



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

**MODULAARSE TERASSILLA PROJEKTEERIMINE
BRICO 2020 VÕISTLUSELE**

**DESIGN PROCESS OF A MODULAR STEEL BRIDGE FOR
THE BRICO 2020 COMPETITION**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Henri Palm

Üliõpilaskood: 192005

Juhendaja: Toivo Tähemaa, teadur

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.

"....." 2020

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2020

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2020

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Henri Palm (sünnikuupäev: 15. aprill 1995), annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Modulaarse terrassilla projekteerimine BRICO 2020 võistlusele", mille juhendaja on Toivo Tähemaa,

- 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.
- 1.3 Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
- 1.4 Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Henri Palm, 192005

Õppekava, peeriala: MATM02/18 – Tootearendus ja tootmistehnika

Juhendaja: teadur Toivo Tähemaa, +3726203252

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Modulaarse terassilla projekteerimine, kasutades kaasaegseid inseneritehnilisi vahendeid ja meetodeid.

(inglise keeles) Design process of a modular steel bridge, by applying modern engineering tools and methods.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Projekteerida silla tehniline lahendus ning tagada võimalikult väike mass
2. Tõestada arvutuste ning LEM-analüüside abil struktuuri kandevõime.
3. Tagada võimalikult soodne ja kiire tootmisprotsess ning kiire ülesseadmine.
4. Vormistada tootmisjoonised ja tootmisplaan.
5. Tutvustada lugejale projekteerimise etappe ja põhjendada tehtud valikuid.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kontseptsioon, lihtsustatud CAD-mudel, materjali valik, tootmistehnoloogiate valik	14.04.2020
2.	Optimeeritud üldmudel	20.04.2020
3.	Üld- ja alamkoostudega struktureeritud 3D-mudel. Toorikute valik, keeviste projekteerimine	01.05.2020
4.	Tootmisjooniste vormistamine	15.05.2020
5.	Lõputöö mustand	21.05.2020
6.	Valmis töö	24.05.2020

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "....." 2020 a

Üliõpilane: "....." 2020 a

/allkiri/

Juhendaja: "....." 2020 a

/allkiri/

Konsultant: "....." 2020 a

/allkiri/

Programmijuht: "....." 2020 a

/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
1. SISSEJUHATUS.....	10
1.1 TEEMA VALIK JA EESMÄRGID.....	10
1.2 TÖÖPLAAN JA METOODIKA.....	11
1.3 ÜLEVAADE VÕISTLUSEST	12
1.3.1 REEGLID.....	12
1.3.2 ISIKLIK KOGEMUS JA ÕPPETUNNID	15
1.4 LEHTMETALLDETAILIDE TOOTMISE ISEÄRASUSED	15
1.4.1 CNC-LÕIKETEHNOLOOGIAD.....	16
1.4.2 PAINUTUSRAADIUS, K-FAKTOR JA MINIMAALNE FLANTSIPIKKUS.....	17
1.5 TOOTMISKESKSE PROJEKTEERIMISE PÕHITÕED	20
1.6 LÕPLIKE ELEMENTIDE MEETOD.....	23
2. PROJEKTEERIMINE	25
2.1 TÖÖ FOOKUS JA EESMÄRGID.....	25
2.1.1 UUDNE STRUKTUURNE LAHENDUS	26
2.1.2 KIIRE ÜLESSEADMISE AEG.....	27
2.1.3 NEGATIIVNE VERTIKAALNE SIIRE.....	29
2.2 TÖÖPROTSESS.....	30
2.2.1 KONTSEPTSIOON JA KAVAND	30
2.2.2 TOOTMISTEHNOLOOGIAD JA MATERJAL	31
2.2.3 CAD-MUDELI ÜLESSEADMINE	32
2.2.4 LIHTSUSTATUD MUDEL.....	35
2.2.5 MOODULITE KINNITAMINE	35
2.2.6 NEGATIIVSE SIIRDE MEHCHANISM	37
2.2.7 OPTIMEERIMINE	39
2.2.8 OHUTUS	45
2.2.9 NÕTKUMINE JA TUGEVDUSRIBID	46
2.3 KOKKUVÕTE	49
3. VALIDEERIMINE.....	51
3.1 SISSEJUHATUS	51
3.2 TALA ANALÜÜTILINE ARVUTUS	51
3.3 ÜLDKONSTRUKTSIOONI LEM-ANALÜÜS	56
3.4 LEHTVEDRUDE DEFORMEERUMINE.....	59
3.5 MOODULITEVAHELISED KINNITUSED	61
3.6 DEFORMATSIOONID TEKI OTSPUNKTIS	62
3.7 KOKKUVÕTE	63

4. TOOTMINE	64
4.1 TOOTMISPLAAN	64
4.2 JOONISED	64
4.2.1 DETAILIDE JA JOONISTE NIMETAMINE	65
4.2.2 KOMPONENTIDE TABELID	66
4.2.3 PEAJOONIS JA KOOSTEJOONIS	67
4.2.4 KEEVISOOSTUDE JOONISED	69
4.2.5 DETAILIDE JOONISED	70
5. KOKKUVÕTE / SUMMARY	72
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	74
LISAD	76
GRAAFILINE OSA	81

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö eesmärk on projekteerida viiemeetrine modulaarne terassild sillaehitusvõistlusele BRICO 2020. Konstruktsioon peab kandma vähemalt 1000 kg ja olema samas võimalikult kerge, jäik, kiiresti ülesseatav ning huvitava välimusega. Töö on algatatud autori enda initsiatiivil, eesmärgiga arendada oskust luua ideest valmis toode, osaleda võistlusel edukalt ning katsetada innovatiivseid projekteerimismeetodeid.

Töö annab ülevaate meetoditest, mõttekäikudest ja protsessist sellise toote valmimiseks. Lõputöö sobib lugemiseks nii alustavale kui ka kogenud insenerile ning muude valdkondade esindajatele, sest on lihtsasti loetav ning sisaldab rohkelt illustreerivaid näiteid.

Soovin tänada õppejõudu ja juhendajat prof. Toivo Tähemaad abi ja nõuannete eest, prof. Martin Eermet töös kasutatavate meetodite ja tarkvara õpetamise eest, Robert Minekast inspireeriva elutöö eest ning sillaehitusinseneri Katriin Vinogradovit abi eest tugevusõpetuses.

Võtmesõnad: terassild, projekteerimine, LEM, tootearendus, magistritöö

Lühendite loetelu

BOM – Bill of Materials, tükitabel.

CAD – Computer Aided Design, raalprojekteerimine.

CNC – Computer Numerical Control, arvprogrammjuhtimine.

DXF – Drawing Exchange Format, digitaalne joonisefail.

LEM – Lõplike elementide meetod (*ingl. k FEM – Finite Element Method*), numbriline arvutusmeetod füüsikaliste probleemide lahendamiseks.

STEP – Standard for the Exchange of Product Data, matemaatiline 3D-mudeli failiformaat.

1. SISSEJUHATUS

1.1 Teema valik ja eesmärgid

Sildade projekteerimine, sarnaselt teistele tootearenduse valdkondadele, nõuab erinevate eesmärkide vahel kompromisside tegemist. Ideaalne sild on vastupidav, jäik, visuaalselt kaunis, materjaliefektiivne, keskkonnasõbralik ning soodne toota, üles seada ja hooldada. Taolised nõuded on sageli üksteisega vastukäivad. Inseneri tööks ongi luua tehniline lahendus, mis saavutab etteantud eesmärke nii hästi kui võimalik. Tihti aga peabki ühe prioriteedi täitmiseks tooma mujal ohverdusi. Tootearendaja on otsekui optimeerija, kes peab leidma tasakaaluka lõpplahenduse igasuguste piirangute ja kompromisside rägastikus.

Käesolev projekt on suurepärane näide, kuidas teha selgeks kõik piirangud, võimalused, prioriteedid ja nendevaheline tasakaal ning luua toode, mis rahuldab seatud eesmärke nii hästi kui vähegi võimalik. Igaüks suudab projekteerida konstruktsiooni, mis kannab vähemalt ühe tonni koormust. Hea insener suudab projekteerida konstruktsiooni, mis kannabki vaid ühe tonni, kuid on samas palju ilusam, hõlpsamini toodetav, soodsam ja materjalisäästlikum.

Minu eesmärk on projekteerida viiemeetrine mudelsild, mis võidab BRICO 2020 sillaehitusvõistluse. Piiranguteks on võistluse karmid reeglid, füüsikaseadused, kiire ajagraafik ja tänapäevaste tootmistehnoloogiate võimekus. Lisaks sean eesmärgiks selle, et see oleks võimalikult modulaarne ja kiiresti ülessestatav, visuaalselt väga kaunis, kvaliteetselt toodetud ja tootmissõbralik. Projekt paneb proovile minu oskused insenerina, tehnilise taibu, loovuse ja võimekuse pidada kinni iseendale püstitatud eesmärkidest.

Töö eesmärk on ka inspireerida noori insenere tegelema taoliste projektidega koolitöö kõrvalt. BRICO on meedias kajastatav rahvusvaheline insenerivõistlus, seega suurepärane võimalus laiemale ringile demonstreerida, et Tallinna Tehnikaülikooli õppurid on innovatiivsed ja julged. Kogenud tootearendajatele võivad pakkuda huvi töös kasutatud projekteerimisvõtted. Ehitusinsenere võib huvitada mehaanikatudengi lähenemine sildade ehitamisele.

1.2 Tööplaan ja metoodika

Kontsept seab paika kogu edasise tegevuse, mistõttu tuleb hoolikalt valida erinevatest tehnilistest lahendustest parim. Sageli jääb töötuhinas just see faas vahele, sest ollakse ülemäära kindel oma esmasest pähe lennanud lahenduses ning ei võeta aega, et alternatiive kaaluda. Töömaastikul teevad koostööd projektijuht, klient ja insenerid, kellest igaühel on oma vaatenurk ning pakutavaid lahendusi on mitu. Antud projekt on aga vaid minu lahendada ning pean hoolitsema selle eest, et lahenduse valik toimub süsteemselt. Kontseptifaasis toimub info otsimine ja erinevate lahenduste skitseerimine. CAD-tarkvara (*CAD – Computer Aided Design, raalprojekteerimine*) ei ole kontseptifaasis vaja kasutada.

Projekteerimist alustan lihtsustatud 3D-mudeli loomisega. Jälgin, et mõõdud ja muud piirangud vastavad võistluse reeglitele. Valin peamised tootmistehnoloogiad ning umbkaudsed toruprofiilid, materjalipaksused ja komponentide kuju. Hindan, kui efektiivne on struktuur tervikuna ning kas üldkuju suudab kanda piisavat koormust. Teostan lihtsamad tugevusarvutused ning leian kompromissi tehnilise lahenduse ja huvitava välimuse vahel.

Koostemudel on vajalik selleks, et veenduda, et erinevad detailid ei ületa reeglites lubatud mõõtmeid ega massi. Reeglite kohaselt ei tohi ühegi mooduli gabariitmõõtmed olla suuremad kui 1200 x 250 x 250 mm ning mass ei tohi ületada 7 kg. Lõigun mudeli nõuetele vastavateks detailideks ning projekteerin keeviskoostud ja omavahelised kinnitusviisid. See etapp on tootmissõbralikkuse saavutamiseks kõige töömahukam ning eeldab projekteerimistarkvara ja tootmistehnika tundmist heal tasemel. Valmis koostemudel peab olema väga korrektselt ehitatud, et järgnevates etappides vigu vältida.

Valideerin saadud geomeetria käsitsi arvutades ja LEM-analüüside abil (*LEM – Lõplike elementide meetod*). Teen kindlaks kriitilised piirkonnad, nõtkohtlikud elemendid ja optimeerin lokaalselt seinapaksused ja kuju. Optimeerin sõlmkohad. Valideerimine kindlustab, et füüsiline toode kannab soovitud koormuseid. Tugevusarvutuste abil saan teada eeldatavad deformatsioonid ja varuteguri.

Joonised on otseselt seotud 3D-mudeliga, mis eeldab väga süsteemset ja korrektset lähenemist juba esimestest etappidest. Joonised vormistan üldkoostust ja keeviskoostudest kuni individuaalsete detailideni välja. Peale paberjooniste vormistan ka automaatlõikuse jaoks joonisefailid, näiteks DXF-formaadis (*DXF – Drawing Exchange Format, digitaalne joonisefail*) joonised kaheteljelise lõikuse jaoks ja STEP-

formaadis (*STEP – Standard for the Exchange of Product Data, matemaatiline 3D-mudeli failiformaat*) mudelid kolmeteljelise töötamise jaoks.

Tootmise planeerimine on vajalik selleks, et toode saaks ettenähtud ajaks ka füüsiliselt valmis. Planeerida tuleb tööde järjekorda ja erinevatele tootmisoperatsioonidele kuluvat aega ja rahalist resurssi. Tootmisprotsess ise on väljaspool käesoleva töö ajaraami.

Toetavad tegevused ei ole küll otseselt seotud lõpptoote valmistamise protsessiga, kuid on vajalikud, et tagada parimad tulemused võistlusel. Selleks on näiteks võistkonna visuaalse identiteedi loomine, videote filmimine ja montaaž, sotsiaalmeediasse sisu loomine, esitlused ja meeskonnaga koostöö harjutamine.

1.3 Ülevaade võistlusest

BRICO on Euroopa suurim terassildade projekteerimise ja ehitamise võistlus. [1] See iga-aastane võistlus toimub Tallinna Tehnikaülikoolis juba viiendat aastat, kaasates inseneritudengeid üle kogu maailma. Eesmärk on meeskonnana projekteerida ja ehitada efektiivseim sild, millega võistelda sõbralikus keskkonnas teiste võistkondadega. Võistlus kaasab nii tudengeid kui kooliõpilasi, seega populariseerib inseneriõpet ning annab võimaluse luua väärtuslikke tutvusi. Peale põhivõistluse toimuvad BRICO raames töötoad, loengud ja kultuursed tegevused. Võistlust korraldavad aktiivsed Inseneriteaduskonna Üliõpilaskogu liikmed. Võistlusnädal toimub tavaliselt maikuu, kuid 2020. aasta võistlus on globaalse pandeemia tõttu septembrisse lükkunud. Võistluse päevade jooksul toimub sildade esitlemine ja omavaheline mõõduvõtt.

1.3.1 Reeglid

Üldised reeglid osalevatele sildadele on järgnevad:

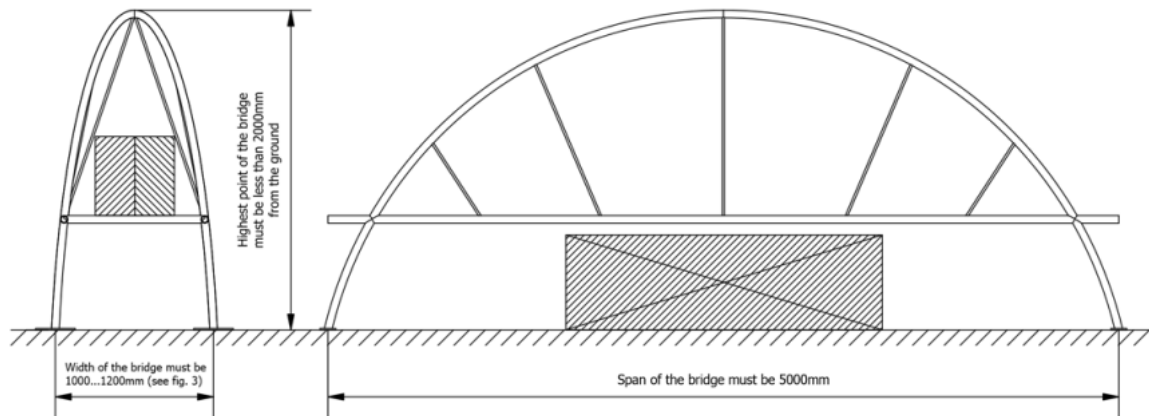
- Pikkus 5 m, laius 1,2 m, kõrgus kuni 2 m.
- Koosneb poltliidetega seotud terasmoodulitest.
- Punktisüsteem soosib sildu, mis on kerged, jäigad, ilusad ning kiirelt kokkupandavad.
- Vertikaalne kandevõime ligikaudu 1000 kg ning vastupidavus horisontaaljõududele.

Võistluse täpsemad reeglid on üsna konkreetsed ja seavad piirangud materjalile, geomeetria ja koostamise protsessile. Samas on reeglites ka nii-öelda halle alasid, mis korraldajate sõnul on tahtlikult jäetud. See soosib innovatiivsust ja kastist välja mõtlemist ning eeldab head tehnilist taipu ja reeglite tundmist. Kohtunikele, kaasvõistlejatele ja publikule tuleb silda esitleda ja põhjendada projekteerimisel tehtud valikuid.

Kogu sild peab koosnema vaid terasdetailidest, mille materjali voolepiir jääb alla 355 MPa. See nõue on ilmselt selleks oluline, et vältida olukorda, kus mõni meeskond saavutab eelise vaid tänu kallimale materjalile. Võistkondade poolt eelistatud terasemargid võistlusel on olnud konstruktsiooniterased S235 ja S355. See on ka ohutuse seisukohast hea: nendel terasemarkidel on madal süsinikusisaldus (kuni 0,24% [2]), mistõttu liigsel koormusel ei purune need hapralt ja järsku, vaid deformeerub plastselt. Need terased on ka hõlpsasti keevitatavad, tänu millele saavad tudengid ise soovi korral harjutada kätt keevitamisega.

Sild peab olema modulaarne ning iga moodul peab mahtuma kasti sisemõõtmetega 1200 x 250 x 250 mm. [3] Moodulid on omavahel ühendatud poldi ja mutriga suurusvahemikus M6-M16, üks kinnituselementidest võib olla keevitatud mooduli külge. Iga mooduli maksimaalne mass on 7 kg (raskemad moodulid toovad kaasa trahvipunktid). Kandvates konstruktsioonides on keelatud liikuvad komponendid, trossid, ketid, vedrud ja hinged.

Sild peab olema projekteeritud pikkusega 5000 mm ning laiusel 1000-1200 mm. Silla teki igas punktis peab olema piisavalt ruumi, et mahutada kaks kasti mõõtmetega 250x500 mm. Silla alt peab läbi mahtuma kast mõõtmetega 2000x600 mm, vt sele 1.3.1.1.



Sele 1.3.1.1 Silla geomeetrised nõuded. Silla kõrgeim punkt võib olla kuni 2000 mm maapinnast. Laius 1000...1200 mm, teki pikkus 5000 mm [3]

Vertikaalsel koormamisel seatakse silla tekile mass 750 kg ning keskkohast 800...1700 mm kaugusele lisamass 250 kg. Lisamassi asukoht selgub alles võistlusel ning määratakse juhuslikult. Lisaks peab iga teki osa suutma kanda vähemalt 35 kg ilma et deformatsioon ületaks 4 mm. Täpsem koormamise skeem asub töö lõpus, lisas nr 4.

Skoori arvestamiseks kasutatakse peenhäälestatud valemeid, mis koosnevad järgmistest parameetritest:

1. Välimus – Kohtunike poolt antud subjektiivne hinnang skaalal 1...100.
2. Mass – Võistlusel mõõdetav silla mass kilogrammides.
3. Ülesseadmise aeg – Aeg, mille jooksul võistkond suudab silla teatud protseduuride kohaselt võistlusel üles seada, arvestatud minutites.
4. Siirded – Mõõdetud deformatsioonid koormamisel. Summa horisontaalsest ja vertikaalsest siirdest millimeetrites.

Kõige väiksemate trahvipunktidega võistkond võidab üldarvestuses. Trahvipunkte saab vähendada ka sellega, et saavutatakse mõnes aspektis võistluse parim tulemus ning ajalooline rekord. Ideaalne sild on punktiarvutuste kohaselt väga ilus, väga kerge, kiiresti koostatav, vastab täielikult reeglitele ja koormamisel paindub läbi mitte alla-, vaid ülespoole. Võidule aitab kaasa see, kui võistkond on korduvalt harjutanud silla kiiresti kokku panemist ja jätab kohtunikele endist hea mulje.

1.3.2 Isiklik kogemus ja õppetunnid

2019. aasta BRICO võistluse jaoks projekteerisime meeskonnaga nelikanttorudest silla, millega saavutasime üldarvestuses II koha. See oli struktuurselt efektiivne ja omapärane, kuid jäi esteetika poolest konkurentidele alla, vt sele 1.3.2.1. Sel korral sean eesmärgiks võimalikult vähe toruraame kasutada ning koguda palju rohkem punkte esteetika hindamisel. Silla lõikasime, puurisime, neetisime, keevitasime ja värvisime iseseisvalt, kasutades mehaanika ja tööstustehnika instituudi laboreid ja töökoda. Ise ehitamise tõttu olid tootmisest tulenevad ebatäpsused üsna suured. Sel korral arvestan projekteerimisel sellega, et oleks võimalikult vähe võimalusi ebatäpselt või valesti teha. See omakorda eeldab erinevate tootmistehnoloogiate eripärade tundmist, palju põhjalikemaid tootmisjooniseid ja süsteemset kvaliteedijuhtimist töö jooksul. Esimese silla tootmine oli iteratiivne protsess – ehituse käigus sai tehtud muudatusi konstruktsioonis, kuna alles tootmise käigus avastasime paremaid lahendusi. Seekord tagan, et kogu protsess on süsteemne ja tulemus vastab täpselt projektile; tootmise käigus muudatusi ei tee.



Sele 1.3.2.1. 2019. aasta meeskond Lovers ning projekteeritud sild "Titanic 2". Vasakult: Anni Evard, Paul Nael, Jürgen Tammepärg, Kristina Volkova, Henri Palm

1.4 Lehtmetalldetailide tootmise iseärasused

Eelmises peatükis seadsin eesmärgiks vältida toruraame. Terrassilla puhul on mõistlikuks alternatiiviks lõigatud ja painutatud lehtmetallist detailid. Selleks, et lõpptoote kvaliteet vastaks soovitud, on vaja arvestada teatud tehnoloogiliste eripäradega. CAD-mudel

võib näha välja ilus ja olla korrektne, kuid on vaja teada, mida on füüsiliselt võimalik toota. Kui projekteerija ei tea, kuidas täpselt tootmine käib, on tagajärgi kahte liiki:

1. Heal juhul tuleb tootja poolt viisakas kõne ja soovitused, kuidas paremini projekteerida ning mis on tehniliselt üldse võimalik valmis teha.
2. Halvemal juhul tarnitakse toodetud detailid, mis on täiesti kasutuskõlbmatud või soovimatute deformatsioonidega. Tootja üldjuhul ei tea, kuidas klient toodangut kasutab, vaid järgitakse lihtsalt joonisele märgitud nõudeid.

Käesolevas peatükis annan ülevaate, mida pidada silmas, kui projekteerida lõigatud ja painutatud lehtdetalle.

1.4.1 CNC-lõiketehnoloogiad

Terasest detailide tootmisel on esimeseks operatsiooniks üldjuhul tooriku lõikamine sobivasse suurusesse ja kujusse. On mitmeid erinevaid lõiketehnoloogiaid, kuidas seda teostada. Ka käsitsilõikus on teatud juhtudel hea valik, kuid sageli on täpsem ja ökonoomsem kasutada arvjuhtimise (*CNC - Computer Numerical Control* [4]) teel lõikamist. Sõltuvalt materjalist ja paksusest on valida erinevate lõiketehnoloogiate vahel:

Plasmalõikusel (*Plasma cutting*) kuumutatakse gaasi kõrgete temperatuurideni, et see muutuks plasmaks. Suurel kiirusel juhitakse plasma tõrviku kaudu lõigatavale lehele ning sulatatakse lokaalselt tekkiva elektrihaare tõttu. Sellest tulenevalt saab plasmalõikust kasutada elektrit juhtivate materjalide lõikamiseks, näiteks terased, alumiinium, vask, messing jms. Plasmalõikuse eeliseks on võime lõigata plaate paksusega kuni 150-200 mm ning võrdlemisi hea hinna ja lõikeserva kvaliteedi suhe teatud paksuste puhul. Puudusteks on see, et lõikeserval muutuvad kõrgete temperatuuride tõttu mehaanilised omadused ning see termomõjutsoon on suurem kui näiteks laserlõikuse puhul. [5]

Vesilõikus (*Waterjet cutting*) on lõikusviis, kus ülikiire peen veejuga kulutab materjali; lõikus on olemuselt kiirendatud erosioon. Veejoas võivad olla peened abrasiivosakesed, mis aitavad lõikust kiirendada. Vesilõikustehnoloogia eelisteks on termomõjutsooni puudumine, võimalus lõigata peaaegu kõiki materjale ja kõrge täpsus. Puudusteks on aeglasema lõikuse tõttu kõrgem hind. [6]

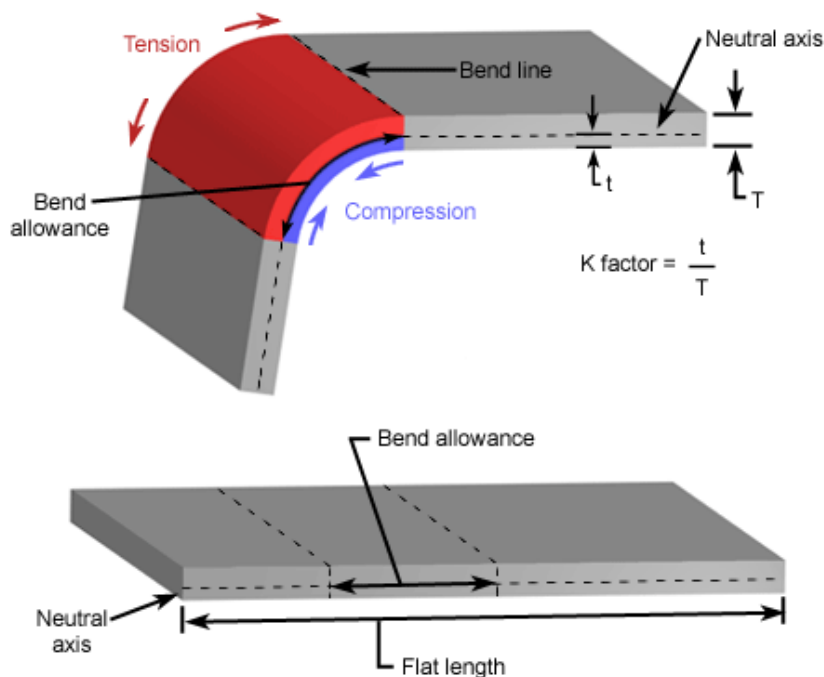
Laserlõikuse tehnoloogiad jagunevad kaheks – CO₂ laser ja fiiberlaser. Esimesel juhul kasutatakse resonatorit, peegleid ja läätsesid, et laserkiir suunata materjali lõikuseks.

Fiiberlaser seevastu on moodsam süsteem, mis kasutab kiudoptilisi kaableid. Üldpõhimõte on mõlemal sarnane – suunata kõrge intensiivsusega valguskiired ühte punkti, mille tõttu materjal kuumeneb, sulab ja aurustub. [7] Laserlõikuse eelisteks on lõikekiirus, täpsus ja võime erinevaid materjale lõigata ja graveerida. Puuduseks on see, et materjale, mis on liiga peegeldavad, ei saa teatud juhtudel lõigata. Samuti ei ole see parim tehnoloogia, et lõigata paksemaid lehti. [8]

Gaasilõikusel suunatakse hapnikujuga eelkuumutatud metallile. Juga süttib ning kõrged temperatuurid võimaldavad selle abil metalli lõigata. Eelisteks on kiirus ja võime lõigata paksu materjali – kuni umbes 150 mm. Puuduseks on see, et lõige toimub tänu oksüdeerimisprotsessile, mistõttu sobib vaid raudmetallidele. [9]

1.4.2 Painutusraadius, k-faktor ja minimaalne flantsipikkus

Lehtmetalli painutamisel toimub siseraadiuse pool materjali kokkusurumine ja välisraadiuse pool venitamine, vt. sele 1.4.2.1 (*Compression – surge, Tension – tõmme*). See, kui palju on võimalik ilma purunemiseta seda venitada ja kokku suruda, sõltub materjalist ja selle paksusest. Vastavad andmed lubatud painderaadiuste kohta tuleb leida enne projekteerimist. Sõltuvalt tootjate masinapargist ja painutamise tehnoloogiast võivad lubatud raadiused erineda. Liiga väikeste raadiuste puhul on vaja võimsamat painutuspinkki ning materjal võib rebeneda. Liiga suurte raadiuste puhul ei pruugi leiduda vastavas mõõdus painutustööriistu või peaks kasutama muid tehnoloogiaid, näiteks valtsimist.



Copyright © 2009 CustomPartNet

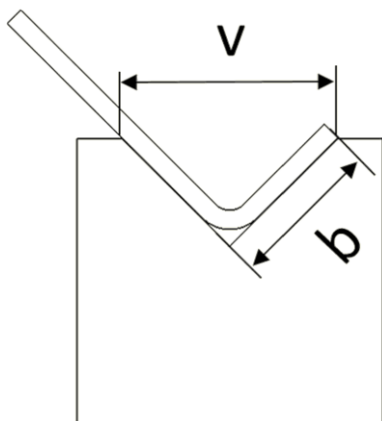
Sele 1.4.2.1 Metalli painutamisel kasutatavad terminid ning surve- ja tõmbepinged materjalis [10]

Lisaks painutusraadiusele peab arvestama ka painutusvaruga (*Bend allowance*). See on parameeter, mis korrigeerib pinnalaotusel seda, kui palju materjali on painutuskoha ümbruses. Painutusvaru arvutab CAD-süsteem üldiselt ise ning genereerib ka painutatud detaili jaoks õige pinnalaotuse, kuid on hea meeles pidada, et detaili painutamisel peab pinnalaotuselt maha arvestama teatud hulga materjali. Selleks, et tarkvara saaks pinnalaotust vastavalt painutusvarule täpselt korrigeerida, peab andma sellele k-faktori. See on parameeter, mis kirjeldab, kus asub painutamisel neutraaltelg (*neutral axis*, vt sele 1.4.2.1) ehk kui palju painde seespool materjali kokku surutakse ja kui palju väljaspool venitatakse. K-faktori arvutamiseks ei ole lihtsat valemit, selle väärtus põhineb katseandmetel. Enne pinnalaotuste saatmist peaks tootjalt uurima, mis antud materjali, paksuse ja painutusraadiuse puhul see väärtus on. Kuna K-faktor mängib rolli vaid pinnalaotuste genereerimisel, siis saab seda muuta ka projekteerimise käigus. Tabelis 1.4.2.2 on üldkasutatavad väärtused alumiiniumi ja terase puhul.

Tabel 1.4.2.1 Alumiiniumi ja terase K-faktori väärtused sõltuvalt materjalipaksusest ja painderaadiusest. [11]

Generic K-Factors	Aluminum		Steel
	Soft Materials	Medium Materials	Hard Materials
Radius			
Air Bending			
0 to Thickness	0.33	0.38	0.40
Thickness to 3x Thickness	0.40	0.43	0.45
Greater than 3x Thickness	0.50	0.50	0.50
Bottoming			
0 to Thickness	0.42	0.44	0.46
Thickness to 3x Thickness	0.46	0.47	0.48
Greater than 3x Thickness	0.50	0.50	0.50
Coining			
0 to Thickness	0.38	0.41	0.44
Thickness to 3x Thickness	0.44	0.46	0.47
Greater than 3x Thickness	0.50	0.50	0.50

Minimaalne flantsipikkus on vajalik, et oleks võimalik teostada painutamine ilma, et materjal deformeeruks mittesoovitud viisil. Ka kõik avad, näiteks poltide jaoks, peaksid paiknema painutuskohast kaugemal kui see minimaalne pikkus, muidu võivad avad ovaalseks muutuda. Selel 1.4.2.2 on illustreeriv skeem lehest ja matriitsi soonest pärast põhjasurumiseiga painutust. See näitab, miks on vajalik minimaalne flantsipikkus b .



Sele 1.4.2.2 Skeem painutatud detaili ja templiga. V – matriitsi soone laius, b – minimaalne flantsipikkus. [12]

Järgnevas näites kirjeldan, kuidas ma antud töös need parameetrid selgeks teen. Plaanin kasutada terast S355MC paksusega 3 mm. Materjali valikuks vt peatükk 2.2.2. Valin tabelist 1.4.2.3 lähima soovitud painderaadiuse ning teen kindlaks, mis peaks olema projekteerimisel minimaalne servapikkus ja painutuspingi võimsus. Taoliseid tabeleid leiab vahel ettevõtete veebilehtedelt või saab neilt seda küsida.

Tabel 1.4.2.2. Metalli painutamise tonnaaži tabel. V – matriitsi soone laius, b – minimaalne flantsipikkus, ir – painutusraadius, t – materjali paksus, tabeli sisu – painutuspingi tonnaaž [13]

t	V	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	320	400	500	
b	4	5.5	7	8.5	11	14	17.5	22	28	35	45	55	71	89	113	140	175	226	280	350		
ir	1	1.3	1.6	2	2.6	3.3	4	5	6.5	8	10	13	16	20	26	33	41	53	65	83		
0.5	4	4																				
0.8	4	5.5	7																			
1	11	8	7	6																		
1.2	16	12	10	8	6																	
1.5		17	15	13	9	8																
2			27	22	17	13	11															
2.5				35	26	21	17	13														
3					38	30	24	19	15													
4						54	42	34	27	21												
5							67	52	42	33	26											
6								75	60	48	38	30										
8									107	85	68	53	43									
10										134	105	85	67	53								
12											153	120	96	78	60							
15												188	150	120	95	75						
20														215	170	135	108	85				
25															265	210	170	130	105			
30																300	240	190	150	120		

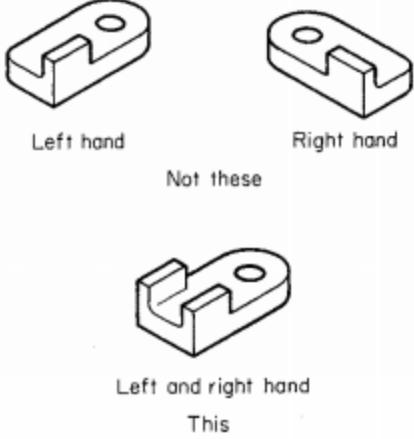
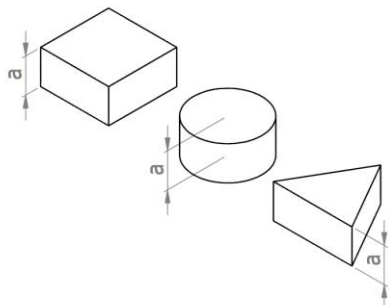

3 mm paksuse terase siseraadiuseks võin vabalt võtta ka 3 mm. Tabeli 1.4.2.3 kohaselt on sellisel juhul minimaalne flantsipikkus 14 mm. Eestis leidub kindlasti tootjaid, kelle masinapargis on painutuspinke võimsusega 30 tonni või enam. Projekteerimise käigus pean silmas pidama, et painutuskoha ääres paiknevad lahtised servad oleksid kindlasti enam kui 14 mm kaugusel. K-faktoriks valin esialgu 0,5 ning töö käigus korrigeerin seda vastavalt tootmispartneri soovitusetele.

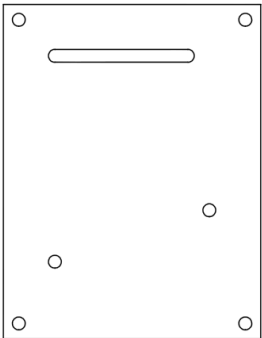
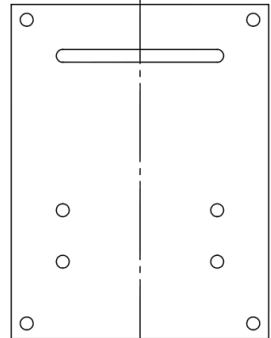
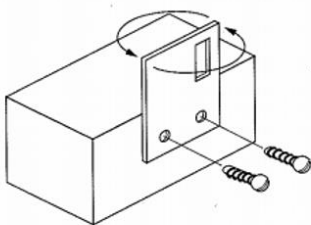
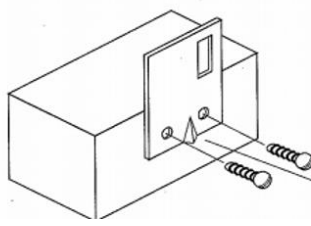
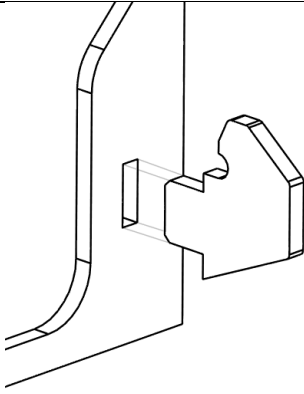
1.5 Tootmiskeskse projekteerimise põhitõed

Tootmissõbralikkus ja tootmiskeskne projekteerimine (*Design for Manufacturability*) on filosoofia ja kogum võtteid, kuidas projekteerimise faasis tagada, et tootmine oleks võimalikult kiire ja kuluefektiivne. Projekteerija ei tohi mõelda "Mina mõtlesin välja, mida teha, nüüd peab tootmisinsener nuputama, kuidas see asi saaks mõistliku hinnaga toodetud". See on kehv mõtteviis. Hea disain on selline, mis arvestab tootmistingimusi, partiid ja tööjõu- ja materjalikuluseid. See mõtteviis ongi tootmiskeskse projekteerimise alus. [14] Juhiseid ja meetodeid, kuidas konkreetselt seda rakendada, on palju ning erinevate tootmistehnoloogiate jaoks tuleb kasutada erinevaid võtteid. Näiteks täppisvaluga toodetavate detailide disainis tuleb kasutada hoopis teistsuguseid põhimõtteid kui CNC-lõikuse või 3D-printimise puhul.

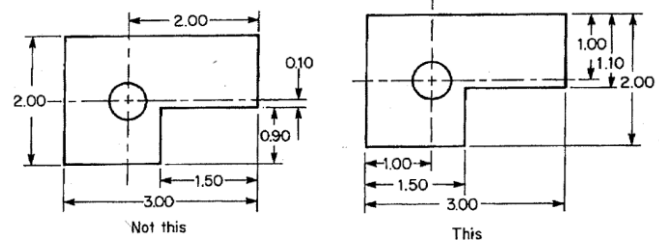
Selleks, et tagada kiire ja efektiivne tootmine ning vältida defekte, kavatsen käesolevas töös kasutada tabelis 1.5.1 olevaid meetodeid:

Tabel 1.5.1 Tootmiskeskse projekteerimise meetodid käesoleva töö jaoks

Kirjeldus	Illustratsioon
<p>Hoida erinevate detailide hulk väiksenä ehk taaskasutada juba projekteeritud detaile mitmes kohas.</p>	 <p>Sele 1.5.1. Kahe erineva detaili asendamine ühe universaalse detailiga, mis täidab mõlema funktsiooni. [15]</p>
<p>Kasutada võimalikult palju samu materjale ja lehepaksuseid</p>	 <p>Sele 1.5.2 Illustreeriv näide detailidest, mis on sama materjali ja paksusega.</p>
<p>Minimeerida erinevate töötlemisoperatsioonide hulka. Illustreerival näitel on vasakul detail, mis vajab materjalieemaldust lõiketöötusega mõlemalt poolt, seega mitut ülesseadmist. Paremal oleva detaili saab lõigata ühe operatsiooniga. NB! Näide kehtib vaid lõiketöötuse puhul (näiteks freesimine).</p>	 <p>Sele 1.5.3 Näide, kuidas lõiketöötlemisoperatsioone vähendades saab toota soodsamalt.</p>

<p>Projekteerida detailid täielikult sümmeetrilised (või ilmselgelt ebasümmeetrilised), et vähendada võimalust kogemata detaile valepidi paigutada.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>PEAAEGU SÜMMEETRILINE.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>SÜMMEETRILINE.</p> </div> </div> <p>Sele 1.5.4. Võimalusel teha detailid täielikult sümmeetrilised, et poleks võimalust paigutamisel eksida.</p>
<p>Tagada, et poleks füüsiliselt võimalik valesid komponente ega komponente valesti omavahel kokku sobitada.</p>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 20px;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Not this</p> <p>Slot should be on the right but plate can be fastened with it on the left.</p> <p>Screws</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>This</p> <p>Raised section prevents part from being fastened backwards.</p> <p>Bent raised section</p> </div> </div> </div> <p>Sele 1.5.5 Näide, kuidas tagada, et komponente saaks koostada saab vaid ühtainsat moodi. Ülemisel illustratsioonil on võimalik plaati ka valepidi kinnitada. Alumisel illustratsioonil saab enduva tükke tõttu paigutada vaid õigetpidi. [16]</p>
<p>Minimeerida vajadust rakiste jaoks keevitusel, lõiketöölusel ja muudel operatsioonidel. Illustratsioonil on näide, kuidas kaht detaili saab omavahel tapi ja avaga täpselt ja kiirelt positsioneerida.</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Sele 1.5.6. Näide, kuidas tappide ja avade (Tab and slot) abil detaile kiiresti positsioneerida.</p>

Vormistada joonised, mis on hõlpsasti loetavad, üheselt mõistetavad ja piisavalt informatiivsed.



