

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

**DROONITÕRJE KONTSEPTSIOONID JA
TÕRJESEADME MOBIILNE
KANDEKONSTRUKTSIOON**

**COUNTER-DRONE CONCEPTS AND MOBILE COUNTER-
DRONE SYSTEM BEARING STRUCTURE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Raimond Pääru

Üliõpilaskood: 191791MATM

Juhendaja: Tarmo Velsker, mehaanika ja
tööstustehnika instituudi
insener

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.

“26” mai 2021

Autor: Raimond Pääru

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“26” mai 2021

Juhendaja: Tarmo Velsker

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” mai 2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Raimond Pääru,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Droonitõrje kontseptsioonid ja tõrjeseadme mobiilne kandekonstruktsioon, mille juhendaja on Tarmo Velsker,

- 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.

26.05.2021

¹ 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 tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Mehaanika ja tööstustehnika

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Raimond Pääru 191791MATM (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: MATM02/18 - Tootearendus ja tootmistehnika, peerialal tootearendus (kood ja nimetus)

Juhendaja(d): Tarmo Velsker mehaanika ja tööstustehnika instituudi insener, 6203256 (amet, nimi, telefon)

Konsultant: Tõnis Tammisaar, insener, (nimi, amet)

Marduk Technologies OÜ, 5256789, tammisaar@gmail.com (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

Droonitõrje kontseptsioonid ja tõrjeseadme mobiilne kandekonstruktsioon

Counter-drone concepts and mobile counter-drone system bearing structure

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida erinevaid droonitõrje kontseptsioone ja valdkonnaga seotud probleeme
2. Analüüsida olemasolevate droonitõrje lahenduste mobiilsust ja rakendatavust maastikul militaarsetes situatsioonides
3. Projekteerida tõrjeseadme mobiilsele kandekonstruktsioonile uued tugijalad, mis suurendaksid haagise stabiilsust tööasendis.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Uurida kasutusel olevaid droonitõrje kontseptsioone ja leida erinevate süsteemide eeliseid ja puudusi	09.05.21
2.	Tõrjeseadme kandekonstruktsiooni analüüs	16.05.21
3.	Uute tugijalgade projekteerimine ja lahenduse analüüs	21.05.21

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "26" mai 2021 a

Üliõpilane: Raimond Pääru " 26" mai 2021 a
/allkiri/

Juhendaja: Tarmo Velsker " 26" mai 2021 a
/allkiri/

Konsultant: Tõnis Tammisaar " 26" mai 2021 a
/allkiri/

Programmijuht: Martin Eerme " 26" mai 2021 a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
1. SISSEJUHATUS.....	9
2. DROONITÕRJE KONTSEPTSIOONID	10
2.1 Probleemi kirjeldus	10
2.1.1 Droonide ajalugu militaarvaldkonnas	10
2.1.2 Probleemi aktuaalsus	11
2.2 Olemasolevad droonitõrje lahendused	12
2.2.1 Droonide vastaste meetmete kategooriad.....	12
2.2.2 Lahenduste probleemid ja eripärad.....	16
2.2.3 Tõrjeseadmete tootjad	20
2.3 Marduk Technologies.....	21
2.3.1 Marduk Shark	22
3. MEHAANIKA ÜLESANDE PÜSTITUS	24
3.1 Nõuete loetelu ja olulisuse hinnang	24
3.2 Morfoloogiline skeem.....	26
3.3 Lahenduste hinnang ja hindamismatriksid	27
3.3.1 Tugijalgade tööasendisse viimine	27
3.3.2 Tugijalgade taldade liikuvus.....	28
3.3.3 Tugijalgade kõrguse reguleeritavus	28
3.4 Tugijalgade paigutus	29
4. OLEMASOLEVA LAHENDUSE ANALÜÜS.....	34
4.1 Rajatingimused	34
4.1.1 Mõjuvad jõud ja momendid	34

4.1.2	Kandekonstruksiooni analüüsitavad osad.....	36
4.1.3	Kinnituste tüübid.....	38
4.1.4	Materjali ja võrgu valik	39
4.2	Arvutuse tulemused	40
5.	UUTE TUGIJALGADE PROJEKTEERIMINE	44
5.1	Ülesande püstitus	44
5.2	Lähteülesande kinemaatika analüüs	44
5.2.1	Grubleri arv	45
5.3	Projekteeritava struktuuri 3D mudel.....	47
5.4	LEM arvutused.....	47
5.5	Tulemuste analüüs.....	48
5.6	Arvutuste tulemused	52
	KOKKUVÕTE	53
	SUMMARY.....	54
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	55
	LISAD	57

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on valitud koostöös Eesti Kaitseväega. Töö koostamise vajadus tulenes Eesti Kaitseväe huvist droonitõrje teema vastu ja eesmärgist leida lahendusi tsiviil ja muude droonide tuvastamiseks ning mõjutamiseks. Valdkonna uurimise käigus võeti ühendust Eesti ettevõttega Marduk Technologies, kellega koostöös kitsendati töö põhiosa fookust ning püstitati konkreetne mehaanika probleem, millele otsitakse lahendusi.

Töö käigus analüüsitakse mobiilse kandekonstruktsiooni olemasolevaid tugijalgu ning projekteeritakse uus lahendus, mis vastaks ettevõtte poolt antud nõuetele. Esmalt koostatakse kandekonstruktsiooni ja vanade ning uute tugijalgade mudelid ning seejärel viiakse läbi tugevusarvutused lõplike elementide meetodiga, et selgitada välja tekkivad pinged ja deformatsioonid.

Autor soovib tänada ülikoolipoolset juhendajat Tarmo Velskerit ning Martin Eermet, kes aitasid suunata mehaanika arvutuste ja töö koostamist. Samuti soovitakse tänada Marduk Technologies tegevjuhti Martin Simonit ja inseneri Tõnis Tammisaart, kes on aidanud seada töö fookust ja abistanud lähteandmete kogumisel ning projekteeritava lahenduse nõustamisega. Autor tänab Eesti Kaitseväge, kes suunas töö teema valikut ning toetas finantsiliselt töö valmimist. Lõpetuseks soovib autor tänada oma isa ja oma elukaaslast ning sõpru, kes on kuulnud ja kaasa mõelnud erinevatele mõttekäikudele ja toetanud moraalselt kogu töö valmimise ajal.

Võtmesõnad: droonitõrje, kandekonstruktsioon, projekteerimine, LEM arvutused, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

CMOS – komplementaarne metall-oksiid-pooljuht (ingl k *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*)

DOF – vabadusastmed (ingl k *Degrees of Freedom*)

GLONASS – NSV Liidus väljatöötatud satelliitnavigatsiooni süsteem, mis on alternatiiviks GPS-ile (vene k *Глобальная навигационная спутниковая система*)

GNSS – ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem (ingl k *Global Navigation Satellite System*)

LEM – lõplike elementide meetod (ingl k *Finite Element Method*, FEM)

MEMS – elektromehaaniline mikrosüsteem (ingl k *Microelectromechanical Systems*)

UAV – mehitamata õhusõiduk (ingl k *Unmanned Aerial Vehicle*)

1. SISSEJUHATUS

Magistritöö eesmärgiks on uurida erinevaid droonitõrje kontseptsioone ja võrrelda nende eeliseid ja puuduseid. Uurimistöö tulemusena otsitakse sobivat lahendust, mida on võimalik rakendada Eesti Kaitseväel lahinguolukordades.

Droonide tehnoloogia on olnud sellel sajandil kiires arengus. Neid kasutatakse tsiviil otstarbel ja ka militaarvaldkonnas. Seoses sellega on päevakorda tõusnud ka droonide vastaste meetmete arendamine ja mitmetel erinevatel tööpõhimõtetel toimivate lahenduste välja töötamine. Droonitõrje seadmeid kasutatakse palju militaarvaldkonnas, kuid samuti ka näiteks lennujaamades, maa-alade ja objektide kaitseks, piiriületuskohtades ning mitmetes muudes olukordades, kus on oluline mehitamata õhusõidukite tuvastamine ja eemale hoidmine. Antud töös keskendutakse peamiselt militaarvaldkonnale.

Koostöös ühe droonitõrje seadmeid tootva Eesti ettevõttega otsitakse lahendust, mis võimaldaks droonitõrje seadet transportida ning kasutada seda maastikul tööasendis. Mobiilse kandekonstruktsiooni jäikuse tõstmiseks ning parendamiseks projekteeritakse haagisele uued tugijalad, mis peavad vastama ettevõtte poolt seatud nõuetele. Selleks koostatakse esmalt haagise ja olemasolevate tugijalgade mudelid ning analüüsitakse lahenduse puudusi, kasutades selleks *Solidworks* tarkvara. Leida tuleb ka droonitõrje seadme poolt tekitatavad jõud ja momendid, mis tuleb sisestada analüüsi tarkvarasse.

Seejärel koostatakse eskiislahendused uute tugijalgade projekteerimiseks ning otsitakse, millise geomeetriaga on võimalik parendada kandekonstruktsiooni stabiilsust. Koostatakse uute tugijalgade 3D mudel ja viiakse läbi konstruktsiooni tugevusarvutused. Töö lisades on toodud kõikide uute toodetavate detailide joonised. Kõige lõppu on lisatud ka koostejoonis.

2. DROONITÖRJE KONTSEPTSIOONID

Selles peatükis avatakse droonitõrje teema tausta ning analüüsitakse erinevaid kontseptsioone, mida kasutatakse droonide avastamiseks, tuvastamiseks, jälgimiseks ja mõjutamiseks. Drooniks ehk mehitamata õhusõidukiks võib pidada, mis tahes õhusõidukit, mida ei juhi otseselt sõidukis olev lendur, vaid see suudab liikuda iseseisvalt tänu autopilootsüsteemile või on kaugjuhitav raadio teel [1]. Autonoomsuse alusel jaotatakse mehitamata õhusõidukid autonoomseteks, poolautonoomseteks ja kaugjuhitavateks. Üldjuhul kasutavad suuremad droonid globaalset navigatsiooni satelliitsüsteemi, kuna nendes mahub rohkem tehnoloogiat ning nende kandevõime on suurem. Väiksemad droonid kasutavad liikumiseks aga MEMS-sensoreid ja CMOS kaameraid. Keskkonna info ja drooni asukoha täpsemaks määramiseks seotakse omavahel GPS, inertsisensorite, visuaalsete ja radarmõõtmiste tulemused [2].

2.1 Probleemi kirjeldus

2.1.1 Droonide ajalugu militaarvaldkonnas

Mehitamata õhusõidukeid on kasutatud militaarvaldkonnas juba eelmisel sajandil. Esmaseid näiteid võib leida isegi aastast 1849. Kuna toona ei olnud leiutatud veel isegi tänapäevaseid lennukaid, siis esimesed UAV näited on seotud kuumaõhupallide abil lõhkekehade kasutamisega austerlaste poolt [3]. Tehnika kiire arengu tõttu 20. sajandil on erinevate mehitamata õhusõidukite kasutamine olnud samuti kiires arengus. Seoses maailmasõdadega hakkasid UAV-d leidma laia kasutust ka militaar valdkonnas. Kuni eelmise sajandi keskpaigani, kasutati droone peamiselt sihtmärkide hävitamiseks ja neid juhiti raadiosignaalidega. Sajandi teises pooles hakati mehitamata õhusõidukitele lisama ka kaameraid ning jälgimisseadmeid [4].

Mehitamata õhusõidukeid kasutatakse tänapäeval militaarvaldkonnas vähemalt 48 riigis, millest suurem osa kasutab ka relvastusega varustatud droone. Peamisteks rakendusteks on luure ja õhutoetus [5]. 2001. aastal oli Ameerika Ühendriigid esimene riik maailmas, kes kasutas relvastatud droone lahingus inimese tapmiseks [6] ning tänaseks on meile teadaolevalt lahingutes kasutanud relvastatud droone üheksa riiki (USA, UK, Pakistan, Iraak, Nigeeria, Iran, Türgi ja Aserbaidžaan). Kasutusel on üle 150 erineva süsteemi, mis näitab, kui suur on varieerumine ka tehniliste lahenduste rakendamisel. Militaarvaldkonnas kasutatavate droonide suurused on samuti suuresti varieeruvad. Väikseimad droonid on oma mõõtmetelt ainult koolibri linnu suurused, kui samas suurim mehitamata õhusõiduk on lennuki mõõtmetes 6,8 tonni kaaluv RQ-4

Global Hawk. Militaarsete UAV-de tootmise ülemaailmne aastane käive oli 2018. aastal ligikaudu 2,8 miljardit dollarit ning 2025. aastaks ennustatakse sellele peaaegu neljakordistumist [5].

Väikeste elektrimootorite ja mikrokontrollerite kasutamise tõttu on 21. sajandil saanud droonidest ka tavapärase tsiviiltarbekaup [7]. Alates 2015. aastast on tsiviildroonide areng ja kasv toimunud kiires tempos. Tuntuimad tavakasutaja droonide tootjad on näiteks DJI, Parrot, Yuneec, Kespry, Autel Robotics, Skydio, Insitu ja paljud teised [8]. Tsiviildroonid mängivad olulist rolli ka sõjalistes olukordades, nagu on näidanud mitmed viimastel aastatel toimunud sõjaliskonfliktid Aserbaidžaanis, Armeenias, Ukrainas, Süürias, Iraagis ja mujal [9].

2.1.2 Probleemi aktuaalsus

Seoses droonide tehnoloogia kiire arenguga on kasvanud nende osakaal ning kaasatus militaarvaldkonnas. Viimase aastakümneni sõjalistes konfliktides on suur roll droonide kasutusel. Kusjuures ohtu ei valmista ainult militaarotstarbelised droonid, vaid olulist luureinfot on lekkinud ka läbi tsiviildroonide sattumise strateegiliselt olulistesse piirkondadesse.

Viimase kohta võib tuua näite Ukrainas aset leidvast sõjalisest konfliktist. Ukraina ja Venemaa vahelises konfliktis kasutatakse droonide puhul sõnalühendit БПЛА (vene k *Беспилотный летательный аппарат*), mis tähistab adapteeritud tsiviildroone. Need droonid monitoorivad erinevatest suundadest Ukraina vägede positsioone ning luureinfo edastatakse separatistidele ja neid toetavatele Venemaa üksustele. Saadud info põhjal tulistatakse Ukraina vägede positsioone raskekuulipildujatest ja ka vastavalt Minski kokkulepetele keelatud kaliibriga miinipildujatest.

Eelmisel aastal aset leidnud Mägi-Karabahhi konfliktis andis droonivõimekus ka suure eelise Aserbaidžaanile. Traditsioonilisest maskeerimisest ja soomusest enam ei piisa, sest mehitamata õhusõiduk suudab sihtmärgid leida ja hävitada ka distantsilt ja kõrgustest. Kommenteerides antud konflikti ütles ka Kaitseliidu peastaabi staabiohvitser major Andrei Šlabovitš, et antud olukorrast on selgelt näha, kuidas droonivõimekusest saabki tuleviku üks peamisi arengusuundasid. Droonide kasutamise efektiivsust rünnaku toetamisel näitas ilmastiku olude muutus. Halbades tingimustes madala pilvisuse ja kehva lennuilmaga päevadel oli näha ka aserite pealetungi takerdumist ning aeglustumist. Lisaks luureinfole ja hävitustöödele, droonivideoid kasutati ka mõjuvõimsa relvana sõdurite ja vastaste moraali hävitamisel [10].

Süüria ja Iraagi aladel toimuvaid sõjalisi konflikte ja sealset droonide kasutust analüüsivas uurimistöös 2016. aastal on välja toodud lai amplituuda nii militaar- kui ka tsiviildroonidest, mida sõjategevuses kasutati. Kokku tuvastati lausa 38 erinevat mehitanud õhusõiduki süsteemi. Enamikke tuvastatud süsteemidest kasutati toona esmakordselt otseselt lahingutegevuses. Lisaks 32-le teadaolevale mudelile, leiti lahingutegevustest ka 6 drooni, mille täpset tüüpi ei suudetud identifitseerida ning tegemist on tõenäoliselt isehitatud seadmetega [11].

Seoses droonide väga kiire levikuga tänapäeva sõjategevuses kerkib üha teravamalt üles ka vajadus droonide vastaste meetmete ja sellega seonduva tehnoloogia arengu edenamisele.

2.2 Olemasolevad droonitõrje lahendused

Droonide areng on olnud viimaste kümnendite jooksul väga kiire, mistõttu on sellega pidanud kaasas käima ka mehitanud õhusõidukite vastane tehnoloogia. 2015. aastal avaldatud Sandia rahvusliku laboratooriumi uuringus on toodud välja, et turul on 10 erinevat droonide vastast süsteemi [12]. Ent juba 2018. aastal Bardi kolledžis läbi viidud uurimistöös tuvastati üle 200 mehitanud sõidukite vastase lahenduse [13]. Sellest nähtub, et droonide mõjutamine on muutunud väga aktuaalseks ning praeguseks on juba välja arendatud väga palju erinevaid lahendusi.

2.2.1 Droonide vastaste meetmete kategooriad

Droonide vastased meetmed saab jagada peamiselt kahte valdkonda:

1. Droonide monitoorimine;
2. Droonide mõjutamine ja tõrjumine.

Mõlemas valdkonnas on kasutusel nii elektroonilised kui ka mehaanilised süsteemid ja meetmed. Eelpool mainitud 2018. aastal läbi viidud uurimistöös on toodud välja kõikides hetkel turul kättesaadavates droonitõrje lahendustes kasutatavad süsteemid.

Droonide monitoorimisel kasutatavad meetmed võivad olla kas passiivsed või aktiivsed. Passiivsete meetodite puhul koguvad seadmed kas visuaalsel vaatlusel või heli teel keskkonnast tulevat informatsiooni. Aktiivsel meetodil töötavad seadmed saadavad aga ise välja signaale ja analüüsivad tagasi tulevat informatsiooni. Monitoorimisel on neli peamist funktsiooni:

1. Tuvastamine;
2. Klassifitseerimine ja identifitseerimine;
3. Asukoha määramine ja jälgimine
4. Häireedastus.

Tuvastus tähendab üldiselt, et süsteem suudab märgata õhus olevat objekti või toimuvat liikumist. Tuvastamisest üksi ei piisa, kuna droone tuvastav radar võib tuvastada ka linde või muid mitte huvi pakkuvaid objekte.

Sellepärast on oluline ka klassifitseerimine. Selline tehnoloogia suudab tavaliselt eristada droone ka muud tüüpi objektidest nagu näiteks lennukid, linnud jne. Sellest järgmine samm on ka identifitseerimine. Paljud tehnoloogiad suudavad täpselt identifitseerida ka drooni konkreetse mudeli või isegi drooni või selle kontrolleri digitaalse sõrmejälje näiteks nagu MAC aadressi. Selline tuvastamise tase võib olla vajalik hilisemate süüdistuste ja juriidiliste probleemide lahendamise jaoks.

Mitmed seadmed võimaldavad reaajas jälgida drooni asukohta. Häireedastus iseenesest on juba vajalik olukorrateadlikkuse hoidmiseks. Kuid vastumeetmete rakendamise võimekus paraneb, kui on teada ka täpne UAV asukoht [14].

Droonide monitoorimiseks kasutatavad süsteemid on toodud välja Tabel 1.

Tabel 1. Droonide monitoorimise süsteemid [13]

Süsteem	Kirjeldus	Tüüp
Radar	Droonide tuvastamiseks kasutatakse radarit, mis tuvastab mehitamata õhusõidukitelt tagasipeegelduvaid raadiolaineid. Radarisüsteemid rakendavad enamasti algoritme, mis suudavad eristada droone muudest väikestest madalal lendavatest objektidest näiteks nagu linnud.	Aktiivne
Raadiolainetel põhinevad lahendused	Tuvastab mehitamata õhusõidukeid skaneerides raadiolainete sagedusi, millel enamuse teadaolevaid droone tegutseb. Algoritmid püüavad kinni ja suudavad	Passiivne

	teha kindlaks raadiolaineid välja saatva seadme geograafilised koordinaadid.	
Elektro-optilised lahendused	Tuvastab droone visuaalselt, kasutades selleks kõrge resolutsiooniga kaameraid või optilisi tuvastussüsteeme.	Passiivne
Infrapuna	Tuvastab droone püüdes kinni nendest tuleva soojuskiirguse.	Passiivne
Akustilised	Droone tuvastatakse nende mootoritest tulevate helide põhjal. Akustilised süsteemid kasutavad andmepanku, kuhu on salvestatud erinevate teadaolevate droonide helid. Süsteem võrdleb keskkonnast kuuldavat heli andmepangas olevate näidistega.	Passiivne
Kombineeritud andurid	Paljud turul olevad lahendused kombineerivad erinevaid süsteeme, et parandada tuvastamise täpsust. Näiteks võib akustilise tuvastusega kinni püütav heli aktiveerida optilise kaameraga tuvastussüsteemi.	Aktiivne/ passiivne

Droonide tõrjumisel ja mõjutamisel on kasutusel mitmed süsteemid, mis kasutavad mõjutamiseks erinevaid põhimõtteid. Üldiselt võib jaotada mõjutamissüsteemid kolme kategooriasse:

1. Füüsiliselt drooni või selle osade hävitamine;
2. Drooni neutraliseerimine (liikumise tõkestamine) või selle normaalse töö häirimine;
3. Drooni juhtimise ülevõtmine [14].

Süsteemid, mida kasutatakse turul olevates droonide mõjutamiseks mõeldud lahendustes, on esitatud Tabel 2.

Tabel 2. Droonide tõrjumise ja mõjutamise süsteemid [13]

Süsteem	Kirjeldus
Raadiolainete segamine ehk jammimine	Segatakse raadiosidet drooni ja selle juhi vahel, lastes välja suures mahus samal sagedusel olevaid raadiolaineid. Kui droonil katkeb side juhiga, siis tavapäraselt sooritavad need selle peale maandumise või alustavad „naase koju“ manöövrit, mille peale liigub droon autonoomselt oma juhini.
GNSS segamine	Segatakse drooni satelliidi ühendust, näiteks nagu GPS või GLONASS, mida mehitamata õhusõiduk kasutab navigeerimiseks. Droonid, mis kaotavad oma satelliit ühenduse, jäävad hõljuma, maanduvad või naasevad koju.
Süsteemi petmine ja ülevõtmine	Võimaldab drooni sideühenduse kaaperdamise kaudu võtta üle sihitud drooni juhtimist. Seda meetodit teatakse ka kui protokolliga manipuleerimist.
Laser	Suunatud laserkiire energia abil hävitatakse drooni kere lendamiseks hädavajalikud komponendid, mis põhjustab drooni allakukkumise.
Võrkpüünised	Võrkpüünis lastakse drooni suunas halvamaks drooni või selle rootorite liikumist.
Laskemoona kasutamine	Kasutatakse tavalist või spetsiaalset erilaskemoona, millega hävitatakse laskealasse sisenevad mitte soovitud droonid.
Kombineeritud mõjutamise meetmed	Mitmed olemasolevad droonitõrje seadmed kasutavad mitme erineva süsteemi kombineerimist. Enam levinud on näiteks raadiolainete ja GNSS-i süsteemi häirimine sama-aegselt.

Lisaks nendele kahele valdkonnale on olemasolevad droonitõrje lahendused jaotatud ka kolme kategooriasse vastavalt sellele, millised on nende seadmete konstruktsioonilised eripärad ja millistes tööasendites neid kasutatakse. Kasutusel olevate droonitõrje seadmete liigitus nende platvormi alusel on esitatud Tabel 3.

Tabel 3. Droonitõrje seadmete platvormid [13]

Tüüp	Kirjeldus
Maapealsed	Süsteemid, mis on mõeldud kasutamiseks maapinnal, kas statsionaarselt või ka liikuvat. Sellesse kategooriasse lähevad kõik seadmed, mis on kinnitatud liikumatule tasapinnale, paiknevad mõnel mobiilsel konstruktsioonil või on kinnitatud mõne maapealse sõiduki külge.
Käes hoitavad	Süsteemid, mis on mõeldud ühele inimesele käes opereerimiseks. Enamus neist süsteemidest meenutavad püsse või muid käsirelvi.
UAV-põhised	Droonidele paigaldamiseks mõeldud süsteemid, et tõrjeseadmega oleks võimalik pääseda sihitud mehitamata õhusõidukile võimalikult lähedale, et siis seda mõjutada lähimalt distantsilt.

2.2.2 Lahenduste probleemid ja eripärad

Eelnevalt kirjeldatud tehnoloogiad on väga eriilmelised ning kõigil on omad tugevad ja nõrgad küljed. Pole olemas ühtset süsteemi, mis töötaks eksimatult kõikides tingimustes ja ükskõik millises keskkonnas. Seega peavad tõrjeseadmete kasutajad võrdlema erinevate meetodite eeliseid ja puuduseid ning valima seadmeid lähtuvalt rakendatavale olukorrale, võttes arvesse omatavaid ressursse ja võimalusi. Droonide tuvastamiseks kasutatavate süsteemide võrdlus on toodud Tabel 4 ja droonide mõjutamiseks kasutatavate süsteemide võrdlus on esitatud Tabel 5 [14].

