

Tairo Tee

**OK JA OK JUUNIOR KLASSI
VÕISTLUSKARDI RAAMIDE
VÄÄNDEJÄIKUSE MÕÕTMINE JA
ANALÜÜS**

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Autotehnika õppekava

Juhendaja: Raiko Annask

Tallinn 2021

Mina, Tairo Tee, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt. Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Raiko Annask /allkirjastatud digitaalselt/

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Tairo Tee sünnikuupäev: 29.11.1996 annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose:

OK ja OK juunior klassi võistluskardi raamide väändejäikuse mõõtmine ja analüüs

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. 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.

/kuupäev digiallkirjas/

/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	4
1. VÕISTLUSKARDI ERIPÄRAD VÕRRELDES SÕIDUAUTOGA.....	6
2. TONY KART.....	8
3. MÕÕTMISMEETODID	10
3. 1 Mõõtmispink	10
3. 2 Mõõtevahendid.....	11
4. KASUTATAV OMAVALMISTATUD NURGAMÕÕTJA.....	13
5. MÕÕTMISMETOODIKA.....	20
5. 1 Metoodika valideerimine.....	22
6. MÕÕTMISTE ANALÜÜS.....	26
KOKKUVÕTE.....	33
SUMMARY	35
VIIDATUD ALLIKAD.....	36
LISAD	38
LISA 1. MÕÕTESEADME PROGRAMMIKOOD	39
LISA 2. MÕÕTESEADME KARBI ALUMISE OSA JOONIS	41

SISSEJUHATUS

Lõputöö käigus mõõdetakse võistluskartide raamide väändejäikust ja analüüsitakse saadud tulemusi. Analüüsi tulemusena soovitakse teada saada, milline väändejäikuse suurus on kardispordis sobilik. Lisaks soovitakse aru saada väändejäikuse muutumisest kardi eluea jooksul, kuna see annab etappidel konkurentide ees eelise, võimaldades hoida raamid sobivas väändejäikuse vahemikus.

Võistluskart on ühekohaline kabiinita sõiduk, millel puudub vedrustus ja diferentsiaal. Kardil on neli ratast, millest kahte esimest kasutatakse suuna muutmiseks ning kahte tagumist kasutatakse läbi võlli veojõu edasi kandmiseks. Võistluskardiga sõidetakse erinevates klassides, kus kasutatakse erinevaid raame ning mootoreid. [1,2]

Võistluskardi juhitavuse eripäraks on vedrustuse ja diferentsiaali puudumine. Seega toimub rataste kontaktpinna muutus ning kaalu ümberjaotus läbi raami paindumise. Raami paindumise määra saab mõõta väändejäikusega. Diferentsiaali puudumise tõttu on kurvi kiireks läbimiseks vajalik kurvis ühe veoratta tõstmine, seega peab olema raam piisavalt jäik, et mitte vajuda läbi olukorras, kus kardi kaal jaotub tavapärase nelja ratta asemel kolmele rattale.

Lõputöös kasutatavaid raame kasutatakse OK ja OK Juunior klassis, klasside tehnilised nõuded on ühesugused, erinevad miinimumkaalu, sõitja vanuse ning mootori poolest [1]. Kardimeeskonnal on kasutusel tootja Tony Kart raamid. Esineb juhuseid, kus uus raam juba esimesel võistlusel ei ole soovitud juhitavusega. Erinevus toimiva ja mittetoimiva uue raami vahel võib olla kuni 0,2 sekundit ringi kohta. On pandud tähele, et suvisel perioodil toodetud raamide hulgas esineb üksikuid raame, mis ei toimi kohe alguses võrdväärselt teiste toodetud raamidega. See annab alust eeldada, et iga raam on tehast väljudes erineva väändejäikusega ning toodetud raamide seas esineb eksemplare, mis on võrreldes teiste raamidega ebavõrdses seisus. Erinevus väändejäikuses võib tuleneda tootmishoone sisetemperatuurist, mis suvisel perioodil ulatub kuni 40 plusskraadini, mille tagajärjel keevisliite omadused muutuvad ning muutub raami väändejäikus. Teiseks põhjuseks võib olla külmtõmmatud toru tootmisel tekkivad defektid, mis võivad toru omadusi muuta

Lõputöö ülesanne on leida moodus raami väändejäikuse mõõtmiseks, arendada välja mõõtemetoodika ja selle abil analüüsida uusi raame. Lisaks ka varem kasutatud raame ning amortiseerunud raame ja leida korrelatsioon raami väändejäikuse ja sõiduomaduste vahel. Selle abil saab juba uusi raame mõõtes ette näha, kui hästi need rajal hakkama saavad. Lisaks on võimalik pikema perioodi jooksul jälgida raami amortisatsiooni ja seeläbi vaadelda raami omadusi eluea

kestel. See võimaldab raami peale etappi mõõta ning selle põhjal analüüsida, kas antud raamiga on võimalik järgmisel etapil edukalt osaleda, või on vaja uut raami. Lõputöö käigus arendatakse välja raamide mõõtemetoodika, mille abil kardi raame mõõta. Kasutatakse kardi raami avariijärgsete deformatsioonide kõrvaldamiseks mõeldud pinki, millele kinnitatakse kardi raam.

Mõõtmisi teostatakse kahel viisil. Esimese viisina rakendatakse momenti mõlemale käändteljele, kuna see mõõteviis kirjeldab raami kui terviku suutlikust rakendatavale momendile vastupanu osutada. Teise viisina rakendatakse momenti vaid ühele raami käändteljele. See meetod kirjeldab raami esiosa omadust tekkivaid pingeid ühtlaselt ära jaotada.

Raami deformatsiooni mõõtmiseks kasutatakse kahte eri mõõtevahendit. Esimeseks on kõrgusnihik, millega mõõdetakse raami deformatsiooni enne ja peale momendi rakendamist. Saadud tulemuste põhjal arvutatakse väändejäikus. Teine mõõtevahend on isevalmistatud nurgamõõdik, millel on suutlikkus kuvada deformatsiooni nurka ja väändejäikust. Saadud tulemuste põhjal analüüsitakse, kas väändejäikus muutub kardi eluea jooksul, millises suunas see muutub ning kui suurel määral.

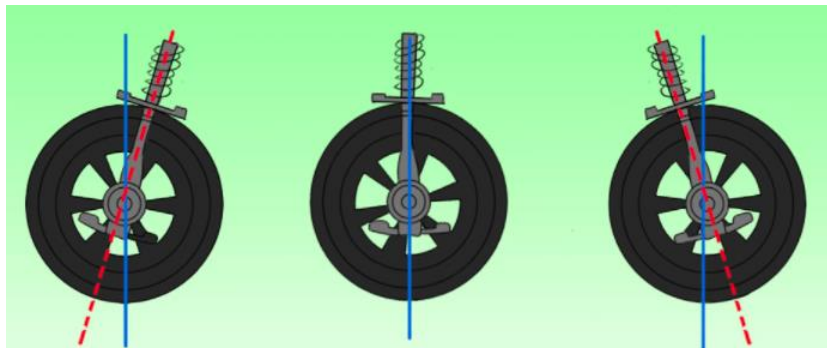
1. VÕISTLUSKARDI ERIPÄRAD VÕRRELDES SÕIDUAUTOGA

Kaheks suureks erinevuseks sõiduauto ning võistluskardi vahel on veermik ja jõuülekanne. Võistluskardil puudub vedrustus. Ehk siis ei ole õõtshoobasid, vedrusid, amorti. Olemas on stabilisaatorvarda ülesannet täitvad detailid. Sellest lähtuvalt toimub kardiga sõites vajalik kaalu ümberjaotumine läbi kardi raami väändumise, ehk kardi raam töötab väände. Väändumise määra saab mõõta väändejäikusega, mis kirjeldab keha vastupanumomenti väände.

Erinevalt sõiduautost, ei ole kasulik igal ajahetkel kardil kõiki nelja ratast maas hoida. Seda peamiselt diferentsiaali puudumise tõttu, mis välistab veoratastel erineva kiirusega pöörlemise. Veorattad tahavad hoolimata kõigest sama kiirusega pöörelda ka siis, kui kart kurvi läbib, sellest tekib tugev alajuhitavus.

Selle vältimiseks on kardi veermik disainitud nii, et kart läbiks kurvi kolmel rattal, tõstes tagumise siseratta õhku. See on saavutatud käändtelje pikikalde ja käänuraadiusega selliselt, et seisval kardil rooli kohapeal keerates kerkib üles välimine esiratas. Kurvi keerates tekkiva kaalu ümberjaotuse tagajärjel tekib olukord, kus kardi välimine esiratas vajutatakse vastu maad ning õhku tõuseb sisemine tagaratas.

Käändtelje pikikalle(Sele 1) põhjustab esirataste keeramisel üles-alla liikumise, kuna käändmik peab liikuma samal teljel käändteljega. Positiivse pikikalde puhul liigub keeramise puhul maapinna suhtes välimine ratas alati üles ja sisemine ratas alati alla. Negatiivse pikikalle omab vastupidist efekti, ehk välimine ratas liigub alla ning sisemine üles. Käändtelje pikikalle muudab ka roolitunnetust. Mida suurem on pikikalle, seda suurem on distants käändtelje maapinnaga lõikumispunkti ning rehvi kontaktpinna keskpunkti vahel külkvaates.



Sele 1. Käändtelje pikikalle. Vasakul on positiivne käändtelje pikikalle, keskel külgakalle puudub ning paremal on negatiivne käändtelje pikikalle [3]

Seeläbi suureneb ratta ja käändtelje vaheline jõuõlg ning ratta keeramise poolt mõjuvad jõud võimenduvad ning jõuavad suurema jõuga juhini. Võistluskardil reguleeritakse käändtelje pikikallet käändtelje juures asuvate eksentrikplaatidega(Sele 2).



Sele 2. Käändtelje pikikalde reguleerplaat [4]

Käänuraadius kirjeldab ratta kontaktpinna keskpunkti kaugust käändtelje ja maapinna löikumispunkti vahel eestvaates. See paneb paika, kui palju liigub ratas üles-alla kindla käändtelje pikikalde puhul. Kartidel reguleeritakse käänuraadiust käändmiku külge minevate distantssseibidega, mis muudavad ratta asukohta käändmiku suhtes(Sele 3).



Sele 3. Kardi käändtelg. *Distantssseibid pildil kollased* [5]

2. TONY KART

Tony Kart on OTK kart Group'i esindusbränd, mis tegeleb nii kartide varuosade, kui ka komplektsete kartide tootmisega Itaalias. Bränd sai alguse 1958, kui Antonio Bosio nägi pilte USA's isevalmistatud kardiraamidest ja soovis neid järgi teha. Firma arengus tuli suur läbimurre 1984, kui koliti vanast talutehnika müügisaalist uutesse ruumidesse, mis on kasutusel tänapäevani (Sele 4). Sellel ajaperioodil kasvas Itaalias huvi kartide vastu ja tänu laienemisele kasvas firma suurtootjaks kardimaailmas.



