



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut

Tootearenduse õppetool

MES70LT

*Priit Kuljus*

**VIBRATSIOONIDE-PÕHINE  
TUULEGENERAATORI LABA SEISUNDI  
MONITOOIMINE**

Autor taotleb  
tehnikateaduse magistri  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2014

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Henrik Herraneni juhendamisel

“.....” .....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....201... a.

..... allkiri

TTÜ masinaehituse instituut

Tootearenduse õppetool

## MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2014. aasta kevad semester

Üliõpilane: Priit Kuljus 104826 (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava MATM02/09 - Tootearendus ja tootmistehnika

Eriala Tootearendus

Juhendaja: Nooremteadur Henrik Herranen (amet, nimi)

Konsultandid: Ott Pabut peainsener 5164457 (nimi, amet, telefon)

### MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Vibratsioonide-põhine tuulegeneraatori laba seisundi monitoorimine

(inglise keeles) Vibration Based Structural Health Monitoring of Windturbine Blade

### Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Seisundi jälgimise meetodi väljaotsimine	05.03.2014
2.	GOM Pontos 4M skanneriga tutvumine	15.03.2014
3.	Omapõnkevormide ning sageduse erinevuse tuvastamine purunenud ning terve tiiva võrdlemise läbi	15.04.2014
4.	Valitud meetodi valideerimine GOM PONTOS 4M skanneriga	25.04.2014
5.	3-telgsete kiirendusandurite platvormi abil antud meetodi katsetamine	15.05.2014

### Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Leida meetod komposiitmaterjali struktuuri seisundi monitoorimiseks ning kontrollida selle sobivust, kasutades vibratsiooide meetodeid.

### Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: Eesti keel

Kaitsmistootlus esitada hiljemalt .....

Töö esitamise tähtaeg.....

Üliõpilane Priit Kuljus

/allkiri/ .....

kuupäev.....

Juhendaja Henrik Herranen

/allkiri/ .....

kuupäev.....

# SISUKORD

Magistritöö ülesanne .....	2
Sisukord.....	3
Eessõna.....	5
1 Sissejuhatus .....	6
2 Ülevaade valdkonnast .....	10
2.1 Tuulegeneraator .....	10
2.2 Laba tõrgete ennetamise olulisus seisundi monitoorimise näol .....	13
2.3 Komposiidid .....	13
2.3.1 Komposiitmaterjalide üldised omadused .....	13
2.3.2 Komposiitmaterjalide tugevusomadused .....	14
2.4 Kiirendusanduri platvorm.....	14
2.5 Uuritav laba .....	17
2.6 Labadel esinevad tõrked .....	19
3 Teooria .....	21
3.1 Laba kahjustuste tuvastamine .....	21
3.2 Kahjustuste tuvastamise meetodid.....	21
3.2.1 Kõrgsageduslikud meetodid .....	22
3.2.2 Madalsageduslikud meetodid .....	25
3.3 Modaalanalüüsi teooria.....	26
3.4 Laba omavõnkevormid ja andurite asetus .....	29
3.4.1 LEM modaalanalüüs .....	29
3.4.2 Markerite asetus .....	33
3.5 Fourier' teisendus .....	34
4 Katsetus .....	37
4.1 Pontos 3D skanner .....	37

4.2	Ergutuspendel .....	38
4.3	Testitavate labade kirjeldus .....	39
4.4	Katsetusprotsessi kirjeldus .....	41
5	Katsetuste tulemused.....	43
5.1	Esimese ja teise mõõtmise andmete erinevus.....	43
5.2	Mõõtmistulemused erinevate telgede suhtes .....	43
5.3	Mõõtmiste müra.....	46
5.4	Filtreeritud mõõtetulemused.....	46
5.5	Labade võnkevormide erinevused .....	49
5.6	Kahjustuse tekitamine labale ja andurite valideerimine. ....	51
5.6.1	Skanneri tulemused vigastuse tekitamistel.....	53
5.6.2	Skanneri ja kiirendusanduri tulemuste võrdlus .....	55
5.6.3	Kiirendusanduri tulemused vigastuse tekitamistel.....	56
6	Kokkuvõte .....	59
	Summary .....	62
	Kasutatud kirjandus.....	65
	Lisad .....	68
	Lisa 1. Kiirendusanduri ADXL326 spetsifikatsioon.....	69
	Lisa 2. Kiirendusanduri ADXL377 spetsifikatsioon.....	70
	Lisa 3. Pontos Skannerite tehniline spetsifikatsioon.....	71
	Lisa 4. Skanneri tulemuste analüüsi lähtekood .....	72
	Lisa 5. Skanneri tulemuste kokkuvõtte lähtekood .....	75
	Lisa 6. Anduri tulemuste analüüsi lähtekood .....	76
	Lisa 7. Laba struktuuri joonis.....	78

## Eessõna

Lõputöö teema anti välja Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse instituudi nooremteadur Henrik Herraneni poolt, kes on ka Sihtasutus Archimedes fondi kaudu Euroopa Regionaalarengufondi finantseeritud projekti „Targad komposiidid - disain ja tootmine“ 3.2.1101.12-0012 koordinaator. Antud projekti osapoolteks on veel tehnoloogia kompetentsi keskus ELIKO. Infot laba kohta jagas my!WIND OÜ peainsener Ott Pabut, kes on antud tuulegeneraatori laba arendusega tihedalt seotud. Infot ja ulatuslikku abi andmete analüüsil MatLab keskkonnas jagas Dr. Tõnis Saar ELIKO Tehnoloogia Arenduskeskus OÜ. Labade mõõtmised toimusid Masinaehituse instituud laboris, kus tehti ka osaline andmete järeltöötlus. Tänuõnad Henrik Herraneni suure pühendumise eest antud magistritöö raames.

# 1 Sissejuhatus

Antud magistritöö kuulub Sihtasutus Archimedes fondi kaudu Euroopa Regionaalarengufondi finantseeritud projekt „Targad komposiidid - disain ja tootmine“ 3.2.1101.12-0012. Töö eesmärgiks on leida meetod komposiitmaterjali struktuuri seisundi monitoorimiseks ning kontrollida selle sobivust, kasutades vibratsiooidel põhinevaid meetodeid. Lisaeesmärgiks on kontrollida, kas kiirendusanduritega on võimalik teostada tuulegeneraatori laba struktuuri seisundi monitoorimist. Töö subjektiks on tuulegeneraatori laba, mis on valmistatud komposiitmaterjalist. Antud töös väljatöötatud lahendusel võib olla potentsiaali kasutamiseks ka luksusjahtide kere struktuuri seisundi monitoorimiseks.

Tuulegeneraatorite arengu kiirus ning nendele esitatavad nõuded järjest kasvavad. Seetõttu otsivad ettevõtted tihedas konkurentsisis konkurentsieelist ning võimalust pakkuda klientidele paremat toodet. Et pakkuda järjest paremaid tuulegeneraatoreid, arendatakse neid pidevalt. Üheks peamiseks tuulegeneraatori eeliseks teiste ees on tema hooldusvälba pikendamine. Hooldus on aeganõudev ja majanduslikult kulukas, eriti olukordades, kus seade asub asustusest eemal või hoopis veekogu kohal. Antud teemad tekitavadki vajaduse leida erinevaid kaugjälgitavaid laba struktuuri seisundi monitoorimise lahendusi. Kuna tuulegeneraatori labade maksumus ulatub viiendikuni generaatori kogumaksumusest [1] ja labasid hetkel testitakse visuaalse kontrolli meetodil, siis on materiaalselt põhjendatud monitoorimise süsteemi arendamine. Lisaks tuleb ära mainida fakt, et ühe laba hävinemine töötaval generaatoril võib hävitada kogu generaatori. Katastroofiliste rikete ennetamise eelduseks on toimiv struktuuri seisundi monitoorimise süsteem. Peamised laba vigastused on seotud erinevate komposiitmaterjalidele omaste probleemidega:

1. Mõrade teke
2. Klaaskiu purunemine
3. Kihtide delaminatsioon
4. Liitekohtade purunemine

Traditsiooniliselt on tuuleturbiinide labad toodetud klaasfiiber-polüester komposiidist, kasutades käsitsi lamineerimise tehnikat. Kuna antud tootmismeetod ei ole inimfaktori tõttu väga täpne ning labade lõikes homogeenne, siis tugevusomadused ja labade vastupidavus võivad kõikuda. Sellest tulenevalt on labade tööiga erinev. Visuaalsel testimisel on võimatu ennustada, milline laba on lühima elueaga ja hävib kõige kiiremini. Seevastu laba struktuuri seisundi monitoorimise süsteemiga on võimalik ennetada katastroofilisi hävinemisi, kuna

süsteem suudab teavitada väiksemate vigastuste tekkest ja struktuuri tugevusomaduste muutustest.

Leidmaks sobivaimat laba struktuuri seisundi monitoorimise meetodit, mis suudaks tuvastada struktuuri omaduste muutumist ajas, uuritakse ja katsetatakse generaatori labasid laboritingimustes. Lähemalt uuritakse laba dünaamilisi omadusi ja nende muutusi läbi vibratsioonide. Selleks kasutatakse teadmist, et igal kehal on  $N$  arv omavõnkesagedusi ja omavõnkevorme, mis on unikaalsed ainult sellele kehale. Omavõnkevorme nimetatakse ka modaalvormideks või modaalvõnkevormideks. Keha materjali ning jäikusomaduste muutus toob esile ka muutused eelmainitud modaalomadustes. Käesolevas töös eesmärk on leida ja testida meetodit, mis suudaks seda saavutada.

Tänapäeval kasutatakse struktuuride seisundi monitoorimist laialdaselt lennunduses ja ehituses. Ehituses kasutatavad meetodid on suhteliselt statsionaarsed ja kohmakad ning muutusi jälgitakse pika aja vältel. Ühed suurimaid monitoorimise objektid on sillad ja kõrghooned. Enimlevinud meetoditena kasutatakse tensoandureid struktuuril, avastamaks liigselt suuri tõmbepingeid struktuuri pindadel. Lennunduses kasutatakse tiibade seisundi monitoorimiseks erinevaid meetodeid. Probleem antud sektoris on aga liigselt paljude mõõtepunktide vajadus, et saavutada piisav monitoorimise täpsus.

Tuulegeneraatorite sektoris pole veel välja kujunenud ühtset laba monitoorimise standardset lahendust, mis oleks optimaalne nii rahaliselt kui ka füüsiliste mõõtmete poolest. Väiksemate labade puhul pole otstarbekas kasutada ülimalt andurite süsteeme, millede suurus võib ulatuda võrdväärseks generaatori jõumasina omaga. Monitoorimise süsteeme kasutatakse 1 kuni 2 MW turbiinide labade puhul, kus on kasutuses tööstuslikud erilahendused, mis sarnanevad ehitussektoris kasutatavatega. Antud juhul on labade pikkuseks umbkaudselt 40 m ning nende sisemusse mahub liikuma inimene. Käesolevas töös kasutatava laba pikkuseks on kolm meetrit ja see seab piirid monitoorimise süsteemi mõõtmetele. Lisaks on tarvis kasutada eeldatavasti ka juhtmevabasid andureid, mis veel enam nõuavad anduritelt efektiivsust.

Magirritöö on üles ehitatud üksteisele loogiliselt järgnevatele osadele. Teises peatükis, sissejuhatuse järel, antakse detailsem ülevaade valdkonnast ja elementidest, mida töö hõlmab. Antakse ülevaade tuulegeneraatorite tüüpidest ja ehitustest, lisaks vaadeldakse ka nende arengut ja kasvu. Järgnevalt kirjeldatakse täpsemalt tuulegeneraatorit, millelt pärinevad katsetustel kasutatavad labad. Seejärel tuuakse välja ülevaade tuuleturbiinidega seonduvate rikete kohta, kust selgub, kui suur osakaal on sellest labadel. Edasi antakse ülevaade



komposiitmaterjalidest ja nende ehitusest ning tuuakse ära tugevuslikud omadused, millel põhinevad teoreetilised arvutused. Sellele järgneb kiirendusandureid kirjeldav osa, kus tuuakse välja erinevad kiirendusandurite tööpõhimõtted, lisaks põhjendatakse kolmeteljelise kiirendusanduri kasutuselevõttu. Tuuakse välja ka kiirendusandurite platvormi ehitus ja kogu mõõtesüsteemi tööpõhimõte. Edasi vaadeldakse lähemalt laba, mille peal hakatakse töös mõõtmisi ja katsetusi teostama. Tuuakse välja osad, millest laba koosneb. Veel tuuakse välja labadel esinevad vigastused kirjanduse põhjal ja katsetataval labal esinevad vigastused.

Kolmandas peatükis võetakse käsitlemisele töö teoreetilised alused. Tuuakse välja vigastuste tuvastamise tasemed, mis on ühtselt kasutatavad antud valdkonnas. Järgnevalt uuritakse kahjustuse tuvastamise meetodeid, tuuakse välja struktuuride seisukorra monitoorimise süsteemide ülesehitus, mida tavapäraselt kasutatakse. Seejärel antakse ülevaade vibratsioonidel põhinevatest struktuuri seisundi monitoorimise meetoditest, esmalt kõrgsageduslikud meetodid, seejärel madalsageduslikud meetodid. Tuuakse välja meetodite võimekused ja iseärasused. Järgnevalt antakse ülevaade modaalanalüüsi teoreetilistest alustest, kuna see on seotud vibratsioonide uurimisega ning paljude madalsageduslike seisundi monitoorimise meetoditega. Edasi vaadeldakse lõplike elementide meetodil läbi viidud modaalanalüüsi tulemusi, mis annab ülevaate laba vibratsioonidest ning võimalikest omavõnkesagedustest. Edasiselt määratakse mõõtepunktide asetused labal lähtuvalt modaalanalüüsist. Viimase punktina antakse ülevaade Fourier' teisendustest.

Neljandas peatükis kirjeldatakse katsetamisel kasutatavaid seadmeid ja katsetusmetoodikaid. Esmalt tutvustatakse skannerit ja selle võimalusi, seejärel ergutuspendlit ja selle lisaseadmeid. Järgnevalt kirjeldatakse detailselt mõõtmistel kasutatavaid labasid ja nende vigastusi. Seejärel antakse ülevaade katsetusprotsessidest ja katseandmete töötlemisest.

Viiendas peatükis keskendutakse katsetulemuste analüüsimisele. Võrreldakse katsesessioonide tulemusi erinevate telgede suhtes. Vaadeldakse, kas ja kuidas müra mõjutab katsetulemusi. Võrreldakse erinevate filtrite kasutamist tulemuste paremaks visualiseerimiseks. Järgnevalt vaadeldakse, kuidas erinevad omavõnkesagedused nii labade lõikes kui ka modaalanalüüsiga võrreldes. Edasise vaatluse all on mõõtetulemused, kus labale tekitati kontrollitud vigastus. Lisaks võrreldakse anduritelt saadavaid tulemusi skanneri mõõtetulemustega. Tehakse järeldused mõõtetulemustest lähtuvalt.

Magistritöö lisades tuuakse välja kiirendusandurite andmelehed, mõõteskanneri tehniline spetsifikatsioon. Veel tuuakse välja MatLab lähtekoodid, millede abil viiakse läbi

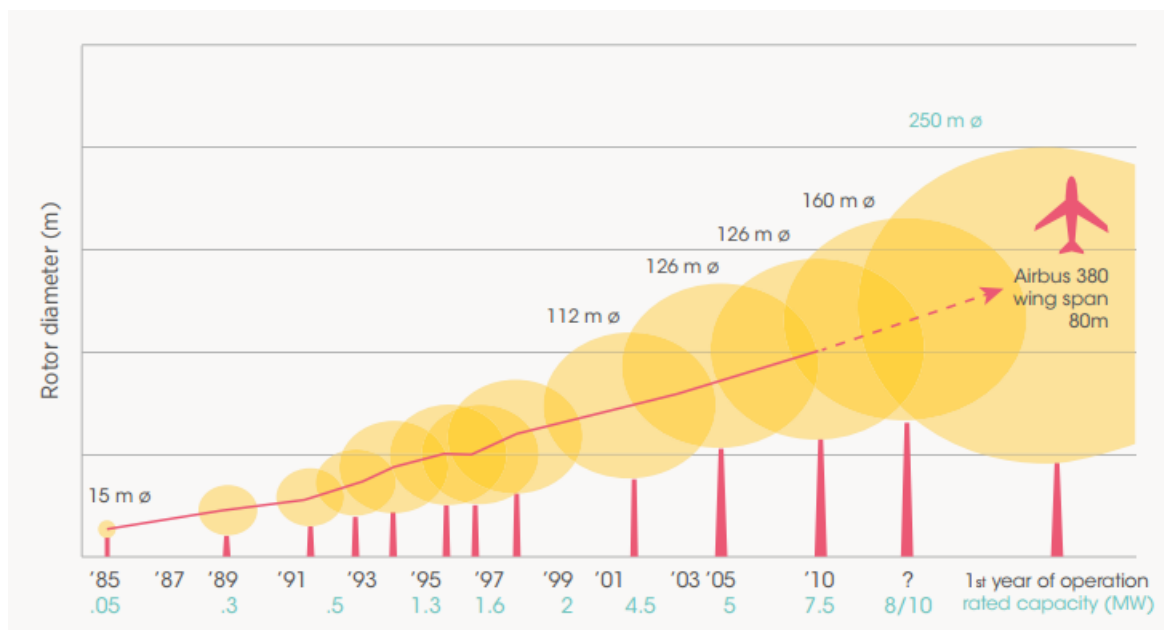
mõõteandmete töötlemine ja visualiseerimine. Viimase lisana on töös joonis laba ehituse ja kohta, kust on näha laba ristlõiked.

## 2 Ülevaade valdkonnast

### 2.1 Tuulegeneraator

Tuulegeneraatoreid on peamiselt kahte tüüpi, vertikaalse teljega ja horisontaalse teljega. Antud töös on vaatluse all horisontaalse teljega tuuleturbiin. Maailmas, kus üha enam kombatakse piire ja soovitakse luua järjest efektiivsemaid ning paremaid seadmeid, toimub pidev areng uute lahenduste loomiseks.

Samasugune tendents on ka tuuleenergia tootmises – generaatorite füüsilised mõõtmed kasvavad järjepidevalt. Arengut iseloomustab Sele 2.1, millelt on näha suuruste kasv aastate lõikes [2].



Sele 2.1 Rootorite diameetrite kasv aastate lõikes [2]

Kiire arengu ning seadmete suurenevate mõõtmete tõttu ei võimalda inimeste poolt teostatav visuaalne kontroll näha optimaalselt labade tugevuslikke omadusi, millest tulenevalt on tekkinud kasvav vajadus seadmete ja struktuuride tehnilise seisundi monitoorimise järele. Teema on oluline ka seetõttu, et täiskiirusel töötava generaatori, mille pöörlemiskiirus on  $230 \text{ min}^{-1}$ , laba purunemisel hävineb ka ülejäänud seade.

Paigalduse poolest jaotatakse tuulikud veekogu ja maismaa generaatoriteks. Mõlemal on omad eelised ja puudused. Laba seisukorra uurimise arengu poolest on potentsiaali ja turgu rohkem veekogudesse paigaldatud generaatoritel, kuna traditsiooniliselt hinnatakse laba tervist visuaalse kontrolli käigus.

Visuaalne kontroll viiakse läbi kas kraana või ronimisköite abil, mida ilmestab Sele 2.2. Merre paigaldatud tuulegeneraatori hooldamist või parandustöid raskendab hooldusaluse ebastabiilsus vee peal. Lisaks on talvisel ajal jääga kaetud veekogu puhul tööd veelgi enam raskendatud või isegi võimatud. Kirjeldatud asjaolude tõttu ongi väga oluline ennetada laba täielikku hävinemist selle monitoorimise näol.



Sele 2.2 Laba inspekteerimine ja hooldus [3]

Käesoleva magistritöö katsetes kasutatavad labad, millele hakatakse arendama struktuuri tervise monitoorimise platvormi, pärinevad firma my!WIND OÜ tuuleturbiinilt, mille võimsus on 5 kW. Tabel 2.1 on välja toodud info generaatori kohta. Märkimist väärib rootori nominaalne kiirus, mis seab labale täiendavad kvaliteedinõuded purunemise osas. Nii suure pöörlemiskiiruse puhul laba täieliku purunemise korral hävineb tuulegeneraator väga suures ulatuses või täielikult.

Tabel 2.1 my!WIND tuuleturbiini spetsifikatsioon [4]

Nimivõimsus	5 kW
Rootori läbimõõt	6 m
Mast	10 m (standardne)
	(saadaval ka kaablitega pingutatav mast ja erinevad kõrgused)
Rootori asetus	Allatuult
Tootlikkuse reguleerimine	Rootori labade asend
Lisapidur	Elektromagnetiline
Nominaalne rootori kiirus	230 min <sup>-1</sup>
Eriomadused	- Aerodünaamiliselt optimeeritud gondel
	- Laiad rootorilaba juured (abiks pöörlema hakkamisel)
	- Rõngasgeneraator ilma kägistamismomendita
	- Täielikult kapseldatud mähised
	- Lengerdamine topelt laagri süsteemiga

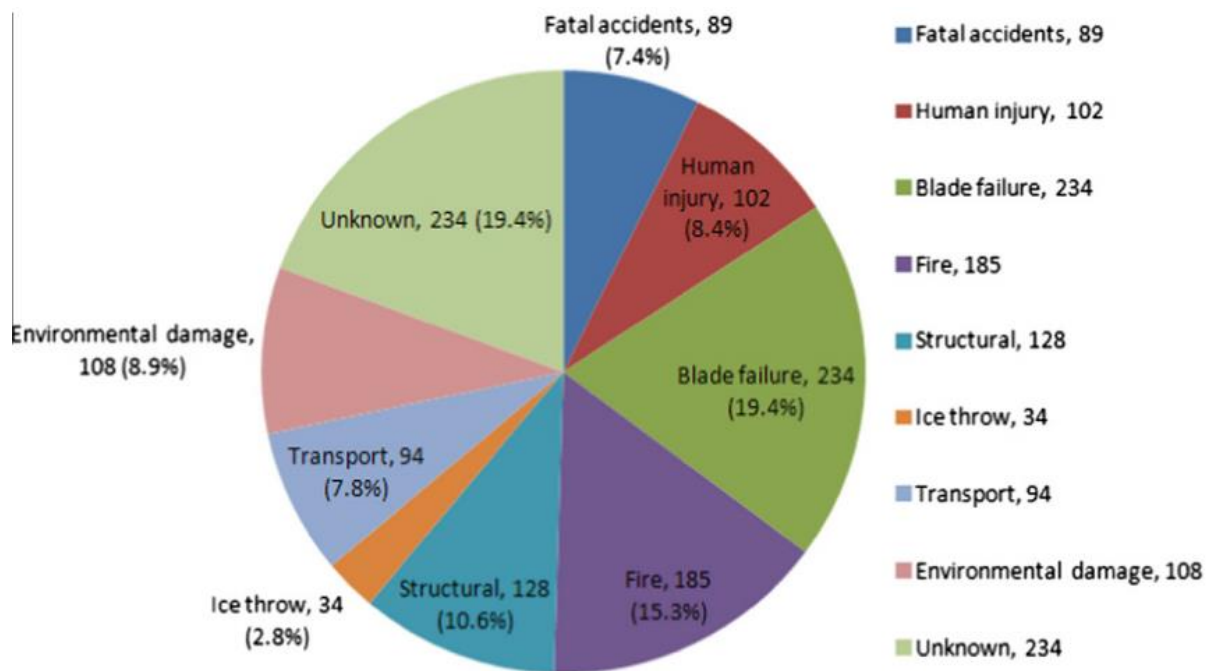
Alloleval Sele 2.3 on toodud ka pilt tootearendusprotsessis osalevast tuuleturbiinist, mis asub Pakri poolsaarel.



Sele 2.3 my!Wind OÜ tuuleturbiin [4]

## 2.2 Laba tõrgete ennetamise olulisus seisundi monitoorimise näol

Tuulegeneraatoritel tekkivatest tõrgetest ligi 20% on seotud labade purunemistega [5]. Sele 2.4 on näha suhteliselt suur labaga seonduvate tõrgete osakaal. Antud analüüs on koostatud Taiwanis, kus on suur osakaal looduskatastroofidel, kuna tegemist on seismiliselt ebastabiilse regiooniga. Eestis võib labaga seotud tõrgete osakaal olla veelgi suurem, kuna looduskatastroofide esinemissagedus on harv.



Sele 2.4 Tuulegeneraatorite rikked [5]

Labade maksumus on umbes viiendik kogu turbiini hinnast [1], seda juhul, kui tegemist on suurt tüüpi tuuleturbiiniga (3MW). Väiksemate mudelite puhul võib hinnaosakaal ulatuda isegi kolmandikuni, kuna üldehitustööde osakaal on väiksem. Lisaks on komposiitmaterjalist laba tootmine suures osas ülesehitatud inimtööjõule, kuna automatiseerida protsessi on keerukas ja majanduslikust aspektist mittetasuv. Alternatiiviks ongi labadele tehtav arendustöö, et nende efektiivsust ja töövõimet parandada ning pikendada.

## 2.3 Komposiidid

### 2.3.1 Komposiitmaterjalide üldised omadused

Komposiitmaterjal on kahest või enamast koostisosast koosnev materjal, mille komponendid on diskreetsed ning äratuntavalt eristatavad. Komposiidi moodustavad armatuur ehk sarrus ja maatriks. Armatuuriks on kiuline materjal nagu klaasplastlaminaat või süsinikplastlaminaat.

