



Wootele Allik

PÖÖRATAV VEOTIISEL

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut
Masinaehituse õppekava
Juhendaja: Tavo Kangru

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Wootele Allik, annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Pööratav veotiisel

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, Wootele Allik,

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt. Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Tavo Kangru

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiallkirjades)

SISUKORD

SISSEJUHATUS	4
ETTEVÕTTE TUTVUSTUS.....	5
1 TOOTE TUTVUSTUS	6
2 PROJEKTEERIMINE	13
2.1 Üldine metoodika.....	13
2.2 Materjali valik	16
2.3 Tehnoloogiad	17
2.4 Kinemaatiline funktsionaalsus.....	18
2.5 Tugevusarvutused	19
2.5.1 Ristlõigete pinged	22
2.6 Hüdraulika arvutused	28
3 MAJANDUSARVUTUSED	31
KOKKUVÕTE	32
SUMMARY	33
VIIDATUD ALLIKAD	34
LISAD.....	35

SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on anda ülevaade BIGAB B12 seeria konksõstehaagisele pööratava veetiisli projekteerimisest ja valmistamisest ettevõttes FORS MW AS.

BIGAB B12 haagise mudeli puhul on tegemist ettevõtte jaoks olulise tootegrupiga, mille käibe mahtu soovitakse tõsta. Hea viis selleks on pakkuda klientidele rohkem lisavarustuse valikuid ning tõsta haagise universiaalsust.

Kogu arendustöö ja tootmine on tehtud ettevõtte siseselt, seega praegu välja töötatud ning katsetatud lahendused annavad oskusteavet, mida saab tulevikus ka uute arenduste puhul kasutada. Prototüübist oleme nüüd juba jõudnud väike-seeria tootmisse. Kogu projekti on iseloomustanud optimaalne disain koos säästliku mõtteviisiga. Olen minimaliseerinud tootmise kulu ja maksimaliseerinud toote pikka elutsüklit.

Autor keskendub peamiselt toote metallkonstruktsiooni loomise peale. Selgitab veetiislite omadusi ja tootmise tehnoloogilisi eripärasid.

Lõputöö koosneb kolmest osast – toote analüüs, projekteerimine koos arvutustega ja majandusarvutuste osa, kus arvutan prototüübi valmistamise maksumuse.

ETTEVÖTTE TUTVUSTUS

AS Fors MW on 27 aastat tagasi asutatud Rootsi päritolu pereettevõtte. Fors MW on oma valdkonna turuliider Euroopas nii FARMA metsaveohaagiste, kraanade kui ka BIGAB konkstõstehaagiste ning NIAB traktorprotsessorite osas. Suurema osa toodangust – 99 % – saadab Fors MW piiri taha, oma esindus on olemas peaaegu veerandsajas riigis. Tänu pidevale tootearendusele ja edukale juhtimisele on ettevõtte hästi ka erinevaid kriise üle elanud. Ettevõtte peakorter ja tehas asuvad Tallinna külje all Sael, sealses tehases toimub ka kaubamärkide Farma, Farma-N ja Bigab masinate projekteerimine, valmistamine ja koostamine. Esimesed neist on metsatöökärsed mõeldud haagised, kraanad, võsagiljotiinid, vintsid, haaratsid. Bigabi märki kannavad konkstõstehaagised, Z-kraanad ja konteinerid. Multilift ehk konkstõstehaagis on ette nähtud ka kõikvõimalikeks põllumajandus- ja ehitustöödeks. Farma-N traktorprotsessorid kandsid varem nimetust Niab. See protsessor ehk palgiloikusseade, mida saab ühendada tavalise traktori haakesse ja on sobilik riist väiksemate puulangetuste ja järkamise jaoks. Näiteks harvendusraieks just Eestimaa viimaste aastate soojades ja märgades talveloludes, kus rasketehnikaga sageli metsa üldse ei pääsegi. [10]

Tehasel on hea võimekus valmistada metallkonstruktsioone alates materjalist kuni lõpptooteni. Kohapeal teostatakse laser- ja plasmalõikust, painutamist ja keevitamist. Samuti CNC treimist ja CNC freesimist. Ettevõttel on oma värvikamber ja haaveldamise liin. Mehaanika koostamise tšehhis teostatakse erinevaid lukksepa töid. Isegi hüdrovoolikud pressitakse majasiseselt, et tagada kiire tarneaeg erilahenduste korral. Lisaks valmistab ettevõtte oma tarbeks ka rakiseid ja erilisi tööriistu. Valmistoodete ja poolfabrikaatide ladustamine toimub ettevõtte territooriumil.

Väiksemamahulised toodete katsetamised teostatakse tehase õuealal. Selleks on olemas vastav personal ja testimise seadmed. Suuremahulised viiakse läbi koostöös partneritega, et imiteerida kõikvõimalikke tingimusi ja olukordasid, kuhu tooted võivad oma eluea jooksul sattuda. Ettevõttes töötab ca 120 inimest. 2023.aasta käive oli ligikaudu 27 miljonit eurot.



Pilt 1. Fors MW tootevalik [1].

1 TOOTE TUTVUSTUS

Bigab B12 seeria on uue põlvkonna konkstõstehaagis [2], kandevõimega 12 tonni. Kasutusvaldkond on põllumajandus ja ehitus. Koormana võtab peale kuni 4600 mm pikkuseid konteinereid. Peamiselt kasutatakse vedukina traktorit, kuid võimalikud on ka muud liikurmasinad.



Pilt 2. B12 haagis

Tegemist on universaalse platvormiga, mis on disainitud olema modulaarne. Klient saab valida erineva lisavarustuse vahel: rehvide, pidurite, poritiibade, tulede, juhtsüsteemide, sildade, vedrustuse, konteineri standardi, konteineri rullikute, mugavusvarustuse jne. vahel.

Varasemal põlvkonnal kasutati keevitusel põhinevat süsteemi(lisavarustuse ja komponentide paigaldamiseks), mis muutis tööprotsessi ja tellimuste juhtimise aeganõudvaks ja ebaefektiivseks. Sisuliselt see tähendas, et tihti raamid valmisid ainulaadsete erilahendustena, mis oli keeruline nii tootmistöötajatele kui ka projekteerijatele.

Sageli pidi ka juba lattu toodetud detaile ja raame jooksvalt ümber töötleva, millega kaasnes omakorda topelt värvimine. Oli selge, et sedasorti disain pole enam tänapäeval

jätkusuutlik. Tootmine on üha rohkem kliendi erilistele soovidele orienteeritud. Samuti tuleb ette müügitellimusi, kus klient plaanib ühte ja sama haagist kasutada mitme erineva traktori haakes, aga sõidu- ja seisupidurite lahendused on traktoritel erinevad.

Uue põlvkonna haagisega on lisavarustuse valik ja paigaldus nüüd tehtud hõlpsaks tänu poltimisele ning läbimõeldud lahendustele. Tarneaeg kliendile on kiirem, kuna saab laost võtta juba valmis toodetud raami ning sellele, vastavalt tellimusele, komplekteerida lisavarustuse. Või lausa ette toodetud baas-haagisele lisada täiendav varustus ning täita kiirelt kliendi tellimus.

Aastal 2023 B12 haagise lisavarustuse nimekiri täienes kraana võrra. Pilt haagisele paigaldatud kraanist on lisades (Lisa 1). Selleks kasutatakse külge polditavat poodiumit, mille külge omakorda kinnituvad nii kraana kui ka tugijalad. Olemasolev standard veotiisel oli liiga lühikene, et toime tulla raami esiosale lisanduva poodiumi pikkusega.

Nimelt siis tekkis ettevõtte sisene vajadus arendada välja uus veotiisel, mis on senisest pikem ja pööramise funktsiooniga. Kuna projekt oli töö autori jaoks huvitav ning piisavalt mahukas, siis otsustas ta valida selle ka lõputöö teemaks.



Pilt 3. Standard veotiisel

Veotiisel on tähtis element, mis ühendab omavahel traktori ja haagise. See peab taluma palju tõmbe- ja paindekoormust ning vastu pidama ka välistele vigastustele nagu kokkupõrge traktori tagumise rattaga või kännud ja suured kivid. Olema seejuures võimalikult kompaktne ja ühilduma haagise olemasoleva kinnitusliidesega. Mõistlik oli ka kasutada juba ettevõtte siseses tootevalikus olevaid sõlmi, nagu parkimise tugijalg, veoaasa koos kinnitusplaadiga ja raamiluku püstakut koos voolikute hoidjaga. Seega teatava osa komponentide kasutamine oli juba ette määratud.

Võrreldes standard veotiisliga oli tarvis uuele tiislile teha kaks põhimõttelist täiendust:

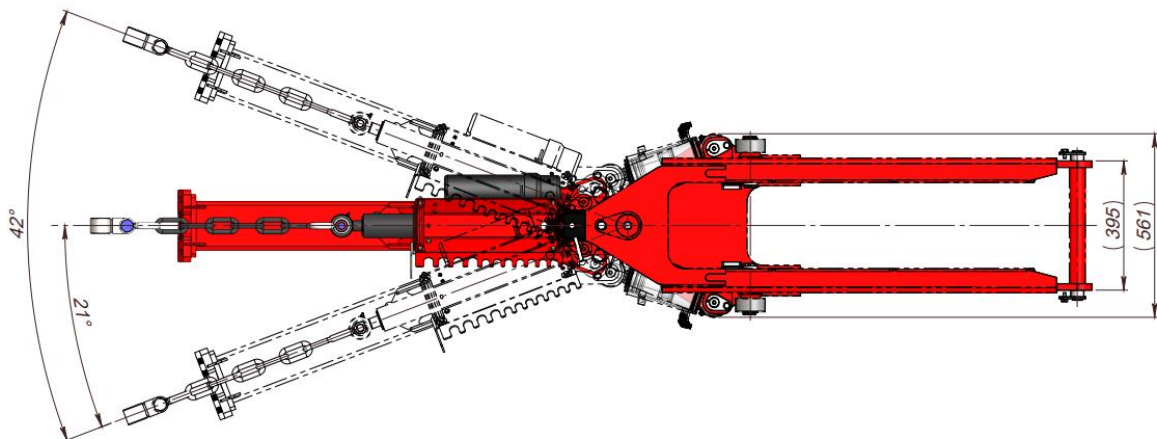
1) Tiislil peab olema pööramise funktsioon.

See annab haagise kasutajale parema manööverdamise võime kitsastes oludes.

Pööramine on lahendatud kahe hüdrosilindriga. Samaaegselt üks lükkab ja teine tõmbab. Tõrgeteta töötamise tagamiseks kasutame silindri silmades sfäärilisi liuglaagreid (Lisa 2), mis on määritavad.

Kahe hüdrosilindri kasutamisega on ka tagatud identne pööramise kiirus ja jõud olenemata suunast- omadus, mida pole võimalik ainult ühe hüdrosilindriga saavutada. Pöördenurk on 21° kummagile poole keskasendist ehk kogu pöördeulatus on 42° . Ehituslikult on pöördenurga piirajaks hüdrosilindrite käigupikkus, täiendavaid piirangu elemente pole ette nähtud.

Pöördeasend on hüdrauliliselt iselukustuv. Kui hüdroüsteemilt signaali ei tule pööramiseks, siis on klapid kinni ja hüdrosilindrid hoiavad asendit. Varuvariandiks on veotiidil ka manuaalne mehhaaniline lukusti, millega saab fikseerida keskasendi. Sobilik maantee sõitudeks või remondi olukorras kasutamiseks.



Pilt 4. Pöördenurga skeem.

2) Suurem pikkus.

Kuna kraana poodium ulatub üle raami esiosa, siis tuleb pikendada tiislit nii palju, et raamiluku püstaku ja kraana poodiumi vahele jääb piisavalt ruumi tiisli pööramise ja horisontaalse liigutamise korral. Samuti pidi uus veotiidil olema piisavalt pikk, et traktori tagumiste rataste ja kraana vahele jääb ruumi. Seega minimaalne kogupikkus 2700 mm.

Vastavalt haagise konfiguratsioonile võib tiisel asuda raami suhtes erinevate nurkade all, et oleks tagatud nõutud veoaasa kõrgus maapinnast. Veoaasa kõrgust reguleeritakse kas linkide pikkusega või hüdrosilindritega(kui on lisavarustusena).



Pilt 5. Raami esiosa. Ootab kraana poodiumi paigaldust.



Pilt 6. Paigaldatud kraana poodium ja pööratav veotiisel

Kõigele eelpool nimetatule on oluline ka toote hind ja paigaldamise lihtsus. Toote hinda saab soodsama hoida kui projekteerida minimaalse material- ja tööjõukuluga. Kus võimalik, olen kasutanud juba ettevõttes olemasolevaid detaile. See loob ka teatava riskasutuse ning on suures plaanis ettevõttele kasulik, kuna suurem kogus tähendab soodsamat ühikuhinda. Lihtne paigaldus tagab koostamisel hea kvaliteedi, kuna maksimaalselt on tehtud eeltööd selle nimel, et iga detail ja sõlm sobiks täpselt ning ainult ühtemoodi kokku. Nii saab inimliku vea tõenäosust minimaliseerida.

Pööratav veotiisel koosneb peamiselt kahest suurest keeviskoostust. Eesmine (Lisa 4) ja tagumine osa (Lisa 5), mis ühendatakse omavahel kokku läbi sõrme. Sõrm asub peakoostu joonisel, detail positsiooniga 5 (Lisa 2). Kaheosaline disain annab võimaluse kasutada sama tagumist osa ning vastavalt vajadusele (pikkus või varustus), kasutada erinevat eesmist osa.

Näitena toob töö autor välja lühendatud esiosaga pööratava veotiisli (Lisa 13). On mõeldud klientidele, kes soovivad paremat manööverdamise võimet ja kraana puudub. Kui klient tulevikus otsustab lisavarustusena ikkagi paigaldada kraana, siis on tarvis ainult veotiisli esiosa vahetada välja pikema versiooni vastu (Lisa 4).

Sedasorti modulaarne lahendus on hea kliendi seisukohast, kuna teeb järelteeninduse soodsamaks ja on rohkem valikuvõimalusi.



Pilt 7. Esimene prototüüp. Kahe keeviskoostu katse koostamine.

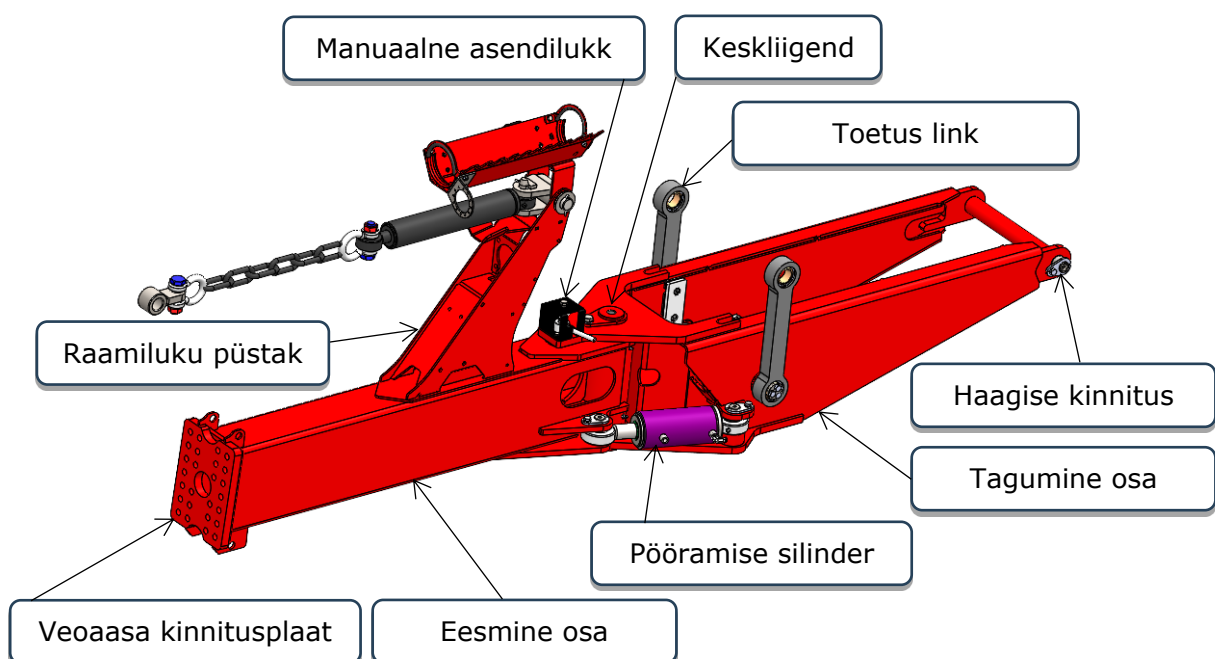
Kogu haagise hüdraulika- ja suruõhuvoolikud ning elektrijuhtmed kulgevad läbi veotiisli (Lisa 14). Esiteks see kaitseb neid väliste vigastuste eest ja hoiab disaini puhtana. Teiseks, voolikud ja juhtmed peavad töökindlalt taluma pööramisel tekkivaid mõjusid ehk jätkma nendele piisavalt ruumi liikumiseks ning paindumiseks. Samas ei ole tulemus täielikult kinnine ehk on hõlbus inspekteerida hüdrovoolikute seisukorda ja vajadusel neid välja vahetada. Lisaks on teataval määral jäetud ruumi, et kui tulevikus peaks haagisele lisanduma täiendavat lisavarustust, siis on võimalik mahutada veel mõned voolikud ja juhtmed.

Autor on projekteerimisel vältinud kinniseid kohti, kuhu saaks suures koguses pori ja muid võõrkehasid koguneda. Survepesuriga saab kõik ebavajaliku sodi eemaldada ning sõlmede alaosades on avavused kust vesi voolab välja.



Pilt 8. Hüdraulika voolikute ja elektrijuhtmete kulgemine läbi külgedel olevate avavuste

Kuna ettevõttel on soov tulevikus taodelda tüübikinnitus B12 haagisele, siis on äärmiselt tähtis, et veotiisel vastaks UN 147 E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.146 regulatsioonile [3]. UN 147 regulatsiooni lisa 3.7.1. järgi ei tohi pinged keeviskonstruktsioonis olla suuremad kui 90 MPa. Selle nõude peale on antud töö autor tugevusarvutused ja üldise konstruktsiooni ülesse ehitanud. Kasutatud on ka UN 147 välja toodud spetsiifilisi arvutuskäike ja valemeid.



Pilt 9. Pööratava veotisi tähtsamad elemendid

Kõigele eelpoolnimetatule lisaks on ka kaubanduslik välimus tähtis element kliendikeskse tootmise puhul. Meie oleme toote hea väljanägemise saavutanud pöörates tähelepanu disainile, mis on funktsionaalne ja kokkusulanduv. Suhteliselt paks terasmaterjal ja omavahel tasakaalus olev kujundus jätavad klienditele soliidse mulje. Veotisel on täielikult sümmeetriline.

Gabariitmõõtmed: 2797 mm pikk, 561 mm lai ja 1048 mm kõrge. Mass 354 kg. Soovituslik hüdroüsteemi töö rõhk on 200 bar. Veotisi peakoostu joonis on nähtav lisades (Lisa 2).

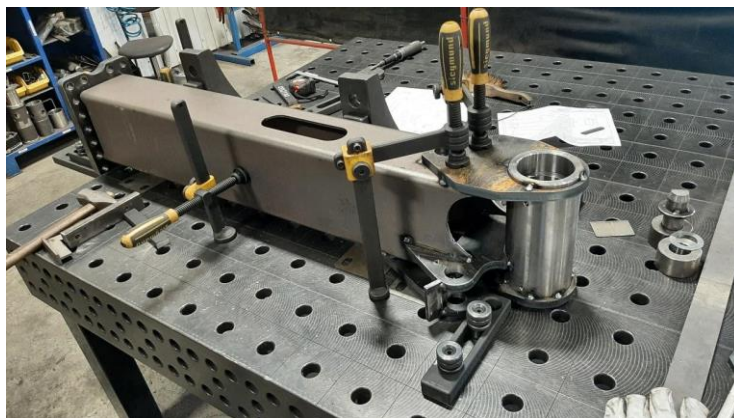
2 PROJEKTEERIMINE

2.1 Üldine metoodika.

