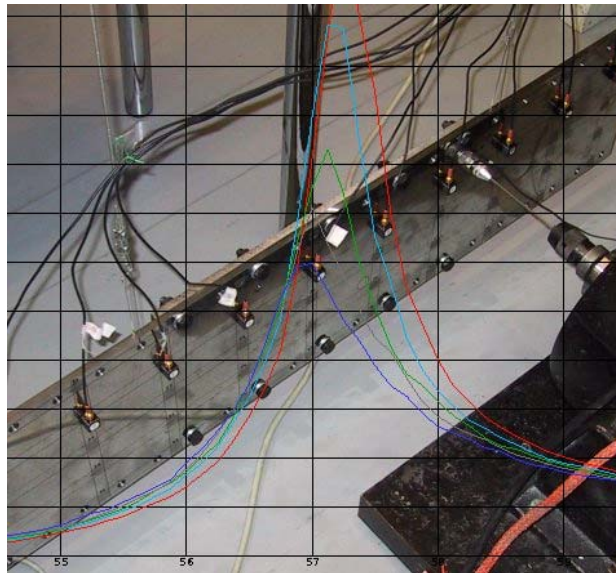


**Tutkimusraportti
BVAL35-011138**

PULTTILIITOKSEN VAIMENNUKSEN KOELAITE
MOODI- JA VASTEMITTAUKSET

Kari Tammi, Paul Klinge, Seppo Aatola, Vesa Nieminen



Espoo 12.06.2001

		A Työraportti	
		B Julkinen tutkimusraportti	X
		Tutkimusraportti luottamuksellinen saakka	
Raportin nimi Pulttiliitoksen vaimennuksen koelaite			
Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus pvm/nro TEKES/VÄRE		Raportin numero BVAL35-011138	
Projektin nimi Pyörivast/pvkoelaite		Suoritteen numero V0SU00572	
Laatija(t) Kari Tammi, Paul Klinge, Seppo Aatola, Vesa Nieminen		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 19 / 7	
Avainsanat moodianalyysi, pulttiliitos, vaimennus, kitka, luisto			
Tiivistelmä Koelaite koostuu kahdesta eripituisesta levystä, jotka liitettiin toisiinsa pulteilla. Kokeissa tutkittiin levyjen välisen pulttiliitoksen vaikutusta rakenteen dynaamisiin ominaisuuksiin. Koelaitteelle ja sen yksittäisille levyille tehtiin iskuvasarakokeita värähtelymuotojen määrittämiseksi vaihdellen liitoksessa käytettyjen pulttien määrää. Lisäksi tehtiin vastemittauksia herättäen koelaitetta sähködynaamisella tärstimellä herätetasoja ja -pisteitä sekä levyjen keskinäistä asemaa vaihdellen. Iskuvasakokeen tuloksina esitellään ominaistajuudet, -muodot sekä niiden ekvivalentit viskoosivaimennukset molemmille levyille erikseen sekä koko koelaitteelle. Vastemittausten tuloksina esitellään koelaitteen taajuusvasteiden riippuvuus herätetasosta. Vastemittauksissa koelaitteen vaimennuksen todettiin kasvavan herätetason kasvaessa. Myös lievää ominaistajuuksien putoamista havaittiin. Raportti kuvaa pulttiliitoksen vaimennuksen koelaitteen, sen mittaamiseen käytetyn koejärjestelyn ja tehtyjen mittausten tulokset. Tämän raportin selostamia mittaustuloksia käytetään koelaitteen laskentamallin tarkennukseen ja verifointiin.			
Allekirjoitukset, Espoo 12.06.2001			
Harri Soininen Tutkimuspäällikkö		Kari Tammi Tutkija	
		Tarkastanut	
Jakelu (asiakkaat ja VTT):			
VTT VALMISTUSTEKNIikka Laiva- ja konetekniikka		Tekniikantie 12, Espoo PL 1705 02044 VTT	
		Puh.vaihde (09) 4561 Faksi (09) 455 0619, (09) 456 5888 WWW: http://www.vtt.fi/manu/	

Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Tavoite.....	3
3	Koejärjestely	3
4	Rajaukset	5
5	Menetelmät	5
	5.1 Iskuvasarakokeet	5
	5.2 Vastemittaukset eri herätetasoin	6
6	Tulokset	8
	6.1 Iskuvasarakokeet	8
	6.2 Vastemittaukset eri herätetasoin	8
	6.3 Kulumajäljet liitoksessa	10
7	Tulosten tarkastelu	11
8	Yhteenveto.....	11
	Lähteet.....	12
	Liite 1. Iskuvasarakokein määritetyt ominaismuodot.....	13
	Liite 2. Vastemittausten tulokset eri tapauksissa	15
	Liite 3. Koelaitteen mittauspisteet.....	19

1 Johdanto

Työ liittyy TEKES:n VÄRE-tutkimusohjelman projektiin "Pyörivien koneiden värähtelyn hallinta", ja sen aliprojektiin "Vastemitoitus". Tässä projektissa suunniteltiin koelaitte, joka koostuu kahdesta toisiinsa pultiliitoksella kytketystä teräslevystä. Koelaitteen pultiliitoksessa tapahtuvan luiston otaksutaan näkyvän mittauksissa herätetasosta riippuvana vaimennuksena.

Koelaitte muodostuu kahdesta eripituisesta levystä, jotka liitettiin toisiinsa pulteilla. Kokeissa tutkittiin ko. pultiliitoksen vaikutusta rakenteen dynaamisiin ominaisuuksiin. Mittaukset aloitettiin määrittämällä molempien levyjen alimmat ominaistajuudet, -muodot ja niiden vaimennukset. Tämän jälkeen levyt liitettiin toisiinsa pulteilla ja koelaitteelle tehtiin joukko mittauksia vaihdellen herätystapaa, levyjen keskinäistä asemaa, liitoksessa käytettyjen pulttien määrää sekä niiden kiristysmomenttia.

Tässä raportissa keskitytään koejärjestelyn kuvaamiseen ja mittaustulosten selostamiseen. Tuloksina esitellään alimmat ominaisuudet ja -taajuudet vaimennuksineen yksittäisille levyille sekä levyt liitettynä yhteen. Lisäksi esitellään koelaitteen herätepisteen vaste eri herätetasoilla.

2 Tavoite

Mittausten tavoite oli selvittää pultiliitoksen vaikutus rakenteen vaimennusominaisuuksiin. Pultiliitoksessa tapahtuvan pintojen hankauksen oletetaan lisäävän rakenteen vaimennusta. Pultiliitoksen tuoman vaimennuksen matemaattinen mallitus olisi merkittävä lisä rakenteiden dynaamisten ominaisuuksien mitoituksessa.

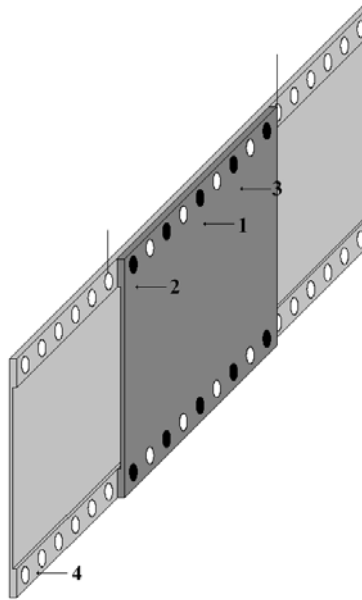
Teräksisen koelaitteen sisäinen vaimennus on pieni, joten pienikin vaimennuksen lisääntyminen oletettavasti näkyy mittauksissa. Vaimennuksen lisääntyminen voidaan havaita koelaitteen ominaistajuuksien laskuna, moodianalyysiohjelmiston laskeman ekvivalentin viskoosivaimennuksen nousuna ja piikkien levenemisenä taajuusvasteissa.

