

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Metalli
Konetekniikan koulutusohjelma

Janne Heikkinen

**KOKEELLISEN MOODIANALYYSIN JÄLKIKÄSITTELY OMINAISMUOTOJEN
VISUAALISEKSI TARKASTELEMISEKSI**

Työn tarkastajat: Professori Aki Mikkola
 TkT Kimmo Kerkkänen

Työn ohjaaja: Professori Aki Mikkola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Janne Heikkinen

Kokeellisen moodianalyysin jälkikäsitteily ominaismuotojen visuaaliseksi tarkastelemiseksi

Diplomityö

2010

69 sivua, 31 kuvaa, 6 taulukkoa, 5 liitettä

Tarkastajat: Professori Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: kokeellinen moodianalyysi, EMA, FEM, ominaistaajuus, ominaismuoto, ominaisvärähtely

Keywords: experimental modal analysis, EMA, FEM, natural frequency, natural mode, natural vibration

Kokeellinen moodianalyysi on kokeellinen menetelmä, jolla voidaan selvittää rakenteille ominaista värähtelyä. Työssä oli kolme tavoitetta, jotka pyrittiin saavuttamaan. Ensimmäinen tavoite oli ohjeistuksen luominen rakenteiden ominaismuotojen visuaaliseksi tarkastelemiseksi Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla käytettävissä olevilla laitteistoilla ja ohjelmilla. Ohjeistuksen perustana on ajatus siitä, että kokeellinen moodianalyysi saataisiin tehokkaampaan käyttöön koneensuunnittelun opetuksessa. Ohjeistus tehtiin pääasiassa kuvien ja kuvia tukevien selitysten avulla.

Työn toisena tavoitteena oli verrata rakenteen ominaisvärähtelyä, kun se oli tuettu vapaasti ja kun se oli tuettu kiinteästi sen luonnolliseen ympäristöön. Taajuuksia verrattaessa huomattiin, että eri tavoin tuetut rakenteet käyttäytyvät eri tavalla, mikä on otettava huomioon, kun tutkitaan kriittisiä värähtelyjä.

Ominaisvärähtelyjä voidaan selvittää myös matemaattisesti esimerkiksi äärellisten elementtien menetelmällä. Työn kolmantena tavoitteena oli verrata elementtimenetelmällä ja kokeellisesti saatuja ominaisvärähtelyn arvoja. Elementtimallia pyrittiin tarkentamaan eri parametrejä muuttamalla niin, että ominaistaajuuksien arvot vastaavat mahdollisimman hyvin toisiaan. Tavoite saavutettiin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Mechanical Engineering

Janne Heikkinen

Post-processing experimental modal analysis for visualizing normal modes

Master's thesis

2010

69 pages, 31 pictures, 6 tables, 5 appendices

Examiners: Professor Aki Mikkola
D.Sc. (Tech) Kimmo Kerkkänen

Keywords: experimental modal analysis, EMA, FEM, natural frequency, natural mode, natural vibration

Experimental modal analysis is a method to determine the natural vibrations of structures. In this work, there were three main goals. The first goal was to create an instruction for visualizing normal modes using the equipment and software, which are available at Lappeenranta University of Technology. The basic idea for the instruction is to promote better usage of experimental modal analysis in mechanical design education. The instruction was based on commented pictures, illustrations and instructions.

For the second goal, structural vibrations were solved when the researched structure was freely suspended in space and fixed to its natural surroundings. When natural frequencies were compared, the supports had a substantial effect on the natural frequencies, which must be taken into account when exploring critical vibrations.

Natural vibrations can be determined also by mathematical methods, for example, by the finite element method. The final goal for this work was to compare the natural frequencies solved by the finite element method with the natural frequencies obtained from experimental modal analysis. The model used in the finite element method was supposed to be modified by changing certain parameters. The main goal was to modify the model so the natural frequencies correlate with those obtained from experimental modal analysis. The goal was reached.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	1
	1.1 Työn tavoitteet	2
	1.2 Työn rajaus	4
2	KOKEELLISEN MOODIANALYYSIN PERUSTEET	5
	2.1 Värähtelymekaniikka	5
	2.1.1 Ominaisaajuudet ja -muodot.....	8
	2.1.2 Vaimennus	10
	2.2 Taajuusvastefunktio	12
	2.3 Kokeellinen moodianalyysi	14
	2.3.1 Moodianalyysilaitteisto	16
	2.3.2 Kokeellisesta moodianalyysistä saatava data	19
	2.4 Kokeellisen moodianalyysin tulosten havainnollinen esittäminen.....	24
	2.5 Elementtimenetelmän ja kokeellisen moodianalyysin yhdistäminen	26
	2.5.1 Äärellisten elementtien menetelmä.....	26
	2.5.2 Teoria yhdistämisen takana	28
3	SOVELLUSTEN YHDISTÄMINEN KÄYTÄNNÖSSÄ.....	32
	3.1 Ominaismuotojen visuaalinen tarkastelu	32
	3.2 Elementtimenetelmän mallin korjaaminen kokeellisen moodianalyysin avulla.....	33
	3.3 Esimerkkirakenne	33
	3.3.1 Esimerkkirakenteen geometria	34
	3.3.2 Puominnosturin puomin kokeellinen moodianalyysi.....	35
	3.3.3 Tulosten jälkikäsitteily ja esimerkkirakenteen ominaismuotojen visuaalinen tarkastelu.....	40
	3.3.4 Esimerkkirakenteen elementtimallin tarkennus.....	45
	3.3.5 Tuetun puomin kokeellinen moodianalyysi	49
4	SAAVUTETUT TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI.....	50
	4.1 Tulokset.....	50
	4.2 Tulosten analysointi	55
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	63
	LÄHDELUETTELO.....	68
	LIITTEET I-V	

KÄYTETYT MERKINNÄT

Latinalaiset aakkoset

A	vakiotermi
c	vaimennuskerroin
C	vaimennusmatriisi
e	eksponenttifunktio
E	kimmomoduli
f	ominaistaajuus
f	voimavektori
H	taajuusvastefunktio
I	yksikkömatriisi
j	imaginääriyksikkö
k	värähtelijän jousivakio
K	jäykkyysmatriisi
\tilde{K}	massanormeerattu jäykkyysmatriisi
m	värähtelijän massa
M	massamatriisi
n	lukumäärä
q	vakiovektori
\ddot{q}	vakiovektorin toinen aikaderivaatta
t	aika
v	vakiovektori
x	asema ajan suhteen
x	asemavektori
\dot{x}	aseman ensimmäinen aikaderivaatta eli nopeus
\dot{x}	nopeusvektori, asemavektorin ensimmäinen aikaderivaatta
\ddot{x}	aseman toinen aikaderivaatta eli kiihtyvyys
\ddot{x}	kiihtyvyysvektori, asemavektorin toinen aikaderivaatta
X	vakiotermi

Kreikkalaiset aakkoset

ζ	vaimennus
ν	kuroutumisvakio
π	matemaattinen vakio pii, jonka likiarvo on 3.141592654
ρ	tiheys
φ	ominaisvektori
ω	ominaiskulmataajuus

Yläindeksit

j	imaginääriyksikkö
t	aika
T	transpoosi
ω	ominaiskulmataajuus

Alaindeksit

c	raja
d	vaimennettu
i	x-suuntainen yksikkövektori
j	y-suuntainen yksikkövektori
k	kerroin
n	vaimentamaton
s	suhde
EMA	kokeellinen moodianalyysi
FEM	äärellisten elementtien menetelmä

Lyhenteet

$3D$	kolmiulotteinen
CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu (<i>computer aided design</i>)
EMA	kokeellinen moodianalyysi (<i>experimental modal analysis</i>)
FEM	äärellisten elementtien menetelmä (<i>finite element method</i>)
FRF	taajuusvastefunktio (<i>frequency response function</i>)
LUT	Lappeenranta University of Technology

<i>MAC</i>	ominaismuotojen samankaltaisuusvertailu (<i>modal assurance criterion</i>)
<i>MIMO</i>	useampi sisäänmeno, useampi ulostulo (<i>multiple input, multiple output</i>)
<i>MISO</i>	useampi sisäänmeno, yksi ulostulo (<i>multiple input, single output</i>)
<i>SIMO</i>	yksi sisäänmeno, useampi ulostulo (<i>single input, multiple output</i>)
<i>SISO</i>	yksi sisäänmeno, yksi ulostulo (<i>single input, single output</i>)
<i>ViDIMS</i>	Virtual Design of Intelligent Machine Structures and Systems

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston konetekniikan osastolle. Haluan kiittää työni ohjaajaa ja ensimmäistä tarkastajaa professori Aki Mikkolaa, jonka armollisella avustuksella olen saanut työni näihin mustiin kansiin. Haluan kiittää myös työni toista tarkastajaa Kimmo Kerkkästä arvokkaista kommentteista sekä Juha Koivistoa mittausten suorittamisesta.

Suurimmat kiitokset haluan osoittaa vanhemmilleni, jotka ovat kasvattaneet minut rakkaudella ja kärsivällisyydellä, ja joiden henkinen ja taloudellinen tuki on ollut kultaakin kalliimpaa kuluvina vuosina. Kiitän sisaruksiani ja ystäviäni kaikista menneistä ja tulevista hienoista hetkistä, jotka ovat tuoneet sopivaa vastapainoa arkiselle opiskelulle. Maikille erityiskiitos työni kielentarkastuksesta. Lopuksi rakas avovaimoni Noora ja poikani Nuutti, elämäni kirkkain valo, kiitän teitä loputtomasta rakkaudesta ja siitä onnesta, jonka päivittäinen elämä kanssanne minulle suo.

Lappeenrannassa 1.6.2010

Janne Heikkinen

1 JOHDANTO

Kokeellinen moodianalyysi on nimensä mukaisesti kokeellinen menetelmä rakenteen ominaisuuksien, kuten ominaistuuksien ja -muotojen sekä rakenteellisen vaimennuksen, tutkimiseksi. Siitä saatavien tulosten avulla voidaan tarkentaa epätäydellisiä matemaattisia malleja, sillä rakenteiden täydellinen matemaattinen mallinnus on mahdotonta rakenteiden epäjatkuvien ja hankalasti määritettävien ominaisuuksien vuoksi. Työ tehdään Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle osana ViDIMS-projektia, jossa tutkitaan suurten älykkäiden koneiden virtuaalista suunnittelua. Kuvassa 1.1 esitettävä LUT:n moodianalyysilaitteisto on hankittu 1990-luvun alkupuolella, eikä siihen ole tehty merkittäviä laitteistopäivityksiä. Samanaikaisesti ohjelmistopaketteja, joita käytetään koneensuunnittelussa, päivitetään jopa vuosittain. Kokeellisen moodianalyysin täydellinen hyödyntäminen on vaillinaista, sillä käytettävän laitteiston ja ohjelmistojen välillä on suuri kehitysporras, ja koneensuunnittelun opetuksessa kokeellinen moodianalyysi on sivuutettu varsin kevyesti ilman perehtymistä teoriaan kokeellisen moodianalyysin takana tai käytännön mittaustapahtumaan, sen järjestelyyn, suunnitteluun tai tulosten jälkikäsitteilyyn. Tämän työn tarkoituksena on antaa eväät kokeellisen moodianalyysin liittämiseen koneensuunnittelun opetukseen.



Kuva 1.1. Lappeenrannan teknillisen yliopiston moodianalyysilaitteisto.

1.1 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on yhdistää kokeellinen moodianalyysi osaksi dynaamista koneensuunnittelua, jossa yhdistyvät geometrian suunnittelu CAD-ohjelmilla, rakenteiden analysointi elementtimenetelmällä sekä kokeellinen moodianalyysi. Kokeellisella moodianalyysillä selvitettyt mittaustulokset tuodaan jälkikäsitteilyohjelmistoon, jossa ominaismuotoja voidaan tarkastella visuaalisesti. Kokeellisesti selvitetty rakenteiden ominaisuudet linkitetään takaisin elementtimenetelmään, jossa malleja voidaan tarkentaa mittauksista saatujen tulosten avulla. Ominaismuotojen visuaalinen tarkastelu tehdään sen vuoksi, että koneensuunnittelun opetuksessa kokeellisen moodianalyysin tuloksia voitaisiin tarkastella mahdollisimman havainnollisesti. Takaisinkytkentä elementtimenetelmään tehdään puolestaan sen vuoksi, että elementtimallia voitaisiin tarkentaa paremmin todellista vastaavaksi. Tällöin sitä voidaan käyttää muissa analyyseissä, joita rakenteelle halutaan tehdä. Tavallisesti CAD:n osuus koneensuunnittelussa on pelkkien geometrioiden luominen, ja heräviä ominaismuotoja tarkastellaan käytettävässä FEM-ohjelmassa. Kokeellisen moodianalyysin tuloksia tarkastellaan lähinnä vain kuvaajien avulla, joista selvitetään ominaistajuudet ja periaatteelliset hyvin yksinkertaisesti esitetyt ominaismuodot.

Työn päätavoite on kokeellisen moodianalyysin tulosten havainnollinen esittäminen. Perinteisesti kokeellinen moodianalyysi on insinööritiedettä teoriasta tulosten jälkikäsitteilyyn saakka. Asiaan perehtymätön henkilö pystyy lukemaan tuloksista kenties ominaistajuudet ja huomaa jonkinlaista säännönmukaisuutta eri käyrien välillä, mutta tutkittavan rakenteen käyttäytyminen jää auttamatta pimentoon. Työssä tehdään yksityiskohtainen kuvaus siitä, miten kokeellisesta moodianalyysistä saatavat tulokset voidaan esittää todellisen rakenteen käyttäytymisenä. Mittaus- ja jälkikäsitteilyproseduuri esitetään askel askeleelta siten, että tähän työhön tutustuttuaan tekniikkaan perehtynyt henkilö pystyy suorittamaan analyysin ja saa jälkikäsiteltyä tulokset niin, että rakenteen käyttäytymisen voi lukea eri ominaistajuuksilla tietokoneen näytöltä.

Työn toinen tavoite on selvittää tuennan vaikutusta rakenteiden ominaistajuuksiin ja muotoihin. Usein kokeellinen moodianalyysi tehdään kappaleelle, joka on täysin irrallaan sen käytönaikaisesta ympäristöstä ja joustavasti tuettu mittausten ajaksi. Näin mitattu rakenne värähtelee vapaasti, eikä sen käytönaikaista kytkentää ole huomioitu. Luonnollinen käytönaikainen tuenta vaikuttaa rakenteen värähtelyyn, sillä kytketyminen nivelin tai muilla tavoin ympäröiviin rakenteisiin rajoittaa rakenteen värähtelyä. Tuennan vaikutusta ominaismuotoihin ja erityisesti ominaistajuuksiin tutkitaan esimerkkimittauksen avulla.

Äärellisten elementtien menetelmä on numeerinen menetelmä, jolla voidaan tutkia rakenteiden eri ominaisuuksia. Elementtimenetelmässä, joksi äärellisten elementtien menetelmää teknisessä puhekielessä kutsutaan, on kuitenkin rakenteiden eri fyysisistä ominaisuuksista sekä yksinkertaistuksista johtuvia virheitä, jotka aiheuttavat edelleen virheitä elementtimenetelmästä saatuihin tuloksiin. Kokeellisesta moodianalyysistä saatavalla datalla voidaan tarkentaa elementtimenetelmän mallia, jotta se vastaisi mahdollisimman hyvin todellista rakennetta. Työn kolmantena tavoitteena onkin korjata elementtimallia kokeellisen moodianalyysin tulosten avulla. Optimaalisin tulos olisi, jos ohjelmaan olisi kehitetty kokeellisen moodianalyysin jälkikäsitteijästä saatavan datan ja elementtimenetelmän datan yhdistävä algoritmi, joka korjaisi elementtimallin ominaisuudet. Algoritmin kehittäminen vaatisi kuitenkin huomattavaa ajallista panostusta työn muiden tavoitteiden kustannuksella sekä keskittymistä tiettyyn ohjelmistokombinaatioon. Se ei vastaisi työn tarkoitusta, sillä työtä on tarkoitus käyttää osana koneensuunnittelun opetusta ja ohjelmistojen vaihtuessa tietyille ohjelmistokokonaisuudelle kehitetty algoritmi ei olisi enää pätevä. Sen sijaan elementtimenetelmästä pyritään selvittämään muutamia muuttujia, joiden säännönmukaista vaikutusta elementtimenetelmän tuloksiin pyritään selvittämään. Korjattua elementtimallia voidaan käyttää edelleen rakenteiden lujoustarkeiluissa ja muussa koneensuunnittelussa tarvittavassa laskennassa ilman pelkoa rakenteen väärästä tai puutteellisesta mallinnuksesta.

1.2 Työn rajaus

Työssä keskitytään LUT:n moodianalyysilaitteistoon ja sovelluksiin sekä näiden yhdistämiseen toisiinsa. Etenkin FE-menetelmän ja kokeellisen moodianalyysin yhdistämistä on tutkittu varsin paljon jo usean vuosikymmenen ajan ja julkaisuja aiheesta on tuhansia, joten teoria menetelmien yhdistämisen takana on laaja. Sovelluskohtainen menetelmien yhdistäminen on kuitenkin tehtävä jokaiselle laitteisto- ja ohjelmakokonaisuudelle erikseen, joten yleispätevää selvitystä suunnittelukonseptin luomiselle ei voida tehdä. Tässä työssä menetelmien yhdistäminen tehdään LUT:ssa käytössä olevilla ohjelmilla, jotka ovat CAD-suunnitteluun Dassault Systèmes SolidWorks Corp:n ohjelma SolidWorks 2009 SP4.1 ja FE-analyysiin Siemens PLM Software Inc:n ohjelma FEMAP versio 10.1.0, jossa käytetään ratkaisijana NX Nastran 6 -sovellusta. Kokeellisesta moodianalyysistä saatavia tuloksia jälkikäsitellään Vibrant Technology, Inc:n ME'scopeVES 5.0 -ohjelmalla.

Esimerkkirakenteena käytetään LUT:n älykkäiden koneiden laboratorion puominosturin puomia. Havainnollisesti askeleittain esitettävä kokeellisen moodianalyysin mittaus- ja jälkikäsitelyproseduuri esitetään puomille, joka on vapaasti tuettu. Puomi kiinnitetään takaisin sen luonnolliseen ympäristöön ja tehdään kokeellinen moodianalyysi uudestaan puomille, joka on kytkeytynyt kahdesta kohtaa ympäröiviin rakenteisiin. Puomin ominaisuudet selvitetään laskennallisesti elementtimenetelmällä, kun se on tuettu vapaasti.

2 KOKEELLISEN MOODIANALYYSIN PERUSTEET

Kaikille kappaleille on ominaista värähdellä tasapainoasemansa ympärillä. Suunniteltaessa koneita ja laitteita kappaleiden värähtelyt on otettava huomioon, jotta vältytään mahdollisilta kappaleiden värähtelyn aiheuttamilta epätoivotuilta tilanteilta. Monissa arkipäivän tilanteissa värähtelystä on hyötyä; esimerkiksi kitaran kieli tai kirkon kello värähtelee soidessaan. Epätoivottavaa värähtelyä voi puolestaan olla esimerkiksi maankuoren värähtely maanjäristyksen aiheuttamana. Koneensuunnittelulla värähtelyä ei ole mahdollista tai edes tarpeellista poistaa, kunhan tiedetään värähtelyn ominaisuudet ja otetaan ne huomioon suunnittelussa. Kun tunnetaan värähtelyn teoriaa, värähtelyjä voidaan analysoida, mitata ja hallita siten, etteivät ne vahingoita staattisia rakenteita tai mekaanisten koneiden osia käytön aikana. (Inman 2001, s. 1-2)

2.1 Värähtelymekaniikka

Värähtelyn perustana on kappale, jolla on massa. Kappaleeseen on varastoitunut energiaa, potentiaalienergiaa, sen ollessa paikallaan. Kun kappaleeseen aiheutetaan ulkoinen voima kuten isku, kappale alkaa liikkua ja kappaleen kiihdyttämiseen käytetty energia varastoituu kappaleen kineettiseksi energiaksi. Kappaleeseen on siten varastoitunut enemmän energiaa kuin sen ollessa paikoillaan, jolloin ylimääräinen energia aiheuttaa kappaleeseen värähtelyä kappaleen pyrkiessä kohti tasapainoasemaa. Värähtely voi olla suuntautunut yhtä aikaa useaan eri suuntaan. (Inman 2001, s. 2)

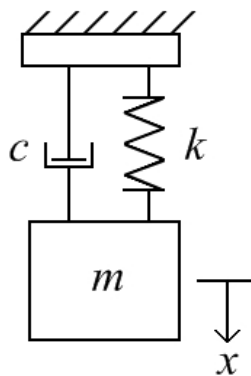
Kappaleiden vapausasteet ovat rajoittamattomia kappaleen liikesuuntia. Vapaasti avaruudessa leijuvalla kappaleella on kuusi vapausastetta: translaatio jokaisen koordinaattiakselin suhteen ja rotaatio jokaisen koordinaattiakselin ympäri. Vapausasteita rajoitetaan sen mukaan, miten kappaleet on tuettu, miten kappaleen eri tutkittavat pisteet asettuvat toistensa suhteen ja ennen kaikkea, mitä systeemin liikettä halutaan tutkia. Yleensä riittää, että translaatiota tutkitaan yhdessä tai kahdessa liikesuunnassa. Rotaatioiden selvittämiseksi kokeellisesti ei ole olemassa tarvittavaa laitteistoa, joskaan rotaatioiden selvittäminen ei ole kovin oleellista yleisessä värähtelyjen selvittämisessä. Yksinkertaisin värähtelevä systeemi on massa-jousi

-systeemi, joka on rajoitettu tasoon niin, että sillä on translaatiota vain yhden koordinaattiakselin suhteen. Muut liikesuunnat on estetty, jolloin systeemillä on yksi vapausaste ja sen asema pystytään määrittämään sen koordinaatin avulla, jossa liike on vapaa.

Harmonisen värähtelyn liikeyhtälö yhden vapausasteen vaimennetulle systeemille, johon ei vaikuta ulkoisia voimia, on muotoa

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0, \quad (2.1)$$

missä m on värähtelijän massa, c on vaimennuskerroin, k on värähtelijän jousivakio, x on asema ajan suhteen, \dot{x} on aseman ensimmäinen aikaderivaatta eli nopeus ja \ddot{x} on aseman toinen aikaderivaatta eli kiihtyvyys. Yhden vapausasteen vaimennettu systeemi on esitetty kuvassa 2.1. Jos vaimennusta ei huomioida, liikeyhtälön vaimennuskerroin c on nolla. (Inman 2001, s. 16)



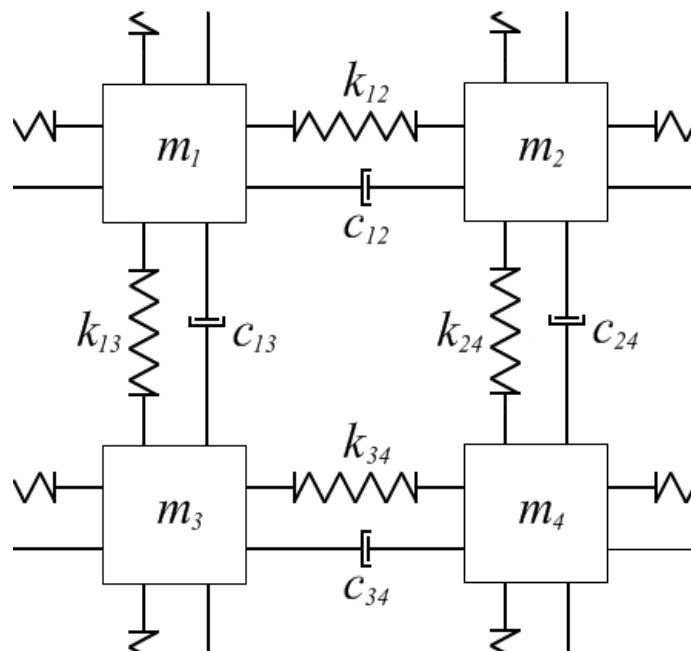
Kuva 2.1. Yhden vapausasteen vaimennettu systeemi.

Yhtälöstä 2.1 saadaan laajennettua liikeyhtälö n vapausasteen vaimennetulle värähtelijälle, johon vaikuttaa ulkoisia voimia yhtälö matriisimuodossa

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t), \quad (2.2)$$

missä \mathbf{M} on massamatriisi, \mathbf{C} on vaimennusmatriisi ja \mathbf{K} on jäykkyysmatriisi. Kaikki matriisit ovat dimensioiltaan $n \times n$ matriiseja. \mathbf{x} on paikkavektori ajan suhteen, josta derivoimalla kerran ajan suhteen saadaan nopeusvektori $\dot{\mathbf{x}}$, ja derivoimalla toisen kerran saadaan kiihtyvyyksvektori $\ddot{\mathbf{x}}$. Voimavektori $\mathbf{f}(t)$ on ulkoisten vaikuttavien voimien summavektori, joka on dimensioiltaan $n \times 1$ vektori. (Craig & Kurdila 2006, s. 211)

Todellisten rakenteiden voidaan kuvitella olevan systeemejä, joiden massa on jakautunut äärelliseksi määräksi pistemassoja pitkin rakennetta. Kahta vierekkäistä pistemassaa yhdistää jousi ja vaimennin. Massamatriisissa huomioidaan jokaisen massapisteen massa, ja vastaavasti vaimennus- ja jäykkyysmatriisissa huomioidaan jokaista pistemassoja yhdistävän jousen ja vaimennuksen suuruus. Kuvassa 2.2 on esitetty todellisen rakenteen idealisoitu jousi-massa -systeemi tasossa. Jousi-massa -systeemin kuvaus tasossa on puutteellinen, sillä todellisuudessa massapisteen ovat jakautuneet koko rakenteen alueelle ja niillä on vapaus liikkua jokaisen avaruudellisen koordinaattiakselin suhteen.



Kuva 2.2. Todellinen jatkuva rakenne idealisoituna jatkuvaksi jousi-massa -systeemiksi.

2.1.1 Ominaistaajuudet ja -muodot

Systemien ominaistaajuudet ovat sen ominaisuuksista riippuvia taajuuden arvoja, joilla systeemi resonoi herätteeseen. Jokaista ominaistaajuutta kohti on ominaismuoto eli moodi, joka on erimuotoinen jokaiselle ominaistaajuudelle. Toisin sanoen samaa ominaismuotoa ei voi esiintyä kahdella eri ominaistaajuudella. Yksinkertaisimmat muodot heräävät alimmilla ominaistaajuuksilla, ja mitä korkeampi on ominaistaajuuden järjestysnumero, sitä monimutkaisempi on heräävä ominaismuoto. Todellisuudessa kappaleilla on loputon määrä ominaistaajuuksia, eikä systemien vapausasteiden määrää voida määrittää, mutta laskennassa todellisia systeemejä yksinkertaistetaan määrämällä systeemeille tietty määrä vapausasteita, jolloin yhtä vapausastetta vastaa yksi ominaistaajuus. Yksinkertaistuksessa systeemille annetaan vapausasteita sen mukaan, miten monimutkainen systeemi on tai kuinka monta ominaistaajuutta halutaan selvittää. Mitä enemmän vapausasteita on, sitä paremmin malli kuvaa todellista rakennetta (Maia & Silva 1997, s. 49)

Ominaistaajuudet voidaan ratkaista liikeyhtälöstä (kaava 2.1). Vaimentamattoman yhden vapausasteen vapaasti värähtelevän systeemin ominaiskulmataajuus on

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2.3)$$

josta edelleen saadaan alikriittisesti vaimennetulle yhden vapausasteen vapaasti värähtelevälle systeemille ominaiskulmataajuus

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_k^2}, \quad (2.4)$$

missä ζ_k on vaimennuskerroin ($0 < \zeta_k < 1$). (McConnell 1995, s. 66-67)

Ominaiskulmataajuudella ja ominaistaajuudella on yhteys

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (2.5)$$

missä f on ominaistajuus (Inman 2001, s. 10). Usein puhutaan ominaistajuudesta, vaikka varsinkin laskennassa käytetään nimenomaan ominaiskulmataajuuksia ω .

Useamman vapausasteen vaimennetun värähtelyn ominaistajuuksien ja -muotojen laskemiseksi on olemassa kolme eri menetelmää. Ensimmäisessä menetelmässä ominaistajuudet ja -muodot saadaan laskettua superpositioperiaatteella vaimentamattoman systeemin reaaliomuotojen avulla. Toisessa menetelmässä taajuudet ja muodot saadaan käyttäen superpositioperiaatetta vaimennetun värähtelyn kompleksimuodoista. Kolmas vaihtoehto on käyttää suoraa integrointia toisiinsa kytkettyihin liikeyhtälöihin. (Craig & Kurdila 2006, s. 296)

Useamman vapausasteen vaimennetun värähtelyn ominaistajuudet ja -muodot esitetään ensimmäisellä menetelmällä, sillä monissa tilanteissa vaimennusta on hankala tai jopa mahdotonta selvittää ja vaimennuksen vaikutus on erittäin vähäinen vaimennuskertoimen ollessa normaalisti noin 0.01-0.1 (Craig & Kurdila 2006, s. 327). Esitetään useamman vapausasteen vaimentamattoman systeemin liikeyhtälö, johon ei vaikuta ulkoisia voimia, matriisimuodossa

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0, \quad (2.6)$$

jossa vektori \mathbf{x} korvataan

$$\mathbf{x} = \mathbf{M}^{-1/2}\mathbf{q}, \quad (2.7)$$

missä $\mathbf{M}^{-1/2}$ on massamatriisin käänteinen neliöjuuri, joka on massamatriisin tavoin diagonaalimatriisi ja \mathbf{q} on vakiovektori. Sijoittamalla edellinen yhtälö ja sen toinen aikaderivaatta $\ddot{\mathbf{q}}$ liikeyhtälöön sekä kertomalla yhtälö massamatriisin käänteisellä neliöjuurella $\mathbf{M}^{-1/2}$ saadaan

$$\mathbf{M}^{-1/2}\mathbf{M}\mathbf{M}^{-1/2}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{M}^{-1/2}\mathbf{K}\mathbf{M}^{-1/2}\mathbf{q}(t) = 0, \quad (2.8)$$

joka voidaan kirjoittaa edelleen muotoon

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{q}(t) = 0, \quad (2.9)$$

missä \mathbf{I} on yksikkömatriisi ja $\tilde{\mathbf{K}}$ on massanormeerattu jäykkyyismatriisi. Jos \mathbf{q} :lle annetaan ratkaisuyrite

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{v} e^{j\omega t}, \quad (2.10)$$

missä \mathbf{v} on vakiovektori ja j on imaginääriyksikkö, voidaan kirjoittaa

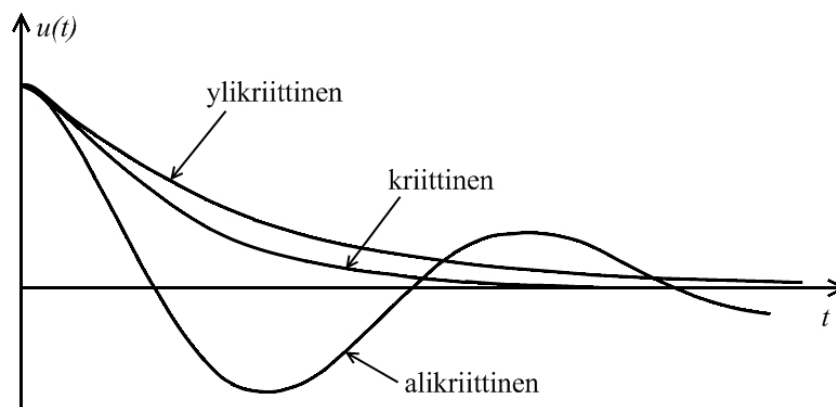
$$\tilde{\mathbf{K}}\mathbf{v} = \omega^2 \mathbf{v}, \quad (2.11)$$

josta voidaan ratkaista ominaiskulmataajuus ω , jolle saadaan ratkaisuja yhtä monta kuin systeemillä on vapausasteita. Kun ω :n arvot sijoitetaan takaisin yhtälöön, saadaan kutakin ominaiskulmataajuutta vastaavat ominaismuodot ratkaisemalla vektorit \mathbf{v} . On huomattava, että vektorit eivät osoita pisteiden absoluuttista siirtymää, vaan niiden avulla saadaan niiden suhteellinen siirtymä toistensa suhteen. Vektorit voidaan skaalata niin suuriksi kuin halutaan, jotta visuaalisesti tarkasteltuna erot vektoreiden pituuksissa ja suunnissa huomataan helposti. (Inman 2001, s. 256-257)

2.1.2 Vaimennus

Vaimennetun värähtelyn ominaisuuksiin kuuluu vaimentua nopeudella, joka riippuu värähtelyn vaimennuskertoimesta. Vaimennuksen kautta dissipoituu systeemistä energiaa, ja jos systeemiin ei tuoda lisäenergiaa, värähtelyt vaimenevat. Ilman vaimennusta systeemi värähtelisi loputtomasti tasapainoaseman ympärillä. Hyvin pienellä vaimennuskertoimella värähtely voi jatkua hyvinkin pitkään, ja kun lähestytään vaimennuskerrointa 1, värähtely vaimenee koko ajan nopeammin. Kertoimella 1 värähtelyä sanotaan kriittisesti vaimennetuksi värähtelyksi, jolloin vaimennus tappaa värähtelyn välittömästi. Se ei oskilloi tasapainoaseman ympärillä, mutta asettuu kuitenkin nopeasti tasapainoasemaansa. Ylikriittisesti vaimennettu värähtely tarkoittaa sitä, että värähtely on vaimennettu niin voimakkaasti, ettei se pääse lähestymään kovin nopeasti tasapainoasemaa. Käytännössä tämä merkitsee sitä, että kaikki tutkittavat

rakenteet ovat luonteeltaan alikriittisesti vaimennettuja systeimejä, sillä niille on ominaista värähdellä tasapainoasemansa ympärillä. Eri vaimennustapaukset on esitetty kuvassa 2.3. (Craig & Kurdila 2006, s. 63)



Kuva 2.3. Eri vaimennustapaukset. (Craig & Kurdila 2006, s. 62)

Vaimennus on rakenteen ominaisuus, jota on käytännössä mahdotonta määrittää tarkasti. Sen voidaan katsoa koostuvan materiaalivaimennuksesta, reunavaimennuksesta ja väliaineen vaimennuksesta. Materiaalivaimennus ja väliaineen vaimennus on koko materiaalin alueelle tasaisesti jakautunut, minkä vuoksi ne voidaan olettaa lineaarisiksi viskoosiksi vaimennuksiksi. Sen sijaan rakenteiden kontaktipintojen väliset reunavaimennukset ovat hyvin paikallisia ja tyypillisesti vaimennus on epäverrannollista. Jos laskennassa käytetään lineaarista vaimennusmallia, kuten Rayleigh'n vaimennusta tai vaimennus jätetään kokonaan huomioimatta, ominaisuudet saadaan helposti systeemin liikeyhtälöstä. Jos vaimennus on epäverrannollista, ominaisuudoista tulee kompleksisia ja laskennasta hyvin työlästä, sillä matriisien diagonaalisuus häviää. Kompleksiset ominaisuudet ovat muotoja, joissa muodoista ei voida erottaa kiinteitä solmupisteitä ja solmupisteiden lukumääräkin voi vaihdella. Kompleksimuotojen siirtymien huippuarvojen voidaan kuvitella etenevän aaltomaisesti pitkin rakennetta. Lineaarisesti vaimennetuissa systeimeissä on selvästi erotettavissa kiinteät solmupisteet ja muodot ovat tasan 180° vaihekulmassa eli muodot ovat seisovia aaltoja. (von Herten 2008, s. 1-2, s. 9) Todellisissa rakenteissa vaimennus on yleensä epälineaarista, mutta kun siirtymät ovat pieniä, on lineaarinen vaimennusmalli riittävä kuvaamaan vaimennusta (Pennala 1999, s. 18).

2.2 Taajuusvastefunktio

Taajuusvastefunktio (*FRF*) on systeemin liikeyhtälöstä johdettava kompleksimuotoinen funktio, josta saadaan luettua systeemin ominaistajuuudet, vaimennussuhde ja ominaismuodot. Systeemiin vaikuttava harmoninen värähtely voidaan lausua Eulerin kaavan avulla kompleksisessa eksponentiaalimuodossa

$$Ae^{j\omega t} = A\cos\omega t + (A\sin\omega t)j, \quad (2.12)$$

missä A on vakiotermi. Eksponentiaalimuodossa oleva systeemiin vaikuttava harmoninen värähtely voidaan kirjoittaa yleiseen yhden vapausasteen liikeyhtälöön ulkoiseksi vaikuttavaksi voimaksi

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = Ae^{j\omega t}. \quad (2.13)$$

Jos liikeyhtälölle annetaan eksponentiaalinen kompleksimuotoinen ratkaisuyrite ja muunnetaan liikeyhtälö Laplacen muunnoskaavojen avulla muotoon

$$(-\omega^2 m + cj\omega + k)Xe^{j\omega t} = Ae^{j\omega t}, \quad (2.14)$$

missä X on vakiotermi, saadaan kompleksimuotoinen taajuusvastefunktio

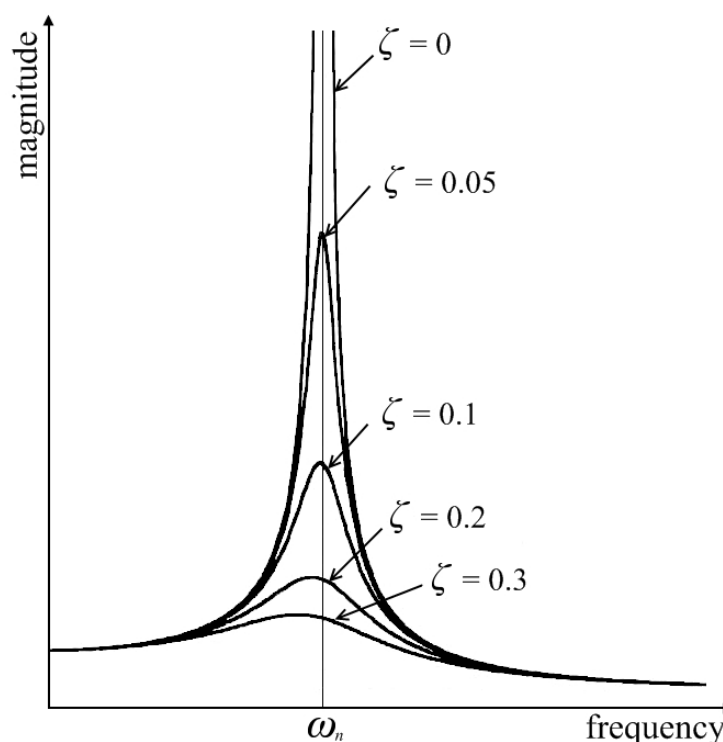
$$H(j\omega) = \frac{1}{k - m\omega^2 + c\omega j}. \quad (2.15)$$

(Inman 2001, s. 109-110)

Vaimennus vaikuttaa taajuusvastefunktioon siten, että sen huippukohtien arvot ovat sitä matalampia, mitä voimakkaammin systeemi on vaimennettu. Taajuusvastefunktion huippukohdista saadaan vaimennussuhde puolitehopisteiden avulla kaavalla

$$\zeta_s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\omega_n}, \quad (2.16)$$

missä ω_1 ja ω_2 ovat puolitehopisteitä ja ω_n on taajuuden arvo, jolla taajuusvastefunktiossa on huippukohta (Inman 2001, s. 511). Vaimennuksen vaikutus taajuusvastefunktioon voidaan nähdä kuvasta 2.4. Kuvasta huomataan, että vaimennuksen suuruus ei vaikuta taajuuden ominaistajuuden arvoon eikä muotoon, joka taajuudella herää, jos systeemi on lineaarisesti vaimennettu ja vaimennuskerroin ei ole suurempi kuin 0.3.



