

Rasmus Merivee

2022 BAJA SAE BAGI TORURAAM

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Autotehnika õppekava

Juhendaja: lektor Raiko Annask

Tallinn 2022

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina, Rasmus Merivee, tõendan, et lõputöö on minu. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Raiko Annask.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Rasmus Merivee, sünnikuupäev: 14.06.1998, annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose 2022 Baja SAE bagi toruraam:

1. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
2. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

SISUKORD

SISUKORD.....	3
SISSEJUHATUS.....	5
1. TORURAAMI ÜLDNÕUDED.....	6
1.1. Toruraami ülesehitus	6
1.1.1. Toruraami torude nõuded.....	6
1.1.2. Turvapuuri torud.....	8
1.1.3. Lisa toetus torud.....	9
1.1.4. Ristiühendustoru	10
1.1.5. Peakaar	10
1.1.6. Diagonaaltoru	11
1.1.7. Peakaare pikiühendus toru	11
1.1.8. Toruraami alumised külgkaitse torud	12
1.1.9. Toruraami ülemised külgkaitse torud	13
1.1.10. Istmealune toetustoru	13
1.1.11. Eesmised turvapuuri torud	14
1.1.12. Turvapuuri tugevdustorud.....	14
1.1.13. Esi ja taga tugevdustorud	14
2. TORURAAMI MATERJAL.....	16
3. TORURAAMI VALMISTAMISTEHNOLLOOGIA	17
3.1. Torupainutus meetodid.....	17
3.1.1. Torupainutus press.....	17
3.1.2. Pöördvormiga painutamine	18
3.1.3. Survepainutamine	19
3.1.4. Rullpainutus	19
3.2. Toru keevitusmeetodid	20
3.2.1. Elektroodkeevitus	21
3.2.2. MIG/MAG-keevitus.....	21

3.2.3.	TIG-keevitus.....	22
3.2.4.	Kuumpragu.....	23
3.2.5.	Külmpragu.....	23
3.3.	Torude lõikamise meetodid	23
3.3.1.	Ketaslõikuriga lõikamine	24
3.3.2.	Laserlõikus	24
4.	TORURAAMI MUDELDAmine.....	26
4.1.	Toruraami tugevusanalüüs	27
5.	TORURAAMI PARENDUSED	29
	KOKKUVÕTE.....	30
	SUMMARY	31
	VIIDATUD ALLIKAD	32
	LISAD.....	33

SISSEJUHATUS

Autori poolt valitud lõputöö teemaks on 2022 aasta Baja SAE bagi toruraami mudeldamine. Eesmärgiks on valmis teha toruraamist CAD mudel, mis vastaks täielikult Baja SAE sätestatud nõuetele ning mida on võimalik jagada kutse- ja/või kõrgkoolidega võistlussarja loomiseks. Toruraami mudeldamisel on esmatähtis tagada sõitja maksimaalne ohutus õnnetusjuhtumi korral. Lisaks on lõputöö eesmärk varasemalt autori õppetöö käigus valminud toruraami prototüübi põhjal uue toruraami parendamine ja toruraamide erinevuste väljatoomine.

Baja SAE kutsub inseneritüdengeid välja töötama ja ehitama maastikusõidukit, mis võimaldab ebatasasel ja raskendatud teeoludel sõitmist. Iga meeskonna eesmärk on kavandada ja ehitada iga ilmaga vastupidav ja üheistmelise maastikusõiduki prototüübi.

Lõputöös kasutatakse peamise meetodina autori poolt valitud Dassault Systèmes-i tudengi litsentsiga tarkvara nimetusega 3DEXPERIENCE, mis pakub võimalusi mudeldamiseks ja tugevusanalüüside teostamiseks.

Autori poolt teostatud lõputöö on ülesehitatud teoreetilisest poolest ja praktilisest poolest. Teoreetisel poolel kirjeldab autor Baja SAE poolt sätestatud toruraami reegleid, kirjeldab toruraami projekteerimise aluseid, materjali valikut ja valmistamistehnoloogiat. Praktilisel poolel kirjeldatakse toruraami analüüsi ja mudeldamist, sealhulgas tugevusanalüüside teostamist ja selle saadust ning parendusettepanekute väljatöötamine varasemalt valminud toruraami põhjal.

1. TORURAAMI ÜLDNÕUDED

Toruraami eesmärk on hoida juhti ümbritsev ruum minimaalsena ja turvapuud peab olema mudeldatud ning valmistatud nii, et tavakasutuse või õnnetusjuhtumi korral peab toruraam hoidma oma terviklikkust. Toruraam peab mahutama igas suuruses juhte alates 95% meestest ja kuni 5% naistest. Mahutavuse nõue kehtib korraldatava võistlusriigi kohta. Kõik juhid peavad mahtuma toruraami minimaalsesse liikumisruumi ja istuma mugavas sõiduasendis, kandes kogu nõutavat turvavarustust. Kõik juhid peavad mugavalt ulatuma kõikidele sõiduki juhtseadistele [1, p. 25].

1.1. Toruraami ülesehitus

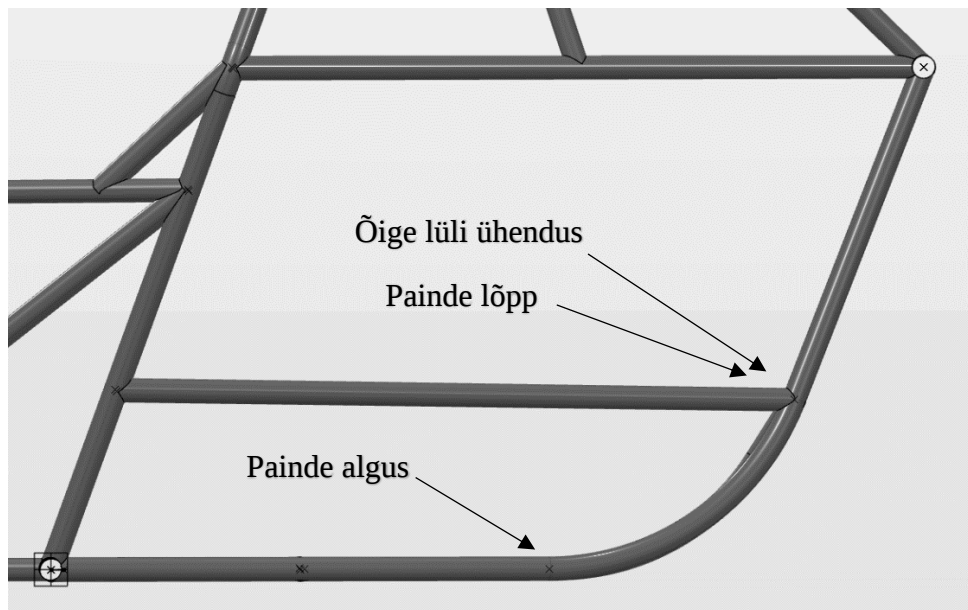
Toruraam peab olema valmistatud terastorust. Järgnev osa määratleb toruraami füüsilised ja ühendusnõuded. Toruraami detailid peavad olema täielikult keevitatud ja keeviseid ei tohi lihvida ega modifitseerida nii, et need segaksid keeviste kontrolli. Toruraamil ei tohi olla avatud teravaid servi, mis võivad mis tahes asendis ohustada juhti ja teisi inimesi [1, pp. 25-26].