Sele 4. Tony Kart'i tootmishoone [6]

Tony Kart kartidele on iseloomulikuks tunnusjooneks rohelist värvi raamid. Roheline värv võeti kasutusele aastal 1986. Samal aastal võideti esimene maailmameistritiitel Tony Kart'i roolis Fabrizio Giovanardi poolt. Algselt oli Tony Kart vaid kardiraamide tootja ning karte ostsid üksnes üksiksõitjad. Ajavahemikul 1986 kuni 1989 saavutatud võidud Tony Kart kartidega andis olulise tõuke Tony Kart võidusõidutiimi, Tony Kart Racing asutamisele. Seal sõitsid ka oma karjääri algusaastatel vormelisõitjad Michael Schumacher ja Jarno Trulli. [7] [6]

Täna sel päeval toodab Tony Kart kuut erinevat raami:

- Racer 401R,
- Krypton 801R,
- Rookie 2020,
- Mini Kid,
- Micro,
- Viper. [8]

Lisaks toodetakse kõigile raamidele teisi sõiduks olulisi komponente:

- Veermikuosad,
- Pidurid,
- Jahutussüsteem,
- Mootorikinnitused, jm. [9]

Tony Kart ei tooda ise mootoreid. OTK grupis toodab mootoreid bränd Vortex. Peale eelmainitu toodetakse veel isiklikku sõiduvarustust – kombinesoonid, saapad, kindad. [10]

Tony Kart esindajateks Eestis on Triple Eight OÜ, kes tegutseb Kurnas ning TGT Racing Rae vallas. Raamid on toodetud kroom-molübdeenterasest ning toru läbimõõduks on 32 ja 30 mm, olenevalt kardi mudelist – Racer 401R kasutab 30mm toru ning Krypton 801R kasutab 32mm toru. Lõputöös uuritakse sõltuvalt raamide kättesaadavusest Racer 401R raame, mis vastavad OK ja OK Juunior klassi nõuetele. OK ning OK Juunior klassi nõuetele vastavad veel ka Krypton801R raamid. Klasside erinevus on seisneb mootorites tehnilistes tingimustes, juhtide vanusevahemikes ning miinimumkaalus. Kardi raami pikkus on mõlemal klassil vahemikus 1010 kuni 1070 mm ja kasutatakse 50mm tagavõlli, mis on õõnes ning on 1,9 mm seinapaksusega [1].

3. MÕÕTMISMEETODID

3.1 Mõõtmispink

Väändejäikuse mõõtmiseks kasutatakse olemasolevat kardi kerepainutuspinki(Sele 5), mille peamine eesmärk on avarijärgselt deformeerunud raami kuju taastamine avariieelsesesse olekusse. Pink võimaldab raami tagaosa jäigalt kinnitada ning esiosale avaldada momenti.



Sele 5. Kardi kerepainutuspink [11]

Momendi avaldamiseks kasutan pingiga koos käivat kangi, millel on olemas kinnitused raami esisilla käändmikute külge kinnitamiseks(Sele 6).



Sele 6. Kardi raamile momendi avaldamise kang

Raami esiosa toetamiseks on poolkuu kujuline klots, mida raami sirgeks painutamisel kasutatakse samuti raami toetamiseks(Sele 7). Raami on vajalik eest toetada ühest punktist, kuna vastasel juhul toetus terve esiosa vastu pinki ning see takistaks raami deformeerumist.



Sele 7. Raami toetamiseks kasutatud klots

3. 2 Mõõtevahendid

Mõõtmise eel oli valikus mitu erinevat varianti raami deformatsiooni mõõtmiseks. Esmane valik oli mõõta raami deformatsiooni indikaatorkella või kõrgusnihikuga (Sele 8) sõltuvalt deformatsiooni suurusest, seejärel arvutada trigonomeetriselt raami väändumise nurk. Meetodi eeliseks oleks suur täpsus vastavalt seadme täpsusele. Sõltuvalt seadmest 0,1 kuni 0,001mm. Puuduseks on, et mõõtmisest saadav info kirjeldab deformatsiooni millimeetrites ning deformatsiooni kraadides saamiseks on vaja teha lisaarvutusi, kus võib tekkida arvutusvigu. Antud meetodit kasutatakse põhilise mõõtmismeetodina ning teise meetodina kasutatakse omavalmistatud nurgamõõdikut.



Sele 8. Mõõtmisteks kasutatud kõrgusnihik.

Teine meetod oleks kasutada lasereid, millega oleks ruudulisele pinnale võimalik märkida lasertäpi asukoht enne ja pärast raskuse peale kandmist [12]. Antud meetod on oma sisseseadelt keerukas, kuna eeldab tulemuste saamiseks stendi, kuhu kinnitada ruuduline paber, kusjuures peab olema stend laseritega risti. Deformatsioon tuleb mõõta stendilt, mitte raamilt endalt, seega vähendab mõõteandmete täpsust ka lasertäppide asukoha märkimine. Antud meetod on oma olemuselt keerukas, vähese mobiilsusega ning kaheldava täpsusega. Seetõttu ka antud mõõtemetodit lõputöös ei kasutatud.

Kolmas lahendus on mõõta raami asendi nurka enne ja pärast momendi rakendamist. Mõõtmisi saab teostada Arduinoga, mis kasutab nurga määramiseks kiirendusandurit ning tulemuse kuvamiseks LCD-ekraani. Lahendus võimaldab teha lõppmõõtmised võimalikult kergeks, st saab vajalikud arvutused (jõuõla pikkus ning rakendatav koormus) Arduinosse sisse programmeerida. Seejärel mõõta deformatsiooni nurk ning sealt näha koheselt väändejäikuse näitu. Lisaks on tegu universiaalse lahendusega, kasutatav teiste analoogsete lahenduste puhul, kus on vaja mõõta konstruktsiooni väändejäikust. Lahenduse puhul on kõik tehted teostatud arduino poolt ning korrektuurid saab teha programmikoodis, kui tekib vajadus muuta anduri mõõtetäpsust, korrekture, jõuõla pikkust või rakendatavat raskust.

4. KASUTATAV OMAVALMISTATUD NURGAMÕÕTJA

Kõnealune lahendus koosneb Arduino Uno R3 mikrokontrollerist, LCD-ekraanist ning kiirendusandurist ADXL345. Lahendus kasutab omavaheliseks suhtluseks I²C protokoll. Arduino UNO R3 on Arduino poolt toodetav arendusplaat, mis põhineb ATmega 328P mikrokontrolleril. Arduinol on erinevaid sisend- ning väljundkontakte, mille abil on võimalik kontrollida erinevaid andureid, täitureid ning mooduleid. Erinevaid komponente kasutades saab Arduinot kasutada erinevates tehnilistes lahendustes juhtmoodulina. Mõnined näited:

- LED-pirnide kontroll,er,
- digitaalne malelaud,
- robotkäsi,
- kiipkaardi lugeja,
- suitsuandur,
- vee kvaliteedi mõõtja,
- joonistusrobot(mõtte edasiarendusena ka 3D printer, CNC pink) [13].

Antud lõputöös kasutati Arduinot järgenvate tooteomaduste tõttu:

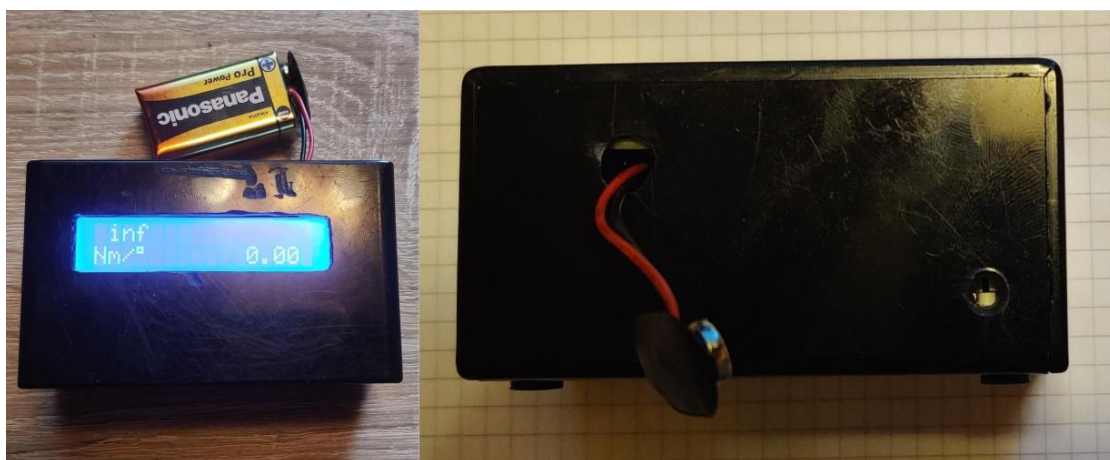
- I²C protokoll tugi erinevate seadmetega suhtlusel,
- füüsiline lähtestusnupp,
- lai pingevahemik väliste vooluallikate kasutamisel (soovituslik 7-12V),
- populaarne toode, seega suur kasutajate tugi. [14]

Lisaks oli Arduino kasuks varasemale kokkupuutele auto lisaseadmete õppeaines ning kuna oli otsustamise hetkel saadaolevatest arendusplaatidest odavaim, millel olid külge joodetud klemmid [15].



Sele 9. Arduino UNO R3 [16]

Kogu elektroonika paigutati karpi, mille algne eesmärk oli mahutada ära Arduino Uno ning sinna peale ethernet'i lisamoodul. Selline karp võeti kasutusse, kuna oli ostutoodetest sobivaim variant, kuna mahutas endasse ära Arduino ning oli veel lisaruumi LCD-ekraani ning kiirendusanduri jaoks. Karbile tehti juurde lisamodifikatsioone, et LCD-ekraanilt saaks infot jälgida, saada ligipääs füüsilisele lähtestusnupule ja oleks võimalik kasutada välist vooluallikat, mitte jääda sõltuvaks arvuti USB-pordist. Selleks tehti vajalikud tehnilised avad karbi külgedele(Sele 10) (Lisa 2).



Sele 10. Mõõteseadme karbile teostatud ümberehitused. Lisatud on kolm tehnilist ava. Avad on loodud ekraani, lähtestusnupu ning välise vooluallika kontaktidele ligipääsu hankimiseks.

Selleks tehti karbi pealmisele küljele LCD – ekraani suurusele vastav ava. Lähtestusnupule ligipääsu saamiseks puuriti nupu kõrvale tehniline ava, et seda nuppu oleks võimalik peenikese esemega, näiteks kruvikeeraja, vajutada. Välise vooluallika kasutamiseks puuriti samuti üks lisaava juhtmete karpi sisse viimiseks.

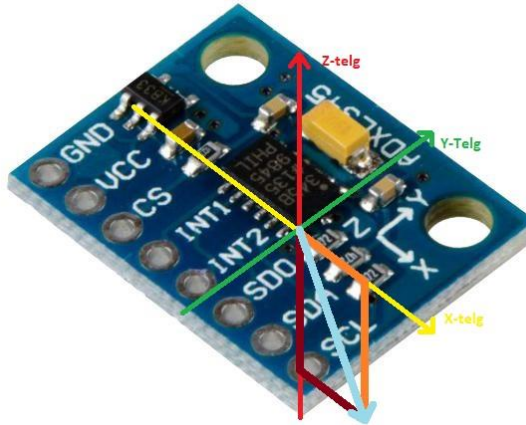
LCD-ekraani kasutatakse mõõtmistulemuste koheseks kuvamiseks. Kuna Arduinol ei ole andmete logimisfunktsiooni sisse ehitatud, oli ekraani kasutamisele alternatiiviks läbi USB liidese mõõtmistulemuste kuvamine läbi Serial monitor'i. Kuid mõõtmiste juures oleks läheduses olev arvuti koos USB kaabliga häiriv ja segav element, siis otsustati seadmele lisada ekraan ning jälgida mõõtetulemusi sealt. Ekraan on kaherealine, igal real 16 tähemärki, ehk kokku saab kuvada ekraanil korraga 32 tähemärki. Eeliseks teiste müügil olevate LCD-ekraanide ees on sellel ekraanil olev I²C moodul, mis võimaldab komponentide omavahelist lihtsat ühendust, tavalise 16 juhtme asemel kasutatakse 4 juhet [17].