Kuva 2.4. Lineaarisen vaimennuksen vaikutus taajuusvastefunktioon. (Maia & Silva 1997, s. 11)

Jos vaimennuskerroin on pieni, useamman vapausasteen tapauksessa ominaismuodot ovat hyvin löyhästi kytkeytyneitä. Löyhästi kytkeytyneet muodot eivät vaikuta toisiinsa, jos ominaistajuudet eivät ole hyvin lähellä toisiaan. Kun vaimennuskertoimen arvo on yli 0.3, rakenteen resonointi on vähäistä, eikä ominaisvärähtelyjä voida selvittää kovin luotettavasti. Useamman vapausasteen tapauksessa muotojen kytkeytyminen toisiinsa on voimakasta, ja jokainen ominaismuoto on useamman ominaismuodon summa, vaikka ominaistajuudet eivät ole kovin lähellä toisiaan. (Dossing 1988, s. 15)

Taajuusvastefunktio ilmoittaa vasteen suhteen herätteeseen. Heräte on aina voima N . Vaste voi olla kiihtyvyys, nopeus tai asema, ja vasteen yksiköstä riippuu, millä nimellä taajuusvastefunktiota kutsutaan. Jos vasteena on siirtymä, yhtälöä voidaan kutsua nimellä *receptance* (jousto). Nopeuden ollessa vasteena yhtälöä kutsutaan nimellä *mobility* (liikkuvuus). Kiihtyvyyttä mitattaessa funktiota voidaan kutsua nimellä *accelerance* tai *inertance* (hitaus). Kansainvälinen standardointi suosittelee käyttämään ensimmäistä, sillä jälkimmäistä käytetään yleisesti akustiikassa. Edellä esitetyt nimet funktiolle on englanninkielellä, sillä yleisesti myös suomenkielisessä kirjallisuudessa nimet esitetään englanniksi. Yksiselitteisiä suomenkielisiä vastineita näille ei ole, mutta suluissa on esitetty vapaat suomennokset termeille. Edellisten käänteisfunktioina saadaan dynaaminen jäykkyys, joka on vaste jaettuna joustolla, mekaaninen impedanssi, joka on vaste jaettuna liikkuvuudella ja näennäinen massa, joka on vaste jaettuna hitaudella. Kaikki edellä esitetyt yhtälöt ovat toisistaan riippuvia ja määrittämällä yksi yhtälö voidaan loput yhtälöt ratkaista laskennallisesti. (Maia & Silva 1997, s. 38-39)

Mitattava vaste valitaan sen perusteella, mitä systeemistä halutaan selvittää ja millaisia ominaisuuksia systeemillä on. Siirtymää mitataan, jos mitattavat taajuudet ovat matalia ja halutaan mahdollisimman havainnollista esitystapaa. Nopeutta mitattaessa saadaan selville suoraan värähtelyn sisältämä energia, ja usein koneille annetut tärinäkriteerit on annettu nopeuksina. Kiihtyvyyden mittaukset korostavat korkeampia taajuuksia. Korkeampia taajuuksia halutaan selvittää esimerkiksi laakerivikoja, hammaspyörien ryntövikoja ja melua aiheuttavia värähtelyjä selvitetäessä. Kiihtyvyyden mittauksen hyvä puoli on se, että sen arvo saadaan mitattua suoraan anturilta, jolloin virhemahdollisuudet vähenevät. Nopeutta ja siirtymää mitattaessa kiihtyvyyden arvo on derivoitava ajan suhteen taajuusvastefunktion selville saamiseksi (Kainulainen 1987, s. 10)

2.3 Kokeellinen moodianalyysi

Kokeellisella moodianalyysillä (*EMA*) selvitetään rakenteiden ominaistaajuuDET mittaamalla todellista rakennetta, jotta ne voidaan ottaa huomioon suunnitellessa

koneita. Lähellä rakenteen ominaistajuuksia olevia taajuuksia on vältettävä, jottei rakenne ala resonoida käytön aikana. Kokeellisessa moodianalyysimittauksessa annetaan rakenteelle herätetaajuuksia taajuusalueelta, joita koneen käytön aikana voi esiintyä. Tavallisesti tämä taajuus on muutamasta hertsistä satoihin hertseihin. Rakenne resonoi, kun herätetaajuus on lähellä sen ominaistajuutta. Resonointi havaitaan antureilla, jotka on kiinnitetty rakenteeseen. On huomattava, että vastetta on mitattava kaikissa niissä suunnissa, joissa ominaisuudet voivat herätä tai joissa niistä ollaan kiinnostuneita, sillä käytettävät anturit pystyvät yleensä mittaamaan vastetta vain yhdessä suunnassa kerrallaan. Yleensä vastetta mitataan joka puolelta rakennetta, jolloin mittaukset kattavat mahdollisimman laajasti kaikki heräävät ominaistajuudet. Sen jälkeen on suunnittelijan vastuulla, mitkä ominaisuudet ovat kriittisiä rakenteen keston kannalta.

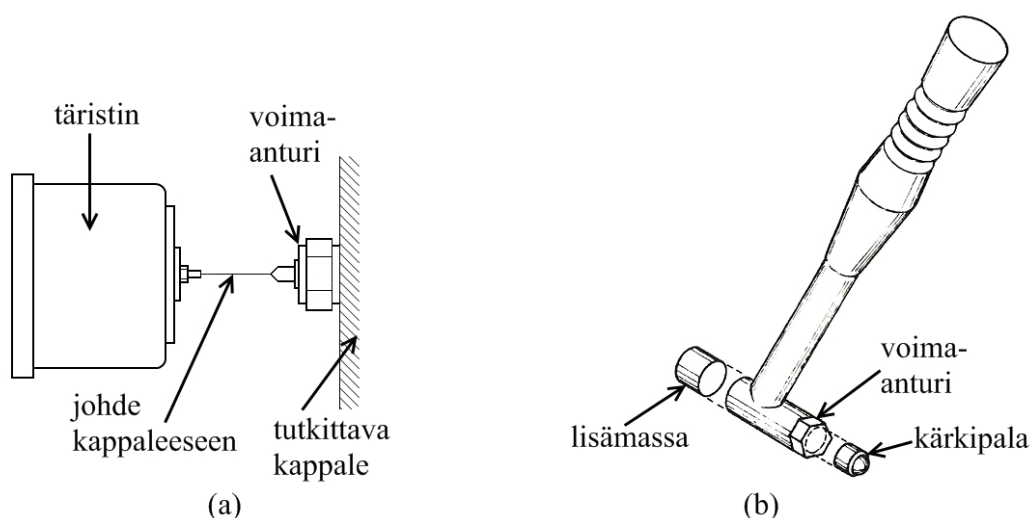
Kokeellisen moodianalyysin perusoletuksena on rakenteen lineaarisuus. Tämä poistaa mahdollisuuden tutkia epälineaarisesti vaimennettua rakennetta luotettavasti ja vaimennus oletetaan siten aina ekvivalentiksi viskoosiksi vaimennukseksi. Lineaarisuuden vuoksi kokeellisessa moodianalyysissä on muutamia ominaisuuksia, jotka osaltaan helpottavat mittausten suorittamista. Tärkein ominaisuus on mittausten toistettavuus. Jos mikään ominaisuus rakenteessa ei muutu ja rakenne on tuettu samalla tavalla edellisissä mittauksissa, on sama, millä kokeellisen moodianalyysin menetelmillä rakenteita tutkitaan. Heräte voi olla impulssi tai sinimuotoinen jatkuva heräte, ja vastetta voidaan mitata yhdestä pisteestä kerrallaan, toistaa mittaus useassa pisteessä tai mitata kerralla vaste kaikissa halutuissa pisteissä. Lopputulos on sama, sillä superpositioperiaatteella saadaan yhdistettyä taajuudet ja muodot yhteen kuvaajaan. Mittauksiin ei myöskään vaikuta herätevoiman suuruus, kunhan tutkittava taajuusalue on sama, eikä herätteen antajasta aiheudu lisämassaa tutkittavalle rakenteelle. Lineaarisuudesta seuraa myös rakenteen symmetrisyys, joten herätteen ja vasteen paikkaa voidaan vaihtaa keskenään, eikä se vaikuta kokeellisen moodianalyysin tuloksiin. (Dossing 1988, s. 16)

2.3.1 Moodianalyysilaitteisto

Moodianalyysilaitteisto koostuu aina samoista peruskomponenteista. Perustana on analysaattori, joka pystyy käsittelemään mittauksista saatavaa dataa. Data analysaattoriin on syötettävä A/D-muuntimien läpi, jotta mittauksista saatavat analogiset signaalit saadaan digitaaliseksi. Signaalit A/D-muuntimille tulee vahvistimilta, jotka vahvistavat sekä sisäänmenon että ulostulon. Sisäänmenona on yksi tai useampia värinäherätteen aiheuttajia ja ulostulona yksi tai useampia antureita tai vastaavia tunnistimia. Molempia on kuitenkin oltava vähintään yhdet, jotta mittaukset voidaan suorittaa. Eri tapauksista voidaan käyttää lyhenteitä SISO, SIMO, MISO tai MIMO sen mukaan, kuinka monta sisäänmenoa ja ulostuloa mittauksessa on (Maia & Silva 1997, s. 452-453). Jos käytettävissä on useampia antureita tai herätteen antajia, antureiden ja herätteiden paikkoja ei tarvitse muuttaa kesken mittauksen. Jos käytettävissä on ainoastaan yksi heräte ja yksi anturi, on anturin tai herätteen paikkaa muutettava mittauksen aikana, jotta mittauksesta saatavasta taajuusvastefunktion kuvaajasta voidaan selvittää myös systeemin ominaismuodot. Ominaisaajuudet saadaan selvitettyä, vaikka käytettäisiin vain yhtä anturia ja yhtä herätettä, ja mittaukset suoritettaisiin vain yhdessä pisteessä. Silloin on kuitenkin oltava varmoja siitä, että herätteenanto- tai vasteenmittauspiste ei ole minkään ominaismuodon solmukohdassa. (Maia & Silva 1997, s. 125-127)

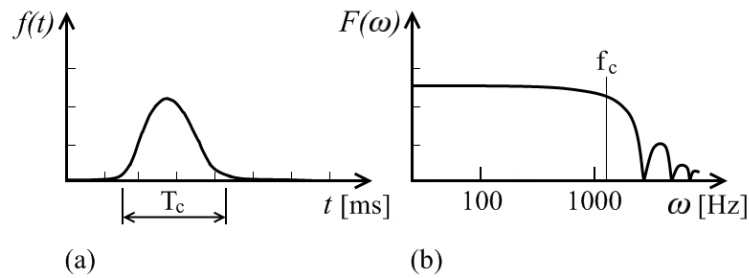
Heräte systeemille annetaan käyttäen joko kuvassa 2.5 (a) esitettyä tärhistintä, joka aiheuttaa systeemille määrätyn herätteen, tai kuvassa 2.5 (b) esitettyä impulssivasaraa, joka laitteen yksityiskohdista riippuen antaa jatkuvan spektrin eritaajuuksisia herätteitä systeemille. Sähkömagneettisella tai -hydraulisella tärhistimellä saadaan helposti annettua siniaaltoisia tai vastaavia herätteitä koko tutkittavalta taajuusalueelta. Hyvin tunnetusta sisäänmenosignaalista saadaan helposti mitattua vastaavat ulostulosuureet ja prosessi on helposti hallittavissa. Tärhistintä voidaan käyttää myös rakenteiden väsymisanalyysissä, sillä rakenteeseen voidaan johtaa herätettä samalla taajuudella tuntikausia. Väsytyksestä rakenteesta mitataan ulostulosuureita aika-ajoin, jolloin huomataan, jos rakenne alkaa väsyä värähtelyn vuoksi. Tärhistinten haittapuolena on niiden koko, jota on kasvatettava sitä mukaa kun mitattava systeemi kasvaa.

Luonnollisesti tärstimellä on massaa, joka voi aiheuttaa vääristymää tuloksiin, jos tärstin on sijoitettu siten, että se aiheuttaa lisämassaa suoraan tutkittavaan rakenteeseen. Ongelma voidaan poistaa siten, että heräte annetaan sellaisesta suunnasta, ettei tärstin lepää tutkittavan rakenteen päällä. Toinen vaihtoehto on johtaa tärstimen heräte rakenteeseen akselia, jännitettyä kaapelia tai vastaavaa kappaletta pitkin. (Inman 2001, s. 497-498)



Kuva 2.5. (a) Tärstin (Maia & Silva 1997, s. 133) ja (b) impulssivasara (Ewins 1984, s. 103)

Impulssivasara on tavallisen vasaran näköinen, ja sen lyöntipäässä on kärkipala ja voima-anturi, jolla voidaan mitata vasaran antama heräte. Impulssivasara ei aiheuta tärstimen tavoin massaa rakenteelle. Sitä on myös huomattavasti nopeampi käyttää kuin tärstimä, jonka asennus on jokaisessa mittauksessa suoritettava erikseen. Impulssivasaran isku tuottaa rakenteeseen herätespektrin, jota on havainnollistettu kuvassa 2.6. Vaikka isku on kestoltaan vain millisekuntien pituinen, se antaa tarpeeksi laajan taajuusalueen, kun valitaan sopivan kokoinen impulssivasara ja sopivan kova kärki vasaraan. Kärkipalana voidaan käyttää esimerkiksi terästä, muovia tai kumia, joista jokainen antaa herätteen eri taajuusalueella. Käytännössä taajuuskaista ylittää sitä korkeammalle taajuudelle, mitä kovempi on kärki. Rajataajuuden f_c jälkeen iskun voima vähenee, eivätkä sitä suuremmat taajuudet rakenteessa enää resonoi. (Inman 2001, s. 499)



Kuva 2.6. Impulssivasaran iskun voimakkuuden kuvaaja (a) ajan funktiona ja (b) taajuuden funktiona (Ewins 1984, s. 103)

Yleisesti ulostulona käytetään liikkeitä mittaavia antureita. Anturit voivat mitata siirtymää, nopeutta tai kiihtyvyyttä. Joissain tapauksissa voidaan käyttää myös paineantureita, voima-antureita, venymäliuskoja, mikrofoneja tai pulssiantureita. On huomattava, että ne anturit, jotka ovat kosketuksissa mitattavaan systeemiin, on kiinnitettävä systeemiin siten, etteivät ne pääse liikkumaan mittauksen aikana. Tämä voi aiheuttaa virhettä mittauksiin, sillä kiinnitys voi vaimentaa anturin saamaa herätettä. Seuraavaksi esitetään muutamia liikettä mittaavia antureita sekä niiden ominaisuuksia (Kainulainen 1987, s. 17-18):

- Piezosähköinen kiihtyvyyssanturi on nykyään yleisimmin käytetty anturi. Se on pienikokoinen, kevyt ja kulumaton, eikä se ole herkkä ympäristön häiriöille. Amplitudin ja taajuuden mittausalue on laaja, alin mitattavissa oleva taajuus on noin 0.2 Hz
- Potentiometriin perustuva kiihtyvyyssanturi on halpa mutta tarkkuudeltaan huono, sillä ei voida mitata suuria kiihtyvyyksiä eikä taajuuksia ja se kuluu käytössä.
- Kapasitanssiin perustuva siirtymäanturi on kosketukseton systeemiin, herkkä ja pienikokoinen, ja sillä voidaan mitata laajalta taajuusalueelta. Mitattavan pinnan on kuitenkin oltava sähköä johtava, anturi on vaikea kalibroida ja se mittaa vain pieniä siirtymiä.
- Reluktanssiin perustuva siirtymäanturi on tarkka ja matalille taajuuksille sopiva. Se mittaa suhteellista siirtymää, mikä on otettava huomioon tuloksissa. Se on sähköisesti monimutkainen, sillä se tarvitsee erillisen teholähteen, eikä sillä pystytä mittaamaan korkeita taajuuksia.

- Magneettinen nopeusanturi on suurikokoinen ja kuluva sekä häiriöherkkä. Mitattava taajuusalue on kapea.
- Muuntajaan perustuva siirtymäanturi on kosketukseton systeemiin, kulumaton ja matalille taajuuksille sopiva. Se on herkkä mitattavan akselin virheille ja kalibrointi täytyy suorittaa laitteelle sen ollessa asennettuna.
- Venymäliuskoihin perustuva kiihtyvyyssanturi sopii matalille taajuuksille. Se vaatii tarkan tehollähteen ja sen amplitudin ja ylimmän taajuuden mitta-alue on rajoitettu.

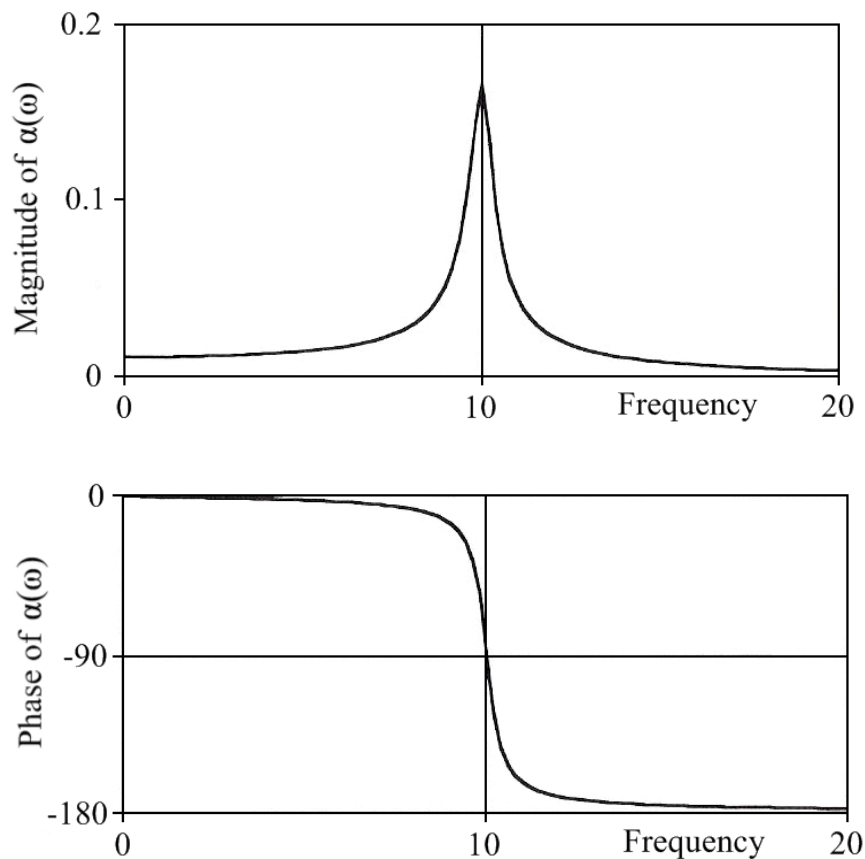
On myös olemassa suhteellisen uusi menetelmä värähtelyn taajuuden ja amplitudin havaitsemiseksi. Siinä käytetään laseria, joka heijastetaan mitattavasta pinnasta takaisin mittalaitteeseen. Laite on kosketukseton mitattavaan systeemiin ja se on erittäin tarkka: taajuuden yläraja on 250 KHz luokkaa ja siirtymä vain nanometrejä. Mittauksesta saadaan tuloksena värähtelylle taajuusvastefunktion lisäksi useita muita esitysmuotoja, kuten värähtely ajan funktiona, Fourierin transformaatio ja koherenssifunktio. (Inman 2001, s. 501)

Menetelmässä voidaan ensin tutkia ominaistajuudet, jotka heräävät tutkittavalla taajuusalueella tutkimalla rakennetta yhdessä pisteessä. Kun ominaistajuudet on selvitetty, voidaan tutkittavaan pintaan johtaa kullakin ominaistajuudella herätettä, joka on yleensä tärähtimellä aiheutettu sinimuotoinen heräte. Herätteen vaikuttaessa pintaa skannataan ennalta määrättyä reittiä pitkin. Tuloksena skannauksesta saadaan ominaismuodot esiin. On huomattava, että skannaus pystytään suorittamaan yhdessä suunnassa kerrallaan, joten jos tutkittava kappaleen ominaismuoto herää useampaan suuntaan, on skannaus suoritettava samalla herätetaajuudella useammalta suunnalta. (Stanbridge & Ewins 1999, s. 1-2)

2.3.2 Kokeellisesta moodianalyysistä saatava data

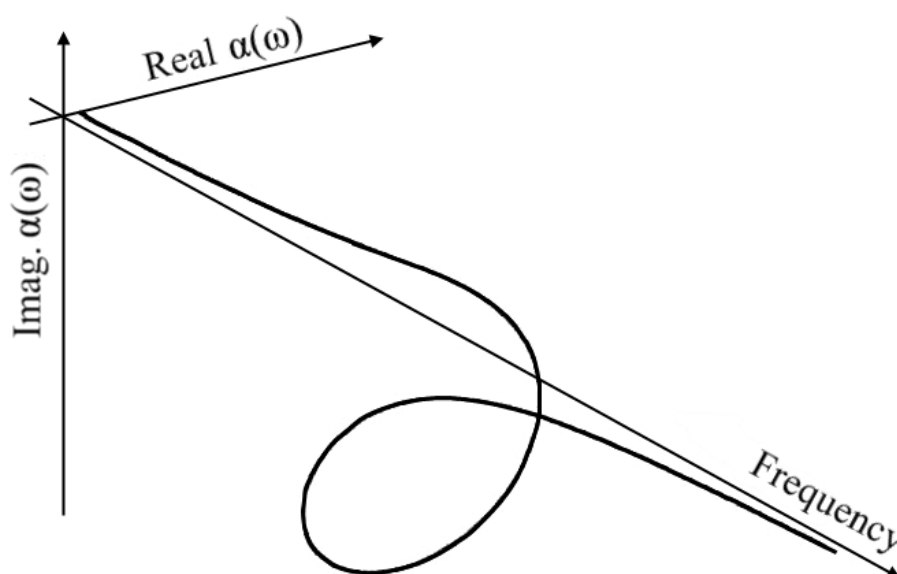
Taajuusvastefunktiosta voidaan piirtää Boden diagrammi, joka on esitetty kuvassa 2.7. Se koostuu kahdesta kuvaajasta, joissa molemmissa on yleensä logaritmisella x-akselilla taajuus ja ensimmäisessä kuvaajassa y-akselilla taajuusvastefunktion suuruus, joka

ilmoitetaan yleensä desibeleinä dB ja toisessa y-akselina taajuusvastefunktion vaihe-ero, joka ilmoitetaan asteina. Useamman vapausasteen systeemin kuvauksessa käytetään useimmiten x-akselilla logaritmista asteikkoa sen vuoksi, että tarkasteltava taajuusalue on varsin laaja ja mielenkiintoisimmat taajuudet ovat asteikon alkupäässä, mutta korkeammatkin taajuudet on otettava huomioon. Yhden vapausasteen tapauksessa, kuten kuvassa 2.7 on esitetty, logaritmista asteikkoa ei tarvitse käyttää x- eikä y-akselilla, sillä kuvaajassa on vain yksi huippukohta, joka saadaan kuvaajaan lineaarisillakin asteikoilla. Jos vapausasteita on useampia ja yksikkönä käytetään desibelejä, taajuusvastefunktion suuruus on jo itsessään logaritminen, sillä desibeli on logaritminen suuruuden yksikkö. Ne taajuudet, joissa taajuusvastefunktiossa on huippukohtia, ovat systeemin ominaiskulmataajuuksia. (Maia & Silva 1997, s. 32-35)

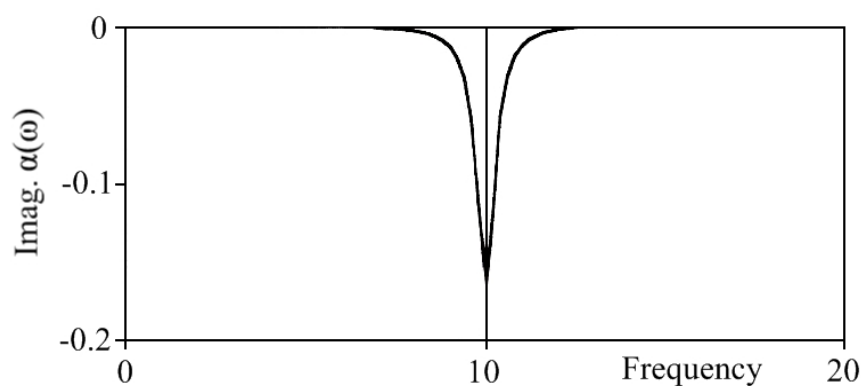


Kuva 2.7. Bode diagrammi yhden vapausasteen systeemille. (Maia & Silva 1997, s. 34-35)

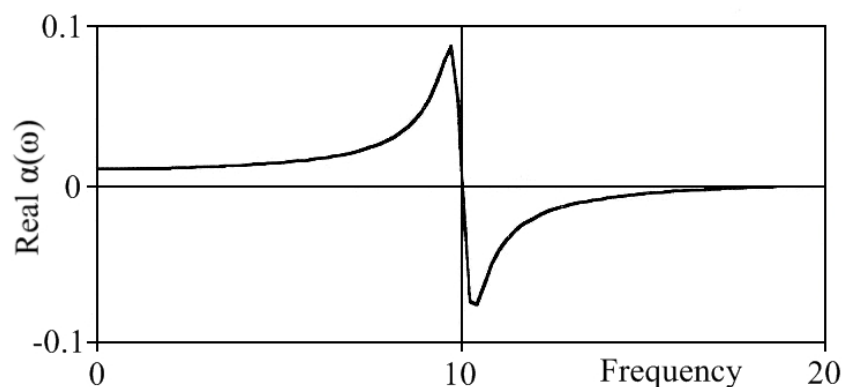
Kompleksimuotoisesta taajuusvastefunktiosta voidaan piirtää kuvassa 2.8 esitetyn kaltainen kolmiulotteinen kuvaaja, jossa taajuus on kuvattu sekä reaaliakselin että imaginääriakselin suhteen. Jos kuvaajaa tarkastellaan kaksiulotteisena, voidaan tarkastella taajuusvastefunktion imaginääriosaa taajuuden suhteen, reaaliosaa taajuuden suhteen tai imaginääriosaa reaaliosan suhteen. Eri tapaukset on esitetty kuvissa 2.9, 2.10 ja 2.11. Systeemin ominaisuudet voidaan selvittää kuvaajasta, jossa imaginääriosaa on kuvattu taajuuden funktiona. (Maia & Silva 1997, s. 32-35).



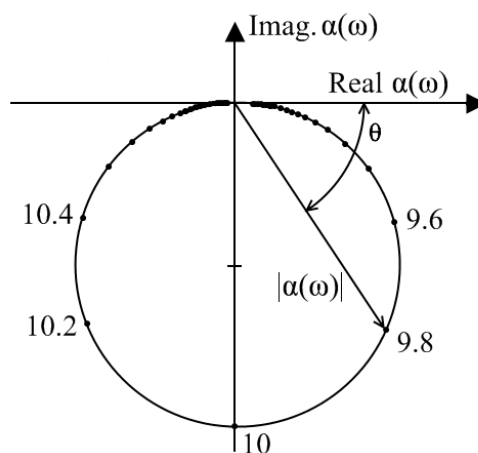
Kuva 2.8. Yhden vapausasteen systeemin taajuusvastefunktion 3-ulotteinen kuvaaja. (Maia & Silva 1997, s. 32)



Kuva 2.9. Yhden vapausasteen systeemin taajuusvastefunktion kuvaaja, jossa on imaginääriosaa taajuuden funktiona. (Maia & Silva 1997, s. 33)

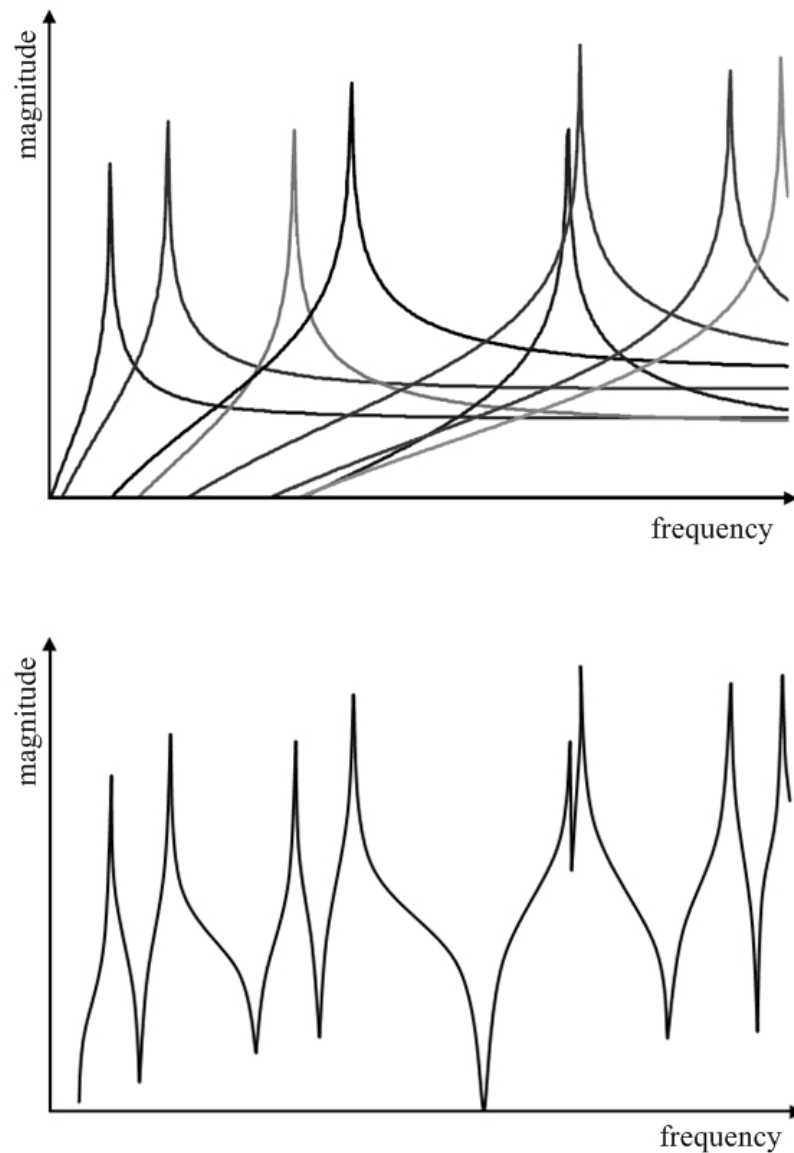


Kuva 2.10. Yhden vapausasteen systeemin taajuusvastefunktion kuvaaja, jossa on reaaliosa taajuuden funktiona. (Maia & Silva 1997, s. 33)



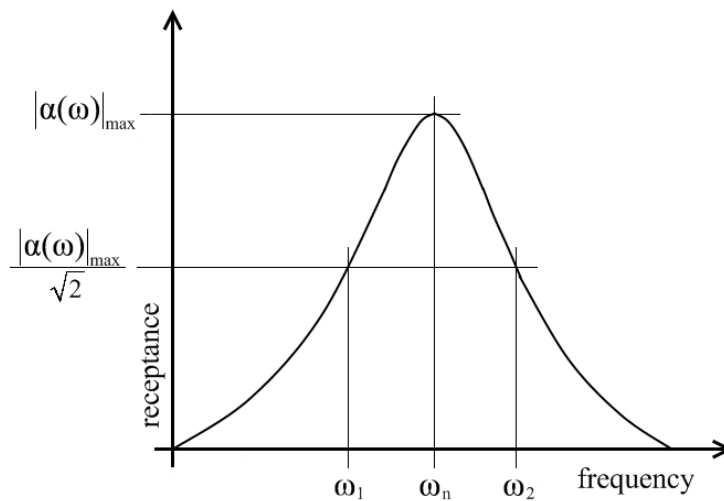
Kuva 2.11. Nyquistin diagrammi. (Maia & Silva 1997, s. 34)

Riittää, että taajuusvastefunktio esitetään yhden vapausasteen systeemille, sillä useamman vapausasteen systeemin ominaiskulmataajuudet voidaan selvittää siten, että oletetaan systeemi yhden vapausasteen systeemiksi. Tällöin saadaan yksi ominaiskulmataajuus eli ensimmäinen ominaiskulmataajuus. Seuraava ominaiskulmataajuus saadaan, kun tarkastellaan samaa yhtälöä edelleen yhden vapausasteen yhtälönä, mutta ensimmäistä ominaiskulmataajuutta korkeammalla taajuuskaistalla, jolloin saadaan toiseksi ylin ominaiskulmataajuus ja niin edelleen. Yhden vapausasteen taajuusvastefunktioista saadut kuvaajat voidaan yhdistää samaan kuvaajaan, kuten kuvassa 2.12 on esitetty, jolloin kuvaajasta voidaan lukea systeemin kaikki tutkittavalla taajuuskaistalla olevat ominaiskulmataajuudet. (Inman 2001, s. 509-511)



Kuva 2.12. Taajuusvastefunktion kuvaaja. Ylempänä eri taajuuskaistoilla tutkitut yhden vapausasteen taajuusvastefunktion kuvaajat, alempana yhden vapausasteen taajuusvastefunktiot summattuna yhteen. (Avitabile 2007, s. 10)

Taajuusvastefunktion huippukohdista saadaan vaimennussuhde puolitehopisteiden avulla kaavalla 2.16, mitä on havainnollistettu kuvassa 2.13. (Maia & Silva 1997, s. 45)



Kuva 2.13. Puolitehopisteet taajuusvastefunktion huippukohdasta. (Maia & Silva 1997, s. 45)

Kokeellisesta moodianalyysistä saatava data voidaan tulostaa siinä koordinaatistossa, josta saadaan luettua halutut tulokset. Mikäli halutaan tutkia ainoastaan ominaiskulmataajuuksia, voidaan datasta tulostaa Boden diagrammi. Ominaiskulmataajuudet eivät kuitenkaan usein riitä, ja ominaiskulmataajuuksien lisäksi halutaan selvittää systeemin ominaismuodot. Ominaismuodot voidaan selvittää kuvaajasta, jossa taajuus on kuvattu imaginääriasteikolla.

2.4 Kokeellisen moodianalyysin tulosten havainnollinen esittäminen

Kokeellisen moodianalyysin tuloksia voidaan tarkastella eri tavoin. Perinteisesti tuloksia tarkastellaan kuvaajien avulla. Kuvaajista on helppo lukea systeemin ominaistajuudet, mutta muotojen lukeminen on huomattavan haastavaa. Perusajatuksena kokeellisesta moodianalyysistä saatavien tulosten visuaalisessa tarkastelussa on mittauspisteiden käyttäytyminen toistensa suhteen eri ominaistajuuksilla. Yksinkertaisimmillaan muodot voidaan tulostaa periaatteellisina kuvaajina, joissa jokaista ominaistajuutta vastaavat ominaismuodot tulostetaan taajuusvastefunktion huippukohtien avulla. Havainnollisuuden parantamiseksi tutkittavasta rakenteesta on piirrettävä rakennekuva, jota voidaan taivutella ominaismuotojen mukaisesti. Perinteisillä CAD-ohjelmilla muotojen esitystä ei voida

tehdä, sillä CAD-piirustus sisältää vain geometrisiä muotoja. Uusimmissa CAD-sovelluksissa on saatavana lisäosia, joissa rakenteiden simulointi ja esimerkiksi ominaisuusmuotoanalyysin tekeminen on mahdollista. Huolimatta erilaisista lisäosista ohjelmissa ei ole kuitenkaan mahdollista simuloida geometrian käyttäytymistä ohjelman ulkopuolelta tuodun datan avulla yksinkertaisesti.

Muotojen tarkastelussa optimaalisin tilanne on, että käytettävässä ohjelmassa rakenteen geometriasta määritetään ne pisteet, joissa mittaus on suoritettu. Pisteiden käyttäytyminen jokaisella ominaisuusmuodoilla saadaan automaattisesti kokeellisesta moodianalyysistä saatavasta datasta ja rakenteen ominaisuusmuotoja voidaan tarkastella jokaisella ominaistajuudella visuaalisesti tietokoneen näytöltä. Geometriaan määritetyt mittauspisteet käyttäytyvät kokeellisesti mitatun taajuusvastefunktion mukaisesti, jolloin koko geometria taipuu ominaisuusmuotojen mukaisesti. Luotaessa mittauspisteitä geometriaan määritetään, mihin suuntaan vastetta on mitattu. Vastetta voidaan mitata samassa pisteessä useampaan suuntaan, jolloin pisteelle annetaan vapaita liikesuuntia mittausten mukaisesti. Kun kokeellinen mittaustulos jokaisessa tutkittavassa pisteessä yhdistetään piirrettyyn geometriaan, voidaan ominaisuusmuotoja tarkastella eri taajuuksilla.

Mitataan esimerkiksi palkkia sen sivulta ja yläpinnalta. Heräte annetaan siinä liikesuunnassa, jossa halutaan vastetta tutkia, jolloin toista liikesuuntaa rekisteröivät anturit eivät havaitse vasteessa merkittävää muutosta. Siten palkin eri liikesuuntien vasteiden mittaus voidaan irrottaa toisistaan täysin eri tapauksiksi. Mittauksista saadaan jokaiselle mittauspisteelle taajuusvastefunktio, josta havaitaan kummankin liikesuunnan ominaistajuudet ja -muodot tutkittavalla taajuuskaistalla. Jos tutkitaan palkin ominaisuusmuotoja esimerkiksi kolmella vastetta mittaavalla anturilla kummallakin liikesuunnalla, muistetaan värähtelyn ja kokeellisen moodianalyysin teoriasta, että systeemille saadaan yhtä monta alinta ominaisuusmuotoa kuin systeemillä on vapausasteita ja mittauksessa jokainen mittauspiste vastaa yhtä vapausastetta. On huomattava, että vaikka systeemissä on kuusi mittauspistettä ja siten kuusi vapausastetta, ei mittauksista välttämättä saada kuutta alimmalla ominaistajuudella heräävä ominaisuusmuotoa mittauspisteiden sijainnista ja mitattavista liikesuunnista johtuen. Mittauksista sen sijaan saadaan kolme alinta ominaisuusmuotoa kummassakin liikesuunnassa, vaikka

jommassakummassa liikesuunnassa heräisi neljänneksi alin ominaisuus toisen liikesuunnan kolmea alinta ominaistaajuutta matalammalla taajuudella.

2.5 Elementtimenetelmän ja kokeellisen moodianalyysin yhdistäminen

Teoreettisen elementtimenetelmän ja käytännöllisen kokeellisen moodianalyysin yhdistäminen on haastava, mutta oleellinen osa ominaisvärähtelyjen selvittämistä ja niiden hyväksikäyttämistä koneensuunnittelussa. Kokeellisella moodianalyysillä saadaan selville todellisten rakenteiden todellinen käyttäytyminen. Todellisissa rakenteissa on aina epäjatkuvuuksia ja epätarkkuuksia, joita ei elementtimenetelmässä pystytä luotettavasti huomioimaan. Nämä ominaisuudet voivat kuitenkin oleellisesti muuttaa rakenteiden käyttäytymistä, ja jos rakenteiden ominaisvärähtelyä tutkitaan vain elementtimenetelmällä, voidaan rakenneanalyysin perusteella tehdä virheellisiä johtopäätöksiä esimerkiksi koneen käytönaikaisten vältettävien värähtelytaajuuksien osalta. On sanomattakin selvää, ettei kokeellista moodianalyysia voida tehdä jokaiselle suunniteltavalle kappaleelle, eikä näin ole tarkoituskaan. Moodianalyysilaitteisto on kallis, ja mittausten suorittaminen vaatii jonkin verran järjestelyjä, joten kustannukset jokaiselle mittaustapahtumalle ovat merkittävät. Suunnittelussa tehtyjen virheiden kustannukset kuitenkin kallistuvat sitä mukaa, mitä kauemmas tuotteen elinkaarella mennään, ja siksi onkin arvioitava myös kokeellisen moodianalyysin suorittamisen tärkeys erityisesti kriittisille rakenneosille.

