



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

Viskemehhanismi tugevuse ja lennuulatuse hindamine seadme kasutamisel

**Evaluation of the throwing mechanism strength and its ability to
provide flight range during the operation**

EDJR16/17 Masinaehitustehnoloogia ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Oleg Pronoza

Üliõpilaskood: 193123EDJR

Juhendaja: Igor Penkov

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.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS

Mina Oleg Pronoza (sünnikuupäev: 10.05.2000)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Viskemehhanismi tugevuse ja lennuulatuse hindamine seadme kasutamisel, mille juhendaja on Igor Penkov,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas 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 punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

Üliõpilane: Oleg Pronoza, 193123EDJR

Õppekava, peeriala: EDJR16/17 Masinaehitus- ja energiatehnoloogia protsesside juhtimine

Juhendaja(d): Lektor, Igor Penkov, igor.penkov@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Viskemehhanismi tugevuse ja lennuulatuse hindamine seadme kasutamisel.

(inglise keeles) Evaluation of the throwing mechanism strength and its ability to provide flight range during the operation.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Ballistika arvutamine. Vastukaalu sõltuvuse arvutamine lennukaugusest (füüsikalised arvutused).
2. Tugevuse arvutamine koos koormustega.
3. 3D-mudel.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Trebuchet mõõtmised Kohtla Järvel.	12.03.23
2.	Ballistika. Vastukaalu sõltuvuse arvutamine lennukaugusest.	23.04.23
3.	Komponentide, hoobade, kurvide, koormuste tugevus.	21.04.23
4.	Mudeli ja lõplike elementide tugevuse ja jäikuse arvutused.	31.03.23
5.	Tööjoonised ja lõputöö vormistamine.	10.05.23

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: 22.05.2023

Üliõpilane: Oleg Pronoza

“22”mai 2023a

/allkiri/

Juhendaja: Igor Penkov

“22”mai 2023a

/allkiri/

Programmijuht: Veronika Shirokova

“22”mai 2023a

/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
SISSEJUHATUS	7
1 RASKUSJÕUL PÕHINEV HEITEMASIN	8
2 LENNUTEE	9
2.1 Liikumine ilma õhutakistusega	10
2.2 Liikumine õhutakistusega	11
3 MÕÕTMISMEETODID	16
3.1 Nurga mõõtmine	16
3.2 Kiiruse mõõtmine	16
3.3 Kauguse mõõtmine.....	18
4 KATSED	19
5 KONSTRUKTSIOON ARVUTUS	25
KOKKUVÕTE	31
SUMMARY.....	32
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	33
LISAD	34
GRAAFILINE OSA.....	35

EESSÕNA

Kolledžis õppides oli autoril sageli raskusi õhutakistuseta mürsu trajektoori hindamisega ja ta tahtis minna sellesse ballistika valdkonda ja analüüsida õhutakistusega mürsu trajektoori.

Töö idee sai alguse väikesest projektist koolituse käigus, millest kasvas välja mahukas ballistika, lennutrajektoori, disaini ja konstruktsiooniarvutuste uurimus. Töö eesmärk on uurida trebucheti dünaamilisi omadusi, visatud mürsu trajektoori ja luua universaalne valem konkreetse ehitatud trebucheti laskekauguse arvutamiseks.

See töö rakendab õppeasutuses saadud teadmisi hästi praktikas.

Täna kõiki, kes aitasid lõputöö tegemisel, gruppi abi eest trebucheti valmistamisel, mentorit abi eest arvutuste tegemisel, kolledži personali tööks aja tagamise eest.

Võtmesõna: trebuchet, ballistika arvutused, rakenduskõrgharidusõppe, diplom.

SISSEJUHATUS

See töö on trebucheti lühikirjeldus ja mürsu trajektoori arvutamine. Lennukaugust mõjutavate füüsikaliste nähtuste kirjeldus ning trebucheti parameetrite jälgimise ja mõõtmise meetodid. Mürsu erinevate viskenurkade katsed ja masside ja viskekauguse sõltuvussuhete graafikute koostamine.

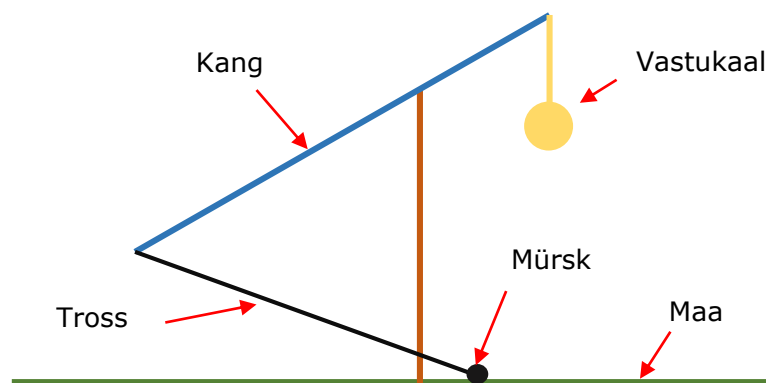
Trebuchet on keeruline seade, mis on loodud massi (mürsu) võimalikult kaugele ja täpselt viskamiseks. Erinevate suuruste muutused mõjutavad mürsu ulatust, vabastamiskiirust ja trebucheti üldist tõhusust. Selles uuringus oli reguleeritav ainult heitesnurk ning vastukaalu ja mürsu massid. Ülejäänud seaded jäid muutmata.

1 RASKUSJÕUL PÕHINEV HEITEMASIN

Trebuchet on vastukaalu põhimõttel töötav mürsu laskemasin. See masin töötab vastukaalu riputamisega kõrgusele. Gravitatsiooni jõud sunnib mehhanismi käivitamisel vastukaalu langema. Tross sirgub täielikult ja laseb mürsu välja. Mürsu kiiruse määrab trebucheti konstruktsiooniga ette nähtud nurk.

Seetõttu laseb trebuchet mürsu kindla kiirusega kindlaksmääratud kaldenurga all. Viskejõudu saab muuta reguleerides vastukaalu massi, vabastusnurka või konstruktsiooni kuju.

Trebuchet on valmistatud pikast talast või varrest, mis on ühendatud esmase toega. Tala ühes otsas on korv või platvorm mürsu paigutamiseks, teises aga vastukaal. Kangi saab asetada pöörlevale teljele, mis võimaldab reguleerida kalde astet erinevate viskekauguste saavutamiseks.

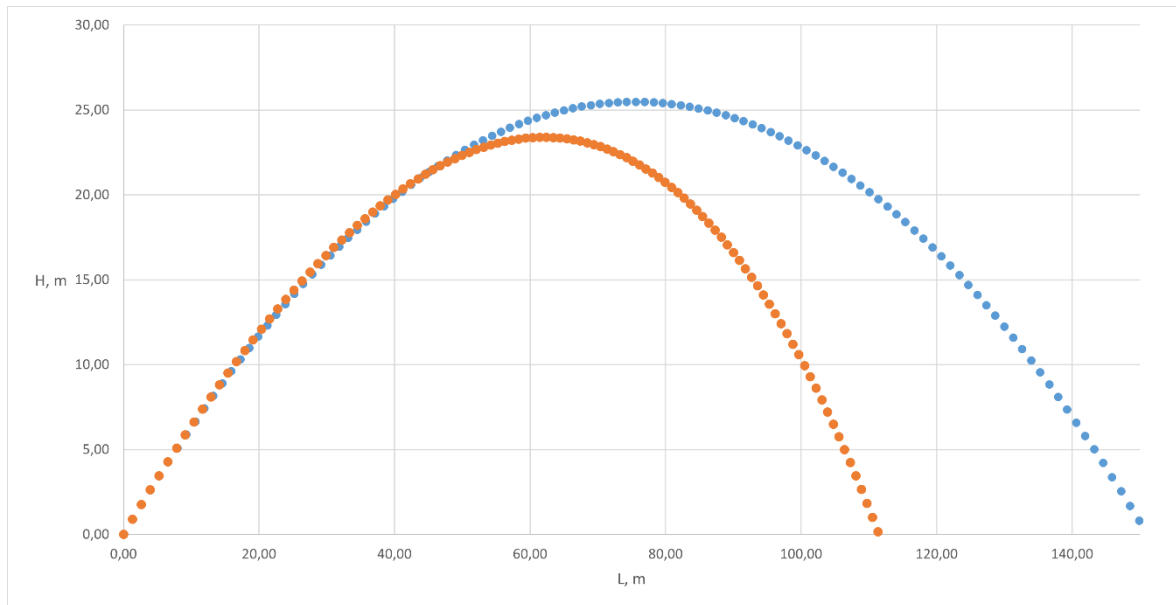


Joonis. 1 Trebuchet

Trebuchet aktiveerub kui mürsk on korvi asetatud ja vajalik kaldenurk on valitud. Seda saab teha erinevate meetoditega, sealhulgas luku vabastamine, vedrude pingutamine või pingenergia vabastamine hoobade ja trosside mehhanismi kaudu.

Trebuchet'i töö põhineb lihtsatel mehaanilistel kontseptsioonidel, nagu käed ja vastukaal. See muudab trebucheti intrigeerivaks õppeteemaks füüsika- ja inseneritundete ning entusiastide jaoks, võimaldades neil mõista mehaanika põhialuseid ja neid praktikas rakendada.

2 LENNUTEE



Joonis. 2 Trajektoor

Sinine värv tähistab mürsu trajektoori vaakumis. Oranž värv on õhus.

Lennutrajektoor on marsruut, mille lennul olev objekt läbib alates selle õhkutõusmisest kuni maandumiseni. Lennutrajektoori määratletakse kui objekti liikumist kahes mõõtmes, kus määravad parameetrid on kõrgus ja pikkus.

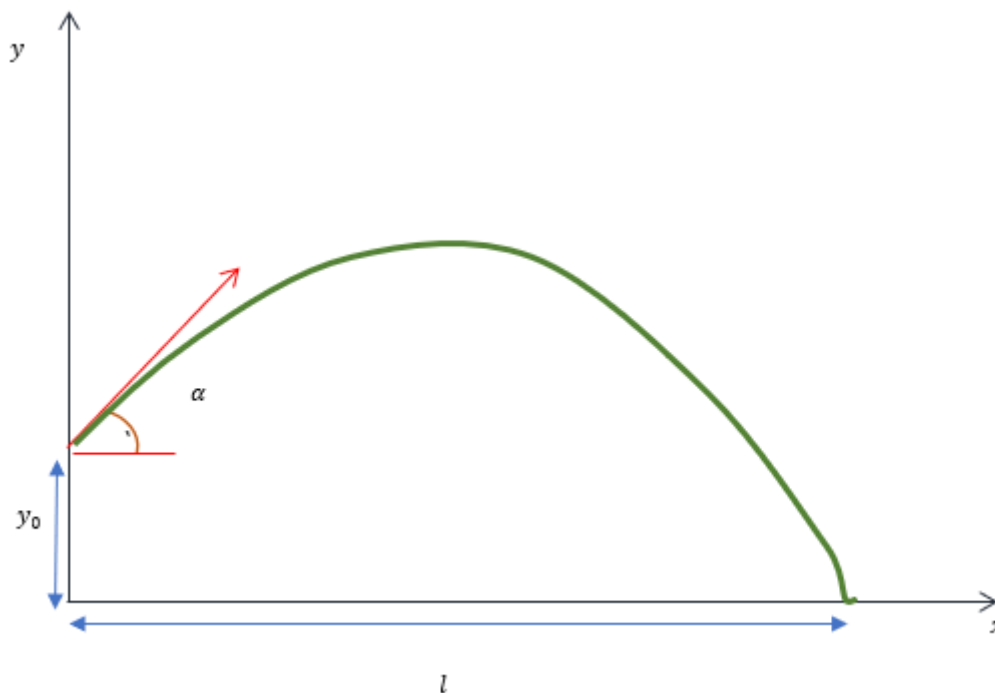
Õhutakistusega ja ilma lennukauguse erinevus seisneb selles, et õhutakistus on tegur, mis mõjutab objekti kiirust, suunda ja ulatust. Objekt läheb õhutakistuse puudumisel mööda parabooli konstantse horisontaalkiirusega ning selle lennuulatuse määrab ainult algkiirus ja stardinurk.

Kõik lendavad objektid aga puutuvad kokku õhutakistusega, mis aeglustab nende liikumist ja sunnib neid teises suunas kalduma. Erinevalt ilma õhutakistusega lendavate objektidega on õhutakistusega lendavatel objektidel keerulisem lennutrajektoor ja väiksem lennuulatus.

Õhutakistuse arvestamiseks lennutrajektoori määramisel tuleb kasutada matemaatilisi mudeleid, mis võtavad arvesse selliseid tegureid nagu objekti mass, ristlõikepindala, takistustegur, koonu kiirus ja stardinurk. Neid muutujaid saab muuta, et saavutada kõrgeim lennuulatus ja need mõjutavad lennu vormi ja ulatust.

Üldiselt mängib õhutakistus olulist rolli objekti lennutrajektoori määramisel. Atmosfääris lendavate seadmete ehitamisel ja käivitamisel tuleb sellega arvestada, kuna see võib lennuulatust oluliselt muuta.