Maatriksina kasutatakse epoksiidvaike ja polüestervaike, millest viimane on 3...5 korda odavam esimesest. Epoksiidvaik on hea sitkuse ning nakketugevusega reaktoplast. Epoksiidvaik on täielikult kõvenenuna väga hea niiskuskindlusega. Kõrgkvaliteetse epoksiidvaigu nakketugevus on maksimaalselt ca 14 MPa, polüestervaigul 0.7 MPa. Polüestervaik kahaneb kõvenemisel ning sisaldab oluliselt rohkem lenduvaid komponente, mis tekitavad materjalis poorsust ning on mürgise toimega [6]. Tuulikutes kasutatakse eranditult polümeermaatriksil baseeruvaid kiudkomposiitmaterjale. Käesolevas töös kasutatud labal on kasutuses klaasplastlaminaat ja maatriksiks on polüestervaik.

Üldiselt on komposiidid kõrge eritugevusega korrosioonikindlad materjalid, mis on ülimalt vastupidavad väsimuskoormustele. Komposiitide suurimaks negatiivseks omaduseks on asjaolu, et nende purunemisel on enamasti katastroofilised tagajärjed.

### 2.3.2 Komposiitmaterjalide tugevusomadused

Komposiitmaterjale käsitletakse reeglina ortotroopsetena. See tähendab, et nendel on erinevad x-, y- ja z-telgede suunalised mehaanilised omadused.

Tabel 2.2 on välja toodud tüüpilised sisendväärtused, millega tehakse erinevaid arvutusi ja simulatsioone, kui pole teada reaalse komposiidi katsetulemuste väärtusi.

Tabel 2.2 Tüüpilised arvutuste sisendandmed

<b>Elastsusmoodulid</b>	<b>Tõmbetugevused</b>	<b>Survetugevused</b>
$E_x = 20 \text{ GPa}$	$\sigma_{xt} = 400 \text{ MPa}$	$\sigma_{xc} = 250 \text{ MPa}$
$E_y = 20 \text{ GPa}$	$\sigma_{yt} = 400 \text{ MPa}$	$\sigma_{yc} = 250 \text{ MPa}$
$E_z = 8 \text{ GPa}$	$\sigma_{zt} = 70 \text{ MPa}$	$\sigma_{zc} = 150 \text{ MPa}$
<b>Poissoni tegurid</b>	<b>Nihkemoodulid</b>	<b>Nihketugevused</b>
$\nu_{xy} = 0.26$	$G_{xy} = 6 \text{ GPa}$	$\tau_{xy} = 50 \text{ MPa}$
$\nu_{yz} = 0.1$	$G_{yz} = 6 \text{ GPa}$	$\tau_{yz} = 50 \text{ MPa}$
$\nu_{xz} = 0.1$	$G_{xz} = 2 \text{ GPa}$	$\tau_{xz} = 30 \text{ MPa}$

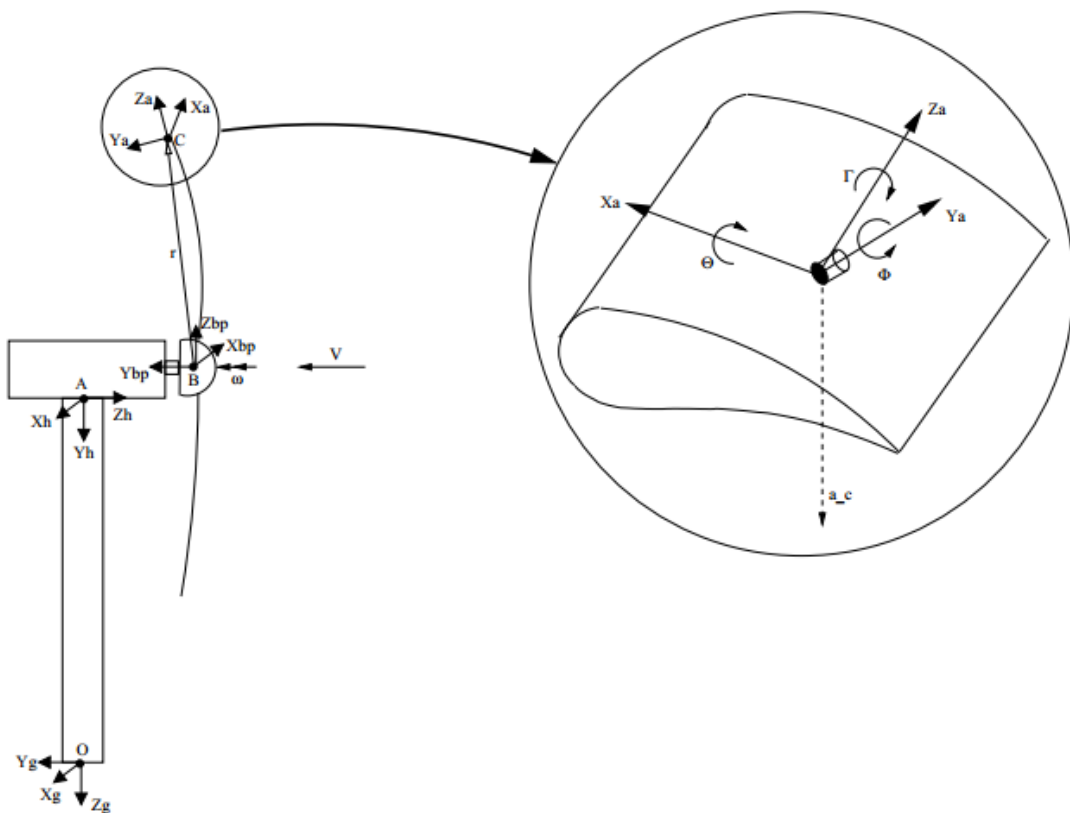
## 2.4 Kiirendusanduri platvorm

„Smart Composites - Design and Manufacturing“ projekti raames plaanitakse laba seisundit monitoorida kiirendusandurite platvormiga. Ühte platvormi kuulub lisaks kiirendusanduritele

ka tenso-, niiskus- ning temperatuuriandur. Kiirendusandurite ülesanne on laba vibratsioonide alusel ennetavalt hinnata labal struktuursete vigastuste teket. Kiirendusandureid on kolme erinevat tüüpi [7]:

1. Piesoelektrilised - kristallilistes ainetes tekib elektriline pinge, kui sellele avaldada mehaanilist mõju.
2. Piesotakistuslik - pooljuhi elektriline takistus muutub, kui seda deformeeritakse. Mõõdetakse voolu muutust piesotakistuslikus elemendis.
3. Mahtuvuslikud - kiirendust reguleerivad vedrulehed summutavas gaasikeskkonnas. Mõõdetakse vedrulehtede vahelise mahtuvuse muutumist.

Platvormis kasutatakse MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) tüüpi mahtuvuslikke kolmes teljes mõõtvaid kiirendusandureid. Nende üheks eeliseks on omadus muuta mõõdetavaid koordinaattelgi tarkvaraliselt sobivaks mõõdetava objekti suhtes selliselt, et andurit füüsiliselt laba suhtes ei liigutata. Antud võimalust saab kasutada ka laba mõõtmisel, kui viimane on ühtlaselt painde all tuulekoormusest tulenevalt [8]. Olukorda selgitab Sele 2.5.



Sele 2.5 Laba koordinaattelgede muutus tulenevalt tuulekoormusest [8]



Üheteljelise või kaheteljelise anduri puhul telgede kohandamist teostada ei ole võimalik. Teise eelisena saab mahtuvuslikku kiirendusandurit kasutada mõõdetava objekti vastavate punktide siirete mõõtmiseks. Eelneva saavutamiseks arvutatakse kiirendustest topelt integraal [8], mida kasutatakse laba seisundi monitoorimisel.

$$d_c(t) = d_0 + v_0 t + \int_0^t dt \int_0^t \alpha(\tau) d(\tau) \quad (2.1)$$

Kus  $d_0$  on siirde algpunkt  $t = 0$

$v_0$  on algkiirus  $t = 0$

$d_c$  on arvutuslik siire  $t$

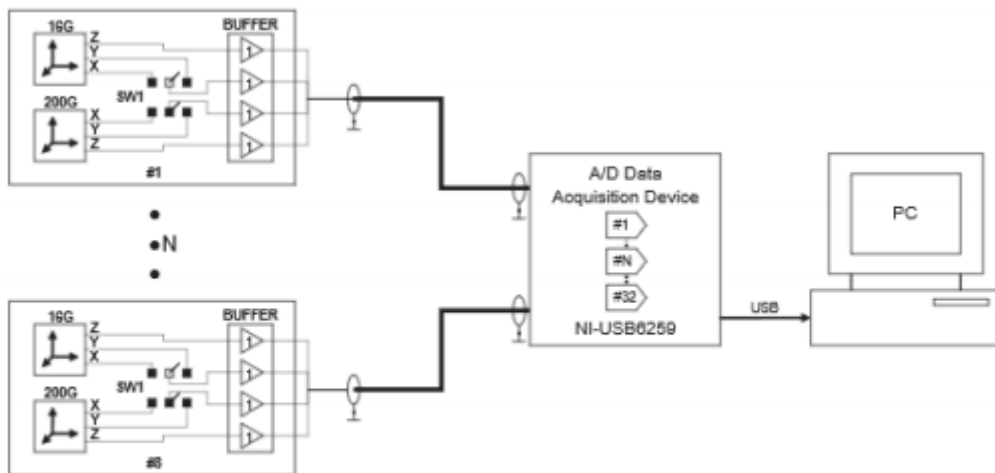
Antud valemit kasutatakse pidevate väärtuste ehk funktsioonide puhul. Valem on sobilik, kuna kasutusel on analoogandurid. Digitaalandurite puhul peab kasutama teistsuguseid meetodeid, sest kujusiirete väljavõtmine on keeruline ning selleks on vajalik luua spetsiaalne algoritm.

Mõõteplatvorm koosneb kahest erinevate karakteristikutega mahtuvuslikust MEMS tüüpi analoog kiirendusandurist, mis on näha Sele 2.6 [9]. Andurite tüübid on ADXL326 ja ADXL377. Andurite võimekuse ja parameetritega saab tutvuda lisa 1 ja lisa 2. Mõlemat andurit saab sisse ja välja lülitada andmehõivesüsteemist.



Sele 2.6 Mõõteplatvorm kahe kiirendusanduriga [9]

Mõõtesüsteem ise koosneb mitmest mõõteplatvormist, mis ühendatakse andmehõive moodulisse. Andmeid analüüsitakse, töödeldakse ja visualiseeritakse LabWiew’l baseeruva tarkvaraga andmehõivemoodulist. Sele 2.7 on näha mõõtesüsteemi komponendid ja ühendused.

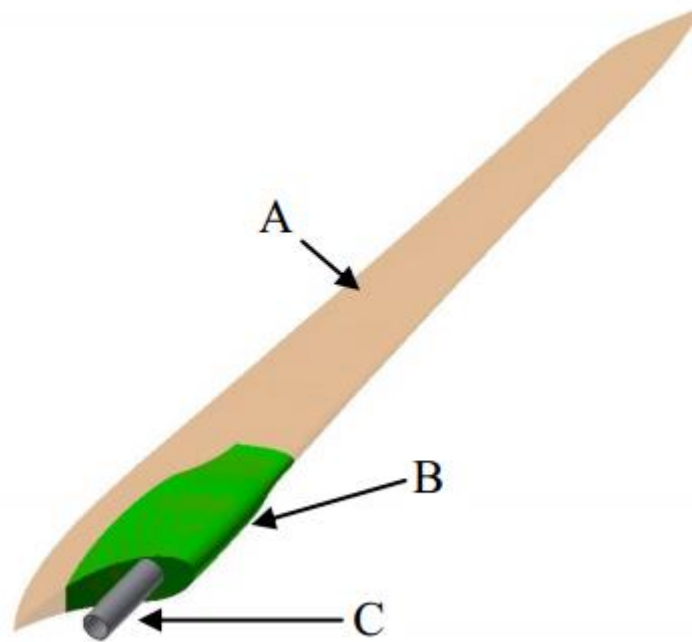


Sele 2.7 Kiirendusandurite mõõtesüsteemi plokkskeem

Parema andmete analüüsimise eesmärgil plaanitakse tulevikus analoogväljundiga andurid vahetada digitaalsete vastu. Lisaks on ette nähtud laba varustada ka tensoanduritega kohtadesse, kus on labal kõige suuremad pindmised pinged. Suurimate pindmiste pingete asukohad täpsustatakse LEM (Lõplike Elementide Meetod) analüüsi ja ka käesoleva töö raames.

## 2.5 Uuritav laba

Uuritav laba on suhteliselt lihtsa ehitusega. Lihtsus teeb ka laba suhteliselt odavaks omataoliste seas. Siiski vajab laba seisukord monitoorimist, kuna turbiini pöörlemiskiirus on kõrge ning generaatori arendamisega tegelev ettevõtte my!Wind OÜ plaanib arendada suuremaid ja võimsamaid turbiine, millede labade tootmishind võib ulatuda kolmandikuni generaatori koguhinnast. Sele 2.8 on näha laba põhikomponendid: A-korpus, B-südamik, C-kinnitustoru.

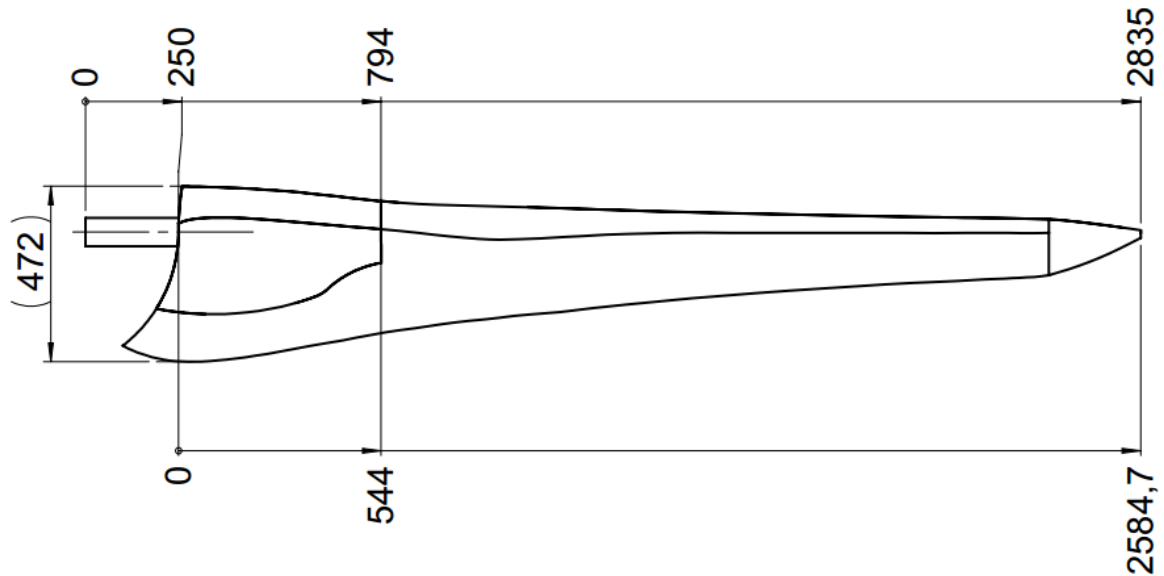


Sele 2.8 Laba põhikomponendid [10]

Korpus koosneb klaasplastist, südamik polüesterplokist ja kinnitustoru metallist. Korpuse detailne kihiline ehitus [10]:

1. Välispinnakiht Gelcoat GS paksusega 0,4 mm.
2. Ristkiudmatt (CSM) pindtihedusega  $600 \text{ g/m}^2$ , paksusega 2 mm. Kihi eesmärk on kaitsta sisemisi kihte ja üldist struktuuri niiskuse ja löökide eest.
3. Neli kihti  $0^\circ/90^\circ$  biaktsiaalset kangast (BRM) pindtihedusega  $600 \text{ g/m}^2$ , paksusega 0,2 mm. Kanga teljed on asetatud vastavalt piki- ja ristisuunaliselt laba kujuga.

Korpus on toodetud kasutades käsitsi lamineerimise tehnoloogiat, kus iga kanga kiht lisatakse käsitsi ning kaetakse vaiguga. Vaiguna on kasutatud firma Reichhold Polylite 413 seeria polüestervaiku. Vaik vastab 1140 tüüpi vaiguklassile DIN 16946/2 standardi järgi [11]. Korpus kinnitub valatud polüesterplokist südamiku külge mõlema poolega ja pooled on omavahel kokku liimitud. Liimitud pind on hetkel kõige enam katki minev piirkond labal. Südamikku on valatud omakorda varrastega kinnitustoru, mis on standardsest S355 tugevusega terasest. Kinnitustoru kaudu ühendatakse laba turbiiniga. Sele 2.9 on näha laba mõõtmed ja kuju. Lisas 7 on toodud detailsem laba struktuuri joonis.



Sele 2.9 Laba mõõtmed

## 2.6 Labadel esinevad tõrked

Komposiitmaterjalidest labade puhul juhtub üsna mitmeid tõrkeid, mida peaks monitoorimisel jälgima. Järgnevalt on välja toodud mõningad üldised labade töötamisel tekkivad vigastused. Allpool tuuakse välja ka testitaval labal tekkivad kahjustused.

Vigastused, mis on üldiselt seotud komposiitide kahjustumisega [12],[13],[14]:

1. Komposiidi fiibri purunemine
2. Delaminatsioon (kihid tulevad üksteise küljest lahti)
3. Mõrad laminaadis
4. Liidetes esinevad praod
5. Laminaadi kiudude murdumine
6. Laba struktuuri dünaamilise karakteristikku muutumine
7. Kahjustused laba aerodünaamilise osa üleminekul kinnituskohale

OÜ my!Wind tootearenduse tarbeks ehitatud tuulegeneraatoril on ettevõtte katsetatud erinevaid arendusjärgus olevaid labasid ning selle käigus on ka selgunud enimlevinud kahjustused ja vead:

1. Laba korpuse pooltevahelise liimliite purunemine.
2. Kinnitustoru ja laba ühenduskohast lahti tulevad tükid.

3. Kinnitustoru ja laba ühenduskohas tekkivad praod.
4. Pragudest korpuse sisemusse pääsev niiskus, mis viib labad tasakaalust välja.
5. Laba juhtserva kulumine erosiooni toimetel ja aerodünaamiliste omaduste halvenemine.
6. Linnu või muu füüsilise eseme löök labale.
7. Laba liikumine telgsuunas mööda toru edasi umbes 10 mm. Tõenäoliselt plastne deformatsioon või vaigu kuivamisprobleemid.

### 3 Teooria

#### 3.1 Laba kahjustuste tuvastamine

Laba struktuuri seisundi monitoorimisel klassifitseeritakse tuvastusmeetodid tasemeteks, mis on välja toodud Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Vigastuse tuvastamise tasemed

Tase 1	On tuvastatud vigastuse olemasolu.
Tase 2	On tuvastatud vigastuse olemasolu ja geomeetriline asukoht.
Tase 3	On tuvastatud vigastuse olemasolu, geomeetriline asukoht ja kvantitatiivne ulatus.
Tase 4	Ennustatakse struktuuri allesjäänud kasutusiga kuni kriitilise hetkeni.

Käesolevas töös on kasutusel meetodid, mis suudavad anda tulemusi esimese taseme raames ning osaliselt ka teisel tasemel. Vibratsioonidel põhinevaid seisundi monitoorimise meetodeid on erinevaid.

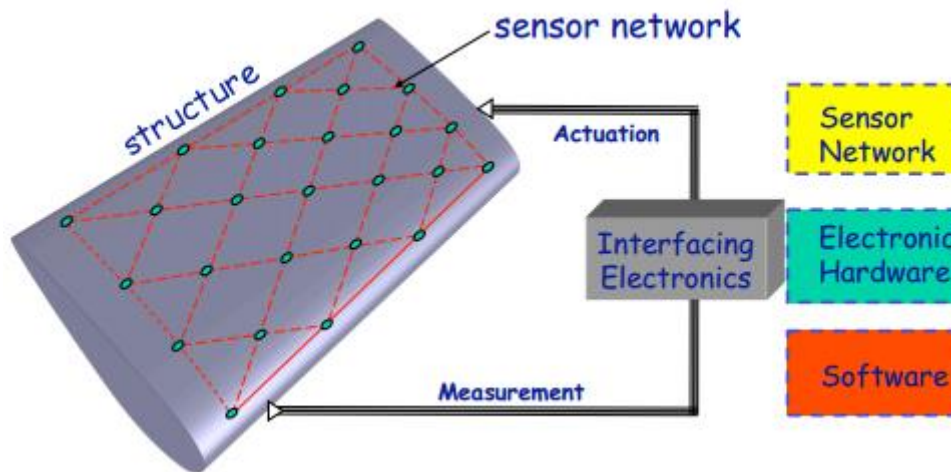
#### 3.2 Kahjustuste tuvastamise meetodid

Kuna antud magistritöö teemaks on struktuuri seisundi monitoorimine läbi vibratsioonide, siis antud alapunktis vaadeldakse erinevaid vibratsioonidel põhinevaid meetodeid. Üldjoontes võib meetodid omakorda jaotada kaheks, milleks on madalsageduslikud ja kõrgsageduslikud.

Vibratsioonidel põhinevad struktuuri seisundi monitoorimise süsteemid on enamjaolt sarnased. Süsteemi tüüpilisteks osadeks on [15]:

1. Sensorite võrgustik.
2. Vibratsioonide tekitamise allikas, mis ergutab struktuuri, et sensorid saaks mõõta keha dünaamilisi karakteristikuid.
3. Signaalitöötlus ja selle algoritmid, mille eesmärgiks on sensoritest tulevate toorete andmete töötlemine ja parametriseerimine, et leida võimalik kahjustuse olemasolu.
4. Tulemuste implemteerimise algoritmid, millede eesmärgiks on kahjustuse ulatuse ja olulisuse hindamine või ka potentsiaalse kahjustuse ennustamine.

Süsteemi osadest annab visuaalse ülevaate Sele 2.1.

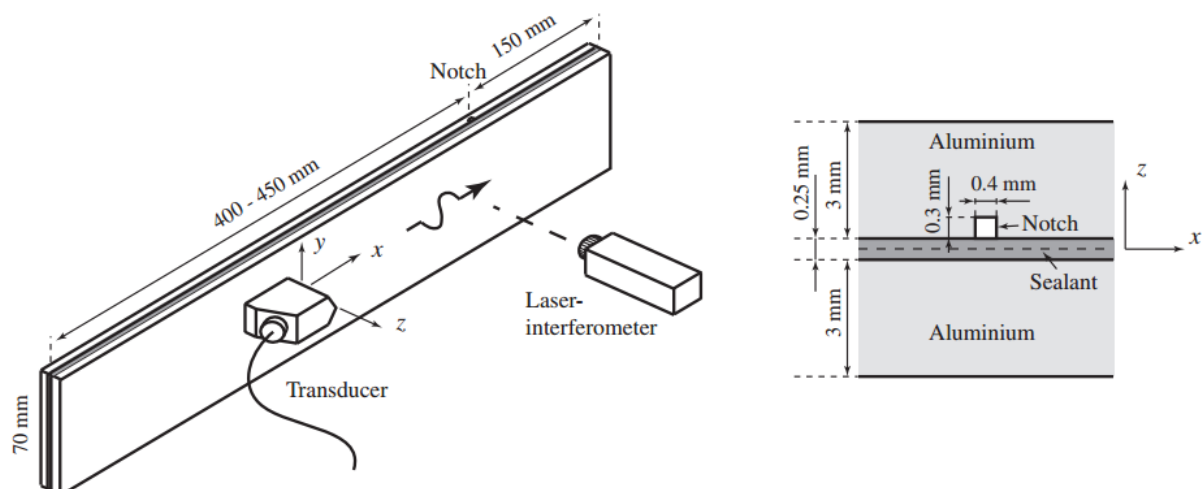


Sele 3.1 Tüüpilise SHM süsteemi illustatsioon [16]

### 3.2.1 Kõrgsageduslikud meetodid

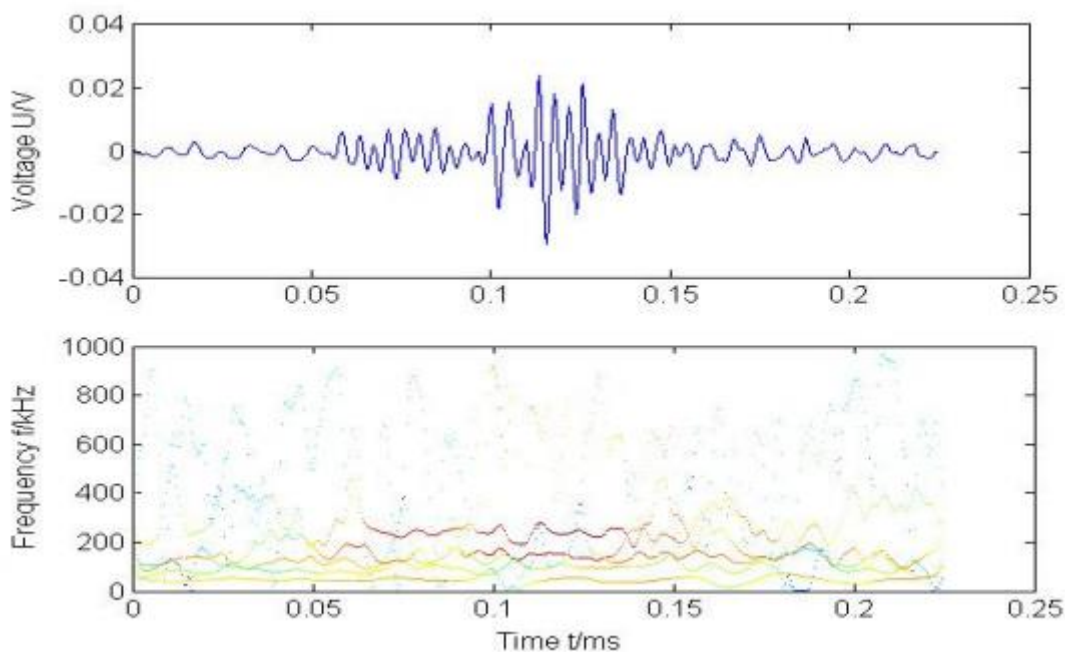
Üldiselt on antud meetodid väga spetsiifilised ja teostatavad laboritingimustes, tuvastamaks pisikesi defekte struktuuris. Meetodid üldjuhul ei vaja etalonmudelit või referentskeha, mis oleks võrdluspunktiks.