2.5.1 Äärellisten elementtien menetelmä

Äärellisten elementtien menetelmällä (*FEM*) tarkoitetaan menetelmää, jossa tutkittavan rakenteen geometria mallinnetaan, valitaan käytettävä elementtityyppi, annetaan mallille rakenteessa käytettävän materiaalin materiaaliominaisuudet ja ulkoiset vaikuttavat voimat sekä reunaehdot, jolloin matemaattisesti voidaan ratkaista mallin eri ominaisuuksia. Elementtimenetelmällä saadaan laskettua mallin numeeriset ominaisuudet. Analyyttistä ratkaisua sillä ei voida selvittää ja esimerkiksi rakenteen

dimensioiden tai materiaaliominaisuuksien muuttuessa malli on analysoitava uudestaan. (Cook 1981, s. 1-4)

FEM:llä voidaan selvittää muiden ominaisuuksien muassa rakenteiden ominaistajuudet ja -muodot. Tarvittavia tietoja ovat kappaleen materiaaliominaisuuksista kimmomoduli ja tiheys sekä kuroutumisvakio, joka on yksikötön vakio. Kimmokertoimen ja tiheyden avulla voidaan luoda kappaleen jäykkyys- ja massamatriisit. Vaimennusta ei yleensä oteta elementtimenetelmässä huomioon. Jos se kuitenkin katsotaan niin merkittäväksi, että se on syytä ottaa huomioon, vaimennusominaisuus on lisättävä elementtimalliin erikseen. FEM-ohjelmissa on yleisesti ominaisarvotehtävien ratkaisemiseksi useampia eri ratkaisijoita, jotka käyttävät eri matemaattisia menetelmiä. Useimmiten käytetään Lanczosin menetelmää, joka antaa tarkat tulokset ominaisarvotehtävästä, eikä laskenta-aika ole pitkä verrattuna tulosten tarkkuuteen. Ohjelmistojen manuaaleissa on kattavasti esitetty, millä matemaattisilla menetelmillä eri ratkaisijat ominaisarvotehtävät ratkaisevat. Perustana on kuitenkin aina jäykkyys- ja massamatriisi sekä joissain ratkaisijoissa lisäksi vaimennusmatriisi. Elementtimalliin annettavat reunaehdot ja ulkoiset vaikuttavat voimat eivät vaikuta ominaistajuuksiin tai -muotoihin, mikä tukee ominaistajuuksien ja -muotojen teoriaa. On kuitenkin huomattava, että esikiristys tai -jännitys, esimerkiksi palkin aksiaalisuuntainen tai laatan pinnan suuntainen ulkoinen vaikuttava voima, vaikuttaa ominaistajuuksiin. Ominaisuus tulee esille tutkittaessa todellisia rakenteita, jotka ovat yleensä monimutkaisempia ja aksiaalisuuntaisia voimia syntyä jo pelkkien eri rakenneosien omasta massasta johtuen. Tarkennettaessa elementtimallia on otettava huomioon, että mallin jäykkyys kasvaa kun se jaetaan elementteihin ja jäykkyyden kasvaminen voimistuu, jos elementit ovat epämääräisen muotoisia (Cook 1981, s. 141).

Elementtimallin tekemisessä on oltava tarkkana käytettävien yksiköiden kanssa. Jos käytetään SI-yksiköitä johdonmukaisesti, voidaan varmistua siitä, ettei virhettä synny. Jos puolestaan käytetään SI-yksiköiden kerrannaisyksiköitä kuten millimetrejä, on materiaaliominaisuuksien kanssa oltava tarkkana. Ominaistajuudet saadaan jousivakion ja massan osamäärän neliöjuuresta, joten on varmistuttava siitä, että jousivakio ilmoitetaan samoissa yksiköissä massan kanssa. Jousivakion SI-

johdannainen yksikkö on Newtoneita metriä kohti ja massan SI-yksikkö kilogramma. Jos tehdään yksikkötarkastelu ominaiskulmataajuuden lausekkeella millimetrejä käyttäen, huomataan tehtävä virhe

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{N}{mm}} = \sqrt{\frac{\frac{kg \cdot m}{s^2}}{kg}} = \frac{rad}{s} \sqrt{\frac{m}{mm}} \quad (2.17)$$

Yksikkötarkastelusta huomataan, että neliöjuuren sisään syntyvä virhe on luokkaa 10^3 , jolloin ominaiskulmataajuuksiin tulee siis tuhannen neliöjuuren suuruinen virhe. Virhe voidaan kompensoida kahdella eri tavalla. Molemmat tavat liittyvät materiaaliominaisuuksien manipulointiin siten, että massan ja jäykkyyden yksiköt tulevat samoiksi. Virhe voidaan kompensoida kertomalla materiaaliominaisuuksista kimmomoduli tuhannella, jolloin yksiköksi saadaan mN/mm^2 , tai jakamalla tiheys tuhannella, jolloin yksiköksi saadaan tn/mm^3 . Näillä menetelmillä neliöjuuren sisään saadaan pituuden yksiköt millimetreissä, jolloin ne saadaan supistettua ja ominaiskulmataajuuden yksiköksi saadaan rad/s.

Ominaisarvotehtävää ratkaistaessa reunaehdot on syytä asettaa samaksi kuin kokeellisesti mitatussa rakenteessa. Usein kokeellinen moodianalyysi pyritään tekemään vapaalle kappaleelle eli kappaleelle, jotka on tuettu jousilla tai muulla tavoin siten, että jäykän kappaleen liikkeitä ovat mahdollisia. Tällöin elementtimallille ei anneta reunaehtoja, jolloin jäykän kappaleen liikkeitä eivät ole estettyjä. Vapaan kappaleen jäykät ominaismuodot heräävät todella matalilla ominaistajuuksilla, joten ne on helppo tiputtaa tarkastelusta pois rajaamalla tutkittava taajuusalue. Tuloksia tarkastellessa voidaan jättää myös kokonaan huomioimatta kuusi alinta ominaismuotoa.

2.5.2 Teoria yhdistämisen takana

Elementtimallien rakentamisessa on joitain perusongelmia, jotka aiheuttavat eroja todellisen rakenteen ja elementtimallin ominaisuuksien välillä. Näitä ongelmia ovat vaimennuksen määrittäminen tai sen määrittämättä jättäminen, reunaehtojen

määrittäminen, systeemin parametrien epäjatkuva jako, materiaaliominaisuuksien määrittäminen sekä puutteellinen nivelten mallinnus. Elementtimenetelmän määrittelyominaisuuksia on mahdollista tarkentaa kokeellisesta moodianalyysistä saatavien tulosten avulla. On kuitenkin muistettava, että menetelmät eroavat toisistaan täysin ja sitä kautta menetelmistä saatavat tulokset eroavat sisällöllisesti toisistaan. (Maia & Silva 1997, s. 342)

Kokeellisessa moodianalyysissä on myös joitain ongelmia, jotka on otettava huomioon yleisesti, mutta erityisesti yhdistettäessä menetelmiä. Eräs ongelma on rakenteen vapausasteiden määrän rajallisuus, mikä aiheuttaa sen, että ominaistajuuksia ja -muotoja on rajallinen määrä ja ne saattavat poiketa elementtimallille annetuista vapausasteista, joita reunaehdot rajoittavat. Kokeellisesti on hankalaa tai mahdotonta määrittää joitain muotoja, kuten rotaatiota akselin ympäri tai kompleksisia ominaismuotoja, joiden solmukohdat liikkuvat jatkuvasti. Mittaustapahtumassa herkäät anturit rekisteröivät myös ulkopuolelta tulevat häiriöt. Häiriöt aiheuttavat kohinaa signaaliin, mikä voi aiheuttaa vääristymiä tuloksiin. Myös itse kokeen suoritus voi olla viallisen koelaitteiston tai epäpätevän käyttäjän takia epäluotettava. (Maia & Silva 1997, s. 342)

Kokeellisen moodianalyysin tulosten avulla voidaan parantaa elementtimallia useilla eri tasoilla. Yksinkertaisimmillaan elementtimallia parannetaan siten, että ominaistajuuDET saadaan yhtä suuriksi kokeellisesti saatujen kanssa ja ominaismuodot samoiksi niiltä osin, jotka kokeellisen moodianalyysin tuloksina saadaan. Astetta parempi malli kuvaa mitatun taajuusvastefunktiosta saatavan datan kokonaisuudessaan lukuun ottaen myös ne muodot, joita mittauksessa ei ole selvitetty. Seuraava malli kuvaa koko rakenteen käyttäytymisen myös niissä pisteissä, joita ei ole mitattu kokeellisesti. Tästä seuraavaksi parempi malli ottaa huomioon myös kontaktit ympäröiviin rakenteisiin. Parhaimmillaan elementtimalli kuvaa todellisen rakenteen massa-, jäykkyys- ja vaimennusominaisuudet, ja se pystyy kuvaamaan kaikki systeemin dynaamiset ominaisuudet lukuun ottaen myös ne, joita ei ole mitattu. (Maia & Silva 1997, s. 341)

Menetelmät kokeellisen moodianalyysin ja elementtimenetelmän yhdistämisen takana voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri luokkaan. Yksinkertaisimmissa menetelmissä kokeellisesti määritettyjä ja elementtimallilla selvitettyjä ominaismuotoja ja -taajuuksia verrataan keskenään. Elementtimallin ominaisuuksiin ei oteta kantaa, eikä siihen, miksi mallit eroavat toisistaan. Menetelmässä ei myöskään pystytä määrittämään rakenteen käyttäytymistä tutkitun alueen ulkopuolella. Seuraavissa hieman jalostuneemmissa menetelmissä selvitetään erot mallien välillä ottaen huomioon myös informaation siitä, miten mallit eroavat toisistaan. Sitä, mitkä systeemin ominaisuudet eroihin vaikuttaa, ei selvitetä. Pisimmälle viedyissä menetelmissä selvitetään massa- ja jäykkyysominaisuuksien häiriöt tai elementtimallissa käytettyjen parametrien epätarkkuudet, jotka aiheuttavat eron kokeellisesti määritettyjen muotojen ja laskettujen muotojen välille. Tavoitteena on, että malli kuvaa mahdollisimman tarkasti todellisen rakenteen fyysiset ominaisuudet. (Maia & Silva 1997, s. 343)

Olipa yhdistämismenetelmä mikä hyvänsä, on aina syytä verrata analyttisiä ja kokeellisesti määritettyjä ominaismuotoja, jos halutaan mahdollisimman luotettavasti arvioida eroja tuloksissa. Vertailussa voidaan käyttää ominaismuotovektoreita. Jokaiselle ominaismuodolle saadaan kerroin, joka kuvaa kokeellisesti määrätyn ja analyttisen ominaismuotovektorin välisen eron. Kerroin saadaan ominaismuotojen samankaltaisuusvertailun (*MAC*) kaavasta

$$MAC(\boldsymbol{\varphi}_{EMA_i}, \boldsymbol{\varphi}_{FEM_j}) = \frac{\left| \boldsymbol{\varphi}_{EMA_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{FEM_j} \right|^2}{\left(\boldsymbol{\varphi}_{EMA_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{EMA_i} \right) \left(\boldsymbol{\varphi}_{FEM_j}^T \boldsymbol{\varphi}_{FEM_j} \right)}, \quad (2.18)$$

missä $\boldsymbol{\varphi}_{EMA}$ on kokeellisesta moodianalyysistä saatu ominaismuotovektori ja $\boldsymbol{\varphi}_{FEM}$ on elementtimenetelmällä saatu ominaismuotovektori, yläindeksi T on vektorin transpoosi ja alaindeksit i ja j ovat yksikkövektoreita. (Friswell & Mottershead 1995, s. 57) *MAC*:sta saadaan arvoja, jotka ovat 0 ja 1 välillä. Karkeasti voidaan tehdä arvio, mitä eri arvot osoittavat ominaismuotojen yhteneväisyydestä. Jos arvo on 1, muodot ovat identtisiä. Jos arvo on suurempi kuin 0.9, muodot ovat samanlaisia toistensa kanssa,

muttei kuitenkaan samoja. Alle 0.9 arvot osoittavat, että muodot poikkeavat toisistaan. (ME-scopeVES 5.0 2008, s. 126)

Tämän työn tavoitteena on elementtimallin korjaus vertaamalla kokeellisen moodianalyysin tuloksia ja elementtimallin tuloksia keskenään. Korjaus tehdään kokeilemalla eri parametrien vaikutusta tuloksiin, ja malli yritetään korjata siten, että tulokset ovat mahdollisimman samoja toistensa kanssa. Tuloksista verrataan numeerisesti ainoastaan ominaistajuuden arvoja. Ominaismuotoja vertaillaan periaatetasolla, ja esimerkiksi MAC:a ei tehdä, vaikka se olisikin oleellinen tutkimuskohde. Työn päätavoitteet ovat kuitenkin muualla, ja LUT:lla ei ole tällä hetkellä käytössä ohjelmaa, josta MAC-arvot saataisiin automaattisesti. Niiden käsinlaskenta olisi työlästä, joten vertailu jätetään ominaistajuuksien tasolle.

3 SOVELLUSTEN YHDISTÄMINEN KÄYTÄNNÖSSÄ

Sovellusten yhdistäminen käytännössä tarkoittaa eri ohjelmilla mallinnettujen ja selvitettyjen ominaisuuksien yhdistämistä. Sovellusten yhdistäminen on usein hankalaa, sillä useimmilla ohjelmilla on omat tiedostomuotonsa, joihin tiedostot tallennetaan. Käytännössä kaikki ohjelmat tukevat useampia tiedostomuotoja varsinkin, jos ohjelmaa käytetään osana suurempaa kokonaisuutta, johon liittyy muita käytettäviä ohjelmia. Tiedostomuotoja ei kuitenkaan voi olla rajattomasti käytettävissä, ja usein haasteeksi muodostuu harvemmin toisiinsa kytkettyjen ohjelmistojen tuetut tiedostomuodot. Tässä työssä käytettävistä ohjelmista SolidWorks ja FEMAP ovat hyvin yhteensopivia tuettujen tiedostomuotojen osalta, ja SolidWorks-ohjelmalla luodut mallit voidaan tuoda FEMAP-ohjelmaan ilman ongelmia. SolidWorks ja ME'scopeVES ovat heikommin yhteensopivia, ja 3D-geometrian tuominen SolidWorks-ohjelmasta ei onnistu suoraan. Yhteensopivuusongelma kierretään tuomalla 3D-geometria ME'scopeVES-ohjelmaan FEMAP-ohjelmasta. Yhteensopivuuden lisäksi FEMAP-ohjelmassa voidaan valmistella geometria siihen muotoon, ettei jälkikäsitteilyohjelmistossa tarvitse tehdä mallinnetulle rakenteelle muuta kuin merkitä mittauspisteiden paikat 3D-geometriaan.

Toinen käytännön ongelma ovat menetelmät eri sovellusten takana. CAD-sovelluksilla on helppo mallintaa visuaalisesti kauniita ja geometrisesti tarkkoja malleja rakenteista. Geometrinen säntillisuus sopii erittäin huonosti esimerkiksi elementtimenetelmään, sillä jokaista yksityiskohtaa ei voida mallintaa tarkasti tai laskennasta tulee erittäin raskas vapausasteiden eksponentiaalisen lisääntymisen vuoksi. Siksi on tärkeää tuntea teoria käytettävien menetelmien takana, ja eri ohjelmien yhdistämisessä on oltava tarkkana, ettei liian hätäisiä johtopäätöksiä tule tehtyä ja esimerkiksi laskenta-aika ei veny suhteettoman pitkäksi verrattuna tulosten tarkentumiseen.

3.1 Ominaismuotojen visuaalinen tarkastelu

Kokeellisella moodianalyysillä selvitettyjä ominaismuotoja tutkitaan ME'scopeVES-ohjelmalla. Se on yleisesti käytetty kokeellisen moodianalyysin jälkikäsitteilyjä, jonka käyttöliittymä on helppo ymmärtää ohjeiden ja oppaiden avulla. Ominaismuotoja

halutaan tarkastella 3D-geometriasta, jolloin muodot ovat erittäin havainnollisesti nähtävissä. Ohjelmassa ominaismuotojen esittämisen perustana on mallinnettu geometria, joka voidaan mallintaa joko ohjelmistossa tai tuoda se tietyistä yhteensopivista ohjelmista. Geometria jaetaan pisteisiin, jotka numeroidaan halutussa järjestyksessä. Mittaustulokset yhdistetään vastaaviin geometrian pisteisiin, jolloin ne värähtelevät kustakin mittauspisteestä saadun datan mukaisesti. Useimmiten mallissa on pisteitä huomattavasti enemmän kuin todellisessa rakenteessa on mittauspisteitä, joten jokaiselle pisteelle ei voida määrätä mittausten mukaista käyttäytymistä. Ominaisvärähtelyn esittäminen ei ole kuitenkaan kovin havainnollista, jos mittauspisteiden välissä on pisteitä, jotka eivät liiku lainkaan. Näiden pisteiden oikeaa käyttäytymistä voidaan kuitenkin jäljitellä interpoloimalla mittauspisteiden välisten pisteiden käyttäytymistä lähimpien mittauspisteiden käyttäytymisen avulla.

3.2 Elementtimenetelmän mallin korjaaminen kokeellisen moodinanalyysin avulla

Elementtimalli korjataan mahdollisimman yksinkertaisesti ja universaalisti siten, ettei menetelmää kytketä mihinkään tiettyyn ohjelmaan, sillä ohjelmistojen versioiden päivittäminen tai ohjelmistojen vaihtaminen aiheuttaisi joko ongelmia elementtimallin korjaamisessa tai koko menetelmän hylkäämisen. Siksi elementtimallin korjausta ei tehdä matriisitasolla, sillä jo matriisien saaminen käsiteltävään muotoon vaatii eri ohjelmissa eri menetelmiä. Sen sijaan tutkitaan, jos joitain parametrejä muuttamalla saataisiin säännönmukaisia muutoksia ominaistajuuksien arvoissa. Mallia korjataan muuttamalla geometriaa sen rakenneosien massatietojen perusteella sekä muuttamalla sen kimmomodulia ja tiheyttä. Vaimennuksen vaikutus arvioidaan niin olemattomaksi tutkittavien ominaisuuksien kannalta, että rakennetta tutkitaan vaimentamattomana.

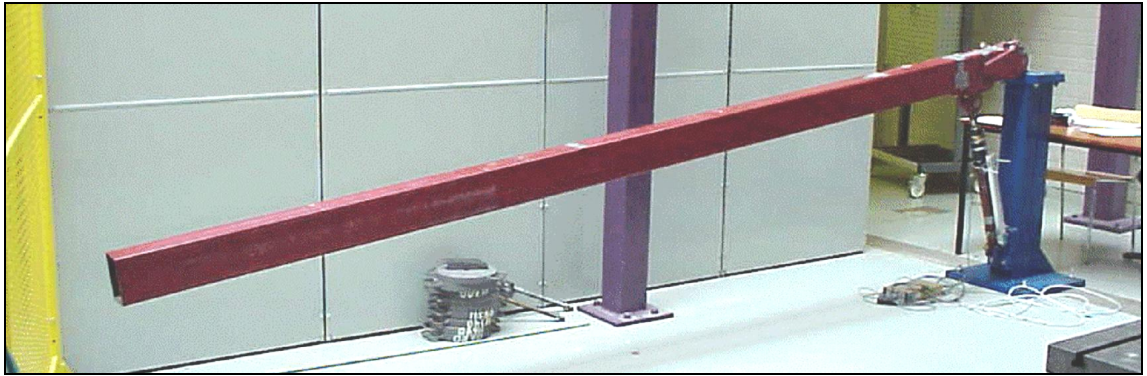
3.3 Esimerkkirakenne

Otetaan teorian tueksi esimerkkirakenne, jona käytetään Lappeenrannan teknillisen yliopiston älykkäiden koneiden laboratoriossa sijaitsevan puominosturin puomia. Rakenteen mallinnus sekä koko prosessi ominaismuotojen tarkastelemiseksi ja

elementtimallin tarkentamiseksi esitetään liitteessä I. Prosessi esitetään niin yksityiskohtaisesti, että mittaustapahtuman toistettavuus on mahdollista tekniikan perustiedoilla ja -taidoilla, sillä selvitystä on tarkoitus käyttää jatkossa koneensuunnittelun opetuksessa. Puominosturi mallinnetaan SolidWorks-ohjelmalla ja puomin ominaistuuksia ja -muodot selvitetään elementtimenetelmällä FEMAP-ohjelmalla, jossa ratkaisijana käytetään NX Nastran 6 -sovellusta. Puomille tehdään kokeellinen moodianalyysi LUT:n moodianalyysilaitteistolla. Mittaustapahtuman suunnittelu tehdään elementtimenetelmällä selvitettyjen ominaismuotojen pohjalta, jotta mittauksesta saadaan kaikki mielenkiintoisella taajuusalueella olevat ominaismuodot. Mittaus suoritetaan ja tulokset otetaan jälkikäsitteilyyn ME'scopeVES-ohjelmaan, jossa niitä tarkastellaan tarkemmin ja käsitellään tulokset siten, että puomin ominaismuotoja voidaan tarkastella visuaalisesti tietokoneen näytöltä. Elementtimenetelmällä selvitettyjä ominaistuuksia ja kokeellisesti selvitettyjä ominaistuuksia verrataan keskenään ja pyritään tarkentamaan elementtimallia siten, että ominaistuuksien vastaavat mahdollisimman tarkasti kokeellisesti mitattuja.

3.3.1 Esimerkkirakenteen geometria

Puominosturin puomi on valmistettu teräksestä, ja se on profiililtaan neliöputkea, jonka korkeus on 150 mm, leveys on 100 mm ja seinämäpaksuus on 4 mm. Puomia on vahvistettu kohdista, joihin kiinnittyvät puominosturin pystypalkki ja sylinteri, jolla puomia ajetaan. Valokuva puominosturista on esitetty kuvassa 3.1. Puominosturin puomi mallinnetaan SolidWorks-ohjelmalla rakennepiirustuksen mukaisesti, joka on esitetty liitteessä I. Mallinnetulle rakenteelle voidaan antaa materiaaliominaisuudet, jolloin saadaan selville rakenteen eri ominaisuuksia kuten puomin massa ja massakeskipiste. Näitä voidaan käyttää hyväksi, kun tarkennetaan elementtimenetelmässä mallinnettua puomia, jonka geometriaa on yksinkertaistettu.



Kuva 3.1. LUT:n laboratorion puominosturi.

3.3.2 Puominosturin puomin kokeellinen moodianalyysi

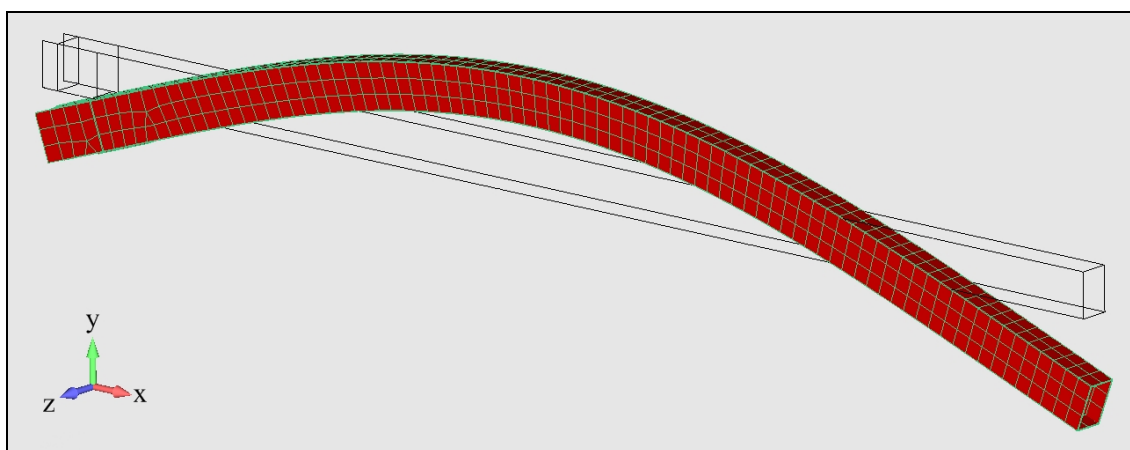
Kokeellisen moodianalyysin suorittamista varten tehdään puomille FE-analyysi, josta selvitetään puomin alimmat ominaistajuudet ja -muodot. Analyysissä puomille ei anneta reunaehtoja, jolloin jäykän kappaleen liikkeet ovat mahdollisia. Alimpien ominaistajuuksien perusteella voidaan valita sopiva taajuuskaista mitattavaksi ja ominaismuotojen perusteella sopivat mittauspisteet.

Taulukossa 3.1 on esitetty FE-analyysillä selvitetty 20 alinta ominaistajuutta ja vastaavien ominaismuotojen esiintymismuodot ja -suunnat. Taulukon tueksi on esitetty kuvassa 3.2 8. alin ominaismuoto. Selvitetyistä ominaismuodoista 6 alinta ominaismuotoa ovat jäykän kappaleen liikkeitä, joita vastaavat ominaistajuudet ovat hyvin matalia. Kun tarkastellaan muita ominaismuotoja, huomataan, että alimmat ominaismuodot ovat aaltomaisia muotoja puomin molemmissa mahdollisissa liikesuunnissa. Ensimmäinen puomin akselin ympäri tapahtuva rotaatio herää vasta yli 250 hertsin taajuudella, jota ennen herää viisi aaltomaista muotoa. Otetaan tutkittavaksi taajuusalueeksi nolasta hertsistä 300 hertsiin. Tällä alueella on kolme aaltomaista muotoa molemmissa liikesuunnissa, jotka halutaan selvittää kokeellisella moodianalyysillä. Kolme muotoa puomin molemmissa mahdollisissa liikesuunnissa tarkoittaa vähintään kolmea mittaustanturia puomin ylä- tai alapinnalla ja jommallakummalla sivulla. Kun suunnitellaan antureiden paikkoja, tarkastellaan heräviä ominaismuotoja, niiden solmukohtia ja aaltomaisten muotojen huippuja. Muotoja tarkastellessa huomataan, että aaltojen solmukohdat ja huiput ovat eri kohdissa

eri ominaismuodoilla. Antureiden paikkojen määrittäminen pitää tehdä joko solmukohtien tai huippujen kustannuksella tai vaihtoehtoisesti lisätään mittauspisteiden määrää ja selvitetään esimerkiksi kolme ominaismuotoa viiden mittauspisteen avulla, kuten tässä esimerkkimittauksessa tehdään.

Taulukko 3.1. 20 alinta ominaistajuuutta ja vastaavien ominaismuotojen esiintymismuodot ja -suunnat.

muoto	taajuus [Hz]	esiintymismuoto ja -suunta
1.-6.	~0	jäykän kappaleen liike
7.	39.04	aalto, z-suunta
8.	52.86	aalto, y-suunta
9.	110.5	aalto, z-suunta
10.	149.6	aalto, y-suunta
11.	214.2	aalto, z-suunta
12.	263.4	rotaatio akselin ympäri
13.	291.9	aalto, y-suunta
14.	338.8	aalto, z-suunta
15.	351.7	rotaatio akselin ympäri
16.	366.7	rotaatio akselin ympäri
17.	380.4	rotaatio akselin ympäri
18.	391.6	rotaatio akselin ympäri
19.	436.4	rotaatio akselin ympäri
20.	466.5	aalto, z-suunta



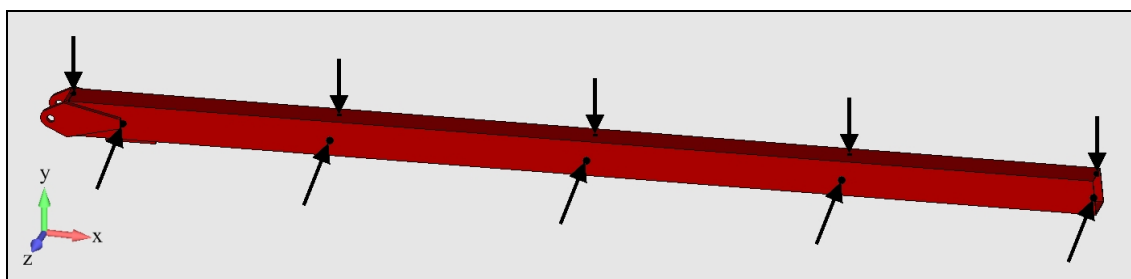
Kuva 3.2. Puomin 8. alin ominaismuoto ominaistajuuudella 52.86 Hz.

Mittausta suunniteltaessa määritetään tutkittava taajuusalue nolasta 300 hertsiin. Mittaus suoritetaan nolasta 400 hertsiin, sillä kolmas y-suunnassa heräävä

ominaismuoto on varsin lähellä 300 hertsiä. Jos elementtimalliin on tullut virhettä, voi todellinen ominaistajuus olla yli 300 hertsiä, jolloin nolasta 300 hertsiin suoritettavasta mittauksesta ei saataisi kuin kaksi y-suuntaista ominaismuotoa selville. Mittauspisteet sijoitetaan keskilinjalle puomin molempiin päihin niin lähelle puomin päätä kuin mahdollista, ja loput kolme pistettä jaetaan välille tasajaolla pyöristettynä seuraavaan senttimetriin puomin loppupäätä kohti. Siten mittauspisteiden x-koordinaateiksi saadaan puomin alkupäästä mitattuna taulukossa 3.2 esitetyt pisteet, joita on havainnollistettu kuvassa 3.3. Pisteiden x-koordinaatit ovat samat molemmilla mitattavilla sivuilla lukuun ottamatta ensimmäistä pistettä, joka puomin sivulla siirretään kohtaan, jossa vahvikelevy alkaa, eli noin 230 mm puomin nivelpäästä.

Taulukko 3.2. Mittauspisteiden x-koordinaatit nivelpäästä lähtien.

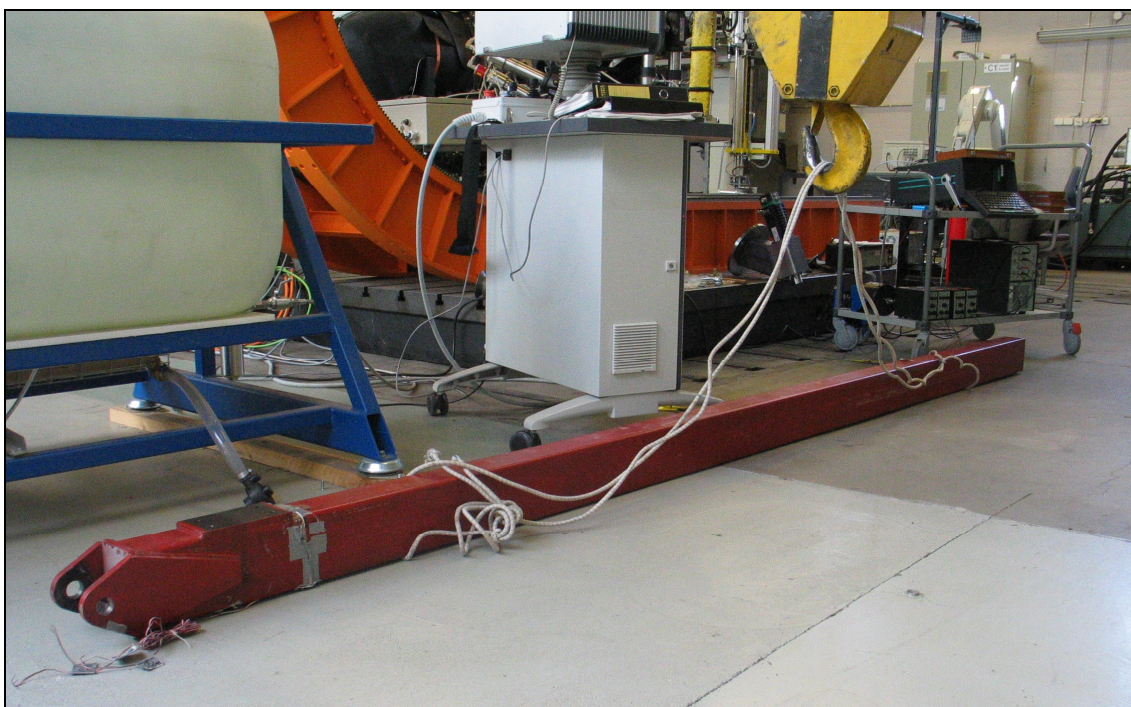
piste	1.	2.	3.	4.	5.
x-koordinaatti [mm]	10/230	1040	2070	3100	4115



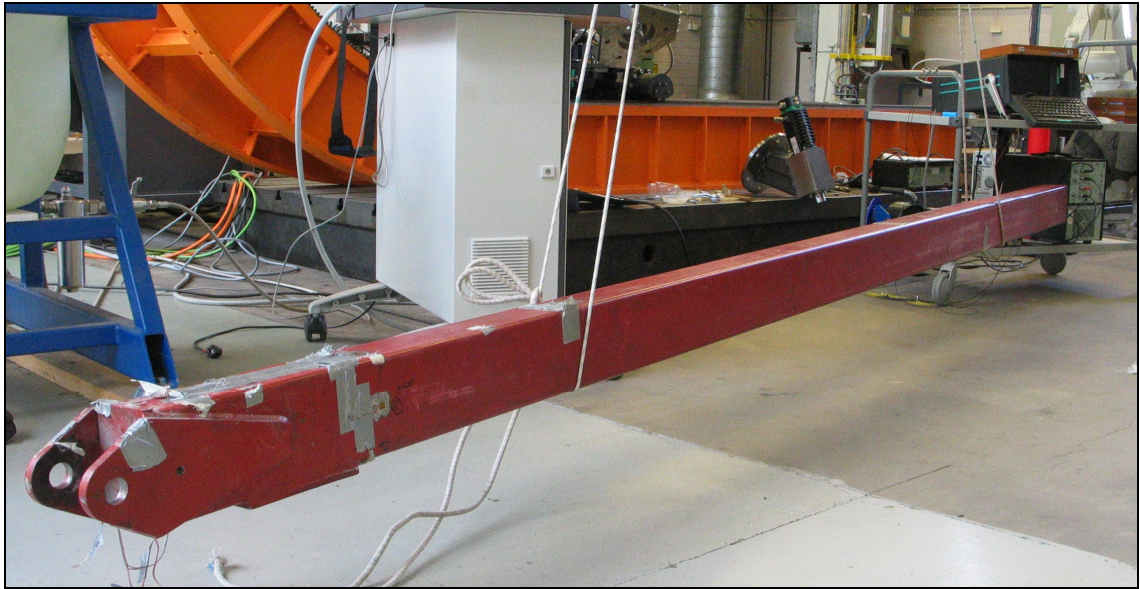
Kuva 3.3. Mittauspisteiden paikat puomilla merkittynä mustilla pisteillä, joihin nuolet osoittavat.

Kokeellinen moodianalyysi suoritetaan puomille, joka on tuettu vapaasti, eli jäykän kappaleen liikkeet ovat mahdollisia. Käytännössä vapaa tuenta saavutetaan erilaisilla joustavilla tuentatavoilla, kuten jousilla tai kuminauhoilla. Vapaalla tuennalla saavutetaan kaksi selkeätä etua verrattuna kiinteästi tuettuun. Ensimmäinen on kontaktien välttäminen muihin rakenteisiin, mikä saattaisi aiheuttaa epälineaarista vaimennusta ja voisi johtaa kompleksisten ominaismuotojen heräämiseen. Kompleksisia ominaismuotoja ei kokeellisessa moodianalyysissä kuitenkaan voitaisi tunnistaa kompleksisiksi, sillä perusoletuksena on aina rakenteen lineaarisuus. Toinen etu on ulkoisten häiriöiden suodatus. Jos rakenne on kiinteästi tuettu, kiinteitä rakenteita pitkin

johtuu tutkittavaan rakenteisiin häiriötaajuuksia ympäröivistä koneista ja laitteista. Anturit rekisteröivät häiriön vasteena, ja taajuusvastefunktion tulee paikallisia huippukohtia, jotka eivät johdu rakenteen resonoinnista annettuun herätteeseen. Optimaalisin tuenta olisi, jos puomi ripustettaisiin roikkumaan pystyasentoon. Gravitaatiosta ja tutkittavan kappaleen omasta massasta johtuva voima olisi aksiaalisuuntainen, eikä siihen vaikuttaisi myöskään puristava voima, sillä alapää roikkuu vapaasti ilmassa, eikä aksiaalisuuntainen venymä aiheuta esikiristystä. Puomi on kuitenkin yli 4 metriä pitkä, ja optimaalisen tuennan saavuttaminen laboratoriomittauksissa olisi hankalaa kattokorkeuden vuoksi. Se aiheuttaisi myös mittausteknisiä ongelmia, sillä käytettävien antureiden johdot ovat melko lyhyitä, joten mittalaitteisto ja mittausten suorittaja jouduttaisiin nostamaan korinosturilla tai vastaavalla ylimpien mittauspisteiden mittaamiseksi. Sen sijaan puomi nostetaan vaakatasossa hallinosturilla, tuentapisteitä on kaksi ja tuenta suoritetaan yhden kuminauhan avulla, mitä on havainnollistettu kuvien 3.4 ja 3.5 avulla.



Kuva 3.4. Puomi ennen nostamista. Kuvassa näkyy hallinosturi ja joustava kuminauha, joka mahdollistaa joustavan tuennan.



Kuva 3.5. Puomi, joka on tuettu joustavasti, minkä ansiosta jäykän kappaleen liikkeet ovat mahdollisia.

Mittaus suoritetaan ennalta määrätyissä pisteissä, ja tulokseksi otetaan neljän mittauksen keskiarvo, jolloin rakenteen ulkopuolelta tulevat satunnaiset häiriöt ja signaalin kohina kompensoituvat. Mittalaitteiden asetukset on oltava luonnollisesti samat koko mittauksen ajan. Mittaukset suoritetaan kolmella käytettävissä olevalla kiihtyvyyssanturilla, jotka kiinnitetään puomiin magneettien avulla. Herätteenä käytetään impulssivasaraa, jossa on kumikärki. Impulssi annetaan samaan kohtaan joka mittauksessa, joskin tietysti siinä suunnassa, jossa liikettä mitataan. Mittaukset suoritetaan molemmille liikesuunnille erikseen siten, että kahdella mittaustapahtumalla saadaan yhden liikesuunnan halutut pisteet mitattua. Mittausten tuloksia tallennettaessa määritetään solmut, joista mittaukset on suoritettu, ja suunta, jossa vastetta on mitattu. Jos ennen mittausten suorittamista on jo tiedossa jälkikäsiteltävän geometrian solmupisteiden numerointi, voidaan solmut numeroida niiden mukaisesti. Ne voidaan numeroida myös kronologisesti tai mittaajan omien mieltymysten mukaisesti. Pääasia on, että tiedetään, mikä solmunumero vastaa mitäkin pistettä. Mittaustapahtumasta on hyvä tehdä muistiinpanoja, joista selviää ainakin solmupisteiden numerot ja niiden paikat puomilla. Myöhemmin jälkikäsitelijässä solmunumerointia voidaan muokata mieleiseksi, joten mittausten numerointi kannattanee tehdä kronologisessa järjestyksessä virheiden minimoimiseksi.

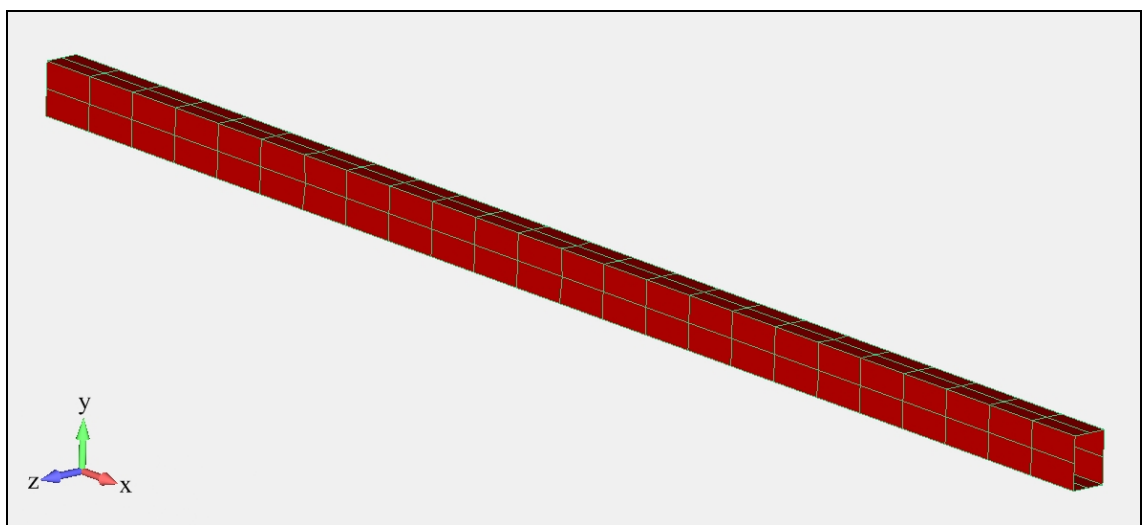
LUT:lla käytössä olevassa moodianalyysilaitteistossa tiedostonsiirto on suoritettava 90-luvulta tuttujen 3 ½ tuuman levykkeiden (arkik. *disketti* tai *korppu*) avulla. Toistaiseksi levykeasemia löytyy vielä satunnaisesti myös LUT:lta, mutta muutaman vuoden kuluttua levykeasemia on yhä vähemmän käytössä, ja niinkin perustavanlaatuinen toiminto kuin tiedostonsiirto voi muodostua suurimmaksi ongelmaksi mittausten datan käsittelyssä.