Sele 1.5.7. Mõõtmed joonisel peaksid lähtuma võimalusel samadelt daatumitelt ning olemasolevast geometriast, mitte "tühjast õhust". [17]

1.6 Lõplike elementide meetod

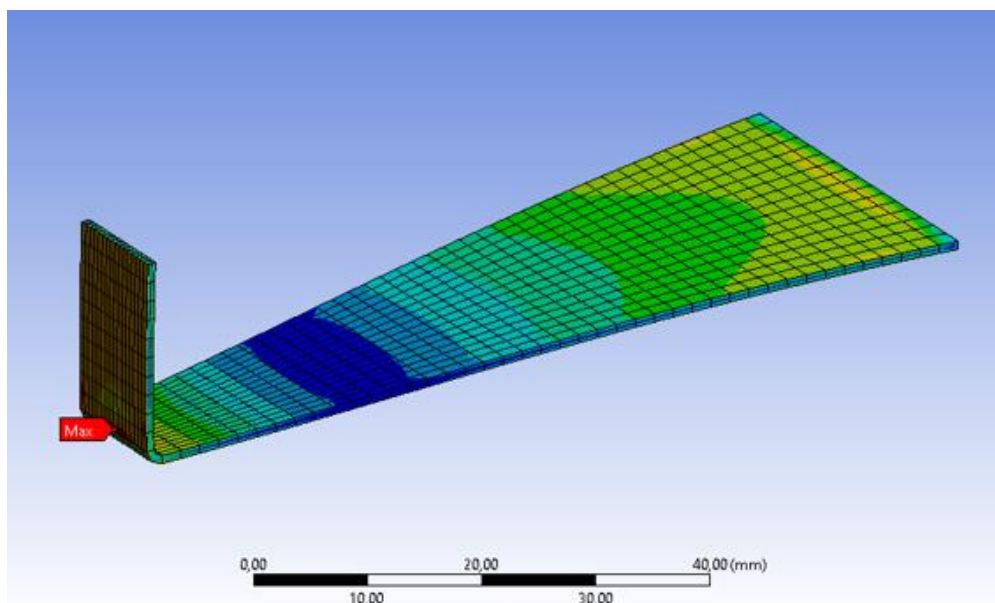
LEM ehk lõplike elementide meetod on laialt levinud numbriline arvutusmeetod, mis aitab lahendada insenertehnilisi probleeme. LEM-arvutustega saab näiteks hinnata soojuslevi, vedelike voolamist ja magnetvälju ning, antud töö puhul, analüüsida konstruktsioonides tekkivaid pingeid ja deformatsioone. Tarkvara, mida kasutatakse erinevate tugevusarvutuste ja analüüside teostamiseks, põhinebki peamiselt lõplike elementide meetodil. [18]

LEM on lihtsustatult selgitades meetod, kus jagatakse arvutusmudel väikesteks elementideks. Igale elemendile teostatakse arvutused, lahendatakse diferentsiaalvõrrandid ja sobitatakse tagasi suurde võrrandisüsteemi. Täpsema tehnilise kirjelduse saab näiteks teosest [19]. LEM-i abil saab analüüsida elementidevahelisi sõlmpunkte ning hinnata tekkivaid pingeid ja deformatsioone. Lihtsamaid ülesandeid saab lahendada lõplike elementide meetodiga ka paberi ja pliatsiga. Tasakaalutingimused kirjutatakse selle meetodi puhul maatriksi kujul, mistõttu keeruliste probleemide analüüsimiseks on otstarbekas kasutada käsiarvutuste asemel spetsiaalseid arvutusprogramme.

Ülesanded, mida LEM abil saab lahendada, võivad olla lihtsast tala tugevusarvutusest kuni komplekssete süsteemideni välja. Alati tasub aga tarkvara abil ülesande ülesseadmisel ning tulemuste hindamisel olla väga korrektne ja kriitiline. Vead geometrias, valesti seatud rajatingimused, valesti seatud kontaktpinnad ja lülid, ebapiisava täpsusega elementide võrgustik, mittesobiv arvutussüsteem ja mitmed muud tüüpilised vead põhjustavad selle, et arvutustulemust ei saa võtta tõsiselt. Soovitav on võimalikult palju arvutusi lihtsustada, näiteks valida kas joonkehade (1D)

või pindkehade (2D) analüüs, eemaldada ebaoluline geometria või (telg)sümmeetrilise objekti puhul lahendada vaid üks pool või veerand.

Elementide hulk peab olema piisav, et tulemus oleks täpne. Kui geometria on liiga keeruline, peab elementide võrgustikku (*ingl. k Mesh*) mõnest kohast peenemaks muutma. Liiga suur elementide hulk aga seevastu suurendab arvutusele kuluvat aega. Seel 1.6.1 on kujutatud LEM-analüüsi tulemusel põhinevat pingete jaotumise skeemi ja elementide võrgustikku.



Sele 1.6.1. Tarkvarapõhise analüüsi tulemus (ANSYS Mechanical). Illustreeriv näide, kuidas LEM abil saab hinnata pingete jaotumist koormusolukorras.

Käesolevas töös kasutan analüüside teostamiseks ANSYS Mechanical tarkvarapaketti. Plaanin analüüsida staatilisel koormusolukorral tekkivate pingete jaotumist, deformatsioone, nõtkumist ning teostada jäikuse ja massi optimeerimist. Seda, milliseid ülesandeid lahendan ning kuidas arvutused üles sean ning tulemusi hindan, saab lugeda peatükis 3 – Valideerimine.

2. PROJEKTEERIMINE

2.1 Töö fookus ja eesmärgid

Kuna on BRICO 2020 võistluse jaoks on arvuliselt võimalik ennustada lõpp-skoori, siis koostasin reeglite põhjal arvutustabeli, vt tabel 2.1.1. Nii saan võrrelda, mis on erinevate aspektide (mass, siirded, esteetika, ülesseadmise aeg) kaalud ja kus oleks mõistlik teha järeleandmisi, et koguda võimalikult vähe trahvipunkte. Näiteks juhul kui skooriarvestuses on suurem osakaal massil ja väiksem siiretel, siis on mõistlik valida õhem materjal ja lasta sillal natuke rohkem läbi vajuda. Mõistlik on ka keskenduda konkreetsetele aspektidele, sest parim tulemus vastavas kategoorias võtab ühe trahvipunkti vähemaks. Kui saavutada kõikide aastate lõikes parim tulemus, siis vähendab see trahve veelgi, seega on väga tasuv proovida ületada võistluse rekordeid.

Tabel 2.1.1. Osa arvutustabelist, mille abil saan hinnata disainiotsuste kaalu võistluse trahvipunktidenä. Kollasega märgitud lahtritesse saab sisestada arvulisi sisendeid, rohelisega märgitud lahter näitab võistlusel saadavaid trahvipunkte. Võitja on meeskond, kes saab kõige vähem trahvipunkte.

PERFORMANCE AT COMPETITION		
DISPLAY SCORE (1...100)	94	<i>Record to beat: 93,8</i>
MASS (kg)	60	<i>Record to beat: 43</i>
ASSEMBLY TIME (min)	3	<i>Record to beat: 10,92</i>
HORIZONTAL DISPLACEMENT (mm)	5	<i>Record to beat: 1,38</i>
VERTICAL DISPLACEMENT (mm)	-5	<i>(ver + hor)</i>
NO. OF CATEGORY WINS	3	
NO. OF RECORDS BEATEN	3	
PENALTIES		
P1. TOTAL GEOMETRY VIOLATIONS (mm)	0	
P2. TOTAL ELEMENT SIZE VIOLATIONS (mm)	0	
P3. ELEMENT / SUPPORT COLLAPSE DURING CONSTRUCTION	0	
P4. TOOL, FASTENER, EQUIPMENT DROPPED. STEPPED INTO RESTRICTED AREA	0	
P5. THROWING TOOLS OR FASTENERS	0	
P6. AMOUNT OF LOOSE BOLTS	0	
P7. LOCAL DISPLACEMENT OVER 4 mm WHEN 35 kg APPLIED	0	
RESULTS		
CONSTRUCTION ECONOMY	2,53	
STRUCTURAL EFFICIENCY	17,26	
OVERALL	16,19	

Käesolevas alapeatükis selgitan, milline võiks olla võistlussild, mis kogub kõige parema skoori. Selleks võrdlen massi, siirdeid, esteetikat ja ülesseadmise aega ning kui palju need panustavad lõppskoori. Teen selgeks, millistele neist aspektidest on mõtet keskenduda ja millised on vähem olulised.

2.1.1 Uudne struktuurne lahendus

Esimese kompromissi leian esteetika ja tehnilise lahenduse vahel. Sajandeid sillaprojekteerimist on tõestanud, et kaarsillad on väga efektiivsed ja vastupidavad. Just seetõttu on valdav osa kogenud BRICO meeskondadest valinud selle lähenemise, kus moodulelemendid moodustavad kaare. Et paista silma teistsuguse lahendusega ning koguda punkte uudsusega, peaks projekteerima teistsuguse kujuga struktuuri. See võib tuua kaasa suurema massi, kuna kaarsilla suurepärasest massi ja kandevõime suhet on antud võistluse kontekstis keeruline teistmoodi saavutada. See-eest võib omapärane disain tuua punkte esteetika hindamisel, millest saadud skoor kaalub üles lisamassist tuleneva trahvi.

Leian, mis on selle aasta punktiarvestuse kohaselt eelistatum variant. 2019. aastal osalenud sildade andmed on vabalt kättesaadavad võistluse internetilehel [20], tänu millele saan arvutada, mis variant sel aastal parema skoori tooks. Võrdlen ilusat, ent keskpärase massiga silda ning keskpärase välimusega, ent kerget silda tabelis 2.1.1.1.

- Tulbas A on hüpoteetiline ilus ja keskmise massiga sild. Esteetika real on 2019. aasta ilusaima silla skoor, massi real on kõikide sildade keskmine mass.
- Tulbas B on hüpoteetiline kerge ja keskpärase välimusega sild. Esteetika real on kõikide sildade keskmine esteetika hinne, massi real on kergeima kvalifitseerunud silla mass.

Kolmandal real on trahvipunktid, mida antud näitajad sel aastal tooksid, eeldusel, et kõik muu on võrdne.

Tabel 2.1.1.1. Massi ja välimuse võrdlus lõpptulemuse optimeerimiseks. Lähteandmed [20] *Täpsustuseks vt lisa 1

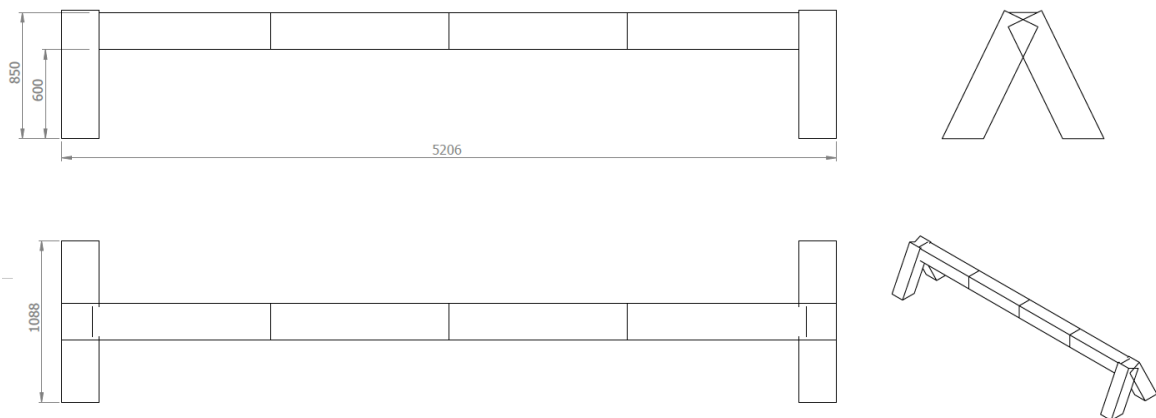
	A	B
	<i>Ilus ja keskpärase massiga sild</i>	<i>Kerge ja keskpärase välimusega sild</i>
Esteetika hinne (0-100)	93,8	75,4
Mass (kg)	70,4	59,4*
2020 trahvipunktid	33,5	39,5

Kuna trahvipunkte arvestades on mõistlikum keskenduda innovatsioonile, mitte liigsele optimeerimisele, siis otsustan pigem silmapaistva ja uudse disaini kasuks. Võistlus on eelkõige insenertehnilise iseloomuga, kuid väga oluline roll on ka esinduslikkusel. Tasub meeles pidada, et peale omapärase struktuuri tuleb esteetika võidu jaoks tagada ka kõrge kvaliteet tootmises. Kui projekteerimise käigus tuleb teha valik välimuse ja massi vahel, saan selle lahendada põhjendatult. Fookuseks valin kena välimuse, mitte massi. Eesmärk on saada 90 või enam punkte esteetika kategoorias.

2.1.2 Kiire ülesseadmise aeg

Teine fookus on hoida koostamise aeg, ja seega ka moodulite arv, võimalikult väiksena. Hetkel hoiab rekordit 2016. aasta meeskond Steel Eagle koostejaga 10 minutit. 2019. aasta võistkond ktuBulls seadis oma silla üles vähem kui 2 minutiga, kuid kahjuks diskvalifitseeriti liigse vertikaalse siirde tõttu koormamisel. Mõlema silla üldkontseptsioon oli sarnane ning konkurentidest selgelt eristuv sellega, et moodulite arv on märkimisväärselt madalam. Samuti pole kumbki sild traditsiooniline kaarsild, vaid jalgadele toetuv modulaarne tala või sõrestik. [21] [22]

Reeglitega on piiratud ühe mooduli lubatud gabariitmõõtmed, milleks on 1200x250x250 mm. Visandan eskiisi, kuidas võimalikult vähese moodulite hulgaga saaks reeglitele vastava kandva struktuuri, vt sele 2.1.2.1



Sele 2.1.2.1. Eskiis võimalikult väheste moodulitega lahendusest.

Minimaalselt on eskiisi näitel võimalik projekteerida sild 8 mooduliga – 4 jalga ja 4 tekimoodulit. Võrdluseks – 2019. aasta võistlusele projekteerisime silla, millel oli 70 moodulit. Võistlusel seadsime selle silla üles 16 minutiga, kogu võistluse tiimide keskmine aeg oli 18 minutit. Ülesseadmise kiirusel on väga suur osa skooriarvestuses - kui kiiruse saaks 15 minuti pealt alla 3 minutini, on see skoori poolest umbkaudselt võrdne sellega, kui saaks massi 28 kg võrra kergemaks (*Arvutuskäiguks vt lisa 2*). Sellisel juhul oleks garanteeritud ka 2 trahvipunkti eemaldamine, sest 3 minuti saavutamine oleks ajalooline rekord (eeldusel, et konkurendid ei leia veelgi kiiremat lahendust).

8 mooduliga lahendus ei ole tingimata parim. Järgnevad asjaolud annavad põhjust mooduleid lisada.

- Lubatud mass ühel elemendil on 7 kg. Eelistatud on muuta liiga raske moodul kaheks tükiks, mitte saada 2 trahvipunkti reegli rikkumise eest.
- Selel 2.1.2.1 illustreeritud näites peavad jalad asuma vertikaalselt, kuna peaksid moodustama osa tekist. Kui seada jalad sissepoole kaldu, suudaksid need struktuuri palju paremini toetada ja siirded oleksid väiksemad. Sel juhul on vaja lisada tekile vähemalt üks lisamoodul.
- 4 mooduliga teki puhul jääks ühenduskoht täpselt keskeljale ehk sinna, kus koormus kõige suurem on. On ebasoovitav, et ühenduskoht asub seal, kus on oodata suurimaid pingeid. Ühe mooduli lisamine keskele annab võimaluse selleks, et põhikoormuse 750 kg saaks jaotada ühenduskohtadeta alale.

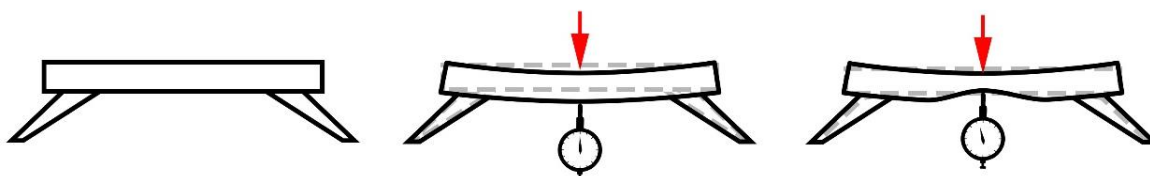
- Koormus on väga suur (1000 kg), mis jaotub üsna kitsale alale (250 mm). Ohutuse seisukohast oleks soovitatav, et koormatav koht oleks toetatud laiemalt. Lähemalt ohutuse kohta vt peatükk 2.2.8.

Eesmärk on hoida moodulite arv eelistatult alla 10 ning ülesseadmise aeg alla 3 minuti.

2.1.3 Negatiivne vertikaalne siire

Siirdeks nimetatakse konstruktsioonelemendi mingi punkti või sirge asendi muutust oma algasendi suhtes. [23] Ei ole vaja tehnilist kõrgharidust mõistmiseks, et koormuse rakendamisel sillale vajub koormatav punkt allapoole, mitte üles. Käesolev alapeatükk kirjeldab, miks ja kuidas võiks saavutada olukorra, kus silla siirde mõõtmisel annab mõõtevahend negatiivse tulemuse.

Siiret mõõdetakse BRICO võistlusel silla kesktasandilt. 2019. aasta võistlusel mõõdetud sildade keskmine vertikaalne siire oli 6,35 mm. Punktiarvestuse, reeglite ja mõõtmise protseduuride kohaselt ei ole välistatud see, et võiks toimuda ka negatiivne siire. Seni ei ole ükski võistkond suutnud seda teoks teha, sest ilmselt ei ole leitud reeglitele vastavat tehnilist lahendust. Kuigi võib kõlada uskumatult, et sild koormuse tõttu ülespoole hakkab vajuma, usun ma, et see on reeglite piires võimalik ning sean selle endale eesmärgiks. Punktiarvestuses tooks see konkurentsisis tohutu edu ning rekordi vastavas kategoorias. Füüsikaseadusi ma murda ei kavatse, vaid lihtsalt kasutada ära võimalusi, mida konstruktsiooniterase elastsed omadused ning võistlusreeglid teha lubavad. Töö käigus teen selgeks, kuidas toimub vertikaalse siirde mõõtmine ning kas saan tekitada kontrollitud lokaalse deformatsiooni kellindikaatori asukoha juurde, vt sele 2.1.3.1.



Sele 2.1.3.1. Illustratsioon, kuidas võiks lokaalselt deformeeruv punkt konstruktsioonis tekitada olukorra, et mõõtekell näitab siiret negatiivsena. Vasakul koormamata sild. Keskel koormatav sild. Paremal koormatav sild, millel on mõõdetav asukoht ülespoole deformeerunud.

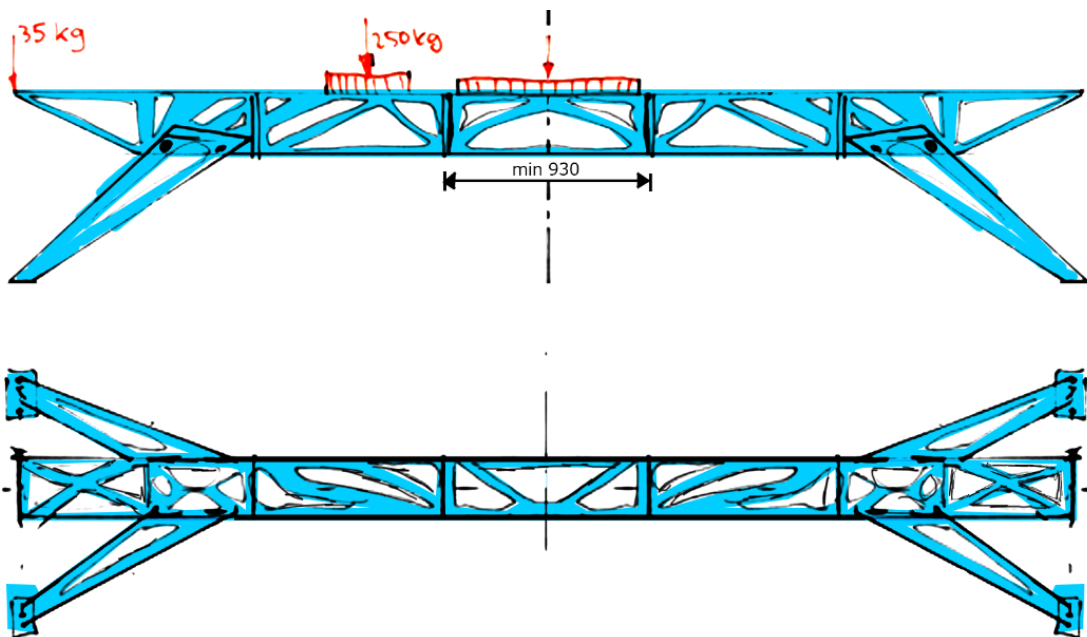
Skooriarvestuse poolest tooks selle eesmärgi saavutamine tohutult suure edu. 2019. aasta keskmine vertikaalne siire oli 3,7 mm (jättes arvestusest välja liigse siirde tõttu diskvalifitseeritud meeskonna). Kui 3 mm vertikaalse siirde asemel oleks see -3 mm,

vähendaks see trahvipunkte 9,6 võrra. Ilmselt tagaks see ka ajaloolise rekordi võistlusel, mis vähendaks trahve veel 2 punkti võrra. Negatiivse siirde saavutamine on punktide poolest umbkaudselt võrdväärne sellega, kui suudaksin kogu silla massi vähendada 25 kg võrra. Eesmärk on mõelda välja ja projekteerida meetod, kuidas seda saavutada.

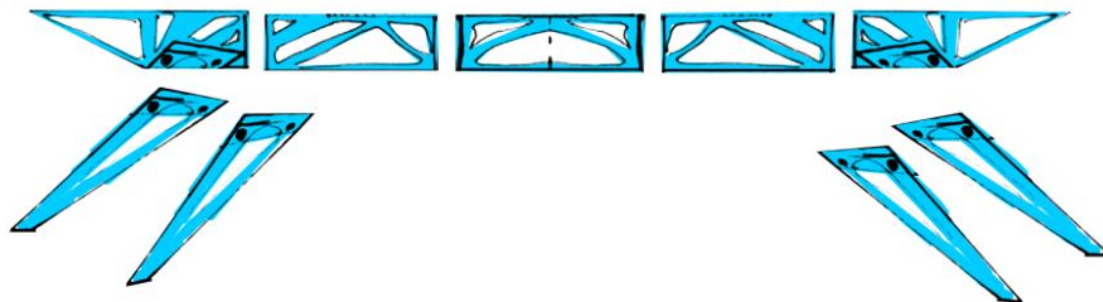
2.2 Tööprotsess

2.2.1 Kontseptsioon ja kavand

Peatükis 2.1 seatud eesmärgid on vaja ühte kavandisse kokku tuua. Nendeks on omapärane välimus, kiire koostamine ja negatiivne vertikaalne siire. Kõige olulisem on tagada kiire ülesseadmine, sest nii saab kõige rohkem trahvipunkte vältida. Sellest tulenevalt hoian moodulite arvu võimalikult väiksena. Kavandi joonestamisel sai kohe selgeks, et tekist kõrgemale ei ole mõtet mooduleid panna, sest see lahendus nõuaks oluliselt suuremat elementide hulka. Seel 2.2.1.1 ja 2.2.1.2 on esimene visand lahendusest, millega otsustasin edasi minna. Mooduleid on 9 ning nende suuruste valikul on arvestatud, kuidas koormused võistlusel jaotuvad kõige halvemal juhul ehk kui lisakoormus 250 kg asub kõige lähemal keskosale. Väljavõtte reeglitest koormamise asukohtadest on lisas nr 3. Keskmise mooduli pikkus peab olema vähemalt 930 mm, kui soovin kogu põhikoormuse ühele moodulile asetada. See on vajalik, et lihtsustada negatiivse siirde saavutamist.



Sele 2.2.1.1. Visand valitud lahendusest 9 mooduliga. Eestvaade ja pealtvaade.



Sele 2.2.1.2. Mooduliteks jagatud visand. Eestvaade.

Moodulite mõõtmed oleksid peaaegu maksimaalsed, mida reeglid lubavad. Olemuselt on lahendus 250x250x3 mm nelikanttoru, mis on tükkideks jaotatud ja neljast küljest erikujulisi avasid täis. See toetub neljale jalamoodulile, mis on keevitatud reeglites nõutud kinnitusplaatide külge. Kavandis olevad huvitava kujuga avad on topoloogia analüüsi abiga genereeritud kandev struktuur, mis tagaks lehtmetailstruktuurile parima jäikuse ja massi suhte. On oodata, et topoloogia analüüsi tulemuseks on orgaanilise välimusega küljed, mis toovad sillale huvitava välimuse ning ühtlasi täidavad struktuurset eesmärki.

Sild on eelkõige kiiresti koostatav, kuid tänu kaasaegsetele optimeerimisvõtetele võib ka massi tuua konkurentsivõimeliselt madalale. Sellise disainimeetodi abil saavutatud ilme on julge ja moodne. Kui kõigele eelnevale lisada ka kvaliteetne tootmine, hea esitlus ja maitsekas värvikombinatsioon, on sild võistluspäeval kahtlemata väga võimekas.

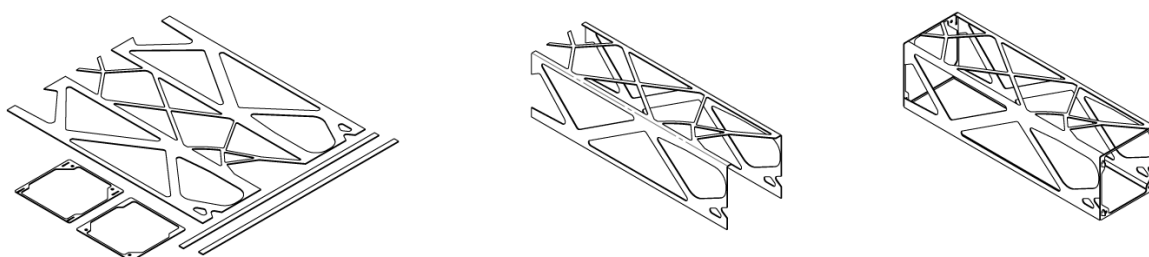
Puhtalt dekoratiivseid elemente ei ole plaanis konstruktsioonis sisse tuua. Auklikud küljed on piisavalt omapärased ning peamine esteetiline väljakutse seisneb sobiva värvitooni valikus ja selles, kuidas rõhutada silla enda loomulikke jooni. Pinnakatteks sobib pulbervärvimine. Pulpervärvitud pind on mehaaniliselt vastupidav ja valida on väga paljude värvitoonide seast. Silla pinnakatteks oleks sügavsinine metalse läikega toon.

2.2.2 Tootmistehnoloogiad ja materjal

Kavandist lähtuvalt valin peamised tootmistehnoloogiad. Eesmärk on kasutada võimalikult palju sama tootmistehnoloogiat ja materjale, et lihtsustada ja kiirendada tootmist. Tootmistehnika tuleb valida enne projekteerimist ja on vajalik teada, mis on üleüldse teostatav. Eelistada tuleks enimlevinud materjale ja uurida, kas antud mõõtudes on seda materjali saadaval. Näiteks 2019. aasta võistlusele sai projekteeritud

mõned 2 mm paksused lehtmetailid. Kuigi maailmas eksisteerib konstruktsiooniteras S355 paksusega 2 mm, siis Eestis ei ole alla 3 mm lehte saadaval ning tuli detailid uuesti projekteerida ja teostada tugevusarvutused.

Tootmistehnoloogiateks sobivad antud kavandile kõige paremini lehtmetaili laserlõikus, painutus ja keevitus. Laserlõikus on piisavalt täpne ja kiire ning keerukate lõikekontuuride tõttu on CNC-lõikus niikuinii vajalik. Tänu nelinurksele väliskujule on enamus painutustest võimalik teha 90-kraadised ja sama painutusraadiusega. Detailid saab omavahel täpselt kokku sobitada tappide abil (*ingl. k tab and slot*) ja lihtsate keevitusoperatsioonidega kokku liita. Selal 2.2.2.1 on näide tootmisoperatsioonide järjekorrast.



Sele 2.2.2.1. Tootmisoperatsioonide järjekord ühe mooduli valmistamiseks. CNC-laserlõikus, painutus, keevitus

Materjaliks valin konstruktsiooniterase S355MC, lehtmaterjalina paksusega 3 mm. Projekteerimise ja arvutamise käigus võib selguda, et mõnes kohas on vaja õhemat või paksemat lehte, kuid need oleksid erandjuhud. Juhul kui tugevusarvutused näitavad liigseid pingeid või nõtkeohtlikku olukorda, ei pea kohe paksemat materjali valima, vaid sobib ka tugevdusribide lisamine. Materjal S355MC sobib hästi painutamiseks, on lihtsasti keevitav ja Eestis üsna laialt levinud.

2.2.3 CAD-mudeli ülesseadmine

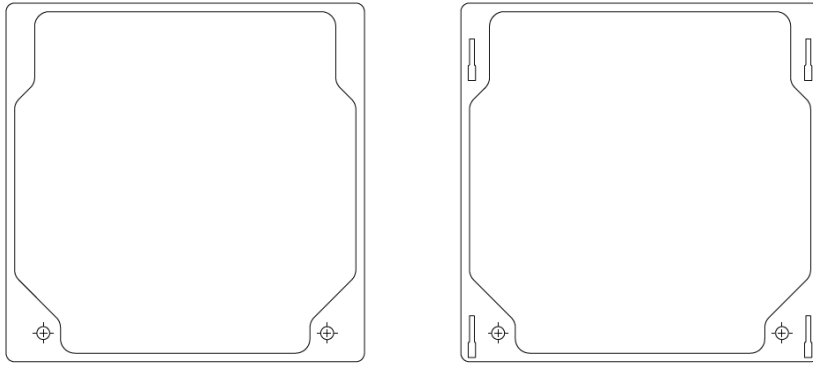
Projekteerimiseks ja jooniste vormistamiseks kasutan CAD-tarkvara Solidworks 2019, mis Tallinna Tehnikaülikooli tudengitele on tasuta kättesaadav. Tarkvara on sobiv antud projekti jaoks, sest sisaldab mitmeid tööriistu ja käsklusi spetsiaalselt metallkonstruktsioonide projekteerimiseks.

Enne kui mudeliga tööle hakkam, seadistan mallid (*templates*). Mall on olemuselt tühi fail, mis on eelseadistatud materjalide, ühikute, värvide, mõõtude komakohtade arvu, jooniste stiili ja muu taolise infoga. Antud projektis sean üles detaili (*Part*), koostu

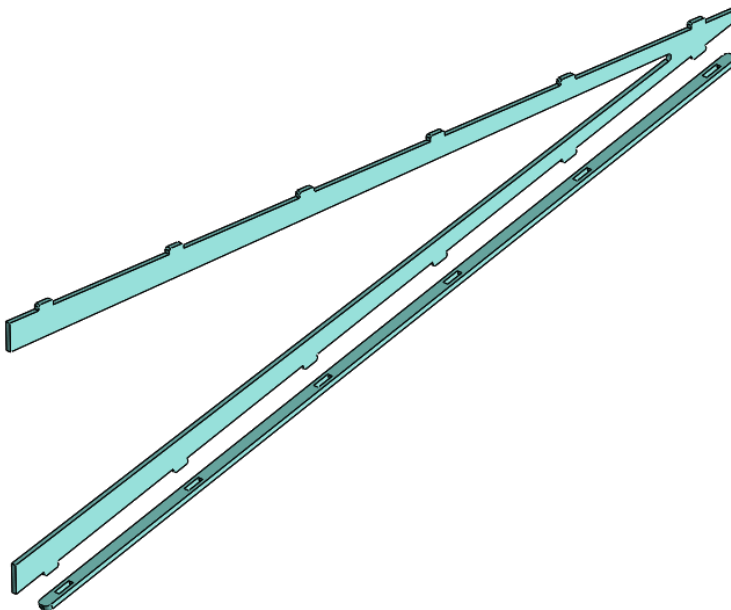
(*Assembly*) ja joonise (*Drawing*) mallid. Kuna detaile tuleb palju, siis säästab see kokkuvõttes palju aega. Mallid aitavad igat uut detaili ja koostu alustada kiiremini ning toovad info automaatselt joonise kirjanurka ja projekti tükitabelisse (edaspidi BOM – *Bill of Materials*) Kui mudelit veel muuta pärast joonise tegemist, kajastub see info ka koheselt joonisel. See hoiab ära lohakusvead ja muud inimlikud eksimused. Asjad, mille saab automaatselt määrata, peakski tegema automaatselt. Näiteks muutes ühes detailis materjali, kajastub see kõikides tabelites, kus antud detail on, ning ka mass arvutatakse kõikjal koheselt ümber.

Projekteerimisel kasutan top-down ja bottom-up meetodite kombinatsiooni. **Top-down** tähendab raalprojekteerimise maailmas lihtsustatult, et koost määrab individuaalsete detailide mõõtmed ja paiknemise. Muutes peakoostus ühte mõõtu (näiteks silla laiust), arvutab mudel kõikide detailide laiuse ümber ja genereerib uued detailid. Selline meetod ei sobi kõikjale ning nõuab palju vilumust ja teadmisi tarkvara kohta. Õigesti kasutades on top-down meetod väga võimas tööriist, mis võib säästa väga palju aega. **Bottom-up** meetod on enam levinud meetod, kus detailid on iseseisvad ja defineerivad ise kõik oma mõõtmed. Sedasi on palju vähem võimalusi eksimusi teha ning projekteerijal on parem ülevaade, et mudel oleks korrektselt üles ehitatud. Näiteks, kui oleks tarvis muuta silla laiust, peaks iga detaili eraldi laiemaks projekteerima.

See, et ma kombineerin ülalnimetatud meetodid, tähendab, et ma kasutan ühe detaili projekteerimisel täiesti teises koostus oleva detaili geomeetriat ning hiljem eemaldan nende omavahelised seosed. Näiteks seel 2.2.3.1 kujutatud detailid on erinevas alamkoostus ehk üksteisest täiesti eraldiseisvad komponendid. Selleks, et poldiavad ja seinad omavahel kattuksid, saan defineerida ühe detaili nii, et ta on otseses sõltuvuses teisest. Näiteks kui muudan poldiava asukohta ühel detailil, hüppab mudelis teise detaili poldiava samuti uude kohta. Kui need on projekteeritud, eemaldan omavahelised sõltuvused. Teine näide on tappide projekteerimise tööriist *Tab and Slot*. Ühele detailile tapid seades tulevad teisele detailile avad vastavasse kohta (vt sele 2.2.3.2). Selliseid käsklusi tuleb kasutada ettevaatlikult, sest kui detailide omavaheline asukoht nihkub, võivad tapid ja avad iseseisvalt hüppata mujale ja põhjustada probleeme.



Sele 2.2.3.1 Näide kahest erinevast detailist, mis on eraldi alamkoostudes, kuid peavad omavahel kokku sobituma.



Sele 2.2.3.2 Teine näide top-down meetodi rakendamisest. Selle asemel, et individuaalselt avasid ja tappe joonestada, saab anda koostus vastava käskluse. Illustreeritult 2 detaili, mis omavahel positioneeritakse tappide abil.

3D-mudeli hierarhiast pean kinni juba esimeste detailide loomisel. Esmalt loon koostu ning hakkasin sinna lisama alamkooste ja detaile. See, kuidas mudelis toimib detailide hierarhia, kajastub ka joonistel ja detailide nimetustes. Kui mudel on õigesti kokku pandud, on lihtne kajastada kogu toote infot ühes tükitabelis. Lisaks hoiab korrektselt üles ehitatud mudel kokkuvõttes palju aega kokku, kuna hoiatusi ja tehnilisi vigasid tekib vähem.

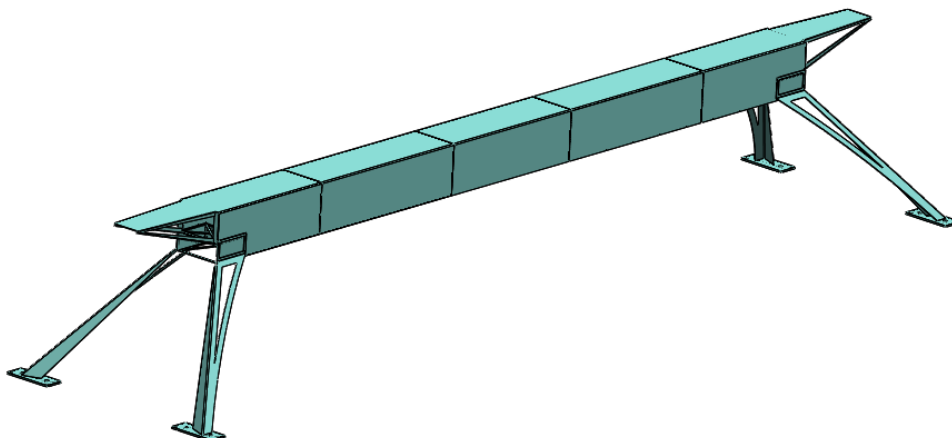
Käesoleval juhul koosneks peakoost moodulitest ja poltidest ehk nendest elementidest, mis võistluspäeval asfaldil kokkuseadmist ootavad. Alamkoostudeks on erinevatest kokku keevitatud detailidest moodulid. Detailiks on üks mooduli külg, tugevdusriibi,

keevismutter või painutatud plaat. Kõikide detailide ja koostude tegemisel kasutan eelnevalt loodud malle.