I²C, ehk *inter-integrated circuit* ehk kahejuhtmeliides on erinevate elektroonikakomponentide suhtluseks kasutatav protokoll. Kahejuhtmeliides kasutab andmete edastamiseks ülem-alam loogikat, kus üks või mitu ülemkomponenti kontrollivad ühte või mitut alamkomponenti. Liides kasutab komponentide omavaheliseks suhtluseks kahte juhet: SCL ja SDA. SCL, ehk *Serial Clock* annab edasi andmete edastamiseks vajalikku sünkronisatsioonisignaali. Sünkronisatsioonisignaali genereeritakse alati ülemseadme poolt. SDA ehk *Serial Data* kannab edasi informatsiooni ning käsklusi ülem- ning alamkomponentide vahel [18].

I²C kasutamiseks on Arduinol olemas eraldi repositoorium, ehk dokumentatsioon funktsioonide kohta. Kuid kuna mõlemal alamkomponendil (kiirendusandur ning LCD-ekraan) olid olemas oma repositooriumid, mis olid lihtsamini kasutatavad, siis ei kasutatud antud seadmes üldist repositooriumit.

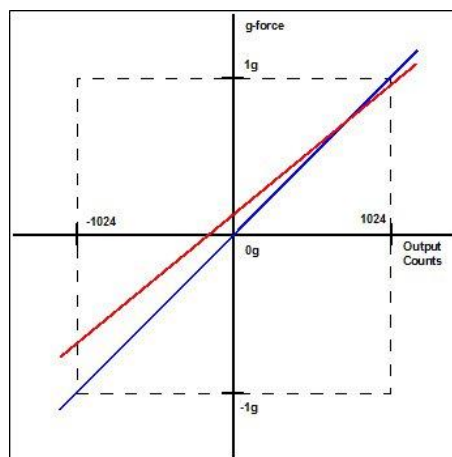
Kiirendusanduriks valiti Analog Devices'i toode ADXL345, peamiseks argumendiks oli hinna ja funktsionaalsuse suhe. Peamised lisafunktsioonid on anduri mõõtevahemiku neljaastmeline reguleerimine, kusjuures teised tol hetkel müüdavad alternatiivid võimaldavad muuta vaid kaheastmeliselt ning need astmed on liiga suure sammuga, et muuta mõõtetäpsust sobivaks.

Kiirendusandur mõõdab andurile mõjuvat raskuskiirendust anduri eri telgede suhtes. Seega, kui andur asetseb maapinna suhtes loodis, siis mõõdab andur Z-telje suhtes 1g ehk 9,81m/s². X- ja Y-telje väärtused on 0g. Kui anduri asend muutub loodtasapinna suhtes, väheneb Z- telje suunas mõjuv raskusjõud, ning suureneb mõne muu telje suunas(Sele 11). Teades seda, saab kasutada kiirendusandurit nurga muutuse määramiseks kasutades trigonomeetriat. Esmalt mõõta algne nurk etteantud telje suhtes ning peale koormise rakendamist mõõta hilisem nurk, ning sealt arvutada nurga muutus. See tagab andmete õigsuse ka mitteloodis tasapindadel ning ei ole vajalik mõõtmislaua loodimine.



Sele 11. Visuaalne kirjeldus kiirendusanduriga nurga mõõtmisele. Kollane, roheline ja punane joon kirjeldavad anduri telgi, Oranž ja tumepunane kirjaldavad mõõteandmeid nendes telgedes ja sinine on gravitatsioonivektor.

Anduri mõõtevigade korrigeerimiseks on vajalik kalibreerimine. Üks mõõtevea avaldumise viis on järgnev: andur võib näidata loodis pinnal mõne telje suunas raskusjõudu, kus ta ei tohiks seda näidata. See on tingitud valest nullpositsioonist. Teine viis on ebaõige väärtuste kasv raskusjõu muutudes. Illustratsioonil (Sele 12) on kujutatud mõlema mõõtevea kombinatsiooni. Sinise joonega on kujutatud reaalne raskusjõu muutus ning punasega on kujutatud mõõdetud raskusjõu muutus. Esimest liiki mõõtevea liiki kirjeldab nullkohtade erinevus. Teist kirjeldab punase joone madalam tõusunurk, läbi mille näidatakse $-1g$ palju madalama raskuskiirenduse juures, sealjuures $1g$ juures on erinevus väiksem.



Sele 12. Kiirendusanduri mõõtevea illustratsioon [19]

Kalibreeringu teostamiseks tuleb mõõta seadmega tegelikku $\pm 1g$ olukorda kõigis kolmes teljes. Mõõteseade tuleb paigutada igale kuuele küljele ning saadud tulemus salvestada. Saadud tulemusi kasutades leian väärtuste nihkekorrektuuri valemi(1) abil:

$$A_{off} [g] = 0.5 \times (A_{+1g} + A_{-1g}), \quad (1)$$

kus A_{off} – nihkekorrektuur

A_{+1g} – mõõteseadme näit telje positiivse telje suhtes

A_{-1g} – mõõteseadme näit telje negatiivse telje suhtes.

Tõusunurga korrektuur leitakse valemi (2) abil:

$$Tõus = 0.5 \times \left(\frac{A_{+1g} - A_{-1g}}{1g} \right), \quad (2)$$

kus $Tõus$ – tõusunurga korrektuur

A_{+1g} – mõõteseadme näit telje positiivse telje suhtes

A_{-1g} – mõõteseadme näit telje negatiivse telje suhtes

$1g$ – mõõteseadme teoreetiline näit 1g puhul.

Ülalolevatest valemitest saadud korrektuurid tuleb korrigeeritud tulemuste saamiseks teha valemi (3) järgi arvutus:

$$A_{tegelik} = (A_{out} - A_{off}) \times Tõus, \quad (3)$$

kus $Tõus$ – tõusunurga korrektuur

A_{out} – seadme korrigeerimata näit

A_{off} – seadme nihkekorrektuur antud teljes

$A_{tegelik}$ – korrigeeritud näit.

Antud korrektuurid tuleb läbi viia iga telje kohta eraldi.

Kiirendusandurist saadud info põhjal tuleb arvutada välja väändumise nurk. Selleks tuleb korrigeeritud tulemused panna valemisse (4) :

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_{X,väljund}^2 + A_{Y,väljund}^2}}{A_{Z,väljund}} \right), \quad (4)$$

kus ψ – nurk radiaanides

$A_{X, väljund}$ – kiirendusandurile mõjuv jõud X-telje suunas

$A_{Y, väljund}$ – kiirendusandurile mõjuv jõud Y-telje suunas

$A_{Z, väljund}$ – kiirendusandurile mõjuv jõud Z-telje suunas [20]

Kuna saadav tulemus on radiaanides, siis tuleb loetavuse lihtsustamiseks radiaanid teisendada kraadideks.

Arduino koodi sisestatakse konstantidena raskuse mass, gravitatsioonikonstant ning kangi pikkus, mille abil arvutatakse välja raamile rakendatav moment(5). Konstandid sisestatakse Arduinosse eraldi, kuna sel juhul saab lihtsasti koodis muudatusi teha, kui mõõtmiste käigus mõnda kolmest suurusel muudetakse.

$$M = m * g * l, \quad (5)$$

kus M – rakendatav moment, Nm-des

m – koormise raskus, kg-des

g – gravitatsioonikonstant(9,81m/s²)

l – kangi pikkus, m-des.

Rakendatava momendi ja väändumise nurga põhjal arvutatakse välja väändumise nurk valemiga(6):

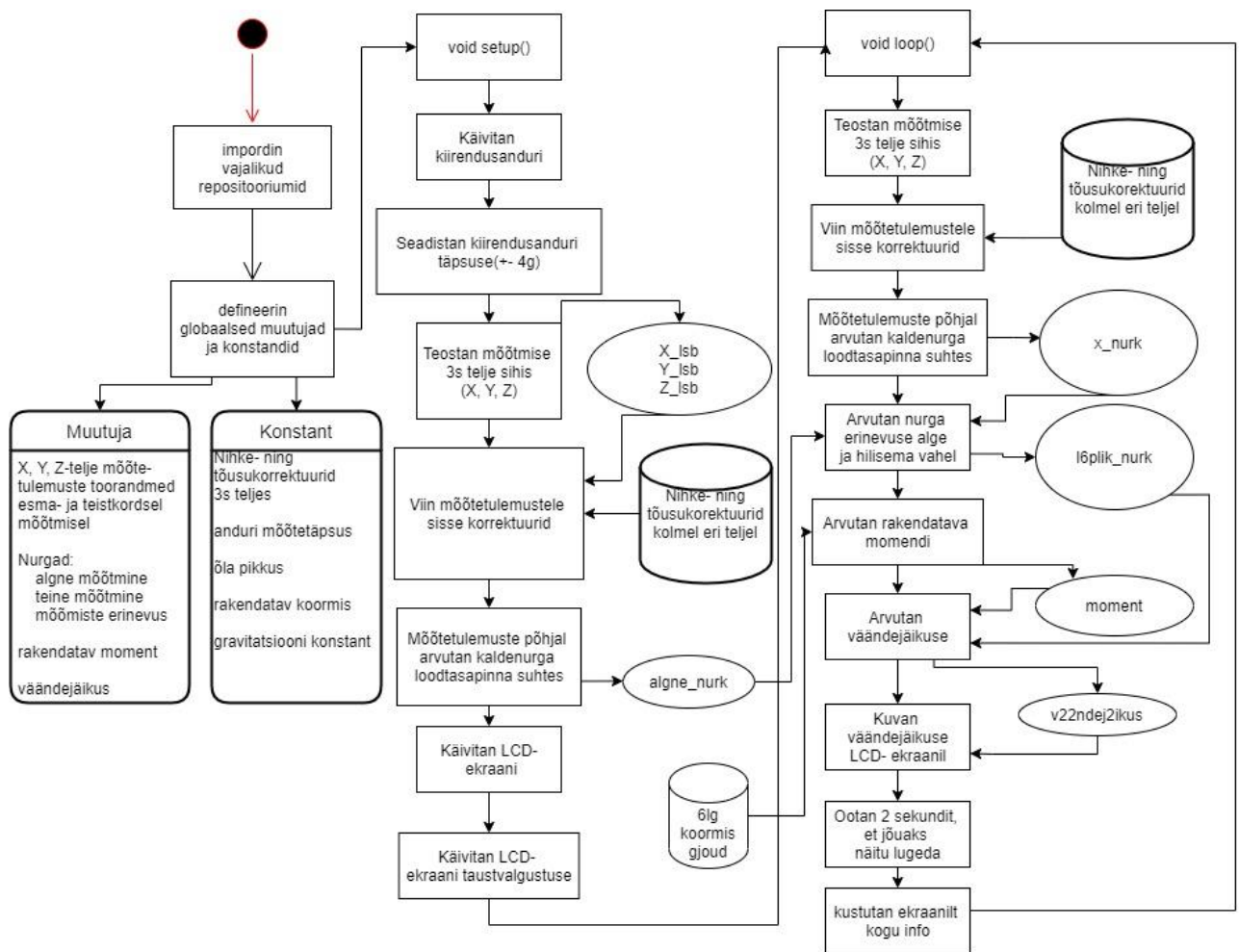
$$V_j = \frac{M}{\alpha}, \quad (6)$$

kus V_j – Väändejäikus, Nm/°

M – rakendatav moment, Nm-des

α – deformeerumise nurk, kraadides.

