

Pärnu Koidula Gümnaasium

**Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi mehaanilise  
põrutuskindluse katsesüsteemi häälestamine**

Praktiline töö

Koostaja: Kristin Kandelin G2A

Juhendajad: MSc Mari Allik, Tartu Ülikooli

Tartu observatooriumi insener

Elmu Mägi

Pärnu 2021

## Sisukord

Sissejuhatus .....	3
1. Teooria .....	5
1.1. Enamlevinud põrutuskindluse katsesüsteemid .....	5
1.2. Põrutuskindluse katsetamise süsteem Tartu Ülikooli Tartu observatooriumis.....	6
1.3. Satelliitide üleslennutamise teenusepakkujad.....	7
1.4. Põrutuse kostespekter .....	7
2. Valitud materjalide katsetamine.....	8
2.1. Materjalide kogumine .....	8
2.2. Katsed materjalidega.....	9
2.3. Katsetulemuste analüüs.....	11
Kokkuvõte .....	15
Kasutatud materjalid.....	16
Summary.....	17
Kinnitusleht .....	19

## Sissejuhatus

Tänapäeval saadetakse kosmosesse aina rohkem satelliite. Enamjaolt on need sidesatelliidid või satelliidid, mis seiravad maad ehk teevad maast pilte. Andmed, mida sellistelt satelliitidelt saab, on kasutusel näiteks erinevates kaardirakendustes. Satelliite lennutatakse kosmosesse kanderaketiga. Kanderaketi lennu ajal toimuvad astmete eraldumised, mille käigus eraldub kanderaketi üks osa teisest ning lendab kosmoses edasi. Sellistel hetkedel mõjuvad kanderaketis olevale satelliidile suure kiirendusega põrutused, mis võivad satelliiti kahjustada. Kindlustamaks, et põrutused satelliiti võimalikult vähe kahjustavad, tuleb satelliidiga läbi viia põhjalikud katsed. Üheks oluliseks katseks on põrutuskindluse katse. Eestis on võimalus satelliitidega sellised katseid läbi viia Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi (TÜTO) kosmosetehnoloogia laboris.

Laboris olev põrutuskindluse katsesüsteem, mis koosneb pendel-haamer süsteemist ja alumiiniumist alusplaadist, vajab häälestamist. Kui haamer tabab alusplaati, tekib põrutus. Erinevaid satelliite on vaja katsetada erineva tugevusega põrutuste juures. Selleks, et põrutuskindluse süsteem seda võimaldaks, tuleb haamri ja alusplaadi vahel kasutada summutavat materjali. Autori ülesandeks on põrutuskindluse katsesüsteemi häälestamine, tehes katseid erinevate summutavate materjalidega, mis on poest lihtsasti kättesaadavad. Autor huvitub astronoomiast, sealhulgas eriti kosmosetehnoloogiast, ning tal avanes võimalus teha satelliiditehnoloogiaalane uurimistöö koostöös Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi inseneri ja teaduritega.

Töö eesmärk on leida sobiv materjal, mis summutaks põrutuskindluse katsetamise jaoks kasutatava haamri löögil tekkivaid kõrgeid sagedusi. Esiteks peab valitud materjali saama kasutada vähemalt viie katse jaoks. Teiseks ei tohi see pihta saades ära laguneda, kuna väikesed tükid võivad sattuda katsetatava satelliidi sisse ja süsteemile kahju teha. Viimaks peab materjali saama vajadusel kergesti poest juurde hankida. Teema on vajalik Tartu

Ülikooli Tartu observatooriumile selleks, et kosmosetehnoloogia labor saaks pakkuda veelgi paremat satelliitide pörotuskindluse katsetamise teenust.

Töö on jaotatud kaheks suureks peatükiks. Esimene peatükk on omakorda jaotatud neljaks alapeatükiks, kus on kirjutatud erinevatest pörotuskindluse katsetamise süsteemidest kogu maailmas ja kirjeldatud TÜTO pörotuskindluse katsetamise süsteemi. Samuti on alapeatükkides kirjutatud satelliite üleslennutavatest ettevõtetest ja pörotuse kostespektrist. Teine peatükk on jaotatud kolmeks alapeatükiks, kus on kirjutatud katsetatavate materjalide valimisest ja iseloomustatud parimate tulemustega materjale. Viimases alapeatükis on kirjeldatud sobivaima materjali valimist.

Töö autor soovib tänada juhendajaid Elmu Mägi ja Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi inseneri Mari Allikut, kes aitas aktiivselt kaasa katsetulemuste analüüsimisele ja töö korrektsele vormistamisele. Samuti soovib autor tänada TÜTO teadureid, kes aitasid katsevahendite opereerimisega, ning praktilise töö kirjaliku osa korrektsust kontrollinud Henriete Toomlaidu ja Leena Karin Tootsi.