2.2.4 Lihtsustatud mudel

Projekteerimist alustan sellest, et loon lihtsad nelinurksed moodulid, mis omavahel otsapidi kokku puutuvad. Lihtsate mudelitega alustades jääb alles võimalus muuta üldmõõtmeid ja detailide kuju, mis töö hilisemas etapis oleks liiga töömahukas. Kontrollin, et kui moodulid otsapidi koos on, siis silla pikkus on 5000 mm nagu reeglites nõutud. Seejärel projekteerin jalamoodulid. Koht, kus konstruktsiooni jalaplaadid maad puudutavad, on reeglitega sätestatud. Struktuuri kandevõime poolest on parem, kui jalad on nurga all, mitte vertikaalselt sirged. Samas peab jälgima hoolikalt, et ei ületa maksimaalset lubatud pikkust 1200 mm. Sellest tulenevalt on hea, kui saab jalgade ja teki kinnituse täpse asukoha algusfaasis paika. Kui plokkmudel on valmis, kontrollin veelkord, et moodulite mõõtmed, teki kõrgus ja muud mõõdud vastavad reeglitele.

Esimese CAD-etapi tulemus on näha seel 2.2.4.1. Enne kui tööd jätkan, teen sellele lihtsale mudelile tugevusanalüüsid, et olla kindel, kas valitud materjalipaksus 3 mm on üldse piisav antud koormuste juures, isegi optimeerimata kujul. Arvutuste ja analüüsi kohta vt peatükk 3 – Valideerimine.

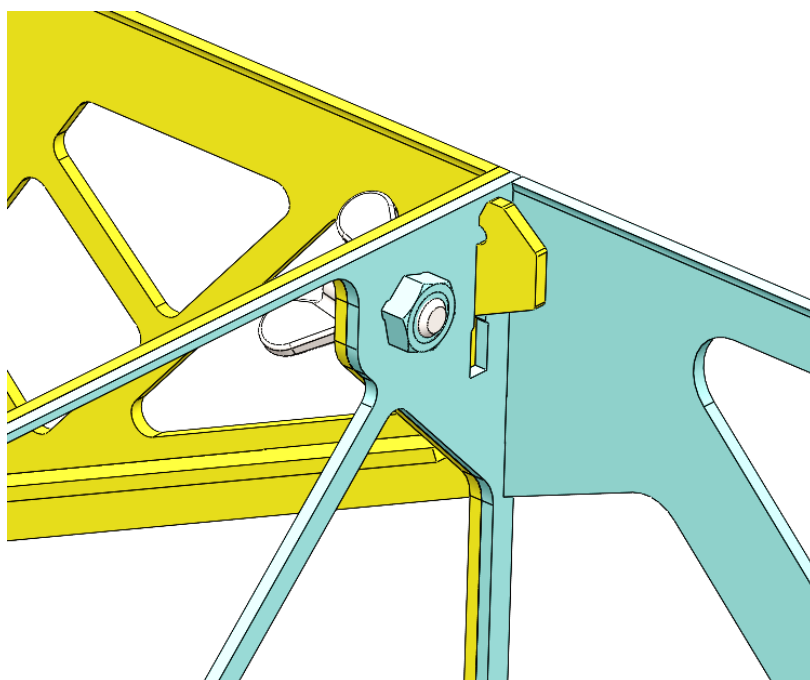


Sele 2.2.4.1 Esimese raalprojekteerimise etapi tulemus. Moodulite üldkuju ja paiknemine koostus

2.2.5 Moodulite kinnitamine

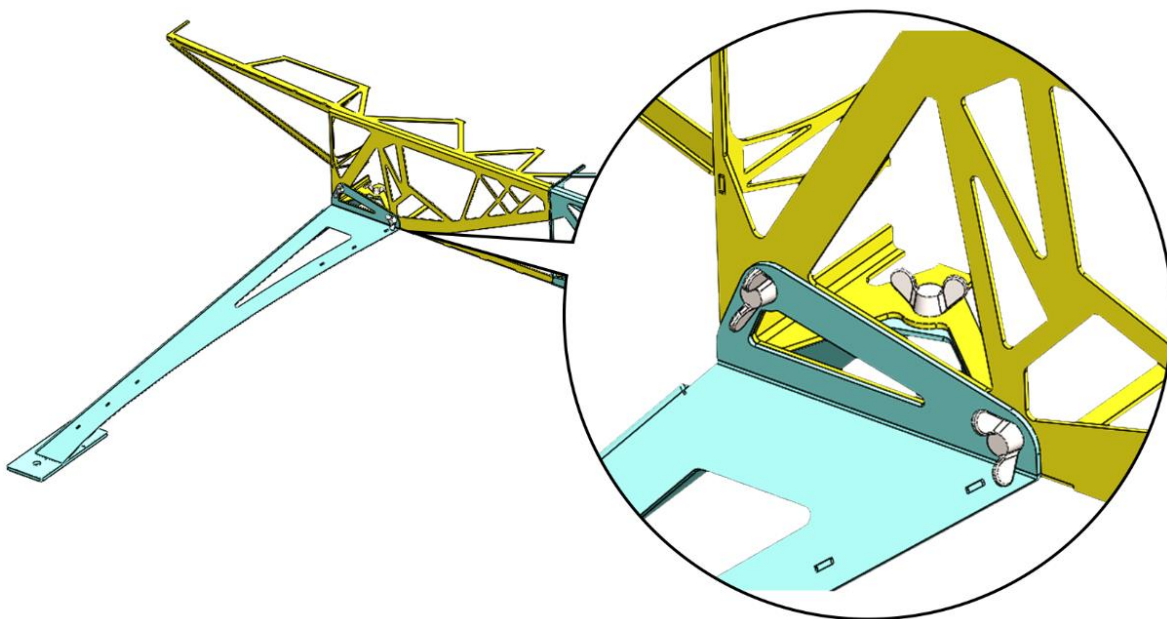
Moodulid peaksid olema võimalikult kiiresti ühendatavad. Reeglite kohaselt peavad need olema poltliited, kuid üks elementidest, näiteks mutter, võib olla keevitatud konstruktsiooni külge. Kindlasti kasutan siin projektis keevismuttreid, kus vähegi võimalik, sest mutrivõtme kasutamine võistlusel kulutab liigselt aega.

Kahe mooduli kinnitamiseks kasutan kaht poltliidet. Lisaks toetavad moodulid teineteist ka konksukujuliste kinnituskõrvadega (vt. sele 2.2.5.1). Sedasi on võimalik osa sillast kokku seada polte kasutamata ning alles siis, kui konstruktsioon on püsti, saab järjest seada ja pingutada poldid. Lisaks aitavad kinnituskõrvad vähendada poldides nihkepingeid. Kasutan liblikpolte, sest nende kasutamine on mugav ja säästab ülesseadmisel aega ning kogu silla saab üles seada tööriistu kasutamata. Võrdluseks – 2019. aasta võistlusel kasutasime ülesseadmise ajal korraga nii kärstivõtit kui mutrivõtit, mis kulutas liigselt aega.



Sele 2.2.5.1 Näide moodulite ühenduskohast kinnituskõrvaga ning poltliitega. Kollasega märgitud üks moodul, sinisega ühendatav moodul. Kinnitusvahenditeks on liblikpolt DIN 316 ja keevismutter DIN 929.

Jalamooduli kinnitamine on kolme poltliitega. Kinnituskõrvu ei ole, sest need moodulid ei tohi mingil juhul ülesseadmise ajal lahti tulla ning tuleks kohe poldidega kinnitada. Kui ülesseadmisel sild kokku kukub, määratakse trahvipunkte juurde. Ka siin toimub kinnitamine liblikpoltide abil, mis läbi moodulites olevate avade kinnituvad keevismutritesse. Jalgade kinnitamiseks vt sele 2.2.5.2



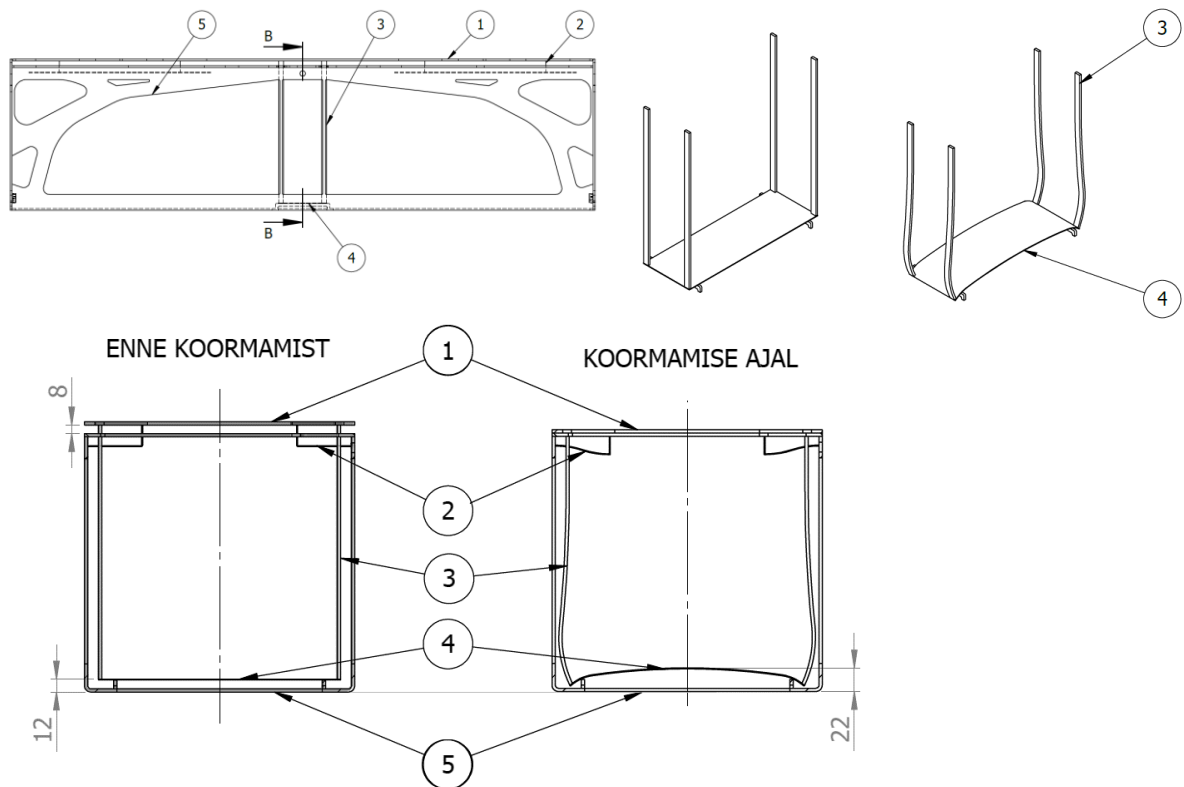
Sele 2.2.5.2 Jalamooduli kinnituspoldid

2.2.6 Negatiivse siirde mehhanism

Algse idee, et kas oleks võistluse reeglite raames võimalik projekteerida struktuur, mis koormuse all end ülespoole tõstaks, käis välja võistluskaaslane ehitusinsener Jürgen Tammepärg 2018. aasta sügisel. Seni ei ole ükski meeskond Eestist ega väljastpoolt suutnud seda "negatiivse siirde" kontseptsiooni teoks teha. [24] See ei ole võimatu; ülespoole ei pea liigutama kogu moodulit, vaid ainult koha, kus mõõtekell siiret mõõdab.

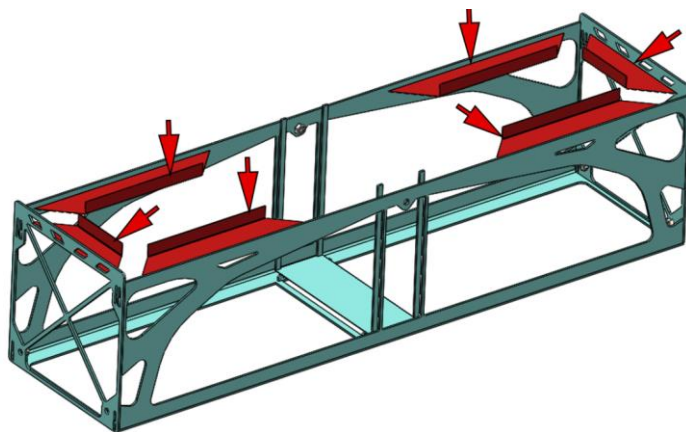
Lahendus, mille avastas, on olemuselt lihtne ja sobitub hästi üldkavandisse. Silla keskmisele moodulile, mis koormatakse täies ulatuses 750 kg koormusega, projekteerin sisse mehhanismi, mis kasutab ära terase elastseid omadusi, et osa mooduli alumisest pinnast ülespoole painutada, vt sele 2.2.6.1

Detail nr 1 on tekipealne pind, kuhu asetatakse koormus. See on raamiga (det nr 5) ühendatud läbi kuue lehtvedru (det nr 2). Mida suurem koormus peale asetatakse, seda enam vajub pealmine plaat alla, surudes 4 survevarrast (det nr 3) allapoole. Survevarraste alumised pinnad on jäigalt ühendatud õhukese plaadi külge (det nr 4). Koormuse tõttu suruvad vardad plaati paindesse sellisel viisil, et plaadi keskosa tõuseb kõrgemale. Sealt keskosast mõõdetaksegi siirdeid. Kui koormus on piisavalt suur, siis pealmine plaat (det nr 1) toetub täielikult raamile ning peatab edasised deformatsioonid. Eeldatavalt tõuseb alumise plaadi keskosa kuni 10 mm.



Sele 2.2.6.1 Illustratsioonid negatiivse siirde mehhanismist. Üleval vasakul: Eestvaade silla keskmisele moodulile. Paremal isomeetriline vaade survevarrastest ja plaadist koormamata ja koormatud olekus. All eestvaade silla keskmisele moodulile koormamata ja koormatud olekus.

Samas on vaja, et süsteem ei deformeeruks liigselt, kui mõõtekella alles nullitakse. Selleks ajaks on tekil eelkoormus ~50 kg. Süsteem peab olema piisavalt jäik, et selle raskuse all veel mitte liigselt vajuda. Selleks on projekteeritud lehtvedrud (sele 2.2.6.1 detail nr 2, sele 2.2.6.2 punaselt märgistatud osad). Need peavad lubama tekil vajuda 8 mm, kui maksimaalne koormus on peal. Need on seevõrd suured seetõttu, et liiga vara tekk läbi ei vajuks. Materjaliks on 0,8 mm paksune teras DC01. Vedrude dimensioneerimise meetodika on selgitatud peatükis 3.4.



Sele 2.2.6.2 Punase värviga ning nooltega märgistatud lehtvedrud silla keskmises moodulis. Pealmised plaadid on lihtsuse eesmärgil siin näites eemaldatud. Sellele moodulile asetatakse põhikoormus 750 kg.

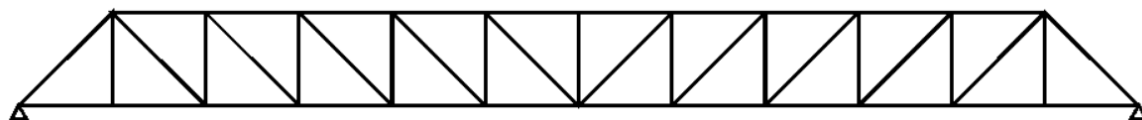
Edastasin selle mooduli mudeli koos selgitusega võistluse korraldustiimile, et saada tagasisidet, kas lahendus on aktsepteeritav. Eesmärk ei ole painutada võistlusreegleid ega kedagi petta, vaid tuua võistlusele innovatiivseid lahendusi, mis on reeglitele vastavad, korraldustiimi poolt heaks kiidetud ja ohutud. Ohutusest rohkem peatükis 2.2.8.

Täpsustuseks pean lisama, et kasutan sõnu "vedru" ja "lehtvedru" käesolevas ja järgnevates peatükkides vaid illustreerivate väljenditena. Deformeeruvate detailide eesmärk ei ole siin projektis salvestada energiat, pehmenada lööke ega täita muid dünaamilisi eesmärke. Samuti, nagu selgub peatükis 3.4, ei ole need projekteeritud taastama oma algasendit pärast 750 kg koormuse eemaldamist. Detailid deformeeruvad plastselt, seega ei saa koormamisel sellega seoses tekkida ohtlikke olukordi – pole ohtu, et pinge järsul vabastamisel midagi katapulteeruks.

2.2.7 Optimeerimine

Optimeerimata silla mass on üle 100 kg. Liigsetest kilodest võiks vabastada need kohad, kus materjal on üleliigne ehk ei panusta struktuuri jäikuse tagamisse. Optimeerimist alustan küljeseinadest. Teada on teki fikseeritud punktid, milleks on ühendus jalamoodulitega, ning eeldatav koormus, mille saan BRICO reeglite raamatust. Teada on ka materjal, milleks on 3 mm paksune teras S355MC. Lahendada jääb vaid see, kust oleks kõige mõtekam materjali eemaldada.

Ehitusinsenerid pööraksid sellises olukorras võib-olla pilgu sõrestiksilla suunas, vt. sele 2.2.7.1. Selline struktuur on väga praktiline ja ökonoomne. Sõrestiksillad toimivad hästi lauskoormusel ja juhul, kui on vaja tagada tugevus igas punktis, olenemata koormuse asukohast. Seevastu võistlusel on üsna spetsiifiline koormamise skeem, tänu millele saaks veelgi optimaalsema struktuuri välja mõelda. Lisaks ei ole sõrestiksild visuaalselt huvitav; see on liiga tehnilise välimusega, mille tõttu ei kõida tähelepanu.

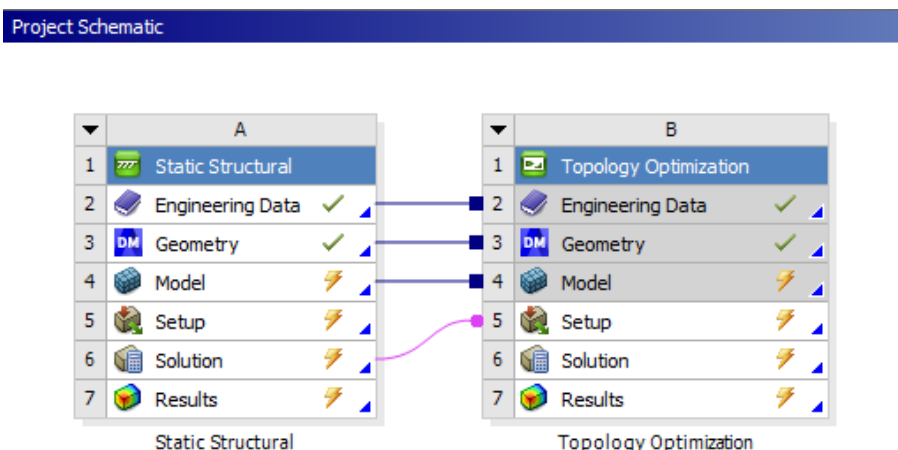


Sele 2.2.7.1. Illustratsioon sõrestiksillast [25]

Väiksema massiga struktuuri loomiseks kasutan topoloogia optimeerimist (*ingl. k Topology Optimization*). See on üsna lai mõiste ning erinevaid optimeerimisalgoritme kasutatakse erisuguste füüsikaliste süsteemide projekteerimisel. Topoloogia optimeerimine käesolevas projektis tähendab LEM-analüüside abil sellise geomeetria leidmist, mis oleks võimalikult jäik, samas kasutades võimalikult vähe materjali. Programmi tööpõhimõte on teostada järjestikku tugevusanalüüse ning igal iteratsioonil eemaldada materjali sealt, kus see pole jäikuse tagamiseks nii vajalik, või lisada materjali sinna, kus seda on vaja. Sedasi optimeeritakse materjalipaigutust etteantud piirides, kuid geomeetria ja tingimuste ülesseadmine, tulemuse valideerimine ja edasine projekteerimine on endiselt vaja inimese poolt teostada.

Topoloogia optimeerimise noorem ja võimekam vend on generatiivne projekteerimine (*ingl. k generative design*), mis pelgalt ei analüüsi ettesöödetud geomeetria, vaid töötab koos inseneriga juba projekteerimise algusfaasis. Selle asemel, et materjali lihtsalt eemaldada, leiab tarkvara ise optimaalse viisi, kuidas genereerida sobivad struktuurid. [26] Antud töös ei ole selleks niivõrd suurt vajadust ja puuduvad ka oskused, seega piirdun "lihtsa" LEM-analüüsidel põhineva optimeerimisega.

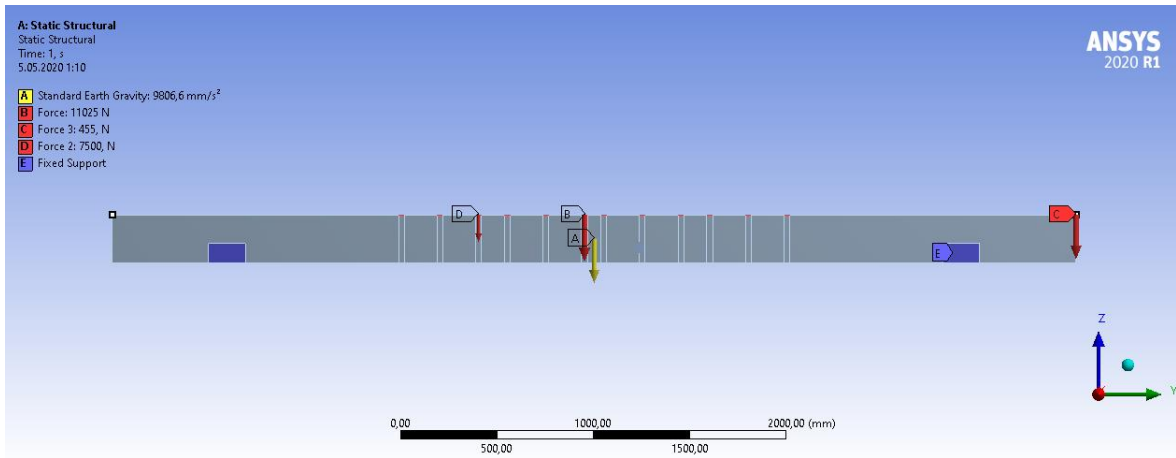
Analüüsi teostamiseks kasutan tarkvarapaketti ANSYS Mechanical. Sean üles staatilise tugevusanalüüsi, mis on sisendiks topoloogia moodulile. See tähendab, et optimeerimine toimub nendele koormustele ja kinnituskohdadele vastavalt (vt sele 2.2.7.2). Määrان materjali, valin analüüsi tüübiks 2D geomeetria ja laen sinna spetsiaalselt analüüsiks tehtud pindmudeli (*ingl. k surface model*).



Sele 2.2.7.2 Topoloogia optimeerimise projekti skeem ANSYS Workbench keskkonnas. Vasakul tugevusanalüüsi moodul. Paremal optimeerimise moodul, mis saab sisendiks tugevusanalüüsi tingimused ja tulemused.

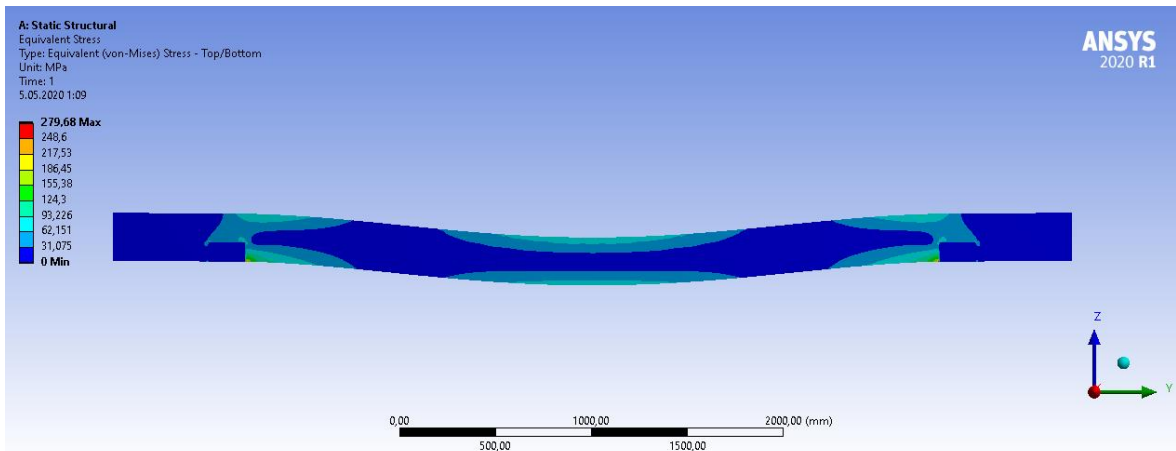
Määrان koormused ja kinnituspunktid, annan materjalile paksuse 6 mm (ehk kaks 3 mm seinaplaati), loon elementide võrgustiku ning käivitan kontrollimiseks lihtsa

tugevusarvutuse. Seel 2.2.7.3 on näidatud asukohad, kuhu rakenduvad koormused ning kuhu kinnituvad jalamoodulid.



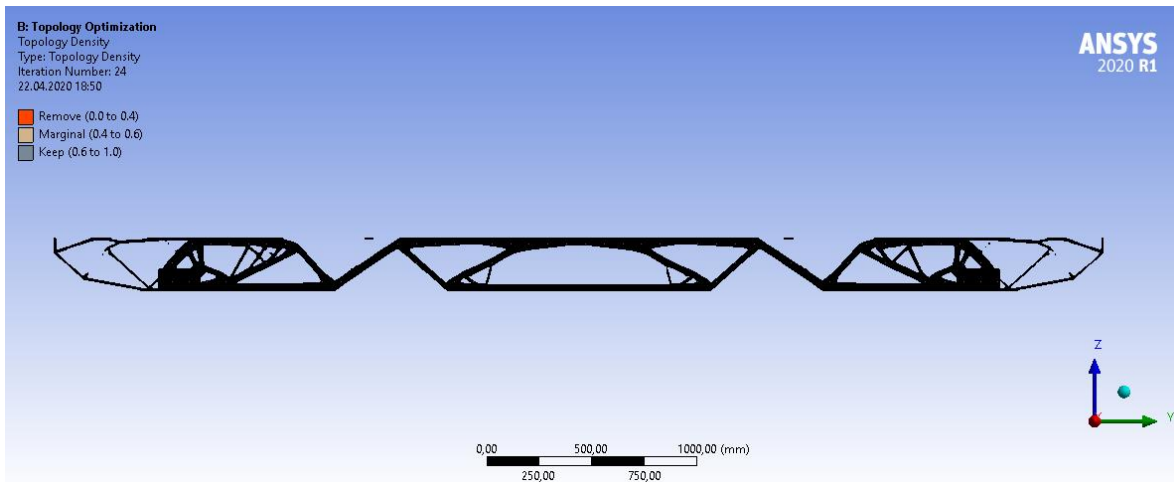
Sele 2.2.7.3 Analüüsimudel tugevusarvutuseks ja optimeerimiseks

Eialgu teostan kontrollimiseks staatilise tugevusanalüüsi ja hindan pingeid, et kontrollida, kas olen seadistused õigesti teinud. Pingete jaotumist on näha seel 2.2.7.4.



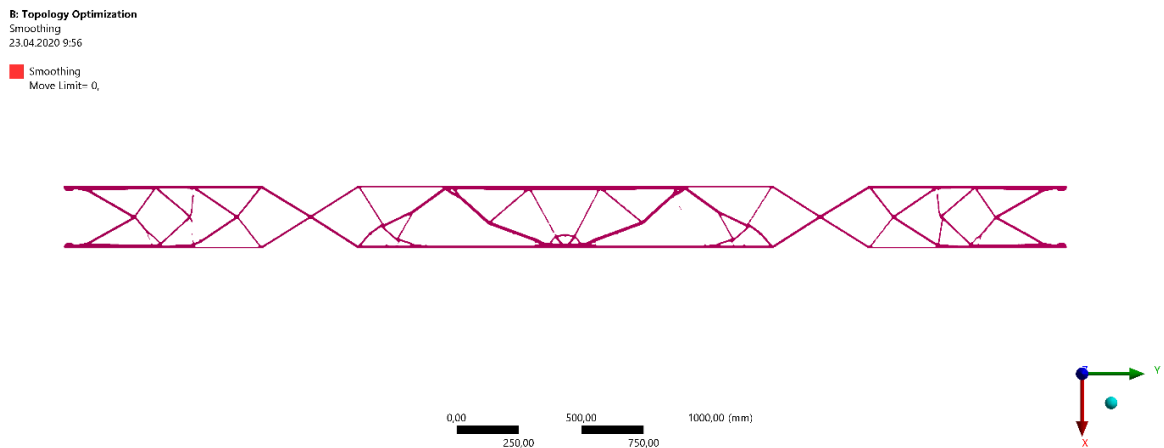
Sele 2.2.7.4. Pingete jaotumine optimeerimata küljeplaadil

Pingete väärtused ja jaotumine näib õige, seega käivitan topoloogilise optimeerimise programmi. Optimeerimisprogrammile tuleb anda lisaks veel sisendiks kui palju materjali massist protsentuaalselt eemaldada soovin ning minimaalne konstruktsioonielemendi paksus tootmise jaoks. Annan ülesandeks eemaldada 75% massist ja vältida selliste struktuuride loomist, mille paksus on alla 4 mm. Selle lahendamise aeg on kordades suurem kui staatilisel analüüsil. Kuna ülesseadmine oli lihtsustatud ning töö käis 2D-mudeliga, arvutas programm optimeeritud kuju vaid 15 minutiga. Tulemus on näha seel 2.2.7.5.



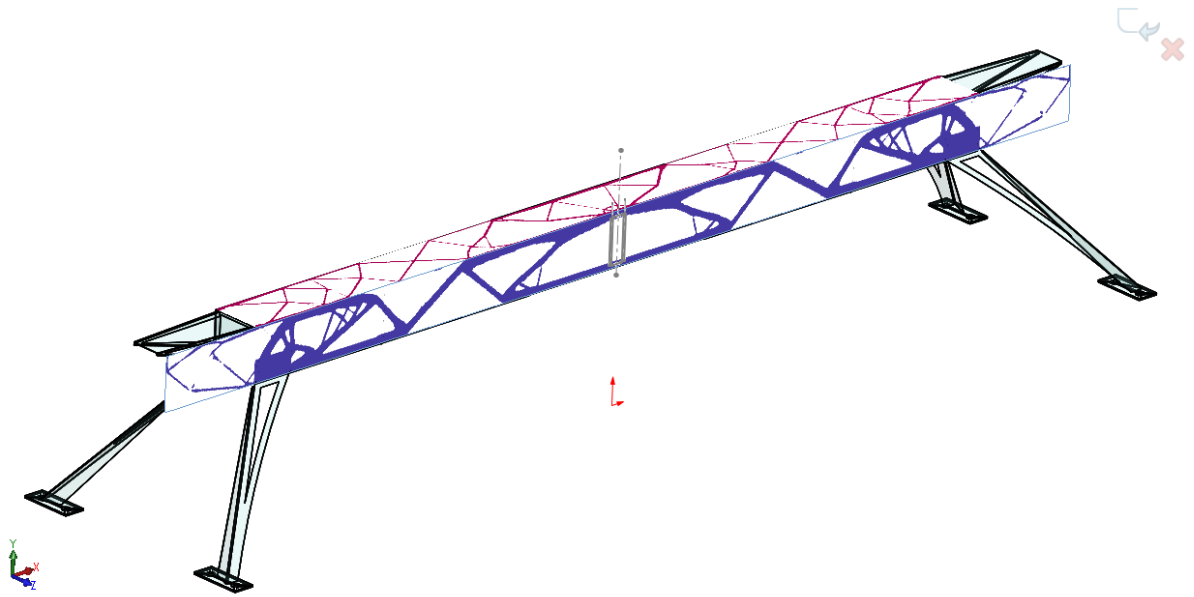
Sele 2.2.7.5 Optimeeritud küljesein sillale. Eestvaade

Oluline on märkida, et saadud tulemust ei saa otse kasutada. See ei ole lõplik geomeetria, vaid suunav mall, mille abil joonestan küljed CAD-tarkvaras käsitsi üle. Siiski annab see hea ülevaate, milliseks võib kujuneda lõpptoode. Kordan sama protsessi, kuid seekord silla tekipealse optimeerimiseks. Sisendiks on reeglites määratud horisontaalkoormus 280 N ning kinnituspunktideks määratud jalgade kinnituskohad. Horisontaalpinna optimeeritud pind on näha selel 2.2.7.6.

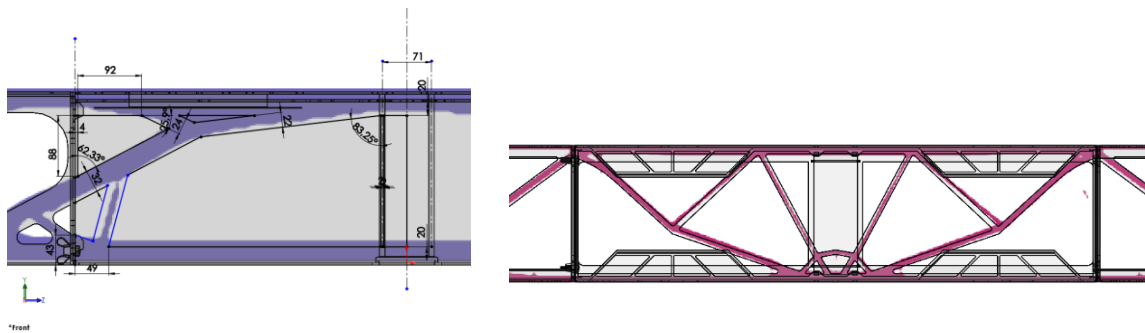


Sele 2.2.7.6 Teki horisontaalpinna optimeeritud topoloogia. Pealtvaade.

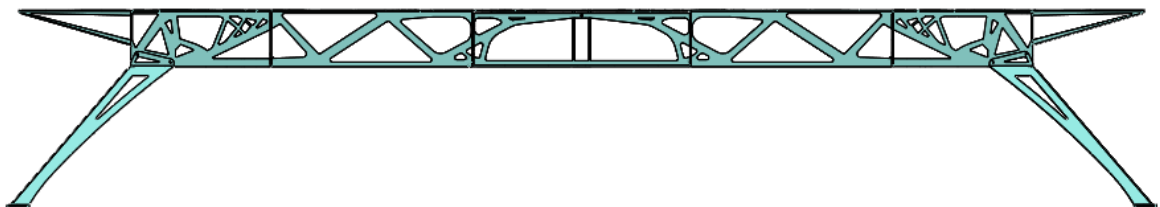
Toon optimeerimistulemused CAD-mudelisse, joonestan struktuuri üle ning lõikan detailidesse avad. Seledel 2.2.7.7-2.2.7.9 on näited tööprotsessist.

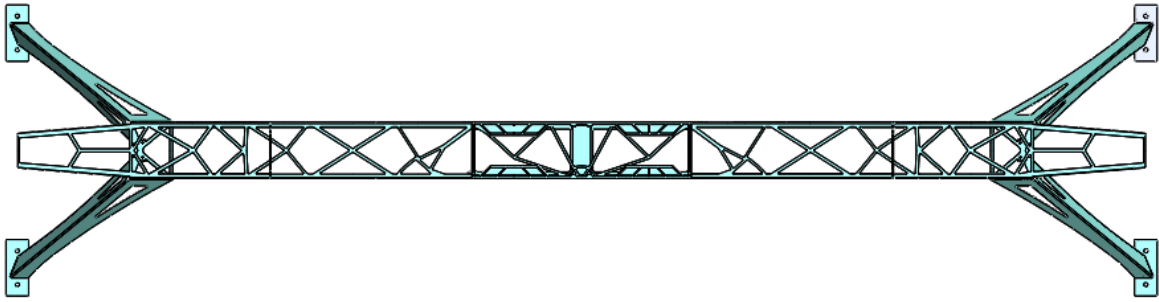


Sele 2.2.7.7 Optimeerimise tulemused sobitatud pindadele.



Sele 2.2.7.8 Tööprotsess – Struktuuri joonestamine detailide pindadele. Vasakul eestvaade moodulile, millesse optimeeritud kujuga avad lõigata. Paremäl pealtvaade silla keskmisele moodulile.


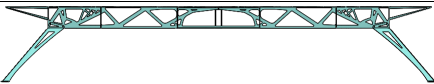




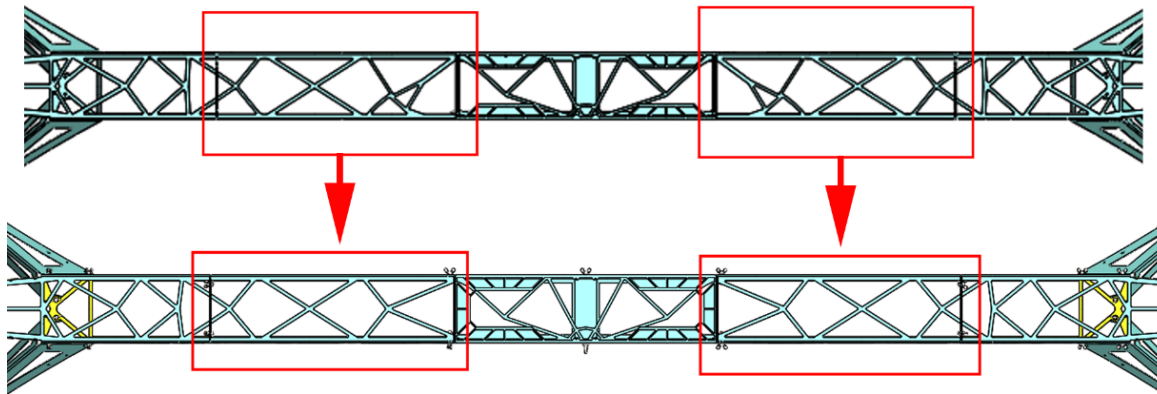
Sele 2.2.7.9 Optimeeritud pinnad. Üleval eestvaade. All pealtvaade.

Optimeeritud silla massi ja suurima deformatsiooni võrdlus on näha tabelis 2.2.7.1. Deformatsioonide leidmiseks vt peatükk 3.

Tabel 2.2.7.1 Optimeerimata ja optimeeritud sildade massi ja deformatsiooni võrdlus võistluse koormusolukorras

	Optimeerimata välisküljed	Optimeeritud välisküljed
Illustratsioon		
Mass	100 kg	53 kg
Deformatsioon	6 mm	8 mm

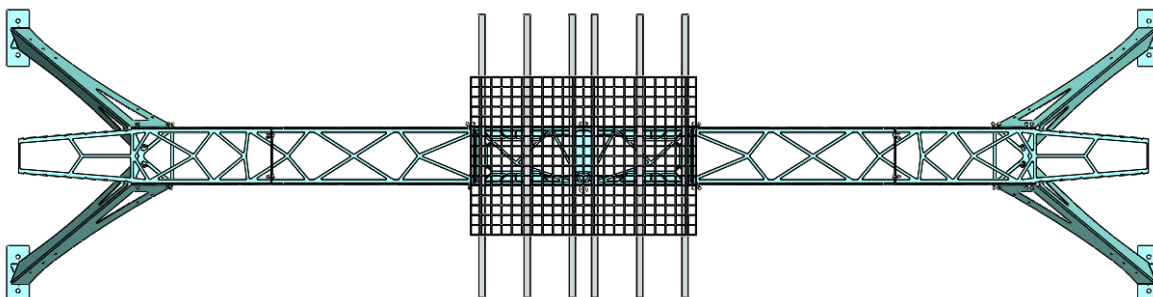
Töö käigus otsustasin teha ühe põhimõttelise muudatuse – teha kõik moodulid peale keskmise täielikult sümmeetrilised. Selleks pean muutma horisontaalpinna optimeeritud geometriat. See toob eelised tootmisesse ja ülesseadmisesse, vähendades eksimuste võimalust. Nimelt kui muuta selil 2.2.7.10 olevad kaks moodulit telgsümmeetriliseks, oleks need täpselt sama detail. Seega väheneb jooniste hulk, väheneb tõenäosus tootmiseksimusele ja väheneb tõenäosus, et võistlusel need sarnased moodulid omavahel segamini ajame.