Üheks meetodiks on lainete levimine elektromehaanilistes struktuurides. Meetodis kasutatakse piesoelektrilisi andureid, millest ühed võivad töötada aktuaatorina ehk signaali generaatorina ja teised andmete vastuvõtjana. Vastu võetakse lainete kaja, mis on tagasi peegeldunud struktuuris tekkinud kahjustustest. Antud meetod on efektiivne tuvastamaks pragusid metallstruktuurides, kasutades Lamb'i lainete levikut, kuna need on teatud kahjustustele tundlikumad [15].



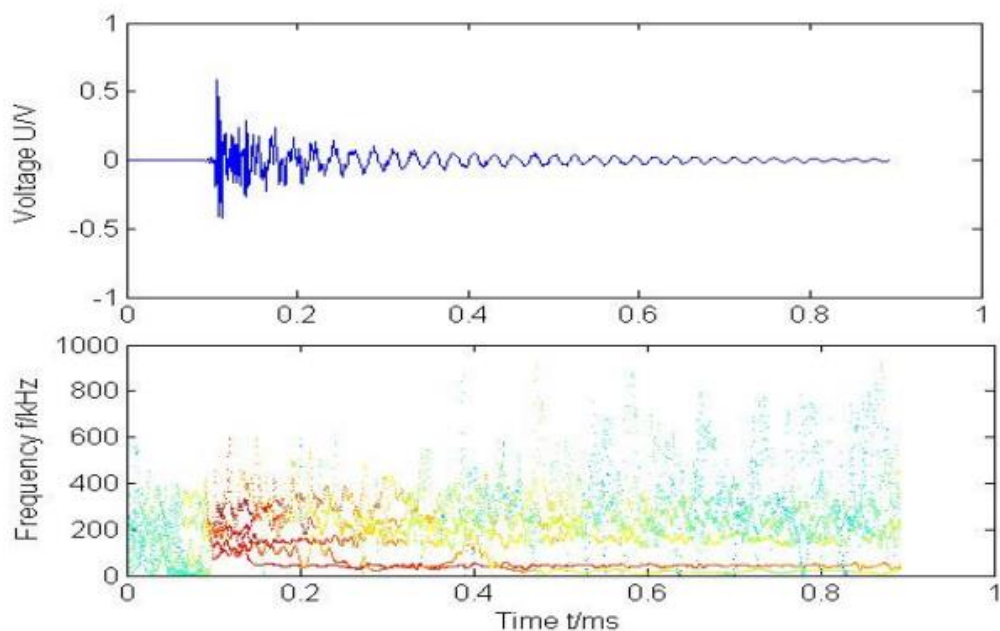
Sele 3.2 Illustratiivne katse ülesehitus, uurimaks lainete levikut struktuuris [17]

Teiseks meetodiks on akustiline emissioon. Materjalid, mis kannavad endas paindeid ja pingeid, võivad emiteerida helilaineid, kui nende sees tekivad järsult kiired struktuuri muudatused. Lainete amplituude ja muid omadusi saab kasutada kahjustuse ulatuse indikaatorina. Akustiline emissioon on globaalne struktuuri seisundi monitoorimise meetod, olles fundamentaalselt erinev tensoandurite tööpõhimõttest, mis suudab pingeid vaid lokaalselt tuvastada. Läbi materjali levivad elastsed lained, mis kannavad endas kahjustuse allikas tekkinud energiat. Laine tuvastamist raskendab dispersioon. Dispersioon on nähtus, mis summutab helilaine leviku teravust, kuna erinevad sagedused levivad struktuurides erineva kiirusega. Lisaks tekib energia neeldumisest laine sumbuvus, mis vähendab signaali amplituudi. Eriti kiiresti sumbuvad kõrgemad sagedused oma vähese energia tõttu. Komposiitmaterjalid on tuntud oma hea sumbuvuse tõttu, seega levivad sellistes materjalides kaugemale madalama sagedusega lained. Madalate sageduste vahemikus on aga ka kõrge müranivoo, mis võib summutada tegeliku kahjustuse tekkest tuleneva akustilise impulsi. 150 kHz peetakse optimaalseks sageduseks, kus müra ei hakka akustilist emissiooni varjama [18]. Antud meetod nõuab monitoorimise süsteemi igahetkelist aktiivolekut, kuna kahjustus võib tekkida mistahes hetkel. Sellest tulenevalt on süsteemi puhul andmemaht suhteliselt suur.

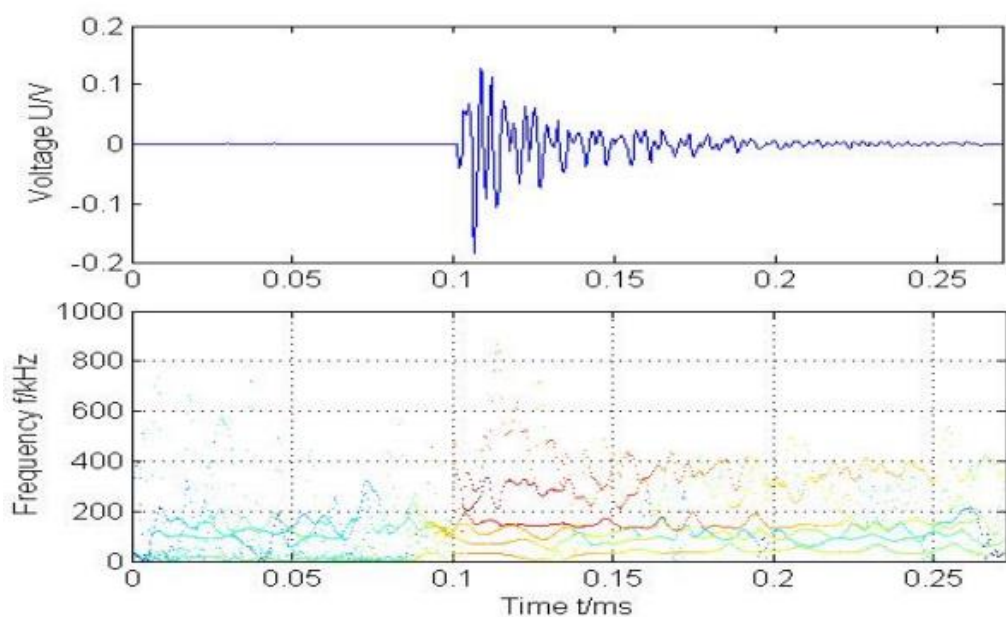


Sele 3.3 Aegdomeenis spekter süsinikkomposiidis tekkinud prao puhul [19]





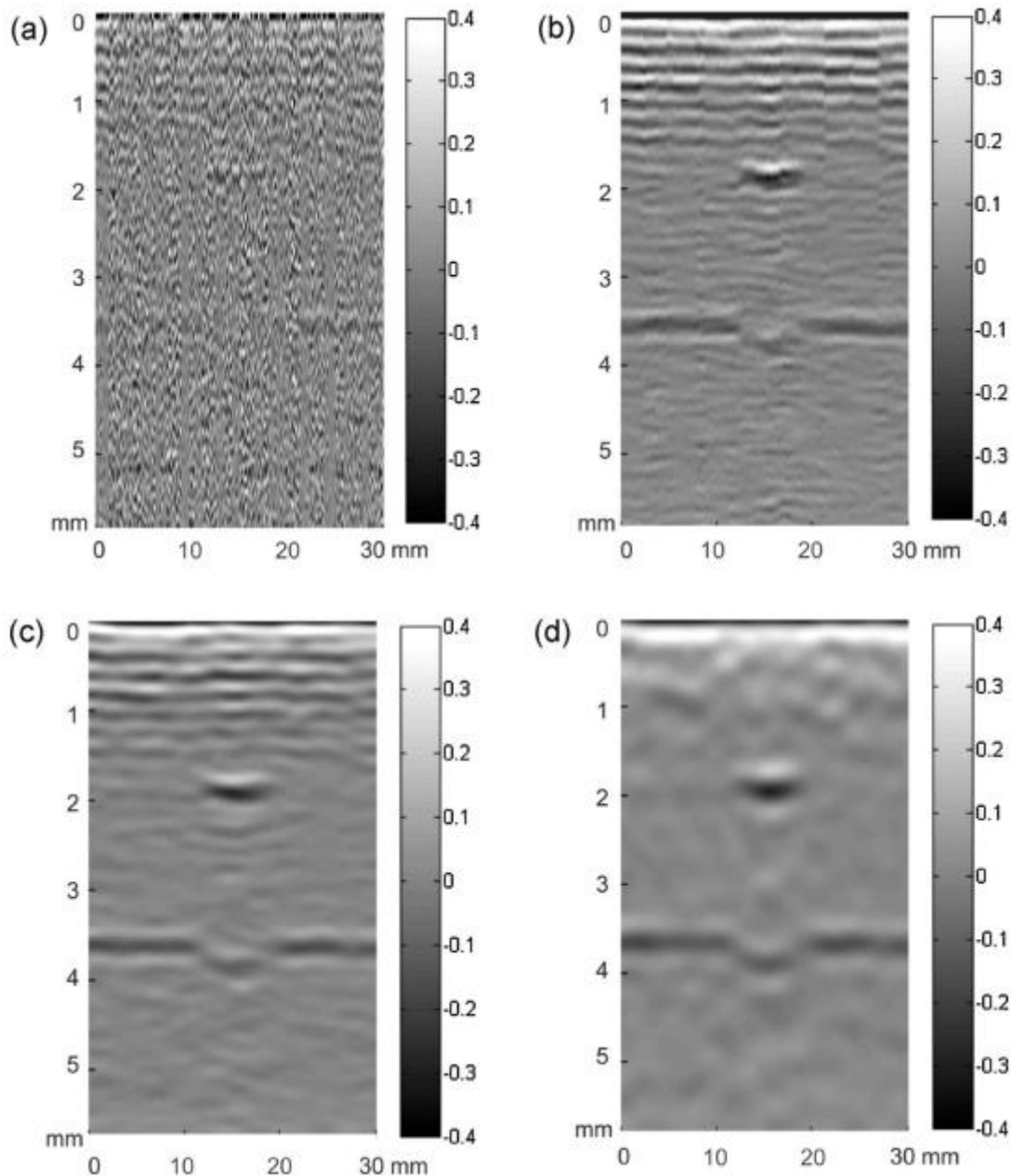
Sele 3.4 Aegdomeenis spekter süsinikkomposiidis tekkinud delaminatsiooni puhul [19]



Sele 3.5 Aegdomeenis spekter süsinikkomposiidi fiibri purunemise puhul [19]

Kolmandaks meetodiks on ultraheli testimine. Üks traditsioonilisemaid testimisi on ultraheliga struktuuri "vaatamine". Helilained suudavad suhteliselt lihtsalt läbida tahkeid kehasid. Kui helilainete levikuteele tekib ebakorrapärasus materjalis, näiteks mõra või pragu, siis peegeldub helilaine allika suunas tagasi. Väiksemate lainepikkuste puhul on helilaine

tagasipeegeldumine intensiivsem. Tavaline sagedusvahemik inspekteerimisel on 0,5 MHz kuni 25 MHz ja lainepikkuseks umbes millimeeter [20]. Antud meetod on väga laialdaselt levinud metallurgias. Sele 2.1 on näha ultrahelipilte, mis on skaneeritud labaga sarnasest materjalist.



Sele 3.6 Erinevalt filtreeritud ultrahelipildid komposiitmaterjalist [21]

### 3.2.2 Madalsageduslikud meetodid

Madalsageduslikud struktuuri seisundi monitoorimise meetodid on levinud reaalsetes lahendustes ja olemasolevatel struktuuridel nii labade kui ka näiteks sildade puhul [22]. Meetodid kasutavad struktuuri modaalsageduste ja modaalkuju infot, mis omandatakse kehale

dünaamilisi katsetusi tehes. Muutused sagedustes, modaalvormides ja jäikusel annavad teada kahjustuse tekkest. Antud meetodid pole väga tulemuslikud, kui tegu on väiksemat tüüpi, mitme või keerulise kahjustusega [15].

Esimeseks meetodiks on resonantssageduste meetod. Teadaolevalt muudavad keha jäikuse ja massi muutused selle resonantssagedusi. Mõõtes omavõnkesagedusi erinevatel hetkedel, saab sageduste nihkumisi vaadelda. Enamikel juhtudel on mõõtmiste teostamiseks vajalik ainult üks andur terve struktuuri peale. Kuna sageduste nihkumine pole tundlik väikestele kahjustustele, siis on oluline, et mõõtmised toimuksid tundlike anduritega just väikeste kahjustuste tekkimisel. Kuna sagedused on keha kui terviku omadus, siis suudab meetod tuvastada ainult kahjustuse teket ja vähesel määral ka kahjustuse suurust, aga mitte asukohta struktuuris. Üldiselt on antud meetod väga edukas laboritingimustes tehtavate katsetuste puhul. Reaalsete struktuuride puhul soovitatakse kasutada lisaks antud meetodile veel mõnda meetodit täpsemaks tuvastamiseks ja valideerimiseks [15].

Teiseks meetodiks on modaalvõnkevormide meetod. Mõõtmised nõuavad ühte ergutusallikat ja mitut mõõtepunkti või liikutavat ergutit ning ühte või mitut sensorit. Mitmed modaalanalüüsi meetodid on üles ehitatud identifitseerimaks modaalvorme infost, mis on mõõdetud aegdomeenis. On loodud mitmeid kahjustuse tuvastamise meetodeid, mis suudavad identifitseerida vigastuse otse modaalvõnkevormilt või modaalkujust. Meetodi piiranguks on vajadus saada tulemusi paljudest struktuuri punktidest. Laboritingimustes on parim viis mõõta modaalvorme Laser Doppler Vibromeetiga (LDV), mille puhul saadakse väga tihe mõõtepunktide võrgustik. Üldiselt on meetod töötav ja mitmeid kordi kontrollitud, aga probleeme tekib suurte struktuuride mõõtmisel mürafooni, mõõtevigade ja täpsusega.

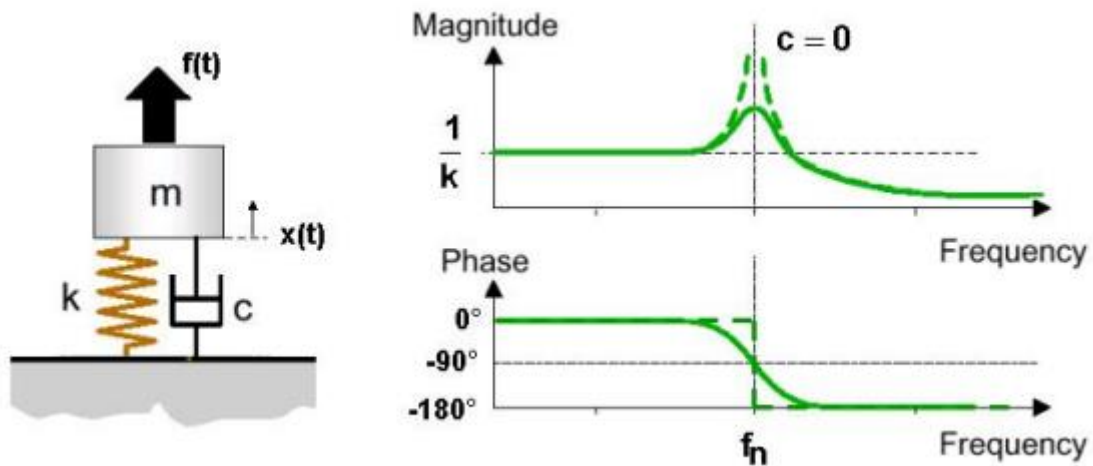
### **3.3 Modaalanalüüsi teooria**

Igale kehale on omased teatavad omavõnkevormid, mis sõltuvad keha materjali omadustest (mass, jäikus, sumbuvus) ja piirtingimustest. Igat modaalvormi saab defineerida omavõnkesageduse ehk resonantssagedusega, modaalsumbuvusega ja modaalkujuga. Modaalvorm muutub, kui muutuvad materjali omadused või piirtingimused kehas. Kehale omased vibratsioonid muutuvad, kui kehale lisada massi. Sama juhtub ka keha kuju muutumisel või selle tugevusomaduste muutumisel.

Antud projekti puhul on tegemist ühe vabadusastmega süsteemiga (SDOF *single-degree-of-freedom*). See tähendab, et vaatluse all on ainult laba ristlõike tasapinnaga normaalis olevad

võnkumised [23]. Kuna teistes tasapindades on laba suhteliselt jäik, siis nende tasapindade suhtes teostatakse vaid kontrolliv analüüs. Lisaks ei vaadelda labas tekkivaid väändeid.

Järgnev tuletuskäik käib SDOF süsteemi kohta, mis tähendab, et keha liigub ühe telje suunas (vt Sele 3.7) [24].



Sele 3.7 Ühe vabadusastmega süsteem [24]

Järgnev võrrand kirjeldab olukorda matemaatiliselt:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (3.1)$$

Kus  $m$  – on keha mass

$c$  – on sumbuviskoefitsent

$k$  – on jäikuskoefitsent

Valemist 3.1 selgub, et kõikide jõudude summa, mis mõjub massile  $m$ , võrdub nulliga. Sealjuures  $f(t)$  on väline mõjutav jõud,  $m\ddot{x}(t)$  on inertsjõudude komponent,  $c\dot{x}(t)$  on sumbuviskoefitsent ja  $kx(t)$  on jäikuskomponent, mis kirjeldab algasendisse liikumist. Muutuja  $x(t)$  kirjeldab massi  $m$  asukohta tasakaalupunkti suhtes.

Sisestades valemi 3.1 Laplace'i domeeni. Eeldusel, et algtingimused on nullid:

$$Z(s)X(s) = F(s) \quad (3.2)$$

kus  $Z(s)$ - on dünaamiline jäikus

Saame tuletada järgneva võrrandi:

$$Z(s) = ms^2 + cs + k \quad (3.3)$$

Üleminekufunktsioon  $H(s)$  siirde  $X(s)$  ja jõu  $F(s)$  vahel

$$X(s) = H(s)F(s) \quad (3.4)$$

on võrdne dünaamilise jäikuse inversiooniga.

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (3.5)$$

Valemis 3.5 on nimetaja juured ülekandefunktsiooni süsteemi poolused. Mehaaniliste struktuuride sumbuvestegur  $c$  on tavaliselt väga väike, mille tulemusena tekivad keerukad konjugeeritud pooluspaarid

$$\lambda = -\sigma \pm i\omega_d \quad (3.6)$$

kus  $f_d = \omega_d/2\pi$  on summutatud omavõnkesagedus

$$f_n = \omega_n/2\pi \text{ on summutamata omavõnkesagedus, kus } \omega_n = \sqrt{k/m} = |\lambda|$$

Kui lisada mass  $\Delta m$  algsele struktuuri massile  $m$ , siis omavõnkesagedus muutub

$$\omega_n = \sqrt{k/(m + \Delta m)} \quad (3.7)$$

Seda eeldusel, et  $c = 0$  ehk kehal puudub sumbuvus.

Vahetades Laplace'i muutuja  $H(s)$  välja omavõnkesageduse vastu  $H(\omega)$ , on sagedusreageeringu funktsioon (*The Frequency Response Function*)

$$H(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + ic\omega + k} = \frac{1}{(k - m\omega^2) + ic\omega} \quad (3.8)$$

Järgmisest võrrandist selgub, et kui  $c = 0$ , siis  $H(\omega)$  muutub lõpmatult

$$\omega \rightarrow \omega_n = \sqrt{k/m} \quad (3.9)$$

Väga vähe on olemasolevaid struktuure, mida saaks modelleerida ühe vabadusastme põhiselt, siiski on SDOF süsteemi omadused olulised, sest neid võib käsitleda kui keerukamate mitme vabadusastmega süsteemide ühte lineaarset vabadusastet ja selle karakteristikuid. Eelneva tuletuskäigu järeldusena võib väita, et keha omaduste ja massi muutumisel muutuvad ka omavõnkevormid ja omavõnkesagedused.

### 3.4 Laba omavõnkevormid ja andurite asetus

#### 3.4.1 LEM modaalanalüüs

Saamaks aimdust laba omavõnkevormidest, sagedustest ja kujudest, viidi modaalanalüüs läbi esmalt lõplike elementide meetodi (LEM) abil. Analüüsi tulemusena selgusid omavõnkevormide suurimate siirete piirkonnad. Piirkondade väljaselgitamine oli oluline, kuna nendesse on plaanis asetada nii andurid kui ka katsetuses kasutatavad markerid, mis saavad mõõtepunktideks skannerile. Tabel 3.2 on välja toodud omavõnkesagedused ja suurimate siirete asukohad sagedustes.

Tabel 3.2 LEM analüüsi omavõnkesagedused ja siirded

Omavõnkevorm	Omavõnkesagedus, Hz	Max. siirde asukoht	Suur siire
1.	7,12	Tipp	-
2.	30,75	Tipp	Keskkoht
3.	55,4	Alumine vasak tipp	Ülemine vasak nurk
4.	82,5	Tipp	2/4 ja 3/4
5.	150,83	Tipp	Keskkoht ja 3/4
6.	169,61	Tipp	Keskkoht

Järgnevatel seledel on toodud välja modaalanalüüsi sisendandmed ja modaalvormide kujud, mille alusel otsustatakse andurite/markeri asukohad labal. Sisendandmed on olulised, kuna komposiitide puhul pole tegemist homogeensete materjalidega vaid ortroopsetega ja mehaanilised omadused telgede lõikes pole võrdsed.

