



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

## SUURE MÕÕTEVAHEMIKUGA REISIKAAL

### TRAVEL SCALE WITH A WIDE MEASURING RANGE

#### MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Simo Stahlman  
/nimi/

Üliõpilaskood 183682

Juhendaja: Martin Eerme, programmijuht  
/nimi, amet/

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

25. mai 2021

Autor: digitaalselt allkirjastatud

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina, Simo Stahlman (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose, Suure mõõtevahemikuga reisikaal (*lõputöö pealkiri*), mille juhendaja on Martin Eerme (*juhendaja nimi*)
    - 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.
- 

25.05.2021

---

<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 loomingu 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.

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:**...Simo Stahlman, 183682.....(nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala:MATM02/18 – Tootearendus ja tootmistehnika...(kood ja nimetus)

Juhendaja(d):...programmijuht, Martin Eerme, 6203270.....(amet, nimi, telefon)

Konsultant:...Maarjus Kirs, teadur.....(nimi, amet)

.....(ettevõtte, telefon, e-post)

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) ...Suure mõõtevahemikuga reisikaal.....

(inglise keeles) ...Travel scale with a wide measuring range .....

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Luua sportlastele sobiva reisikaalu disain
2. Valmistada seade
3. Testida seade

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Toote idee ja kavandi defineerimine, turuanalüüs	01.10.2020
2.	Seadme elektroonika ja mehaanika disaini loomine	01.11.2020
3.	Valmistamine	01.03.2021
4.	Programmeerimine ja testimine	01.05.2021
5.	Dokumentatsiooni koostamine	25.05.2021

**Töö keel:** ...Eesti..... **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....2021 a

**Üliõpilane:** ...Simo Stahlman..... ".....".....2021 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ...Martin Eerme..... ".....".....2021 a  
/allkiri/

**Konsultant:** ...Maarjus Kirs..... ".....".....2021 a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ...Martin Eerme..... ".....".....2021 a  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

1. SISSEJUHATUS .....	9
2. KAALU KASUTAJA PROFIIL JA TEHNILISED NÕUDED .....	11
2.1 Kaalu kasutaja profiil .....	11
2.2 Kaalu tehnilised nõuded .....	11
3. TURUANALÜÜS .....	12
3.1 Nedis personaalne reisikaal .....	12
3.2 PEARL reisikaal .....	13
3.3 Beurer KS 19 Black köögikaal .....	13
3.4 Turu-uuringu kokkuvõte.....	14
4. SEADME TÖÖPÕHIMÕTE .....	15
5. PÕHIKOMPONENTIDE VALIK JA SÜSTEEMI ÜLEVAADE .....	17
5.1 Põhikomponentide valik .....	17
5.1.1 Jõuandur .....	17
5.1.2 Jõuanduri signaali töötlemise moodul .....	19
5.1.3 7-segmendiline ekraan .....	19
5.1.4 Mikrokontroller.....	20
5.2 Süsteemi ülevaade .....	21
6. TRÜKKPLAADI ELEKTRISKEEM.....	23
6.1 Kaalu toiteahela skeem .....	23
6.2 Kaalu mõõte- ja juhtahela skeem .....	24
7. TRÜKKPLAADI DISAIN JA VALMISTAMINE .....	26
8. KORPUSE DISAIN JA VALMISTAMINE .....	29
8.1 Korpuse materjali valik .....	29
8.2 Korpuse disain .....	30
8.3 Korpuse valmistamine.....	31
9. KASUTAJALIIDES JA PROGRAMM .....	37
9.1 Kasutajaliides .....	37
9.2 Programm .....	40
10. LÕPPTULEMUSE TESTIMINE JA VEAD .....	41
10.1 Testimine.....	41
10.1.1 Mõõtetulemuse kordustäpsuse test .....	41
10.1.2 Kaalu mõõteväärtuste tõesuse hindamine.....	42
10.1.3 Mehaanilise vastupidavuse test .....	43
10.1.4 Praktilisuse test.....	43
10.2 Lõpptulemus ja parendamise võimalused .....	43

KOKKUVÕTE .....	46
ABSTRACT .....	48
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	50
LISAD .....	52
Lisa 1 Toiteahela elektriskeem .....	53
Lisa 2 Mõõte- ja juhtahela elektriskeem .....	54
Lisa 3 Projekteeritud trükkplaadi pealtvaade .....	55
Lisa 4 Projekteeritud trükkplaadi altvaade .....	56
Lisa 5 Projekteeritud trükkplaadi tükitabel .....	57
Lisa 6 Mehaanilised joonised .....	59
Lisa 7 Programm .....	71
Lisa 8 Programmi voogdiagramm .....	82

## EESSÕNA

Lõputöö teema „Suure mõõtevahemikuga reisikaal“ tekkis isiklikust vajadusest kulturismiga tegeledes jälgida kehakaalu ja söödava toidu kogust võistlusreisidel ja viibides kodust eemal. Kaal võimaldab kaaluda kümne grammi täpsusega nii toitu kui ka kehakaalu, hõlbustades seeläbi võistlusteks valmistumist ja sobiva toitumise jätkumist kodust eemal. Töö mehaaniline osa teostati autori isiklikes töökoja ruumides ning elektroonika komplekteeriti ja testiti ABB AS ajamite ja taastuenergia tehase kvaliteedilaboris.

Autor soovib tänada abi eest juhendajaid Martin Eermet ja Maarjus Kirsi ning ABB AS tehnilist tooteomanikku Joonas Karu.

Võtmesõnad: komposiitmaterjal, süsinikkiud, kaal, magistritöö

## Lühendite ja tähiste loetelu

CAD – arvuti abil toote disainimine (ingl k *Computer Aided Design*)

EEPROM – elektriliselt kustutatav ja programmeeritav püsimälu (ingl k *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*)

GND – süsteemi maapotentsiaal (ingl k *System Ground*)

ICSP – programmeerimise meetod (ingl k *In Circuit Serial Programming*)

MISO – SPI andmesignaali alluvalt ülemseadmele (ingl k *Master In Serial Out*)

MOSI – SPI andmesignaali ülemseadmelt alluvale (ingl k *Master Out Serial In*)

SCK – jadasiini taktsignaali (ingl k *Serial Clock*)

SPI – sünkroonse järjestiksuhtluse liidese standard (ingl k *Serial Peripheral Interface*)

UART – üldotstarbeline asünkroon-jadaliides (ingl k *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*)

UD – ühesuunaline (ingl k *Unidirectional*)

USB – universaalne jadasiin (ingl k *Universal Serial Bus*)

VCC – maapotentsiaali suhtes kõrgem pingeline, seadme toitepinge (ingl k *Voltage Common Collector*)



# 1. SISSEJUHATUS

Kulturismi ja fitnessi harrastamine on elustiil, mis nõuab ööpäevaringset tööd oma keha arendamiseks. Lisaks lihaste treenimisele on vaja kehale tagada taastumiseks sobivad tingimused – puhkamise, taastavate protseduuride ja optimaalse toitumisega. Sportlasele individuaalselt sobivate makrotoitainete piisava olemasolu tagamiseks tuleb kaalumise jälgida tarbitava toidu koguseid. Eriti tähtis on see võistlusdieedi ajal, kui keha on pikast kaloridefitsiidist stressis ja valesti tarbitud toit võib tundidega sportlase välimust ja sooritust halvemaks muuta ning võistluse rikkuda. Kaalumine on aga oluliselt raskendatud kui viibitakse kodust eemal, näiteks võistlus-, töö- või puhkusereisidel.

Senini on töö autor võtnud reisidele kaasa kaks isiklikku kaalu – toidukaalu toidu kaalumiseks ja vannitoakaalu kehamassi mõõtmiseks. Reisile kahe kaalu kaasavõtmine on aga tülikas, võtab kotis palju ruumi ning kaalub palju. Hotellitubades enamasti kaalu pole ning isegi vastupidisel juhul, tuleks toidu kaalumiseks siiski kodust eraldi kaal kaasa võtta, sest kehakaalud kuvavad kasutaja kaalu saja grammi täpsusega ning ei sobi toidu kaalumiseks. Seega, kui on soov kodust eemal olles kaalumise jätkata, tuleb sobivad kaalud kodust kaasa võtta.

Töö eesmärgiks on luua laia mõõtevahemikuga universaalne reisikaal nii kehamassi kui ka toidu kaalumiseks, tagamaks kehale võimalikult head eeldused arenemiseks ja taastumiseks. Antud seade muudab reisimise mugavamaks ning võimaldab jälgida kehakaalu ja toitumist sarnaselt kodustele tingimustele, andes võistluseelselt kindlustunnet ning vähendades riski rikkuda toitumisega lavavorm.

Loodav kaal peab mõõtma toidu kaalu vähemalt kümne grammi täpsusega ning kehamassi saja grammi täpsusega. Seade peab olema kompaktne, kerge, lihtsasti kasutatav, vastupidav reisimisele ja töötama nii patareidega, akupangaga kui ka mobiililaadijaga.

Vannitoa- ja toidukaale on võimalik ka osta, kuid need ei vasta soovitatavatele parameetritele mõõtevahemiku, täpsuse ja kompaktsuse poolest. Toidukaalud näitavad kaalutava eseme massi ühe grammi täpsusega enamasti kuni 5 kg-ni ning vannitoakaalud saja grammi täpsusega enamasti kuni 150 kg-ni. Lisaks on vannitoakaalud mõõtmelst suured ja kaaluvad palju, mis muudab nende reisile kaasavõtmise väga tülikaks. Kuna nõutavate parameetritega universaalne kaal turul

puudub, siis arendatakse täpselt vajadustele vastav seade, mis muudab sportlase elu mugavamaks.

Seadme elektroonikaskeemide ja trükkplaadi disaini loomiseks kasutatakse elektroonikadisaini tarkvara *Altium Designer*. Kaalu korpuse detailid disainitakse raalprojekteerimise programmis *DS Solidworks* ja valmistatakse süsinikkiust riide lamineerimisel komposiitmaterjalist ning 3D printimise abil.

Töö on jaotatud kuueks suuremaks osaks. Esmalt teostatakse turuanalüüs ja määratletakse seadme tehnilised nõuded. Seejärel valitakse elektroonika põhikomponendid ja luuakse elektriskeemid ning vastavalt nendele disainitakse ja koostatakse trükkplaat. Elektroonika disainiga paralleelselt luuakse mehaanika disain ja valmistatakse kaalu korpus, arvestades elektroonikakomponentide kujuga ning kaalule esitatavate nõuetega. Füüsiliste osade valmimisel programmeeritakse kaal vastavalt soovitud kasutajaliidese funktsioonidele ja lõpetuseks hinnatakse seadme mõõtetäpsust ning määratletakse vead.

## 2. KAALU KASUTAJA PROFIIL JA TEHNILISED NÕUDED

Tehniliste nõuete defineerimiseks koostati sihtgruppi kuuluva kasutaja profiil, mille põhjal määrati kasutaja vajadustest lähtuvalt tehnilised nõuded.

### 2.1 Kaalu kasutaja profiil

Kaal on suunatud sportlikule inimesele, kes soovib kodust eemal olles täpselt jälgida söödava toidu koguseid ja kehamassi muutust. Kasutaja kehamass on kuni 130 kg. Reisile kaasavõetava pagasi suurus on enamasti piiratud ja ruumi ei ole kunagi piisavalt, mistõttu soovib kasutaja, et kaasavõetav kaal võtaks kohvris võimalikult vähe ruumi. Spetsiifilised kaalu funktsioonid (nt kehamassiindeksi arvutamine ja rasvaprotsendi mõõtmine) ei oma tähtsust, piisab kui kaal kuvab selgelt kaalutava keha massi.

### 2.2 Kaalu tehnilised nõuded

Vastavalt kasutaja profiilile ja kaalu valmistamise võimekusele määrati seadme põhilised parameetrid.

Tabel 2.1 Tehnilised nõuded kaalule

Jrk nr	Nõue	Väärtus
1.	Maksimaalsed mõõtmed	200 x 300 x 50 mm
2.	Maksimaalne seadme mass	1 kg
3.	Mõõtevahemik	20 g – 140 kg
4.	Mõõtetäpsus kuni 5 kg	±10 g
5.	Mõõtetäpsus 5 - 140 kg	±100 g
6.	Põhitoiteallikas	AAA tüüpi patareid
7.	Lisatoite võimalus	Mobiililaadija, akupank, USB-C
8.	Kasutajaliides	Taustvalgusega selgelt loetavad numbrid
9.	Reprodutseeritavus	Lihtsate vahenditega
10.	Materjalide maksumus	< 300 €

### 3. TURUANALÜÜS

Enne toote arendamist viidi läbi turuanalüüs, et analüüsida turul pakkuda olevaid seadmeid, vältimaks olukorda, kus kulutatakse aega ja raha uue toote arendamisele, mis on juba varasemalt teostatud ning lihtsasti soetatav.

Erinevaid vannitoa- ja toidukaalusid on müüa kogu maailmas, kuid uurides erinevaid variante, joonistub välja üks ja see sama muster – kehamassi kaalumiseks on kaalud, mis näitavad 100 g täpsusega kuni umbes 150 kg-ni ja toidu kaalumiseks on kaalud 1 g täpsusega kuni 5 kg-ni. Multifunktsionaalset seadet, mis suudaks mõõta nõutava täpsusega mõõtevahemiku alguses ja lõpus ning omaks lisatoite võimalust, ei leitud. Turul saadavalolevaid reisikaalusid otsiti levinumatest välismaa veebipoodidest (näiteks *Amazon* ja *ebay*), sest väikesemõõtmelisi reisikaalusid Eesti e-kaubandusest ei leitud. Järgnevalt on välja toodud kolm turul enam levinud lahendust. Tabelis 3.1 on võrdlemise lihtsustamiseks koondatud kaalude tehnilised andmed.

#### 3.1 Nedis personaalne reisikaal

Väike karastatud klaasist ja plastmassist valmistatud reisikaal kehamassi mõõtmiseks. Kaal sobib suurepäraselt reisil kehamassi jälgimiseks, kuid 100 g täpsus ei ole toidu kaalumiseks piisav.



Joonis 3.1 Personaalne reisikaal NEDIS [1]

### 3.2 PEARL reisikaal

Sarnaselt eelmisele kaalule on tegemist väikese karastatud klaasist ja plastmassist valmistatud reisikaaluga kehamassi mõõtmiseks. Antud kaalul on küll suurem mõõtevahemik ja väiksem mass, kuid 100 g täpsus ei ole toidu kaalumiseks piisav.



Joonis 3.2 Reisikaal PEARL [2]

### 3.3 Beurer KS 19 Black köögikaal

Karastatud klaasist ja plastmassist köögikaal, mis on sobilik toidu kaalumiseks, kuid väikese mõõtevahemiku tõttu ei sobi inimese kehamassi mõõtmiseks. Kõigist kolmest kõige kergem ja kallim seade.



Joonis 3.3 Beurer KS 19 Black köögikaal [3]

### 3.4 Turu-uuringu kokkuvõte

Turul on pakkuda suurepäraseid reisi- ja toidukaale, kuid kaks-ühes seadet ei suudetud leida. Kaalude tehniliste andmete võrdlustabelist selgub, et olemasolevad reisikaalud on sobiva suuruse ning mõõtevahemikuga, kuid 100 g täpsus ei ole toidu kaalumiseks sobiv. Toidukaalud on piisavalt täpsed, kuid on mõeldud vaid kergete esemete kaalumiseks. Lisaks puudub eeltoodud kaaludel lisatoite kasutamise võimalus, mis tähendab, et kui patarei/patareid saavad tühjaks, siis ei ole seadet võimalik kasutada.

Tabel 3.1 Kaalude tehniliste andmete võrdlustabel

<b>Parameeter</b>	<b>NEDIS [1]</b>	<b>PEARL [2]</b>	<b>Beurer KS 19 [3]</b>
Mõõtmed (P x L x K) / mm	230 x 140 x 20	211 x 112 x 23	200 x 145 x 16,5
Seadme mass g	665	446	342
Mõõtevahemik kg	0 – 150	5 – 180	0 – 5
Reklaamitud mõõtetäpsus g	100	100	1
Toiteallikas	1x CR2032 patarei	2x AAA patarei	1x CR2032 patarei
Lisatoite võimalus	puudub	puudub	puudub
Hind €	19,43	9,99	23,99

Uuringust järeldub, et multifunktsionaalse ja laia mõõtevahemikuga seadme loomine täidaks tühimiku kahe kaalutüübi vahel ning tegemist ei oleks juba olemasoleva toote duplitseerimisega. Uue kaalu arendamine annab võimaluse disainida seade vastavalt soovidele ja luua kasutusvaldkonnale sobiv funktsionaalsus.