3 Koejärjestely

Rakenne koostuu kuvan 1 mukaisesti pidemmästä ja lyhyemmästä teräslevystä. Pidemmän levyn pituus on 1045 mm ja lyhyemmän 450 mm, molemmat ovat 250 mm leveitä. Molempien levyjen pitkiin sivuihin on porattu 50 mm välein reiät pultiliitosta varten. Levyjen pitkällä sivuilla kulkee 30 mm leveä liitosalue, jossa levyjen paksuus on 8,6 mm, loput levystä on koneistettu ohuemmiksi (paksuus 5 mm), jotta pultiliitoksen kontaktipinta olisi selkeästi määrätty.

Koelaitte ripustettiin aluksi kahden vaijerin avulla kattoon. Ripustuksen yksityiskohtiin kokeiltiin useita eri vaihtoehtoja siten, että tuenta häiritseisi mittauksia mahdollisimman vähän. Huomattiin, että tuentapisteen tulee sijaita neljänneksen levynpituuden etäisyydellä niitä vastaavista päistä. Laskelmien [1] mukaan valitun tuennan todettiin häiritsevän vähiten neljää

ensimmäistä värähtelymuotoa. Pitkän sivun jako suhteessa 1/4, 2/4 ja 1/4 vastasi isossa levyssä likimain kuudetta reikään levyn päästä lukien. Pienessä levyssä tuentapisteeksi määritettiin kolmas reikä päästä lukien.



Kuva 1. Pidempi ja lyhyempi levy liitettyinä yhteen. Liitospultit kuvattu mustina täplinä. Koelaitte tuettiin riipputtamalla sitä kuudensista rei'istä pidemmän levyn päästä lukien. Herätepisteet merkitty numeroin 1-4.

Vaijerien kiinnitystapa vaikutti resonanssioppiikkien selkeyteen ja mittausten toistettavuuteen. Parhaaksi yhdistelmäksi todettiin kiinnittää levyyn pianolangasta tehty lenkki, joka puolestaan kiinnitettiin silmukkaan vaijerin päässä. Muovipäällysteinen vaijeri kuorittiin muovista silmukan osalta. Yläpäistään vaijerit kiinnitettiin katossa olevaan kulmarautaan. Vaijerien kiinnitykseen kiinnitettiin erityistä huomiota, koska kaikki ylimääräiset vaimennuslähteet tulisi eliminoida koejärjestelystä. Täristimellä herätettäessä vaijerien ominaismuodot alkoivat häiritä mittauksia uudelleen, koska käytettiin pidempiä vaijereita (koelaitte tuli laskea alemmas, lattialle sijoitetun täristimen tasolle). Ongelma poistui vaihtamalla vaijerit ohuisiin rautalankoihin.

Isossa levyssä mittausverkko sisälsi yhteensä 50 mittauspistettä käsittäen viisi riviä ja kymmenen saraketta. Rivien keskinäinen etäisyys oli vakio 55 mm. Ensimmäisen ja toisen sarakkeen välimatka oli 150 mm, muualla etäisyys sarakkeesta toiseen oli 100 mm. Verkko asettui levyn keskelle siten että reunimmaisten rivien pisteet olivat 15 mm etäisyydellä levyn pitkistä sivuista ja reunimmaiset sarakkeet olivat 48 mm etäisyydellä päistä. Pienessä levyssä oli 20 mittauspistettä viidessä rivissä ja neljässä sarakkeessa. Riviväli oli kaikkialla 55 mm ja sarakkeväli vastaavasti 100 mm. Reunimmaisten rivien etäisyys pienen levyn pitkistä sivuista oli 15 mm molemmissa reunoissa, mutta sarakkeista toinen oli 100 mm päädyistä ja toinen 50 mm päädyistä. Molempien levyjen mittauspisteiden koordinaatit on esitetty liitteessä 3.

4 Rajaukset

Mittauksissa pyrittiin samaan esille pulttiliitoksen vaimennuksen kasvu herätetason kasvaessa. Tämä vaatii toisistaan merkittävästi poikkeavia herätetasoja. Eri herätetasoilla voi koelaitteen vuorovaikutus ympäristönsä kanssa tuoda esiin muitakin vaimennusmekanismeja. Ulkopuolinen vaimennus voi aiheutua tuennasta, ilmapumppauksesta tai anturien kaapeleista. Nämä pyrittiin minimoimaan kiinnittämällä huomiota koelaitteen tuentaan ja anturointiin.

5 Menetelmät

5.1 Iskuvasarakokeet

Mittaukset tehtiin LMS:n Cada-X (FMON/GAM) ohjelmistolla, käyttäen Scadas III mittausetupäätä. Heräte annettiin B&K 8200 voima-anturilla varustetulla iskuvasaralla (V_2). Voima-anturin signaali vahvistettiin varausvahvistimessa B&K 2635 ennen mittausetupäätä. Vasteiden mittaamiseen käytettiin kymmentä Endevco E63B-100 kolmen suunnan ICP-antureita, joilla mitattiin kiihtyvyyttä vain anturin z-suunnassa, vastaten levyn pintaa vastaan kohtisuoraa suuntaa.

Mittauksia varten valmistettiin massaltaan antureita vastaavat painot kiinnitettäväksi niihin mittauspisteisiin, joihin ei kyseisellä mittaushetkellä ollut asennettu antureita. Anturit ja niitä korvaavat painot kiinnitettiin vahalla levyjen sileille puolille. Isossa levyssä edettiin mittaamalla vasteet riveittäin ja pienemmässä sarakeittain (kuvat 2 ja 3). Heräte annettiin levyn koneistetulta puolelta mittauspisteeseen 50 isossa levyssä ja mittauspisteeseen 70 pienessä levyssä.

Iso levy		I	I		I	I															
Mittaus 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittaus 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Mittaus 3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittaus 4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Mittaus 5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10											
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20											
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30											
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40											
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50											

Kuva 2. Mittauksen eteneminen viidessä ison levyn mittauksessa on esitetty lihavoimalla ko. mittauspisteen numero. Tuentavaijerit on merkitty likimääräisesti mittauksissa 1 ja 2.

Pieni levy		I	I			I	I			
Mittaus 1		51	52	53	54	Mittaus 2	51	52	53	54
		55	56	57	58		55	56	57	58
		59	60	61	62		59	60	61	62
		63	64	65	66		63	64	65	66
		67	68	69	70		67	68	69	70

Kuva 3. Mittaukset etenivät kaksi saraketta kerrallaan pienen levyn tapauksessa. Tuentavaijerit on merkitty likimääräisesti kuvaan.

Yksittäisten mittausten jälkeen levyt pultattiin vastakkain yhteen siten että pieni levy sijaitsi ison levyn keskellä ja anturien sijoituspaikat päällekkäin. Pultitus tehtiin aluksi levyjen joka toisesta reiästä kymmentä pulttia käyttäen. Pulttien (M10, lujuusluokka 10.9, DIN 933) ja mutterien (M10, DIN 934) kierteet voideltiin molybdeenisulfidin ja vaseliinin seoksella. Liitoksessa käytettiin aluslevyä (M10, DIN 125) molemmiin puoliin. Taulukon mukainen kiristys lujuusluokan 10.9 pultille on 60 Nm, tässä tapauksessa käytettiin lujuusluokan 8.8 pultille tarkoitettua 41 Nm kiristystä.