Autori idee oli luua uus toode, mis vastab omaduste poolest ettevõtte ootustele, kuid on ka kohapeal hõlpsasti toodetav. Ettevõtte sisene tootmine on alati eelistatud, kuna saame kindlad olla kvaliteedis ning eriti prototüüpide puhul on lihtne ja kiire hoida silma peal igal tootmise etapil. Kiireneb ka muudatuste elluviimise aeg ja tagasiside tootmistöötajatelt on sisuliselt kohene.

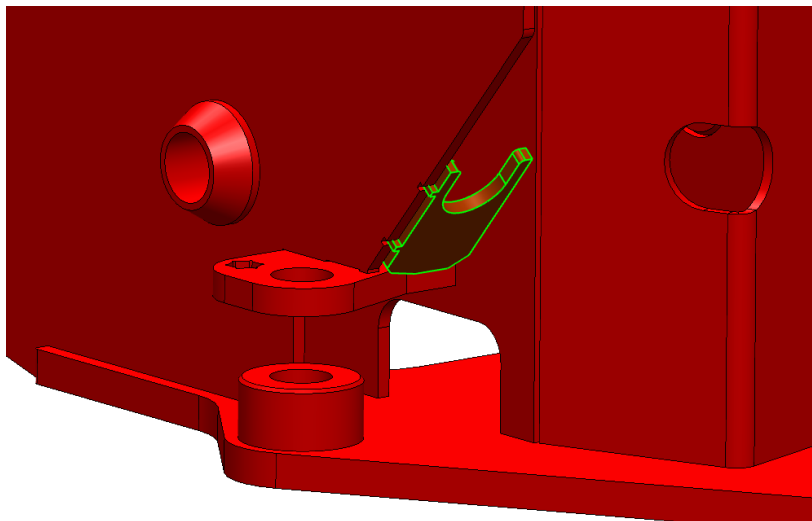
Ennem projekteerimise algust tutvus autor ettevõtte tootmise ja koostamise eripäradega. Tuleb arvestada olemasolevate tööpinkidega. Näiteks täpsust (± 0.1 mm) vajavad lehtmaterjalist detailid on mõistlik teha maksimaalselt 12 mm paksusest materjalist, kuna paksema korral hakkab lõikeserva kvaliteet kannatama. Lahendus on kas lisada detailile täiendav lõiketöötlus või tellida allhankija käest – mõlemal juhul läheb toode kallimaks ja tarneaeg pikeneb, ning muudatusi on keerukam teha. Seega tuleb hoolikalt kaaluda materjali valikut vastavalt paksusele. Üldine reegel on ka see, et mida paksem materjal seda suurem peab olema painderaadius. Suurem painderaadius aga tähendab ka detailide mõõtmete ebavajalikku kasvu, kuna läheb tarvis ka suuremaid painutamise tööriistu, mis määravad ära painde minimaalse laiuse. Kasutasin 16 mm ja 20 mm paksust materjali ainult detailides, kus see oli rangelt õigustatud ning sain tehnoloogiliste võtetega lahendada ära koostamise täpsuse probleemi.

Praeguses olukorras on toode mõeldud käsitsi keevitamiseks. Tulevikus, kui peaks toodangu arv oluliselt suurenema siis tasub kaaluda keevitusroboti kasutamist. Kuid selleks peab mõned muudatused tegema, et täielikult saaks ära kasutada roboti suuremat töötamise kiirust.



Pilt 10. Esimese prototüübi koostamine indeks tüüpi keevituslaual.

Keeviskonstruktsioonide valmistamisel suur osa keevitaja tööajast kulub detailide omavahelise asendi ülesse seadmiseks ja vajalike mõõtude tagamiseks. Mida keerukam keeviskoost, seda ajamahukamaks ülesse seadmine muutub. Seetõttu otsustasin kasutada võimalikult palju tappe, et vähendada koostamisele ja keevitamisele kuluvat aega. Samuti tagab see kõrgema ja ühtlasema kvaliteedi ning vähendab vajaminevate tööriistade hulka. Rakiseid pole antud toote valmistamiseks ette nähtud. Esiteks puudub vajadus, kuna suudetakse joonistel olevatele nõuetele vastav kvaliteet tagada ka indeks töölaudade peal koostades (Lisa 10). Teiseks, hetkel on toode liiga vähe aega tootmises olnud, et teha lõplik järeldus, kas näiteks koostamist kiirendavate rakiste kasutamise õigustaks end majanduslikult. Tuleb arvestada, et sageli peab seoses detaili või keeviskoostu muudatusega ka rakist muutma.



Pilt 11. Näide tappide kasutamisest. Rohelise piirjoonega detaili asendi saab täpselt fikseerida tänu tappidele ja kõrval asuvatele detailidele. Kevvitaja ei pea täiendavaid mõõtmisi tegema.

Kuna igasse kohta ei saa tappe teha, siis teine meetod oli kasutada ära laserlõike pingi suurt täpsust ning panna detailid läbi servade omavahel kokku. Üldiselt pidas töö autor projekteerimise puhul kinni reeglist, et võimalikult vähe jätta ruumi inimlikule veale koostamisel ja keevitamisel. Seega täpsust vajavad kohad on valmistatud ühes tükis või järeltöödeldud. Detailid lehtmaterjalist paksusega 16 mm ja 20 mm vajavad avade järeltöötlust, kuna neid pole võimalik piisava täpsusega koostada ja keevitamine tekitab ka kuumuse tõttu deformatsioone. Vähendamaks CNC töötlemisekeskuse tsükli aega ning tööriista kulu, siis on mõistlik nendele detailidele lõigata ette väiksema läbimõõduga pilootavad.

Majanduslikult soodsam oleks detailid enne keevitamist masintöödelda, kuna saaks kasutada madalama ekspluatatsiooni hinnaga tööpinke. Madalam hind tuleneb tööpingi

töölaua mõõtmetest ehk tööpingi üldine maksumus. Isegi kui keevitajal oleks võimalik tagada eeltöödeldud detailidega nõutav keeviskoostu täpsus, siis selle korratavus ja ajakulu muudab tegevuse küsitavaks.



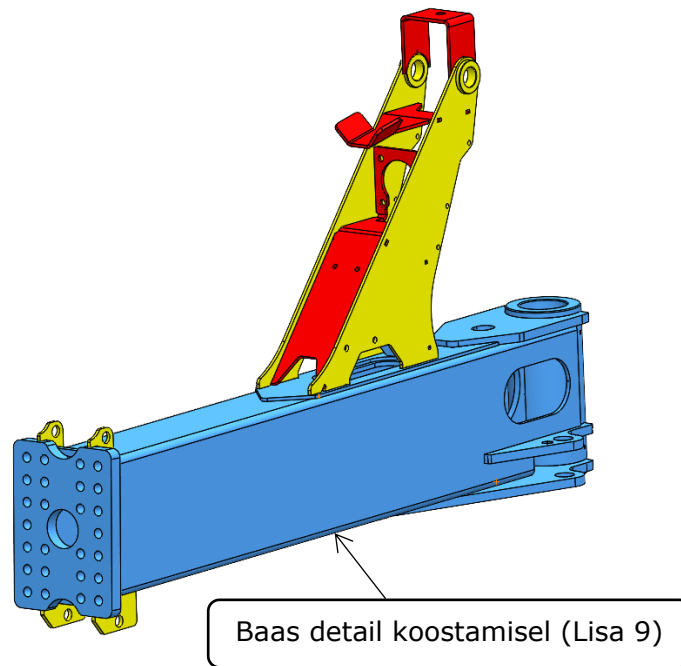
Pilt 12. Puksi (Lisa 3) sisemisele avale on jäetud töötlusvaru, et peale koostu keevitamist on võimalik töödelda lõpliku mõõdu peale. Seejärel paigaldatakse pressistuga liuglaager (Lisa 2).

Autor vaatab kogu toodet tervikuna ja võtab ka arvesse võimalikku tootmispraagi protsenti. Seega töö autori lahendus on esmalt keevitada konstruktsioonid kokku ja seejärel masintöödelda. Tulemuseks suudame vähendada keevitamisele kuluvat aega. Täpsus kõige olulisemates kohtades tagatakse avade masinatöötusega (Lisa 12).

Masinatöödeldud avade sisse käivad määritavad liugelaagrid (Lisa 2). Need tagavad pika eluea ja on vajadusel vahetatavad. Veetiisli eesmise- ja tagumise osade keevisjoonised on lisades (Lisa 4 ja Lisa 5). Keeviskoostude mehhaanilise töötlemise joonised on ka lisades (Lisa 6 ja 7).

Projekteerimise puhul on autor lähtunud ka heast tavast kasutada sümmeetriat. Esiteks see lühendab toote arendamise aega. Saab kasutada väiksemat arvu detaile ning tootmisjoonised tulevad hõlpsamini loetavamad, sest joonistele on võimalik peale kanda vähem infot. Teiseks saab valmistada detaile, mille väljalõike pinnalaotus on sama kuid ainult painutuste tegemise suund on erinev. Näiteks detailid FMWP09358 ja FMWP09358-01. Joonised asuvad lisades (Lisa 8). Kolmandaks, sõlmede keevitus ja montaaž on tunduvalt lihtsam ning väiksema inimliku eksimise võimalusega, kui detailid on sümmeetrilised.

Kohtades, kus pole võimalik sümmeetriliste detaile kasutamine, siis on hea lahendus kasutada identseid detaile. Suurem kogus teeb tükihinna soodsamaks ja saab vältida asjatult uue detaili loomist ettevõtte infosüsteemidesse.



Pilt 13. Veetiisli esiosa keeviskoost FMWS21045 (Lisa 4). Sinise värviga tähistatud detailid on sümmeetrilised ja kollase värviga tähistatud detailid on identsed. Punase värviga tähistatud detailid on küll sümmeetrilised, aga neid saab ainult ühes kindlas asendis koostada.

2.2 Materjali valik

Veetiisel on peamiselt valmistatud terasest S355J2. Vastab EN 10025-2 standardile. Kuna tugevusarvutused on tehtud juhindudes UN 147 E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.146 regulatsioonist [3], siis suurema voolepiiriga teraste kasutamine pole majanduslikult ega tehnoloogiliselt õigustatud. Olles regulatsiooniga kooskõlas, jääb ligikaudu neljakordne tugevusvaru.

Lisaks on S355J2 on hästi painutatav [4], mehaaniliselt hästi töödeldav ja keevitav ning omab rahuldavat löögisitkust ka -20° temperatuuri juures. Löögisitkuse omadus madalal temperatuuril on meie toodete puhul tähtis, kuna suur osa müügiturgudest asub Põhjamaades.

Samuti on tegemist ettevõtte jaoks laialt levinud materjaliga, mistõttu on meil alati laovaru olemas üldkasutatavate paksuste koha pealt. Me elame praegu ajastul, kus metallide ja energia hind on kõrge. Sellepärast peame tähelepanu pöörama ka jääkide hulgale. Kõige parem seda teha on kasutades materjali (S355J2), kuna laser- või plasmalõikuse korral saab terve lehtmaterjali tahvli ära kasutada, paigudates sinna ka teisi ettevõtte poolt toodetavaid detaile.

Suur sisseostu kogus tähendab soodsamat hinda. Tootmisüksusel on ka laialdased kogemused selle materjaliga, mistõttu kiirenes projekteerimise aeg ja puudus vajadus töötajate ümberõppe tarvis.

2.3 Tehnoloogiad

Veotisli valmistamiseks kasutan tänapäeval masinaehituses üldlevinud tehnoloogiaid. Peamiselt laser- ja plasmalõikust, painutamine, CNC treimine ja CNC freesimine, MIG/MAG keevitus, terashaaveldamine ja värvimine. Vähesel määral on tarvis ka teostada keermestamist ja servade faasimist keevituseks. Kuna projekteerides on töö autor pannud rõhku detailide omavahelisele kokkusobivusele ja arvestanud ka asjaoluga, et käsitsi tehtavad keevisõmblused võivad laiuselt natukene kõikuda, siis on töö autor jätnud keevisõmblustele tavapärasemast rohkem ruumi. Tulemuseks on keeviskoostud, mille puhul pole tarvis teostada täiendavaid lihvimise operatsioone ja hea kaubanduslik välimus on tagatud (Lisa 11).



Pilt 14. UNIPORT 6000. Selles CNC masintöötluskeskuses teostatakse töötlus ka veotiislile.

Veetiisli koostamisel (Lisa 15) on kasutusel üldlevinud käsitööriistad ja abivahendid. Põhiliste sõlmede suure massi tõttu (Lisa 4 ja lisa 5) peab seda tegema koos kraanaga. Koostamise tšehhis on olemas sildkraanad ja nende kasutamine on tavapärane osa ettevõtte põhitegevusest.

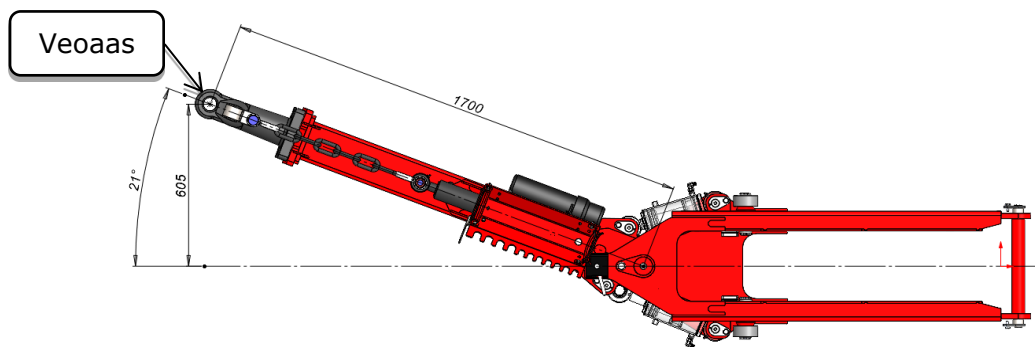


Pilt 15. Kraana kasutamine B12 haagise koostamisel

Projekteerides olen vältinud ettevõtte jaoks uusi tehnoloogiaid ja eritööriistu, et hoida toote hind madal ja minimaliseerida tööliste koolitamise vajadust. Iga täiendav dokument või koosolek, et anda edasi uut infot, on suur tööaja kulu. Seoses veetiisli koostamise ja paigaldamisega haagise külge on ka oluline mõelda ettevõttest väljapoole. Nimelt kuna me ise hüvitame garantii perioodi ajal tekkinud kulud klientidele, siis oli tähtsal kohal asjaolu, et montaaž ja demontaaž oleks tööaega ja oskusi vähenõudev.

2.4 Kinemaatiline funktsionaalsus

Kinemaatika parandamine omab suurt rolli toote kasutajale, kuna tõstab haagise kasutamise mugavust, muudab töötamise efektiivsemaks ja ohutumaks ning vähendab asjatut masina- ja kütusekulu ebavajalike manööverdamiste ärajäämise tõttu. Haagise pöörderaadius sõltub peamiselt sellest, kui suur nurk(°) on võimalik tekitada traktori ja haagise vahele. Piiravaks asjaoluks saab traktorite puhul tagumiste rataste kokkupuude veetiisliga. Üldiselt traktorid suudavad saavutada pöördenurga 35° kuni 50°, enne kui tagumised rattad lähevad vastu veetiislit. Täpne pöördenurk sõltub paljudest teguritest: rehvi välis läbimõõt, rehvi laius, rataste omavaheline kaugus, haakeseadme tüüp, haakeseadme kõrguse ja kauguse asukoht ja rattakettide olemasolu. Pööratava veetiisli korral on võimalik suurendada traktori ja haagise omavahelist nurka(°) veel täiendava 21° võrra, mis pakub tunduvalt paremat manööverdamise võimet ja vähendab pöörderaadiust.



Pilt 16. Veetiisel pööratud parempoolsesse piirasendisse.

Enamustel juhtudel, kui klient ostab omale B12 haagise koos pööratava veetiisliga, siis kuulub lisavarustusse ka kraana (Lisa 1). Kraanaga töötades peab alati kasutama maapinnale toetavaid tugijalgasid. Pööratava veetiisli puhul on võimalik mugavalt sättida tugijalgade asukohta ilma traktorit liigutamata ja operaator saab paremini keskenduda kraana juhtimisele. Samuti olukorras kui kraana ja tugijalad on transpordi asendis, siis kergendab manööverdamist metsas puude vahel või muudes kitsastes kohtades.

Lisaks kõigele eelpool nimetatule, tiisli pööramise funktsioon on ka konteineri peale laadimise etapis kasulik omadus. Kui näiteks haagise rullikud ja konteiner suusad pole omavahel hästi joondatud, siis puudub vajadus traktoriga uus lähenemise katse teha, vaid olukorra saab lahendada ohutult tiisli pööramisega.

Tiisli pööramine on lahendatud hüdrosilindrite abiga, mida on võimalik juhtida olenevalt lisavarustusest operaatori poolt kas käsitsi traktori kabiinist või läbi kaugjuhtimise puldi. Kraanadega töötamise puhul on levinud, et operaator asub traktorist kaugemal ja seega on erinevate funktsioonide ühilduvus suur eelis. Klientide eelistused liiguvad ühe rohkem selle poole, et seadmed oleksid ohutud ja mugavad ning suure võimekusega.

2.5 Tugevusarvutused

Vastavalt UN 147 E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.146 [3] regulatsioonile ei tohi keeviskonstruktsioonide ristlõigete pinged ületada 90 MPa. Kuna veetiisel koosneb kahest kokku ühendatud keeviskoostust, siis peame seda regulatsiooni järgima, et tulevikus ettevõtte saaks taodelda veetiislile tüübikinnitust.

Seega on autori tugevusarvutuste etapi lõppeesmärgiks leida σ_b väärtused, nad vastaksid ISO 7641/1-1983pt 5.3 [5] või UN147 E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.146 Annex 6 [3]. Olenevalt kumb nõuetest on rangem.

Ristlõigete pingete arvutamine on hea meetod spetsiifiliste sõlmede projekteerimiseks. Töömahukus oleneb, mis määral ja kui lühikese vahemaa vältel mõõdetava keha ristlõige muutub. Seetõttu pööratava veotiisli puhul pidi töö autor tihedalt tegema lõikeid, et toode oleks täies ulatuses kontrollitud. Tegemist on suhteliselt keeruka kehaga, kus lisaks geomeetria muutub ka materjali paksus. Samuti on tootel palju avavusi ja sisselõikeid, mis tekitavad järske ristlõike pingete muudatusi suhteliselt lühikeste vahemaade kohta. Seetõttu on töö autor projekteerides üritanud avavuste suurust hoida nii väikesena, kui võimalik. Lisaks paigutada asukohtadesse, kus, tänu ümbritsevale materjali kogusele või üldisele geomeetria, ristlõike pinged on tunduvalt alla lubatud piiri. Hea näide on hüdrovoolikute läbiviigu avad veotiisli esiosal (Lisa 11). Kuna konstruktsioonist tulenevalt asuvad seal piirkonnas ka hüdrosilindrite (Lisa 2) ja keskliigendi puksi (Lisa 3) kinnitusplaadid (Lisa 4), siis suured avavused ei kergita ristlõike pingeid üle lubatud piiri.