# 1. Teooria

## 1.1. Enamlevinud põrutuskindluse katsesüsteemid

Põrutuskindluse katsete abil on võimalik simuleerida põrutusi, millele satelliidid peavad kanderaketi üleslennutamise ja astmete eraldumise etappidel vastu pidama. Selliseid põrutusi saab iseloomustada kui lühikese kestuse ja kõrge kiirendusega impulsse, mis kestavad vähem kui 0,5 ms ja esitatakse spektriga vahemikus 100 kuni 10 000 Hz. (Shock test, n.d.) Põrutuskindluse katseid tehakse kolme erinevat moodi: mehaaniliselt, pürotehniliselt ja kukutamise meetodil. Põrutuskindluse katsetamise teenust pakuvad näiteks firmad TriasRnD, Innovative Solutions in Space (ISIS) ja National Technical Systems (NTS). TriasRnD pakub pürotehnilist ja mehaanilist põrutuskindluse katsetamise teenust. Joonisel 1 on näha National Accelerator Centeri (CNA, hispaania keeles *Centro Nacional de Aceleradores*) põrutuskindluse katsetamise süsteemi, mis on väga sarnane Tartu Ülikooli Tartu observatooriumis olevaga. Katseobjekt, massiga kuni 15 kg, on kinnitatud alusplaadile, mille küljes on kaheksa sensorit, mis mõõdavad põrutusi kolmel teljel (*ibid.*). Süsteem mõõdab põrutuste kostespektrit sagedustel 100–10 000 Hz ning kiirendusega kuni 3000 g (umbes 29 400 m/s<sup>2</sup>) (*ibid.*).



**Joonis 1.** National Accelerator Centeri põrutuskindluse katsetamise süsteem  
Allikas: TriasRnD koduleht, n.d..

RUAG Space Test Centre'i pürotehnilise põrutuse katsesüsteem mõõdab põrutuste kosespektrit sagedustel 100–20 000 Hz ning kiirendusega kuni 20 000 g (umbes 196 000 m/s<sup>2</sup>). Süsteemiga saab katsetada satelliite, mille mass on kuni 25 kg. Katsetamisel saavutatud maksimaalsed tulemused sõltuvad katseobjekti andmetest: selle massist, mõõtmest ja komponentide paigutusest. Katsetulemusi mõõdetakse 124 sensoriga. Põrutuse simuleerimiseks kasutatakse naelapüssi või pendel-haamrit. (Pyroshock Test, n.d.)

## 1.2. Põrutuskindluse katsetamise süsteem Tartu Ülikooli Tartu observatooriumis

Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi põrutuskindluse katsetamise süsteemi arendas Paul Liias RadiusSpace'is. See pandi kokku 2015. aasta suvel. Süsteem vastab European Cooperation for Space Standardizationi (ECSS), National Aeronautics and Space Administrationi (NASA) ja European Space Agency (ESA) standarditele. See koosneb alumiiniumist alusplaadist ning pendel-haamrist, mida saab paigaldada nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt. (Allik, 2016: 13) Praktilises töös kasutati summutusmaterjalide katsetamiseks vertikaalset haamripaigutust, mida on näha joonisel 2.



**Joonis 2.** Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi põrutuskindluse katsetamise süsteem  
Allikas: Kristin Kandelini erakogu, 2020.

TÜTO põrutuskindluse katsetamise süsteemiga saab katsetada katseobjekte, mille mass on kuni 26 kg. Süsteem mõõdab mehaanilisi põrutusi kiirendusega kuni 10 000 g (ligikaudu 98 000 m/s<sup>2</sup>). Mehaanilise põrutuse kosespektrit on võimalik mõõta sagedustel 1–10 000 Hz. (Testing of instruments..., n.d.) Andmekogumissüsteemiga, mis koosneb andmekogumis-

moodulist ja kiirendusanduritest, töödeldakse pörutusel salvestatud kiirenduse väärtusi. Andurid on kinnitatud katseobjekti ning alusplaadi külge, mis on omakorda ühendatud andmekogemusmooduli ja arvutiga. (Allik, 2016: 16)

### **1.3. Satelliitide üleslennutamise teenusepakkujad**

Satelliitide kosmosesse lennutamisega tegelevad näiteks firmad Arianespace, SpaceX, Virgin Galactic ja Blue Origin (Launch Services Providers, n.d.). Enne, kui satelliidi võib orbiidile saata, peab see läbima mitmeid katseid, millest üks on pörutuskindluse katse. Igal kanderaketil on individuaalsed pörutuse kostespektri testprofiilid. Need profiilid antakse pörutuskindluse katsetamise teenusepakkujatele, kes peavad neid satelliidi katsetamisel rakendama. Praktilise töö katsete jaoks kasutati Arianespace'i Vega kanderaketi testprofiile. Algselt kasutati neid Tallinna Tehnikaülikooli kahe kuubiksatelliidi, Koidu ja Hämäriku katsetamisel.