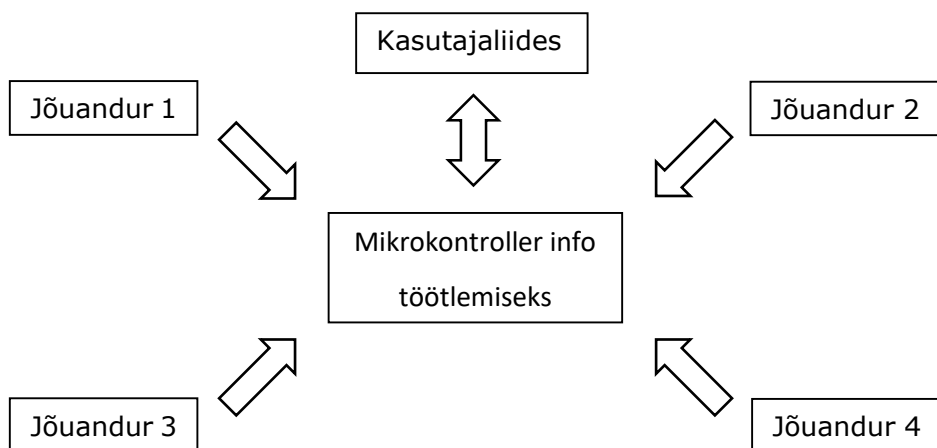
## 4. SEADME TÖÖPÕHIMÕTE

Läbi ajaloo on kasutatud väga erineva tööpõhimõttega kaalusid. Vanim kaalutüüp on tasakaalukaal (*balance scale*), kus süsteemi tasakaalustamiseks kasutatud kaaluvihtide kogukaal on võrdne kaalutava eseme massiga. Lisaks on olemas veel hulk erineva ehituse ja tööpõhimõttega kaalusid, mida antud töös ei käsitleta, sest suurte mõõtmete ja kaalu tõttu, ei sobi need kerge ja väikese reisikaalu tegemiseks.

Saavutamaks püstitatud eesmärke, kasutatakse väikeseid ja võimekaid jõuandureid, mis muundavad andurile mõjuva kineetilise energia mõõdetavaks väljundsignaaliks. Väljundsignaal on proportsionaalne anduritele mõjuva jõuga, seega teades anduritele mõjuva jõu ja andurite väljundsignaalide vahelist suhet, saab andurite väljundsignaalide abil leida anduritele mõjuva jõu (mõõdetava objekti mass) suuruse.

Jõuandureid on kolme tüüpi: hüdraulilised, pneumaatilised ja elektrilised. Kaks esimest ei sobi antud rakendusse, sest need on füüsiliselt rasked ja suured ning sobivad pigem raskete esemete kaalumiseks. Lisaks on oht, et hüdraulilised andurid hakkavad lekkima ja pneumaatilised andurid vajavad töötamiseks välist suruõhuallikat. Püstitatud eesmärgi täitmiseks kasutatakse elektrilisi jõuandureid, mis on väikesed ja millest saadavat elektrilist signaali on lihtne kasutada.

Täpse mõõtetulemuse saamiseks peab kogu mõõdetava keha mass toetuma jõuanduritele. Seega sõltub sobiva jõuanduri valik anduri võimekusest ja andurite hulgast. Kaalule vajaliku stabiilsuse saavutamiseks kasutatakse nelja jõuandurit, mis on optimaalne hulk stabiilsuse ja kaalumise võimekuse seisukohast. Vähemate andurite kasutamine muudab kaalu ebastabiilsemaks ja enamate andurite kasutamine on ebavajalik ning ebaotstarbekas. Sarnaselt turul olemasolevatele kaaludele paigutatakse jõuandurid kaalu plaadi alla, maa ja kaaluplaadi vahele ning kaitstakse täiendava korpusega. Joonisel 4.1 on näidatud kaalu põhimõtteline skeem.



Joonis 4.1 Kaalu põhimõtteline skeem



## 5. PÕHIKOMPONENTIDE VALIK JA SÜSTEEMI ÜLEVAADE

### 5.1 Põhikomponentide valik

Vastavalt seatud nõuetele valiti võtmetähtsusega elektroonikakomponendid, mille „ümber“ luua abiahelad ja korpus. Järgnevalt on välja toodud valitud komponendid ja nende kasutamise põhjendus.

#### 5.1.1 Jõuandur

Elektrilisi jõuandureid on palju eri tüüpe. Tabelis 5.1 on võrreldud enim levinud andureid ning toodud välja eelised ja puudused.

Tabel 5.1 Elektriliste jõuandurite tüübid

Anduri tüüp	Eelised ja puudused	Kasutusvaldkond
Tensoandur	+ Kaalu rakendustes laialt levinud	Sobilik kaalu ja labori rakendustesse
	+ Täpne	
	+ Tundlik	
	+ Mugav kasutada	
	+ Odav	
	+ Lineaarne väljund	
	- Temperatuurist mõjutatud	
Piezokristallil põhinev andur	+ Kaalu rakendustes laialt levinud	Sobilik kaalu ja labori rakendustesse
	+ Täpne	
	+ Tundlik	
	+ Mugav kasutada	
	+ Odav	
	+ Väike elastne deformatsioon	
	- väljund pole lineaarne	
- Ei mõõda staatilisi jõudusid		
Mahtuvuslik andur	- Vähe levinud	Ei ole mõeldud esemete massi mõõtmiseks. Kasutatakse nt seadmete osade positsioneerimisel
	+ väga tundlikud	
	+ Vastupidav ülekoormusele	
	+ Vähetundlikud müra ja häiringute suhtes	
	- Tundlik temperatuurile	

Tabel 5.1 Elektriliste jõuandurite tüübid järg

Anduri tüüp	Eelised ja puudused	Kasutusvaldkond
Mahtuvuslik andur	- Dielektrik materjal „muutub“ ajas ning kaal muutub ebatäpseks	Ei ole mõeldud esemete massi mõõtmiseks. Kasutatakse nt seadmete osade positsioneerimisel
	- Kallis	
Magnetakistusel põhinev andur	- Vähe levinud	Kasutatakse nt valtsmasinates, kus on suured jõud
	+ Väga vastupidav suurtele jõududele	
Iduktiivsusel põhinev andur	- Vähe levinud	Kasutatakse rakendustes, kus on nõutud väga suur täpsus
	+ Vastupidav ülekoormusele	
	+ Väga suur täpsus ja resolutsioon	

Antud töö raames otsustati kasutada tensoandurit, sest kõik teised andurid peale tenso- ja piezokristallil põhinevate andurite on vähe levinud ja kallid ning ei ole mõeldud antud kaalu mõõtevahemikus kasutamiseks. Piezokristallil põhinevat andurit ei kasutata, kuna erinevalt tensoandurist on selle väljund mittelineaarne ja ei anna püsivat väljundsignaali, mis muudab kaalu programmeerimise ja kalibreerimise keerukamaks.

Valitud tensoanduriks osutus *TE CONNECTIVITY SENSORS FX1901-0001-0100-L* [4], sest konkreetne andur on ettenähtud kaalu rakendustesse, sellel on sobiv mõõtepiirkond (kuni 45 kg), kriitilised osad on valmistatud roostevabast terasest, muutes anduri ajas kestvaks ja vastupidavaks ülekoormustele, anduri kompaktne korpuse disain võimaldab seda lihtsasti korpusesse kinnitada ning andur on hea hinna ja kvaliteedi suhtega. Lisaks on töö autor sama andurit edukalt varasemates projektides kasutanud ning omab seeläbi kogemust ja teadmisi nende kasutamisel.

Anduri hind ostuhetkel *Farnell*-i veebipoes [5]: 32,2 €.



Joonis 5.1 Tensoanduri foto FX1901 [4]

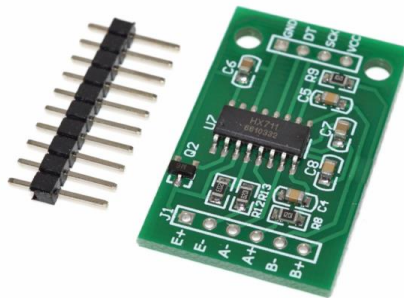
### 5.1.2 Jõuanduri signaali töötlemise moodul

Jõuanduri väljundsignaali ulatus on 0 – 100 mV kogu mõõtevahemiku kohta. Sedavõrd väikeste pingete mõõtmiseks ja konverteerimiseks digitaalsignaalsiks kasutatakse signaali töötlemise moodulit HX711 mikroskeemi [6] baasil. HX711 on *AVIA Semiconductor*—i poolt toodetud ja patenteeritud 24-bit-ne analoog-digitaalmuundur, mis on disainitud kasutamiseks kaalu rakendustes ühendatuna otse *Wheatstone-i* sillal põhinevate jõuanduritega.

Sellel mikroskeemil põhinevate moodulite kasutamine on isetegijate seas väga populaarne ja seetõttu on internetis laialdaselt abistavaid materjale ning erinevatele arendusplatvormidele on loodud avalikult kättesaadavad teekid. See võimaldab kiirendada seadme arendusprotsessi ning aitab vältida võimalike vigade teket. Lisaks kui kasutatud moodul peaks mingil põhjusel purunema, saab selle uue osta ja ilma suuremate kuludeta välja vahetada.

Kuna Euroopas müüakse ainult kasutamiseks valmis mooduleid ja mitte üksikuid mikroskeeme, siis kasutati töö raames Hiinas *OKYSTAR* poolt toodetud moodulit [7], mida müüb Eestis edasi Oomipood.

Signaali töötlemise mooduli hind ostuhetkel Oomipoe veebipoes [8]: 3,42 €



Joonis 5.2 *OKYSTAR* HX711 signaali töötlemise moodul [7]

### 5.1.3 7-segmendiline ekraan

Kasutajale info kuvamiseks kasutatakse 7-segmendiliste numbrinäidikute moodulit, kus on kaheksa 7-segmendilist numbrinäidikut ning nende käitamiseks MAX7219 valgusdiod-ekraani juhtkiip. See võimaldab igat segmenti eraldi kontrollida ja kuvada soovitud kõigest kolme digitaalsisendi abil. Sellise info kuvamise viisi kasuks otsustati, sest kuvatav info on primitiivne ja vedelkristallekraani kasutamine oleks olnud

ebaotstarbekas. Lisaks on 7-segmendilised numbrinäidikud väga tugeva taustvalgusega, mis on vajalik kaalu disaini aspektist ja numbrid on suured ning selgelt loetavad.

Toode telliti Hiinast *Aliexpress* lehe vahendusel [9], mistõttu ei ole teada, kelle poolt on ekraan toodetud.

7-segmendilise ekraani hind *Aliexpress*-i veebipoes ostuhetkel [9]: 0,88 €



Joonis 5.3 MAX7219 juhtimisega 7-segmendiline ekraan [9]

#### 5.1.4 Mikrokontroller

Andmete töötlemiseks kasutatakse 8-bitist *Atmel ATmega 328P* mikrokontrollerit, sest *Arduino* arendusplaadid kasutavad sama kontrollerit ja paljud *Arduino* kasutajad on loonud teekid kõikvõimalikele moodulitele ja suhtlusprotokollidele. Lisaks on *Arduino* programmeerimiskeskond uute rakenduste loomisel väga kasutajasõbralik ning töö autori kogemus antud platvormiga kiirendab seadme arendamise protsessi ja vähendab vigade tõenäosust.

*ATmega 328P* mikrokontrolleri käitamiseks on vaja vähe väliseid komponente, sellel on piisavalt sisendeid ja väljundeid, see on voolutarbimiselt säästlik, hind on odav ja see on laialdaselt kättesaadav. Jõudlus ei ole sellel mikrokontrolleril võrdväärne võimsamate sama segmendi esindajatega, kuid antud rakenduses sellest piisab.

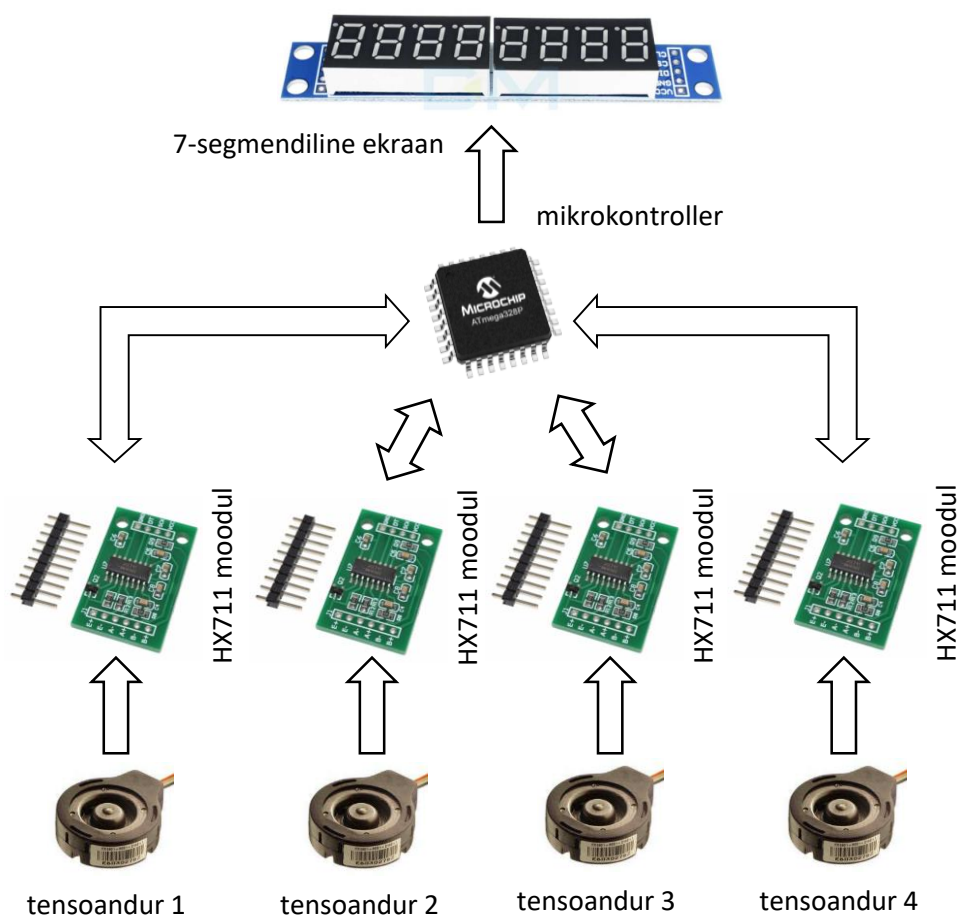
*Atmel ATmega328P-AU* hind ostuhetkel *Farnell*-i veebipoes [10]: 2,2 €



Joonis 5.4 *Atmel ATmega328P-AU* mikrokontroller [11]

## 5.2 Süsteemi ülevaade

Kasutaja kaalu mõõtmiseks kasutatakse nelja FX1901 tensoanduri ja signaali töötlemise mooduli komplekti (vt Joonis 5.5). Iga tensoanduri maksimaalne mõõdetav mass on kuni 45 kg (nelja anduri peale kokku kuni 180 kg) ja väljund on seejuures kuni 100 mV, mistõttu töödeldakse väljundsignaali signaali töötlemise mooduliga, mis konverteerib analoogsignaali 24-bitiseks digitaalsignaalsiks. Saadud nelja anduri digitaalsignaaliid juhitakse mikrokontrollerisse, kus toimub info töötlemine ja ettevalmistamine kasutajale kuvamiseks. Info kuvatakse kasutajale 7-segmenndilise ekraani abil.



Joonis 5.5 Andmete liikumist illustreeriv skeem [5] [10] [7] [9]

Kaalu põhitoiteallikaks on 3 AAA-tüüpi patareid, mille jadamisi ühendamisel saadakse väljundpinge 4,5 V. Kõik kaalu elektroonika elemendid on mõeldud kasutamiseks 5 V toitepingega, mistõttu reguleeritakse patareide väljundpinget *Buck-boost* muunduriga, mis tõstab ja vajadusel ka langetab pinget täpselt 5-le voldile. Patareide tühjenemisel kuni 2,5 V-ni lülitatakse seade muunduri poolt välja. Välise lisatoite puhul on tegemist

juba 5 V reguleeritud toiteallikaga (telefoni laadija või akupank) ja see eraldi reguleerimist ei vajaks, kuid seadme töökindluse ja ohutuse tagamiseks suunatakse ka välise toiteallika energia läbi pingemuunduri. Tagamaks patareide võimalikult pikk eluiga, on süsteemis mehaaniline lüliti, mis lülitab välja pingemuunduri ja seeläbi kogu seadme.

Kaalu lähtestamiseks (*tare*) on puudetundlik nupp, mille katsumisel käivitab mikrokontroller lähtestamise protseduuri. See on vajalik näiteks toidu kaalumisel, kui kasutaja soovib kaaluda anuma sisse mõnda toiduainet. Sellisel juhul saab kasutaja lähtestada kaalu 0-asendisse nii, et anum on kaalu peal ja seejärel kaaluda ainult anumasse valatavat toiduainet.