2.1 Liikumine ilma õhutakistusest



Joonis. 3 Lennutee

Mürsk jälgib parabooli, kui võtta arvesse ruumilist liikumist või antud juhul lendu kahes koordinaadis.

$$x = v_0 * \cos\alpha * t \quad (2.1)$$

$$y = y_0 * \sin\alpha * t - \frac{g * t^2}{2} \quad (2.2)$$

See on parabooli valemi üldine esitus.

$$ax^2 + bx + c = y \quad (2.3)$$

Seda valemit kasutatakse lennu üldise pikkuse määramiseks.

$$\frac{gt^2}{2} + \sin\alpha t + y_0 = 0 \quad (2.4)$$

kus, y_0 – esialgne viskekõrgus, h,

g – gravitatsioonikonstant, $\frac{m}{s^2}$,

valime $g = 9,818 \text{ m/s}^2$ [6],

α – viskenurk, °,

t – aeg õhus, t,

Lisaks tuleb võrrandi juurte leidmiseks seda tehnikat kasutades valida aja jaoks positiivne arv, kuna see ei saa olla negatiivne, et määrata lennu kogukestus.

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a} \quad (2.5)$$

Vahemiku määramiseks peate rakendama kehtestatud valemit (2.1).

2.2 Liikumine õhutakistusega

Eelmise lõigu arvutused ei sobi enam takistusega lennumarsruudi arvutamiseks. Mürsk ei lenda enam paraboolis õhutakistuse tõttu, kuna läbi ruumi liikuv keha puutub kokku frontaalse õhutakistuse jõuga.

Tõmbetrajektoori saab tuletada ja arvutada mitmel viisil. Siin on kiire meetod lennutrajektoori jäljendamiseks.

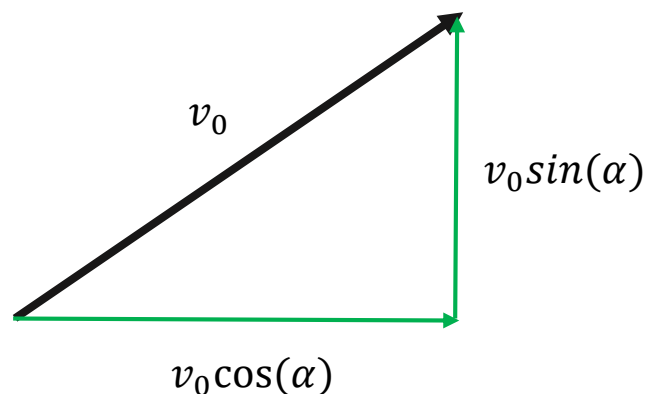
Mürsu lennutrajektoori loomisel kasutati Exceli tabelit. Valemid jagati piki x- ja y-telge osadeks, et määrata nihe, kiirus, takistus ja kiirendus. Mürsu liikumise põhjal tehti mürsu lennutrajektoori kujutav graafik ja andmed sisestati andmebaasi. Mürsu trajektoori loomiseks vajalikud arvutused on jaotatud järgmises järjestuses ja üksikasjalikult [5].

Tabel 1

Aeg	Kaugus		Kiirus		Õhutakistus		Kiirendus	
s	X, m	Y, m	X, m/s	Y, m/s	X, N	Y, N	X, m/s ²	Y, m/s ²

Kiirus

Algkiiruse vektor jagatakse kõigepealt selle x ja y komponendiks, et hõlbustada valemit.



Joonis. 4 Kiiruse suunda jagamine

Neid valemeid kasutades saame algkiiruse vektorid (Joonis 4).

$$v_x = v * \cos\alpha \quad (2.6)$$

$$v_y = v * \sin\alpha \quad (2.7)$$

kus, v_x – x-telje mürsu kiirus, $\frac{m}{s}$,

v_y – y-telje mürsu kiirus, $\frac{m}{s}$,

v – alguskiirus, $\frac{m}{s}$,

α – viskenurk, °.

Nende arvutuste abil määratakse ainult kiiruste algväärtused piki telge. Kiirendust arvestavaid valemeid kasutatakse kiiruse arvutamiseks lendu lõpus.

$$v_{n+1} = v_n + a_n \Delta t \quad (2.8)$$

kus, v_{n+1} – järgmine kiirus, $\frac{m}{s}$,

v_n – eelmine kiirus, $\frac{m}{s}$,

a_n – kiirendus, $\frac{m}{s^2}$,

Δt – aja muutus, s.

Nüüd tuleb lahutama x- ja y-komponentideks.

$$v_{xn+1} = v_{xn} + a_{xn} \Delta t \quad (2.9)$$

$$v_{yn+1} = v_{yn} + a_{yn} \Delta t \quad (2.10)$$

kus, v_{xn+1} – x-telje järgmine kiirus, $\frac{m}{s}$,

v_{yn+1} – y-telje järgmine kiirus, $\frac{m}{s}$,

v_{xn} – x-telje eelmine kiirus, $\frac{m}{s}$,

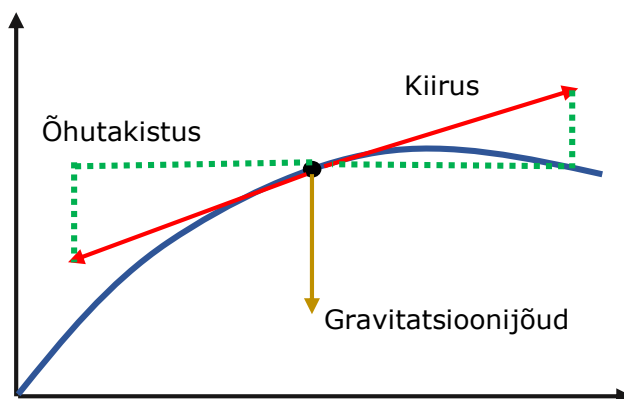
v_{yn} – y-telje eelmine kiirus, $\frac{m}{s}$,

a_{xn} – x-telje kiirendus, $\frac{m}{s^2}$,

a_{yn} – y-telje kiirendus, $\frac{m}{s^2}$,

Δt – aja muutus, s.

Õhutakistus



Joonis. 5 Õhutakistuse suund

Seejärel tuleks valemit kasutada iga komponendi tõmbejõu arvutamiseks [2].

$$|F_d| = \frac{1}{2} * C_d * A * \rho * v^2 \quad (2.10)$$

kus, F_d – õhutakistuse jõud, N,

C_d – takistustegur, $\frac{N}{m \cdot kg \cdot s^2}$,

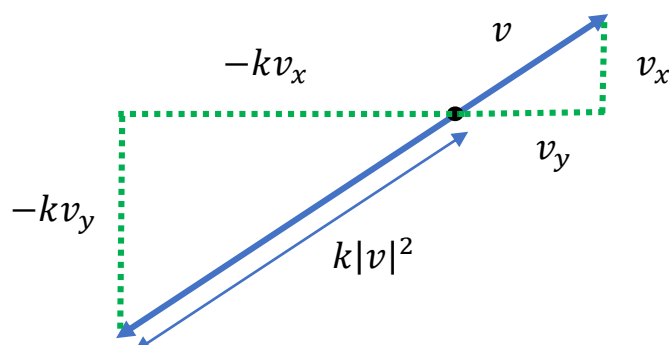
$C_d = 0,47 \frac{N \cdot s^2}{m \cdot kg}$, (vt Lisa 1 Tabel 1)

A – mürsu läbilõikepindala, m^2 ,

ρ – vedeliku/gaasi tihedus, $\frac{kg}{m^3}$,

$\rho = 1,29 \frac{kg}{m^3}$ [7],

v – mürsu kiirus, $\frac{m}{s}$.



Joonis. 6 Õhutakistuse suunda jagamine

See tähendab, et takistus vaadeldakse iga telje jaoks eraldi. Võrrandid tuleks väljendada - märgiga, sest tuleb meeles pidada, et takistusjõud töötab kiirusvektorile vastupidises suunas. Ruutkiiruse vektori suunale vastassuunas on alati õhutakistusjõud.

$$F_{dx} = -\frac{1}{2} * C_d * A * \rho * v_x^2 \quad (2.11)$$

$$F_{dy} = -\frac{1}{2} * C_d * A * \rho * v_y^2 \quad (2.12)$$

kus, C_d – õhutakistuse tegur, $\frac{N}{m \cdot kg \cdot s^2}$,

$C_d = 0,47 \frac{N \cdot s^2}{m \cdot kg}$, (vt Lisa 1 Tabel 1)

A – mürsu läbilõikepindala, m^2 ,

ρ – vedeliku/gaasi tihedus, $\frac{kg}{m^3}$,

$\rho = 1,29 \frac{kg}{m^3}$ [7],

v – mürsu kiirus, $\frac{m}{s}$.

F_{dx} – x-telje õhutakistuse jõud, N,

F_{dy} – y-telje õhutakistuse jõud, N,

v_x – x-telje mürsu kiirus, $\frac{m}{s}$,

v_y – y-telje mürsu kiirus, $\frac{m}{s}$.

Kiirendus

Seda meetodit kasutades saame pärast tõmbejõu määramist määrata mürsu kiirendus ruumis.

$$\sum F = ma \rightarrow a = \frac{\sum F}{m} \quad (2.13)$$

kus, a – mürsu kiirendus, $\frac{m}{s^2}$,

$\sum F$ – mürsule mõjuvate jõudude summa, N,

m – mürsu mass, kg.

$$a_y = \frac{\sum F_y}{m} \quad (2.14)$$

$$a_y = \frac{\sum F_y}{m} \quad (2.15)$$

kus, a_x – x-telje kiirendus, $\frac{m}{s^2}$,

a_y – y-telje kiirendus, $\frac{m}{s^2}$,

$\sum F_x$ – x-telje mõjuvate jõudude summa, N,

$\sum F_y$ – y-telje mõjuvate jõudude summa, N.

Kaugus

Selle valemi abil saame määrata mürsu liikumist ruumis pärast kiirenduse määramist.

$$l_{n+1} = l_n + v_n * \Delta t \quad (2.16)$$

kus, l_{n+1} – uus asukoht, m,

l_n – eelmine asukoht, m,

v_n – kiirus enne asendi muutmist, $\frac{m}{s}$,

Δt – aja muutus, s.

Laiendame valemit x, y telgedel.

$$x_{n+1} = x_n + v_{nx} * \Delta t \quad (2.17)$$

$$y_{n+1} = y_n + v_{ny} * \Delta t \quad (2.18)$$

kus, x_{n+1} – x-telje uus asukoht, m,

y_{n+1} – y-telje uus asukoht, m,

y_n – y-telje eelmine asukoht, m,

x_n – x-telje eelmine asukoht, m,

v_{nx} – x-telje kiirust enne asendi muutmist, $\frac{m}{s}$,

v_{ny} – y-telje kiirust enne asendi muutmist, $\frac{m}{s}$,

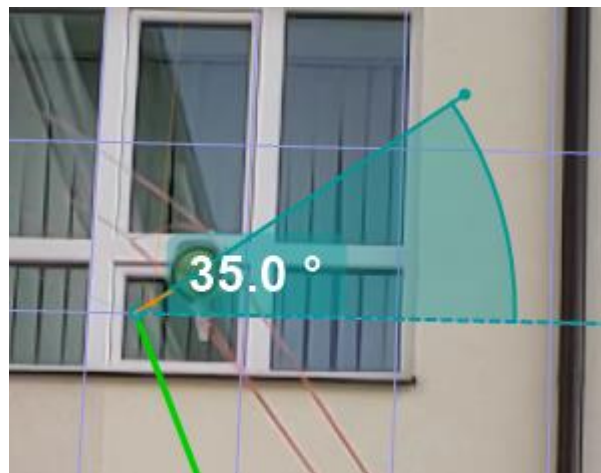
Δt – aja muutus, s.

3 MÕÕTMISMEETODID

3.1 Nurga mõõtmine

Mürsu kukkumisnurga määramiseks kasutati katsetamist. Vastukaalu vastasküljele kinnitatakse nurgakruvi. Trebucheti keeramisel kinnitatakse trossi külge seib, mis seejärel kinnitatakse kruvi külge. Kruvi samm reguleerib nurka, mille all seib kruvilt maha libiseb ja laskub mürsku.

Trebuchet'ist käivitatud proovivõte jäädvustati kaamerale kaadrisagedusega 120 kaadrit sekundis, et mõõta palli vabastamise nurka.



Joonis. 7 Heitenurk leidmine

Kukkumisnurk on nurk, mille juures seib kruvilt maha libiseb ja trebuchet lõpetab mürsule energia edastamise, mis näitab, et mürsk on juba lennus.

3.2 Kiiruse mõõtmine

Kiirust mõõdeti aeglustatud telefoniga ja trebuchet-mürsu heite kiirus määrati rakenduse Kinovea abil.

