
	<p style="text-align: center;"><i>Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia</i></p> <p style="text-align: center;">Ikkunalasin ominaismuodot</p> <p style="text-align: center;">Lujax</p>	<p>Dokumentin numero.: D058/04</p> <p>Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01</p> <p>Sivu: 1</p>
--	--	--

LUJAX

IKKUNALASIN OMINAISMUODOT


LASKENNAN JA MITTAUSTEN VERTAILUA JA VALIDOINTIA

	Vaihe	Nimi	Päiväys	Allekirjoitus
Valmistelija/ Lujax:	R2	Matti Hyötyniemi	2007-01-01	
Tarkastaja/ Asiakas:				
Hyväksyjä: (Sisäinen)				
Hyväksyjä: (Ulkoinen)				

	<p style="text-align: center;"><i>Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia</i></p> <p style="text-align: center;">Ikkunalasin ominaismuodot</p> <p style="text-align: center;">Lujax</p>	<p>Dokumentin numero.: D058/04</p> <p>Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01</p> <p>Sivu: 3</p>
--	--	--

Sisällysluettelo

YLEISTÄ	4
TEOREETTINEN TULOS.....	5
TULOS FE-LASKENNASTA VAPAASTI TUETULLE LASILEVYLLE	6
VERTAILU TEOREETTISIIN TULOKSIIN.....	8
KAKSI LASILEVYÄ, PAINE- JA INERTIAKYTKENTÄ.....	9
KAKSI LASIA, ILMARAKO JA ULKOPUOLINEN ILMAMASSA	11
MITTAUSTULOS.....	11
PÄÄTELMIÄ.....	13
LIITTEET	14

	<p><i>Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia</i></p> <p>Ikkunalasin ominaismuodot</p> <p>Lujax</p>	<p>Dokumentin numero.: D058/04</p> <p>Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01</p> <p>Sivu: 4</p>
--	--	---

YLEISTÄ


Tämä raportti vertailee periaatteessa tarkan teoreettisen ratkaisun, FE –laskennan sekä mittaamalla saatujen tuloksien arvoja keskenään. Pyrkimyksenä on lähinnä demonstroida erilaisia laskennan ja mittausten suomia mahdollisuuksia ja rajoja.

Tarkasteltavana on 2-kerroksisen, tavallisen lämpöikkunan sisälasi. Ikkunan koko on 2600 x 1150 mm ja nimellinen paksuus 6mm. Laskennassa on käytetty seuraavia materiaaliarvoja¹: $E=75 \text{ Gpa}$, $\rho=2500 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,25$. Lasi on reunoiltaan kiinni kehyksessä kumitiivisteiden välityksellä.



Kuva 1 Anturi kiinnitettyä sisälasiin

¹ RT –sivu RT X(31)-33100, JT-turvalasit, tammikuu 1990

	Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia	Dokumentin numero.: D058/04
	Ikkunalasin ominaismuodot	Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01
Lujax		Sivu: 5

TEOREETTINEN TULOS

Suorakulmainen, ohut lasi oletetaan reunoiltaan vapaasti tuetuksi värähtelijäksi tyhjiössä, jolloin sille saadaan perinteinen nk. *Navierin ratkaisu*²:

Ikkunalasin värähtely

kN := 1000N dm := 10cm

a := 1150mm b := 2600mm h := 6mm Lasin mitat

$E := 7500 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$ $\rho := 2.5 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$ v := 0.25 Materiaaliominaisuudet

$m_- := \rho \cdot h$ $K := \frac{E \cdot h^3}{12(1 - v^2)}$ Laatan neliömassa ja taivutusjäykkyys

m := 1..3 n := 1..6

$\omega_{m,n} := \pi \cdot \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{K}{m_-}}$ Vapaasti tuetun laatan Navierin ratkaisun kulmanopeudet

$f := \frac{\omega}{2\pi}$ $f = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13.914 & 20.744 & 32.128 & 48.065 & 68.555 & 93.599 \\ 0 & 48.827 & 55.657 & 67.04 & 82.977 & 103.468 & 128.512 \\ 0 & 107.014 & 113.844 & 125.228 & 141.165 & 161.655 & 186.699 \end{pmatrix} \text{ Hz}$ Ominaistaajuudet alimmilla muodoilla

Tulosmatriisissa f on esitetty vaimentamattomat ominaistaajuudet pystysuunnassa 0-5 siniaallon puolikkaalle ja poikittaissuunnassa 0-3 siniaallon puolikkaalle. (Huomaa indeksoinnin alku nollasta).