## 6. TRÜKKPLAADI ELEKTRISKEEM

Elektriskeemide ja trükkplaatide loomiseks kasutati trükkplaatide elektroonika disainimise tarkvara *Altium Designer*, sest tegemist on valdkonna ühe mugavama ja võimekama tarkvaraga ning töö autoril on antud tarkvara varasem kasutamise kogemus.

Skeemide loomisel arvestati seadme nõutavate parameetrite ning eelnevalt valitud komponentide ühendustega. Tabelis 6.1 on välja toodud elektriskeemide projekteerimise lähteandmed.

Tabel 6.1 Elektriskeemide projekteerimise lähteandmed

Parameeter	Väärtus
Patarei toitepinge V	4,5
Välise toiteallika pinge V	5
Mõlema toiteallika olemasolul eelistatud toiteallikas	Väline
Välise toiteallika ühendus	USB-C
Jõuandurite andmeühenduste arv kokku	5
7-segmendilise ekraani andmeühenduste arv	3
Programmeerimisliides	UART ( <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> )
Alglaaduri (bootloader) laadimise liides	ICSP ( <i>In Circuit Serial Programming</i> )
Lähtestamise nupu ühenduste arv	1

### 6.1 Kaalu toiteahela skeem

Kahe erineva toiteallika kasutamise võimaldamiseks on toiteahelal kaks sisendit. Jadamisi ühendatud 3 AAA-tüüpi patarei 4,5 V sisend ja USB-C ühendus. Sisendpinge reguleerimiseks otsustati kasutada *Texas Instruments*-i buck-boost regulaatori juhtkiipi TPS63060DSCR [12], mis on võimeline pinget tõstma ja langetama 5 V nivoole, sisendpingest 2,5 V kuni 12 V. Buck-boost regulaatoreid tavaliselt ühe mikroskeemina ei leia, mistõttu tuleb see vastavalt rakendusele disainida. TPS63060 valiti, kuna tegemist kiibiga, mis on mõeldud kasutamiseks patarei- ja akutoitega seadmetes ja on autori varasemates projektides ennast igati tõestanud. Regulaatori koostamiseks valiti ja ühendati komponendid vastavalt juhtkiibi andmelehel soovitatule (vt Lisa 1).

Kaalu sisse- ja väljalülitamiseks on toiteahelasse lisatud mehaaniline lüliti, mis juhib pingeregulaatori olekut ja seeläbi kaalu osade reguleeritud 5 V toitepinge olemasolu.

Välise toiteallika eelistamise nõude täitmiseks on ahelasse lisatud diodid *D3* ja *D4*, mis vastupingestatakse välise toiteallika ühendamisel, kuna selle pinge on patareide maksimaalsest pingest kõrgem. Diodide olemasolu välistab ka voolu liikumise välisest toiteallikast patareidesse.

## 6.2 Kaalu mõõte- ja juhtahela skeem

Mõõte- ja juhtahela keskne komponent on ATmega 328P mikrokontroller, mille erinevatesse sisenditesse ja väljunditesse ühenduvad kõik andurid, 7-segmendiline ekraan, lähtestamise nupp ja pinge mõõtmise ahelad (vt Lisa 2). Tabelis 6.2 on välja toodud kõik mikrokontrolleriga tehtud ühendused ja nende funktsioonid.

Tabel 6.2 Mikrokontrolleri ühendused

Sisendi/väljundi number	Funktsioon
1	1. tensoanduri sisend (24-bit digitaalsignaali)
2	2. tensoanduri sisend (24-bit digitaalsignaali)
3	Maaühendus (GND)
4	5 V toitepinge (VCC)
5	Maaühendus (GND)
6	5 V toitepinge (VCC)
7	Mikrokontrolleri välise taktsignaali sisend
8	Mikrokontrolleri välise taktsignaali sisend
9	3. tensoanduri sisend (24-bit digitaalsignaali)
10	4. tensoanduri sisend (24-bit digitaalsignaali)
11	Tensoandurite taktsignaali (SCK)
12	Puutetundliku lähtestamise nupu väljundsignaali
13	Puutetundliku lähtestamise nupu sisendsignaali
14	Kasutamata
15	ICSP ühenduse andmesignaali ülemseadmelt alluvale (MOSI) alglaaduri laadimiseks
16	ICSP ühenduse andmesignaali alluvalt ülemseadmele (MISO) alglaaduri laadimiseks
17	ICSP ühenduse taktsignaali (SCK)
18	Mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduri toitepinge
19	Kasutamata
20	Mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduri referentspinge sisend
21	Maaühendus (GND)
22	Kasutamata
23	Kaalu reguleerimata sisendpinge läbi kahe 1 M $\Omega$ takistist moodustatud pingejaguri jälgimaks sisendpinget
24	Kaalu välise toiteallika sisendpinge läbi kahe 1 M $\Omega$ takistist moodustatud pingejaguri tuvastamiseks välise toiteallika olemasolu
25	Kasutamata
26	Kasutamata



Tabel 6.2 Mikrokontrolleri ühendused järg

Sisendi/väljundi number	Funktsioon
27	Kasutamata
28	Kasutamata
29	Mikrokontrolleri taaskäivitamise ( <i>reset</i> ) signaal
30	UART ühenduse väljund mikrokontrolleri programmeerimiseks
31	UART ühenduse sisend mikrokontrolleri programmeerimiseks
32	Kasutamata

Lisaks on signaaliahelatesse lisatud 10 k $\Omega$  *pull-up* ja *pull-down* takistid, et signaalisisendi puudumisel ei jääks ahel teadmata olekusse (*float*), vaid oleks mikrokontrolleri jaoks tuntud potentsiaalil (GND või 5 V). Mikrokontrolleri taktsignaali ostsillaatori ahelasse on lisatud kaks 22 pF takistit, mis siluvad taktsignaali häiringuid. Enamikele ahelatele on lisatud ka testpunktid (TP-d), mida kasutatakse trükkplaadi korrasoleku kontrollimiseks.

## 7. TRÜKKPLAADI DISAIN JA VALMISTAMINE

Trükkplaadi disainimiseks kasutati *Altium Designer* tarkvara ning plaadid lasti valmistada Hiinas trükkplaate tootvas ettevõttes *JLCPCB*. Hiina tarnija kasuks otsustati mitmekordse hinnaerinevuse tõttu võrreldes Eesti tootjatega. Valitud ettevõtte teenuseid on töö autor kasutanud ka varem ning trükkplaatide kvaliteet on ligilähedane Eestis toodetud plaatidele.

Plaadi projekteerimisel suuri piiranguid ei seatud, sest skeemis puuduvad kõrged pinged ja suured sagedused (v.a mikrokontrolleri taktsageduse ahel). Siiski jälgiti üldisi trükkplaadi disainimise reegleid ja trükkplaaditootja seatud konstrueerimisreegleid [13], et plaati oleks võimalik toota. Lisaks peeti silmas kaalu mehaanilisi piiranguid pistikute ja kõrgemate komponentide asukoha osas. Kaalu paksuse piirangu tõttu valiti komponendid võimalikult madalad, et trükkplaat mahuks koos muude kaalu detailidega korpuse sisse.

Tabelis 7.1 on toodud *JLCPCB* disaini reeglid ning tabelis 7.2 on loetletud üldised põhimõtted plaadi disainimiseks.

Tabel 7.1 Trükkplaaditootja seatud disaini reeglid [13]

Parameeter	Väärtus [mm]
Minimaalne puuritud ava diameeter	0,2
Minimaalne läbiviigu ( <i>via</i> ) ava diameeter	0,3
Minimaalne läbiviigu ( <i>via</i> ) diameeter	0,6
Minimaalne jootepiirala laiuse ümber ava ( <i>annular ring</i> )	0,3
Minimaalne avade vaheline kaugus (ava servast)	0,5
Minimaalne jootepiirala vaheline kaugus	0,127
Minimaalne ava ja raja vaheline kaugus	0,33
Minimaalne radade vahe	0,127
Minimaalne raja laius	0,127
Minimaalne jootemaski laius	0,254
Minimaalne legendi joone laius	0,153
Minimaalne jootepiirala kaugus legendist	0,15
Minimaalne raja kaugus perimeetrist	0,2

Tabel 7.2 Üldised põhimõtted trükkplaadi disainimisel

<b>Põhimõte</b>	<b>Selgitus</b>
Radade suund trükkplaadi eri pooltel risti	Põhimõtte jälgimisel saab mööduda ühel trükkplaadi küljel ilmnenud takistusest plaadi teisel küljel.
Andmesignaali rajad paigutada toiteradadest eemale	Häiringute vältimiseks signaaliahelates paigutatakse toiterajad neist võimalikult kaugemale.
Võimalikult vähe teravnurki radade paigutamisel	Radade paigutamisel jälgitakse, et ei tekiks teravnurki, sest need põhjustavad „happelõkse“ plaatide tootmisel.
Toiteradade piisav laius	Kuigi disainitav plaat ei tarbi palju voolu, tehakse toiterajad minimaalsest võimalikust laiusest laiemad, et vähendada plaadi soojenemist ja pingelangu.
Kaalu korpusest tulenevad kuju piirangud	Kaalu korpuse sees ei ole palju ruumi ja disainitav plaat peab sobima korpuse sisse.
Pistikute asetus	Pistikute paigutamisel arvestatakse komponentide ja avade paigutusega kaalu korpuses. Näiteks tuleb arvestada USB-C pesa jaoks mõeldud avaga kaalu küljel.
Monteerimisprotsessiga arvestamine komponentide ja radade paigutamisel	Plaadi disainimisel arvestatakse, et plaat on vaja ka kokku panna. Monteerimise protsessi lihtsustamiseks on näiteks parem kui väga kõrged ja madalad komponendid ei ole kõrvuti ning jootepiirkondade väljaviigud on komponendi suhtes paigutatud sümmeetriliselt.

Projekteeritud trükkplaadi (vaata Lisa 3 ja Lisa 4) parameetrid on toodud tabelis 7.3.

Tabel 7.3 Trükkplaadi parameetrid

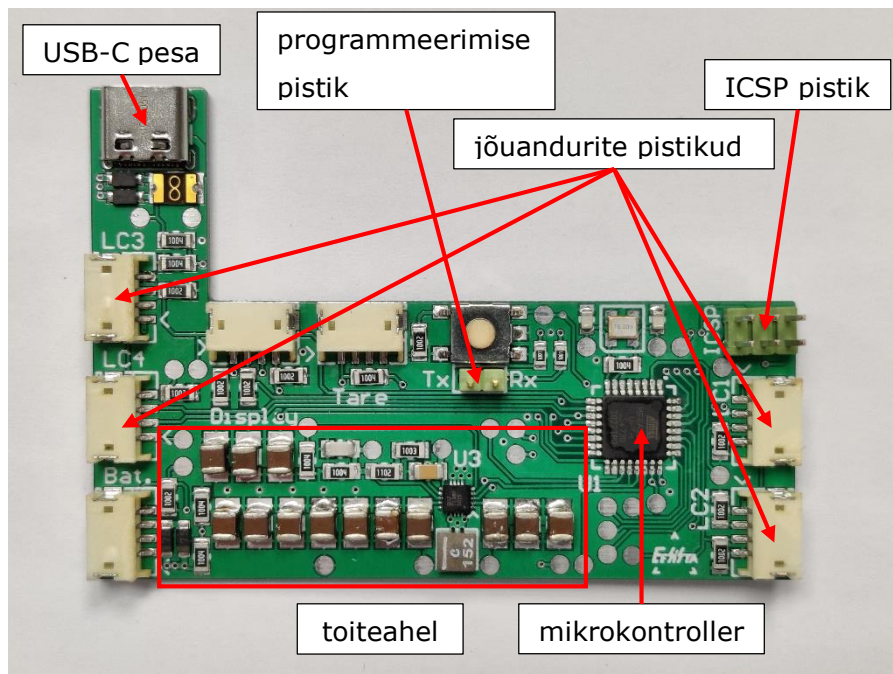
<b>Parameeter</b>	<b>Väärtus</b>
Trükkplaadi kihtide arv	2
Vasekihtide paksus	35 µm
Trükkplaadi paksus	1,67 mm
Dielektriku materjal	FR-4
Jootemaski värvus	roheline
Markeeringu värvus	valge
Plaadi mõõtmed	52,5 x 75 mm
Avade arv	12
Jootepiirkondade pinnakate	pliiivaba kuumtina

Lisas 5 on esitatud trükkplaadi materjalitabel (BOM). Trükkplaadi koostamiseks on vaja 58-t komponenti (19 erinevat artiklit), mis ostetakse elektroonikakomponentide edasimüüjalt *Farnell Element 14*.

Komponentide kogumaksumus plaadi kohta oli ostuhetkel 31,8 €.

Trükkplaadi maksumus oli tellimise hetkel 1,5 €.

Trükkplaadid koostati ABB AS elektroonika laboris, kus on olemas professionaalseks kasutamiseks mõeldud seadmed elektroonika koostamiseks ja analüüsimiseks. Joonisel 7.1 on pilt kokku pandud trükkplaadist.



Joonis 7.1 Koostatud trükkplaat

## 8. KORPUSE DISAIN JA VALMISTAMINE

Kaalu elektroonika kaitsmiseks ja andurite kinnitamiseks on tähtis, et seadmel oleks korpus, mis tagaks seadme piisava tugevuse ja jäikuse kogu mõõtepiirkonnas, kuid oleks seejuures kerge ja ilma eriseadmeid kasutamata valmistatav ja reprodutseeritav. Kuna korpuse disain ja tootmise protsess on sõltuv materjalist, siis esmalt valiti korpuse materjal.

### 8.1 Korpuse materjali valik

Materjali valimiseks koostati võrdlustabel, kus hinnati töö teostaja vaatenurgast eri materjalide hinda, töödeldavust ja sobivust antud projektis kasutamiseks.

Tabel 8.1 Eri materjalide võrdlustabel

Materjal	Hind	Töödeldavus	Sobivus
Alumiinium	Keskmine	Vajalik freespingi olemasolu	Kerge ja tugev, jäikus saavutatav oskusliku mehaanilise disainiga. Sobilike mõõtmetega toormaterjali on võimalik osta paljudest eri kohtadest. Sobib suurepäraselt kaalu korpuse tegemiseks
Plastik	Kallis	Vajalik freespingi olemasolu	Kerge ja sobiva plastiku ning oskusliku disaini puhul piisavalt jäik kaalu tegemiseks. Plastiku eellõigatud tükkide saadavus on Eestis väga halb ja täissuuruses tahvli ostmine on kallis ja ebaotstarbekas.
Komposiit	Keskmine	Vajalik vaakumpumba olemasolu	Hea disaini puhul kerge ja jäik, efektse väljanägemisega ja materjalid ka väikeses koguses saadaval.