Potentsiaalse energia valemit saab kasutada selleks, et arvutada, kui palju energiat teatud kõrgusel vastukaalus talletub.

$$PE = mgh \quad (3.1)$$

kus, PE – vastukaalu potentsiaalne energia, J,

m – vastukaalu mass, kg,

g – gravitatsioonikirendus, m/s^2 ,

valime $g = 9,818 m/s^2$,

h – vastukaalu töökaugus, m.

$$PE = 2,97 * 9,81 * 0,42 = 12,23 \text{ J} \quad (3.2)$$

Pärast seda, kui on kindlaks tehtud, kui palju potentsiaalset energiat vastukaal suudab tekitada, on võimalik määrata kiirus, mille trebuchet mürsule annab, kasutades kineetilise energia võrrandit ja eeldades, et trebuchet kannab kogu energia mürsule.

$$KE = \frac{m_{mursk} * v^2}{2} \quad (3.3)$$

kus, KE – mürsu kineetiline energia, J,

m_{mursk} – mürsu mass, kg,

v – mürsu kiirus, $\frac{m}{s}$,

Arvutuste hõlbustamiseks saab valemit lihtsustada.

$$KE = PE \quad (3.4)$$

kus, KE – mürsu kineetiline energia, J,

PE – vastukaalu potentsiaalne energia, J.

$$KE = \frac{m_{mursk} * v^2}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 * KE}{m_{mursk}}} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 * PE}{m_{mursk}}} \quad (3.5)$$

kus, KE – mürsu kineetiline energia, J,

m_{mursk} – mürsu mass, kg,

v – mürsu kiirus, $\frac{m}{s}$,

PE – vastukaalu potentsiaalne energia, J.

$$v = \sqrt{\frac{2 * 12,23}{0,13}} = 13,72 \text{ m/s} \quad (3.6)$$

See kehtib ainult siis, kui vastukaalu potentsiaalne energia on täielikult üle kantud mürsu kineetiliseks energiaks, st kiiruseks. Selle valemi abil saab arvutada trebucheti energiaülekande efektiivsus.

$$v_M = \frac{S}{t} \quad (3.7)$$

kus, S – kaugus, m,

v_M – kiiruse mõõdetud väärtus, $\frac{m}{s}$,

t – aeg, s.

Tõhususe saame valemist, teades vastukaalus talletatud energiat ja arvutades mürsu kiiruse trebucheti järgi.

$$v = \eta * v_M \rightarrow \eta = \frac{v_{heide}}{v} * 100\% \quad (3.8)$$

kus, η – tõhusus, %,

v_M – kiiruse mõõdetud väärtus, $\frac{m}{s}$,

v – arvatud kiirus, $\frac{m}{s}$.

Selgub:

$$\eta = \frac{6,75}{13,72} * 100\% = 49,19\% \quad (3.9)$$

Selle tulemusena on efektiivne energiaülekanne ligikaudu 50%.

3.3 Kauguse mõõtmine

Mõõdud koguti 50-meetrisel köiel markerite ja mõõdulindiga. Iga üksik kaal märgistati kasvava seerianumbriga.



Joonis 8 Mõõtmise vahend

Vaadeldud kaugus on 6,82 meetrit, hinnanguline kaugus aga 6,38 meetrit.

$$\frac{6,38}{6,82} * 100\% \approx 93\% \quad (3.10)$$

Järeldus

See näitab, et lennukauguse mõõtmise ja arvutamise meetod on 93% täpne.

4 KATSETE TULEMUSED

Katse eesmärk oli määrata tennisepalli lennuulatus erinevate alguskiiruste ja stardinurkade korral. Selleks viidi iga antud alguskiiruse kohta läbi 5 katset, et määrata kindlaks keskmine lennukaugus ja vähendada viga. Iga 5 katse järel suurendati alguskiirust 1 kilogrammi vastukaalu võrra, kokku 9 kiirust.

Tennisepalli käivitamiseks kasutati trebuchet'i, mis võimaldab reguleerida palli stardinurka ja palli alguskiirust. Valiti kaks stardinurka, 0 ja 35 kraadi, et uurida, kuidas nurga muutmine mõjutab palli ulatust.

Mõõtmised tehti iga katse kohta ning arvutati iga nurga ja alguskiiruse keskmine lennuulatus.

Selle katse tulemused aitavad mõista, kuidas alguskiirus ja stardinurk mõjutavad tennisepalli lennuulatust.

Tabel 2. Katsed

Valitud nurk 0°						
Kaugus, m					Mürsu mass, g	Vastukaalu mass, g
3,63	4,81	4,68	4,79	5,36	130,2	2973,5
4,63	4,91	5,36	5,73	5,84	132,4	3973,5
5,21	5,84	5,89	5,86	6,03	134,7	4973,5
6,51	6,82	6,91	7,75	9,01	136,9	5973,5
7,37	8,42	8,51	9,22	9,41	139,2	6973,5
6,83	8,15	8,28	8,62	9,28	141,4	7973,5
8	9,7	10,84	11,25	11,36	143,7	8973,5
8,96	9,35	9,67	9,77	11,2	145,9	9973,5
9,29	9,58	9,72	10,29	10,42	143,7	10973,5

Tabel 3. Katsed

Valitud nurk 35°						
Kaugus, m					Mürsu mass, g	Vastukaalu mass, g
5.65	5.94	7.11	7.35	8.06	130.2	2973.5
7.25	7.35	8.64	9.31	10.03	132.1	3973.5
10.50	10.57	12.25	12.81	13.05	134.0	4973.5
13.12	14.05	14.27	14.30	16.63	135.9	5973.5
14.94	15.90	15.94	17.45	17.76	137.8	6973.5
15.38	16.25	17.17	17.95	18.31	139.8	7973.5
15.31	15.36	16.09	16.58	16.98	141.8	8973.5
15.12	15.64	17.60	17.70	18.33	143.8	9973.5
18.37	19.33	19.45	19.71	20.04	145.9	11973.5

Seejärel arvutati selle valemi abil vastukaalu ja mürsu suhe.

$$\tau = \frac{m_{\text{vastukaal}}}{m_{\text{mursk}}} \quad (4.1)$$

kus, τ – mürsu ja vastukaalu suhe,

$m_{\text{vastukaal}}$ – vastukaalu mass, g,

m_{mursk} – mürsu mass, g.

Tabel 4. Mürsu ja vastukaalu masside suhe

Validid nurk 0°		
τ	$m_{\text{mursk}}, \text{ g}$	$m_{\text{vastukaal}}, \text{ g}$
22,84	130,2	2973,5
30,00	132,4	3973,5
36,93	134,7	4973,5
43,62	136,9	5973,5
50,11	139,2	6973,5
56,38	141,4	7973,5
62,46	143,7	8973,5
68,36	145,9	9973,5
76,39	143,7	10973,5

Tabel 5. Mürsu ja vastukaalu masside suhe

Validid nurk 35°		
τ	$m_{\text{mursk}}, \text{ g}$	$m_{\text{vastukaal}}, \text{ g}$
22,84	130,2	2973,5
30,00	132,4	3973,5
36,93	134,7	4973,5
43,62	136,9	5973,5
50,11	139,2	6973,5
56,38	141,4	7973,5
62,46	143,7	8973,5
68,36	145,9	9973,5
76,39	143,7	10973,5

Viie katsega arvutame keskmine väärtus valemi järgi ja sisestame vastav massisuhe koefitsient tabelisse.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (4.2)$$

kus, \bar{x} – keskmine kaugus, m,

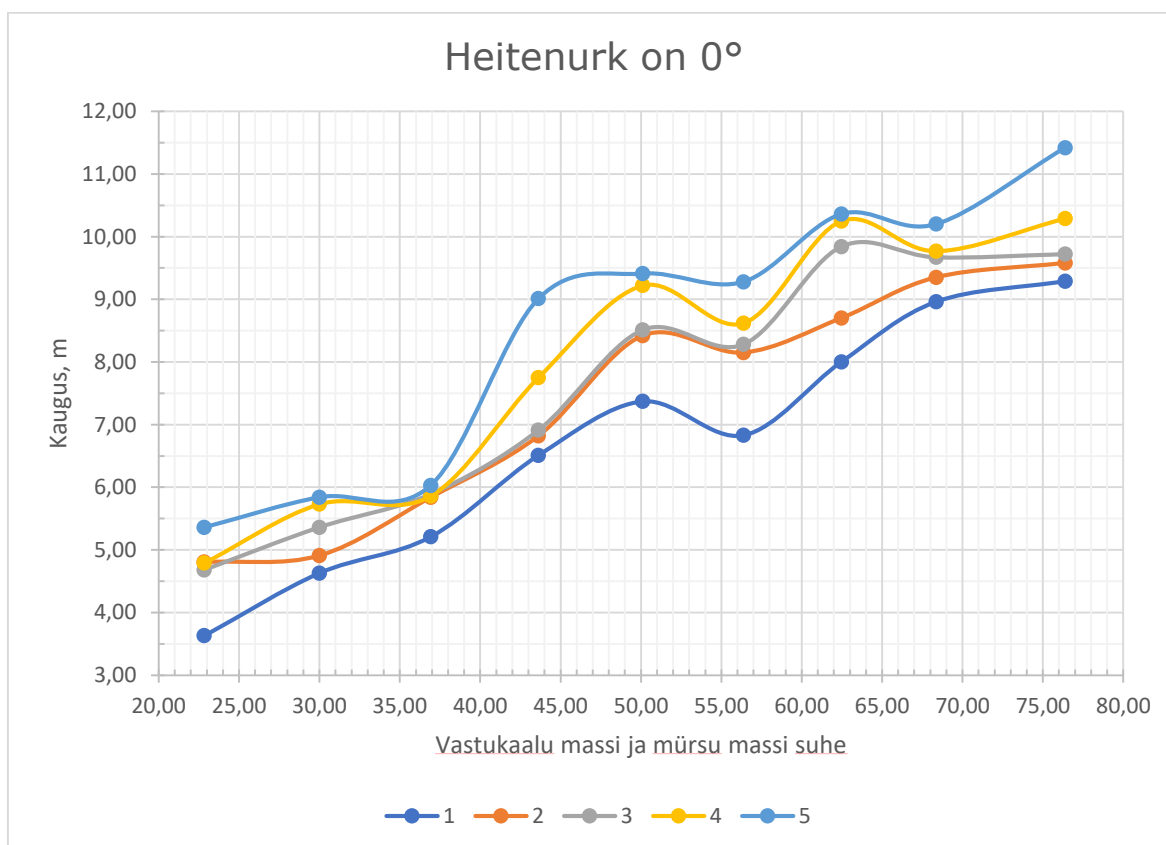
x_i – mõõdetud kaugus, m,

n – proovi number.

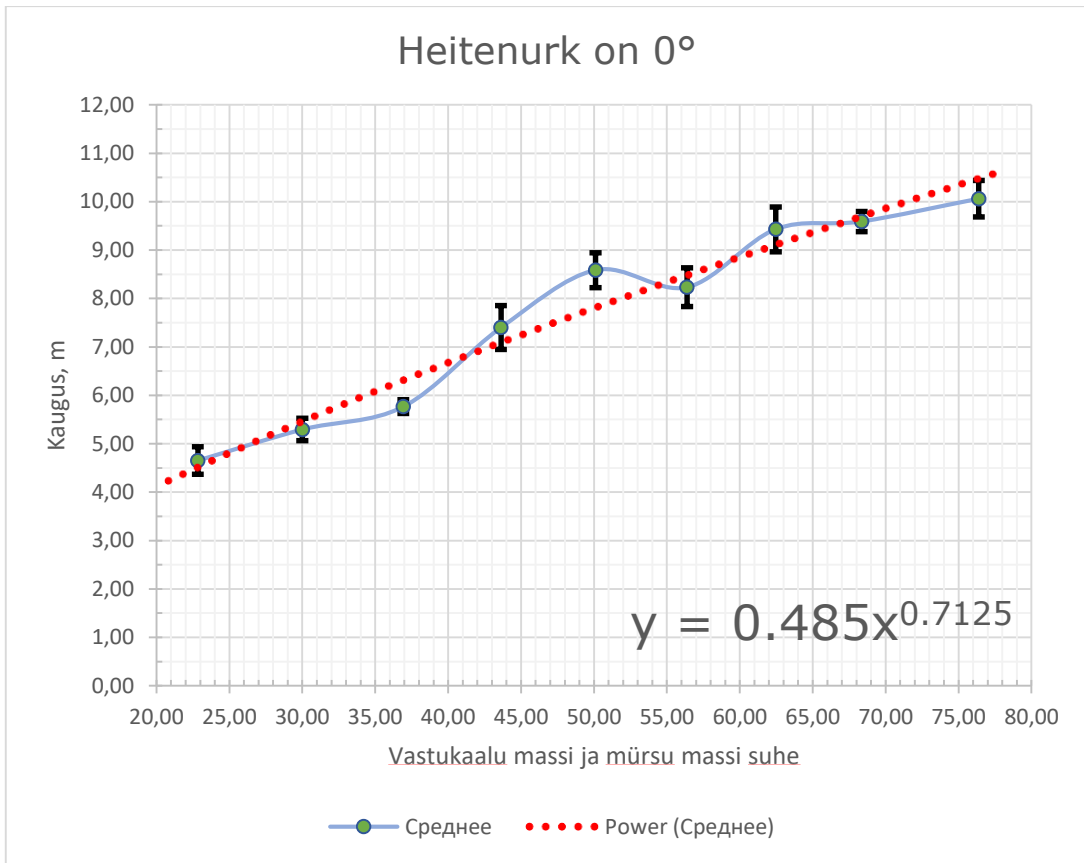
Seega on meil sõltuvusgraafiku koostamiseks valmis andmete tabel.