3.3.3 Tulosten jälkikäsitely ja esimerkkirakenteen ominaismuotojen visuaalinen tarkastelu

LUT:lla käytössä olevassa kokeellisen moodianalyysin jälkikäsitelyohjelmistossa ME'scopeVES:ssä pystytään ominaismuotoja tarkastelemaan tuomalla geometria FEMAP-ohjelmasta ja määrittämällä kokeellisen moodianalyysin mittauspisteet geometriaan. 3D-geometriaa ei voida tuoda suoraan CAD-ohjelmasta jälkikäsitelyohjelmiston tukeman menetelmän vuoksi. Jälkikäsitelyohjelmistoon voidaan tuoda muista ohjelmista ainoastaan niin sanottuja rautalankamalleja, eli malleja, joiden geometria kuvataan viivojen avulla. Rautalankamalleiksi luetaan määrättyissä FEM-ohjelmissa tehdyt mallit, jotka on jaettu elementteihin. Elementtien väliset solmut ohjelma tunnistaa pisteiksi, elementtien reunat viivoiksi ja elementit pinnoiksi. Kun otetaan huomioon nämä ominaisuudet, voidaan elementtimallista tehdä jälkikäsitelyohjelmaan sopiva malli. Solmujen lukumäärä on hyvä rajoittaa, sillä mittausta on suoritettu vain kymmenessä pisteessä. Pisteiden yletön lukumäärä vaikeuttaisi oikeiden mittauspisteiden määrittämistä, sillä jälkikäsitelyohjelmistossa on määrättävä mallista pisteet, joissa mittausta on suoritettu. Mitä vähemmän on pisteitä, sitä helpompi pisteet on löytää. Toisaalta pisteiden lisääminen ei tuo minkäänlaista hyötyä ominaismuotojen tarkkuuteen tai muuhun seikkaan, minkä vuoksi pisteiden lukumäärän kasvattaminen olisi hyödyksi.

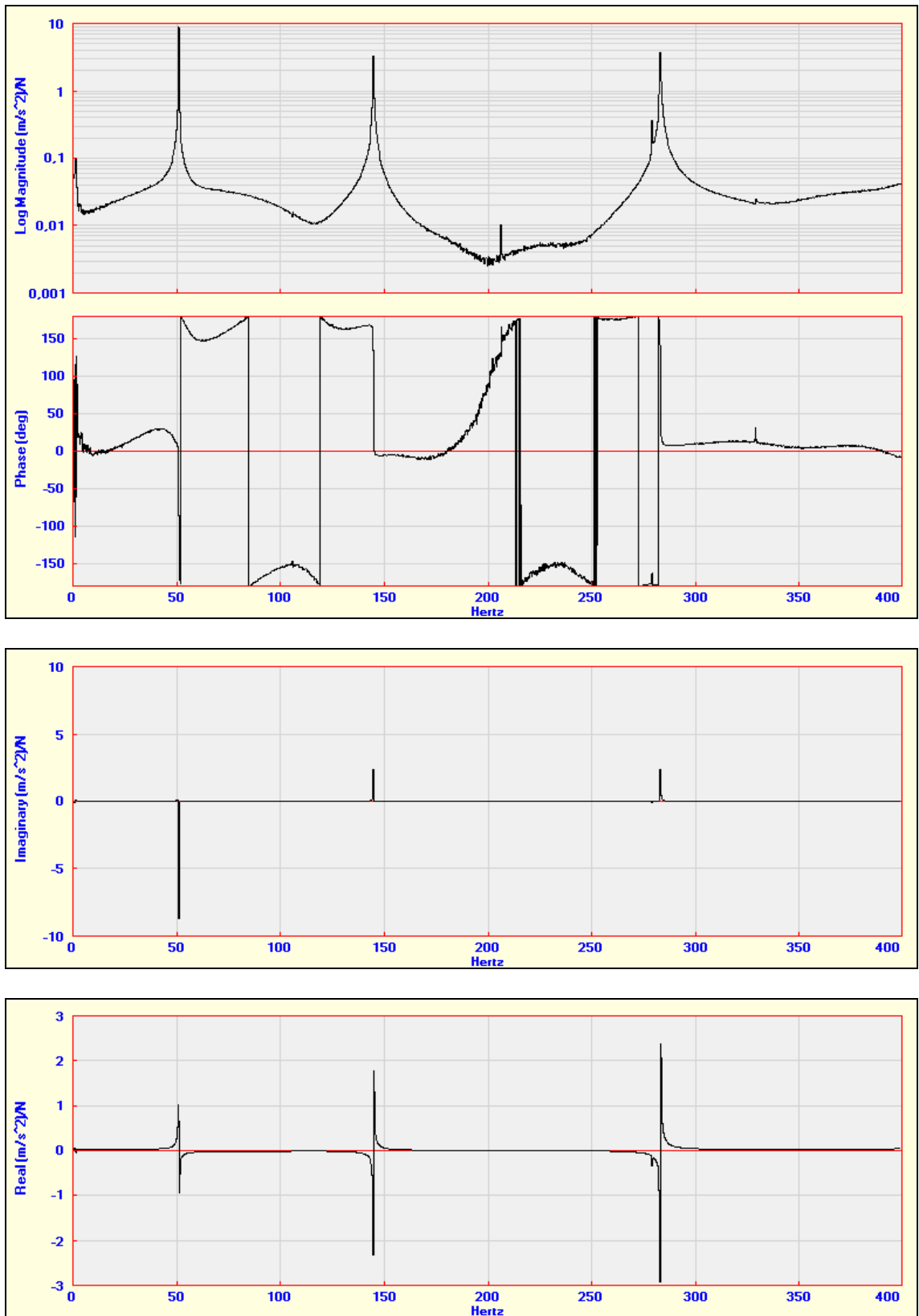
Puomista tehdään FEMAP-ohjelmassa kuvassa 3.6 esitettävä elementtimalli, jota on yksinkertaistettu verrattuna aiemmin kokeellisen moodianalyysin mittaustapahtumaa suunnitellussa mallinnettuun elementtimalliin. Liitteessä I on esitetty yksinkertaistetun FEMAP-mallin mallinnus ja mittauspisteiden määrittely malliin. Elementtimallissa

käytetään elementtityyppinä lineaarisia kuorielementtejä. Yhteen elementtiin liittyy neljä solmua, jolloin käytetyllä elementtijaolla elementtimallissa on solmuja 200 kappaletta. Materiaaliominaisuuksia tai kuorielementtien paksuutta ei tarvitse antaa, sillä jälkikäsittelyohjelmaan tuotavasta mallista voidaan käyttää hyödyksi ainoastaan solmuja ja elementtejä. Kuorielementit ovat luonteeltaan yksikön paksuisia, vaikka niille annettaisiin paksuus elementtimenetelmän laskentaa varten. Malli tallennetaan tiedostomuotoon, joka voidaan tuoda jälkikäsittelyohjelmaan.



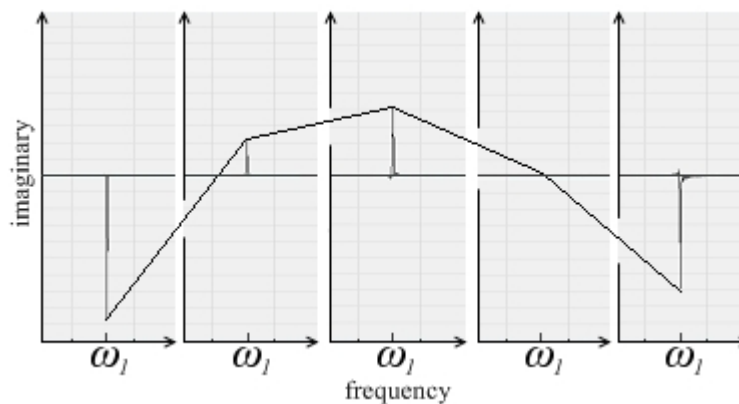
Kuva 3.6. FEMAP-malli, jota käytetään ominaismuotojen tarkastelussa.

Kun mittaukset on suoritettu, saadut tulokset tuodaan jälkikäsittelyohjelmistoon, missä niitä voidaan käsitellä. Taajuusvastefunktioita voidaan tutkia kaikissa muodoissa, jotka teoriaosassa on esitetty. Kuvassa 3.7 on esitetty yhden tutkitun pisteen Boden diagrammi, imaginääriosa taajuuden funktiona ja reaali osa taajuuden funktiona.



Kuva 3.7. Erään mittauspisteen taajuusvastefunktion kuvaajat. Ylinnä Bode diagrammi, keskellä imaginääriosa taajuuden funktiona ja alinna reaaliota taajuuden funktiona.

Ominaismuotoja voidaan tarkastella kuvaajista, joissa imaginääriosa on kuvattu taajuuden funktiona. Liitteessä II on kuvattu molempien liikesuuntien mittauspisteiden taajuusvastefunktioiden imaginääriosat taajuuden funktiona. Liitteen kuvista voidaan jo hieman hahmottaa syntyviä ominaismuotoja, jos tueksi otetaan teoria siitä, miten kuvaajat ja ominaismuodot liittyvät toisiinsa. Tarkastellaan esimerkiksi yläpinnan mittauspisteitä ja taajuusvastefunktioiden ensimmäistä taajuutta, joissa taajuusvastefunktioissa on huippukohta. Huomataan, että ensimmäisessä ja viimeisessä pisteessä imaginääriosa on negatiivinen ja keskellä olevista pisteistä kahdessa selvästi positiivinen ja yhdessä noin nolla. Jos tarkasteltavat pisteet laitetaan järjestyksessä peräkkäin ja yhdistetään imaginääriosien huiput, saadaan periaatteellinen kuvaaja ensimmäisestä ominaismuodosta tarkasteltavassa liikesuunnassa kuvan 3.8 mukaisesti. Kuvasta huomataan, että ensimmäinen ominaismuoto on puoliaallon muotoinen, mikä vastaa elementtimenetelmällä selvitettyä ensimmäistä ominaismuotoa kyseisessä liikesuunnassa.



Kuva 3.8. Ensimmäinen ominaismuoto, joka saadaan yhdistämällä yhden liikesuunnan taajuusvastefunktioiden imaginääriosien huippupisteet ensimmäisellä ominaistajuudella.

Kuten edellisestä kuvasta nähdään, ominaismuodon tarkastelu on hyvin periaatteellista, eikä se ole visuaalisesti tyydyttävä. Visuaalisemmin tuloksia voidaan tarkastella, jos yhdistetään mittauksista saadut tulokset mittauspisteitä vastaaviin kohtiin geometriassa. Pisteiden ja mittausten yhdistäminen voidaan tehdä joko muokkaamalla mittausten solmunumerointia tai mallin solmunumerointia. Oleellista on, että mitattujen pisteiden

solmunumerointi on sama kuin geometriassa määritettävien pisteiden numerointi. Liitteessä I on esitetty pisteiden yhdistäminen molemmilla tavoilla.

Kun pisteet on asetettu samoiksi ja mittausdata yhdistetty pisteisiin, on vielä määritettävä, miten mittaamattomat pisteet käyttäytyvät. Jälkikäsitteilyohjelmistossa on mahdollista interpoloida mittaamattomien pisteiden käyttäytymistä. Interpolointi suoritetaan hyvin yksinkertaisesti rakenteen geometrian avulla. Interpoloinnissa määrätään, kuinka monta lähintä mittauspistettä, ja mitkä liikesuunnat otetaan huomioon. Mittauspisteille annetaan painokertoimia sen mukaan, kuinka kaukana ne ovat kustakin huomioon otettavasta mittauspisteestä. Puomin tapauksessa interpoloidaan pisteitä y- ja z-suunnassa, ja otetaan huomioon neljä lähintä mittauspistettä. Jos tarkastelussa on vain toisen liikesuunnan mittauspisteet, voidaan valita kyseinen suunta interpolointiin ja valita mittauspisteiden määräksi kaksi. Mittauspisteet on sidottu liikesuuntiin ja interpoloinnissa otetaan lähimpinä pisteinä huomioon lähimmät saman liikesuunnan mittauspisteet. Siksi interpoloinnissa pitäisi riittää kaksi lähintä mittauspistettä, vaikka mittausdataa onkin kahdessa liikesuunnassa. Jälkikäsitteilyohjelmassa interpoloidut mittaamattomien pisteiden painokertoimet eivät kuitenkaan jostain syystä täsmää painokertoimien kanssa, jotka saadaan, kun tutkitaan yhtä liikesuuntaa kerrallaan. Interpoloinnissa huomioon otettavien mittauspisteiden lukumäärä vaikuttaa siten, että lähellä mittauspisteitä olevat mittaamattomat pisteet käyttäytyvät sitä huonommin, mitä enemmän mittauspisteitä otetaan huomioon. Tämä johtuu siitä, että mittauspisteen vaikutus interpoloitavaan lähipisteeseen vähenee, jolloin mittauspiste liikkuu enemmän kuin sitä lähimpänä olevat pisteet.

Kun kaikille pisteille on määrätty käyttäytyminen, voidaan ominaismuotoja tarkastella. Mittauspisteet käyttäytyvät tarkasteltavan taajuusvastefunktion kuvaajan mukaisesti, joten tarkasteltavaksi on otettava imaginääriosa taajuuden funktiona. Muita kuvaajia käytettäessä rakenne taipuu taajuusvastefunktion mukaisesti, mutta ainoastaan imaginääriosaa taajuuden funktiona tarkasteltaessa saadaan selville rakenteen ominaismuodot. Ominaismuotoja voidaan tarkastella määrittämällä taajuusvastefunktion kuvaajasta taajuus, jota halutaan tutkia. Jos tutkittava taajuus on ominaistaajuus, rakenne värähtelee ominaismuodon mukaisesti. Jos tutkittava taajuus ei

ole ominaistajuus, eri mittauspisteet värähtelevät satunnaisesti hyvin vähän tasapainoaseman ympärillä. Ohjelmassa oletusasetuksena on skaalata tulokset automaattisesti sopivaan mittakaavaan, joten hyvinkin vähäinen värähtely saadaan näkymään kasvattamalla skaalauskerrointa riittävästi. Ominaisuuksien välillä olevia muotoja ei tule tarkastella missään mielessä, sillä niistä ei saada selville mitään oleellista rakenteen käyttäytymisestä. Muun kuin ominaismuodoilla värähtelyn voi eliminoida asettamalla skaalauskerroin vakioksi. Siinä on puolestaan se ongelma, että toiset ominaismuodot esiintyvät voimakkaammin kuin toiset, eli vakioskaalauskerroin toiset ominaismuodot deformatuivat huomattavasti enemmän kuin toiset. Valitsemalla oikein kursori, jolla tarkasteltava taajuus valitaan, voidaan varmistua siitä, että ominaistajuudet löydetään taajuusvastefunktiosta, jolloin voidaan käyttää myös automaattista skaalausta.

3.3.4 Esimerkkirakenteen elementtimallin tarkennus

Kokeellista moodianalyysia suunniteltaessa elementtimallista luodaan geometrisesti suhteellisen tarkka. Mallia voidaan myöhemmin tarkentaa kokeellisesta moodianalyysistä saatavien tulosten avulla. Elementtityyppinä käytetään lineaarisia laattaelementtejä, joilla saadaan ominaisarvoanalyysistä suhteellisen tarkat tulokset. Elementtiverkkona voidaan käyttää verrattain harvaa verkkoa, jolloin laskenta-aika ei kasva suhteettoman pitkäksi ja kokemuksen perusteella voidaan todeta, että elementtien lukumäärän rajaton kasvattaminen ei vaikuta tuloksiin juuri lainkaan. Käytännössä nykyään, kun käytetään 32- tai 64-bittisiä suorittimia, voidaan käyttää niin montaa merkitsevää numeroa laskennassa, ettei laskennassa tule juurikaan numeerista virhettä, vaikka vapausasteita olisi huomattavan paljon.

Elementtimallia luotaessa voitaisiin käyttää hyväksi SolidWorks-ohjelmalla luotua geometriaa, joka verkotettaisiin suoraan elementteihin. Silloin kuitenkin jouduttaisiin käyttämään tilavuuselementtejä, joita tulisi elementtimalliin erittäin paljon, varsinkin jos halutaan elementtien olevan säännöllisen muotoisia kuutioita tai tetroja. Puomi on erittäin pitkä verrattuna putken paksuuteen, ja tilavuuselementeistä tulee välttämättä hyvin pitkulaisia. Huonot, epäsäännölliset elementit aiheuttavat laskentaan ongelmia ja

virheitä tuloksiin elementtimallin jäykkyyden kasvaessa. Elementtien lukumäärän kasvaessa elementtien vapausasteiden lukumäärä kasvaa ja laskennasta tulee helposti hyvin raskas. Periaatteessa analyysissä voitaisiin käyttää myös palkkielementtejä, mutta epäjatkuvuuden kuvaaminen puomin eri osissa tulisi ongelmalliseksi. Sen sijaan geometria luodaan pisteiden ja viivojen avulla FEMAP-ohjelmassa, ja verkotetaan luodut pinnat laattaelementeillä. Näin elementtien lukumäärä pysyy hyvin pienenä, ja elementeistä tulee geometrisesti hyvän muotoisia.

Liitteessä I on esitetty malli, jota laskennassa on käytetty. Alkuperäinen malli on mallinnettu käyttäen yhtä materiaalia ja kolmea elementtipaksuutta. Materiaalioinaisuuksina on annettu kimmomoduli E , joka on 207 000 MPa, kuroutumisvakio ν , joka on 0.3 ja tiheys ρ , joka on 7801 kg/m³. Rakennetta yksinkertaistetaan mallinnuksessa, ja jokainen eri rakenneosia mallinnetaan suorakaiteen muotoisena, vaikka puomin sivuilla olevat kiinnikelevyt ovat todellisuudessa epämääräisen muotoiset. Elementteinä käytetään lineaarisia kuorielementtejä, kuten aiemmin todettiin. Analyysityypiksi valitaan ominaisarvoanalyysi, jonka valikosta säädetään ratkaisumenetelmäksi Lanczosin menetelmä, ja massamatriisit muodostetaan konsistentin- ja lumped-massamatriisin lineaarikombinaationa. Menetelmä antaa parhaat tulokset Nastran-ratkaisijassa käytettävissä olevista massamatriisin muodostamisvaihtoehdoista. Analyysistä halutaan tuloksena 20 alinta ominaismuotoa, joista kuusi alinta on jäykän kappaleen liikkeitä, sillä reunaehtoja ei anneta. Reunaehtoja ei anneta elementtimallille, sillä myös mittaukset tehdään puomille, jonka jäykän kappaleen liike on mahdollista joustavan tuennan vuoksi. Rakennetta analysoidaan vaimentamattomana.

Elementtimalli eroaa todellisesta rakenteesta geometriaan tehtyjen yksinkertaistusten vuoksi. Tarkennettaessa elementtimallia kokeellisen moodianalyysin tulosten avulla, tehdään yksinkertaistetusta rakenteesta ominaisuuksiltaan mahdollisimman samankaltainen todellisen rakenteen kanssa. Käytännössä yksinkertaistukset vaikuttavat tutkittavan rakenteen eri osien massaun, mikä taas vaikuttaa massakeskipisteen sijaintiin. Massakeskipiste pyritään saamaan todellisen rakenteen massakeskipistettä vastaavaan kohtaan, ja koko elementtimallin massa tarkennetaan todellisen rakenteen

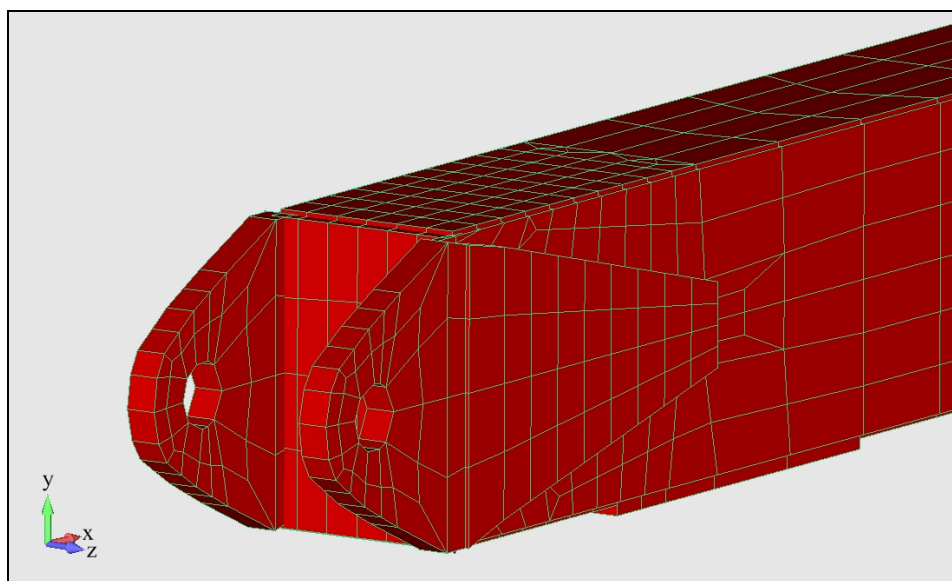
massaa vastaavaksi. Näiden suorittamiseksi tarkistetaan jokaisen rakenneosan massa. Jokaisesta rakenneosasta tehdään SolidWorks-ohjelmassa oma part-tiedosto. Osille annetaan materiaaliominaisuudet, jolloin saadaan jokaisen rakenneosan massa. Massaa verrataan elementtimallin vastaavaa osaa kuvaaviin elementtien massaan. Elementtimallia tarkennetaan massatietojen avulla muuttamalla elementtipaksuutta, jolloin massaa saadaan lisättyä tai vähennettyä puuttumatta materiaalin tiheyteen. Kun elementtimallin massa vastaa SolidWorks-ohjelmalla mallinnetun rakenteen massaa, ja massakeskipiste on likimain samassa kohdassa, tutkitaan ominaistuuksien arvoja.

Seuraavaksi tarkennuksessa muutetaan elementtimallin materiaaliominaisuuksia. Ensin varioidaan kimmomodulia vakiotiheydellä ja sitten tiheyttä vakiokimmomodulilla, jolloin nähdään kummankin ominaisuuden vaikutus ominaistuuksiin. Kaikki tulokset skaalataan jakamalla saadut ominaistuuksudet vastaavalla kokeellisesta moodianalyysistä saadulla ominaistuuksudella. Skaalauskerroimista voidaan piirtää kuvaaja, josta nähdään havainnollisemmin ominaistuuksien vaikutus ominaistuuksuden arvoihin. Tarkasteluun otetaan elementtimenetelmästä ainoastaan ne ominaistuuksudet, jotka kokeellisesti on selvitetty, sillä muilla taajuuksilla ei ole vertailukohtaa. Mitä lähempänä skaalauskerroin on arvoa yksi, sitä lähempänä on elementtimenetelmän ominaistuuksuus kokeellisesti selvitettyä.

Elementtimallin rakenneosien paksuutta varioidaan, jotta nähdään niiden vaikutus eri liikesuuntien ominaistuuksuden arvoihin. Puomin nivelpäässä on käytetty kahden paksuisia elementtejä kuvaamaan vahvistettuja kohtia. Näiden elementtien paksuutta varioidaan antamalla niille paksuutta lisää 5 mm tai vähentämällä paksuutta 5 mm. Paksuuksia varioidaan ristiin, ja yritetään havaita säännönmukaisuutta eri osien paksuuden muuttamisessa. Elementtipaksuuden varioiminen vaikuttaa puomin massaan ja massakeskipisteeseen, minkä arvellaan vaikuttavan myös ominaistuuksuden arvoihin.

Geometriaan tehtyjen yksinkertaistusten vaikutusta tutkitaan mallintamalla elementtimalli, joka vastaa mahdollisimman tarkasti todellista rakennetta. Mallintaminen tehdään SolidWorks-ohjelmalla luodun geometrian avulla, joka tuodaan FEMAP-ohjelmaan. Elementteinä käytetään lineaarisia kuorielementtejä, jotka luodaan

käyttäen hyväksi tuodun tilavuusgeometrian pintoja ja viivoja. Pintojen verkottaminen elementteihin ei ole triviaalia, ja kokematon FEM-mallintaja voi olla ongelmissa risteilevien pintojen ja viivojen kanssa. Huomionarvoisia seikkoja elementteihin verkottamisessa on solmujen yhdistyminen viereisiin solmuihin, geometrisesti epämääräisten elementtien välttäminen, yhtenäinen elementtijako siten, ettei elementtien väleihin jää rakoja ja elementtipaksuuksien huomioiminen luotaessa eri rakenneosia. Malli luodaan siten, että ne puomin osat, joissa on vahvikelevyjä, jaetaan elementteihin, joihin on yhdistetty puomin ja vahvikelevyn paksuus. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että alapinnan kiinnikelevyn kohta mallinnetaan 14 mm paksuilla elementeillä, vahvikelevyjen puomin sivuilla olevat osat mallinnetaan 19 mm paksuilla elementeillä ja puomin yli tulevat osat 15 mm paksuilla elementeillä. Kuva elementtimallin nivelpäästä on esitetty kuvassa 3.9. Elementtejä mallissa on 1050, mikä on hyvin maltillinen määrä tämän kokoluokan tarkkaan elementtimalliin.

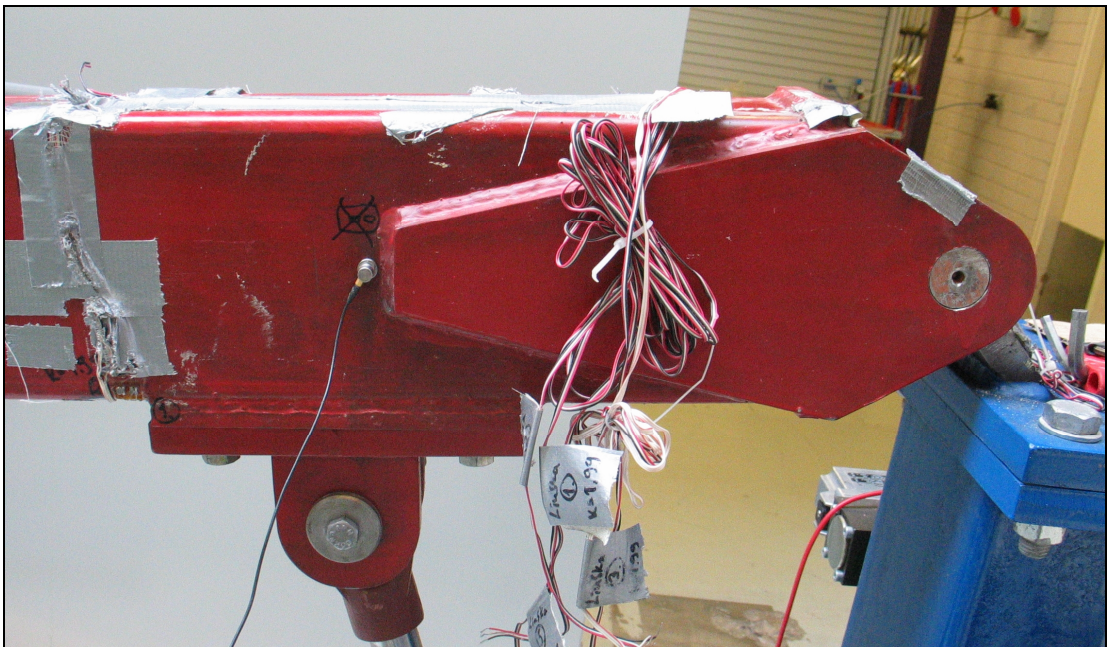


Kuva 3.9. FEMAP-ohjelmalla luotu elementtimalli, joka vastaa mahdollisimman tarkasti todellista rakennetta.

Kaikkien tutkittujen muuttujien vaikutusta arvioidaan kokonaisuutena ja pyritään tarkentamaan elementtimallia siten, että kaikki tutkitut kuusi ominaistajuutta ovat mahdollisimman lähellä kokeellisesti saatuja ominaistajuuksia. Taajuuksia verrataan kuvaajan avulla, jossa jokaista ominaistajuutta verrataan keskenään skaalaamalla elementtimallista saatu tulos kokeellisesti saadulla tuloksella.

3.3.5 Tuetun puomin kokeellinen moodianalyysi

Puomille tehdään kokeellinen moodianalyysi uudestaan, kun se on sen omassa luonnollisessa ympäristössään kiinnitettynä sarananivelellä puominosturin pystypalkkiin sekä nosturin toimilaitteeseen hydraulisynteriin. Kuva puomista kiinnitettynä on esitetty aiemmin kuvassa 3.1. Värähtely on näin ollen estetty puomin nivelpäässä ja puomin alapinnalla vahvikelevyn kohdalla, mihin toimilaitteen pää kiinnittyy, kuten kuvassa 3.10 on esitetty. Sylinteri on lepotilassa, jolloin mäntä lepää mekaanista vastetta vasten, eikä hydraulioöljyn puristuvuudella ole vaimentavaa vaikutusta.



Kuva 3.10. Puominosturin kiinnittyminen pystypalkkiin ja toimilaitteeseen.

Mittaus suoritetaan samalla tavalla kuin aiemmin joustavasti tuetulle puomille suoritettiin. Mittauspisteitä on viisi, vaikka jo ennen mittausta voidaan arvioida, että puomin nivelpäästä ei saada luotettavia tuloksia puomin tukipisteiden välistä, jossa värähtelyn voidaan arvioida olevan olematonta verrattuna muihin mitattaviin pisteisiin. Mittaus suoritetaan, ja tulokset otetaan jälkikäsitteilyyn.

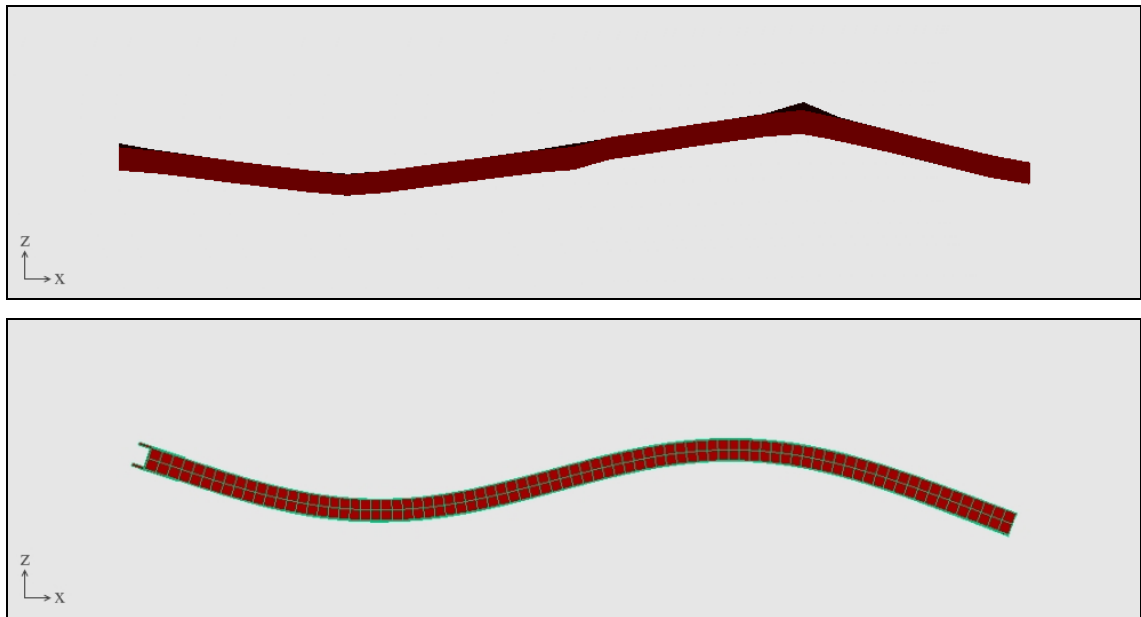
4 SAAVUTETUT TULOKSET JA TULOSEN ANALYSOINTI

Tulokset esitetään asetettujen tavoitteiden mukaisessa järjestyksessä. Tulosten esittäminen on sidottu tekstin taulukoihin ja kuviin sekä liitteisiin, jotka on esitetty työn lopussa. Tulosten esittäminen ja analysointi on jaettu omiin alaotsikoihin.

4.1 Tulokset

Työn päätavoitteena on luoda yksityiskohtainen ohjeistus, jonka avulla kokeellisen moodianalyysin tuloksia voidaan tarkastella havainnollisesti. Ohjeistus on esitetty liitteessä I, ja sen sisältämien kuvien ja selitysten avulla tekniikkaan perehtynyt henkilö pystyy toistamaan tehdyt toimenpiteet tutustuttuaan käytettyihin ohjelmistoihin pintapuolisesti.

Eri menetelmillä saatuja ominaistajuuksia ja -muotoja voidaan tarkastella vertaamalla saatuja tuloksia keskenään, jolloin voidaan arvioida, mitkä seikat vaikuttavat tuloksiin, miksi näin tapahtuu ja mitä johtopäätöksiä niistä voidaan tehdä. Tarkastellaan ensimmäiseksi joustavasti tuetun puomin ominaistajuuksia ja -muotoja. Poimitaan aiemmin esitetystä taulukosta 3.1 kokeellisella moodianalyysillä selvitettäviä ominaismuotoja vastaavat ominaistajuudet ja merkitään ne taulukkoon 4.1, johon merkitään myös kokeellisesti saadut ominaistajuudet. Liitteessä III on esitetty ominaistajuuksia vastaavat ominaismuodot. Elementtimenetelmällä saadut ominaismuodot on esitetty rinnan kokeellisesti selvitettyjen ominaismuotojen kanssa, jotta niiden vertailu olisi helppoa. Muodot on esitetty siten, että ensin on esitetty z-suuntaan heräävät muodot ja sitten y-suuntaan heräävät muodot. Esimerkinomaisesti kuvassa 4.1 on esitetty z-suunnassa heräävä toinen ominaismuoto. Muodoista havaitaan, että ne ovat aaltomaisia muotoja pitkin puomin pituutta. Liikesuuntien ensimmäiset muodot ovat puoliaallon muotoisia, toiset muodot kokoaallon muotoisia ja kolmannet ominaismuodot puolitoista-aallon muotoisia.

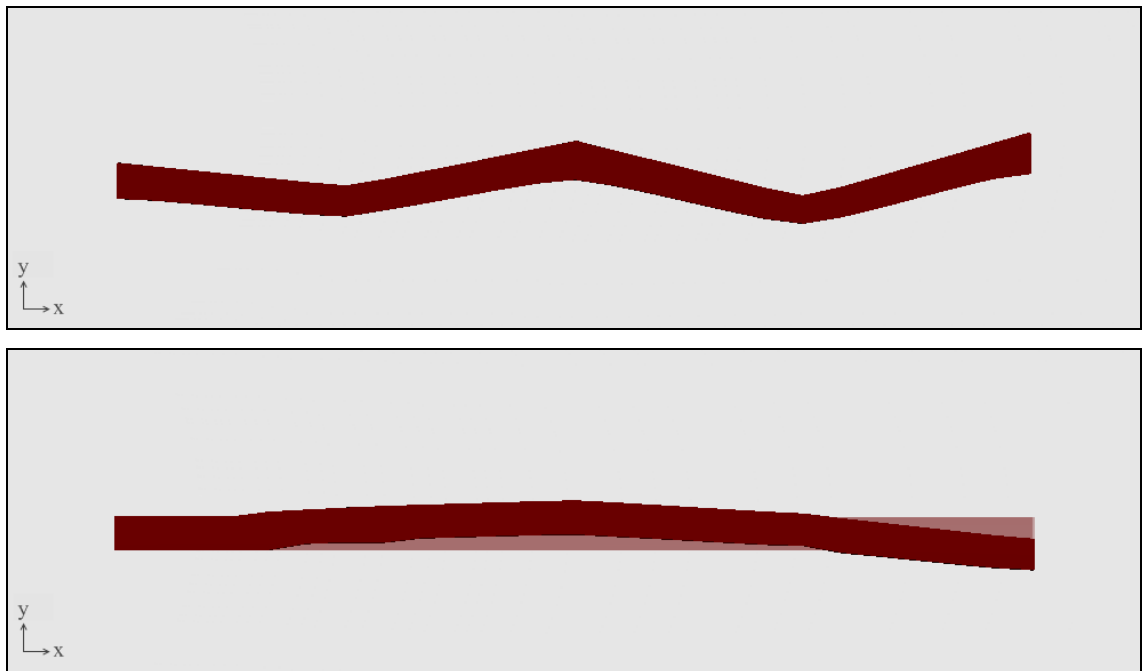


Kuva 4.1. z-suunnassa heräävä toinen ominaismuoto.

Taulukko 4.1. Molempien mitatun liikesuunnan 3 alinta ominaistajuutta ja vastaavat FEM:llä saadut taajuuudet.

suunta	muoto	FEM [Hz]	EMA [Hz]	suht. ero [%]
z	1.	39.04	37.5	4.11
z	2.	110.5	106	4.25
z	3.	214.2	207	3.48
y	1.	52.86	51.3	3.04
y	2.	149.6	145	3.17
y	3.	291.9	284	2.78

Verrataan seuraavaksi joustavasti tuetun ja luonnolliseen ympäristöön kytketyn puomin ominaistajuuksia. Tutkitulla taajuuskaistalla olevat ominaistajuudet merkitään taulukkoon 4.2. Joustavasti tuetun rakenteen ominaismuotoja tarkasteltiin aiemmin ja ne on esitetty liitteessä III. Jäykästi tuetun puomin kokeellisella moodianalyysillä selvitetty ominaismuodot on esitetty liitteessä IV. Liitteessä on ensin esitetty z-suunnan alimmat mitatut ominaismuodot järjestyksessä ja sitten y-suunnan alimmat mitatut ominaismuodot. Esimerkkinä muodoista esitetään kuvassa 4.2 sekä joustavasti että jäykästi tuetun puomin kolmas y-suunnassa heräävä ominaismuoto.



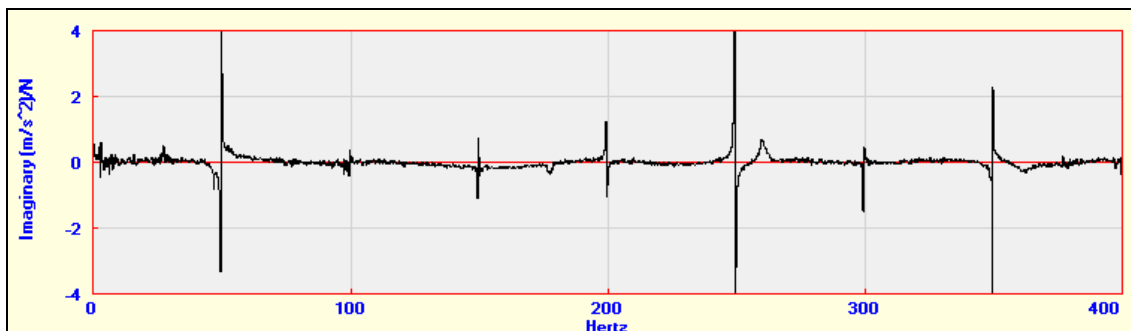
Kuva 4.2. Ylempänä joustavasti tuetun ja alempana jäykästi tuetun puomin y-suunnassa heräävä kolmas ominaismuoto.

Taulukko 4.2. Joustavasti tuetun ja jäykästi tuetun rakenteen tutkittavalla taajuusalueella olevat ominaistaajuudet molemmissa liikesuunnissa.

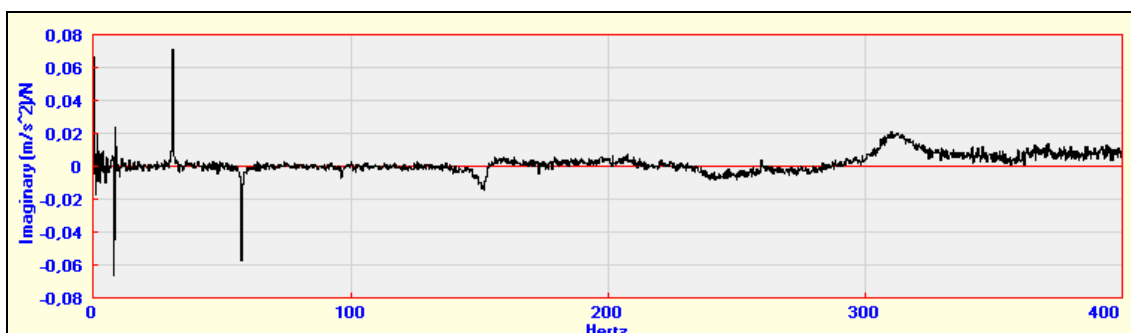
suunta	muoto	joustavasti tuettu [Hz]	jäykästi tuettu [Hz]
z	1.	37.5	3.5
z	2.	106	27.5
z	3.	207	47.3
z	4.	-	99.3
z	5.	-	178
z	6.	-	260
y	1.	51.3	8.5
y	2.	145	31.3
y	3.	284	58
y	4.	-	152

Puomin nivelpäähän asetettujen antureiden taajuusvastefunktioita ei voida käyttää, kuten jo ennen mittausta on arvioitu. Vaste näissä pisteissä on olematon verrattuna muihin pisteisiin, kuten kuvista 4.3 ja 4.4 voidaan todeta. Mittaustulosten huomioon ottamisen sijaan puomin nivelpään mittauspisteet kiinnitetään, jolloin niille on määrätty käyttäytyminen ja niitä voidaan käsitellä mittauspisteiden tavoin. Siten tiedetään

edelleen viiden pisteen käyttäytyminen toistensa suhteen, ja ominaismuotoja saadaan selville viisi, vaikka vain neljän pisteen mittaustulokset otetaan huomioon.