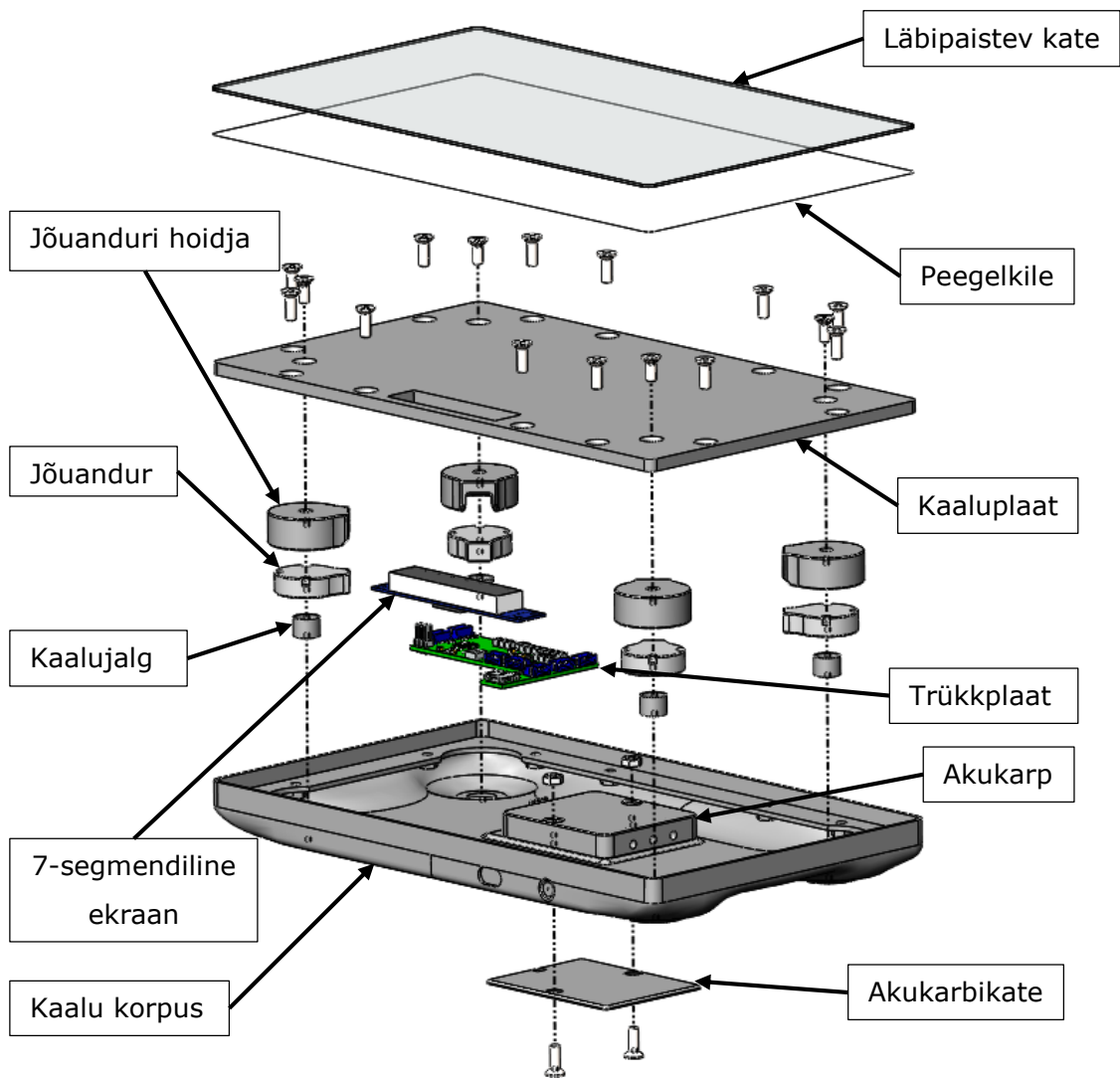
Kaalu korpuse valmistamiseks otsustati kasutada süsinikkiud komposiiti, sest selle töötlemiseks piisab käsitööriistadest ja vaakumpumbast, kuid alumiiniumi ja plastiku töötlemiseks on vajalik freespingi olemasolu, mis töö teostajal puudub. Töö tellimine mõnest freesimisega tegelevast ettevõttest on väga kulukas ja aeganõudev. Hinnalt on alumiinium ja süsinikkiu toormaterjali hind samas suurusjärgus, seevastu 20 mm paksust plastikut saab osta vaid tahvli kaupa, mille maksumus ületab kordades projekti eelarve. Süsinikkiust valmistatud detailid on oluliselt jäigemad ja tugevamad kui klaaskiust toodetud komposiidetailid, mistõttu eelistatakse süsinikkiudu klaaskiule. Lisaks omab töö teostaja kogemust ja seadmeid komposiidetailide valmistamiseks ja töötlemiseks.

## 8.2 Korpuse disain

Korpuse disainimiseks kasutatakse raalprojekteerimise programmi *DS Solidwoks*, mis on keskklassi CAD (*computer aided design*) tarkvara. Trükkplaadi disainimise tarkvarast saadud täpse trükkplaadi mudeli ümber luuakse sobiva kuju ja suurusega korpus, mis võiks eelduslikult vastu pidada jõududele, mis rakenduvad kaalu kandvatele osadele kogu kaalu mõõtepiirkonnas. Osade disainimisel ei kasutata tugevusarvutusi, sest komposiitmaterjalide tugevuse arvutamine on väga keeruline ja saadud tulemustesse tuleb suhtuda ettevaatlikkusega ning tegemist on seadmega, mis ei täida vastutusrikast ülesannet.

Kaalu suuruse määramisel lähtutakse esialgsetes nõuetes seatud suuruse piirangust ja kasutajamugavusest. Kuna kahejala kaalu tegemisel jääks kasutaja kannad või päkad ebamugavalt üle kaalu serva, siis otsustatakse ühejalakaalu kasuks. Suuruse defineerimisel kasutatakse number 44 jala profiili, arvestades, et üks jalg mahuks täielikult kaalu platvormile ja 7-segmendiline ekraan oleks seejuures nähtav.

Loodud mehaaniline disain (vt Joonis 8.1 ja Lisa 6) koosneb seitsmest osast. Kandevkonstruktsiooni põhielement on süsinikkiu ja epoksiidvaigu komposiidist kaaluplaad, mille nelja nurka kinnituvad 3D prinditud jõuandurite hoidjad, mis hoiavad paigal jõuandureid. Viimane lüli kaaluplaadi ja maapinna vahel on jõuandurite külge liimitud 3D prinditud kaalu jalad. Kaaluplaadi peal on peegelkilega kaetud läbipaistev polükarbonaadi leht, mis kaitseb kaalu pealispinda ja 7-segmendilist ekraani. Elektroonika kaitsmiseks kinnitub kaaluplaadi külge õhukesest komposiidist kaalu korpus. Korpuse külge on kinnitatud 3D prinditud akukarp ja selle komposiidist kaas ning trükkplaat ja 7-segmendiline ekraan.



Joonis 8.1 Kaalu komponendid

### 8.3 Korpuse valmistamine

Korpuse valmistamist alustati varasemalt loodud mudeli 3D printimisega PLA (*polylactic acid*) materjalist. Antud materjal on 3D printimise kogukonnas laialdaselt levinud, sest see on odav, mehaaniliselt jäik ja seda on lihtne printida. 3D printimisel sulatab printer kiht-kihi haaval plastikut ettenähtud trajektoorige kuni moodustub 3-dimensiooniline keha. Kihtide liitekohad muudavad printitud detaili „astmeliseks“, mis ei sobi vormi võtmiseks. Sobiliku mudeli saamiseks pahteldati printitud mudel (vt Joonis 8.2) autopahtliga ja krunditi kahekomponentse täitekrundiga (vt Joonis 8.3).



Joonis 8.2 3D prinditud korpuse mudel



Joonis 8.3 Pahteldatud ja krunditud korpuse mudel

Mudeli kaitsmiseks keemiliselt agressiivse vaigu eest värviti see spetsiaalse kahekomponentse akrüülvärviga (vt Joonis 8.4), mis on hästi poleeritav ja millelt saab suurepäraseid vorme võtta. Peale mudeli poleerimist võeti sellelt klaaskiust ja vinüülestervaigust tehtud vorm (vt Joonis 8.5).





Joonis 8.4 Värvitud ja poleeritud mudel



Joonis 8.5 Valmis vorm

Valmis vormi sisse asetati süsinikkiust riie ja immutati seejärel vaiguga, kasutades vaigu infusiooni meetodit (vt Joonis 8.6) Antud meetodit kasutati selle kasutamise lihtsuse ja saavutatava kvaliteedi tõttu. Teised kaks meetodit, lisaks infusioonile, on märjalt lamineerimine ja vaiguga eelimmutatud riidega (ingl k *prepreg*) lamineerimine. Märjalt lamineeritud detailid on teiste meetoditega võrreldes nõrgemad ja raskemad, sest riide/vaigu vahekord ei ole optimaalne ja eelimmutatud riide kasutamine ei olnud tehnoloogiliselt võimalik, sest töö autoril puudub autoklaav.



Joonis 8.6 Korpuse valmistamine vaigu infusiooni meetodil

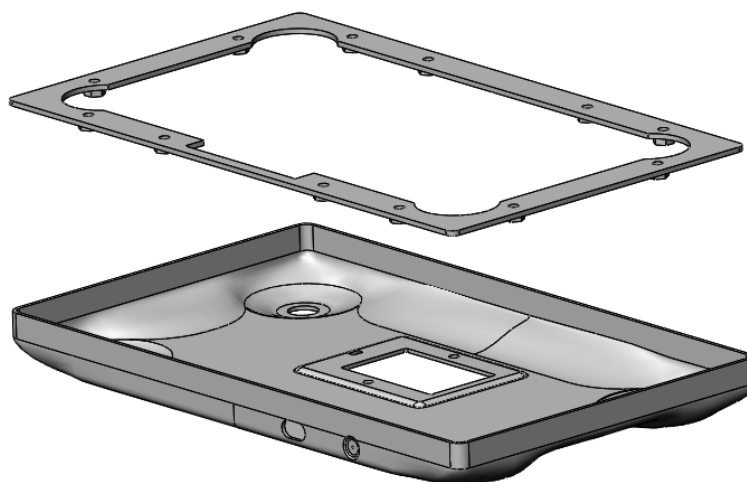
Peale vaigu kõvenemist eraldati korpuse toorik vormist ja lõigati vastavalt joonisele mõõtu ning puuriti avad. Kõik teised komposiidist detailid valmistati samal meetodil, kuid kuna need on tasapinnalised, siis lamineeriti need vahetatud klaastahvlile.

Komposiitmaterjalide omadused sõltuvad riidekiudude suunast ja seeläbi saab detailide omadusi kiudude suunaga „disainida“. Komposiitmaterjalist detailide sees olevad riidekiud on kõige tugevamad kiu sihis mõjuvale tõmbejõule ja oluliselt nõrgemad kiu sihis rakenduvale survele. Vastavalt riidekiu suunale eristatakse kolme tüüpi riidet: *twill*, biaksaalse kiudude asetusega (BIAX) ning ühesuunaliste kiudude asetusega riide (UD). Vastavalt kasutatud riidetüübile ja asukohale muutuvad detaili mehaanilised omadused. Kaalu eri osade valmistamisel kasutatud riide tüübid ja järjestus nähtavast pinnast „sissepoole“ on toodud tabelis 8.2. Riidekiudude nurk on antud kaalu pikema külje suhtes.

Tabel 8.2 Komposiidi kihtide järjestus

Kiht	Detail		
	Kaalu plaat	Korpuse liimitud flants	Korpus ja akukarbikate
1.	<i>Twill</i> 160 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	<i>Twill</i> 160 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°
2.	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°
3.	UD 300 g/m <sup>2</sup> , 0°	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°
4.	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°
5.	BIAX 400 g/m <sup>2</sup> , -45°/45°	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	-
6.	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	-	-
7.	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	-	-
8.	BIAX 400 g/m <sup>2</sup> , -45°/45°	-	-
9.	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	-	-
10.	UD 300 g/m <sup>2</sup> , 0°	-	-
11.	<i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	-	-
12.	<i>Twill</i> 160 g/m <sup>2</sup> , 0°/90°	-	-

Peale kõigi osade vastavalt joonistele lamineerimist ja töötlemist, liimiti kokku kahest osast koosnev korpus ning M4 mutrid (DIN EN ISO 4032) kaaluplaadi kinnitamiseks (vt Joonis 8.7), kasutades selleks akrüüllimi.



Joonis 8.7 Korpuse 2 osa

Seejärel liimiti kuuma liimiga korpuse külge akukarp, 7-segmendiline ekraan, toitelüliti, lähtestamise nupp ja trükkplaat. Kuuma liimi eelis antud rakenduses on elastsus, liimimise lihtsus ja kiirus. Lisaks on kuuma liimiga tehtud liiteid küllaltki lihtne hiljem isopropanooliga avada, kui mõni detail peaks purunema või vajab muul põhjusel asendamist.

Peale 1 mm paksuse polükarbonaat-lehe mõõtu lõikamist ja peegelkilega katmist, kinnitati M4x10 kuuskantpesaga peitpeakruvidega (DIN 7991) kaaluplaadile andurite hoidjad ning andurid pesadesse kahepoolse teibiga. Seejärel ühendati elektroonika ja fikseeriti kaaluplaat M4x12 kuuskantpesaga peitpeakruvidega korpuse külge. Viimase detailina fikseeriti kiletatud polükarbonaadist kate kahepoolse teibiga kaaluplaadi külge.

Kaalu mehaanika osa valmistamiseks kasutatud materjalide nimekiri ja summaarne maksumus on toodud tabelis 8.3. Loetelust on välja jäetud vormi valmistamiseks kulunud materjalid, sest see oli ühekordne kulu. Lisaks on märkimata materjalid, mida kulus väga vähe ja mille mõõtmine ja hinnastamine on ebamõistlik. Näiteks 3D printeri filament ja akrüülliiim.

Tabel 8.3 Mehaanika osade nimekiri

<b>Materjal/komponent</b>	<b>Tarnija</b>	<b>Kogus</b>
Süsinik-kiudkangas <i>twill</i> 160 g/m <sup>2</sup>	SIA Kompozitmaterjali (Composite24)	0,18 m <sup>2</sup>
Süsinik-kiudkangas <i>Twill</i> 400 g/m <sup>2</sup>		0,78 m <sup>2</sup>
Süsinik-kiudkangas BIAx 400 g/m <sup>2</sup>		0,12 m <sup>2</sup>
Süsinik-kiudkangas UD 300 g/m <sup>2</sup>		0,12 m <sup>2</sup>
Vaakuminfusiooni kulumaterjalid		3 tk
Epoksiidvaik	Composite Eesti OÜ	0,5 kg
Polükarbonaatleht	AS Kesko Senukai Estonia (K-rauta)	0,04 m <sup>2</sup>
M4x12 DIN7991 kruvid	Baltic Bolt OÜ	14 tk
M4x10 DIN7991 kruvid		4 tk
M4 mutter DIN EN ISO 4032		18 tk
Peegelkile	Seritek OÜ	0,04 m <sup>2</sup>

Materjalide maksumus ühe kaalu mehaaniliste osade valmistamiseks: 52 €.

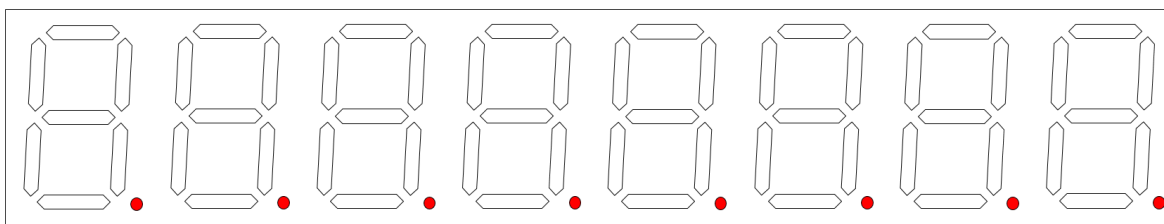
## 9. KASUTAJALIIDES JA PROGRAMM

### 9.1 Kasutajaliides

Kaalu kasutajaliidese tegemisel arvestati, et see oleks lihtne ja piisavalt informatiivne. Kaalu eesmärk on näidata mõõdetava objekti massi, sel peab olema lähtestamise võimalus ja lisainfona kuvama kui patareid hakkavad tühjaks saama või kui objekti kaalu ei ole võimalik tuvastada.

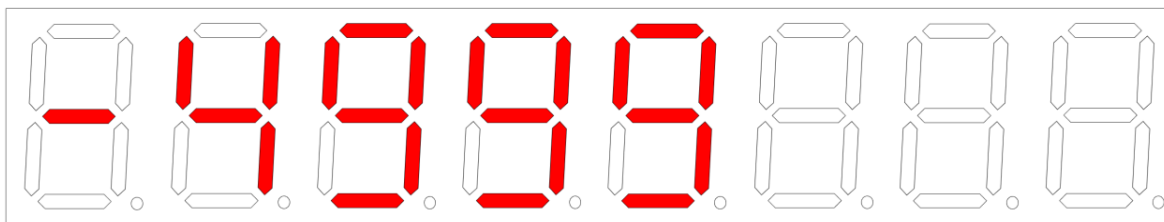
Järgnevalt on välja toodud kõik info kuvamise viisid ja selgitus funktsioneerimise kohta.

Seadme sisse lülitamisel toimub kaalu programmi käivitumine ja esmane lähtestamine. See võtab aega umbes 4 sekundit ja protsessi olekut indikeerivad järjestikku süttivad punktid (vt Joonis 9.1). Töövalmiduse saavutamisel kustuvad punktid ja kuvatakse mõõdetava objekti kaal.

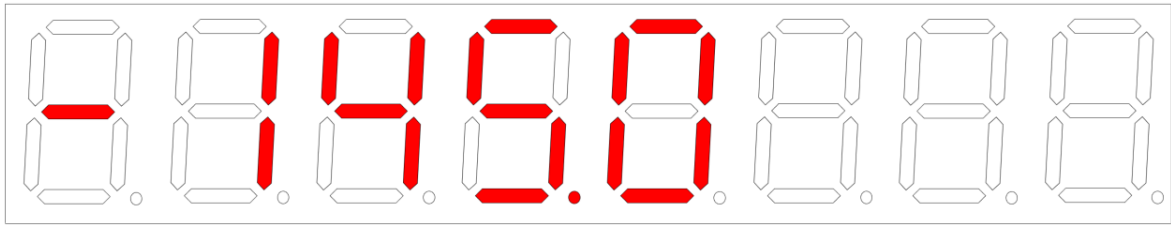


Joonis 9.1 Programmi käivitamisel kuvatav informatsioon

Kaalu kuvamisel kasutatakse kahte esitusviisi – kuni viie kilogrammini kuvatakse mõõdetava objekti mass grammides (vt Joonis 9.2) ning sealt edasi 100 g täpsusega kilogrammides (vt Joonis 9.3). Seejuures fikseeritakse kilogrammi näidu stabiliseerudes mõõtetulemus 3,5 sekundiks vilgutades seda poole sekundi kaupa kolm korda. Peale seda naaseb kaal mõõtetrežiimi.