Properties of Outline Row 7: Woven GFRP












	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Orthotropic Elasticity				
3	Young's Modulus X direction	14500	MPa		
4	Young's Modulus Y direction	14500	MPa		
5	Young's Modulus Z direction	1800	MPa		
6	Poisson's Ratio XY	0,14			
7	Poisson's Ratio YZ	0,38			
8	Poisson's Ratio XZ	0,38			
9	Shear Modulus XY	2900	MPa		
10	Shear Modulus YZ	1600	MPa		
11	Shear Modulus XZ	1600	MPa		
12	Orthotropic Stress Limits				
13	Tensile X direction	250	MPa		
14	Tensile Y direction	250	MPa		
15	Tensile Z direction	50	MPa		
16	Compressive X direction	-150	MPa		
17	Compressive Y direction	-150	MPa		
18	Compressive Z direction	-70	MPa		
19	Shear XY	12	MPa		
20	Shear YZ	10	MPa		
21	Shear XZ	10	MPa		
22	Tsai-Wu Constants				
23	Coupling Coefficient XY	-1			
24	Coupling Coefficient YZ	-1			
25	Coupling Coefficient XZ	-1			
26	Ply Type				
27	Type	Woven			

Sele 3.8 Laba LEM analüüsi sisendandmed klaaskiud matile

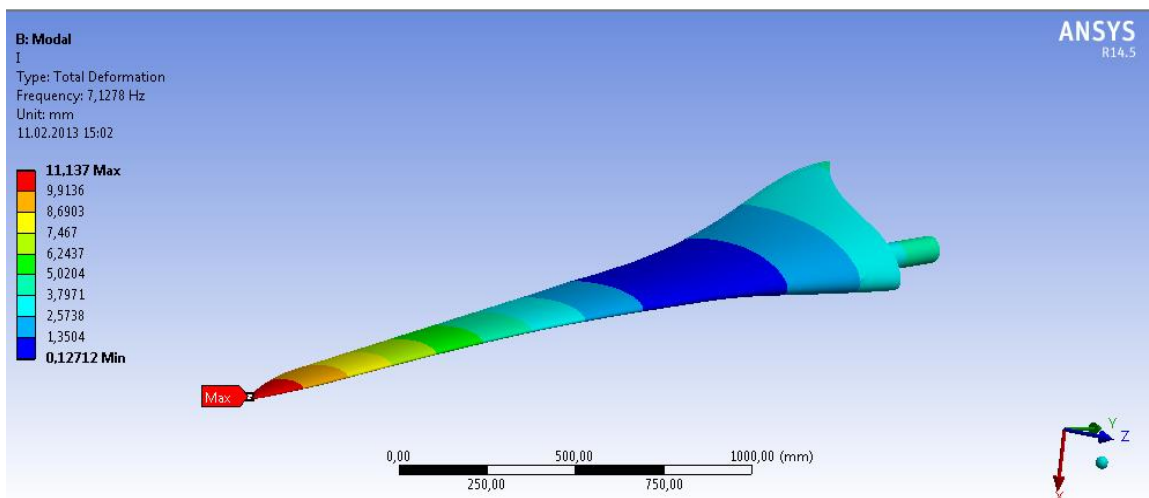
Properties of Outline Row 4: Norpol GS Gelcoat

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Isotropic Elasticity				
3	Derive from	Young's Modulus an...			
4	Young's Modulus	3000	MPa		
5	Poisson's Ratio	0,37			
6	Bulk Modulus	3,8462E+09	Pa		
7	Shear Modulus	1,0949E+09	Pa		
8	Tensile Yield Strength	60	MPa		
9	Tensile Ultimate Strength	60	MPa		
10	Ply Type				
11	Type	Isotropic			
12	Isotropic Strain Limits				
13	Von Mises	0,03			

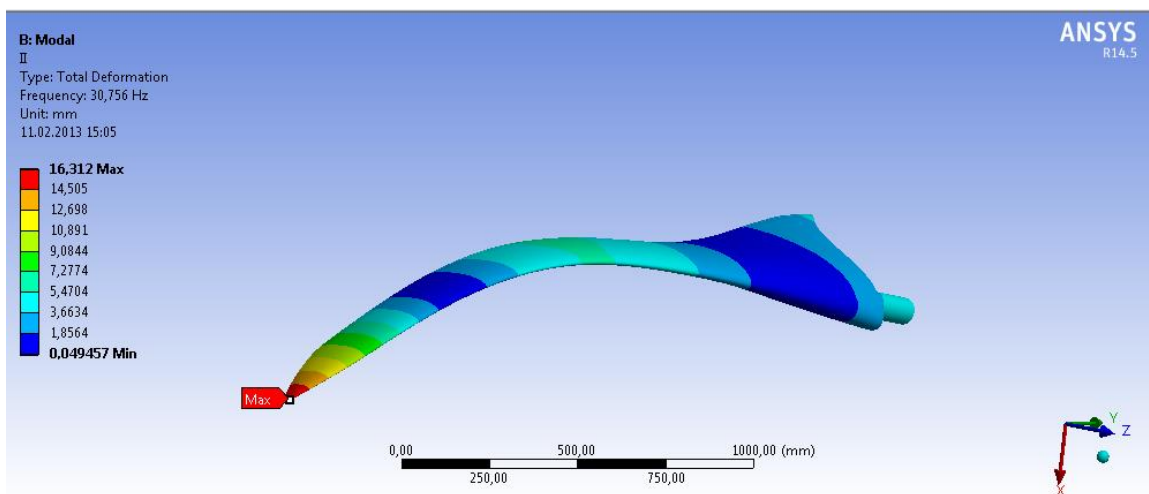
Sele 3.9 Laba LEM analüüsi sisendandmed Gelcoat kihile

Properties of Outline Row 5: Polylite 413 vaik				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Isotropic Elasticity			
3	Derive from	Young's Modulus an...		
4	Young's Modulus	3550	MPa	
5	Poisson's Ratio	0,37		
6	Bulk Modulus	4,5513E+09	Pa	
7	Shear Modulus	1,2956E+09	Pa	
8	 Tensile Ultimate Strength	64,8	MPa	 

Sele 3.10 Laba LEM analüüsi sisendandmed polüestervaigule

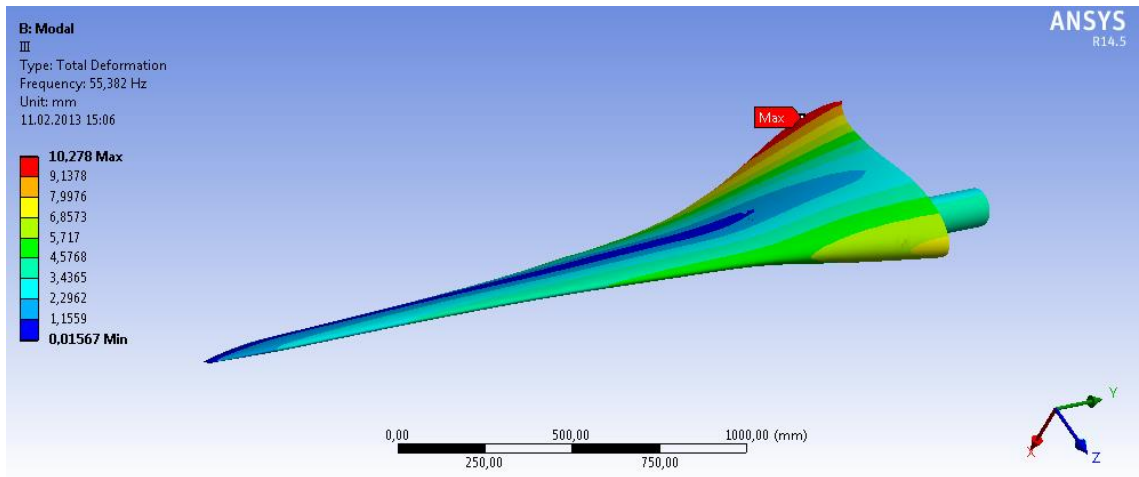


Sele 3.11 Esimene omavõnkevorm

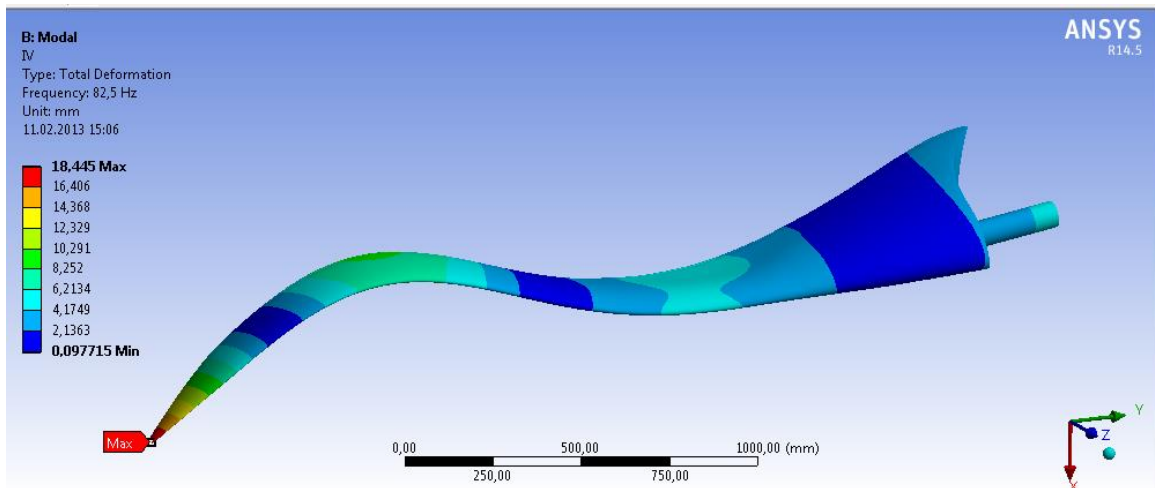


Sele 3.12 Teine omavõnkevorm

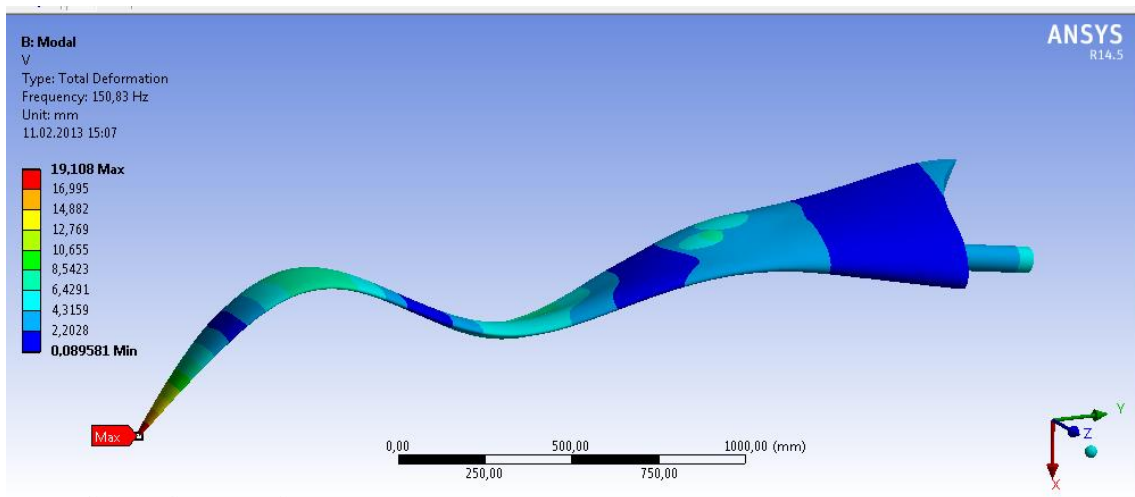




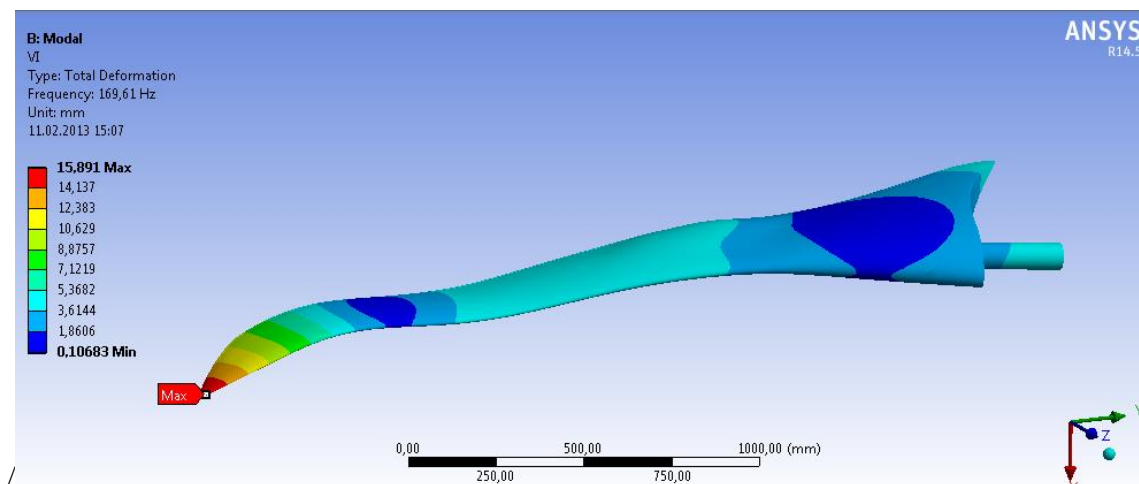
Sele 3.13 Kolmas omavõnkevorm



Sele 3.14 Neljas omavõnkevorm



Sele 3.15 Viies omavõnkevorm



Sele 3.16 Kuues omavõnkevorm

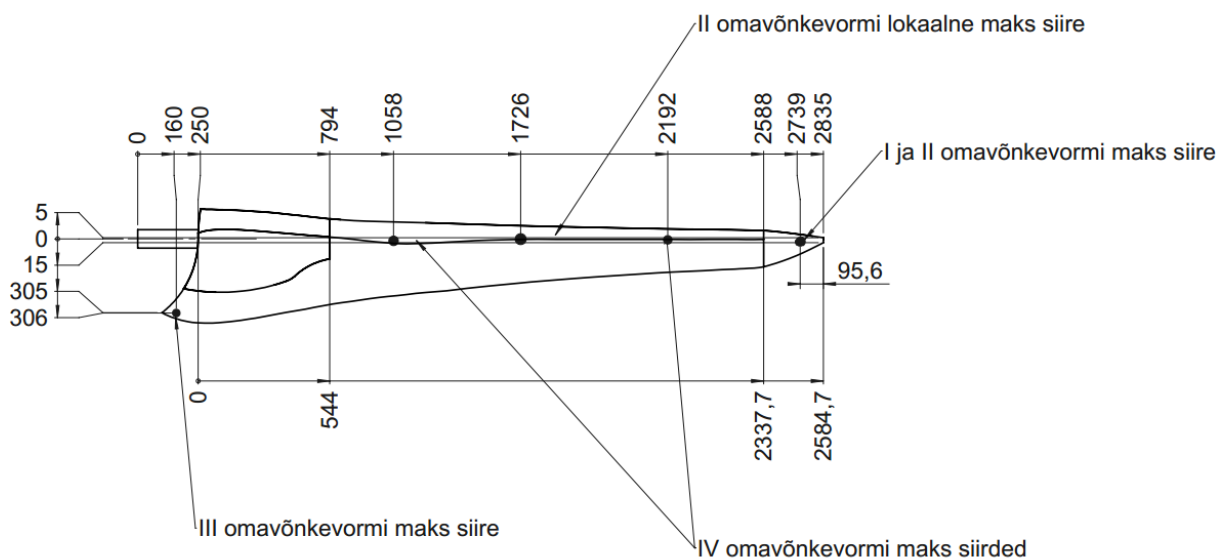
### 3.4.2 Markerite asetused

Lähtuvalt teoreetilisest lõplike elementide meetodil teostatud modaalanalüüsist, otsustati panna markerid suurimate siirete asukohtadele. Antud otsust toetab ka kirjandus [25], väites, et andureid tuleks asetada suurimate siirete kohtadele, et müra signaali suhe oleks võimalikult suur ja tundlikus maksimaalne.

Markereid otsustati panna tiivale viis tükki, et oleks kaetud esimese viie omavõnkevormi maksimaalsed siirded. Reaalsete kiirendusandurite platvormide asetused täpsustatakse pärast esmaseid skaneerimisi. Tõenäoliselt kasutatakse ühel labal kahte kuni kolme anduriplatvormi. Antud hulk on optimaalne reaalseks rakendamiseks järgmistel põhjustel:

1. Laba omahind ei tohi muutuda liiga kõrgeks andurite hinna tõttu.
2. Liiga suur andurite arv ja liiga suured andurid mõjutavad laba enda dünaamilisi omadusi.
3. Kuna massi vähendamiseks tuleb kasutada juhtmevabasid andureid, seab see piirangud ülekantavatele andmemahitudele.
4. Kuna labasid on ühel generaatoril kokku kolm, siis tuleb anduritega seonduvad kulud kolmekordistada.

Sele 3.17 on näha markerite ja ka potentsiaalsete andurite asukohad labal. Markerite asetus põhineb LEM modaalanalüüsi tulemustel, asukohtadeks valiti suurimate siirete kohad labal. Antud metoodikat toetab ka kirjandus [25].



Sele 3.17 Markerite asetus labal

### 3.5 Fourier' teisendus

Fourier' teisendus on tuntud ning palju kasutatud meetod tehnikas ja tööstuses. Teisenduse eesmärk on muundada signaal aeg-esitusest sagedusesitusse ehk perioodilise signaali integraalne teisendus, mille puhul näiteks aja funktsioon  $f(t)$  esitatakse komplektsete eksponentfunktsioonide  $e^{j\omega}$  kaudu nn kujutisfunktsioonina  $F(j\omega)$  [26]. Sagedusesitus on signaali (antud juhul skanneri mõõtepunktide väärtusi) lihtsam analüüsida ja leida sagedusdomeene. Sarnane tegevus toimub ka andurite puhul, aga anduri väljundiks on signaal.

Kuna tavaline Fourier' teisendus on aeganõudev ja ressursimahukas arvutus, siis kasutatakse kiireid Fourier' teisendusi (FFT). See põhineb teatavate tulemuste korduval ära kasutamisel ja/või spetsiifilistel vaheteisenduste kasutamisel. FFT'd kasutatakse peamiselt diskreeditud signaalide puhul, aga on ka olukordi, kui seda kasutatakse analoogsignaalide teisenduseks. Andmete tulemusel kasutatakse Fourier' teisenduse rakendamiseks MatLab keskkonda, kus on olemas vastav funktsioon, mida saab kasutada [27]. Funktsioon põhineb alltoodud valemitel:

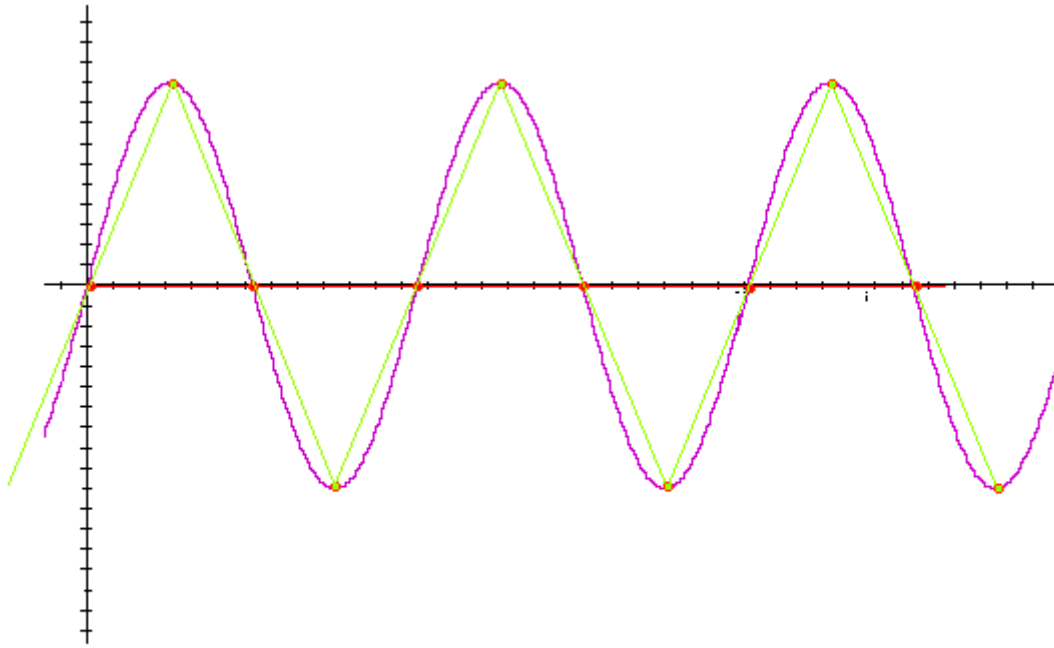
$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (3.10)$$

$$x(j) = (1/N) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (3.11)$$

kus

$$\omega_N = e^{(-2\pi i)/N} \text{ on } N\text{'s ühtsuse ruut.}$$

Fourier' teisenduse puhul tekib üks lisakitsendus tuues andmed aegdomeenist sagedusdomeeni. Kui skanneriga teha mõõtmisi sagedusvahemikus 0 kuni 480 Hz, siis pärast Fourier' teisendusi saadakse spekter 0 kuni 280 Hz. Antud suurimat sagedust nimetatakse võõndussageduseks. Kitsendus on põhjustatud andmete diskreetimisest Nyquist–Shannoni teoreemist lähtuvalt. Selleks, et signaali perfektselt rekonstrueerida, peab sãmplimissagedus ületama vähemalt kaks korda signaalis esineva maksimaalse sageduse.



### Sampling at 2 times per cycle

Sele 3.18 Nyquist–Shannoni teoreemi illustratsioon [28]

## 4 Katsetus

### 4.1 Pontos 3D skanner

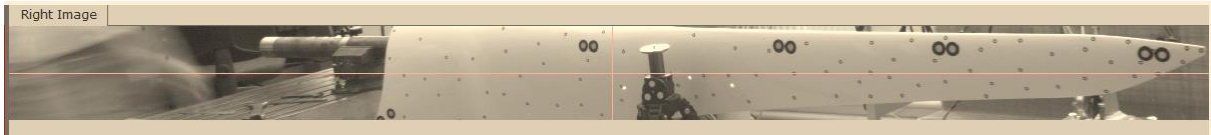
Antud magistr töö raames on skanneri mõõtmiste eesmärk asendada andureid, kuna hetkel valideeritakse kiirendusandurite otstarbekust ja võimekust. Skanneri abiga saab mõõta erinevate laba punktide siirdeid ja kiirendusi, mida hilisemalt on võimalik analüüsida.

Mõõtmisteks kasutatakse GOM Pontos 4M süsteemi, mille koosseisu kuulub tööjaam andmete analüüsimiseks ja sensorite plokk koos infrapuna välkudega. Väiksematest lisadetailidest võib ära märkida valgust püstiku, riistvara ploki, nupuga püstikmehhanismi mõõtmisteks ja valgussensoriga püstikmehhanismi. Sele 4.1 on visuaalselt näha skaneerimissüsteemi peamised osad. Skanneri tehnilised andmed on toodud lisa 3.



Sele 4.1 Skanner tööasendis

Sele 4.2 on näha laba katsetuse ülesehitus ja ka illustreeriv pilt läbi sensori võetuna 1/8 vaateväljast, tagamaks maksimaalseimat salvestusrežiimi (480 Hz).



Sele 4.2 Skanneri vaateväli järeltöötlustarkvaras

Sele 4.3 on näha, milline on vaade kaamera poolt. Kolmjala küljes olevad kolm markerit on referentsmarkerid, mis ruumi suhtes ei liigu katsetuse käigus. Referentsmarkerite mõõtetulemuste abil saab analüüsida mürafooni suurust.



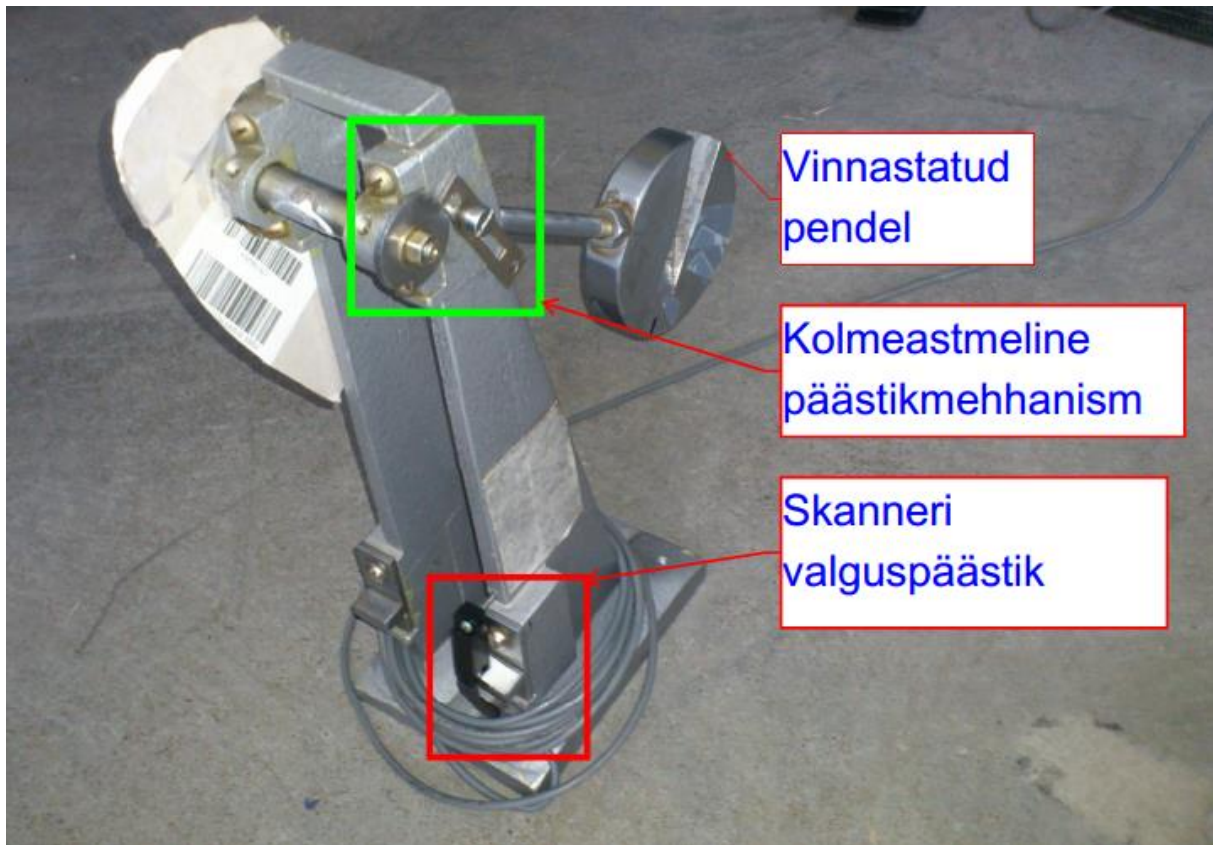
Sele 4.3 3D skanneri vaateväli

## 4.2 Ergutuspendel

Katsetustel kasutati vibratsioonide tekitamiseks pendlit. Pendel on iseenesest mõeldud komposiitmaterjalide purustusjõu määramiseks, aga antud juhul sobis ka katse läbiviimiseks, kuna suutis anda võrdse energiaga lööke erinevatesse laba punktidesse. Pendli ergutuspunktideks valiti markerpunktide lähedus. Täpsemalt löödi laba tagaseina markerpunkti kohale. Igas löögipunktis kasutati kahte erinevat löögitugevust, et laba ergutada.

Sele 4.4 on näha skanneriga ühendatud valguspäästik, mille aktiveerumisel süsteem alustab mõõtmisi. Antud lisaseade parendas mõõtmistulemuste ühtlust, kuna eelnevalt kasutati käsilülitit, kus mõõtmise alguse määras inimfaktor ja reaktsiooniaeg.





Sele 4.4 Pendel laba ergutamiseks

### 4.3 Testitavate labade kirjeldus

Katsetel oli kasutada neli erinevas seisukorras laba, millel ei ilmnenud visuaalsel vaatlusel märgatavaid kahjustusi. Siiski olid nad turbiini küljest lahti monteeritud, kuna ei vastanud enam esitatavatele nõuetele. Tabel 4.1 on toodud labad ja nende vigastuste kirjeldused.

Tabel 4.1 Labade seisukord

Laba nr.	Vigastuse kirjeldus
1	Vigastusteta.
2	Üks laba korpuse pool polüesterploki küljest lahti tulnud, südamik püsib teise poole küljes kinni.
3	Polüestersüdamik laba küljest täielikult lahti tulnud.
4	Kinnitustoru juurest korpuse pooldumiskohas mõra, muidu terve. Vaatlusel tundus, et käitub sarnaselt tervele tiivale.



Seledel 4.5-4.8 on toodud pildid katsetel kasutatud labadest.