Levyt tuettiin ison levyn kiinnityspisteistä aivan kuten ison levyn yksittäisessä mittauksessa. Konstruktiota mitattiin jonka jälkeen liitoksesta poistettiin 4 pulttia, jolloin levyt olivat kiinni yhteensä kuudella pultilla joka neljännessä reiästä. Pulttien poistamisen jälkeen mittaus toistettiin. Kaikista em. Mittauksista tehtiin moodianalyysi tuloksinaan neljä alinta ominaismuotoa, -taajuutta sekä niiden vaimennukset. Mittauksissa käytettiin samaa iskuvasaraa ja voima-anturia kuin aiemminkin, vasteet nyt vain mitattiin viidestä pisteestä kerrallaan B&K 4375 ja B&K 4393 kiihtyvyyssantureilla käyttäen B&K 2635 varausvahvistimia. Anturit kiinnitettiin vain ison levyn mittauspisteisiin.

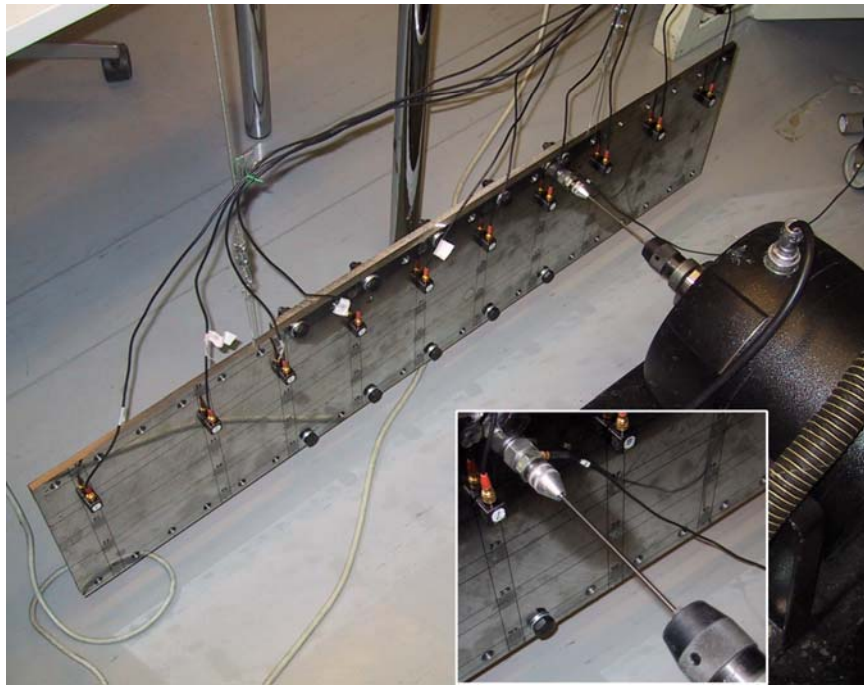
Levyt yhdessä		I	I			I	I															
Mittaus 1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittaus 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Mittaus 6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittaus 10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50

Kuva 4. Mittauksien eteneminen yhdistettyjen levyjen tapauksessa. Huomaa, että kymmenestä mittauksesta on esitetty vain ensimmäinen, toinen, kuudes ja viimeinen.

5.2 Vastemittaukset eri herätetasoin

Iskuvasarakokeiden jälkeen koelaitetta herätettiin tärstimellä (kuva 5) tarkoituksena saada aikaan suurempia värähtelytasoja. Pulttien luistoa pyrittiin saamaan esiin syöttämällä värähtelymuodoille enemmän energiaa. Lisäksi tärstimen avulla koelaitteen värähtelytaso oli vaihdeltavissa. Käytetty tärstin oli toimintaperiaatteeltaan sähködynaaminen, tyypiltään Ling Dynamic Systems 450 Series Vibrator. Koelaitteeseen terästangon avulla syötetty voima mitattiin B&K 8200 -anturilla. Syöttöpisteen värähtelynopeutta mitattiin koelaitteen toiselta puolelta laser-vibrometrillä (Polytec OFV-3000). Tärstin oli sijoitettu ison levyn puolelle ja värähtelynopeus mitattiin pienen levyn puolelta. Koelaitteen värähtelymuotoja mitattiin myös Endevco E63B -kiihtyvyyssanturein värähtelymuodon varmistamiseksi. Nyt

mittauspisteverkko oli karkeampi kuin iskuvarakokeissa, koska koelaitteen värähtelymuodot olivat jo määritetyt. Mittasignaalit kerättiin aiempien mittausten tapaan Scadas III mittausetupäällä ja Cada-X -ohjelmistolla.



Kuva 5. Sähködynaamisen täristimen voima välitettiin terästangolla koelaitteeseen. Alhaalla lähikuva täristimen karasta, terästangosta sekä voima-anturista ja sen karasta. Täristin on kuvassa kytketty reunimmaiseen herätepisteeseen (kuva 1, piste 2).

Täristimellä kokeiltiin ensiksi laajakaistaista kohinaherätettä, jonka huomattiin aiheuttavan paljon jäykän kappaleen liikkeitä koelaitteeseen. Lisäksi laitteeseen syötetty energia jäi vaatimattomaksi, koska se hajaantui suurelle taajuuskaistalle. Tämän jälkeen koelaitetta herätettiin vakiotaajuisella sinillä koelaitteen alimmalla ominaistajuudella. Tämä ei tuottanut tulosta pulttien täydellä kiristyksellä (41Nm).

Seuraavaksi koelaitteen levyt irrotettiin toisistaan ja pinnat tarkastettiin. Pinnat puhdistettiin, pultit vaihdettiin uusiin, niiden kierteet rasvattiin ja koelaitteeseen kasattiin uudelleen. Nyt kiristysmomenttina oli 20 Nm. Kiristyksen laskettua puoleen tuli esiin merkkejä luistosta. Koelaitteen vaste ei kasvanut sisään syötetyn energian mukana lineaarisesti.

Vakiotaajuisella siniherätteellä ongelmaksi havaittiin resonanssissa pysyminen. Resonanssitaajuuden huojuessa lievästi vaste vaihtelee rajummin. Käytetyn laitteiston avulla ei voinut herättää sinipyhykäisyillä tai säätää herätetaajuutta mittausten aikana. Kapeakaistainen satunnaisheräte osoittautui hyväksi vaihtoehdoksi, koska sillä pystyttiin rajoittumaan vain yhden ominaisuuden tarkasteluun, minimoimaan koelaitteen jäykän kappaleen liikkeitä ja vuorovaikutukset tuentavaijerien kanssa. Herätekaistaksi valittiin 10 Hz koelaitteen alimman ominaistajuuden ympäristössä.

Koelaitetta herätettiin kolmesta eri pisteestä sen pituussuunnassa (kuva 1, pisteet 1-3). Tämän jälkeen pieni levy siirrettiin ison levyn päähän ja laitetta herätettiin kahdesta pisteestä (kuva 1,

pisteet 1 ja 2). Pulttien kiristystä nimellismomenttiin kokeiltiin vielä kerran. Lopuksi levyjen välinen liitos voideltiin pulttien kierteisiin käytetyllä vaseliinin ja molybdeenisulfidin seoksella ja koelaitetta herätettiin keskeltä (kuva 1, piste 1) pienen levyn ollessa niinikään keskellä.