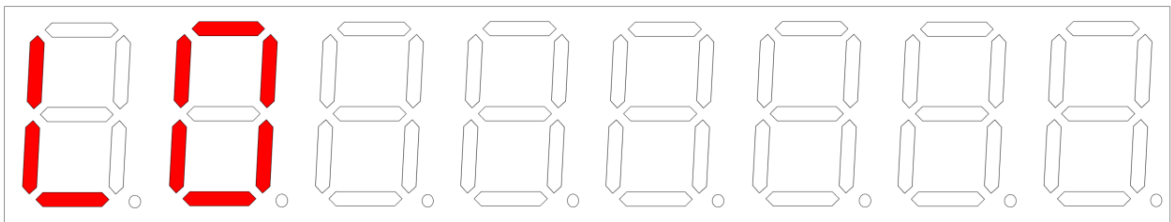
Joonis 9.2 Kaalu kuvamine grammides



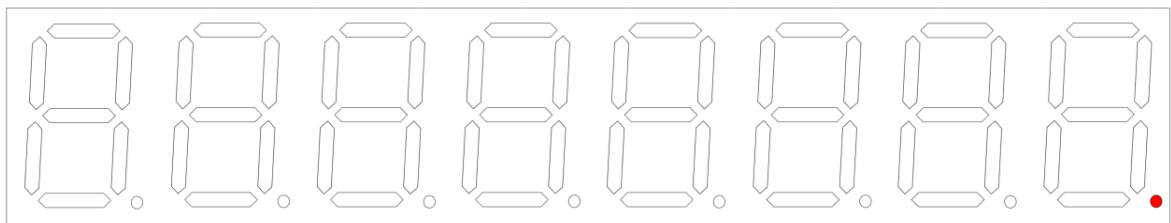
Joonis 9.3 Kaalu kuvamine kilogrammides

Kaalu lähtestamiseks peab kasutaja puudutama kaalu küljel asuvat puudetundlikku nuppu, mis käivitab lähtestamise protseduuri. Lähtestamisest teavitamiseks süttivad korraga kaheks sekundiks kõik punktid (vt Joonis 9.1).

Patarei tühjenemisel alla 3,5 volti kuvatakse kasutajale käivitamisel peale programmi laadimist tähis „LO“ (vt Joonis 9.4), mis teavitab kasutajat patarei vahetamise vajadusest. Märkuannet kuvatakse 3,5 sekundiks vilgutades seda poole sekundi kaupa kolm korda. Välise toiteallika ühendamisel süttib ekraanil viimase segmendi punkt (vt Joonis 9.5) indikeerimaks toiteallika valikut. Indikatsiooni puudumisel ei oleks aru saada, millist toiteallikat seade kasutab ja võib tekkida olukord, kus kasutaja ühendab patareide säästmise eesmärgil akupanga, kuid tegelikult ümberlülitust ei toimu ja patareid tühjenevad ootamatult.

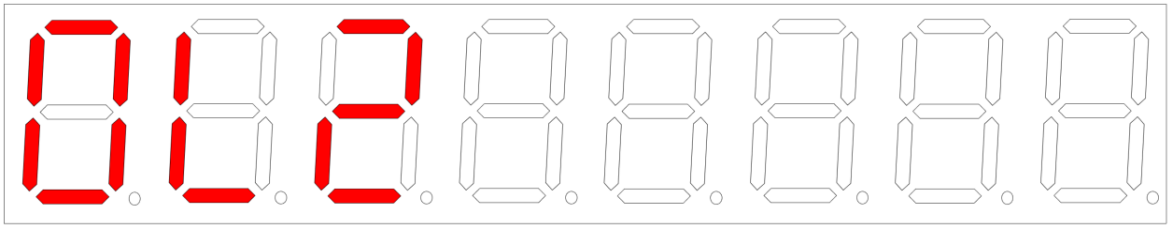


Joonis 9.4 Patareide tühjenemise märguanne



Joonis 9.5 Välise toiteallika kasutamise indikatsioon

Ühe või enama anduri mõõtepiirkonna ületamisel ei ole võimalik kasutajale õiget mõõteväärtust kuvada ning kasutajale indikeeritakse viga tähisega „OL“ (ülekoormus, ingl k *Over Load*) ja vastavalt esimesena vea andnud anduri number (vt Joonis 9.6). Viga kuvatakse kuni vea kadumiseni või kaalu väljalülitamiseni.



Joonis 9.6 Vea esinemisel kuvatav informatsioon

## 9.2 Programm

Seadme arendamise eelis võrreldes valmis toote ostmisega on võimalus disainida seadme funktsionaalsus vastavalt vajadusele ja soovile. Kasutajale kuvatava info hulk ja viis on määratud seadme programmiga, mida käitab kaalu juhtplaadil olev *Atmel-i* mikrokontroller. Sama mikrokontrollerit kasutavad ka erinevad *Arduino* arendusplaadid, mille lai kasutajaskond on loonud ja avalikult kasutamiseks jaganud lugematul hulgal eri teeke, mille kasutamine uue seadme programmeerimist oluliselt lihtsustab. Kaalu programmis on kasutatud viite *Arduino* arendusplaadile loodud teeki – matemaatiliste tehete (*math.h*) [14] teeki, MAX7219 (7-segmenndilise ekraani juhtkiip) juhtimise (*LedControl.h*) [15] teeki, HX711 (jõuanduri signaali töötlemise mooduli kiip) juhtimise (*HX711\_ADC.h*) [16] teeki, EEPROM mälu (*EEPROM.h*) [17] teeki ja puuetundliku nupu (*CapacitiveSensor.h*) [18] teeki.

Kaalu programmi tegemisel arvestati kasutajaliidesel kuvatava informatsiooni visiooniga, seadme soovitava funktsionaalsusega ning loodi parameetrid kaalu seadistamiseks ja kalibreerimiseks. Suurimat mõju kaalu täpsusele ja karakteristikale avaldavad jõuandurite võimendustegurid ja stabiilsuskordaja. Esimese abil toimub kaalu kalibreerimine, korrutades jõuanduritest saadud väärtuse võimendusteguriga, viiakse jõuanduri väljund vastavusse kaalutava keha massiga. Stabiilsuskordaja määrab kui mitu järjestikust mõõtmist peavad kattuma, et tulemust võiks pidada usaldusväärseks ja fikseerida kaalu näidu kasutaja jaoks.

Loodud programmi (vt Lisa 7) tööpõhimõtet iseloomustab kõige paremini voogdiagramm (vt Lisa 8), kus on välja toodud tähtsamad programmi etapid ja tööpõhimõtte. Programm algab vajalike teekide, muutujate ja konstantide määramisega ja seadmistamisega. Seejärel käivitub kaalu mõõtettsükkel, kus iga mõne millisekundi järel mõõdab kaal kaalutava objekti massi (vajalik HX711 mikrokiibi töös hoidmiseks), kaalu toitepingeid ja lähtestamise nupu olekut. Mõõtetulemusi ja muid teateid arvutatakse ja uuendatakse ekraanil 10 korda sekundis.



## 10. LÖPPTULEMUSE TESTIMINE JA VEAD

Uue toote arendamisel on üks tähtsamaid etappe lõpptulemuse hindamine, kus valideeritakse, kas seade vastab töö alguses püstitatud eesmärkidele. Selleks tuleb läbi viia toote testimine, saamaks aru, kas seade funktsioneerib nii nagu soovitud ning leidmaks vead ja arenguvõimalused, mida parandades muuta toode veelgi paremaks.

### 10.1 Testimine

Kaalu võimekuse hindamiseks teostati kolm erinevat testi, mis panid proovile kaalu mõõtetulemuste- kordustäpsuse ja tõesuse, mehaanilise vastupidavuse ja praktilisuse.

#### 10.1.1 Mõõtetulemuse kordustäpsuse test

Kaalu kordustäpsuse hindamiseks võrreldakse kaalu kolmes mõõtepiirkonna punktis kümne järjestikuse mõõtetulemuse korduvust ehk lähedust üksteisele. Selleks kasutatakse kolme erinevat etaloni, millest ühe mass on kaalu mõõtepiirkonna alguses, teine kolmandik mõõtepiirkonnast ja kolmas mõõtepiirkonna teises pooles. Etalonide massi määramiseks kasutatakse ABB AS kalibreeritud labori- ja kaubakaalu.

Vastavalt valemile (10.1) leiti mõõteväärtuste standardhälve kõigis mõõtepunktides.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}} \quad (10.1)$$

Kus:  $\sigma$  – valimi standardhälve,

$N$  – valimi suurus,

$x_i$  – iga valimi väärtus,

$\mu$  – valimi aritmeetiline keskmine.

Tabel 10.1 Kaalu kordustäpsuse ja tõesuse testi andmed

Jrk nr	Mõõte-tulemused 206 g etaloniga $x_i / \text{g}$	Mõõte-tulemused 45,65 kg etaloniga $x_i / \text{kg}$	Mõõte-tulemused 103,99 kg etaloniga $x_i / \text{kg}$
1.	206	45,5	103,8
2.	206	45,5	103,9
3.	206	45,5	103,9
4.	204	45,5	103,7
5.	205	45,5	103,9
6.	206	45,4	103,7
7.	204	45,5	103,7
8.	205	45,5	103,8
9.	206	45,4	103,8
10.	206	45,4	103,8
Aritmeetiline Keskmine $\mu$	205,4	45,5	103,8
Standardhälve $\sigma$	0,84	0,05	0,08

Tulemustest selgub, et kaalu mõõteskaala alguses on standardhälve 0,84 g ja suuremate raskuste puhul 50 – 80 g, mis on antud rakenduse jaoks piisav. Siiski näitas test, et raskuste suurenedes tõuseb mõõtetulemuste variatsioon ja seeläbi halveneb korduvus. Ühelt poolt on see oodatav, kuid teisalt vähendab kaalu usaldatavust mõõtepiirkonna lõpus.

### 10.1.2 Kaalu mõõteväärtuste tõesuse hindamine

Kaalu mõõteväärtuste tõesuse leidmiseks kasutati referentsväärtusega võrdlemise meetodit, mille käigus võrreldi kümne järjestikuse mõõtetulemuse keskväärtust referentsväärtusega. Arvutustes kasutati eelmise testi käigus kogutud andmeid.

Võrdlemisel referentsväärtusega leiti, et kaal mõõdab tegelikust väärtusest 0,2% vähem kogu mõõtepiirkonna ulatuses. Arvuliselt on see 206 g objekti kaalumisel -0,6 g, 45,6 kg objekti puhul -0,1 kg ja 104 kg raskuse korral -0,2 kg. Seega arvutuslikult on 145 kg kaalumisel mõõtetulemus 144,71 kg. Konstantne vea suurus kogu mõõtevahemiku ulatuses viitab tarkvaralisele arvutusveale, mida saab teatud määral programmis oleva võimendusteguriga parandada. Hetkel saavutatud tõesus on piisav mõõtepiirkonna alguses, kuid ületab soovitatavat väärtust raskemate kui 45 kg objektide kaalumisel ja vajab parandamist.

Täiendavalt leiti, et kaal on suuremate raskuste puhul tundlik mõõdetava objekti asukoha suhtes kaaluplaadil. Objekti asetamisel kaaluplaadi servale on mõõtetulemused

oluliselt väiksemad tegelikust massist. Selle fenomeni põhjuseid ei õnnestunud töö käigus leida. Praktilisel kasutamisel ei põhjusta see probleeme kui jälgida, et kaalutav ese paikneks kaaluplaadi keskel või kehamassi kaaludes oleks raskus võimalikult ühtlaselt päka ja kannal vahel jaotunud.

### 10.1.3 Mehaanilise vastupidavuse test

Mehaanilise vastupidavuse kontrollimiseks koormati kaalu 130 %-lise koormusega (200 kg). Selleks võttis töö autor turjale kangid, mis moodustasid koos autori kehamassiga kokku eelnevalt mainitud raskuse. Seejärel teostati viis kaalu peale ja maha liikumist. Seade pidas koormusele vastu ja vigu ei tuvastatud.

### 10.1.4 Praktilisuse test

Kaalu praktilisuse hindamiseks kasutati seadet nädala jooksul igapäevaselt toidu ja kehamassi kaalumiseks. Toidu kaalumisel ei tuvastatud ühtegi praktilist erinevust võrreldes tavalise turult saadud toidukaaluga. Kehamassi kaalumisel leiti, et kaalumise protseduur võtab laiatarbe vannitoakaaluga võrreldes kauem aega, sest näidu fikseerimine on aeglasem. Kasutajat mõne sekundiline lisaootamine siiski ei häirinud.

## 10.2 Lõpptulemus ja parendamise võimalused

Töö tulemusena valmis multifunktsionaalne kaal, millega on võimalik kaaluda nii toitu kui ka kehamassi. Mõõtetulemuste standardhälve vastab kogu mõõtepiirkonna ulatuses püsitatud eesmärkidele, kuid tulemuste tõesus erineb üle 45 kg objektide kaalumisel rohkem kui 100 g, mis vastab osaliselt seatud ootustele. Programmi parendamisega ja täiendava testimisega on võimalik seadme tõesust parandada ja seeläbi kaalu usaldusväärsust tõsta.

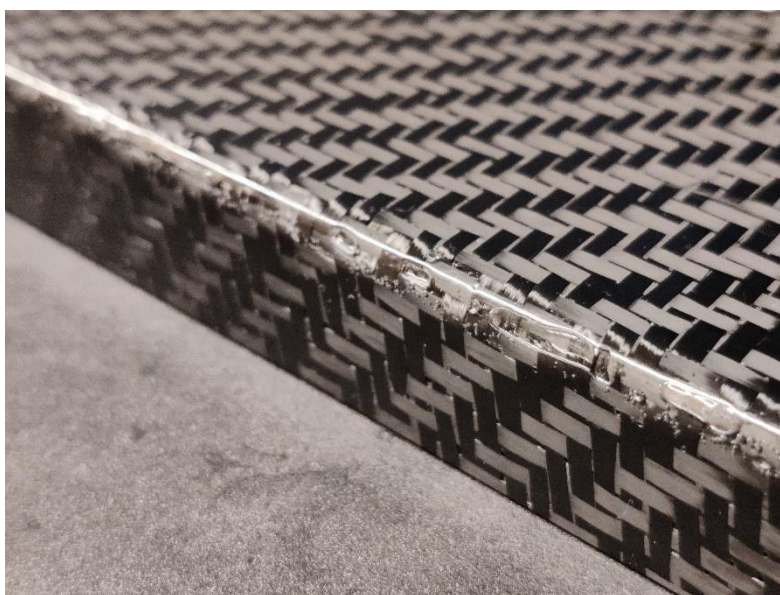
Seadme mõõtmed on 250 x 150 x 25 mm ja kaal koos patareidega 620 g. Elektroonika valmistamiseks ja elektriühelate koostamiseks vajaminevate osade kogumaksumus oli 176,66 € ning mehaanika valmistamiseks kulunud materjalide hind 52 €. Seega on kaalu omahind kokku 228,66 €, mis on lubatud maksumuse piires. Arvestades, et tegemist on käsitööna valmistatud süsinikkiust korpusega suhteliselt võimeka seadmega, siis ei ole selle hind ülemäära suur. Kallim hind võrreldes laiatarbekaaludega oli oodatav.



Joonis 10.1 Valmis kaal

Kuigi füüsiliselt vastab lõpptulemus seatud ootustele, on seadmel mõned kosmeetilised defektid, mida saaks lamineerimise protsessi parendades vältida. Osad kaalu korpuse servad on väga väikese raadiusega, mis muudab lamineerimise keerukamaks ja on suur oht tühimike tekkeks (vt Joonis 10.2). Seda on võimalik parandada hoolikama lamineerimisega või eelimmutatud riide kasutamisega. Loodud vorm on sobilik eelimmutatud riide lamineerimiseks ja kõvendamiseks ahjus või autoklaavis.

Hoolimata komposiidi kosmeetilistest defektidest ja tõesuse erinevusest, on loodud seade unikaalse välimusega ja täidab eesmärgi, aidates kaasa sportlase parema võistlusvormi loomisele.



Joonis 10.2 Tühimikud laminaadis

Teine võimalik parendamise koht on seadme programm. Kuigi kaal töötab murevabalt, saaks pikema testimise ja parameetrite seadistamisega tõsta täpsust ja stabiilsust. Hetkel on kehamassi kaalumiseks vaja püsida kaalul sisuliselt liikumatult, et kaal saavutaks piisava stabiilsuse ja fikseeriks näidu. Paremate mõõtetulemuste filtreerimise ja mõõtelogika arendamisel, saab muuta mõõtmise protsessi kasutaja jaoks kiiremaks ja mugavamaks.