Tabel 6. Katsetulemused

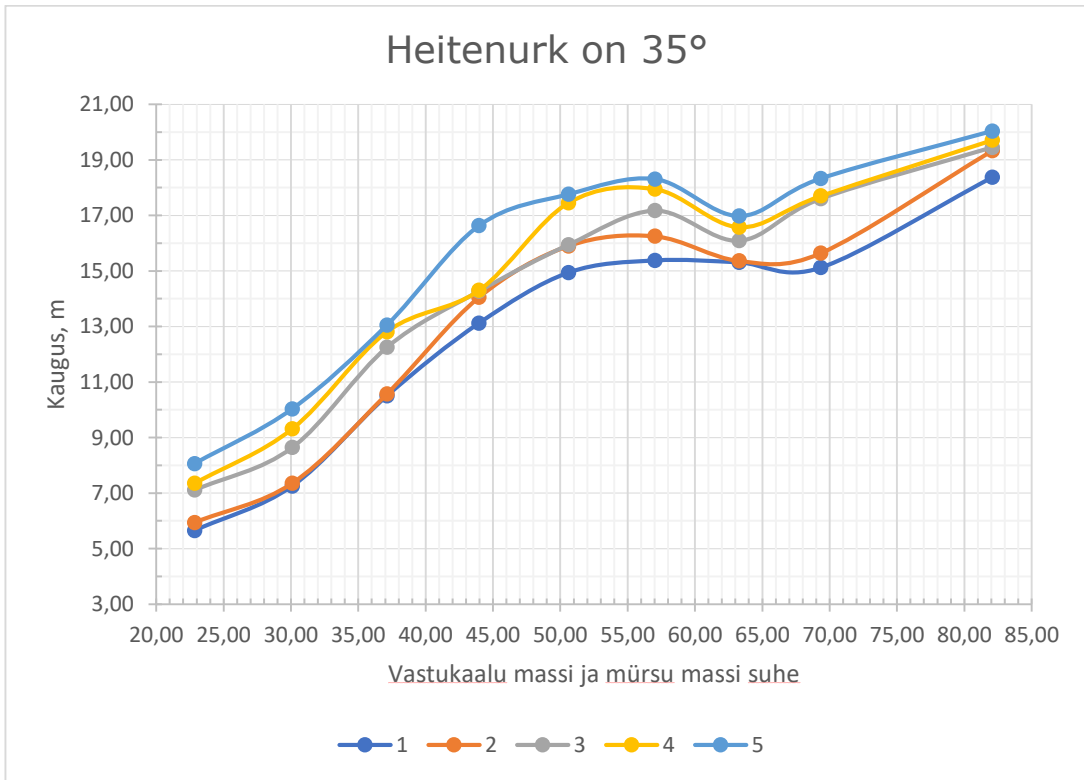
Validid nurk 0°		Validid nurk 35°	
Keskmine kaugus, \bar{x}	Massi suhe, \bar{x}	Keskmine kaugus, \bar{x}	Massi suhe, τ
4,65	22.84	6.82	22.84
5,29	30.00	8.52	30.09
5,77	36.93	11.84	37.13
7,40	43.62	14.47	43.96
8,59	50.11	16.40	50.60
8,23	56.38	17.01	57.03
10,23	62.46	16.06	63.28
9,79	68.36	16.88	69.34
9,86	76.39	19.38	82.07



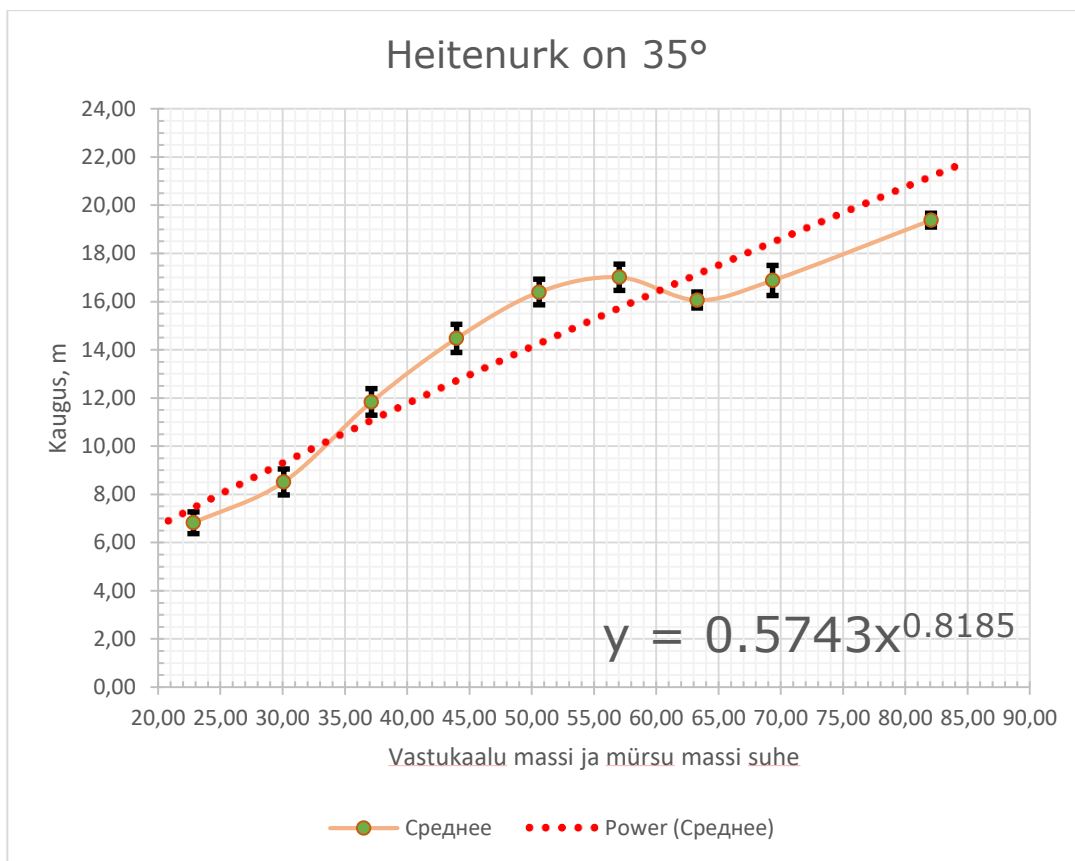
Graafik 1



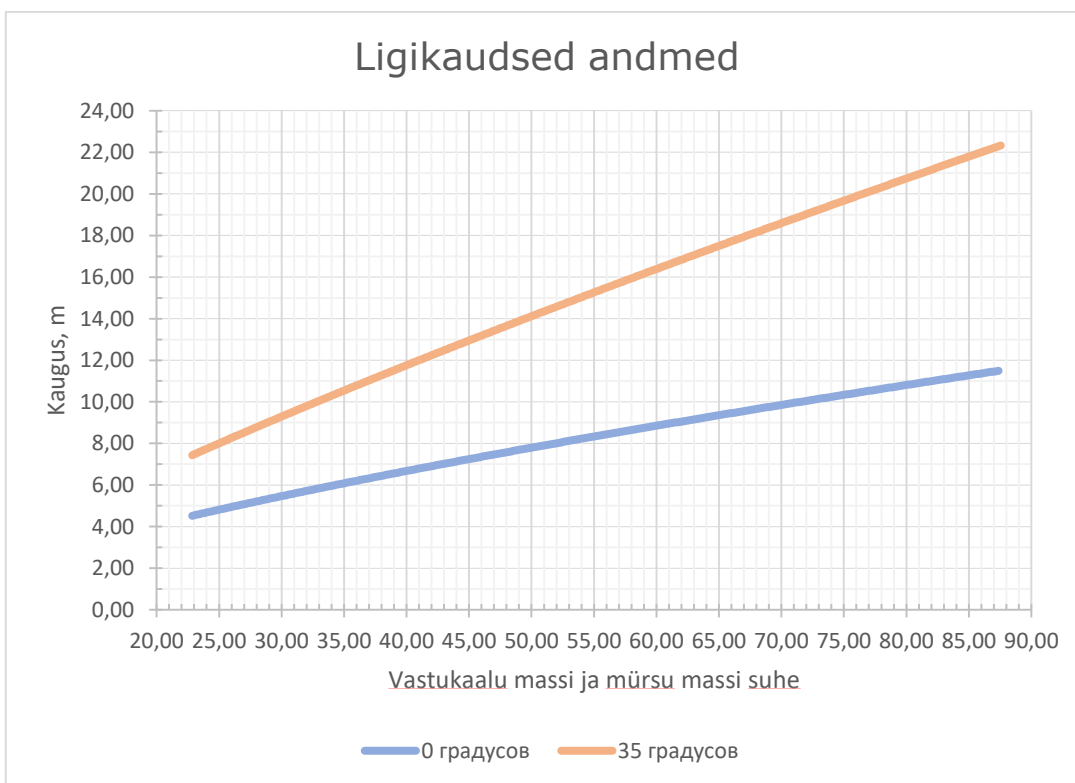
Graafik 2



Graafik 3



Graafik 4



Graafik 5

Järeldus

Kuna oranži joone tõus on suurem kui sinise graafiku tõus, tähendab see, et mürsu väljumisnurga suurenedes tõuseb lennukaugus kiiremini, kui vastukaalu ja mürsu suhe väärtus on sama. Peale selle võib mürsu väljumisnurga tõstmine kaasa tuua lennukauguse suurema kasvu kui vastukaalu ja mürsu suhe on piisavalt suur.

Tuleb aga pidada meeles, et lai väljumisnurk võib vähendada sihtmärki tabava mürsu täpsust. Selle tulemusel on parim väljumisnurk stsenaariumi korral erinev ja hõlmab kompromissi lennuulatuse ja tabamuse täpsuse vahel.

Arvesse tuleks võtta ka muid parameetreid, mis võivad mõjutada mürsu ulatust, nagu koonu kiirus ja õhutakistus. Suurem koonu kiirus kompenseerib tagasihoidlikku väljumisnurka, mille tulemuseks on pikem lennuulatus. Teisest küljest võib heite kiiruse suurendamine nõuda võimsamat trebucheti või muid viise mürsu kiirendamiseks.

Õhutakistus võib samuti oluliselt mõjutada mürsu ulatust, eriti suurte stardinurkade korral. Õhutakistuse minimeerimiseks võib kasutada spetsiaalseid mürsu konstruktsioone või madala hõõrdumisega materjale.

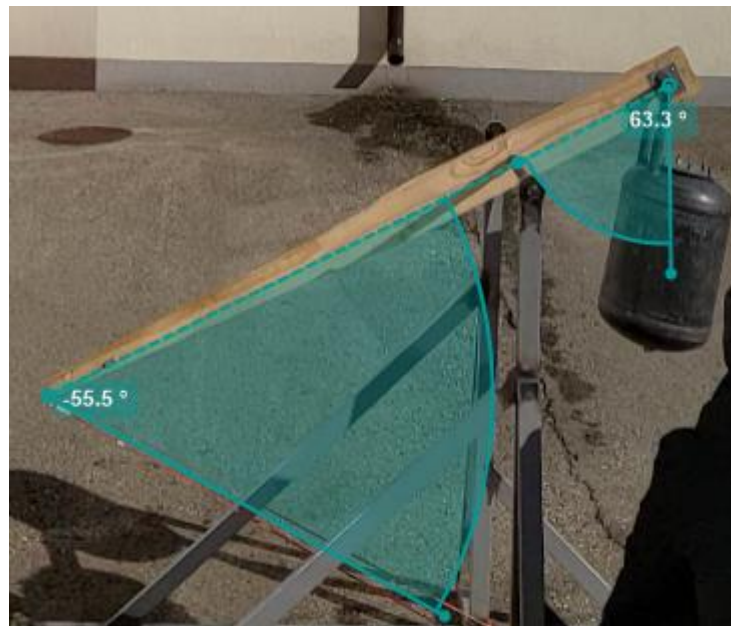
Seega tuleb mürsu maksimaalse ulatuse saavutamiseks arvesse võtta mitmeid elemente, samuti konkreetseid katseid ja arvutusi.

5 KONSTRUKTSIOONI ARVUTUS

Puidust kang, mis juhib masina tööd, on üks olulisemaid komponente. Kangi materjali valimiseks on vaja viia läbi tugevusarvutusi. Selleks on vajalik jõudiagramm, mis arvestab masina töötamise ajal käele mõjuvad jõud. Trossi ja võlli arvutused on selles olulised komponendid. Trossi tõmbejõudu saab hinnata kangi tasakaalu põhimõttel, mis võimaldab valida käele sobiva materjali ja tagada kogu masina töökindluse.

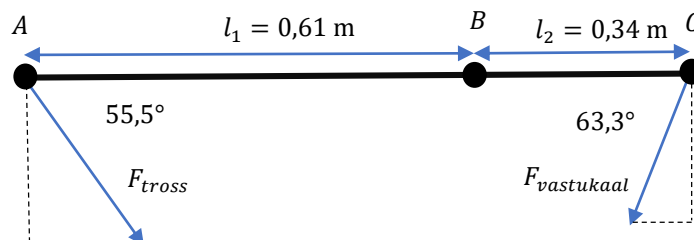
Kang

Ennekõike tuleb leida nurki, mille alla jõud on suunatud.



Joonis. 9 Jõu suunad

Seejärel tuleb luua jõuskeem.