6 Tulokset

6.1 Iskuvasarakokeet

Iskuvasarakokeissa kerätty data analysoitiin Cada-X moodianalyysiohjelmistolla SDOF-menetelmää käyttäen. Koelaitteen osien, ison ja pienen levyn mitatut ominaistajuudet on esitetty taulukossa 1. Koko koelaitteelle tehdyt iskuvasarakokeet antoivat taulukon 2 mukaiset alimmat ominaistajuudet. Kunkin tapauksen neljä alinta ominaismuotoa on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 1. Ison ja pienen levyn neljä alinta ominaistajuutta levyt erillään mitattuna.

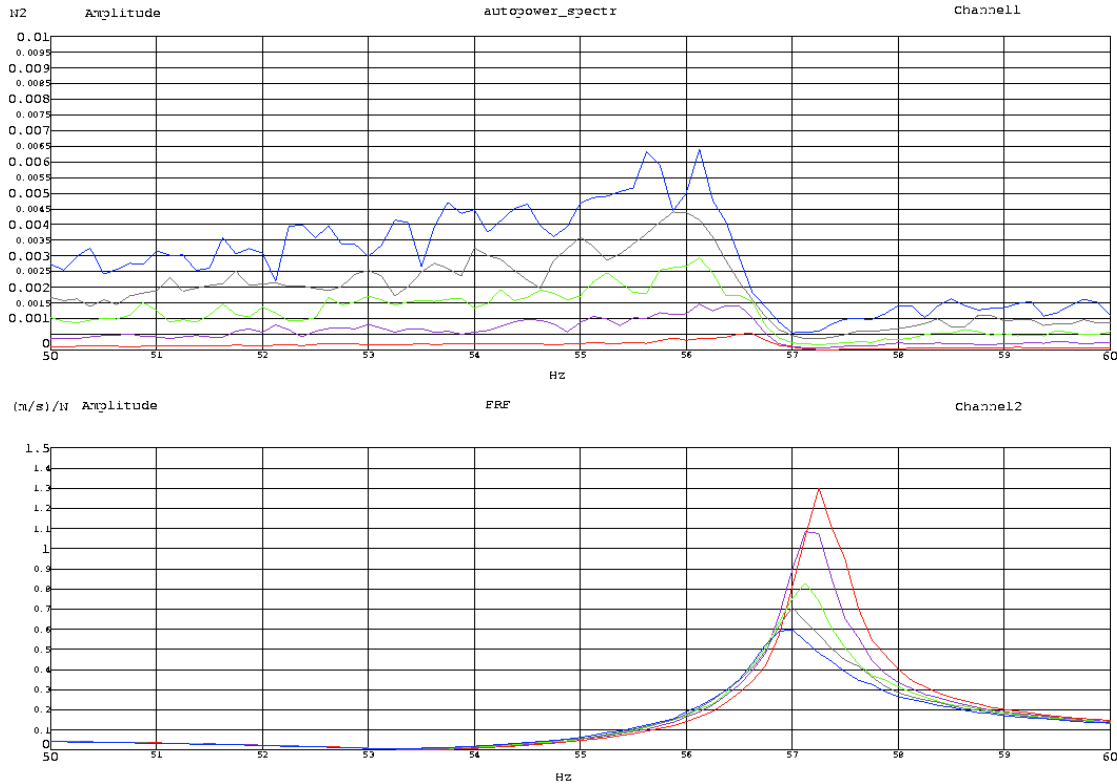
Levyt yksinään	Iso levy		Pieni levy	
Ominaismuoto	Taajuus [Hz]	Vaimennus [%]	Taajuus [Hz]	Vaimennus [%]
1.	32,7	0,06	156,4	0,18
2.	66,8	0,15	175,9	0,04
3.	90,3	0,07	359,6	0,04
4.	138,4	0,07	376,0	0,09

Taulukko 2. Koelaitteen neljä alinta ominaistajuutta kymmenellä ja kuudella liitospultilla.

Levyt yhdessä	10 pultilla		6 pultilla	
Ominaismuoto	Taajuus [Hz]	Vaimennus [%]	Taajuus [Hz]	Vaimennus [%]
1.	57,7	0,09	56,4	0,13
2.	100,3	0,08	97,1	0,12
3.	127,2	0,04	123,3	0,13
4.	160,4	0,04	157,1	0,10

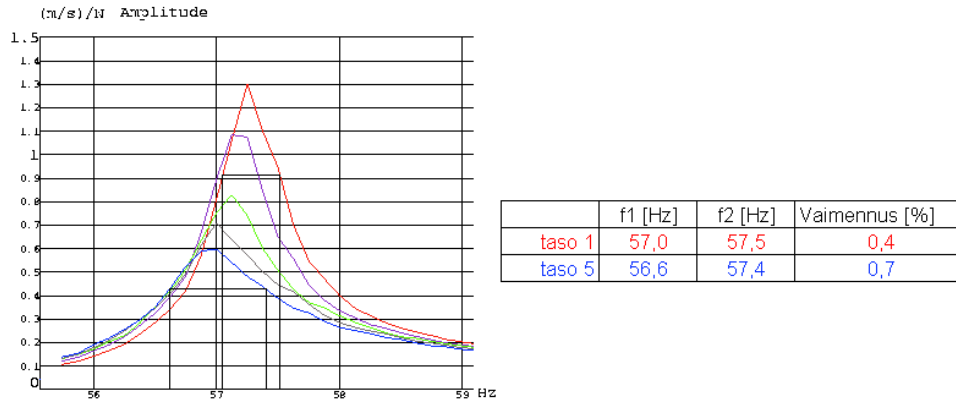
6.2 Vastemittaukset eri herätetasoin

Koelaitetta herätettäessä tärhistimen eri värähtelytasoin huomattiin, että tietyn herätetason yläpuolella rakenteen vaste ei enää ole verrannollinen herätetasoon. Tämä havainnollistettiin herättämällä koelaitetta 10 Hz kaistalla sen ensimmäisen ominaismuodon ympäristössä ja mittaamalla koelaitteen taajuusvastefunktioita eri herätetasoin. Kuvassa 6 ylhäällä näkyy herätespektri ja alhaalla koelaitteen herätepisteen taajuusvaste. Kuvan tapauksessa pieni levy oli kiinnitetty ison levyn keskelle ja koelaitetta herätettiin pisteestä 2. Vaimennuksen kasvu herätetason kasvaessa näkyy taajuusvastefunktion madaltumisen ja pyöristymisen lisäksi pienenä ominaistajuuden laskuna.



Kuva 6. Koelaitteen herätevoiman spektri (ylh.) ja sitä vastaava taajuusvaste (alh) viidellä eri herätetasolla.

Kuvasta 6 arvioitiin vaimennuksen suuruutta matalimman ja korkeimman herätetason tapauksissa. Vasteiden huippuarvoista määriteltiin puolitehopisteet ja niitä vastaavat taajuudet, tämän jälkeen vaimennukset laskettiin jakamalla taajuuksien erotus niiden summalla [2]. Menetelmä ei ole tarkka, koska vasteen huippuarvon määrittäminen mittauksin on epätarkkaa (riippuu rakenteen ominaistaajuuden osumisesta mittalaitteen spektriviivalle). Parempi tulos saataisiin laskemalla vaimennus mittaustuloksiin sovitetusta käyrästä. Käytetty likimääräinen laskelma kuitenkin osoittaa, että vaimennus kasvaa herätteen amplitudin kasvaessa.