## KOKKUVÕTE

Töö käigus loodi laia mõõtevahemikuga universaalne reisikaal, millega on võimalik kaaluda nii kehamassi kui ka toitu, võimaldamaks kulturismi ja fitnessi harrastavatel sportlastel kodust eemal olles jätkata vajaliku kaalumise. Turu-uuringu käigus tuvastati, et osta saab nii toidu- kui ka vannitoakaale, kuid universaalset seadet töö tegemise ajal ei müüdu.

Loodud kaal kasutab mõõtmiseks nelja 45 kg võimekusega tensoandurit ja signaali töötlemise moodulit, millelt saadavat informatsiooni töötleb kaalu juhtplaat. Mõõteväärtust kuvatakse kasutajale 7-segmendilisel ekraanil. Kaalu lähtestamiseks on puudetundlik nupp, mille puudutamisel saab kaalu viia nullolekusse, mis on vajalik funktsioon toidu kaalumisel. Kaalu toiteallikaks on kolm AAA-tüüpi patareid, kuid lisaks sellele on võimalik kasutada välist toiteallikat, mille ühendamiseks on USB-C pesa. See võimaldab kaalu kasutada ka siis kui patareid on tühjad, näiteks telefoni laadija või akupangaga. Kogu kaalu elektroonika disainiti ja valmistati töö autori poolt spetsiaalselt antud kaalu eesmärki silmas pidades.

Mehaanilised osad valmistati süsinikkiud komposiidist, mille jaoks 3D prinditi kaalu korpuse mudel, millelt omakorda võeti korpuse lamineerimiseks sobiv vorm. Korpuse lamineerimiseks kasutati vaigu infusiooni meetodit, mille abil saavutati laminaadis optimaalne riide/vaigu vahekord ja seeläbi väga tugev, kuid samas kerge korpus. Lõplikud kaalu mõõtmed on 250x150x25 mm (PxLxK) ning mass koos patareidega 620 g. Detailid, mida ei olnud mõistlik komposiidist valmistada, 3D prinditi PLA materjalist.

Seadme vastavust soovitud parameetritele hinnati nelja erineva testi abil. Kordustäpsuse test näitas, et mõõteskaala alguses on mõõteväärtuste standardhälve 0,84 g ja suuremate raskuste puhul 50 – 80 g, mis vastab seatud tingimustele. Tõesuse hindamise testis leiti, et kaal mõõdab tegelikust väärtusest 0,2% vähem, mis tähendab, et maksimaalse 145 kg raskuse objekti kaalumisel näitaks kaal 290 g vähem. Saadud tulemus ületab oodatavat tõesust, kuid testi tulemused viitavad tarkvaralisele veale, mida saab täiendava konfigureerimise ja testimise abil parandada. Mehaaniline vastupidavuse test näitas, et kaal peab suurepäraselt vastu ka 130 %-lisele koormusele. Täiendava testimise abil ja kaalu purunemise piiri leidmisel saaks õhema laminaadi kasutamisel teha kaalu veelgi kergema, ilma et see vastupidavusele mõju

avaldaks. Kaalu praktilisuse hindamise test tõestas, et kaal on igapäevaselt kasutatav ja töötab ootuspäraselt.

Kuigi füüsiliselt vastab lõpptulemus seatud ootustele, on seadmel mõningate servade väikesest raadiusest tingitud lamineerimise defektid, mida saaks eelimmutatud riide kasutamisega või lamineerimise protsessi parendamisega vältida. Siiski, hoolimata prototüübil esinevatest vigadest on kaal unikaalse välimusega ning töö autori hinnangul suurepäraselt õnnestunud.

## **ABSTRACT**

The main goal of this thesis work was to design and produce a travel scale with a wide measuring range which would be able to measure bodyweight and food to allow bodybuilders and fitness athletes to continue the necessary weighing routine away from home. The market analysis showed that both food and bathroom scales could be purchased but no universal device was available on the market.

The device uses four 45 kg strain gauges and signal conditioning modules to measure the weight of the object. The information from load cells is processed by the main control board and the conditioned value is displayed to the user on a 7-segment display. There is a touch button on the side of the scale to tare the weight which is a necessary function when weighing food. The scale is powered by three AAA batteries but has an USB-C port to connect an external power supply. This allows the scale to be used even when the batteries are empty, for example, with a phone charger or portable power bank. All the electronics were designed and manufactured by the author of the work.

The mechanical parts were made of a carbon fiber composite using the resin infusion method. Planar parts were laminated on a waxed glass and the mold for main housing was taken from 3D printed model. The resin infusion method is preferred method to achieve an optimal fabric / resin ratio in the laminate which creates a very strong but lightweight part. The final dimensions of the device are 250x150x25 mm (LxWxH) and the mass with batteries is 620 g. Details that were not reasonable to make out of the composite, were 3D printed of PLA material.

The compliance of the device with the desired parameters was evaluated by four different tests. The repeatability test showed that at the beginning of the measuring range the standard deviation of the measured values is 0.84 g and while measuring heavier objects 50 - 80 g, which corresponds to the set conditions. In the accuracy test, the weight was found to measure 0.2% less than the actual value, which means that when weighing an object with a maximum weight (145 kg), the weight would show 290 g less. The obtained accuracy is less than expected, but the test results indicate that it is a software error that can be corrected by additional configuration and testing. The mechanical endurance test showed that the weight withstands 30% overload (200 kg) perfectly. With additional testing and finding the limit of weight breakage, the use of a thinner laminate could make the weight even lighter without affecting durability. The test of the practicality proved that the scale is usable on a daily basis.



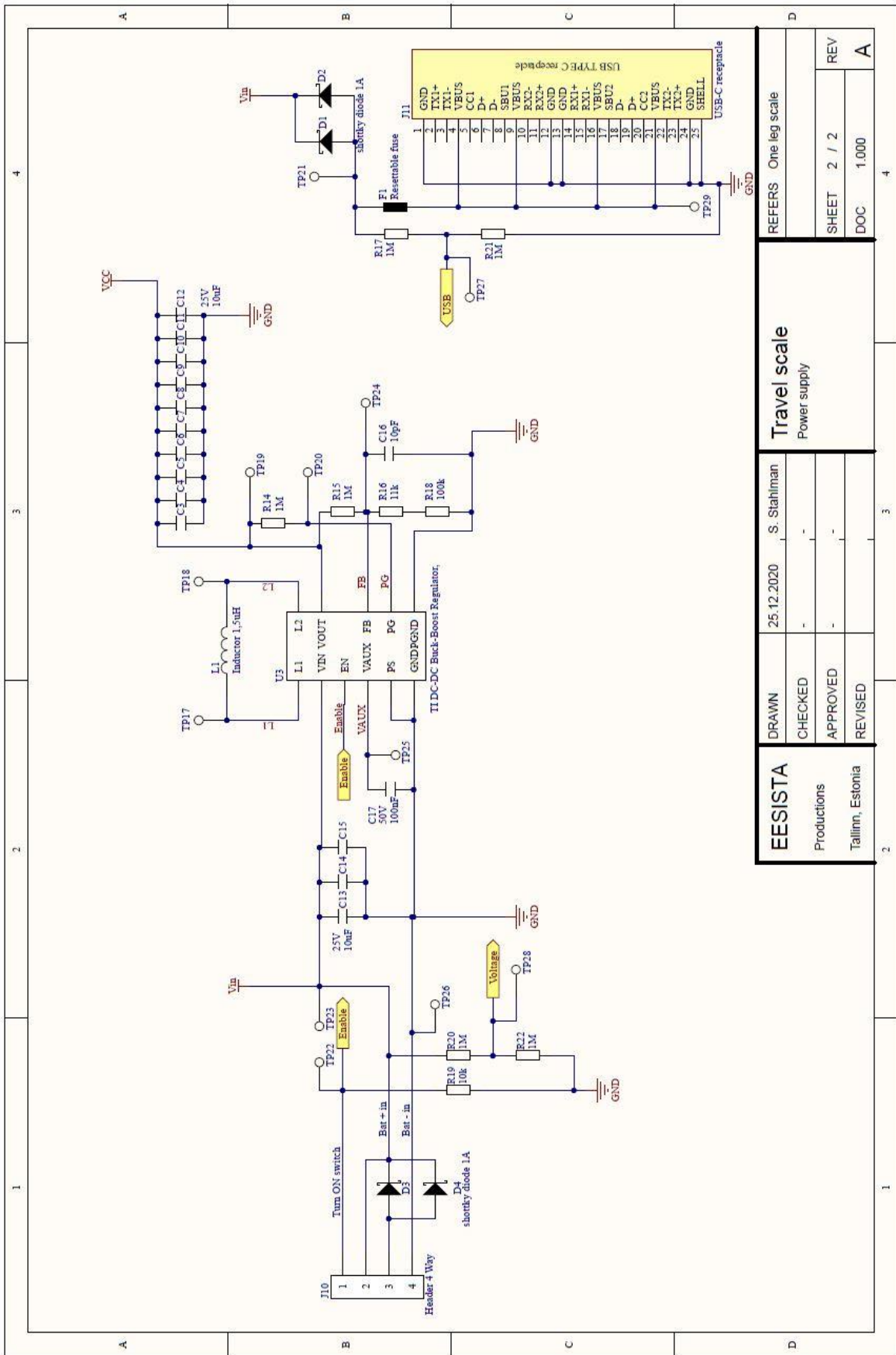
Although the physical result meets the set expectations, the device has few lamination defects due to the small radius of some edges, which could be avoided by using a pre-impregnated carbon fiber fabric or improving the lamination process. However, despite the flaws in the prototype, the device has a unique appearance and, in the author's opinion, is a great device for bodybuilders and fitness athletes.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Nedis, „Nedis.com,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://nedis.com/en-us/product/home-living/travel/550677995/personal-scales-digital-white-tempered-glass-maximum-weighing-capacity-150-kg>. [Kasutatud 01 05 2021].
- [2] Pearl, „pearl.de,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.pearl.de/a-NC5682-3045.shtml>. [Kasutatud 01 05 2021].
- [3] Beurer, „beurer.com,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.beurer.com/web/gb/products/wellbeing/weight-and-diagnosis/kitchen-scale/ks-19-black.php>. [Kasutatud 01 05 2021].
- [4] T. connectivity, „Farnell,” 11 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/2915275.pdf>. [Kasutatud 14 04 2021].
- [5] Farnell, „Farnell,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ee.farnell.com/te-connectivity/fx1901-0001-0100-l/compression-load-cell-20mv-v-45/dp/3397811?st=fx1901-0001-0100>. [Kasutatud 02 02 2021].
- [6] A. Semiconductors, „Sparkfun,” unknown. [Võrgumaterjal]. Available: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf). [Kasutatud 14 04 2021].
- [7] OKYSTAR, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.okystar.com/product-item/weighting-sensor-weight-scale-sensor-oky3478/#tab-id-1>. [Kasutatud 14 04 2021].
- [8] Oomipood, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.oomipood.ee/product/oky3478\\_1\\_sensor\\_pressure\\_load\\_cell\\_amplifier\\_ic\\_hx711](https://www.oomipood.ee/product/oky3478_1_sensor_pressure_load_cell_amplifier_ic_hx711). [Kasutatud 14 04 2021].
- [9] diymore Official Store, „Aliexpress,” 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aliexpress.com/i/32662678780.html>. [Kasutatud 05 04 2021].
- [10] Farnell, „Farnell,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ee.farnell.com/microchip/atmega328p-au/mcu-8bit-atmega-20mhz-tqfp-32/dp/1715486?st=atmega328p-au>. [Kasutatud 05 04 2021].
- [11] M. T. Inc., „Microchip,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P>. [Kasutatud 15 04 2021].
- [12] Texas Instruments, „Farnell,” 9 2020. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 15 4 2021].
- [13] JLCPCB, „JLCPCB,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://jlcpcb.com/capabilities/Capabilities>. [Kasutatud 16 4 2021].

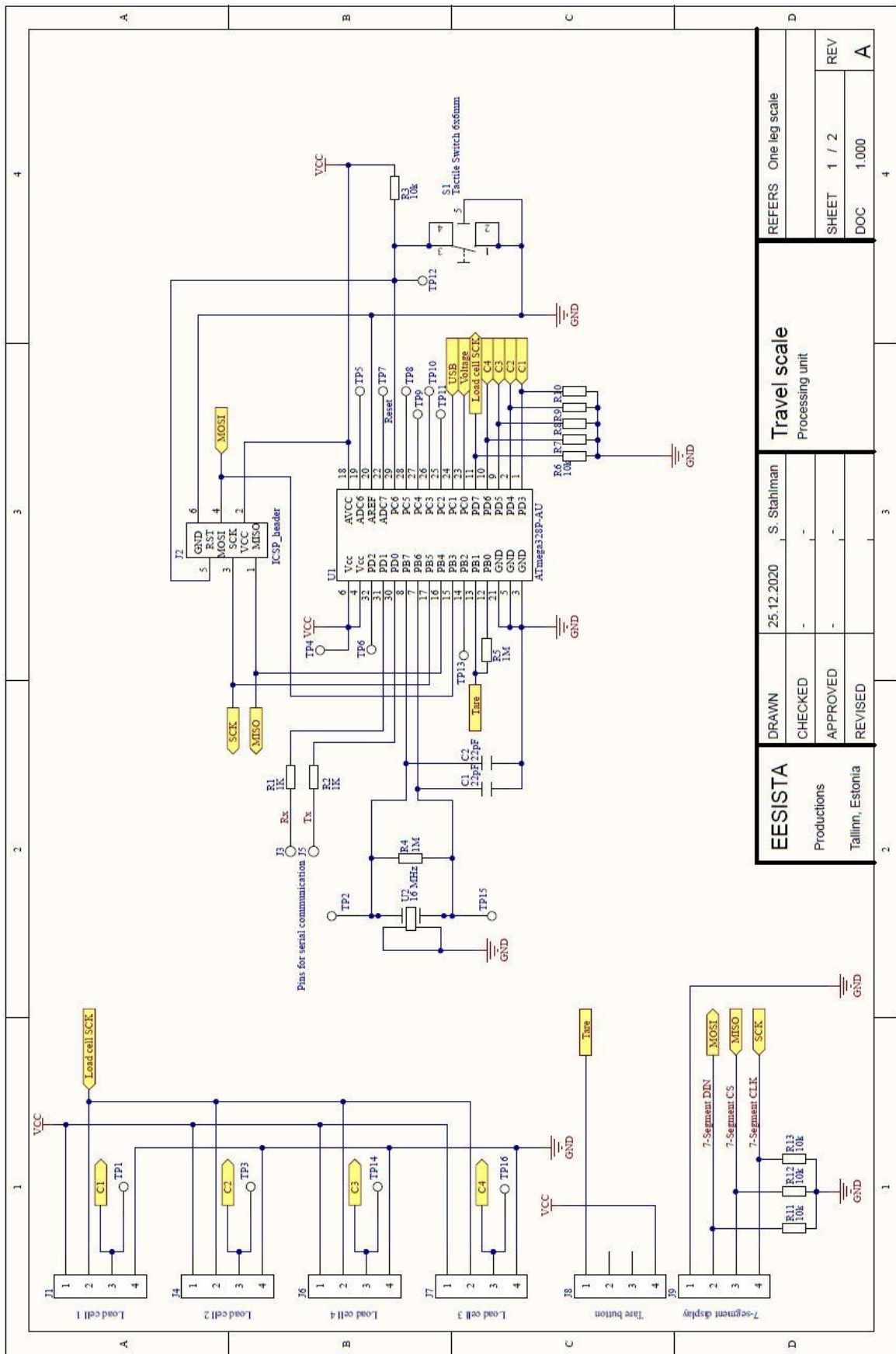
- [14] Arduino, „Arduino,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.arduino.cc/en/math/h>. [Kasutatud 03 03 2021].
- [15] E. Fahle, „Arduinolibraries,“ 04 03 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.arduinolibraries.info/libraries/led-control>. [Kasutatud 03 03 2021].
- [16] O. Kallhovd, „Github,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://github.com/olka/HX711\\_ADC](https://github.com/olka/HX711_ADC). [Kasutatud 03 03 2021].
- [17] Arduino, „Arduino,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/EEPROM>. [Kasutatud 04 03 2021].
- [18] P. Stoffregen, „Github,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/PaulStoffregen/CapacitiveSensor>. [Kasutatud 03 03 2021].