Sele 4.5 Laba nr 1



Sele 4.6 Laba nr. 2



Sele 4.7 Laba Nr. 3



Sele 4.8 Laba nr. 4

#### **4.4 Katsetusprotsessi kirjeldus**

Kokku tehti tiibadele katsetusi kolmel korral. Esimesel korral ei olnud mõõtemetoodika veel täpselt välja kujunenud. Teisel korral kasutati homogeensemaid meetodeid kõikide tiibade mõõtmisel:

1. Löögipendlile oli teisel korral paigaldatud kolme erineva löögitugevusega päästik.
2. Löögijärgse mõõtmisaja võrdsustamiseks labadel oli skanner optopaariga, mis pärast pendli lööki käivitas kahesekundilise mõõteperioodi (mõõteperioodi pikkust saab skanneri tarkvarast seadistada).

3. Lisati täiendavad markerid eeldatavatesse omavõnkevormide maksimumpunktidesse juhiks, kui skanner ei suuda üksikut markerit tuvastada.

Kolmandal katsetusel katsetati laba juba ka kiirendusandurite ja skanneriga üheaegselt, tehes tervele labale sisselõikeid esiserva, tekitamaks kontrollitud kahjustust.

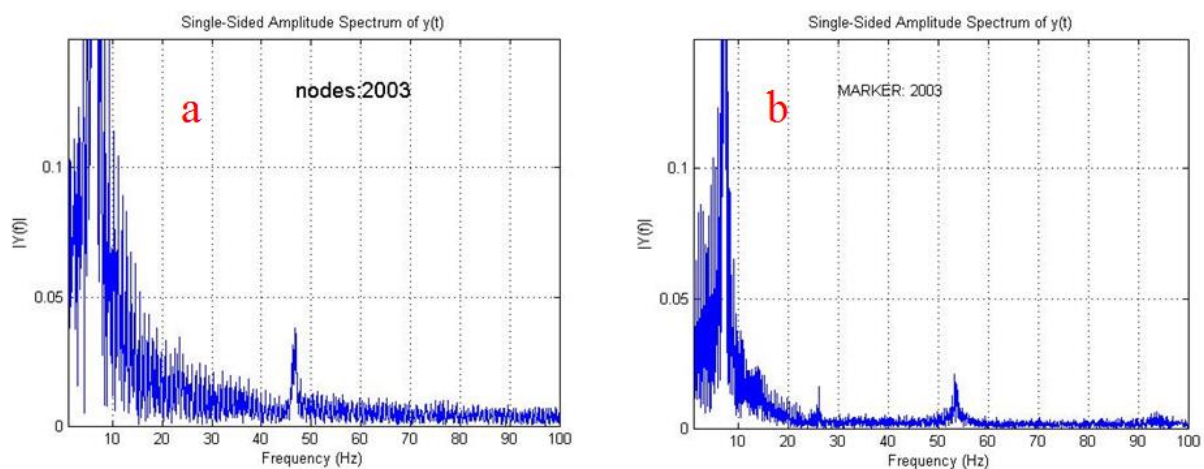
Skaneerimise puhul tekkis väljatöötatud protsess, mida korrati mõõtmiste käigus, et saada tulemused:

1. Skanneri üles seadmine
2. Skanneri kalibreerimine
3. Skanneri vaatevälja seadistamine markerpunktide suhtes
4. Skaneerimine
5. Andmete salvestamine
6. Andmete järeltöötlus skanneri tarkvaras
7. Andmete eksportimine skanneri tarkvarast
8. Andmete analüüs MatLab's

## 5 Katsetuste tulemused

### 5.1 Esimese ja teise mõõtmise andmete erinevus

Nagu mainitud alapunktis 4.4, tehti kokku kolm mõõtmisessiooni. Esimese mõõtesessiooni tulemuseks oli suurelt mõõtemetoodikate parendamine ja tundmaõppimine, kuna mõõteseadet oli uus ja tegevusprotsess sissetöötamata, eriti just laba mõõtmiste teostamise osas. Sele 5.1 on näha ka mõõtmistulemuste graafikud, kus info on korrigeeritud esimese mõõtmise puhul – skanner ei tuvastanud mõningaid mõõtepunkte ning ebatäpne mõõteperioodi algus muutis tulemused samuti korrigeerituks.

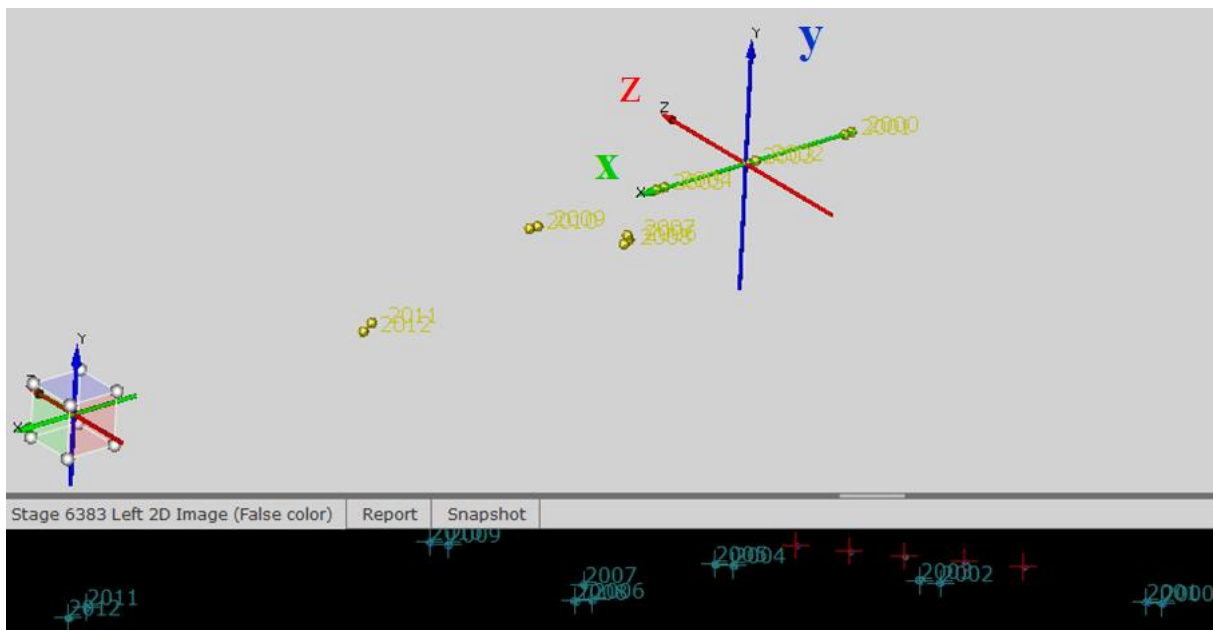


Sele 5.1 a-esimene katsetus; b-teine katsetus

On näha, et parempoolsemal graafikul on sagedusdomeenid kitsamalt ja konkreetsemalt välja joonistunud, mis annab aimdust, et mõõtmisel tekkinud ebatäpsusi ja müra on vähem. Lisaks tuleb märkida, et esimesel mõõtmisel pole eristatav laba teine omavõnkevorm sagedusvahemikus 20-30 Hz. Lisas 4 on toodud lähtekood mille põhjal saadi antud graafikud ja tulemused.

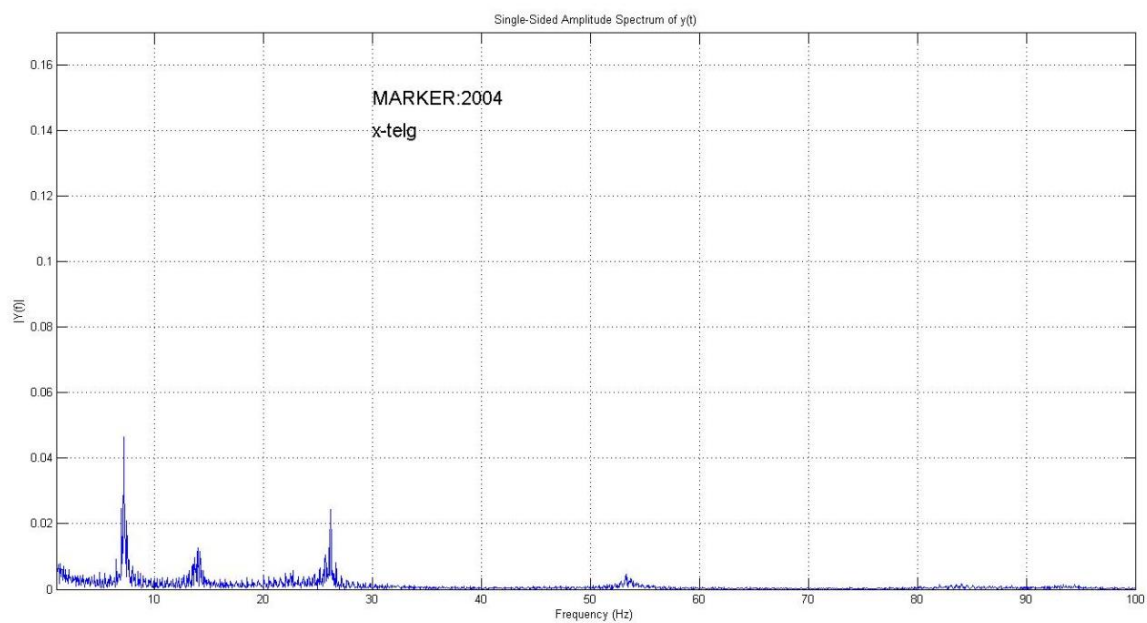
### 5.2 Mõõtmistulemused erinevate telgede suhtes

Mõõtmisandmed sisestati Matlab keskkonda vektoritena telgede kaupa. Järgnevalt on välja toodud mõõtmistulemused erinevate telgede suhtes:

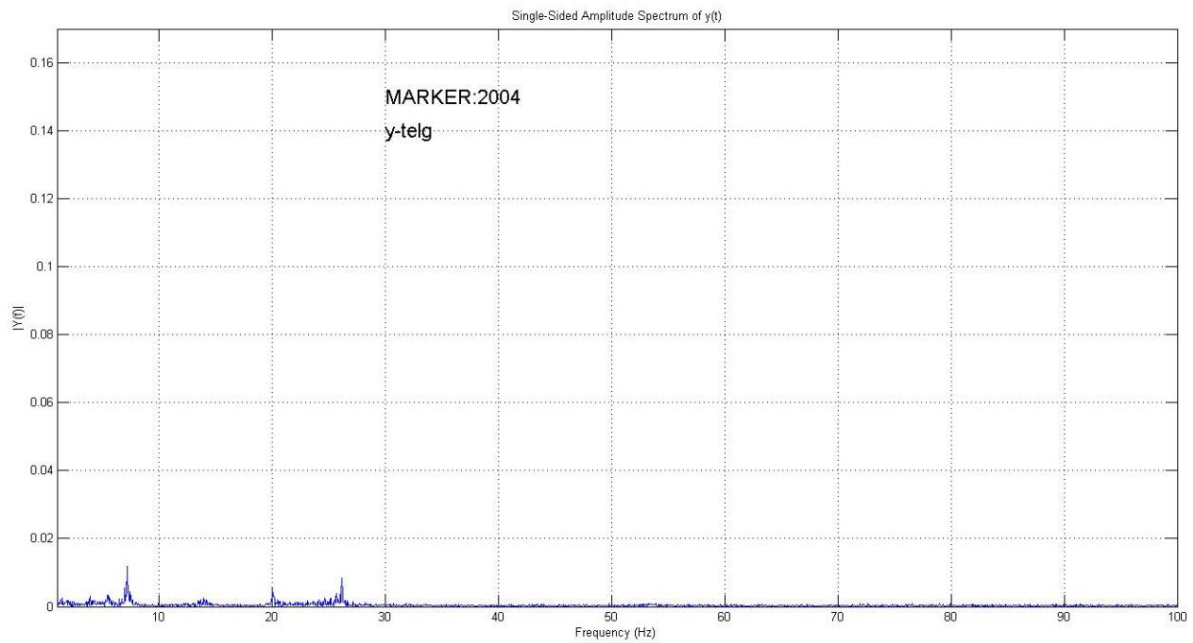


### Sele 5.2 Mõõtmistulemused koordinaattelgede suhtes

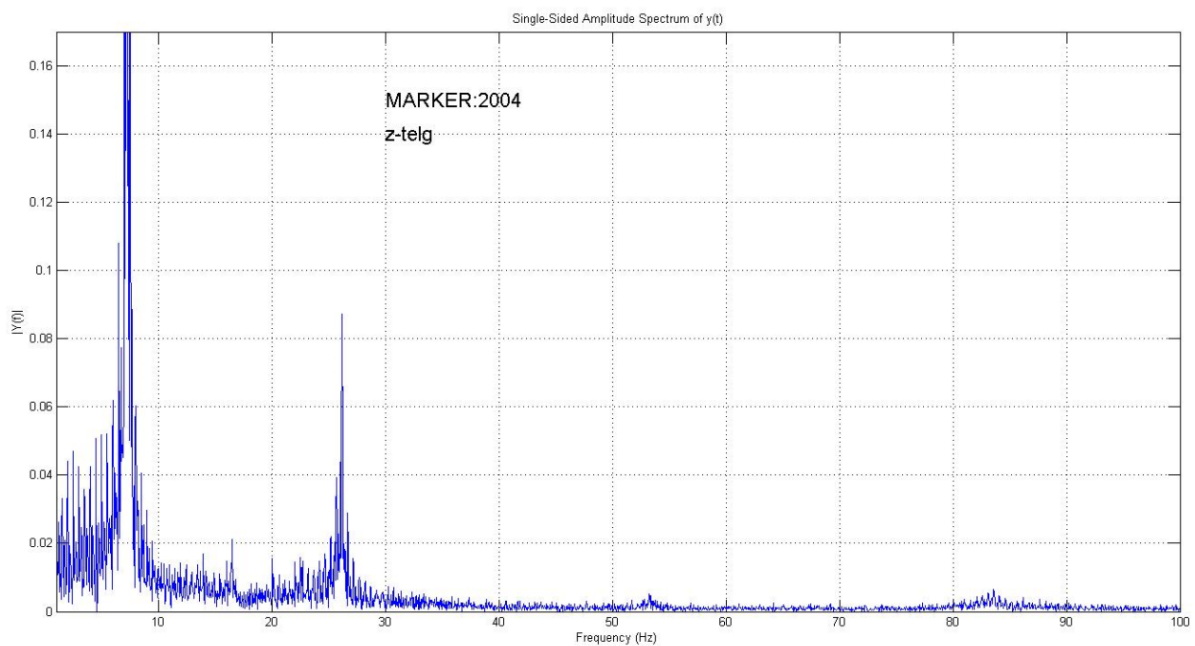
Sele 5.2 on näha skanneri tarkvaras seatav koordinaatteljestik. Antud telgede kaupa sisestati andmete vektorid ka Matlab keskkonda edasiseks andmete töötlemiseks. Järgnevalt vaadeldakse kõigi kolme telje mõõtmistulemusi.



### Sele 5.3 x-teljesuunalised tulemused



Sele 5.4 y-teljesuunalised tulemused



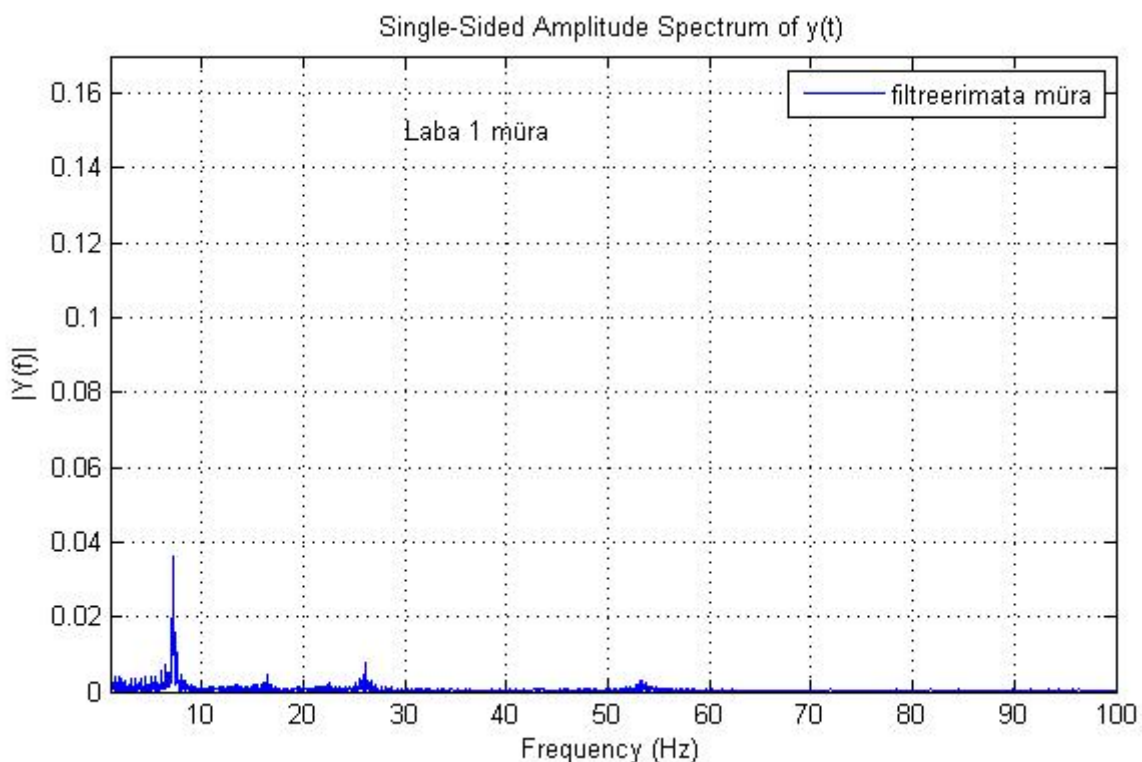
Sele 5.5 z-teljesuunalised tulemused

Ülaltoodud kolmelt seelt ilmneb, et z-teljesuunalised tulemused on suurimate amplituudidega. Järgnevate tulemuste analüüsil kasutati ainult selle telje suunalisi tulemusi, kuna teistes suundades pole selgelt eristatavad omavõnkevormid nende vähese tundlikkuse tõttu. X- ja y-teljesuunaliste tulemuste puhul on siiski näha sagedusdomeene, mis on

eristatavad. Antud nähtus on võimalik, kuna skanneri tarkvaras määratud koordinaadistik ei ühti laba pinnaga, kuhu on paigaldatud marker. See tähendab, et markerid pole täielikult paralleelsed xy-tasapinnaga ja seetõttu tekib väärtustest komponent x ja y telgedele.

### 5.3 Mõõtmiste müra

Skanneri omapärast tulenevalt asetati mõõtevälja ka liikumatud markerid, mis olid mõõtmise ajal liikumatuteks punktideks. Nende mõõtepunktide abil saab vaadelda, kui suur on müra foon mõõtmistel. Sele 5.6 on nähtav seisvate punktide mürafoon.

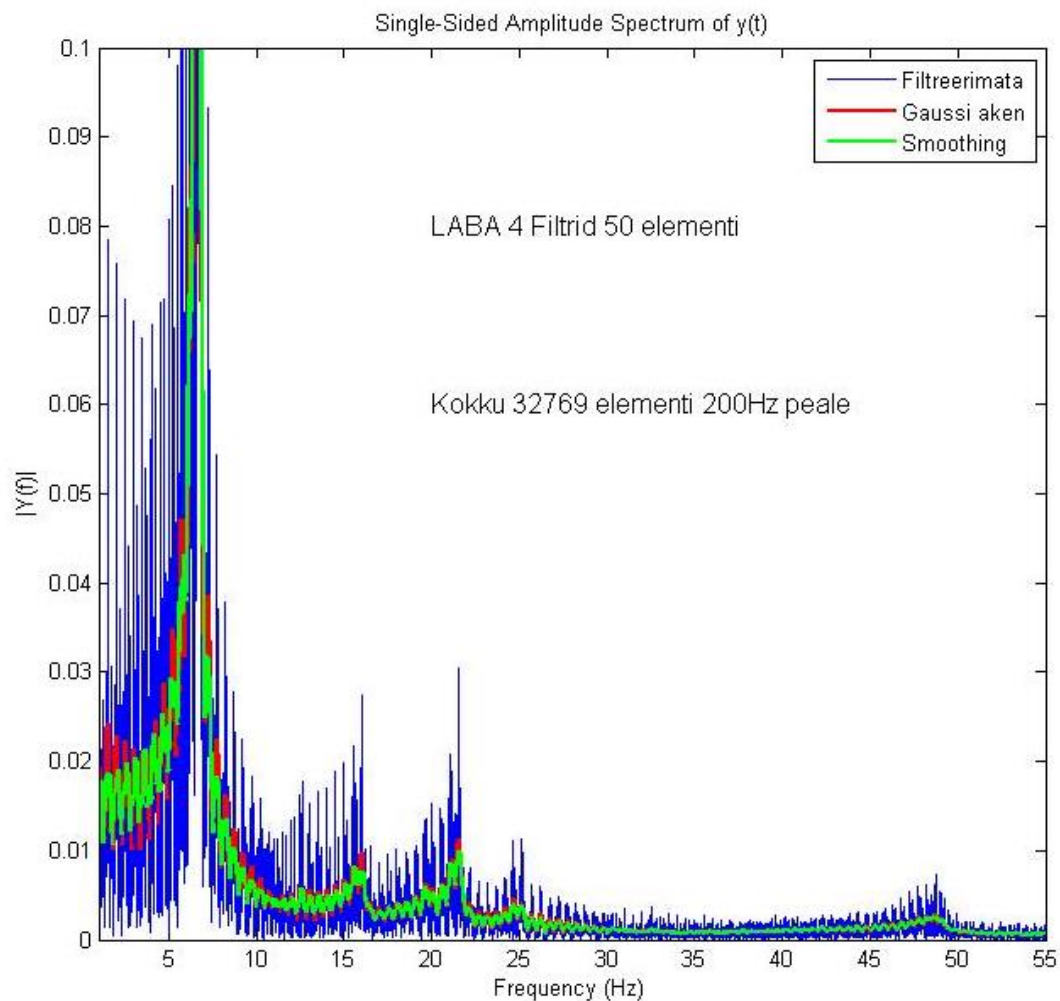


Sele 5.6 Referentspunktide mõõtetulemus

### 5.4 Filtreeritud mõõtetulemused

Et tuvastada selgemalt omavõnkevormide sagedusdomeene, kasutati selleks filtreid ja joone silumise funktsioone. Järgnevalt on Sele 5.7 toodud laba nr. 4 summaarse spektri summa graafik koos kahe erineva filtreeritud joonega:





Sele 5.7 Filtrite kasutamine võrrelduna töötlemata spektriga

Antud juhul on võrdlevate lihtsustusfiltritena kasutatud Gaussi akna filtrit ja *smoothing* funktsiooni MatLab keskkonnast.

Gaussi akna funktsiooni puhul võetakse andmetejadast teatud suurusega andmete aken, antud juhul 50, ja analüüsides neid väärtusi, arvutatakse igale elemendile korrigeeriv kordaja. Seejärel vastava konstandiga arvutatakse vastav element läbi ja saadakse siledam joone väärtus [29]. Antud tegevust korratakse kogu andmete ulatuses, mida antud juhul on 32 769 elementi. Sele 5.8 a on toodud Gaussi filtriga filtreeritud laba nr 4 summeeritud tulemused.

*Smooth* filtri puhul on tegemist aproksimeerimisfunktsiooniga (curve fitting), mis silub andmeid kasutades keskmise väärtuse filtrit [30] [31]. Liikuva keskvaertusega filter silub andmeid võttes keskmise väärtuse eelmise ja järgmise elemendi väärtusest. Filtri ulatus sõltub muutuva keskvaertuse suurusest, mis antud juhul on 50 elementi.

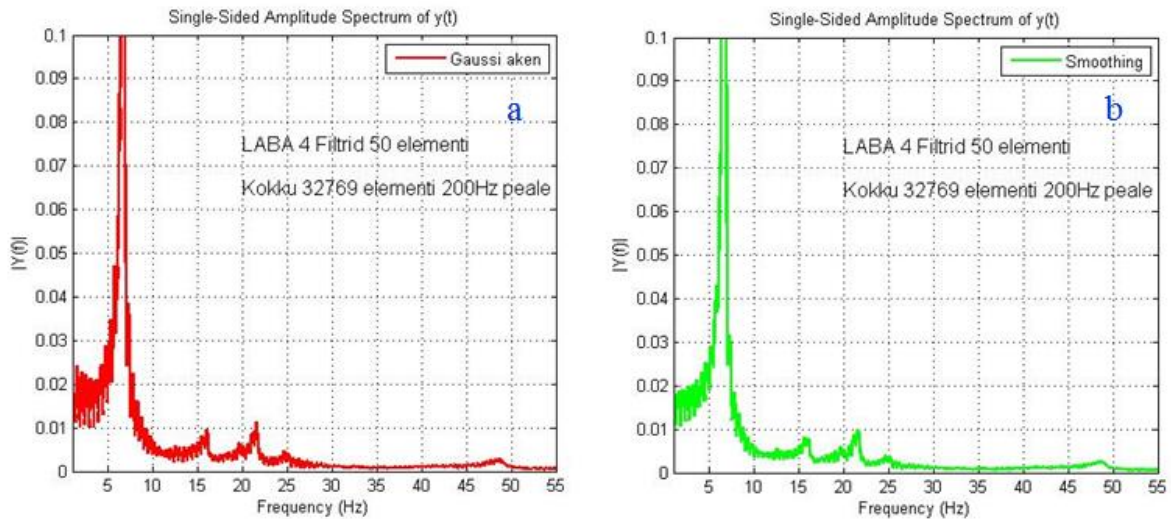


$$y_s(i) = \frac{1}{2N + 1} (y(i + N) + y(i + N - 1) + \dots + y(i - N))$$

kus  $y_s(i)$  on  $i$ 'nda elemendi silutud väärtus

$N$  on silumisfiltri ulatus

Sele 5.8 b on toodud *smooth* funktsiooniga filtreeritud laba nr 4 summeeritud tulemused.