Tabel 4. Droonide monitoorimise süsteemide võrdlustabel [14]

Süsteem	Eelised	Puudused
Radar	<ul style="list-style-type: none"> • Võimalik rakendada pikkade distantside korral. • Pidev seire. • Ülitäpne geograafilise asukoha määramine. • Saab korraga hakkama sadade sihtmärkidega. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lahendused on teistest süsteemidest kordades kallimad. • Vajavad palju tehnikat ning antenne, et tuvastada UAV täpset asukohta.

	<ul style="list-style-type: none"> • Suudab tuvastada kõiki liike droone sealhulgas ka autonoomselt lendavaid õhusõidukeid. • Ei sõltu nähtavusest ja ilmastikutingimustest – töötab päeval, öösel, vihmas, udus jne. 	<ul style="list-style-type: none"> • Avastamisulatus sõltub drooni suurusest. • Enamik seadmeid ei suuda veatult eristada linde mehitamata õhusõidukitest. • Häirete vältimiseks on vaja ülekandelitsentse ja sageduskontrolli.
Raadiolainetel põhinevad lahendused	<ul style="list-style-type: none"> • Suhteliselt madala kuluga. • Suudab tuvastada mitut drooni ja kontrollierit. • Mitmed lahendused suudavad ka määrata nende täpsemat positsiooni. 	<ul style="list-style-type: none"> • UAV lend võib olla täielikult autonoomne, mis juhul antud lahendused ei tööta. • Tüüpiliselt kasutatav lühikestel distantsidel. • Kehvad tulemused keskkondades, kus on palju muid segavaid raadiolaineid.
Elektro-optilised lahendused	<ul style="list-style-type: none"> • Suudab tagada visuaale mehitamata õhusõidukitest ning võimaldab salvestada pilte, mida saab kasutada hilisemalt asitõenditena. 	<ul style="list-style-type: none"> • On väga ilmastikutundlikud. • Raskendatud töötingimused pimedas, udus jne. • Iseseisvalt tuvastamiseks vajab suuremahulist pilditöötlust ja masinnägemise rakendamist. • Kõrge valehäirete tõenäosus.
Infrapuna	<ul style="list-style-type: none"> • Sarnased omadused elektro-optiliste süsteemidega. • Ei sõltu palju valgusest ja suudab tuvastada ka öösel. 	<ul style="list-style-type: none"> • Piiratud distantsid ja keskkonnad. • Lindude või muude objektide eristamine mehitamata õhusõidukitest on keerulisem.
Akustilised	<ul style="list-style-type: none"> • Suudab tuvastada kõiki lähiümbruses olevaid droone sealhulgas ka autonoomseid droone. • Tuvastab droone ka maastikel, kus teistel süsteemidel võib olla raskusi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lahendus ei tööta mürrarohketes piirkondades. • Väga lühike töödistsants (maksimaalselt 300-500m).

	<ul style="list-style-type: none"> • Väga mobiilne ning kergesti rakendatav. • Täielikult passiivne. 	
Kombineeritud andurid	<ul style="list-style-type: none"> • Kuna ükski meetod ei ole 100% töökindel, tõstab süsteemide kombineerimine tuvastamise tõenäosust. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erinevate süsteemide kasutamine ja omavahel sidumine muudab tõrjeseadme hinna veelgi kallimaks.

Tabel 5. Droonide mõjutamissüsteemide võrdlustabel [14]

Süsteem	Eelised	Puudused
Raadiolainete segamine ehk jammimine	<ul style="list-style-type: none"> • Keskmise hind. • Mittekineetiline neutraliseerimine. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lühike mõjuavaldamise kaugus. • Võib häirida ka muud raadiosidet. • Võib põhjustada drooni ettearvamatut käitumist. • Võib drooni tahtmatult saata hoopis selle sihtmärgini.
GNSS segamine	<ul style="list-style-type: none"> • Keskmise hind. • Mittekineetiline neutraliseerimine. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sarnased puudused raadiolainete segamisele. • Lühike mõjuavaldamise kaugus. • Võib häirida ka muud satelliitsidet. • Võib põhjustada drooni ettearvamatut käitumist. • Võib drooni tahtmatult saata selle sihtmärgini.
Süsteemi petmine ja ülevõtmine	<ul style="list-style-type: none"> • Keskmise hind. • Mittekineetiline neutraliseerimine. • Võimaldab suunata drooni käitumist ja vältida seeläbi drooni kogemata sattumist ohualasse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lühike mõjuavaldamise kaugus. • Keerulisem võtta üle juhtimist, kui lihtsalt segada drooni seadmeid.

Laser	<ul style="list-style-type: none"> • Peatab füüsiliselt drooni. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kõrge hind. • Lisakahjustuste tekkimise oht on suur. • Tavaliselt üpris suured süsteemid ja seni veel küllaltki eksperimentaalne tehnoloogia.
Võrkpüünised	<ul style="list-style-type: none"> • Püüab drooni füüsiliselt kinni. • Hea kasutada edasiseks ekspertiisiks ja võimalik kasutada hiljem asitõendina juriidilistes vaidlustes. • Maapinnalt lastavad võrkpüünised on poolautomaatsed ja kõrge täpsusega. • Võrkpüünisega varustatud mehitamata õhusõidukiga on võimalik saavutada ka pikk mõjuulatus ning vähendada lisakahjustuste ohtu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kineetiline lahendus võib põhjustada vabalt langevate rusude tekkimist sõltuvalt, kas kasutatakse ka mingit langevarju taolist lahendust. • Droonidelt lastavad võrgud on võrdlemisi ebatäpsed. • Droonidelt lastavatel võrkudel on pikk laadimisaeg. • Maapinnalt lastavad võrkpüünised on lühikese mõjualaga.
Laskemoona kasutamine	<ul style="list-style-type: none"> • Peatab füüsiliselt drooni ning ei luba seadme edasist kasutust. • Maapinnalt lastav laskemoon on poolautomaatne ja kõrge täpsusega. • Laskemoonaga varustatud mehitamata õhusõidukiga on võimalik saavutada ka pikk mõjuulatus ning vähendada lisakahjustuste ohtu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kineetiline lahendus põhjustab vabalt langeva rusude tekkimist. • Droonidele paigaldatud laskeseadmed on pika laadimisajaga. • Maapinnalt lastav laskemoon on aga lühikese mõjualaga.

Kombineeritud mõjutamise meetmed	<ul style="list-style-type: none"> • Kuna ükski meetod ei ole 100% töökindel, suurendab süsteemide kombineerimine mõju efektiivsust. • Näiteks suurendatakse kaugemate sihtmärkide tabamiseks vajalikku mõjuulatust. • Näiteks kombineerides võrkpüüniseid ja raadiolainete segamist, saadakse kätte koju naasmise manöövrit teostav droon. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erinevate süsteemide kombineerimisega kaasneb veelgi kõrgem hind. • Samuti suureneb seadmete hulk ja tehnoloogia suurus, mis läbi võib vähendada tõrjeseadme mobiilsus.
----------------------------------	--	--

2.2.3 Tõrjeseadmete tootjad

Uurides droonitõrjes kasutatavate erinevate meetodite kohta, leidis autor, et turul on juba väga palju erinevaid seadmeid. Arvestades süsteemide kombineerimise keerukust ning mahukust, on magistritöö raames tarbetu luua uut lahendust. Mõistlikum on otsida mõni turul olev kaitsevää vajadustele sobiv seade ning projekteerida lahendus, kuidas muuta seade mobiilseks ja lahingolukordades kasutamiseks sobilikuks.

Bardi kolledži uuringus on toodud välja, et üle maailma on saja ettevõtte, kes toodavad erinevaid droonide avastamise ja mõjutamise lahendusi [13]. Ettevõtteid, kes lahendavad droonitõrje probleemi, tegutseb kõikides maailmajagudes. Mõned suurimatest tootjatest maailmas on näiteks Chenega Europe, Cobham Antenna Systems, DroneShield, Meritis, Repulse jpt. USA-Austraalia ettevõtte DroneShield seadmeid on katsetatud ka isegi Eestis. 2018. aastal katsetati Tallinna vanglas nende seadet, et demonstreerida, kuidas on võimalik eemale hoida vangla territooriumile salakaupa toovaid droone. DroneShieldi seadme tööpõhimõte seisneb raadiolainetel põhinevatel lahendustel, kus esmalt tuvastatakse droon ning seejärel häiritakse drooni tööd saates välja segavaid raadiolainete sagedusi [15].

Sarnaseid segajaid toodab ka Eestis tegutsev ettevõtte Rantelon. Rantelon projekteerib, toodab ja müüb erinevaid raadiosageduslikke elektroonika seadmeid. Nad valmistavad ka mitmeid seadmeid militaartööstusesse ning samuti on tegelenud mitu aastat

justnimelt droonide tuvastamiseks ja segamiseks mõeldud seadmete tootmisega. Nende valikus on neli toodet:

- Droonituvastaja;
- Väike droonipüss;
- Suur droonipüss;
- Kantav segaja [16].

Kõik nende lahendused põhinevad raadioside ja GNSS-i segamises. Tänapäevased droonid on aga paljuski autonoomsed ning seetõttu ei saa neid tuvastada ega mõjutada raadioside kaudu.

Uurimistöö käigus jõuti veel teise Eestis asuva ettevõtte ni Marduk Technologies, kes lahendab sarnast droonitõrje probleemi. Nemad keskenduvad lahendustele, mis suudavad tuvastada ning mõjutada, mis tahes drooni – kaugjuhitavat, poolautonoomset ja ka autonoomset.

2.3 Marduk Technologies

Ettevõtte Marduk Technologies on asutatud 2016. aastal. Ettevõtte juhid Indrek Seppo ja Martin Simon on intervjuus tabavalt öelnud: „Droonid kasutavad valdavalt operaatori ja drooni vahel suhtlemiseks raadiosidet. Selle abil neid ka tuvastatakse ja segatakse. Selliste droonide probleem on tänaseks juba lahendatud – Eestis on sarnaselt meile väga hea ettevõtte Rantelon, kes teeb droonide segajaid. Probleem on aga see, et mida teha droonidega, mis töötavad autonoomselt ehk raadiovaikuses? Need on need droonid, millele meie üritame viimased viis aastat lahendust leida.“ [9]

Nende droonitõrje seade püüab lahendada nimelt probleemi, mis on seotud autonoomsete mehiteamata õhusõidukitega. Oma kodulehel kirjutavad nad, et nende eesmärk on luua tõrjeseade, mis on mõeldud keskmaa kasutuseks (1 kuni 5 km mõjualaga). Seade peab tuvastama, jälgima ning lõpuks hävitama ohtu pakkuva drooni [17]. Nende toode ei ole mõeldud ainult militaarvaldkonnas kasutamiseks, vaid sobib ka näiteks lennujaamadesse, maa-alade ja objektide kaitseks, piiriületuskohtadele ning paljudesse muudesse olukordadesse, kus on oluline mehiteamata õhusõidukite tuvastamine ja eemale hoidmine.

2.3.1 Marduk Shark

Marduk Technologies droonitõrje seade Shark, kasutab droonide tuvastamiseks elektrooptilisi süsteeme ning nende mõjutamiseks on välja arendatud laserite süsteem, et sellega hävitada droonide osasid. Kasutamiseks on see mõeldud maapealselt. Hetkel on tõrjeseade kinnitatud kolmjala külge, mida on võimalik asetada otse maapinnale, kuid on võimalik kinnitada ka mobiilse kandekonstruktsiooni külge. Koostöös ettevõttega Milrem Robotics on välja töötatud ka lahendus, kus Marduk Shark on paigaldatud Milremi arendatud mehitamata sõidukile TheMIS [18].

Marduki ja Milremi koostöös valminud lahendus on väga kõrgetasemeline tööriist sõjanduses, kuid seejuures muudab Milremi robotplatvormi lisamine seadme hinna veelgi kõrgemaks. Alternatiivse võimalusena on Sharki mobiilsuse tagamiseks hetkel kasutusel ka järelveetava haagisega teostatud lahendus. Seadme kolmjalg on kinnitatud liikuvate ühendustega haagise põhja külge ning lahingolukorras on võimalik see fikseerida laskeasendisse. Olemasolev haagisesüsteem koos droonitõrje seadmega on esitatud Joonis 1.



Joonis 1. Olemasolev haagis koos droonitõrje seadmega [9]

Haagis on standardne lahendus, mida pakub Tiki Treiler [19]. Muudetud on vaid treileri aluspõhja ja toruraami. Põhjale on lisatud seadme kolmjala kinnitamiseks vajalikud osad. Samuti on standardsed ka haagise tugijalad, mida kasutatakse kandekonstruktsiooni laskeasendisse fikseerimiseks. Olemasolevate tugijalgadega ei ole haagis piisavalt stabiilne.

Haagise jäikus on sellise täpse seadme puhul väga oluline. Tõrjeseadme kolmjala mass on 30 kg. Seadme pea kaalub koos erinevate moodulitega kokku 68 kg ning see pöörleb kahes suunas (ümbes vertikaal ja horisontaal telje) nurkkiirusega 3π rad/s, mis saavutatakse 0,3 sekundi jooksul. Sellise massi liikumine avaldab läbi jalgade mõju ka haagisele ning on vaja arvutada, millised deformatsioonid tekivad, kui kasutada olemasolevat tugijalgade süsteemi. Samuti on olemasolevate tugijalgade alumine toetuspind maaga väikese pindalaga, mis vähendab omakorda kandekonstruktsiooni stabiilsust pehmemal maastikul.

Sellest tulenevalt püstitati koostöös Marduk Technologies mehaanika inseneriga probleemülesanne, milleks on projekteerida droonitõrje seadme kandekonstruktsioonile uued tugijalad. Uued tugijalad peavad suurendama haagise jäikust tema töö asendis ehk ratastelt õhku tõstetuna ning peavad moodustama maaga suurema tugipinna.

3. MEHAANIKA ÜLESANDE PÜSTITUS

Magistritöö praktilise osa ülesandeks on lahendada mehaanika sõlm Marduk Technologies droonitõrje seadme veohaagise tugijalgadele. Tugijalgade konstruktsioon peab täitma ette antud funktsioone ning vastama ettevõttega koostöös määratud nõuetele.

3.1 Nõuete loetelu ja olulisuse hinnang

Koostöös Marduk Technologies poolse konsultanti Tõnis Tammissaarega pandi kirja ülesande lähteparameetrid ning konstruktsioonile esitatavad nõuded, millele anti kaalud, kui oluline mingi parameeter tugijalgade konstruktsiooni projekteerimisel on. Nõuete olulisuse hindamisel on kasutatud 5 punkti skaalat, kus 5 väljendab nõuet, mis peab olema tingimatult täidetud ning 1 väljendab nõuet, mida võiks vähegi võimalusel silmas pidada, kuid mille arvelt võib teha oluliselt järeleandmisi. Nõuded ja nende olulisuse hinnang on esitatud Tabel 6.

Tabel 6. Nõuete loetelu ja olulisuse hinnang

Nõue	Nõude kirjeldus	Nõude kaal
Jäikus ja stabiilsus	Tugijalad peavad tagama haagise jäikuse, mis stabiliseerib tuvastus- ja laskeasendis oleva droonitõrje seadme liikumisel tekkivaid jõude ja momenti. Eesmärk on uue lahendusega saavutada vähemalt 3 korda väiksem nihe tugijalgades.	5
Vastupidavus	Konstruktsioon peab olema valmistatud välitingimustele vastavatele nõuetele ning võtma arvesse, et seadmega opereeritakse peamiselt looduses ja maastikul.	4
Paigaldamise kiirus	Haagise tugijalad peavad olema paigaldatavad võimalikult kiiresti ning ei tohiks segada droonitõrje seadme üles seadmist. Võttes arvesse, et kogu seadme	4

	lahingvalmidus tuleb saavutada maksimaalselt 15 minuti jooksul, peavad tugijalad olema paigaldatavad paari minutiga.	
Kompaktsus ja <i>clearance</i>	Konstruksiooni ehitus peab olema võimalikult kompaktne. See tähendab, et see ei tohi võtta haagise sisemusest palju ruumi, kuna seda osa kasutatakse droonitõrje seadme ja selle osade vedamiseks. Samuti peab säilima haagise <i>clearance</i> , mis tähendab, et künklikel ja kännulistel maastikel liikudes ei tohi haagise külge kinnitatud tugijalad ja selle osad segada manööverdamist ja maastiku läbitavust.	3
Toodetavus	Kasutatavad detailid peavad olema kergesti toodetavad ka üksikute detailidena ja ei saa eeldada masstootmist. Sobivad tootmisprotsessid on näiteks laserlõikus, keevitus, painutus, vajadusel ka freesimine ja treimine jt. Mitte sobivad protsessid on näiteks valamine, stantsimine jt.	4
Hind	Konstruksiooni projekteerimisel peab arvestama, et lahenduse hind oleks suhteliselt kooskõlas ülejäänud haagise hinnaga.	2
Poltliidete vältimine	Konstruksiooni kinnitamine ja koostamine maastikul peab võimalusel vältima poltide, mutrite ja muude paigaldamisel lisatavate pisikeste kinnitusvahendite kasutamist. Kuna seade on mõeldud peamiselt maastikul opereerimiseks, siis looduses kaovad	3

	väikesed detailid inimliku eksimuse tõttu kergelt.	
Mehaanilise konstruktsiooni lihtsus	Tugijalgade konstruktsioon peab oma ehituselt olema võimalikult lihtne ning vältima üle inseneeritud paljudest detailidest koosnevat lahendust.	2
Universaalsus	Konstruktsioon peab olema kergesti skaleeritav ning sobima väikeseid muudatusi tehes ka teistele haagistele paigaldamiseks.	1

3.2 Morfoloogiline skeem

Morfoloogilises skeemis näidatakse funktsioonikandjad, tuuakse välja projekteeritava konstruktsiooni sõlmed ja nimetatakse erinevaid lahendusi konstruktsiooni jaoks. Funktsioonid ja tegevuspõhimõtted koos funktsioonikandjatega on esitatud Tabel 7.

Tabel 7. Morfoloogiline skeem

Nr	Funktsioon		Tegevuspõhimõtte (AP) / Funktsioonikandja (FC)		
1	Tugijalgade tööasendisse viimine	AP	Mehaaniline	Hüdrauliline	Pneumaatiline
		FC	Käsitsi	Käär-tõstuk	Hüdraulilised silindrid
2	Tugijala taldade liikuvus	AP	Fikseeritud asend	Ühes teljes reguleeritav	Mitmes teljes reguleeritav
		FC	Keevitatud tald	Pöörlev liigend	Kuulligend
3	Tugijalgade kõrguse reguleeritavus	AP	Fikseeritud asend	Astmeliselt muudetav kõrgus	Vabalt valitav kõrgus
		FC	Keevitatud ühendus	Splindiga fiksaator	Kiirkinnitus klamber
					

3.3 Lahenduste hinnang ja hindamismatriksid

Morfoloogilises skeemis toodud funktsioonikandjatest on vaja valida lahendused, mis sobiksid kõige paremini ettevõtte poolt seatud nõuetega ning tagaksid haagise stabiilse töösandi. Järgnevalt on hinnatud erinevaid lahendusi konstruktsiooni sõlmede lahendamiseks.

3.3.1 Tugijalgade töösandisse viimine

Tugijalgade töösandisse viimiseks on pakutud välja neli erinevat lahendust. Oluline on tagada võimalikult kiire jalgade töösandi fikseerimine, kuid samas peab arvestama, millised võimalused on haagisele lisa seadmete paigutamisel ning kas on võimalik kasutada lisaenergiaallikaid. Erinevate lahenduste hinnang on esitatud Tabel 8.

Tabel 8. Tugijalgade töösandisse viimise lahenduste hinnang

Tugijalgade töösandisse viimine					
Kriteerium	Kriteeriumi kaal	Lahendused			
		Käsitsi	Käartõstuk	Hüdraulilised silindrid	Pneumaatilised silindrid
Hind	2	5	3	1	1
Paigalduskiirus	4	2	4	5	5
Töökindlus	4	5	5	3	2
Tootmise keerukus	4	5	3	1	1
Kompaktsus	3	5	2	2	1
Kokku kaalutud hinne		73	60	44	37
Lõplik valik		Käsitsi			

Tugijalgade töösandisse viimise puhul jäädakse sama lahenduse juurde, mida kasutatakse olemasoleval haagisel. Esmalt lastakse haagis eesmisest tiisli otsast

võimalikult madalale, kasutades selleks reguleeritava kõrgusega eesmist ratast. Selles asendis lastakse maksimaalselt alla tagumised tugijalad. Seejärel tõstetakse haagis tiisli eesmisest otsast maksimaalselt kõrgele ning lastakse alla eesmised tugijalad. Tiisli otsa alla laskmisel jääb haagis toetuma nüüd tugijalgadele ning enam mitte ratastele ja lehtvedrustusele.

Selline tegevuste järjekord võib tunduda küll pikk ja lohisev, kuid samas käib see piisavalt kiirelt ning on seejuures kõige lihtsam võimalik lahendus. Kuna see ei nõua ühegi lisa detaili tootmist või seadme kasutamist, siis on see oma hinnalt kõige soodsam lahendus. Lisaks ei võta see lahendus haagise kastist vaba ruumi ära.

3.3.2 Tugijalgade taldade liikuvus

Olemasoleval lahendusel ei ole tugijala talla asend muudetav, kuid see annaks teatava eelise maastikul. Metsas, kus maapind ei ole alati ühtlaselt tasane, on hea, kui talla asend ei oleks jäigalt fikseeritud. Keevitatud tald ei kasuta seetõttu alati kogu võimalikku toetuspinda. Lahendusel, kus tald saab vabalt liikuda, muutub talla nurk vastavalt maastikule selliseks, et vastu maad toetuks kogu talla pind. Seetõttu kasutatakse uue lahenduse puhul liikuvat talda.

Liikuva tallaga lahenduse puhul on võimalik teha lahendus, kus talda saab reguleerida ümber ühe telje või ümber mitme. Kõikides suundades pööratava talla saab teha kasutades kuulliigendit, kuid see suurendab oluliselt lahenduse keerukust ning mõjutab ka hinda. Ühes teljes pööratava talla saab aga lahendada ühe lihtsa pöörleva liigendiga. Samas tagab see juba reguleeritavuse ning kolmes teljes pööramist pole isegi tarvis.

Uue tugijala jaoks valiti ühes teljes reguleeritava tallaga lahendus.

3.3.3 Tugijalgade kõrguse reguleeritavus

Olemasoleva lahenduse puhul on kasutatud kiirkinnitusega klambrit. Tugijala asendi fikseerimine keevitusega tagab küll selle, et ühendused on jäigemad ning ei saa tekkida lõtku, kuid see kaotab täielikult ära reguleeritavuse. Selleks, et haagis toetuks tugijalgadele ja mitte ratastele ning lehtvedrustusele peab tugijalgade kõrgus olema kindlasti reguleeritav.

Astmeliselt reguleeritav lahendus sobiks kasutamiseks asfaldil või muul jäigal ning tasasel pinnasel. See väldiks, et jalgade kõrgust fikseeriv kinnitus saaks muutuda lõdvemaks seadme töö käigus tekkiva vibratsiooni või mõne muu jõu tõttu. Kuid metsas pehmel ja ebatasasel pinnasel on astmeliselt reguleeritaval lahendusel oluline miinus.

Maastiku ebatasasuse tõttu võib tekkida vajadus reguleerida kõik neli jalga erinevatele kõrgustele, kuid see erineb ainult mõne millimeetri võrra. Astmelise lahendusega ei suudeta tagada sellist täpsust, sest tugijala torusse ei ole võimalik teha palju avasid. Avade rohkus vähendab toru tugevust. Vabalt reguleeritav lahendus võimaldab jalgade asendit reguleerida vastavalt maastiku olukorrale.

Otsus on olemasolevat lahendust mitte muuta ning uue tugijala puhul kasutada samuti tugijala kõrguse reguleerimiseks kiirkinnitusega klambrit.