Toruraami painutatud detailidel ei tohi esineda vigastusi ega teisi deformatsioone ristlõikes. Allpool loetelus on välja toodud Toruraami terminoloogia [1, p. 27]:

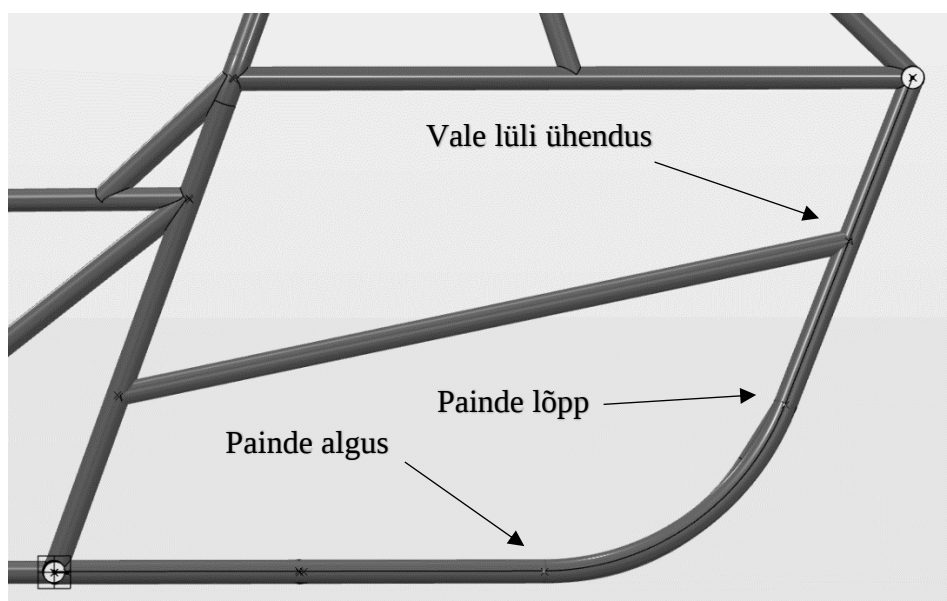
- Raam: kogu terastoru kujuline konstruktsioon
- Turvapuud: koost primaar- ja sekundaartorud mida kasutatakse juhi kaitsmiseks
- Lülid: primaarne või sekundaarne nõutav detail, mis algab ja lõpeb ristumiskohas
- Ristumiskoht: kahe või enama liituva toru kesk joonte ristumiskoht

1.1.1. Toruraami torude nõuded

Toruraami lülid peavad olema valmistatud terastorust ning võivad olla sirged või painutatud. Sirged torud ei tohi olla pikemad, kui 1016. Painutatud torude nurk ei tohi olla suurem kui 30°. Väikseid painderaadiusi, milleks on mitte suurem kui 152 mm, mis lõpevad ristumiskohas, ei loeta toru paindeks, olenemata nurgast. Ristumiskohaga lõppev painutus tähendab, et punkt asub painde puutumispunktides või nende vahel (vt Sele 1 ja Sele 2). Nõutud mõõtmised turvapuuri lülide vahel on määratletud detailide kesk joonte vaheliste mõõtmistega [1, p. 25].



Sele 1. Õige turvapuuri lülide ristumispunkt



Sele 2. Vale turvapuuri lülide ristumispunkt

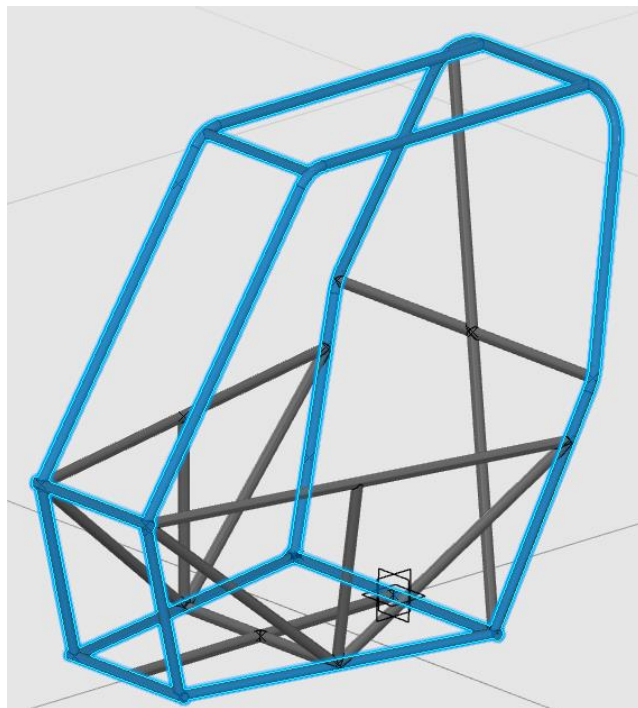
Lõigatud ühenduspunkt, mis on suurem kui 5°, loetakse, kui paine ja ühenduspunkt, mis on väiksem kui 5°, loetakse, kui torude ühenduspunkt. Konstruktsioon, mis on koostatud mitmest torust, näiteks külgkokkupõrke torud ja turvakaare alumised ristiühendustorud, arvestatakse, kui tervik detail ristumiskohast ristumiskohani [1, p. 25].

1.1.2. Turvapuuri torud

Turvapuuri nõutavad torud on kujutatud allpool toodud pildil (vt Sele 3Sele 3).

Primaarseteks terastorudeks nimetatakse [1, p. 26]:

- Peakaar (RRH, Rear Roll Hoop)
- Turvakaare pikiühendustorud (RHO, Rool Hoop Overhead Members)
- Eesmised turvakaare torud (FBM, Front Bracing Members)
- Ristiühendusltoru (ALC, Aft Lateral Cross Member)
- Ülepearistiühendustoru (BLC, Overhead Lateral Cross Member)
- Ülemine ristiühendustoru (CLC, Upper Lateral Cross Member)
- Külgmine ristiühendustoru (DLC, SIM Lateral Cross Member)
- Eesmine ristiühendustoru (FLC, Front Lateral Cross Member)
- Alumine ristiühendustoru (LFS, Lower Frame Side Members)

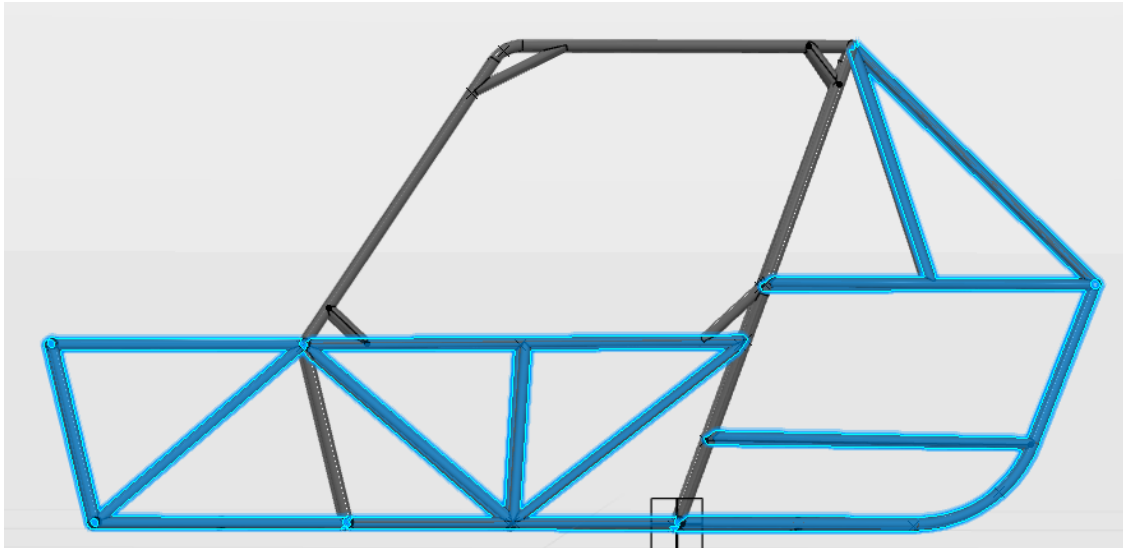


Sele 3. Turvapuuri primaarsed torud (kujutatud siniselt)

Sekundaarsed torud peavad olema ümarad või neljakandilised terastorud, minimaalse seinapaksusega 0.89 mm ja minimaalse välise diameetriga 25.4 mm. Autor on võtnud kasutusele mudeldamisel terastoru [1, p. 27].