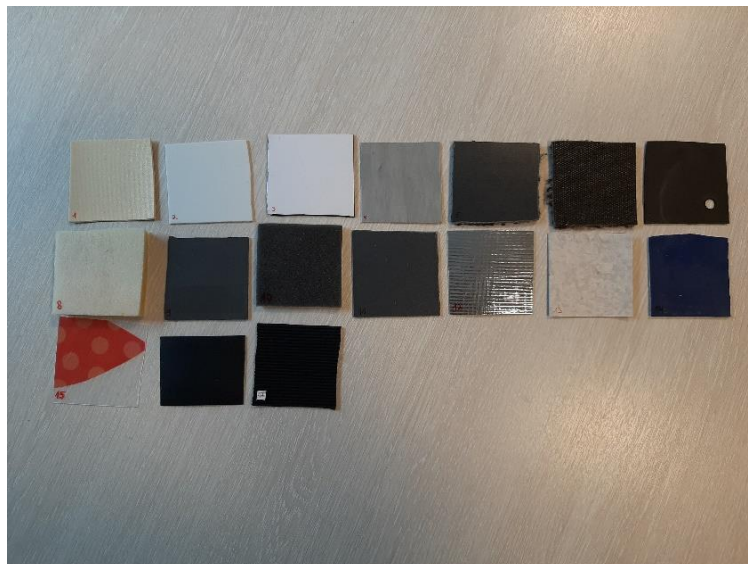
### **1.4. Pörutuse kostespekter**

Satelliidiga viiakse pörutuskindluse teste läbi selleks, et kindlustada, et satelliit ei lakkaks sellele tööaja jooksul mõjuvate vibratsioonide tõttu töötamast (Hutin, n.d.: 1). Pörutuskindluse katsete tulemustest koostatakse pörutuse kostespekter. Pörutuse kostespekter on graafiline kujutis, mis näitab kiirenduse suhet sagedusega. Kiirenduse ja aja andmeid rakendatakse ühe vabadusastmega süsteemidele (Irvine, 2012: 3). Iga ühe vabadusastmega süsteemi iseloomustab loomulik omavõnkesagedus ja summutamise suhtarv ehk  $Q$ -tegur (Allik, 2016: 18). Kosmosetööstuses kasutatakse tavaliselt summutustegurit, mille väärtus on 5%, mis omakorda vastab  $Q$ -tegurile 10 (Irvine, 2012: 4). Objekti loomulik omavõnkesagedus on sagedus, millel objekt võngub, kui selle tasakaaluolekut häirida ning lasta sellel vabalt võnkuda (Irvine, 2000: 1). Üks laialdaselt kasutatud algoritme pörutuse kostespektri arvutamiseks on Smallwoodi algoritm, sest see esitab parimini kõrgeid sagedusi. Samuti kasutab TÜTO pörutuse kostespektri arvutamiseks 4. järku Runge-Kutta meetodit. (Allik, 2016: 20) Eelnimetatud algoritmi käesolevas praktilises töös ei kasutatud.

## 2. Valitud materjalide katsetamine

### 2.1. Materjalide kogumine

Töö algas 17 erineva materjali soetamisega Bauhofist ja Koduekstrast, samuti võeti materjale Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi laborite laoruumist. Enamasti olid valitud materjalid plastikust ning kummist, kuna sellised materjalid olid eelnevalt hästi katsetamisel tekkivaid põrutusi summutanud. Katsetati ka pehmemaid materjale, näiteks soojustusvilla, erinevatest plastikutest lauakatteid ning porolooni, kuna taheti teada, kui hästi need põrutust summutaksid. Peale materjalide hankimist lõigati neist 8 cm pikkuse küljega ruudud, mis omakorda nummerdati. Esimene katsetamine viidi läbi 10. juunil, siis katsetati kõiki materjale üks kord. Tulemusi analüüsiti ning valiti välja viis materjali, mis summutasid teistest paremini kõrgeid sagedusi ja pidasid katsetamisele hästi vastu. Teine katsetamine viidi läbi 18. juunil, valitud materjale katsetati selle käigus kolm korda. Joonisel 3 on näha esialgseid 17 valitud materjali enne katsetamist.