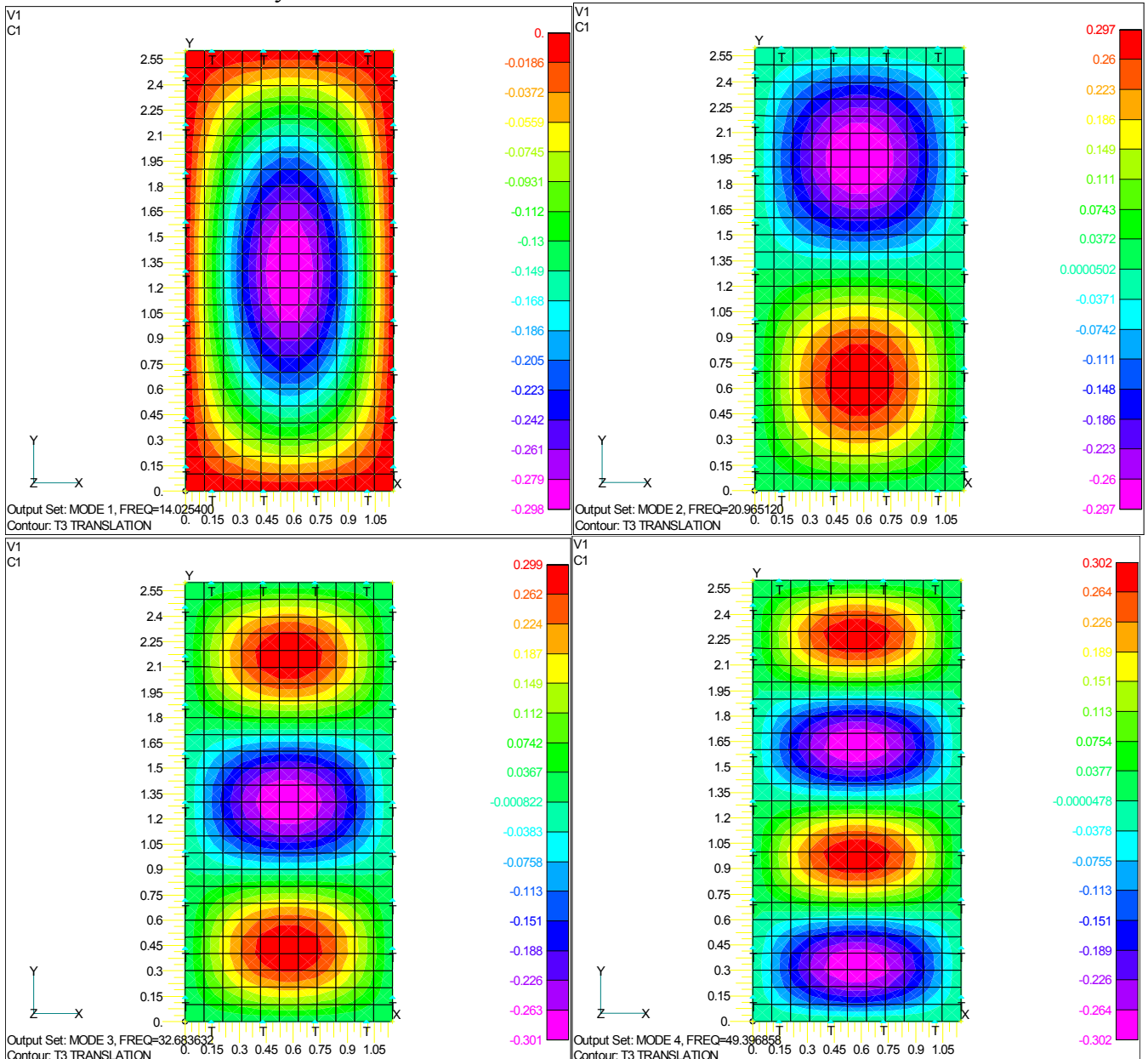
Ulko- ja sisälasin välinen etäisyys on 50mm.