Sekundaar torud on (vt. Sele 4): [1, p. 27]:

- Külgkokkupõrke torud (SIM, Side Impact Members)
- Esi- ja taga kokkupõrke torud (FAB, Fore/Aft Bracing Members)
- Istmealune toru (ALC, Rear Lateral Cross Member)
- Tagumine ristitoru (RLC, Rear Lateral Cross Member)



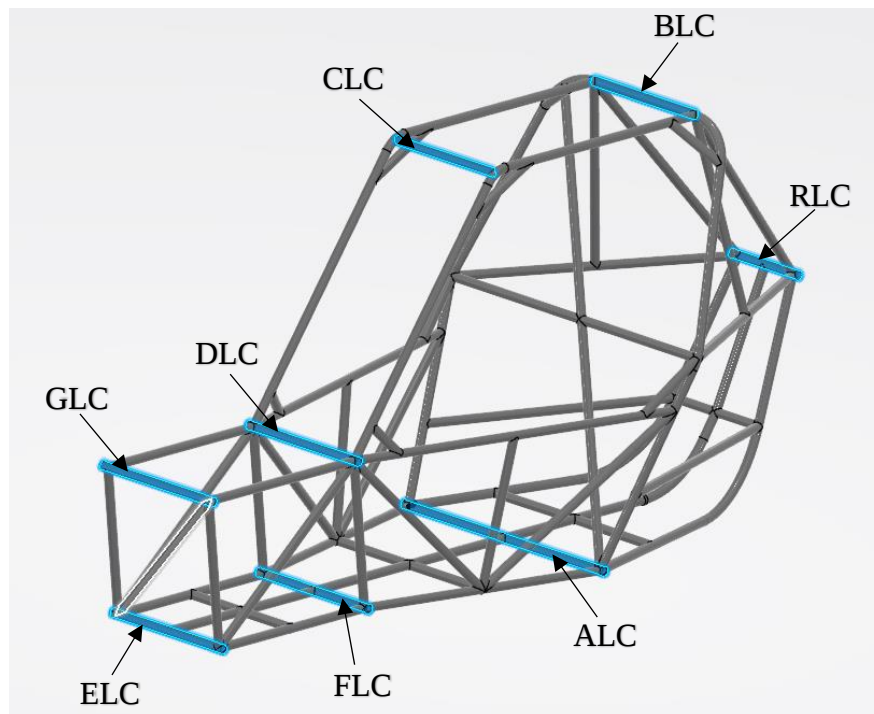
Sele 4. Toruraami sekundaarsed lülid (kujutatud siniselt)

1.1.3. Lisa toetus torud

Painutatud või sirgetele torudele, mis ületavad maksimaalset lubatud pikkust, tuleb lisada lisa toetus toru. Siretel torudel peab toetus toru ühenduma keskpunktis (± 127 mm) ja painutatud torudel peab olema paigaldatud painde raadiuse keskele. Kui kasutatakse täiendavaid toetus torusid, hinnatakse toruraami pikkust ja/või täiendavaid painutusi ristumispunkti ja täiendava toetus toru asukoha vahel. Painutatud toru nurk ei tohi kordagi olla suurem kui 30° . Turvapuuri külgmised teostus torud peavad olema täielikult keevitatud mõlema otsa übermõõdu ümber [1, p. 28].

1.1.4. Ristiühendustoru

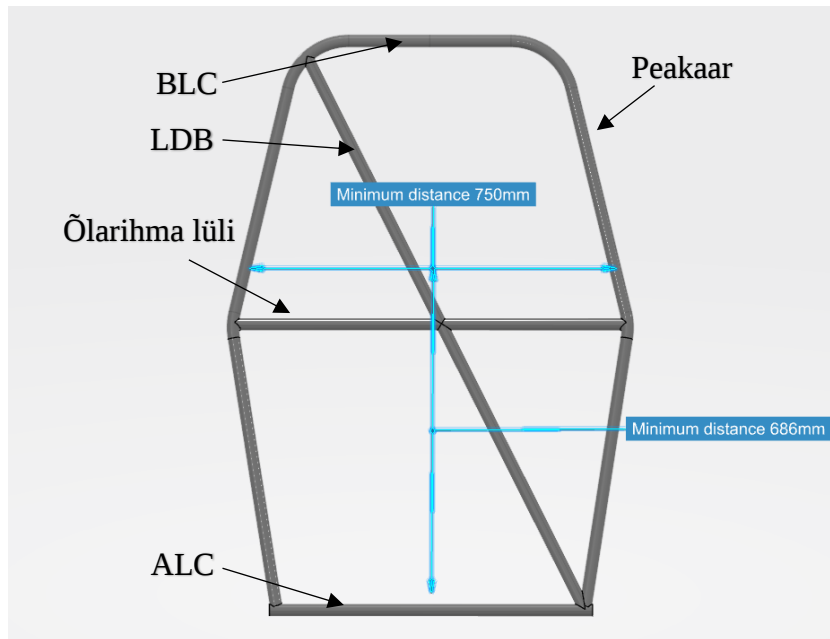
Ristühendus torude pikkus ei tohi olla suurem kui 203,5 mm. Risti olevad ühendus torud (vt. Sele 5) ei tohi olla painutatud, kuid need võivad olla osa suuremast painutatud torude konstruktsioonist, eeldades, et painde puutujate vahel on minimaalne pikkus [1, p. 30].



Sele 5. Toruraami ristiühendus torud

1.1.5. Peakaar

Peakaar on tasapinnaline struktuur juhi selja taga ja määrab piiri toruraami esiosa ja tagumise poole vahel. Juht ja juhiiste peavad asuma täielikult peakaarest eespool. Peakaar on põhiliselt vertikaalne, kuid võib olla kallutatud kuni 20°. Peakaare minimaalne laius, mõõdetuna istmepõhjast kõrgusel 686 mm, peab olema 736 mm (vt. Sele 6). Peakaare vertikaalsed osad peavad olema ühendatud ülemise- ja alumise ristiühendus torude osadega alt ja ülevalt. Ülemise- ja alumise ristiühendus torud peavad olema terviklikud. Ülemise- ja alumise ristiühendustoru, peakaar ja peakaare diagonaal toru ning õlarihma toru peavad kõik olema ühes tasapinnas ja peakaar peab olema terviklik, ehk see ei tohi koosneda mitmest tükist [1, p. 31].



Sele 6. Peakaar

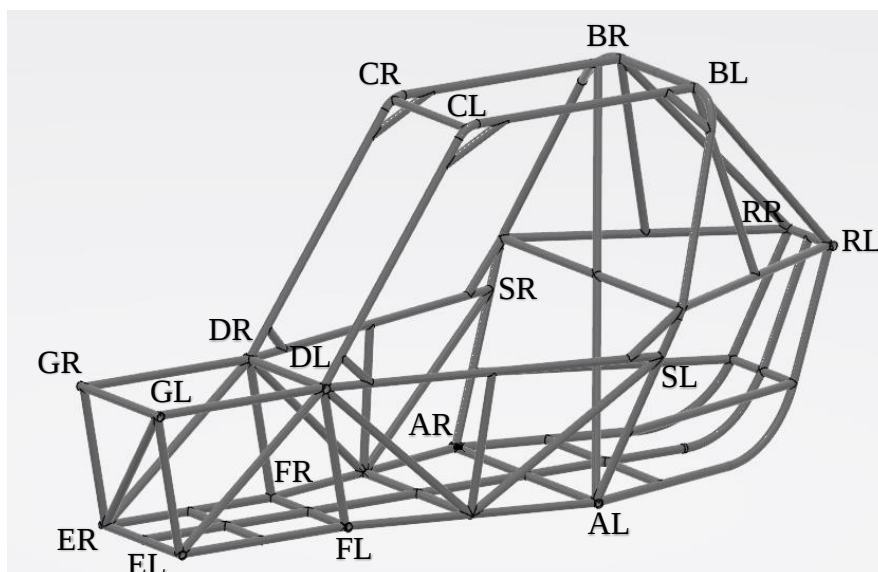
1.1.6. Diagonaaltoru

Peakaar peab olema diagonaalselt tugevdatud. Diagonaaltur peab ulatuma peakaare vertikaalsest osast teiseni. Diagonaaltoru ja peakaare vertikaalsete osade ülemised ja alumised ristumiskohad ei tohi olla otspunktidest kaugemal, kui 127 mm. Nurk diagonaaltoru ja peakaare vertikaalsete osade vahel peab olema suurem või võrdne 20° . Külgmised osad võivad koosneda rohkem, kui ühest osast. Diagonaaltoru ei pea vastama maksimaalse toru pikkuse nõudele [1, p. 32].

1.1.7. Peakaare pikiühendus toru

Peakaare pikiühendus toru tagumised otsad peavad olema üksteistest 51 mm kaugusel peakaare ülemisel osal. Peakaare pikiühendus toru detailide esiotsad määravad punktid CR ja CL. Punktid CR ja CL peavad toruraami külgvaates asuma punktist BR ja BL vähemalt 305 mm kaugusel, mis on määratletud peakaare pikiühendus toru tsentrist langeva vertikaalse sirgega. See punkt istmel on määratletud istme põhja lõikepunktiga 101 mm raadiusega, mis puudutab istme põhja ja seljatuge [1, p. 33].