Joonis.10 Jõuskeem

Trossi pingutusjõud arvutatakse kangi võrrandi abil. Vastukaalu mass ja suund on teada.

$$\frac{F_1}{l_1} = \frac{F_2}{l_2} \rightarrow \frac{F_{tross}}{l_1} = \frac{F_{vastukaal}}{l_2} \rightarrow F_{tross} = \frac{m_{vastukaal} * g}{l_2} \quad (5.1)$$

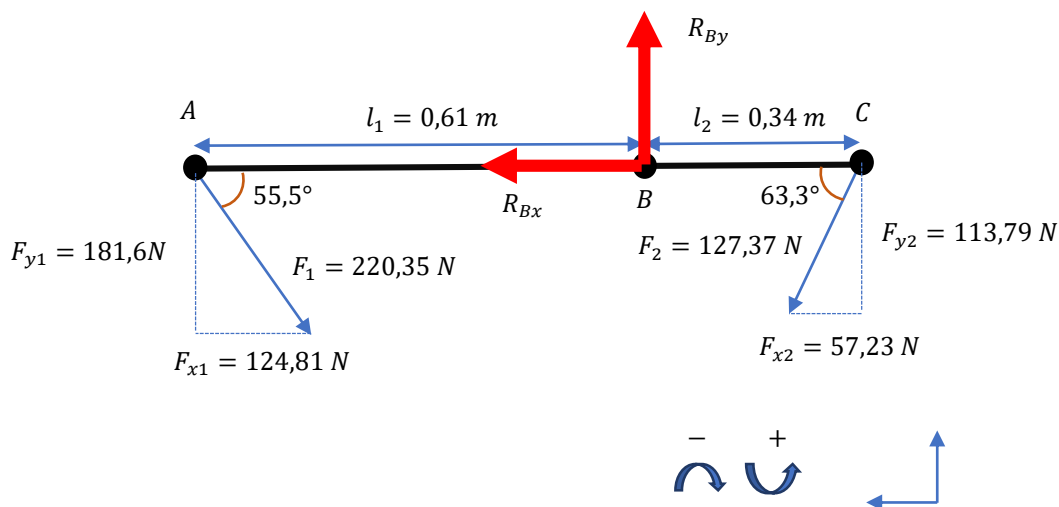
kus, $F_{vastukaal}$ – vastukaal, N,
 F_{tross} – trossi pingutusjõud, N,
 l_1 – pikkus kinnitusest trossini, m,
 l_2 – pikkus kinnitusest vastukaaluni, m,
 $m_{vastukaal}$ – vastukaalu mass, kg,
 g – gravitatsioonikonstant, $\frac{m}{s^2}$,
 valime $g = 9,818 \text{ m/s}^2$ [6].

Kasutame vastukaaluks suurimat lubatud massi, milleks on 12,97 kg.

$$\frac{F_{tross}}{0,61} = \frac{12,97 * 9,82 * \sin(63,3^\circ)}{0,34} \rightarrow F_{tross} = \frac{12,97 * 9,82 * 0,61 * \sin(63,3^\circ)}{0,34} \quad (5.21)$$

$$F_{tross} = 181,6 \text{ N} \quad (5.3)$$

See on talale risti mõjuv jõud. Määrata tuleb kogu trossi pinge.



Joonis. 10 Jõuskeem

Arvutame piki y-telge mõjuvate jõudude summa.

$$\sum F_y = 0 \quad (5.4)$$

$$R_{By} - F_{y1} - F_{y2} = 0 \quad (5.5)$$

$$R_{By} - 181,6 - 127,37 = 0 \quad (5.6)$$

$$R_{By} = 308,97 \text{ N} \quad (5.7)$$

Arvutame ka piki x-telge mõjuvate jõudude summa.

$$\sum F_x = 0 \quad (5.8)$$

$$R_{Bx} - F_{x1} + F_{x2} = 0 \quad (5.9)$$

$$R_{Bx} - 124,81 + 57,23 = 0 \quad (5.10)$$

$$R_{Bx} = 67,58 \text{ N} \quad (5.11)$$

Arvutame resultantjõu, võttes kogusumma juured.

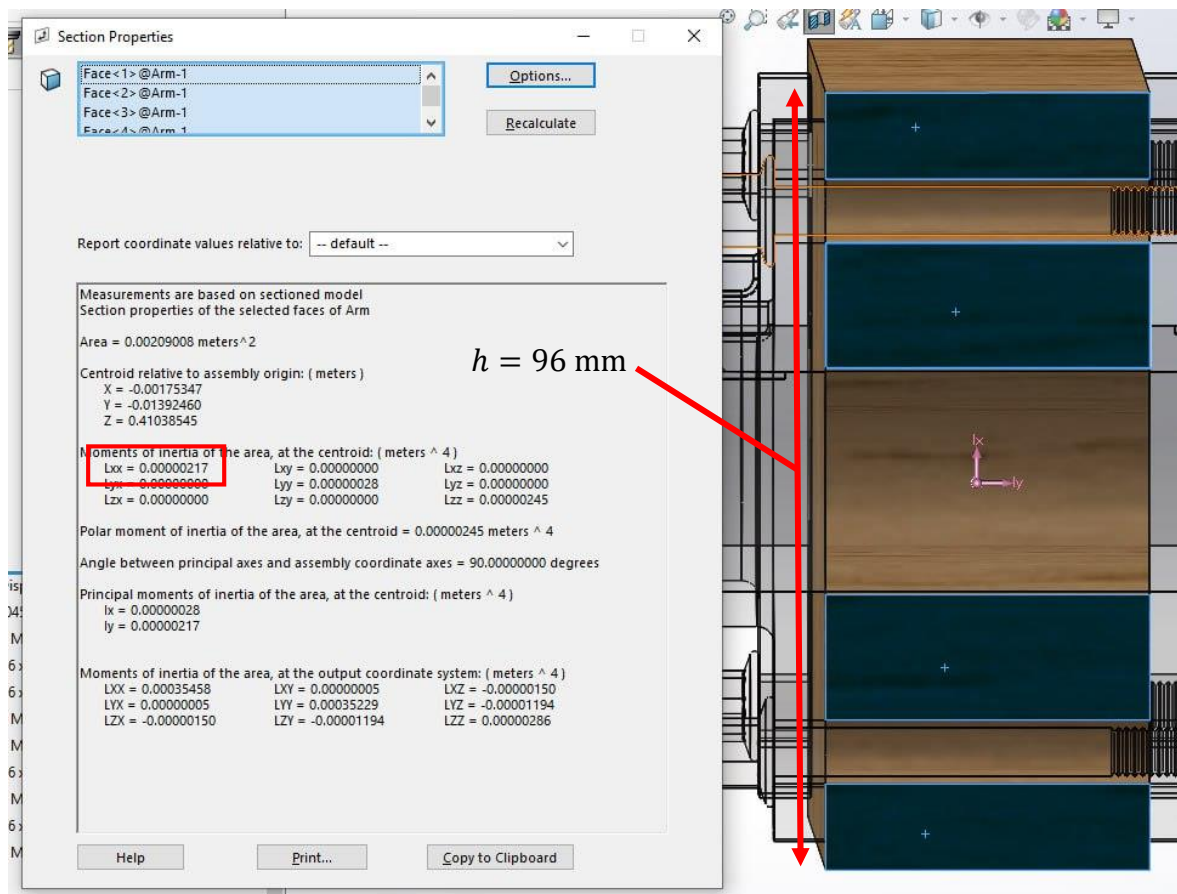
$$R = \sqrt{R_{Bx}^2 + R_{By}^2} \quad (5.12)$$

$$R = 316,27 \text{ N} \quad (5.13)$$

Enne käe materjali valimist tuleb arvutada tala paindemoment ja inertsimoment kriitilises ristlõikes.

$$M = l_2 * F_{y2} = 0,34 * 113,79 = 38,69 \text{ Nm} \quad (5.14)$$

Ebaühtlase segmendi takistusmomenti hinnati SolidWorksi tarkvara abil.

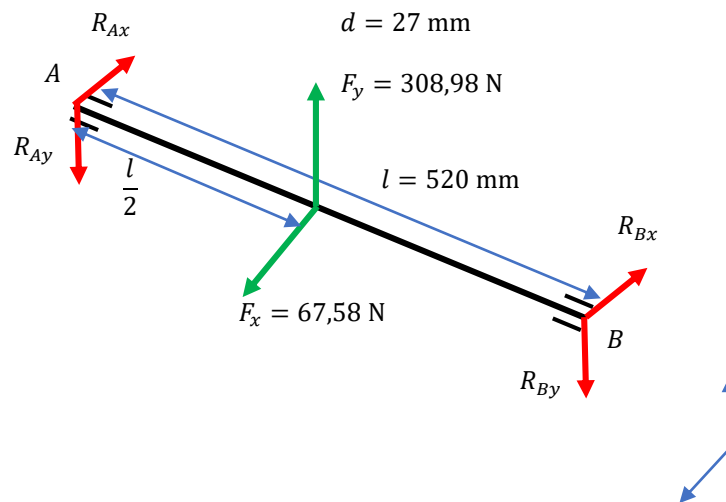


Joonis. 11 Arvutused SolidWorksi tarkvara abil

Kasutame seda valemit pinge arvutamiseks [9].

$$\sigma_{ekv}^{IV} = \frac{M}{I_x} * \frac{h}{2} = \frac{38,69}{0,00000217} * \frac{0,096}{2} = 0,86 \text{ MPa} \quad (5.15)$$

Võll



Joonis. 12 Jõuskeem

Reaktsioonjõudude leidmine [10]

$$\sum M_{Ay} = 0 \quad (5.16)$$

$$-R_{By} * l + F_y * \frac{l}{2} = 0 \rightarrow R_{By} = \frac{F_y * \frac{l}{2}}{l} \rightarrow R_{By} = 154,49 \text{ N} \quad (5.17)$$

$$\sum M_{By} = 0 \quad (5.18)$$

$$R_{Ay} * l - F_y * \frac{l}{2} = 0 \rightarrow R_{Ay} = \frac{F_y * \frac{l}{2}}{l} \rightarrow R_{Ay} = 154,49 \text{ N} \quad (5.19)$$

$$\sum M_{Ax} = 0 \quad (5.20)$$

$$R_{Bx} * l - F_x * \frac{l}{2} = 0 \rightarrow R_{Bx} = \frac{F_x * \frac{l}{2}}{l} \rightarrow R_{Bx} = 33,79 \text{ N} \quad (5.21)$$

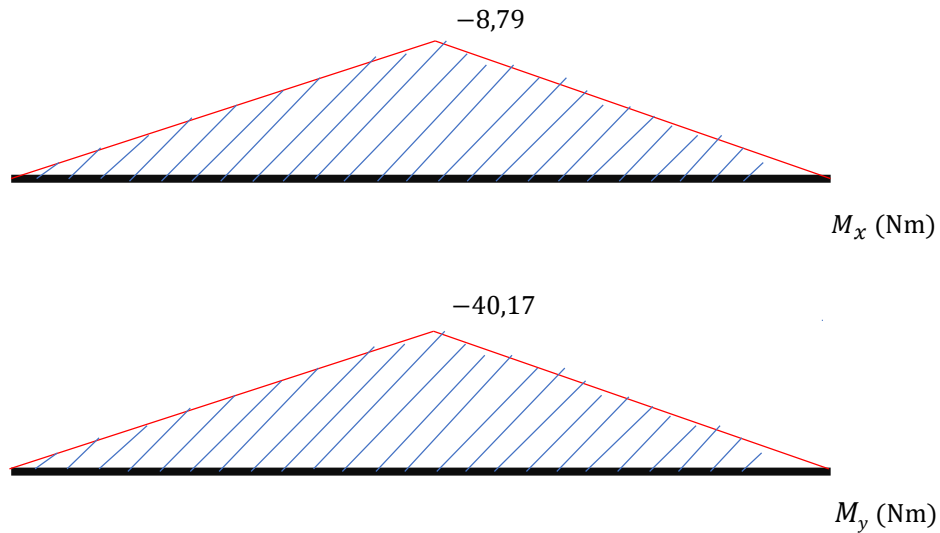
$$\sum M_{Bx} = 0 \quad (5.22)$$

$$-R_{Ax} * l + F_x * \frac{l}{2} = 0 \rightarrow R_{Ax} = \frac{F_x * \frac{l}{2}}{l} \rightarrow R_{Ax} = 33,79 \text{ N} \quad (5.23)$$

Koostame paindemomentide epüürid [10]

$$M_x = -R_{Ax} * \frac{l}{2} = -33,79 * \frac{0,52}{2} = -8,79 \text{ Nm} \quad (5.24)$$

$$M_y = -R_{Ay} * \frac{l}{2} = -154,49 * \frac{l}{2} = -40,17 \text{ Nm} \quad (5.25)$$



Joonis 13 Paindemomentide epüürid [10]

Ekvivalentne moment (IV tugevusteooria) ohtlikus lõikes

$$M_{ekv}^{IV} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} = \sqrt{8,79^2 + 40,17^2} \approx 41,12 \text{ Nm} \quad (5.26)$$

Ekvivalentpinge [10]

$$\sigma_{ekv}^{IV} = \frac{M_{ekv}^{IV}}{W} = \frac{32 * M_{ekv}^{IV}}{\pi * d_r^3} = \frac{32 * 41,12}{\pi * 0,027^3} = 21,3 \text{ MPa} \quad (5.27)$$

$$\sigma_{ekv}^{IV} < [\sigma] = \frac{R_{eH}}{S} = \frac{370}{1,5} \approx 247 \text{ MPa} \quad (5.28)$$

Laager

Laagri tööaja määramiseks kasutame programmi SKF Bearing Selector [8].

Calculation results

Unfold all

⊞	Bearing Properties	YET 204	YET 204		
↓	Minimum load	F_{Tm} : Left: 0.127 kN	Right: 0.127 kN		
💧	Viscosity	κ : Left: 0.71	Right: 0.71		
⬇️	Bearing loads	C/P: Left: 84.67	Right: 84.67		
🌿	Estimation of CO ₂ emissions over period of interest	NEW	kg of CO ₂ : Left: 0.2	Right: 0.2	
💧	Grease life and relubrication interval	L_{10} : Left: 100000 h	Right: 100000 h	t_f : Left: 30000 h	Right: 30000 h
S	Static safety factor	S_0 : Left: > 20	Right: > 20		
L ₁₀	Bearing rating life	L_{10h} : Left: > 2x10 ⁵ h	Right: > 2x10 ⁵ h	L_{10mh} : Left: > 2x10 ⁵ h	Right: > 2x10 ⁵ h
🔊	Frequencies	Please unfold to see results			
⚖️	Friction	M: Left: 53.5 Nmm	Right: 53.5 Nmm		

Joonis. 7

Arvestuslikuks ajaks oli $L=2 \cdot 10^5$ töötundi.