3.4 Tugijalgade paigutus

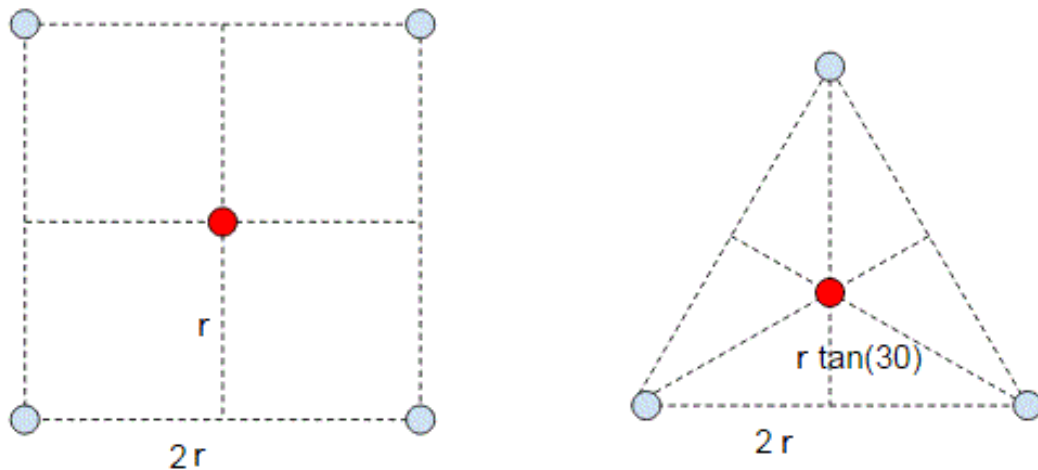
Olemasoleval haagisel on tugijalad kinnitatud haagise raami külge neljas punktis. Järgnev analüüs võrdleb, milline tugijalgade arv on antud kandekonstruksiooni jaoks sobivaim.

Praegune jalgade asetus on esitatud Joonis 3. Neli tugijalga on paigutatud haagise külgedele selliselt, et haagise ja droonitõrje seadme massikeske oleks kõikidest tugijalgadest samal kaugusel. Küll aga ei ole võrdsed nende kauguste x ja y -koordinaadid, mis tõttu liigub haagis külgsuunas rohkem kui piki liikumise suunda.

Ebatasasel pinnal võib tekkida olukord, kus nelja toetuspunktiga toetatud keha hakkab kõikumama, sest üks jalg võib ebatasasuse tõttu jääda õhku ning keha kõigub siis kahe diagonaalil asetseva toetuspunkti vahel. Kolme jalaga on aga kõik toetuspunktid alati vastu maad.

Keha toetamiseks on vaja minimaalselt kolme tugipunkti. Toetades keha kahest punktist jääb alles üks vabadusaste – ümber jalgade vahelise telje pöörlemine. Kui aga toetada keha kolmest punktist võetakse ära keha kõik vabadusastmed ning keha ei saa iseeneslikult liikuda üheski suunas ega pöörle ümber ühegi telje. Kui toetuspunktid asetsevad masskeskme suhtes sümmeetriliselt, siis on keha masskeskme liikumine kõikide jalgade vaheliste telgede suhtes võrdse mõjuga. Sellepärast võrreldakse järgnevas analüüsis korrapäraste hulknurkade kujulisi lahendusi.

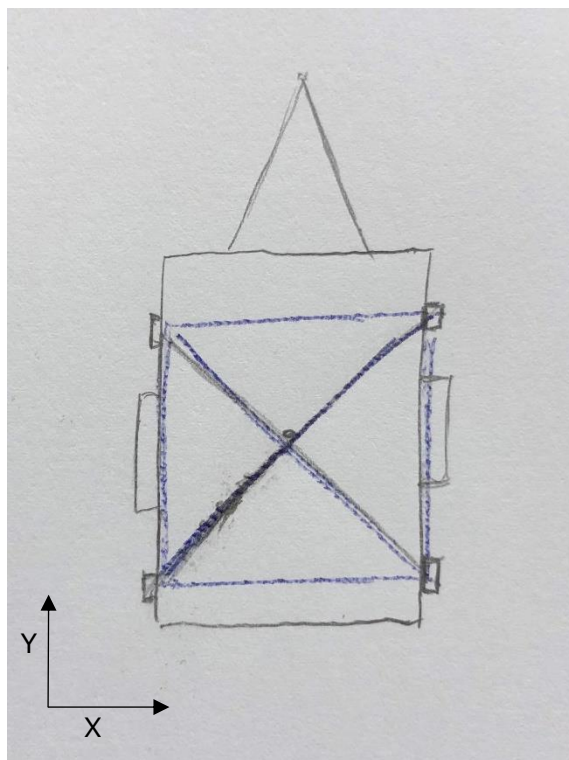
Mida laiema toetuspinna haaravad tugijalad, seda keerulisem on viia keha oma tasakaalu asendist välja, sest mida kaugemale masskeskmest viiakse toetuspunktid, seda pikemaks muutub masskeskme kaugus kahte tugijalga ühendavast teljest. Selle poolest on nelja jalaga lahendus parem. Joonis 2 on näidatud, kuidas võrdsel kaugusel asetsevate jalgade puhul muutub sõltuvalt toetuspunktide arvust masskeskme kaugus tugijalgu ühendavast teljest.



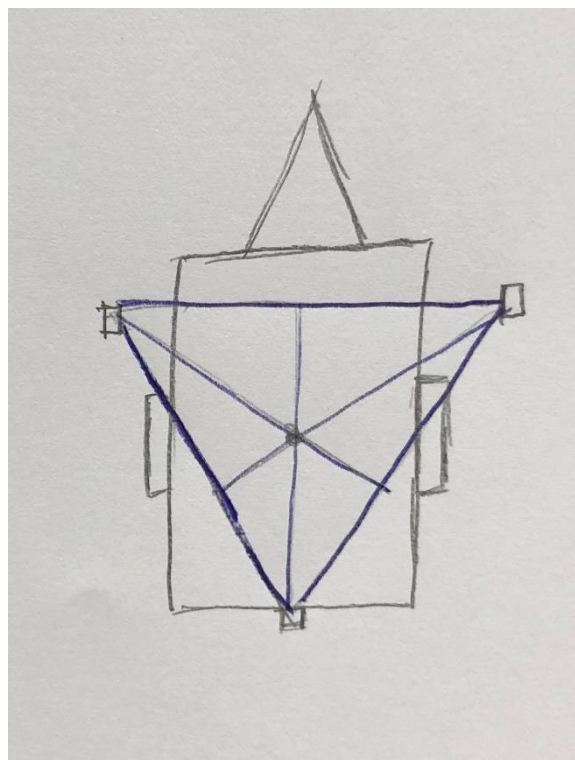
Joonis 2. Tugijalgade masskeskme kaugus jalgade vahelisest teljest

Ruudu kujulisel lahendusel on masskeskme kaugus jalgade vahelisest teljest r , kuid kolmnurkse lahenduse puhul $r \cdot \tan 30^\circ$ ehk ligikaudu $0,58r$. See tähendab, et kolmnurkse lahenduse puhul piisab peaaegu kaks korda väiksemast vahemaast, et masskeskme lükkamisel kukuks keha ümber. See muudab lahenduse ebastabiilsemaks, kuid haagise toetamise puhul ei ole nihked nii suured, et peaks kartma haagise ümber kukkumist.

Visandati uus eskiis kolme toetuspunktiga, mis on esitatud Joonis 4. Selliselt kandekonstruktsiooni toetades saavutatakse stabiilne seisund, kus kõik tugijalad on masskeskmest võrdsel kaugusel ning haagiselt on võetud ära kõik vabadusastmed. Antud lahenduse probleemiks on see, et tugijalad tuleb viia haagisest eemale, mis suurendaks kandekonstruktsiooni gabariitmõõtmeid ka transpordi asendis. See on aga üks lähteülesande kriteeriumitest, mida tuleb vältida. Seega tuli kaaluda veel teisi lahendusi.



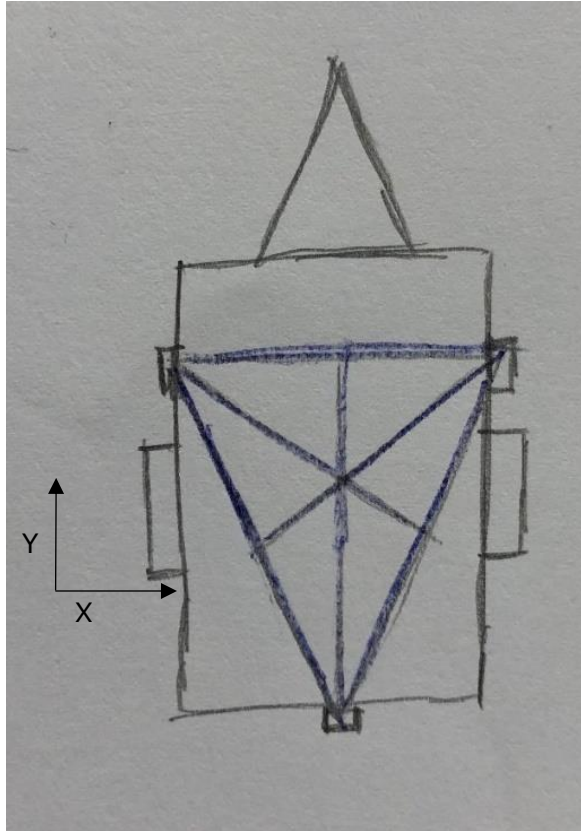
Joonis 3. Olemasoleva tugijalgade lahenduse eskiis



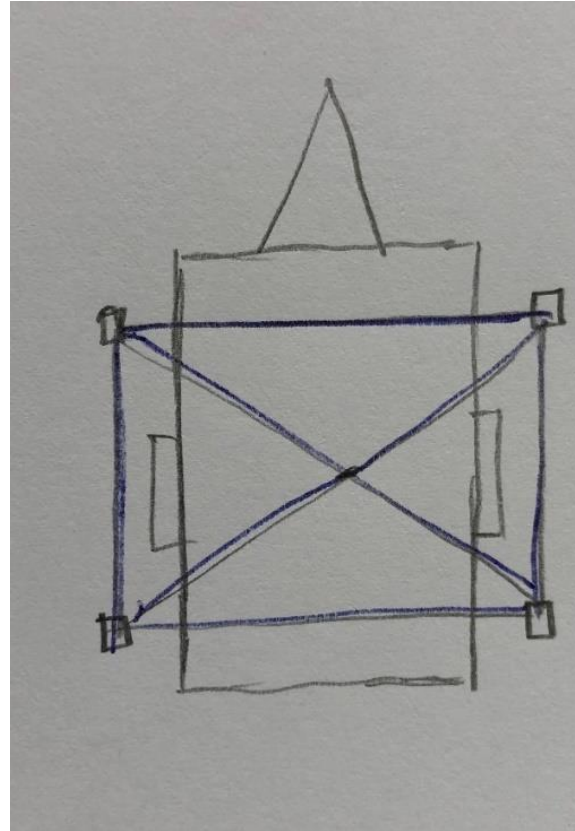
Joonis 4. Võrdkülgse kolmnurga kujulise tugijalgade lahenduse eskiis

Järgmiseks tehti kolme toetuspunktiga lahendus, kus külgmised jalad asuvad haagise toruraami küljes. See on esitatud Joonis 5. Selle lahenduse puhul väheneb masskeskme kaugus jalgade vahelisest teljest, mis vähendab haagise stabiilsust.

Kolme jalaga lahendusest loobutakse, sest analüüs näitab, et nelja tugijalaga on samade gabariitmõõtmete korral haagis parema stabiilsusega. Selleks, et olemasolevat nelja toega lahendust muuta paremaks oleks hea viia tugijalad samuti haagise raamistikust eemale, et saavutada ruudukujuline lahendus. Selline eskiis on esitatud Joonis 6. Eskiisilt on näha, et see tähendaks taaskord jalgade kinnituste laiemaks viimist, mida ei soovita teha metsas liikumiseks vajaliku kompaktsuse tagamiseks. Samuti on valitsuse määruses reguleeritud, et avalikul teel liikumiseks lubatud maksimaalne haagise laiusgabariit on 2,55 m [20]. Sellest lähtuvalt oli järgmiseks eesmärgiks mõelda lahendus, kus tugijalad on kinnitatud haagise toruraami külge, kuid töösendis on neid võimalik tõmmata laiemaks.



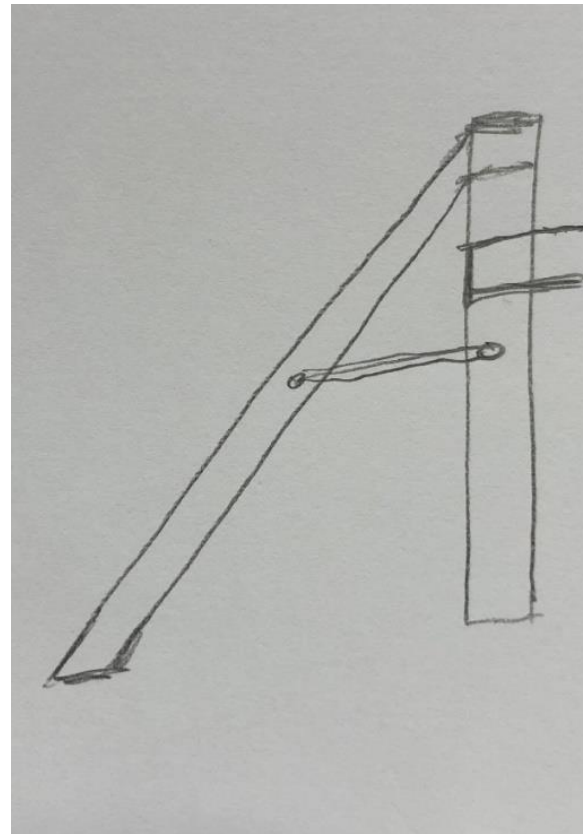
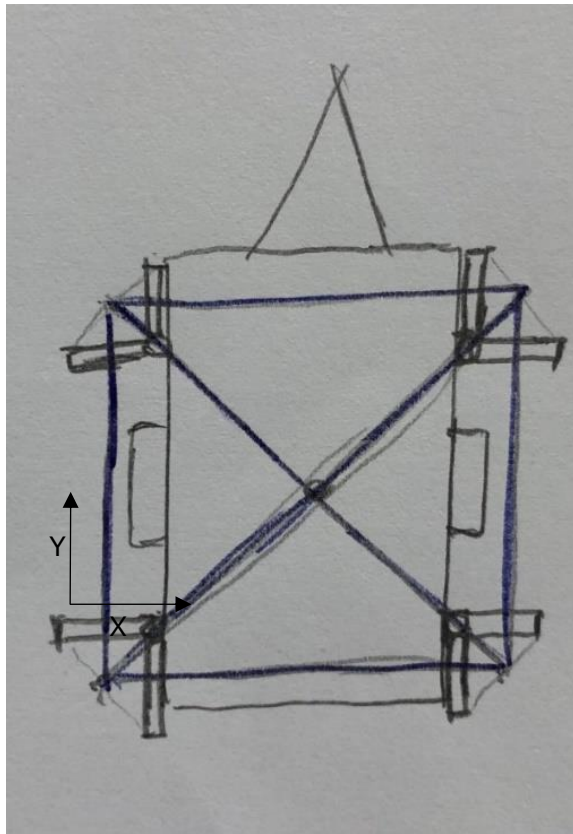
Joonis 5. Võrhaarse kolmnurga kujulise tugijalgade lahenduse eskiis



Joonis 6. Ruudu kujulise tugijalgade lahenduse eskiis

Selline lahendus saavutatakse jalgadega, mille eskiis on toodud Joonis 7. Lahendusel on neli tugijalga, mis on kinnitatud haagise toruraami külge. Tugijalad on liigenditega lahti käivad ning need ei muuda haagise gabariitmõõtmeid lubatust laiemaks. Uue tugijala eskiislahenduse külgvaade on toodud Joonis 8.

Uutel tugijalgadel on toruraami külge kinnitatud üks vertikaalne post, mis ei toetu maapinnale. Selle posti külge kinnitatakse liigenditega külgmised postid, mis toetuvad maapinnale nurga all. Jalgadele nurga lisamine aitab vähendada külgsuunalist läbipainet tugijalas. Kuna peamine droonitõrje seadme poolt tekitatav moment mõjub ümber vertikaaltelje ehk just nimelt külgsuunas, siis on vaja stabiilsuse tõstmiseks vähendada külgsuunalist läbipainet.



Joonis 7. Laialikäivate tugijalgadega Joonis 8. Uue tugijala eskiisi külgvaade lahenduse eskiis

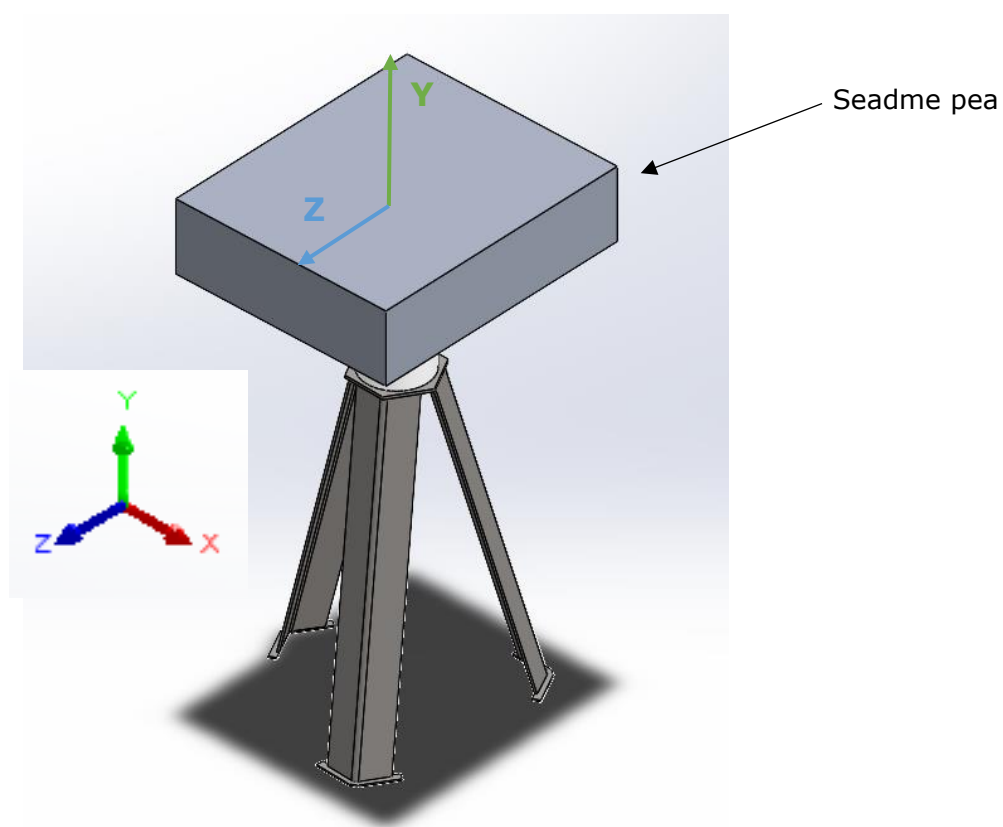
4. OLEMASOLEVA LAHENDUSE ANALÜÜS

Enne uute jalgade projekteerimist koostatakse olemasolevate tugijalgade analüüs. Seda võrreldakse hiljem uue lahenduse tulemustega. Olemasoleva ja uue lahenduse analüüs tehakse *Solidworks* tarkvaraga. Analüüsi koostamiseks määratakse esmalt rajatingimused, mis sisaldab koostule mõjuvate jõudude arvutamist ning kinnituste tüüpe. LEM arvutuse tulemustes analüüsitakse tekkinud pingeid ja deformatsiooni.

4.1 Rajatingimused

4.1.1 Mõjuvad jõud ja momendid

Järgnevalt on esitatud tekkiva momendi arvutused, mis sisestatakse rajatingimusena *Solidworks* programmis analüüsitavale süsteemile. Pöördemoment tekib droonitõrje seadme pea pöörlemisel ümber y- ja z-telgedega. Seadme pea koos telgedega on esitatud Joonis 9. Seadme pea on modelleeritud risttahukana, kuna konfidentsiaalsuse tõttu ei soovi ettevõtte näidata seadme reaalselt kuju ega selle osasid.



Joonis 9. Droonitõrje seade

Pöördemomendi arvutamiseks on kasutatud järgnevaid lähteandmeid, mis on antud seadme valmistaja poolt:

- Seadme pea mass koos kaamerate ja kinnitustega $m = 46\text{kg}$;
- Optika moodulite (sh kinnitus ja häälestussüsteemid) $m = 11\text{ kg}$;
- Maksimaalne pöörlemiskiirus $\omega = 3 \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$;
- Kiiruse muutus 0...100% $\Delta t = 0,3\text{ s}$.

Selliseks kiiruse muutmiseks vajalik nurkkiirendus on arvutatud järgneva valemiga [21]:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

kus:

α – nurkkiirendus;

$\Delta\omega$ – pöörlemiskiiruse muutus;

Δt – kiiruse muutuseks kuluv aeg.

Arvutatud droonitõrje seadme nurkkiirendus:

$$\alpha = \frac{3 \pi \text{ rad/s}}{0,3 \text{ s}} = 10 \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Selleks, et seadmele anda leitud nurkkiirendus α , on vaja pöördemomenti, mis arvutatakse järgneva valemiga [21]:

$$M = I * \alpha$$

kus:

M – pöördemoment;

I – keha massimoment ümber telje;

α – nurkkiirendus.

Ümber y-telje pöörlemisel pöörleb kogu seadme pea ehk kaamera koos kahe optikamooduliga, mille mass on kokku $m = 68\text{kg}$. Ümber z-telje pöörlemisel liigub ainult pealmine kaameratega osa ilma optika mooduliteta ehk mass $m = 46\text{kg}$. Droonitõrje seadme pea massimomendid on saadud seadme tootjalt. Keha massimomendid ümber telgede on:

$$I_y = 7,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$I_z = 2,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

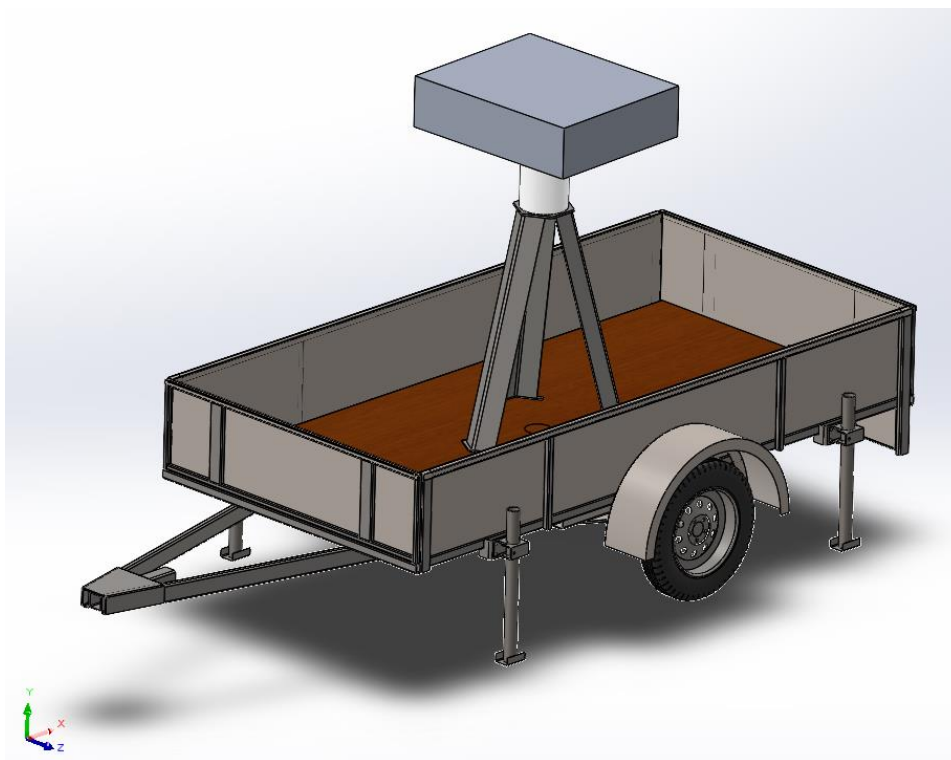
Kuna seade pöörleb ümber oma y- ja z-telje, siis arvutati pöördemomendid ümber nende telgede.

$$M_y = 7,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 * 10 \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 223,0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_z = 2,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 * 10 \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 62,8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

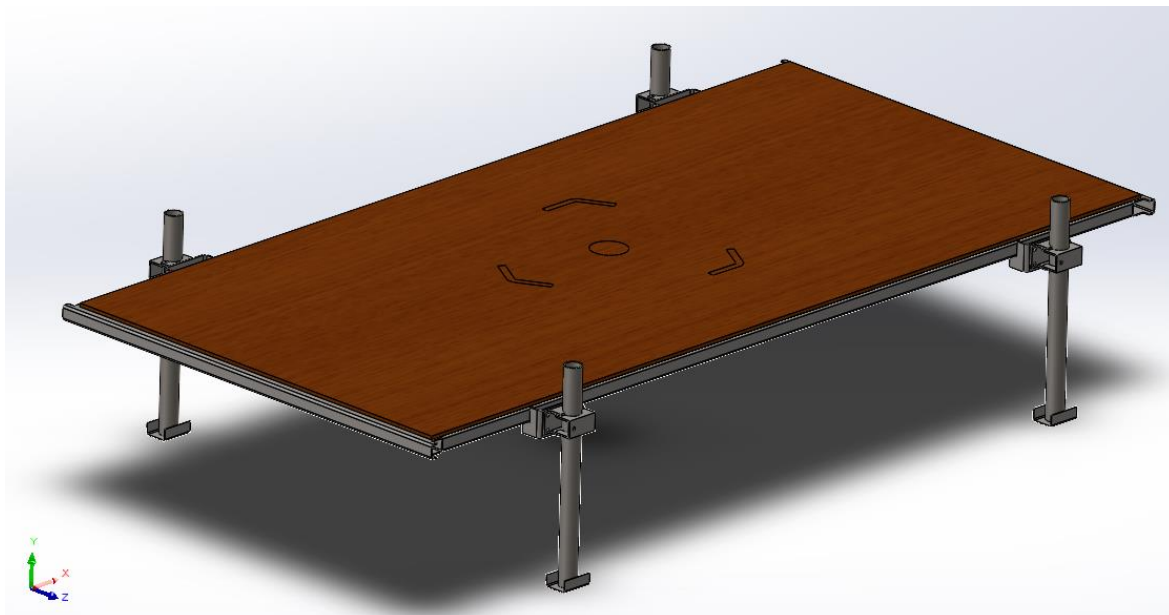
4.1.2 Kandekonstruksiooni analüüsitavad osad

Solidworks programmis koostatud kandekonstruksiooni mudel on esitatud Joonis 10.