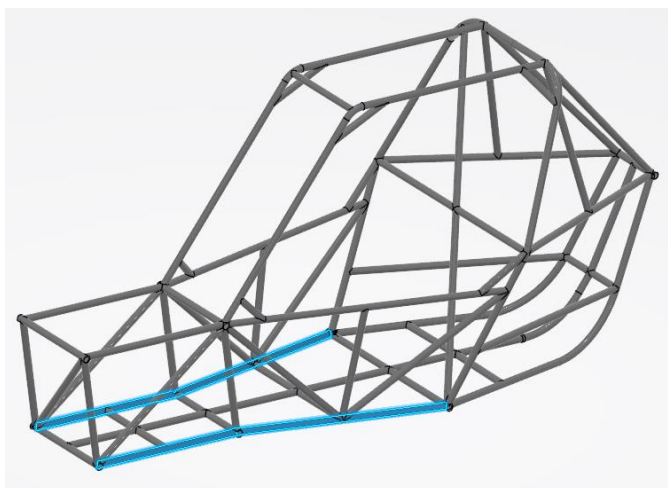
Punktid CR ja CL ning punktid BR ja BL ei tohi samuti asuda madalamal kui malli alumine serv, milleks on 1041,4 mm istme kohal [1, p. 33].



Sele 7. Toruraami lülide ühendustorud

1.1.8. Toruraami alumised külgkaitse torud

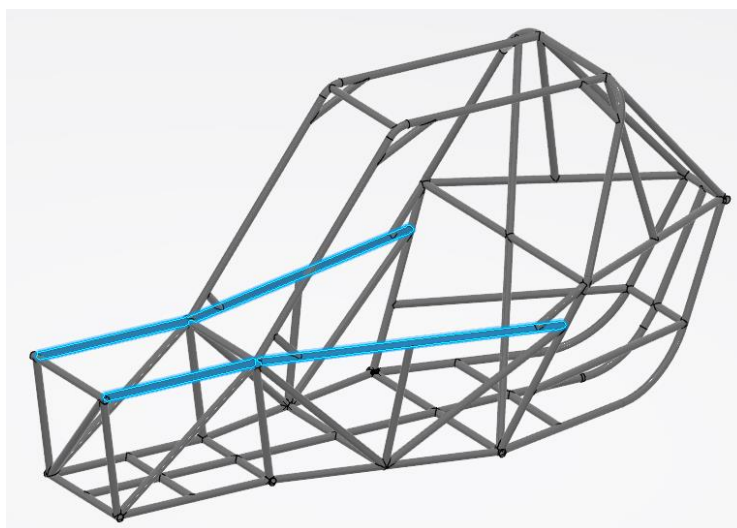
Toruraami alumise parema ja vasaku poole küljed määravad toruraami kaks alumist külgmist toru (vt. Sele 8). Need osad on ühendatud toruraami põhjaga ja ulatuvad normaalses sõiduasendis istudes juhi jalgadest kaugemale. Toruraami alumised külgkaitse torude esiotsad on ühendatud eesmise risti toruga. Alumise külgkaitse torud ja eesmise risti toru ühenduspunkti määravad punktid FR ja FL. Toruraami esiosa konstruktsiooni puhul, ulatuvad alumised külgkaitse torud ettepoole punkti ER ja EL ning on ühendatud risti toruga FLC ja ELC (vt. Sele 5) [1, p. 36].



Sele 8. Turvapuuri alumised külgkaitselülid (märgitud siniselt)

1.1.9. Toruraami ülemised külgkaitse torud

Toruraami horisontaalse keskasendi määratlevad kaks külgkaitse toru (vt. Sele 9). Need torud on ühendatud peakaarega, määratledes punkti SL ja SR ja ulatuvad normaalses sõiduasendis istudes juhi jalgadest kaugemale. Külgkaitse torude esiosa on ühendatud eesmise risti toruga, DLC (vt. Sele 5). Külgkaitse- ja risti toru ristumiskohad määratlevad punktid DR ja DL. Külgkaitse torud peavad asuma 203 mm ja 356 mm kõrgusel istme sisepeõhjast punktide SL/SR ja DL/SR vahel. Toruraami esiosa konstruktsiooni puhul, ulatuvad külgkaitse torud edasi punktini GL/GR ja on ühendatud risti toruga GLC. Sellisel juhul võib DLC ära jätta, kui GLC tagab juhi jalgadele piisava kaitse, kuid lisaturvalisuse mõttes jätame DLC risti toru alles [1, p. 37].



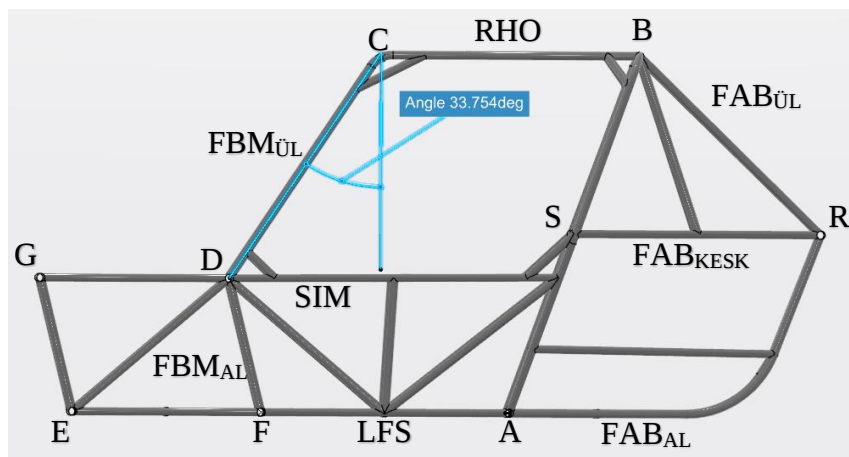
Sele 9. Toruraami ülemised külgkaitse torud (märgitud siniselt)

1.1.10. Istmealune toestustoru

Istmealune toestustoru peab olema paigaldatud nii, et istme purunemise tõttu ei saaks juht toruraami aluspõhjast läbi kukkuda. Toestustoru võib mudeldada kas pikisuunaliselt või risti turvapuuri suhtes. Pikisuunaline toestustoru peab kinnituma ALC ja FLC lülidega. Ristisuunaline toestustoru peab kinnituma turvapuuri alumiste külgkaitse torudega. Mudeldatud toruraamil on kasutusel pikisuunaline toestustoru. [1, p. 38]

1.1.11. Eesmised turvapuuri torud

Eesmised turvapuuri lülid peavad ühinema toruraami pikiühendus torudega, külgkaitse torudega ja alumise külg torudega punktides C, D ja F. Ülemised eesmised turvapuuri lülid (FBM_{ÜL}) peavad ühinema toruraami pikiühendus toru punktiga C ja külgkaitselülidega D. Alumised eesmised turvapuuri torud (FBM_{AL}) peavad ühinema punktiga D ja F. Turvapuuri kinnitustorud peavad olema terviklikud. FBM_{ÜL}-i ja selle vertikaalne vaheline nurk peab olema väiksem või võrdne 45 kraadiga (vt. Sele 10). Mudeldatud turvapuuril on 33,75° [1, p. 39].



Sele 10. Eesmised turvakaare lülid

1.1.12. Turvapuuri tugevdustorud

Kui peakaar ja selle pikiühendus toru ja turvapuur ei koosne ühest punktist C painutatut torust, siis on punktis C vaja kinnitust, et toetada peakaare pikiühendus toru toestuslüluga. [1, p. 40].