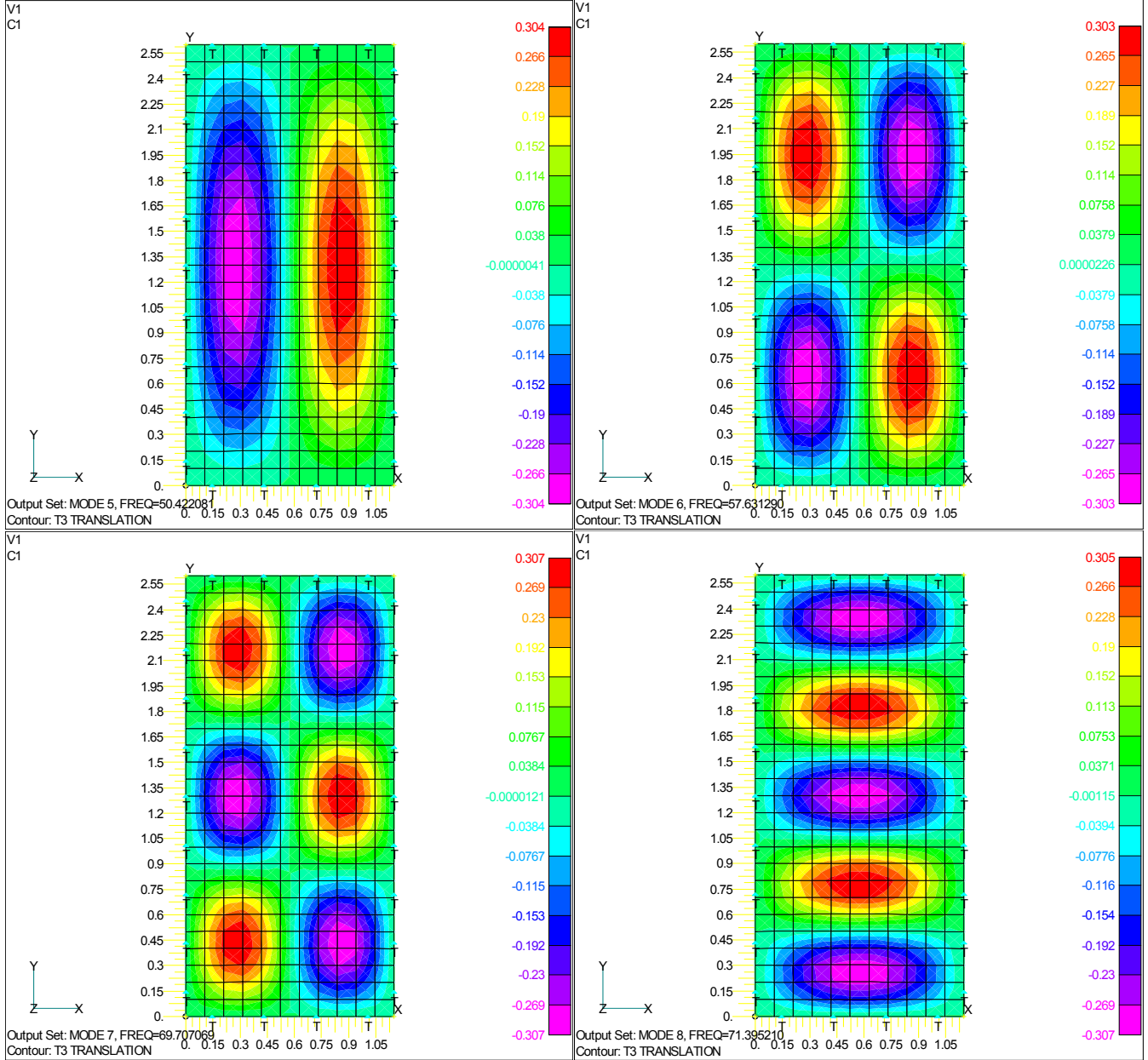
² Erkki Pennala: Koneiden ja rakenteiden värähtelyt (1998)