Sele 2.2.7.10 Pealtvaade silla tekimoodulitele. Üleval – kaks erinevat moodulit. All – Kaks identset moodulit.

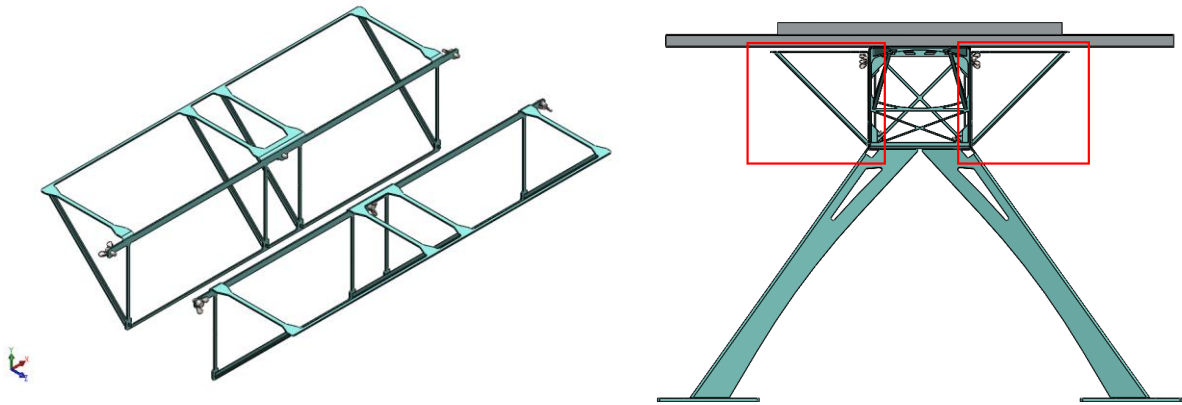
2.2.8 Ohutus

Suhtlusel võistluse tehnilise juhiga sain mõned näpunäited, kuidas teha konstruktsioon pisut ohutumaks. Kuna sillale laotakse koormuseks 1000 kg ja tekk on vaid 250 mm lai, siis peaks suurendama seda ala, kuhu põhikoormus asetatakse. Seel 2.2.8.1 on pealtvaade sillale koos talade ja restiga, millele asetatakse koormus.



Sele 2.2.8.1 Pealtvaade sillale koos koormamiseks vajalike talade ja restiga. Sellele lisaks tuleb 250 kg koormuse jaoks teinigi rest.

Selleks, et koormamine oleks ohutum, lisan konstruktsiooni keskosasse 2 lisamoodulit, mille eesmärk on hoida koormus stabiilsemalt sillal. Kuigi need lisavad kogu koostule massi juurde, on need vajalikud ka selleks, et saaksime paremini positioneerida koormamiseks vajalikud torud ja resti. Moodulid on näha seel 2.2.8.2.

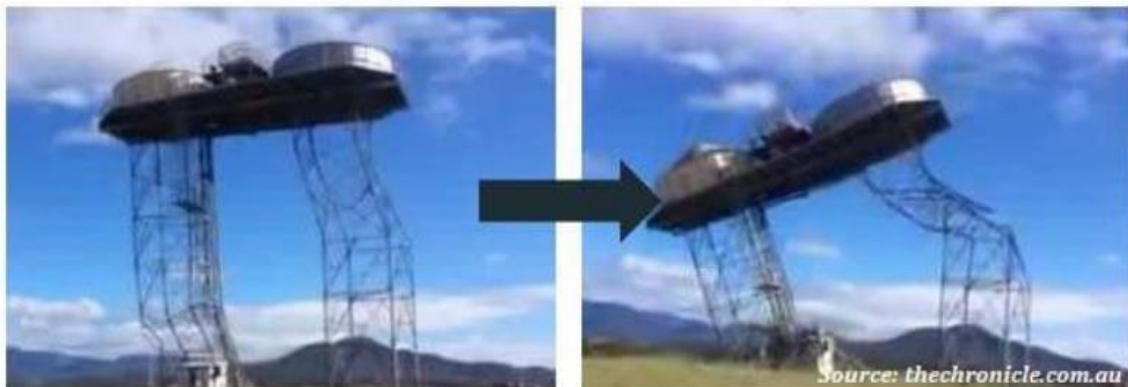


Sele 2.2.8.2 Lisamoodulid ohutuma koormamise tagamiseks. Vasakul moodulid eraldiseisvana, paremal külgsuuna sillale koos moodulite ja talade ja restiga.

2.2.9 Nõtkumine ja tugevdusribid

Juhul kui konstruktsioonis on saledad vardad, kus koormamisel tekivad survepinged, muutuvad need vardad liigsel koormusel ebastabiilseks ning võib toimuda nõtkumine (*ingl. k buckling*). Alati ei saa leida nõtkekohtlikke elemente lihtsate LEM-analüüsidega. Kui jõud on pikisuunaline elemendi teljega, võib LEM-analüüs näidata pingeid, mis on ohutuse piirides. Kuid juhuslike mõjutuste toimel või siis, kui jõud ei rakendu ideaalselt pikisuunas elemendi teljega, võib see element kaotada võime koormust kanda ning nõtkub katastroofiliselt. Näidet veetorni jalgade nõtkumisest vt sele 2.2.9.1.

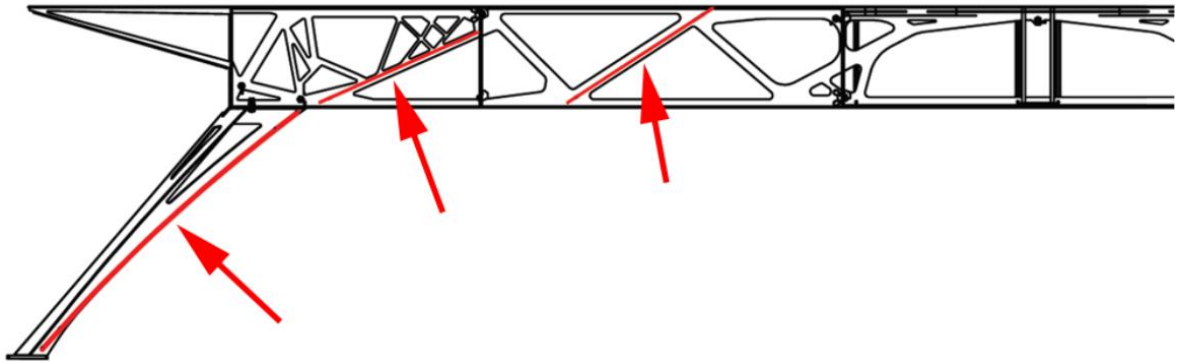
Buckling of a water-reservoir's columns



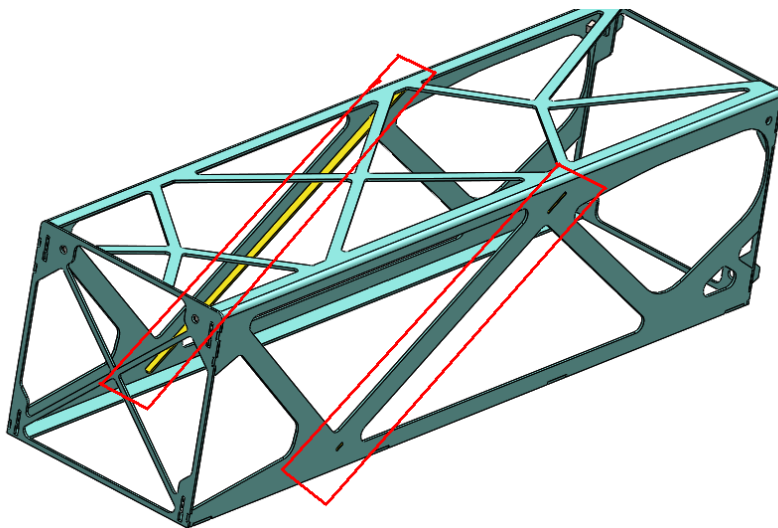
Sele 2.2.9.1 Näide katastroofilisest nõtkumisest [27]

Käesolevas töös on struktuursete elementide paksuseks vaid 3 mm, mistõttu survele töötavatele varrastele lisan ristisuunalised tugevdusribid, et vältida nõtkumist. Vastasel juhul painduvad need saledad vardad külgsuundades ja ei ole võimelised enam koormust kandma. Seel 2.2.9.2 on punasega märgistatud kõik sillal asuvad

tugevdusribid. Need toestavad küljeseinade kohti, milles tekivad survepinged. Seel 2.2.9.3 on näide tugevdusribist ühes moodulis.



Sele 2.2.9.2 Konstruksioonis asuvad nõtkevastased tugevdusribid, märgistatud punasega.



Sele 2.2.9.3 Illustratsioon tugevdusribidest ühes moodulis.

Hindan Euleri valemi abil, kas seel 2.2.9.3 näidatud tugevdusribid on vajalikud. Euleri valemi abil saab leida, mis on kriitiline jõud ehk Euleri jõud vardale, teades selle pikkust, materjali ja inerts momente.

$$F_{KR} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (2.2.9.1) [28]$$

kus F_{KR} on kriitiline jõud, N,

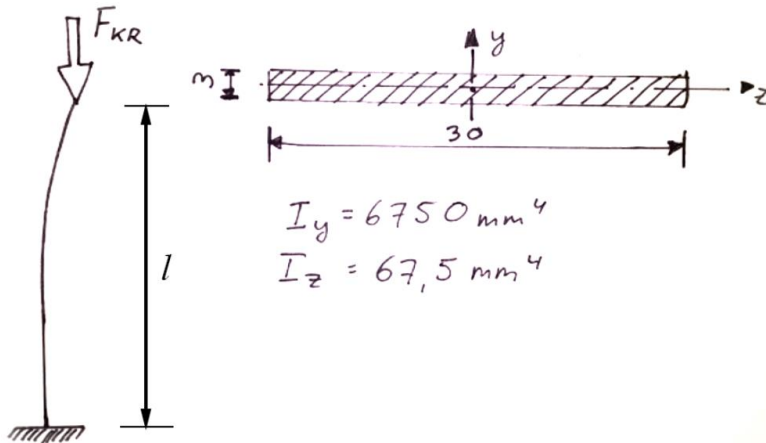
E on elastsusmoodul, Pa,

I on tala ristlõike väikseim inerts moment, mm⁴,

μ on nõtketegur,

l on tala pikkus, m.

Koormamise skeem ja varda ristlõige on illustreeritud seel 2.2.9.4.



Sele 2.2.9.4 Saleda varda koormamise skeem ja ristlõige. Inertsmomentide väärtused ristlõike z- ja y-teljel.

Käesoleval juhul oleks varda alumine ots jäigalt kinnitatud ning teine ots vaba (vt sele 2.2.9.4), seega võtan nõtketeguri μ väärtuseks 2 [28]. Ristlõike väikseim inertsmoment on $67,5 \text{ mm}^4$. Varda pikkus on $0,3 \text{ m}$.

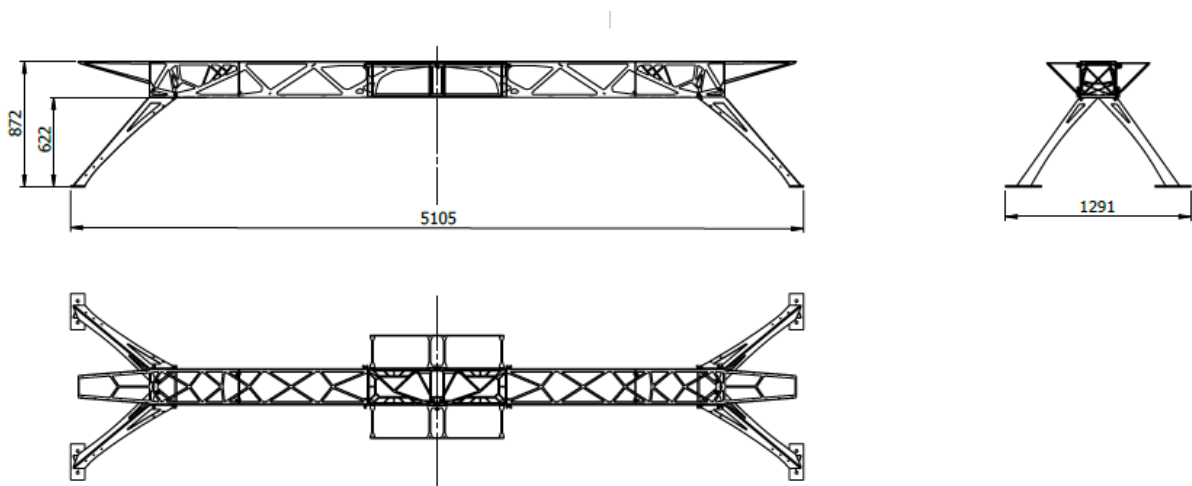
$$F_{KR} = \frac{3,14^2 * 210 * 10^9 * 67,5 * 10^{-12}}{(2 * 0,3)^2} = 389 \text{ N} \quad (2.2.9.2)$$

Lihtsustatult võtaks reaalsel koormamisel neli taolist varrast vastu koormust kokku kuni 10000 N ehk ühele taolisele saledale vardale mõjuks koormus 2500 N . See on üldistatud väärtus, sest pole arvestatud jõu suunda ja muid tegureid, mis defineerivad vardale mõjuvaid koormuseid. 2500 N on aga kordades suurem kui Euleri jõud 389 N , mistõttu on tugevdusribi lisamine vajalik seel 2.2.9.3 näidatud kohta.

2.3 Kokkuvõte

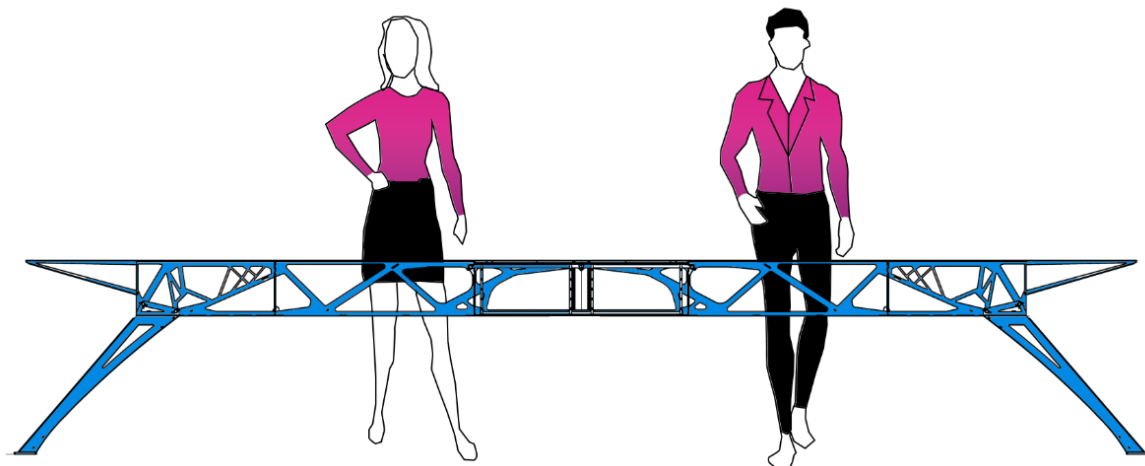
Projekteerimisele kulus ligikaudu 120 töötundi. Tänu korrektsele üles ehitatud mudelile ei tekkinud Solidworks'i kasutamisel suuri tehnilisi probleeme. Suurim ajakulu oli projekteerimise protsess ise, seega kui käesolev projekt oleks kliendi poolt tellitud, saaks pakkuda konkurentsivõimelise hinna. Suurim ebavajalik ajakulu oli erinev analüüsitarkvara (ANSYS Mechanical) ja projekteerimistarkvara (Solidworks): analüüsid tuli igale uuele mudelile algusest üles ehitada.

Projekteeritud silla mass on 56,5 kg, millele tuleb lisaks keeviste ja pinnakatte mass. Erinevaid moduleid on 6 tk ning erinevaid detaile on 28 tk. Kokku on moduleid 11 tk ja detaile 100 tk. Selal 2.3.1 on väljavõtte peajoonisest.



Sele 2.3.1 Väljavõtte peajoonisest. Kolmvaade gabariitmõõtudega.

Ülesseadmise aeg võistlusel on ligikaudu 2 minutit, konservatiivselt arvestades 3 minutit. Eeldatav trahvipunktide arv kogu võistluse peale jääb vahemikku 17 kuni 35 (vt lisa 4). Eesmärk on võistlusel saada kõige vähem trahvipunkte ja üldarvestuses saavutada 1. koht. Konkurents on kindlasti tugev, sest võistluse edasilükkumise tõttu on osalevatel võistkondadel rohkem aega oma konstruktsioonis parandusi sisse viia ja teha füüsilisi katsetusi. Käesoleva silla suurimad eelised konkurentide ees on kiire ülesseadmise aeg, huvitav välimus ja innovaatiline negatiivse siirde mehhanism.



Sele 2.3.2 Eestvaade sillale. Illustreerimaks suurusjärke on võrdluseks juurde joonistatud inimkontuurid.

Silla pikkus on 5105 mm, laius on 1291 mm ning kõrgus 872 mm. See koosneb moodulitest, mille mõõtmed on kuni 250 x 250 x 1140 mm. Mastaabist annab aimu silla eestvaade seel 2.3.2, millele on illustreerivaks võrdluseks juurde joonistatud inimeste kontuurid. See välimuse poolest sale konstruktsioon peaks kandma 1000 kg ning selleks, et olla kindel, et see sild ka seda kanda suudab, tuleb teostada valideerimine (vt peatükk 3).

3. VALIDEERIMINE

3.1 Sissejuhatus

Käesoleva peatüki eesmärk on kindlaks teha, kas projekteeritud lahendus on struktuurselt piisav antud koormustele. Selleks teostan sillale, moodulitele ja moodulitevahelistele kinnitustele tugevusanalüüsid. Need aitavad leida kriitilised sõlmkohad ja elemendid ning pingete jaotumise ja deformatsioonid. Esmalt teostan kogu struktuurile staatilise analüüsi. See aitab leida suuremad pingekolled, mis projekteerimise käigus on tähelepanuta jäänud. Seejärel saab viia sisse esmased parandused ja jätkata täpsemate arvutustega. Siin etapis on vaja kindlaks teha nõtkeotlikud elemendid ja moodulitevaheliste kinnituspunktide tugevus. Teostan arvutused erinevatele võistlusel võimalikele koormusjuhtudele.

Kuigi LEM-analüüsid on suureks abiks ja säästavad palju aega, tuleb tulemuste hindamisel olla väga kriitiline. Kõige lihtsamate detailide puhul saab hea ülevaate tugevusest ja pingete jaotumisest, kuid antud juhul on tegu kompleksse mitme mooduliga struktuuriga, mis peab kandma suurt koormust. CAD-mudel ja analüüsid on idealiseeritud olukorrad, aga tegelikkuses on vaja arvestada materjali defektidega, tootmise ebatäpsustega, juhuslike jõududega koormamisel ja muude juhtumitega, mida analüüsida pole otstarbekas.

Sellisteks olukordadeks arvestatakse projekteerimisel juurde varutegur. Üldiselt on varuteguri määramisel arvestatud purunemise tagajärgedega. Kui purunemisel on oht inimestele, arvestatakse projekteerimisel suurem varu. Samuti, kui mõjuvad jõud ei ole täpselt teada ja koormust hinnatakse umbkaudselt, võetakse samuti suurem varutegur. Kuna käesolevas projektis on jõud üsna täpselt teada ning ohtu inimestele ei ole (*võistlusel on ette nähtud ohutusmeetmed*), siis valin varuteguriks 1,2. Selle teguriga korrutan kõik jõuväärtused, mida analüüsis kasutan. Näiteks kui on teada, et koormus on 7500 N ja varutegur on 1,2, siis analüüsides määrän jõu väärtuseks:

$$7500 \text{ N} * 1,2 = 9000 \text{ N} \quad (3.1.1)$$

3.2 Tala tugevusarvutus algpameetrite meetodiga

Enne töö alustamist ja CAD-mudeli tegemist hindasin analüütiliselt, kas S355 terasest nelikanttoru mõõtmetega 250x250x3 oleks üldse piisav toorik, mida hakata

optimeerima. Arvutan, kas see suudab vastu võtta võistlusel seatavad koormused. Koormuste asukohad ja suurused on valitud vastavalt võistluse reeglitele.

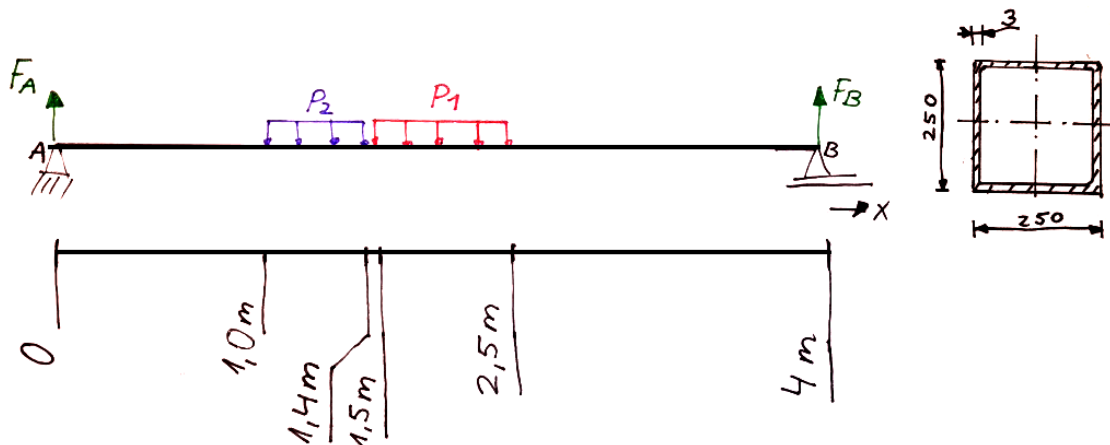
Teisendan rakendatavad koormused 750 kg ja 250 kg lauskoormuseks. Koormuste asukohad on illustreeritud seel 3.2.1.

$$p_1 = \frac{7,5 \text{ kN}}{1 \text{ m}} = 7,5 \text{ kNm}^{-1} \quad (3.2.1)$$

$$p_2 = \frac{2,5 \text{ kN}}{0,4 \text{ m}} = 6,25 \text{ kNm}^{-1} \quad (3.2.2)$$

kus p_1 on surve põhikoormuse 750 kg tõttu, mis rakendatakse pinnale laiussega 1 m,

p_2 on surve lisakoormuse 250 kg tõttu, mis rakendatakse pinnale laiussega 0,4 m.



Sele 3.2.1 Tugevusarvutuse skeem. Vasakul koormusolukord, paremal nelikanttala ristlõige. X-telg on paralleelne maapinnaga, y-telg on risti maapinnaga.

Koostan tasakaaluvõrrandid.

$$M_A = 0; \quad M_B = 0; \quad \Sigma F_y = 0$$

kus M_A on moment toepunktis A, kNm,

M_B on moment toepunktis B, kNm,

ΣF_y on kõikide jõudude summa paralleelselt y-teljega, kN,

$$M_A = -p_2 * 0,4 * \frac{1 + 1,4}{2} - p_1 * 1 * \frac{1,5 + 2,5}{2} + F_B * 4 = 0 \quad (3.2.3)$$

$$M_B = -F_A * 4 + p_2 * 0,4 * \left(4 - \frac{1 + 1,4}{2}\right) + p_1 * 1 * \left(4 - \frac{1,5 + 2,5}{2}\right) = 0 \quad (3.2.4)$$

$$-F_A - F_B + p_2 * 0,4 + p_1 * 1 = 0 \quad (3.2.5)$$

kus F_A on reaktsioonijõud punktis A, kN,

F_B on reaktsioonijõud punktis B, kN.

Arvutan vertikaalsuunalised (y-telje suunas) toereaktsioonid F_A ja F_B otspunktides, tasakaaluvõrrandite (3.2.3) ja (3.2.4) põhjal.

$$F_B = \frac{6,25 * 0,4 * 1,2 + 7,5 * 1 * 2}{4} = 4,5 \text{ kN} \quad (3.2.6)$$

$$F_A = \frac{6,25 * 0,4 * 2,8 + 7,5 * 1 * 2}{4} = 5,5 \text{ kN} \quad (3.2.7)$$

Järgnevalt koostan elastse joone võrrandi, mis kirjeldab antud koormusolukorra läbipainde funktsiooni. Lahendusmeetodiks on algparameetrite meetod. [29] Tala elastse joone universaalvõrrand on:

$$EI_y w = EI_y w_0 + EI_y \varphi_{y0} x + \sum M \frac{\langle x - a_M \rangle^2}{2!} + \sum F \frac{\langle x - a_F \rangle^3}{3!} + \sum p \frac{\langle x - a_p \rangle^4}{4!} \quad (3.2.8) [29]$$

kus EI_y on tala paindejäikus piki y-telge, kNm²,

$w(x)$ on siire kohal x , m,

φ_{y0} on algpööre, rad,

x on kaugus tala otspunktist A, m,

a_M, a_F ja a_p on vastavalt jõupaari, jõu rakenduspunkti ja lauskoormuse kaugus tala otspunktist, m.

Kinnituspunktides (ehk kaugustel 0 ja 4 m) on siire 0.

$$w(0) = 0$$

$$w(4) = 0$$

Kuna koormusolukord ei sisalda jõumomente, saan lihtsustada elastse joone võrrandit (3.2.8).

$$0 = 0 + EI_y \varphi_{y0} x + \sum F \frac{\langle x - a_F \rangle^3}{3!} + \sum p \frac{\langle x - a_p \rangle^4}{4!} \quad (3.2.9)$$

$$0 = 0 + EI_y \varphi_{y0} x - F_A \frac{\langle x - a_{FA} \rangle^3}{3!} + p_2 \frac{\langle x - a_{p2-1} \rangle^4}{4!} - p_2 \frac{\langle x - a_{p2-2} \rangle^4}{4!} + p_1 \frac{\langle x - a_{p1-1} \rangle^4}{4!} - p_1 \frac{\langle x - a_{p1-2} \rangle^4}{4!} \quad (3.2.10)$$

kus a_{FA} on toereaktsioon F_A kaugus tala vasakpoolsest otspunktist A, m,

a_{p2-1} on koormuse p_2 alguspunkti kaugus tala vasakpoolsest otspunktist A, m,

a_{p2-2} on koormuse p_2 lõpp-punkti kaugus tala vasakpoolsest otspunktist A, m,

a_{p1-1} on koormuse p_1 alguspunkti kaugus tala vasakpoolsest otspunktist A, m,

a_{p1-2} on koormuse p_1 lõpp-punkti kaugus tala vasakpoolsest otspunktist A, m.

Avaldan algparameetri $EI_y \varphi_{y0} x$, võttes x väärtuseks tala lõpp-punkti ehk 4 m:

$$0 = 0 + EI_y \varphi_{y0} * 4 - F_A \frac{(4 - 0)^3}{3!} + p_2 \frac{\langle 4 - 1 \rangle^4}{4!} - p_2 \frac{\langle x - 1,4 \rangle^4}{4!} + p_1 \frac{\langle x - 1,5 \rangle^4}{4!} - p_1 \frac{\langle x - 2,5 \rangle^4}{4!} \quad (3.2.11)$$

$$EI_y \varphi_{y0} * 4 = 5,5 \frac{(4 - 0)^3}{3!} - 6,25 \frac{\langle 4 - 1 \rangle^4}{4!} + 6,25 \frac{\langle 4 - 1,4 \rangle^4}{4!} - 7,5 \frac{\langle 4 - 1,5 \rangle^4}{4!} + 7,5 \frac{\langle 4 - 2,5 \rangle^4}{4!} \quad (3.2.12)$$

$$EI_y \varphi_{y0} = 9,71 \text{ kNm}^2$$

Algparameetri väärtust teades saan leida siirde igas tala punktis. Avaldan siirde w väärtuse, kui $x = 2$ ehk tala keskkohas. Kuna kaugus $a_{p2-2} = 2,5$ m jääb kaugemale kui 2 m, siis jääb see lahendusmeetodist tulenevalt arvutusest välja:

$$EI_y w = 0 + 9,71 * 2 - 5,5 \frac{(2-0)^3}{3!} + 6,25 \frac{(2-1)^4}{4!} - 6,25 \frac{(2-1,4)^4}{4!} + 7,5 \frac{(2-1,5)^4}{4!} \quad (3.2.13)$$

$$EI_y w = 12,33 \text{ kNm}^3$$

Terase S355 elastsusmoodul E on 210 GPa [30] ja valitud nelikanttoru inertsmoment I on 30142892 mm⁴. Avaldan siirde:

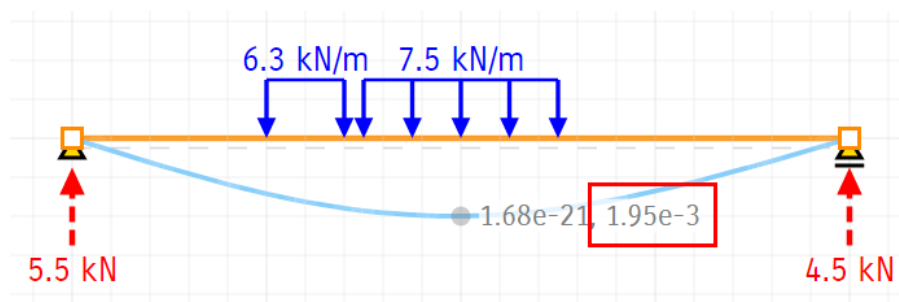
$$12,33 \text{ kNm}^3 = 12330 \text{ Nm}^3 \quad (3.2.14)$$

$$w = \frac{12330}{EI} = \frac{12330}{210 * 10^9 * 30142892 * 10^{-12}} \quad (3.2.15)$$

$$w = 1,95 \text{ mm}$$

Siire tala keskel on 1,95 mm.

Kontrolliks kasutan struktuurianalüüsitarkvara STRIAN, mis annab tulemuseks 1,95 mm ja kinnitab, et toereaktsioonid olid samuti õigesti arvatud.



Sele 3.2.2 Analüüsitarkvaras STRIAN tehtud kontrollarvutus. Punase ristkülikuga märgitud arv 1.95e-3 on siire keskpunktis, meetrites.

Pingete arvutamiseks asukohas $x = 2$ leian paindemomendi $M_{x=2}$.

$$M_{x=2} = 5,5 * 2 - 6,25 * 0,4 * 0,8 - 7,5 * 0,5 * 0,25 \quad (3.2.16)$$

$$M_{x=2} = 8,06 \text{ kNm}$$

Õõnes nelikanttoru telgvastupanumoment W on

$$W_y = \frac{250 * 250^3 - 244 * 244^3}{6 * 250} \quad (3.2.17) [31]$$

$$W_y = 241143 \text{ mm}^3$$

Paindepinge $\sigma_{x=2}$ on

$$\sigma_{x=2} = \frac{M_{x=2}}{W_y} = \frac{8060}{241142 * 10^{-9}} = 33424289 \text{ N} * \text{m}^{-2} = 33,4 \text{ MPa} \quad (3.2.18) [31]$$

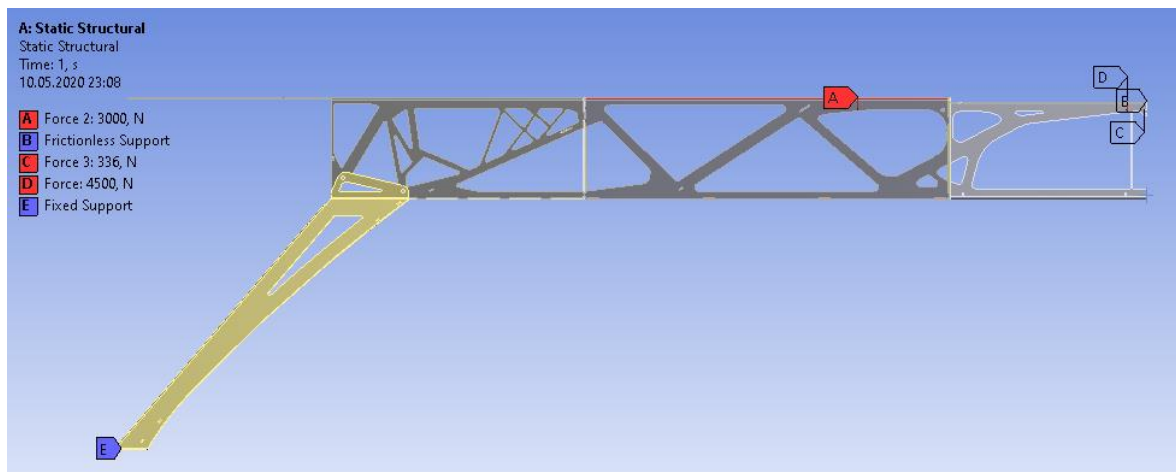
Valitud nelikanttoru 250x250x3 mm on sobiv antud koormustele. Konstruksiooni keskel on siire 1,95 mm ning konstruksiooni varutegur on 10,6. Neljameetrise tala mass on 92,5 kg. Selle arvutusega sain kinnituse, et teras S355 paksusega 3 mm on sobiv toorik, mida käesolevas töös kasutada.

3.3 Üldkonstruksiooni LEM-analüüs

Pärast projekteerimist teostan kogu konstruksioonile LEM-analüüsi. Selleks, et säästa aega ja arvutusressurssi, tuleks mudelit lihtsustada nii palju kui võimalik. Eemaldan mudelist kõik mittevajalikud detailid – poldid, mutrid, kinnituskõrvad ning detailid, mis üldkonstruksiooni hindamisel pole vajalikud. Arvutatavate elementide arvu saab 50% väiksemaks, kui mudel sümmeetriatasandilt poolitada ja analüüsida vaid üht poolt. Kasutan võimalikult lihtsaid kehadevahelisi kontakte, mis seovad kehade kokkupuutepinnad omavahel jäigalt kokku (nn. "Bonded"- tüüpi kinnitused). Ülesseadmine on kirjeldatud tabelis 3.3.1.

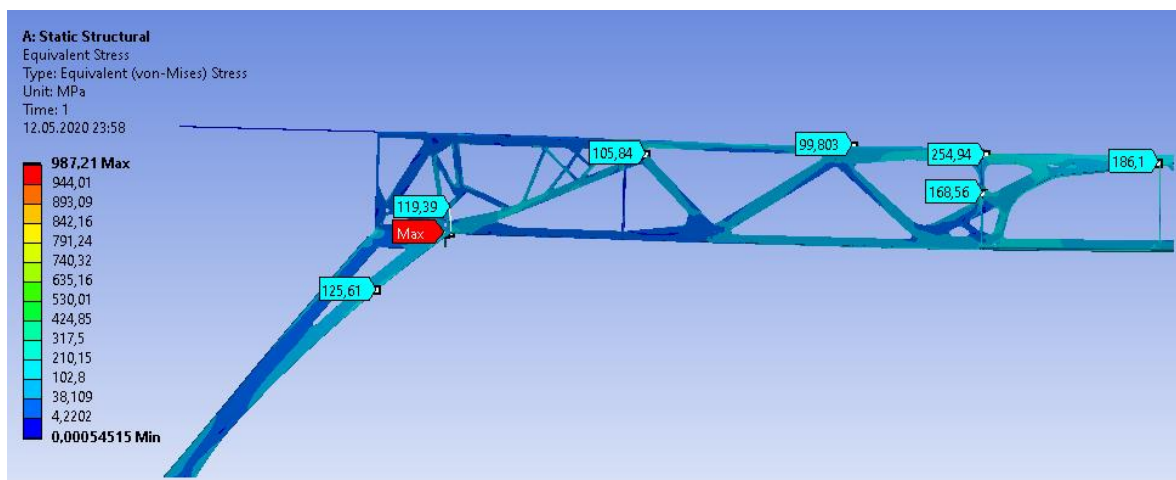
Tabel 3.3.1 Üldkoostu LEM-analüüsi ülesseadmine

Koormused	4500 N vertikaalkoormus keskmisele moodulile 3000 N vertikaalkoormus kõrvalasuvale moodulile 336 N horisontaalkoormus keskmise moodulile
Kinnitused	Fikseeritud kinnitus jalamooduli alumisele osale Liugtasapind (<i>Frictionless support</i>) sümmeetriatasapinnal Kehadevahelised kontaktid jäigad (<i>Bonded</i>)
Lihtsustused	Mudel on poolitatud sümmeetriateljelt Kinnitusvahendid eemaldatud Tugimoodulid (<i>vt pt 2.2.8 "Ohutus"</i>) eemaldatud Mittestruktuursed detailid eemaldatud
Elementide võrgustik (<i>Mesh</i>)	Analüüsi tüüp: 3D-kehad Elemendi suurus: 2 mm Elementide arv: 1004250
Materjal	Normaalelastsusmoodul (<i>Young's Modulus</i>): 210 GPa Tihedus: 7850 kg*m ⁻³ Voolepiir: 355 MPa Tõmbetugevus: 460 MPa
Seaded	Lahendaja: Otsene (<i>Direct</i>) Suured deformatsioonid: Jah



Sele 3.3.1 Illustratsioon staatilise analüüsi ülesseadmisest. Eestvaade sillale. Koormused A ja D rakendatakse horisontaalpindadele. Koormus C on horisontaalne koormus, mis rakendatakse keskmisel moodulile olevale poldiavale. Kontaktpind B on sümmeetria kasutamiseks vajalik liugtasapind. Kinnituspunkt E on fikseeritud jalamooduli kinnitusplaat.

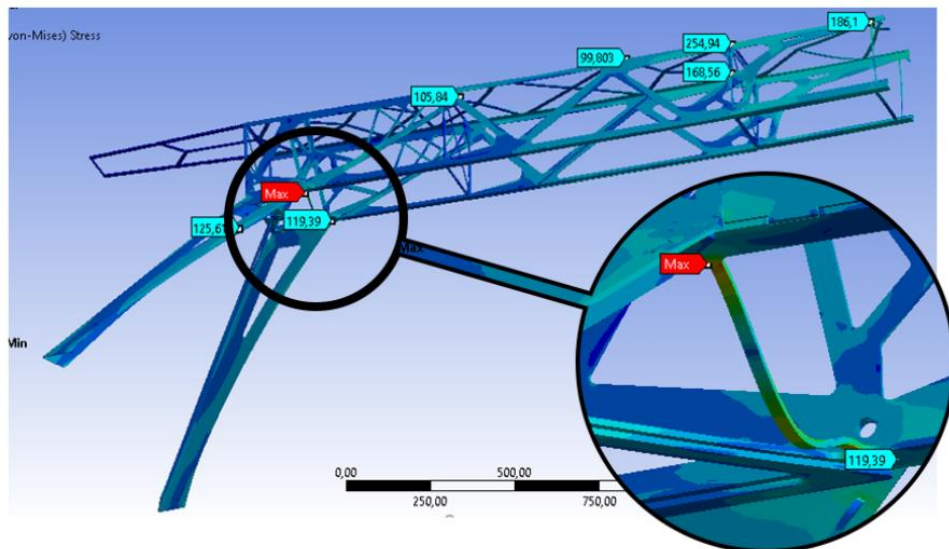
See, kuidas pinged jaotuvad, annab aimu, kuidas struktuur end jäigana proovib hoida. Kui pingete jaotumise skeemil on näha, et pinged koonduvad ühte punkti, siis tuleks sinna lisada materjali, näiteks tugevdusribina või lihtsalt nurkade ümardamise kaudu pingekoldeid vältida. Selel 3.3.2 on kujutatud pingete jaotumine. Tänu sellele, et sisenurkade raadiused on ümarad, jaotuvad pinged üsna ühtlaselt.



