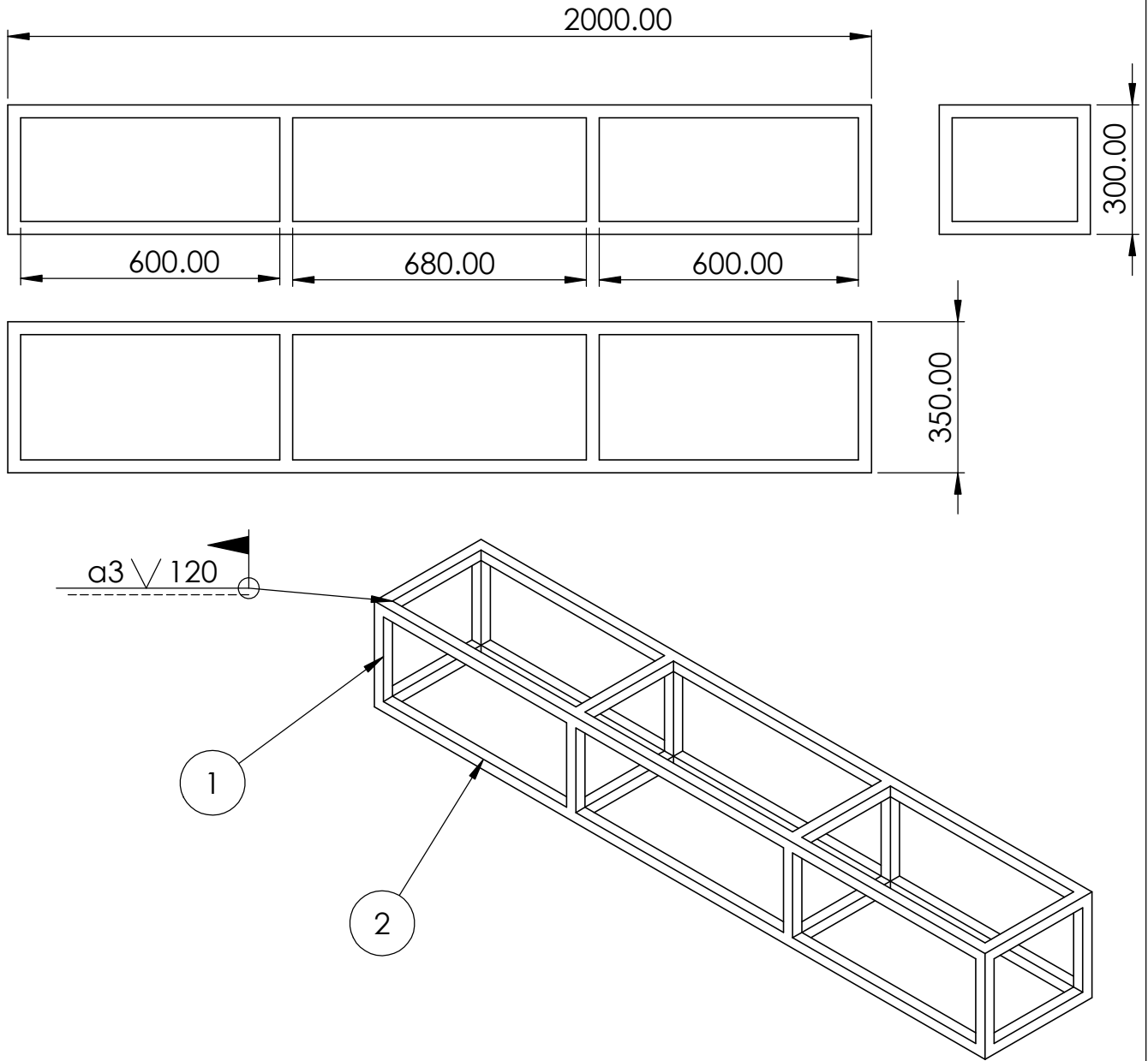


2		Vineerist kasvulava	TN20/150214 C 01 01 K	1	
1		30 x 30 x 2 mm nelikantorust raam	TN20/150214 C 02 00 K	1	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal: S235 ehitusteras, 21mm vineer	Näitamata piirhälbed: DIN ISO 2768-1 v	Mass: 26 kg	Mõõt: 1:10
Teostas	Mart Traagel	Nimetus: Taimekasvatustalava, 2 m x 0.35 m			
Kontrollis	Kaarel Soots				
Kinnitas	Kaarel Soots				
		Leht: 1	Tähis: TN20/150214 C 01 00 K		