Kuva 4.3. Puomin nivelpäässä puomin sivulta mitattu taajuusvastefunktion kuvaaja.



Kuva 4.4. Puomin nivelpäässä puomin yläpinnalta mitattu taajuusvastefunktion kuvaaja.

Elementtimallin elementtipaksuuksia muutetaan SolidWorks-ohjelmalla tehtyjen eri rakenneosien massatarkastelujen jälkeen. Massatarkastelun jälkeen puomin elementtipaksuus, joka alun perin oli 4 mm, muutetaan 3.9 mm:ksi. Puomin alapinnan vahvikelevyn paksuus jätetään alkuperäiseen 10 mm:iin, sillä suorakulmainen levy voidaan mallintaa suoraan todellista vastaavaksi. Puomin päätylevy ja kiinnikelevyt ovat alun perin 15 mm paksuisia. Yksinkertaistuksessa jätetään huomioimatta kiinnikelevyjen muoto ja levyssä oleva reikä ja kiinnikelevyt oletetaan suorakaiteen muotoisiksi. SolidWorks-ohjelmassa suoritettuna massatarkastelun perusteella elementeille annetaan paksuus 13 mm, jolloin jokainen rakenneosa ja koko puomin massa vastaavat hyvin SolidWorks-ohjelmalla mallinnetun puomin massaa. Myös massakeskipiste on lähes samassa kohdassa rakennetta, kuten taulukossa 4.3 on esitetty. Puomin geometrisiin ominaisuuksiin voidaan olla tyytyväisiä ja arvellaan, etteivät erot

todellisen rakenteen ja elementtimallin geometriassa vaikuta tulosten välillä oleviin eroihin.

Taulukko 4.3. FEMAP-ohjelmassa ja SolidWorks-ohjelmassa käytetyn geometrian massakeskipiste ja massa.

koord. [mm]	SolidWorks	FEMAP
x	1775.94	1794.21
y	73.32	73.39
z	50.00	50.00
massa [kg]	72.68	72.52

Taulukossa 4.1 esitetyissä ominaistuuksissa huomataan selviä eroja elementtimenetelmällä ja kokeellisesti selvitettyjen välillä. Erojen syitä yritetään selvittää muuttamalla eri parametrien arvoja ja tarkastelemalla muutosten vaikutusta ominaistuuksiin. Ensimmäisenä varioidaan jäykkyysominaisuuksia tiputtamalla kimmomodulin arvoa portaittain aina 4 GPa välein. Jäykkyyden vaikutusta arvioidaan liitteeseen V piirretystä pylväsdiagrammista, joka on esitetty kuvassa L5.1.

Seuraavaksi tutkitaan tiheyden muuttamisen vaikutusta kimmomodulin ollessa annettujen materiaaliominaisuuksien mukainen. Tiheyden arvoa nostetaan portaittain $0.2e-9 \text{ tn/mm}^3$. Tiheyden muuttamisen vaikutukset on esitetty pylväsdiagrammissa liitteen V kuvassa L5.2.

Seuraavaan liitteen V kuvaan L5.3 on piirretty kaavio, jossa on varioitu puomin vahvikelevyjä kuvaavien elementtien paksuuksia. Pylväsdiagrammiin on merkitty käytetyt elementtipaksuudet siten, että ensin on puomin alapinnan vahvikelevyvä kuvaavien elementtien paksuus ja sitten puomin päätylevyvä ja sivun kiinnikelevyjä kuvaavien elementtien paksuus. Viimeisenä on esitetty tulokset, jotka on saatu elementtimallista, joka on luotu tarkasti rakennepiirustusten mukaisesti.

Edellisten tulosten perusteella rakenne on optimoitu siten, että kaikki selvitetty ominaistuuksit ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Optimointi tehdään tarkasti mallinnetulle geometrialle, joka itsessään on jo erittäin tarkka tulosten osalta. Ensin

tarkennetaan tiheys siten, että mallin massa vastaa SolidWorks-ohjelmalla luodun geometrian massaa. Seuraavaksi määritetään arvo kimmomodulille haarukoimalla arvo ominaistajuuksien kannalta sopivaksi. Kimmomodulin vaikutuksen tiedetään olevan lineaarinen, jolloin haarukointi on helppo suorittaa. Tarkennetun elementtimallin ominaistajuuksia verrataan taulukossa 4.4 kokeellisesti saatuihin ominaistajuuksiin.

Taulukko 4.4. Optimoidusta elementtimallista ja kokeellisesti saadut ominaistajuudet.

muoto	EMA [Hz]	FEM [Hz]	ero [Hz]
1.	37.5	37.43	0.07
2.	51.3	51.22	0.08
3.	106	106.11	0.11
4.	145	145.23	0.23
5.	207	206.88	0.12
6.	284	284.60	0.60

4.2 Tulosten analysointi

Jos tarkastellaan liitteessä I esitettyä ohjeistusta ominaismuotojen visuaaliseksi tarkastelemiseksi, voidaan todeta sen olevan yksiselitteinen ja kattava. SolidWorks- ja FEMAP-ohjelmilla suoretut rakenteiden mallintamiset on jätetty vähemmälle huomiolle ohjeistuksen osalta, mutta toistaiseksi niitä kumpaakin käytetään opetuksessa LUT:lla, joten ohjelmien käyttäminen ei tuottane ongelmia.

Elementtimenetelmän ja kokeellisen moodianalyysin tuloksia tarkasteltaessa huomataan, että suhteellinen ero ominaistajuuksissa on alimmilla ominaistajuuksilla noin 3-4 % luokkaa. Ero on melko pieni, kun huomioidaan elementtimalliin tehdyt yksinkertaistukset ja ylipäätään ero matemaattisen, täysin laskentaan pohjautuvan analyysin ja kokeellisen todellisten rakenteiden käyttäytymiseen perustuvan menetelmän välillä. Tarkasteltaessa ominaismuotoja liitteestä III huomataan, että ominaismuodot ovat täysin toisiaan vastaavat. Elementtimenetelmällä muodoista saadaan visuaalisesti kauniimminkin käyttäytyviä, sillä jokaiselle rakenteen vapausasteelle on laskettu oma käyttäytyminen. Näin ollen menetelmässä ei ole epäjatkuvia määräämättömiä kohtia ja muodot ovat kauniita jatkuvia aaltoja. Kokeellisesti mitatut

muodot eivät käyttäydy jälkikäsitteilyohjelmassa yhtä kauniisti, sillä mittauspisteitä ja siten pisteitä, joiden käyttäytyminen tunnetaan, on vain viisi kummassakin liikesuunnassa. Loput pisteet on interpoloitu mitattujen pisteiden avulla. Interpoloitujen pisteiden käyttäytyminen ei vastaa täydellisesti todellisia pisteiden käyttäytymistä, mikä nähdään kulmikkaina ominaismuotoina. Kulmikkuus johtuu siitä, että mittauspisteen ympärillä olevat pisteet on interpoloitu useamman pisteen avulla, jolloin pisteen käyttäytyminen on useamman pisteen summa painokertoimet huomioiden. Huolimatta muotojen kulmikkuudesta ja tietystä epätarkkuudesta voidaan kuitenkin todeta, että viiden kokeellisesti mitatun pisteen avulla saatiin kolme alinta ominaismuotoa luotettavasti selvitettyä molemmissa tutkituissa liikesuunnissa.

Verrattaessa joustavan ja tuetun puomin ominaistajuuksia huomataan, ettei jäykästi tuetun puomin ominaistajuuksilla ole minkäänlaista yhteyttä joustavasti tuetun puomin ominaistajuuksiin. z-suunnassa herääviä ominaistajuuksia tutkittavalla taajuusalueella on jäykästi tuetulla puomilla kuusi, kun joustavasti tuetulla puomilla niitä on kolme. Ensimmäinen ominaistajuus herää jo 3.5 hertsin taajuudella, mikä on todella matala ominaistajuuden arvoksi tämänkaltaiselle rakenteelle. Seuraavat taajuudet esiintyvät säännöllisin välein aina tutkitun taajuusalueen ylärajalle saakka. y-suunnassa herää neljä ominaistajuutta tutkitulla taajuuskaistalla, kun joustavasti tuetussa puomissa y-suunnassa herää kolme ominaistajuutta. Taajuuksia tarkasteltaessa ei voida hahmottaa minkäänlaista säännönmukaisuutta eri tavoin tuetun puomin ominaistajuuksissa toisiinsa nähden.

Mittaustulosten jälkikäsitteilyyn kelpuutetaan vain neljän mittauspisteen tulokset kummallakin mitatulla liikesuunnalla. Viidennen pisteen kohdalla värähtely on niin olematonta, että tulokset tiputetaan tarkastelusta pois ja kiinnitetään puomin nivelpään pisteet. Mitattujen taajuusvastefunktioiden ja kiinnitettyjen pisteiden avulla voidaan tarkastella viittä alinta ominaismuotoa, eli tutkitulta taajuusalueelta jää vähintään yksi z-suunnassa heräävää ominaismuotoa selvittämättä mittauspisteiden vähyyden vuoksi.

Tarkasteltaessa tuetun puomin ominaismuotoja liitteestä IV huomataan, että mittauksista ei saada edes viittä alinta ominaismuotoa luotettavasti määritettyä.

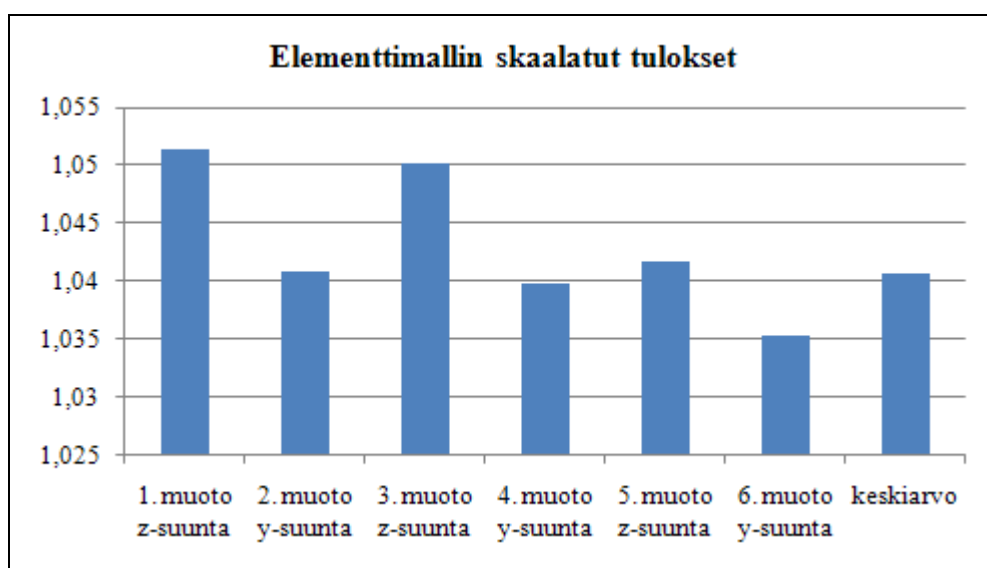
Ensimmäinen ominaisuusmuoto kummassakin liikesuunnassa saadaan määritettyä ja se voidaan katsoa olevan oikein verrattaessa ominaisvärähtelymuodoista tehtyihin universaaleihin taulukoihin eri tuentatavoilla tuettujen palkkien alimmista ominaisuusmuodoista. Seuraavat kaksi ominaisuusmuotoa kummassakin liikesuunnassa ovat hämmentäviä, sillä muodot näyttävät olevan pääpiirteissään samoja, vaikka korkeamman muodon vastaava taajuus on lähes kaksinkertainen matalampaan taajuuteen verrattuna. Muotojen aaltoluvut ovat samat. Tarkempi tarkastelu ja erityisesti muotojen animointi jälkikäsitteilyohjelmassa antaa viitteitä muotojen käyttäytymisen eroista. Alemman ominaisuusmuodon käyttäytyminen on melko symmetristä pituuteen nähden niissä rajoissa, mitkä tuenta antaa, kun taas korkeamman muodon deformaatio näyttäisi keskittyvän enemmän puomin vapaaseen päähän puomin nivelpään ollessa melko värähtelemättömänä. Samaa käyttäytymistä havaitaan jatkettaessa ominaisuusmuotojen tarkastelua pitemmälle. Toiset muodot vaikuttavat koko puomin alueella, kun taas toiset ovat selvästi enempi keskittyneitä puomin vapaaseen päähän. Tästä voidaan päätellä, että neljästä mitatusta ja yhdestä kiinnitetystä pisteestä saadaankin periaatteelliset kuvat useammalle ominaisuusmuodolle, joita teoriassa mittauksista voitaisiin saada. Ongelmallista kuitenkin on, että kahden eri ominaisuusmuodon, joissa on sama aaltoluku, eroja on mahdotonta tunnistaa täysin luotettavasti ilman mittauspisteiden lisäämistä, joten ei voida sanoa, että ominaisuusmuotoja saadaan enemmän kuin mittauksissa on mittauspisteitä.

Tarkasteltaessa puomin nivelpään mittauspisteistä saatuja taajuusvastefunktion kuvaajia huomataan, että puomin sivun mittauspisteessä taajuusvastefunktion kuvaajassa, joka esitettiin kuvassa 4.3, on säännöllisesti 50 hertsin välein epämääräisiä huippukohtia. Häiriö voi olla seurausta esimerkiksi liian lähellä mittalaitteistoa olevasta sähkölaitteesta. Tässä mittauksessa ei kuitenkaan ollut sähkölaitteita puominosturin ympärillä käytössä, ja mittauksissa pidettiin huolta siitä, etteivät sähkölaitteiden kaapelit tai sähköjohdot kulje ristiin antureiden johtojen kanssa. Kuvassa 3.10 esitettiin puomin tuenta ympäristöön. Samasta kuvasta voidaan nähdä myös anturin sijainti puomilla, mikä on suoraan toimilaitteen kohdalla puomin sivulla. Yksi mahdollisista häiriön aiheuttajista voisi olla toimilaitetta pitkin johtuva häiriötaajuus sähköverkosta. Sitä on hankala arvioida, mistä sähkölaitteesta häiriö alun perin johtuu. Häiriön ollessa tarkasti

50 hertsin monikerran taajuuksilla, voidaan olla kuitenkin varmoja siitä, että muutos vasteessa on sähköverkon häiriöstä johtuva.

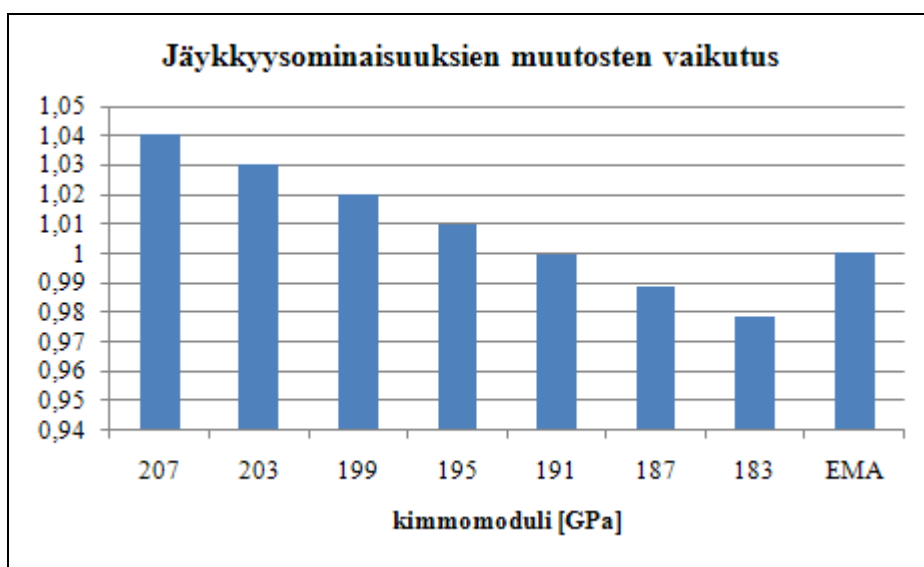
Kuvasta 4.4 nähdään, että taajuusvastefunktion huippukohdat puomin yläpinnalla ovat tuskin havaittavissa. Kuvaajan y-akselilta voidaan lukea vasteen suuruusluokka. Jatkuva värähtely eri taajuuksilla pitkin taajuusvastefunktiota on normaalia kohinaa, josta erottuvat huiput ovat suuruusluokaltaan käytännössä olemattomia koko rakenteen värähtelyn kannalta. On täysin perusteltua tiputtaa tulokset tarkastelusta pois ja kiinnittää pisteet, jolloin niitä voidaan käyttää mittauspisteiden tavoin. Ne on vain määrätty pysyä liikkumatta.

Varioidun elementtimallin tuloksista voidaan ensimmäisenä tarkastella kuvan 4.5 pylväsdiagrammia, jossa on skaalatut elementtimenetelmän tulokset. Materiaaliominaisuudet ovat ne, jotka materiaaliominaisuuksiksi on annettu, eikä geometriaa ole muutettu massatarkennuksen jälkeen. Tutkittujen liikesuuntien ensimmäisten ominaistajuuksien arvot ovat toisia ominaistajuuksia korkeampia verrattuna kokeellisen moodianalyysin tuloksiin ja edelleen toiset ominaistajuudet ovat kolmansia korkeampia. Kaikki elementtimenetelmällä saadut ominaistajuudet ovat kokeellisesti saatuja korkeampia, kuten jo aiemmin esitettiin taulukossa 4.1. Skaalattujen tulosten keskiarvo on noin 4 % korkeampi kokeellisesti saatuja tuloksia.



Kuva 4.5. Alkuperäisen elementtimallin skaalatut tulokset.

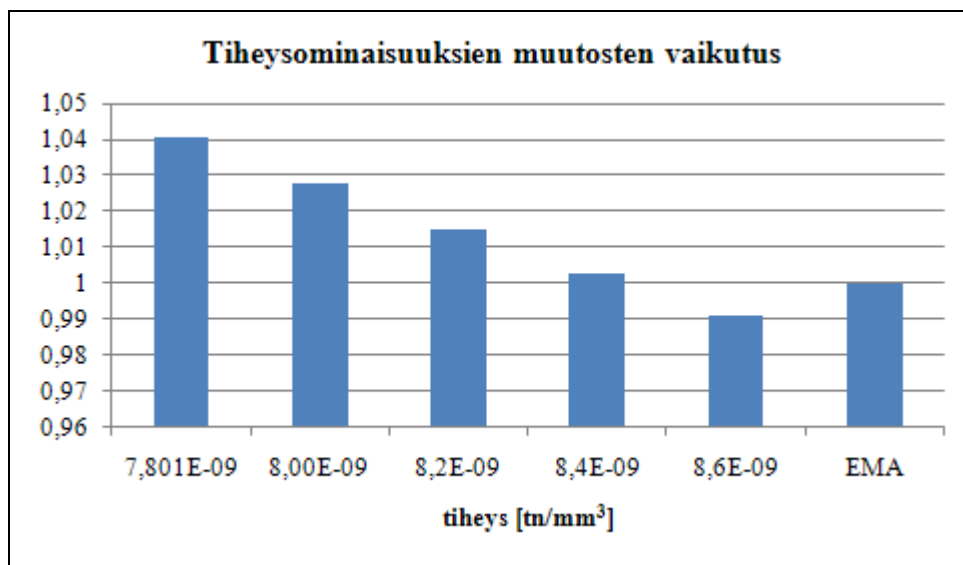
Ensimmäisenä varioidaan jäykkyysominaisuuksia pienentämällä kimmomodulia. Jäykkyysominaisuuksien muuttamisen vaikutusta jokaiseen yksittäiseen ominaistajuuteen voidaan arvioida liitteessä V esitetystä kuvasta L5.1. Kuvassa 4.6 on esitetty pylväsdiagrammi, jossa on esitetty skaalattujen tulosten keskiarvot kimmomodulia muutettaessa. Tiheyden ollessa annettujen materiaaliominaisuuksien mukainen parhaat varioidun mallin tulokset kokeellisesti mitattuihin verrattuna saadaan, kun kimmomodulin arvo on 191 GPa. Huomattavaa on, että jäykkyyden muuttamisella on selvästi lineaarinen vaikutus ominaistajuuksiin, kun koko puomin alueella käytetään samaa materiaalia.



Kuva 4.6. Skaalattujen tulosten keskiarvo kimmomodulia muutettaessa.

Seuraavaksi tarkastellaan, miten tiheyden muuttaminen vaikuttaa kimmomodulin ollessa annettujen materiaaliominaisuuksien mukainen. Tiheyden arvoa nostetaan portaittain $0.2e-9 \text{ tn/mm}^3$, jolloin parhaat tulokset saadaan, kun tiheyden arvo on $8.4e-9 \text{ tn/mm}^3$. Skaalattujen tulosten keskiarvot on esitetty pylväsdiagrammina kuvassa 4.7. Liitteen V kuvassa L5.2 on esitetty pylväsdiagrammi, johon on merkitty jokaisen yksittäisen ominaistajuuden skaalatut tulokset tiheyttä muutettaessa. Jäykkyyden tavoin tiheyden muuttaminen näyttää selvästi vaikuttavan lineaarisesti ominaistajuuden arvoihin. Se, miten järkevää on tiheysominaisuuksien muuttaminen, on hieman kyseenalaista, sillä voidaan varmuudella todeta, että elementtimalli ei vastaa todellista mallia massaominaisuuksien huomattavan muuttumisen vuoksi. Kun geometriaa on

yksinkertaistettu, on sekä jäykkyys- että tiheysominaisuuksia muutettava huomattavasti, jotta ominaistajuudet saadaan vastaamaan kokeellisesti mitattuja. Muutosten suuruus on sitä luokkaa, että elementtimallin muut ominaisuudet, kuten staattiset lujuusominaisuudet, vastaavat tuskin kovinkaan hyvin todellisen rakenteen vastaavia ominaisuuksia.



Kuva 4.7. Skaalattujen tulosten keskiarvo tiheyttä muutettaessa.

Seuraavaan liitteen V kuvaan L5.3 on piirretty pylväsdiagrammi, jossa on varioitu puomin vahvikelevyjä kuvaavien elementtien paksuuksia. Pylväsdiagrammiin on merkitty käytetyt elementtipaksuudet siten, että ensin on puomin alapinnan vahvikelevyä kuvaavien elementtien paksuus ja sitten puomin päätylevyä ja sivun kiinnikelevyjä kuvaavien elementtien paksuus. Diagrammista voidaan havaita, että alapinnan vahvikelevyn paksuudella ei ole käytännössä vaikutusta ominaistajuuksiin. Päätylevyn ja kiinnikelevyjen elementtipaksuudella on sen sijaan huomattava merkitys tuloksiin. Tämä johtuu mitä luultavimmin siitä, että päätylevyn ja vahvikelevyjen elementtipaksuuden muuttamisella on suurempi vaikutus kokonaismassaan, ja massan kasvaminen vaikuttaa suoraan tiheyden muuttamisen tavoin ominaistajuuden arvoihin. Elementtipaksuutta muuttamalla ei kuitenkaan päästä yhtään sen tarkempaan tuloksiin kuin alkuperäisillä elementtipaksuuksilla, sillä ominaistajuuksien erot toistensa suhteen muuttuvat.

Kuvan L5.3 pylväsdiagrammin viimeisenä pylväänä on esitetty ominaistajuudet, jotka saadaan, kun elementtimallista luodaan mahdollisimman tarkasti todellista rakennetta vastaava. Ominaistaajuudet ovat hyvin lähellä kokeellisesti saatuja ominaistaajuuksia, eikä eri ominaistaajuuksien välillä ole samanlaisia eroja kuin yksinkertaistetun geometrian eri ominaistaajuuksissa on toistensa suhteen. Tästä voidaan päätellä, että yksinkertaistetulla geometrialla ei päästä läheskään yhtä tarkkoihin tuloksiin kuin mahdollisimman tarkasti mallinnetulla elementtimallilla, vaikka massaominaisuudet ja massakeskipiste ovat todellista rakennetta vastaavia. Jos ajatellaan geometriaan tehtyjä yksinkertaistuksia verrattuna koko puomin kokoluokkaan, huomataan niiden olevan suorastaan mitättömiä. Nämä pienet erot kuitenkin vaikuttavat suoraan ominaistaajuuksiin ja niiden välisiin eroihin. Jos arvioidaan, muutetaanko kimmomodulia tai tiheyttä lähes 8 %, vai geometria todellista vastaavaksi eikä puututa materiaaliominaisuuksiin, voidaan olla varmoja, että elementtimalli vastaa huomattavasti paremmin todellista, kun muutokset tehdään geometriaan.

Kun halutaan tarkentaa elementtimalli mahdollisimman tarkasti todellista vastaavaksi ominaistaajuuksien perusteella, käytetään mahdollisimman tarkasti mallinnettua elementtimallia, josta saadaan lähellä kokeellisesti mitattuja ominaistaajuuksia jo käytettäessä tiedettyjä materiaaliominaisuuksia. Elementtimallille suoritetaan massatarkastelu, jonka perusteella määritetään tiheys, kun tiedetään mallin tilavuus ja tavoiteltava elementtimallin massa, joka on sama kuin SolidWorks-ohjelmalla luodun geometrian massa. Tiheydeksi saadaan siten $7.83087e-9 \text{ tn/mm}^3$. Seuraavaksi tiputetaan kimmomodulin arvoa gigapascal kerrallaan, arvioidaan tuloksia toistensa suhteen ja valitaan lopulta kimmomoduliksi 205 GPa. Tarkennetun mallin ominaistaajuudet skaalattuna kokeellisesti saaduilla on esitetty liitteen V kuvassa L5.4. Kuvasta huomataan, että suhteelliset erot ovat suurimmillaan noin 0.2 % ja vastaava suurin ero on numeerisesti noin 0.6 Hz. On myös huomattava, että kokeellisesti saadut ominaistaajuudet on esitetty kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella, kun elementtimenetelmästä saadaan tulokset jopa kymmenen merkitsevän numeron tarkkuudella. Jos elementtimenetelmästä saatuja tuloksia tarkastellaan kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella, niiden arvot ovat tismalleen samat kokeellisesti saatujen taajuuksien kanssa. Ominaistaajuuksien voidaan katsoa vastaavan erittäin

tarkasti toisiaan, ja tarkennettuun elementtimalliin voidaan olla erittäin tyytyväisiä. Myös staattisten lujuusanalyyysien voidaan arvioida vastaavan todellisia lujuusominaisuuksia, sillä materiaaliominaisuuksia on muutettu hyvin vähän ja merkittäviä eroja todellisen rakenteen ja elementtimallin välillä ei ole.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn päätavoite oli laatia yksityiskohtainen ohjeistus kokeellisen moodianalyysin tulosten tarkastelemiseksi LUT:lla käytettävissä olevilla ohjelmilla. Mittausten yksinkertaisuudesta, mittaustapahtuman idealisoinnista joustavan tuennan osalta, käytettävistä ohjelmistoista ja teorian kohtalaisesta ymmärtämisestä johtuen päätavoite saatiin täytetyksi vähintään tyydyttävästi. Havainnollisten kuvien ja kuvia täydentävien selitysten avulla tekniikkaan vähänkään perehtynyt henkilö, joka osaa käyttää auttavasti käytettäviä ohjelmia, pystyy suorittamaan esikäsittelyn geometrialle, jota käytetään kokeellisen moodianalyysin mittausten yhdistämisessä ja mitatun datan jälkikäsitteilyn ominaismuotojen havainnolliseksi esittämiseksi. Ohjeistuksen on testannut koneensuunnittelun laboratorion kesätyöntekijä, joka sai ominaismuodot selvitettyä tavoitteiden mukaisesti ilman sen suurempia ongelmia.

Työn toinen tavoite oli tutkia tuennan vaikutusta ominaistajuuksiin ja muotoihin. Tuennalla huomattiin olevan radikaali vaikutus rakenteen ominaisvärähtelyyn. Ominaisajuuksien huomattiin tippuvan huomattavasti, ja siinä, missä joustavasti tuetulle puomille löydettiin kuusi ominaistajuutta tutkitulla taajuuskaistalla, jäykästi tuetulle puomille löydettiin taajuuksia kymmenen. Tämänkaltainen käyttäytyminen on kriittistä silloin, kun rakenteista selvitetään ominaistajuuksia, joita koneiden käytön aikana tulisi välttää. Siksi on oltava huomattavan selvää, mihin mittaustuloksia käytetään, ja jos tutkitaan koneiden käytönaikaisia vältettäviä tai kriittisiä taajuuksia, on tutkittava rakenne tuettava ehdottomasti luonnolliseen asemaan. Tuloksista havaittiin selvästi myös se, ettei tuetun rakenteen ominaismuotojen lukeminen ole läheskään yhtä luotettavaa verrattuna joustavasti tuetun rakenteen ominaismuotojen lukemiseen. Elementtimallin muodostus ja erityisesti reunaehto- arviointi on sattumanvaraista ja vaatisi lisätutkimusta, jotta tuetun puomin kokeellisia tuloksia voitaisiin verrata luotettavasti elementtimenetelmän vastaaviin tuloksiin. Tuetun rakenteen elementtimallin tarkentaminen ei ole hyvä vaihtoehto, sillä jo pelkät reunaehdot voivat aiheuttaa suuria eroja saataviin tuloksiin. Elementtimallin muita ominaisuuksia saatetaan virheellisesti muuttaa, jotta tulokset saataisiin korreloimaan keskenään. Tämä taas aiheuttaisi virheitä muusta laskennasta saataviin tuloksiin, jos mallia on tarkoitus

käyttää värähtelyanalyysin lisäksi esimerkiksi lujuuslaskennassa. Yhteenvetona voidaan todeta, että elementtimallin tarkennuksessa on käytettävä joustavasti tuetun rakenteen kokeellisen moodianalyysin tuloksia, ja käytönaikaisia vältettäviä värähtelyjä tutkittaessa on poikkeuksetta käytettävä luonnollisessa asemassa kytkettynä olevan rakenteen kokeellisen moodianalyysin tuloksia.

Tuetun puomin kokeellisen moodianalyysin tuloksia tarkasteltaessa huomataan selvästi menetelmän puutteet. Ominaisaajuudet saadaan epäilemättä luotettavasti selville, mutta ominaismuotojen tarkastelu ei ole missään määrin tyydyttävää. Siksi onkin tärkeää yhdistää kokeellinen moodianalyysi johonkin toiseen menetelmään, mikä lähtökohtaisesti on aina elementtimenetelmä, jotta kokeellisen moodianalyysin tuloksia voitaisiin luotettavasti tarkastella, ja niiden perusteella tehdä johtopäätöksiä.

On myös huomattava, että kokeellisella moodianalyysillä ei saada selvitettyä rotaatiomuotoja eikä aksiaalisuunnassa herääviä muotoja. Rotaatioherätettä rakenteisiin harvemmin johtuu, mutta tykyttävää aksiaalisuuntaista herätettä syntyy huomattavasti useammin. Aksiaalisuunnassa heräävät ominaismuodot ovat taajuudeltaan korkeita verrattuna normaalin suuntaan herääviin, mutta joissain kohteissa ne tulee oleellisesti ottaa huomioon. Teorian mukaan aksiaalisuunnassa heräävien ominaismuotojen vastaavat ominaisaajuudet saataisiin selville antamalla heräte palkin, levyn tai vastaavan tutkittavan kappaleen päähän aksiaalisuunnassa, mutta tämän tutkiminen jätetään tuleville jälkipolville.

Elementtimallin tarkentaminen huomattiin sangen haastavaksi tehtäväksi, kun käytettiin yksinkertaistettua geometriaa. Jäykkyys- ja tiheysominaisuuksien muuttamisella huomattiin olevan lineaarinen vaikutus ominaisaajuuksiin, mutta ongelmallisia ovat eri ominaisaajuuksien erot kokeellisesti selvitettyihin ominaisaajuuksiin materiaaliominaisuuksien pysyessä vakiona. Myöskään yksinkertaistetun geometrian elementtipaksuuksien muuttamisella tähän ei pystytty siinä määrin puuttumaan kuin alkuperäisenä tavoitteena oli. Elementtipaksuuksien muuttamisella huomattiin olevan jonkinlaista vaikutusta eroihin, mutta selvää lineaarisuutta muutoksilla ei huomattu

olevan siinä määrin, että ominaistajuuksien erot olisi saatu optimoitua mahdollisimman pieniksi paksuuksien muuttamisen avulla.

Tarkasti todellista rakennetta vastaavaksi mallinnettu elementtimalli antoi sen sijaan lähes identtiset tulokset kokeellisesti mitattujen tulosten kanssa. Tuloksissa olevat suhteelliset erot ovat prosenttien kymmenysten luokkaa ja numeeriset erot suurimmillaan hertsien kymmenesosa. Mallista muutettiin tiheys, jotta mallin massa saatiin SolidWorks-ohjelmalla mallinnetun geometrian massaa vastaavaksi. Kimmomodulin arvoa laskettiin 2 GPa, jotta ominaistajuudet saatiin mahdollisimman hyvin vastaamaan kokeellisesti määrättyjä ominaistajuuksia. Kun tiedetään, että jako elementteihin jäykistää mallia todellisesta, voidaan arvioida, että kimmomodulin arvon tiputus noin yhdellä prosentilla tekee mallista jopa tarkemman verrattuna tiedettyjen materiaaliominaisuuksien käyttämiseen. Kyseinen johtopäätös on kuitenkin verrattain hataralla pohjalla, ja lisätutkimusta olisi tehtävä esimerkiksi staattisten lujuustarkastelujen muodossa.

Johtopäätöksenä elementtimallien tutkimisen perusteella voidaan todeta, että yksinkertaisten geometrian avulla saadaan ominaisarvoanalyysistä melko lähellä todellisia ominaistajuuksia olevia taajuuksia, mutta erot ovat silti 3-4 % luokkaa. Erot saataisiin pienemmäksi tarkentamalla materiaaliominaisuuksia, mutta materiaaliominaisuuksia on muutettava huomattavasti, jotta saadaan halutut vaikutukset ominaistajuuden arvoihin. Ominaisuuksien huomattava muuttaminen todennäköisesti vaikuttaisi muihin rakenteelle tehtävien analyysien tulosten tarkkuuteen negatiivisesti. Jos elementtimallia käytetään esimerkiksi kokeellisen moodianalyysin tukena tai mallista halutaan selvittää alimpia ominaismuotoja ja niiden suuntia, voidaan huoletta käyttää yksinkertaistettua geometriaa, jolloin elementtimallin luominen on nopeaa, helppoa ja yksinkertaista. Jos puolestaan halutaan elementtimallista mahdollisimman tarkka, on käytettävä mahdollisimman tarkasti todellista rakennetta vastaavaksi mallinnettua elementtimallia. Sen luomiseen kuluu eittämättä enemmän aikaa kuin yksinkertaisen mallin luomiseen, mutta tulokset kiistatta osoittavat, että käytetty aika on sen arvoista. Tällöin voidaan olla varmoja myös siitä, että mallille tehtävien muiden analyysien tulosten tarkkuus ei heikkene.

Mittausten suorittaminen kuulostaa yksinkertaiselta tapahtumalta, mutta mittauksia suoritettaessa kävi selväksi, ettei niihin pidä suhtautua missään määrin kevytmielisesti. Käytettävät piezosähköiset kiihtyvyyssanturit ovat todella herkkiä kaikenlaisille häiriöille. Mittalaitteiston asetukset ja säädöt on tarkastettava aika-ajoin, jotta varmistutaan siitä, ettei mittauksiin tule itse laitteistosta aiheutuvaa häiriötä. Tämä kävi selväksi mittauksen aikana, kun yhden anturin johto oli lähes irronnut anturista antureiden paikkojen vaihtamisen yhteydessä, minkä jälkeen mittauksissa oli selvästi havaittavaa häiriötä. Toinen mittauksissa havaittu häiriön aiheuttaja oli sähköverkosta aiheutuva häiriö. Sähköverkosta aiheutuvat häiriöt voidaan tunnistaa, kun tiedetään, että sähköverkon taajuus on 50 hertsiä, jolloin häiriö taajuusvastefunktion vasteessa on 50 hertsin tai sen monikerran taajuudella. Sähköverkon häiriö on kuitenkin sikäli hankala, että 50 hertsin monikerran ominaistajuus rakenteessa on yhtä todennäköinen kuin mikä tahansa muu taajuus, joten ei voida aina olla varmoja, onko muutos taajuusvastefunktiossa rakenteen värähtelystä vai sähköverkon häiriöistä johtuvaa.

Jatkossa tämän työn pohjalta ja yleisesti samasta aihepiiristä tutkittavia asioita olisi tuetun rakenteen elementtimallin ja erityisesti reunaehtojen tutkiminen. Tuetun rakenteen kontaktit tulisi ottaa elementtimallissa huomioon siten, että kontaktista aiheutuva paikallinen vaimennus saataisiin selvitettyä ja siten koko elementtimallista saataisiin luotettavampi. Jo aiemmin mainittiin aksiaalisuuntaisten ominaistajuuksien tutkiminen jatkokehitysideana, jota voitaisiin laajentaa antamalla tutkittavalle rakenteelle esikivistystä tai -jännitystä, jonka vaikutuksen alla normaalin suuntaisia ominaistajuuksia tutkittaisiin. Jotta ei tehtäisi liian hätäisiä johtopäätöksiä, olisi tässä esitetyn yhden esimerkkirakenteen tueksi otettava useampia tutkittavia rakenteita käsittelyyn. Kokeellisen moodianalyysin menetelmistä jatkossa olisi mielenkiintoista tutkia enemmän laserin antamia mahdollisuuksia, jotka tässä työssä sivuttiin maininnalla.

Elementtimallin tarkentamisessa huomattiin, että jäykkyysominaisuuksien muuttamisen vaikutus oli lineaarista, kun koko rakenteen alueella käytettiin samaa materiaalia. Usein, kun tarkennetaan elementtimallia kokeellisen moodianalyysin tulosten avulla, on

kysymys siitä, että todellisessa rakenteessa on määrittämättömiä ominaisuuksia, jotka halutaan selvittää. Määrittämättömät ominaisuudet ovat esimerkiksi materiaalin jäykkyys, jos materiaalina käytetään sekoitemateriaaleja tai laminoituja rakenteita tai vastaavia, joille ei yksinkertaisesti voida määrittää yksiselitteisiä jäykkyysominaisuuksia. Jatkotutkimusta voitaisiin tehdä rakenteelle, jossa käytetään esimerkiksi kahta materiaalia, joista toisen jäykkyysominaisuuksia ei tunneta. Jatkotutkimuksessa voitaisiin keskittyä siihen, ovatko ominaistajuuden arvot edelleen lineaarisesti riippuvia, kun vain toisen rakenteessa käytetyn materiaalin jäykkyysominaisuuksia muutetaan.

Kokeellisen moodianalyysin tuloksien perusteella voitaisiin tarkentaa elementtimallia suoraan kehittämällä algoritmi, joka laajentaisi analyysistä saatavan datan siihen muotoon, että sitä voitaisiin verrata elementtimallin dataan. Se vaatisi kuitenkin jonkinlaisen yhteensopivuuden ohjelmistojen välillä, ja olisi sikäli haastava tutkimuskohde. Nyt käytetyssä kokeellisen moodianalyysin jälkikäsitteilyohjelmistossa on optiona elementtimallin ja ominaisvärähtelyanalyysin tekeminen sekä mallin tarkentaminen kokeellisen moodianalyysin tulosten avulla automaattisesti optimoimalla eri parametrejä käyttäjän antamissa rajoissa. Tämän lisäpaketin kustannukset olisivat kuitenkin olleet huomattavat, josta voidaan mainita sen verran tarkemmin, että ohjelmiston tarjoajan kotisivuilla on saatavissa hinnasto, josta ohjelmistopakettin päivittämiseksi voidaan laskea kustannusarvio kymmenissä tuhansissa US-dollareissa.