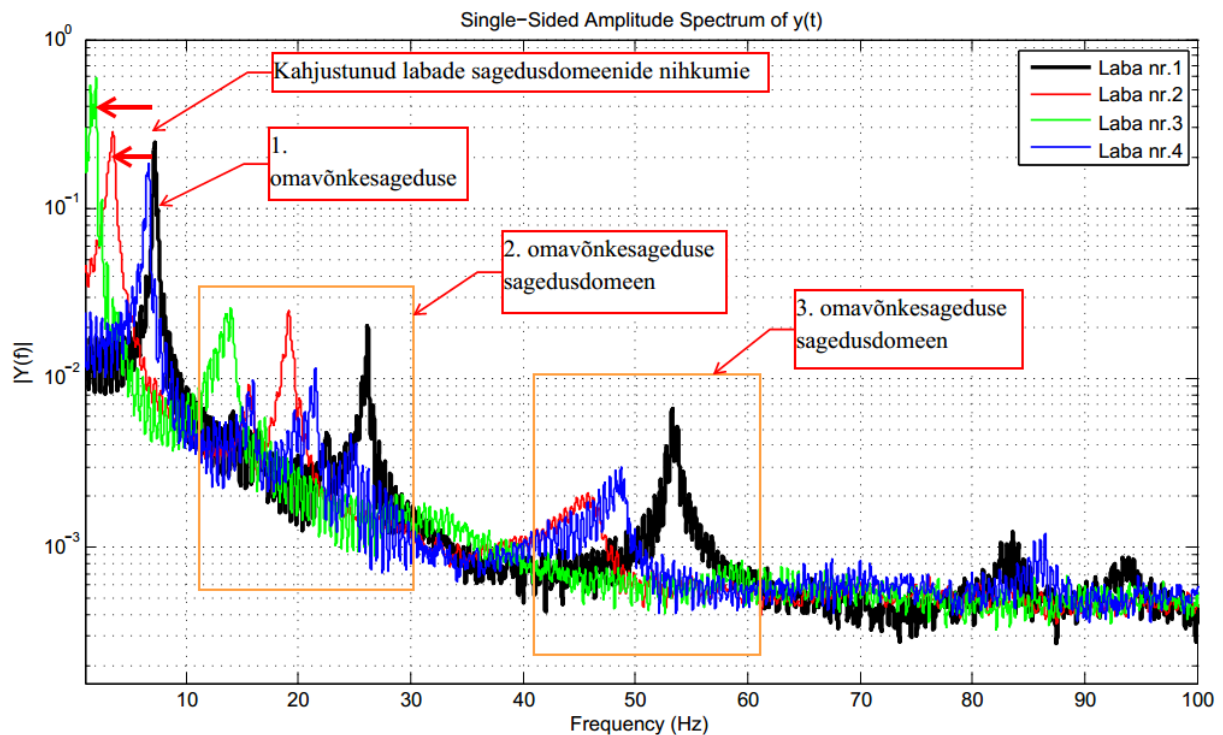


Sele 5.8 a-Gaussi akna filter; b-siluv filter

Filtreeritud tulemusi on võimalik võrrelda Sele 5.8. Edasises analüüsis on kasutatud lihtsustavaks filtriks *smooth* filtrit, kuna selle implementeerimine Matlab keskkonnas on mõistlikum.

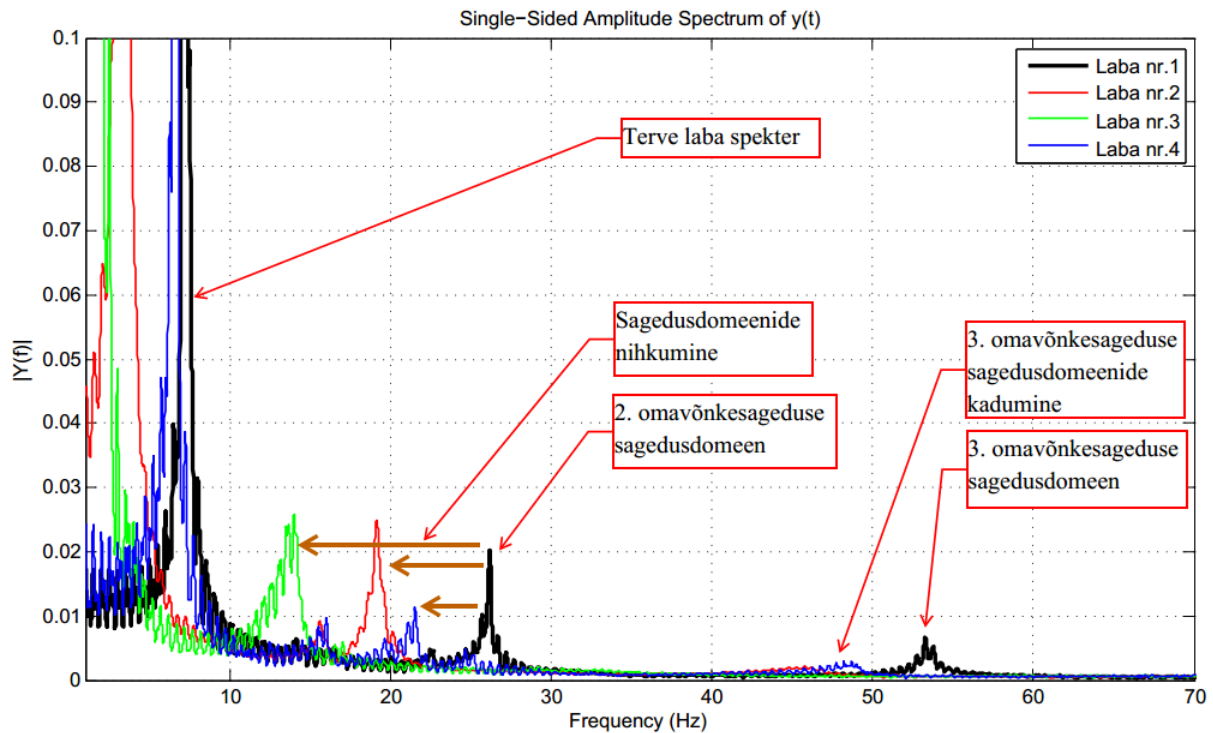
## 5.5 Labade võnkevormide erinevused

Labade teisel mõõtmisel mõõdeti kõiki nelja laba, veendumaks kas erinevad laba kahjustused avalduvad omavõnkesageduste erinevustes. Et saada võimalikult kaalukas tulemus, liideti labade löike markerite mõõtmisest saadud tulemus ja lisati need tulemused labade kaupa graafikule. Lisas 5 on toodud MatLab'i lähtekood, millega loodi järgnevad graafikud.



Sele 5.9 Nelja laba võrreldavad spektrid

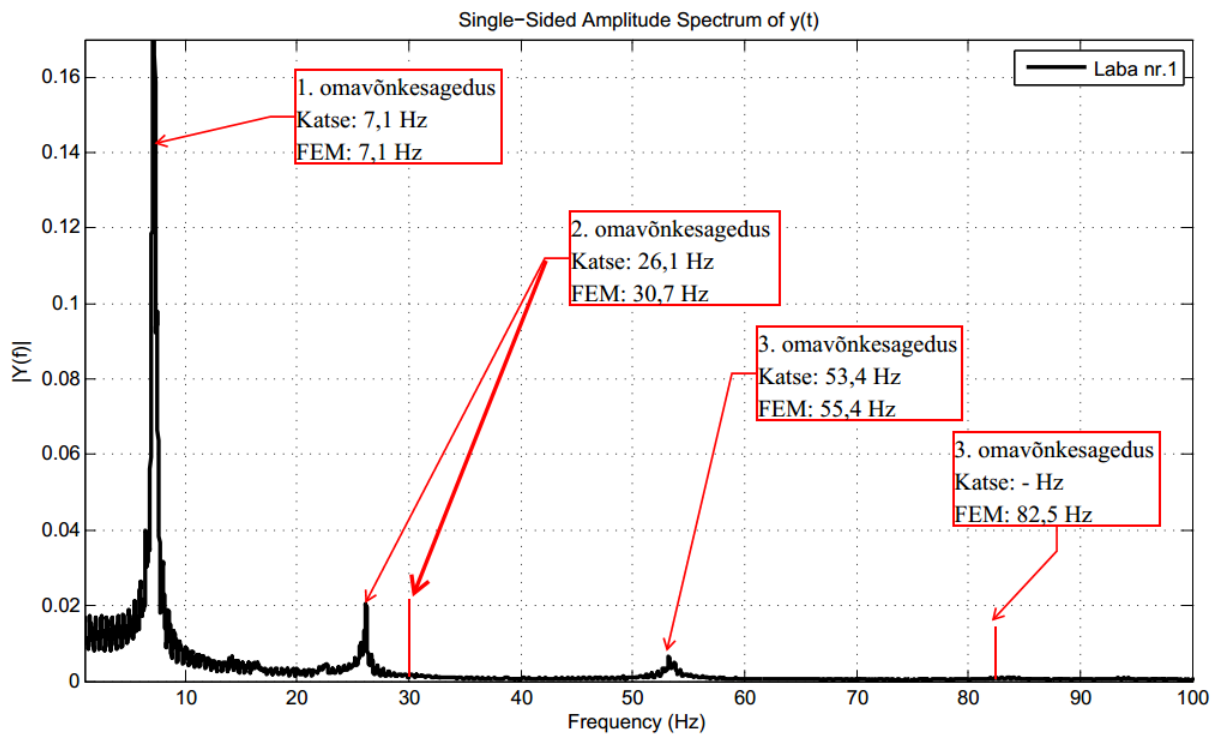
Sele 5.9 on välja toodud kõigi katsetes testitud nelja laba sagedusspektrid. Antud seel olev graafik on vertikaalteljes logaritmiline, et välja tuua kogu spektri tipud ja näidata tervet ulatust. On näha, et esimeste omavõnkesageduste sagedusdomeenid on nihkunud madalamale sagedusele. Kui terve laba esimene omavõnkesagedus oli umbes 7.2 Hz, siis antud juhul on näha, et enim kahjustunud labade nr. 2 ja nr. 3 esimene omavõnkesagedus on nihkunud 4 kuni 5 Hz madalamale. Laba nr. 3 puhul ei ole sellist triivi täheldatud. Seda võib põhjendada asjaolu, et laba polnud nii suurte kahjustustega.



Sele 5.10 Nelja laba võrreldavad spektrid lineaarskaalas

Sele 5.10 on märgatav spektrite dünaamika. Esimeste omavõnkesagedusdomeenide tipud on antud seel maha lõigatud, et järgnevad sagedusdomeenid oleksid märgatavad. Teise omavõnkesageduse domeenide triiv labadel on veelgi rohkem märgatav. Triivi ulatus on isegi üle 10 Hz'i. Kolmanda omavõnkesageduse domeenide puhul on märgata domeenide kadumist kahjustunud labade puhul. Antud nähtust võib seletada sellega, et jäikusomadused labadel on niivõrd kehvaks läinud, et kõrgemad sagedused ei oma endas eriti energiat ning seetõttu nende amplituud pole eristatav mürafoonist.

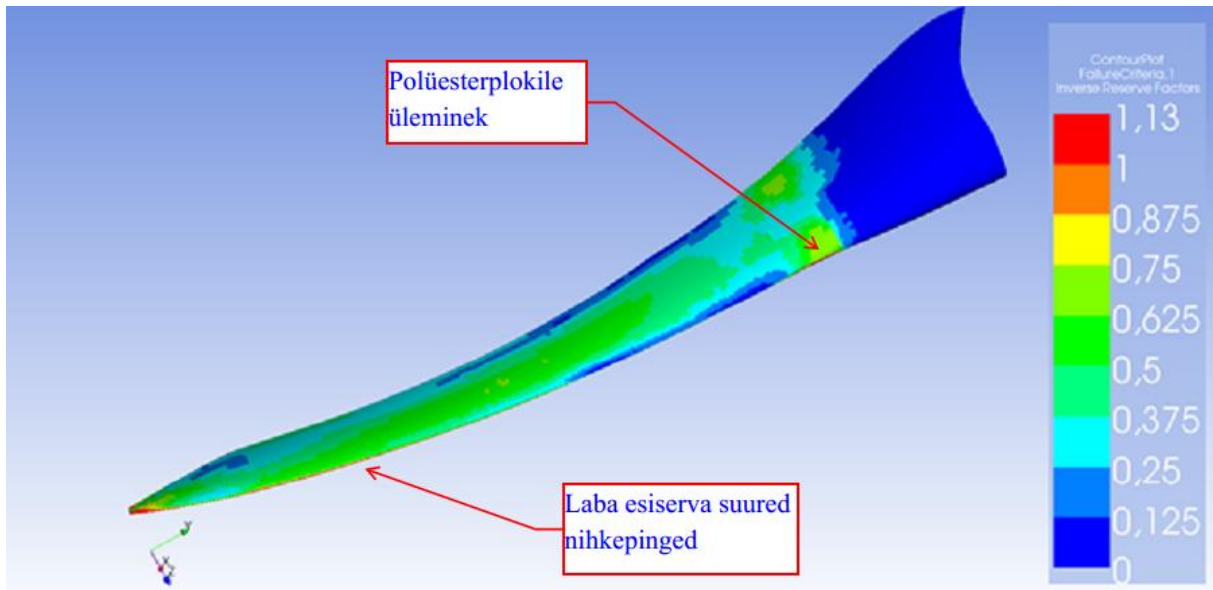
Kui võrrelda terve laba omavõnkesageduse domeene LEM analüüsi omadega, siis on tuntav erinevus just kõrgemate omavõnkesageduste osas. Antud erinevused on nähtavad Sele 5.11.



Sele 5.11 LEM Modaalanalüüsi ja katse võrdlus

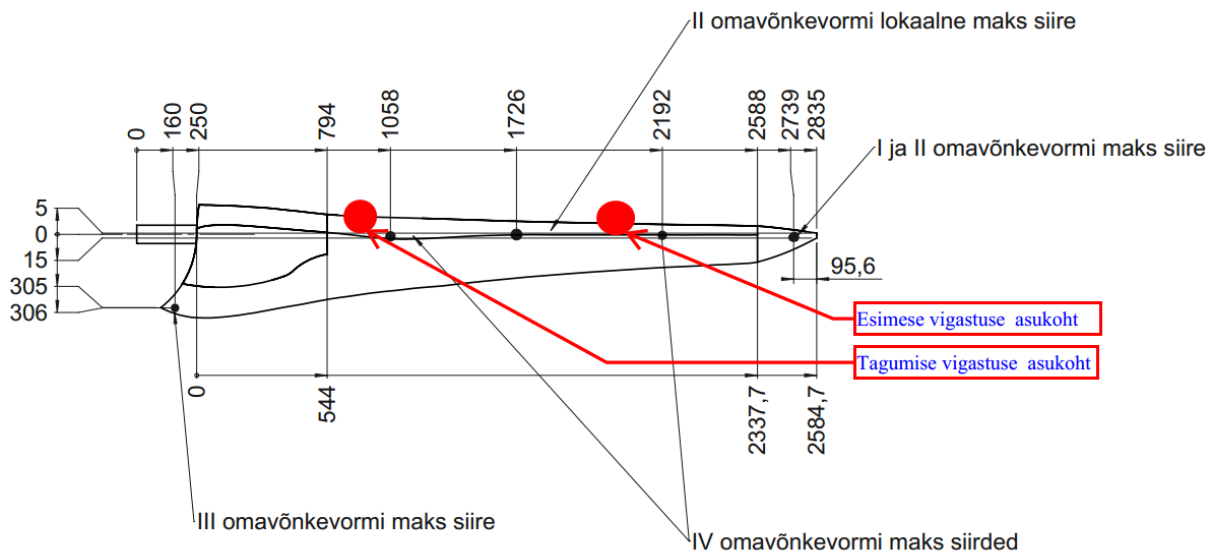
## 5.6 Kahjustuse tekitamine labale ja andurite valideerimine.

Kolmanda mõõtmisessiooni raames kasutati mõõdetaval labal ka kiirendusanduri platvormi, mida kirjeldati alapeatükis 2.4. Kiirendusandurid lisati ainult tervele labale. Rohkematele labadele andureid ei lisatud majanduslikel kaalutlustel, aga ka eesmärgiga uurida, kuidas ja kas on tuvastatavad väiksemad vigastused. Lisaks oli katse eesmärgiks kontrollida skanneri ja kiirendusanduri tulemuste korreleerumist. Andurid liimiti labale markerite lähedale. Lisaks tekitati labale ka kahjustustena sisselõiked. Sisselõiked sooviti teha laba suurimate pingete piirkondadesse. Suurimad pingete piirkonnad leiti lõplike elementide tugevusanalüüsist, kust selgus, et kõige nõrgemad piirkonnad on polüesterploki üleminek, tiiva eesserv nihkele ning pealmine pind survele.



Sele 5.12 Suurimate pingete asukohad labal

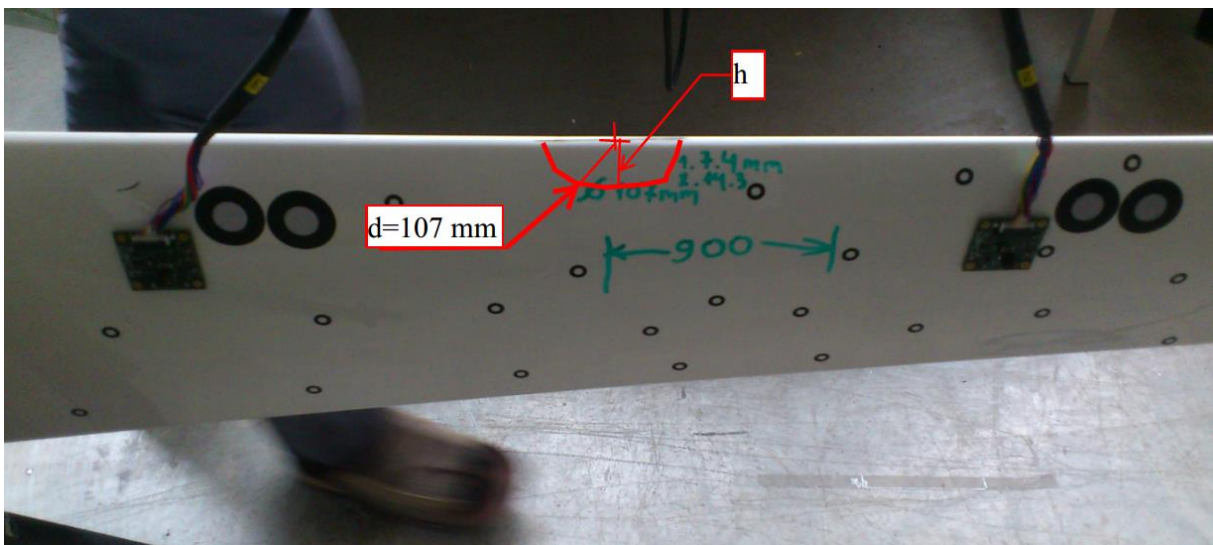
Sele 5.12 on nähtavad laba suurimate pingete asukohad, mis on kõige problemaatilisemad. Sarnastel kohtadel esinesid vigastused ka katki läinud labadel. Lisaks tasub mainimist fakt, et laba esiserv kulub märgatavalt erosiooni tõttu, mida on mainitud ka punktis 2.6. Sele 5.13 on näidatud tekitatava vigastuse asukohad, mis kattuvad suurimate pingetega laba esiservas.



Sele 5.13 Labale tekitatavate vigastuste asukohad

Järgnevalt on välja toodud katsesessioonide järjestus:

1. Anduritega terve laba skaneerimine (juhtmeid anduritele ei ühendatud, kontrollimaks kas ja palju hiljem andurite juhtmed tulemust võivad mõjutada).
2. Terve laba skaneerimine ja töötavate anduritega testimine.
3. Esimesse otsa tekitatud vigastusega  $h=7,4$  mm  $d=107$  mm.
4. Esimesse otsa tekitatud vigastusega  $h=14,3$  mm  $d=107$  mm.
5. Tagumisse otsa tekitatud vigastusega  $h=12,2$  mm  $d=107$  mm.
6. Tagumisse otsa tekitatud vigastusega  $h=23,3$  mm  $d=107$  mm.
7. Tagumisse otsa tekitatud vigastusega  $h=27,5$  mm  $d=107$  mm.



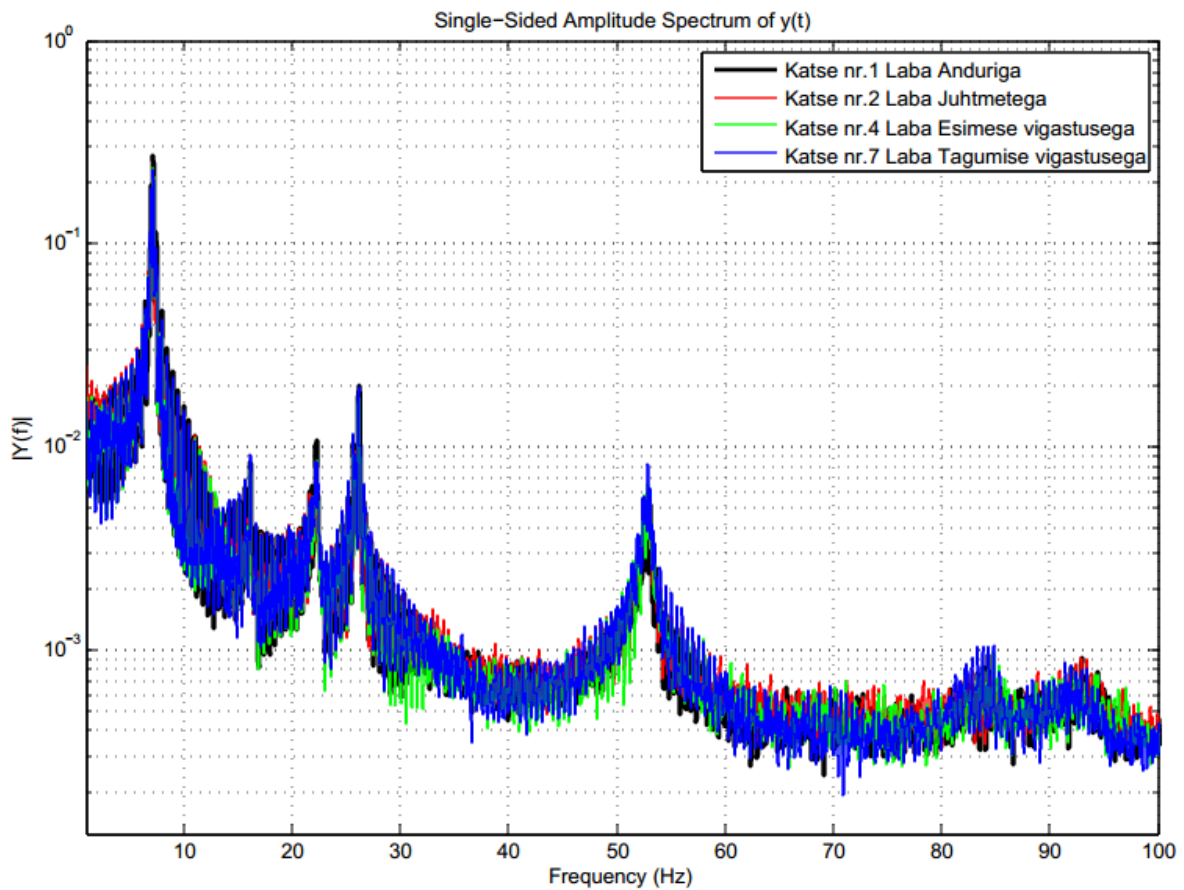
Sele 5.14 Mõõdetav laba koos markerite, andurite, juhtmete ja vigastusega

Sele 5.14 on näha, kuidas tekitati labale vigastus. Vigastus tekitati labale nurklihvija löikekettaga laba sisse lõigates.

Andurite asetusel arvestati, et andurite ja skanneri koordinaatteljed kattuks, arvestati ka ühendusjuhtmetega, et need ei blokeeriks markereid ning ei takistaks laba vaba liikumist.