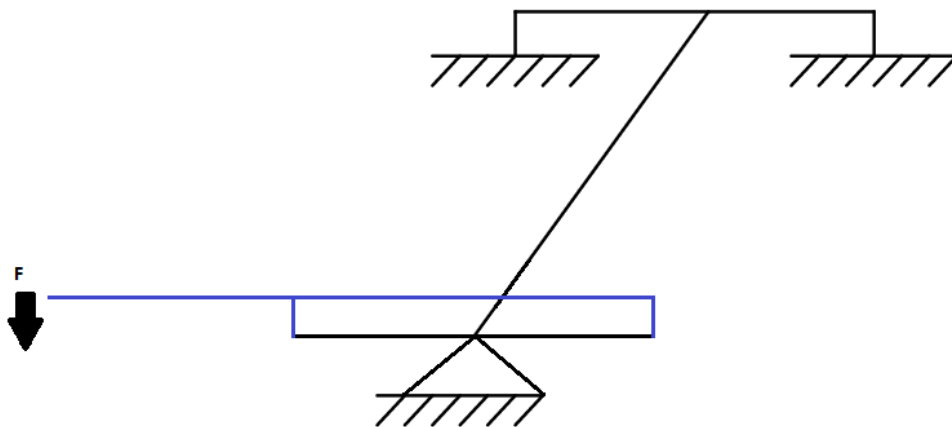
Arduino koodi eripäraks on *setup* ning *loop* funktsioonid, millel põhineb Arduino programmeerimine. *Setup*-funktsioon käivitatakse ühe korra seadme käivitamisel ning edaspidi hakatakse *loop*-funktsiooni kordama. See võimaldab Arduinoga mõõta nurka loodtasapinna suhtes enne koormamist, koormis rakendada ning seejärel mõõdab Arduino nurka peale koormise rakendamist. Seejärel saab koormatud raami nurgast lahutada koormamata raami ning saab teada, kui palju raam väändus. Varasemalt konstantidena kirja pandud jõuõla pikkuse ja rakendatava raskuse abil saab välja arvutada väändejäikuse. (Sele 13)



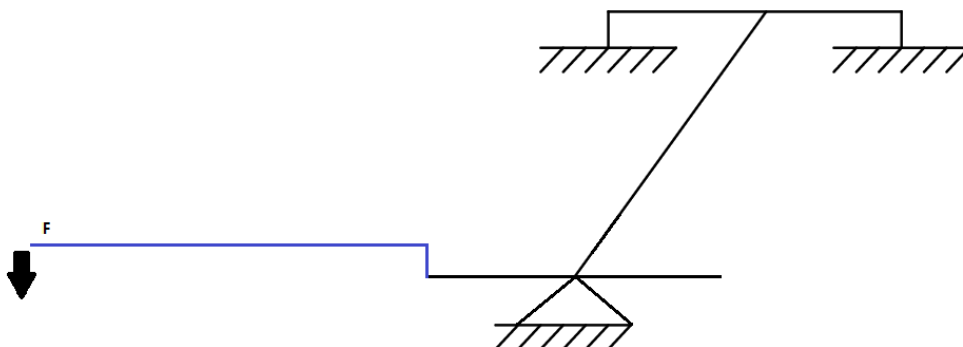
Sele 13. Mõõteseadme koodi UML plokk skeem

5. MÕÕTMISMETOODIKA

Raam kinnitatakse pingile jäigalt, fikseerides tagasilla võll selleks ettenähtud kõrvade vahele ning kinnitades mõlemad veosilla pooled, blokeerides nende liikumise edasi-tagasi suunas poldiga. Kasutades kangi, rakendatakse raamile momenti kahel viisil. Esimese meetodiga kinnitatakse kang mõlema käändtelje kinnituse külge ning avaldatakse momenti(Sele 14). See määrab kogu raami deformeerumise momendi rakendamise ajal. Teise meetodiga rakendatakse momenti vaid ühele käändtelje kinnitusele, ning kontrollitakse nihikuga raami deformatsiooni mõlemal käändtelje kinnitusel(Sele 15). Selle meetodiga selgub, kui edukalt suudab raam rakendatavat momenti raamis ära jaotada, st kui jäigalt on omavahel seotud mõlemad esirattad omavahel(Sele 15). Madal väändejäikus ehk suur deformatsioon tähendaks seda, et kardi kurvi liikumisel vajuks kardi esiosa läbi ning tagumine sisekurvipoolne ratas ei kerki piisavalt üles ning kart jääb alajuhitavaks, kuna kardi sisemine tagaratas ei tõuse piisavalt maast lahti.

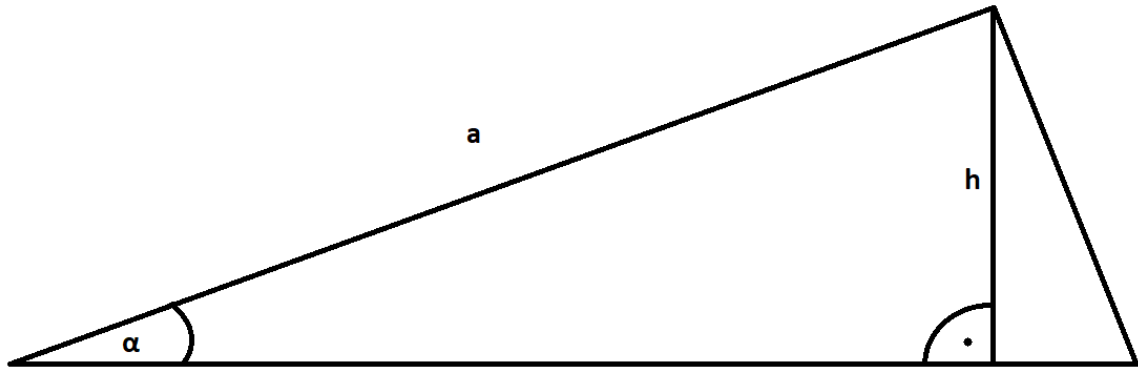


Sele 14. Raamile momendi avaldamine mõlemast käändteljest



Sele 15. Raamile momendi avaldamine ühest käändteljest

Mõlema meetodi puhul kontrollitakse raami deformeerimist kõrgusnihikuga. Iga raami puhul mõõdetakse kaugust käändtelje kinnitusest kuni raami esiosa toetava klotsi keskpunktini. Seejärel mõõdetakse kõrgusnihikuga koormamata raami käändtelje asukoht mõlemal pool. Peale koormise rakendamist mõõdetakse mõlema käändtelje kinnituse kõrgus ja arvutatakse koormatud ning koormamata asendi vaheline erinevus(Sele 16).



Sele 16. Raami mõõtes moodustuv võrdhaarne kolmnurk. a – käändtelje ja toetusklotsi vaheline distant, h –koormamata ning koormatud raami vaheline asukohtade erinevus mõõdetuna käändteljest, α – raami väändumise nurk.

Saadud andmete põhjal arvutatakse raami väändumise nurk kasutades trigonomeetriat.

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{h}{a}, \quad (7)$$

kus α – raami väändumise nurk

h – raami kõrguse muutus enne ja pärast koormamist

a – raami käändtelje ja toetusklotsi vaheline distant.

Teise mõõteseadmena kasutatakse omavalmistatud mõõteseadet, millega mõõdetakse raami deformeerumise nurka ning arvutatakse väändejäikus välja seadme siseselt. Antud mõõtmise puhul rakendatakse momenti kahest käändtelje kinnituspunktist ja seade asetatakse kardi roolivõlli tugitalale, mis asub raami pinnal loodtasapinnas(Sele 17). Tugitala on võimalikult lähedal momenti rakendavale talale, mis tagab võimalikult täpse mõõtetulemuse.



Sele 17. Roolivarda tugi. [21]

Mõlema meetodi puhul kasutatakse koormiseks riidest kotti, mille sisse on pandud 12,8 kg jagu tinaraskuseid - kolm raskust, mille ühe massiks 3 kg ja kaks raskust massiga 1,9 kg (Sele 18). Kasutatavaid raskusi kasutatakse kartidel ballastidena, kuna OK ja OK juunior klassides sõidavad teismeealised, kes võivad olla suurte kehamasside erinevusega ja nende abil antakse kardile nõutud miinimumkaal.



Sele 18. Kasutatud raskused. Vasakul on 1,9kg raskus ning paremal 3kg raskus.

5. 1 Metoodika valideerimine

Metoodikat on varasemalt kasutatud sõidukite raamide väändejäikuse mõõtmiseks [22]. Seega kasutatav meetodika vastab eesmärgile, st selle meetodiga on võimalik väändejäikust mõõta. Vaja on teada metoodika avastamispiiri, ehk vähim muudatus raami väändumises, mida on võimalik mõõta. Mõõtmisteks kasutatud kõrgusnihiku mõõtetäpsus on 0,05mm. Kui raami deformeerumist

mõõdetakse 360 mm kauguselt, siis vähim nurk, mida sel viisil on võimalik mõõta, on 0,0796 kraadi, ehk 28,65 minutit. Rakendades 12.8 kg suurust koormist 1950 mm kauguselt, nagu ka mõõtes väändejäikust, siis on väändejäikuseks 30 769 Nm/°. Mis oleks antud mõõtmisviisi puhul avastamispiir, millest suuremat väändejäikust ei saa tuvastada. Nurga mõõtmisel tekkiv mõõtemääramatus on 0,0079°, kuna minimaalne mõõdetav raami väändumine nihikuga on 0,05mm. Sellisel määral nihiku näidu muutus annab mõõtenurkade erinevuseks ligikaudu 0,0079°. Mõõtetulemuste kapriissuse määremiseks koostati arvutustabel(Tabel 1), kuhu pandi kirja ühe baasmõõtmise andmed ja hakati mõõtmise andmetega ühe parameetri kaupa manipuleerima ja vaatlema, kui suurel määral mõõtetulemused erinevad baasmõõtmisest. Selle tulemusena sooviti leida mõõtemetoodika robustsust.

Tabel 1. Kõrgusnihikuga mõõtmisvigadest tekkivate andmemoonutuste mõju lõpptulemusele

	Nihiku näit, mm	Kaugus, mm	Jõuõla pikkus, mm	Koor- mis, kg	Moment, Nm	Nurk, °	Vände- jäikus, Nm/°	Erinevus Nm/°	Erinevus , %
Baasnäit	8.1	360	1.95	12.8	244.86	1.29	190.0	0.0	0.00
Nihik +0.1 mm	8.2	360	1.95	12.8	244.86	1.30	187.7	2.3	1.22
Nihik -0.1 mm	8.0	360	1.95	12.8	244.86	1.27	192.3	-2.4	-1.25
Kaugus raami keskkohast +5mm	8.1	365	1.95	12.8	244.86	1.27	192.6	-2.6	-1.39
Kaugus raami keskkohast -5mm	8.1	355	1.95	12.8	244.86	1.31	187.3	2.6	1.39
Jõuõlg +5mm	8.1	360	1.96	12.8	245.49	1.29	190.5	-0.5	-0.26
jõuõlg - 5mm	8.1	360	1.95	12.8	244.23	1.29	189.5	0.5	0.26
Koormis +0,1kg	8.1	360	1.95	12.9	246.77	1.29	191.5	-1.5	-0.78
Koormis - 0,1kg	8.1	360	1.95	12.7	242.94	1.29	188.5	1.5	0.78

Tabelist ilmneb, et suurim üksik mõju mõõtmistulemusele on toetuspunkti ja momendi rakenduspunkti vaheline distant. 5mm eksimisega muutub arvutatava väändejäikuse suurus kuni 1,39%. Sarnane tabel koostati ka Arduino baasil mõõteseadme kohta, kuhu pandi kirja üks koormamata raami pealt teostatud mõõtmine ning üks koormatud raami pealt teostatud mõõtmine.