Joonis 10. Olemasolev kandekonstruksioon.

LEM arvutuste koostamiseks on vaja mudelit lihtsustada, et vähendada arvutuse mahukust ning suurendada selle täpsust. Mudelist kaotatakse ära kõik arvutuse jaoks ebavajalikud osad, mis ei mõjuta haagise jäikust ning seeläbi liikuva seadme poolt tekitatava momendi mõju tugijalgadele. Lihtsustatud mudel on toodud Joonis 11.



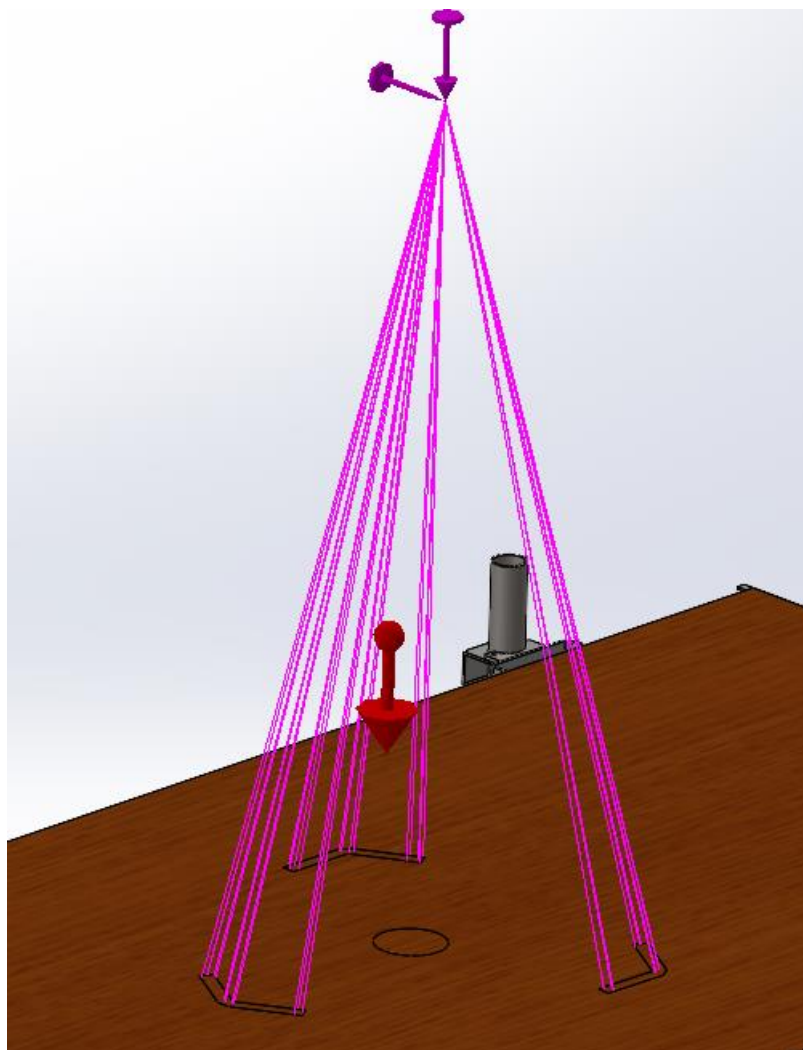
Joonis 11. Kandekonstruksiooni lihtsustatud mudel

Lihtsustatud mudelis on jäetud alles vaid haagise toruraam ning alusplaat, mis suurendavad konstruktsiooni jäikust. Toruraami külge on kinnitatud olemasolevad tugijalad, milles tekkivaid jõude ja deformatsioone tahetakse analüüsi käigus leida. Mudelist on eemaldatud ka droonitõrje seadme pea ning seadme liikumisest tekkiv moment on lisatud kasutades *Remote Load* funktsiooni. Funktsioonis määratakse globaalsete koordinaatidega mõjuva koormuse asukoht ning mõjuvad jõud ning momendid. Funktsiooni sisestatud väärtused on toodud Joonis 12.

Connection Type: Rigid
Location:
X = 1,400 mm
Y = 2,920 mm
Z = 2,840 mm
Translational Components:
Y = -666.85219998 N
Rotational Components:
Y = -223 N.m
Z = -62.8 N.m

Joonis 12. Funktsiooni *Remote Load* parameetrid

Koormus on pandud mõjuma haagise alusplaadil olevatele kolmjala kinnituspindadele. Seadme kolmjala kinnituspinnad on loodud kasutades funktsiooni *Split Line*. Lisaks droonitõrje seadme liikumise poolt tekitatavale koormusele on tervele kandekonstruktsioonile lisatud mõjuma gravitatsioonijõud. Mudelile mõjuvad jõud on näidatud Joonis 13.



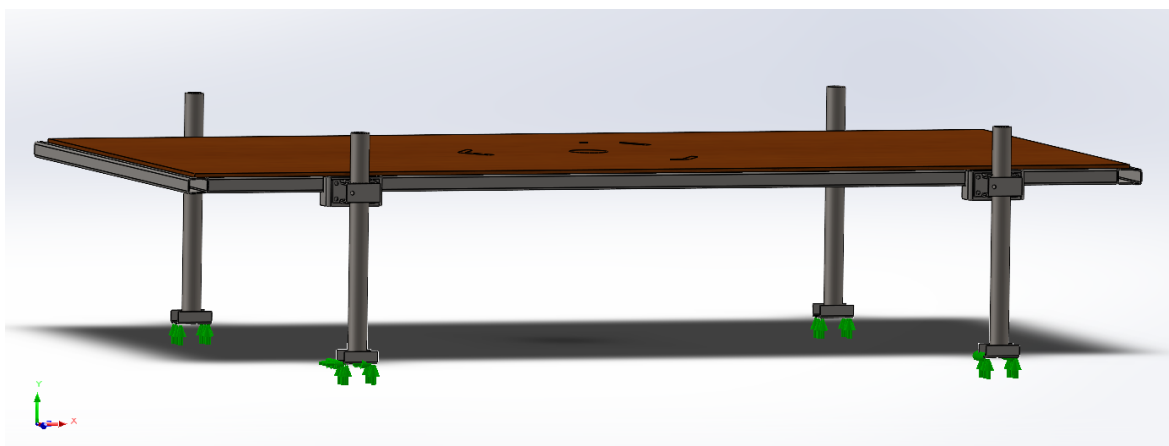
Joonis 13. Kandekonstruktsioonile mõjuvad jõud ja momendid

4.1.3 Kinnituste tüübid

Lisaks mõjuvatele jõududele on arvutustes vaja määrata konstruktsiooni erinevate detailide omavahelised ühendused ning kogu koostu kinnitused ehk *Fixtures*. Konstruktsiooni detailid on omavahel ühendatud kasutades funktsioone *Contact Set* ja *Component Contact*. Haagise toruraami osad on oma vahel seotud keevisliitega. Keevisliidet on kasutatud ka tugijalgade detailide vahel, mis realselt omavahel kokku

on keevitatud. Kiirkinnitusega klambri kohas on määratud jala ja klambri vahele seos „bonded“. „Bonded“ kontakt on määratud ka alusplaadi ning toruraami vahele.

Kogu koostule on määratud mõjuma neli *Slider* tüüpi kinnitust. Seda tüüpi kinnitusega võeti konstruktsioonilt ära y-telje sihiline liikumine. Algselt tehti rajatingimuste sisestamisel viga ning kasutati kinnitustüüpi *Fixed*, mis kaotab ära vabadusastmed kõigis kolmes teljes. Sellisel juhul ei saa aga tekkida jalgade kõikumist ning liikumist, mis reaalses olukorras kindlasti tekib. Teatud juhtudel võib reaalses olukorras toimuda jalgade libisemine maapinnal ning samuti on võimalik tugijala talla pööre pinnase pehmuse tõttu. Kahjuks ei ole aga täpselt selliseid tingimusi võimalik antud mudelis luua. Kuid tähelepanu tuleb veel pöörata sellele, et ainult y-telje sihilise liikumise tõkestamisel tekib mudelis jäiga keha liikumine ning seeläbi tekiks haagise pöörlemine ümber y-telje. Selle vältimiseks tõkestati ühel eesmisel jalal lisaks y-teljele ka x-telje sihiline liikumine ning ühel tagumisel jalal lisaks z-telje sihiline liikumine. Lisatud kinnitused on näidatud Joonis 14.



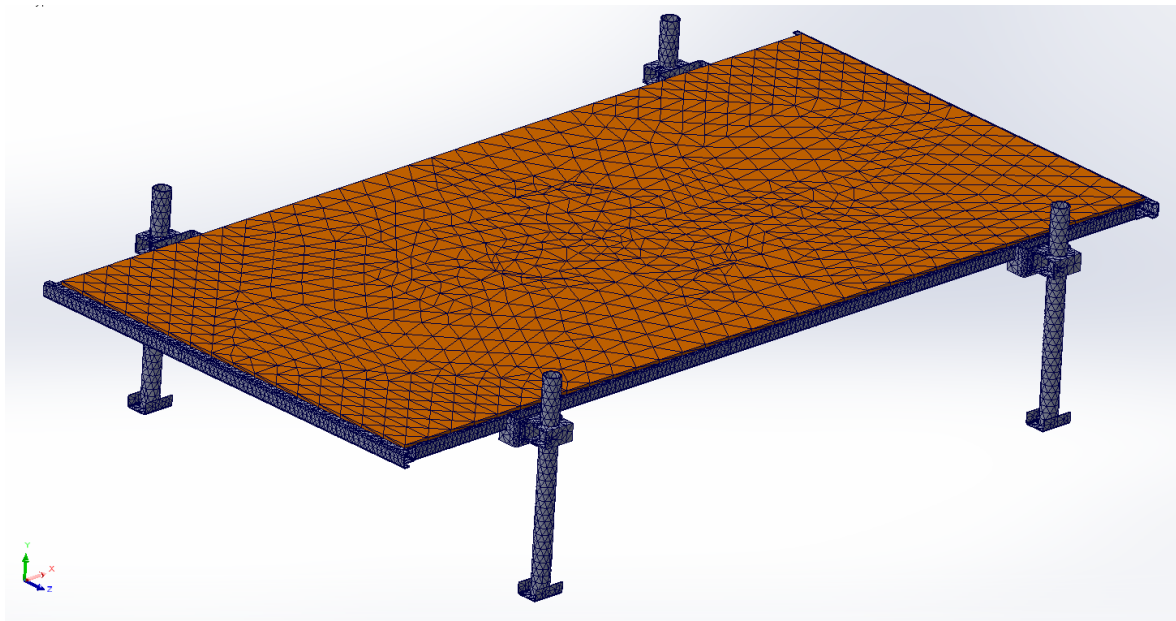
Joonis 14. Konstruktsioonile lisatud kinnitused

4.1.4 Materjali ja võrgu valik

Viimaste asjadena enne arvutuse läbi viimist on vaja määrata kõikide komponentide materjalid ning koostada detailidele lõplikke elementide võrk ehk määrati programmis *Mesh* parameetrid.

Haagise toruraam ning tugijalad on valmistatud konstruktsiooni terasest S235 ning alusplaadi materjaliks on määratud vineer. Võrgu genereerimisel on kasutatud kõige peenemat võrgusilma. Võttes arvesse erinevate detailide ja nende osade kumeruspindasid ja kõverusraadiust, kasutatakse *Mesh* funktsiooni parameetrite sisestamisel *Curvature-based mesh* valikut. Kõige suuremate võrguelementide suurus

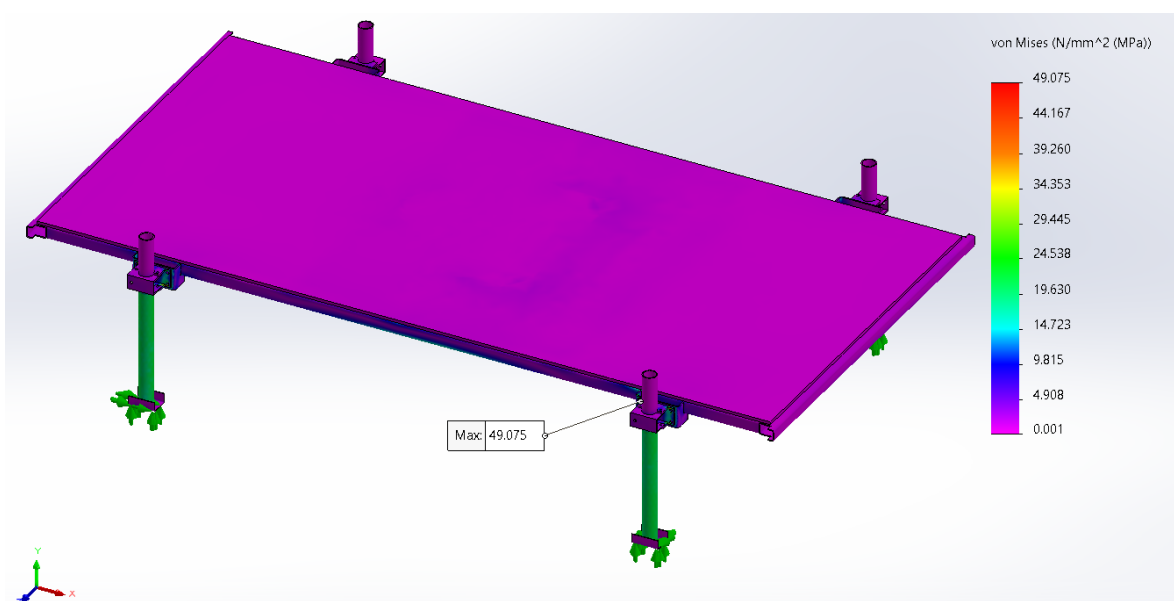
on 65 mm ja suuremat täpsust vajavate avade ning väiksemate detailide puhul on võrgu suurus 13 mm. Genereeritud võrk on toodud Joonis 15.



Joonis 15. Genereeritud võrk

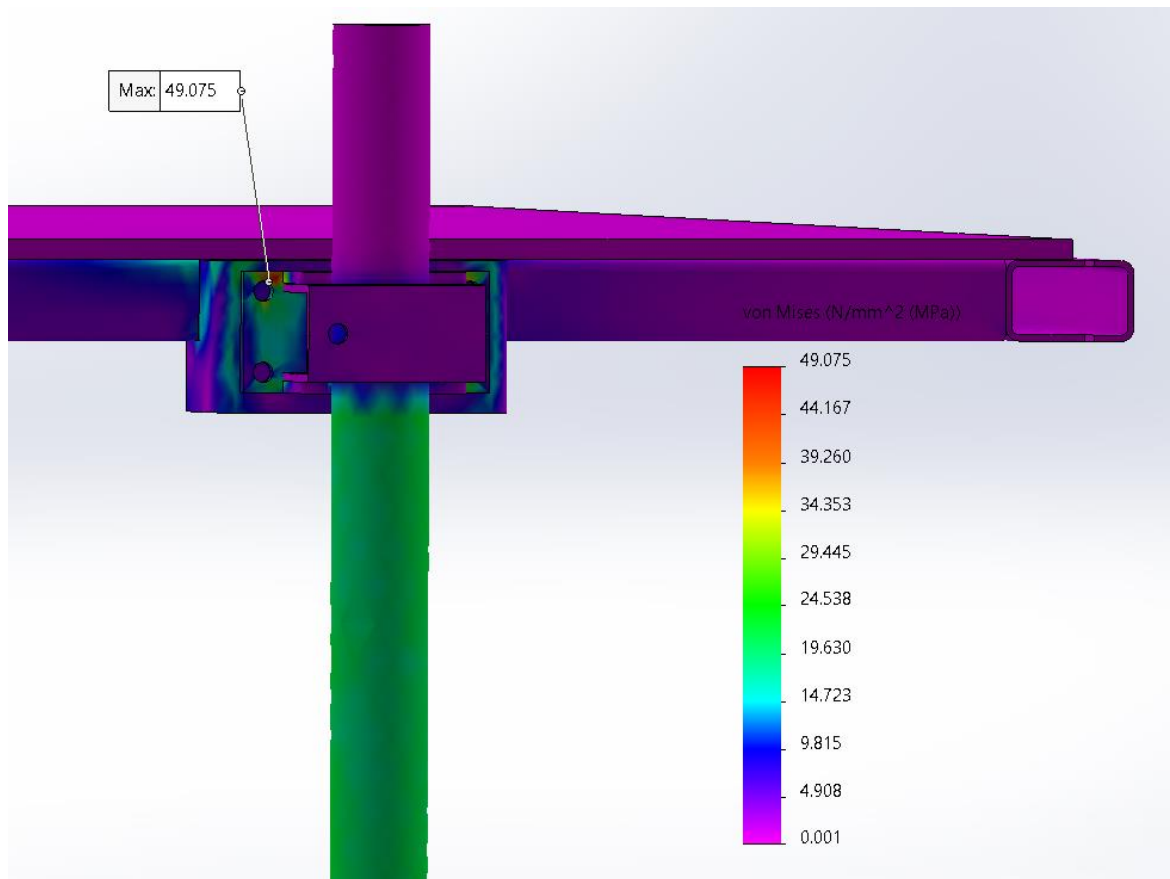
4.2 Arvutuse tulemused

Arvutuse tulemustest tuuakse välja tekkivad pinged ja deformatsioonid. Joonis 16 on näidatud kandekonstruktsioonis tekkiv pinge.



Joonis 16. Kandekonstruktsioonis tekkivad pinged

Suurim tekkinud pinge on ligikaudu 49 MPa, mis tekib tugijala kinnitusklambri poltliite ava juurde. Suurendatud vaade maksimaalse pinge asukohast on toodud Joonis 17.



Joonis 17. Maksimaalne tekkiv pinge

Tekkinud maksimaalne pinge on lubatud piirides ega ületa materjali voolepiiri. Varutegur arvutatakse järgneva valemiga [21].

$$S = \frac{\sigma_y}{\tau_{max}}$$

kus:

S – tegelik varutegur;

σ_y – materjali voolepiir;

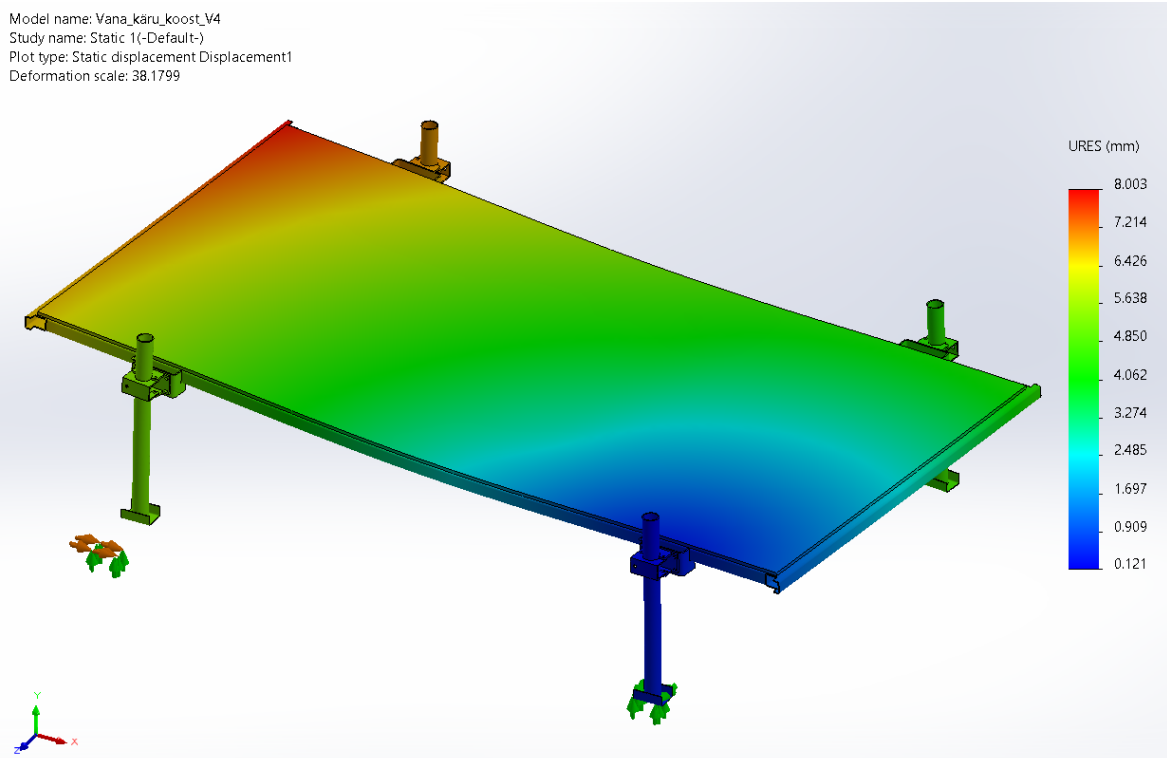
τ_{max} – tegelik maksimaalne pinge.

Tegelik varutegur tuleb järgnev:

$$S = \frac{235 \text{ MPa}}{49 \text{ MPa}} \approx 4,8$$

Tehtud arvutus ja varuteguri hinnang näitab, et konstruktsioonis tekkivad pinged ei ole probleemiks.

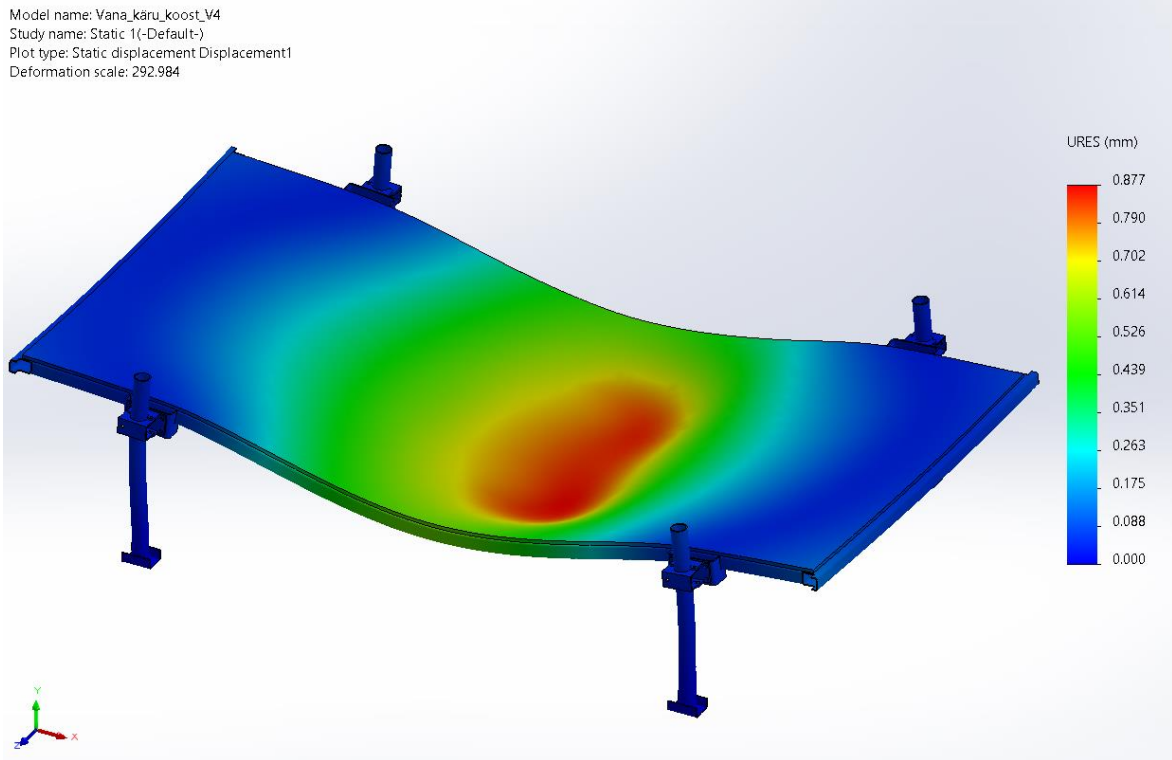
Olulisem on aga vaadata tekkivaid deformatsioone, sest tekkivad nihked on konstruktsiooni stabiilsuse seisuskohast kõige olulisem aspekt. Joonis 18 on näidatud vanade tugijalgadega tekkivad deformatsioonid. Suurim tekkiv nihe on ligikaudu 8 mm. Arvutusest on näha, et tekkinud deformatsioonid ei ole sümmeetrilised. Arvutuste tulemustest genereeriti animeeriv video, mille abil uuriti, kuidas konstruktsioon deformeeruma hakkab. Videost oli näha, kuidas jalgadel tekkisid erinevad libisemised, mis tuleneb peatükis 4.1.3 kirjeldatud kinnituste määramisest. Jalad, millel ei ole tõkestatud liikumine x- ja/või z-telje sihis, said libiseda mõlemas suunas. Jalad, millel on tõkestatud liikumine ka mõnes teises suunas, libisevad selle võrra vähem. Parema pildi saamiseks muudeti rajatingimusi ning prooviti läbi kombinatsioone, kus erinevatel jalgadel tõkestati veel liikumissuundasid peale y-telje sihi ning saadud tulemusi võrreldi omavahel. Kõikidel juhtudel olid tulemused sarnased ning ei erinenud rohkem kui 15% võrra.