Kuva 7. Vaimennuksen määrittely puolitehopisteiden avulla kahdelle herätetasolle.

6.3 Kulumajäljet liitoksessa

Pulttien löysentämisen yhteydessä liitos avattiin, tarkastettiin ja puhdistettiin uudelleen. Liitoksen päissä huomattiin ruoste- ja kulumajälkiä (kuva 8). Pienen levyn päiden kohdalla oli kontaktipinnoissa havaittavissa kulumista sekä ruostetta. Liitoksessa oli tapahtunut luistoa tai pintojen iskeytymistä toisiinsa tärityksen aikana. Jäljillä lienee yhteys liitoksesta kuuluneisiin naksahduksiin, joita esiintyi suurimmilla tasoilla täritystäessä.



Kuva 8. Levyissä näkyi kulumajälkiä ja ruosteläikkiä. Nuolen osoittama ruosteinen raita on syntynyt pulttiliitoksen päähän. Vasemmalla alhaalla lähikuva pienen levyn päästä.

7 Tulosten tarkastelu

Iskuvarakokeilla ei koelaitteen vaimennuksen muutosta mittatarkkuuden rajoissa voida sanoa esiintyneen. Neljän pultin poistaminen ei löysentänyt liitosta niin merkittävästi, että iskuvarakoe olisi riittänyt vaimennuksen muutoksen toteamiseen. Tällaisessa tapauksessa iskuvarakoe onkin tarkoitukseen huonosti sopiva menetelmä, koska vasaraniskun aiheuttama värähtelytaso on matalahko ja sen suuruus vaikeasti kontrolloitavissa. Koelaitteen vaimennus riippuu herätteen amplitudista, mutta amplitudin pienessä laitteen sisäinen vaimennus tulee hallitsevaksi. Iskuvarakokeella keräämällä talteen taajuusvasteita ei tiedetä millä alueella ollaan, tällöin hallitsevaksi ilmeisesti tulee matalatasoinen vaimenevan värähtelyn "häntä".

Pulttiliitoksen koelaitteen vaimennuksen kasvu havaittiin herättämällä koelaitetta eritasoisilla satunnaisheränteillä. Vaimennuksen kasvu havaittiin taajuusvasteita vertailemalla. Täristemellä tuotettu vakiotaajuinen siniheräte oli vaikea saada juuri tarkalleen koelaitteen ominaistajuudelle, koska ominaistajuus riippui hieman herätetasosta. Kapeakaistainen kohinaheräte havaittiin sopivimmaksi käytettävissä olevista vaihtoehdoista.

Tulosten suunta oli ennakoidun mukainen: vaimennus kasvoi herätetason kasvaessa ja aiheutti ominaistajuuden alenemista.

8 Yhteenveto

Pulttiliitoksen vaimennuksen koelaitetta mitattiin iskuvarakokein ja sähködynaamisella täristemellä herätettynä. Iskuvarakokein ei vaimennuksen kasvua pystytty mittamaan. Vaimennuksen kasvu sen sijaan havaittiin herättämällä koelaitetta täristemellä eritasoisilla satunnaisheränteillä koelaitteen alimman ominaismuodon ympäristössä.

Pulttiliitokseen liittyvien johtopäätösten tekeminen vaatii lisätyötä mallinnuksen ja ilmiöiden ymmärtämisen saralla. Tämän raportin selostamia mittaustuloksia käytetään laskentamallin tarkennukseen ja verifiointiin.

Lähteet

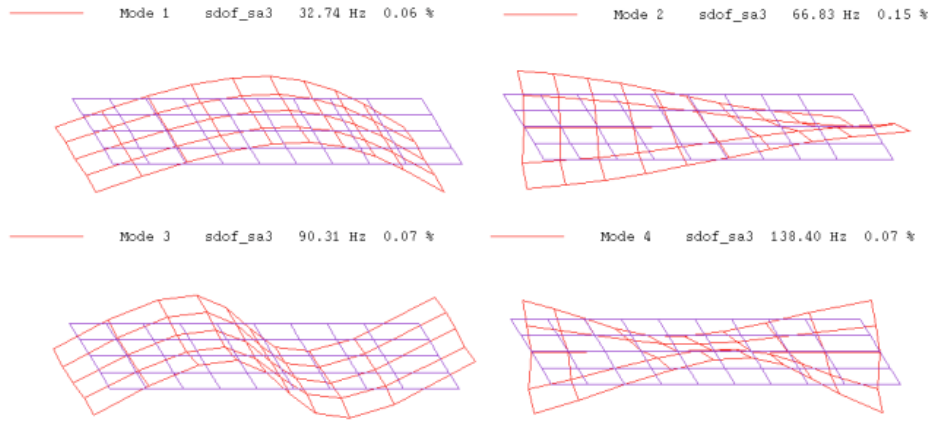
1. Klinge P. et al. 2001. *Pulttiliitosten vaimennuksen koelaitteen mitoitus*. VTT Valmistustekniikka, työraportti AVAL35-011079. Espoo. 11 s.
2. Clough R. & Penzien J. 1975. s. 73. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill. USA. 634 s. ISBN 0-07-011392-0.

Liite 1. Iskuvasarakokein määritetyt ominaismuodot

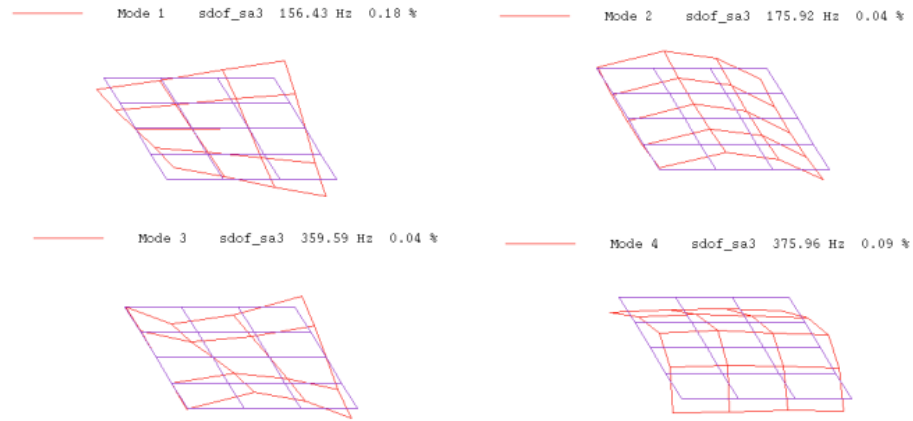
Kuva 1 esittelee ison levyn neljä alinta ominaismuotoa. Muodot vuorottelevat siten, että pituussuuntainen taivutus on alin ominaismuoto. Seuraavana järjestyksessä on pituussuuntainen vääntömuoto, jonka jälkeen on toinen pituussuuntainen taivutusmuoto ja lopuksi toinen vääntömuoto.

Kuvassa 2 näkyvät pienen levyn ominaismuodot. Alin ominaismuoto on pituussuuntainen vääntömuoto, toinen muoto taas on pituussuuntainen taivutus. Kolmas ominaismuoto on pituussuuntainen vääntö ja neljäs poikkisuuntainen taivutus. On huomattava, että mittauspisteverkko ei sijoittunut symmetrisesti levyn keskelle. Tästä johtuen muodot eivät näytä aivan symmetrisiltä levyn keskilinjan suhteen.