**Joonis 3.** Valitud materjalid enne katsetamise algust  
Allikas: Kristin Kandelini erakogu, 2020.



Valitud materjalid olid järgnevad:

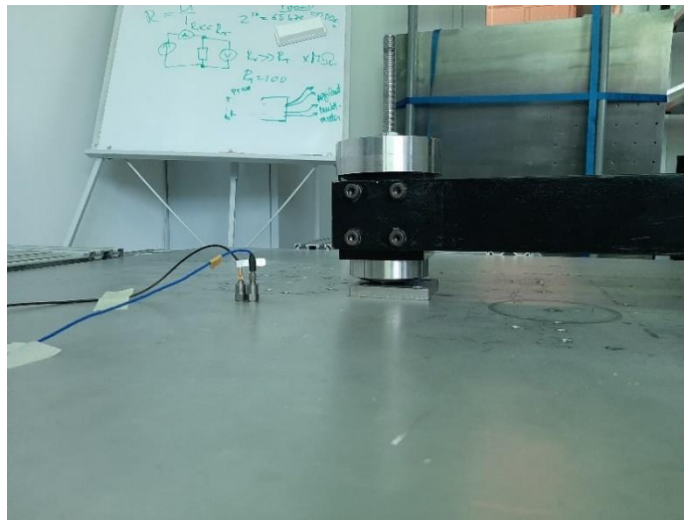
- Materjal 1 – lauakate
- Materjal 2 – lõikelaud
- Materjal 3 – mööblivilt
- Materjal 4 – plastikust põrandakate
- Materjal 5 – uksematt
- Materjal 6 – vaipkate
- Materjal 7 – plastikust põrandakate
- Materjal 8 – isolatsioonivill
- Materjal 9 – kummimatt
- Materjal 10 – poroloon
- Materjal 11 – põrandakate
- Materjal 12 – lauakate
- Materjal 13 – põrandakate
- Materjal 14 – põrandakate
- Materjal 15 – plastikust lauakate
- Materjal 16 – põrandakate
- Materjal 17 – uksematt

Materjalid 1, 2 ja 12 osteti Koduekstrast. Materjalid 3, 5, 8, ja 17 osteti Bauhofist. Materjalid 4, 6, 7, 9, 11, 13, 14 ja 16 võeti TÜTO laoruumist, neid oli eelnevalt kasutatud observatooriumi ning kosmosetehnoloogia laborite renoveerimiseks. Materjali 10, mis oli samuti pärit TÜTO laoruumist, oli eelnevalt kasutatud põrutuse summutamiseks.

## **2.2. Katsed materjalidega**

Katsed viidi läbi TÜTO kosmosetehnoloogia labori pendel-haamriga. Haamri raskus oli 2 kg ning see kukutati 20-kraadise nurga alt alusele. Alusele oli kinnitatud kaks sensorit, mis olid ühendatud andmekogumismooduliga. Katsetulemused salvestati mehaanilise põrutus-kindluse katsesüsteemi salvestustarkvara MechShock 1.5.1'ga. Katsetamise ajal oli temperatuur laboris 20°C. Kõik katsed viidi läbi ilma katseobjekti ning kinnitamiseks mõeldud rakiseta. Katseobjektiks nimetatakse objekti (tavaliselt satelliit), mida katsetakse, et määrata selle vastupidavus ning töövõime määratud keskkonnas (Device Under Test...),

n.d.). Rakisega kinnitatakse katseobjekt alusplaadi külge. Joonisel 4 on näha pilti TÜTO haamrist.



**Joonis 4.** Katsetamiseks kasutatav haamer ning sensorid  
Allikas: Kristin Kandelini erakogu, 2020.

Esimesel katsetamisel, mis viidi läbi 10. juunil 2020, katsetati kõiki 17 materjali üks kord. Enne katsetamist kontrolliti, kas süsteem töötab korralikult ja sensorid ühtivad omavahel. Selleks kukutati haamer alusplaadile ilma summutava materjalita. Kui oli saadud positiivne tulemus, alustati katsetega. Haamer tõsteti üles ja katsetatav materjal pandi alusplaadile. Seejärel käivitati mehaanilise põrutuskindluse katsesüsteemi salvestustarkvara. Olles kontrollinud, et kõigil laboris viibijatel on kuulmiskaitsed peas, tõsteti haamer 20-kraadise nurga alla ning lasti sellel materjalile kukkuda. Haamer tõsteti taas üles, katsetatud materjal eemaldati ning asemele pandi uus. Salvestustarkvara tulemused salvestati vastava materjali kausta, et need hiljem graafikule kanda. Seejärel pandi tarkvara valmis järgmise materjali katsetamiseks. Samamoodi katsetati ka ülejäänud 16 materjali.