Joonis 18. Konstruktsioonis tekkivad deformatsioonid võimendatud skaalal

Võrdluseks on ka toodud tekkinud deformatsioonid, kui kõik jalad määrata *Fixed* ehk tõkestatakse jalgade liikumine kõigis kolmes suunas (vt Joonis 19). Sellisel juhul on

näha, et tekib ainult paine alusplaadis, mis vähesel määral mõjutab ka ülejäänud konstruktsiooni. Enam ei teki mitte ühegi jalal libisemist ega pööret maapinnal. Nagu on eelnevalt kirjeldatud, siis ei ole see aga reaalsele olukorrale vastav. Päriselt on jalgade liikumine tõkestamata ning sõltuvalt täpsest maapinnast ja selle omadustest, saab tekkida ka jalgade libisemist ja pööret maapinnal.



Joonis 19. Konstruktsioonis tekkivad deformatsioonid jalgade fikseerimisel

5. UUTE TUGIJALGADE PROJEKTEERIMINE

5.1 Ülesande püstitus

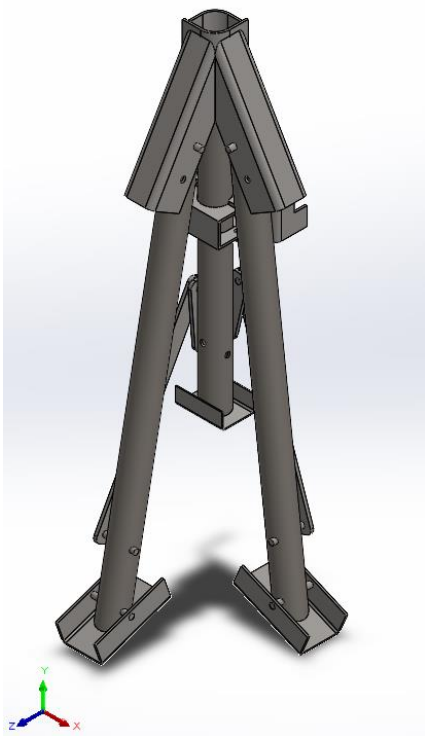
Droonitõrjeseadme kandekonstruksiooni tugijala projekteerimise ülesandes tuleb läbida järgnevad etapid:

1. Struktuurimudeli modelleerimine;
2. Kinemaatika modelleerimine;
3. Tugijala osade modelleerimine;
4. LEM arvutus;
5. Tulemuste esitamine ja kontroll.

5.2 Lähteülesande kinemaatika analüüs

Lähteandmete põhjal modelleeriti struktuuri geomeetria. Analüüsitava koost on droonitõrje seadme kandekonstruksiooni uus tugijalg. Tugijala peamine post peab liikuma vertikaaltelje sihis nii palju, et sellega oleks võimalik tõsta üles haagis, mis ei toetuks enam ratastele ja lehtvedrustusele. Selle tagamiseks on vaja haagist tõsta vähemalt 100 mm, mis tagab, et konstruktsioon ei toetu enam ratastele vaid ainult tugijalgadele. Tugijala külgmised postid peavad toetuma maapinnale nurga all. Külgmised postid on tugijala peamise postiga ühendatud liigenditega. See võimaldab transpordi asendis lükata tugijalad kinnisesse asendisse (vt Joonis 20) ning tööasendis tõmmata külgmised jalad laiali (vt Joonis 21), et suurendada toetuspinda ning panna jalad tööle nurga all.

Selleks, et toota vähem detaile ning et uut süsteemi oleks lihtsam integreerida olemasoleva lahendusega, kasutati uue struktuuri geomeetria modelleerimisel ära kõik olemasoleva tugijala komponendid. Tugijala kinnitus haagise toruraami külge on jäetud samaks. Samuti kasutatakse olemasolevat tugijala kõrguse muutmise ja fikseerimise süsteemi. Vana tugijala posti kasutatakse uue jala peamise postina, mille külge kinnitatakse liigenditega külgmised jalad.



Joonis 20. Struktuuri geomeetria avatud asendis
 Joonis 21. Struktuuri geomeetria kinnises asendis

5.2.1 Grubleri arv

Uue tugijala koostu analüüsimisel on vaja läbi mõelda kasutatavate liigendite tüübid. Kuna vana tugijalg jäetakse süsteemi sellisena nagu ta on, siis selle liigendeid antud analüüsis ei vaadata. Samuti on mõlemad külgmised jalad koos oma kinnitustega identsed, seega võetakse vabadusastmete hindamiseks ette ainult üks külgmise jalg ning valitud liigendi tüüpe rakendatakse mõlema jala jaoks.

Külgmise jala struktuur koosneb 6 detailist ehk vabadusastmete summa on näidatud järgnevas arvutuses:

$$M = 6 * 6 = 36$$

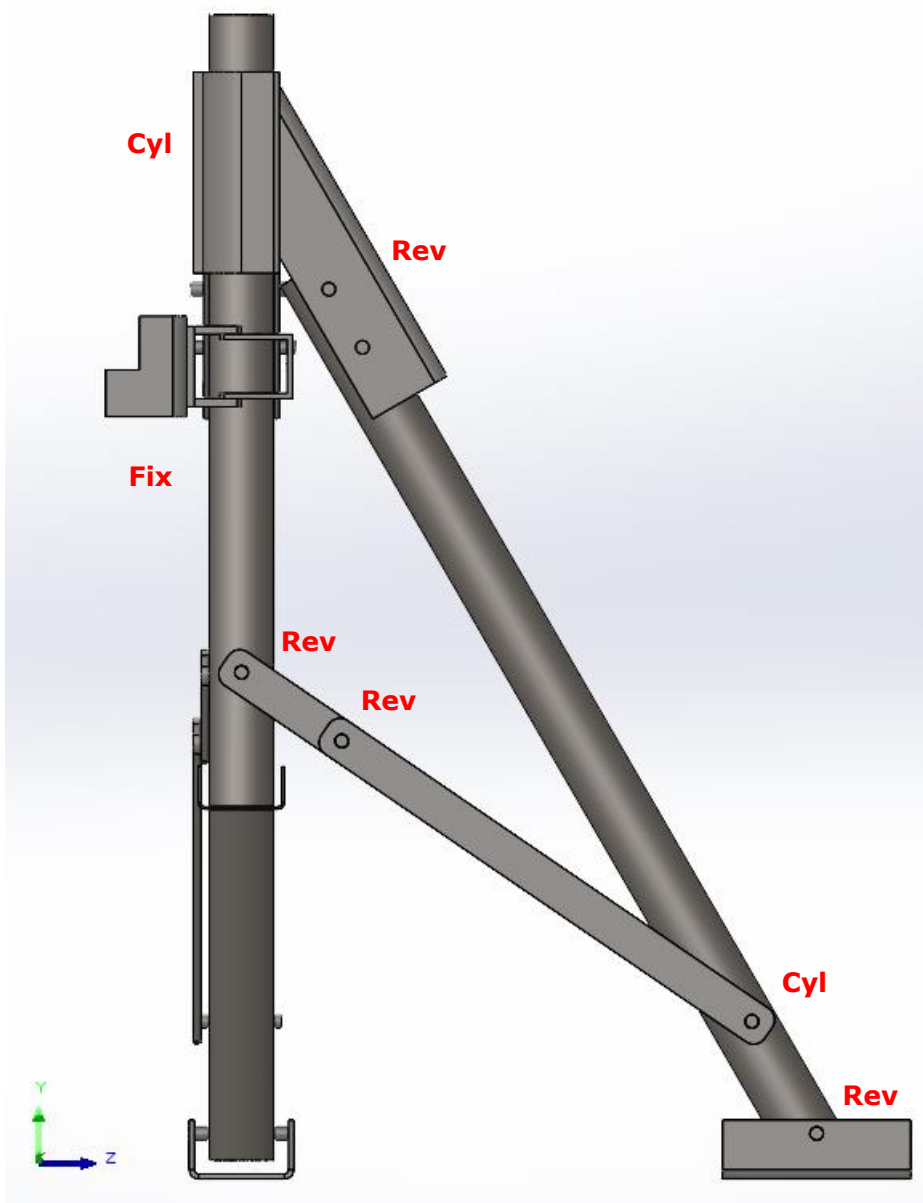
kus M – struktuuri vabadusastmete arv.

Struktuuri on võetud ka peamine post, kuid on arvestatud, et tööasendis peab see olema fikseeritud. Seega on sellelt detaililt võetud ära kõik kuus vabadusastet, kuigi kiirkinnitusega klambri abil on võimalik seda avada ja liigutada üles-alla. Külgmise jala struktuuris arvestatakse kahe liikumisega: külgmise posti avatud asendisse viimine ja tugijala talla pöörlemine ümber ühe telje.

Grubler'i arvu arvutus on näidatud Tabel 9.

Tabel 9. Lähteülesande Grubler'i arvu arvutus

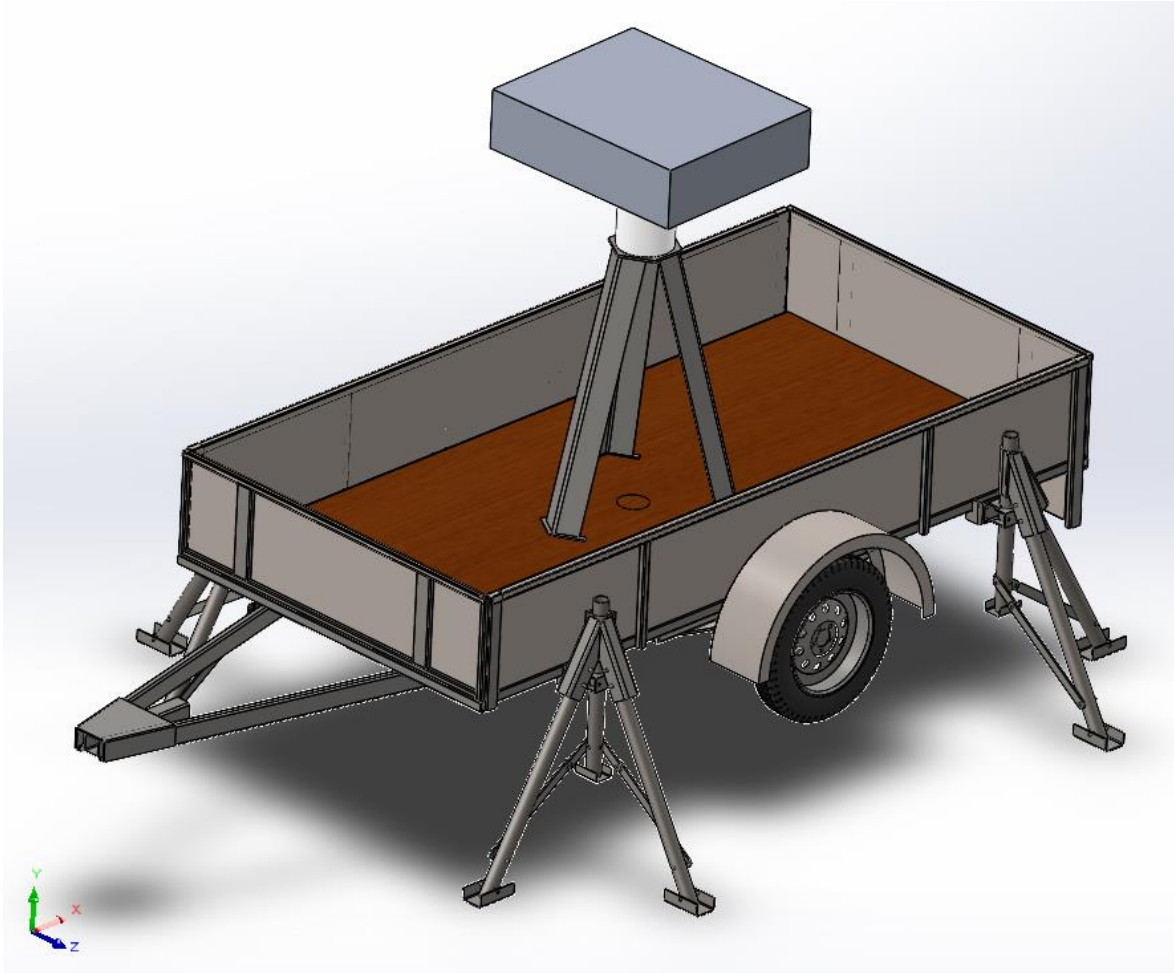
Liigendi tüüp	Liigendite arv	Liigendi DOF	DOF kokku
M	6	6	36
<i>Fixed</i>	1	-6	-6
<i>Cylindrical</i>	2	-4	-8
<i>Revolute</i>	4	-5	-20
<i>Motion</i>	5	-1	-2
Järele jäänud DOF			0



Joonis 22. Konstruktsiooni sõlmed

5.3 Projekteeritava struktuuri 3D mudel

Projekteeritavast struktuurist tehti *Solidworks* tarkvaraga 3D mudel. Koostu keskkonnas lisati haagisele uued tugijalad ning uut mudelit kasutatakse LEM arvutuste koostamisel. Uue kandekonstruktsiooni mudel on näidatud Joonis 23.



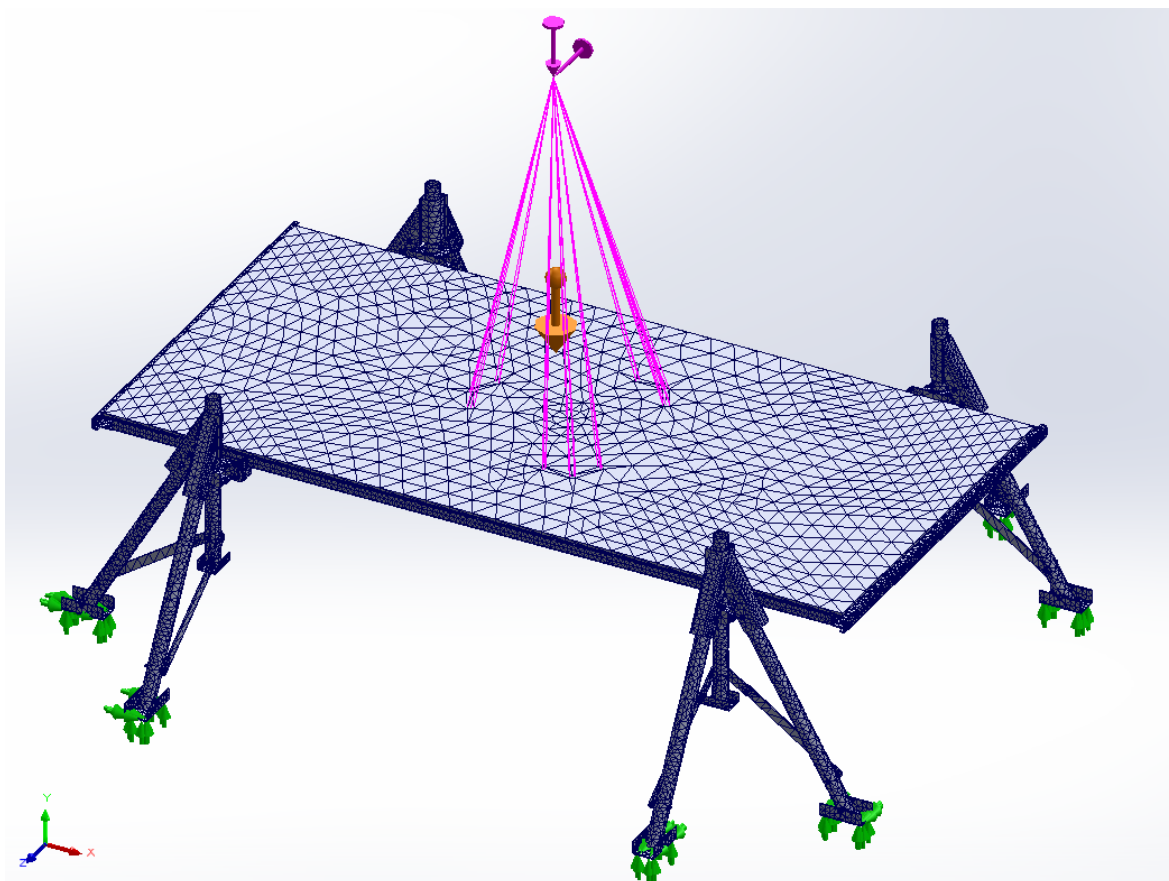
Joonis 23. Uue kandekonstruktsiooni mudel

5.4 LEM arvutused

LEM arvutuste koostamisel alustati samuti rajatingimuste määramisest nagu olemasoleva lahenduse analüüsi puhul. Süsteemis mõjuvad jõud on täpselt samad, mis enne. Toruraami ja alusplaadi ühendamiseks on kasutatud samu kinnitustüüpe, mis enne ja ka tugijala kinnitusklamber on toruraami külge kinnitatud keevisliitega. Külgmise jala ühendustes on kasutatud *Pin* tüüpi sõrmliteid. *Pin* tüüpi ühenduse kasutamisel on keelatud tihvti liikumine, kuna kasutatakse splinti. Vabaks on jäetud

tihvti pöörlemine. Peale kinnituste määramise tehti mudelis sarnased lihtsustused ja eemaldati ebavajalikud osad ning kasutatud materjalid on teras ja vineer.

Võrgu genereerimisel kasutati kõige peenemat võrgusilma ning *Curvature-based mesh* valikut. Kõige suuremate võrguelementide suurus on 75 mm ja suuremat täpsust vajavate avade ning väiksemate detailide puhul on võrgu suurus 15 mm. Genereeritud võrk koos määratud rajatingimustega on toodud Joonis 24.



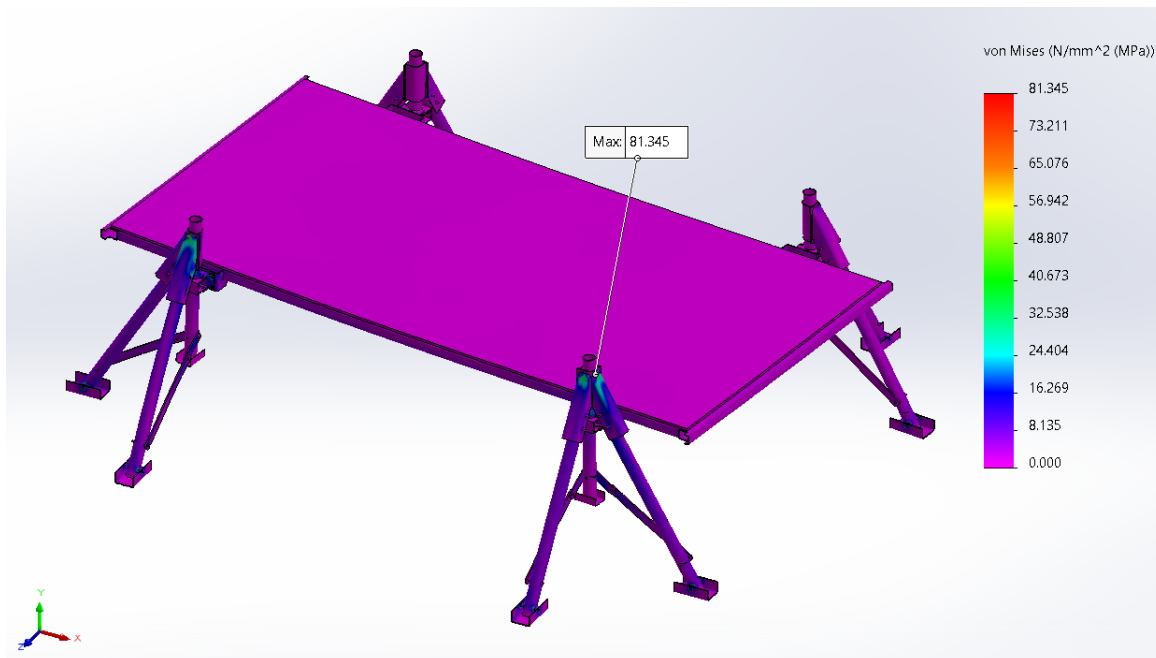
Joonis 24. Genereeritud võrk ja määratud rajatingimused

5.5 Tulemuste analüüs

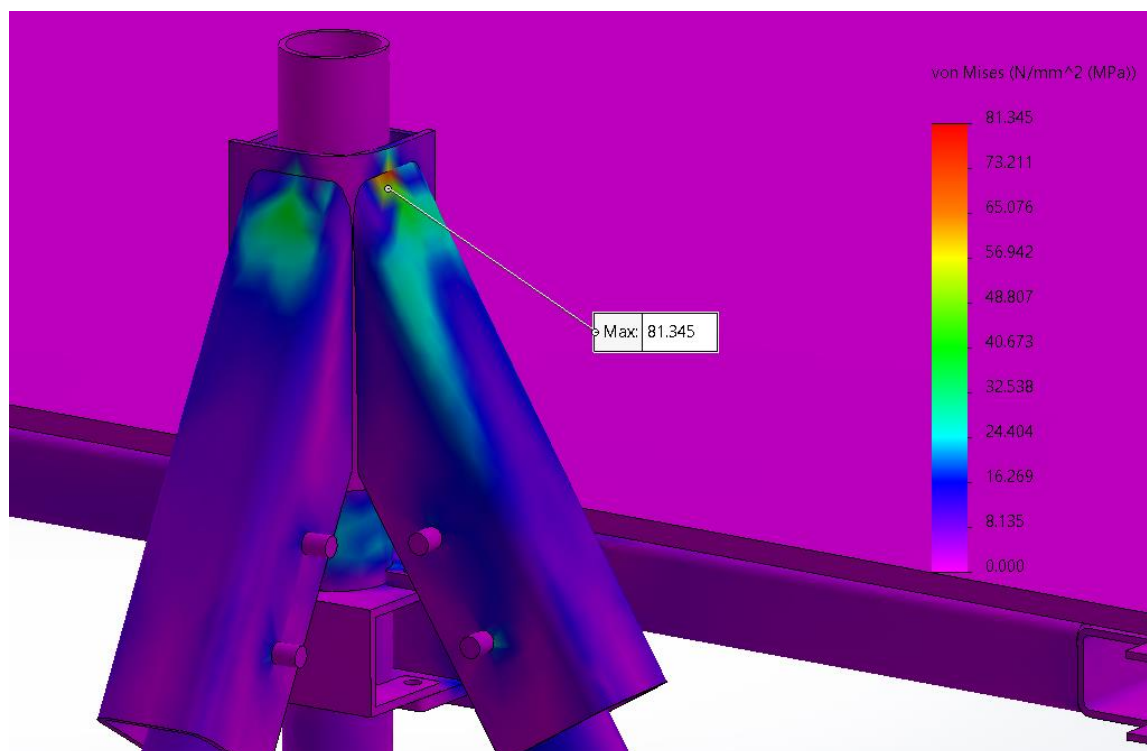
Arvutuse tulemustest tuuakse välja tekkivad pinged ja deformatsioonid. Joonis 25 on näidatud kandekonstruktsioonis tekkiv pinge.