Tross

$$F_{kr} = F_{max} * S \rightarrow 220,35 * 2,5 = 550,88 \text{ N} \quad (5.29)$$

$$m = \frac{F_{kr}}{g} \rightarrow \frac{550,88}{9,81} = 56,15 \text{ kg} \quad (5.30)$$

Tross on valitud massile 60 kg.

KOKKUVÕTE

Trebuchet' mitteideaalsus põhjustab saadud vahemike mitmekesisust. Vead trebucheti konstruktsioonis takistasid sellel pikemat lasketiiru võimaldada. Reguleeritakse ainult trebucheti tulistamise nurka ja vastukaalu massi. Lisaks ei olnud trebuchet ehitatud tavalise kolmnurga kujul, mis piiras selle liikuvust. See uuring näitas, et mitte ainult vastukaalu nurk ja mass ei mõjuta mürsu ulatust, vaid ka konstruktsiooni suurus. Ju ei olnud trebuchetil piisavalt käe pikkust, sest vastukaal langes liiga vara efektiivsesse alumisse asendisse ja käsi ei jõudnud korviga trossi sirgeks ajada, et vastukaalu potentsiaalset energiat rohkem ära kasutada.

Kasutada võib ka muid energia salvestamise meetodeid, näiteks vedru või trossi/köie pingutamist. Teine viskemehhanism, mida tuntakse katapulдина, kasutab sarnast kontseptsiooni potentsiaalse energia salvestamiseks pinge või kokkusurumise kujul. Teise võimalusena kasutada materjali painutamisejõudu, näiteks amb või vibu puhul. Energia salvestamiseks venitatakse nõor elastsest materjalist poolpainutatud kaare vahele.

Kiirusega või kiiruse ruuduga võrdeline tõmbejõud on hõõrdumise tulemus. Maksimaalse ulatuse saavutamiseks peab algkiiruse suhteline jaotus x - ja y -komponentide vahel olema kaldu komponendi x kasuks, kuna sellel on suurim kiirus igal ajal peale stardi. See viitab sellele, et antud stardikiiruse maksimaalse ulatuse saavutamiseks on vaja väiksemat stardinurka.

Trebucheti geomeetria aitab oluliselt kaasa ka lennuulatusele, kus jälgitakse, kas pika ja lühikese õla proportsioonid, võrdluspunkti kõrgus ja vastukaalu õla pikkus edastavad edukalt energiat mürsule.

SUMMARY

The trebuchet's non-ideality accounts for the variety of the obtained ranges. Errors in the trebuchet's design prevented it from having a longer shooting range. Only the angle at which the trebuchet fires and the weight of the counterweight are adjusted. Furthermore, the trebuchet was not constructed in the shape of a conventional triangle, which restricted its mobility. This research demonstrated that not only the angle and mass of the counterweight impact the range of the projectile, but also the structure's size. After all, the trebuchet didn't have enough arm length because the counterweight dropped to its effective lower position too soon, and the arm didn't have time to straighten the rope with the basket to make greater use of the counterweight's potential energy.

Other methods of energy storage, such as the tension of a spring or a cable/rope, can also be employed. Another throwing mechanism known as a catapult employs a similar concept of storing potential energy in the form of tension or compression. Alternatively, employ the force of bending the material, as in a crossbow or bow. To store energy, the string is stretched between a half-bent arc of elastic material.

A drag force proportional to the velocity or square of the velocity is the result of friction. To obtain maximum range, the relative distribution of initial velocity between the x and y components must be skewed in favor of the x component as it exhibits the highest velocity at all times other than the launch. This suggests that in order to get maximum range for a given launch velocity, a smaller launch angle is needed.










Trebuchet geometry also contributes significantly to flight range. Whether the long and short arm proportions, the height of the reference point, and the length of the counterweight arm are observed to successfully transmit energy to the projectile.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Drag force coefficient [Online] 4.02.2023
https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient
2. Drag force [Online] 4.02.2023 <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/flight-equations-with-drag/#vertical-location>
3. Механические свойства древесины. [Online] 25.03.2023
<https://les.novosibdom.ru/mehanicheskie-svoystva-drevesiny>
4. Air Resistance/Trajectory Spreadsheet [Online] 10.05.2023
https://www.youtube.com/watch?v=rx7BuSJbt6Y&ab_channel=PhysicsWorks
5. Projectile Motion: Quadratic Drag [Online] 10.05.2023
https://www.youtube.com/watch?v=BDGBu9o1fvo&ab_channel=jng
6. Gravimetric Network [Online] 14.03.2023
[https://geoportaal.maaamet.ee/eng/Spatial-Data/Geodetic-Data/Geodetic-Networks/Gravimetric-Network-p670.html#:~:text=The%20gravity%20acceleration%20on%20land,%2Fs%20%20\(220%20mGal\)](https://geoportaal.maaamet.ee/eng/Spatial-Data/Geodetic-Data/Geodetic-Networks/Gravimetric-Network-p670.html#:~:text=The%20gravity%20acceleration%20on%20land,%2Fs%20%20(220%20mGal))
7. Плотность воздуха [Online] 16.04.2023
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D1%83%D1%85%D0%B0#:~:text=%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D1%83%D1%85%D0%B0%D1%8F%D0%B2%D0%BB%D1%8F%D0%B5%D1%82%D1%81%D1%8F%20%D1%84%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%B9%20%D0%BE%D1%82,%D0%B8%20%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B8%20101%20330%20%D0%9F%D0%B0>
8. SKF bearing selector [Online] 9.04.2023
<https://skfbearingselect.com/#/bearing-selection-start>
9. RAE0930 Tugevusõpetus [Online] 6.04.2021
<https://moodle.taltech.ee/course/view.php?id=2821>
10. RAE0351 Masinaelemendid [Online] 24.05.2022
<https://moodle.taltech.ee/course/view.php?id=20575>

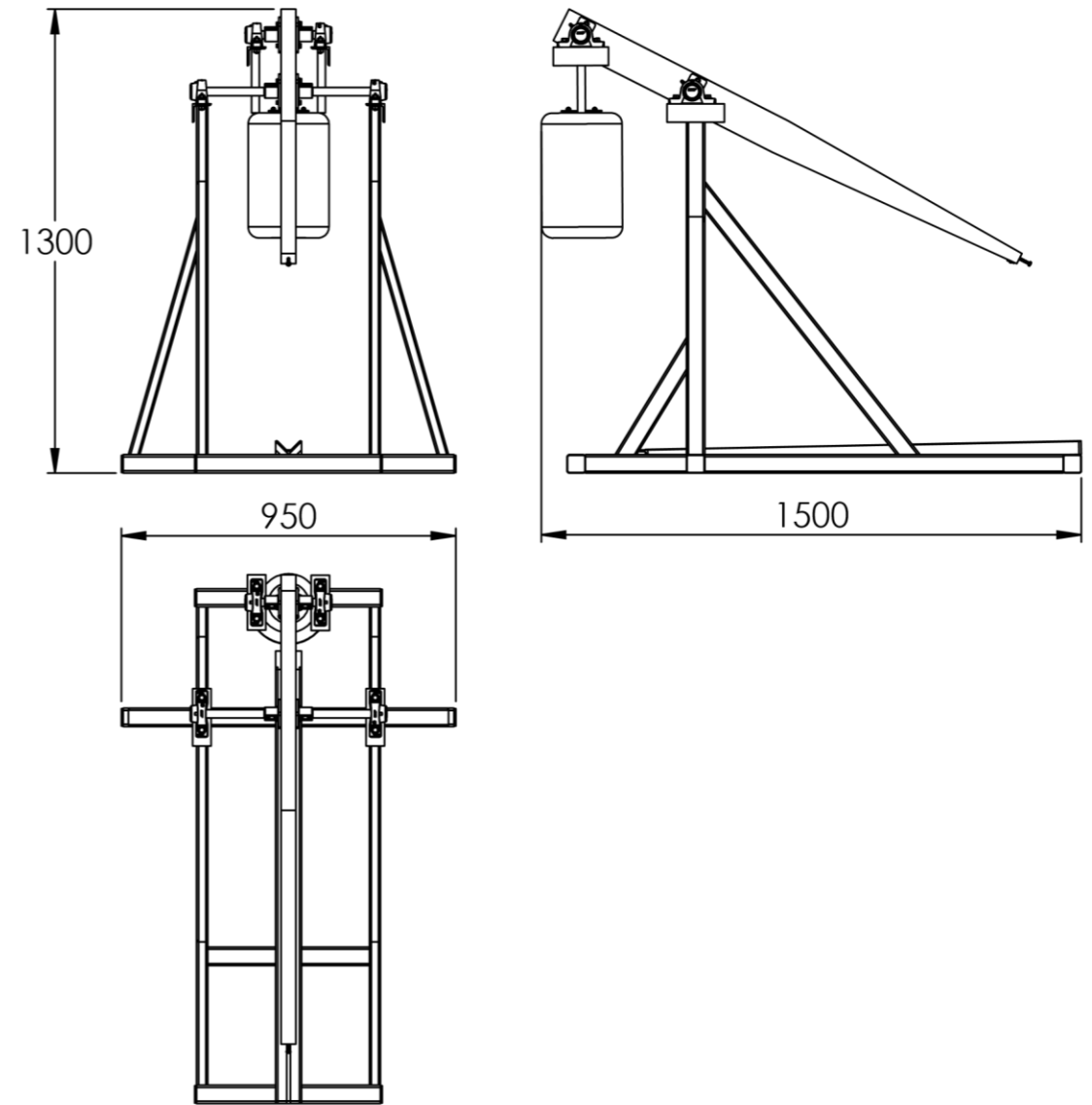
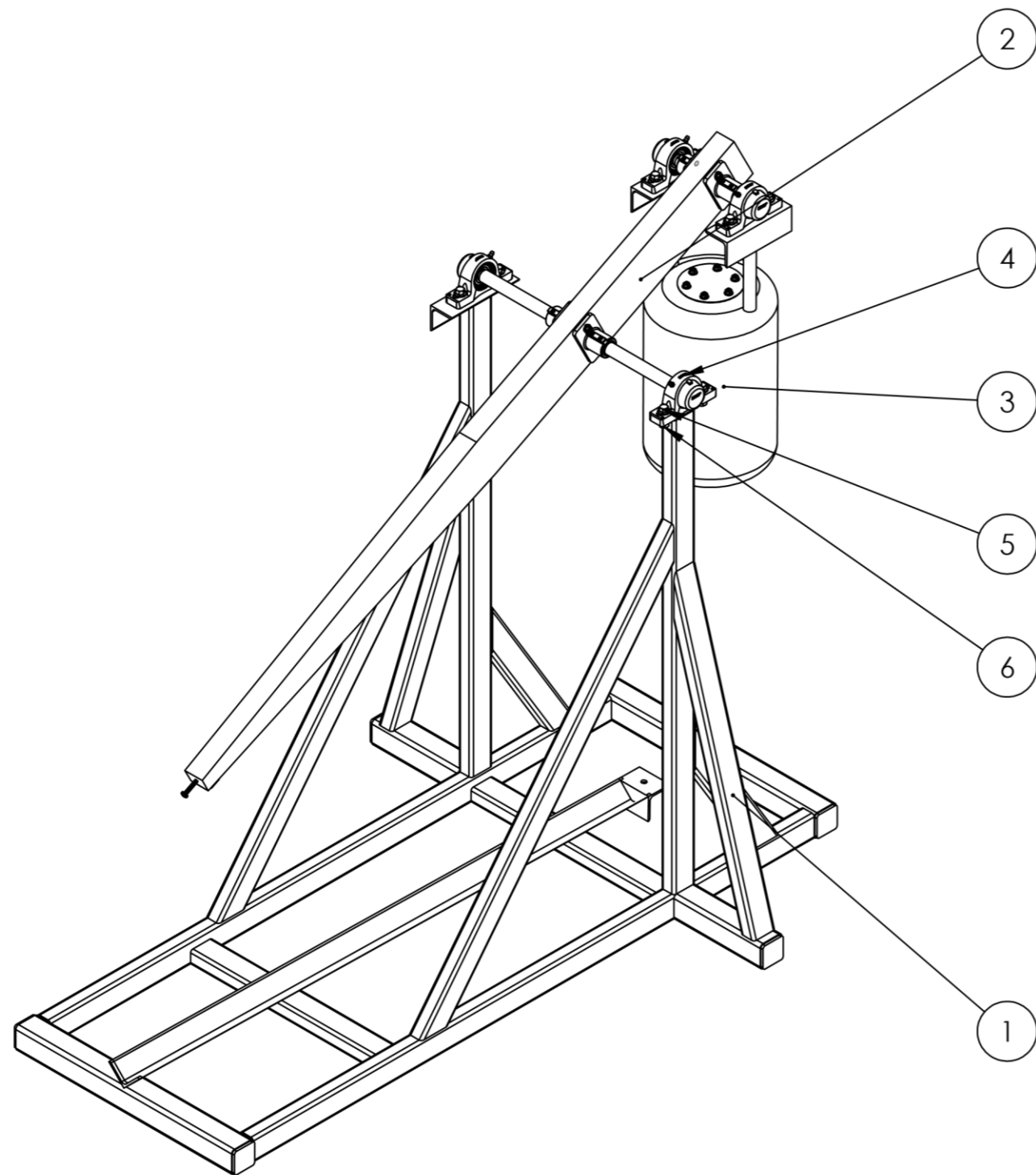
LISAD

Tabel 1

Shape	Drag Coefficient
Sphere → 	0.47
Half-sphere → 	0.42
Cone → 	0.50
Cube → 	1.05
Angled Cube → 	0.80
Long Cylinder → 	0.82
Short Cylinder → 	1.15
Streamlined Body → 	0.04
Streamlined Half-body → 	0.09

Measured Drag Coefficients

GRAAFILINE OSA



1. 12,97 kg on maksimalse vastukaalu mass.