Ristlõike pingete arvutamine käib etteantud valemite järgi. Detailide pingeid eraldi ei määrata, seda tehakse tiisli kui terviku põhjal. Arvesse võetakse ainult koormust kandvaid keeviskonstruktsioone (Lisa 4 ja lisa 5). Kuigi praktilises elus keevitatakse detailid kokku ja siis lisandub veel ka vähesel määral täiendav osa materjali keevisõmbluse ristlõike tulemusena, siis töö autor seda projekteerimisel arvesse ei võtnud. Seega 3D mudelis puudub keevisõmbluste imitatsioon. Mõtteliselt lõigatakse keha vertikaalselt lõikudeks (Pilt 19) ja teostatakse ristlõike pinge arvutused. Veotiisli mõjuvad jõud algavad veoasale mõjuvast koormusest (S) (Tabel 1). Edasiste jõudude leidmiseks on vaja teada tiisli pikkust (koos veoasaga), toetuspunkti- ja kinnituspunkti asukoha kaugust (Skeem 1).

Projekteerimise faasis kui alles töö autor üritab leida detailide geomeetria ja materjali paksust, et saavutada optimaalne ristlõike pinge, siis võib selleks olla tarvis teha ligikaudu paarsada arvutust. Tööprotsess on pidev kontrollarvutuste ja geomeetria korrektuuride tegemine, kuni saavutatakse rahuldav tulemus. Optimaalne ristlõike pinge tähendab, et mitte üle 90MPa, aga soovitatavalt 70MPa-85MPa lähedale. Liiga madal pinge tähendab üleliigset materjali kulu. Teatud ristlõike pingete asukohtades (Pilt 17) on pingete suhteliselt madal väärtus paratamatu, sest kasutusel on muutumatu ristlõikega terasprofiil (Lisa 9). Siin kohal on autor leidnud hea kompromissi toote omaduste ja majandusliku mõju vahel.

Kuna paberi ja pliiatsiga arvutamine on liiga aeglane tegevus ning võib põhjustada inimliku arvutusvea, siis autor koostas Excel programmi abil kalkulaatori, mis lisaks ühe kinnituspunktiga veotiislitele, võimaldab teostada arvutusi ka toetuspunktiga mudelitele.

Mõeldud kasutamiseks kogu ettevõttele, uute toodete arendamisel ja olemasolevate toodete puhul muudatuste järgseks kontrolliks. Ekraanitõmmised on välja toodud lisades (Lisa 16 ja lisa 17).

Kalkulaatori valemitesse tuleb sisestada lähteandmed: traktori mass, maksimaalne kandevõime ja staatiline koormus veoasale. Veoaas on lisavarustus, mis paigaldatakse poltidega veotiisli külge, kuid ei kuulu veotiisli peakoostu (Lisa 2). Arvutuste jaoks kasutatakse kujutletavat veoasa, et luua realistlik olukord. Veoaas pikendab jõuõlga.

Lähteandmed on autorile tööülesande osana etteantud suurused, mida ta kasutab edasistes arvutustes.

Tabel 1. Lähteandmed

Jrk	Nimetus	Väärtus	Ühik	Tähis
1	Traktori mass	32	t	T
2	Maksimaalne kandvõime	12	t	
3	Haagise täismass	16.5	t	
4	Staatiline koormus veoasale	2500	kg	S

Esmalt leitakse veotiislile mõjuv teoreetiline horisontaaljõud D_c (kN) valemiga (1) [3].

$$D_c = \frac{(T \times C)}{(T + C)} \times g, \quad (1)$$

kus T - traktori mass, t;
 C - läbi haagise sildade maapinnale mõjuv mass, t;
 G - gravitatsiooni kiirendus, 9,81 m/s².

$$D_c = \frac{(T \times C)}{(T + C)} \times g = \frac{(32 \times 14)}{(32 + 14)} \times 9.81 = \frac{448}{46} \times 9.81 = 95.54 \text{ kN}.$$

Seejärel tuleb leida teoreetilise vertikaaljõu amplituudi väärtus V (kN) valemiga (2) [3].

$$V = 1,44 \times 1,8 \frac{m}{s^2} \times C, \quad (2)$$

kus 1,44 - konstant;
1,8 - konstant;
 C - läbi haagise sildade maapinnale mõjuv mass, t.

$$V = 1,44 \times 1,8 \frac{m}{s^2} \times 14 = 36,29 \text{ kN}.$$

Nüüd leiame horisontaalse koormuse F_h (kN) täismassiga haagise korral. Kasutame selleks valemit (3) [3].

$$F_h = 1,0 \times D_c \quad (3)$$

kus $1,0$ - konstant;
 D_c - teoreetiline horisontaaljõud, kN.

$$F_h = 1,0 \times 95,54 = 95,54 \text{ kN}.$$

Järgmisena leiame vertikaalse koormuse F_s (kN). Kasutame selleks valemit (4) [3].

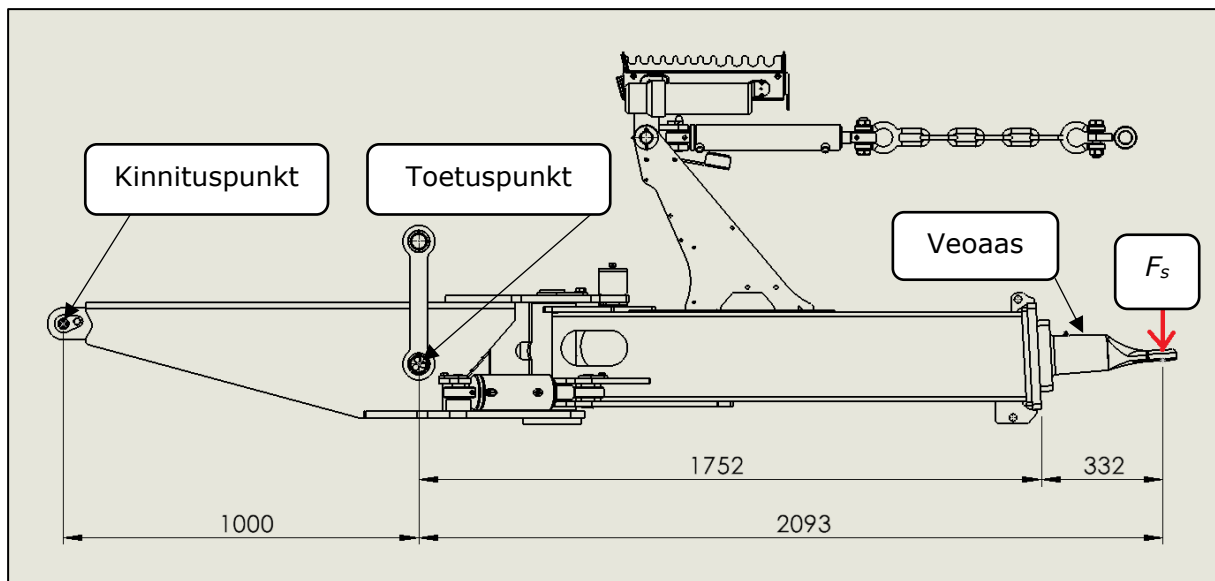
$$F_s = g \times S + 0,3 \times V, \quad (4)$$

kus G - gravitatsiooni kiirendus, $9,81 \text{ m/s}^2$;
 S - staatiline koormus veoaasale, t;
 $0,3$ - konstant;
 V - teoreetilise vertikaaljõu amplituudi väärtus, kN.

$$F_s = 9,81 \times 2,5 + 0,3 \times 36,29 = 35,41 \text{ kN}.$$

2.5.1 Ristlõigete pinged

Üldskeem (Skeem 1) näitab ära veotiisli kinnituspunkti ja toepunkti kauguse üksteisest. Samuti asukoha, kuhu mõjub vertikaalselt punktjõud F_s (Valem 4).

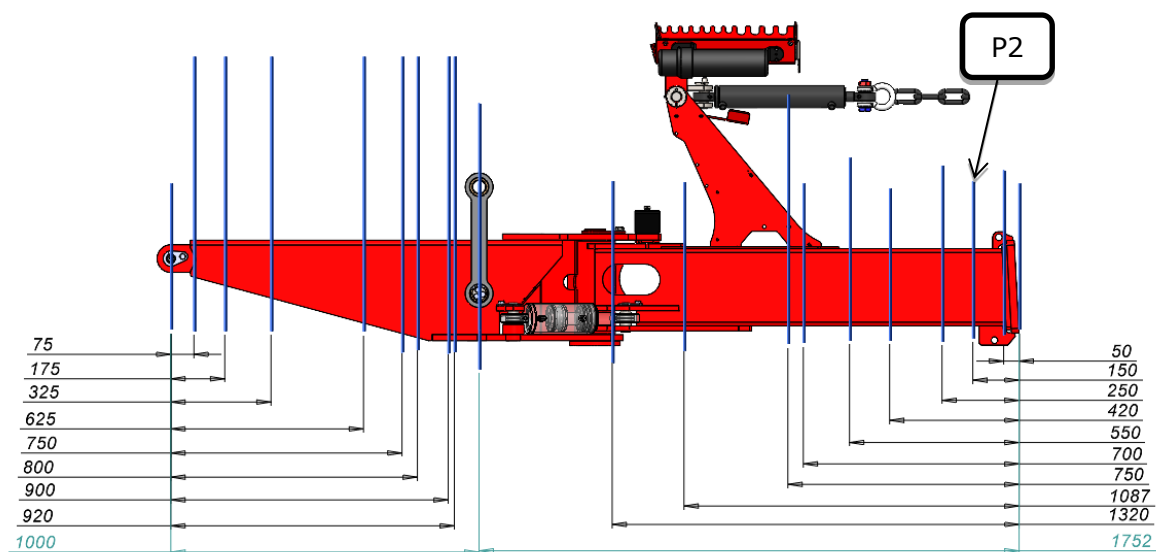


Skeem 1. Üldskeem

Kuna meil on teada F_s (Valem 4) väärtus, siis saame alustada ristlõike painde pinge leidmist σ_b [6]. Tegemist on absoluutväärtustega.

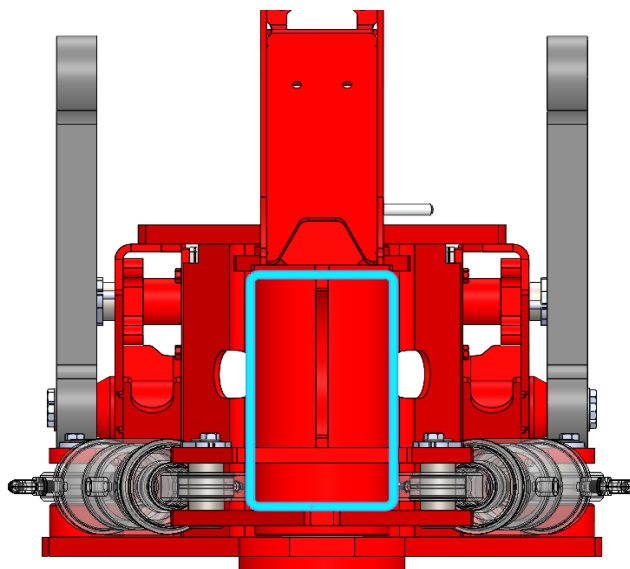
Autori veotiisel (Skeem 1) on lisaks kinnituspunktile ka toetuspunktiga. Seetõttu arvutused tehakse kujutletavas süsteemis, kus veotiisel kui üks tervik jagatakse mõtteliselt kaheks osaks. Mõttelise eesmise osa alla arvestatakse vahemaad 2093 mm (Skeem 1), toetuspunktist kuni veoaasa tsentrini. Mõttelise tagumise osa alla arvestatakse vahemaad 1000 mm (Skeem 1), tagumisest kinnituspunktist kuni toetuspunktini. Praktilises elus veotiisli külge kinnitatakse ka veoaas. Autor kasutab kujutletavat veoaasa, et anda visuaalne ettekujutus pikenenud jõulale. Arvutuste jaoks kasutame kõige pikemat versiooni ehk selle võrra suureneb veotiisli mõtteline esiosa 332 mm. Määrame vertikaaljõu F_s (Valem 4) mõjuma veoaasa tsentrisse.

Esmalt koostame teostame ristlõigete asukohtade skeemi (Skeem 2), kuhu on peale kantud 20 mõõtekohta. Mõõtekohtade asukohta horisontaalsel suunal liigutatakse projekteerimise käigus, et veotiisel oleks täies ulatuses kontrollitud. Piirkondades, kus on avavused või detailide ülekate. Tuleb eeldada järske ristlõike painde pingete muutust ja peab mõõtekohtasid asetada tihedamini, et saada täpsem tulemus. Autor on kasutanud P + number tüüpi tähistamist lõikepindadele . P1 , P2 , P3 jne (Skeem 2).

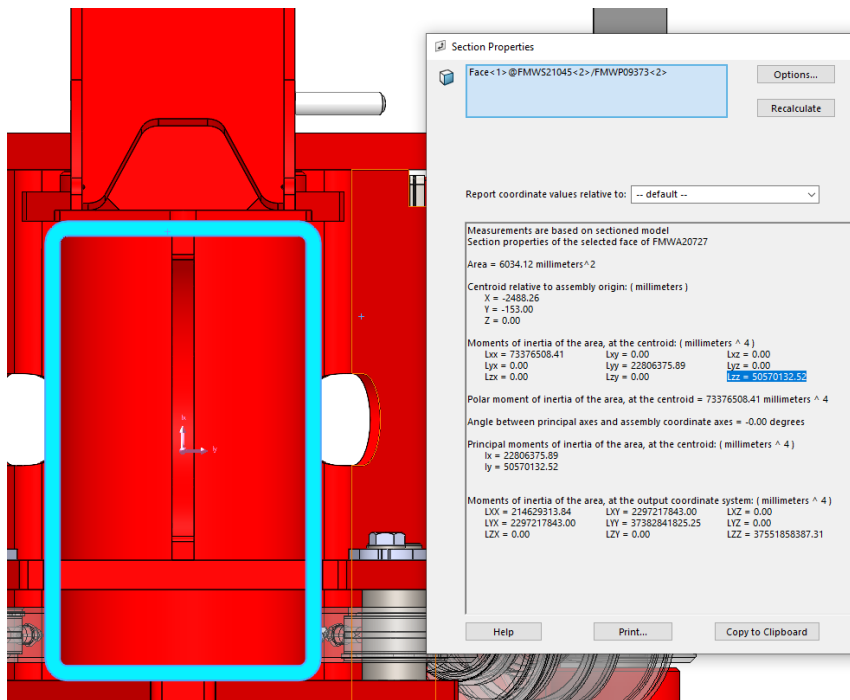


Skeem 2. Ristlõike mõõtekohtade asukohad kaugustega. Kujutletava veoasa pikkus liidetakse eraldi juurde.

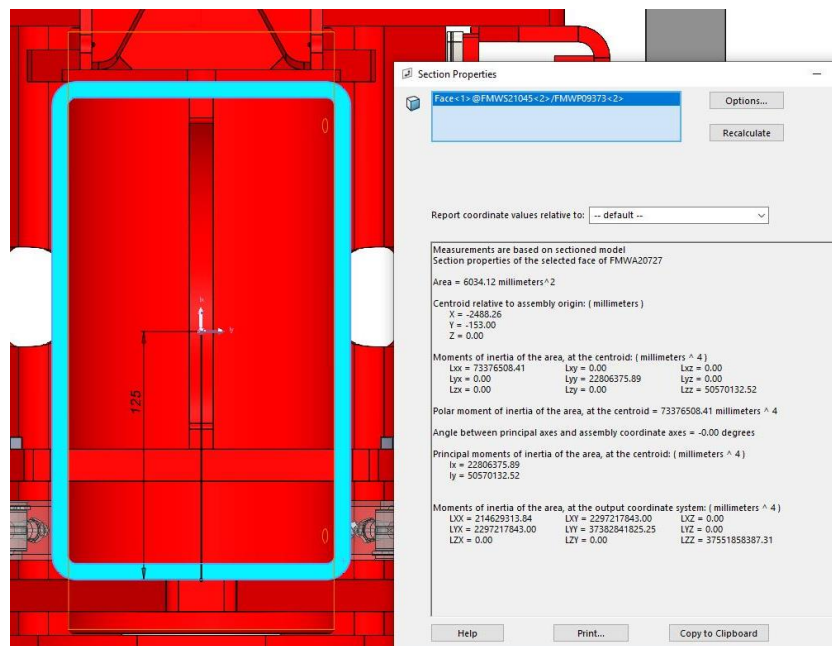
Järgmisena kasutame CAD programmi Solid Works funktsiooni Section View ja Section Properties. Näitena autor teeb läbi ristlõike pinna P2 (Skeem 2) inertsimomendi väärtuse I_{x1} ja tsentroidist kaugeima asukoha a leidmise. Väärtus a tuleb manuaalselt mõõta, tõmmates joone tsentroidist (Pilt 19) kuni ristlõike pinna kaugeima servani. Tsentroidi asukoha määrab Solid Works automaatselt.



Pilt 17. Ristlõige asukohas P2 (Skeem 2)



Pilt 18. Mõõtepinna P2 inertsimomendi I_{xI} väärtus on 50570132 mm⁴. (Seda tinglikult Z- telje suhtes arvestatuna kuna 3D mudel on niimoodi positsioneeritud).



Pilt 19. Vahemaa tsentroidi ja kaugeima punkti vahel.

Nüüd kui meil sisendandmed käes, siis saame teostada arvutuse leidmaks σ_b . Selleks esmalt leiame tugevusmomendi W_{xI} (mm³) valemiga (5),

$$W_{x1} = \frac{I_{x1}}{a} \quad (5)$$

kus I_{x1} - ristlõike inertsimoment, mm^4 ;
 A - kaugeim punkt tsentroidist, mm.

$$W_{x1} = \frac{50570132}{125} = 404\,561 \text{ mm}^3$$

Seejärel arvutame paindepinge σ_b (N/mm^2). Selleks kasutame ettevõtte siseselt valemit (6),

$$\sigma_b = \frac{F_s \times 10^3 \times l_1}{W_{x1}}, \quad (6)$$

kus F_s - vertikaalne koormus, kN;
 10^3 - konstant;
 l_1 - P2 kaugus F_s mõjumise punktist (Skeem 2). Arvestame juurde +332 mm kujutlevat veoasa, mm;
 W_{x1} - tugevusmoment, mm^3 .

$$\sigma_b = \frac{F_s \times l_1}{W_{x1}} = \frac{35,41 \times 10^3 \times 482}{404\,561} = \frac{17,067,620}{404\,561} = 42.18 \text{ MPa} = 42.18 \text{ N/mm}^2$$

Ehk siis ristlõike kohas P2 on meil ristlõike paindepinged (σ_b) suurusega 42.18MPa.

Kuna ristlõike P2 (Skeem 2) puhul on tegemist asukohaga, mis jääb suhteliselt lähedale jõu rakendumise punktile ja seal ma kasutan ühtlase ristlõikega profiili (Lisa 9), siis on sedavõrd madal ristlõike pinge aksepteeritav. Muutliku ristlõikega profiili puhul peaksime loobuma ostutoote kasutamisest ja ise valmistama, mis tõstaks toote hinda.

Lühiduse huvides autor piirdub ühe ristlõike koha näidis arvutuse väljatoomisega.

Järgmisena meil on tarvis arvutada ristlõike pingeid asukohtades, mis jäävad veotiisli toetuspunkti ja kinnituspunkti vahele (Skeem 2) siis peame kasutama teistsugust arvutuskäiku, et leida kinnituspunktile F_2 (Skeem 3) mõjuv vertikaaljõu F_{s2} (kN). Selleks võtame aluseks kangireegli valemi $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$ [7] . Ning koostame valemi (7).