1.1.13. Esi ja taga tugevdustorud

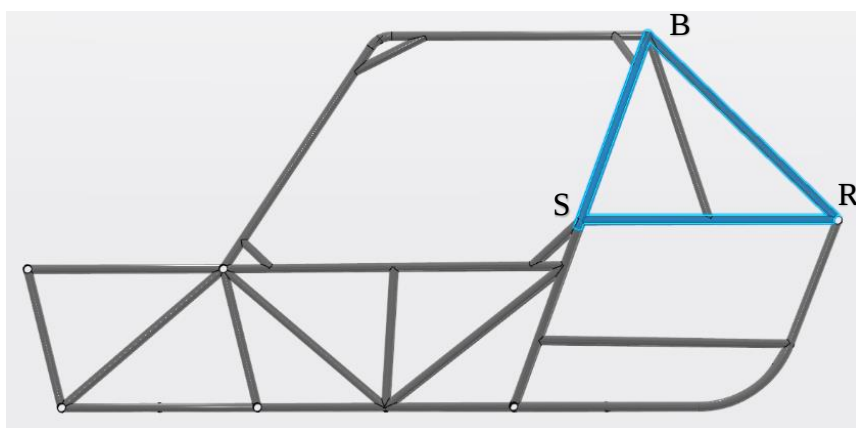
Turvakaar tuleb külgvaates takistada läbi paindumist kolmnurkse tugisüsteemi abil [1, p. 40] :

- Eesmine tugi piirab mõlemat punkti C piki- ja vertikaalse nihke eest, toetades seega punkte B läbi turvaraami pikiühendus torud,
- Tagumine tugi piirab otse mõlema punkti B pikisuunalist nihkumist, kui punktides C olevad liigendid peaksid purunema.

Tugevdus torude konstruktsioonides kasutatavate osade pikkus ei tohi ületada 1016 mm ja triangulatsiooninurgad peavad olema vähemalt 20° kinnitus punktide vahel [1, p. 25].

Esi tugevdus torde süsteem peab ühendama FBM_{ÜL} torud turvapuuri külgkaitse torudega. FBM_{ÜL}-i torude ühenduspunkt peab olema 127 mm piires, mõõdetuna sirgjoonelise kaugusena keskjoonest punkti C keskjooneni. Turvapuuri külgkaitse torude ühenduspunkti määrab punkt P ja seda peavad vertikaalselt toestama teised torud, mis ühendavad külgkaitse torud turvapuuri alumiste külgtorudega, mis määratlevad punkti Q [1, p. 40].

Tagumised tugevdustoru konstruktsioonid peavad looma mõlemale sõiduki küljele külgvaates kolmnurga (vt. Sele 11). Tekkinud kolmnurk peab asuma turvakaarest tagapool, sisaldama turvakaare vertikaalset külge ja omama ühte tippu punktis B, punktis S ja punktis R. Selline kolmnurkne süsteem peab olema loodud terviklikest torudest, kuid painded väiksemad kui 30 kraadi, on lubatud. Mudeldatud toruraamil puuduvad painded tekkinud kolmnurgal. Tagumise tugikolmnurga tagumine tipp määrab punkti R ja see peab olema ühendatud vähemalt 203,5 mm pikkuse risti toruga teisepoolse tugikolmnurgaga [1, p. 40].



Sele 11. Külgvaates tekkinud kolmnurk (märgitud siniselt)

2. TORURAAMI MATERJAL

Toruraami torude materjal peab olema teras, mille süsiniku sisaldus on vähemalt 0,18%. Süsiniku sisaldus terases tõstab terase voolavuspiiri, tõmbetugevust ja kõvadust ning vastupanu väsimuspurunemisele [2, p. 14]. Kõik eelnevalt nimetatud omadused on toruraamil suure tähtsusega, sest nii tõuseb toruraami tugevus ja sellega kaasneb juhi turvalisus bagi sõitmisel.

Autor on arvestanud nõuetega ja teostanud põhjaliku uuringu erinevate materjalide vahel ning otsustas kasutada turvapuuri toru materjaliks E355 klassi süsinikterast. Turvapuuri primaartorude mõõtmeteks valiti 30 mm x 3 mm ja sekundaartorude mõõtmeteks 30 mm x 2,5 mm. Süsinikteras torudel on hea hinna ja kvaliteedi suhe. Valitud toru materjali süsiniku sisaldus on kuni 0,22% ja suurima elemendi sisaldus, milleks on mangaan, on kuni 1,60% [3]. Süsinikteras toru on lihtne lõigata ja painutada. Valitud materjalil puudub kroomi sisaldus, mis võib suure sisalduse tõttu tekitada keevisõmblusse pinged ning mis võivad edasi areneda mõradeks [2, p. 60].

Tabel 1. Keemiliste elementide sisaldus E355 klassi süsinikterases [4, p. 9]

Keemiline element, tähis	Elemendi sisaldus, % massi kohta
Süsinik, C	$\leq 0,22$
Räni, Si	$\leq 0,55$
Mangaan, Mn	$\leq 1,60$
Fosfor, P	$\leq 0,025$
Väävel, S	$\leq 0,015$
Alumiinium, Al	$\leq 0,025$

Tabel 2. E355 klassi süsinikterase mehaanilised omadused [4, p. 9]

Terase klass	Voolavuspiir, R_{eH}	Tõmbetugevus, R_m	Katkevenivus, A
E355	355 MPa	560 MPa	22%

3. TORURAAMI VALMISTAMISTEHNOLLOOGIA

3.1. Torupainutus meetodid

Toruraami torude valmistamisel on vaja torusid painutada. Torude painutamiseks on olemas erinevad meetodid. Õige torupainutus meetodi valimisel tuleb arvestada toruraami mudeldatud painderaadiuste suurusetega ja missugust painutus kvaliteeti soovitakse. Olenevalt kasutatavast painutusetehnikast ja torumaterjali omadustest toimub toru painutamise ajal mitmeid füüsilisi muutusi. Toru painutamise käigus mõjuvad sise- ja välisküljele erinevad jõud, mille tulemuseks on välimise külje õhenemine ja pikenemine ning sisemise külje kortsumine ja paksenemine. Lisaks muutub toru ristlõikes ovaalsesks. See tuleneb paindele mõjuvatest tasakaalustamata jõududest. Selleks, et vältida toru muutumist ovaalsest, on vaja toru seest poolt toetada.

Toru painutamisel peab arvestama, et toru paindub tagasi peale painutusrakise eemaldamise, mille tulemuseks on väiksem paindenurk, kui soovitud. Sellise probleemi vältimiseks tuleb toru painutada rohkem soovitud paindenurgast, et toru saavutaks soovitud paindenurga. Kirjeldatud nähtust mõjutvad erinevad tegurid, näiteks toru seina paksus, kasutatav painutus meetod ja materjali jäikus. Mida suurem on materjali jäikus, seda suurem on toru tagasi paindumine.

3.1.1. Torupainutus press

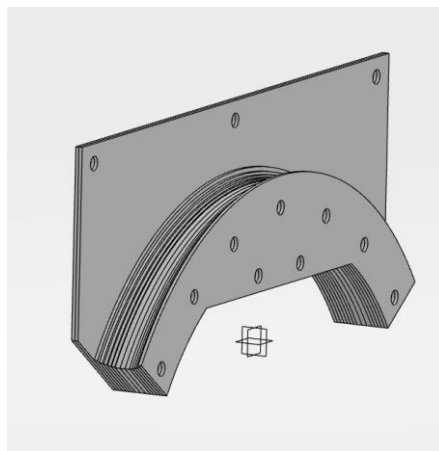
Kõige tavalisem viis kuidas torusid painutada on pressi abil. Autori poolt eelnevalt valminud Baja

SAE toruraami valmistamisel kasutati torupainutus pressi (vt.

Sele 12). Vastavalt õige suurusele paberile joonestati soovitud toru ja painde kontuurid ning selle abil kontrolliti kas toru painderaadius on õige. Toru painutamiseks koostati spetsiaalne painutusrakis (vt. Sele 133), mis võimaldas anda torule soovitud painderaadiuse.