Seejärel hakati koormatud asendi mõõtmise erinevate komponentidega manipuleerima, tulemused on näha tabelis(Tabel 2).

Tabel 2. Arduino baasil mõõteseadme poolt tekkivate mõõtevigate mõju lõpptulemusele

	X	Y	Z	Jõuõla pikkus, m	Koormis, kg	Moment, Nm	Nurkade erinevus, °	V.jäikus, Nm/°	Erinevus Nm/°	Erinevus, %
Algne mõõtmine	0	0	256							
Baasmõõtmine	34	5	240	1.95	12.8	244.85	1.39146	175.9715		
X+5	35	5	240	1.95	12.8	244.85	1.49022	164.3092	11.66223	6.62
X-5	33	5	240	1.95	12.8	244.85	1.28512	190.5330	14.56151	6.27
Y+5	34	10	240	1.95	12.8	244.85	1.39056	176.0859	0.114432	0.06
Y-5	34	0	240	1.95	12.8	244.85	1.39176	175.9333	0.038160	0.02
Z+10	34	5	250	1.95	12.8	244.85	1.36309	179.6345	3.663072	2.08
Z-10	34	5	230	1.95	12.8	244.85	1.42104	172.3084	3.663009	2.08
Jõuõlg+5mm	34	5	240	1.96	12.8	245.48	1.39146	176.4227	0.451209	0.25
Jõuõlg-5mm	34	5	240	1.95	12.8	244.22	1.39146	175.5203	0.451209	0.25
Koormis+0,1kg	34	5	240	1.95	12.9	246.77	1.39146	177.3462	1.374777	0.78
Koormis-0,1kg	34	5	240	1.95	12.7	242.94	1.39146	174.5967	1.374777	0.78

Tabelist on näha, et Arduinol põhinev mõõteseade on antud mõõtepiirkonnas kõige tundlikum X-telje suunaliste mõõtevigade suhtes. 5-ühikulise muutuse puhul erineb mõõtetulemus ligikaudu 6,62%. Samuti on seade üsna tundlik Z-teljelise mõõtevea suhtes, ligikaudu 2%. Muude komponentide muutuse vastu on mõõteseadme tundlikkus alla 1%.

6. MÕÕTMISTE ANALÜÜS

Mõõtmises osales 11 raami, millest kaheksa olid mõõtmise hetkel uued raamid, kolm raami olid kasutatud läbitud etappe vahemikus 8 kuni 18 (Tabel 3). Tabelis on kirjas ka kommentaarid sooritusvõime kohta kasutatud raamide puhul ja uute raamide puhul, millega on tehtud esimesed sõidud enne lõputöö valmimist.

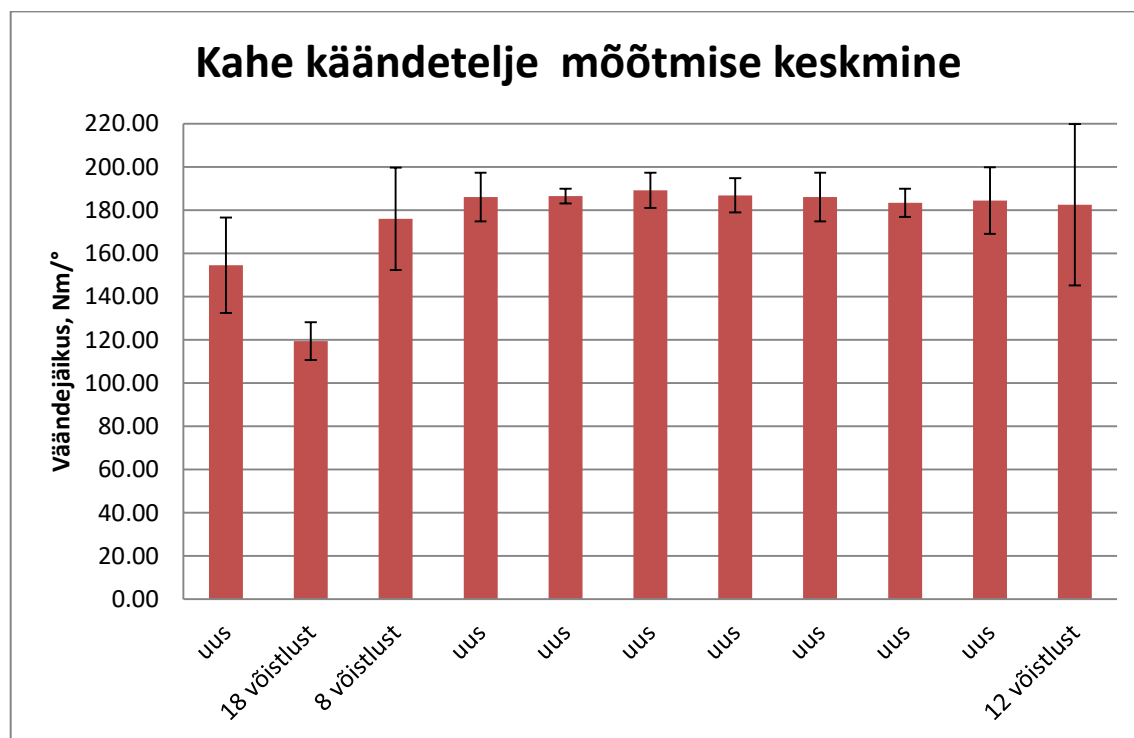
Tabel 3. Raamide seerianumbrid, vanused ja kommentaarid

Raami seerianumber	Raami vanus
CY 72421	Uus
BY 75395	18 etappi, ei kasutata suuretappiel
CY 60348	8 etappi, rajal närviline
CY 71066	Uus
CY 75331	Uus, toimis hästi
CY 75340	Uus, toimis hästi
CY 75233	Uus
CY 75389	Uus
CY 72859	Uus
CY 72766	Uus
CY 60335	12 etappi, toimib hästi

Raami deformeerumised olid vahemikus 6,1 kuni 13,0 mm, seega kasutati deformatsiooni mõõtmiseks kõrgusnihikut mõõtetäpsusega 0,1mm, mitte indikaatorkella, kuna olemasoleva indikaatorkellaga ei olnud võimalik mõõta suuremaid deformatsioone, kui 10mm.

Mõõtmistulemusi vaadeldes saab täheldada, et raamide väändejäikus langeb kasutuses oldud aja, ehk raamid, mis on juba kasutuses olnud, on madalama väändejäikusega, kui uued raamid. Kasutatud raamide puhul on raske antud raamide näol teha põhjanevaid järeldusi raami omaduste halvenemise kiiruse kohta ajas, kuna raam, mis on sõitnud 12 etappi, on suurema väändejäikusega, kui raam, mis on sõitnud 8 etappi. 12 etappi sõitnud raam erineb uute raamide väändejäikusest 0,5 kuni 3,7% sõltuvalt uuest raamist. Lisaks on raami kohta saadaolevad kommentaarid positiivsed. Selle alusel saab eeldada, et raami väändejäikus ja sõiduomadused on omavahelises seoses. Kasutatud raamide puhul muudab seose leidmise raskeks nende varasem ajalugu. Teadmata on hetkel, kas kardid on sõitnud samadel radadel, kas on olnud avariisid, kas mõni etapp on poolikuks jäänud vms.

Graafikult on näha, et üks uus raam, seerianumbriga CY 72421, on teistest uutest raamidest märgatavalt väiksema väändejäikusega (Sele 19). Raam erineb teistest uutest raamidest oma väändejäikusega ligikaudu 17%. See annab alust arvata, et mõõdetud raamide hulka on sattunud üks uus raam, mis juba ostes on teistest madalama väändejäikusega ning on teiste raamidega võrreldes ebavõrdses seisus.



Sele 19. Graafik mõõtmisandmete tulemusest esimese mõõtmismeetodiga.

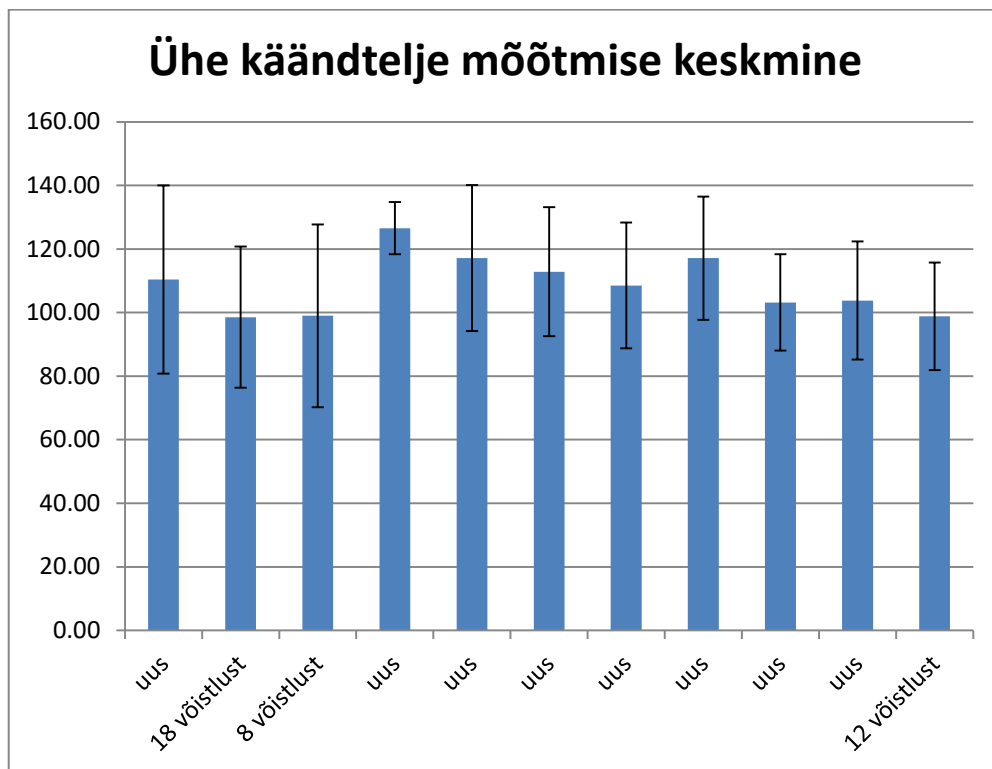
Kui välja arvata üks uus raam, mille väändejäikus on teistest kardinaalselt väiksem, siis uute raamide keskmiseks väändejäikuseks on 182,09 Nm/°. Kui arvata kaasa ka raam, mis juba uuena on väiksema väändejäikusega, siis oleks uute raamide keskmiseks väärtuseks 185,54 Nm/°.