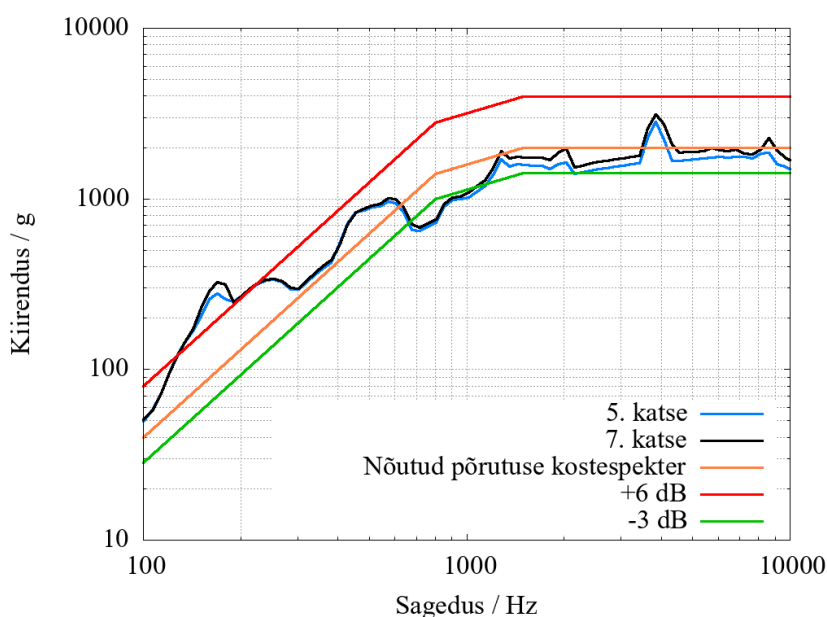
Peale katsetulemuste analüüsimist valiti nende vastupidavuse ning põrutuse summutamise võime põhjal välja 5 materjali. Valitud materjalid olid 3, 11, 12, 13 ja 14. Teine katsetamine viidi läbi 18. juunil 2020. Eelnevalt nimetatud materjalidest löigati uued 8 cm küljepikkusega ruudud. Enne katsete alustamist kontrolliti taas, kas sensorid ühtivad ning süsteem töötab. Seekord oli tulemus negatiivne, mistõttu vahetati üks kaablitest teise vastu ja katset korrati. Probleemi ei õnnestunud lahendada, seega võrreldi sensorite mõõtmistulemustest koostatud põrutuse kostespektri graafikut vastava 10. juuni katsetamise omaga

ning eemaldati sensor, mis näitas ebatäpsemaid andmeid. Katsetamine jätkus ühe sensoriga. Iga valitud materjali katsetati kolm korda. Katsetulemusi analüüsiti augusti esimeses pooles.

### 2.3. Katsetulemuste analüüs

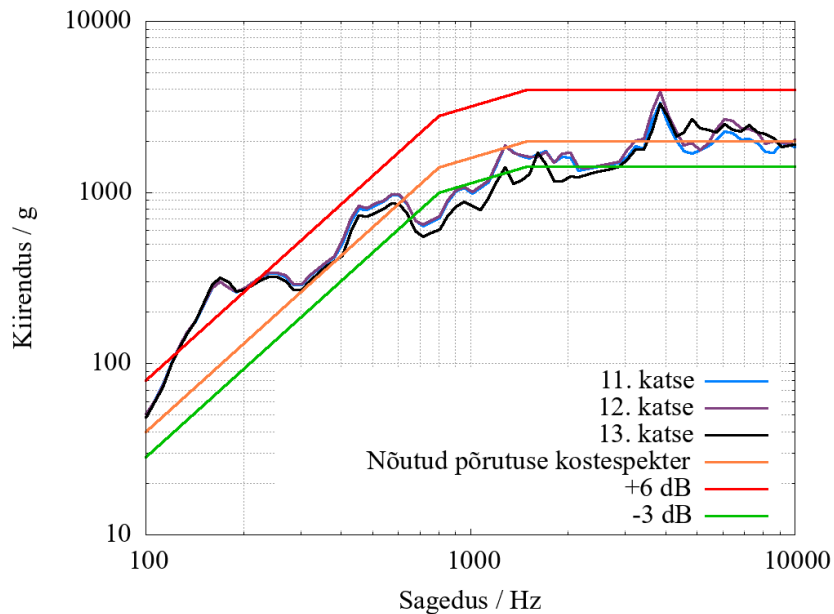
Valitud materjal peab olema vastupidav. See tähendab, et see peab vastu pidama vähemalt viis katsetuskorda ning ei tohi haamriga pihta saades väikesteks tükkideks puruneda, kuna need võivad katsetatava satelliidi sisse lennata ning selles olevatele detailidele viga teha. Materjali graafik peab jääma antud -3 dB kuni +6 dB testprofiilide piiresse enamikul sagedustel, eriti sagedustel vahemikus 1000–10 000 Hz. Eelnimetatu on tähtis, kuna kõrged sagedused võivad katsetatava satelliidi elektroonikat, struktuure (praod habrastes materjalides, plastiku paindumine) või kinnitusvahendeid (kruvid ja mutrid) kahjustada (Allik, 2016: 13). Viimaks on oluline, et materjali saaks vajadusel poest juurde hankida.