LÄHDELUETTELO

Avitabile P. 2007. Experimental Modal Analysis, a Simple Non-Mathematical Presentation. University of Massachusetts Lowell. 15 s.

Cook R. D. 1981. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. John Wiley & Sons. 537 s.

Craig R. & Kurdila A. 2006. Fundamentals of Structural Dynamics. John Wiley & Sons. 728 s.

Dossing O. 1988. Structural Testing, Part 2: Modal Analysis and Simulation. Brüel & Kjaer. 54 s.

Ewins D. J. 1984. Modal Testing: Theory and Practice. John Wiley & Sons Ltd. 1984. 269 s.

Friswell M. I. & Mottershead J. E. 1995. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Kluwer Academic Publishers. 286 s.

Inman D. 2001. Vibration Engineering. Prentice Hall. 621 s.

Kainulainen J. 1987. Kokeellinen Moodianalyysi -luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 127 s.

Maia N. & Silva J. 1997. Theoretical and Experimental Modal Analysis. John Wiley & Sons. 468 s.

McConnell K. 1995. Vibration Testing: theory and practice. John Wiley & Sons. 606 s.

ME'scopeVES 5.0. 2008. Tutorial Manual, Volume IB – Options. Vibrant Technology. 155 s.

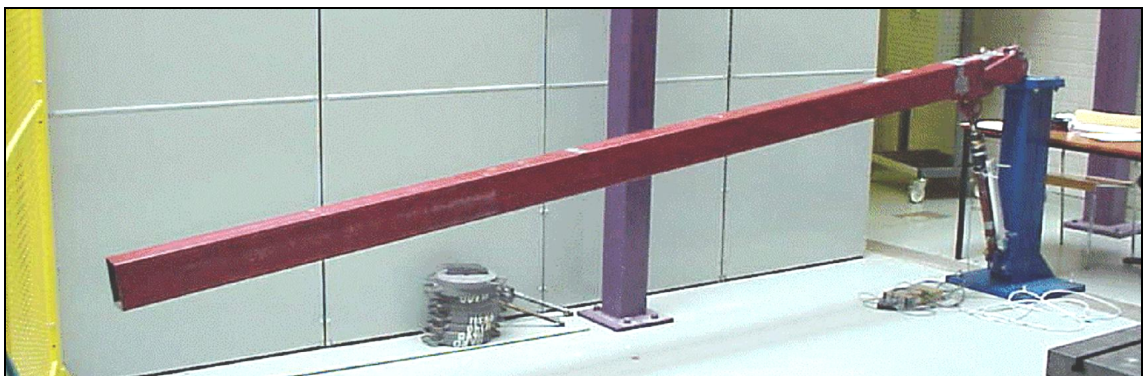
Pennala E. 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtelyt. Otatieto. 314 s.

Stanbridge A. B. & Ewins D. J. 1999. Modal Testing Using a Scanning Laser Doppler Vibrometer. Imperial College of Science Technology and Medicine. 15 s.

von Herten R. 2008. Kompleksimuodot, bi-ortogonaalisuus ja yleinen viskoosi vaimennus. Rakenteiden Mekaniikka Vol. 42, Nro 4. 24 s.

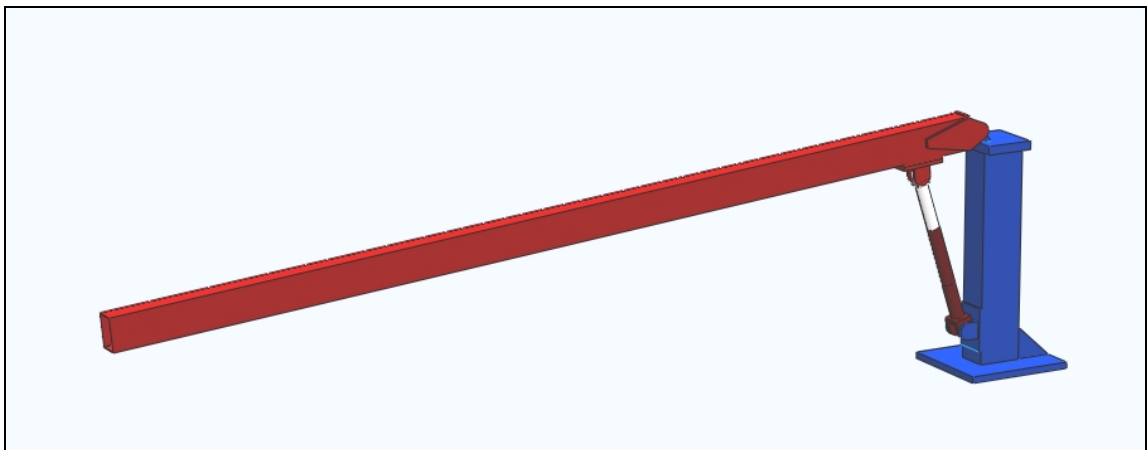
MITTAUKSEN SUORITTAMINEN ASKEL ASKELEELTA

Liitteessä esitetään yksityiskohtainen kuvaus siitä, miten kuvassa L1.1 esitetystä LUT:n älykkäiden koneiden laboratorion puominosturin puomista voidaan tarkastella kokeellisesti selvitettyjä ominaismuotoja visuaalisesti. Selvitystä tuetaan kuvin ja selityksin siten, että lukija pystyy toistamaan selvitystyön helposti samoilla ohjelmilla, joita on käytetty tämän selvityksen tekemisessä.

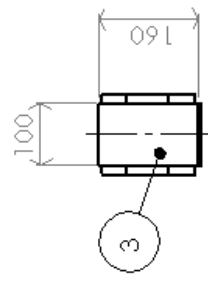
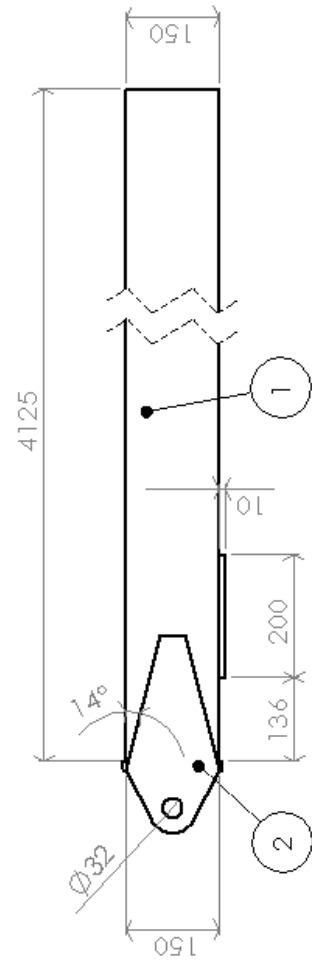
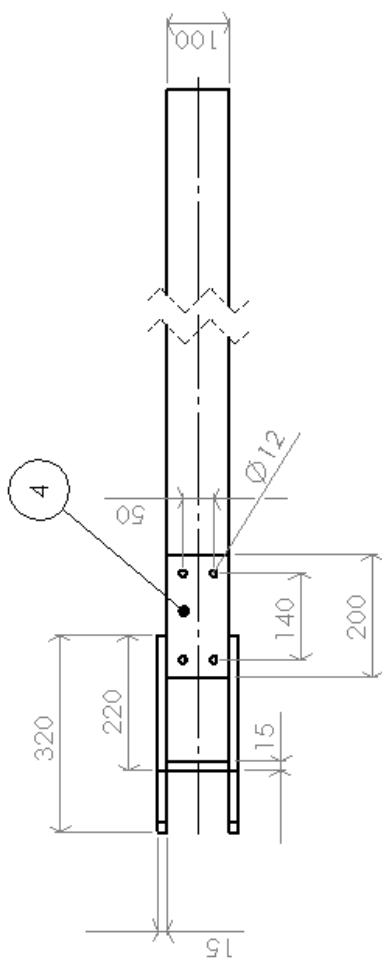


Kuva L1.1. LUT:n älykkäiden koneiden laboratorion puominosturi.

Selvittämisen perustana ovat puominosturin rakennekuvat, jotka on esitetty tämän liitteen sivulla 2. Rakennekuvien pohjalta rakenne mallinetaan SolidWorks-ohjelmalla mahdollisimman tarkasti. Kuvassa L1.2 on esitetty koko puominosturin SolidWorks-malli, josta selvityksessä tarkastellaan vain nosturin puomia.



Kuva L1.2. SolidWorks-malli puominosturista.



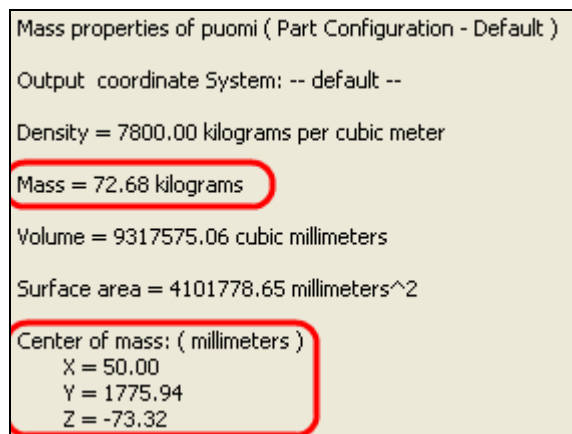
Materiaaliominaisuudet	Fe 510
kimmomoduli	207 000 MPa
kuroutumisvakio	0,3
tiheys	7801 kg/m ³

nro	nimike	dimensiot	mat.	kpl
1	paikki	150x100x4x125	Fe510	1
2	kiinnikelevy	320x150x15	Fe510	2
3	päätylevy	160x100x15	Fe510	1
4	vahvikelevy	200x100x10	Fe510	1

1 2 3 4 5

Rakenteen mallintaminen SolidWorks-ohjelmalla

Selvityksessä oletetaan, että sen seuraajalla on tekniikan perustiedot ja rakenteiden mallinnus rakennekuvien pohjalta SolidWorks-ohjelmalla ei tuota ongelmia. Joihinkin yksityiskohtiin annetaan tarkemmat ohjeet toimintojen suorittamiseksi. Kun 3D-rakenne on mallinnettu, annetaan sille materiaaliominaisuudet. Uutta materiaalikorttia ei tarvitse täyttää, sillä ollaan kiinnostuneita vain rakenteen massasta, joten valitaan materiaaliksi esimerkiksi **Cast Carbon Steel**, jonka tiheys on 7800 kg/m^3 . Kun materiaali on määritetty, tarkastetaan puomin paino. Paino voidaan tarkastaa pitkin tiedostopolkua **Tools – Mass Properties...** josta voidaan lukea massatiedot, jotka on esitetty kuvassa L1.3. Jos arvot ovat grammoina kuutiomillimetrissä, voidaan [**Options**]-valikosta muuttaa yksikkötiedot kilogrammoiksi kuutiometrissä. Jokaisen yksittäisen puomin rakenneosan massan voi tarkastaa samalla tavalla tekemällä oman **part**-tiedoston jokaisesta puomin rakenneosasta ja määrittämällä materiaaliominaisuudet.



Kuva L1.3. SolidWorks-ohjelmalla luodun koko puomin massatiedot ja massakeskipisteen koordinaatit.

Kokeellisen moodianalyysin suunnittelu

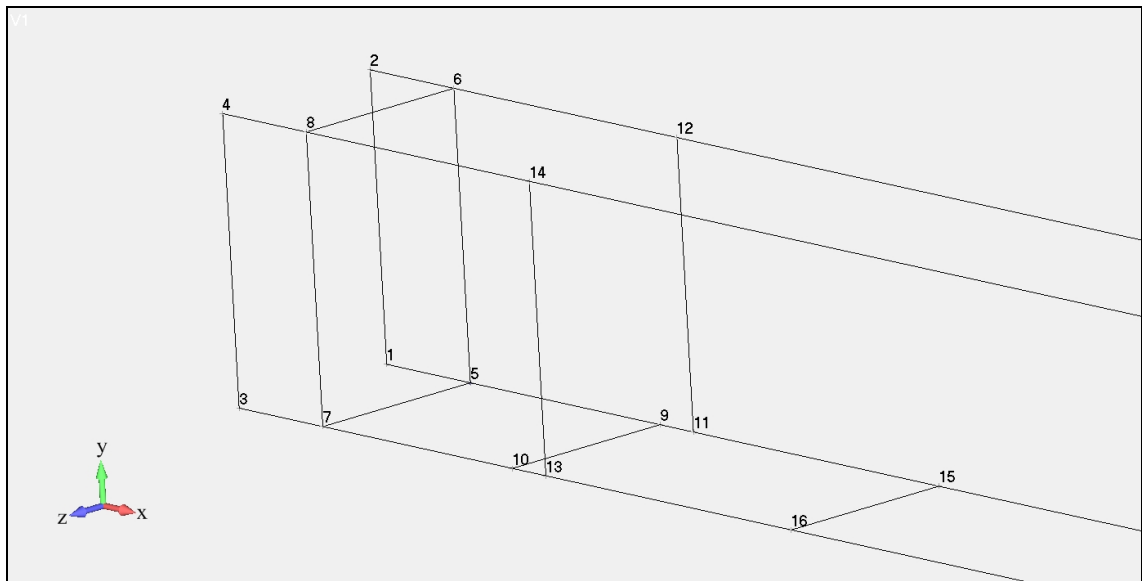
Seuraavaksi siirrytään FEMAP-ohjelmaan, jossa tehdään elementtimalli rakenteesta, josta tutkitaan 20 alinta ominaismuotoa. Ominaismuotoja tarkastellaan sillä silmällä,

että voidaan valita hyvät kokeellisen moodianalyysin mittauspisteet. Ominaismuotojen lisäksi tarkastellaan ominaistajuuksia, jotta voidaan rajata tutkittava taajuusalue mielenkiintoisille taajuuksille. Elementtirakenteen mallintamisen esittämisessä oletetaan, että lukijalla on perustiedot FEMAP-ohjelman käyttämisestä ja analyysin seuraaminen ja toisto onnistuu ilman jokaisen mallinnusvaiheen tarkempaa kuvausta.

Geometriaa yksinkertaistetaan todellisesta mallista siten, että yhdellä puomin sivutahkolla on geometrian apupisteitä vain yhdellä viivalla. Yhteensä geometriapisteitä on 20 kappaletta, ja niillä on taulukossa L1.1 esitetyt koordinaatit. Pisteet yhdistetään viivoilla kuvassa L1.4 esitetyllä tavalla siten, että jokainen peräkkäinen piste yhdistetään seuraavaan. Viivoista muodostetaan pintoja **Boundary Surfaces** -komennon avulla. Pinnat luodaan jokaiselle yksittäiselle viivojen muodostamalle alalle, joten palkin yläpinnalla on yksi pinta ja muilla pinnoilla kolme kullakin.

Taulukko L1.1. Geometriapisteiden koordinaatit FEMAP-mallissa

ID	x	y	z
1	-60	0	0
2	-60	150	0
3	-60	0	100
4	-60	150	100
5	0	0	0
6	0	150	0
7	0	0	100
8	0	150	100
9	136	0	0
10	136	0	100
11	160	0	0
12	160	150	0
13	160	0	100
14	160	150	100
15	336	0	0
16	336	0	100
17	4125	0	0
18	4125	150	0
19	4125	0	100
20	4125	150	100

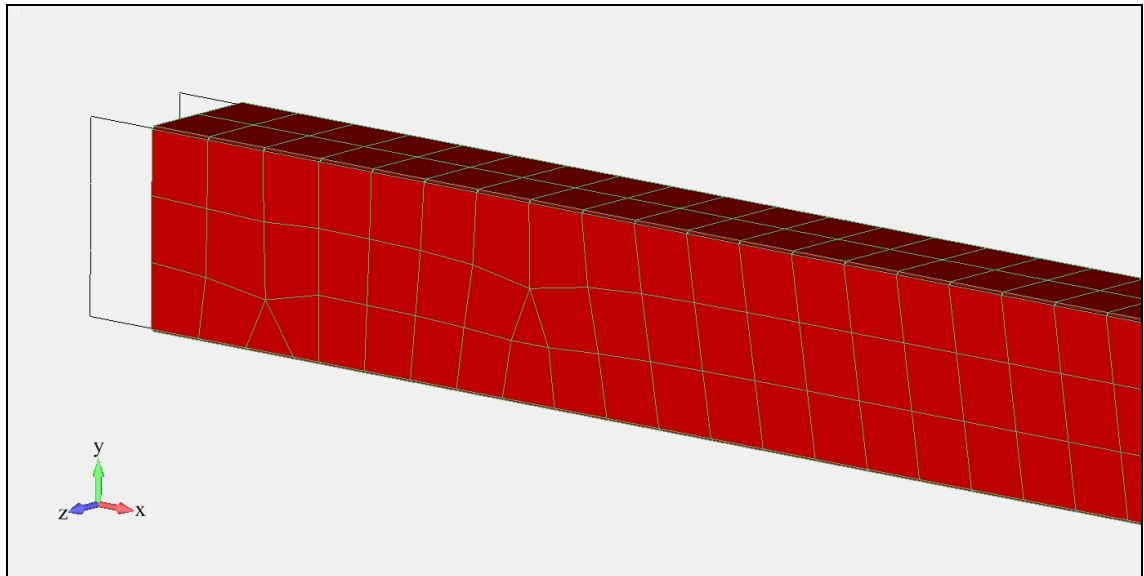


Kuva L1.4. Pisteet ja viivat puomin mallintamiseksi FEMAP-ohjelmassa.

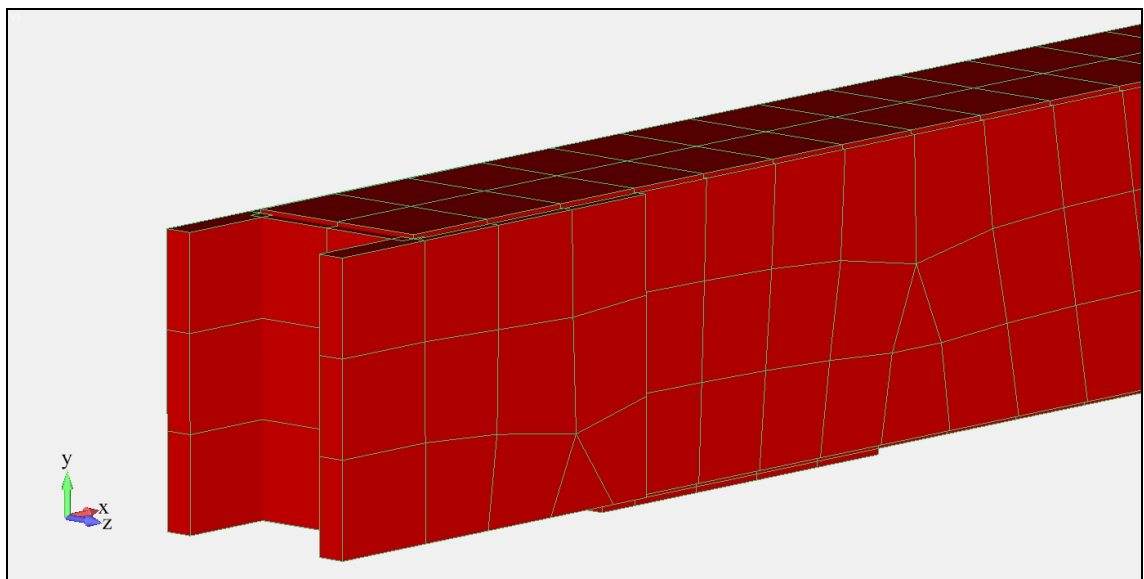
Seuraavaksi määritetään rakenteen materiaalikortti, johon määritetään kimmomoduli $207\,000$ ($=\text{N}/\text{mm}^2$), kuroutumisvakio 0.3 ja tiheys $7.801\text{e-}9$ ($=\text{tn}/\text{mm}^3$). Geometriassa käytettiin millimetrejä, joten materiaaliominaisuudet on annettava millimetrijohdannaisina yksikköinä. Elementtityypiksi valitaan lineaarinen laattaelementti (**Plate**). Luodaan kolme eripaksuista elementtityyppiä, joiden paksuudet ovat 4 mm, 10 mm ja 15 mm. 4 mm paksu elementtityyppi on puomin elementteihin, 10 mm paksu elementtityyppi on alapinnan vahvikelevyn elementteihin ja 15 mm paksu elementtityyppi on vahvikelevyjen ja päätylevyn elementteihin.

Seuraavaksi määritetään elementtikoko pinnoilla 50 mm:ksi. Sen jälkeen aletaan verkottaa pintoja. Ensin verkotetaan puomi 4 mm paksuilla elementeillä, jota havainnollistetaan kuvassa L1.5. Sitten verkotetaan 10 mm paksu vahvikelevy puomin alapinnalla. Elementit luodaan 4 mm paksujen elementtien päälle, jolloin kohdassa on kaksi elementtikerrosta päällekkäin. Samoin verkotetaan vahvikelevyt puomin sivuille 15 mm paksuilla elementeillä siten, että puomin sivuilla olevat osat luodaan 4 mm paksujen elementtien päälle. Kun kaikki elementit on luotu, yhdistetään päällekkäiset solmut **Tools - Check - Coincident nodes...** -tiedostopolkua pitkin. Luotua elementtimallia voidaan tarkastella oikeilla elementtipaksuuksilla laittamalla asetus päälle **View Options** -valikosta, (pikavalinta **F6**-näppäimestä - **Element** -

Orientation/Shape - 1..Show Fiber Thickness), jolloin malli näyttää kuvassa L1.6 esitetyn kaltaiselta. Tarkistetaan vielä mallin massatiedot (**Tools - Mass Properties - Mesh Properties...**), jotka saadaan tonneina, sillä tiheyden määrittämisessä käytettiin tonneja kuutiomillimetreissä. Mallin massaksi saadaan noin 76 kg, mikä poikkeaa SolidWorks-mallista noin kolme ja puoli kilogrammaa.

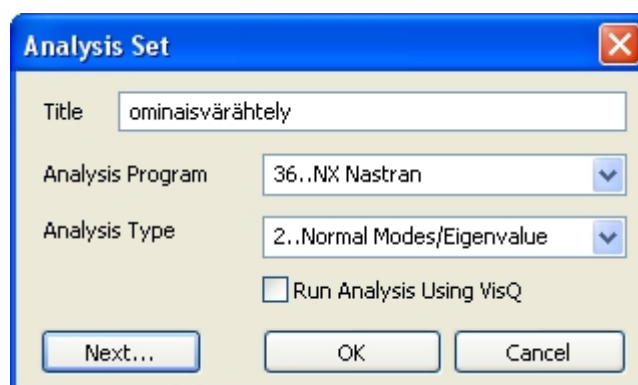


Kuva L1.5. 4 mm paksuilla laattaelementeillä verkotetun puomin malli.

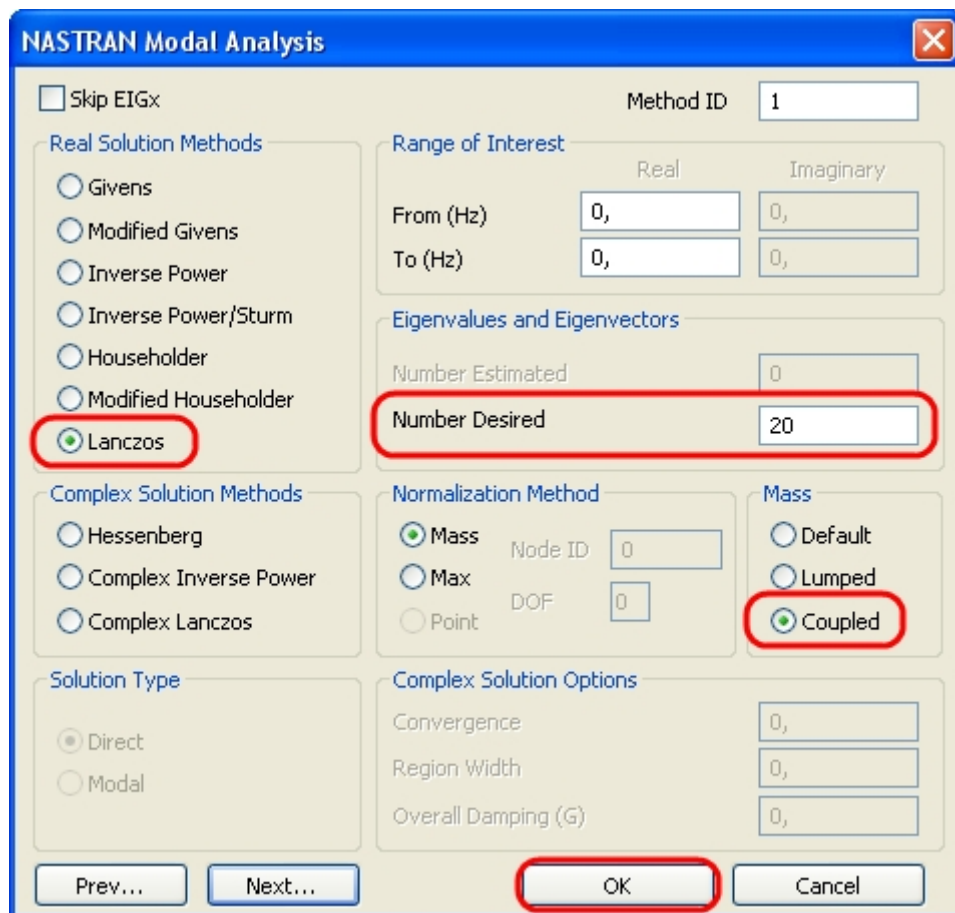


Kuva L1.6. Eri paksuisilla laattaelementeillä verkotetut vahvikelevyt ja puomi.

Puomista selvitetään 20 alinta ominaismuotoa, joiden perusteella suunnitellaan kokeellisen moodianalyysin mittaustapahtuma. Ominaisaajuuksien ja -muotojen perusteella määritetään mittauspisteiden paikat puomilla. Mallinnetulle puomille suoritetaan ominaisarvoanalyysi. Analyysityyppi ja analyysin oletusvalinnoista poikkeavat valinnat tehdään pitkin tiedostopolkua **Model - Analysis...** Aukeavasta ikkunasta klikataan **New...**-painiketta, jolloin aukeaa uusi ikkuna, joka on esitetty kuvassa L1.7. Ikkunaan voidaan määrittää analyysille otsikko sekä valita käytettävä ratkaisija ja analyysityyppi. Otsikoksi annetaan esimerkiksi ”ominaisvärähtely”, ratkaisijana käytetään oletusratkaisijaa, joka on **36..NX Nastran** ja analyysityypiksi valitaan **2..Normal Modes/Eigenvalue**. Seuraavaksi klikataan **Next...**-painiketta, josta päästään valitsemaan vapaasti analyysin eri ominaisuuksien vaihtoehtoja. **Next...**-painiketta painetaan viisi kertaa, jolloin näkyvissä on kuvassa L1.8 esitettävä ikkuna. Ikkunan valintaruutuihin muutetaan **Eigenvalues and Eigenvectors** -alaotsikon alle **Number Desired** -valintaruutuun 20, mikä on ominaismuotojen määrä, joka analyysistä halutaan. **Mass**-alaotsikon alla valitaan massamatriisinmuodostamistapa, joksi valitaan **Coupled**, joka on konsistentin- ja lumped-massamatriisin lineaarikombinaatio. Analyysityyppinä on oletuksena Lanczosin menetelmä, jolla saadaan tarkat ja hyvät tulokset nopeasti. Muita ominaisuuksia ei tarvitse muuttaa, ja valintaikkuna voidaan kuitata **OK**-painikkeesta pois, ja analyysi voidaan suorittaa, joko analyysi-ikkunan **Analyze**-painikkeesta tai työkalupalkin painikkeesta, jossa on kaksi keltaista hammasratasta.



Kuva L1.7. Analyysityypin ja ratkaisijan valintaikkuna.



Kuva L1.8. Analyysin valintaikkuna, johon määritetään haluttu ominaisuutojen määrä, massamatriisinmuodostusmenetelmä ja ratkaisumenetelmä.

Geometrian esikäsittely

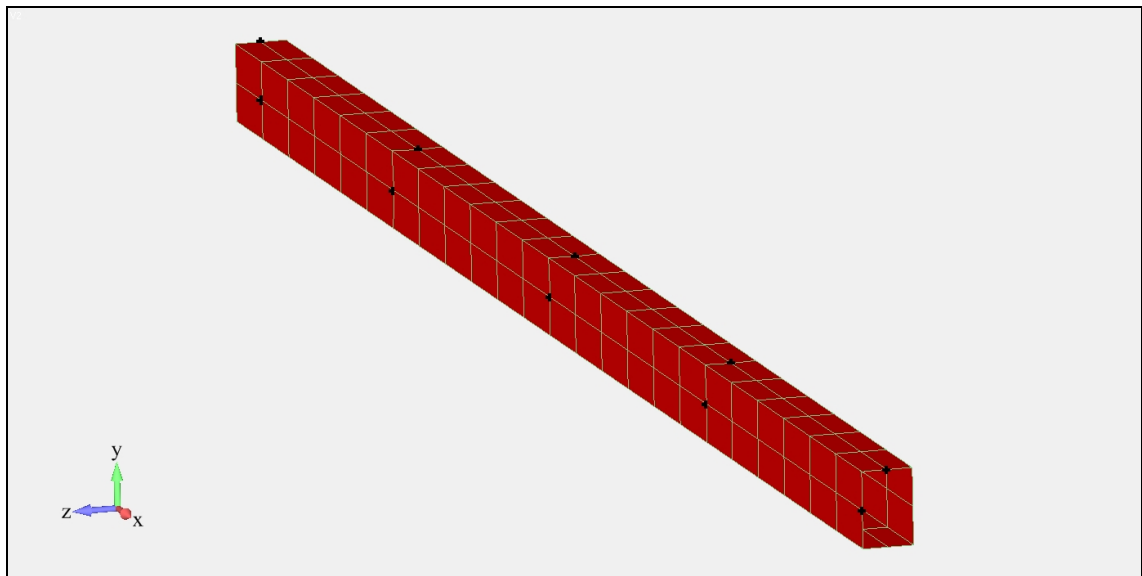
Mittausten tarkastelemista varten tarvitaan geometria, joka tuodaan kokeellisen moodianalyysin jälkikäsitteijänä toimivaan ME'scopeVES-ohjelmaan. Malli luodaan FEMAP-ohjelmalla luomalla yksinkertaistettu puomin geometria kahdeksalla pisteellä, jotka yhdistetään viivoilla ja luodaan pinnat viivojen välille **Boundary Surfaces**-komennolla. Pisteiden koordinaatit on esitetty taulukossa L1.2. Elementtityyppinä käytetään yksikönpaksuista laattaelementtiä, jolle ei tarvitse määrittää materiaaliominaisuuksia. Pinnat jaetaan siten, että jokaisella pitkällä sivulla on 24 elementtiä ja jokaisella lyhyellä sivulla kaksi elementtiä. Geometriaan määritetään edellä mainitut mittauspisteet luomalla pisteet vastaaviin kohtiin, jotka on esitetty taulukossa L1.2. Elementtijako on toteutettu siten, että hyvin lähellä jokaista määritettyä

mittauspistettä on solmukohta. Solmut siirretään määrättyihin mittauspisteisiin, sillä jälkikäsitteilyohjelmisto tunnistaa elementtimallin solmut pisteiksi, eikä se tunnista pisteitä lainkaan. Solmut siirretään tiedostopolkua **Modify - Edit - Node..** pitkin, josta siirretään solmut määrättyihin mittauspisteisiin. Malli-ikkunaa voi zoomata pikanäppäimellä F7 tai työkalupalkin Zoom-painikkeesta, jolloin aukeaa ikkuna, jossa määritetään ikkunan yläkulman piste, ja ristikulmaan alakulman piste klikkaamalla näyttöruudulta haluttuja pisteitä. Pikanäppäintä F7 käytettäessä valinta pitää vielä kuitata **OK**-painikkeesta. Solmujen siirtäminen tapahtuu siten, että ensin klikataan solmua, joka halutaan siirtää, ja painetaan **OK**-painiketta. Seuraavaksi valitaan **Methods**-painikkeen takaa löytyvästä valikosta **On Point** ja valitaan piste, johon solmu halutaan siirtää ja kuitataan **OK**-painikkeella. Toimenpide toistetaan jokaiselle pisteelle, kunnes kaikki solmut on yhdistetty mittauspisteisiin. Valmis malli näyttää hyvin yksinkertaiselta palkilta (kuva L1.9). Malli tallennetaan tiedostopolkua **File - Export - Femap Neutral...** pitkin, jolloin malli tallennetaan .NEU-muotoon, joka on jälkikäsitteilyohjelmiston tukema tiedostomuoto. Tallennettaessa mallia, ohjelma kysyy, mitä siitä halutaan tallentaa. Aukeava ikkuna, joka esitetään kuvassa L1.10, voidaan kuitata **OK**-painikkeella oletusasetuksin, vaikka tarvittavia tietoja ovat vain geometriaominaisuudet.

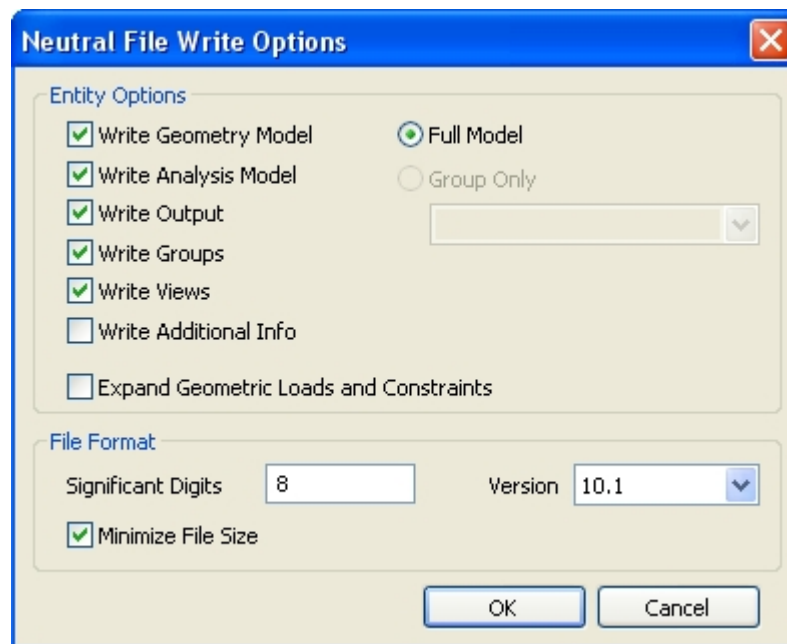
Taulukko L1.2. Yksinkertaistetun geometrian pisteiden koordinaatit ja mittauspisteiden koordinaatit.

piste	x	y	z
1	0	0	0
2	0	150	0
3	0	0	100
4	0	150	100
5	4125	0	0
6	4125	150	0
7	4125	0	100
8	4125	150	100

M1	0	150	50
M2	1040	150	50
M3	2070	150	50
M4	3100	150	50
M5	4125	150	50
M6	230	75	100
M7	1040	75	100
M8	2070	75	100
M9	3100	75	100
M10	4125	75	100

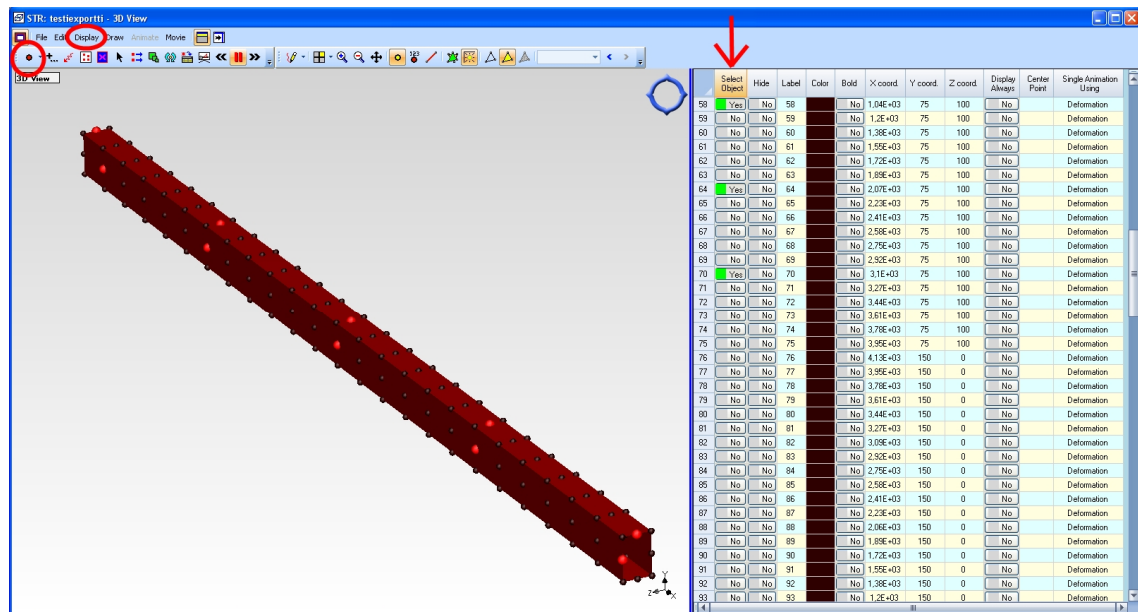


Kuva L1.9. FEMAP-ohjelmalla luotu malli puomista, joka viedään jälkikäsitteilyohjelmaan. Mittauspisteet on korostettu mustalla.



Kuva L1.10. Valintaikkuna, jossa voidaan määrittää tallennettavat ominaisuudet tallennettaessa malli .NEU-muotoon.

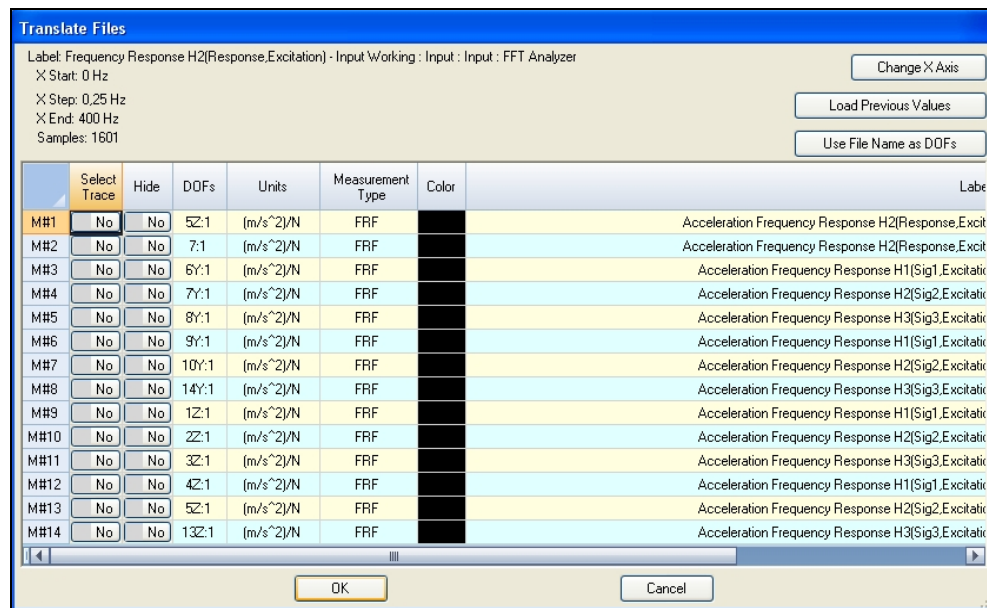
Malli tuodaan seuraavaksi ME'scopeVES-ohjelmaan. ME'scope on erikoiskäyttöön tarkoitettu ohjelma, eikä lukijalta oleteta esitietoja ohjelman käyttämisestä vaan kaikki toiminnot selitetään yksityiskohtaisesti. Ohjelmassa on avattava ensin uusi projekti (**Project - New...**), jotta voidaan tuoda geometria toisesta ohjelmasta. Seuraavaksi tuodaan FEMAP-ohjelmassa luotu geometria jälkikäsittelyohjelmaan (**File - Import - Structure...**). Mallia voidaan käänellä ja zoomata **Display - View Control** -valikon alta. Nuolien lisäksi mallia voi pyörittää nuolia ympäröivästä renkaasta. Mallia voidaan käänellä myös hiirellä ykköskorva alas painettuna ja zoomata rullasta. Mallin pyörittely ohjelmassa on varsin hankalaa aluksi. Pyöritellään malli samaan orientaatioon FEMAP-ohjelmassa esitetyn mallin kanssa, jolloin positiivinen y-suunta on ylöspäin, positiivinen z-suunta käyttäjältä katsottuna puomista vasemmalle ja positiivinen x-akseli pitkin puomia kohti käyttäjää. Malli-ikkunan työkalupalkin äärimmäisenä vasemmalla olevasta alasetoivalikosta saadaan näkyville mallissa olevat pisteet, josta voidaan etsiä mittauspisteet ja korostaa ne näkyviin **Select Object** sarakkeesta tai klikkaamalla pistettä mallin geometriasta Ctrl-näppäin pohjassa. Mittauspisteiden korostus kannattaa tehdä, sillä niitä tarvitaan yhdistettäessä mittaustietoa mittauspisteisiin. Malli näyttää nyt kuvassa L1.11 esitetyn kaltaiselta.