Konkreetne raam on ka kahest kasutatud raamist madalama väändejäikusega, erinevuseks 12%. Ainus raam, millel on väiksem väändejäikus, on raam, mille ajalugu on teadmata (Tabel 4).

Tabel 4. Raamide väändejäikuste erinevuste võrdlus protsentides, kasutades esimest mõõtmismeetodit

	CY 72421 Uus	BY 75395 18 etappi	BY 60348 8 etappi	CY 71066 Uus	CY 75331 Uus	CY 75340 Uus	CY 75233 Uus	CY 75389 Uus	CY 72859 Uus	CY 72766 Uus	CY 60335 12 etappi
CY 72421 Uus		-29.3	12.2	17.0	17.2	18.3	17.3	17.0	15.8	16.3	15.4
BY 75395 18 etappi	22.7		32.1	35.8	36.0	36.8	36.1	35.8	34.9	35.2	34.5
BY 60348 8 etappi	-13.9	-47.3		5.4	5.7	7.0	5.8	5.4	4.1	4.6	3.6
CY 71066 Uus	-20.5	-55.7	-5.7		0.3	1.6	0.4	0.0	-1.4	-0.9	-2.0
CY 75331 Uus	-20.8	-56.2	-6.0	-0.3		1.4	0.1	-0.3	-1.7	-1.1	-2.2
CY 75340 Uus	-22.5	-58.3	-7.5	-1.7	-1.4		-1.2	-1.7	-3.1	-2.5	-3.7
CY 75233	-21.0	-56.4	-6.2	-0.4	-0.1	1.2		-0.4	-1.9	-1.3	-2.4
CY 75389 Uus	-20.5	-55.7	-5.7	0.0	0.3	1.6	0.4		-1.4	-0.9	-2.0
CY 72859 Uus	-18.7	-53.5	-4.2	1.4	1.7	3.0	1.8	1.4		0.6	-0.5
CY 72766 Uus	-19.4	-54.4	-4.8	0.9	1.1	2.5	1.3	0.9	-0.6		-1.1
CY 60335 12 etappi	-18.1	-52.7	-3.7	1.9	2.2	3.5	2.3	1.9	0.5	1.1	

Teist mõõtemetodit kasutades ilmnes, et sarnaselt eelmisele mõõtmismeetodile, on uutel raamidel suurem väändejäikus (Sele 20).



Sele 20. Graafik mõõtetulemustest kasutades teist mõõtemetodit.

Selle mõõtemetodiga mõõtes on uute raamide väändejäikused suurema erinevusega, ning vanade ja uute raamide väändejäikuste erinevus on väiksem. Graafikust saab välja lugeda, et selle mõõtemetodiga mõõtes on kõik kasutatud raamid madalama väändejäikusega, kui uued raamid. Siiski oli üsna kaootiline erinevus raamidel kahe käändtelje vaheline erinevus, mis ei olnud seotud raamide vanusega. Erinevus oli vahemikus 6% kuni 29 %.

Kasutatud raamide omavaheline kõikumine on märgatavalt väiksem, kuni 0,4%, võrreldes uute raamidega, mille omavaheline kõikumine on kuni 22,8%(Tabel 5).

Tabel 5. Kardiraamide väändejäikuste erinevus protsentide, kasutades teist mõõtmismeetodit

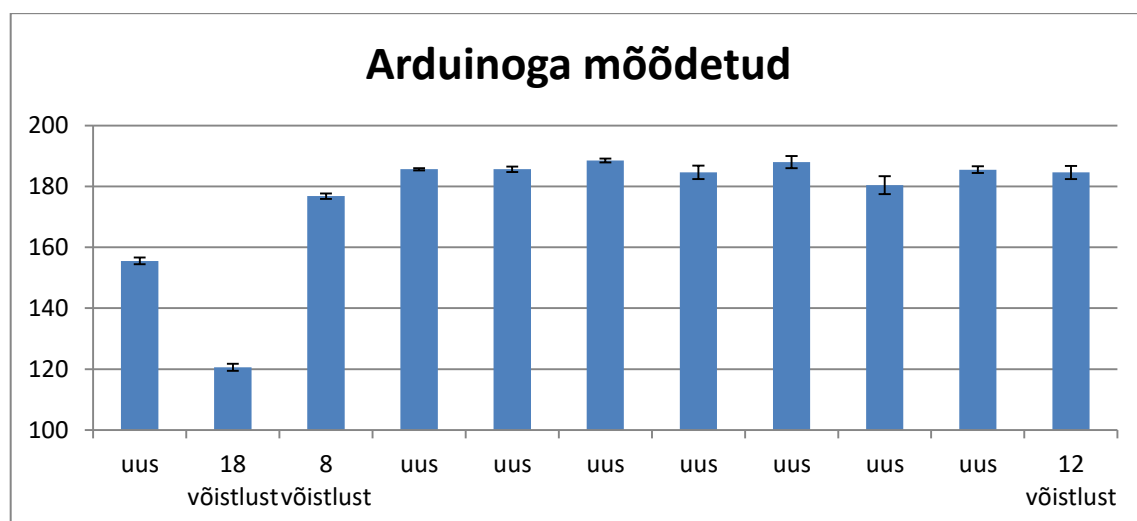
	CY 72421	BY 75395	BY 60348	CY 71066	CY 75331	CY 75340	CY 75233	CY 75389	CY 72859	CY 72766	CY 60335
CY 72421		-12.01	-11.52	12.77	5.79	2.18	-1.73	5.74	-7.01	-6.36	-11.70
BY 75395	10.72		0.44	22.13	15.89	12.67	9.18	15.84	4.46	5.05	0.27
BY 60348	10.33	-0.44		21.79	15.52	12.29	8.78	15.47	4.05	4.63	-0.16
CY 71066	-14.65	-28.42	-27.86		-8.01	-12.15	-16.63	-8.07	-22.68	-21.94	-28.06
CY 75331	-6.15	-18.89	-18.38	7.41		-3.83	-7.98	-0.06	-13.59	-12.90	-18.57
CY 75340	-2.23	-14.51	-14.01	10.83	3.69		-4.00	3.63	-9.40	-8.73	-14.19
CY 75233	1.70	-10.11	-9.63	14.26	7.39	3.84		7.34	-5.19	-4.55	-9.81
CY 75389	-6.08	-18.83	-18.31	7.47	0.06	-3.77	-7.92		-13.52	-12.83	-18.50
CY 72859	6.55	-4.67	-4.22	18.49	11.96	8.59	4.94	11.91		0.61	-4.39
CY 72766	5.98	-5.31	-4.85	17.99	11.42	8.03	4.35	11.37	-0.61		-5.02
CY 60335	10.48	-0.28	0.16	21.91	15.66	12.43	8.93	15.61	4.20	4.78	

Erinevus kõrgusnihiku ning omavalmistatud mõõteseadme vahel kõigub vahemikus -1,17% kuni 1,17%(Tabel 6).

Tabel 6. Kahe erineva mõõtmisvahendi mõõteerinevus kasutades sama mõõtmismeetodit.

	Arduinoga mõõdetud	Kõrgusnihikuga mõõdetud	Erinevus	%
CY 72421	155.55	154.43	1.12	0.72
BY 75395	120.62	119.44	1.18	0.99
BY 60348	176.82	175.94	0.88	0.50
CY 71066	185.62	186.02	-0.40	-0.21
CY 75331	185.65	186.53	-0.88	-0.47
CY 75340	188.48	189.10	-0.62	-0.33
CY 75233	184.62	186.80	-2.18	-1.17
CY 75389	187.99	186.02	1.97	1.06
CY 72859	180.43	183.37	-2.94	-1.60
CY 72766	185.49	184.42	1.07	0.58
CY 60335	184.58	182.44	2.14	1.17

Tabelist on näha, et mõõtmisvahendite omavaheline mõõteerinevus kõigub 0,21 ning 1,8% vahel(Sele 21). Tabeli põhjal saab järeldada, et mõõteerinevusest leitav mõõteviga on piisav, et omavalmistatud nurgamõõtjaga ei ole võimalik omavahel võrrelda uusi raame, kuna raamide väändejäikuste erinevus on väiksem, kui mõõteviga. Samuti saab järeldada, et mõõteseade on piisavalt suure täpsusega, et eristada uusi raame kasutatud raamidest.



Sele 21. Arduino ja kõrgusnihiku mõõteerinevuste tabel. *Error bar*'id kujutavad erinevust kõrgusnihiku ning Arduino näidu vahel.

Analüüsi tulemusest saab järeldada, et uute toimivate raamide väändejäikus jääb vahemikku 180 – 189 Nm/°. Uute raamide väändejäikus, mis jääb alla selle, saab lugeda tootmisprotseduuri käigus tekkinud hälvete tõttu madalama sooritusvõimega raamiks. Kasutatud raamid on veel kasutatavad, kui nende väändejäikus on vähemalt 176 Nm/°, kuid on juba tunda muutusi raami käitumises. Mõõdetud kasutatud raamide põhjal ei saa täpsemalt välja tuua, milline on seos sõidetud etappide ning väändejäikuse langusega. Andmete täpsemaks analüüsiks on vajalik suurema arvu raamide mõõtmine, mis on erineva ajalooga. Lisaks annab infot juurde sama raami mõõtmine peale iga etapi läbimist, et saada aru, kuidas väändejäikus muutub ajas.

KOKKUVÕTE

Lõputöös uuriti OK ning OK junior klassi nõuetele vastavate võistluskardi raamide väändejäikust. Töös arendati välja mõõtemetoodika, mille alusel mõõtmisi teostada. Mõõtmiseks kasutati kardi avariijärgsete deformatsioonide parandamiseks mõeldud vahendeid. Nendeks olid kerepainutuspink, mille külge kart tagaosa pidi kinnitati, Kang, millega avaldada momenti kardi raamile ning klots, millega toetati esiosa, et see ei toetaks suure toetuspinnaga vastu lauda ning laud ei takistaks raami deformeerumist. Mõõdeti kahe meetodi abil. Esimese meetodi abil mõõdeti, kui jäik on raam tervikuna, selleks rakendati momenti raami mõlemale käändteljele kinitusele. Teist meetodit kasutati raami esiosas pingete jaotumise suutlikuse mõõtmiseks.

Mõõtmisteks kasutati kahte mõõteseadet. Esimeseks mõõteseadmeks oli kõrgusnihik. Algne plaan oli kasutada indikaatorkella, kuid raamid deformeerusid mõõtmiste käigus nii suurel määral, et indikaatorkella kasutamine osutus tarbetuks. Raamid deformeerusid suurusjärgus ligikaudu 6 kuni 11 millimeetrit, mis on ebamõistlikult suur deformatsioon indikaatorkellaga mõõtmiseks, mille täpsus on vahemikus 0,01 mm. Selle asemel kasutati kõrgusnihikut, millega sai mõõta deformatsiooni täpsusega 0,1 mm. Teine mõõteseade oli omavalmistatud mõõteseade, mis põhines Arduino arendusplaadil.

Mõlema mõõteseadme puhul arvutati välja mõõtemääramatus, mis tuleneb inimveast või anduri mõõteveast. Selgus, et kasutades mõõtenihikut, on suurim tekkiv mõõteviga 1,39%. Kasutades omavalmistatud nurgamõõtjat, on võimalik suurim mõõteviga 6,6%. Antud mõõtmiste käigus mõõtetulemusi võrreldes osutus siiski tulemuste erinevuseks 1,8%. Omavalmistatud nurgamõõtja puhul ei saa sõltuvalt mõõteveast olla kindel, et nurgamõõtja suudab eristada üht uut raami teisest, kuna uute raamide väändejäikuste erinevus on väiksem, kui omavalmistatud nurgamõõtja mõõtemääramatus. Küll aga on omavalmistatud nurgamõõtja piisavalt täpne, et eristada uut raami kasutatud raamist.