Suurim tekkinud pinge on ligikaudu 81 MPa, mis tekib tugijala külgmise posti ülemises ühenduskohas. Kuna antud kohas on nurga all lõigatud nelikanttoru, siis on realistlik, et arvutuse tulemused näitavad pinge kontsentreerumist teravale lõikekohale. Suuremad pinged tekivad ka liikuva talla ja külgmise posti ühenduskohas. See on samuti realistlik,

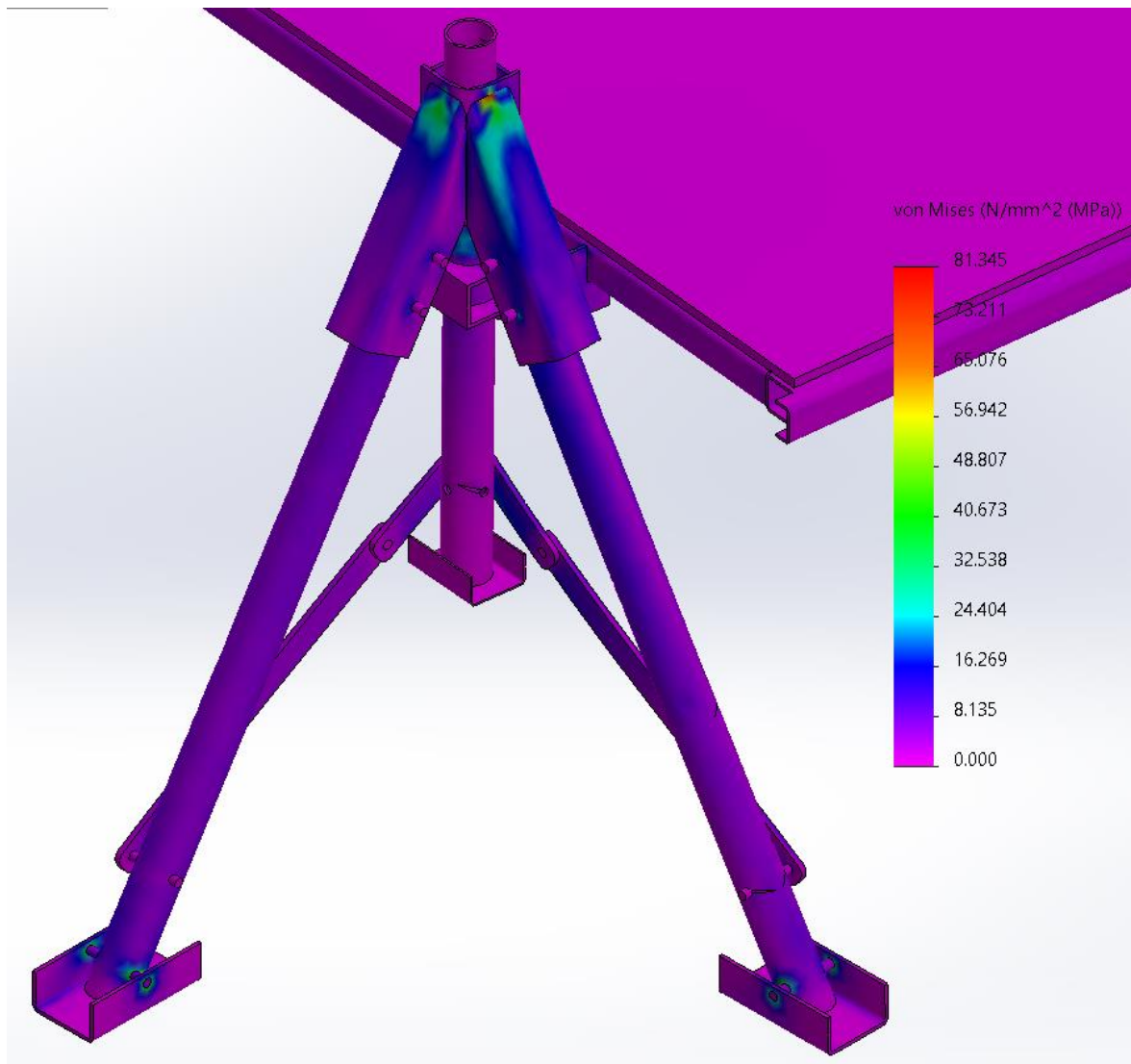
sest peamine raskuse toetumine jääbki sellele kohale. Suurendatud vaade maksimaalse pinge asukohast on toodud Joonis 26. Vaade ühes tugijalas tekkivatest pingetest on toodud Joonis 27.



Joonis 25. Kandekonstruktsioonis tekkivad pinged



Joonis 26. Maksimaalne tekkiv pinge



Joonis 27. Ühes tugijalas tekkivad pinged

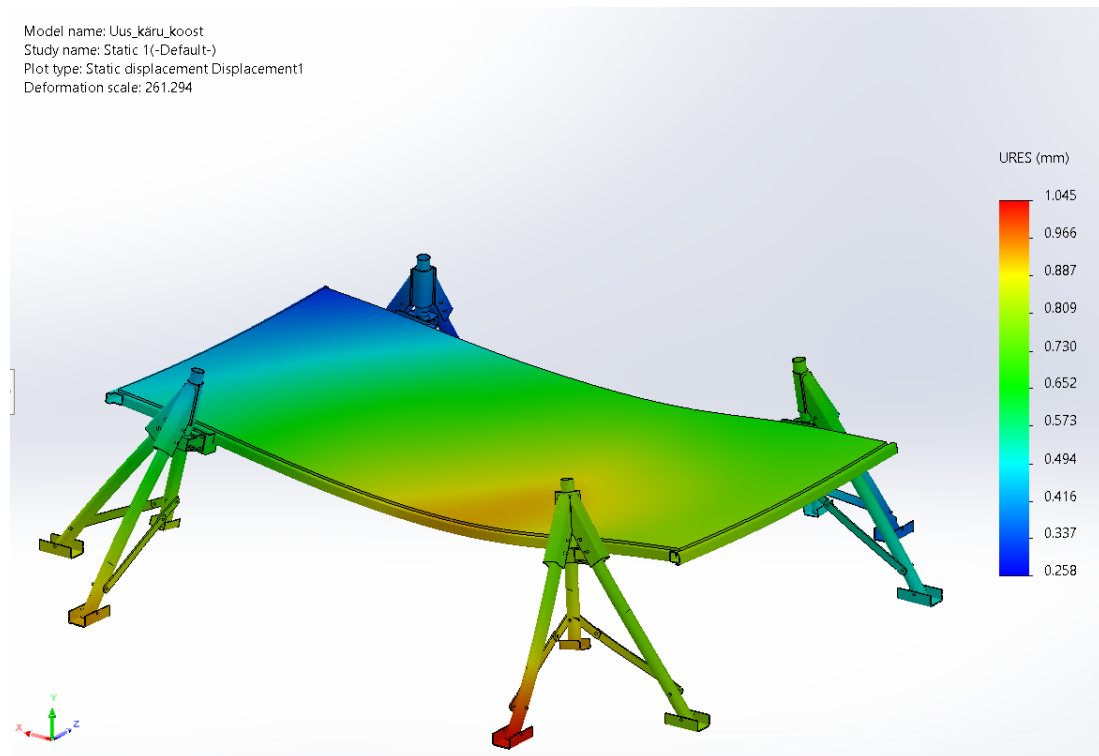
Uue lahenduse puhul on konstruktsioonis tekkiv maksimaalne pinge kolm korda suurem võrreldes olemasoleva lahendusega. Kuid võrreldes materjali voolepiiriga on see endiselt lubatud piirides. Tegelik varutegur tuleb järgnev:

$$S = \frac{235 \text{ MPa}}{81.3 \text{ MPa}} \approx 2,9$$

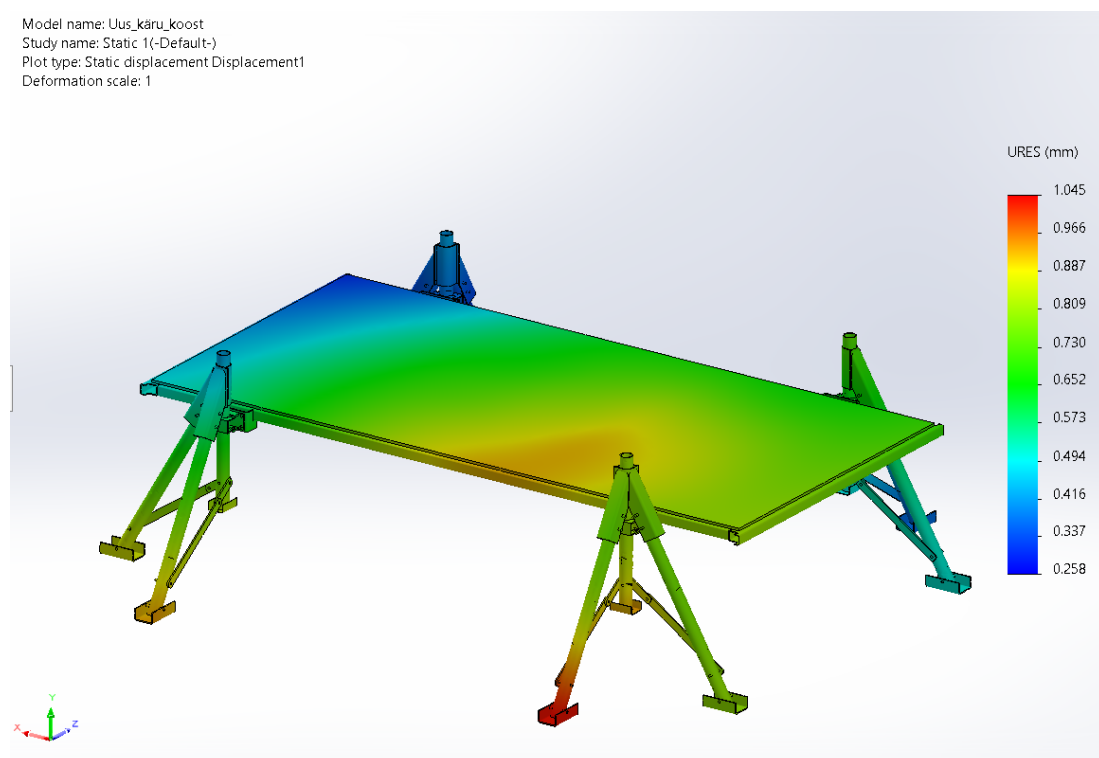
Selline varutegur vastab mehaanikainseneri käsiraamatus toodud dünaamiliste koormusjuhtude ja sitketest materjalidest (nt teras) detailide projekteerimisel esitatavale ohuteguri nõudele [22]. Sellest võib järeldada, et ka uute tugijalgade puhul ei ole tekkivad pinged probleemiks.

Joonis 28 on näidatud võimendatud skaalal uute tugijalgadega tekkivad deformatsioonid. Maksimaalne nihe on 1 mm, mis näitab, et tegemist on stabiilsema

lahendusega, kui praegu kasutusel olev tugijalgade süsteem. Deformatsioonide võimendatud skaala näitab, millistes suundades tekivad jalgade läbipainded.

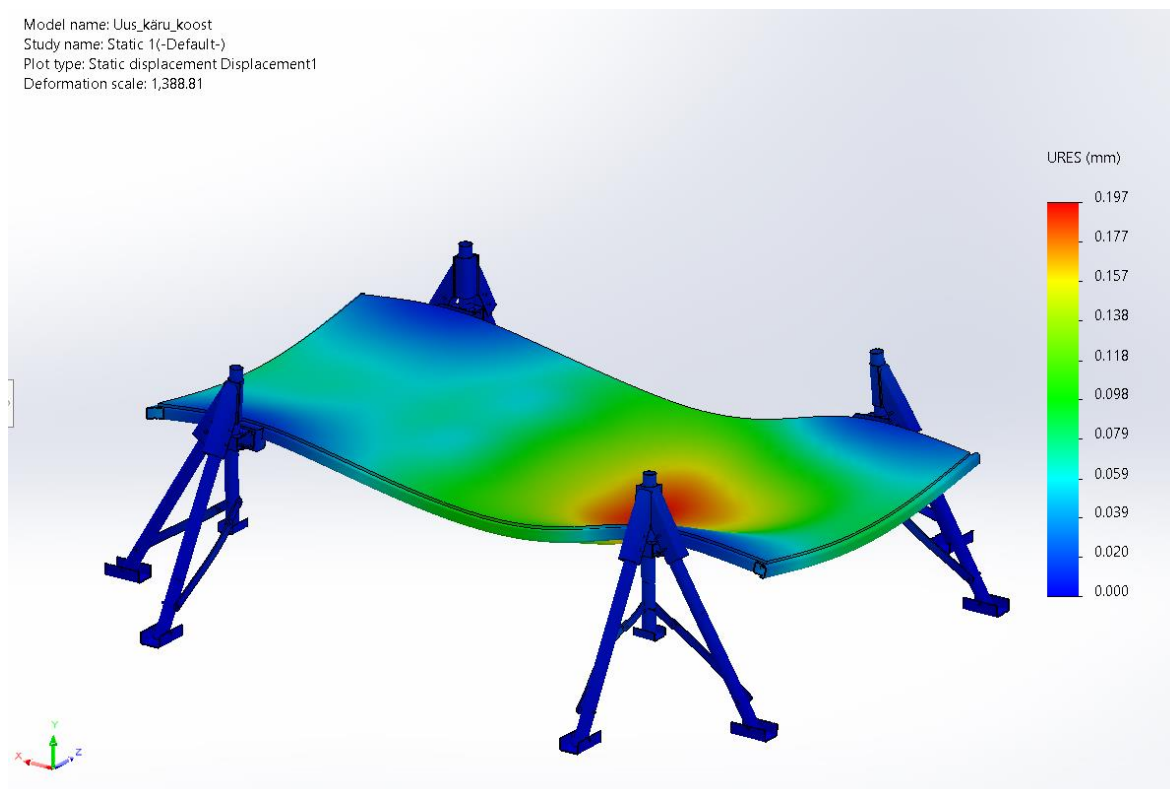


Joonis 28. Konstruktsioonis tekkivad deformatsioonid võimendatud skaalal



Joonis 29. Konstruktsioonis tekkivad deformatsioonid tegelikul võimendamata skaalal

Deformatsioonide arvutuse tulemuste hindamiseks kasutati sama põhimõtet, mis olemasoleva lahenduse juures. Animeerivast videost vaadati, kuidas deformatsioonid tekivad ning prooviti läbi erinevate liikumissuundade tõkestamist. Kõik arvutused näitasid ligikaudu 1 mm suurust tekkivat nihet. Läbi arvutati ka olukord, kus kõik jalad on fikseeritud. Sarnaselt olemasoleva lahendusega tekkis sellisel juhul paine ainult alusplaadis (vt Joonis 30).



Joonis 30. Konstruktsioonis tekkivad deformatsioonid jalgade fikseerimisel

5.6 Arvutuste tulemused

Arvutuse tulemused näitavad, et uus lahendus on sobiv ning vastab nõuetele. Konstruktsioonis tekkivad pinged on lubatud piirides ning samuti on varutegur piisav. Arvutatud deformatsioonidest võib järeldada, et uued jalad suurendavad haagise stabiilsust ning vähendavad selle liikumist droonitõrje seadme töö ajal. Koostatud arvutused ei kajasta ideaalselt reaalselt olukorda, sest lisaks on suur mõju pinnasel, millele kandekonstruktsioon toetub. Küll aga saab arvutatud tulemuste võrdlemisel teha järeldusi, kas uus lahendus parandab stabiilsust võrreldes olemasoleva lahendusega.

KOKKUVÕTE

Antud magistritöös uuriti esmalt erinevaid droonitõrje kontseptsioone ning võrreldi nende eeliseid ja puuduseid. Selle tulemusena jõuti Eesti ettevõteteni Marduk Technologies, kes lahendab sama valdkonna probleemi. Selleks, et Eesti Kaitseväel oleks võimalik rakendada nende droonitõrje seadet maastikul lahingolukordades, otsiti lahendust mobiilse kandekonstruktsiooni stabiilsemaks muutmiseks ja parendamiseks.

Töö mehaanika osas analüüsiti esmalt olemasoleva lahenduse puuduseid ning seati nõuded, millele peab vastama uus projekteeritav lahendus. Töös kirjeldati, milliseid funktsioone peavad tugijalad täitma ning analüüsiti erinevaid koostu sõlmesid. Loodi eskiislahendused ja kirjeldati milliste võimalike jalgade paigutuse geomeetriatega oleks võimalik antud ülesannet lahendada. Kirjeldatud lahendustest valiti välja sobivaim, mis võeti uute jalgade projekteerimise aluseks.

Seejärel koostati *Solidworks* tarkvara kasutades mudelid haagisele, olemasolevatele jalgadele ning uute tugijalgade lahendusele. Arvutati välja droonitõrje seadme poolt tekitatavad jõud ning rakendati neid tugevusarvutustes lõplike elementide meetodil. LEM arvutuste koostamisel määrati rajatingimused ning arvutuste tulemuste põhjal analüüsiti, kas uus lahendus täidab oma eesmärgi ning sobib kandekonstruktsiooni parendamiseks.

Analüüsi tulemusena leiti, et projekteeritud uus lahendus muudab kandekonstruktsiooni stabiilsemaks ning vastab ka ettevõtte poolt püstitatud nõuetele. Uutes tugijalgades tekkinud pinged jäid lubatud piiridesse ning arvutatud varutegur tuli 2,9. Tugijalgades tekkivad deformatsioonid vähenesid uue lahendusega 8 korda, mis on seatud eesmärgist parem tulemus.

Uuele lahendusele tehtud analüüsi käigus ei hinnatud võimalikke tekkivaid resonantsisagedusi, mille hinnangu võiks tulevikus teostada. Samuti ei mahtunud magistritöö raamesse erinevate maapindade mõju hindamine ning sellest tulenevalt saab tulevikus uurida lisaks, kuidas mõjutavad erinevate omadustega aluspinnad kandekonstruktsiooni stabiilsust.

Loodud mudelite põhjal koostati kõikidele detailidele ja tervele koostule joonised, mis on toodud töö lisades.

SUMMARY

In this master's thesis, different counter-drone concepts were first studied, and their advantages and disadvantages were compared. As a result, the Estonian company Marduk Technologies was contacted, who are trying to solve a problem in the same field. For the Estonian Defence Forces to be able to use their counter-drone device on any terrain in battle situations, a solution was sought to make the mobile bearing structure more stable and superior.

In the mechanics part of the thesis, the shortcomings of the existing solution were first analysed and the requirements that the new designed solution must meet were set. The author described which functions the support legs must perform and analysed different solutions for the assembly. Sketch solutions were created, and the author described what possible leg position geometries could be used to solve this task. From the described solutions, the most suitable one was selected, which was used as the basis for the design of the new legs.

Models were then developed using Solidworks software for the trailer, the existing legs, and the new solution. The forces generated by the counter-drone device were calculated and applied in the strength calculations by the finite element method. When compiling the FEM calculations, the boundary conditions were determined and based on the results of the calculations, it was analysed whether the new solution fulfils its purpose and is suitable for improving the bearing structure.

As a result of the analysis, it was found that the designed new solution makes the bearing structure more stable and meets the requirements set by the company. The stresses in new support legs remained within the acceptable range and the calculated safety factor was 2.9. The deformations caused by the support legs were reduced by a factor of 8 with the new solution, which is a better result than the set goal.

The analysis of the new solution did not assess the possible resonant frequencies that could be estimated in the future. Also, the impact assessment of different soils did not fall within the scope of the master's thesis, and as a result, it will be possible to study in the future how substrates with different properties affect the stability of the bearing structure.

Based on the created models, drawings were prepared for all details and the whole assembly, which are presented in the appendices of the work.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Dalamagkidis, K., Valavanis, K. P., Piegl, L. A. (2012) *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Aerspace System*. Springer.
2. Bento, Maria de Fátima. (2008) *Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. InsideGNSS*.
3. Buckley, J. (1999). *Air Power in the Age of Total War*. UCL Press Limited.
4. Rothstein, A. (2015). *Drone*. Bloomsbury Publishing
5. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) – Comparing the USA, Israel, and China. *Emerj veebilehekülg*. <https://www.techemergence.com/unmanned-aerial-vehicles-uavs/>
6. Michel, A. H. (2015). How Rogue Techies Armed the Predator, Almost Stopped 9/11, and Accidentally Invented Remote War. *Wired*.
7. Standage, T. (2017). Taking Flight. *The Economist*.
8. The Top 100 Drone Companies to Watch in 2021. *UAV Coach veebilehekülg*. <https://uavcoach.com/drone-companies/>
9. Eesti firma, mis võitleb Mesopotaamia draakonitega – Marduk, otsib inimesi, kelle jaoks droonitõrje on piisavalt äge väljakutse. *Digigeenius veebilehekülg*. <https://digi.geenius.ee/tookuulutus/eesti-firma-mis-voitleb-mesopotaamia-draakonitega-marduk-otsib-inimesi-kelle-jaoks-droonitorje-on-piisavalt-age-valjakutse/>
10. Lauri, V. (2020). Droonivõimekus annab Mägi-Karabahhi konfliktis Aserbaidžaanile eelise. *ERR*.
11. Gettinger, D. (2016). Drones Operating in Syria and Iraq. *Dronecenter*.
12. Birch, G. C., Griffin, J. C. & Erdman, M. K. (2015). *UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey 2015, Albuquerque*. Sandia National Laboratories.
13. Michel, A. H. (2018). *Counter-Drone Systems, Bard: Center for the Study of the Drone at Bard College*. Bard College Press.
- 14.9 counter-drone technologies to detect and stop drones today. (2020). *Robinradar veebilehekülg*.

15. Lõugas, H. (2018). Sellise "droonipüssiga" toodi täna Tallinna vangla juures taevast alla pool tosinat drooni. *Digigeenius*.
16. Rantelon. *Ettevõtte kodulehekülg*. <https://rantelon.ee/>
17. Marduk Technologies. *Ettevõtte kodulehekülg*. <https://www.marduk.ee/>
18. Randlo, T. (2021). Eesti tehnoloogiafirma arendas välja mobiilse droonitõrjesüsteemi. *Postimees*.
19. Tiki. *Ettevõtte kodulehekülg*. <https://www.tiki.ee/>
20. Ratastraktori, liikurmasina ja nende haagiste tehnoseisundi kontrollimise eeskiri ning nende tehnoseisundile ja varustusele esitatavad nõuded. (2001). RTL 2001, 46, 657. <https://www.riigiteataja.ee/akt/85060>
21. Põdra, P. (2016). Detailide tugevus pikkkel. *Tugevusõpetus I loengumaterjalid*. https://moodle.taltech.ee/pluginfile.php/149172/mod_resource/content/6/2.%20Detailide_tugevus_pikkkel.pdf
22. Kulu, P. Toim. (2012). *Mehaanikainseneri käsiraamat*. TTÜ kirjastus.