Samuti määrame selguse huvides, et nüüd :

$$F_s \text{ (Valem 4)} = F_{s1} = F_1 = 35,41 \text{ kN}$$

$$F_2 \text{ (Valem 7)} = F_{s2}$$

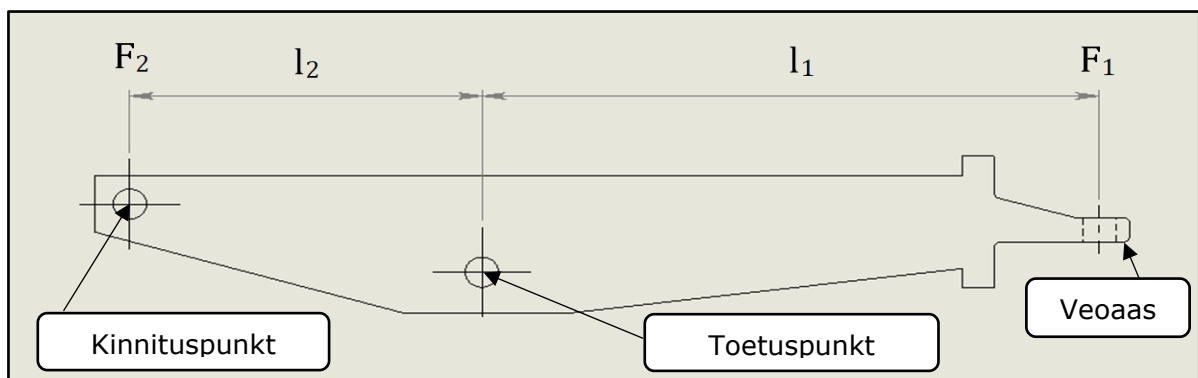
$$l_1 = 1752 + 332 = 2084 \text{ mm (Skeem 1)}$$

$l_2 = 1000 \text{ mm}$ (Skeem 1)

$$F_2 = \left(\frac{l_1}{l_2}\right) \times F_1, \quad (7)$$

kus F_1 - vertikaalne koormus, kN;
 l_1 - vahemaa, mm;
 l_2 - vahemaa, mm;

$$F_2 = \left(\frac{2084}{1000}\right) \times 35,41 = 73,79 \text{ kN}.$$



Skeem 3. Mõttelise tagumise osa vertikaal jõu F_2 rakenduspunkti asukoht

Mõttelise tagumise osa ristlõike pingete σ_b (N/mm²) arvutamine viiakse läbi kasutades valemit (8), mis on tuletatud valemist (6).

$$\sigma_b = \frac{F_{s2} \times 10^3 \times l_2}{W_{x2}}, \quad (8)$$

kus F_{s2} - vertikaalne koormus, kN;
 10^3 - konstant;
 l_2 - ristlõike asukoha kaugus mõõdetuna punktist F_2 , mm;
 W_{x2} - ristlõike tugevusmoment, mm³.

Kontrolliks on sobilik meetod arvutada valemi (6) ja valemi (8) järgi ristlõike pinget asukohas toetuspunkt (Skeem 3). Saadud tulemused peavad ühtima.

Nüüd autor hindab valemiga (6) saadud tulemust 42.18 N/mm^2 . Vastavust standardile ISO 7641/1-1983pt 5.3 [5] ja UN 147 E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.146 regulatsiooni lisa 3.7.1 [3]. Kuna UN 147 regulatsioon on rangem siis lähtun nõudest keeviskonstruktsiooni $\delta_{max} \leq 90 \text{ MPa}$. Seega autori poolt leitud väärtus vastab tingimustele.

2.6 Hüdraulika arvutused

Veotiisli pööramine toimub tänu kahele identsele hüdrosilindrile (Lisa 2). Silindrid alati töötavad koos – kui üks „lukkab“ siis teine „tõmbab“. Ehitusliku eripära tõttu silinder sisseliikumise ajal arendab vähem jõudu kui välja liikumisel. Käesolevas peatükis autor arvutab välja silindrite poolt arendatava jõu ning sellega tekkiva pöördemomendi veotiisli esiosale (Lisa 4). Pööramise kiiruse arvutust ei teostata kuna toote puhul puudus vastav projekteerimise nõue ja erinevate traktorite hüdroüsteemi vooluhulk l/min on erinev.

Tabel 2. Hüdrosilindri andmed

Jrk	Parameeter	Väärtus	Ühik
1	Töörõhk p_e	200	bar
2	Silindri sisemine läbimõõt d_1	90	mm
3	Kolvivarre läbimõõt d_2	40	mm
4	Kasutegur η	0.85	%

Esmalt leiame kolvi pindala A_1 (mm²) valemiga (9) [8],

$$A_1 = \frac{\pi \cdot (d_1)^2}{4}, \quad (9)$$

kus π - matemaatiline konstant, $\approx 3,141$;

d_1 - silindri sisemine läbimõõt, mm.

$$A_1 = \frac{\pi \cdot (d_1)^2}{4} = 6030,52 \text{ mm}^2$$

Silindri jõu F_1 (N) välja liikumise korral leiame valemiga (10) [9],

$$F_1 = P_e \cdot A_1 \cdot \eta, \quad (10)$$

kus P_e - hüdroüsteemi töörõhk, N/cm²;

A_1 - kolvi pindala, cm²;

η - kasutegur, %.

$$F_1 = 2000 \frac{N}{cm^2} \cdot \frac{\pi \cdot (9cm)^2}{4} \cdot \eta = 108140 \text{ N} = 108.14 \text{ kN}$$

Kolvivarre poolse kolvipindala A_2 (mm²) leiame valemiga (11) [8],

$$A_2 = A_1 - \frac{\pi \cdot (d_2)^2}{4}, \quad (11)$$

kus A_1 - kolvi pindala, cm²;

π - matemaatiline konstant, $\approx 3,141$;
 d_2 - d_2 – kolvivarre läbimõõt, mm.

$$A_2 = A_1 - \frac{\pi \cdot (d_2)^2}{4} = 4,774.12 \text{ mm}^2$$

Silindri jõu F_2 (N) sisse liikumise leiame valemiga (12) [9],

$$F_2 = P_e \cdot A_2 \cdot \eta, \quad (12)$$

kus P_e - hüdroüsteemi töö rõhk, N/cm²;
 A_2 - kolvivarre poolne kolvipindala, cm²;
 η - kasutegur, %.

$$F_2 = 2000 \frac{N}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\pi \cdot [(9\text{cm})^2 - (4\text{cm})^2]}{4} \cdot \eta = 86780 \text{ N} = 86.78 \text{ kN}$$

Nüüd, kui meil on teada silindrite poolt tekitatavad jõud, siis saame leida ka pöördemomendi, millega pööratakse tiisli eesmist osa. Pöördemomendi leidmiseks kasutasin lihtsustatud arvutust, et leida ligikaudne väärtus hüdrosilindrite ja jõuõlgade määramisel. Hilisem toote katsetamine pidi andma lõpliku vastuse. Veotiidli esiosa (Lisa 4) pöördemomendi $N \cdot m$ leidmiseks kasutan valemit (13) [7]. Jõu F (N) leidmiseks liidan kokku F_1 (N) ja F_2 (N). Kauguse l (m) leidmiseks mõõdan vahemaa veotiidli sümmeetriateljest kuni silindri kinnitus sõrme ava tsentrini (Lisa 6).

$$T = F \cdot l, \quad (13)$$

kus F - jõud, N;
 l - kaugus, m.

$$T = (108140 + 86780) \cdot 0.115 = 22\,415,8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Peale prototüübi katsetamist (Pilt 20) maksimaalse koormaga (13t) selgus, et tulemus vastab ootustele ja täidab funktsiooni. Katsetasime betoonpinna peal ehk haagise rehvidel oli hea haarduvus. Veotiidli pööratavuse jõu puudust ei täheldatud. Haagise ekspluatatsiooni käigus võivad tekkida keeruliselt prognoositavad situatsioonid ja seetõttu on mõistlik tagada sõlme toimivus ka kõige raskematel tingimustel. Samuti peab arvesse võtma asjaolu, et kuigi soovituslik töö rõhk on 200 bar siis kliendid kasutavad haagist ka vanemate traktoritega, mille hüdraulika süsteemi töö rõhk on madalam soovituslikust. Mõistliku silindrite poolt tekitatav jõud võib olla kuni 20% väiksem.



Pilt 20. Pööramise katsetamine. Pildil on näha rehvide külgsuunalist nihet.

3 MAJANDUSARVUTUSED

Leitakse pööratava veotiisli prototüübi valmistamise maksumus (Tabel 3). Autor tasuvuse aega ei arvesta kuna toode on peamiselt mõeldud B12 seeria haagise üldise müügitahu suurendamiseks ja uute klientide leidmiseks. Lisaks oskusteave, mis omandati projekteerimisel, valmistamisel ja klientide tagasisidel jäi ettevõttesse ning seda saab tulevikus kasutada muude projektide puhul.

Tabel 3. Pööratava veotiisli prototüübi valmistamise kulud

Jrk	Kuluartikkel	Maksumus	Kogus	Kokku
1	Raami luku kmpl., (eurot)	250	1	250
2	Voolikute hoidja, (eurot)	65	1	65
3	Asendi lukustuse kmpl., (eurot)	62	1	62
4	Veotiisli tagumine osa, (eurot)	800	1	800
5	Keskliigendi sõrm, (eurot)	120	1	120
6	Veotiisli eesmine osa, (eurot)	680	1	680
7	Hüdrosilinder, (eurot)	100	2	200
8	Liugelaagrid, (eurot)	60	1	60
9	Määrdenippel, (eurot)	1	2	2
10	Silindrite kinnituse sõrm, (eurot)	16	4	64
11	Tagaosa kinnituse sõrm, (eurot)	21	2	42
12	Kinnitusvahendid, (eurot)	20	1	20
13	Koostamine, (eurot/h)	30	8	240
14	Katsetamine, (eurot/h)	35	10	350
15	Projekteerimine ja tootearendus, (eurot/h)	30	130	3900
16	Üldkulud 20% jrk 13 ja jrk 14, (eurot)	118	1	118
		Kokku, (eurot)		6973

Projekteerimise aja alla kuulus ka valmistamise ja katsetamise käigus kogutud info põhjal tootmisjooniste muudatuste tegemist.

Autor märgib ära, et seeria toote puhul on võimalik hinda teataval määral alla tuua kuna suuremad kogused langetavad alakoostude ja ostukomponentide hinda. Keeviskoostude valmistamine esimesel korral uue toote puhul on eriti ajamahukas.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli projekteerida ja teha tootmisküpsiks uus veotiisel haagisele BIGAB B12. Aastal 2023 haagise lisavarustuse nimekiri täienes järel paigaldatava kraana võrra ja standard veotiisel selle kombinatsiooniga enam ei sobinud. Uuel veotiisil pidi olema kaks sisulist täiendust: pööramise funktsioon koos 42° kogu pöörde ulatusega ja kogupikkus vähemalt 2700 mm, et tagada piisavalt ruumi traktori ja kraana vahele. Samuti vastama ristlõike pingete osas UN 147 E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.146 regulatsiooni nõudele, et tulevikus ettevõtte saaks taodelda tüübikinnituse.

Ettevõtte poolt püstitatud ülesande täitmiseks esmalt autor tutvus haagise ja olemasoleva standard veotiisliga, et tagada uue toote täielik modulaarsus. Mõtestas lahti tähtsamad omadused ja disaini lahendused ning tehnoloogia. Lisaks oli mõistlik ka kaardistada juba ettevõtte tootenimekirjas olevaid detaile ja sõlmi, et vältida asjatult samalaadsete projekteerimist.

Autor töötas välja lahenduse kus kahest keeviskoostust läbi sõrme ühendatav veotiisel pöörab keskliigendist hüdrosilindrite abiga. Kasutati kahte koos töötavat hüdrosilindrit, et tagada identne liikumise kiirus ja jõud olenemata pööramise suunast. Tagumine keeviskoost ehk haagise raami külge kinnituv osa jääb alati samaks ja eesmise osa vahetamisega on võimalik klientidele pakkuda eri pikkusega variatsioone. Toote pika eluea tagavad tugev konstruktsioon ja vahetatavad kuluosad. Samuti asjaolu, et toode on hõlpsasti remonditav või osaliselt asendatav.

Solid Works programmi ja käsi arvutuste abil teostatud tugevusarvutused põhinesid ristlõike pingete leidmisel, et tagada $\sigma_b \leq 90$ MPa kogu veotiisli ulatuses.

Majanduslikus osas leiti prototüübi valmistamise maksumus, mis sisaldas materjali ja ostukomponentide hinda ning tööjõulu kulu koos projekteerimisega. Veotiisli prototüübi maksumus oli 6973 eurot.

SUMMARY

The aim of this thesis was to design and make production-ready a steering drawbar for the BIGAB B12 trailer.

In 2023, the list of optional equipment for the trailer expanded to include a retrofitted crane, making the standard drawbar unsuitable for this combination. The new drawbar needed two significant improvements: a steering function with a 42° of total angle (21° to both sides) and a total length of at least 2700 mm to ensure enough clearance between the tractor and the crane. Additionally, it had to meet the cross-sectional stress requirements of the UN 147 E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.146 regulation so the company could apply for type approval in the future.

To complete the task set by the company, the author first familiarized themselves with the trailer and the existing standard drawbar to ensure the new product's full modularity. The key properties, design solutions, and technology were thoroughly analyzed. It was also sensible to map out the parts and assemblies already in the company's product catalog to avoid unnecessary creation of similar products.

The author developed a solution where the drawbar, connected through a pin, steers at a central joint with the help of hydraulic cylinders. Two hydraulic cylinders working together were used to ensure identical movement speed and force regardless of the turning direction. The rear welded assembly, which attaches to the trailer frame, remains the same, and by replacing the front part, different length variations can be offered to customers. The product's long lifespan is ensured by a strong construction and replaceable wear parts, as well as the fact that the product is easy to repair or partially replace.

Strength calculations were performed using SolidWorks software and manual calculations, focusing on finding cross-sectional stresses to ensure that $\sigma_b \leq 90$ MPa throughout the drawbar.

In the economic section, the prototype manufacturing cost was determined, including the price of parts and subassemblies, as well as labor costs including design work. The cost of the drawbar prototype was 6973 euros.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „Fors MW AS“ 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.forsmw.com/en>.
- [2] „Fors MW AS“ 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.forsmw.com/en/hook-lift-trailers/b-12> .
- [3] „Unece“ 2024 . [Võrgumaterjal]. Available: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2020/R147e.pdf> .
- [4] R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, V. Menges, S. Oesterle, T. Rapp, C. Scholer, A. Stenzel, A. Stephan ja F. Wieneke,, MEHAANIKAINSENERI KÄSIRAAMAT, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2021, p. 128.
- [5] „ISO“ 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iso.org/standard/14456.html>.
- [6] R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, V. Menges, S. Oesterle, T. Rapp, C. Scholer, A. Stenzel, A. Stephan ja F. Wieneke,, MEHAANIKAINSENERI KÄSIRAAMAT, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2021, p. 44.
- [7] R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, V. Menges, S. Oesterle, T. Rapp, C. Scholer, A. Stenzel, A. Stephan ja F. Wieneke,, MEHAANIKAINSENERI KÄSIRAAMAT, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2021, p. 35.
- [8] R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, V. Menges, S. Oesterle, T. Rapp, C. Scholer, A. Stenzel, A. Stephan ja F. Wieneke,, MEHAANIKAINSENERI KÄSIRAAMAT, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2021, p. 23.
- [9] R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, V. Menges, S. Oesterle, T. Rapp, C. Scholer, A. Stenzel, A. Stephan ja F. Wieneke,, MEHAANIKAINSENERI KÄSIRAAMAT, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2021, p. 429.
- [10] W.Allik , Praktika aruanne II, Tallinn: TKTK Inseneripraktika II 2023, p. 4.