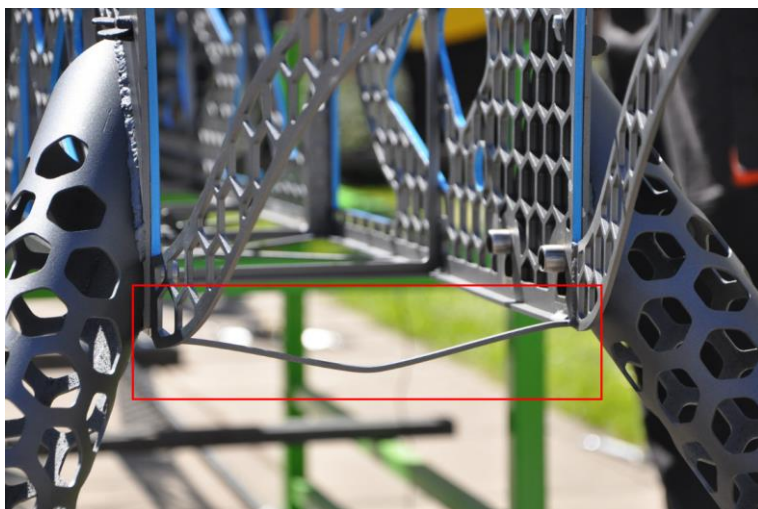
Sele 3.3.2 LEM-analüüsi tulemus. Pingete jaotumise skeem.

Üldine pingete jaotumine on rahuldav, kuid mõned pisiasjad selgusid tänu analüüsidele. Selleks on näiteks jalamoodulite vaheline ühendus (vt sele 3.3.3), mis suurte paindepingete tõttu tekitab nõrkeotlikku olukorra. Sarnane deformeerumine toimus 2019. aasta võistlusel, mis põhjustas ühe võistkonna diskvalifitseerimise liigsete siirete tõttu (sele 3.3.4). Korrektselt üles ehitatud LEM-analüüsid aitavad ennustada

deformatsioone kiiremini ja soodsamalt kui prototüübi ehitamine ja täpsemalt kui käsitsiarvutused. Seel 3.3.3 näidatud kohta tuleb tugevdada.

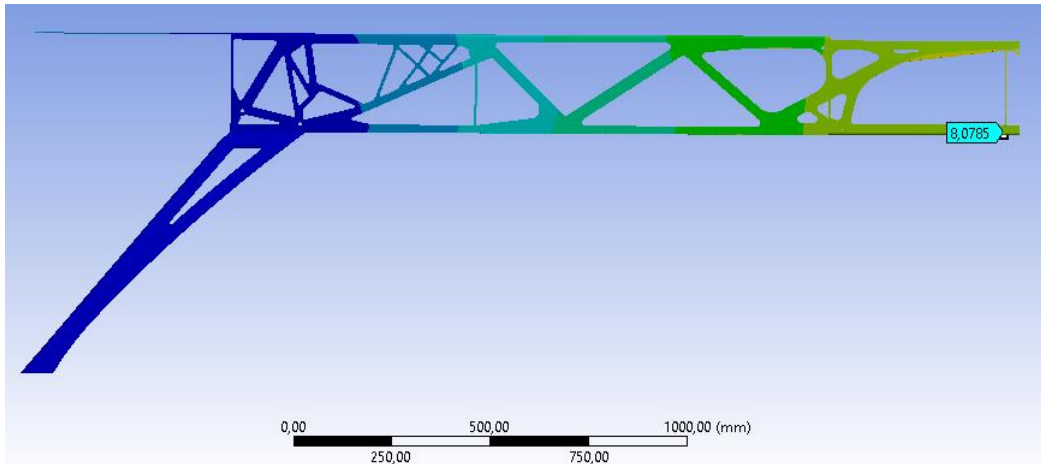


Sele 3.3.3 Detailvaade jalamoodulite vahelisele elemendile, mis koormuse tõttu nõtkub.



Sele 3.3.4 Lähivõte 2019. aastal võistleva meeskonna ktuBulls sillast, mis sarnase olukorra tõttu diskvalifitseeriti. [22]

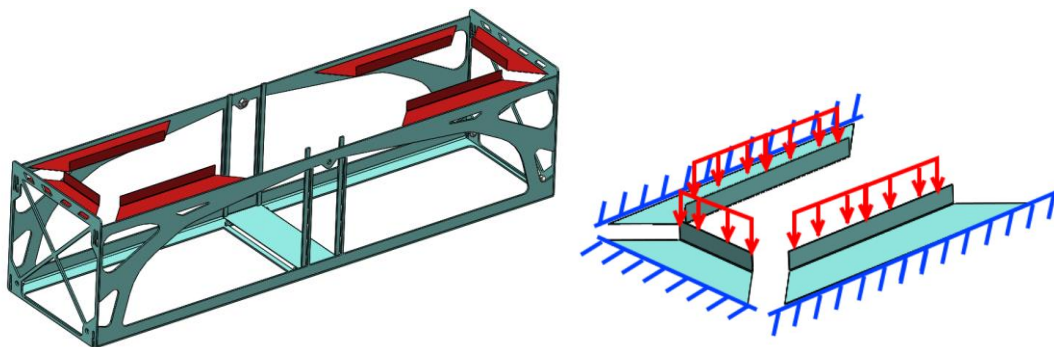
Deformatsioon selles punktis, kus võistlusel siiret mõõdetakse, on 8 mm, vt. sele 3.3.5. See on teoreetiline siire. Päril koormusolukorras lisanduvad sellele tootmisest tulenevad ebatäpsused ning lõtkud. On reaalne, et tegelik siire on 10 mm. Samas on oodata, et tänu negatiivse siirde mehhanismile tõuseb mõõdetav koht samuti kuni 10 mm ehk mõõdetav siire võistlusel on ligikaudu 0 mm.



Sele 3.3.5 Deformatsiooniskeem LEM-analüüsi tulemusena. Siire möõtmise kohas on 8 mm.

3.4 Lehtvedrude deformeerumine

Negatiivse siirde mehhanism (vt pt 2.2.6) kasutab oma funktsiooni teostamiseks kontrollitud deformatsioone. Kasutan LEM-analüüsi, et dimensioneerida teki pealispinda toetavad lehtvedrud. Eesmärgiks on hoida deformatsioonid võimalikult väikesed, kui sillal on eelkoormus 50 kg, ning et koormusel 750 kg oleksid need täielikult kokku surutud. Lehtvedrud on selil 3.4.1 punasega märgistatud. Teen kindlaks deformatsioonid, pinged ja koormused erinevatel olukordadel. Detailide materjaliks on teras DC01 paksusega 0,8 mm.



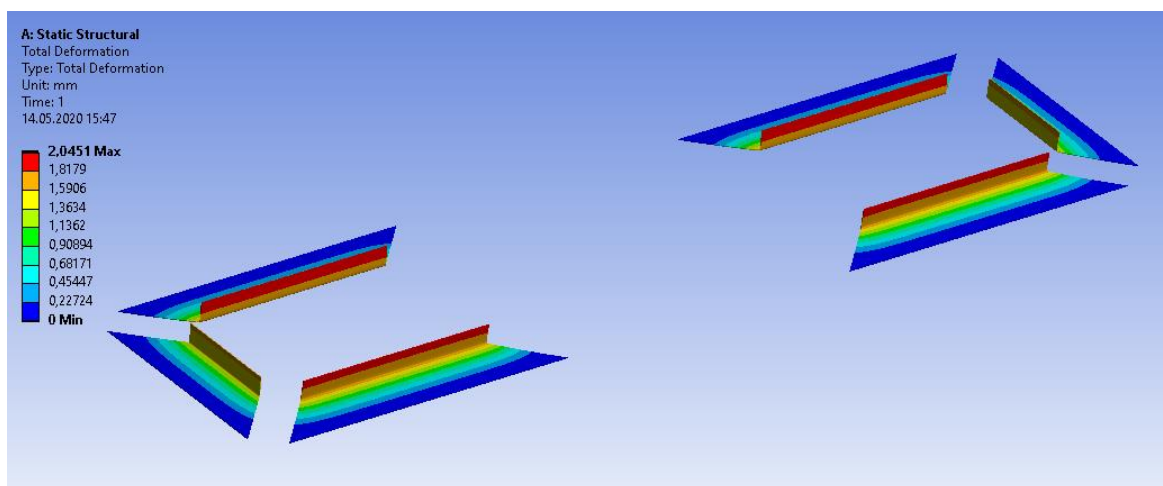
Sele 3.4.1 Lehtvedrud (märgistatud vasakul punaselt), mis tagavad selle, et eelkoormamisel tekiplaat liigselt alla ei vajuks. Paremäl koormamise skeem – Punasega illustreeritud koormus, sinisega fikseeritud küljed.

Analüüsi eesmärgiks on leida deformatsioon eelkoormusel 50 kg ning koormus, mille puhul deformatsioon on 8 mm. Selleks teostan 2 analüüsi. Esimeses analüüsis annan koormuse 500 N ning hindan deformatsioone. Teise analüüsi puhul määrän ette deformatsiooni 8 mm ning tulemuseks saan koormuse, mis on selle deformatsiooni tekitamiseks vajalik. Kolmandaks tahan leida koormuse, mille puhul sisepinge ületab

355 MPa ehk kui detailid hakkad plastselt deformeeruma. Analüüside seaded asuvad tabelis 3.4.1.

Tabel 3.4.1 Lehtvedrude LEM-analüüsi seaded

Koormused	1. analüüs: 500 N vertikaalkoormus jaotatud kõikidele vedrudele 2. analüüs: ettemääratud deformatsioon 8 mm 3. analüüs: Katsetuste abil leitud koormus 1100 N, mille puhul materjal läheneb plastsele deformatsioonile
Kinnitused	Fikseeritud kinnitatavad küljed
Lihtsustused	Kõik kehad peale vedrude eemaldatud
Elementide võrgustik (<i>Mesh</i>)	Analüüsi tüüp: 3D-kehad Elemendi suurus: 5 mm Elementide arv: 10542
Materjal (DC01)	Normaalelastsusmoodul (<i>Young's Modulus</i>): 210 GPa Tihedus: 7850 kg*m ⁻³ Voolepiir: 280 MPa Tõmbetugevus: 460 MPa
Seaded	Lahendaja: Otsene (<i>Direct</i>) Suured deformatsioonid: Jah



Sele 3.4.2. Näide analüüsi tulemusest. Esimene analüüs. Deformatsioon koormusel 500 N. Maksimaalne deformatsioon 2 mm.

Tabel 3.4.2 Vedru analüüside tulemused

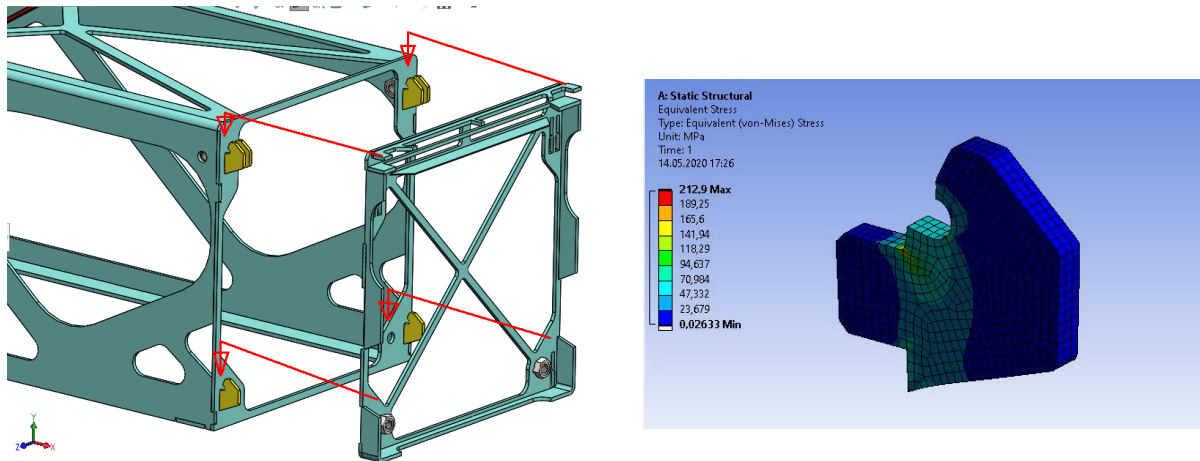
Kirjeldus	Eelkoormamisel <i>Hetkel, mil nullitakse siirde mõõtmise seadmed</i>	Materjali elastsuspiiril <i>Hetkel, mil vedrudes tekivad jäädavad deformatsioonid</i>	Lõplikul deformatsioonil <i>Hetkel, mil vedrud on täielikult alla surutud</i>
Deformatsioon	2 mm	3,2 mm	8 mm
Maks. pinge	180 MPa	280 MPa	1000 MPa <i>Väärtus on tühine. Toimunud on plastne deformatsioon.</i>
Koormus	500 N	800 N	4600 N <i>Väärtus on tühine. Toimunud on plastne deformatsioon.</i>

Negatiivse siirde mehhanismi mitmekordseks kasutamiseks on vaja taastada vedrude algne kuju, kuna suurtel koormustel need deformeeruvad plastselt. Võistlusel koormatakse silda vaid korra, seega selline plastsus ei mõjuta tulemust punktide poolest. Silla teistkordseks kasutamiseks peab keskmise mooduli pealmist plaati tungraua abil tõstma, et taastada vedrude deformeerumata kuju. Enne võistlust ei tohi mingil juhul koormata silda rohkem kui 800 N koormusega.

3.5 Moodulitevahelised kinnitused

Moodulid kinnituvad omavahel poltliidete ja kinnituskonksudega. Kinnitan LEM-analüüsides, et nende kõrvade kogus ja mõõtmed suudavad koormust vastu võtta. Analüüsimisel arvestan sellega, kuidas konks on mooduli külge keevitatud. Suurim koormus, mida üks kinnituskonks struktuuris kannab, on 1200 N.

Teostan analüüsi ühele konksule ning määran koormuse 1200 N. Varutegur kinnituskõrvas sellisel koormusel on 1,6. See on konservatiivne väärtus, sest ei ole arvestatud sellega, et ka poltliide kannab osa koormustest. Seel 3.5.1 on illustreerivalt näidatud moodulitevaheline kinnitamine ja näide pingete jaotusest koormust kandes.

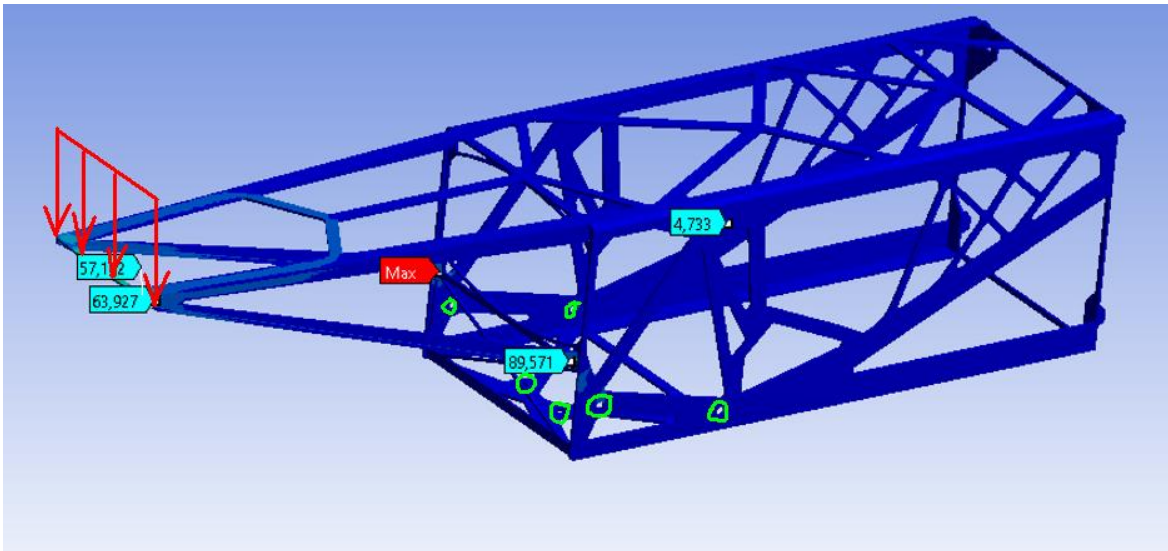


Sele 3.5.1 Vasakul moodulitevaheline kinnitamine konksudega, paremal illustratsioon tugevusanalüüsisist ja pingete jaotumisest koormusel. Maksimaalne pinge on 213 MPa.

Kinnitussõlmed on projekteeritud suurema varuteguriga ning lisaks kinnituskonksudele hoiab iga moodulit teise küljes ka vähemalt 2 M8 polti. Analüüsimisel ei ole arvestatud tugimoodulitega (pt 2.2.8), mis aga samuti seovad mooduleid. Kinnitused sobivad antud koormustele.

3.6 Deformatsioonid teki otpunktis

Reeglite kohaselt peab iga teki punkt suutma kanda vähemalt 34 kg koormust. Kõige vähem koormust suudavad kanda ilmselt teki otpunktid. Valideerin lihtsa tugevusanalüüsiga, et seda kohta koormates püsib struktuur jäigana. Selet 3.6.1 on illustratsioon hinnatavast moodulist ning pingete jaotusest. Fikseerisin kohad, kus moodul kinnitub jalgade külge ja määrasin koormuse 400 N otsaservale. Maksimaalne pinge oli 90 MPa ning deformatsioon 0,5 mm.



Sele 3.6.1 Äärmise tekimooduli tugevusanalüüs. Punasega märgitud koormus 400 N, rohelisega märgitud fikseeritud kinnituspunktid.

3.7 Kokkuvõte

Valideerimine andis kindluse, et projekteeritud lahendus on struktuurselt toimiv. Lisaks ilmses, et on vaja tugevdada peatükis 3.3 kirjeldatud kohta, kus jalgu ühendav element paindub koormamisel liigselt. Kogu konstruktsiooni varutegur on 1,2. Suurim deformatsioon on 8 mm. Valitud kinnituslahendused toimivad.

Negatiivse siirde süsteemi toetavad vedrud deformeeruvad eelkoormamisel (50 kg) 2 mm ning hakkavad plastselt deformeeruma koormuse 80 kg juures. Põhikoormusel on vedrud deformeerunud plastselt.

4. TOOTMINE

4.1 Tootmisplaan

Toote valmistamine on planeeritud vahemikku juuni-august 2020. Tootmise üldplaan on vajalik, et püsida ajakavas ja arvutada toote omahinda. Tabelis 4.1.1 annan ülevaate tootmise etappidest, ajakavast ja kuludest. Kulud on hinnangulised. Kogu töö on valmis hiljemalt 15. augustiks, mis annab enne võistlust aega 2 nädalat, et ülesseadmist harjutada ja tegeleda esitluste ettevalmistusega.

Tabel 4.1.1 Tootmisplaan

Aeg	Kirjeldus	Koht	Kulu	Kommentaar
01.06- 15.06.2020	Toorikud (max) : S355MC (8 mm) 500x280 S355MC (3 mm) 2000x5100 DC01 (0,8 mm) 500x460 Laserlõikus 106 detaili. Painutamine S355MC (3 mm), r=3; 13 detaili Painutamine DC01 (0,8 mm) r=1; 6 detaili	METEC	~400 €	Hind orienteeruv, kasutatud Fractory automaatset hinnastamist, vt tabel 4.2.2
15.06- 25.06.2020	Punktkeevitamine ~10 h	METEC / TalTech		Punktkeevitatud raami kontrollimine minu poolt. Ülesseadmine, visuaalne hinnang. Teostamise asukoht selgumisel
25.06- 25.07.2020	Keevitamine ~40 h	METEC / TalTech	~800 €	Teostamise asukoht selgumisel
25.07- 30.07.2020	Ülesseadmise harjutamine võistluseks	TalTech	-	
30.07- 10.08.2020	Moodulite pulbervärvimine UPS-5202 Lollypop Blue (Prismatic Powders)	METEC	~40 €	
10.08- 15.08.2020	Disainielementide lisamine	TalTech		Visuaalsed elemendid vastavalt kunstniku nägemusele
		KOKKU	1240 €	

4.2 Joonised

Hea toote välja mõtlemine ja CAD-mudeli tegemine on tootearenduses olulised tegevused. Sama oluline on see, et leiutatud lahendused saavad ka õigesti valmistatud

ning selleks on vaja, et insener suudab oma peas ja mudelis olevad mõtted ka teistele selgeks teha. Joonestamine on teatud mõttes nagu keel, mille kaudu tehnilist tööd tegevad inimesed omavahel suhtlevad. Kui keeleoskus on ebapiisav või ei vaevuta kogu vajalikku infot jagada, siis lähevad asjad "tõlkes kaduma". Järgnevad on mõned tüüpilised möödarääkimised, mis projekteerijate ja tootjate vahel aset võivad leida, ning millest need tulenevad.

- Komponentid ei sobitu omavahel hästi kokku – Joonisel on jäänud olulised mõõdud märkimata või pole antud edasi täpsustavaid nõudeid, kui täpselt peab mõõt joonisele vastama (lubatud tolerantsid). Tootja on ise valinud soodsaima meetodi, kuidas operatsioon teostada ning see on osutunud liiga ebatäpseks.
- Tootmine on ebavajalikult kulukas – Vastupidiselt eelnevale, märgitud nõuded on liiga kõrged. Näiteks freesimise puhul on palju soodsam hoida pinnakvaliteedi nõuded võimalikult madalad, sest siis on võimalik suurematel kiirustel lõigata. Peentöötlust peaks tegema vaid nendele pindadele, kus seda tõesti vaja on.
- Detaili geomeetria on vale – Joonisele on jäänud mõni vaade märkimata, mõõtmed tähistamata või pole seda märgata. Kus vähegi võimalik, peaks kasutama sektsioon- ja detailvaateid, et pöörata tähelepanu geomeetria, mis kolmvaatel peitu jäävad.
- Toode on kole – Täpsustamata on jäänud pinnatöötlus (metalldetailil on korrosioon) või nõuded toorikule (vineeri puhul näiteks spoonikihi kvaliteediklass), servad on teravad (puudub info minimaalse servaraadiuse/faasi kohta), värv on vale (puudub täpne värvikood).

Käesolevas peatükis annan ülevaate, milline on projekti tootmisjooniste paki ülesehitus ja jooniste järjekord. Toon näidised koostejoonistest ja detaili joonistest ja selgitan, millist infot joonistel kajastan.

4.2.1 Detailide ja jooniste nimetamine

Kogu sild koosneb 29 erinevast detailist (lehtmetallist lõigatud ja painutatud plaadid) ja kolmest erinevast kinnitusvahendist (poldid, keevismutrid). Detailidest on kokku keevitatud 6 erinevat moodulit. Selleks, et joonistel olev info oleks lihtsamini loetav, on mõned moodulite keeviskoostud jagatud omakorda veel alam-keeviskoostudeks. Kokku on konstruktsioonis 106 detaili, mis moodustavad 11 moodulit.

Jooniste nimetused on samad, mis CAD-mudelite nimetused. Peamudeli ja -joonise nimetus on DF_A000 ("A" nagu *Assembly* – Koost). Moodulite nimetused on DF_A001...005. Kui moodulis on alamkooste, siis nende nimetused on (näiteks mooduli A001 puhul) DF_A00101...003. Detailide nimetus aga ei järgi tema kuulumist koostu – detailide nimetused kulgevad järjest DF_P001...034 ("P" nagu *Part* – Detail). Üks detail võib samaaegselt kuuluda mitmesse erinevasse koostu, näiteks kinnituskõrv P024 ja tugevdusribi P030 kuuluvad samaaegselt mitmesse erinevasse moodulisse.

4.2.2 Komponentide tabelid

Tänu sellele, et mudeli hierarhia on korrektne ning on kasutatud detailide ja koostude loomisel eelnevalt ettevalmistatud malle, saab tekitada komponentide tabelleid ehk tükitabeleid (*BOM – Bill of Materials*), mis täituvad automaatselt mudelil põhineva infoga. Näiteks struktureeritud komponentide tabel 4.2.2.1 (*Multi-level BOM / Indented BOM*) on loodud automaatselt selle info põhjal, mis mudelis on. CAD-tööriistade õige kasutamine säästab suures koguses aega. Tabel 4.2.2.1 on kasuks tootmise etapis, kus individuaalsed detailid on toorikutest välja lõigatud ja painutatud ning need on vaja vastavatesse koostudesse seada ja kokku keevitada.

Tabel 4.2.2.1. Osa peakoostu struktureeritud BOMist. Sinisega on märgitud moodulite koostud, kollasega alam-keeviskoostud, rohelisega detailid, halliga ostukomponendid. *Welded Assembly* – Keeviskoost. *Sheet* – Lehtmaterjal.

	DET. NR	KIRJELDUS	MATERJAL	MASS	KOGUS
1	DF_A001	WELDED ASSEMBLY		6,84	2
2	DF_A00103	WELDED ASSEMBLY		5,84	1
3	DF_P004	SHEET T = 3 mm	S355MC	4,37	1
4	DF_P012	SHEET T = 3 mm	S355MC	1,21	1
5	DF_P030	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,09	2
6	DF_P034	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,07	1
7	DIN 929-M8-C				4
8	DF_A00101	WELDED ASSEMBLY		0,36	2
9	DF_P008	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,27	1
10	DF_P009	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,09	1
11	DF_A00102	WELDED ASSEMBLY		0,28	1
12	DF_P013	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,24	1
13	DF_P024	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,01	4
14	DF_A002	WELDED ASSEMBLY		6,45	2
15	DF_P005	SHEET T = 3 mm	S355MC	4,81	1
16	DF_P014	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,31	1
17	DF_A00201	WELDED ASSEMBLY		0,29	1
18	DF_P025	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,24	1
19	DF_P024	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,01	6
20	DF_P015	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,43	2
21	DF_P030	SHEET T = 3 mm	S355MC	0,09	2
.....					
52	DIN 929-M8-C				4
53	EYEBOLT DIN 358-M8-N				1
54	WING SCREW DIN 316-M8X14				25

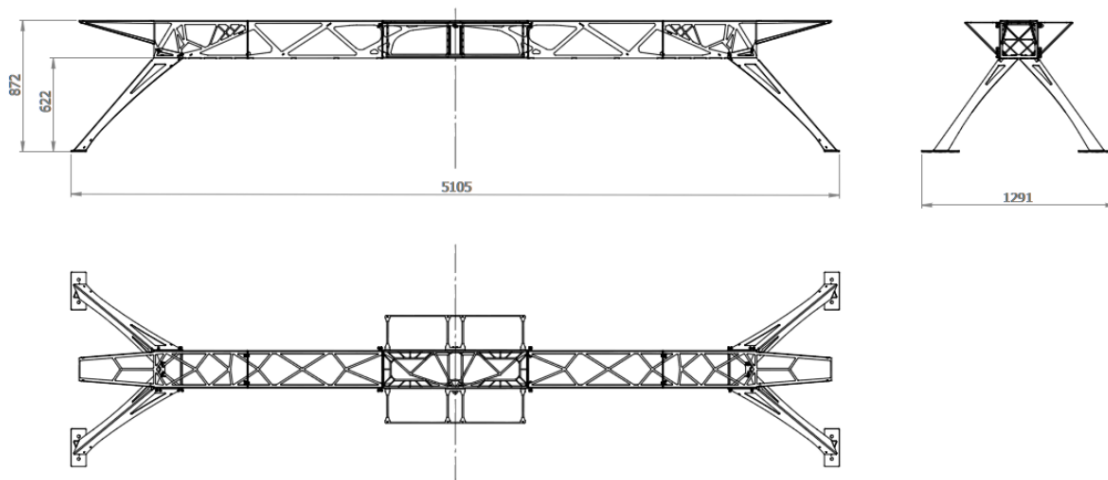
Tabel 4.2.2.2, struktureerimata tükitabel (*Parts-only BOM*) on tabel, mis on abiks tootmise esimestel etappidel, kui pole veel vaja teada infot koostudesse paigutamise kohta. See tabel on abiks näiteks laserlõikuse jaoks detailide paigutamisel toorikule. Tootmisinseneril on sellise tabeli abil hea kontrollida, mitu detaili teatud materjali ja paksusega toorikule läheb. Lisasin illustreerivalt ka tulba hinna kohta.

Tabel 4.2.2.2. Struktureerimata komponentide tabel. Eri värvidega on märgitud erinevast toorikust lõigatavad detailid.

	DET. NR	KIRJELDUS	MATERJAL	MASS	KOGUS	LÕIKUSE JA PAINUTUSE HIND, KOGUSEGA (fractory.com)
1	DF_P001	Sheet T = 8.00 mm	S355MC	0,91	4	10,76
2	DF_P002	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	3,22	2	23,94
3	DF_P004	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	4,37	2	58,62
4	DF_P005	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	4,81	2	48,50
5	DF_P006	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,91	1	9,95
6	DF_P008	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,27	4	10,36
7	DF_P009	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,09	4	3,68
8	DF_P012	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	1,21	2	23,58
9	DF_P013	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,24	2	5,00
10	DF_P014	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,31	2	6,12
11	DF_P015	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,43	4	5,72
12	DF_P016	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	4,83	1	29,36
13	DF_P017	Sheet T = 0.80 mm	DC01	0,1	4	10,92
14	DF_P019	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,04	4	1,44
15	DF_P020	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,01	2	0,40
16	DF_P021	Sheet T = 0.80 mm	DC01	0,11	1	0,74
17	DF_P022	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	1,18	1	9,04
18	DF_P023	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,13	4	4,12
19	DF_P024	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,01	20	2,60
20	DF_P025	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,24	2	5,18
21	DF_P026	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,29	2	6,90
22	DF_P027	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	1,23	2	36,90
23	DF_P028	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,05	8	4,00
24	DF_P029	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,07	8	5,60
25	DF_P030	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,09	8	5,44
26	DF_P031	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,27	4	5,20
27	DF_P033	Sheet T = 0.80 mm	DC01	0,06	2	9,34
28	DF_P034	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	0,07	2	0,82
29	DF_P102	Sheet T = 3.00 mm	S355MC	3,22	2	24,50
30	DIN 929-M8-C				26	
31	Eyebolt DIN 358-M8-N				1	
32	Wing screw DIN 316-M8X14				25	
				TOTAL	158 TK	400 € (ILMA KM)

4.2.3 Peajoonis ja koostejoonis

Peajoonis on joonisepaki esimene leht ning käesoleva töö puhul kuvab üldinfot projekti kohta ning märkuseid tootjale. Näidatud on üldmõõtmed ehk gabariidid ning teki alumise osa kõrgust maapinnast. Viimane mõõt on vajalik, sest soovin neid jooniseid võistlusele registreerimisel kasutada ja näidata, et antud kõrgus vastab reeglitele. Seel 4.2.3.1 on osa peajoonisest – lihtne kolmvaade tootele ja märkused tootja jaoks. BOM ja koostejoonis asuvad eraldi lehel. Täismõõdus joonised asuvad töö lõpus graafiliste lisadena.



NOTES

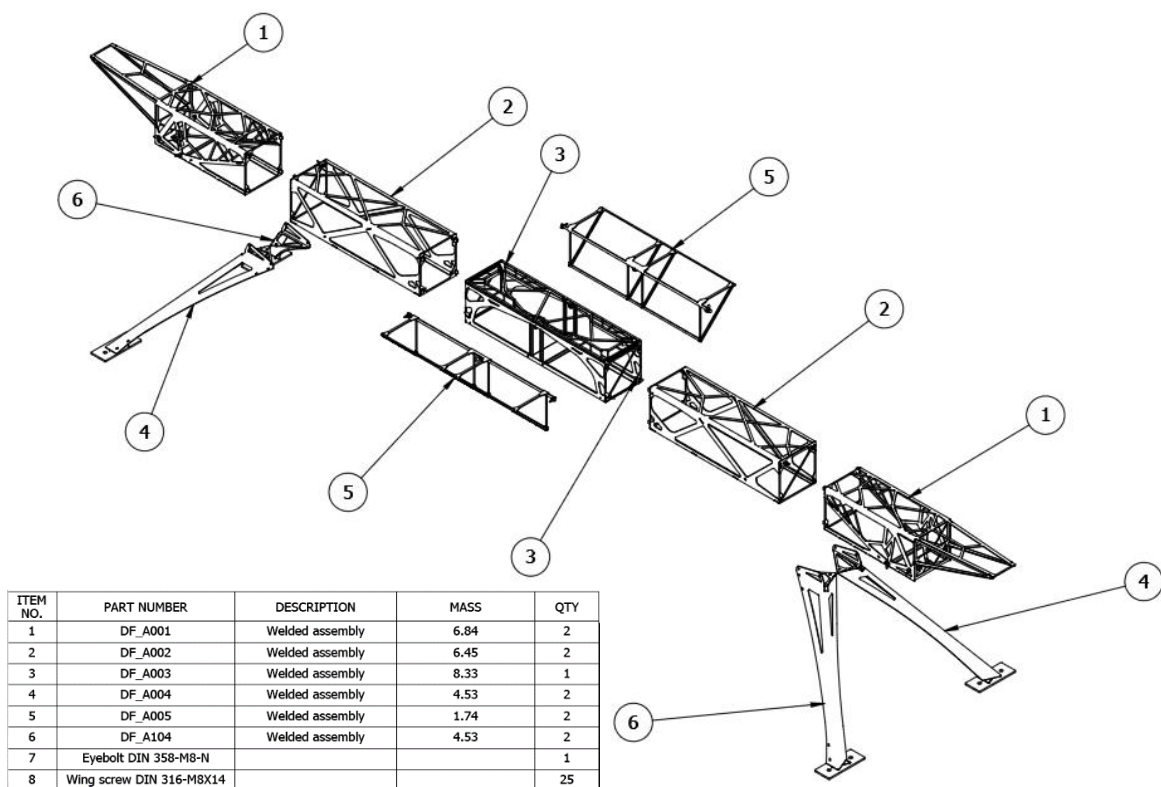
1. PHYSICAL FIT OF SHEET METAL TAB AND SLOT MUST BE GUARANTEED BY THE MANUFACTURER.
2. MARKING BEND LINES BY LASER ENGRAVING IS ALLOWED.
3. DEBURR ALL SHARP EDGES BEFORE SURFACE COATING.
4. ALL THREADED HOLES TO BE MASKED BEFORE SURFACE COATING.
5. BOLT HOLES WITHOUT THREADS OR WELDED NUTS MAY BE USED FOR ATTACHING HOOK FOR SURFACE COATING

ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)
	DRAWN BY Henri Palm		DRAWING NO. DF_A000	
	CHECKED BY		DESCRIPTION Main assembly	
	APPROVED BY		DATE	SHEET
LOVERS			15.05.2020	1 / 15
			PAPER	SCALE
			A3	1:20

Sele 4.2.3.1. Illustreeriv ülevaade peajoonisest. Täismõõdus joonised asuvad töö graafilises osas.

Koostejoonise (vt sele 4.2.3.2) eesmärk on näidata, kuidas paigutuvad komponendid üldkoostus. Kasutan nn. plahvatusvaadet (*ingl. k Exploded view*), et oleks võimalikult selge, milline on moodulite välimus ja asend. Koostejoonise tükitabel on ülevaatlik ja on oma põhimõttelt nende komponentide nimekiri, mis võistluspäeva alguses ootavad kokkupanemist. Osanumbrid ehk õhupallid (*ingl. k Balloons*) osutavad, mis detailiga on joonisel tegu. Joonisest on kasu tootjale, et veenduda moodulite omavahelises kokkusobivuses, silda üles seadvatele võistlejatele, et tutvuda silla kokkupanekuga ning ka lihtsalt selleks, et tutvustada silla tehnilist lahendust võistlusel kohtunikele, kaasvõistlejatele ja teistele huvilistele.

Täismõõdus joonised asuvad töö lõpus graafiliste lisadena.



Sele 4.2.3.2 Illustreeriv ülevaade koostejoonisest ja selle tükitabelist

4.2.4 Keeviskoostude joonised

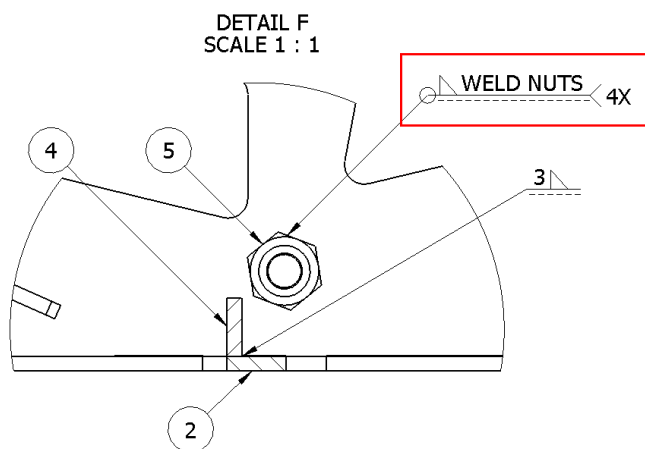
Keevisõmbluste märkimisel joonistele kasutan standardis EVS-EN ISO 2553:2019 määratud A-süsteemi tingmärke ja tähiseid. Valdav osa konstruktsioonis olevatest õmblustest on nurk- ja korkõmbused (vt tabel 4.2.4.1). Peaaegu kõik nurkõmbused on selleks, et kahte risti asetsevat detaili liita. Korkõmbused on ette nähtud selleks, et detaile läbi tappide keevitada.

Tabel 4.2.4.1. Nurkõmbuse ja korkõmbuse illustratsioon ja tingmärk [32]

Tähistus (õmbuse tüüp)	Keevisõmbuse tüübi illustratsioon (katkendjooned näitavad liite servade ettevalmistust enne keevitamist)	Tingmärk ^a
Nurkõmbus (fillet)		
Korkõmbus (plug)		

Lisaks tabelis 4.2.4.1 olevatele õmblustele märgin joonistele ka keevismutrite keevitamise. Kuna standardis [32] ei ole otseselt infot selle kohta, kasutan märkimiseks

selel 4.2.4.1 kujutatud meetodit, kombineerides nurkõmbluse, ümberringi õmbluse sümboolid ja lühikese märkme. Kui samas keeviskoostus on sarnaseid õmbluseid mitu, lisan koguse info märkme harksabasse.

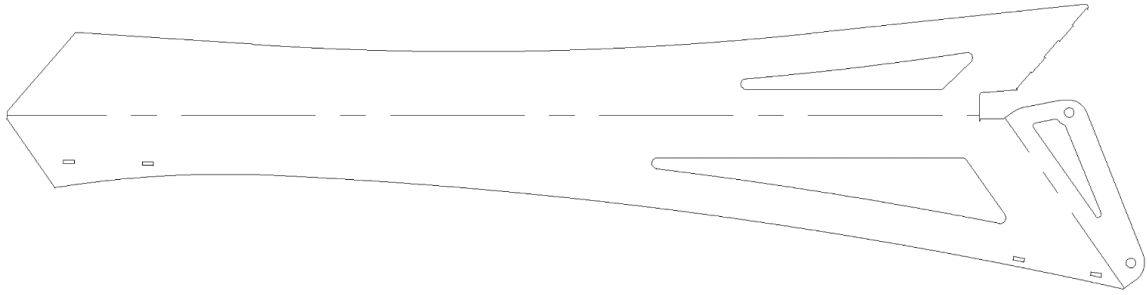


Sele 4.2.4.1 Katkend jooniselt DF_A00103. Näide keevismutri õmbluse märkimisest.