LISAD

LISA 1 Kinnitusklambri joonis

LISA 2 Külgtoru joonis

LISA 3 Liigend 1 joonis

LISA 4 Liigend 2 joonis

LISA 5 Liigend 3 joonis

LISA 6 Suure kõrva joonis

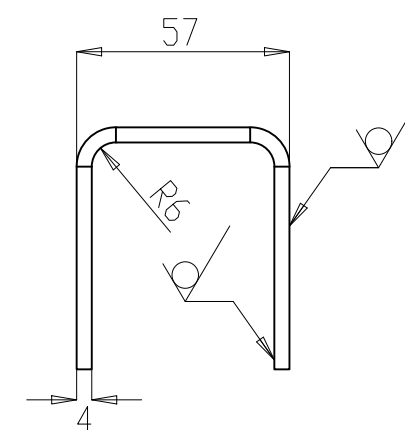
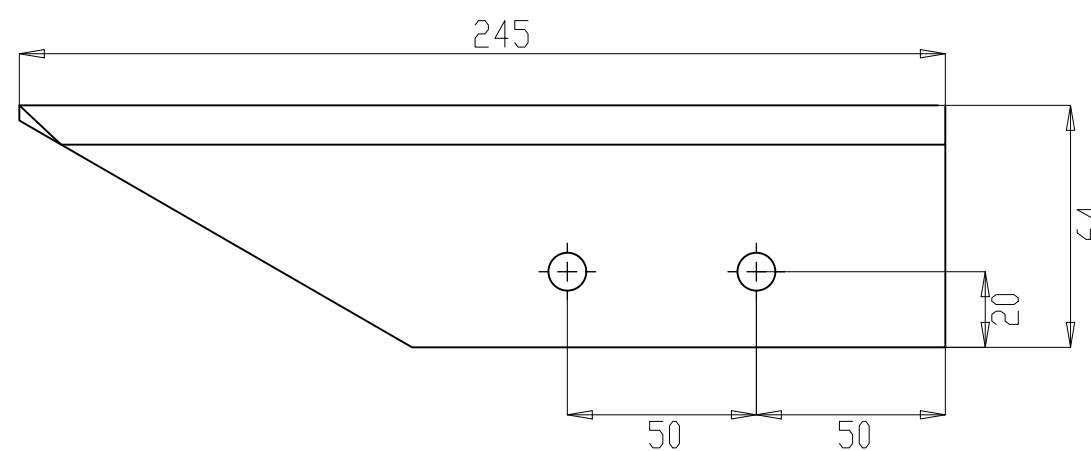
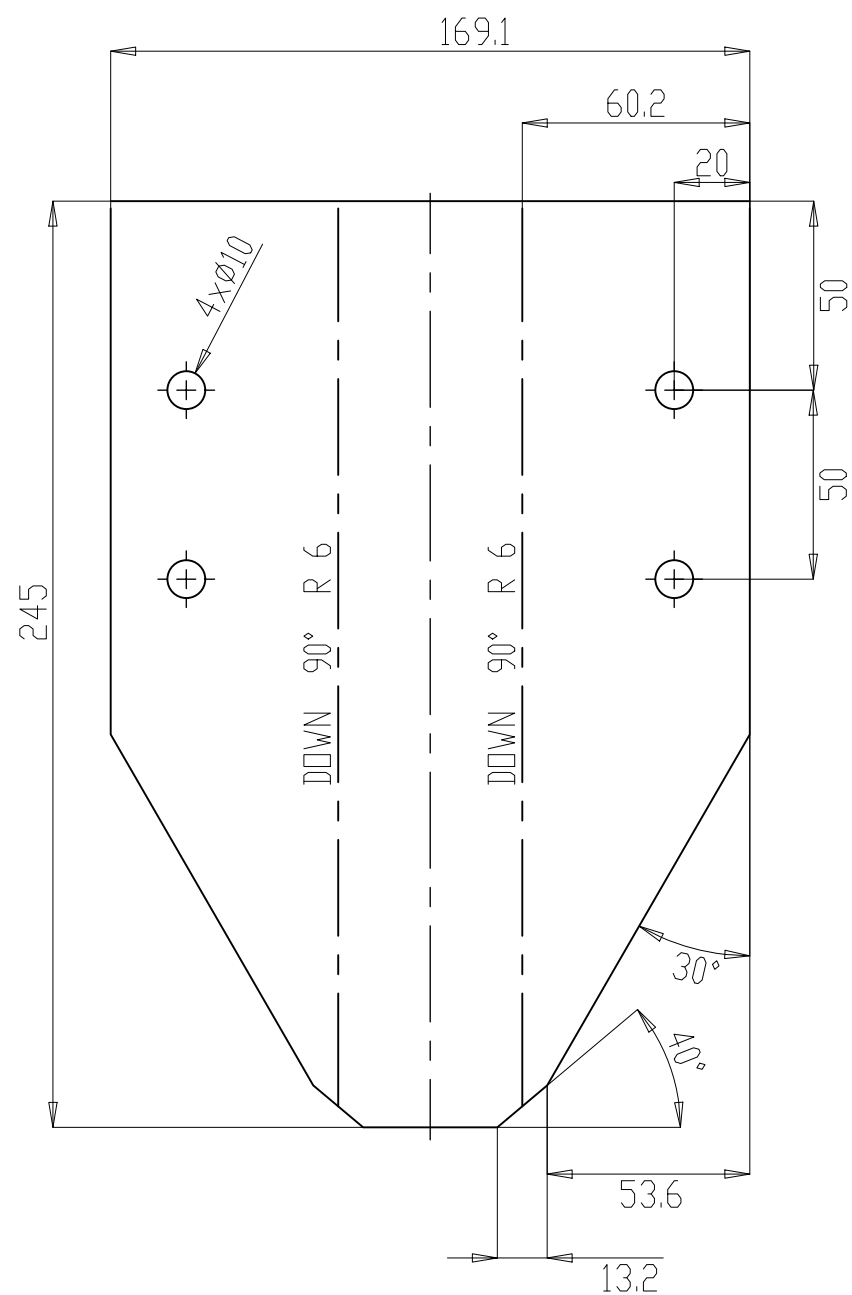
LISA 7 Väikese kõrva joonis

LISA 8 Talla joonis

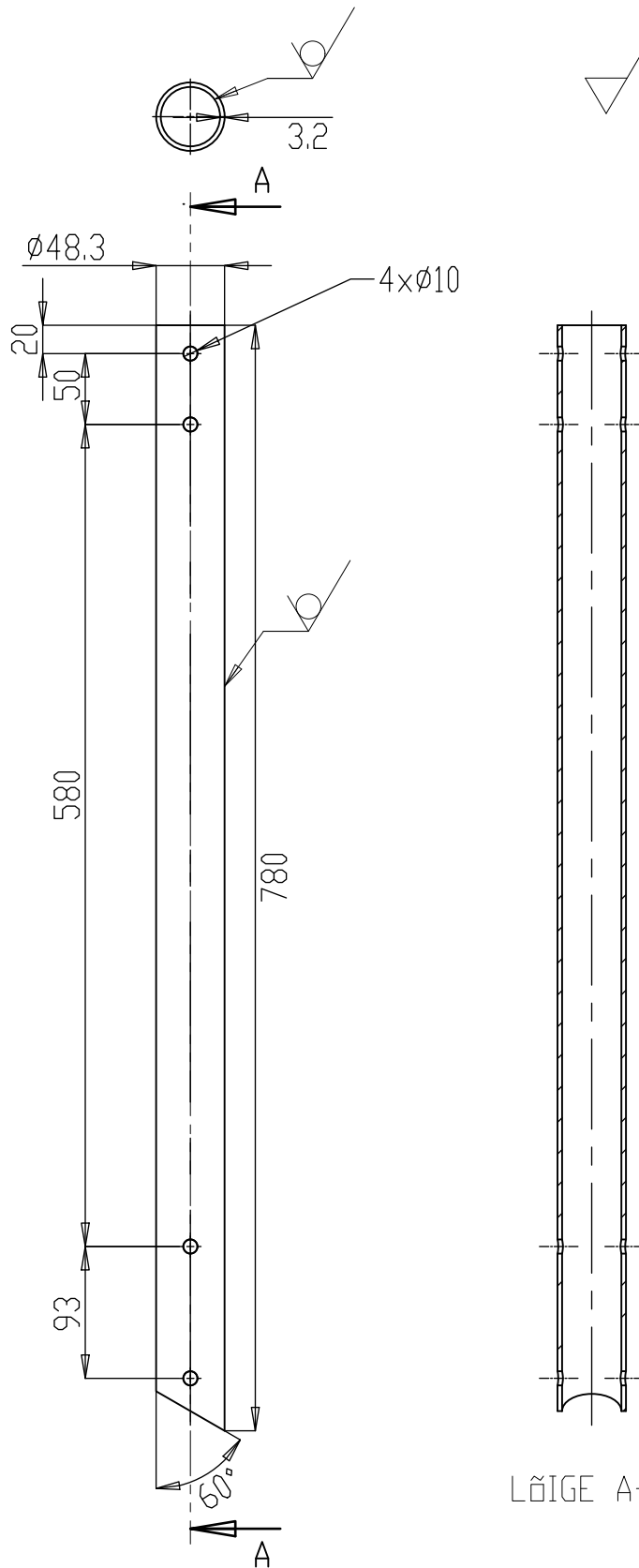
LISA 9 Tugijala joonis

LISA 10 Külgtoru kinnituse joonis

Ra 6,3 (✓)



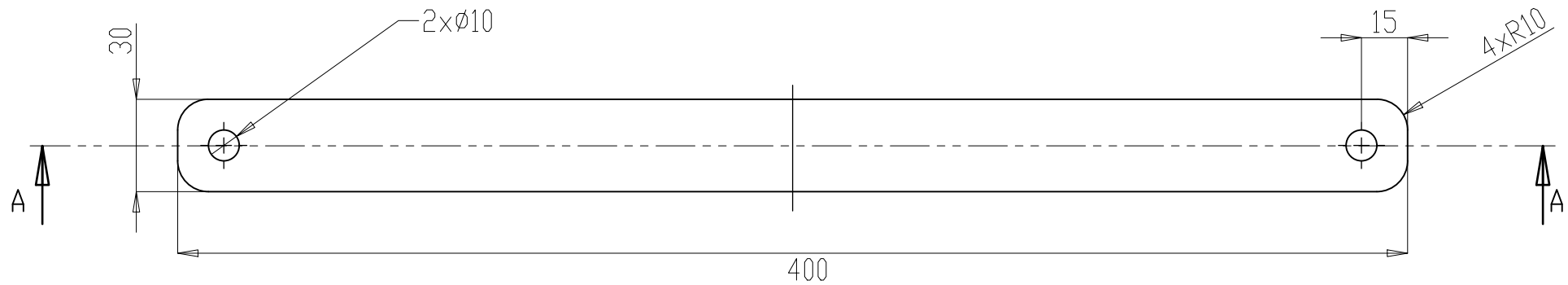
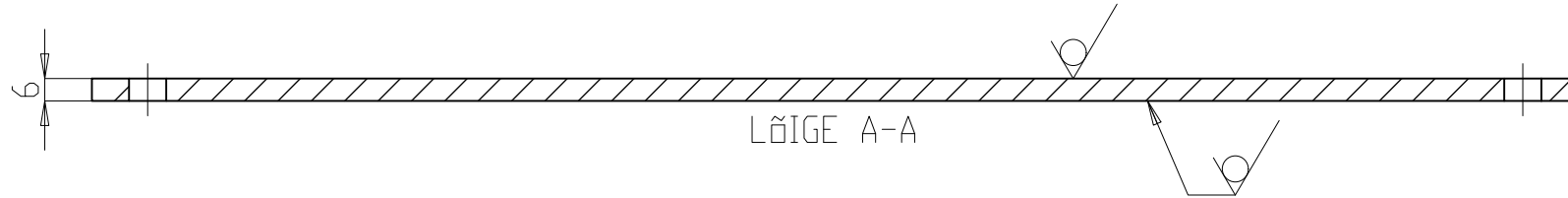
	Materjal:	Teras S235	Märkimata piirhälbed:	IT11	Mass:	1,1 kg	Mööd:	1:2
	Teostas:	R. Pääru	<h1>Kinnitusklamber</h1>					
	Kontrollis:	T. Velsker						
	Kinnitas:	T. Velsker						
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika			Leht:	1	Tähis:	01.009		



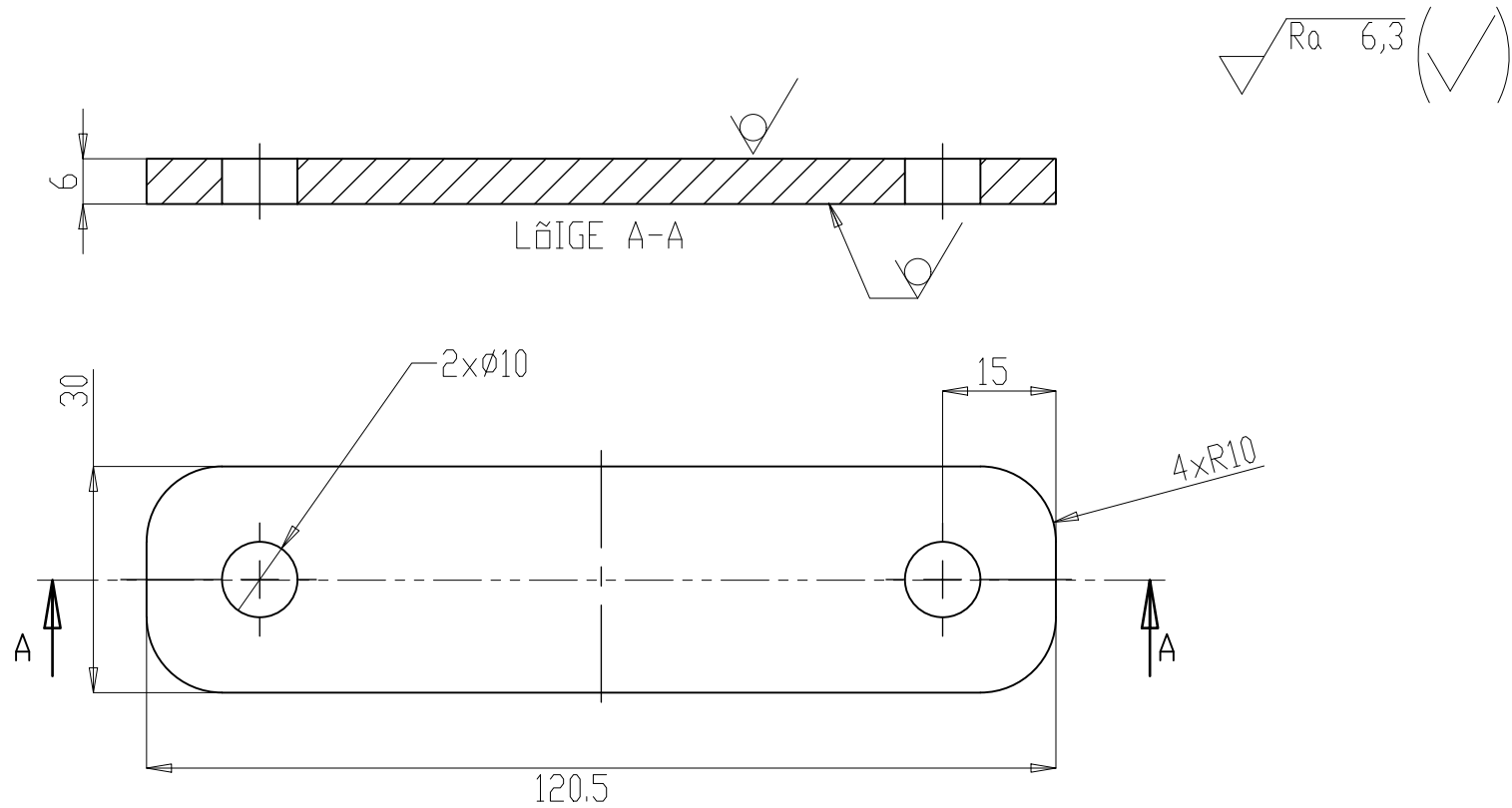
LÕIGE A-A

	Materjal: Teras S235	Märkimata piirhälbed: IT11	Mass: 2,7 kg	Mõõt: 1:5
Teostas:	R. Pääru	Nimetus: Külgtoru		
Kontrollis:	T. Velsker			
Kinnitas:	T. Velsker			
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika		Leht: 1	Tähis: 01.006	

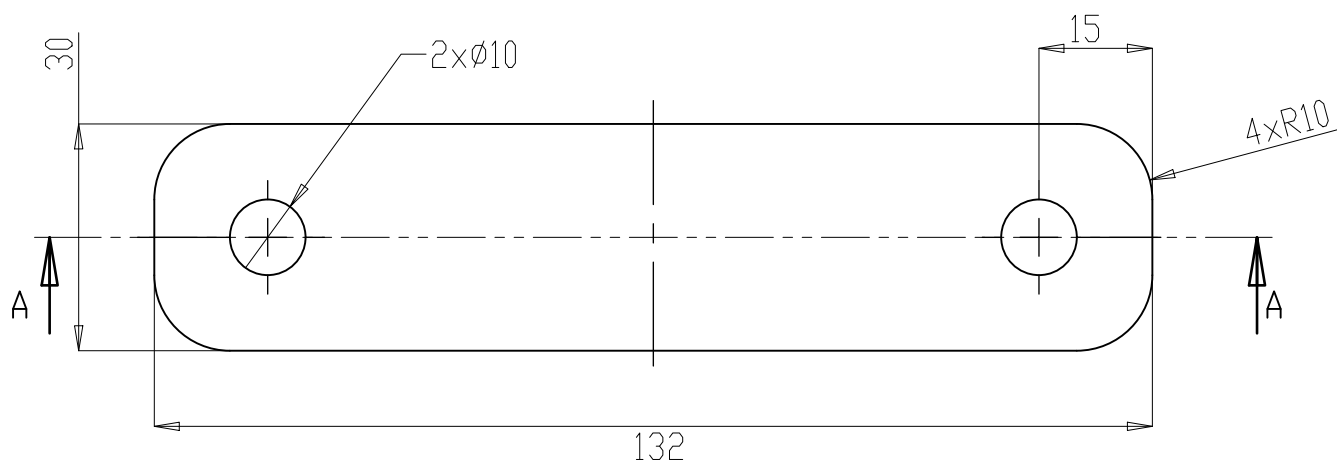
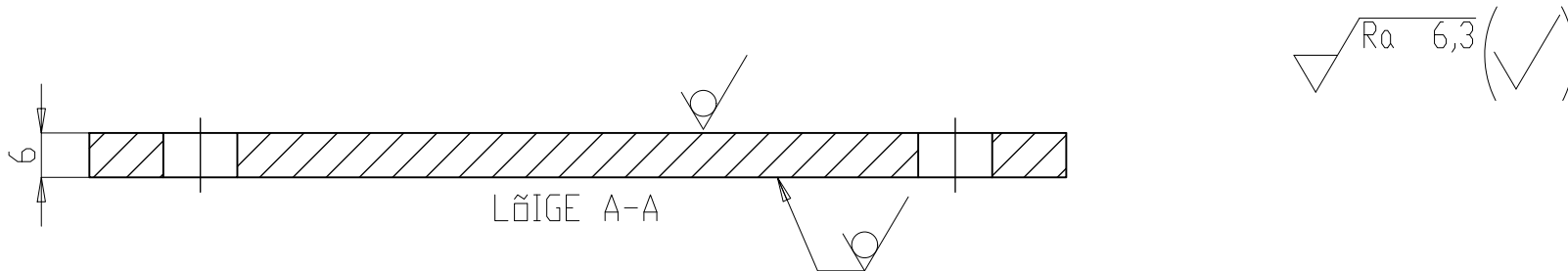
$R_a \ 6,3$ (✓)



	Materjal: Teras S235		Märkimata piirhälbed: IT11	Mass: 0,56 kg	Mõõt: 1:2
	Teostas: R. Pääru	<h1>Liigend 1</h1>			
Kontrollis: T. Velsker					
Kinnitas: T. Velsker					
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika		Leht: 1	Tähis: 01.007		

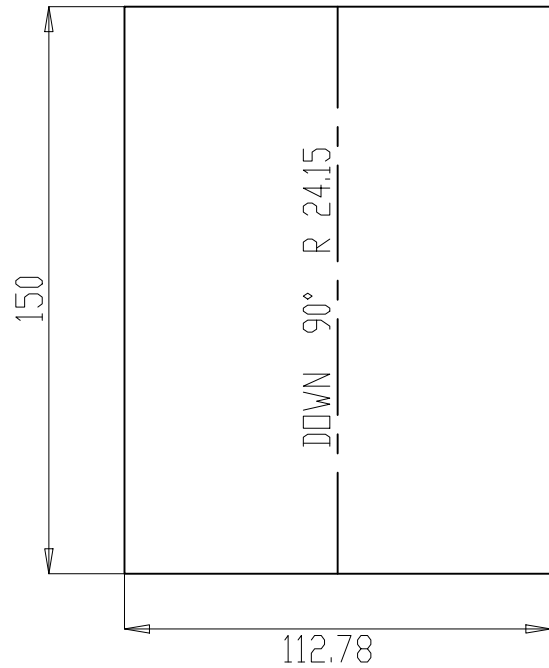
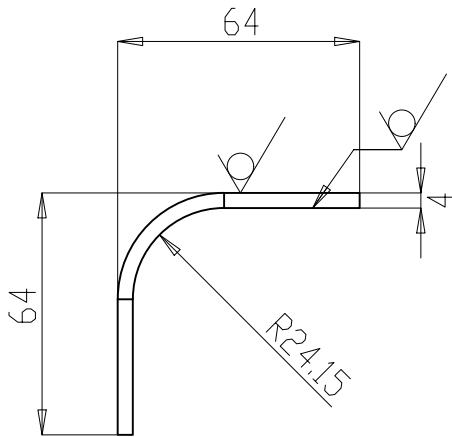


	Materjal:	Teras S235	Märkimata piirhälbed:	IT11	Mass:	0,16 kg	Mõõt:	1:1
	Teostas:	R. Pääru	Nimetus:	<h1>Liigend 2</h1>				
	Kontrollis:	T. Velsker						
	Kinnitas:	T. Velsker						
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika			Leht:	1	Tähis:	01.012		



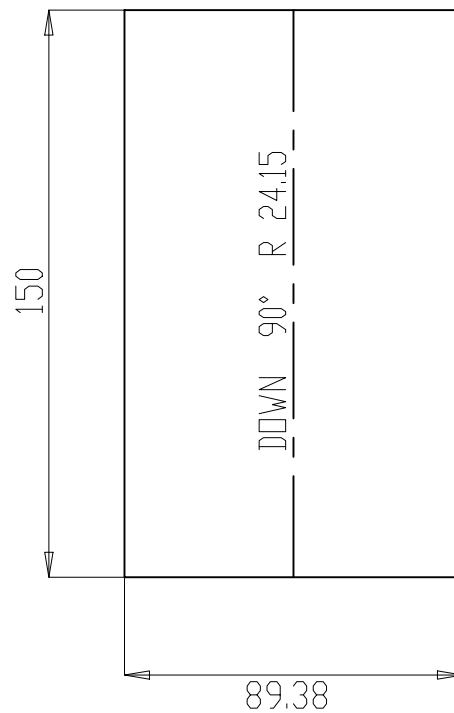
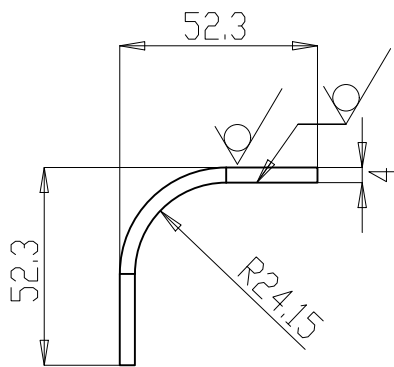
	Materjal: Teras S235		Märkimata piirhälbed: IT11	Mass: 0,18 kg	Mõõt: 1:1
	Teostas: R. Pääru	Nimetus: <h1>Liigend 3</h1>			
	Kontrollis: T. Velsker				
	Kinnitas: T. Velsker				
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika		Leht: 1	Tähis: 01.013		

$R_a \ 6,3$ (✓)

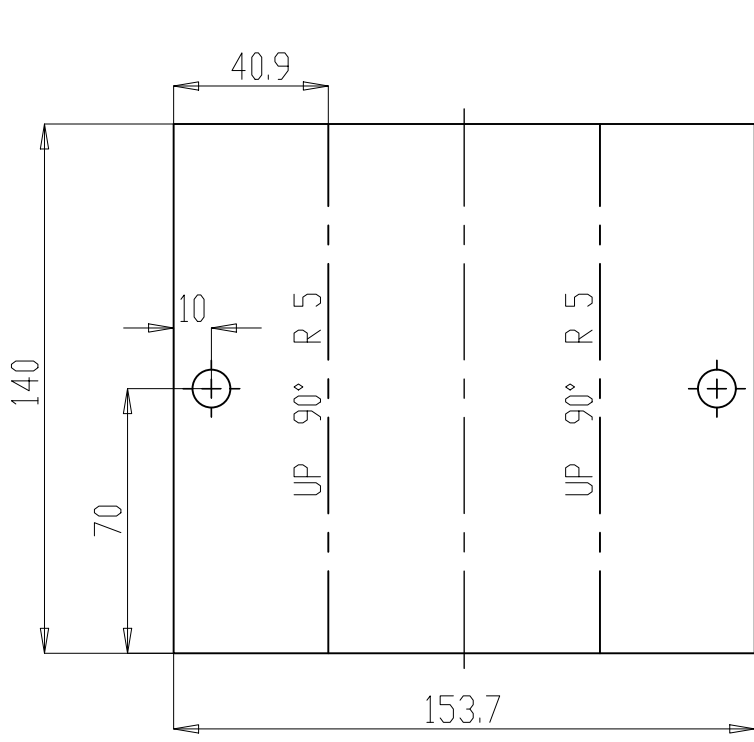


	Materjal: Teras S235	Märkimata piirhälbed: IT11	Mass: 0,53 kg	Mõõt: 1:1
Teostas:	R. Pääru	Nimetus: <h1>Suur kõrv</h1>		
Kontrollis:	T. Velsker			
Kinnitas:	T. Velsker			
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika		Leht: 1	Tähis: 01.010	