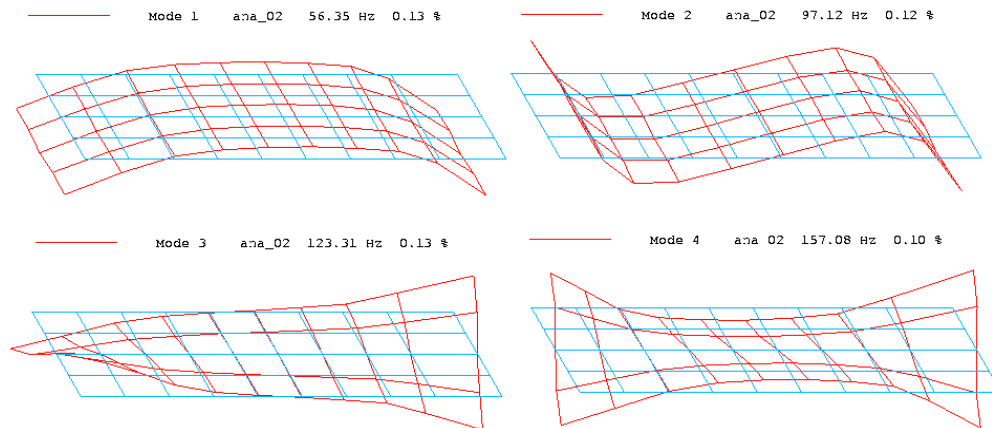
Koelaitteen neljä alinta ominaismuotoa näkyvät kuvassa 3. Kuvat vastaavat kuudella liitospultilla pultilla liitetyn koelaitteen mittauksia. Pieni levy toimii keskellä jäykisteenä siten, että ominaismuodoista kaksi alinta on taivutusmuotoja pituussuunnassa ja kaksi seuraavaa vääntömuotoja.



Kuva 1. Ison levyn neljä alinta ominaismuotoa. Kuvassa on esitetty päällekkäin ominaismuoto ja deformoitumaton muoto.



Kuva 2. Pienen levyn neljä alinta ominaismuotoa. Levy on vastaavassa asennossa kuin iso levy kuvassa 1 eli pulttiliitoksen reiät sijaitsevat levyn vasemmalta oikealle kulkevilla sivuilla.

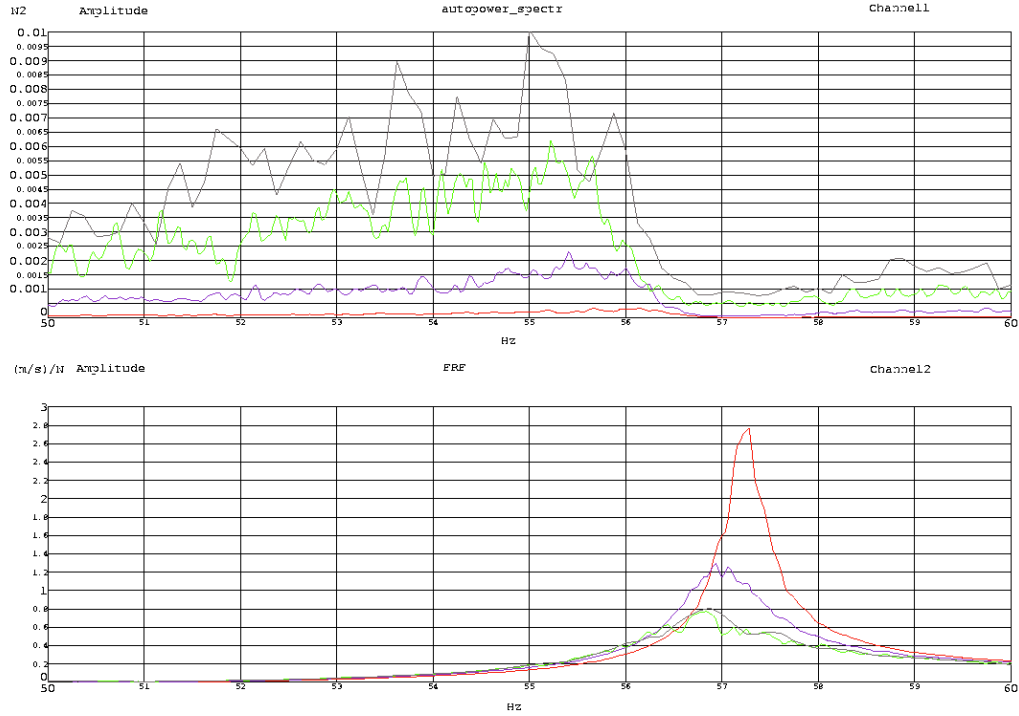


Kuva 3. Koelaitteen neljä alinta ominaismuotoa.

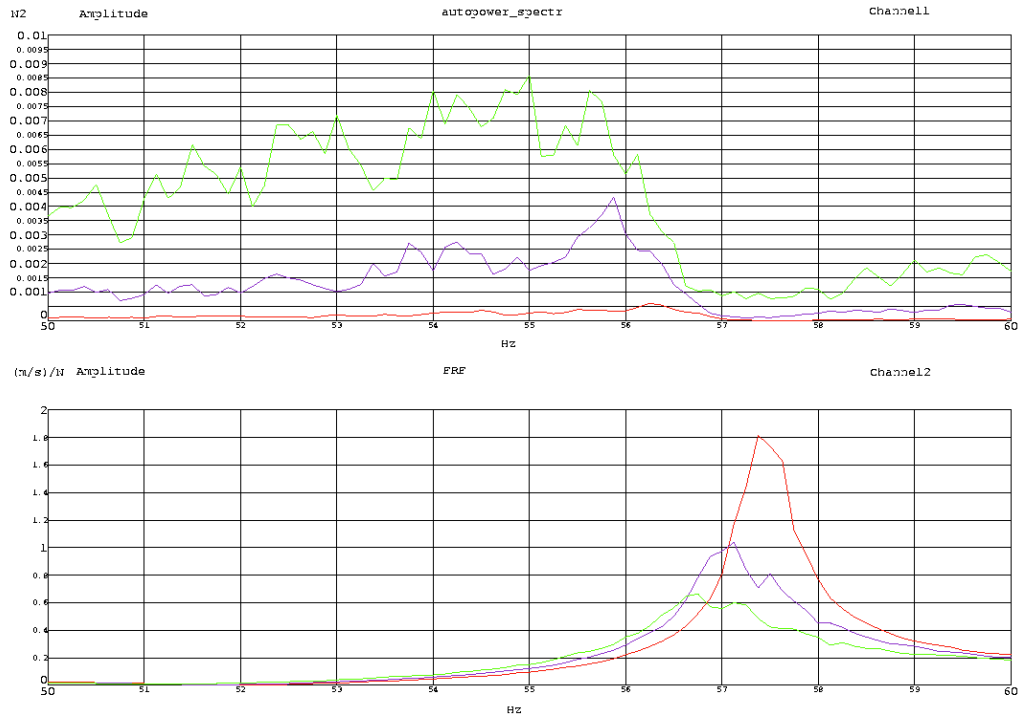
Liite 2. Vastemittausten tulokset eri tapauksissa

Raportissa esitellyssä tapauksessa herätevoima syötettiin pisteestä 2 (luku 3: Koejärjestely, kuva 1) pienen levyn ollessa keskellä isoa levyä. Kuvassa 1 nähdään värähtelynopeusvaste, kun heräte on annettu pisteeseen 1 eli koelaitteen keskelle ja kuvassa 2 on heräte annettu pisteeseen 3. Vaste on mitattu levyn koelaitteen toiselta puolelta (heräte annettu ison levyn puolelta, mitattu pienen levyn puolelta).