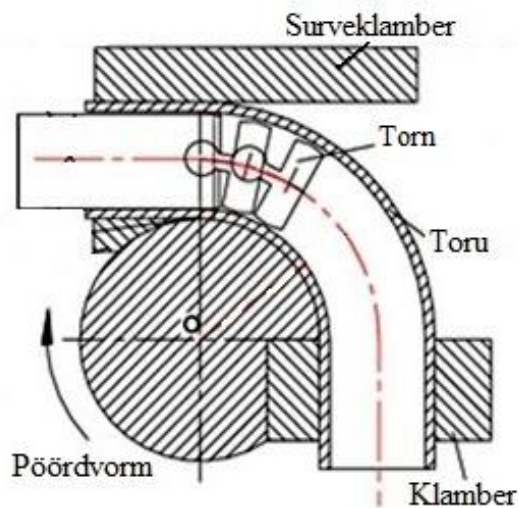
Sele 12. Torupainutus press



Sele 13. Painutusrakis

3.1.2. Pöördvormiga painutamine

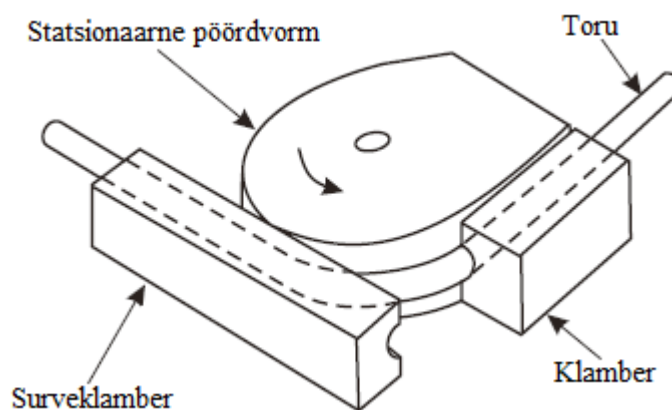
Pöördvormiga torude painutamine (vt. Sele 14) on sobiv meetod täpse ja konstantse läbimõõduga painde loomiseks. Sellise meetodi puhul toimub toru painutamine pöördvormi abil, mis määrab painde raadiuse. Pöördvorm pöörab ümber oma telje, kuni soovitud painderaadius on saavutatud. Rakise külge on klambriga ühendatud toru ja toru sisse asetatakse torn, mis ei lase torul ebavajalike füüsilisi deformatsioone tekkida. [5]



Sele 14. Pöördvorm

3.1.3. Survepainutamine

Survepainutus (vt. Sele 15) meetodit kasutatakse sümmeetriliste toorikute painutamiseks ja selline torude painutus meetod ei võimalda kasutada torude sisediaametri toetamiseks torni ja toru ristlõige võib muutuda ovaalseks. Survepainutus ei sobi väikeste painderaadiuste painutamiseks. [5]

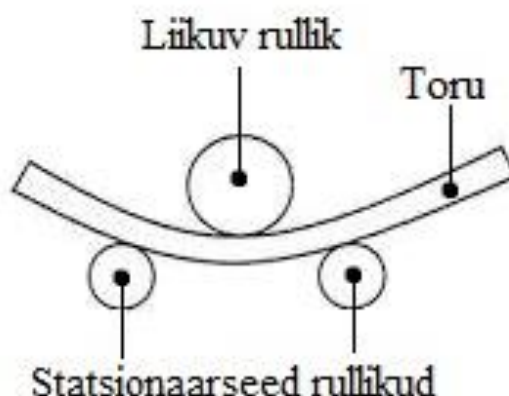


Sele 15. Survepainutus

3.1.4. Rullpainutus

Rullpainutus (vt. Sele 16) meetodit kasutatakse suurte painderaadiuste torude painutamiseks. Rullpainutus koosneb kahest statsionaarsest pöörlevast rullikust ja ühest liikuvast rullikust, mis on

paigaldatud kolmnurkse mustriks. Statsionaarsed rullikud pöörlevad liikuva rulli vastassuunas ja toru painderaadius moodustub järk-järgult, kui toru liigub pöörlevatel rullikutel edasi-tagasi. [5]



Sele 16. Rullpainutus

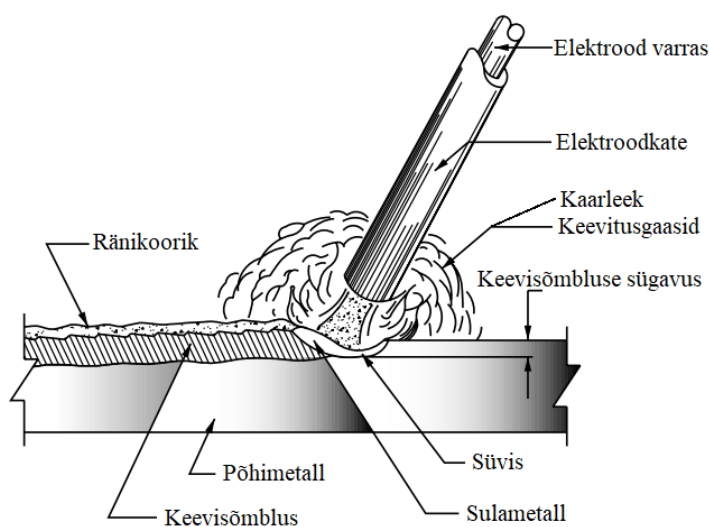
3.2. Toru keevitusmeetodid

Turvapuuri torude valmistamisel on vaja torusid omavahel ühendada. Keevitamine on terassulamite enimlevinud ühendusmeetod. Keevitamine tähendab detailide tervikliite loomise kohaliku või üldise kuumutamise teel. Lisaks kuumutamisele on olemas ka survekeevitus, kuid autori poolt valminud lõputöös käsitletakse ainult sulakeevitus. Turvapuuri keevitamisel on parim valik sulakeevitus, sest sulakeevitust kasutatakse enamasti erinevate konstruktsioonide ühendamisel ja sellel on kõrge kvaliteet ning see on kasutajasõbralik. Sulakeevituse alla kuuluvad MIG/MAG keevitus, TIG keevitus, elektroodkeevitus jpt. Torude keevitamisel tuleb arvestada valitud materjali keevitatavust, et keevisliide vastaks kvaliteedinõuetele. Kvaliteedinõueteks on halb, piiratud, rahuldav ja hea. Keevisliite kvaliteeti hinnatakse praokindlusega. [2, pp. 59-60]

Õige keevitusmeetodi valimisel tuleb arvestada, et toruraam peab vastu pidama löök ja surve koormustele, mis kasutuskäigus esinevad. Selleks peavad keevisõmblused olema tugevad ja kvaliteetsed. Valitud toru materjali keevitamiseks on parim meetod MIG/MAG-keevitus, sest selline meetod on kõige enam levinud, kasutajasõbralik ja keevisõmblused tulevad kvaliteetsed. MIG/MAG-keevitusel ei esine räbu defekte, mis võivad keevisõmblust nõrgestada.

3.2.1. Elektroodkeevitus

Elektroodkeevitust saab kasutada alalis- või vahelduvvooluga ja materjaliga mille läbimõõt on alates 1 mm. Autori poolt kirjutatud lõputöös käsitleme vahelduvvoolu elektroodkeevitust, sest vahelduvvooluga on keevitus kvaliteet kõrgem ja keevituskaar stabiilsem. Keevituselektrood kinnitub hoidiku külge ja kaarleegi süütamine peab olema samas kohas kus toimub keevitamine. Keevituskaare temperatuur on 5000-6000 °C ja kõrge temperatuuri toimetel põhimetall koos elektroodi vardaga sulavad ning tekib keevisõmblus. Elektroodi kinni jäämist keevitatavasse metalli takistab lehtrikujuline süvis ja mis suunab ka metallitilgad keevisvanni. Elektrodikatte lihtsustab kaarleegi püsimist ja selle põlemise ühtsust, sest elektrodikattest eraldub gaasi, mis kaitseb kaarleeki. Elektrodikatte sulamisel tekib keevisõmbluse peale räbu kiht, mis tekitab rübusti defekte. Elektroodkeevitusel on madal tootlikus, sest ühe elektroodvarda sulamisaeg on umbes kaks minutit ja seetõttu tekib ajakadu, sest lisaks on vaja elektroodvarrast vahetada ja keevituska ar uuesti süüdata. [2, p. 60] [6, pp. 39-48]