LISAD

Lisa 1. Kraana

Lisa 2. Pööratava veotiisli peakoost FMWA20727

Lisa 3. Detaili joonis FMWP09371

Lisa 4. Keeviskoostu joonis FMWS21045/1

Lisa 5. Keeviskoostu joonis FMWS21044/1

Lisa 6. Masintöötlemise joonis FMWS21045/2

Lisa 7. Masintöötlemise joonis FMWS21044/2

Lisa 8. Detaili joonised FMWP09358 ja FMWP09358-01

Lisa 9. Detaili joonis FMWP09373

Lisa 10. Tagumise osa koostamise

Lisa 11. Esiosa keevisõemblused

Lisa 12. Haaveldatud pind

Lisa 13. Lühendatud esiosaga veotiisel

Lisa 14. Hüdrovoolikute paigaldamine

Lisa 15. Montaaž

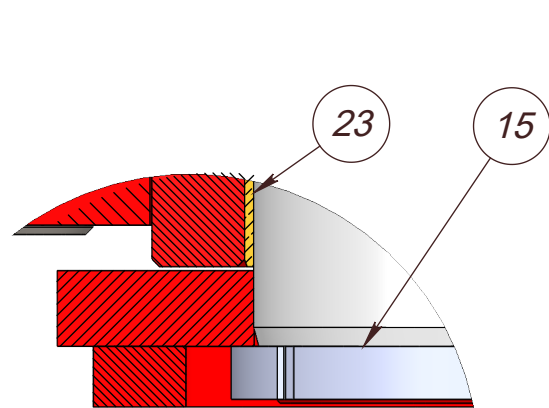
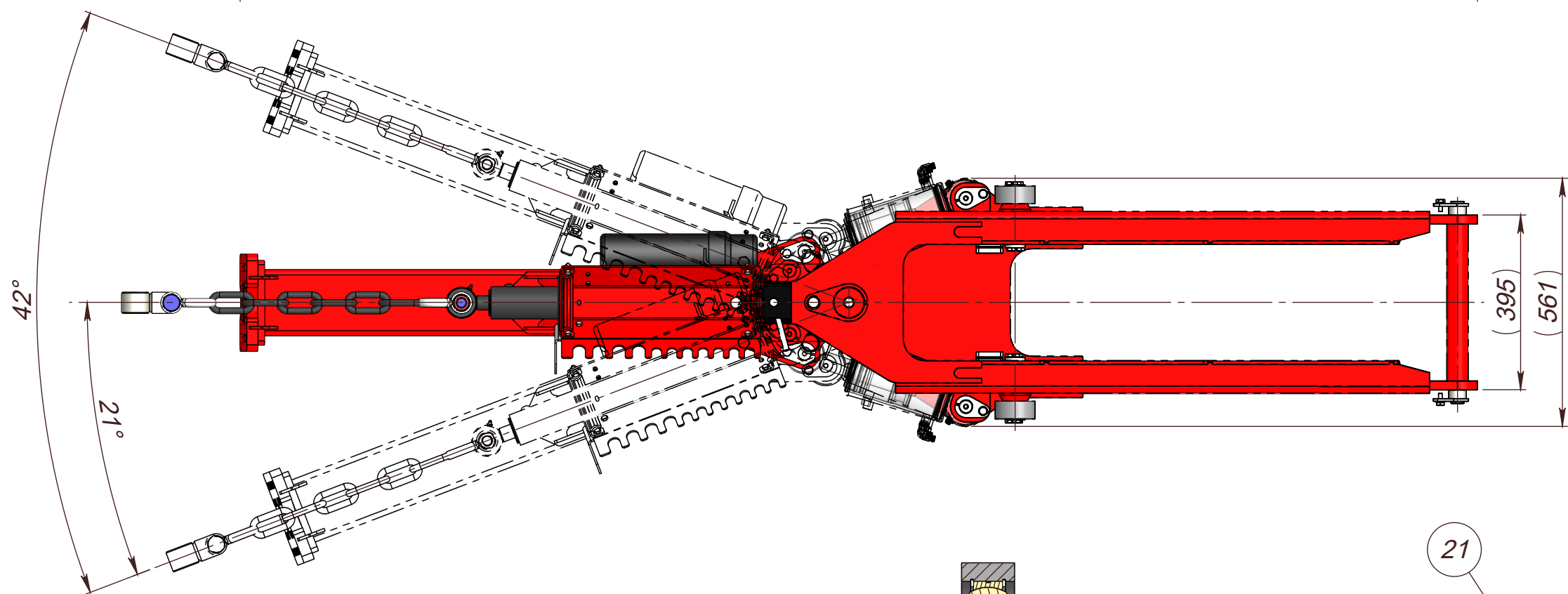
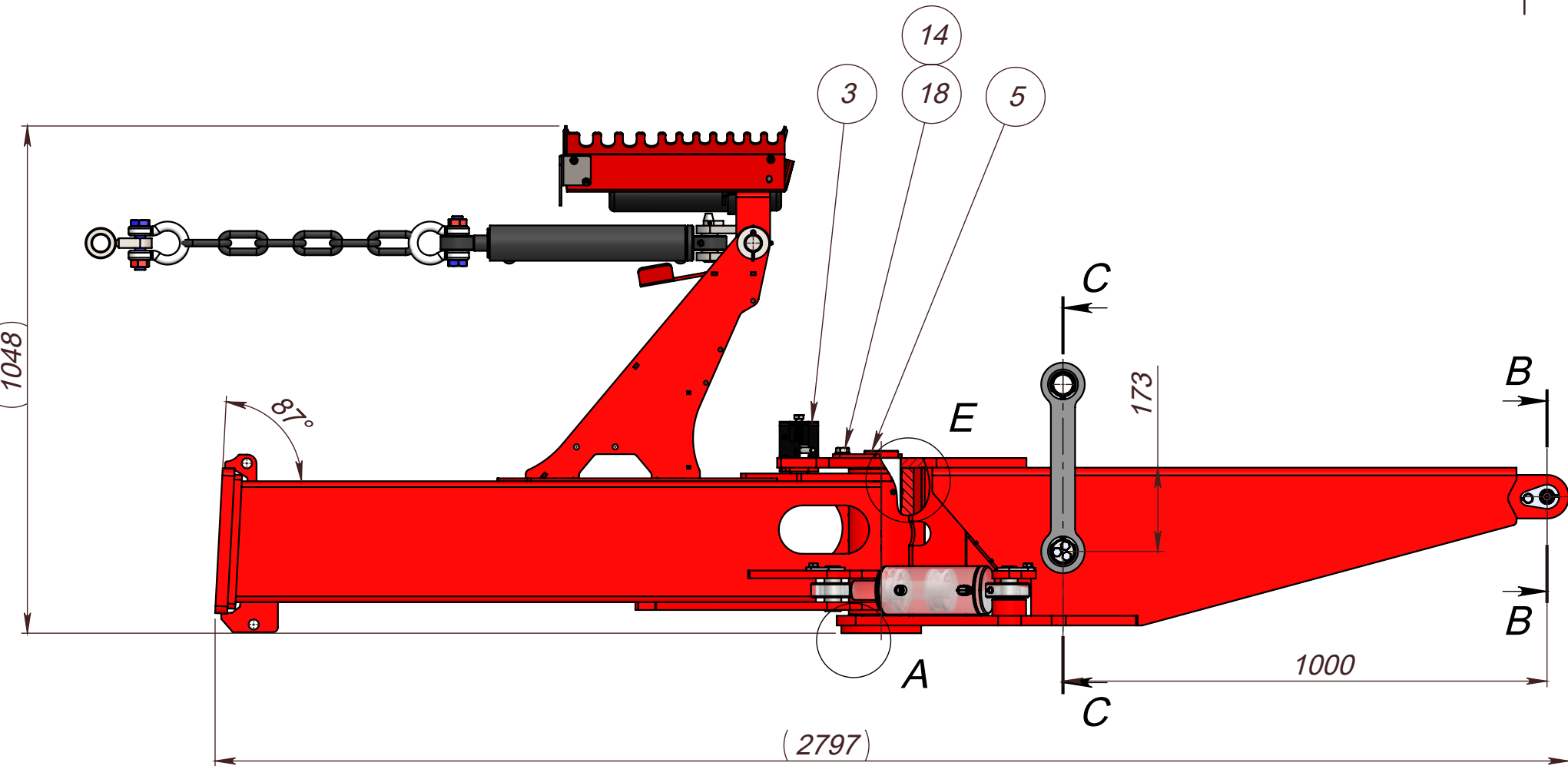
Lisa 16. Ristlõike pingete kalkulaator

Lisa 17. Ristlõike pingete kalkulaator

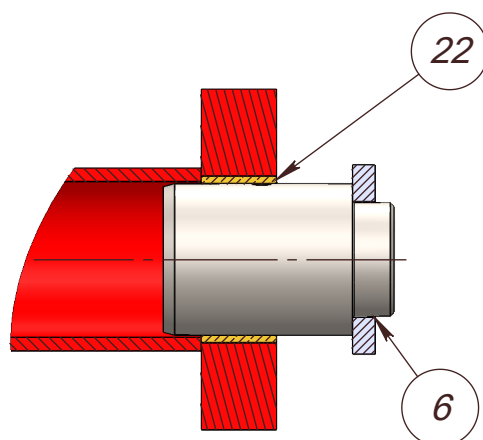


Lisa 1. Kraana

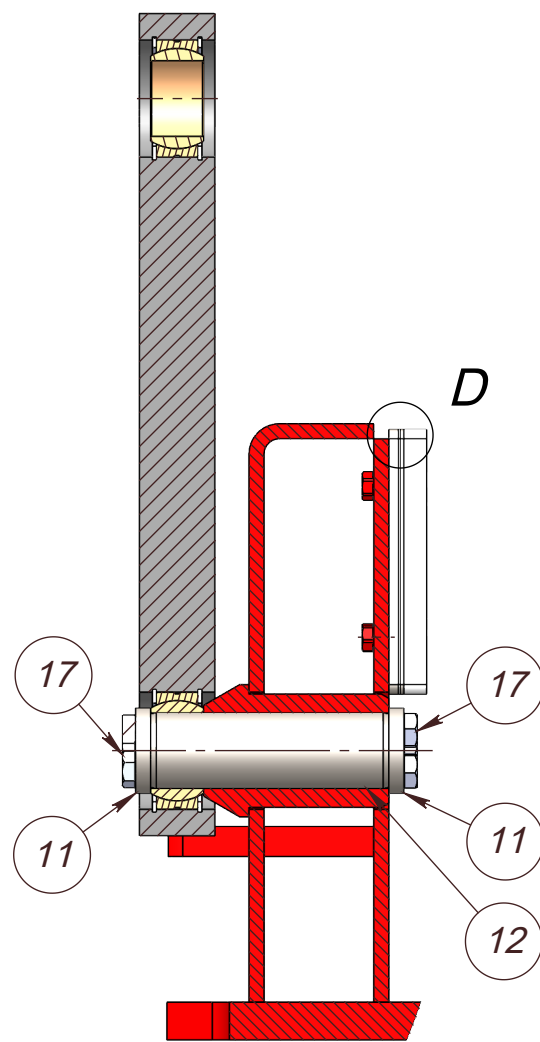
This document and its contents are the property of FORS MW Ltd. and must not be copied, reproduced or disclosed to any third party without prior written permission. Contravention will be prosecuted.



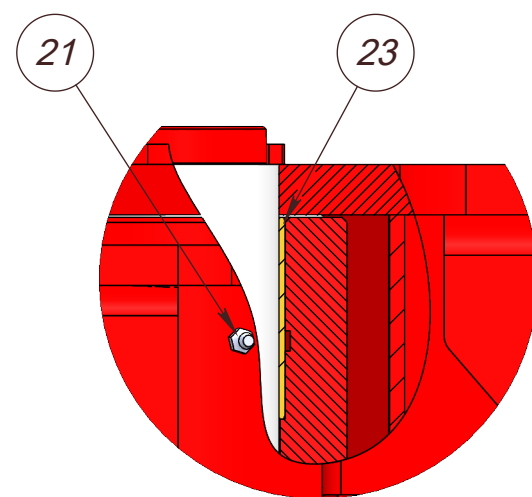
DETAIL A
SCALE 1 : 2



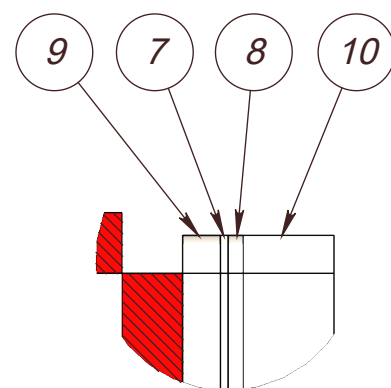
SECTION B-B
SCALE 1 : 2



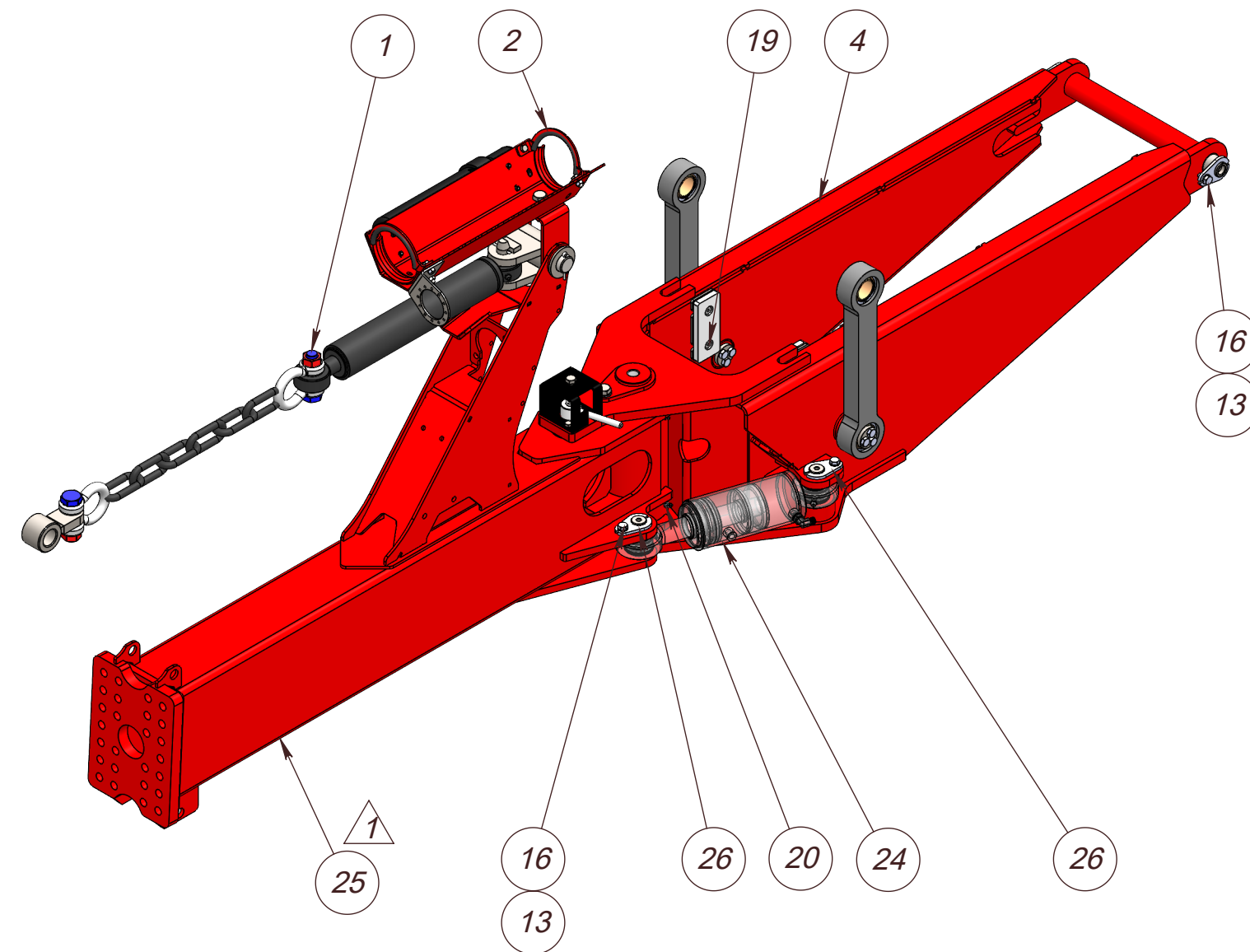
SECTION C-C
SCALE 1 : 4



DETAIL E
SCALE 1 : 3



DETAIL D
SCALE 1 : 1



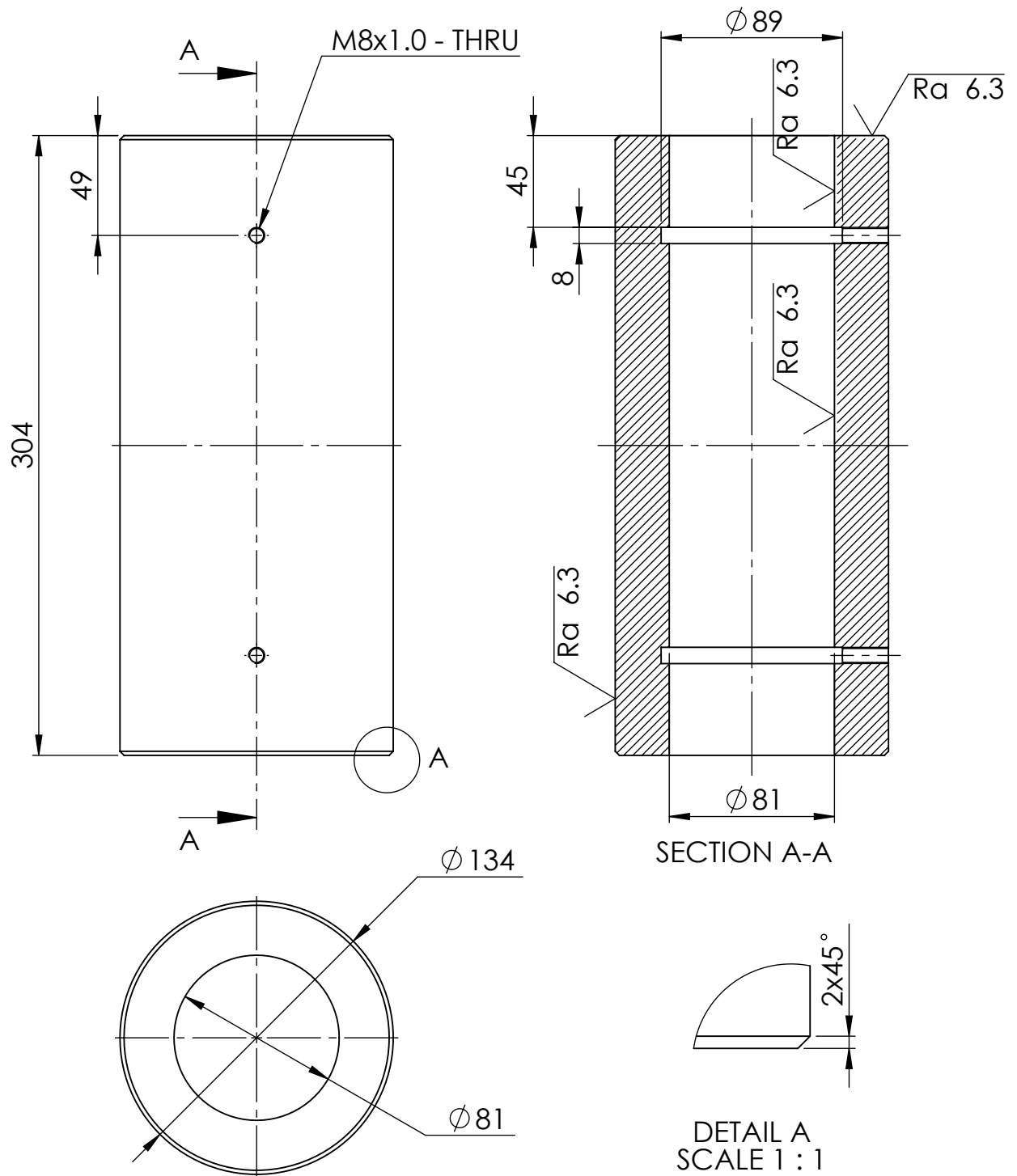
REVISIONS			
REV.	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
1	Revised FMWS21045	24/01/2024	W.Allik

Item No.	Part Number	Rev.	Description	Type	Material	Qty.
1	FMWA20301-07	6	Frame lock set	8-12 - 14-17		1
2	FMWA20487	5	Hose holder ASM		-	1
3	FMWA20723	0	Drawbar lock		-	1
4	FMWS21044	0	Steerable drawbar - rear part		-	1
5	FMWS20718-05	p1	FMWS20718-05		-	1
6	FMWS20687	0	Shaft			2
7	FMWP09060	p0	Plate	PLT 1.00 - 140.00x60.00	EN 10130 DC01-B-m	2
8	FMWP09060-01	p0	Plate	PLT 2.00 - 140.00x60.00	EN 10130 DC01-B-m	2
9	FMWP09060-02	p0	Plate	PLT 5.00 - 140.00x60.00	EN 10130 DC01-B-m	2
10	FMWP09059	p0	Plate	PLT 12.00 - 140.00x60.00	Plastic PA6	2
11	FMWP01042	2	Lock Washer	PLT 8 - 45x45	EN 10025-1 S355J2	4
12	FMWP09103-02	p0	Shaft	D40.00- 126.00	EN 10277-2 S355J2C+C	2
13	908225		Washer flat	M10 fzb DIN 125	8.8	6
14	908267		Washer flat	M16 fzb DIN 125		1
15	907554		Nut Lock/Round	M70x2 N DIN 1804		1
16	906170		Bolt Hex. Cap	M10x20 fzb DIN 933	8.8	6
17	906173		Bolt Hex. Cap	M10x25 fzb DIN 933	8.8	12
18	906222		Bolt Hex. Cap	M16x25 fzb DIN 933	8.8	1
19	906350		Hex. socket screw		8.8	4
20	930106-1		Lubricating nipple	1/8" DIN 71412 45deg		1
21	930106		Grease nipple	M8x1 DIN 71412		1
22	909143		Slide Bearing	40x44x20 M DIN1494	Brass	2
23	909167	0	Slide Bearing	80-85-80 M DIN 1494	Brass	2
24	313140	2	Hydraulic cylinder	90/40-100		2
25	FMWS21045	1	Steerable drawbar - front part		-	1
26	FMWS00427-06	2	Shaft	D35-93		4

PCS/SET		Type:	Surface area: m2	General tolerance symbols acc.ISO2768-m-f General tolerance symbols acc.ISO2768-m-K Welding tolerances EVS-EN ISO 13920 - B Quality level weld EVS-EN ISO 5817 - C Thermal cutting ISO 9013
Drw: W.Allik 02.10.2023		Material: -		
Chk: - -		Finish:		
App: - -		Steerable drawbar		- Primer only - No paint
Sheet: 1/1	Size: A2			Drawing number: FMWA20727
Scale: 1:12	Weight: kg 353.52			
				Rev. 1

This document and its contents are the property of FORS MW Ltd. and must not be copied, reproduced or disclosed to any third party without prior written permission. Contravention will be prosecuted.