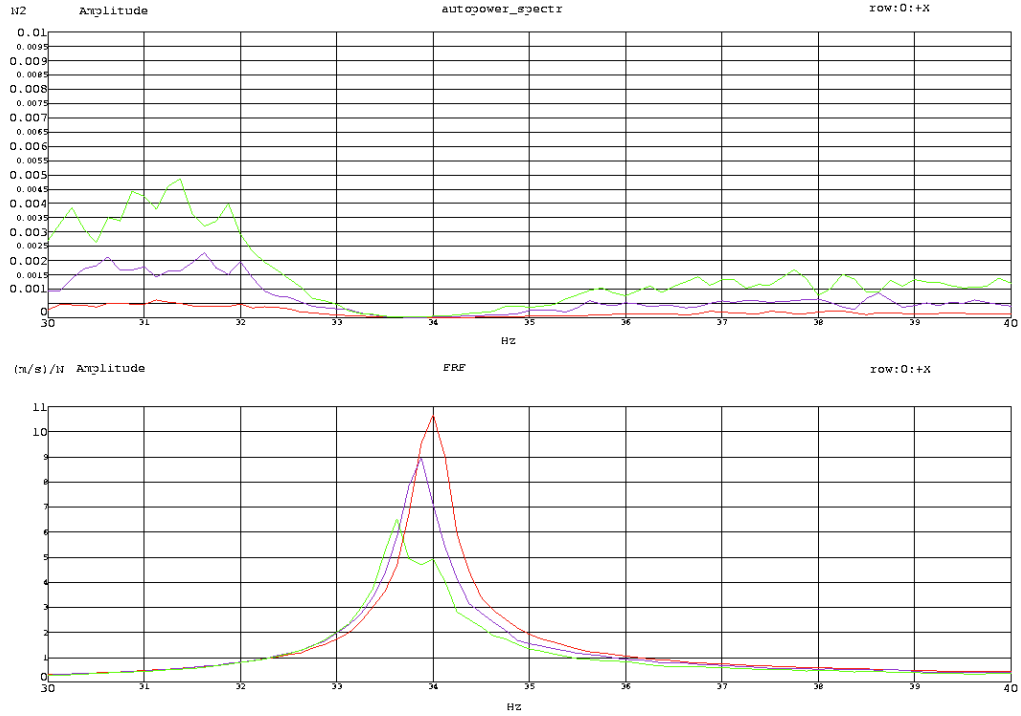
Seuraavaksi pieni levy liitettiin ison levyn päähän. Pultit kiristettiin aluksi 20 Nm momenttiin. Kuva 3 esittelee herätteen ja vasteen herätepisteestä 1 ja kuva 4 herätepisteestä 2. Sitten pultit kiristettiin 41 Nm momenttiin kun pieni levy oli kiinnitettynä ison päähän. Kuvasta 5 nähdään tulokset herätepisteestä 1 herätettynä. Lopuksi kokeiltiin vielä liitoksen voitelua. Molempien levyjen liitospintoihin levitettiin molybdeenisulfidin ja vaseliinin seosta ja pultit kiristettiin 20 Nm momenttiin, mittaustulokset kuvassa 6.



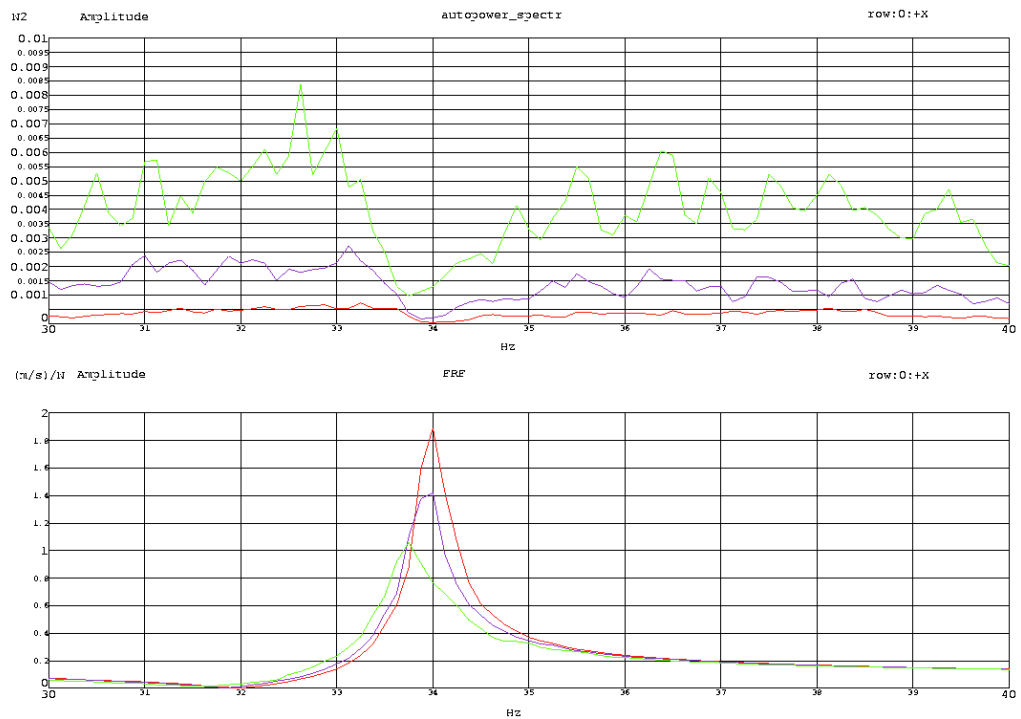
Kuva 1. Koelaitteeseen keskelle annettu heräte (ylh.) ja saman pisteen värähtelynopeuden taajuusvaste (alh).