## **LISAD**



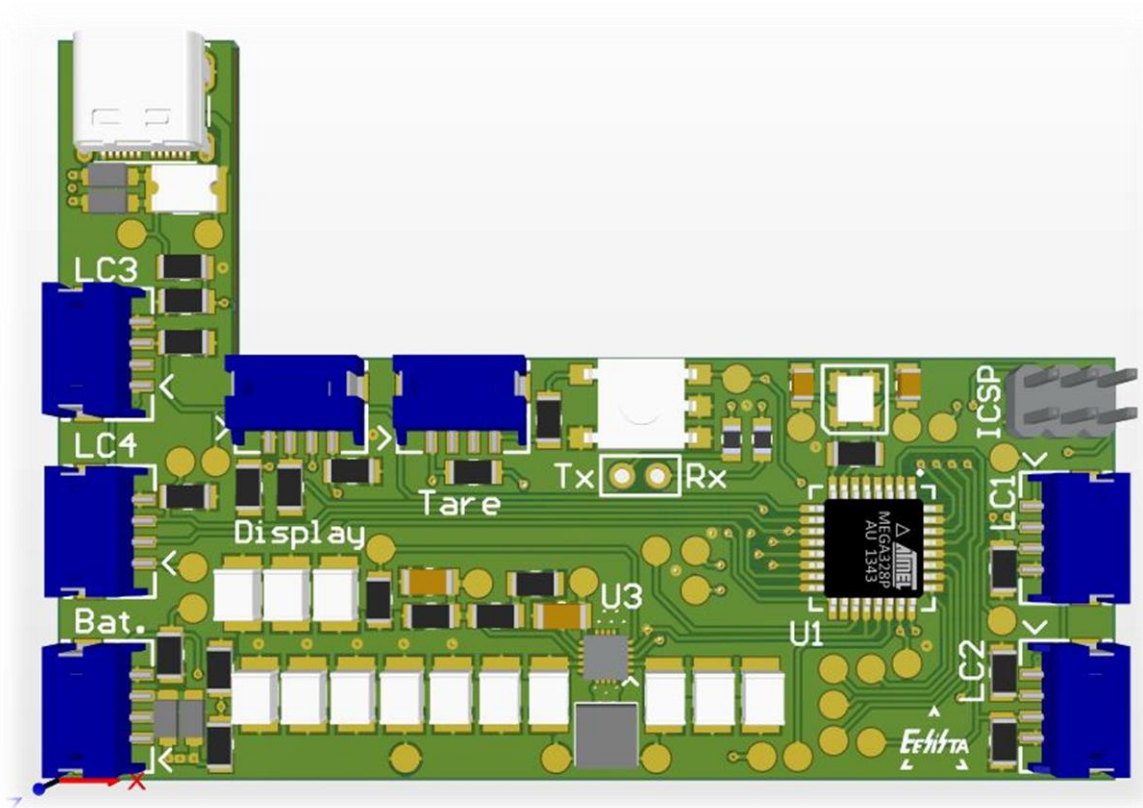
EESISTA		DRAWN	25.12.2020	S. Stahlman	REFERS	One leg scale
Productions		CHECKED	-	-	Travel scale	
Tallinn, Estonia		APPROVED	-	-	Power supply	
		REVISED	-	-	SHEET	2 / 2
					DOC	1,000
					REV	A

Lisa 2 Mõõte- ja juhtahela elektriskeem

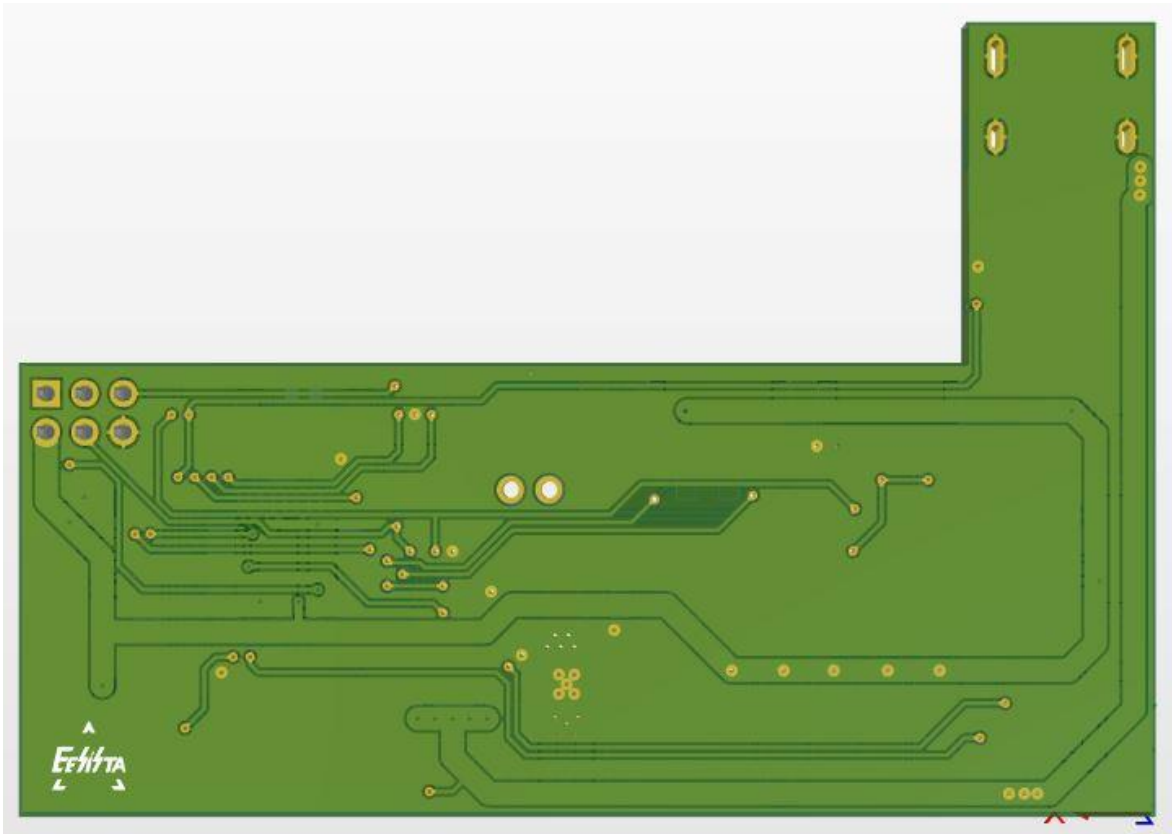


<b>EESISTA</b>		DRAWN		25.12.2020		S. Stahlman		REFERS		One leg scale	
Productions		CHECKED		-		-		SHEET		1 / 2	
Tallinn, Estonia		APPROVED		-		-		DOC		1.000	
		REVISED						Processing unit		REV	
										A	

Lisa 3 Projekteeritud trükkplaadi pealtvaade



Lisa 4 Projekteeritud trükkplaadi altvaade





**Lisa 5 Projekteeritud trükkplaadi tükitabel**

<b>Markeering</b>	<b>Kommentaar</b>	<b>Tootja</b>	<b>Farnelli-i tootekood</b>	<b>Kogus</b>
J2	ICSP pistik 2213S-06G	MULTICOMP PRO	1593440	1
J1, J4, J6, J7, J8, J9, J10	4 ühendusega pistik	JST (JAPAN SOLDERLESS TERMINALS)	1830899	7
U1	ATMEGA328P-AU mikrokontroller	MICROCHIP	1715486	1
C1, C2	keraamiline kondensaator, 22 pF, 50 V	KEMET	2821223	2
C16	keraamiline kondensaator, 10 pF, 1 kV	KEMET	2821125	1
C17	keraamiline kondensaator, 100 nF, 50 V	MULTICOMP PRO	2320901	1
C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15	keraamiline kondensaator, 10 µF, 25 V	MURATA	3582628	13
S1	reset lüliti FSM1LP	ALCOSWITCH - TE CONNECTIVITY	3397775	1
U2	ostsillaator, 16 MHz, 3,2 x 2,5 mm	MULTICOMP PRO	2853934	1
F1	kaitse MF-MSMF050-2, 500 mA	BOURNS	9350314	1
R1, R2	takisti, 1 kΩ, 125 mW	MULTICOMP PRO	2447587	2
R3, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R19	takisti, 10 kΩ, 250 mW	MULTICOMP PRO	2447455	10
R4, R5, R14, R15, R17, R20, R21, R22	takisti, 1 MΩ, 250 mW	MULTICOMP PRO	2447478	8
R16	takisti, 11 kΩ, 250 mW	MULTICOMP PRO	2447460	1
R18	takisti, 100 kΩ, 250 mW	MULTICOMP PRO	2447453	1
D1, D2, D3, D4	shottky diood RSX101M-30TR, 1 A, 30 V	ROHM	1680065	4
U3	DC-DC Buck-Boost regulaatori juhtkiip TPS63060DSCR	Texas Instruments	2082430	1

**Projekteeritud trükkplaadi tükitabeli järg**

<b>Markeering</b>	<b>Kommentaar</b>	<b>Tootja</b>	<b>Farnelli-i tootekood</b>	<b>Kogus</b>
J11	USB-C pistik	MOLEX	2524075	1
L1	induktor XFL4020-152, 1,5 $\mu$ H, 9,1 A	Coilcraft	2289215	1

## **Lisa 6 Mehaanilised joonised**

```

#include "math.h"

//-----7-segmendilise ekraani teekide lisamine-----
#include "LedControl.h"

//LedControl(DataIn,CLK,CS,MAX72XX mikroskeemide arv)
LedControl lc=LedControl(11,13,12,1);

//-----7-segmendilise ekraani teekide lisamine-----

//-----HX711 mooduli teekide lisamine-----

#include <HX711_ADC.h>
#include <EEPROM.h>

//LoadCell_x(Dout, SCK)
HX711_ADC LoadCell_1(3, 7); //HX711 1
HX711_ADC LoadCell_2(4, 7); //HX711 2
HX711_ADC LoadCell_3(5, 7); //HX711 3
HX711_ADC LoadCell_4(6, 7); //HX711 4

//EEPROM mälu seadistamine kalibratsiooniväärtuste salvestamiseks (4
baiti)
const int eepromAdress_1 = 0;
const int eepromAdress_2 = 4;
const int eepromAdress_3 = 8;
const int eepromAdress_4 = 12;

//-----HX711 mooduli teekide lisamine-----

//-----Puutetundliku nupu teekide lisamine-----

#include <CapacitiveSensor.h>

//1MOhm-i takisti kontaktide 8 ja 9 vahel. kontak 9 on mõõtekontakt
CapacitiveSensor cs_8_9 = CapacitiveSensor(8,9);
//Nupp on ühendatud digitaalsisendiga 9
int tare_button = 9;

//-----Puutetundliku nupu teekide lisamine-----

//-----Mikrokontrolleri sisendite seadistamine-----

//Akupinge mõõtmine on ühendatud analoogsisendiga 0
int battery = A0;
//Välise toite mõõtmine on ühendatud analoogsisendiga 1
int USB = A1;

//-----Mikrokontrolleri sisendite seadistamine-----

void setup() {

//-----7-segmendilise ekraani seadistamine-----

//Ekraani sisselülitamine
lc.shutdown(0,false);

```

## Kaalu programmi järg

```
//Valgustugevuse keskmisele väärtusele seadistamine
lc.setIntensity(0,8);
//Ekraani puhastamise käsklus
lc.clearDisplay(0);
//-----7-segmendilise ekraani seadistamine-----

//-----Puutetundliku nupu seadistamine-----

//Autokalibreerimise välja lülitamine
cs_8_9.set_CS_AutocaL_Millis(0xFFFFFFFF);

//-----Puutetundliku nupu seadistamine-----

//-----Käivitumisel esimese kahe punkti näitamine-----

//kogu laadimise protsessi aeg 2,5s jagatakse punktide vahel ära
int pause = (2500/8);

//Tühjenda ekraan ja näita kahte punkti
lc.clearDisplay(0);
lc.setLed(0, 7, 0, 1);
delay(pause);
lc.setLed(0, 6, 0, 1);
delay(pause);

//-----Käivitumisel esimese kahe punkti näitamine-----

//-----HX711 mooduli seadistamine-----

//Kalibratsioonikonstantid kõigile jõuanduritele
float calValue_1 = 266;
float calValue_2 = 266;
float calValue_3 = 266;
float calValue_4 = 266;

//HX711 moodulite käivitamine
LoadCell_1.begin();
LoadCell_2.begin();
LoadCell_3.begin();
LoadCell_4.begin();

//Stabiliseerimisaeg nulli, sest katsed näitasid, et see muudab
mõõtmised //aeglasemaks ilma kasutegurita
long stabilisingtime = 0;

//Muutujad jõuandurite valmisoleku indikeerimiseks
byte loadcell_1_rdy = 0;
byte loadcell_2_rdy = 0;
byte loadcell_3_rdy = 0;
byte loadcell_4_rdy = 0;

// Jõuanduritel info kogumise jäi vitamine ja nullimine. Tehakse seni
//kuni kõik andurid on töövalmis
while ((loadcell_1_rdy + loadcell_2_rdy + loadcell_3_rdy +
loadcell_4_rdy) < 4) {
    if (!loadcell_1_rdy){
```

## Kaalu programmi järg

```
    loadcell_1_rdy = LoadCell_1.startMultiple(stabilisingtime);
}
if (!loadcell_2_rdy){
    loadcell_2_rdy = LoadCell_2.startMultiple(stabilisingtime);
}
if (!loadcell_3_rdy){
    loadcell_3_rdy = LoadCell_3.startMultiple(stabilisingtime);
}
if (!loadcell_4_rdy){
    loadcell_4_rdy = LoadCell_4.startMultiple(stabilisingtime);
}
}
//Käivitumise ebaõnnestumise korral kuvatakse teade "OL" ja vea andnud
//anduri number
while(LoadCell_1.getTareTimeoutFlag()) {
    lc.clearDisplay(0);
    lc.setChar(0,7,0,0);
    lc.setChar(0,6,'L',0);
    lc.setChar(0,5,1,0);
}
while(LoadCell_2.getTareTimeoutFlag()) {
    lc.clearDisplay(0);
    lc.setChar(0,7,0,0);
    lc.setChar(0,6,'L',0);
    lc.setChar(0,5,2,0);
}
while(LoadCell_3.getTareTimeoutFlag()) {
    lc.clearDisplay(0);
    lc.setChar(0,7,0,0);
    lc.setChar(0,6,'L',0);
    lc.setChar(0,5,3,0);
}
while(LoadCell_4.getTareTimeoutFlag()) {
    lc.clearDisplay(0);
    lc.setChar(0,7,0,0);
    lc.setChar(0,6,'L',0);
    lc.setChar(0,5,3,0);
}

//Kalibratsioonikonstanti seadistamine
LoadCell_1.setCalFactor(calValue_1);
LoadCell_2.setCalFactor(calValue_2);
LoadCell_3.setCalFactor(calValue_3);
LoadCell_4.setCalFactor(calValue_3);
Serial.println("Startup + tare is complete");

//-----HX711 mooduli seadistamine-----

//-----Käivitumisel 3-6 punkti näitamine-----

lc.setLed(0, 5, 0, 1);
delay(pause);
lc.setLed(0, 4, 0, 1);
delay(pause);
lc.setLed(0, 3, 0, 1);
delay(pause);
lc.setLed(0, 2, 0, 1);
delay(pause);
```

## Kaalu programmi järg

```
//-----Käivitumisel 3-6 punkti näitamine-----

//-----Mikrokontrolleri sisendite seadistamine-----

    //Lähtestamise nupu seadistamine sisendiks
    pinMode(tare_button, INPUT);
    //Patareipinge ühenduse seadistamine sisendiks
    pinMode(battery, INPUT);
    //Välise toiteallika ühenduse seadistamine sisendiks
    pinMode(USB, INPUT);

//-----Mikrokontrolleri sisendite seadistamine-----
}

//-----Programmi põhimuutujad-----
//Muutujad jõuandurite mõõtetulemuste salvestamiseks
long a = 0;
long b = 0;
long c = 0;
long d = 0;

//Muutuja summeritud tulemuse salvestamiseks cf = a+b+c+d
long cf = 0;

//Muutujad ühelistele, kümnelistele,..., miljonilistele
int num11;
int num12;
int num13;

int num21;
int num22;
int num23;

int num31;
int num32;
int num33;

//Muutujad 7-segmendilise display numbrite kuvamiseks
int num0 = ' ';
int num1 = ' ';
int num2 = ' ';
int num3 = ' ';
int num4 = ' ';
int num5 = ' ';
int num6 = ' ';
int num7 = ' ';
int dot0 = 0;
int dot1 = 0;
int dot2 = 0;
int dot3 = 0;
int dot4 = 0;
int dot5 = 0;
int dot6 = 0;
int dot7 = 0;

//Massiiv komakohtade salvestamiseks
int dp[8] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
//Massiiv eelmise jagatud mõõteväärtuse salvestamiseks
```