Kuna keeviste märkimine nõuab mitmeid erinevaid vaateid, mis võtavad lehel ruumi, on mõttekas jagada suuremad koostud mitmeks väiksemaks koostuks. Detailide keevitamised saab märkida eraldi joonistele ning need siis komplektselt tuua suuremasse koostu. Nii on ühel lehel vähem informatsiooni ja jooniseid on lihtsam lugeda. Töö graafilises lisas asuvad näited keeviskoostude joonistest.

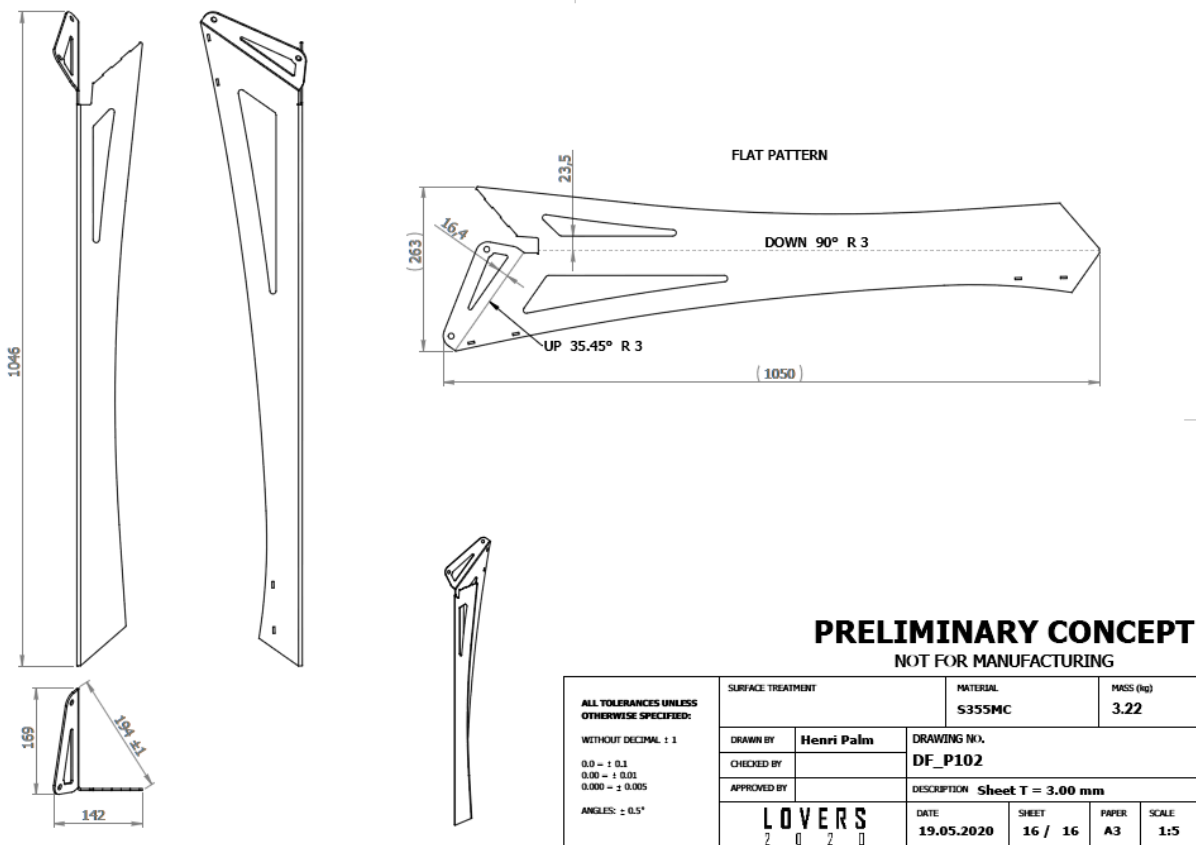
4.2.5 Detailide joonised

Detailide lõikused on teostatud arvjuhtimise (CNC) abil, seega painutamata detailide tootmise jaoks pole paberjoonisel mõtet igat joont mõõdistada. Paberil detaili jooniseid on vaja selleks, et keevitamisel teaks, milline detail välja näeb. Lisaks on igal detailijoonisel gabariitmõõtmed, mass ja materjaliinfo ning see info võib aidata lõikuste planeerimisel ja transpordil. Detailide puhul on oluliseks "jooniseks" digitaalkujul lõikekontuur ja paindejooned (*ingl. k bend lines*). Selle jaoks on levinud failiformaat DXF (*Drawing Exchange Format*), mille abil saab ette valmistada laserlõikuse programmi. Selel 4.2.5.1 on näide jalamooduli ühe detaili DXF-failist. See on pinnalaotus, millel on lõikamiseks kontuurid ja graveerimiseks painutusjooned.



Sele 4.2.5.1 Detaili DF_P002 DXF-joonise sisu. Detaili pinnalaotuse kontuurid ja painutusjooned.

Paberjoonisele tuleks märkida rohkem infot kui vaid jooned, kuna see on mõeldud inimese poolt lugemiseks. Selel 4.2.5.2 on võrdluseks sarnane detail DF_P102 joonisenä. See on joonis, mida kasutab painutuspingi operaator, et pinnalaotus detailiks painutada ja mõõte kontrollida. Töö graafilises lisas asuvad näited detailijoonistest.



Sele 4.2.5.2 Katkend joonisest DF_P012.

5. KOKKUVÕTE / SUMMARY

Käesoleva magistritöö eesmärk oli projekteerida modulaarne terrassild, mis on struktuurselt püsiv ning huvitava välimusega. Toode vastab sillaehitusvõistluse BRICO 2020 reeglitele ning on projekteeritud koormusele 1000 kg. Algselt püstitatud eesmärgid olid võimaldada silla kiire ülesseadmine, vähendada üleliigne mass topoloogia optimeerimise abil, kasutada tootmiskeskse projekteerimise metoodikat ja tutvustada töö lugejale, mis etappidest koosneb sellise toote arendamine.

Silla mõõtmed on 5105x1291x872 mm ning koosneb 11 poltidega ühendatavast moodulist. Kogu konstruktsiooni mass on 57 kg ning koosneb peamiselt lõigatud ja painutatud lehtmetaildetailidest. Materjalideks on terased S355MC ja DC01. Koormusel 1000 kg on konstruktsiooni varutegur vähemalt 1,2. Ülesseadmise aeg on maksimaalselt 3 minutit.

Töö alguses seatud eesmärgid said täidetud ning sild töötab olla võistlusel enam kui konkurentsivõimeline. Projekteerimine võttis aega ligikaudu 120 tundi, millest enamus kulus 3D-mudeli ehitamisele. Projekteerimistarkvaraks kasutasin Solidworks 2019 Student Edition ning LEM-analüüsideks ANSYS Mechanical. Suuri tehnilisi probleeme ei tekkinud tänu sellele, et mudelid olid üles ehitatud korrektselt.

Magistritöö on kirjutatud eesmärgiga tõsta lugejas huvi tootearenduse vastu ja tutvustada minu mõttekäike, kuidas ideest saab tootmisküps projekt. Sellele eesmärgile vastavalt on töö kirjutatud võimalikult arusaadavalt ja kasutatud on rohkelt illustratsioone, ent see on siiski tehnilise iseloomu, sõnavara ja arvutuskäikudega akadeemiline töö. Kogenud insenerid ja ka teiste valdkondade esindajad võivad leida tööst uusi meetodeid, mõttekäike või vähemalt inspiratsiooni. Sellised tudengiprojektid on head, sest annavad noorele insenerile võimaluse luua midagi innovatiivset ja hulljulget, mida tööpõllul hiljem ette ei tule.

Ees ootab projekteeritud silla tootmine (juuni-august 2020) ning võistlusel esindamine (september 2020). Toote joonisepaki ja 3D-mudelid annan inseneriteaduskonna üliõpilaskogu INSÜK liikmetele vabaks kasutamiseks lootusega, et see inspireerib teisi tudengeid arendama oma erialaseid oskuseid väljaspool loengusaali.

The objective of this master's thesis was to design a modular steel bridge which is structurally sound and aesthetically appealing. The product conforms to the rules of the steel bridge competition BRICO 2020 and has a designed load capacity of 1000 kg. Initial objectives were to allow for quick assembly, optimize mass by method of topology optimization, make use of principles of "Design for manufacturability" and to introduce to the reader, which stages make up the development of such a product.

The bridge general dimensions are 5105x1291x872 mm and it consists of 11 modular elements connected by bolts. The structure weighs 57 kg and consists primarily of cut and bent sheet metal parts. Materials are steel grades S355MC and DC01. The factor of safety under 1000 kg load is at least 1,2. Assembly time is at most 3 minutes.

The objectives were met and the bridge design shows great potential for the competition. The design process took about 120 hours, most of which was spent on building the 3D model assembly. I used Solidworks 2019 Student Edition for design and ANSYS Mechanical for FEM-analysis. No technical difficulties occurred, in large thanks to great care which was taken to ensure correct setup of models.

This thesis intends to raise the reader's interest towards product development and also to introduce my methods of turning an idea into a manufacturing-ready design. To aid that purpose, the style of writing is simple and abundant with illustrations, yet includes technical vocabulary and calculations for academic purposes. Skilled engineers as well as representatives of other fields may discover novel methods, proofs of concept or at least inspiration from this work. Such student projects allow a young engineer to create projects so innovative and reckless, the likes of which may never happen during employment.

The project is not complete – manufacturing is to take place (June-August 2020) as well as the competition itself (September 2020). The drawings and CAD files will be shared with members of the Student Council of School of Engineering with hopes that these may inspire other students to practice their specialty outside lectures as well.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- 1 **BRICO 2020 - About [Online]**
<http://www.brico.ee/about/> (16.04.2020)
- 2 **EVS-EN 10025-2:2019 Konstruksiooniterasest kuumvaltsitud tooted**
Eesti Standardikeskus (05.2020)
- 3 **BRICO 2020 – Rules and regulations [Online]**
<http://brico.ee/rules-and-regulations.pdf> (01.05.2020)
- 4 **Mehaanikainseneri käsiraamat (lk 447)**
Üldtoimetaja P. Kulu. TTÜ Kirjastus, Tallinn 2012
- 5 **Plasmalõikus (Fractory) [Online]**
<https://fractory.com/et/plasmaloikus/> (01.05.2020)
- 6 **Vesilõikus (Fractory) [Online]**
<https://fractory.com/et/vesiloikus/> (01.05.2020)
- 7 **How does laser cutting work (ESAB) [Online]**
<https://www.esabna.com/us/en/education/blog/how-does-laser-cutting-work.cfm> (01.05.2020)
- 8 **Laserlõikus (Fractory) [Online]**
<https://fractory.com/et/laserloikus/> (01.05.2020)
- 9 **Gaasilõikus (Fractory) [Online]**
<https://fractory.com/et/gaasiloikus/> (01.05.2020)
- 10 **Sheet metal forming (Custompart.net) [Online]**
<https://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming> (01.05.2020)
- 11 **Analyzing the k-factor in sheet metal bending (The Fabricator) [Online]**
<https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/analyzing-the-k-factor-in-sheet-metal-bending> (01.05.2020)
- 12 **Sheet Metal Design Guide (Geomiq) [Online]**
<https://geomiq.com/sheet-metal-design-guide/> (01.05.2020)
- 13 **Sheet Metal Bending – Methods, Design Tips & K Factor (Fractory) [Online]**
<https://fractory.com/sheet-metal-bending/> (01.05.2020)
- 14 **Design for Manufacturability Handbook, Second Edition (pt 1.3)**
J. Bralla. McGraw-Hill Handbooks 1999
- 15 **Design for Manufacturability Handbook, Second Edition (Joonis 7.1.15)**
J. Bralla. McGraw-Hill Handbooks 1999
- 16 **Design for Manufacturability Handbook, Second Edition (Joonis 7.1.7)**

-
- J. Bralla. McGraw-Hill Handbooks 1999
- 17 **Design for Manufacturability Handbook, Second Edition (Joonis 1.3.3)**
J. Bralla. McGraw-Hill Handbooks 1999
- 18 **Ehitusmehaanika. Varraskonstruksioonide staatika. (lk 605-608)**
A. Räämet, R. Räämet. TTÜ Kirjastus, 2018
- 19 **Introduction to the Finite Element Method, Fourth Edition**
J.N. Reddy. McGraw-Hill Education 2019
- 20 **BRICO 2019 results [Online]**
<http://www.brico.ee/2019/05/17/brico-2019-results/> (01.05.2020)
- 21 **BRICO 2016 photo gallery [Online]**
<http://www.brico.ee/2016/05/21/may-20th-award-ceremony/> (01.05.2020)
- 22 **BRICO 2019 photo gallery [Online]**
<http://www.brico.ee/2019/06/10/brico-2019-2/> (01.05.2020)
- 23 **Ehitusmehaanika. Varraskonstruksioonide staatika. (lk 371-374)**
A. Räämet, R. Räämet. TTÜ Kirjastus, 2018
- 24 **Suuline vestlus BRICO 2018 ja 2019 projektijuhi Karl Sachrisega**
(04.05.2020)
- 25 **Pratt truss illustration (Wikimedia Commons, user: Pau) [Online]**
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pratt_truss.PNG (04.05.2020)
- 26 **Generative design (Autodesk) [Online]**
<https://www.autodesk.com/solutions/generative-design> (04.05.2020)
- 27 **Euler's Buckling Formula (Engineering Core Courses) [Online]**
<http://www.engineeringcorecourses.com/solidmechanics2/C5-buckling/C5.1-eulers-buckling-formula/theory/> (04.05.2020)
- 28 **Tugevusõpetus (lk 388)**
A. Klauson, J. Metsaveer, P. Põdra, U. Raukas. TTÜ Kirjastus 2017
- 29 **Tugevusõpetus (lk 324)**
A. Klauson, J. Metsaveer, P. Põdra, U. Raukas. TTÜ Kirjastus 2017
- 30 **Steel design properties (Eurocode Applied) [Online]**
<https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>
(05.05.2020)
- 31 **Mehaanikainseneri käsiraamat (lk 47-49)**
Üldtoimetaja P. Kulu. TTÜ Kirjastus, Tallinn 2012
- 32 **EVS-EN ISO 2553:2019. Keevitus ja külgnevad protsessid. Tingmärkidega tähistamine joonistel. Keevisliited.**
Eesti Standardikeskus, 2019

LISAD

Lisa 1. 2019. aasta kergeim sild, täpsustus

Kuigi töös mainisin, et kergeim sild kaalus 59 kg, siis tegelikkuses oli ühel võistkonnal sild massiga 48 kg. See aga deformeerus koormamisel liigselt, mistõttu diskvalifitseerus kõikides kategooriates peale esteetika. Järgnevalt lisan alternatiivse tabeli L1.1, milles on arvestatud hoopis selle silla massi. Nagu näha, siis on ikkagi napilt otstarbekam keskenduda huvitavama välimusega konstruktsiooni disainimisele, mitte kilogrammide säästmisele. Parima välimuse ja kergeima silla projekteeris 2019. aastal Leedu võistkond ktuBulls, kuid sai osaleda vaid esteetika hindamisel, sest sild vajus koormamisel üle 25 mm.

Tabel L1.1. Massi ja välimuse võrdlus, arvestades ka 2019. a võistkonna ktuBulls tulemusi. Tabeli selgituseks vt pt 2.1.1.

	A	B
	<i>Ilus ja keskpärase massiga sild</i>	<i>Kerge ja keskpärase välimusega sild</i>
Esteetika hinne (0-100)	93,8	75,4
Mass (kg)	70,4	48,7
2020 trahvipunktid	33,5	33,7

Lisa 2. Koostekiiruse ja massi mõju skoorile, meetodi selgitus

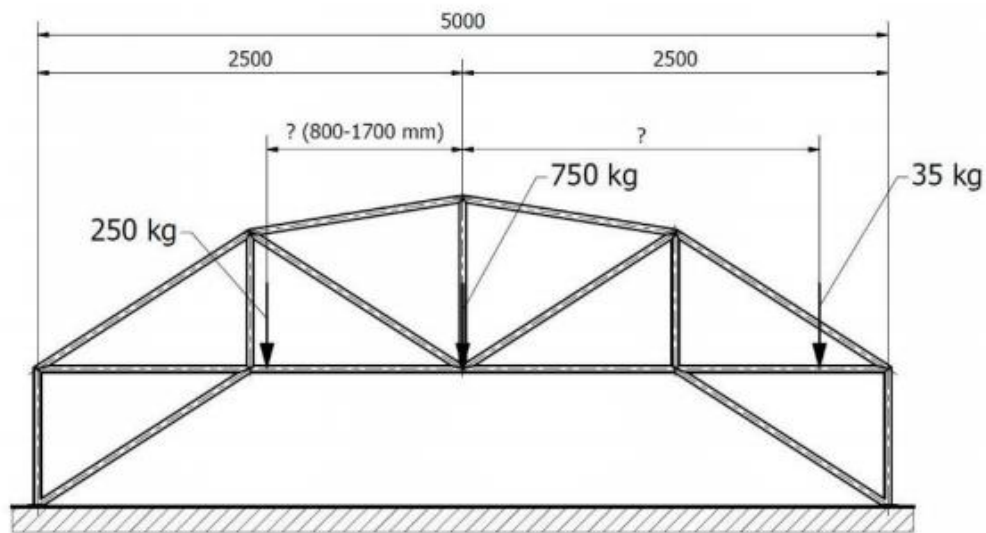
Selleks, et arvutada, kas on tõhusam teha kerge sild või kiirelt ülesseatav sild, kasutasin peatükis 2.1 kirjeldatud arvutustabeleid. Tulbas A on sild, mis on struktuurselt väga efektiivne, kuid koostamise aeg on pikk. See on näiteks kaarsild, milleks on vaja suuremas koguses mooduleid. Tulbas B on sild, mis on massiivsem, kuid koosneb väiksemast hulgast moodulitest ning saavutab koostekiiruse poolest võistluse rekordi. Need andmed sisestan oma arvutustabelisse, mis reeglites antud valemite põhjal arvutab lõpptulemuse. Umbkaudselt on samaväärne see, kui sild on 28 kg raskem, ent 12 minuti võrra kiiremini ülesseatav.

Tabel L2.1. Massi ja koostekiiruse võrdlus. Andmed on illustratiivsed, eesmärgiga leida sarnane lõppskoor.

	A	B
	<i>Kerge, kuid paljude moodulitega sild</i>	<i>Massiivne, kuid väheste moodulitega sild</i>
Mass (kg)	45	73
Koostamise kiirus (min)	15	3
2020 trahvipunktid	37,5	37,7

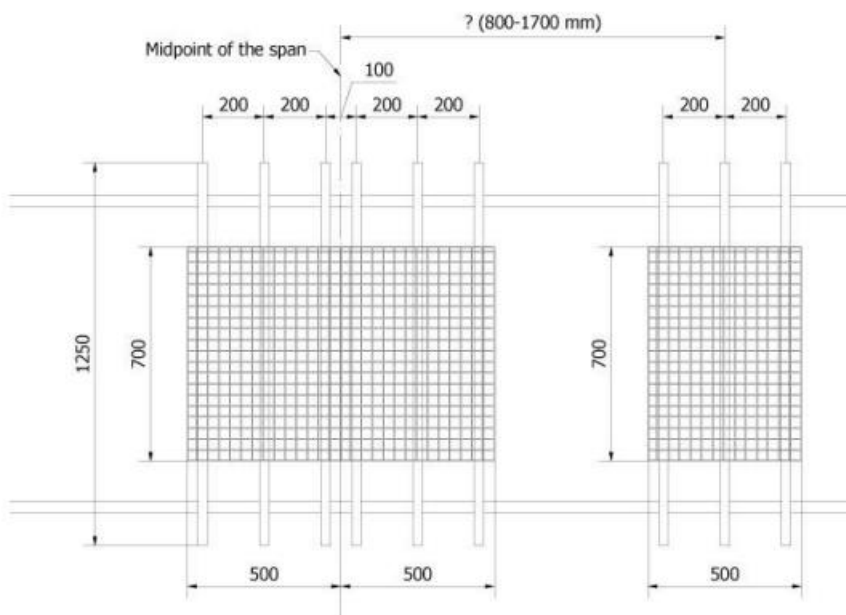
Lisa 3. Väljavõtte reeglitest – koormamise skeem

Järgnevas lisas on koormamise skeem võistluspäeval. Lisakoormus 250 kg valitakse kohapeal juhuslikult, mis on vahemikus 800-1700 mm. Konstruktsiooni seisukohast kõige halvem variant on 800 mm ehk tugijalgadest kõige kaugemal olev asukoht.



Vertical load test

Sele L3.1 Väljavõtte võistlusreeglitest. Koormuste asukohad illustreeritult. [3]



Sele L3.2 Nelikanttorud ja rest, mis asetatakse tekile ning millele omakorda asetatakse koormused. [3]

Lisa 4 – Eeldatav trahvipunktide hulk võistlusel

Tabelis L4.1 on arvestuslikud trahvipunktid, mida võistluse jooksul kogume. Vasakul tulbas on halvim oodatav tulemus, kus negatiivse siirde mehhanism ei toimi nagu planeeritud, esteetika skoor jääb kesiseks ning moodulite kaalumisel leitakse, et mõni moodul ületab massi 7 kg. Paremas tulbas on parim oodatav tulemus, kus esteetikas saame hea skoori ja siire mõõdetakse negatiivseks.

Tabel L4.1 Võistkonna eeldatavad üldtulemused

Halvim oodatav tulemus		Parim oodatav tulemus	
PERFORMANCE AT COMPETITION		PERFORMANCE AT COMPETITION	
DISPLAY SCORE (1...100)	80	DISPLAY SCORE (1...100)	94
MASS (kg)	57	MASS (kg)	57
ASSEMBLY TIME (min)	3	ASSEMBLY TIME (min)	2
HORIZONTAL DISPLACEMENT (mm)	4	HORIZONTAL DISPLACEMENT (mm)	4
VERTICAL DISPLACEMENT (mm)	4	VERTICAL DISPLACEMENT (mm)	-2
NO. OF CATEGORY WINS	2	NO. OF CATEGORY WINS	2
NO. OF RECORDS BEATEN	1	NO. OF RECORDS BEATEN	2
PENALTIES		PENALTIES	
P1. TOTAL GEOMETRY VIOLATIONS (p)	0	P1. TOTAL GEOMETRY VIOLATIONS (p)	0
P2. SINGLE ELEMENT SIZE/WEIGHT VIOLATIONS (p)	2	P2. SINGLE ELEMENT SIZE/WEIGHT VIOLATIONS (p)	0
P3. BRIDGE / SUPPORT COLLAPSE DURING CONSTRUCTION	0	P3. BRIDGE / SUPPORT COLLAPSE DURING CONSTRUCTION	0
P4. TOOL, FASTENER, EQUIPMENT DROPPED. STEPPED INTO RESTRICTED AREA	0	P4. TOOL, FASTENER, EQUIPMENT DROPPED. STEPPED INTO RESTRICTED AREA	0
P5. THROWING TOOLS OR FASTENERS	0	P5. THROWING TOOLS OR FASTENERS	0
P6. AMOUNT OF LOOSE BOLTS	0	P6. AMOUNT OF LOOSE BOLTS	0
P7. LOCAL DISPLACEMENT OVER 4 mm WHEN 35 kg APPLIED	0	P7. LOCAL DISPLACEMENT OVER 4 mm WHEN 35 kg APPLIED	0
RESULTS		RESULTS	
CONSTRUCTION ECONOMY Cc	2,53	CONSTRUCTION ECONOMY Cc	1,63
STRUCTURAL EFFICIENCY Cs	25,78	STRUCTURAL EFFICIENCY Cs	16,93
OVERALL	35,31	OVERALL	16,97

Võistluse punktiarvestus on igal aastal erinev ning ühel aastal hea tulemuse saavutanud sild võib järgneval aastal olla kehv. Siiski, juhul kui käesolevas projektis oleva sillaga oleksime 2019. aasta võistlusel osalenud, oleks saavutanud üsna tõenäoliselt võidupositsiooni. Tabelis L4.2 on 2019. aasta skooritabel, millese lisasin käesoleva silla andmed ja eeldatavad tulemused võistluspäeval.

Tabel L4.2 Eeldatavad tulemused 2019. aasta punktiarvestuse kohaselt

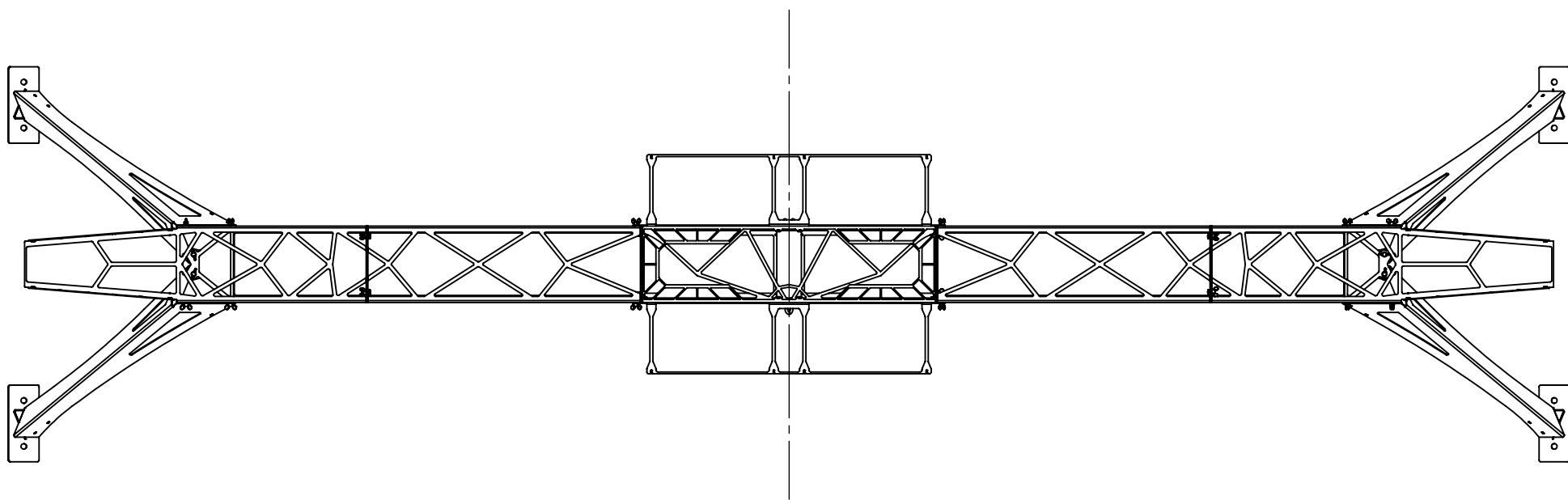
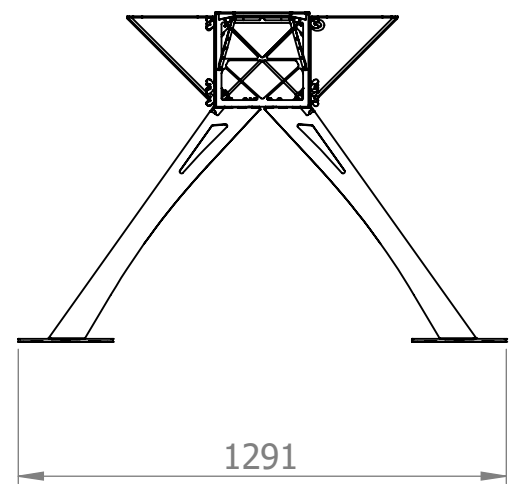
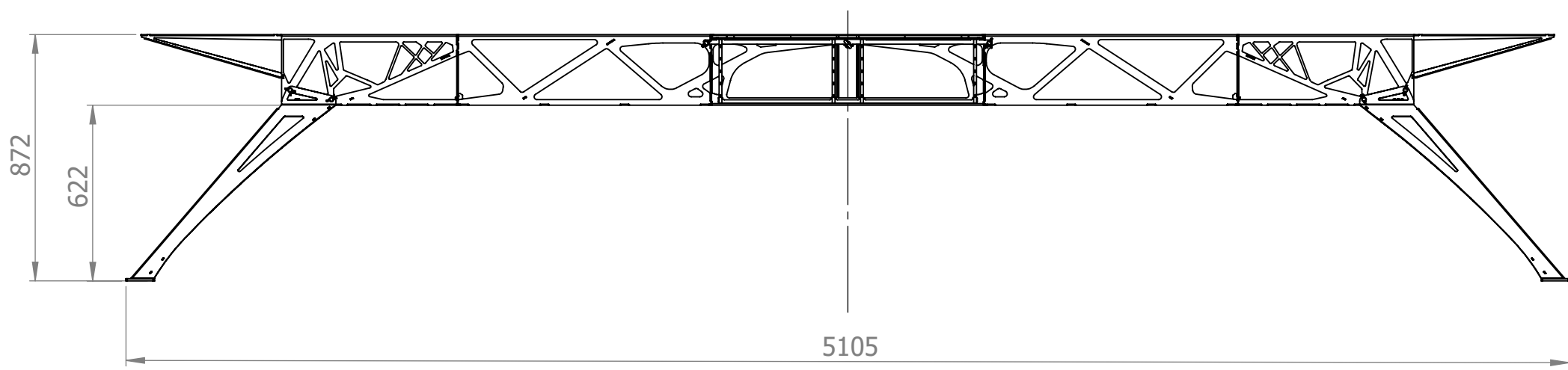
TEAM	INPUT					COST CALCULATION					RESULTS (LOWEST SCORE WINS)			
	AEST.	TIME	VER	HOR	WEIGHT	AEST	WORK	VER	HOR	WEIGHT	MARU STRUCTU RAL EFFICIEN CY	CONSTRU CTION EFFICIEN CY	DISPLAY	TOTAL SCORE
	-	min	mm	mm	kg	points	points	points	points	points	points	points	points	points
Column1														
Steel Spiders	81,70	21,42	3,16	1,23	57,20	4,19	2,37	1,58	1,19	4,88	7,65	2,37	4,19	13,21
Lovers	75,20	16,35	2,27	3,18	67,45	5,18	1,93	1,39	1,58	6,49	9,46	1,93	5,18	15,57
Team Parable	81,20	22,77	4,00	7,88	59,35	4,26	2,50	1,78	3,11	5,18	10,08	2,50	4,26	16,83
Hexagon	82,50	19,63	6,53	0,64	93,00	4,08	2,20	2,56	1,10	13,18	16,84	2,20	4,08	23,12
Stalowni Mocni	50,80	25,62	4,72	1,04	72,45	11,47	2,80	1,97	1,16	7,45	10,59	2,80	11,47	24,86
Steel Dream	70,50	23,09	2,95	0,29	60,30	6,04	2,53	1,53	1,04	5,32	7,89	2,53	6,04	25,06
The Steelers	67,80	19,10	2,17	0,21	104,80	6,59	2,16	1,37	1,03	18,28	20,68	2,16	6,59	28,42
ktuBulls	93,80	1,60	25,00	4,73	48,65	2,83	1,07	36,76	1,98	3,85	42,59	1,07	2,83	44,48
LOVERS 2020	80,00	3,00	4,00	4,00	57,00	4,43	1,13	1,78	1,78	4,86	8,42	1,13	4,43	11,97

GRAAFILINE OSA

Järgnevad A3-formaadis joonised. Need ei sisalda kõikide projektis olevate koostude ega detailide jooniseid, vaid 15 näitlikku joonist 42-st.

Jooniste järjestus:

1. DF_A000 Peajoonis
2. BOM-tabelid
3. DF_A000 Koostejoonis
4. DF_A001 Keeviskoost
5. DF_A00103 Keeviskoost
6. DF_A00101 Keeviskoost
7. DF_A00102 Keeviskoost
8. DF_P004
9. DF_P012
10. DF_P030
11. DF_P034
12. DF_P008
13. DF_P009
14. DF_P013
15. DF_P024



NOTES

1. PHYSICAL FIT OF SHEET METAL TAB AND SLOT MUST BE GUARANTEED BY THE MANUFACTURER.
2. MARKING BEND LINES BY LASER ENGRAVING IS ALLOWED.
3. DEBURR ALL SHARP EDGES BEFORE SURFACE COATING.
4. ALL THREADED HOLES TO BE MASKED BEFORE SURFACE COATING.
5. BOLT HOLES **WITHOUT** THREADS/WELDED NUTS MAY BE USED FOR ATTACHING HOOK FOR SURFACE COATING

<p>ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:</p> <p>WITHOUT DECIMAL ± 1</p> <p>0.0 = ± 0.1</p> <p>0.00 = ± 0.01</p> <p>0.000 = ± 0.005</p> <p>ANGLES: ± 0.5°</p>	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
				56.59	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_A000		
APPROVED BY		DESCRIPTION Main assembly			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	1 / 16	A3	1:20

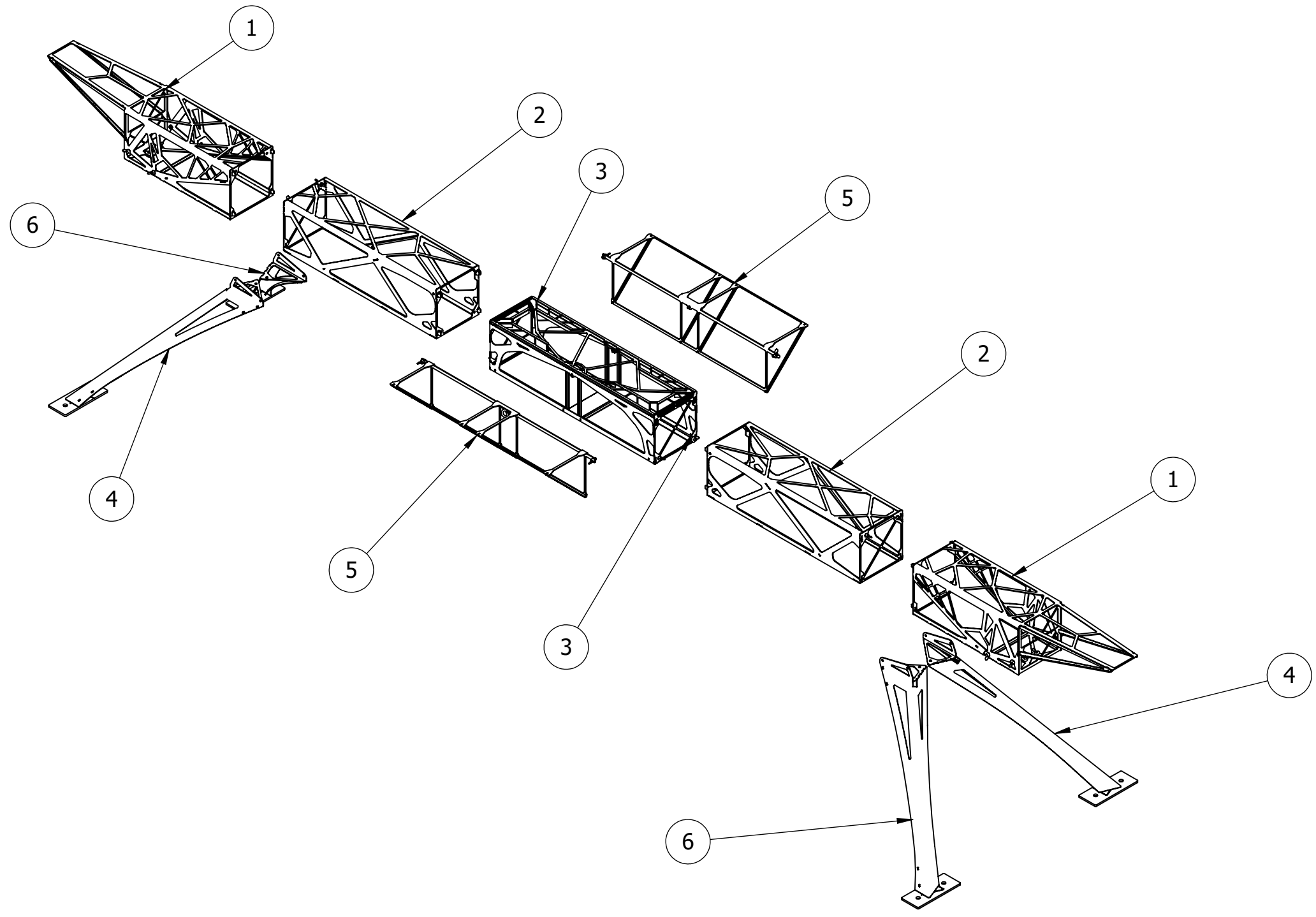
TABLE 1. STRUCTURED BOM

PART NUMBER	DESCRIPTION	MATERIAL	MASS	QTY.
DF_A001	WELDED ASSEMBLY		6.84	2
DF_A00103	WELDED ASSEMBLY		5.84	1
DF_P004	Sheet T = 3 mm	S355MC	4.37	1
DF_P012	Sheet T = 3 mm	S355MC	1.21	1
DF_P030	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.09	2
DF_P034	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.07	1
DIN 929-M8-C				4
DF_A00101	WELDED ASSEMBLY		0.36	2
DF_P008	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.27	1
DF_P009	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.09	1
DF_A00102	WELDED ASSEMBLY		0.28	1
DF_P013	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.24	1
DF_P024	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.01	4
DF_A002	WELDED ASSEMBLY		6.45	2
DF_P005	Sheet T = 3 mm	S355MC	4.81	1
DF_P014	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.31	1
DF_A00201	WELDED ASSEMBLY		0.29	1
DF_P025	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.24	1
DF_P024	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.01	6
DF_P015	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.43	2
DF_P030	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.09	2
DIN 929-M8-C				4
DF_A003	WELDED ASSEMBLY		8.33	1
DF_A00302	WELDED ASSEMBLY		6.61	1
DF_P026	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.29	2
DF_P022	Sheet T = 3 mm	S355MC	1.18	1
DF_P016	Sheet T = 3 mm	S355MC	4.83	1
DF_P020	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.01	2
DIN 929-M8-C				6
DF_P021	Sheet T = 0.8 mm	DC01	0.11	1
DF_A00301	WELDED ASSEMBLY		1.61	1
DF_P006	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.91	1
DF_P017	Sheet T = 0.8 mm	DC01	0.10	4
DF_P033	Sheet T = 0.8 mm	DC01	0.06	2
DF_P019	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.04	4
DF_A004	WELDED ASSEMBLY		4.53	2
DF_P002	Sheet T = 3 mm	S355MC	3.22	1
DF_P001	Sheet T = 8 mm	S355MC	0.91	1
DF_P023	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.13	1
DIN 929-M8-C				1
DF_P031	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.27	1
DF_A005	WELDED ASSEMBLY		1.74	2
DF_P027	Sheet T = 3 mm	S355MC	1.23	1
DF_A00501	WELDED ASSEMBLY		0.13	4
DF_P028	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.05	1
DF_P029	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.07	1
DF_A104	WELDED ASSEMBLY		4.53	2
DF_P102	Sheet T = 3 mm	S355MC	3.22	1
DF_P023	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.13	1
DIN 929-M8-C				1
DF_P001	Sheet T = 8 mm	S355MC	0.91	1
DF_P031	Sheet T = 3 mm	S355MC	0.27	1
EYEBOLT DIN 358-M8-N				1
WING SCREW DIN 316-M8X14				25