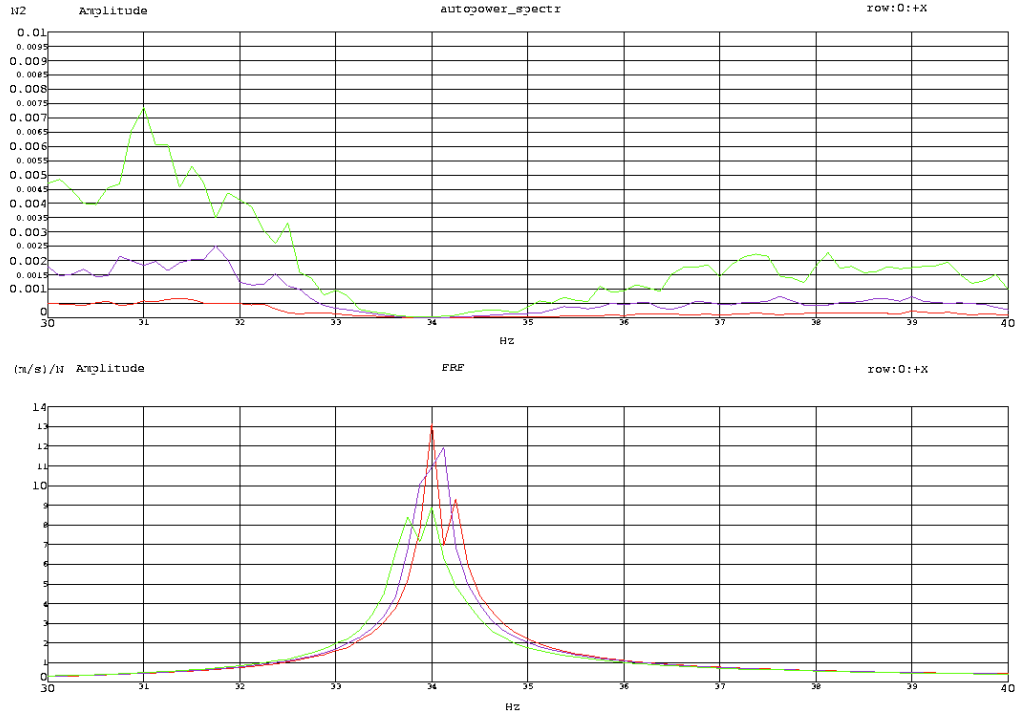
Kuva 2. Koelaitteeseen annettu heräte pisteeseen 3 ja sitä vastaava taajuusvaste.



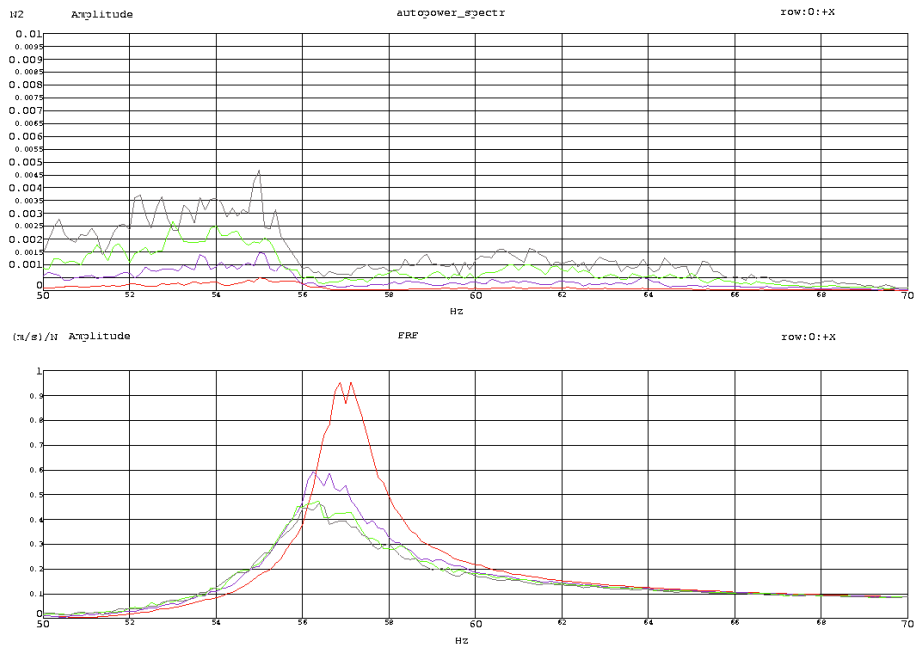
Kuva 3. Heräte keskellä (herätepiste 1). Pieni levy ison oikeassa reunassa.



Kuva 4. Heräte pisteessä 2. Pieni levy ison oikeassa reunassa.



Kuva 5. Heräte ja taajuusvaste kun pultit oli kiristetty 41 Nm momenttiin. Heräte pisteestä 1, pieni kiinnitettyä ison levyn päähän.



Kuva 6. Kuvan tapauksessa on heräte keskellä, pieni levy keskellä, liitos voideltu ja pultit kiristetty 20 Nm momenttiin.

Liite 3. Koelaitteen mittauspisteet

Solmun numero	X	Y	Z	Kommentti	Solmun numero	X	Y	Z	Kommentti
Iso levy									
1	220.0000	0.0000	950.0000	Vas. ylänurkka	41	0.0000	0.0000	950.0000	Vas. alanurkka
2	220.0000	0.0000	800.0000		42	0.0000	0.0000	800.0000	
3	220.0000	0.0000	700.0000		43	0.0000	0.0000	700.0000	
4	220.0000	0.0000	600.0000		44	0.0000	0.0000	600.0000	
5	220.0000	0.0000	500.0000		45	0.0000	0.0000	500.0000	
6	220.0000	0.0000	400.0000		46	0.0000	0.0000	400.0000	
7	220.0000	0.0000	300.0000		47	0.0000	0.0000	300.0000	
8	220.0000	0.0000	200.0000		48	0.0000	0.0000	200.0000	
9	220.0000	0.0000	100.0000		49	0.0000	0.0000	100.0000	
10	220.0000	0.0000	0.0000		50	0.0000	0.0000	0.0000	Herätepiste 4
11	165.0000	0.0000	950.0000		-	195.0000	0.0000	475.0000	Herätepiste 1
12	165.0000	0.0000	800.0000		-	195.0000	0.0000	275.0000	Herätepiste 2
13	165.0000	0.0000	700.0000		-	195.0000	0.0000	575.0000	Herätepiste 3
14	165.0000	0.0000	600.0000						
15	165.0000	0.0000	500.0000						
16	165.0000	0.0000	400.0000						
17	165.0000	0.0000	300.0000						
18	165.0000	0.0000	200.0000						
19	165.0000	0.0000	100.0000						
20	165.0000	0.0000	0.0000						
Pieni levy									
21	110.0000	0.0000	950.0000		51	0.0000	0.0000	0.0000	
22	110.0000	0.0000	800.0000		52	0.0000	0.0000	100.0000	
23	110.0000	0.0000	700.0000		53	0.0000	0.0000	200.0000	
24	110.0000	0.0000	600.0000		54	0.0000	0.0000	300.0000	
25	110.0000	0.0000	500.0000		55	-55.0000	0.0000	0.0000	
26	110.0000	0.0000	400.0000		56	-55.0000	0.0000	100.0000	
27	110.0000	0.0000	300.0000		57	-55.0000	0.0000	200.0000	
28	110.0000	0.0000	200.0000		58	-55.0000	0.0000	300.0000	
29	110.0000	0.0000	100.0000		59	-110.0000	0.0000	0.0000	
30	110.0000	0.0000	0.0000		60	-110.0000	0.0000	100.0000	
31	55.0000	0.0000	950.0000		61	-110.0000	0.0000	200.0000	
32	55.0000	0.0000	800.0000		62	-110.0000	0.0000	300.0000	
33	55.0000	0.0000	700.0000		63	-165.0000	0.0000	0.0000	
34	55.0000	0.0000	600.0000		64	-165.0000	0.0000	100.0000	
35	55.0000	0.0000	500.0000		65	-165.0000	0.0000	200.0000	
36	55.0000	0.0000	400.0000		66	-165.0000	0.0000	300.0000	
37	55.0000	0.0000	300.0000		67	-220.0000	0.0000	0.0000	
38	55.0000	0.0000	200.0000		68	-220.0000	0.0000	100.0000	
39	55.0000	0.0000	100.0000		69	-220.0000	0.0000	200.0000	
40	55.0000	0.0000	0.0000		70	-220.0000	0.0000	300.0000	Herätepiste