Kuva L1.11. FEMAP-ohjelmasta tuotu malli puomista, jossa kokeellisen moodianalyysin mittauspisteet on korostettu.

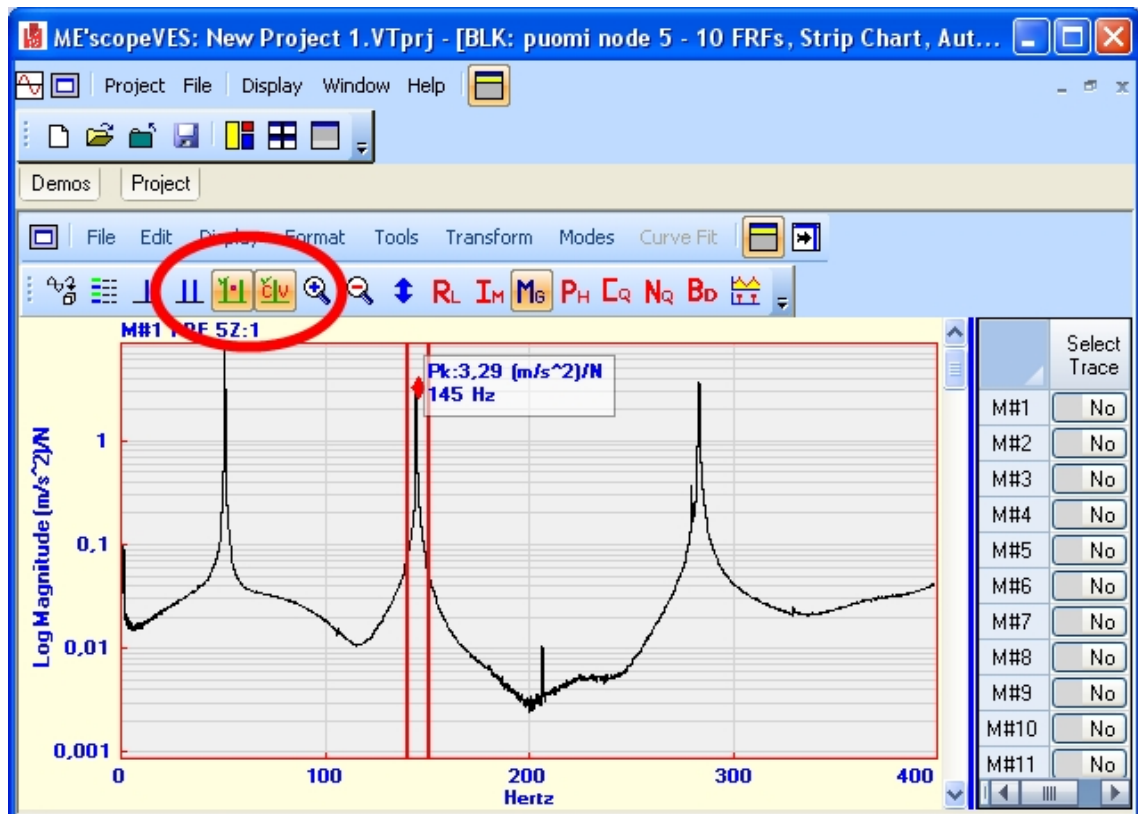
Mittaustulosten käsittely ja yhdistäminen geometriaan

Seuraavaksi tuodaan mittausdata ohjelmaan. Data tuodaan pitkin tiedostopolkua **File - Import - Data Block**. Kaikki mittausdataa sisältävät tiedostot voidaan tuoda samalla kertaa, jolloin ne tulevat jatkokäsittelyyn yhtenä pakettina. Ohjelmassa aukeaa kuvassa L1.12 näkyvä ikkuna, johon ei tarvitse tehdä muutoksia, vaan se voidaan hyväksyä klikkaamalla **OK**.



Kuva L1.12. Mittausdata, joka tuodaan jälkikäsitteilyohjelmaan.

Seuraavaksi aukeaa kuvassa L1.13. esitetty ikkuna, josta voidaan tarkastella taajuusvastefunktioita ja niiden kuvaajia eri akseleiden suhteen. Näkymää voidaan vaihdella työkalupalkista, josta voidaan valita myös kursorityyppi. Kursorityypiksi valitaan esimerkiksi kursori, jossa määritetään väli, josta etsitään kulloisenkin välin huippukohta automaattisesti. Kyseistä kursoria kuvataan kahdella sinisellä pystypalkilla, joiden välissä on punainen piste. Väliä voidaan liikuttaa vetämällä sitä pitkin kuvaajaa, jolloin löydetään helposti paikalliset huippukohdat. Välin päätepisteitä voidaan liikuttaa vetämällä. Huippukohdan taajuus ja vastaava huippukohdan arvo saadaan näkyviin kursorivalinnalla, jossa on sininen pystypalkki, jonka vasemmalla puolella on C ja oikealla V. Kursorivalinnat voivat olla yhtä aikaa päällä.



Kuva L1.13. Ensimmäisen mittauspisteen taajuusvastefunktion kuvaaja.

Seuraavaksi määritetään mitatut pisteet samoiksi rakenteen geometriassa olevien pisteiden kanssa. Tämä voidaan suorittaa joko muuttamalla mittauksissa määrättyä solmunumerointia tai geometrian pisteiden numerointia. Mittausdatan solmunumerointia voidaan muuttaa kuvassa L1.14 esitetyllä tavalla, jossa mittauksissa määrätty solmunumero ja mitattu liikesuunta korvataan rakenteen geometrian vastaavilla pisteillä. Geometrian vastaavat mittauspisteet selvitettiin aiemmin, jota havainnollistettiin aiemmin kuvassa L1.11, josta ne voidaan tarkastaa. Numerointia voidaan muuttaa tuplaklikkaamalla kutakin solmunumeroa **DOFs**-sarakkeesta, jolloin niitä voidaan vapaasti muuttaa. Sarakkeessa on esitetty mittauspisteen solmunumerointi, mittauksen suunta ja herätteenantopiste. Tässä mittauksessa heräte on annettu samaan pisteeseen, jolloin voidaan käyttää merkintää 1. Jos mittauksia olisi suoritettu siten, että herätettä olisi annettu useampaan pisteeseen, olisi herätteenantopisteet määrättävä geometriaan mittauspisteiden tavoin. Esimerkiksi palkin yläpinnan ulommainen mittauspiste määritetään mittauksissa mittauspisteeksi 1 ja sen mittaussuunnaksi Y, jolloin sen **DOFs**-sarakkeen tiedot ovat ”1Y:1”. Geometriaan määritetyistä

mittauspisteistä voidaan lukea mittauspistettä 1 vastaavaksi pisteeksi piste 76, jolloin mittausdataan **DOFs**-sarakkeeseen muutetaan tiedoiksi ”76Y:1”. Vastaavasti merkitään mittausdataan jokaista mittauspistettä vastaava piste geometriasta.

	Select Trace	Hide	DOFs	Units	Measurement Type	Color	
M#1	No	No	101Y:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#2	No	No	70Z:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#3	No	No	28Z:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#4	No	Yes	7Y:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#5	No	No	64Z:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#6	No	No	58Z:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#7	No	No	2Z:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#8	No	Yes	14Y:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#9	No	No	102Y:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#10	No	No	108Y:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#11	No	No	114Y:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#12	No	No	120Y:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#13	No	Yes	5Z:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq
M#14	No	Yes	13Z:1	[m/s ²]/N	FRF		FRF Freq

Kuva L1.14. Mittauspisteet, joille on määrätty järjestysnumero rakenteen geometrian mittauspisteitä vastaavista pisteistä sekä rakenteen koordinaatiston mukaiset mittaussuunnat.

Toinen vaihtoehto mittauspisteiden ja rakenteen geometriapisteiden yhdistämiseksi on muuttaa geometriasta pisteiden numerointia. Mittauspisteen numeroksi annetaan mittauksissa määrätty solmupisteen numero kuvassa L1.15 esitetyllä tavalla tuplaklikkaamalla **Label**-sarakeesta vastaavan pisteen numeroa ja muuttamalla piste mittauksissa tallennettua solmunumeroa vastaavaksi. On kuitenkin huomattava, että nyt geometriassa on kaksi pistettä samalla järjestysluvulla, joten alkuperäinen piste on muutettava toiseksi. Esimerkin tapauksessa piste 101 muutettiin pisteeksi 5, joten alkuperäinen piste 5 on muutettava pisteeksi 101 tai muuksi määräämättömäksi pisteeksi. Muitten kuin mittauspisteiden numeroinnilla ei ole väliä ja ne voivat olla myös samat toistensa kanssa. Jos malli sisältää kaksi tai useampia pisteitä, joita on merkitty mitattuja solmuja vastaavilla numeroilla, ne kaikki käyttäytyvät mittauksen mukaisesti ja rakenne käyttäytyy siis väärin. Siksi on yksinkertaisinta tehdä mittauspisteiden ja vastaavien rakenteen geometrian pisteiden yhdistäminen ensimmäisellä esitetyllä tavalla.

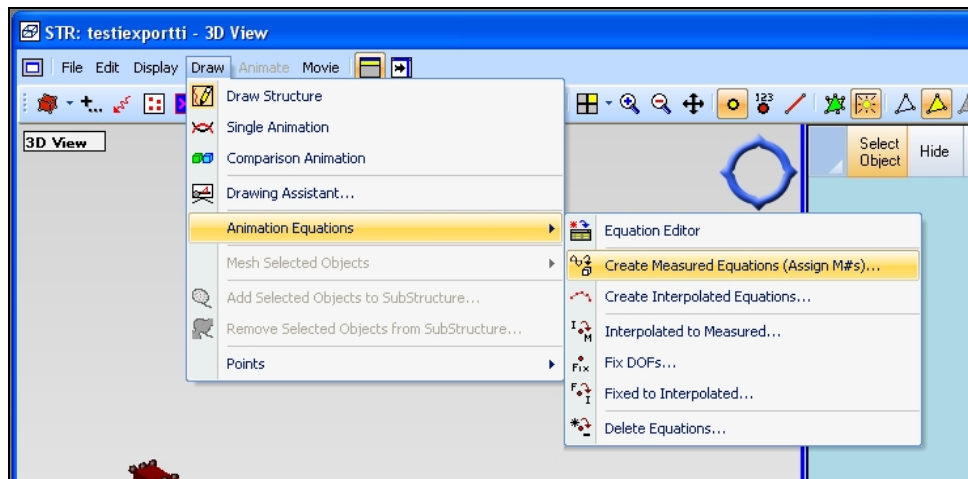
Select Object	Hide	Label	Color	Bold	X coord.	Y coord.	Z
98	No	98		No	344	150	
99	No	99		No	172	150	
100	No	100		No	0	150	
101	Yes	5		No	0	150	
102	Yes	1		No	4,13E+03	150	
103	No	103		No	3,95E+03	150	
104	No	104		No	3,78E+03	150	
105	No	105		No	3,51E+03	150	
106	No	106		No	3,44E+03	150	
107	No	107		No	3,27E+03	150	
108	Yes	108		No	3,1E+03	150	
109	No	109		No	2,92E+03	150	
110	No	110		No	2,75E+03	150	
111	No	111		No	2,58E+03	150	

Select Trace	Hide	Units	Measurement Type	Color
M#1	No	52:1	(m/s ²)/N	FRF
M#2	No	7:1	(m/s ²)/N	FRF
M#3	No	6Y:1	(m/s ²)/N	FRF
M#4	No	7Y:1	(m/s ²)/N	FRF
M#5	No	8Y:1	(m/s ²)/N	FRF
M#6	No	9Y:1	(m/s ²)/N	FRF
M#7	No	10Y:1	(m/s ²)/N	FRF
M#8	No	14Y:1	(m/s ²)/N	FRF
M#9	No	12:1	(m/s ²)/N	FRF
M#10	No	22:1	(m/s ²)/N	FRF
M#11	No	32:1	(m/s ²)/N	FRF
M#12	No	42:1	(m/s ²)/N	FRF
M#13	No	52:1	(m/s ²)/N	FRF
M#14	No	132:1	(m/s ²)/N	FRF

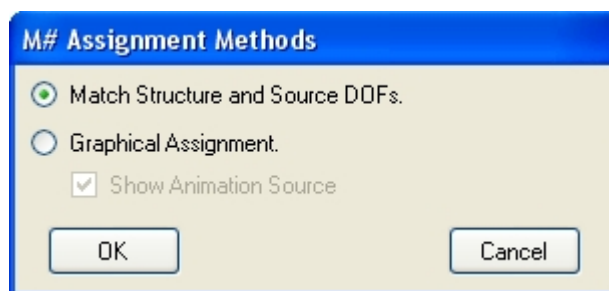
Kuva L1.15. Rakenteen geometriaan muutetut pisteet, joille on annettu järjestysnumero mittausten mukaisesti.

Jos mittauksista on tullut ylimääräistä dataa, kuten ylimääräisten mittauspisteiden mittaustuloksia, kelvottomia tuloksia sisältäviä mittauspisteitä tai muita vastaavia tuloksia, joita ei haluta ottaa huomioon tarkastelussa, ne voidaan tiputtaa tarkastelusta pois yksinkertaisesti asettamalla ne piiloon klikkaamalla **Hide** sarakkeeseen **Yes** kyseisen mittauspisteen kohdalle.

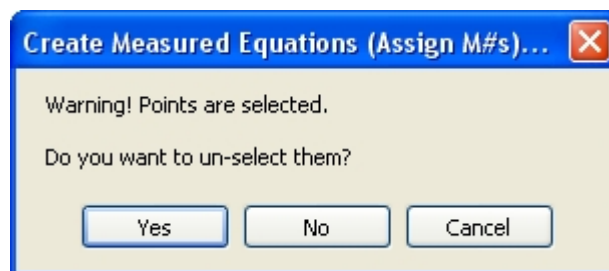
Seuraavaksi yhdistetään mittausdata juuri määrättyihin pisteisiin. Seurataan tiedostopolkua **Draw - Animation Equations - Create Measured Equations (Assign M#s)...**, joka on esitetty kuvassa L1.16, ja hyväksytään ilmestynvä kuvassa L1.17 esitettävä ikkuna. Jos geometriasta on edelleen valittuna pisteitä, ohjelma antaa kuvan L1.18 ilmoituksen. Ilmoituksessa varoitetaan valituista pisteistä ja se voidaan kuitata **Yes**-painikkeesta, jolloin ohjelma poistaa valinnan pisteistä ja yhdistäminen voidaan tehdä. Jos valitaan **No**, ohjelma ei yhdistä pisteitä. Kun ohjelma on luonut yhteyden mittauspisteiden ja datan välille, seuraa ilmoitus, joka on esitetty kuvassa L1.19. Ilmoituksessa on kerrottu, kuinka monta pistettä on yhdistetty mittauksiin. Jos jossain pisteessä on ongelmia yhdistämisessä, ohjelma ilmoittaa mittauksen numeron, jota ei voitu yhdistää pisteeseen, kuten kuvassa L1.20 on esitetty. Tämä johtuu todennäköisesti väärästä numeroinnista tai mittauspisteen liikesuunnasta, jotka kannattaneet ensimmäisenä tarkastaa.



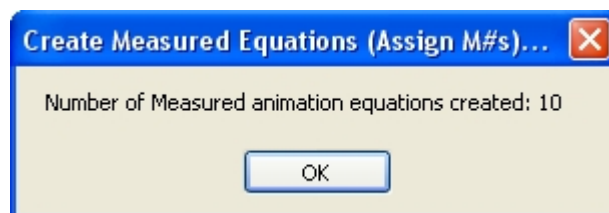
Kuva L1.16. Tiedostopolku, jota pitkin luodaan yhteys mitatun datan ja mittauspisteiden välille.



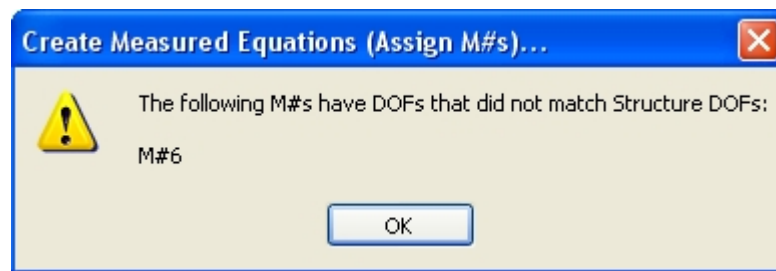
Kuva L1.17. Mittausdatan ja -pisteiden yhdistämiseksi hyväksyttävä ikkuna.



Kuva L1.18. Varoitus, joka ilmoittaa valituista pisteistä.

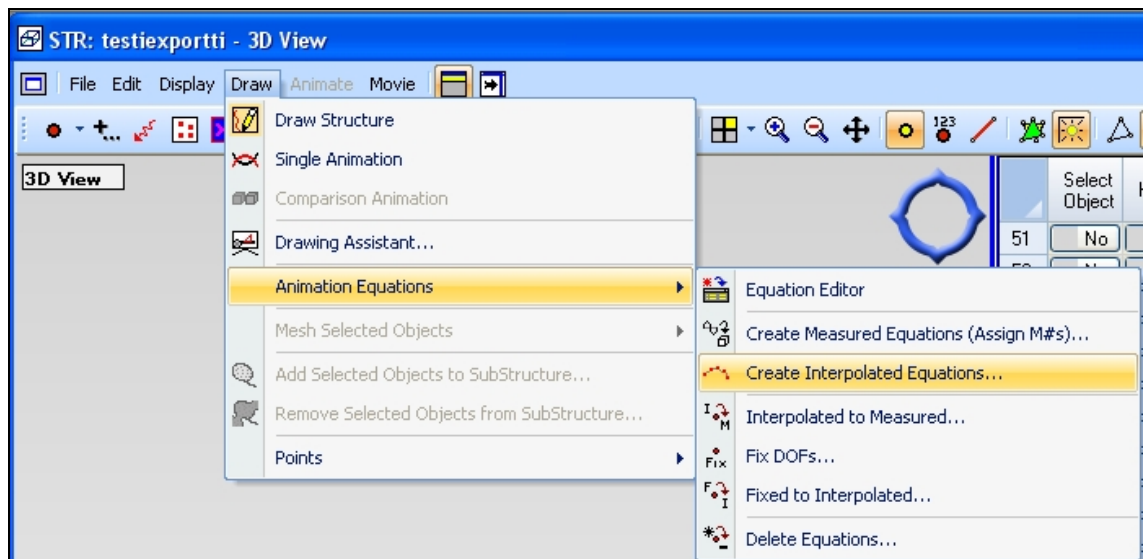


Kuva L1.19. Ilmoitus, jossa ilmoitetaan mittauspisteiden määrä, jotka on yhdistetty mittausdataan.

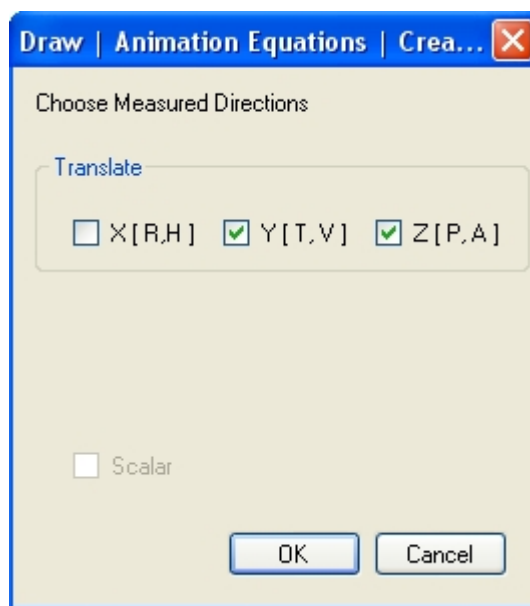


Kuva L1.20. Virheilmoitus, jossa ilmoitetaan, että kuudennen mittauspisteen dataa ei voitu yhdistää mihinkään pisteeseen.

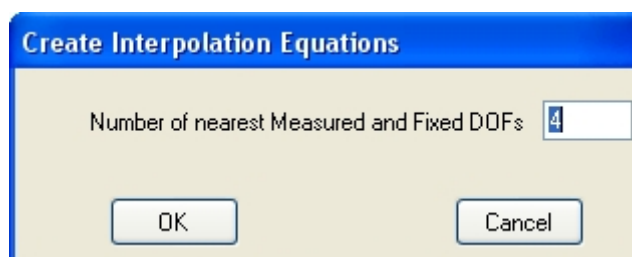
Seuraavaksi interpoloidaan mittaamattomat pisteet. Interpolointiin määrätään mittauspisteiden lukumäärä, joka korkeimmillaan otetaan huomioon määrättäessä mittaamattomien pisteiden liikettä. Eri mittauspisteet saavat painokertoimet sen mukaan, mikä on niiden geometrinen etäisyys mittaamattomasta pisteestä. Interpolointi suoritetaan pitkin kuvassa L1.21 esitettyä tiedostopolkua **Draw - Animation Equations - Create Interpolated Equations...** Seuraavaksi aukeaa kuvassa L1.22 esitetyn kaltainen ikkuna, jossa määritetään interpoloitavat suunnat, jotka ovat esimerkin tapauksessa y- ja z-suunnat. Hyväksytään klikkaamalla **OK**, jonka jälkeen määritetään kuvassa L1.23 esitettyssä ikkunassa, montako mittauspistettä halutaan käyttää interpoloinnissa hyväksi. Halutaan käyttää neljää pistettä, joka on oletuksena ja klikataan **OK**, minkä jälkeen ohjelma ilmoittaa, että 390 pistettä on interpoloitu. Interpoloituja pisteitä on 390, sillä molemmissa liikesuunnissa on mitattu viisi pistettä ja loput 195 pistettä on interpoloitava eli myös ne pisteet joissa vastetta on mitattu toiseen liikesuuntaan.



Kuva L1.21. Tiedostopolku, jota pitkin interpoloidaan mittaamattomat pisteet.



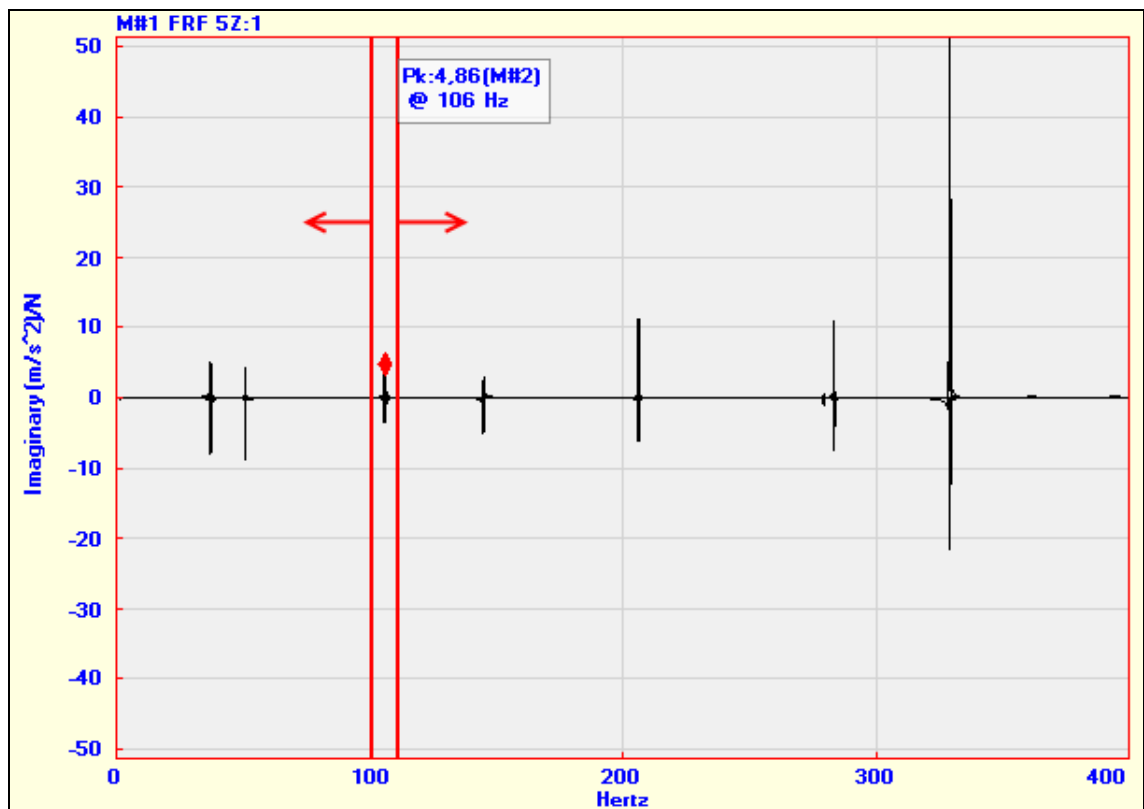
Kuva L1.22. Valintaikkuna, jossa valitaan interpoloitavien mittauspisteiden suunnat.



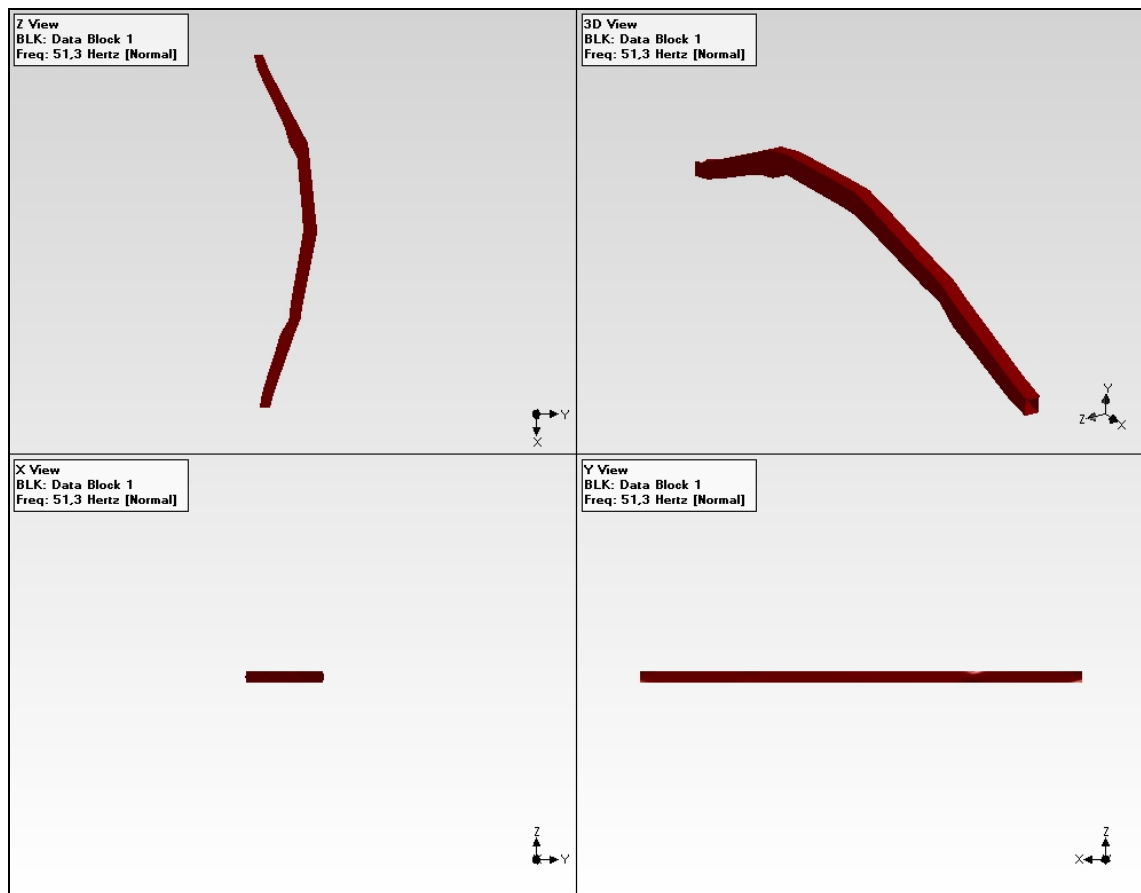
Kuva L1.23. Valintaikkuna, jossa valitaan interpoloitavissa pisteissä huomioon otettavien mittauspisteiden korkein lukumäärä.

Ominaismuotojen tarkastelu

Nyt jokaiselle rakenteen pisteelle on määrätty käyttäytyminen joko mittaamalla tai interpoloimalla ja ominaismuotoja voidaan alkaa animoida. Tiedostopolkua **Draw - Single Animation** pitkin voi animoida ominaismuotoja. Taajuusvastefunktion kuvaajasta voidaan määrittää taajuus, jota vastaavalla muodolla rakenteen ominaismuotoa tarkastellaan. On muistettava, että kuvaajana on käytettävä imaginääriosaa taajuuden funktiona. Kaikki kuvaajat voidaan yhdistää yhteen kuvaajaan pitkin tiedostopolkua **Format - Overlay Traces**. Näin voidaan varmistua siitä, että tarkastellaan yhtä muotoa kerrallaan. Kuvassa L1.24 on esitetty kuvaaja, jossa kaikkien käytettävien taajuusvastefunktioiden kuvaajat, joissa tarkasteltavana on imaginääriosa taajuuden funktiona, on yhdistetty samaan kuvaajaan. Kuvassa käytetty kursorityyppi valitsee automaattisesti halutulta taajuusalueelta jokaisen kuvaajan huippukohdan. Jos alueella on huippukohdat sekä y- että z-suunnan kuvaajissa, animoitavassa ominaismuodossa otetaan huomioon molempien liikesuuntien huippukohdat, ja ominaismuoto on kahden eri ominaismuodon summattu muoto. Animaation asetuksia voi muuttaa joko työkalupalkista tai **Animate**-tiedostovalikon alta. Mahdollisia muutettavia ovat esimerkiksi animaation nopeus, amplitudi ja skaalauskerroin. Animaatiota voidaan tarkastella joko isometrisessä muodossa tai kaikissa eri koordinaattisuunnissa yhtä aikaa tuplaklikkaamalla ikkunaa, jossa rakennetta animoidaan. Edelleen voidaan tuplaklikata sitä ikkunaa, jota halutaan tarkastella yksittäin, esimerkiksi ikkunaa, jossa ominaismuoto kuvataan x-y-tasossa. Kuvassa L1.25 on esitetty kuva, jossa ensimmäistä y-suunnan ominaismuotoa animoidaan ja tarkastellaan kaikissa mahdollisissa tasoissa ja isometrisessä muodossa.

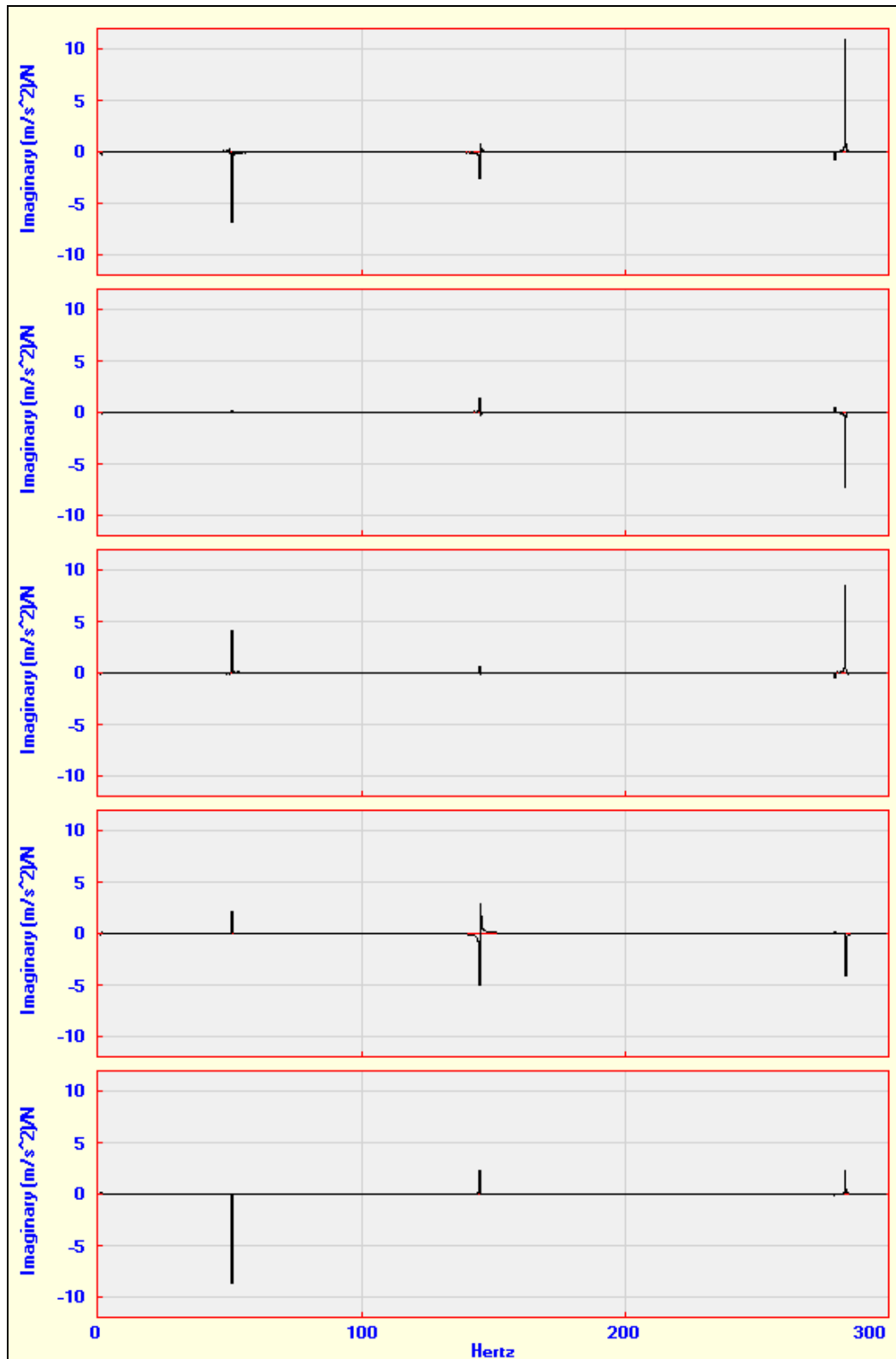


Kuva L1.24. Tutkittava taajuus määritetään taajuusvastefunktion kuvaajasta vetämällä kursoria puoleen ja toiseen.

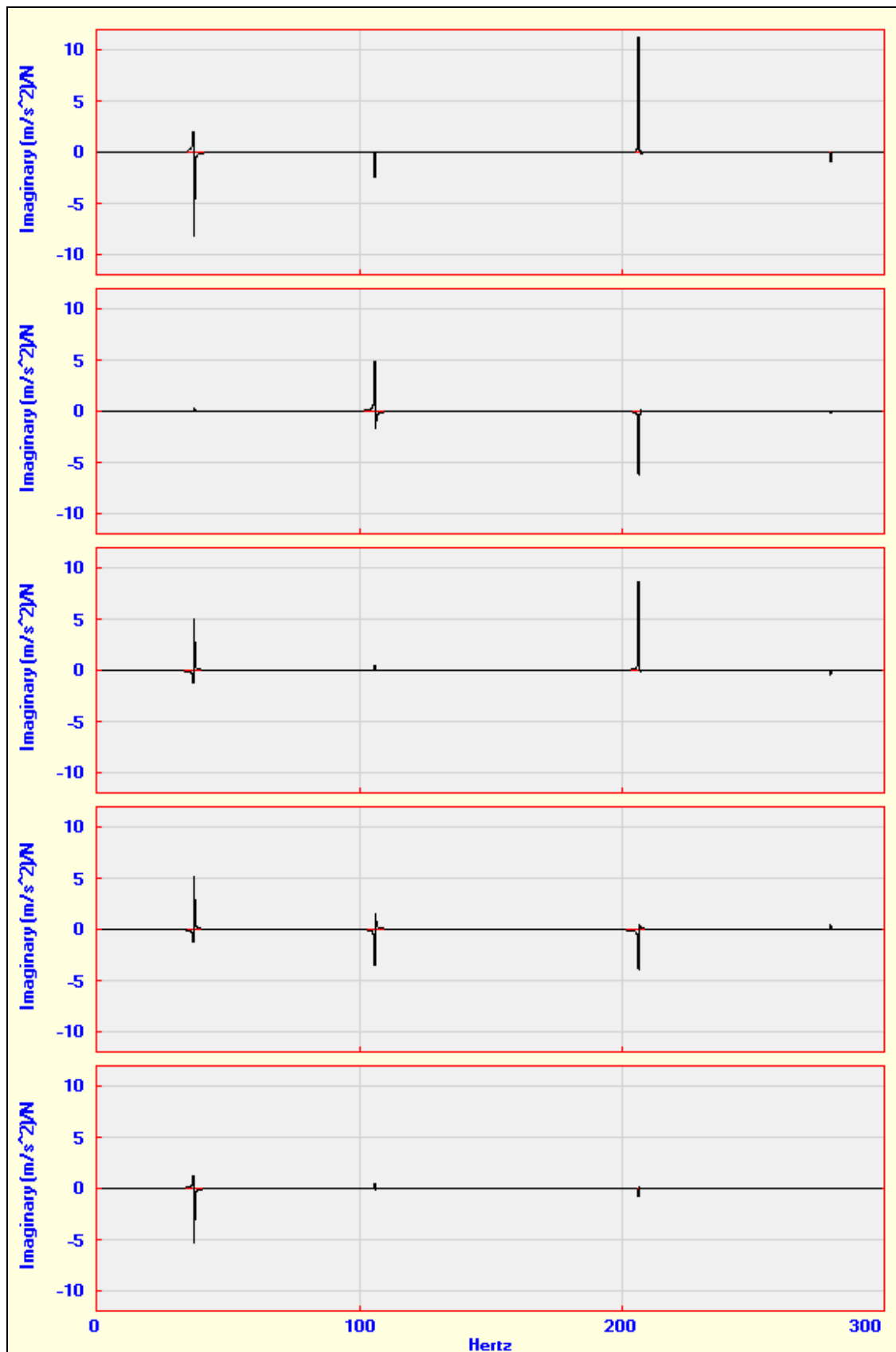


Kuva L1.25. Ensimmäisen y-suuntaisen ominaismuodon animaatio x-y-, y-z- ja x-z-tasossa sekä isometrisessä muodossa.