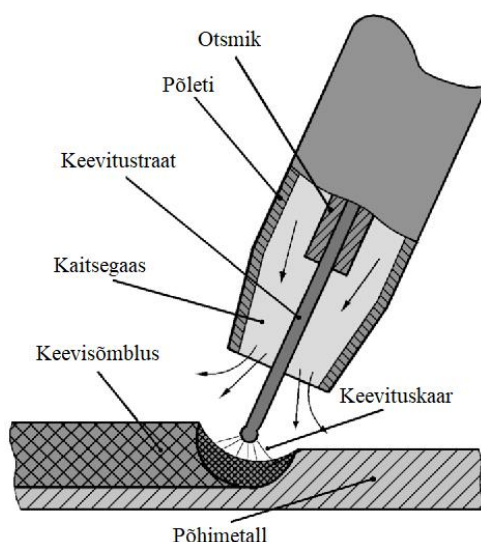
Sele 17. Elektroodkeevitus

3.2.2. MIG/MAG-keevitus

MIG/MAG poolautomaatkeevitust (keevitustraati juhitakse automaatselt, keevituspidet juhitakse käsitsi) kasutatakse kõikide metalsete materjalide puhul, mis on keevitatavad. Suurim erinevus võrreldes elektroodkeevitusega on kõrge tootlikus ja suurem keevitus kvaliteet. Lühendit MIG/MAG

kasutatakse koos, sest nende keevitusprotsessid on väga sarnased. Ainuke erinevus nende vahel on kaitsegaasi kasutus. MIG keevitus toimub inertgaasis ja MAG keevitus toimub aktiivkaitsegaasis. Peamiseks inertgaasiks peetakse argooni ja aktiivkaitsegaasiks süsihappegaasi, kuid kaitsegaas valitakse vastavalt keevitatavast materjalist. Autori poolt valitud toruraami materjali keevitamiseks on kõige levinum süsihappegaas, sest materjal on madalsüsinikterases. [2, pp. 60-61]

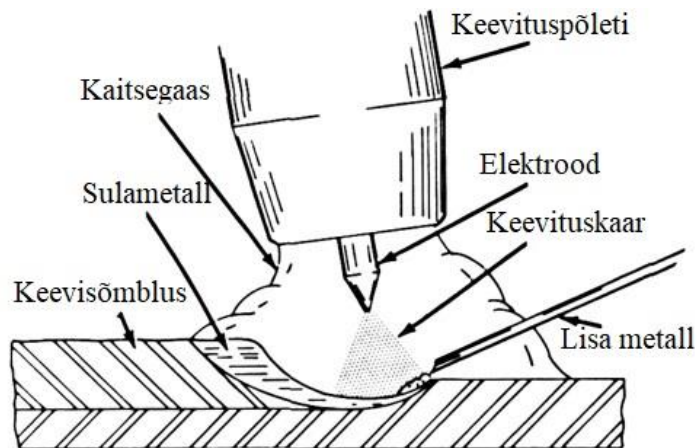
MIG/MAG keevitamisel tekib keevitustraadi ja keevitatava metalli vahele keevituskaar, mille suure temperatuuri toimetel keevitustraad ja keevitatav metall sulavad ning tekib keevisõmblus. Keevituspõleti düüsi kaudu juhatakse kaitsegaasi, mis kaitseb keevissüvendit ja sulametalli tilkasid hapniku ja lämmastiku toime eest. Keevitustraadi peale voolu juhib keevitusseade automaatselt traadi etteandemehhanismi abil. Keevituse jaoks juhatakse vool mööda voolukontakti. Keevitusseadme esipaneelilt on võimalus keevitustraadi peale voolu kogust ja voolu tugevust reguleerida. [2, pp. 60-61]



Sele 18. MIG/MAG keevitus

3.2.3. TIG-keevitus

TIG-keevitust kasutatakse peamiselt õhukeste materjalide keevitamisel, milleks on alates 0,1 mm. Peamised materjalid milleks TIG-keevitust kasutatakse on metallsulamid, kergoksüdeeruvad metallid, kõrglegeerterased. TIG-keevitusel tekitatakse keevituskaar volframelektroodi otsa, mis on sulamatu ja põhimetalli vahele mille tulemusena tekib keevisõmblus ning keevituspõleti düüsi kaudu juhatakse kaitsegaas. Kaitsegaasil on peale elektroodi ja keevissüvendi kaitsmise ümbritseva õhu eest, ülesanne ka põletit jahutada. Kaitsegaasiks TIG-keevitusel on argoon ja heelium. Keevissüvendi tekitamiseks kasutatakse lisa metalli. [2, p. 61]



Sele 19. TIG-keevitus

3.2.4. Kuumpragu

Kuumpragu on metalli tardumispragu. Kuumpragu võib tekkida, kui valitud materjali väävli sisaldus on üle 0,03% ja tekib tavaliselt kõrgel temperatuuril õmblusmetalli. Kuumpragude tekke vältimiseks kasutatakse lisamaterjalina mangaani. Autori poolt valitud toruraami toru materjali väävli sisaldus on mitte rohkem, kui 0,015% ja mangaani sisaldus mitte rohkem, kui 1,60%. [6, p. 18] [2, p. 60]

3.2.5. Külmpragu

Külmpragu on tingitud jahtumiskiirusest ja see on tingitud materjali karastamisega. Külmpragu võib tekkida, kui valitud materjali süsiniku sisaldus on üle 0,25% ja tekib tavaliselt keevisõmbluse kõrvale põhimetalli. Külmpragude tekke vältimiseks peab vähendama temperatuuride ebahürtlust, näiteks ühendatavate detailide eelkuumutamise. [6, p. 18] [2, p. 60]

3.3. Torude lõikamise meetodid

Torude vajaliku pikkuse ja otsaprofiili saamiseks on vaja torusid lõigata õigesse mõõtu, et need sobiksid omavahel kokku. Torude lõikamiseks kasutatakse erinevaid meetodeid, kus tuleb arvestada millist materjali lõigatakse. Parim toruraami torude materjali, süsinikterase, lõikamise meetodiks on laser- ja ketaslõikus.

3.3.1. Ketaslõikuriga lõikamine

Toruraami konstrueerimisel saab ketaslõikuriga (vt. Sele 20) lõigata ja/või lihvida torusid soovitud pikkusega. Ketaslõikurid võivad olla elektri pealt käitavad, suruõhuga või sisepõlemismootoriga. Ketaslõikuri pöördmehhanismi otsa tuleb valida õige lõikeketas, mis on mõeldud terastorude töötlemiseks. Seadmega töötamisega ei tohi unustada ketta kaitset, mis kaitseb kasutajat töötlemise käigus tekkinud metallpuru või puruneva lõikeketta eest. Lisaks on võimalik vahetada käepideme pooli, mis võimaldab tööd teha parema- või vasakukäelistel.



Sele 20. Ketaslõikur

3.3.2. Laserlõikus

Varasemalt valminud toruraami konstrueerimisel kasutati torude valmistamiseks laserlõikust (vt. Sele 21). Selline meetod on lihtne ja täpne, et saada soovitud torude mõõtmed ja otsprofiilid. Toruraami konstrueerimisel on tähtis, et lõigatud otsaprofiilid oleksid võimalikud täpsed, et torud sobituksid omavahel kokku. Laserlõikus minimaliseerib ajakulu torude valmistamisel. Laser lõikamisel kasutatakse suure võimsusega laserkiirt, mis suunatakse läbi optiliste peeglite ja arvuti juhtimise abil. Suunatud laserkiir põletab, sulatab ja puhub gaasijoa minema, et jätta kõrge kvaliteediga pinnaviimistlusega lõige. Kolmemõõtmeline ja kallutatav lõikepea võimaldab teha kalde all lõikeid. Laserlõikuse torude valmistamiseks sobivad mudeldatud torude .STP failid, kus on märgitud toru materjal ja mõõdud. [7] [8]



Sele 21. Laserlõikus

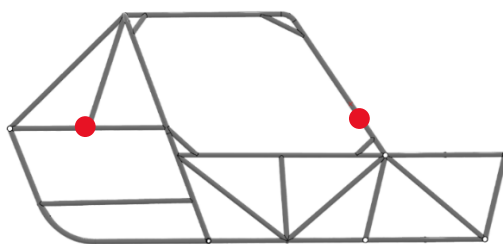
4. TORURAAMI MUDELDAAMINE

2022 aasta Baja SAE toruraami mudeldamise vajadus tuleneb sellest, et soovitakse hakata korraldama võistlussarja, mis vastab täielikult Baja SAE poolt sätestatud nõuetele. Autor võttis eesmärgiks valmis mudeldada toruraam, mis vastab täielikult eelnevalt nimetatud nõuetele. Toruraami mudeldamiseks kasutas autor raaltarkvara nimetusega 3DEXPERIENCE. Mudeldamise alustamiseks koostas autor punktipilve, mille alusel hakata *Generative Shape Design* töökeskkonnas torusid mudeldama. Järgiti ka visuaalselt toruraami esteetilist välimust.