Teiseks katsetamiseks valitud materjalide hulgast andsid kõige parema tulemuse materjalid 11, 13 ja 14, mille kõikide katsete tulemuste graafikud jäid kõrgetel sagedustel antud testprofiilide piiresse. Materjalid 3 ja 12 ei summutanud kõrgeid sagedusi piisavalt hästi, seega ei sobinud need summutusmaterjalideks. Kuigi esimesel katsel jäid graafikud testprofiilide piiresse, olid teise ja kolmanda katse tulemuste graafikud juba antud parameetritest kõrgemal. Seega saab materjale kasutada vaid ühe katse jaoks, kuna edasistel katsetel võivad kõrged sagedused katsetatavat objekti kahjustada.



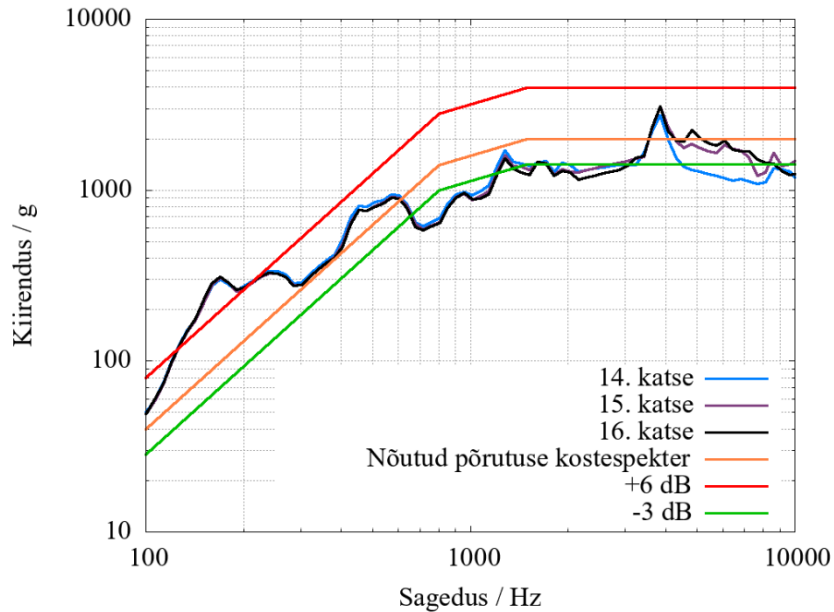
Joonis 5. Materjal 11 katsetulemuste kostespekter

Materjal 11 oli plastikust põrandakate, mille paksus oli 2,49 mm. See pidas katsetamisele väga hästi vastu – materjal ei pragunenud ning selle pinnal olid minimaalsed kahjustused. Katsetulemustest koostatud graafik jäi sagedustel 1000–10 000 Hz antud testprofiilide piiresse, nagu on võimalik näha joonisel 5. Samuti ei täheldatud katsete kordamisega materjali summutusefekti märgatavat langust. Materjali on võimalik hankida hästivarustatud ehituspoodidest.



**Joonis 6.** Materjal 13 katsetulemuste kostespekter

Materjal 13 oli plastikust põrandakate, mille paksus oli 1,92 mm. Materjali äärtesse tekkisid katsetamise käigus praod ning tagaküljel oli näha haamrilöögist tekkinud muljumisjälgi. Katsetulemustest koostatud graafik jäi sagedustel 1000–10 000 Hz antud testprofiilide piiresse või alumisest piirist allapoole, nagu on võimalik näha joonisel 6. Katsete kordamisel täheldati materjali summutusefekti vähest langust. Materjali on võimalik hankida hästivarustatud ehituspoodidest.