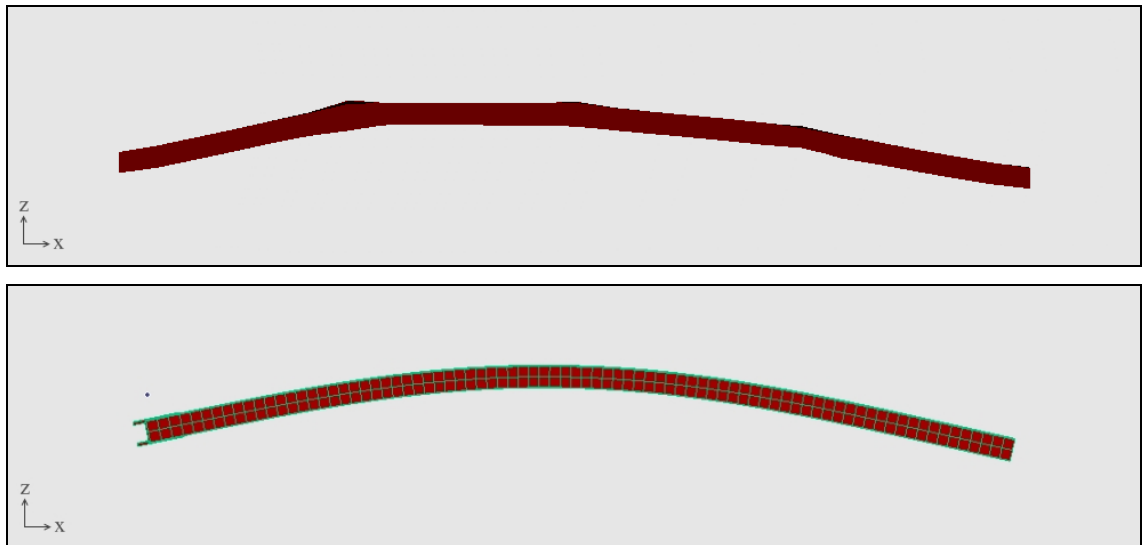
TAAJUUSVASTEFUNKTION KUVAAJAT



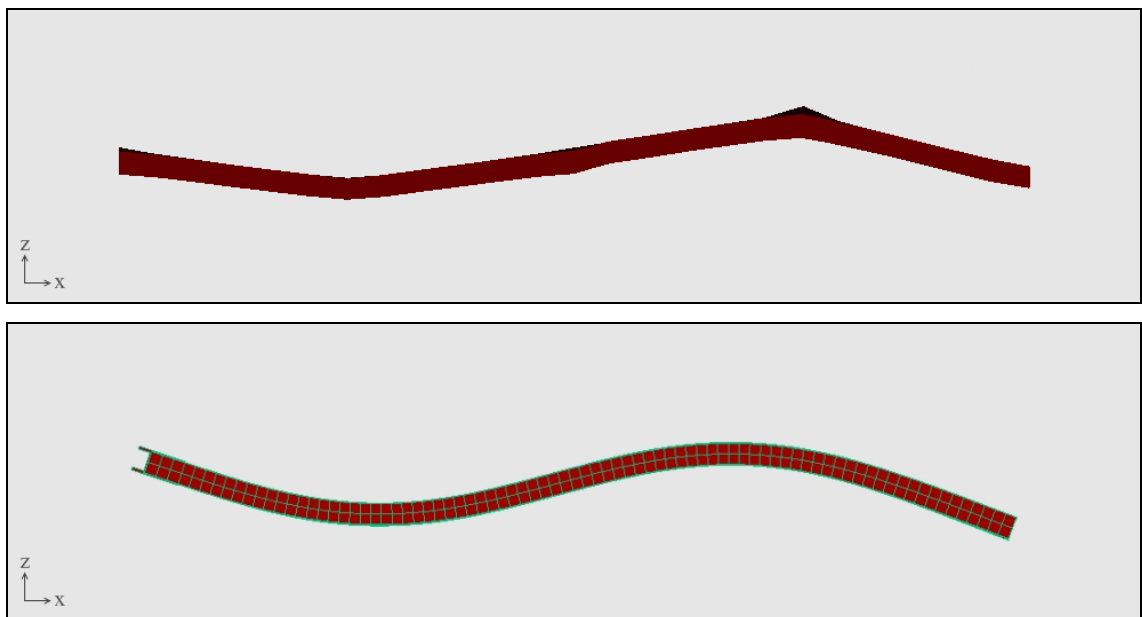
Kuva L2.1. Puomin yläpinnan mittauspisteiden taajuusvastefunktioiden imaginääriosien kuvaajat taajuuden funktiona järjestyksessä alkupäästä loppupäähän.



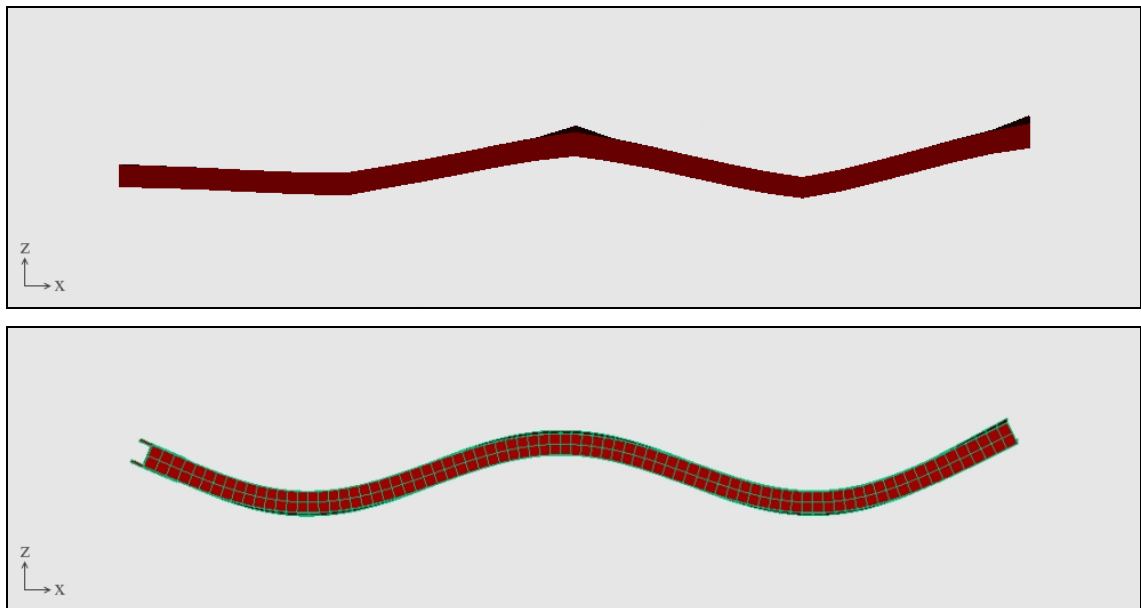
Kuva L2.2. Puomin sivun mittauspisteiden taajuusvastefunktioiden imaginääriosien kuvaajat taajuuden funktiona järjestyksessä alkupäästä loppupäähän

JOUSTAVASTI TUETUN PUOMIN OMINAISMUODOT

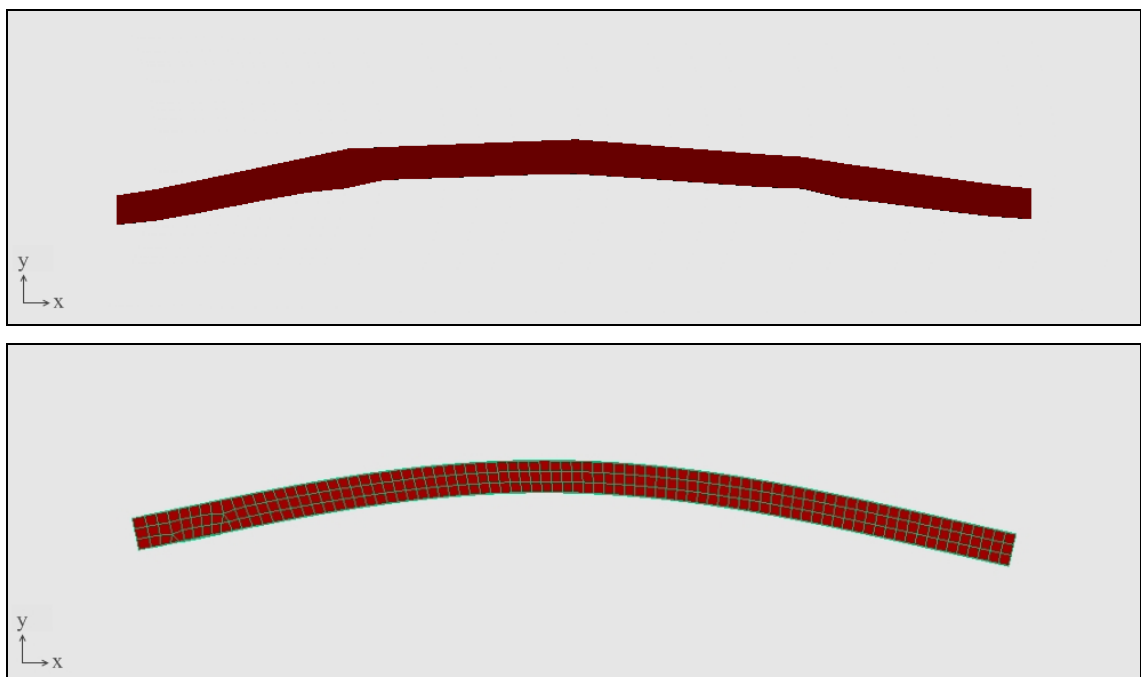
Kuva L3.1. Globaalin z-suunnan 1. ominaismuoto. Ylempänä EMA:sta ja alempana FEM:stä saatu muoto.



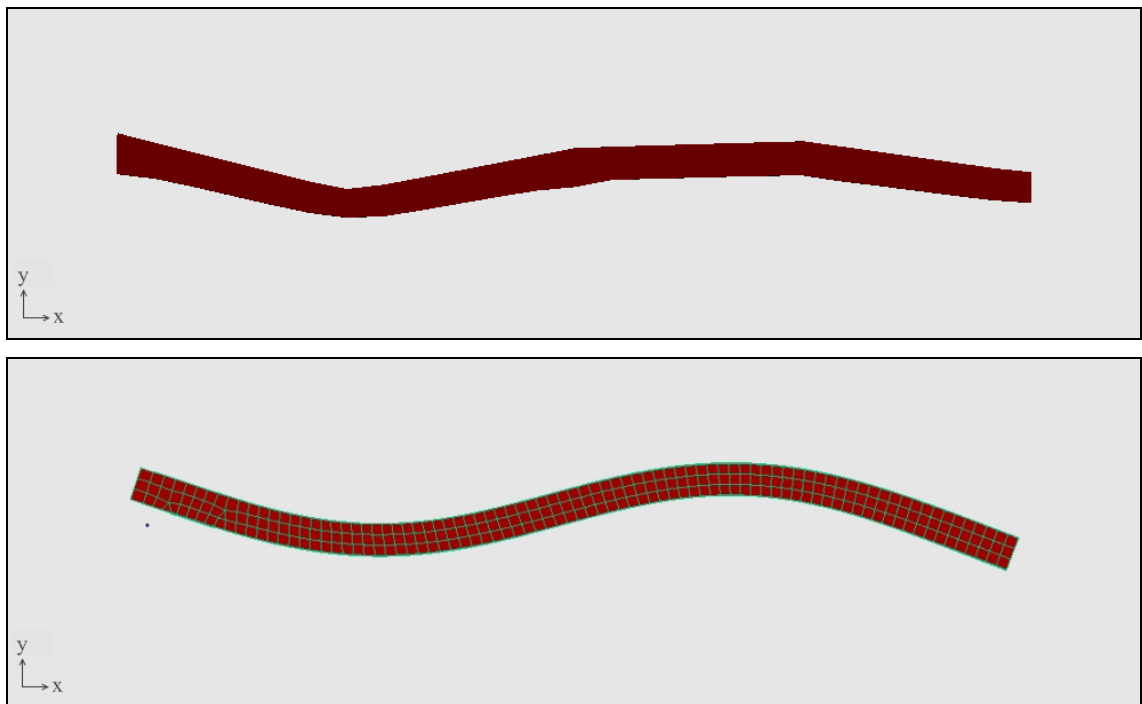
Kuva L3.2. Globaalin z-suunnan 2. ominaismuoto. Ylempänä EMA:sta ja alempana FEM:stä saatu muoto.



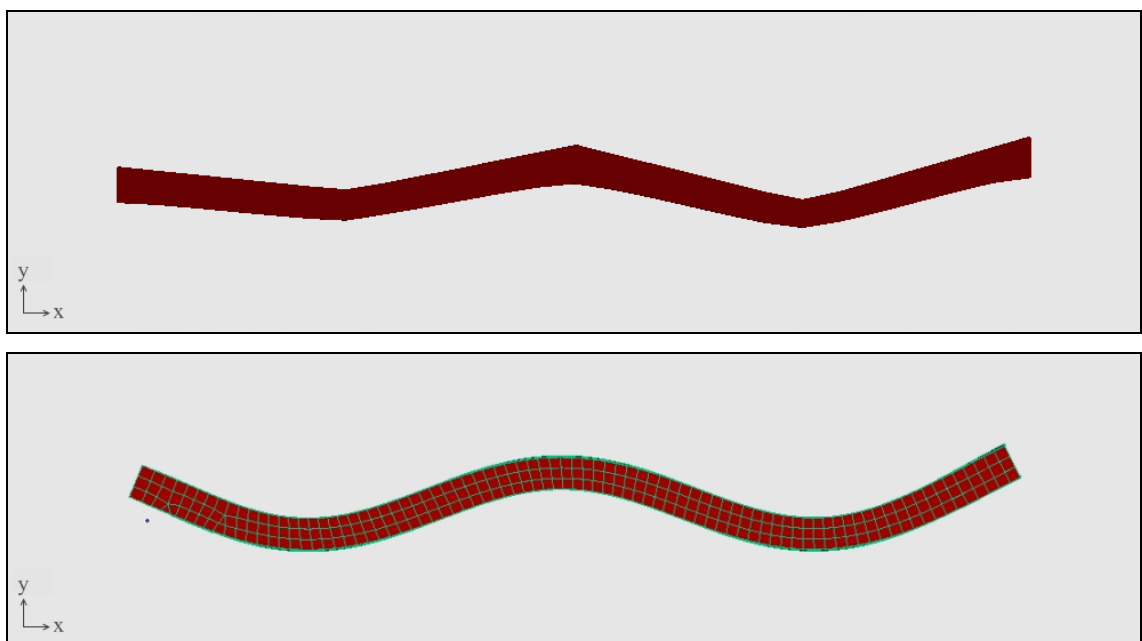
Kuva L3.3. Globaalien z-suunnan 3. ominaismuoto. Ylempänä EMA:sta ja alempana FEM:stä saatu muoto.



Kuva L3.4. Globaalien y-suunnan 1. ominaismuoto. Ylempänä EMA:sta ja alempana FEM:stä saatu muoto.



Kuva L3.5. Globaalin y-suunnan 2. ominaismuoto. Ylempänä EMA:sta ja alempana FEM:stä saatu muoto.



Kuva L3.6. Globaalin y-suunnan 3. ominaismuoto. Ylempänä EMA:sta ja alempana FEM:stä saatu muoto.

TUETUN PUOMIN OMINAISMUODOT

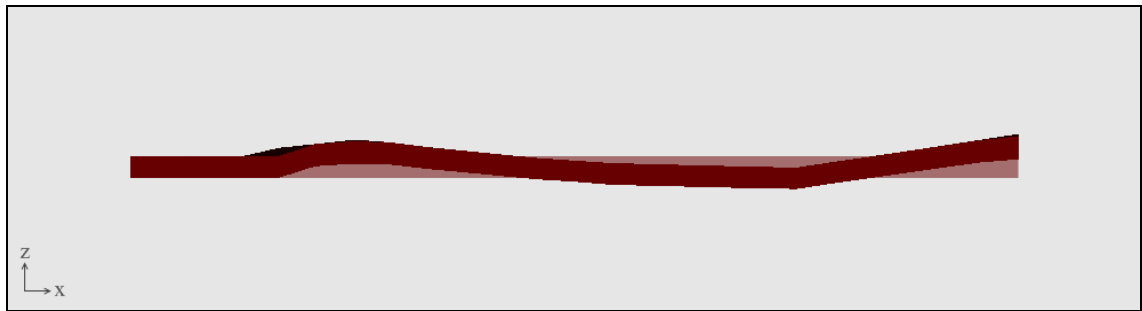
Kuva L4.1. z-suunnan 1. ominaismuoto ominaistajudella 3.5 Hz.



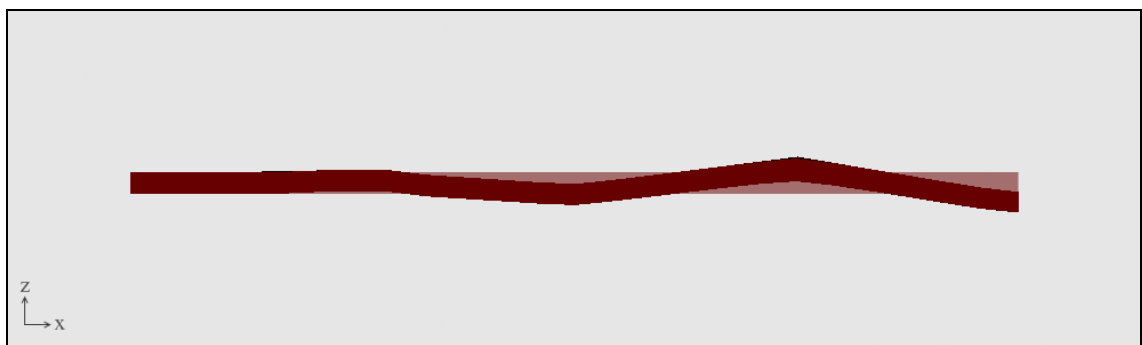
Kuva L4.2. z-suunnan 2. ominaismuoto ominaistajudella 27.5 Hz.



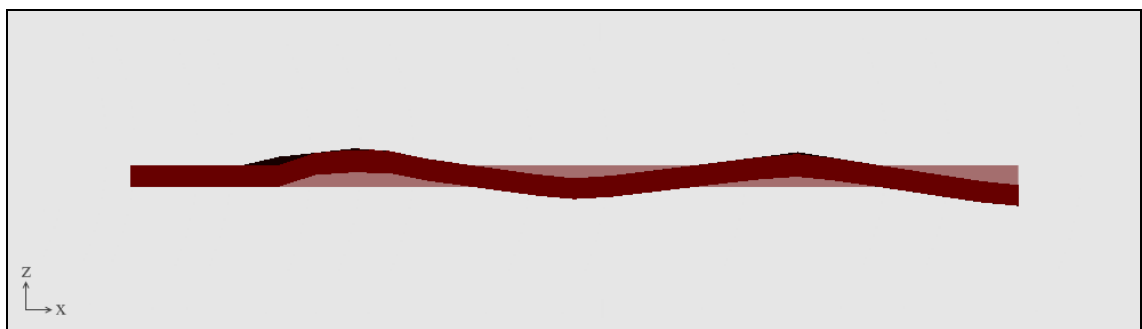
Kuva L4.3. z-suunnan 3. ominaismuoto ominaistajudella 47.3 Hz.



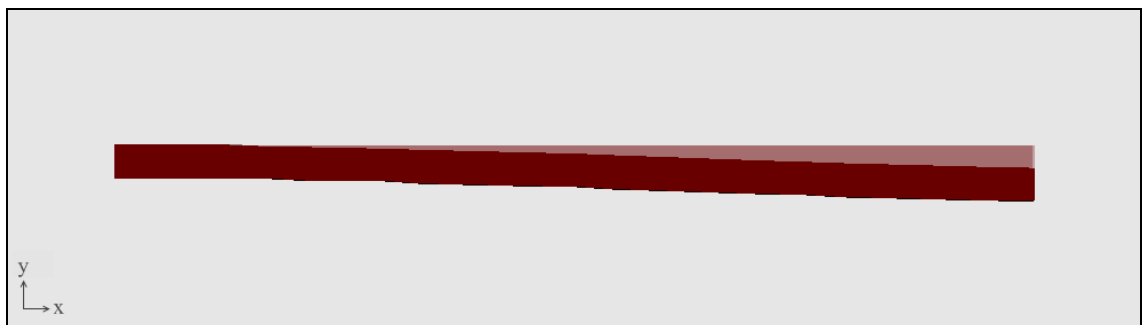
Kuva L4.4. z-suunnan 4. ominaismuoto ominaistaajuudella 99.3 Hz.



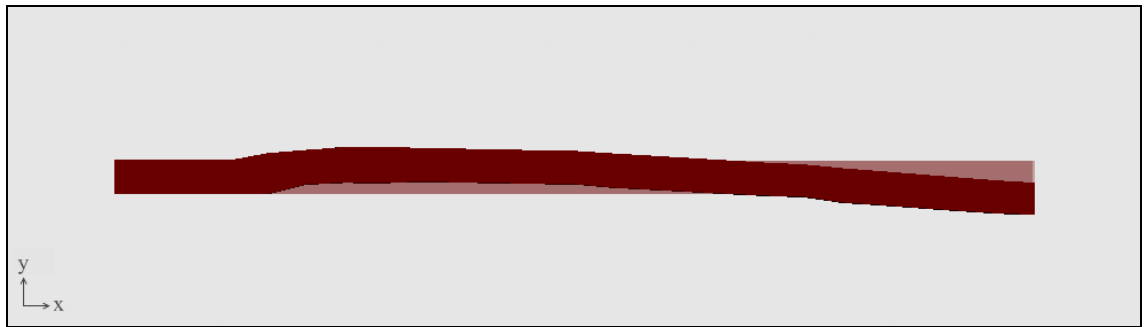
Kuva L4.5. z-suunnan 5. ominaismuoto ominaistaajuudella 178 Hz.



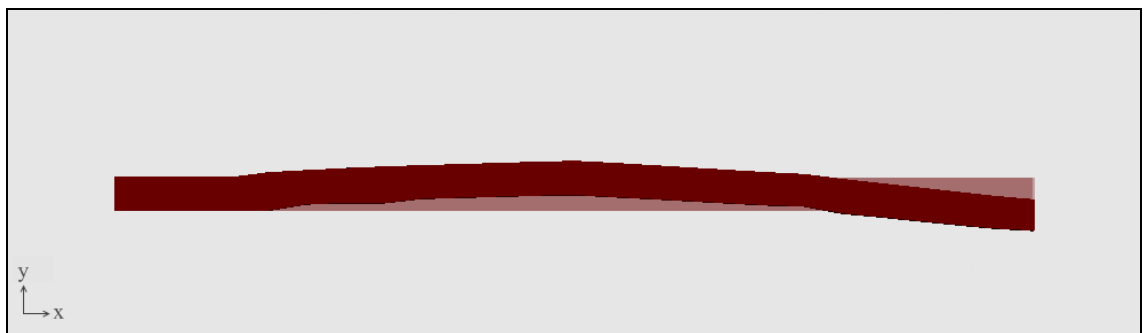
Kuva L4.6. z-suunnan 6. ominaismuoto ominaistaajuudella 260 Hz.



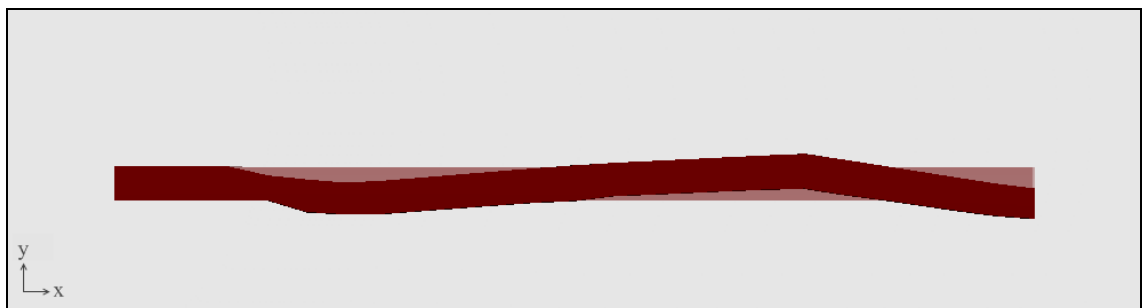
Kuva L4.7. y-suunnan 1. ominaismuoto ominaistaajuudella 8.5 Hz.



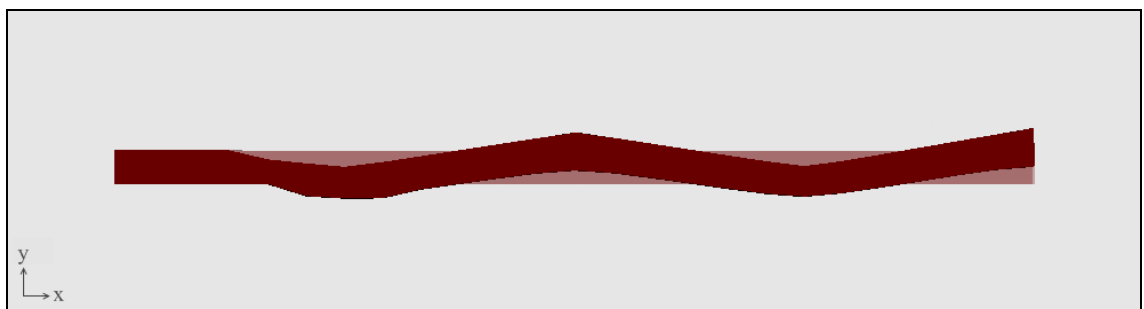
Kuva L4.8. y-suunnan 2. ominaismuoto ominaistaajuudella 31.3 Hz.



Kuva L4.9. y-suunnan 3. ominaismuoto ominaistaajuudella 58 Hz.

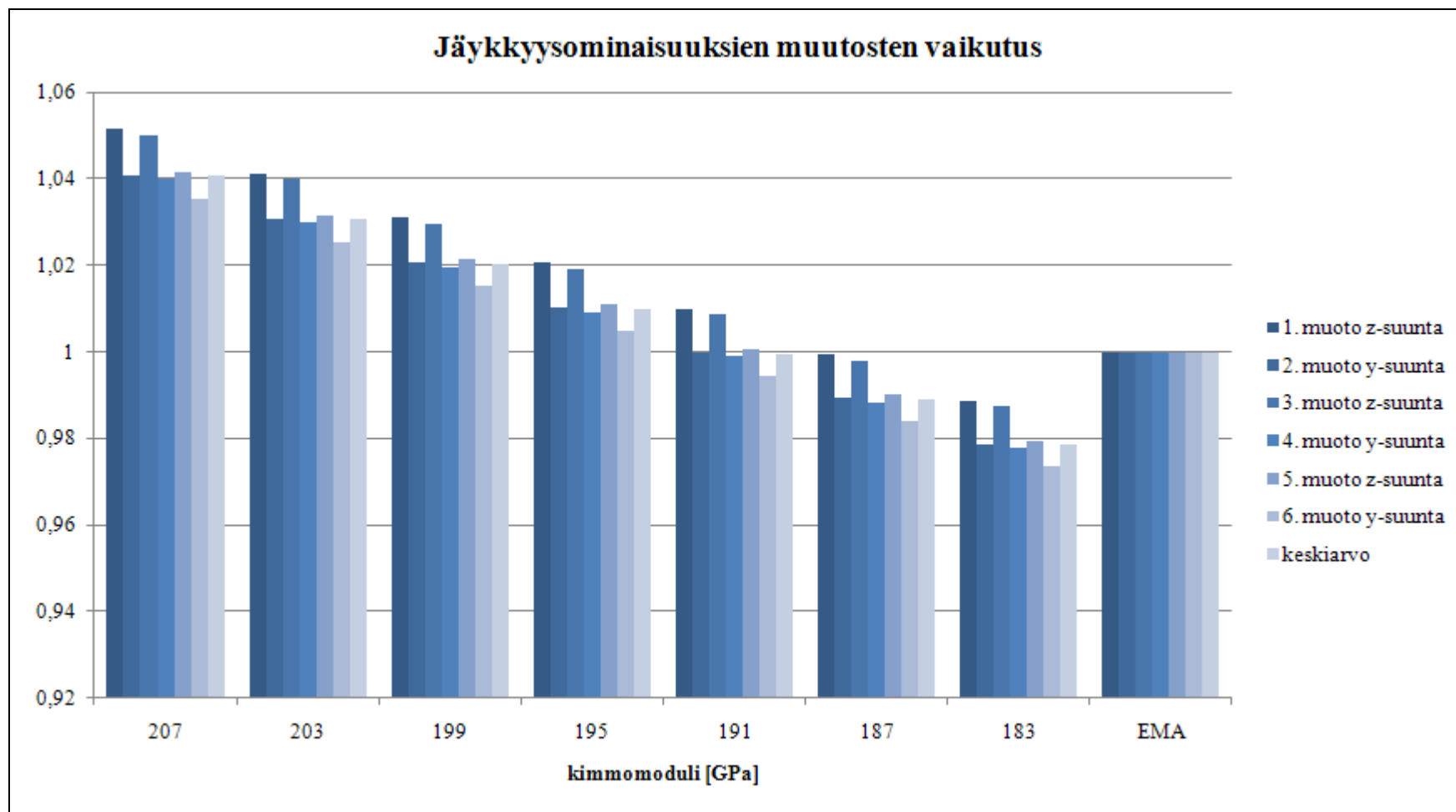


Kuva L4.10. y-suunnan 4. ominaismuoto ominaistaajuudella 152 Hz.

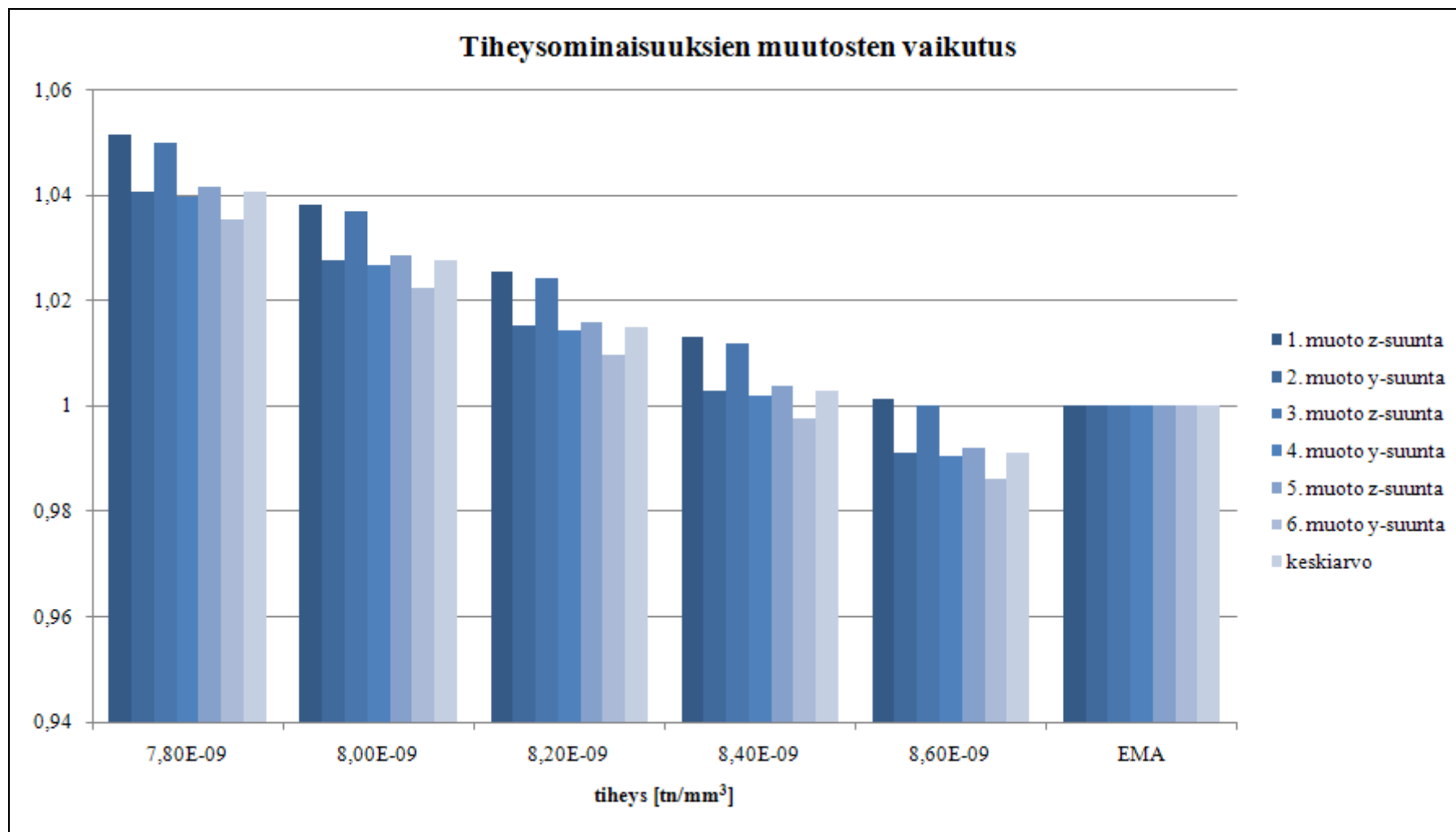


Kuva L4.11. y-suunnan 5. ominaismuoto ominaistaajuudella 309 Hz.

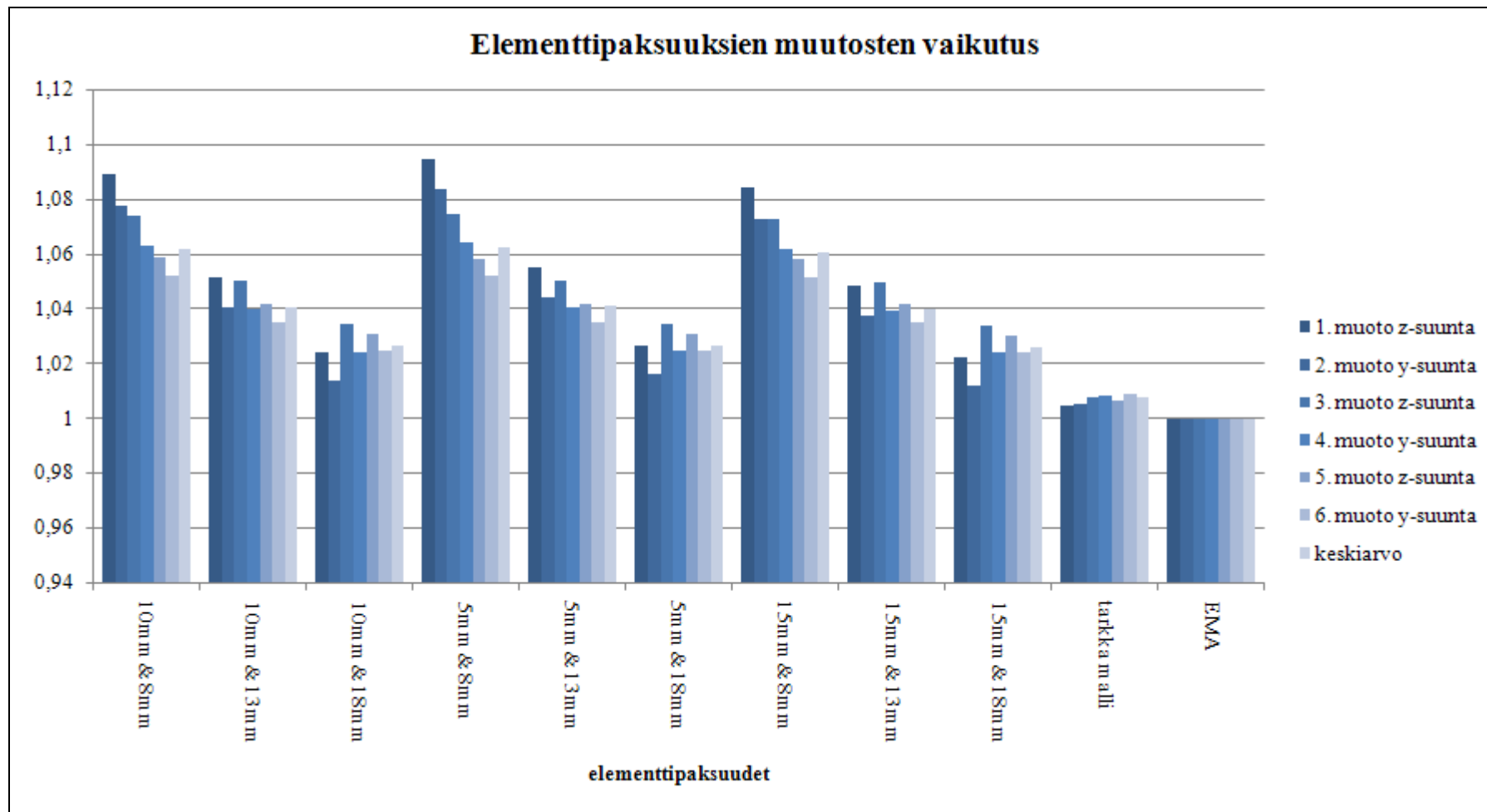
ELEMENTTIMALLIN OMINAISUUKSIEN MUUTOSTEN VAIKUTUS



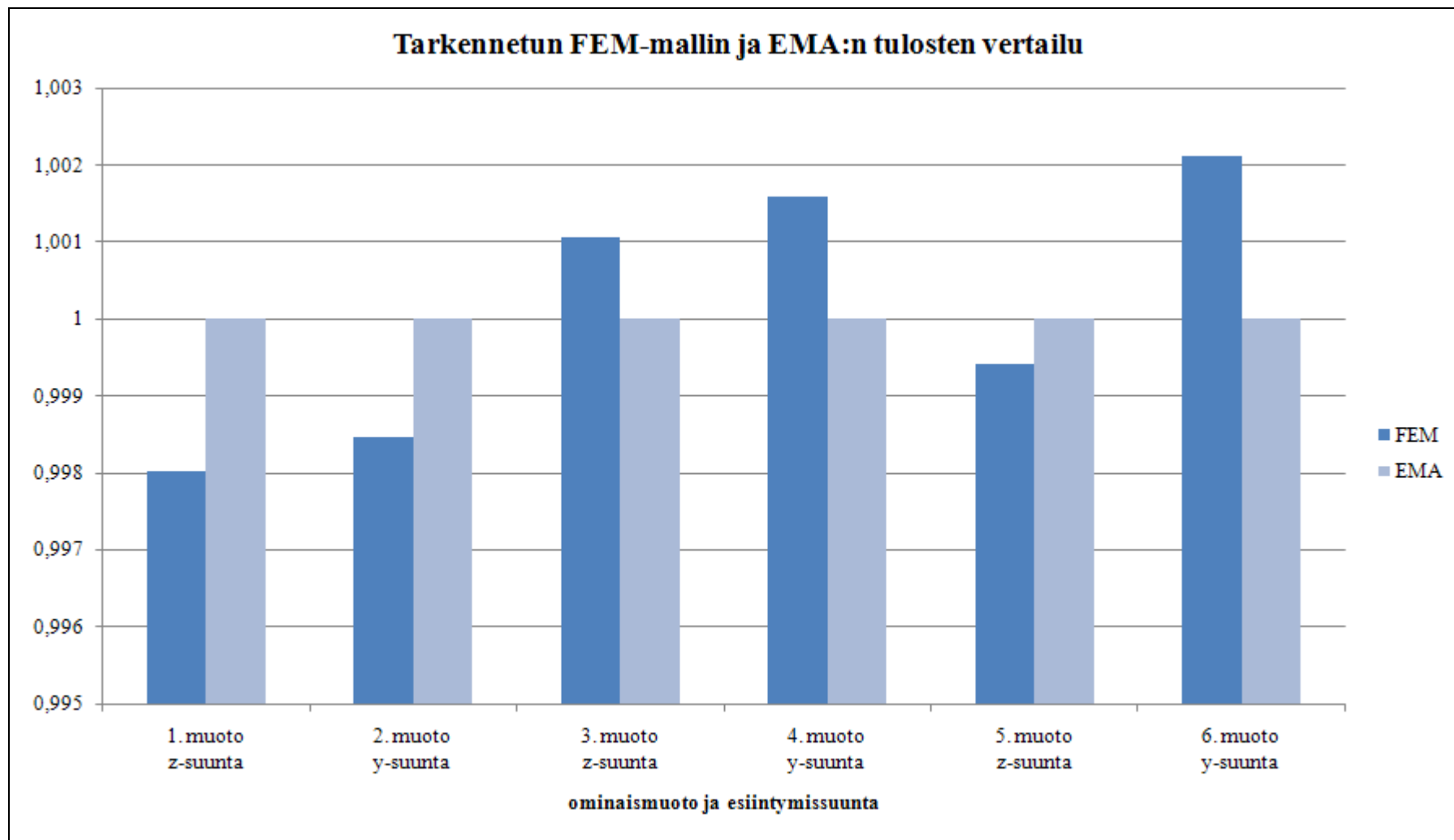
Kuva L5.1. Kimmomodulin vaikutus ominaistajuuden arvoihin.



Kuva L5.2. Tiheyden vaikutus ominaistajujen arvoihin.



Kuva L5.3. Puomin nivelpään vahvikelevyjen elementtipaksuuden vaikutus ominaistaajuuden arvoihin ja viimeisenä tarkkan mallin skaalatut tulokset.



Kuva L5.4. Optimoidun FEM-mallin ja EMA:n skaalattujen ominaistajuuksien vertailu.