Toruraami mudeldamise puhul tuleb arvestada sõidutingimustega, kus kogu bagi sõitma hakkab. Arvestades, et Baja SAE võistlussarja korraldatakse rasketes sõidutingimustes, siis tuleb toruraami mudeldamisel selle faktoriga arvestada. Vaadeldes toruraami mudeldust (vt. **Error! Reference source not found.**), siis on näha, et toruraami esi- ja tagaosa mudeldamisel on selle faktoriga arvetatud. Toruraami tagaosa on suure raadiusega, mis aitab kõrgetest või suure tõusunurgaga takistustest üle sõita. Sama lahendusega on mudeldatud esiosa. Negatiivne lähenemisnurk aitab kergemini takistusi ületada, sest bagi rattad on toruraamist eespool. Mudeldatud toruraamil on lähenemisnurk $13,7^{\circ}$ ja mahasõidunurk $22,8^{\circ}$.

Toruraami mudeldamisel oluline faktor on ka juhi turvalisus. Toruraami mudeldamisel on võetud arvesse erinevad ohutegurid, mis võistlusrajal asetsevad. Õnnetuste ennetamiseks on mudeldatud toruraamile külgkaitse torud, mis kaitsevad juhti külje pealt tulevate ohtude eest terve toruraami pikkuses. Lisaks külgkaitsetele, kaitseb juhti ka turvakaar. Turvakaar kaitseb juhti ümberpaiskumise korral ja turvakaarele on mudeldatud lisatugevdus lülid, et ümberpaiskumise korral ei vajuks turvakaar kokku.

Toruraami tagaosa kolmnurkse süsteemi küljes asetseb vedrustuse punkt ning mis on omakorda tugevdatud tugevdustoruga. Esiosas asetseb vedrustuse punkt turvapuuri ülemise toru küljes, sest siis liiguvad vedrustusest tulenevad löökkoormused pikisuunaliselt ning ei koorma liigselt toruraami.



Sele 22. Toruraami vedrustuse punktid

4.1.1. Toruraami valmistamise kuluarvestus

Kuluarvestus tabel on koostatud interneti allikatest leitud hinnakirja järgi.

Tabel 4. Kulutabel

	Kogus	Hind, €	Kokku, €
Materjal	20 m	7,5	150
Torude lõikamine laseriga	20 min	15 €/min	300
Torupainutus press	1	350	350
MAG keevitusseade	1	5999	5999
3DEXPERIENCE tarkvara litsents	1	6000 €/aasta	6000
			12799

Toruraami kuluarvestusel arvestati parima valmistehnoloogia meetoditega ja kogu toruraami valmistamine koos seadmete soetamisega läheb maksma 12799 €

4.2. Toruraami tugevusanalüüs

Baja SAE bagi on ettenähtud rasketes sõidutingimustes sõitmiseks, kus toruraamile tekivad pinged. Toruraamile tekkivatest pingete arusaamiseks on vaja teostada tugevusanalüüs, mis tõstab esile toruraamil esinevad pinged. Tugevusanalüüs aitab leida parenduslahendusi mudeldatud toruraamile, et tagada toruraami maksimaalne vastupidavus ja juhi turvalisus rasketes sõidutingimustes.

Tugevusanalüüside teostamiseks lisasin toruraami 3DEXPERIENCE Structural Scenario Creation töökeskkonda, kuid tudengi litsentsi tõttu ei võimalda tarkvara tugevusanalüüsi teostada. Probleem

esineb mudelile lisatud sõrestiku suuruses. Tudengi litsents ei luba piisavalt väikest sõrestiku luua, kuid proovides teha suurem sõrestik, ei suuda tarkvara simulatsiooni läbi viia, sest sõrestik on ebaühtlane. Sõrestiku suurus ei tohi olla suurem, kui 5 mm, sest siis tekib ebaühtlane sõrestik.

5. TORURAAMI PARENDUSED

Varasemalt valminud toruraami prototüübi suurim puudus on painutatud torude keerukus. Keeruliste toru painete tegemisel võivad tulla valmistamise käigus vead sisse ja vigade parandus nõuab palju ajalist ressursi ning halvimal juhul rohkem torude materjali. Uuel toruraamil on kasutusel ainult suurte raadiustega painutused, mis minimaliseerib torude painutamisel eksimusvigu. Uuel toruraamil on raskendatud teeoludel parem maastiku läbivus, kui toruraami prototüübil, sest toruraamide lähenemisnurga erinevus on 13,7°. Toruraami prototüübil ei ole erilist tähelepanu pööratud juhi turvalisusele. Arvestades võistlussarja ohtlike teeoludega, on uuel toruraamil mudeldatud rohkem elemente juhi turvalisuse tõstmiseks, sealhulgas ka jalaruumi laiendamine suurendamine 95 mm.

Tabel 4. Toruraamide parameetrid

	Pikkus x laius x kõrgus, mm	Kaal, kg	Toruraami teoreetiline lähenemisnurk, °	Toruraami teoreetiline mahasõidunurk, °
Uus raam	2300 x 660 x 1198	41	13,7	22,4
Prototüüp raam	2371 x 664 x 1211	46	0	0

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli valmis mudeldada Baja SAE bagi toruraam, mis vastab täielikult Baja SAE poolt sätestatud võistlussarja nõuetele ja mida on võimalik jagada kutse- ja/või kõrgkoolidega. Toruraami mudeldamisel pöörati tähelepanu ülesehituse parendamisele võrreldes prototüüp toruraamiga ja juhi turvalisus tõsteti esikohale.

Juhi turvalisuse tõstmiseks täiustati toruraami lisatugevdus ja -kaitse torudega, mis kaitsevad juhti sõitmise ajal. Uue toruraami mudeldamisega parendasime toruraami parameetreid, vähendades kaalu ja üldmõõtmeid. Toruraami kaal vähenes 11,5% ja üldmõõtmed vähenesid 2,1%. Parendati teoreetilise lähenemis- ja mahaõidunurka koguni 31,1%, mis aitab kaasa maastiku läbivusele. Toruraami tugevus parenduste hüpoteesile tugevusanalüüsi abil vastust ei leitud tudengi litsentsi piirangute tõttu.

SUMMARY

The aim of this diploma was to model a Baja SAE buggy roll cage that fully meets the requirements of the competition series set by Baja SAE and can be shared with vocational and/or higher education institutions. When modeling the roll cage, attention was paid to improving the design compared to the prototype roll cage and driver safety was given priority.

To increase driver safety, the reinforcement and protection of the roll cage has been improved with tubes that protect the driver while driving. By modeling the new roll cage, we improved the parameters of the roll cage, reducing weight and overall dimensions. The weight of the tubular frame decreased by 11.5% and the overall dimensions decreased by 2.1%. The theoretical approach and departure angle was improved by as much as 31.1%, which contributes to the permeability of the landscape. The strength of the roll cage was not answered by the strength analysis hypothesis due to student license limitations.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Baja SAE, „www.bajasae.net,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bajasae.net/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>. [Kasutatud 18. aprill, 2022].
- [2] J. K. E. H. T. M. O. T. Priit Kulu, „www.ene.ttu.ee,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ene.ttu.ee/leonardo/materjalid/Materjalid.pdf>.
- [3] Ferropipe, „www.ferropipe.com,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://ferropipe.com/en-10297-1-grade-e355-carbon-steel-seamless-tubes/>. [Kasutatud 01. mai, 2022.].
- [4] www.sanyosteel.com, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.sanyosteel.com/files/EN/EN%2010305-4.pdf>. [Kasutatud 30. aprill, 2022.].
- [5] IQS Directory, „www.iqsdirectory.com,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iqsdirectory.com/articles/tube-fabrication/tube-bending.html>. [Kasutatud 01. mai, 2022.].
- [6] R. Roots, „Metallide keevitustehnoloogia ja seadmed“.
- [7] ArcoMetal, „www.arcometal.ee,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://arcometal.ee/et/torulaser/>. [Kasutatud 04. mai, 2022.].
- [8] TWI Global, „<https://www.twi-global.com/>,“ [Võrgumaterjal]. Available: shorturl.at/motIW. [Kasutatud 04. mai, 2022.].

LISAD

Lisa 1. Prototüüp raami eestvaade

Lisa 2. Prototüüp raami külgvaade

Lisa 3. Prototüüp raami pealt vaade

Lisa 4. Prototüüp raami tagant vaade

Lisa 5. Uue raami eestvaade

Lisa 6. Uue raami külgvaade

Lisa 7. Uue raami pealt vaade

Lisa 8. Uue raami tagant vaade