**Joonis 7.** Materjal 14 katsetulemuste kostespekter

Materjal 14 oli plastikust põrandakate, mille paksus oli 2,02 mm. Materjali äärde tekkis katsetamise käigus pragu ning haamrilöögist jäi materjali mõlk. Materjali tagaküljel oli näha katsetamisel tekkinud muljumisjälge ja seda ümbritsevaid mõrasid, mis muutsid materjali hapraks. Nagu on näha joonisel 7, ei läinud katsetulemustest koostatud graafik sagedustel 1000–10 000 Hz antud testprofiili ülemisest parameetrist üle, vaid jäi pigem alumisest parameetrist madalamale. Katsete kordamisel ei täheldatud sagedustel 1000–4000 Hz summutusefekti märgatavat langust, kuid sagedustel 4000–10 000 Hz oli langus juba nähtavalt suurem. Materjali on võimalik hankida hästivarustatud ehituspoodidest.

Varasemalt on põrutuskindluse katsetamiseks kasutatud summutusmaterjalidena erinevaid plastikuid. Valitud materjalidest parimad tulemused andsid materjalid 11, 13 ja 14, mis kõik olid plastikust põrandakatted. Materjalid 3 ja 12, mis ei summutanud põrutust nii hästi kui ülejäänud kolm materjali, olid vastavalt mööbli- ja lauakate. Seega saab järeldada, et põrutust summutavad paremini plastikust materjalid. Testiti ka õhukesi plastikust materjale (näiteks plastikust lauakate), kuid nende summutusefekt ei olnud piisav.

Materjali sobivust põrutuskindluse katsetamise summutusmaterjaliks hinnatakse mitmete alapeatüki 2.3. alguses loetletud kriteeriumite järgi. Materjal 11 täitis kõik need kriteeriumid. Materjali pinnale ei olnud katsetamisest tekkinud märgatavaid kahjustusi. Katsetulemustest koostatud graafik jäi antud testprofiilide piiresse ning katsete kordamisega ei täheldatud materjali summutusefekti märgatavat langust. Samuti on materjal kergesti kättesaadav

hästivarustatud ehitusmaterjalipoodidest. Tulevikus tahetakse materjaliga teha lisakatseid, et leida, mitmele haamrilöögile see vastu peab, enne kui materjal puruneb või selle summutusefekt sagedustel 1000–10 000 Hz oluliselt halveneb.

## Kokkuvõte

Praktilise töö eesmärk oli leida sobivaim materjal, mis summutaks haamri löögil tekkinud kõrgeid sagedusi. Materjali sobivust summutusmaterjaliks hinnatakse mitmete kriteeriumite alusel. Esiteks peab materjali saama kasutada vähemalt viie katse jaoks. Teiseks ei tohi materjal katsetamise käigus väikesteks tükkides laguneda, kuna need võivad sattuda katseobjekti sisse ning süsteemile kahju teha. Viimaks peab materjal olema vajadusel poest kergesti kättesaadav. Materjal 11, mis oli plastikust põrandakate, täitis kõik eelnimetatud tingimused.

Autor oleks pidanud kirjaliku osa kirjutamisega varem alustama. Kuigi töö praktiline osa ning katsetulemuste analüüs said aegsasti tehtud, alustas autor kirjaliku osa koostamist veidi hilja. Ühtlasi raskendas töö kirjutamist see, et teema kohta pole eestikeelseid materjale ning sageli puuduvad ka terminitele täpsed vasted. Praktilise töö teostamisel toetuti peamiselt Tom Irvine'i Vibrationdata lehel avaldatud teadustöödele ja -artiklitele. Samuti kasutati töös Tartu Ülikooli DSpace'is avaldatud Mari Alliku magistritööd ning TriasRnD kodulehel olevaid põrutuskindluse katsetamise süsteemide kirjeldusi. Töö täitis oma eesmärgi: leiti sobiv materjal, mida saab kasutada Tartu Ülikooli Tartu observatooriumis satelliitide katsetamisel tekkinud kõrgete summutamiseks.

Tulevikus on plaanis 11. materjaliga läbi viia lisakatseid. Nende eesmärk on leida, mitu korda on võimalik materjali haamriga lüüa enne, kui see puruneb või katsetulemustest koostatud graafik sagedustel 1000–10 000 Hz antud testprofiilidest kõrgemale läheb. Materjali hakatakse Tartu Ülikooli Tartu observatooriumi kosmosetehnoloogia laboris kasutama satelliitide põrutuskindluse katsetamisel tekkinud kõrgete sageduste summutamiseks.