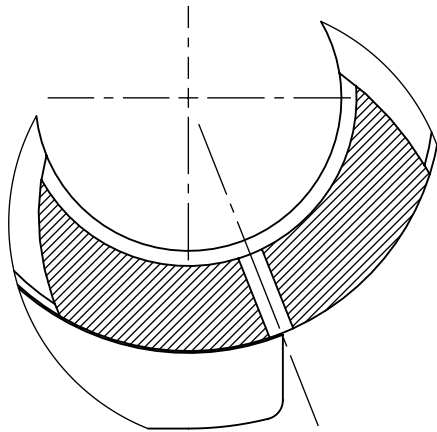
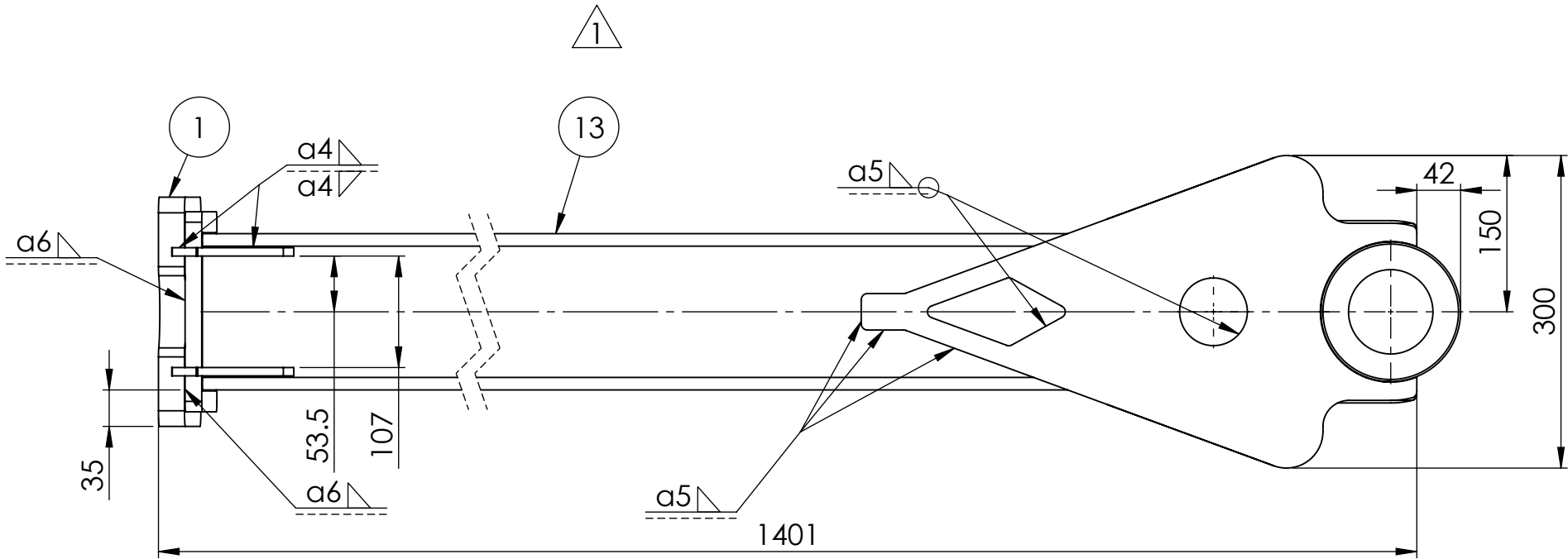
Revision	Description	Changed Date	Changed By	Approved Date	Approved By
0		10.10.23	W.Allik	10.10.23	W.Allik



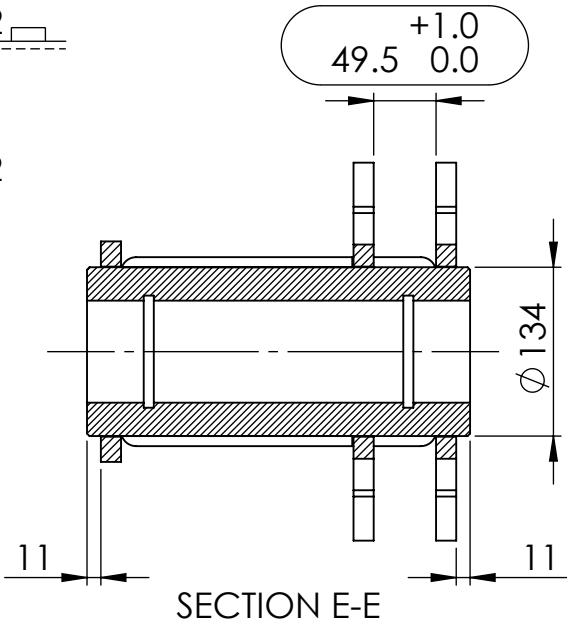
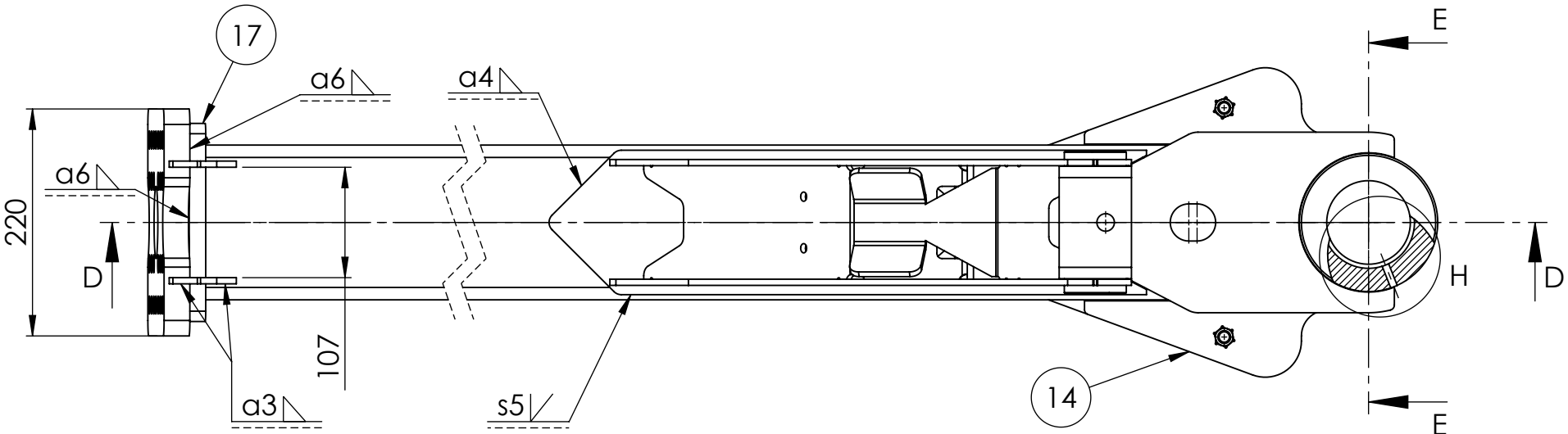
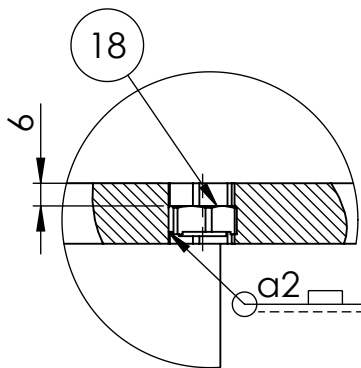
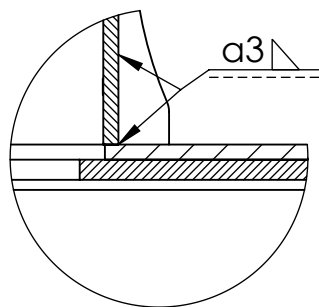
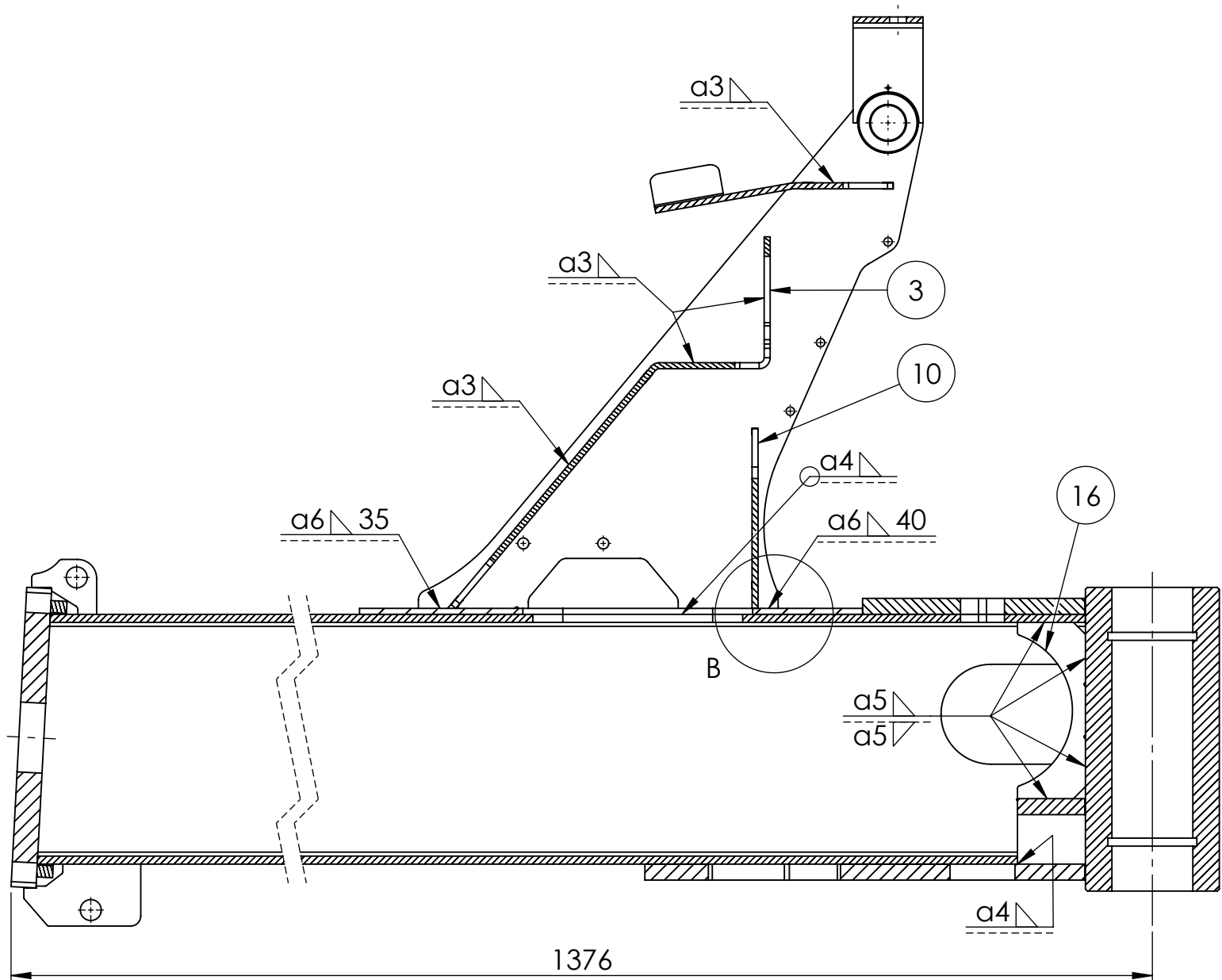
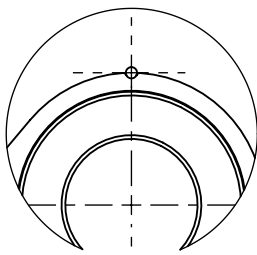
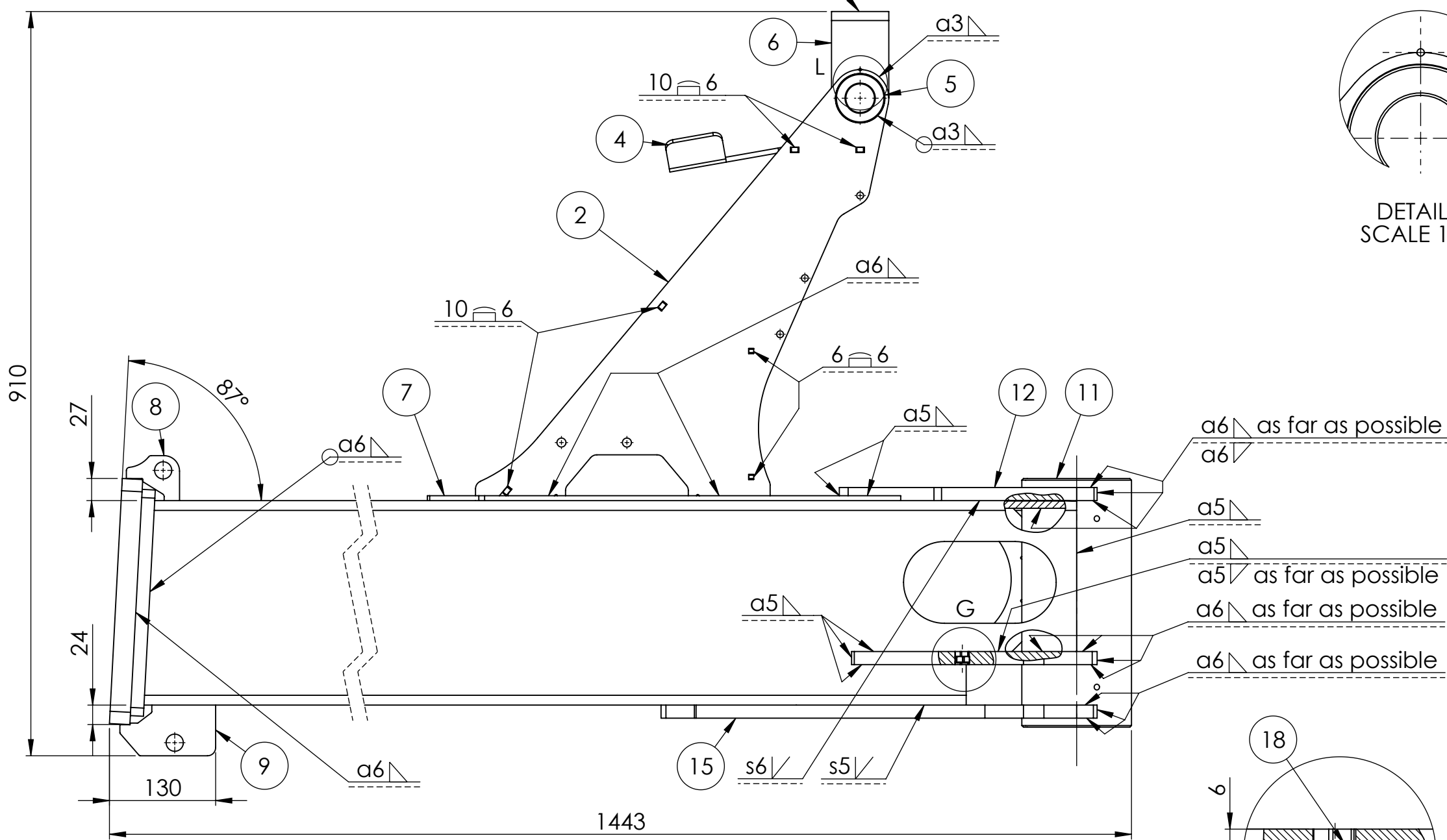
	Name / Date	Type:	RND D134-304	Surface area: m2	General tolerances ISO 2768-mK
Drw:	W.Allik 18.09.23	Material:	EN 10025-1 S355J2	227748.23	Welding tolerances EVS-EN ISO 13920 - B
App:		Finish:	-		Quality level weld EVS-EN ISO 5817 - C
					Thermal cutting ISO 9013
Sheet:	1/1	Size:	A4	Bushing	
Scale	Weight: kg	Metric:mm	FORS MW		Rev.
1:3	21.20		Drawing number: FMWP09371		0

As Welded FMWS21045

REVISIONS			
REV.	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
1	Revised FMWP09373 : FMWS21045-02 configurations removed	24/01/2024	W.Allik



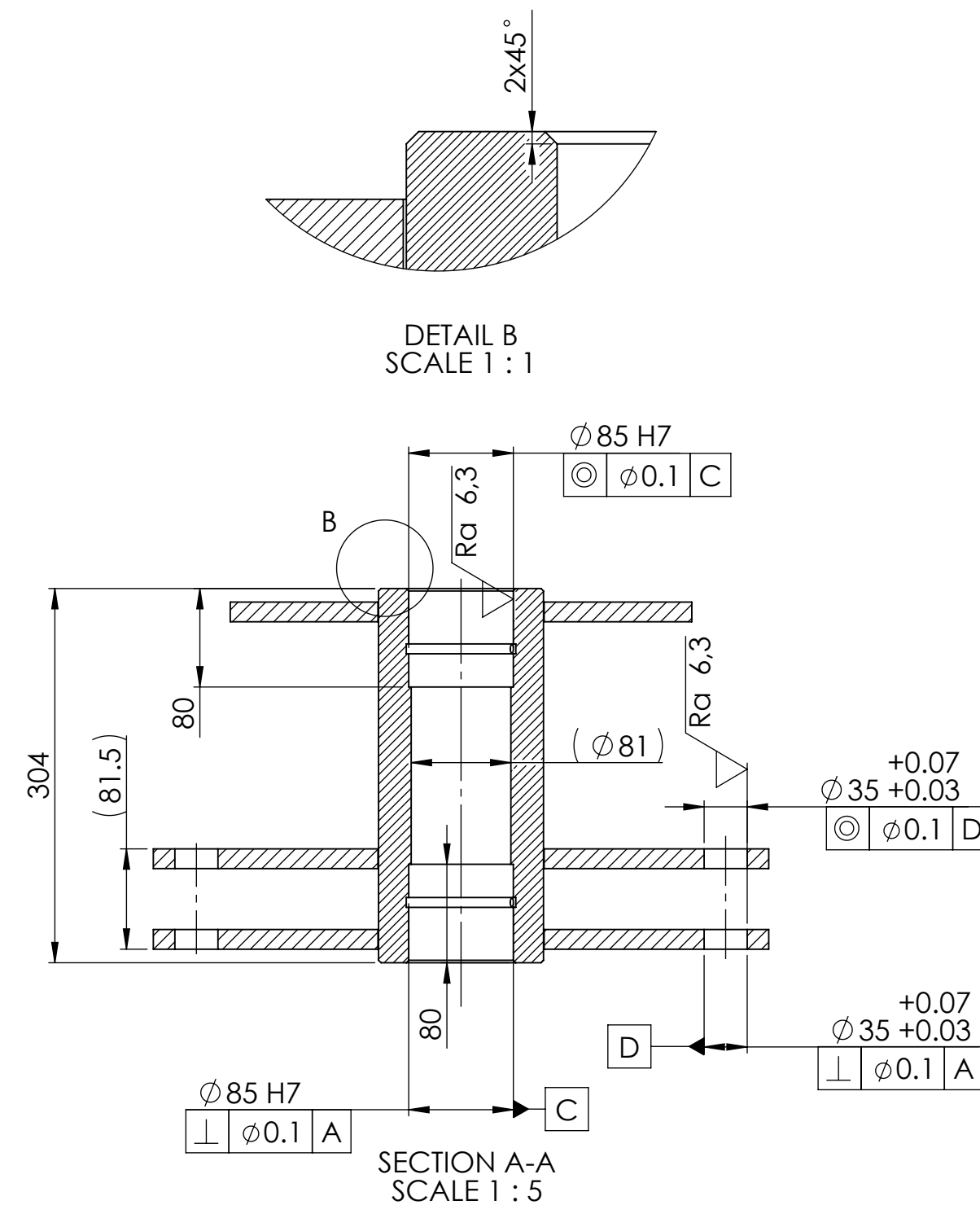
FMWP09107 , FMWP09108 and FMWP09355 to be welded after machining !!