Mõõtetulemuste põhjal saab järeldada, et raamid kaotavad väändejäikust aja jooksul, kuna kasutatud raamidel oli väändejäikus madalam, kui enamustel uutel raamidel. Uute raamide hulgas oli ka üks raam, mis oli teistest uutest raamidest kardinaalselt madalama väändejäikusega, 17-18% erinevusega, sõltuvalt, millise uue raamiga võrrelda. Ülejäänud kasutatud raamid erinesid üksteisest 0,3 – 1,6%. See annab alust arvata, et mõõdetud raamide seas oli ka üks raam, mis on juba uuena teistest madalama väändejäikusena ning ei toimi teiste uute raamidega võrdväärselt.

Antud mõõtmise raames ei saa luua seost läbitud etappide ning väändejäikuse langemisega, kuna valimis oli liiga vähe raame ning väändejäikus ei muutunud lineaarselt sõidetud etappidega võrreldes.

Edaspidi oleks vaja kindlasti suurendada mõõdetavate raamide hulka, et oleks rohkem andmeid, mida võrrelda. Uue ning juba kasutatud raami väändejäikuse erinevuse määramiseks on vaja mõõta raame, mis on läbinud vaid ühe võistluse. Samuti oleks soovituslik mõõta mitut raami kogu eluea kestel, st igal võistlusel. Lisaks võimaluse korral võrrelda ka ringiaegu samal rajal raamide eluea kestel.

SUMMARY

The following thesis *Measurement and Analysis of OK and OK Junior Class Go-Kart Frame's Torsional Rigidity* had the aim to develop methodology to measure go-kart's torsional rigidity, carry out measurements and analyse said results. Reason to start a thesis on subject was due to lack of information available about go-karts torsional rigidity despite that go-kart's frame is a very important component of it's suspension.

According to FIA regulations, go-karts are not allowed to have any type of suspension. Thus, any required bump absorption is carried out by the frame. Another key feature that distinguishes go-kart from a passenger kas is a lack of a differential, also prohibited by FIA. Driving force of the engine is transferred to rear wheels via an axle shaft. This creates a situation where going into a corner, kart is severely understeering because both drive wheels are spinning at the same speed, thus wishing to push the kart forwards. To solve that, the steering geometry is set to lift the outer front wheel when stationary. Due to weight transfer the outer front wheel is forced against the road and inner rear wheel is lifted from the ground and the kart drives through the bend on three wheels.

Measuring is carried out with a measurement test bench, a lever and a block commonly used to straighten the frame after a collision or a similar incident. Devices used to measure frame's deformation and thus torsional rigidity were a height caliper and a selfmade inclinometer made on the base of an Arduino development board.

Two different methods of measurement was used. First method consisted of applying torque to both of the kingpins and then measuring deformation from both kingpins of the frame. This method shows, how well frame's handle applied torque as a whole. During the second method torque is applied to only one kingpin and deformation is measured from both kingpins. This shows how well are the left and right side front wheels connected.

Measuring data shows that there torsional rigidity does change over time. The more a frame has driven the lower torsional rigidity it has. However there was also one new frame that had considerably lower torsional rigidity. This can happen from improper quality of the cold-drawn tube that is used to manufacture the frame or from welding defects due to unusually hot ambient temperatures in the manufacturing facility. More accurate conclusions about the decrease of torsional rigidity per driving session cannot be made due to the low number of measured frames. It can be said, that there is no linear relation between torsional rigidity and driven driving sessions.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] FIA. (2021, Aprill) FIA karting. [Online]. https://www.fiakarting.com/sites/default/files/2021-03/6.0_RT2021.pdf
- [2] (2021, märts) Eesti kardiliit. [Online]. <http://www.kart.ee/kuidas-alustada/>
- [3] Robert Tomashek. (2021, aprill) How to Know if You Need a Wheel Alignment. [Online]. <https://www.yourmechanic.com/article/how-to-know-if-you-need-a-wheel-alignment-by-robert-tomashek>
- [4] Tony Kart. (Aprill, 2021) Stub Axles and Accessories - 0211.D0KIT. [Online]. https://www.tonykart.com/parts-dettaglio_en.php?ID_prodotto=1840&ID_categoria=12&ID_macrocategoria=2
- [5] Tony KArT. (2021, Aprill) Stub Axles and Accessories - 0092.00CSXKIT. [Online]. https://www.tonykart.com/parts-dettaglio_en.php?ID_prodotto=1416&ID_categoria=12&ID_macrocategoria=2
- [6] (2021, märts) Tony Kart. [Online]. https://www.tonykart.com/marchio_en.php
- [7] Flow Racers. (2021, Aprill) Flow Racers. [Online]. <https://flowracers.com/blog/tony-kart-go-karts-history-review/>
- [8] Tony Kart. (2021, Märts) Tony Kart Chassis. [Online]. https://www.tonykart.com/telai_en.php
- [9] Tony Kart. (2021, Märts) Tony Kart Spare Parts. [Online]. https://www.tonykart.com/parts_en.php?ID_macrocategoria=2
- [10] (2021, Märts) Tony Kart Sportswear. [Online]. https://www.tonykart.com/wear_en.php?ID_macrocategoria=1&ID_categoria=4
- [11] PicClick UK. (2021, aprill) Kart chassis straightening,alignment,jig table honda cadet,Tkm,rotax,Otk,iame. [Online]. <https://picclick.co.uk/Kart-chassis-straighteningalignmentjig-table-honda-cadetTkmrotaxOtkiame-202509418947.html>
- [12] Sergio Anibal Rodriguez, Robert Michael Walsh, Dr. David Wootton Amy Elizabeth Chambers, "Development of a Test Stand for Determining the Torsional Rigidity of a Formula SAE Space Frame," Cooper Union, New Orleans, 2016.
- [13] Ankush Das. (2021, Mai) 17 Cool Arduino Project Ideas for DIY Enthusiasts. [Online]. <https://itsfoss.com/cool-arduino-projects/>
- [14] Arduino. (2021, Aprill) Arduino - ArduinoBoardUno. [Online]. <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/arduinoBoardUno>

- [15] Oomipood. (2021, märts) Arduino arendusplaadid - Oomipood. [Online].
https://www.oomipood.ee/category/robootika_ja_konstruktorid/arduino/arduinoarendusplaadi/?sort=p.price&order=ASC
- [16] pololu. (2021, Aprill) Pololu - Arduino Uno R3. [Online].
<https://www.pololu.com/product/2191>
- [17] Oomipood. (2021, Aprill) LCD ekraan sinine 1602 IIC/I2C mooduliga 5V - Oomipood. [Online].
https://www.oomipood.ee/product/lcd_disp_module_lcd_ekraan_sinine_1602_iic_i2c_mooduliga_5v
- [18] Scott Campbell. (2021, Aprill) BASICS OF THE I2C COMMUNICATION PROTOCOL. [Online].
<https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/#:~:text=I2C%20is%20a%20serial%20communication,always%20controlled%20by%20the%20master.>
- [19] Gulf Coast Data Concepts. (2021, Märts) Gulf Coast Data Concepts, LLC. [Online].
<http://www.gcdataconcepts.com/calibration.html>
- [20] Christopher J. Fisher. (2021, Märts) Analog Devices. [Online].
<https://www.analog.com/en/app-notes/an-1057.html#>
- [21] Zip North. (2021, Aprill) Tony Kart Racer 401 - Rolling Chassis - Zip North. [Online].
<https://www.zipnorth.com/product/tony-kart-racer-401/>
- [22] Hendrik Tasa, "Ringraja auto prototüübi moderniseerimine," Mai 2014.