### 5.6.1 Skanneri tulemused vigastuse tekitamistel

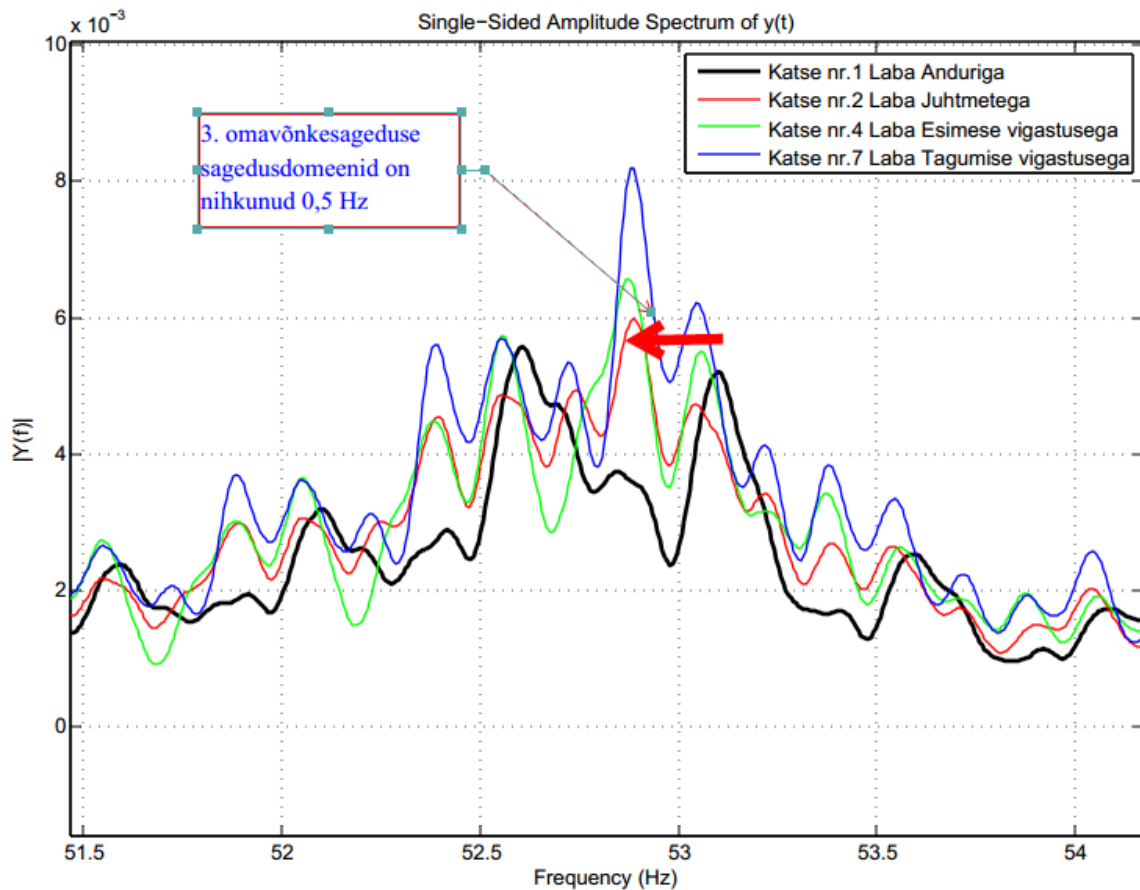
Skanneri tulemusi analüüsides esmapilgul ei märgatud suuri sagedusdomeenide nihkumisi, mistõttu võrreldi omavahel teise, neljanda ja seitsmenda katse tulemusi graafikul, kuna antud katsetel olid suurimad vigastuste erinevused, mida võrrelda.



Sele 5.15 Vigastuse tekitamise tulemused

Tulemusi analüüsid selgus, et märgatavat sagedusdomeenide nihet nii väikeste vigastuste puhul ei teki. Seda illustreerib ka Sele 5.15. Lähemal detailsel vaatlusel selgus, et lineaarskaalaga graafikul on märgatav väike erinevus ilma anduri ühendusjuhtmeta laba ja juhtmetega laba ning vigastatud labaga katsete vahel. See ilming annab märku, et kõrgematel sagedustel võib keha omaduste muutus esile kerkida varem kui madalatel sagedustel.





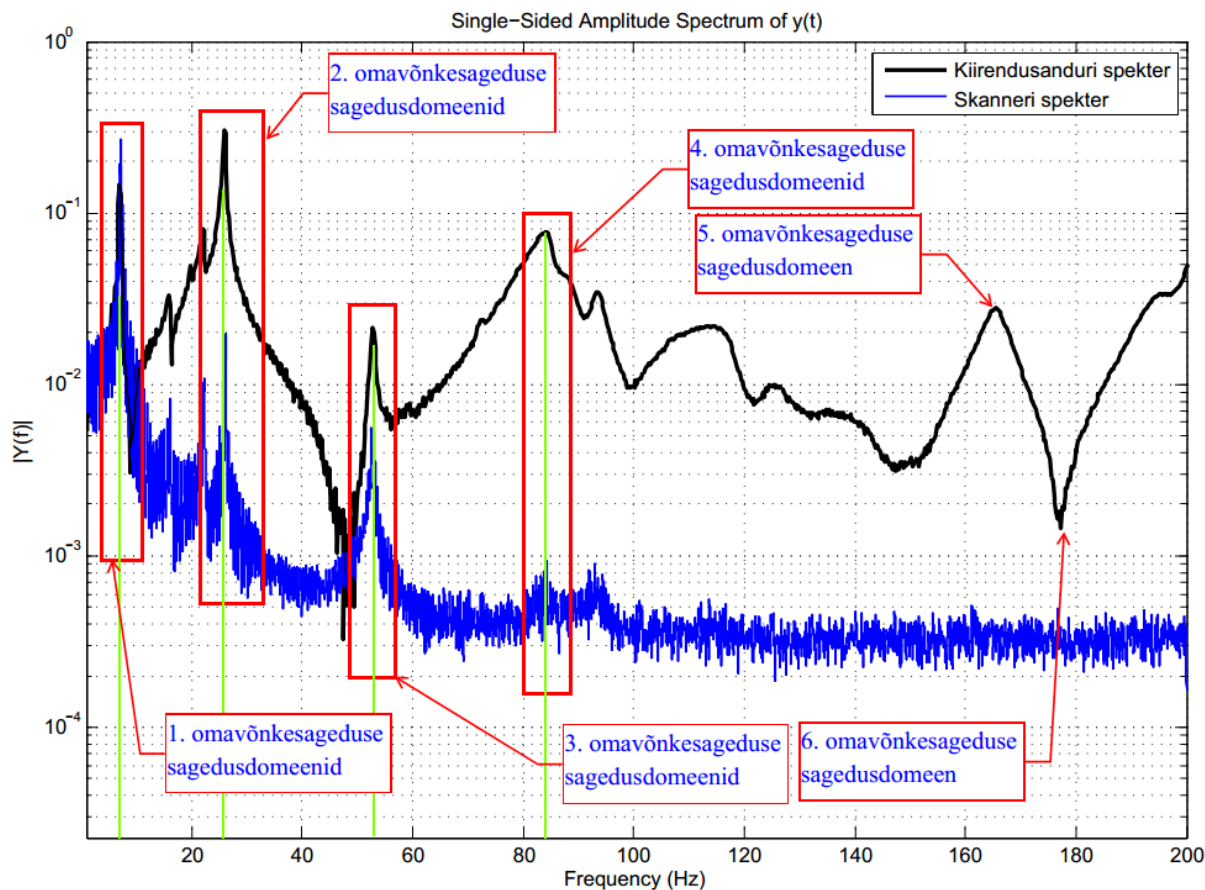
Sele 5.16 3. omavõnkesageduse sagedusdomeenide nihkumine

Sele 5.16 on lineaarse skaalaga graafik, samade tulemustega nagu oli Sele 5.15. Graafikut uurides selgus, et kolmanda omavõnkesagedusdomeeni juures on tekkinud sagedusdomeeni nihkumine ühendusjuhtmetega tehtud katsete puhul. On märgatav, et ilma juhtmeteta tehtud katse tulemused on erinevad ühendatud kiirendusanduritega tehtud katsetest ja vigastuse tekitamine pole andud skanneri mõõtmistega tuvastatav.

### 5.6.2 Skanneri ja kiirendusanduri tulemuste võrdlus

Andurite labale asetamise katse üheks eesmärgiks oli võrrelda anduritest saadavate ja skannerist saadavaid tulemusi. Antud juhul oli eesmärk kontrollida, kas anduritest saadav info on üldse reaalne ja kas suudetaks anduritest saadavat infot loetavaks teha ja kasutada.



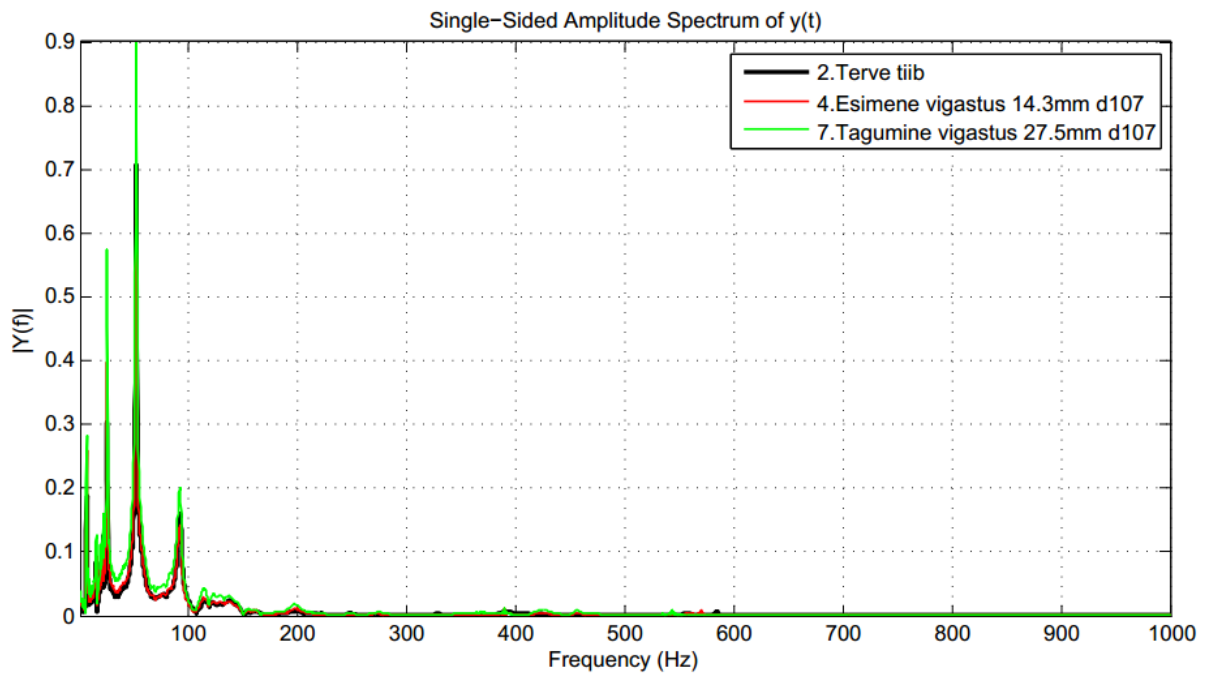


Sele 5.17 Kiirendusanduritest ja skannerist saadud tulemuste võrdlusgraafik

Uurides mõlemaid tulemusi, selgus, et sagedusdomeenid kattuvad mõlemate puhul, nagu ilmneb Sele 5.17. On märgata anduri suuremat tundlikkust. Esimese omavõnkesageduse sagedusdomeeni juures on märgata, et anduri maksimum ei ületa skanneri maksimumi, kuigi teiste sagedusdomeenide puhul see juhtub. Antud fenomeni põhjuseks on kiirendusanduri tundlikkuse langus madalatel sagedustel. Kiirendusanduri spektrist on eristatavad ka viienda ja kuuenda omavõnkesageduse sagedusdomeenid, mis ei kattu küll LEM modaalanalüüsi sagedustega täielikult, aga hetkel on need eristatavad antud selil. Kuuenda omavõnkevormi sagedusdomeen on tõenäoliselt miinimum tulenevalt anduri asukohast. Antud omavõnkevormil võib anduri asukohas olla ülimalt suur sumbuvus.

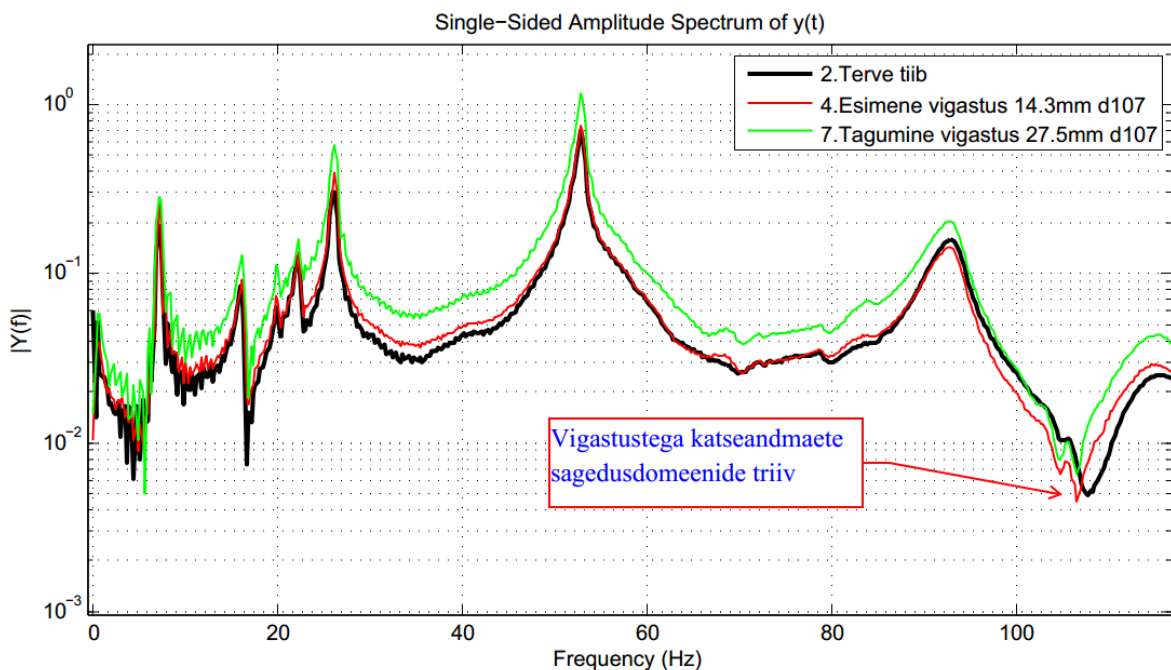
### 5.6.3 Kiirendusanduri tulemused vigastuse tekitamistel

Kuna anduri ulatus on 0 Hz kuni 2 kHz, siis algselt tuuakse välja anduri kogu mõõteulatuse spekter 0 Hz kuni 1 kHz. Vt Sele 5.18. Linearskaalaga jooniselt on näha suuremad omavõnkevormide sagedusdomeenid ja potentsiaalsed domeenide triivid. Lisas 6 on ära toodud ka andmete analüüsimisel kasutatud lähtekood.



Sele 5.18 Kiirendusanduri kogu spekter

Kogu ulatusega spektritelt pole tuvastatavaid triive näha. Järgnevalt uuriti graafikuid detailsemalt, leidmaks huvipakkuvaid iseärasusi.

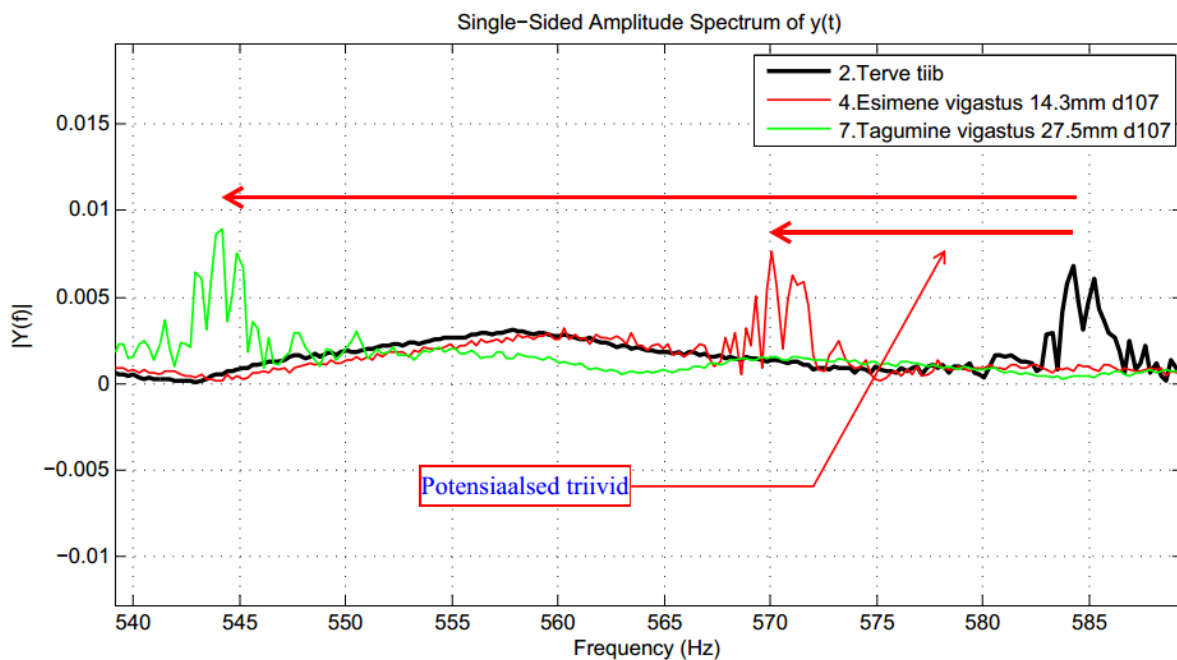


Sele 5.19 Sagedusdomeenid logaritmilise skaalaga graafikul

Detailsemal andmete uurimisel märgati, et logaritmilise skaalaga graafikul Sele 5.19 on märgata neljanda omavõnkesagedusdomeeni lähedal vigastusega labade spektrite vähest triivi.

Kuna vigastus, mis labale tekitati, oli suhteliselt minimaalne, siis võib antud triiv olla vigastuse indikaatoriks. Triiv esineb spektril, millel oli tekitatud ainult laba tipuosasse vigastus (punane joon) ning ka spektril, millel oli vigastus tekitatud ka laba tagumisse osasse (roheline joon). On ilmne, et antud triiv võib iseloomustada laba esimesse osasse tekitatud vigastust, kuna antud mõõteandmed graafikul pärinevad tipmiselt andurit, mis on vigastusele suhteliselt lähedal.

Lineaarse skaalaga graafikute spektreid lähemalt uurides, oli märgata spektrite teatavate triivide ilmingut, mida illustreerib Sele 5.20. Ilmneb, et triiv tekib domeenides, mis asuvad vahemikus 540 kuni 590 Hz. Antud domeenid ei pruugi olla omavõnkesageduse omad, aga tundub, et domeenide nihkumine jälgib sama loogikat, mida oli märgata erinevate kahjustustega labade võrdlemisel Sele 5.9. On näha, et suurema kahjustusega sagedusdomeeni (roheline joon) triiv madalamale sagedusele on suurem kui väiksema kahjustusega sagedusdomeeni (punane joon) oma.



Sele 5.20 Potentsiaalsete triivide illustatsioon

Kokkuvõtvalt võib mainida, et erinevate vigastuste tekitamise katsel polnud näha märgatavaid omavõnkesageduste muutumisi vigastuse väikese ulatuse tõttu, aga märgati spektrite erinevusi vigastuste ulatusest sõltuvalt, mis viitab, et laba dünaamilised omadused ikkagi muutusid vigastamise käigus ja seda on võimalik tuvastada.

## 6 Kokkuvõte

Antud magistritöö teemaks oli tuulegeneraatori laba seisundi monitoorimine kasutades selleks vibratsioone. Eesmärgiks oli testida, kas erinevates seisundites tuulegeneraatori labade vibratsioonid on erinevad. Lisaks oli eesmärgiks valideerida, kas kiirendusanduriga on võimalik jälgida laba seisundit.

Esmalt sooritati infootsing, saamaks aru valdkonnast ja selle iseärasustest, saamaks teada uusimaid suundi struktuuride seisundi monitoorimise kohta ning leidmaks sobiv meetod, millega oleks võimalik monitoorimist implementeerida labal. Järgnevalt selgitati töös kasutatava skanneri GOM Pontos 4M tööpõhimõtteid ja võimekust, et olla kindlad selle sobivuses labade vibratsioonide mõõtmistel.

Alguses saadi täpsem ülevaade tuulegeneraatoritega seonduvast. Selgitati välja tuulegeneraatori mastabid ja tüüp, mille labasid töös katsetama hakatakse. Järgnevalt uuriti labade põhjustatud tõrgete osakaalu generaatori tõrgete seas. Edasiselt anti ülevaade komposiitmaterjalidest ja nende tugevusomadustest ning kirjeldati kiirendusanduri platvormi, mida oli plaanis kasutama hakata. Anti ülevaade laba ehitusest ja sellel esinevatest tõrgetest.

Seejärel uuriti ja anti ülevaade struktuuri seisundi monitoorimise meetoditest, mis põhinevad vibratsioonidel. Meetodid jaotati kõrgsageduslikeks ja madalsageduslikeks. Selgus, et pole ühte kõige parimat meetodit, mis sobiks ideaalselt monitoorimiseks. Erinevatel meetoditel olid omad eelised. Magistritöös otsustati edasi liikuda omavõnkesageduste meetodiga ja sooviti seda implementeerida labal. Edasiselt toodi teoreetilised alused antud meetodi kohta modaalanalüüsi näitel ning selgitati Fourier' teisenduste põhimõtteid.

Vibratsioonide mõõtmisi viidi läbi kolmel korral. Töös anti ülevaade kasutatava skanneri kohta, aga ka löögipendli kohta ja mõõtmisi lihtsustavate lisaseadmete kohta. Esimesel korral testiti kõiki nelja laba kasutades GOM Pontos 4M skannerit. Labal kasutati viite markerit, mis olid skanneri mõõtepunktideks. Skanneri mõõtepunktide asukohtade valik baseerus lõplike elementide meetodil (LEM) põhineval modaalanalüüsil. Analüüsiti laba esimest kuute modaalvõnkevormi, selgitati välja suurimate siirete asukohad kõikidel vormidel ning nende järelduste põhjal valiti markerite asukohad. Teisel mõõtmisessioonil parendati mõõtemetoodikaid. Markerpunktidele lisati dubleerivad markerid, kuna skanner ei suutnud paljusid punkte tuvastada esimesel korral. Vibratsioone tekitaval löögipendlil hakati kasutama

kolmeastmelist lööginivoo päästikut. Mõõteperioodi alustamise initsieerimiseks paigaldati pendlile valguspäästik, mis ühtlustas mõõteperioodide stardihetke. Seadistati ka skanneri mõõtetihedust markerite paremaks tuvastuseks. Kolmandal testimissessioonil testiti vigastuseta laba koos kiirendusanduritega ning tekitati labale ka kontrollitud vigastusi, veendumaks kas väiksemat laadi vigastused ilmnevad vibratsioonide erinevustena. Laba tipust 900 mm tahupoole sooritati kaks sisselõiget mõlemad erinevate sügavustega. Teine vigastus tekitati laba korpuse ja epoksiidploki üleminekukohale, kuhu sooritati sisselõige kolmes tasemes.

Katsemõõtmete tulemusi analüüsiti MatLab keskkonnas. Mõõtepunktide koordinaadid viidi aegdomeenist sagedusdomeeni kiirete Fourier' teisenduste abil, mille tagajärjel saadi ühepoolised sagedusspektrid laba mõõtepunktide kohta. Spektritest olid selgelt eristatavad labade omavõnkesageduste sagedusdomeenid. Skanneri tehniliste omaduste tõttu olid tuvastatavad neli esimest omavõnkesagedust. Anduritega sooritatud mõõtmiste puhul olid kõik omavõnkesagedused eristatavad. Reaalsed omavõnkesagedused langesid suurusjärgus kokku LEM analüüsil leitud omavõnkesagedustega. Esimene omavõnkesagedus ühtis kõige täpsemalt, kõrgemad sagedused järjest vähem. Erinevate kahjustustasemetega labade sagedusdomeenide erinevused olid selgelt eristatavad. Suuremate kahjustustega laba sagedusdomeenide triiv oli ulatuslikum terve laba omast võrreldes paremas konditsioonis oleva laba domeenidega. Võrreldi ka skanneri ja kiirendusanduri mõõtetulemuste spektreid, kust selgus, et spektrite omavõnkesageduste domeenid ühtisid. Vigastuste tekitamise mõõtetulemustelt ei olnud märgata selgeid ilminguid sagedusdomeenide nihkumisest. Tõenäoliselt vigastus ei olnud piisav, et muuta laba struktuuri dünaamilisi omadusi. Andurite mõõtetulemuste spektris oli märgata mõningaid ilminguid sagedusdomeenide triivile, aga domeenid ei olnud omavõnkesageduste omad.

Üldiselt saab väita, et andureid on otstarbekas kasutada laba struktuuri seisundi monitoorimiseks. Et seda teha, tuleb edasiste tegevustena lahendada andurite infovahetuse ja neilt saadava infotöötuse probleemid, kui need paigaldada töötavale labale. Töös kirjeldatud laba puhul peaks kindlasti kasutama juhtmevabasid andureid, mis aga tähendab, et esmane andmetöötlus tuleks sooritada anduriplatvormis endas, et vähendada andmemahutusid. Lisaks peab andureid füüsiliselt kaitsma, tõenäoliselt kas matma laminaati või paigaldama need laba sisepinnale. Lisaks tuleb töötada välja algoritm, mis suudaks tulemustest identifitseerida sagedusdomeenid ja sooritada võrdlusi vigastuseta laba suhtes. Lisaks peaks algoritm suutma

jälgida sagedusdomeenide muutumist ajas. Töös tehti algust antud algoritmi loomisega, mis aga baseerus skanneri tulemustel.

## Summary

This thesis was the subject of a wind turbine blade structural health monitoring using vibrations. The objective was to test if different conditions of blade will have different results in their vibrations. In addition, the aim was to validate whether an acceleration sensor is able to monitor the condition of the blade.

First an information retrieval was performed, in order to understand the peculiarities of the field and to find out the latest trends in structural health monitoring. Also to find an appropriate method to be able to implement the monitoring of blade. Subsequently, the GOM Pontos 4M scanner working principles were examined, and ability to do the vibration measurements was explored.

At first more accurate overview of issues related to wind turbines was obtained. It was clarified which type and size of wind turbine blades the work will be based on. Next, the blade failure proportions were investigated in comparison of overall generator failures. After that, an overview of composite materials and their strength properties was given. Also the planned sensor platform review was introduced for the acceleration sensor. An overview of the design of the blade and occurring failures were introduced.

Then, the vibration-based methods of structural health monitoring were introduced. These were divided into high-frequency and low-frequency methods. It turned out that not one of the best methods described would fit perfectly for monitoring the blade structure. Different methods had their own advantages. It was decided that natural frequencies method will be used for further work of scope and for health monitoring. After finalizing the selection of structural health monitoring method a more detailed theoretical background was given based on modal analysis, also Fourier' transforms were introduced.