7		Mutter M10 - N	ISO - 4161	8	
6		Vedruseib M10 18-8	92148A210	8	McMAST ERCARR
5		Polt M10 x 30 x 30-C	ISO - 4162	8	
4		Laager	SKF SY 20 FM + ECY 204	4	SKF
3		Vastukaal	CV 120.03.00	1	
2		Kang	CV 120.02.00	1	
1		Raam	CV 120.01.00	1	
Osa	Väli	Nimetus	Tähistus	Hulk	Märkus



Finish: Näitamata piirhälbed:

Materjal:
Ei ole määratud

Möötkava 1:10
Mass 24,60 kg

Konstruktor O. Pronoza 2023-05-10

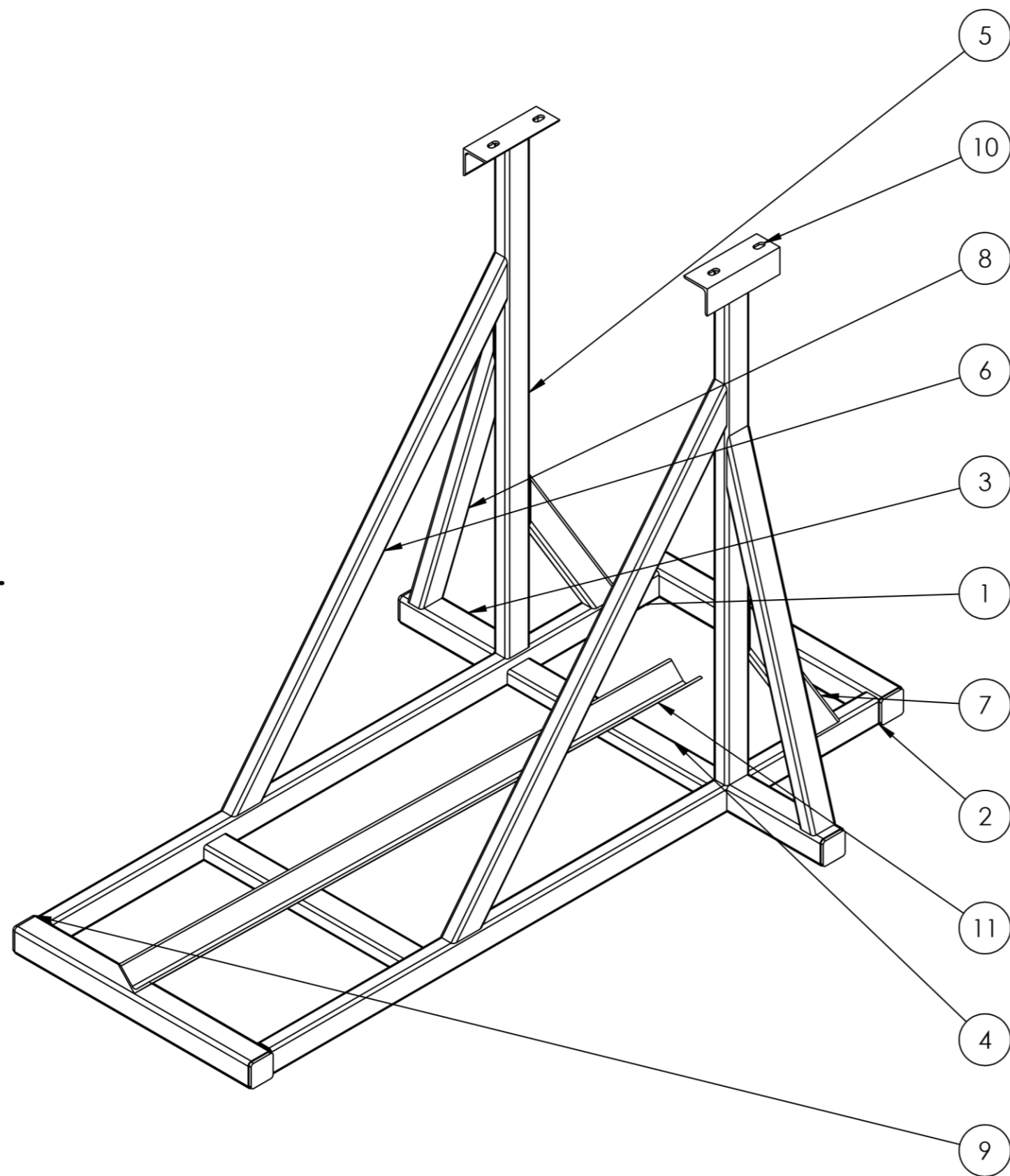
Juhendaja I.Penkov 2023-05-10

Raskusjõul põhinev heitemasin
Koostejoonis
Kuulub lõputöösse EVK 0010

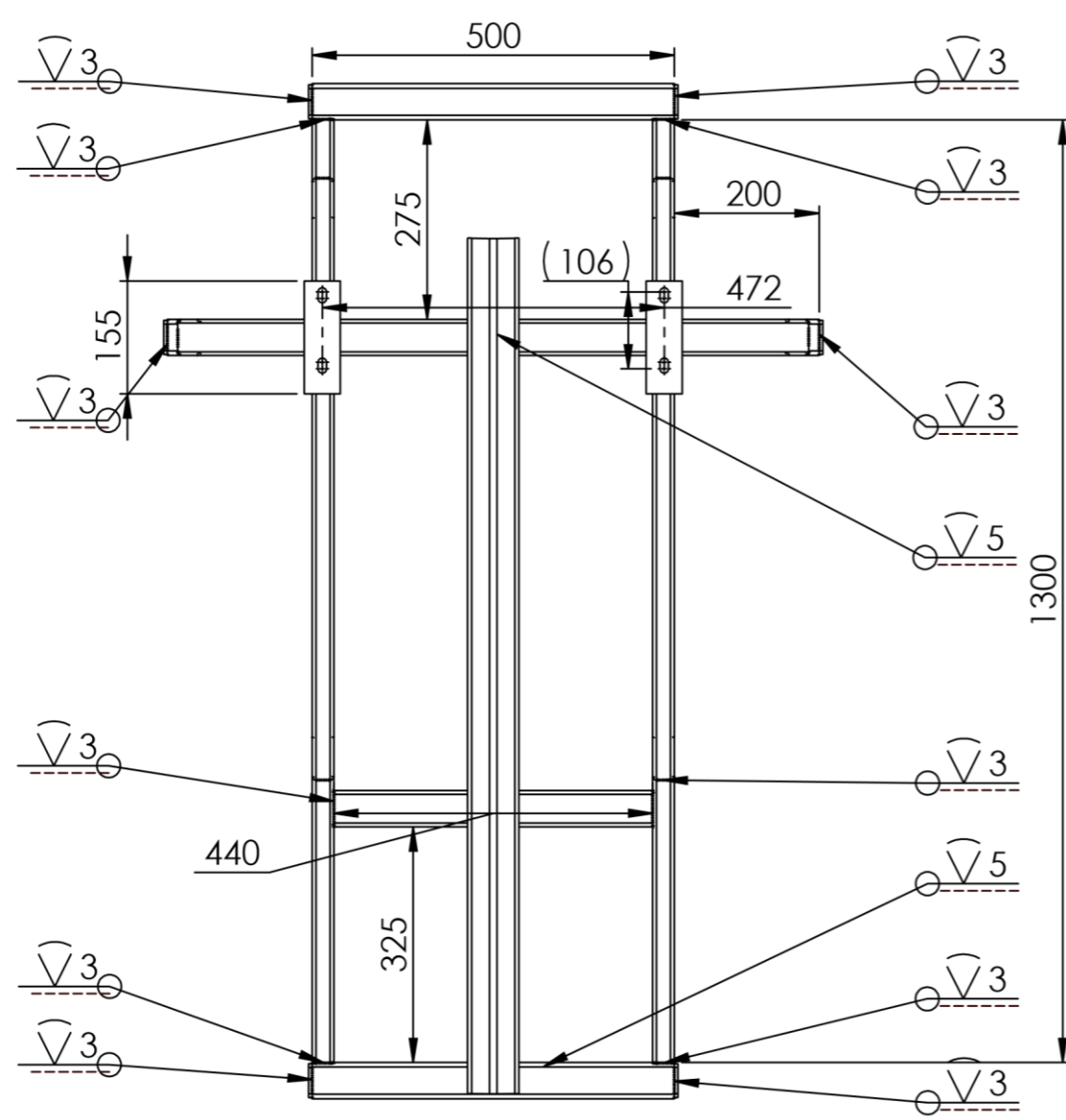
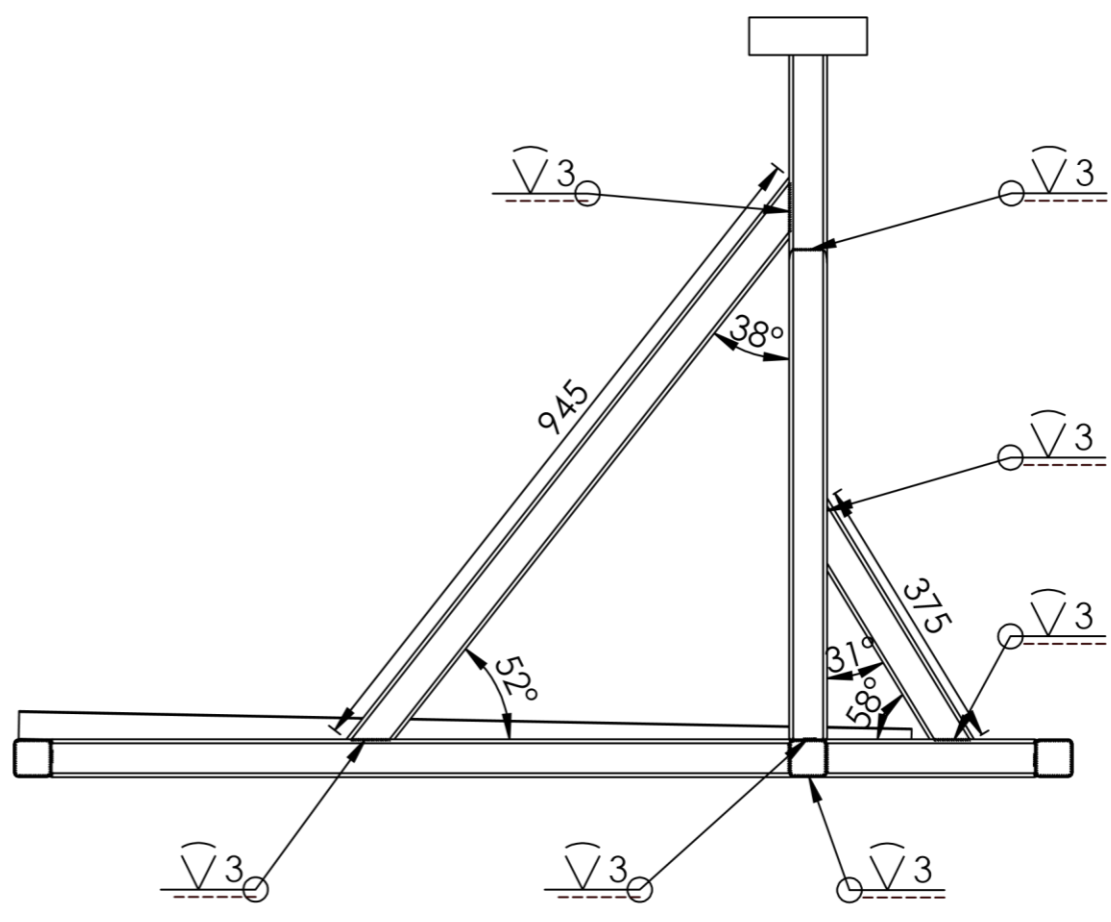
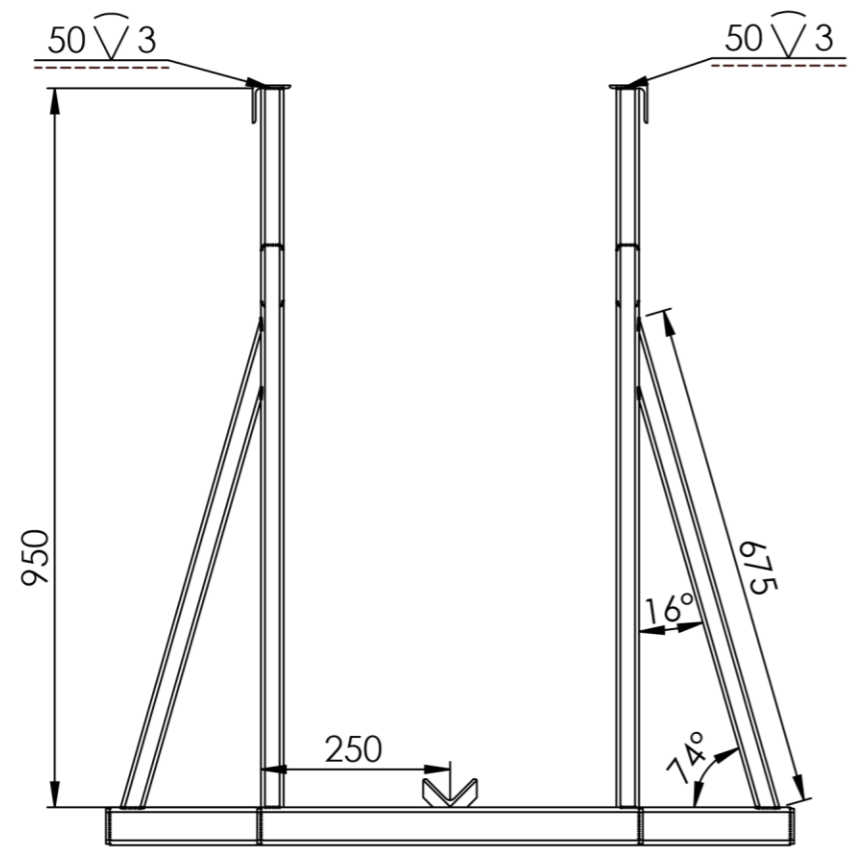
TTÜ
Virumaa Kolledž