## Kaalu programmi järg

```
int LAST_BYTE[8] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};

//Lippude muutujad
int tare_flag = 0; //Lähtestamise lipp
int tare_done = 1; //Lähtestamine lõpetatud lipp
int first = 0; //Esimese tsükli lipp
int freeze = 0; //Näidu fikseerimise lipp
int low_battery = 0; //Madala akupinge lipp
int OL = 0; //Ülekoormuse lipp
int minus; //Negatiivse väärtuse lipp

//Loendurite ja aja muutujad
unsigned long p; //Ekraani uuendamise ajaloendur
int tare_counter = 0; //Lähtestamiste loendur
int match = 0; //Näidu samasuse loendur
unsigned long o = 0; //Näidu fikseerimise ajaloendur
long t; //HX711 mooduli ajaloendur

//-----Programmi põhimuutujad-----

//-----Alamprogrammid-----

// Funktsioon lähtestamise nupu oleku lugemiseks
int Din_check(){
    int result=0;
    //Nupu oleku lugemine
    result = cs_8_9.capacitiveSensor(30);
    //Nupu vajutamisel töstetakse flag
    if(result >= 300){
        result = 1;
    }
    else{
        result = 0;
    }
    return result;
}

//Mõõtetulemuse jagamise funktsioon tulemuse kuvamiseks 7-segmendilisel
//ekraanil
long* split(long number){

    //Massiivi definitsioon andmete salvestamiseks
    static long BYTE[8] = {' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ',0};
    long k = 1;

    //Ühelisteks, künnelisteks,..., sajatuhandelisteks jagamise tehe
    //Väärtus jagatakse 1, 10, 100, 1000, 10000 ja 100000 ja leitakse jääk.
    for (int i = 0; i < 6; i++){
        BYTE[i] = ((number / k) % 10);
        k = k*10;
    }
    return BYTE;
}

//Funktsioon numbrite kuvamiseks 7-segmendilisel ekraanil
void show(int d1, int dp1, int d2, int dp2, int d3, int dp3, int d4, int
dp4, int d5, int dp5, int d6, int dp6, int d7, int dp7, int d8, int dp8){
```



## Kaalu programmi järg

```
lc.clearDisplay(0); //clear
lc.setChar(0,7,d1,dp1);
lc.setChar(0,6,d2,dp2);
lc.setChar(0,5,d3,dp3);
lc.setChar(0,4,d4,dp4);
lc.setChar(0,3,d5,dp5);
lc.setChar(0,2,d6,dp6);
lc.setChar(0,1,d7,dp7);
lc.setChar(0,0,d8,dp8);
}

//Funktsioon eelmise mõõteväärtuse ja uue mõõteväärtuse võrdlemiseks
int Check_last(long int NEW_BYTE[8]){
    int result=0;
    //Kontrollib kõiki bite. Kui bit langeb kokku, siis kontrollitakse
    järgmist bit-i. Kui kõik Bit-d on samad, siis tagastab 1-e.
    for (int i = 7; i >= 0; i--){
        if(LAST_BYTE[i] == NEW_BYTE[i]){
            if(i == 0){
                result = 1;
            }
        }
    }
    //Kui bit ei lange kokku, siis kirjutab eelmise mõõteväärtuse üle ja
    tagastab 0-i.
    else{
        for (int i = 7; i >= 0; i--){
            LAST_BYTE[i] = NEW_BYTE[i];
            result = 0;
        }
        break;
    }
}
return result;
}

//Funktsioon toitepingete kontrollimiseks
int power_check(){
    int result=0;
    int USB_voltage = 0;
    USB_voltage = analogRead(USB);
    //Maksimaalne ADC väärtus saab olla 5 V puhul 511 seoses 1/2
    //pingejaguriga mõõteahelas
    //Seega kui mõõdetakse enam kui 496 (4,85 V), on väline toiteallikas
    //ühendatud. Arvutus: (511/5)*4,85 = 496
    if(USB_voltage >= 496){
        result = 9999;
    }
    else{
        //Kui väline toiteallikas ei ole ühendatud, siis mõõdetakse ja
        //tagastatakse patareipinge.
        result = analogRead(battery);
    }
    return result;
}
//-----Alamprogrammid-----
```

## Kaalu programmi järg

```
//-----Põhiprogramm-----
void loop() {
  //Teosta iga 10 ms järel jõuandurite mõõtmine. Kui väärtused ületavad
  //anduri maksimaalse väärtuse, siis kuvab veateate.
  //*****
  do{
    LoadCell_1.update();
    LoadCell_2.update();
    LoadCell_3.update();
    LoadCell_4.update();

    if (millis() > t + 10) {
      a = LoadCell_1.getData();
      b = LoadCell_2.getData();
      c = LoadCell_3.getData();
      d = LoadCell_4.getData();

      t = millis();

      //Kui 1. andur mõõdab üle 45 kg-i, siis tõsta OL lipp ja kuva
      //veateade
      if(a >= 45000 || a <= -45000){
        OL = 1;
        show(0, 0, 'L', 0, 1, 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0);
        delay(1);
      }
      //Kui 2. andur mõõdab üle 45 kg-i, siis tõsta OL lipp ja kuva
      //veateade
      else if(b >= 45000 || b <= -45000){
        OL = 1;
        show(0, 0, 'L', 0, 2, 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0);
        delay(1);
      }
      //Kui 3. andur mõõdab üle 45 kg-i, siis tõsta OL lipp ja kuva
      //veateade
      else if(c >= 45000 || c <= -45000){
        OL = 1;
        show(0, 0, 'L', 0, 3, 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0);
        delay(1);
      }
      //Kui 4. andur mõõdab üle 45 kg-i, siis tõsta OL lipp ja kuva
      //veateade
      else if(d >= 45000 || d <= -45000){
        OL = 1;
        show(0, 0, 'L', 0, 4, 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0, ' ', 0);
        delay(1);
      }
      //Kui kõik on korras, siis langeta lipp
      else{
        OL = 0;
      }

      //Kui kõikide andurite mõõteväärtused on lubatu piires, siis liida
      //tulemused kokku
      cf = a+b+c+d;
    }
  }
  //Veateadet kuvatakse seni kuni ükski andur enam viga ei näita
}while(OL == 1);
//*****
```

## Kaalu programmi järg

```
//Toitepinge kontroll. Kui pinge on alla 3,5 V, siis tõstab patarei
//lipu.
//Kui väline toiteallikas on ühendatud, siis kuvatakse kasutajale
//sellekohane märguanne
//*****

//Välise toiteallika korral kuvatakse kasutajale sellekohane märguanne
if(power_check() == 9999){
    dp[0] = 1;
    low_battery = 0;
}
//Liiga madala patareipinge korral tõstetakse patarei lipp
else{
    if((power_check() <= 358)){
        low_battery = 1;
        dp[0] = 0;
    }
    //Kõikidel teistel kordadel langetatakse kõik toitega seotud lipud
    else{
        low_battery = 0;
        dp[0] = 0;
    }
}
//*****

//Numbrite jagamine ja kuvamine 7-segmendilisel ekraanil iga 100 ms
järele
//*****

if (millis() > p + 100){
    //Negatiivse mõõteväärtuse korral kuva "-" märk
    if(cf >= 0){
        minus = ' ';
    }
    else{
        minus = '-';
    }

    //Jaga mõõteväärtus eraldi numbriteks mida 7-segmendilisel ekraanil
    //kuvada
    long *BYTE = split(abs(cf));
    BYTE[6] = minus;

    //Kui raskus on suurem kui 4999g, siis kümnelisi ja ühelisi ei kuvata
    if(BYTE[5] !=0 || BYTE[4] !=0 || BYTE[3] > 4){
        BYTE[1] = ' ';
        BYTE[0] = ' ';
    }

    //Mõõteväärtus liigutatakse ekraanil võimalikult vasakule, et
    //kasutajale ei kuvataks üleliigseid nulle
    for(int i = 5; i >= 1; i--){
        if(BYTE[5] == 0){
            for(int j = 5; j >= 1; j--){
                BYTE[j] = BYTE[j-1];
                if(j == 1){
                    BYTE[0] = ' ';
                }
            }
        }
    }
}
```

## Kaalu programmi järg

```
    }
}
//Kui number on number on liigutatud maksimaalselt vasakule, siis
//vastavalt mõõteväärtusele:
// - Mõõteväärtus x on 1000g < x < 4999g, siis koma ei tule
else {
    if(i >= 3){
        if(i == 3 && BYTE[5] <= 4){
            for(int k = 7; k > 0; k--){
                dp[k] = 0;
                BYTE[7] = 0;
            }
        }
        // - mõõteväärtus x on x > 4999g, siis vastavalt väärtusele
        seatakse //kuvatakse koma
        else{
            dp[9-i] = 1;
            BYTE[7] = i;
            for(int m = 7; m > 0; m--){
                if(m != (9-i)){
                    dp[m] = 0;
                }
            }
        }
    }
}
// - Mõõteväärtus on väiksem kui 1000g, siis lülitatakse kõik
//punktid välja
else{
    for(int k = 7; k > 0; k--){
        dp[k] = 0;
        BYTE[7] = 0;
    }
}
break;
}
}

//Mõõteväärtuse võrdlemine eelmise mõõteväärtusega
//Kui väärtused sobivad, siis lisab ühe näidu samasuse loendurile
if((Check_last(BYTE) == 1) && (BYTE[7] >= 3)){
    match++;
}
//Kui väärtused ei sobi, siis lähtesta loendur
else{
    match = 0;
}

//Kui loenduri väärtus on suurem kui etteantud väärtus ja mõõdetav
//objekt kaalub rohkem kui 4999g,
//siis tõstab näidu fikseerimise lipu.
if((match >= 4) && (BYTE[7] >= 3) && (freeze == 0)){
    freeze = 1;
    o = millis();
    match = 0;
    num0 = 4;
}

//Esimesel käivitusel 7-8 punkti kuvamine ekraanil ning patarei
//vahetamise märguande kuvamine kui see on vajalik
```

## Kaalu programmi järg

```
if(first == 0){
    lc.setLed(0, 1, 0, 1);
    delay(312);
    lc.setLed(0, 0, 0, 1);
    delay(312);
    lc.clearDisplay(0);

    //Kui patarei lipp = 1, siis kuvatakse patarei vahetamise märguanne
    if(low_battery){
        num7 = 'L';
        num6 = 0;
        freeze = 1;
        o = millis();
    }
    first = 1;
}

//Kui näidu fikseerimise lipp = 1, siis näit fikseeritakse ja
//vilgutatakse kasutajale 3 korda
if(freeze == 1){
    int h = (millis()-o);

    if(h > 3500){
        freeze = 0;
        lc.clearDisplay(0); //clear
    }
    else if(h > 3000){
        show(' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0);
    }
    else if(h > 2500){
        show(num7, dot7, num6, dot6, num5, dot5, num4, dot4, num3, dot3,
            num2, dot2, num1, dot1, num0, dot0);
    }
    else if(h > 2000){
        show(' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0);
    }
    else if(h > 1500){
        show(num7, dot7, num6, dot6, num5, dot5, num4, dot4, num3, dot3,
            num2, dot2, num1, dot1, num0, dot0);
    }
    else if(h > 1000){
        show(' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0);
    }
    else if(h > 500){
        show(num7, dot7, num6, dot6, num5, dot5, num4, dot4, num3, dot3,
            num2, dot2, num1, dot1, num0, dot0);
    }
    else{
        show(' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0,' ',0);
    }
}

//Kui näidu fikseerimise lipp = 0, uuendatakse näidu kuvamiseks
//mõõtetulemusi
else{
    num0 = ' ';
    num1 = BYTE[0];
    num2 = BYTE[1];
    num3 = BYTE[2];
}
```

## Kaalu programmi järg

```
    num4 = BYTE[3];
    num5 = BYTE[4];
    num6 = BYTE[5];
    num7 = minus;
    dot0 = dp[0];
    dot1 = dp[1];
    dot2 = dp[2];
    dot3 = dp[3];
    dot4 = dp[4];
    dot5 = dp[5];
    dot6 = dp[6];
    dot7 = dp[7];

    //Kui näit ei ole fikseeritud ega lähtestamine pooleli, siis
    //kuvatakse kasutajale hetke mõõteväärtus
    if((tare_done == 1) || (tare_counter > 16)){
        if(freeze != 1){
            show(num7, dot7, num6, dot6, num5, dot5, num4, dot4, num3,
                dot3, num2, dot2, num1, dot1, num0, dot0);
        }

        tare_counter = 0;
        tare_done = 1;
    }
    else{
        tare_counter++;
        tare_done = 0;
    }
}

p = millis();

}
//*****

//Lähtestamise oleku kontroll. Kui kui lähtestamise nupp on vajutatud,
//siis kaal lähtestatakse ja kuvatakse märguanne
//*****

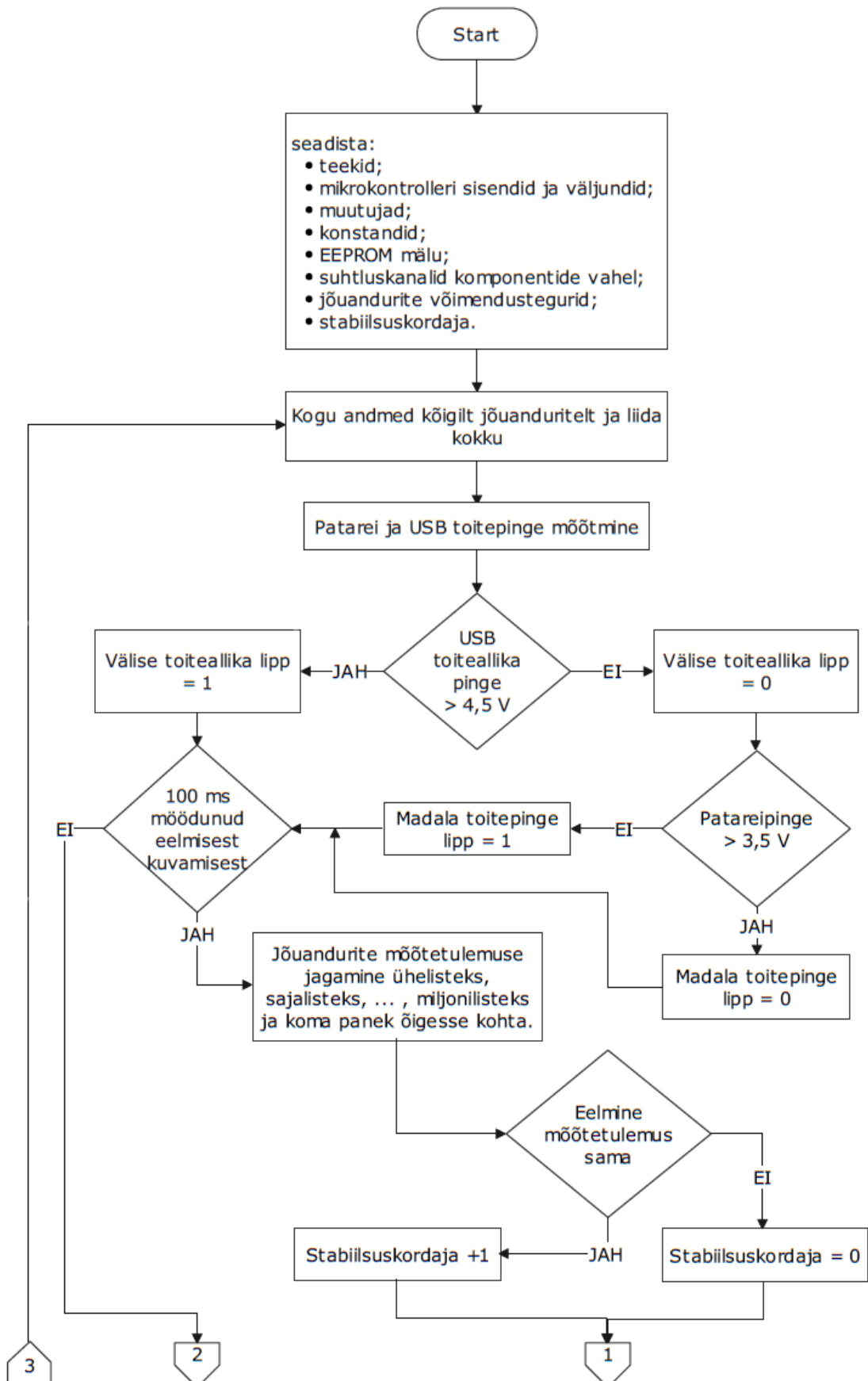
tare_flag = Din_check();
if((tare_flag == 1) && (tare_done == 1)){
    //show(1, dp1, 2, dp2, 3, dp3, 4, dp4, 5, dp5, 6, dp6, 7, dp7, 8,
dp8)
    show(' ', 1, ' ', 1, ' ', 1, ' ', 1, ' ', 1, ' ', 1, ' ', 1, ' ', 1);

    LoadCell_1.tareNoDelay();
    LoadCell_2.tareNoDelay();
    LoadCell_3.tareNoDelay();
    LoadCell_4.tareNoDelay();

    tare_done = 0;
}
//*****

delay(1);
}
//*****
//Põhiprogrammi lõpp
```

## Lisa 8 Programmi voogdiagramm



Programmi voogdiagrammi järg