LISAD

Lisa 1. Mõõteseadme programmikood

Lisa 2. Mõõteseadme karbi alumise osa joonis

Lisa 1. Mõõteseadme programmikood

```
#include <SparkFun_ADXL345.h>           //impordin repositooriumid
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
ADXL345 adxl = ADXL345();              //Kasutan I2C protokolliga anduri ja LCD'ga suhtlemiseks
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16,2);      //määran lcd aadressi ning pikslite arvu

float x_g;                             //muutujad G'des
float y_g;
float z_g;

#define offsetX    -2                  // OFFSET korrektsioonid
#define offsetY    1.5
#define offsetZ    -6

#define gainX      1.09375             // GAIN korrektsioonid
#define gainY      1.078125
#define gainZ      1

#define lsb2g 0.0078
#define andurit2psus 4

float x_alg_g;                         //koormamata tulemuse mõõtetulemused G'des
float y_alg_g;
float z_alg_g;

float x_alg_lsb_k;
float y_alg_lsb_k;
float z_alg_lsb_k;

float x_lsb_k;
float y_lsb_k;
float z_lsb_k;

float x_algne_nurk;                   //algse mõõtmise tulemus
float x_nurk;                         //koormatud mõõtmise nurga tulemus

float l6plik_nurk;                   //mõõdetud nurkade erinevus

float ola_pikkus = 1.95;              //jõuõla pikkus meetrites
int koormus = 12.8;                   //rakendatav koormus kg'des
int gjoud = 9.81;
float moment;                         //rakendatav moment
float v22ndej2ikus;                  //väändejäikus

float keskmine = 0;

void setup() {

  adxl.powerOn();                     //Lülitan mooduli sisse

  int x_alg_lsb,y_alg_lsb,z_alg_lsb;  // Defineerin muutujad mõõtmistulemuste jaoks
  adxl.readAccel(&x_alg_lsb, &y_alg_lsb, &z_alg_lsb); //Teostan nullmõõtmise
                                          //algväärtuste saamiseks

  x_alg_lsb_k = (x_alg_lsb - offsetX) / gainX;
  y_alg_lsb_k = (y_alg_lsb - offsetY) / gainY;
```

```

z_alg_lsb_k = (z_alg_lsb - offsetZ) / gainZ;

x_alg_g = x_alg_lsb_k*lsb2g;           //teisendan mõõteandmed G-desse
y_alg_g = y_alg_lsb_k*lsb2g;
z_alg_g = z_alg_lsb_k*lsb2g;

x_algne_nurk = (atan(sqrt(pow(x_alg_g, 2) + pow(y_alg_g, 2))/z_alg_g))*57296/1000;
//arvutan nurga kraadides

lcd.init();
lcd.backlight();

}

void loop() {

int x_lsb,y_lsb,z_lsb;
  adxl.readAccel(&x_lsb, &y_lsb, &z_lsb);    // Teostan koormatud mõõtmise

x_lsb_k = (x_lsb - offsetX) / gainX;
y_lsb_k = (y_lsb - offsetY) / gainY;
z_lsb_k = (z_lsb - offsetZ) / gainZ;

x_g = x_lsb_k*lsb2g;                     //Muutujad mõõtetulemustejaoks, G-des
y_g = y_lsb_k*lsb2g;
z_g = z_lsb_k*lsb2g;

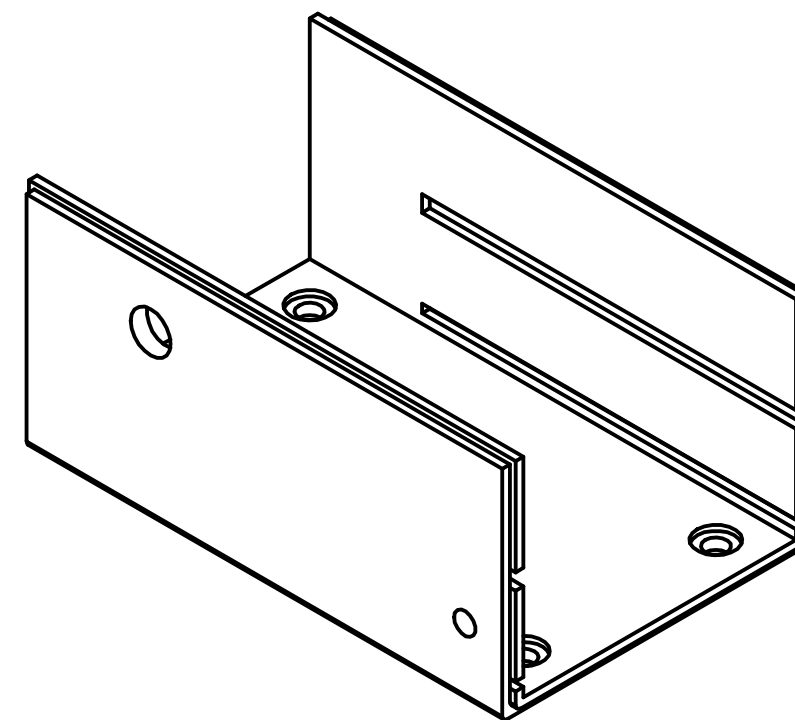
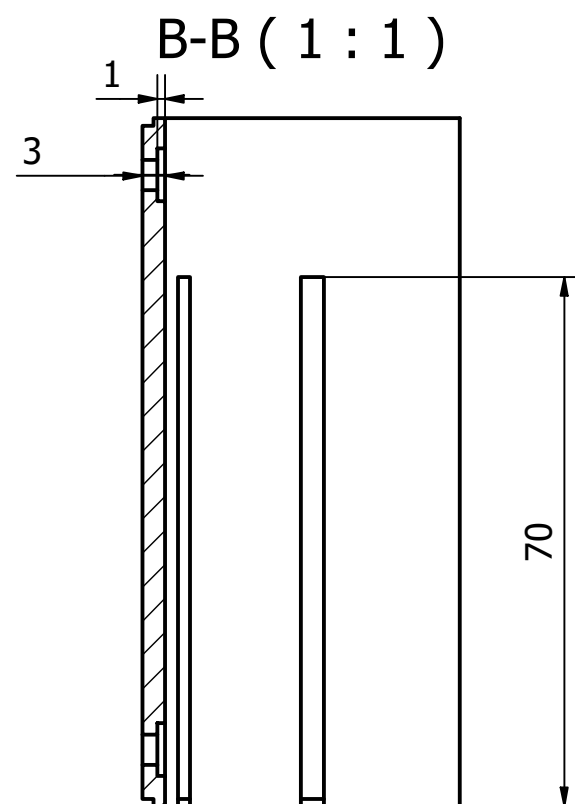
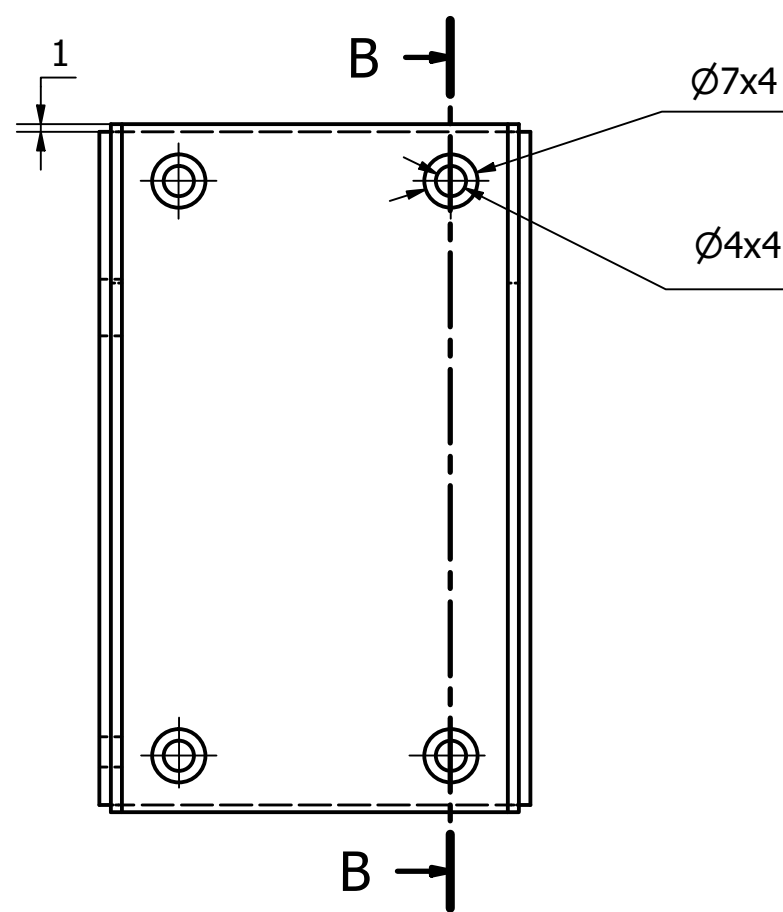
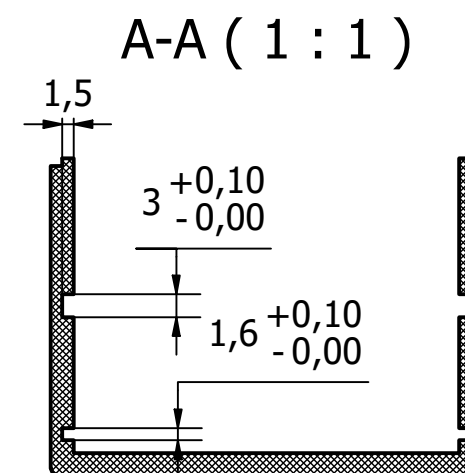
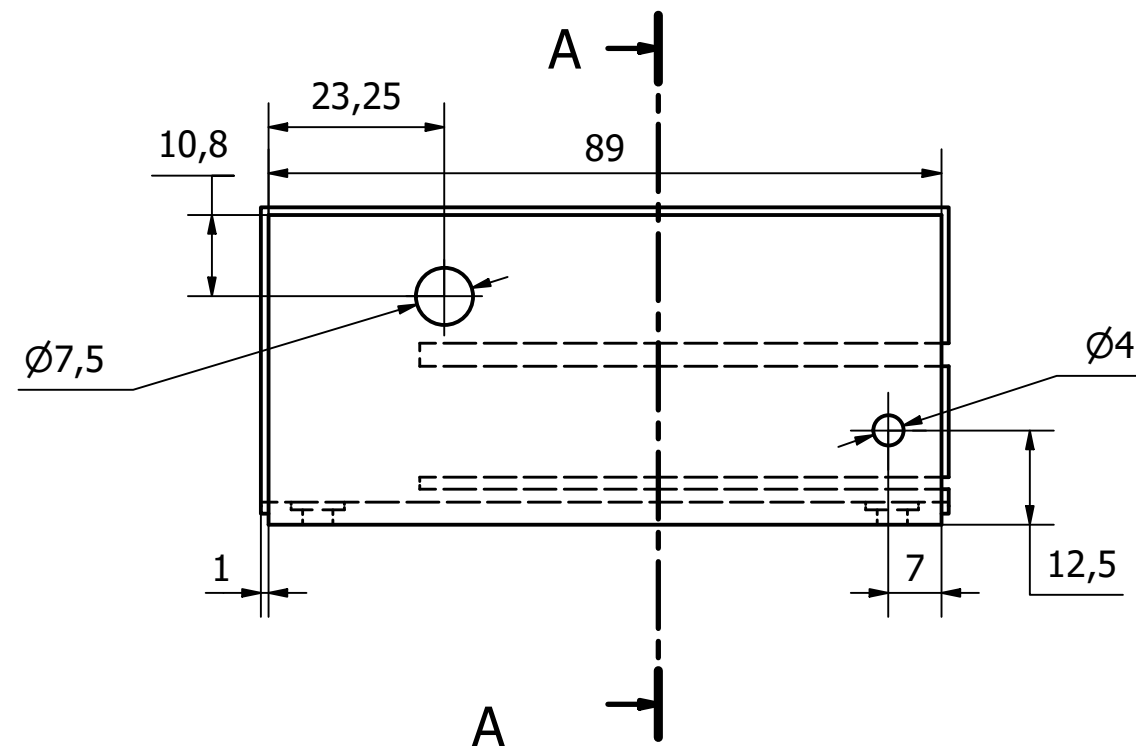
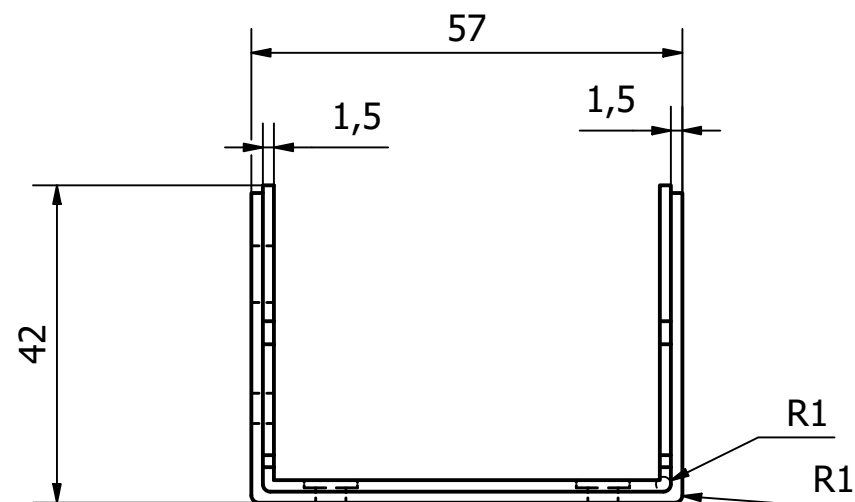
x_nurk = (atan(sqrt(pow(x_g, 2) + pow(y_g, 2))/z_g))*57296/1000;
//Arvutan nurga kaadides

l6plik_nurk = abs(x_algne_nurk - x_nurk);  //Arvutan nurga muutuse, kasutan abs()
//funktsiooni absoluutväärtuse
//saavutamiseks

moment = koormus * gjoud * ola_pikkus;
v22ndej2ikus = moment / l6plik_nurk;      //Arvutan väändejäikuse Nm/kraad

lcd.setCursor(1,0);                       //Kuvan info ekraanile
lcd.print(v22ndej2ikus);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Nm/");
lcd.setCursor(3,1);
lcd.print(char(223));
lcd.setCursor(11,1);
lcd.print(l6plik_nurk);
delay(2000);
lcd.clear();
}

```



	Materjal: Polüstüreen	Märkimata piirhälbed: ISO 2768	Mass: 36g	Mööd: 1:1
Teostas:	T. Tee	Nimetus: Nurgamöödiku karbi alumine osa		
Kontrollis:	R. Annask			
Kinnitas:	R. Annask			
Tallinna Tehnikakõrgkool		Leht: 1	Tähis: ARD001	