Item No.	Part Number	Rev.	Description	Type	Material	Qty.	
1	FMWP07689	0	Plate	PLT25 - 300x220	EN 10025-1 S355J2	1	
2	FMWP09107	0	Plate	PLT6-710.56x276.68	EN 10025-1 S355MC	2	
3	FMWP09108	2	Plate	PLT6 - 549x118	EN 10025-1 S355MC	1	
4	FMWP09113	p0	Plate	PLT6 - 240x129	EN 10025-1 S355MC	1	
5	FMWP07516	p0	Bushing	HB63/36 -20	EN 10294-1 E355J2	2	
6	FMWP09112	p0	Plate	PLT6 - 299x70	EN 10025-1 S355MC	1	
7	FMWP09367	0	Plate	PLT6-578x140	EN 10025-1 S355MC	1	
8	FMWP09379	0	Plate	PLT6-65x55	EN 10025-1 S355MC	2	
9	FMWP09380	1	Plate	PLT8 - 117x62	EN 10025-1 S355MC	2	
10	FMWP09355	0	Plate	PLT6-180x117	EN 10025-1 S355MC	1	
11	FMWP09371	0	Bushing	D134-304	EN 10025-1 S355J2	1	
12	FMWP09372	0	Plate	PLT16-315x175	EN 10025-1 S355MC	1	
13	FMWP09373	2	Beam	HS250x150x8 - 1350	EN 10219-1 S355J2H	1	
14	FMWP09374	0	Plate	PLT16-300x300	EN 10025-1 S355MC	1	
15	FMWP09375	0	Plate	PLT16-532.86x300	EN 10025-1 S355MC	1	
16	FMWP09376	0	Plate	PLT12-177 x 68	EN 10025-1 S355MC	1	
17	FMWP09377	0	Plate	PLT16-277 x 192	EN 10025-1 S355MC	1	
18	912162	0	Nut Weld Hex.	M10 DIN 929	8.8	2	
Name / Date		Type:	Surface area: m2		General tolerances Welding tolerances EVS-EN ISO 13920 - B Quality level weld EVS-EN ISO 5817 - C Thermal cutting ISO 9013		
Drw: W.Allik 18.09.23		Material:					-
App:		Finish:					RAL-3020
			Steerable drawbar - front part			P - Primer only NP - No paint	
Sheet:	1/4	Size: A2	FORS MW			Drawing number: FMWS21045	
Scale	Weight: kg	Metric:mm					Rev.
1:6	126.78					1	

This document and its contents are the property of FORS MW Ltd. and must not be copied, reproduced or disclosed to any third party without prior written permission. Contravention will be prosecuted.

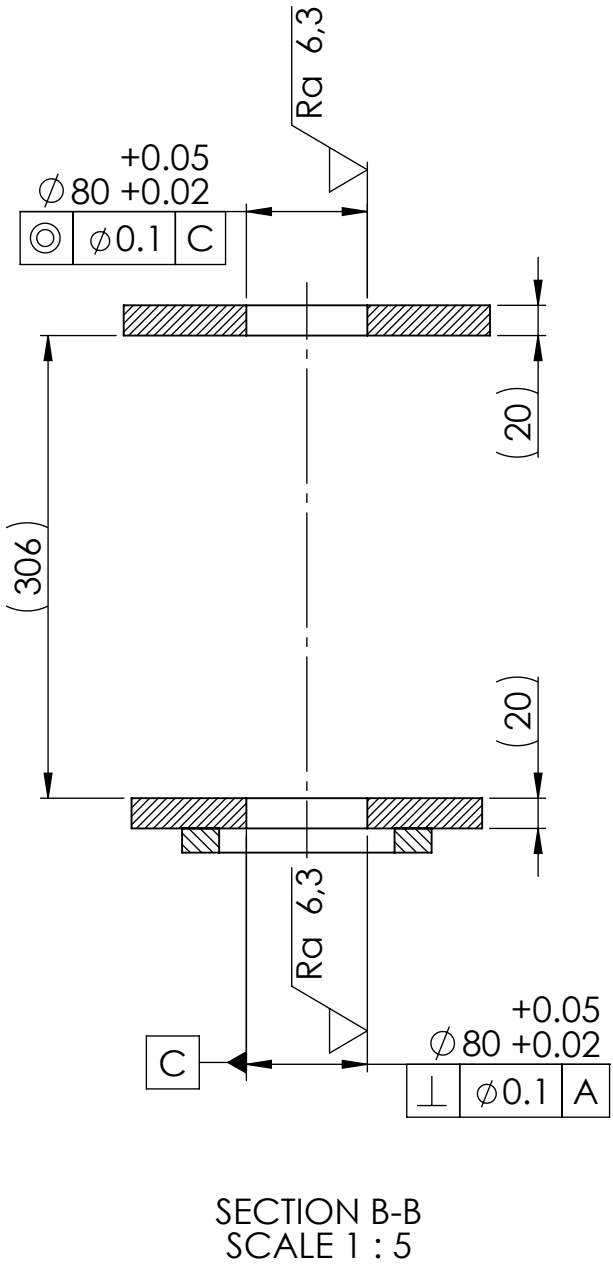
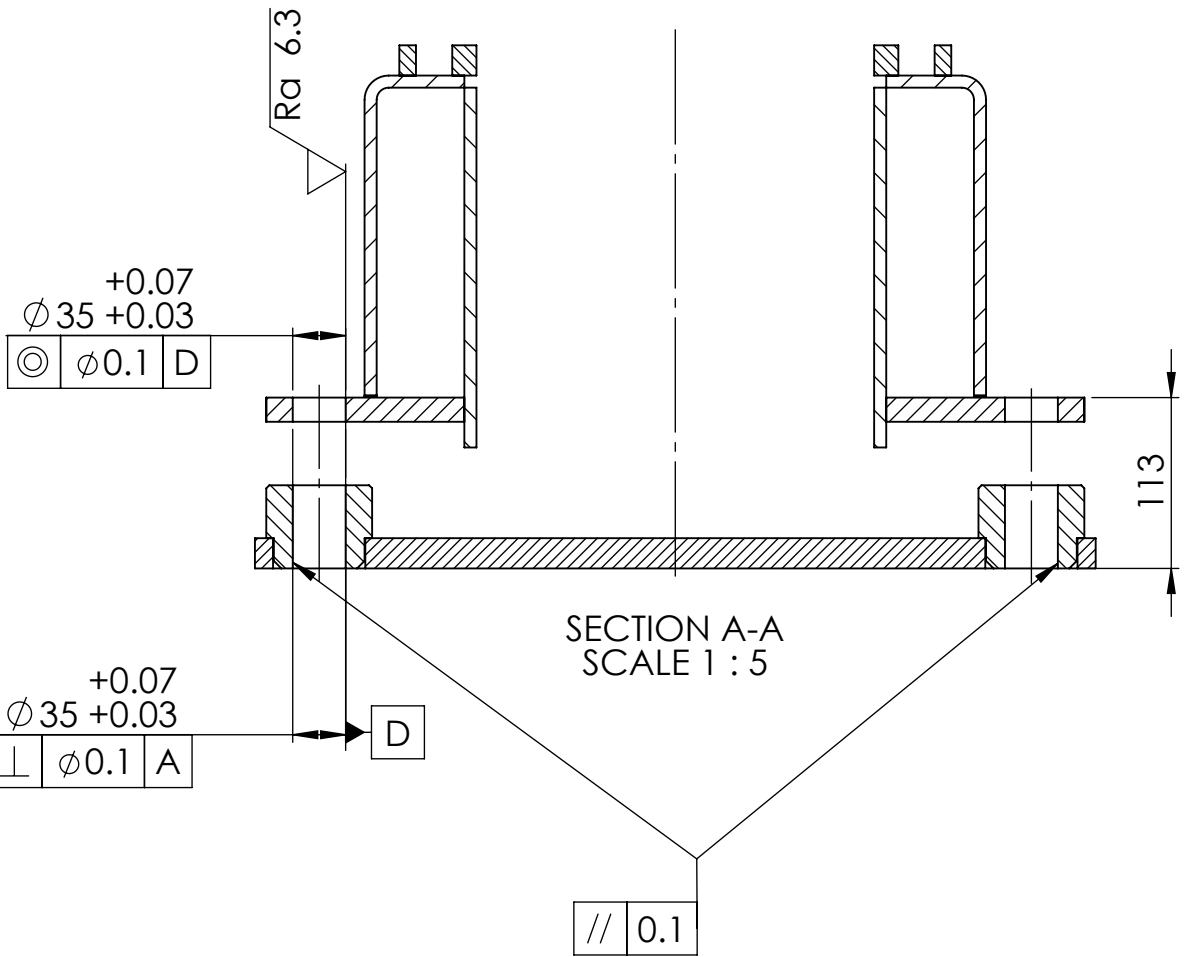
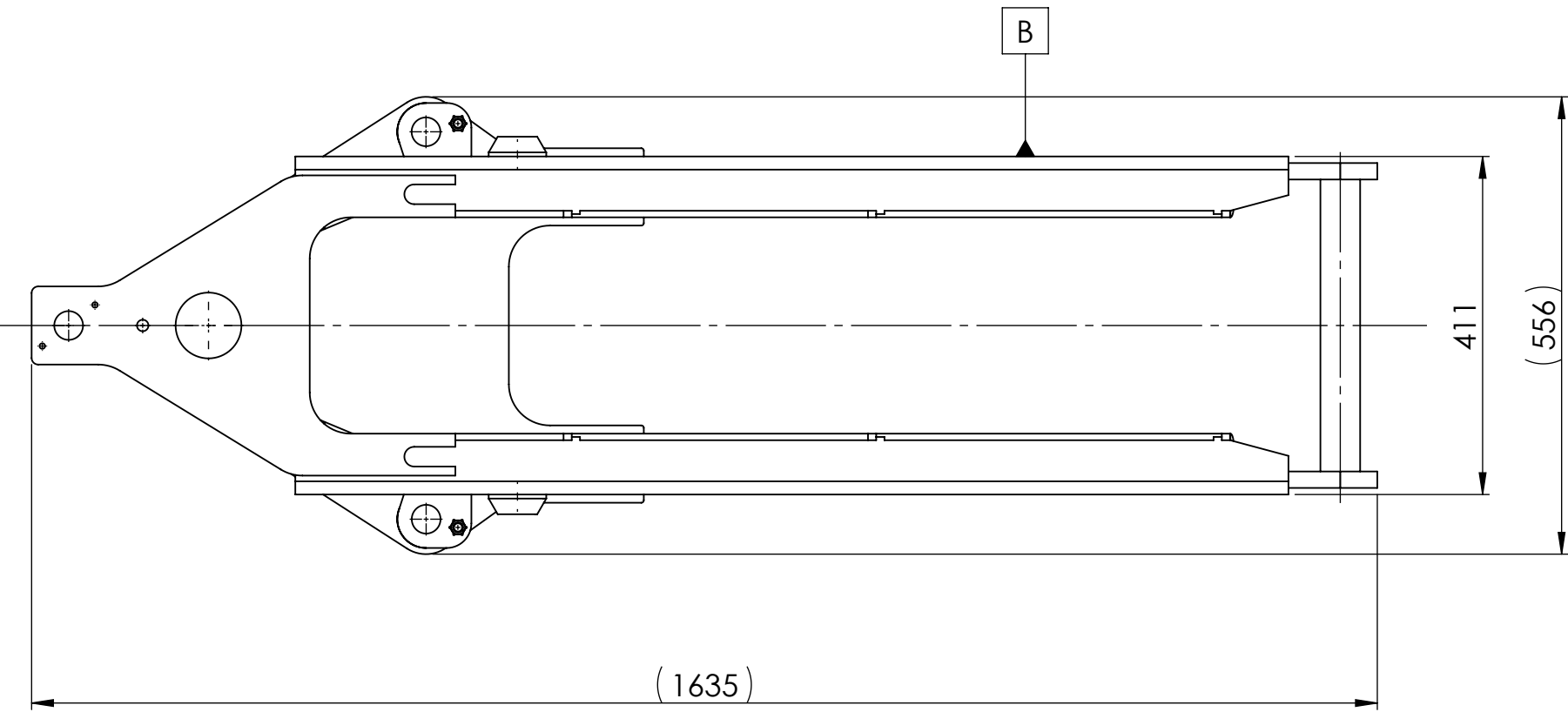
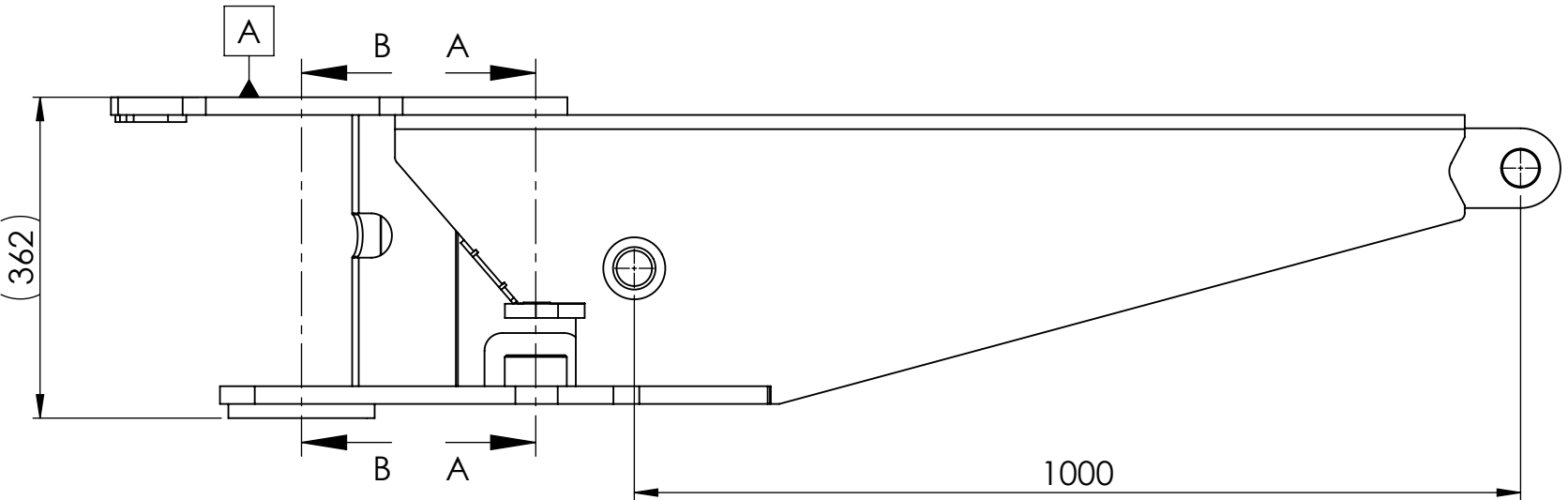
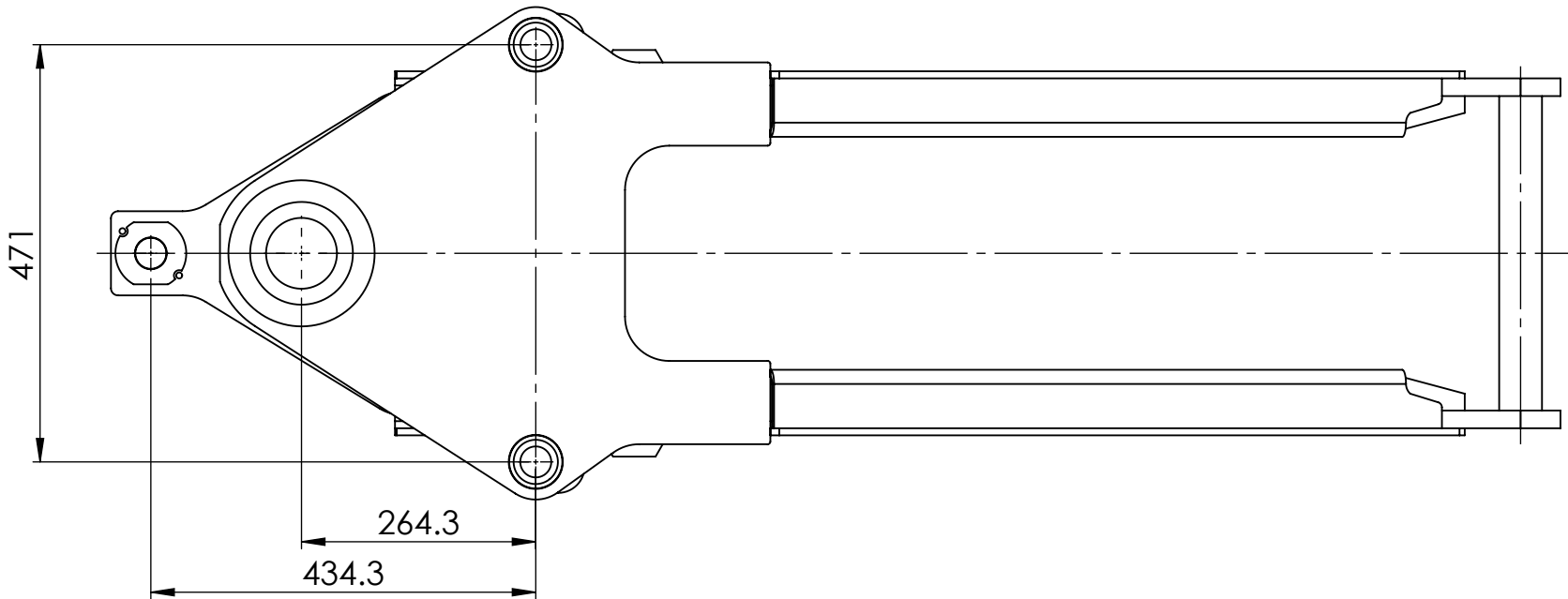
Name / Date			Type:		Surface area: m2	General tolerances Welding tolerances EVS-EN ISO 13920 - B Quality level weld EVS-EN ISO 5817 - C Thermal cutting ISO 9013	
Drw:	W.Allik 29.09.23		Material:	-			
App:			Finish:	RAL-3020			
			Steerable drawbar - front part				 - Primer only
Sheet:	2/4	Size: A2					 - No paint
Scale	Weight: kg	Metric:mm				Drawing number: FMWS21045	Rev. 1
1:5	125.70						



This document and its contents are the property of FORS MW Ltd. and must not be copied, reproduced or disclosed to any third party without prior written permission. Contravention will be prosecuted.

As machined

Revision	Description	Changed Date	Changed By	Approved Date	Approved By
0		25.09.23	W.Allik	25.09.23	W.Allik



Name / Date			Type:		Surface area: m2	General tolerances Welding tolerances EVS-EN ISO 13920 - B Quality level weld EVS-EN ISO 5817 - C Thermal cutting ISO 9013	
Drw:	W.Allik 18.09.23		Material:	-			
App:			Finish:	RAL - 3020			
			Steerable drawbar - rear part			 - Primer only  - No paint	
Sheet:	2/2	Size: A2					
Scale	Weight: kg	Metric:mm				Drawing number: FMWS21044	Rev. 0
1:8	141.06						

This document and its contents are the property of FORS MW Ltd. and must not be copied, reproduced or disclosed to any third party without prior written permission. Contravention will be prosecuted.

Revision	Description	Changed Date	Changed By	Approved Date	Approved By

FMWP09358

Technical drawing of a plate with dimensions and a 3D isometric view. The drawing includes a top view with dimensions (58.3), (Q 1123), (Q 362), and a 90° R 8 chamfer. A side view shows a height of 313 and a 90° angle. A detail view shows a thickness of 8. A 3D isometric view shows the plate's profile. The overall length is 1110. A note indicates 'SCALE 1 : 15'.

0

66-1

SCALE 1 : 15

✓

Lasercut

Missing dimensions can be obtained from DXF.