Leht 1/1

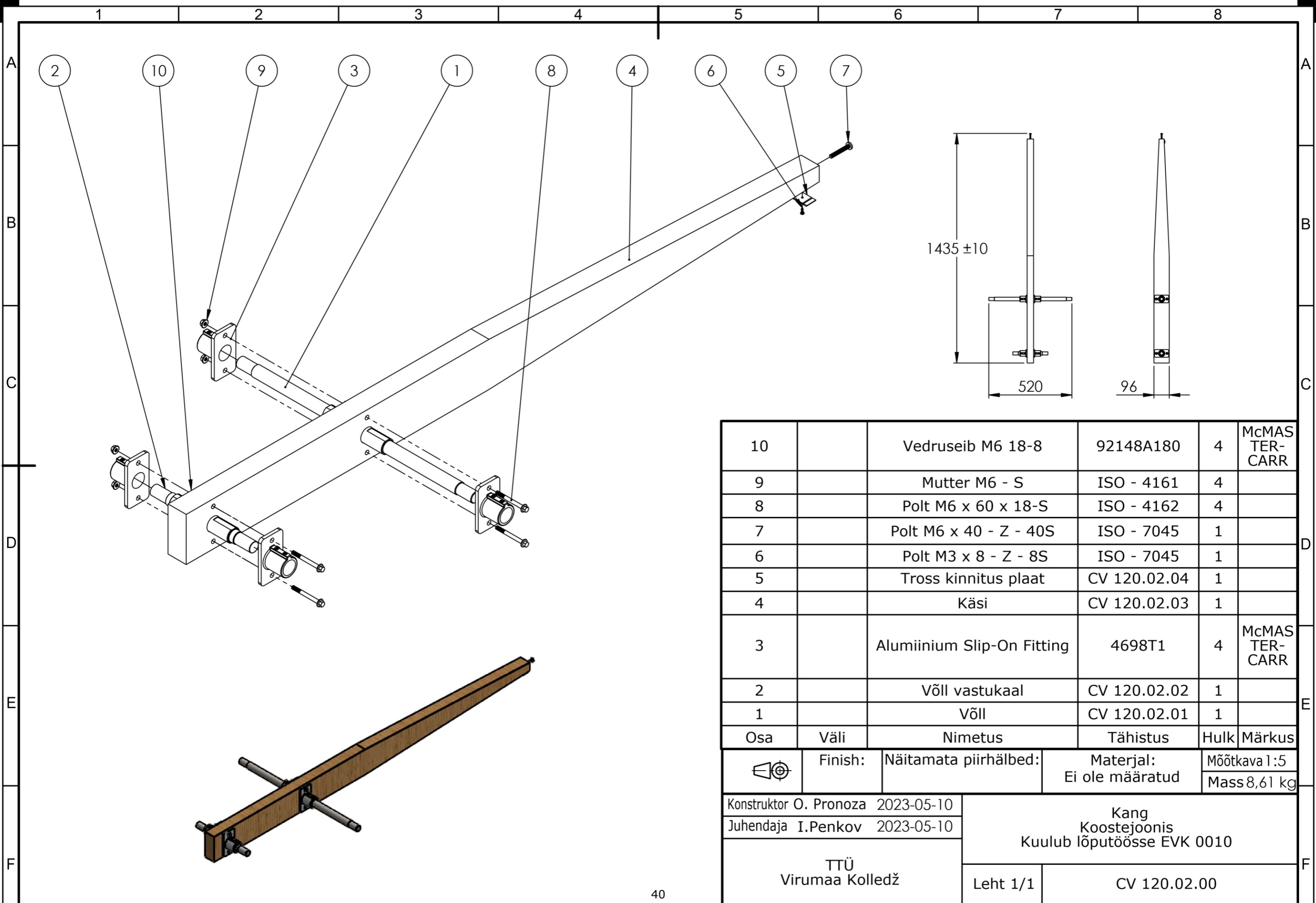
CV 120.00.00



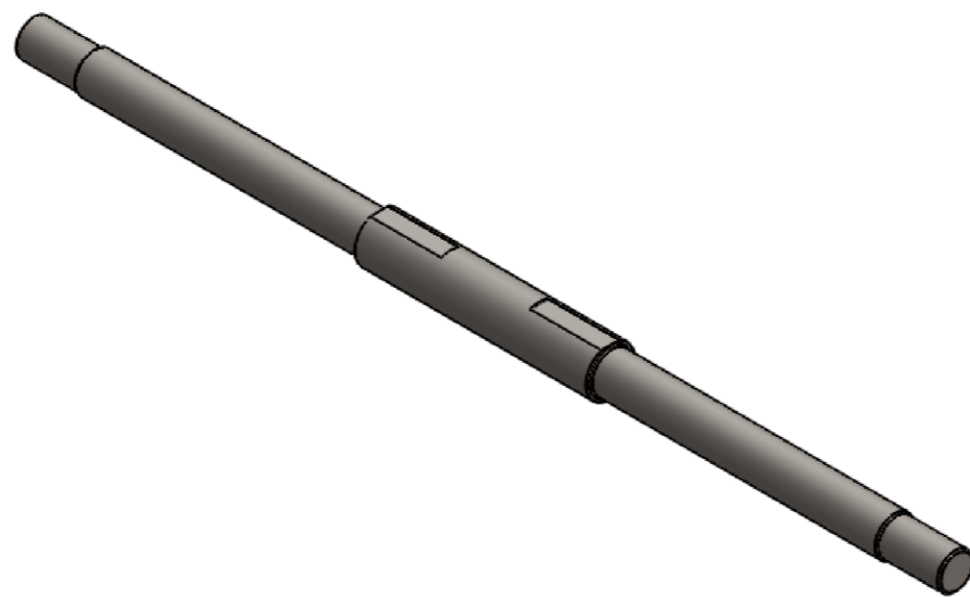
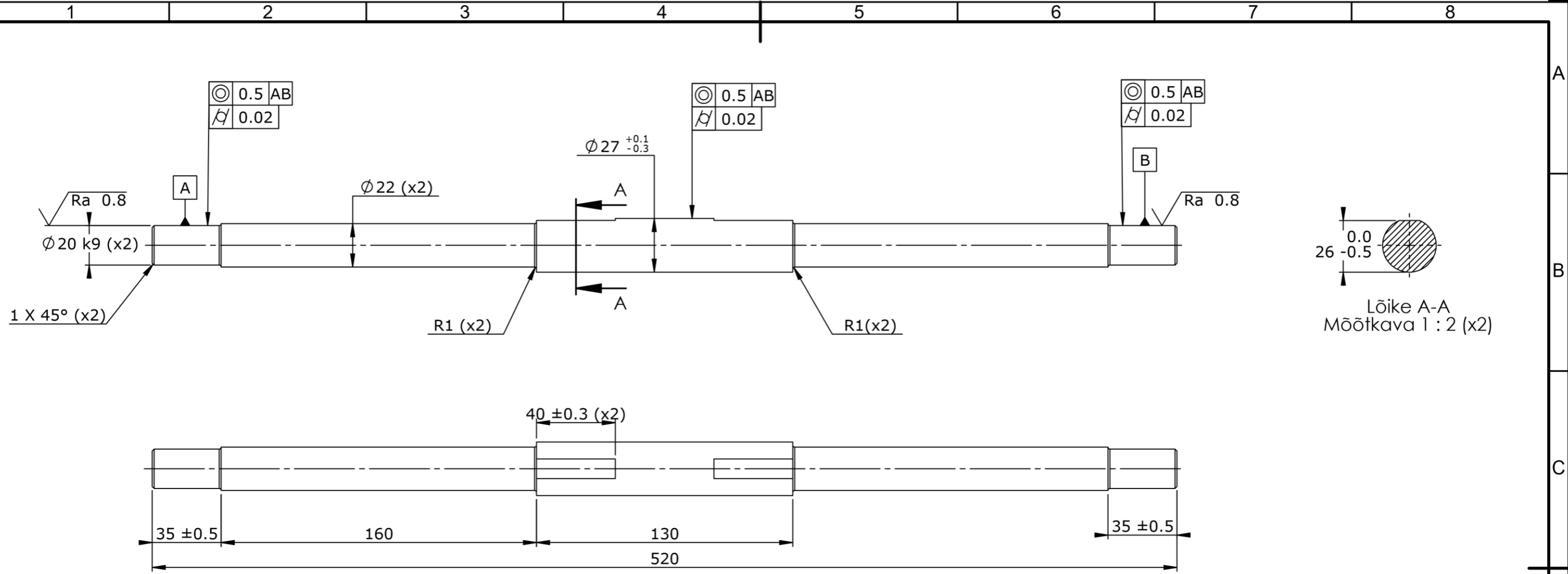
11		L toru 50x50x4<3>	1180	1	
10		L toru 50x50x4 <2>	155	1	
9		Korg 46 x 46 x 3,5	46 x 46 x 3,5	6	
8		Ristkülik toru 50 X 30 X 2.6	675	2	
7		Ristkülik toru 50 X 30 X 2.6	375	2	
6		Ristkülik toru 50 X 30 X 2.6	945	2	
5		Ristkülik toru 50 X 30 X 2.6	950	2	
4		Ristkülik toru 50 X 30 X 2.6	440	2	
3		Ristkülik toru 50 x 50 x 3.2<4>	200	2	
2		Ristkülik toru 50 x 50 x 3.2<3>	500	2	
1		Ristkülik toru 50 X 30 X 2.6	1300	2	
Osa	Väli	Nimetus	Tähistus (mm)	Hulk	Märkus
		Finish: Ra 25	Näitamata piirhälbed H14, h14, -IT14/2	Materjal: AISI 304 DIN EN 10088-3	Möötkava 1:10
		Konstruktor O. Pronoza 2023-05-10	Raam Koostejoonis		
		Juhendaja I.Penkov 2023-05-10	Kuulub lõputöösse EVK 0010		
		TTÜ Virumaa Kolledž	Leht 1/2	CV 120.01.00	



	Finish: Ra 25	Näitamata piirhälbed H14, h14, -IT14/2	Materjal: Ei ole määratud	Mõõtkava 1:10
	Konstruktor O. Pronoza 2023-05-10		Mass 17,34 kg	
Juhendaja I. Penkov 2023-05-10		Raam Koostejoonis Kuulub lõputöösse EVK 0010		
TTÜ Virumaa Kolledž				
		Leht 2/2	CV 120.01.00	



10		Vedruseib M6 18-8	92148A180	4	McMAS TER- CARR
9		Mutter M6 - S	ISO - 4161	4	
8		Polt M6 x 60 x 18-S	ISO - 4162	4	
7		Polt M6 x 40 - Z - 40S	ISO - 7045	1	
6		Polt M3 x 8 - Z - 8S	ISO - 7045	1	
5		Tross kinnitus plaat	CV 120.02.04	1	
4		Käsi	CV 120.02.03	1	
3		Alumiinium Slip-On Fitting	4698T1	4	McMAS TER- CARR
2		Võll vastukaal	CV 120.02.02	1	
1		Võll	CV 120.02.01	1	
Osa	Väli	Nimetus	Tähistus	Hulk	Märkus
	Finish:	Näitamata piirhälbed:	Materjal: Ei ole määratud	Möötkava 1:5	Mass 8,61 kg
Konstruktor O. Pronoza 2023-05-10		Kang Koostejoonis Kuulub lõputöösse EVK 0010			
Juhendaja I.Penkov 2023-05-10					
TTÜ Virumaa Kolledž		Leht 1/1	CV 120.02.00		



1. Teravad servad eemaldada.
2. Kõvadus 207 HB

	Finish: Ra 12.5	Näitamata piirhälbed H14, h14, -+IT14/2	Materjal: Teras C45E ISO 683-1:2016	Mõõtkava 1:2 Mass 1,7 kg
	Konstruktor O. Pronoza 2023-05-10 Juhendaja I. Penkov 2023-05-10		<h1>Võll</h1>	
TTÜ Virumaa Kolledž		Leht 1/1		