TABLE 2. PARTS-ONLY BOM

PART NUMBER	DESCRIPTION	MATERIAL	BEND RADIUS	MASS	QTY
DF_P001	Sheet T = 8 mm	S355MC		0.91	4
DF_P002	Sheet T = 3 mm	S355MC	3	3.22	2
DF_P004	Sheet T = 3 mm	S355MC	3	4.37	2
DF_P005	Sheet T = 3 mm	S355MC	3	4.81	2
DF_P006	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.91	1
DF_P008	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.27	4
DF_P009	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.09	4
DF_P012	Sheet T = 3 mm	S355MC	3	1.21	2
DF_P013	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.24	2
DF_P014	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.31	2
DF_P015	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.43	4
DF_P016	Sheet T = 3 mm	S355MC	3	4.83	1
DF_P017	Sheet T = 0.8 mm	DC01	0.8	0.10	4
DF_P019	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.04	4
DF_P020	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.01	2
DF_P021	Sheet T = 0.8 mm	DC01		0.11	1
DF_P022	Sheet T = 3 mm	S355MC		1.18	1
DF_P023	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.13	4
DF_P024	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.01	20
DF_P025	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.24	2
DF_P026	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.29	2
DF_P027	Sheet T = 3 mm	S355MC	3	1.23	2
DF_P028	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.05	8
DF_P029	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.07	8
DF_P030	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.09	8
DF_P031	Sheet T = 3 mm	S355MC	4580	0.27	4
DF_P033	Sheet T = 0.8 mm	DC01	0.8	0.06	2
DF_P034	Sheet T = 3 mm	S355MC		0.07	2
DF_P102	Sheet T = 3 mm	S355MC	3	3.22	2
DIN 929-M8-C					26
EYEBOLT DIN 358-M8-N					1
WING SCREW DIN 316-M8X14					25
					158

ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL		MASS (kg)	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.			
	CHECKED BY					
	APPROVED BY		DESCRIPTION			
	LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
			22.05.2020	2 / 16	A3	1:50



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	MASS	QTY
1	DF_A001	Welded assembly	6.84	2
2	DF_A002	Welded assembly	6.45	2
3	DF_A003	Welded assembly	8.33	1
4	DF_A004	Welded assembly	4.53	2
5	DF_A005	Welded assembly	1.74	2
6	DF_A104	Welded assembly	4.53	2
7	Eyebolt DIN 358-M8-N			1
8	Wing screw DIN 316-M8X14			25

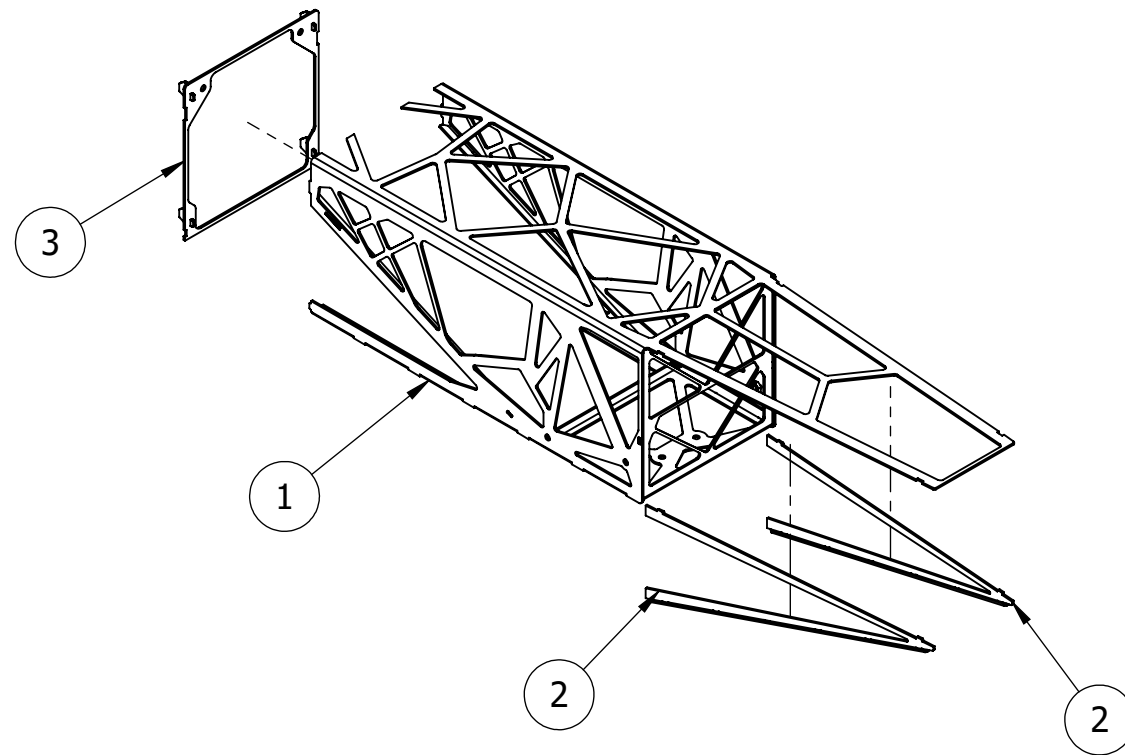
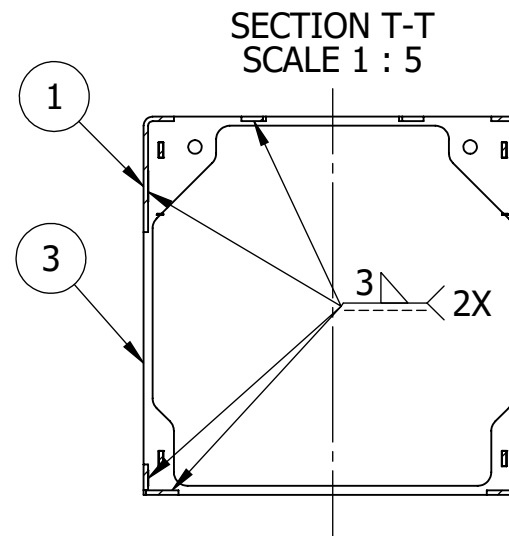
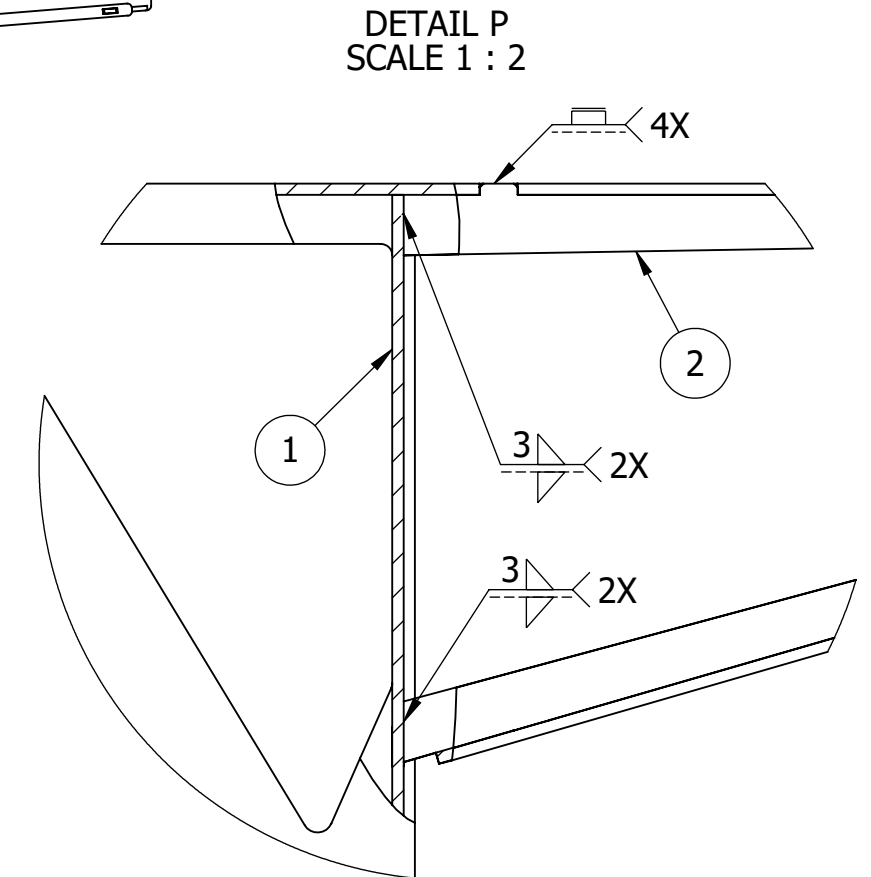
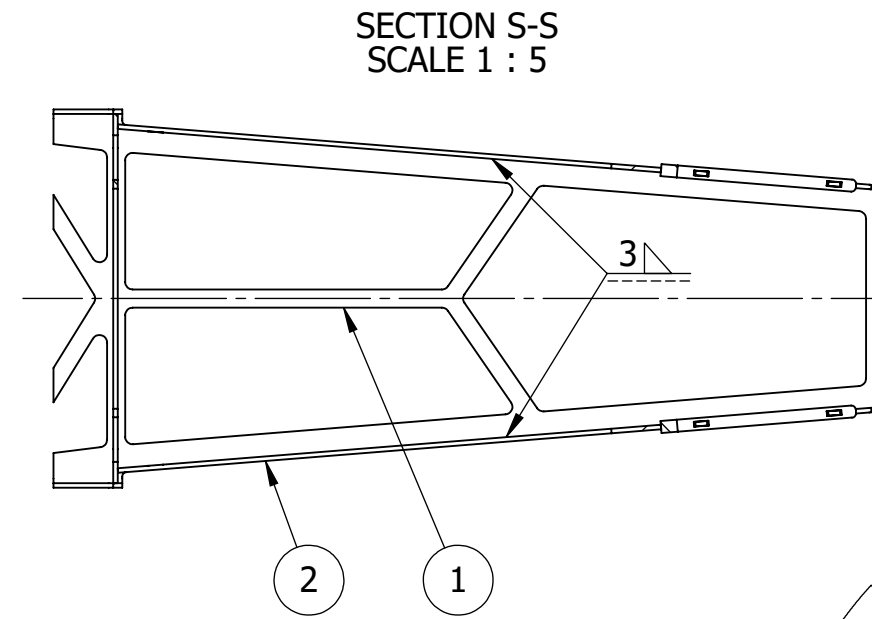
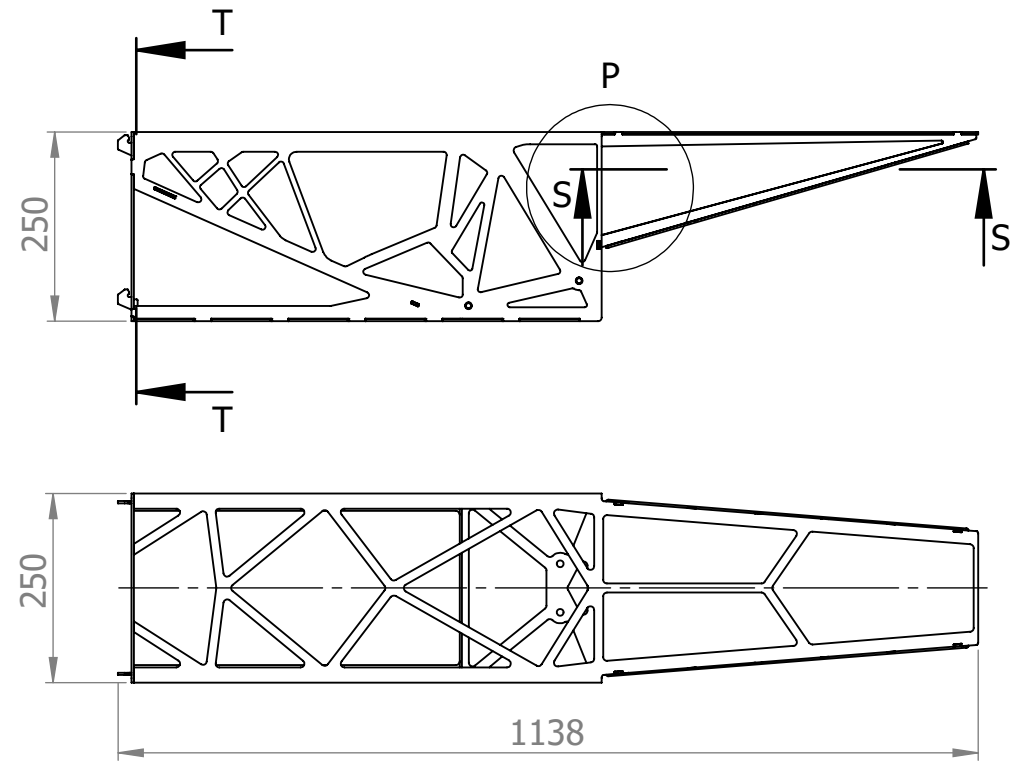
ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:

WITHOUT DECIMAL ± 1

0.0 = ± 0.1
 0.00 = ± 0.01
 0.000 = ± 0.005

ANGLES: ± 0.5°

SURFACE TREATMENT		MATERIAL		MASS (kg)	
				56.59	
DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.			
CHECKED BY		DF_A000			
APPROVED BY		DESCRIPTION Main assembly			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	3 / 16	A3	1:20



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	MASS	QTY
1	DF_A00103	Welded assembly	5.84	1
2	DF_A00101	Welded assembly	0.36	2
3	DF_A00102	Welded assembly	0.28	1

ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT Powder coated UPS-2502 (Prismatic Powders)		MATERIAL		MASS (kg) 6.84
	DRAWN BY Henri Palm	DRAWING NO. DF_A001			
	CHECKED BY	DESCRIPTION Welded assembly			
	APPROVED BY	DATE 22.05.2020	SHEET 4 / 16	PAPER A3	SCALE 1:10
LOVERS 2 0 2 0					

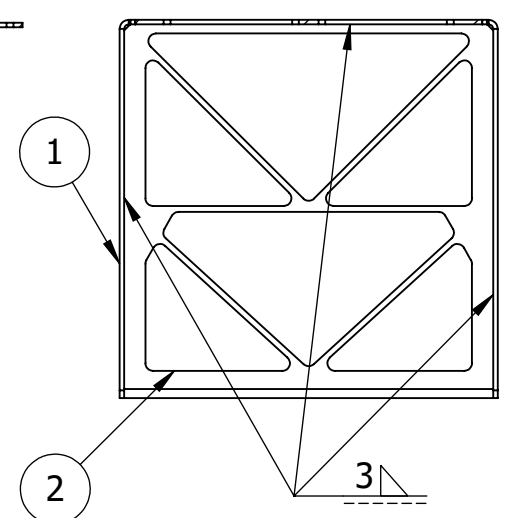
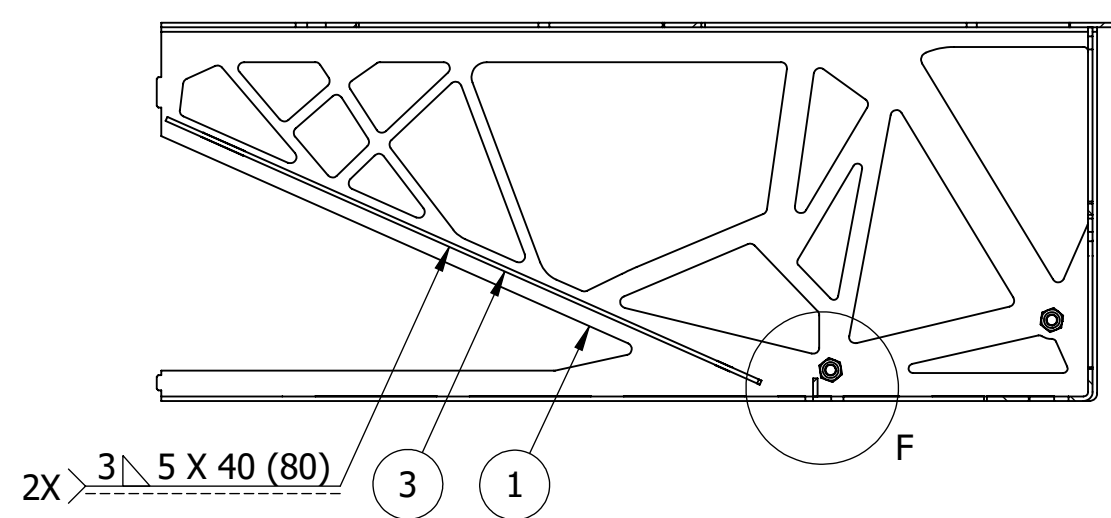
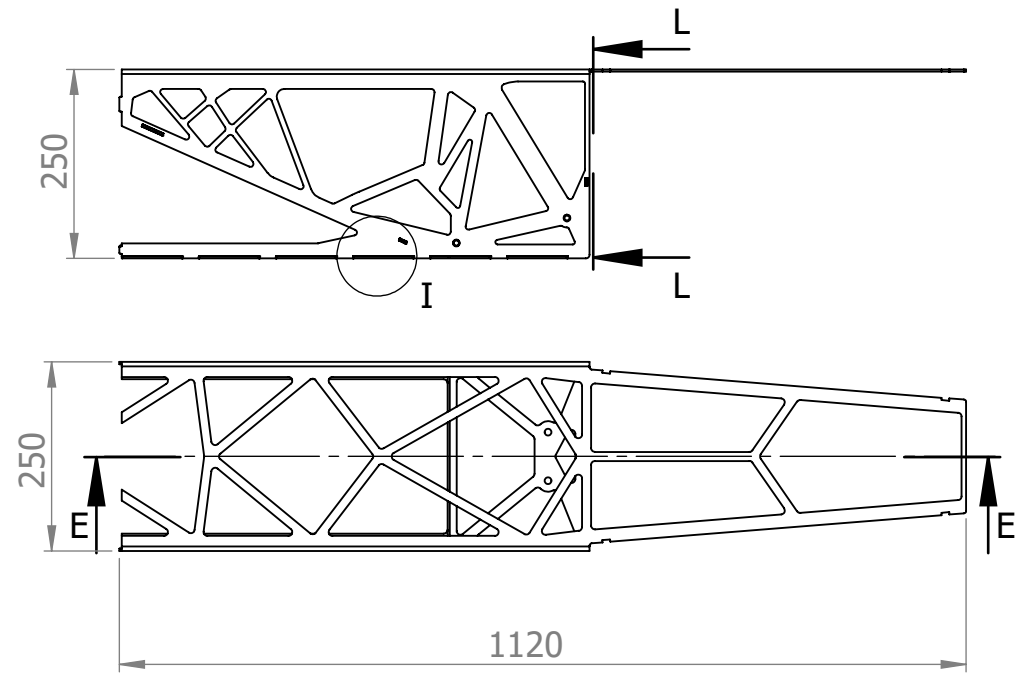
8 7 6 5 4 3 2 1

F
E
D
C
B
A

F
E
D
C
B
A

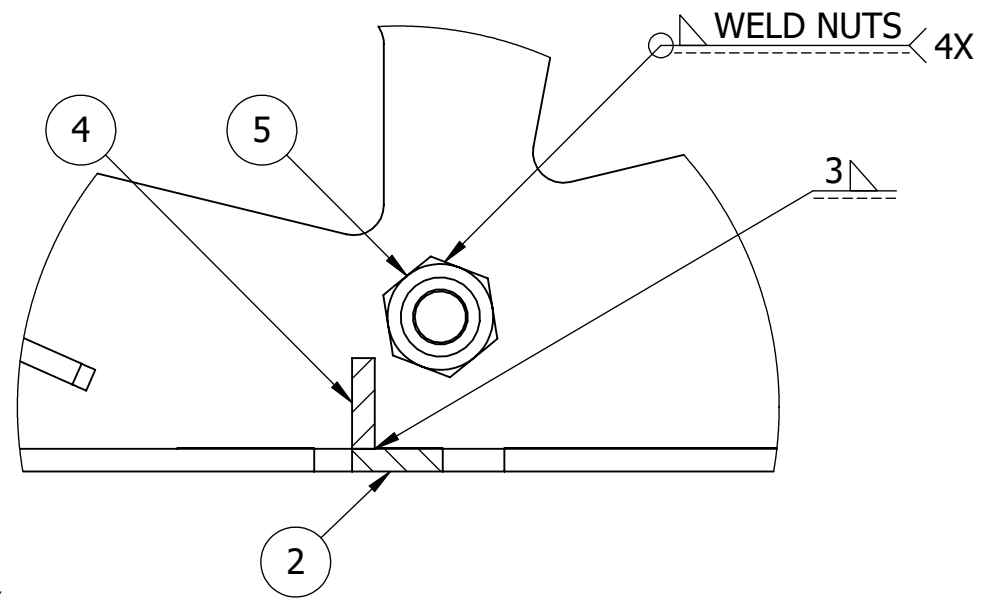
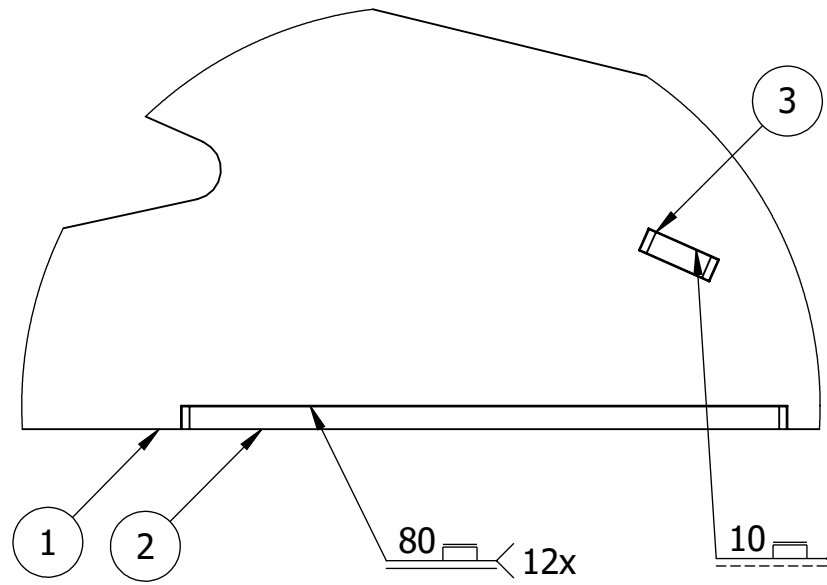
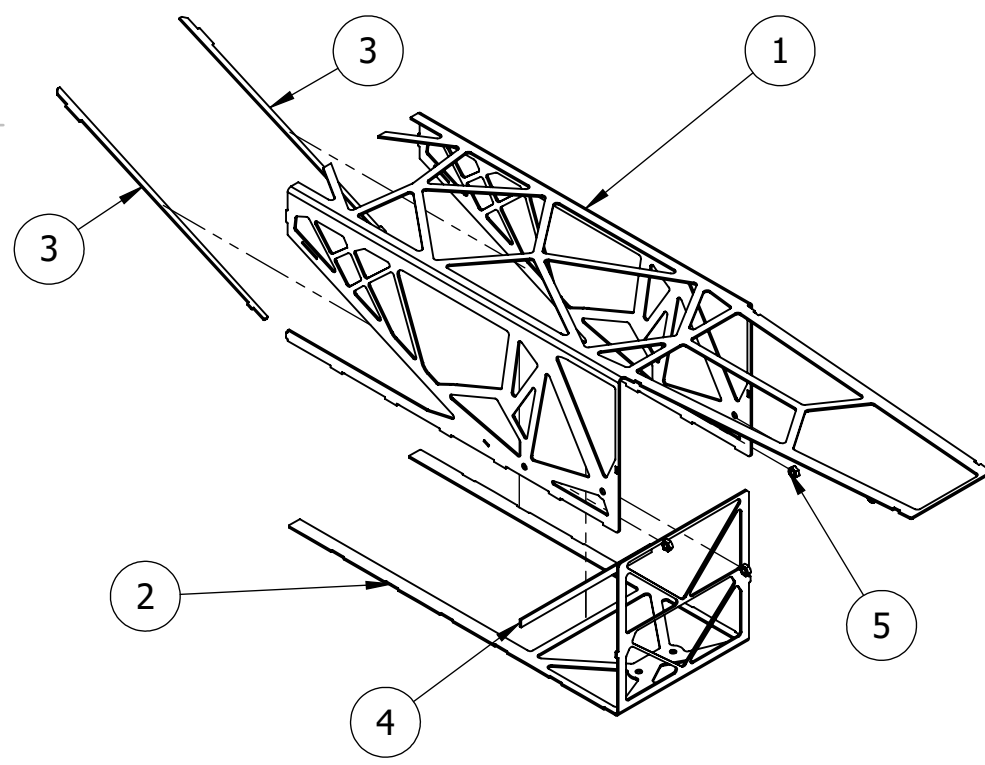
SECTION E-E
SCALE 1 : 5

SECTION L-L
SCALE 1 : 5



DETAIL I
SCALE 1 : 1

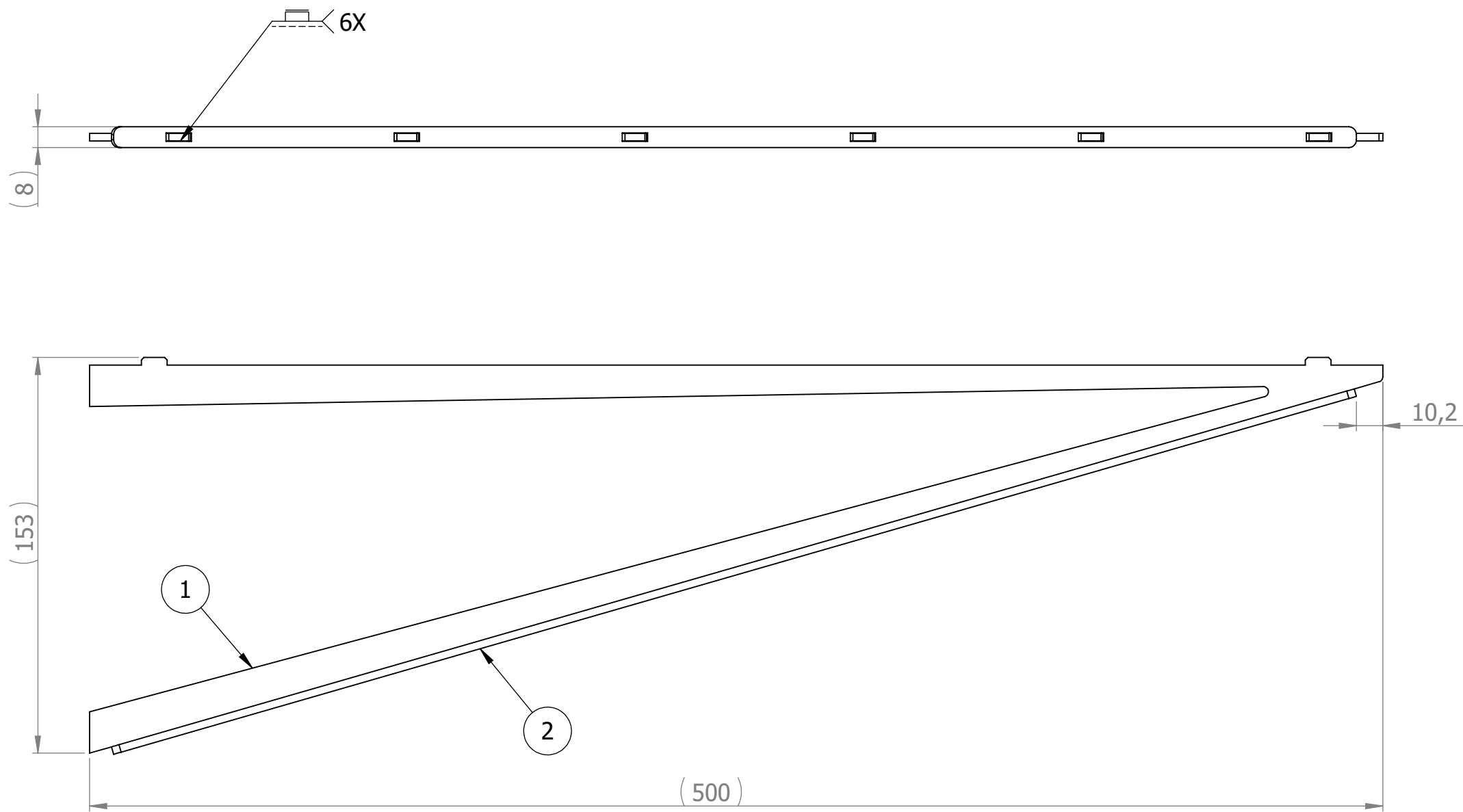
DETAIL F
SCALE 1 : 1



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	MASS	QTY
1	DF_P004	Sheet T = 3 mm	4.37	1
2	DF_P012	Sheet T = 3 mm	1.21	1
3	DF_P030	Sheet T = 3 mm	0.09	2
4	DF_P034	Sheet T = 3 mm	0.07	1
5	DIN 929-M8-C			4

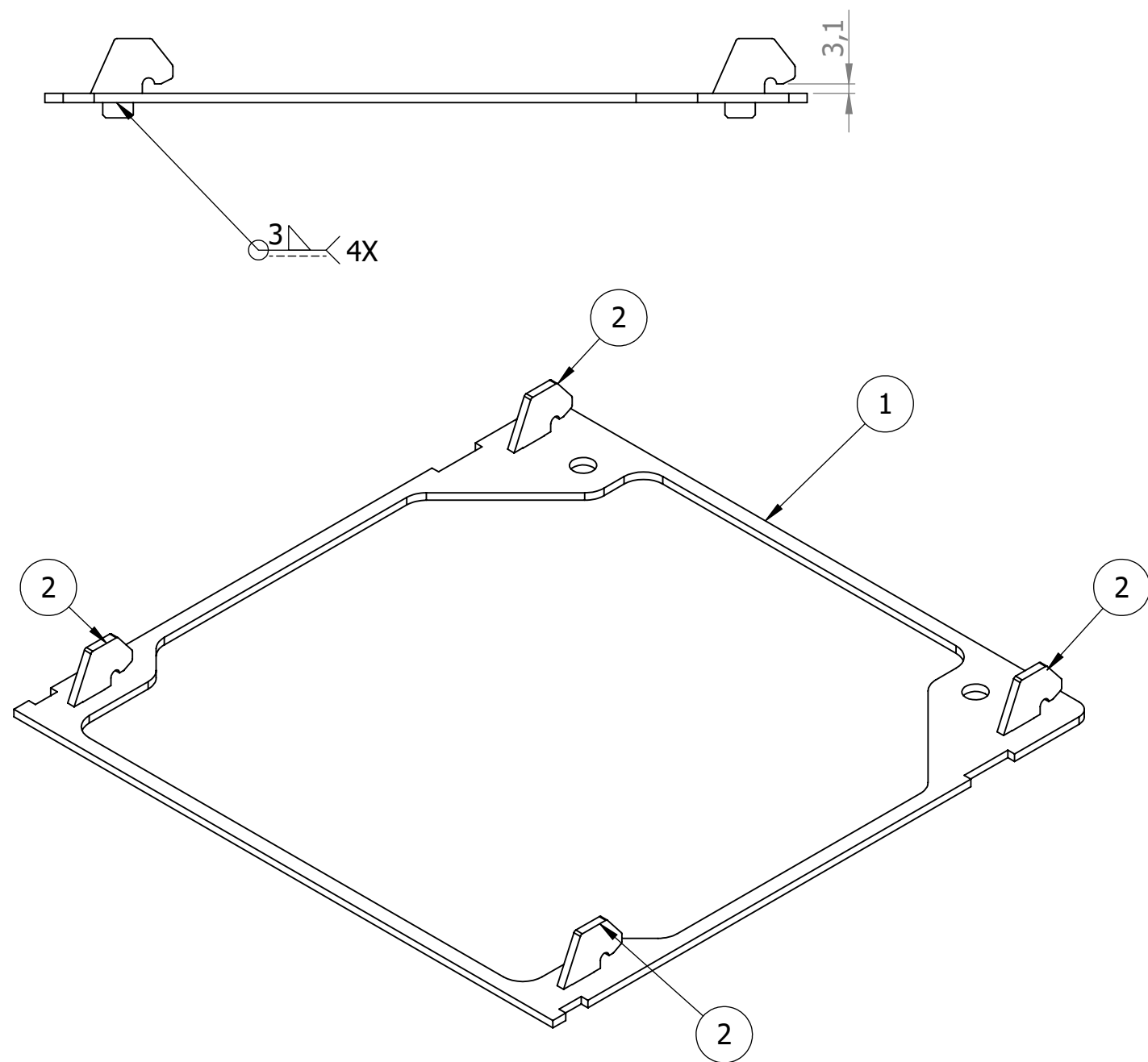
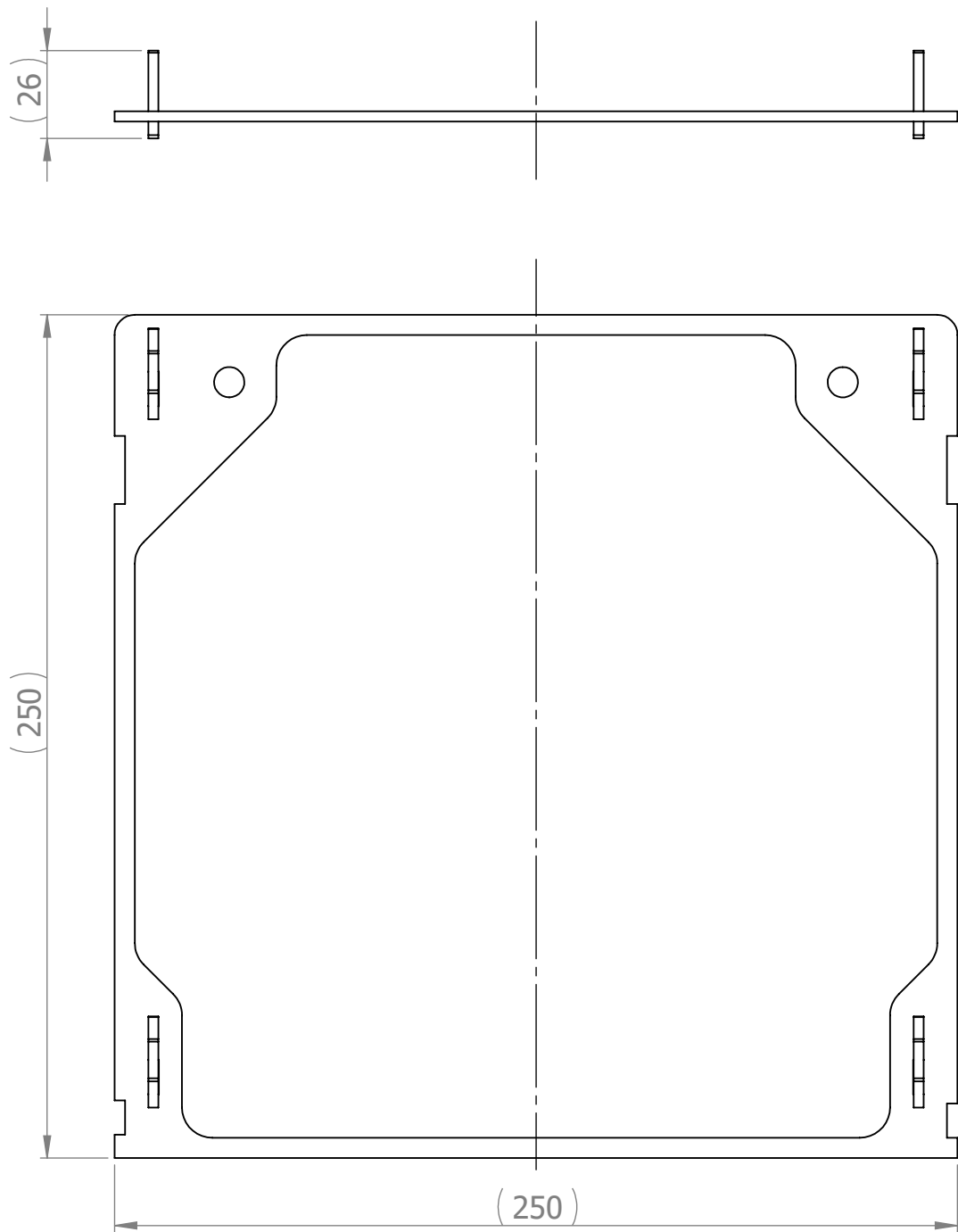
ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		SURFACE TREATMENT		MATERIAL		MASS (kg)	
WITHOUT DECIMAL ± 1						5.84	
0.0 = ± 0.1		DRAWN BY Henri Palm		DRAWING NO. DF_A00103			
0.00 = ± 0.01		CHECKED BY					
0.000 = ± 0.005		APPROVED BY		DESCRIPTION Welded assembly			
ANGLES: ± 0.5°		LOVERS 2 0 2 0		DATE 22.05.2020		SHEET 5 / 16	
				PAPER A3		SCALE 1:10	

8 7 6 5 4 3 2 1



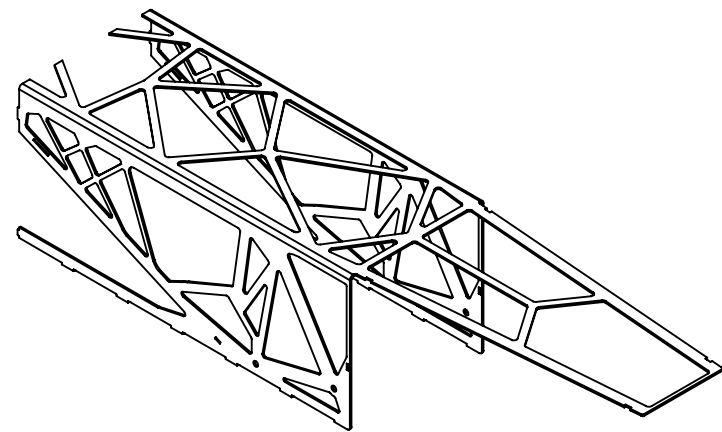
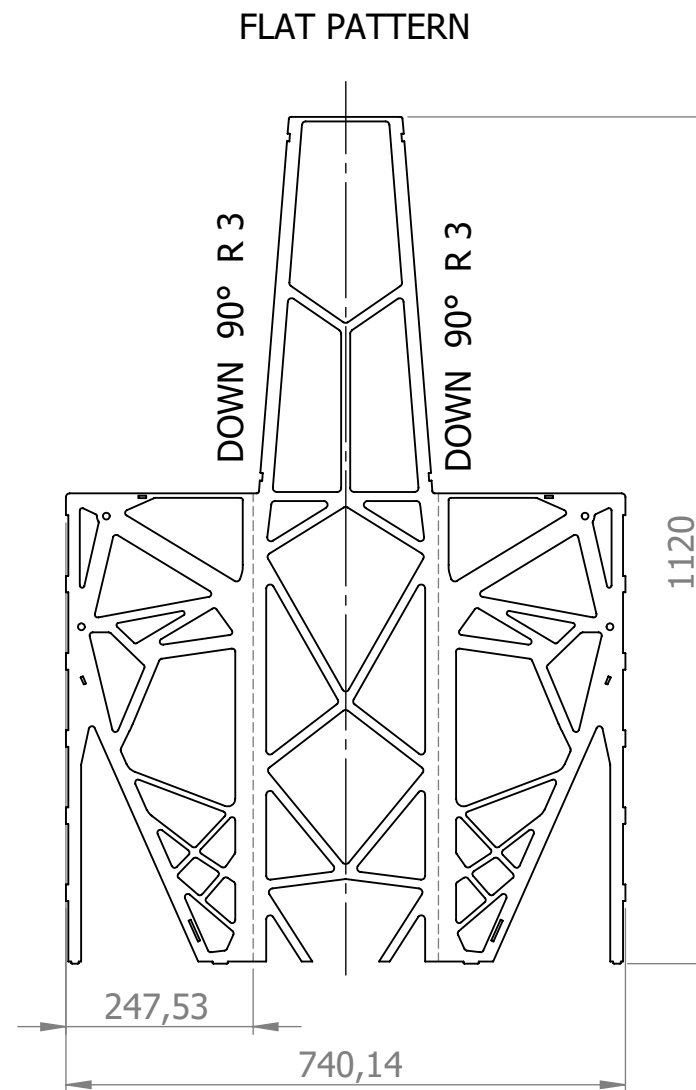
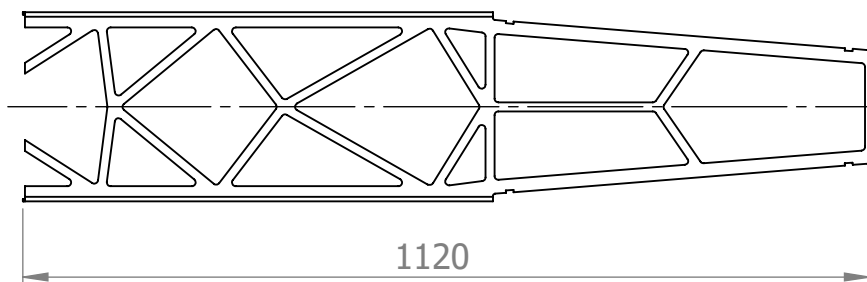
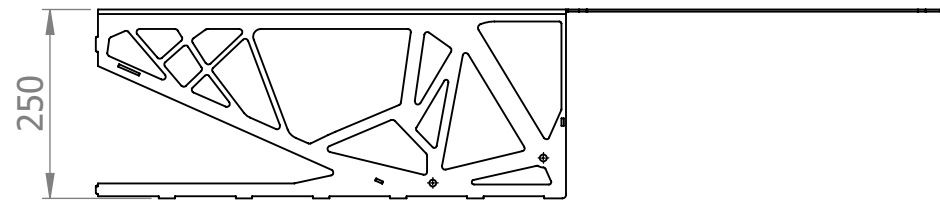
ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL		MASS (kg)
					0.36
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_A00101		
APPROVED BY		DESCRIPTION Welded assembly			
LOVERS		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
2 0 2 0		22.05.2020	6 / 16	A3	1:2