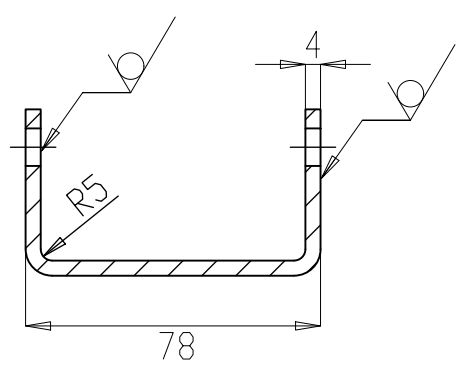
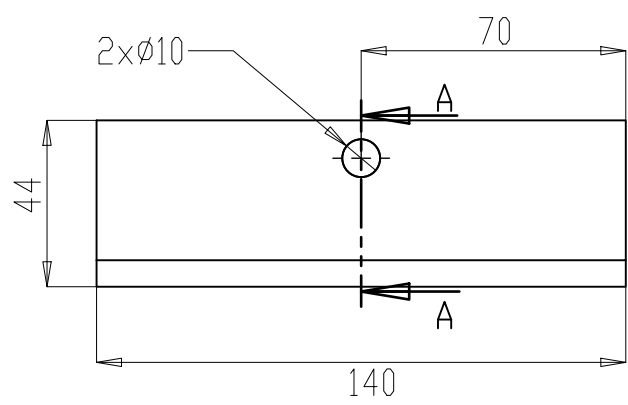
Ra 6,3 (✓)



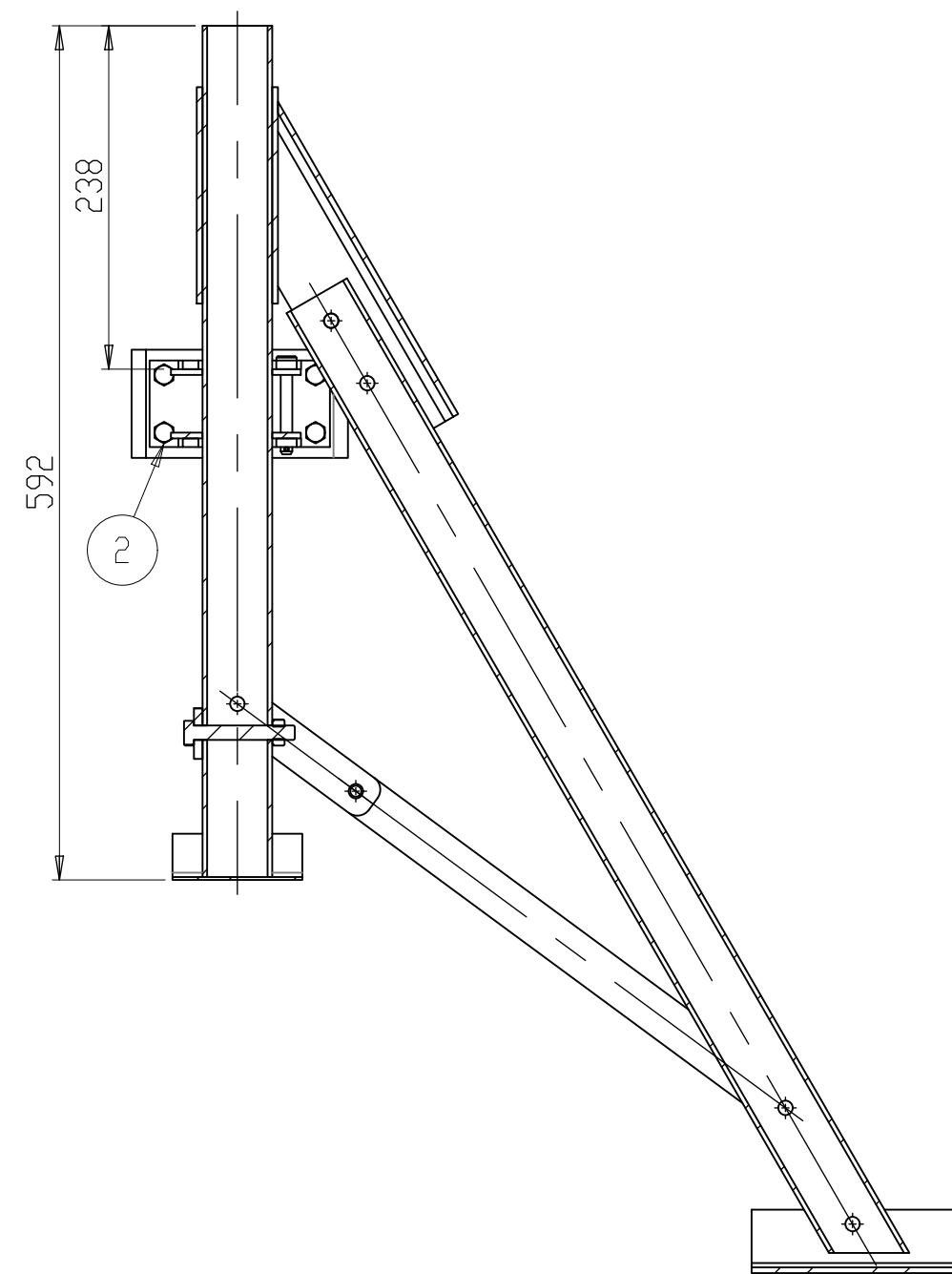
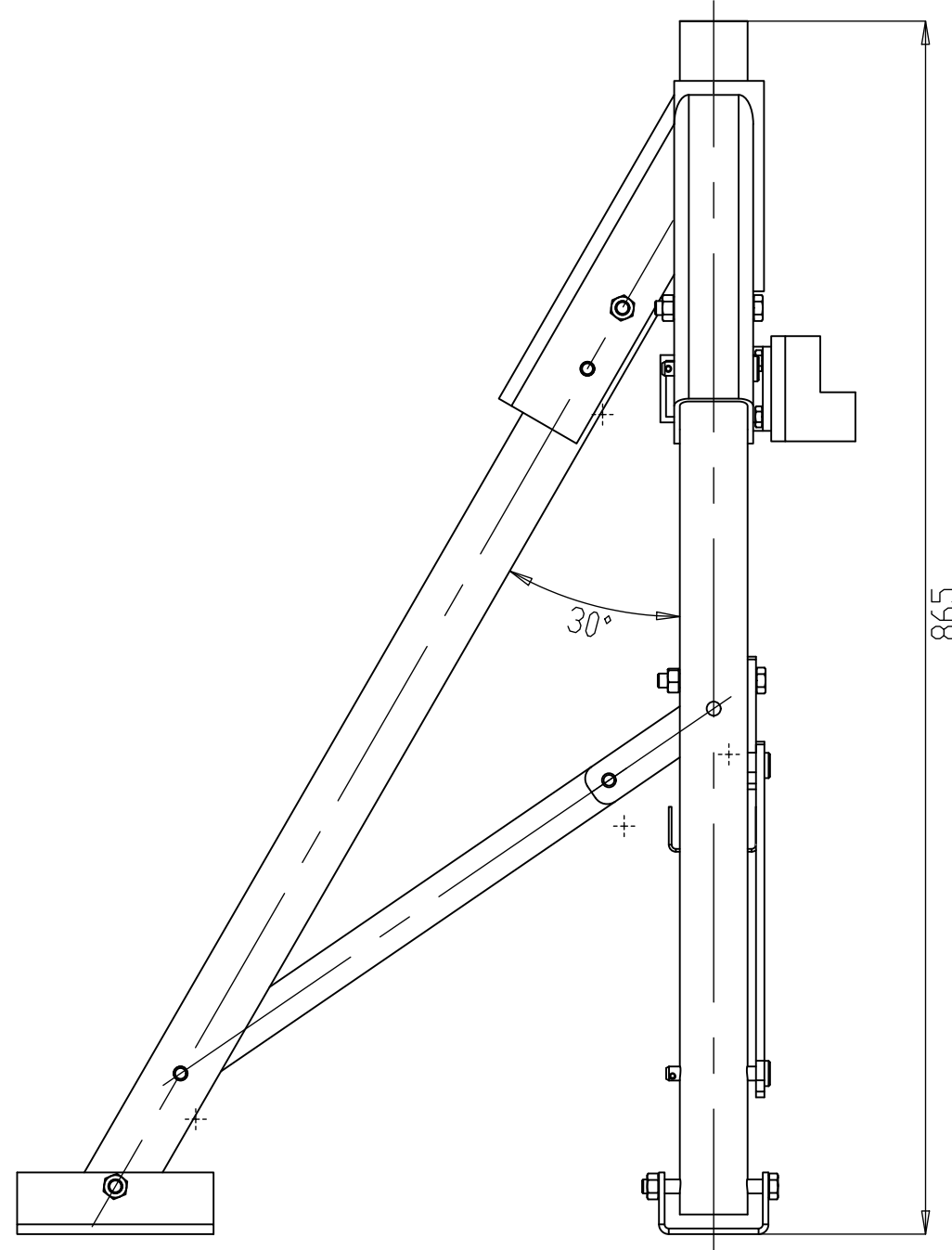
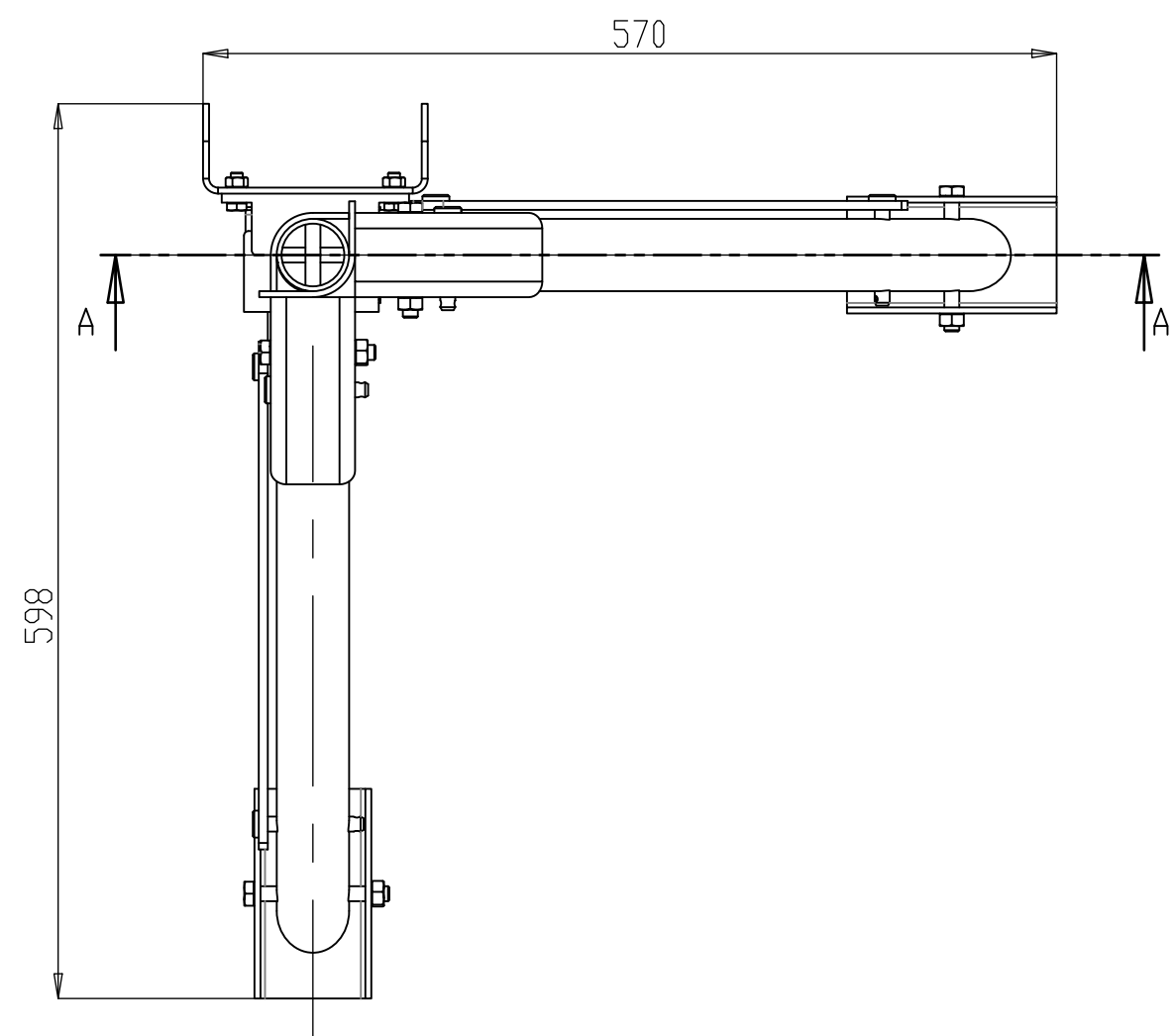
	Materjal:	Teras S235	Märkimata piirhälbed:	IT11	Mass:	0,42 kg	Mööd:	1:1
	Teostas:	R. Pääru	Nimetus:	<h1>Väike kõrv</h1>				
Kontrollis:	T. Velsker							
Kinnitas:	T. Velsker							
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika		Leht:	1	Tähis:	01.011			



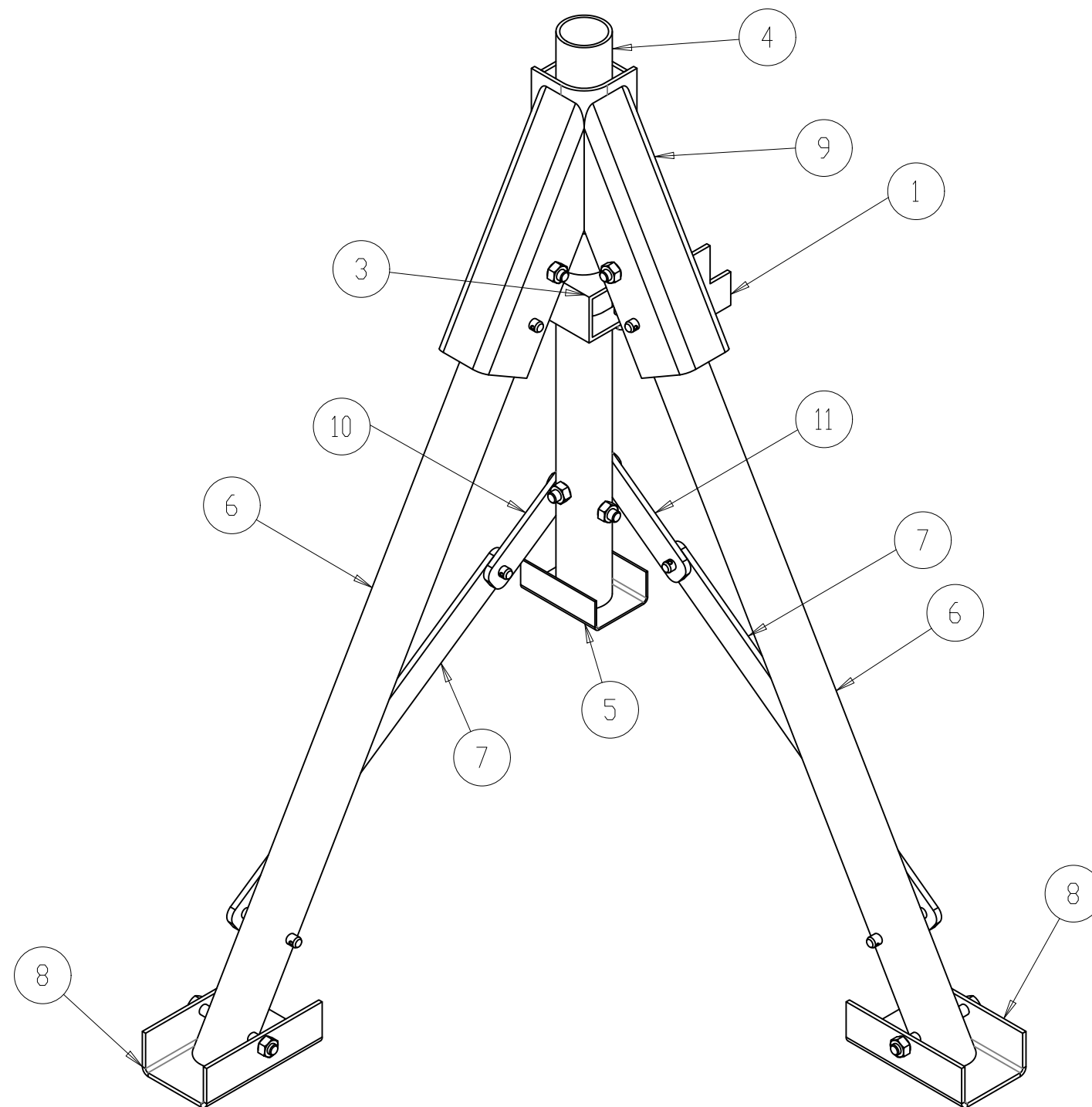
LÖIGE A-A



	Materjal: Teras S235		Märkimata piirhälbed: IT11		Mass: 0,68 kg	Mõõt: 1:2
	Teostas: R. Päärü	Nimetus: <h1 style="text-align: center;">Tald</h1>				
Kontrollis: T. Velsker						
Kinnitas: T. Velsker						
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika		Leht: 1	Tähis: 01.008			

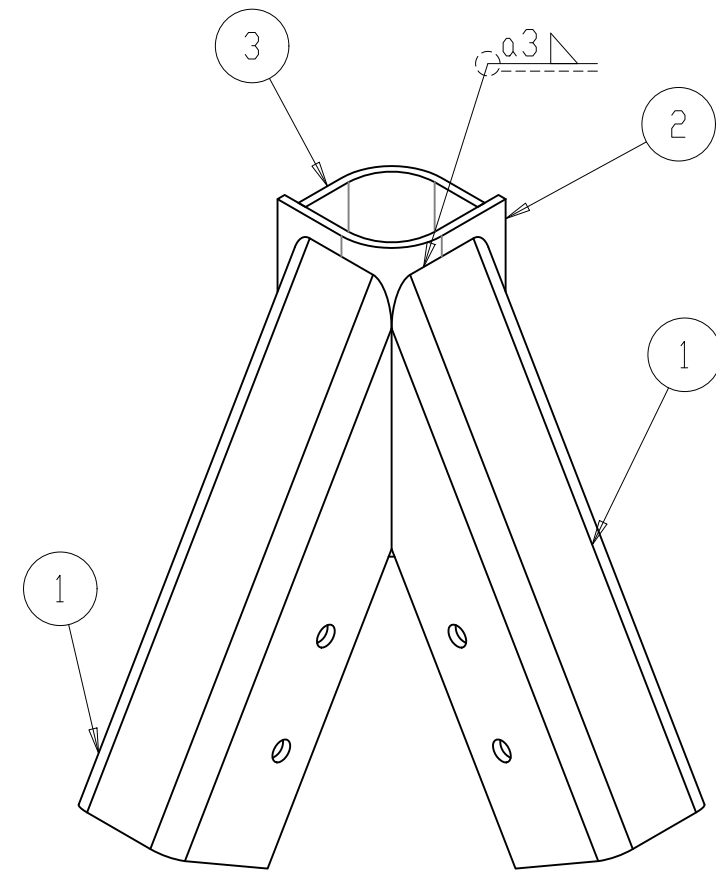
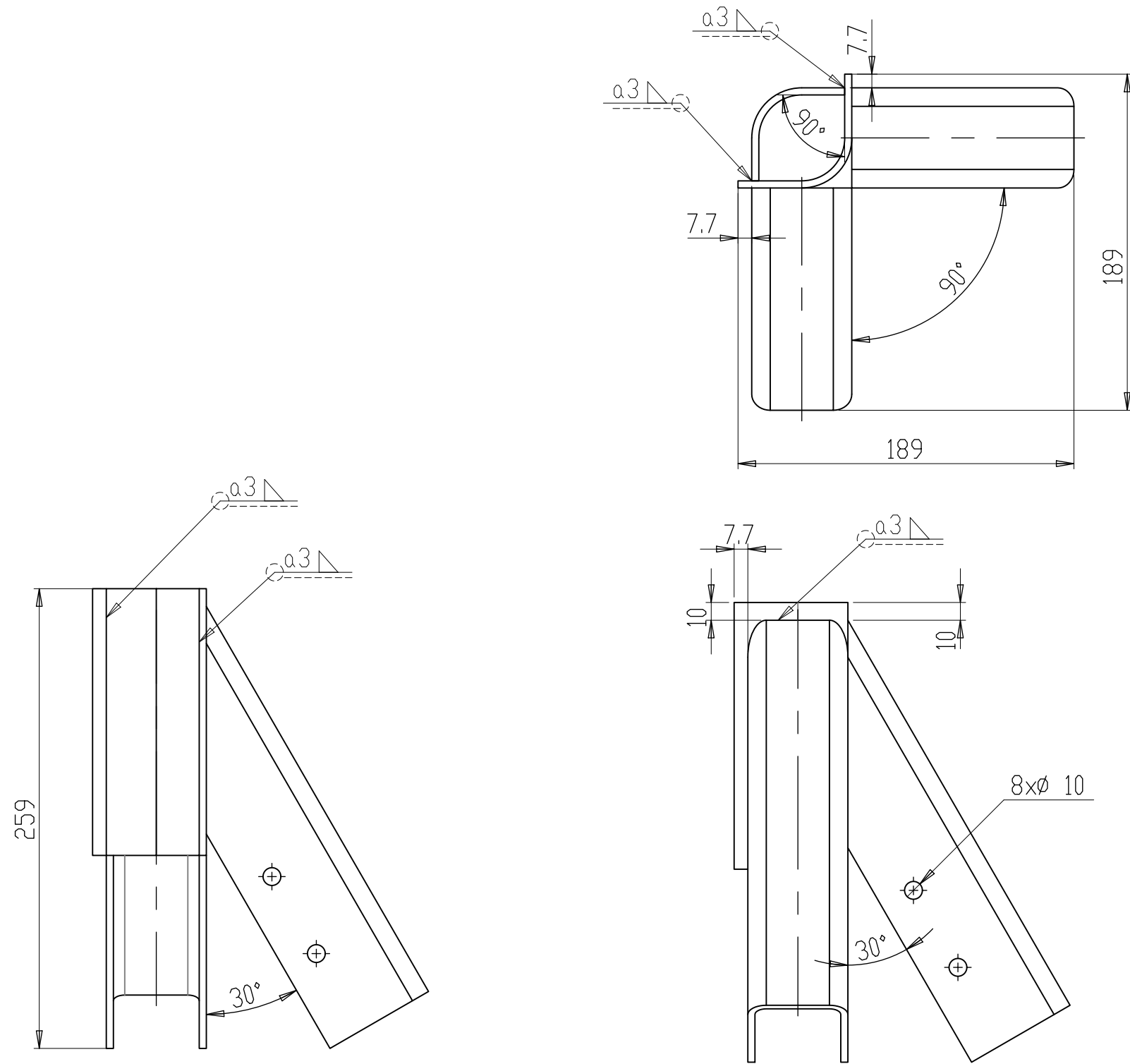


LÄIGE A-A



NR.	DETAILI NIMETUS	JÕONISE NR.	KOGUS
1	Raami kinnitus		1
2	Kiirkinnitusklamber 1		1
3	Kiirkinnitusklamber 2		1
4	Peamine toru		1
5	Väike tald		1
6	Külgtoru	01.006	2
7	Liigend 1	01.007	2
8	Tald	01.008	2
9	Külgtoru kinnitus	01.001	1
10	Liigend 2	01.012	1
11	Liigend 3	01.013	1
12	ISD 4016 - M10 x 70 x 26-WN		4
13	ISD 4016 - M10 x 90 x 26-WN		2
14	ISD - 4032 - M10 - W - N		6
15	ISD - 4032 - M8 - W - N		4
16	ISD 2341 - B - 10 x 20 x 3.2 - St		2
17	ISD 2341 - B - 10 x 70 x 3.2 - St		2
18	ISD 2341 - B - 10 x 65 x 3.2 - St		2
19	ISD 2341 - B - 8 x 65 x 2 - St		1
20	ISD 8676 - M8x1.0 x 20-N		4

	Materjal: Teras S235	Märkimata piirhälbed: IT11	Mass: 15,1 kg	Mõõt: 1:5
Teostas:	R. Pääru	Tugijalg		
Kontrollis:	T. Velsker			
Kinnitas:	T. Velsker			
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika		Leht: 1	Tähis: 01.000	



	Materjal:	Teras S235	Märkimata piirhälbed:	IT11	Mass:	3,15 kg	Mööd:	1:3
	Teostas:	R. Pääru	Nimetus:	Külgtoru kinnitus				
Kontrollis:	T. Velsker	Kinnitas:	T. Velsker					
Taltech Tootearendus ja MATM-40 tootmistehnika			Leht:	1	Tähis:	01.001		

NR.	DETAILI NIMETUS	JOONISE NR.	KOGUS
1	Kinnitusklamber	01.009	2
2	Suur kõrv	01.010	1
3	Väike kõrv	01.011	1