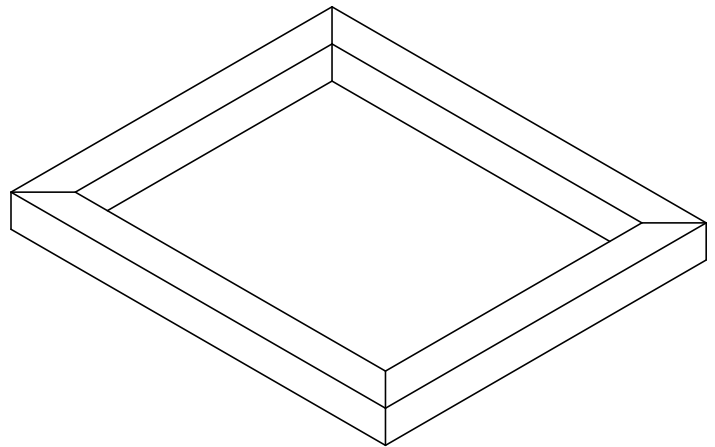
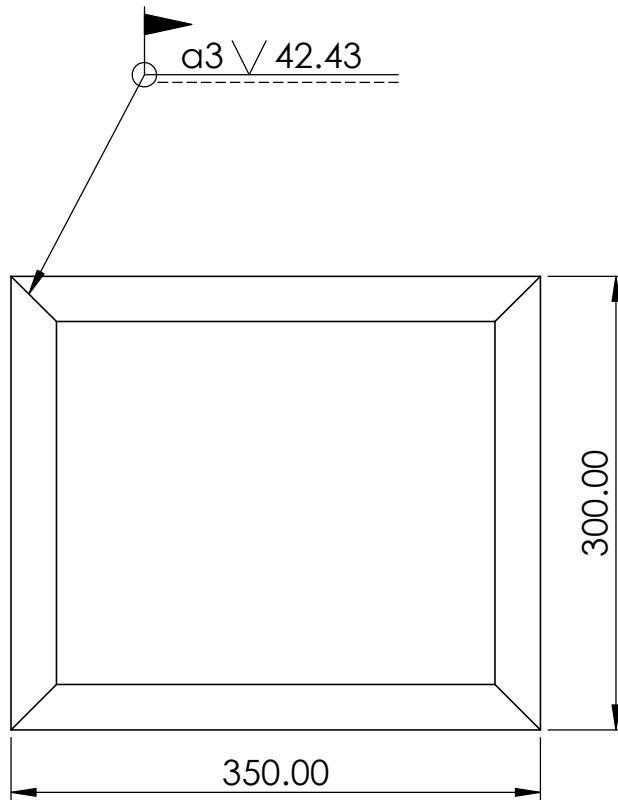
	<i>Materjal:</i> 21mm veekindel vineer	<i>Näitamata piirhálbed:</i> DIN ISO 2768-1 m	<i>Mass:</i> 14,193 kg	<i>Mõõt:</i> 1:15
<i>Teostas</i>	<i>Mart Traagel</i>	<i>Nimetus:</i> Vineerist kast		
<i>Kontrollis</i>	<i>Kaarel Soots</i>			
<i>Kinnitas</i>	<i>Kaarel Soots</i>			
		<i>Leht:</i> 1	<i>Tähis:</i> TN20/150214 C 01 01 K	

Kõik nurgad keevitada nagu joonisel märgitud



2		30 x 30 x 2 nelikanttoru S235	ostukomponent	12	4tk 680 mm
1		Alusraami detail	TN20/150214 C 02 01 K	4	
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal: S235 ehitusteras	Näitamata piirhälbed: DIN ISO 2768-1 v	Mass: 12 kg	Mõõt: 1:15
Teostas	Mart Traagel	Nimetus: Taimekasvatustalava alusraam			
Kontrollis	Kaarel Soots				
Kinnitas	Kaarel Soots				
		Leht: 1	Tähis: TN20/150214 C 02 00 K		

Kõik nurgad keevitada nagu joonisel märgitud



	<p><i>Materjal:</i> S235JR, 30 x 30 x 2 nelikanttoru EN 10219-1</p>	<p><i>Näitamata piirhülbed:</i> DIN ISO 2768-1 m</p>	<p><i>Mass:</i> 2 kg</p>	<p><i>Mõõt:</i> 1:5</p>
<p><i>Teostas</i></p>	<p>Mart Traagel</p>	<p><i>Nimetus:</i> Taimekasvatustalava alusraami detail</p>		
<p><i>Kontrollis</i></p>	<p>Kaarel Soots</p>			
<p><i>Kinnitas</i></p>	<p>Kaarel Soots</p>			
		<p><i>Leht:</i> 1</p>	<p><i>Tähis:</i> TN20/150214 C 02 01 K</p>	

**LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ SALVESTAMISEKS (AVALDAMISE TÄHTAJATU
PIIRANG) NING JUHENDAJA(TE) KINNITUS TÖÖ KAITSMISELE LUBAMISE
KOHTA**

Mina,

Mart Traagel,
(*autori nimi*)

Sünniaeg 25. jaanuar 1992,

1) annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

AASTARINGSILT KASUTATAV AKVAPOONILINE KASVUHOONE,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on Kaarel Soots,

(*juhendaja(te) nimi*)

salvestamiseks säilitamise eesmärgil, sh digitaalarhiivis DSpace säilitamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

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

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

Lõputöö autor (*allkirjastatud digitaalselt*)
(*allkiri*)

Tartu, (25.05.2020)
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.

Luban lõputöö kaitsmisele.

Kaarel Soots, (*allkirjastatud digitaalselt*)
(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(25.05.2020)
(*kuupäev*)