The testing for vibrations of the blade was carried out in three sessions. An overview of the measurement scanner, excitator pendulum and other smaller helping accessories was given. At the first time, all four blades were tested using the GoM Pontos 4M scanner. Five marker points were used for scanner to measure from the blade. Markerpoints placement was based on the finite element method (FEM) based modal analysis. Blade was analyzed for the first six modeshapes. Major transitions in all its forms were identified, the locations of the major transitions as well. Based on the findings marker and acceleration sensor placement was

decided. On the second measuring session the methods of measuring were improved. Additional markers were added next to initial ones, since the scanner was not able to identify many of the points for the first time. Three-level trigger was added for the excitation pendulum to have more exact results. Light emitted switch was installed for the pendulum to initiate the start of the measurement period. Frame rate of the scanner was also adjusted for better detection of marker points. On the third test session controlled injuries were carried out on the non-damaged blade to make sure the injuries occur in the lower modal frequencies differences are distinguishable. Also acceleration sensors were added on the blade on the test session. Two incisions were made 900 mm from the tip of the blade towards the rear, at different depths of two levels. Another injury was made near to the blade housing area where the incision was performed in three levels.

The test results were analyzed in MatLab environment. The coordinates of the measuring points were converted from time-domain to frequency-domain with fast Fourier' transformations. Based on results frequency amplitude spectrum of the blade was created. Frequency domains were clearly distinguishable from the single sided amplitude spectrum. Due to the technical characteristics of the scanner the first four natural frequencies were detected. All of the first six natural frequencies were clearly distinguishable based on the acceleration sensor measurements. The measured natural frequencies and the ones found in FEM analysis were more or less accurate. First natural frequencies between FEM and scanned one were matching each other, the higher frequencies matched as well, but not as much, the higher the frequency the less they collided to each other. Blades with different condition showed different spectras of response data, and comparing the spectras against each other showed the drifts of the frequency domains clearly. The frequency domain shifts were more extensive on the blade that was in worst condition. The spectras of scanner and acceleration sensor data were compared to each other and found that the frequency domains were consistent to each other. It means that the acceleration sensor was successfully validated and can be used for blade structural health monitoring. In the results of controlled injury test no clear evidence were seen of the modal frequency domain drifts. Probably the injury was insufficient to change the structure and therefore dynamic characteristics of the blade. However some phenomenas were detected that lead to the assumptions that some minor changes were in the structure response, but these changes were not in the frequency domains of the natural frequencies.



Generally, it can be noted that it is advisable to use acceleration sensors to monitor the structural health of the blade. Sensor information exchange to data acquisition module and data analysis issues need to be resolved before the sensor platform can be integrated to working wind turbine blade. Wireless sensor platform would be advised for finalized solution, which however, means that the primary data processing should be performed inside the sensor platform, in order to reduce the volumes of data. In addition, the sensors must be physically protected, there are two options of doing that, either bury them inside the blades composite laminate or to install them to inner side of the laminate surface. An algorithm needs to be developed that can identify frequency domains from the measurement data and compare the domains respectively to the ethalon blade. Frthermore the algorithm should be able to monitor the blade structural health over time. Work was begun for creating the algorithm, but it was started based on the scanner results that are different from the ones from the acceleration sensors.

## Kasutatud kirjandus

- [1] International Renewable Energy Agency, “RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES,” *IRENA Work. Pap.*, vol. Volume 1: Power Sector, no. Issue 5/5, Jun. 2012.
- [2] “Rootori diameetri kasv.” [Online]. Available: <http://gtms1314.files.wordpress.com/2013/03/graph-1.png>. [Accessed: 08-May-2014].
- [3] “Maintenance-Techs-from-Renuvo.jpg (500×614).” [Online]. Available: <http://wpcore.wpe.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2011/07/Maintenance-Techs-from-Renuvo.jpg>. [Accessed: 08-May-2014].
- [4] “my!WIND tuuleturbiini spetsifikatsioon.” [Online]. Available: [http://www.mywind.ee/htdocs/my\\_home.php](http://www.mywind.ee/htdocs/my_home.php). [Accessed: 06-May-2014].
- [5] J.-S. Chou, C.-K. Chiu, I.-K. Huang, and K.-N. Chi, “Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 27, pp. 99–118, Jan. 2013.
- [6] Henri Herranen, “Õppeaine arendustöö ja innovatsioon loengumaterjalid 2013,” Tallinn, 2013.
- [7] Ahti Põlder, “Mehhatroonikasüsteemide komponendid MHX0065 Sensorid.” .
- [8] Martin Arraigada and Manfred Partl, “Calculation of displacements of measured accelerations, analysis of two accelerometers and application in road engineering,” vol. Conference paper STRC, no. 6 th Swiss Transport Research Conference, Mar. 2006.
- [9] Henrik Herranen, Alar Kuusik, Tõnis Saar, Marko Reidla, Raul Land, Olev Märten, and Jüri Majak, “Acceleration data acquisition and processing system for SHM,” 2014.
- [10] Pabut, O, Allikas, G, Herranen, H, Talalaev, R, and Vene, K, “MODEL VALIDATION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF A SMALL WIND TURBINE BLADE,” *8th Int. DAAAM Balt. Conf.*, Apr. 2014.
- [11] “Reichhold | Composites Product Detail.” [Online]. Available: <http://www.reichhold.com/en/composites-product-detail.aspx?pid=1009&list=all>. [Accessed: 07-May-2014].
- [12] S. Ataya and M. M. Z. Ahmed, “Damages of wind turbine blade trailing edge: Forms, location, and root causes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 35, pp. 480–488, Dec. 2013.
- [13] Bent F. Sørensen, Lars Lading, Peter Sendrup, Malcolm, Malcolm McGugan, Christian P. Debel, Ole J.D. Kristensen, Gunner Larsen, Anders M. Hansen, Jørgen Rheinländer, Jens Rusborg, and Jørgen D. Vestergaard, “Fundamentals for Remote

Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades - a Preproject.” Risø National Laboratory, Roskilde, May-2002.

- [14] J. C. Marín, A. Barroso, F. París, and J. Cañas, “Study of damage and repair of blades of a 300 kW wind turbine,” *Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1068–1083, Jul. 2008.
- [15] Afzal Suleman, “LECTURE 1: VIBRATION-BASED SHM TECHNIQUES.” .
- [16] Afzal Suleman, “SHM-in-Action Lecture Series,” Lisbon - PORTUGAL, 24-Nov-2008.
- [17] B. Masserey, C. Raemy, and P. Fromme, “High-frequency guided ultrasonic waves for hidden defect detection in multi-layered aircraft structures,” *Ultrasonics*.
- [18] K. K. Borum, M. McGugan, and P. Brøndsted, “CONDITION MONITORING OF WIND TURBINE BLADES,” *Proc. 27th Risø Int. Symp.*, vol. Polymer Composite Materials for Wind Power Turbines, 2006.
- [19] C. Lu, P. Ding, and Z. Chen, “Time-frequency Analysis of Acoustic Emission Signals Generated by Tension Damage in CFRP,” *Procedia Eng.*, vol. 23, pp. 210–215, 2011.
- [20] Afzal Suleman, “LECTURE 4: NON-DESTRUCTIVE EVALUATION: CONVENTIONAL TECHNIQUES.” .
- [21] I. Pelivanov, T. Buma, J. Xia, C.-W. Wei, and M. O’Donnell, “NDT of fiber-reinforced composites with a new fiber-optic pump–probe laser-ultrasound system,” *Photoacoustics*, vol. 2, no. 2, pp. 63–74, Jun. 2014.
- [22] Jesús de Sebastián, Alfredo Escudero, Roberto Aranz, Iván M. Díaz, Alfonso Poncela, and Antolín Lorenzana, “A LOW-COST VIBRATION MONITORING SYSTEM FOR A STRESS RIBBON FOOTBRIDGE,” *Politec. Torino 24-26 June 2013*, vol. SMART2013, no. 6th ECCOMAS Conference on Smart Structures and Materials.
- [23] L. C. Henriksen and N. K. Poulsen, “Energy-based Nonlinear Control of Hydraulically Actuated Pitch-Servo Systems.”
- [24] Patrick Guillaume, “MODAL ANALYSIS.”
- [25] Imad Abdallah, “Advanced Load Alleviation for Wind Turbines using Adaptive Trailing Edge Geometry: Sensing Techniques,” M.Sc Thesis Project, Technical University of Denmark, 2006.
- [26] “F - Fourier.” [Online]. Available: <http://www.elin.ttu.ee/~parveto/EthnLing/TechVoca/F/Fourier.htm>. [Accessed: 09-May-2014].
- [27] “Fast Fourier transform - MATLAB fft - MathWorks Nordic.” [Online]. Available: <http://www.mathworks.se/help/matlab/ref/fft.html>. [Accessed: 20-May-2014].

- [28] “Nyquist’s Sampling Theorem.” [Online]. Available: <http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/Multimedia/node149.html>. [Accessed: 22-May-2014].
- [29] “Gaussian window - MATLAB gausswin - MathWorks Nordic.” [Online]. Available: <http://www.mathworks.se/help/signal/ref/gausswin.html>. [Accessed: 11-May-2014].
- [30] “Filtering and Smoothing Data - MATLAB & Simulink - MathWorks Nordic.” [Online]. Available: <http://www.mathworks.se/help/curvefit/smoothing-data.html>. [Accessed: 13-May-2014].
- [31] “Smooth response data - MATLAB smooth - MathWorks Nordic.” [Online]. Available: <http://www.mathworks.se/help/curvefit/smooth.html?searchHighlight=smooth>. [Accessed: 11-May-2014].

**Lisad**

# Lisa 1. Kiirendusanduri ADXL326 spetsifikatsioon

**ADXL326**

## SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 3\text{ V}$ ,  $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\ \mu\text{F}$ , acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis	$\pm 16$	$\pm 19$		g
Nonlinearity	Percent of full scale		$\pm 0.3$		%
Package Alignment Error			$\pm 1$		Degrees
Interaxis Alignment Error			$\pm 0.1$		Degrees
Cross Axis Sensitivity <sup>1</sup>			$\pm 1$		%
<b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>2</sup></b>					
Sensitivity at $X_{out}$ , $Y_{out}$ , $Z_{out}$	Each axis $V_S = 3\text{ V}$	51	57	63	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature <sup>3</sup>	$V_S = 3\text{ V}$		$\pm 0.01$		%/°C
<b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b>					
0 g Voltage at $X_{out}$ , $Y_{out}$	$V_S = 3\text{ V}$	1.35	1.5	1.65	V
0 g Voltage at $Z_{out}$	$V_S = 3\text{ V}$	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			$\pm 1$		mg/°C
<b>NOISE PERFORMANCE</b>					
Noise Density $X_{out}$ , $Y_{out}$ , $Z_{out}$			300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
<b>FREQUENCY RESPONSE<sup>4</sup></b>					
Bandwidth $X_{out}$ , $Y_{out}$ <sup>5</sup>	No external filter		1600		Hz
Bandwidth $Z_{out}$ <sup>5</sup>	No external filter		550		Hz
$R_{EXT}$ Tolerance			$32 \pm 15\%$		k $\Omega$
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
<b>SELF TEST<sup>6</sup></b>					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		$\mu\text{A}$
Output Change at $X_{out}$	Self test 0 to 1	-29	-62	-114	mV
Output Change at $Y_{out}$	Self test 0 to 1	+29	+62	+114	mV
Output Change at $Z_{out}$	Self test 0 to 1	+29	+105	+190	mV
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		350		$\mu\text{A}$
Turn-On Time <sup>7</sup>	No external filter		1		ms
<b>TEMPERATURE</b>					
Operating Temperature Range		-40		+85	°C

<sup>1</sup> Defined as coupling between any two axes.

<sup>2</sup> Sensitivity is essentially ratiometric to  $V_S$ .

<sup>3</sup> Defined as the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.

<sup>4</sup> Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors ( $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$ ).

<sup>5</sup> Bandwidth with external capacitors =  $1/\sqrt{2} \times \pi \times 32\text{ k}\Omega \times C$ . For  $C_X$ ,  $C_Y = 0.003\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 1.6 kHz. For  $C_Z = 0.01\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 500 Hz. For  $C_X$ ,  $C_Y = 10\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 0.5 Hz.

<sup>6</sup> Self test response changes cubically with  $V_S$ .

<sup>7</sup> Turn-on time is dependent on  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$  and is approximately  $160 \times C_X$  or  $C_Y$  or  $C_Z + 1\text{ ms}$ , where  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$  are in  $\mu\text{F}$ .

## Lisa 2. Kiirendusanduri ADXL377 spetsifikatsioon

Data Sheet

ADXL377

### SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 3\text{ V}$ ,  $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\ \mu\text{F}$ , acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis		$\pm 200$		g
Nonlinearity	% of full scale up to 180 g		$\pm 0.5$		%
Cross-Axis Sensitivity <sup>1</sup>			$\pm 1.4$		%
<b>SENSITIVITY, RATIOMETRIC<sup>2</sup></b>					
Sensitivity at $X_{out}$ , $Y_{out}$ , and $Z_{out}$	Each axis $V_S = 3\text{ V}$	5.8	6.5	7.2	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature <sup>3</sup>	$V_S = 3\text{ V}$		$\pm 0.02$		%/ $^\circ\text{C}$
<b>ZERO g BIAS LEVEL, RATIOMETRIC</b>					
Zero g Voltage	$V_S = 3\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	1.4	1.5	1.6	V
Zero g Offset vs. Temperature			$\pm 12$		mg/ $^\circ\text{C}$
X-Axis and Y-Axis			$\pm 30$		mg/ $^\circ\text{C}$
Z-Axis					
<b>NOISE PERFORMANCE</b>					
Noise Density			2.7		mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$
$X_{out}$ and $Y_{out}$			4.3		mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$
$Z_{out}$					
<b>FREQUENCY RESPONSE<sup>4</sup></b>					
Bandwidth <sup>5</sup>	No external filter		1300		Hz
$X_{out}$ and $Y_{out}$			1000		Hz
$Z_{out}$					
$R_{int}$ Tolerance			$32 \pm 15\%$		k $\Omega$
Sensor Resonant Frequency			16.5		kHz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Logic Input Low			0.6		V
Logic Input High			2.4		V
ST Actuation Current			60		$\mu\text{A}$
Output Change	Self-test, 0 to 1				
At $X_{out}$			-6.5		mV
At $Y_{out}$			6.5		mV
At $Z_{out}$			11.5		mV
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High			2.8		V
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range <sup>7</sup>		1.8	3.0	3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		300		$\mu\text{A}$
Turn-On Time <sup>8</sup>	No external filter		1		ms
<b>OPERATING TEMPERATURE RANGE</b>		-40		+85	$^\circ\text{C}$

<sup>1</sup> Defined as coupling between any two axes.

<sup>2</sup> Sensitivity is essentially ratiometric to  $V_S$ .

<sup>3</sup> Defined as the output change from ambient temperature to maximum temperature or from ambient temperature to minimum temperature.

<sup>4</sup> Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors ( $C_X$ ,  $C_Y$ , and  $C_Z$ ).

<sup>5</sup> Bandwidth with external capacitors =  $1/(2\pi \times 32\text{ k}\Omega \times C_X)$ .

<sup>6</sup> Self-test response changes cubically with  $V_S$ .

<sup>7</sup> Self-tested at 3.0 V and guaranteed by design only (not tested) to work over the full voltage range from 1.8 V to 3.6 V.

<sup>8</sup> Turn-on time is dependent on  $C_X$ ,  $C_Y$ , and  $C_Z$  and is approximately  $160 \times (C_X \text{ or } C_Y \text{ or } C_Z) + 1$ , where  $C_X$ ,  $C_Y$ , and  $C_Z$  are in  $\mu\text{F}$  and the resulting turn-on time is in ms.

## Lisa 3. Pontos Skannerite tehniline spetsifikatsioon

### 2. The PONTOS System Variants

System types	PONTOS 5M	PONTOS 4M	PONTOS 12M	PONTOS HS
Standard measuring volume in mm	10 x 8 to 5000 x 4150	10 x 7 to 4000 x 2900	15 x 11 to 5000 x 3750	10 x 8 to 4000 x 3200
Camera resolution	2448 x 2050 pixels	2352 x 1728 pixels	4096 x 3072 pixels	1280 x 1024 pixels
Camera chip	CCD		CMOS	
Max. frame rate	With 19" PC: 15 Hz (29 Hz with binning)	60 Hz at 2352 x 1728 pixels  120 Hz at 2352 x 856 pixels  240 Hz at 2352 x 416 pixels  <b>480 Hz at 2352 x 184 pixels</b>	24 Hz at 4096 x 3076 pixels  48 Hz at 4096 x 1536 pixels  96 Hz at 4096 x 768 pixels  192 Hz at 4096 x 384 pixels	500 Hz at 1280 x 1024 pixels  1000 Hz at 1280 x 512 or 880 x 704 pixels  2000 Hz at 1280 x 256 or 560 x 488 pixels  4000 Hz at 1280 x 120 or 400 x 304 pixels
	With laptop: 7 Hz (29 Hz with binning)		96 Hz at 2048 x 1536 pixels  190 Hz at 2048 x 768 pixels  365 Hz at 2048 x 384 pixels	
Connection camera to PC	Gigabit-Ethernet via sensor controller		Camera Link	
Intermediate image storage	In the main memory (RAM) of the evaluating computer			
Exposure time	0.1 ms up to 2 s	0.1 ms up to 2 s	0.1 ms up to 2 s	0.010 ms up to 1 s
Main hardware components	Laptop or 19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting	19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting Flash controller	19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting Flash controller	19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting Flash controller
Laser pointer			yes	
LED lighting with polarization filters	yes (10° or 30°)	optional	optional	optional
Measuring results	3D coordinates, 3D displacements, deformation			
	For further information see <a href="http://www.gom.com">http://www.gom.com</a>			



## Lisa 4. Skanneri tulemuste analüüsi lähtekood

```
x1fileName= 'C:\Users\sck\Dropbox\SHM\MATLAB\2gen1\2gen1-2006--true-
lms_data.uff'
%x2fileName= 'Goliath0100_dataLMSOptimized.uff'
x1= readuff(x1fileName); %% 'InfoOnly')

xlen = length (x1)
xlen2= round(xlen/3); %% X,Y,Z vahelduvalt
xlen3= length(x1{1}.x)
t_xvektor=zeros (xlen2, xlen3);
t_yvektor=zeros (xlen2, xlen3);
t_zvektor=zeros (xlen2, xlen3);

d_xvektor=zeros (xlen2, xlen3);
d_yvektor=zeros (xlen2, xlen3);
d_zvektor=zeros (xlen2, xlen3);

for i=2:xlen2 %% '1'-OK , aga'2', '16' (4,5,6) -mingi anomaalia-vähe
andmeid?

    base= (i-1)*3+1;

    xs=size (x1{base}.x);

    marker(i) = x1{base }.rspNode;
    xlen3_act= 718; % Vektori tegelik pikkus
    % aja massiiv
    t_xvektor(i, 1:length(x1{base }.x))=x1{base }.x (:);
    t_yvektor(i, 1:length(x1{base+1}.x))= x1{base+1}.x (:);
    t_zvektor(i, 1:length(x1{base+2}.x))= x1{base +2}.x (:);
    % väärtuste massiiv d= 'measData'
    d_xvektor(i, 1:length(x1{base }.measData))=x1{base }.measData (:);
    d_yvektor(i, 1:length(x1{base+1}.measData))= x1{base+1}.measData (:);
    d_zvektor(i, 1:length(x1{base+2}.measData))= x1{base +2}.measData (:);

    if (xs~= xlen3)
        xbase= base
        xxlen=xs
    end
end

x=7
%plot (t_xvektor, d_xvektor)
%plot (d_xvektor(2, 1:700))
nodes3 = [
2009
2007
2004
2002
2001
];
nodes3 = nodes3(end:-1:1);

nd = nodes3;
%nd2 = nodes2;
clear beam beam2;
```

```

for i = 1:length(nd)
    ind= find(marker == nd(i));
    beam(i,:) = d_xvektor(ind,:);
    clear ind;
    %ind= find(marker == nd2(i));
    %beam2(i,:) = d_xvektor(ind,:);
end
for k = 1:size(beam,1)-1
    Fs = 400; % Sampling frequency
    T = 1/Fs; % Sample time
    L = 8000; % Length of signal
    t = (0:L-1)*T; % Time vector
    y = beam(k,:);
    NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
    Y = fft(y,NFFT)/L;
    f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
    j=2*abs(Y(1:NFFT/2+1));
    %FILTREERIMATA

    g = gausswin(20); %Gaussi filter ja selle ulatusparameeter
    g = g/sum(g);
    g1 = conv(j, g, 'same')%Gaussi filter rakendatakse
    %j1=wkeep(j,4095,'c');
    g2=wkeep(g1,4095,'c');
    %FILTREERITUD

    %[max_res_y,max_hz_x]=max(j1(1:307));
    %[max_res_y2,max_hz_x2]=max(j1(307:614))
    %[max_res_y3,max_hz_x3]=max(j1(615:1231))
    %[max_res_y4,max_hz_x4]=max(j1(1231:4095))
    es=1
    te=308
    ko=615
    ne=1232

    [max_res_y1,max_hz_x11]=max(g2(es:307));
    [max_res_y2,max_hz_x22]=max(g2(te:614));
    [max_res_y3,max_hz_x33]=max(g2(ko:1231));
    [max_res_y4,max_hz_x44]=max(g2(ne:4095));

    max_hz_x1=max_hz_x11+es
    max_hz_x2=max_hz_x22+te
    max_hz_x3=max_hz_x33+ko
    max_hz_x4=max_hz_x44+ne
    %LEIAB MÅx väärtuse Y JA X KOHA MAATRIKSIS
    aeg=4095/200
    res_max1=max_hz_x1/aeg
    res_max2=max_hz_x2/aeg
    res_max3=max_hz_x3/aeg
    res_max4=max_hz_x4/aeg

    %TEISENDA MAATRIKSI ASUKOHA HZ'KS X kohta jagatud 200 Hz peale
    %export funktsiooniga excelisse
    figure(k)
    % Plot single-sided amplitude spectrumz
    plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
    hold on

```

```

%plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),f,y3)
%plot(f,g1,'r','LineWidth',2)

axis([1 100 0 0.17])
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t)')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
grid on

text(30, 0.15, ['MARKER:' num2str(nodes3(k))], 'FontSize',16);
text(30, 0.14, ['z-telg'], 'FontSize',16);

hold off
end

```

## Lisa 5. Skanneri tulemuste kokkuvõtte lähtekood

```
load f4.mat;
fn=f;
clear f ;
load g1_1.mat;
gn1=g1;
clear g1 ;
load f2.mat;
fn2=f;
clear f ;
load g1_2.mat;
gn2=g1;
clear g1 ;
load g1_3.mat;
gn3=g1;
clear g1 ;
load g1_4.mat;
gn4=g1;
clear g1 ;

plot(fn,gn1,'k','LineWidth',2)
hold on
plot(fn2,gn2,'r','LineWidth',1)
hold on
plot(fn,gn3,'g','LineWidth',1)
hold on
plot(fn,gn4,'b','LineWidth',1)
hold on
    axis([1 100 0 0.17])
    title('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t)')
    xlabel('Frequency (Hz)')
    ylabel('|Y(f)|')
    legend('Laba nr.1','Laba nr.2','Laba nr.3','Laba nr.4')
    grid on
    hold off
```

## Lisa 6. Anduri tulemuste analüüsi lähtekood

```
ax = 'Z';
dataM = data;
switch ax
    case 'X'
        mt = 1;
    case 'Y'
        mt = 2;
    case 'Z'
        mt = 3;
end

for ix = 1:3
    dataIndex = (ix-1)*4 + 1;
    dataX = dataM(:,dataIndex);

    dataIndex = (ix-1)*4 + 2;
    dataY = dataM(:,dataIndex);

    dataIndex = (ix-1)*4 + 3;
    dataZ = dataM(:,dataIndex);

    dataMag = sqrt(dataX.^2 + dataY.^2 + dataZ.^2);
    [fftRes fs] = fftCalc(dataZ, 2000);

    L = numel(dataM(:,dataIndex));
    NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y

    h = figure(1)
    % Plot single-sided amplitude spectrumz
    fft_val=2*abs(fftRes(1:NFFT/2+1));

    fft_fil=smooth(fft_val,5)
    %plot(fs,fft_val)
    %hold on
    plot(fs,fft_val,'b','LineWidth',1)
    %semilogy(fs,fft_val,'b','LineWidth',1)

    axis([1 1000 0 50*mean(abs(fftRes(1:NFFT/2+1)))]])
    grid on
    text(47, 40, ['node:' num2str(ix*mt)], 'FontSize',14);
    % hold on

    % [fftRes fs] = fftCalc(data(:,dataIndex), 2000);
    % L = numel(data(:,dataIndex));
    % NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
    % plot(fs,2*abs(fftRes(1:NFFT/2+1)),'color','r')
    %
    %
    % title(['Amplitude Spectrum of node nr.' num2str(ix) ' Axis:' ax])
    % xlabel('Frequency (Hz)')
    % ylabel('|Y(f)|')
```

```

%      %axis auto
%      hleg1 = legend('Structure with mass','Plain structure');
%      hold off

%print(h,'Figure2.png')
fileName = ['a2_3_test impact z node' num2str(ix)];
saveas(h, fileName, 'png')

end

function [fftData, fVec] = fftCalc(data, fs)

Fs = fs;                % Sampling frequency
T = 1/Fs;               % Sample time
L = numel(data);        % Length of signal
y = data;

NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
fftData = fft(y,NFFT)/L;
fVec = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

end

```

## Lisa 7. Laba struktuuri joonis