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	MASS	QTY
1	DF_P008	Sheet T = 3 mm	0.27	1
2	DF_P009	Sheet T = 3 mm	0.09	1

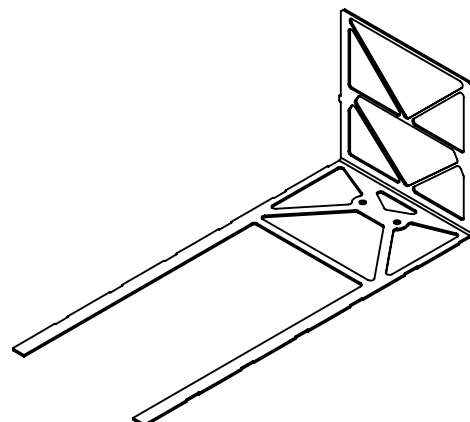
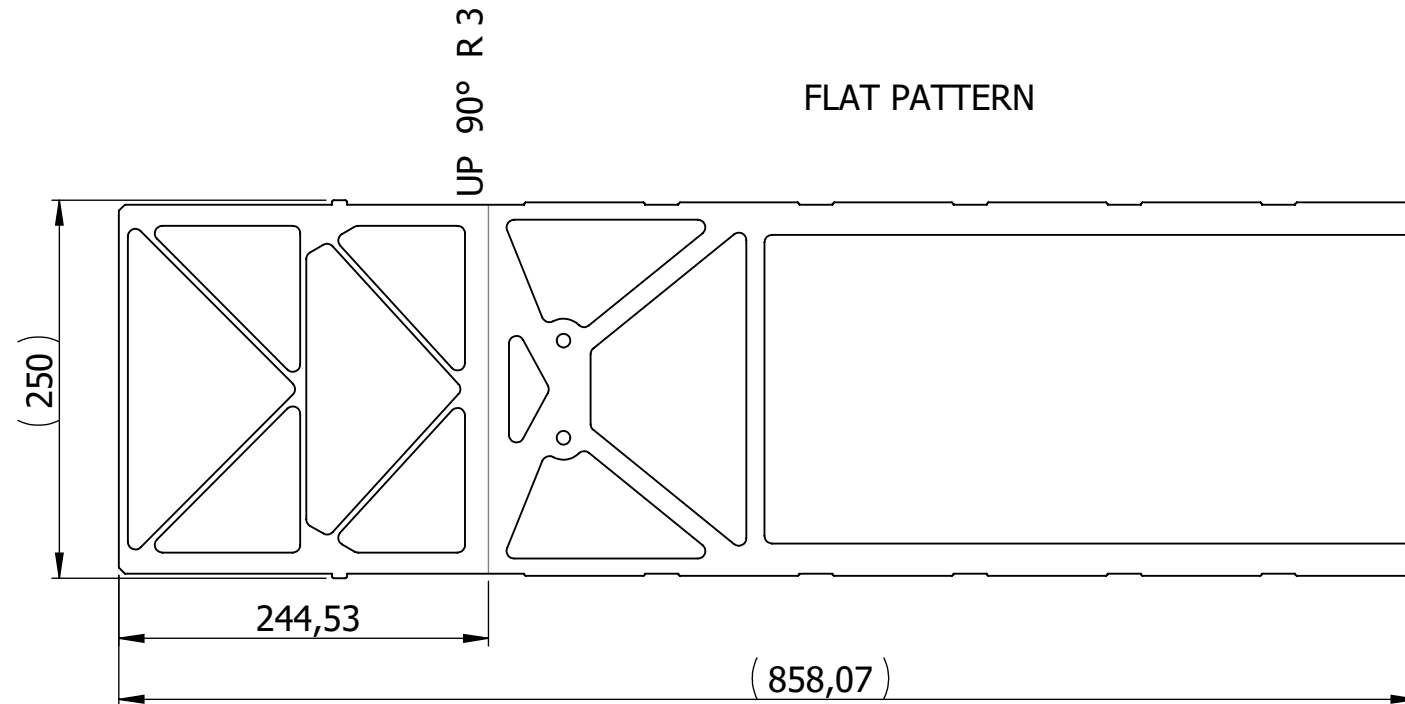
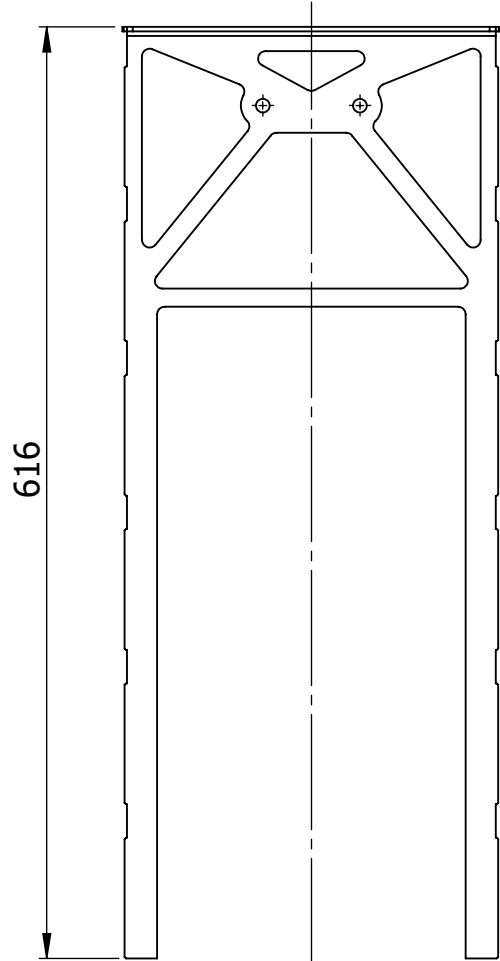
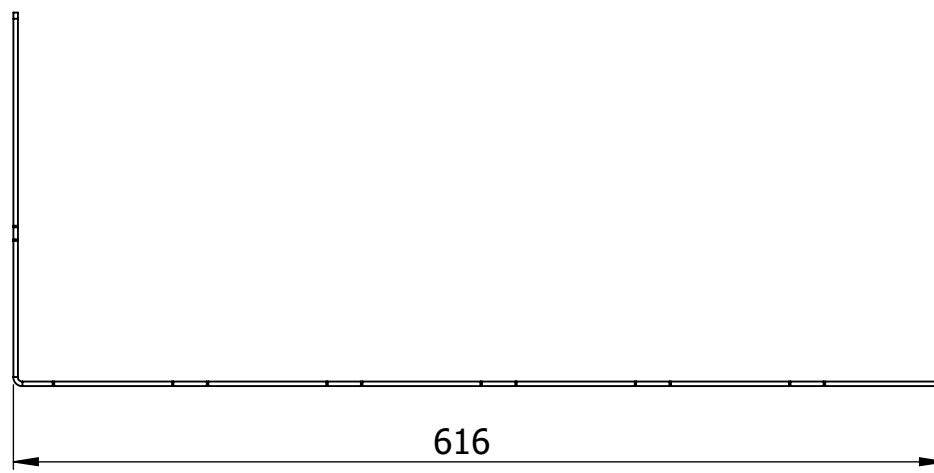
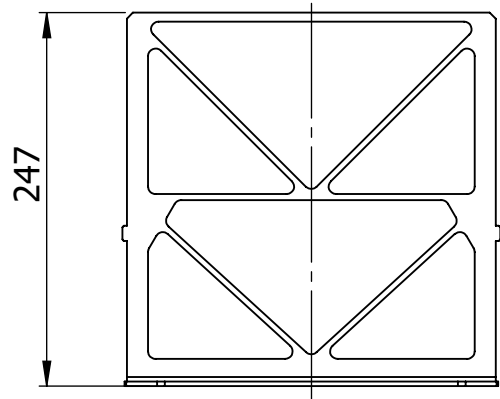


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	MASS	QTY
1	DF_P013	Sheet T = 3 mm	0.24	1
2	DF_P024	Sheet T = 3 mm	0.01	4

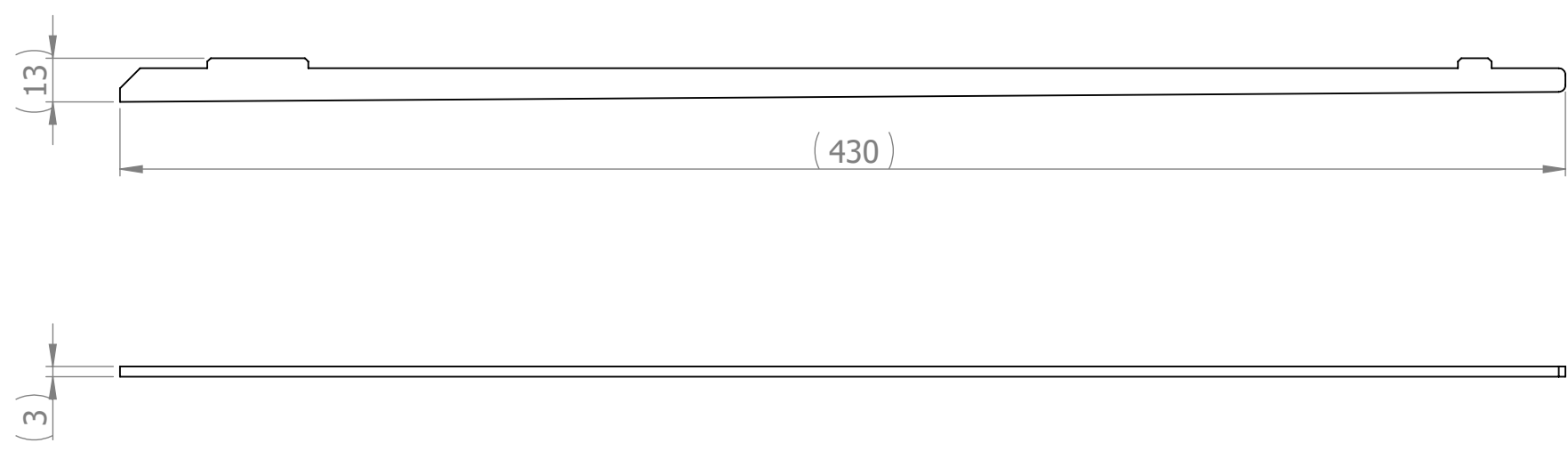
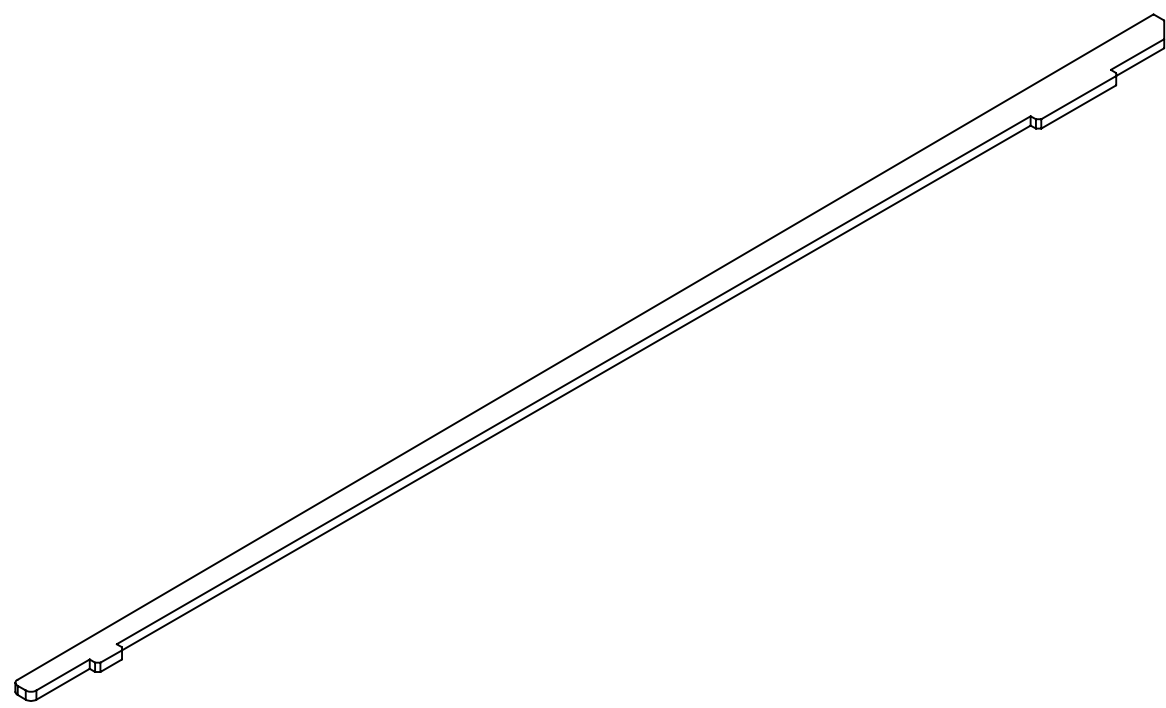
ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL		MASS (kg)
					0.28
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_A00102		
APPROVED BY		DESCRIPTION Welded assembly			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	7 / 16	A3	1:2



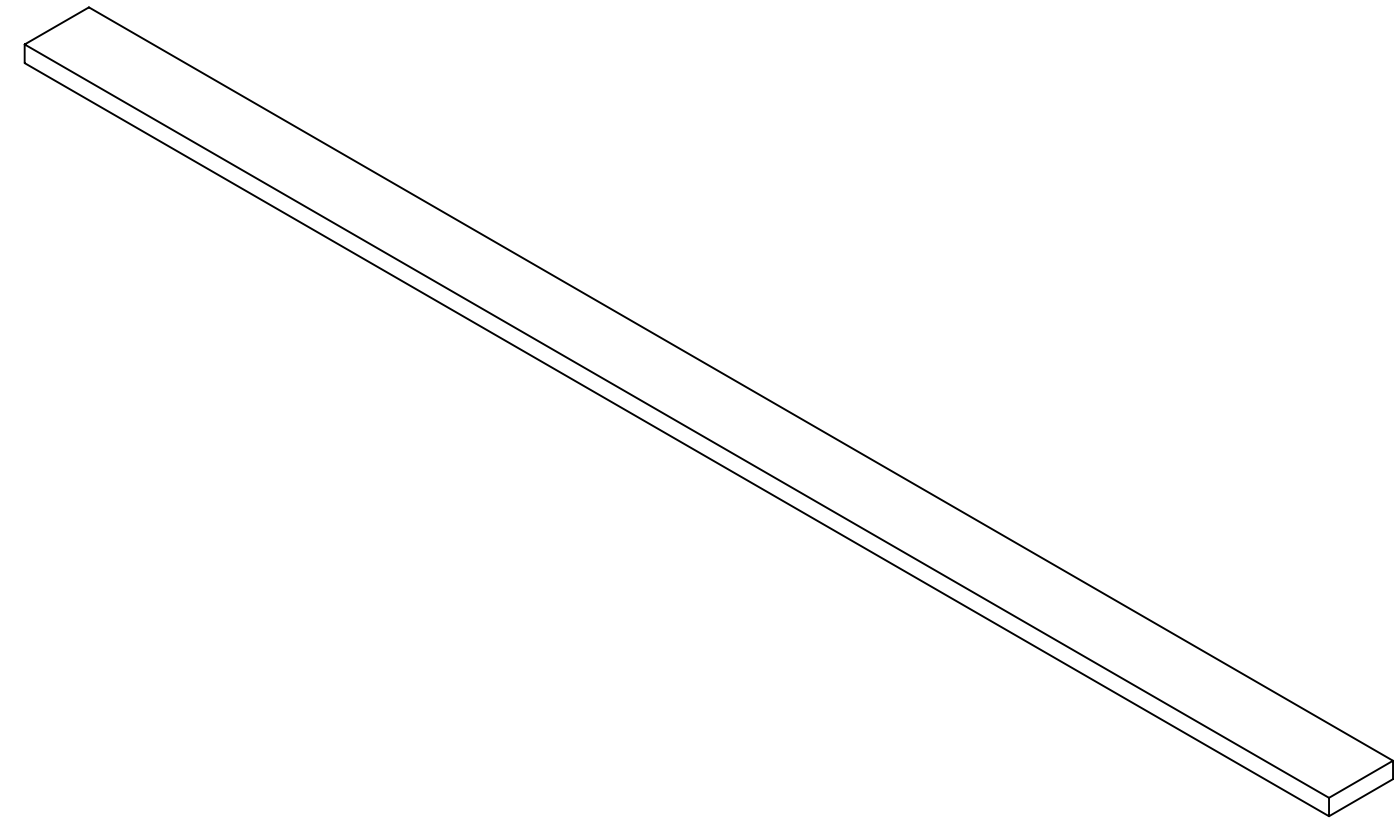
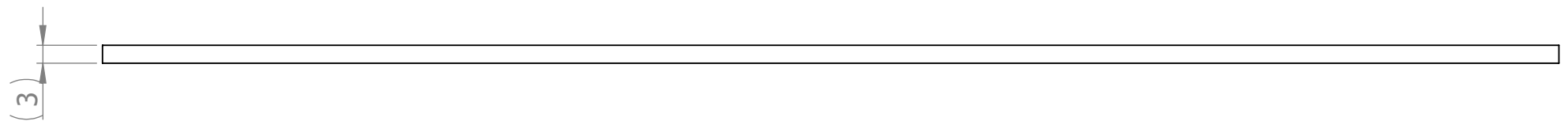
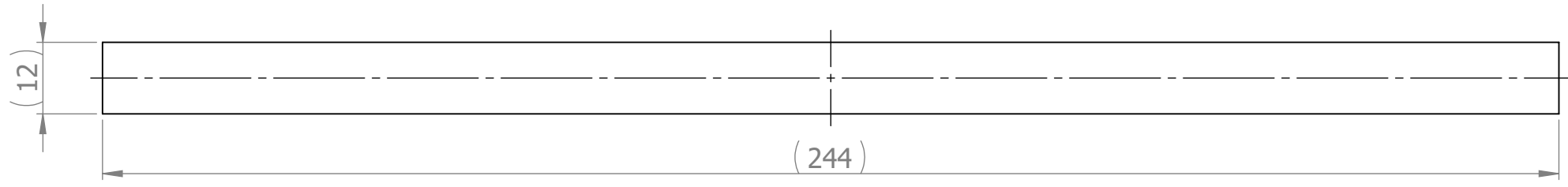
ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
			S355MC	4.37	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_P004		
APPROVED BY		DESCRIPTION Sheet T = 3 mm			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	8 / 16	A3	1:10



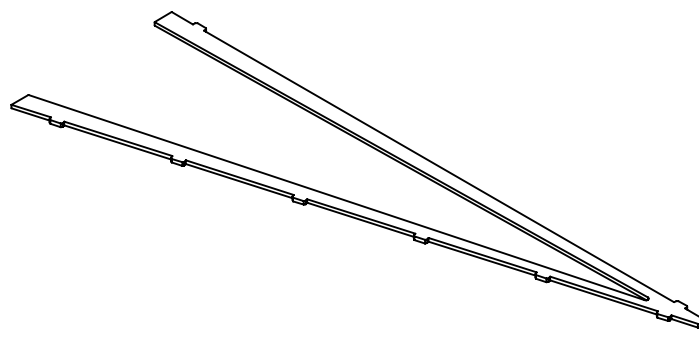
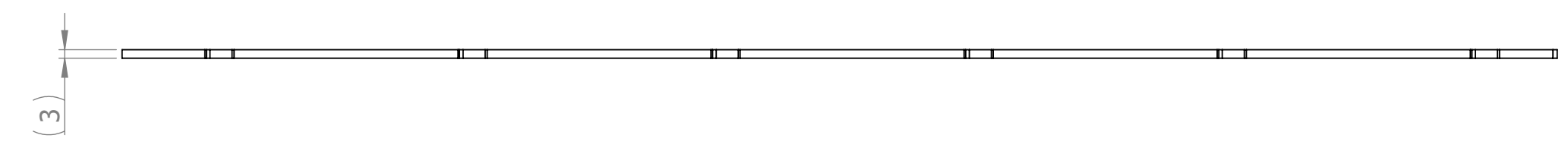
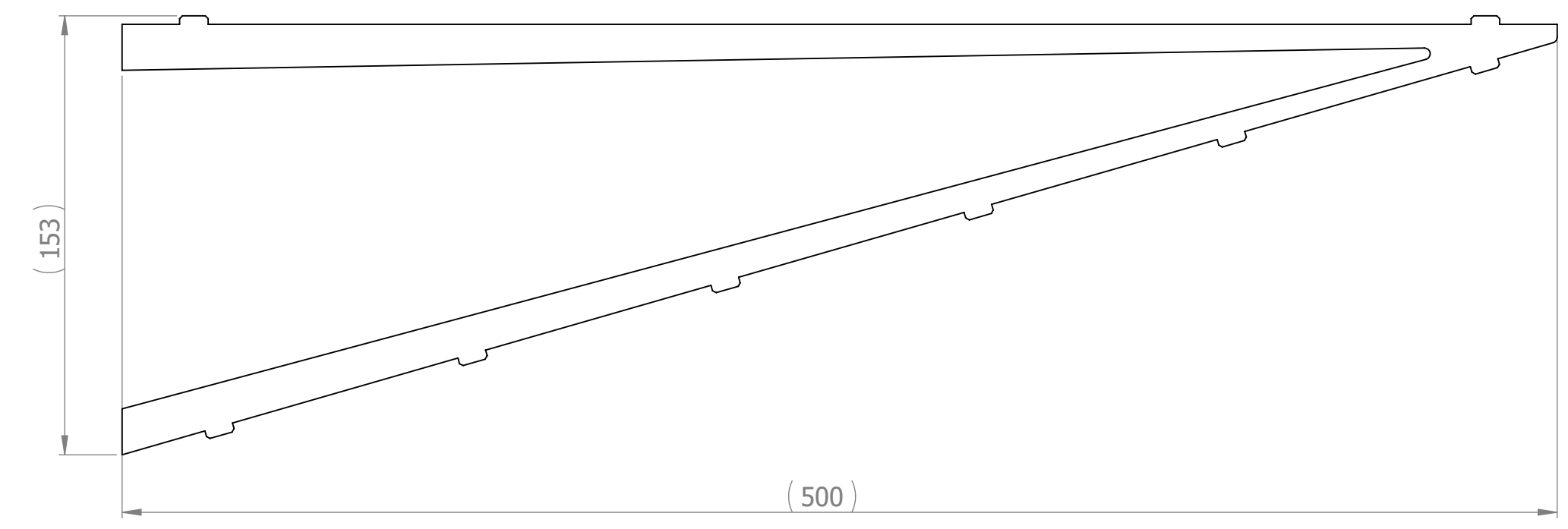
ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
			S355MC	1.21	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_P012		
APPROVED BY		DESCRIPTION Sheet T = 3 mm			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	9 / 16	A3	1:5



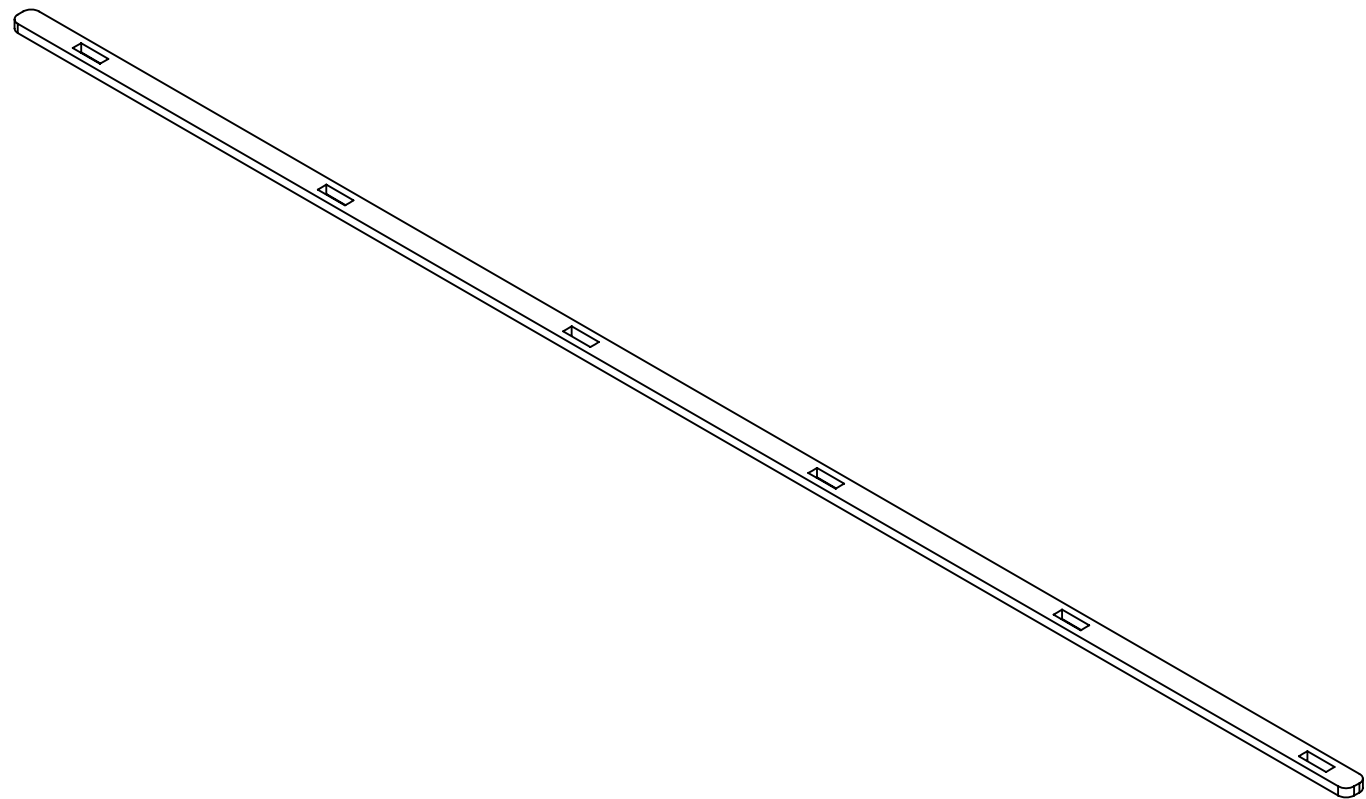
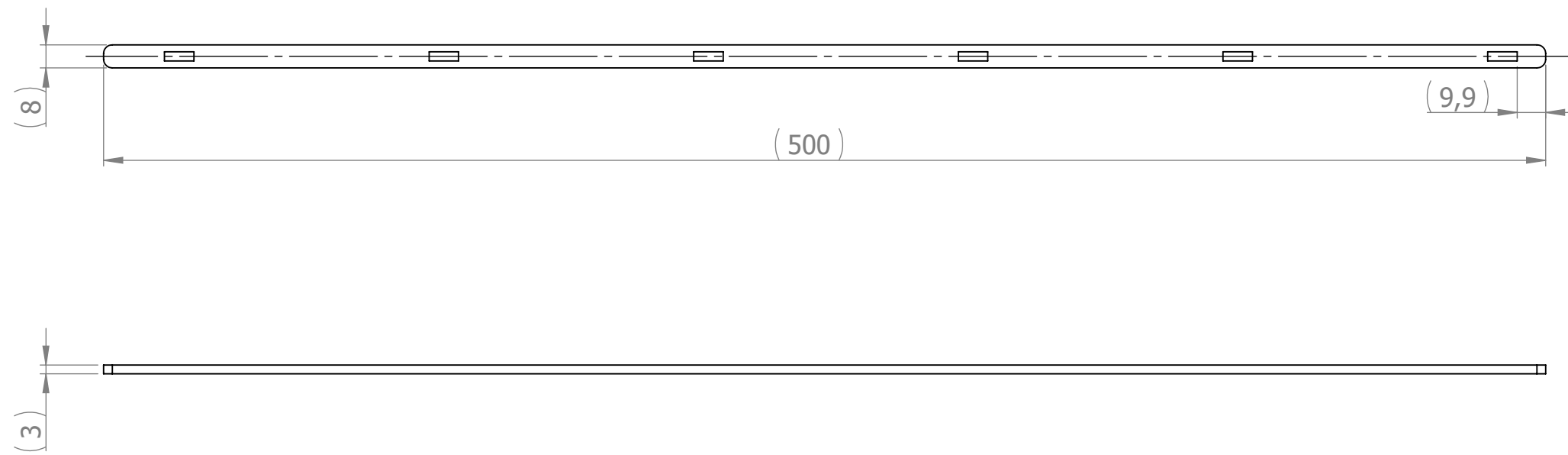
ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
			S355MC	0.09	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_P030		
APPROVED BY		DESCRIPTION Sheet T = 3 mm			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	10 / 16	A3	1:2



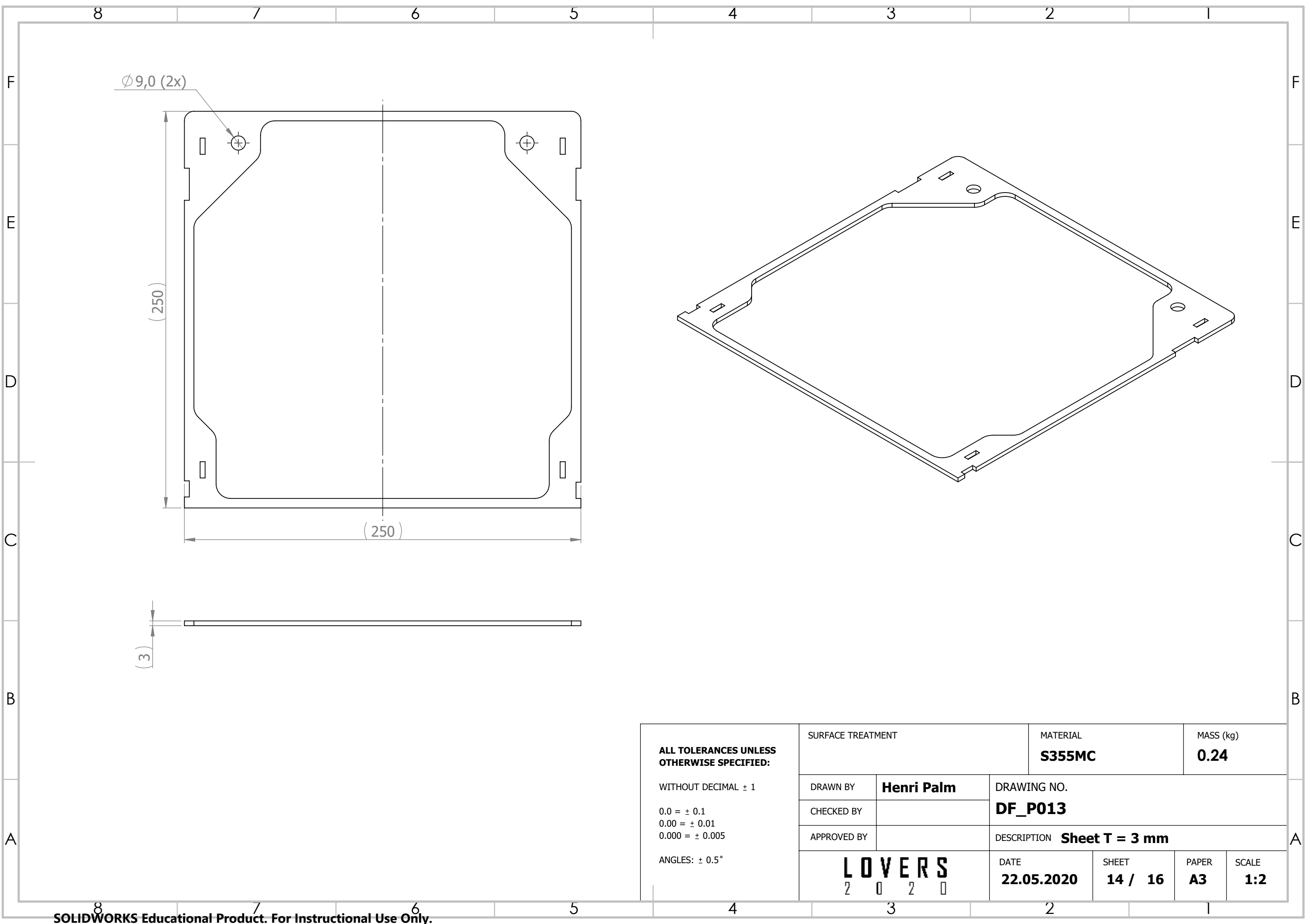
ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
			S355MC	0.07	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_P034		
APPROVED BY		DESCRIPTION Sheet T = 3 mm			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	11 / 16	A3	1:1



ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: $\pm 0.5^\circ$	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
			S355MC	0.27	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_P008		
APPROVED BY		DESCRIPTION Sheet T = 3 mm			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	12 / 16	A3	1:2



ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
			S355MC	0.09	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_P009		
APPROVED BY		DESCRIPTION Sheet T = 3 mm			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	13 / 16	A3	1:2



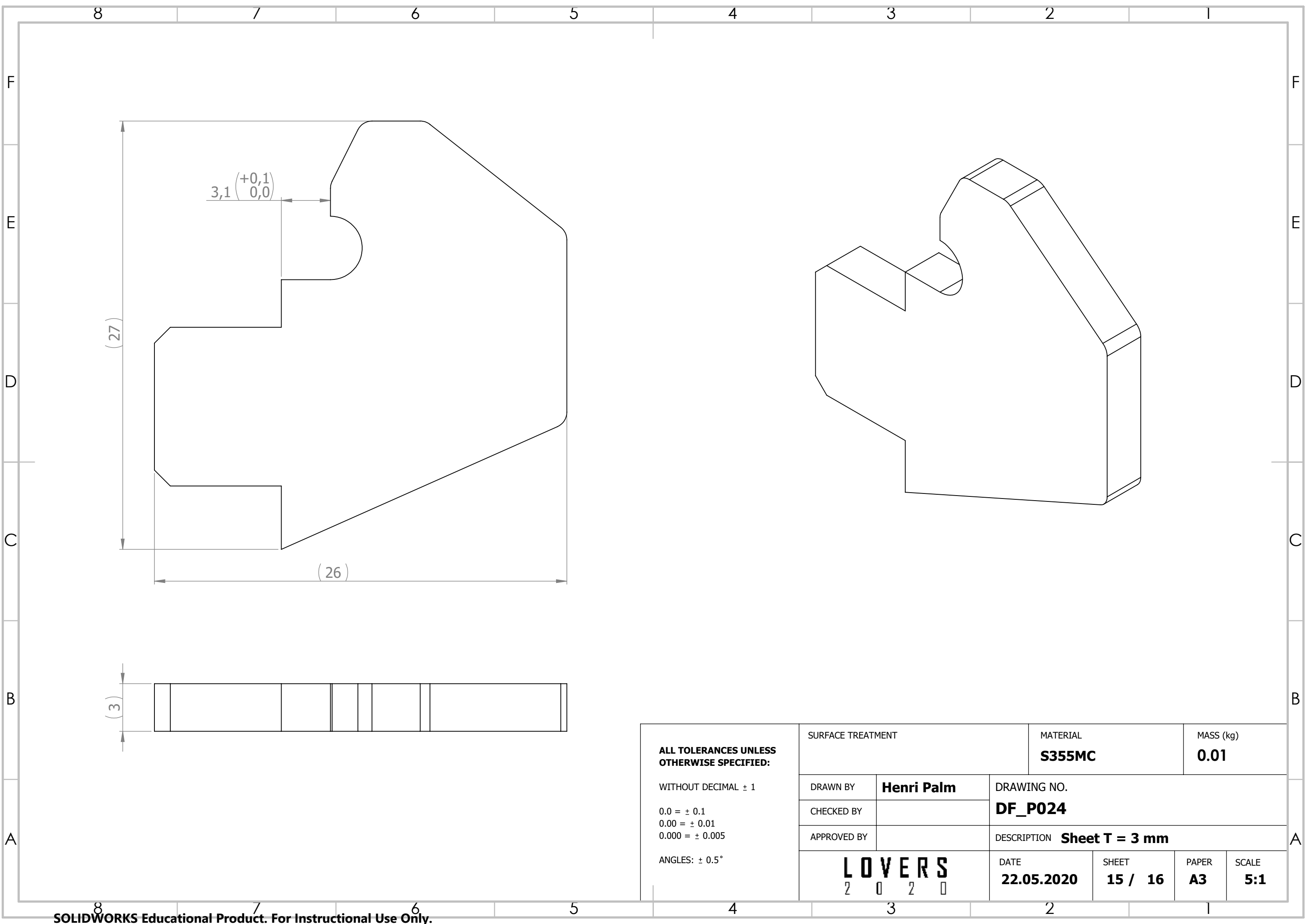
Ø 9,0 (2x)

(250)

(250)

(3)

ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: ± 0.5°	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
			S355MC	0.24	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_P013		
APPROVED BY		DESCRIPTION Sheet T = 3 mm			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	14 / 16	A3	1:2



ALL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: WITHOUT DECIMAL ± 1 0.0 = ± 0.1 0.00 = ± 0.01 0.000 = ± 0.005 ANGLES: $\pm 0.5^\circ$	SURFACE TREATMENT		MATERIAL	MASS (kg)	
			S355MC	0.01	
	DRAWN BY	Henri Palm	DRAWING NO.		
	CHECKED BY		DF_P024		
APPROVED BY		DESCRIPTION Sheet T = 3 mm			
LOVERS 2 0 2 0		DATE	SHEET	PAPER	SCALE
		22.05.2020	15 / 16	A3	5:1