## Kasutatud materjalid

1. Allik, M. (2016). Software Development for the Mechanical Shock Testing System at Tartu Observatory. [Magistritöö, Tartu Ülikool]. DSpace. Loetud: <https://dspace.ut.ee/handle/10062/51868>, 11.03.2021.
2. Device Under Test (DUT). Techopedia kodulehekül. Loetud: <https://www.techopedia.com/definition/25924/device-under-test-dut>, 06.03.2021.
3. Hutin, C. (n.d.) Understanding the Use and Applications of the Shock Response Spectrum Method. Vibrationdata kodulehekül. Loetud: [http://www.vibrationdata.com/tutorials\\_alt/SRS\\_method\\_DP.pdf](http://www.vibrationdata.com/tutorials_alt/SRS_method_DP.pdf), 06.11.2020.
4. Irvine, T. (2000). An introduction to frequency response functions. Vibrationdata kodulehekül. Loetud: [http://www.vibrationdata.com/tutorials\\_alt/frf.pdf](http://www.vibrationdata.com/tutorials_alt/frf.pdf), 05.11.2020.
5. Irvine, T. (2012). An introduction to the Shock Response Spectrum. Vibrationdata kodulehekül. Loetud: [https://www.vibrationdata.com/tutorials2/srs\\_intr.pdf](https://www.vibrationdata.com/tutorials2/srs_intr.pdf), 05.11.2020.
6. Launch Services Providers. Satellite Evolution Group kodulehekül. Loetud: <https://www.satellite-evolution.com/launch-providers>, 02.12.2020.
7. Pyroshock Test. TriasRnD kodulehekül. Loetud: <https://triasrnd.com/en/1/93-pyroshock-test>, 26.11.2020.
8. Shock Test. TriasRnD kodulehekül. Loetud: <https://triasrnd.com/en/1/340-shock-test>, 25.11.2020.
9. Testing of instruments for mechanical shock. ADAPTER koduleht. Loetud: <https://adapter.ee/en/teenus/testing-of-instruments-for-mechanical-shock/>, 26.11.2020.
10. TriasRnD kodulehekül. (n.d.). The Shock Testing System in National Accelerator Centre. [Foto] Võetud: <https://triasrnd.com/en/1/340-shock-test>, 25.11.2020.



## Summary

The purpose of “Characterization of the Mechanical Shock Testing System at University of Tartu, Tartu Observatory” was to find a material which would be the most effective in dampening the high frequency shocks caused by a pendulum hammer strike. A suitable material should meet certain criteria. Firstly, the material has to survive at least five tests. Secondly, the material should not break into small pieces, as they could fly into the device under the test and damage its components. Lastly, the material should be easily acquirable. Material 11, which was a plastic floorboard, met all those conditions.

The two main parts of the practical work are the theoretical background and analysis of the test results. The theoretical background contains information about different Shock Testing Systems in the world, the description of the Mechanical Shock Testing System in University of Tartu, Tartu Observatory, and information about launch service provides and the Shock Response Spectrum. The second part contains information about the chosen materials, the testing sequence, and lastly, analysis of the test results of the three materials with best damping effects and choosing the best damping material.

Although the practical section and the analysis of the test results were completed early into the work process, the author started putting the theoretical section together later than it had initially been planned. The process of writing the theoretical part proved to be more challenging than the author had thought as there were no resources written in Estonian concerning the given topic; therefore, many technical terms used in the practical work did not have widely used, correct or official Estonian translations. The main sources used for writing the theoretical section were research papers and articles published on Tom Irvine’s Vibrationdata website. Mari Allik’s Master’s thesis published on University of Tartu’s DSpace and articles about different shock testing systems from TriasRnD’s website were also used.

Further testing with material 11 will be carried out in the future. The purpose of the further research is to determine how many times the material can be struck with the pendulum hammer before it cracks, or the material's shock response spectrum exceeds the upper test profile in frequencies 1,000 to 10,000 Hz. The material will be used in University of Tartu, Tartu Observatory's space technology laboratory to dampen the high frequency shocks occurring during satellite shock testing.

## **Kinnitusleht**

Kinnitan, et koostas in käesoleva kirjaliku töö iseseisvalt. Kõigile töös kasutatud teiste autorite töödele ja andmeallikatele on viidatud; olen teadlik, et käesolevat tööd ei edastata teistele tulu teenimise eesmärgil ega jagata teadlikult plagieerimiseks.

.....

kuupäev / nimi / allkiri

Tunnistan töö kaitsmisvalmiks.

Juhendajad

.....

kuupäev / nimi / allkiri

.....

kuupäev / nimi / allkiri