	Name / Date	Type:	PLT8-1123x362	Surface area: m ² 589095.39	General tolerances ISO 2768-mK Welding tolerances EVS-EN ISO 13920 - B Quality level weld EVS-EN ISO 5817 - C Thermal cutting ISO 9013
Drw:	W.Allik 18.09.23	Material:	EN 10025-1 S355MC		
App:		Finish:	-		

	Plate		P - Primer only NP - No paint		
Sheet:	1/2	Size: A4			
Scale	Weight: kg	Metric:mm		Drawing number: FMWP09358	Rev. 0
1:10	17.64				

This document and its contents are the property of FORS MW Ltd. and must not be copied, reproduced or disclosed to any third party without prior written permission. Contravention will be prosecuted.

Revision	Description	Changed Date	Changed By	Approved Date	Approved By

FMWP09358-01

UP 90° R 8

(Q 1123)

(Q 362)

313

1110

(8)

90°

0 66-1

SCALE 1 : 15

Lasercut

Missing dimensions can be obtained from DXF.

	Name / Date	Type:	PLT8-1123x362	Surface area: m ² 589095.39	General tolerances ISO 2768-mK Welding tolerances EVS-EN ISO 13920 - B Quality level weld EVS-EN ISO 5817 - C Thermal cutting ISO 9013
Drw:	W.Allik 18.09.23	Material:	EN 10025-1 S355MC		
App:		Finish:	-		

	Plate		- Primer only - No paint		
Sheet:	2/2	Size: A4			
Scale	Weight: kg	Metric:mm		Drawing number: FMWP09358	Rev. 0
1:10	17.64				

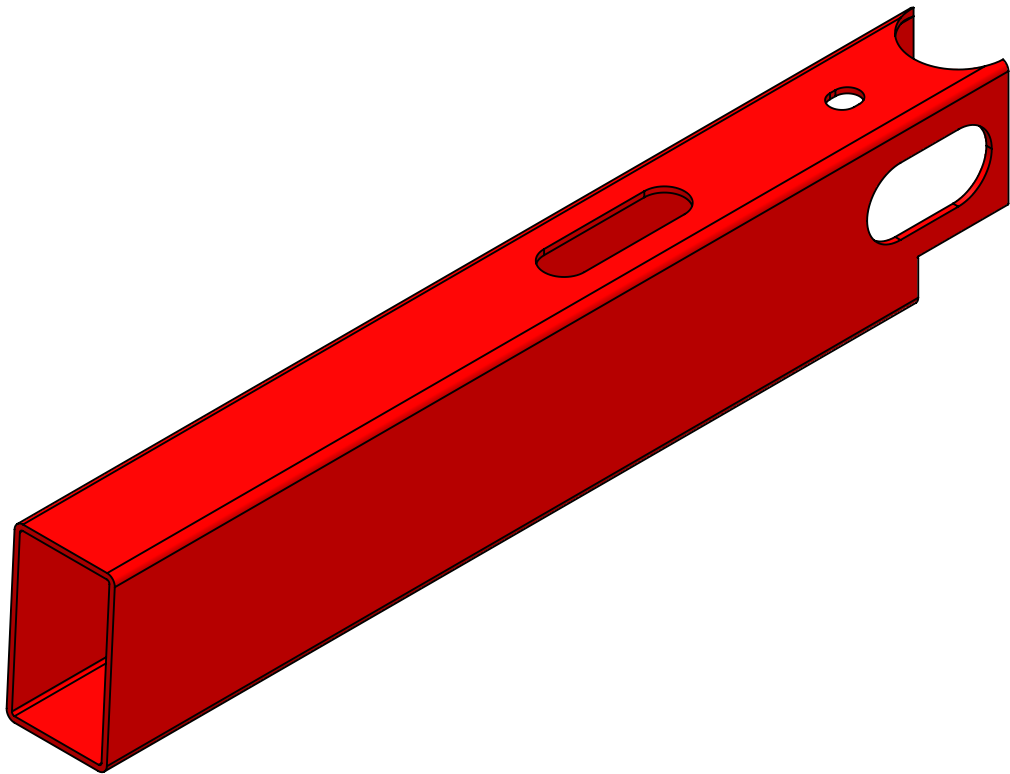
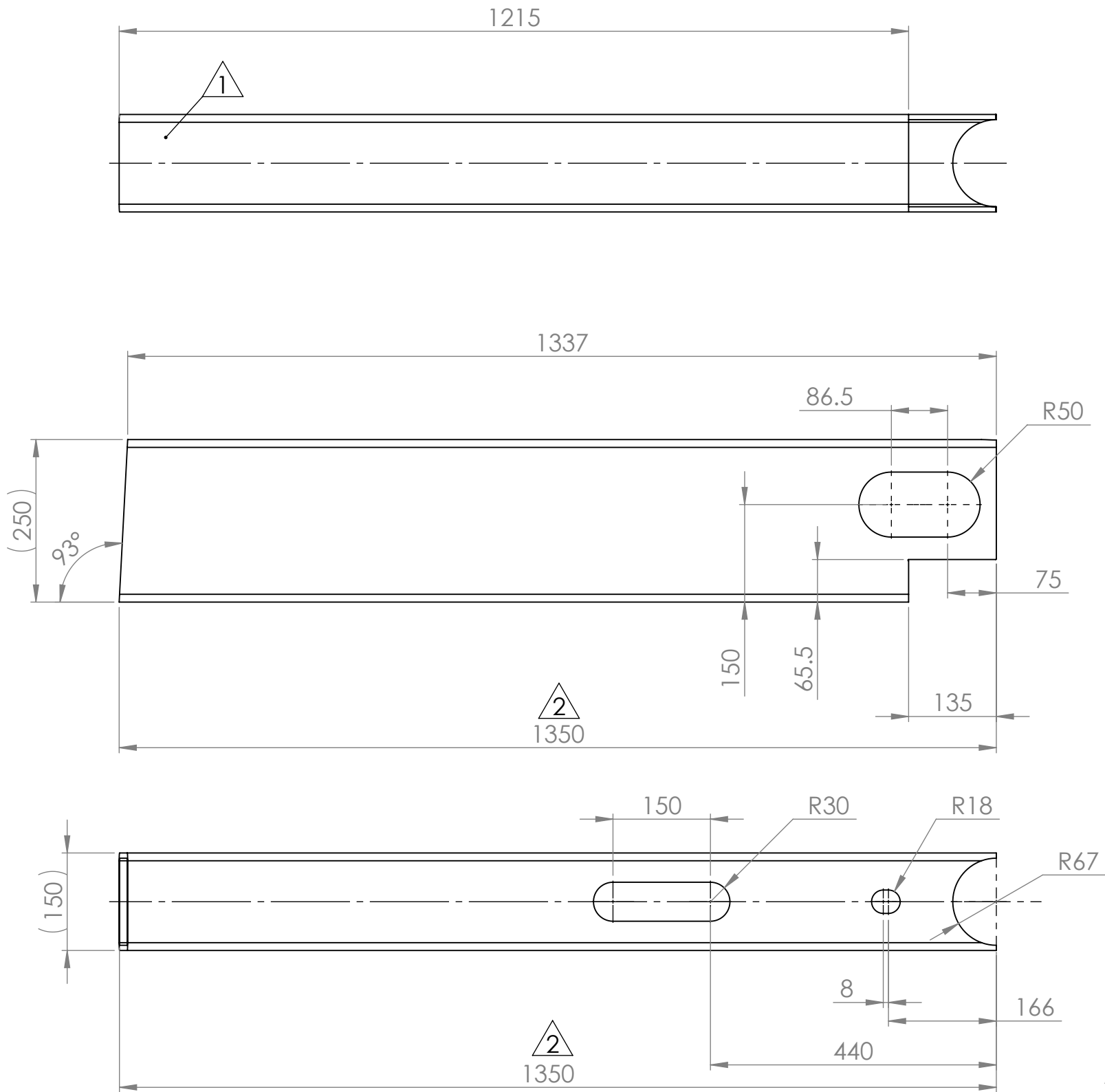
C:\PDM_Vault\CAD Data\2-FMWP\P-9\P-9300\

Printed: 29/09/2023

This document and its contents are the property of FORS MW Ltd. and must not be copied, reproduced or disclosed to any third party without prior written permission. Contravention will be prosecuted.

FMWP09373

REVISIONS			
REV.	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
1	Slots for tabs removed	30/10/2023	W.Allik
2	Added +150mm to length ; -01 configuration removed	24/01/2024	W.Allik



Missing dimensions can be obtained from SAT.

Name / Date		Type:	HS250x150x8 - 1350	Surface area: m ² 1878147.89	General tolerances ISO 2768-mK Welding tolerances EVS-EN ISO 13920 - B Quality level weld EVS-EN ISO 5817 - C Thermal cutting ISO 9013	
Drw:	W.Allik 18.09.23	Material:	EN 10219-1 S355J2H			
App:		Finish:	-			
			Beam			 - Primer only  - No paint
Sheet:	1/1	Size: A3				
Scale 1:8	Weight: kg 58.10	Metric:mm 			Drawing number: FMWP09373	Rev. 2

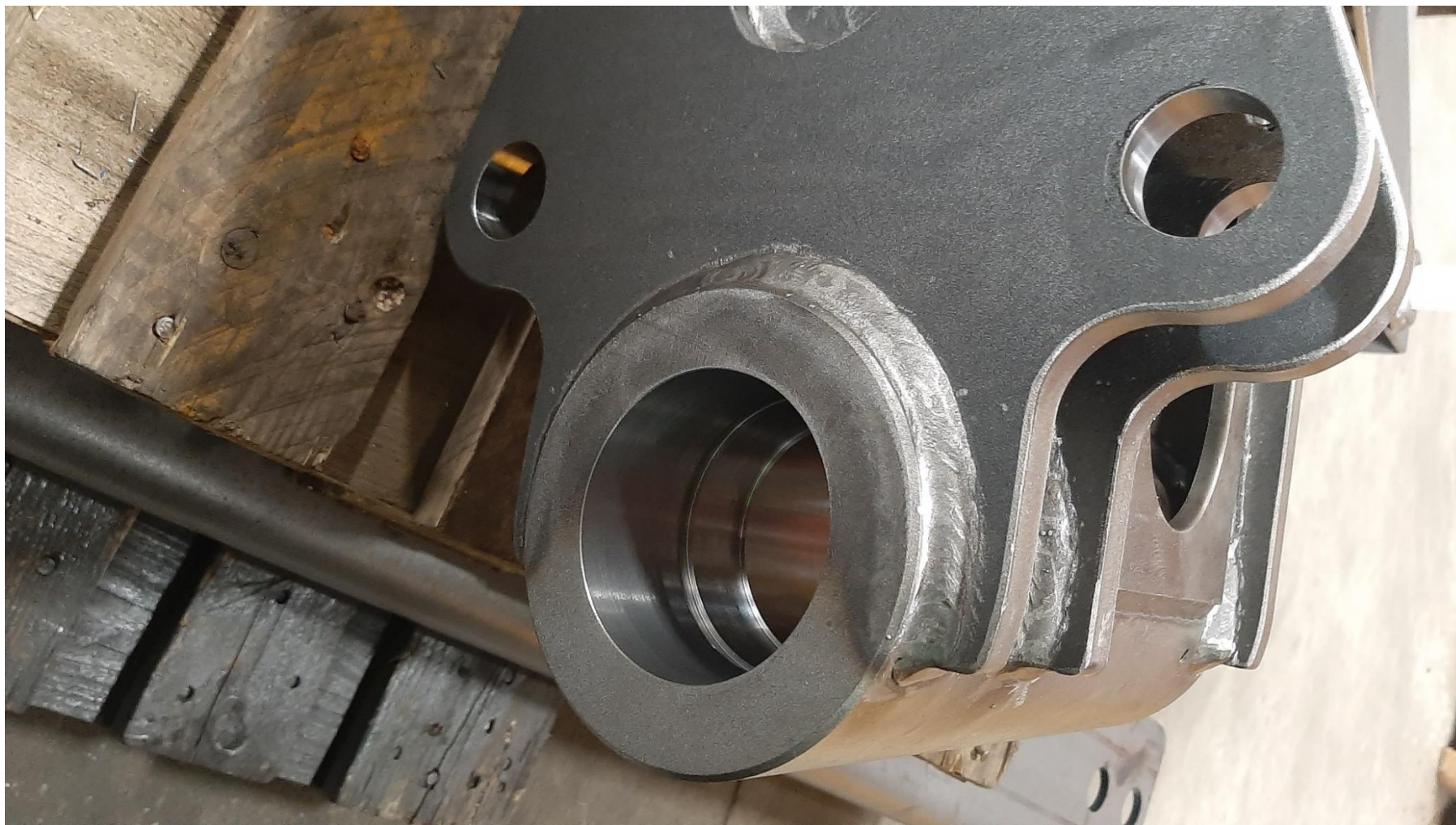
PlasmaCut



Lisa 10. Tagumise osa koostamine keevituslaual. Tarvis läheb ainult elementaarseid tööriistu.



Lisa 11. Esiosa keevisõmblused



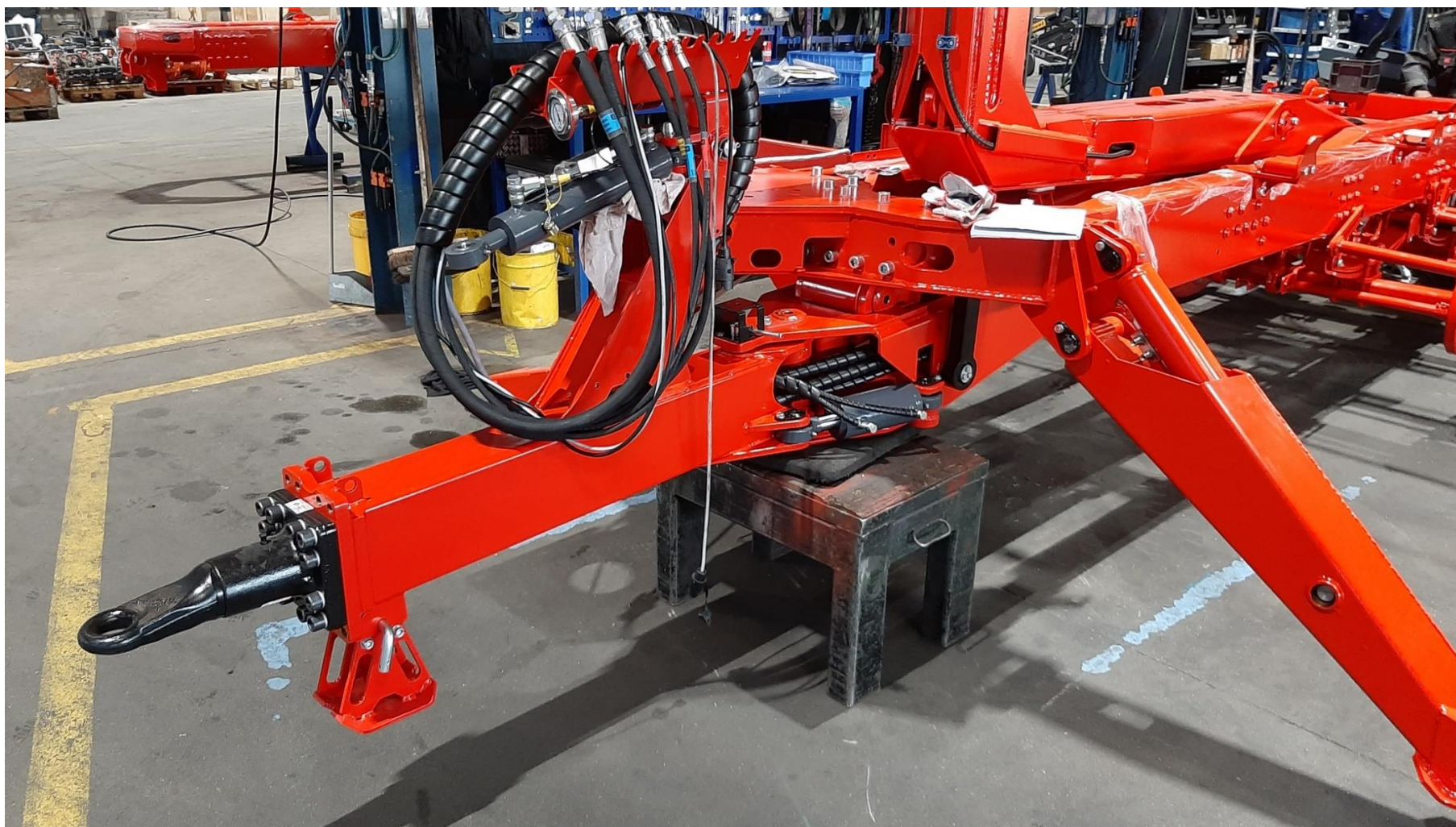
Lisa 12. Haaveldatud pind



Lisa 13. Lühendatud esiosaga veetiisel



Lisa 14. Hüdrovoolikute paigaldamine



Lisa 15. Montaaž

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
					DRAWBAR CALCULATOR											
3															by W.Allik	
4																
5					Version 1.2.1			TÜHJENDA KÕIK LAHTRID				Last update 18.07.2023				
6																
7																
8					1) Arvutuste lähteandmed ja legend											
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19					2) Arvutused											
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
30																
31																
32																

Nimetus : Extended steerable B12 drawbar

Traktori mass: 32 t

Max. kandevõime: 12 t

Haagise täismass: 16.5 t

Max. koormus veoasale: 2500 kg

Tühjenda

LEGEND :

- Andmed puudulikud
- Ise peab täitma
- Arvutatud vastus
- Informatiivne lahter

2.1 Dc value

D_c= 95.54 kN

S= 2500 kg

T= 32 t

C= 14 t

g= 9.81 m/s²

$$D_c = \frac{(T \times C)}{(T + C)} \times g \text{ (kN) [UN reg. No. 147 2.10.1]}$$

C= mass , mis mõjub maapinnale läbi haagise sildade ehk haagise täismass lahutada max. koormus veoasale

KLASSIKALINE DRAWBAR

TOETUSPUNKTIGA DRAWBAR

TULEMUSED KOPEERIMISEKS

(TEST)Mõõtmistulemuste ...

Lisa 16. Ristlõike pingete kalkulaator

3) Ristlõigetes tekkivad pinged

$F_s = 35.41 \text{ kN}$

NB: Ristlõike kaugus määrata veoasa tsentrist.

NÄIDIS ARVUTUS :

$$P_l = \frac{F_s \times l_l}{W_{x_l}} = \frac{54,8 \times 10^3 \times 300}{22726161:89} = 64 \text{ N/mm}^2 = 64 \text{ MPa} \leq 90 \text{ MPa}$$

Ristlõike kaugus(mm)
Inertsimoment
Suurim vahemaa neutraalpunkti(tsentroid) ja ristlõike pinna vahel. Määrata loogiliselt mööda X või Y või Z telge.

3.1	$P_1 = 78.1 \text{ N/mm}^2 = 78.1 \text{ MPa}$
Ristlõike kaugus	2083 mm
Inertsimoment	176,692,396.00 mm ⁴
Tsentroidi kaugus	187 mm

Tühjenda

3.2	$P_2 = 25.3 \text{ N/mm}^2 = 25.3 \text{ MPa}$
Ristlõike kaugus	382 mm
Inertsimoment	100375269 mm ⁴
Tsentroidi kaugus	188 mm

Tühjenda

3.3	$P_3 = 41.8 \text{ N/mm}^2 = 41.8 \text{ MPa}$
Ristlõike kaugus	482 mm
Inertsimoment	50987660 mm ⁴
Tsentroidi kaugus	125 mm

Tühjenda

3.4	$P_4 = 50.5 \text{ N/mm}^2 = 50.5 \text{ MPa}$
-----	--

KLASSIKALINE DRAWBAR

TOETUSPUNKTIGA DRAWBAR

TULEMUSED KOPEERIMISEKS

(TEST)Mõõtmistulemuste ...