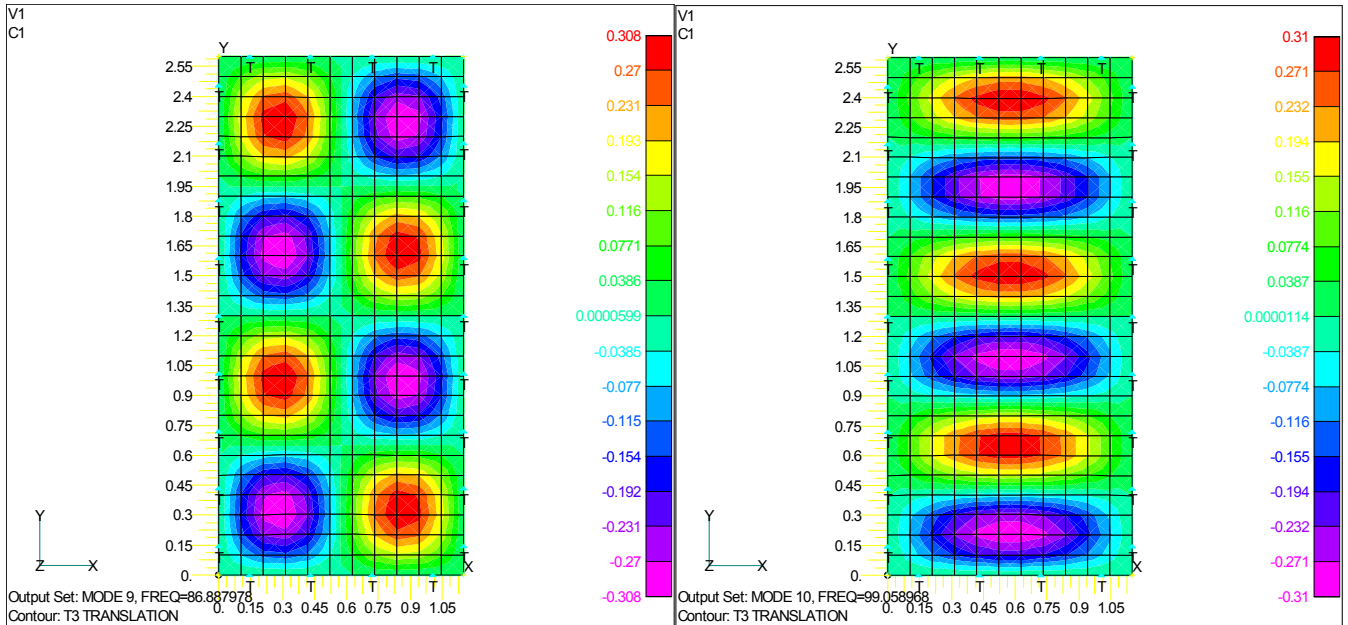
TULOS FE-LASKENNASTA VAPAASTI TUETULLE LASILEVYLLE

Laskenta vastaa oletuksiltaan ja reunaehdoiltaan Navierin ratkaisua. Siinä ei oteta huomioon lasin ja ympäristön vuorovaikutusta muuten kuin reunaehtojoen kautta.

Laskennassa käytettiin lineaarisia 4-solmuisia CQUAD4 -elementtejä NE-Nastranissa (v8.3) ja vastaavia, alennetun integroinnin Kirchoff-tyyppisiä ohutkuorielementtityyppiä S4R5 ABAQUS-ohjelmistossa (v6.6-3). Pystysuunnassa elementtiverkossa on 26 elementtiä ja vaakasuunnassa 11 elementtiä molemmissa tarkasteluissa. Mallin kaikki reunat on niveltuettuja. Laskenta suoritettiin Lanczosin ratkaisijalla kytketyllä massamatriisilla mutta muuten oletusparametreilla. Alla on esitetty lasketut värähtelymuodot ja taajuudet [Hz] 10 alimmalle ominaismuodolle NE-Nastranilla. Abaquksella saadut ominaismuodot ovat samanlaisia, mutta taajuudet ovat hieman poikkeavia (ks. taulukko). Väritykset esittävät suhteellista siirtymää kohtisuorassa suunnassa.








VERTAILU TEOREETTISIIN TULOKSIIN

Taulukko 1 Yksittäisen lasilevyn värähtelytulosten vertailua

M,n	F_{tarkka} [Hz]	$F_{NEI-Nastran}$ [Hz]	$(F_{NEI}/F_{tarkka} - 1)$	F_{Abaqus} [Hz]	$(F_{Abaqus}/F_{tarkka} - 1)$
1,1	13.914	14.025	0.80 %	14.022	0.78 %
1,2	20.744	20.965	1.07 %	20.868	0.60 %
1,3	32.128	32.684	1.73 %	32.448	1.00 %
1,4	48.065	49.397	2.77 %	49.019	1.98 %
2,1	48.827	50.422	3.27 %	50.72	3.88 %
2,2	55.657	57.631	3.55 %	57.425	3.18 %
2,3	67.04	69.707	3.98 %	68.766	2.57 %
1,5	68.555	71.395	4.14 %	70.961	3.51 %
2,4	82.977	86.888	4.71 %	84.996	2.43 %
1,6	93.599	99.059	5.83 %	98.79	5.55 %

FE –laskennassa käytettiin samoja oletuksia reunaehdoille kuin teoreettisessa laskennassa joten periaatteessa tulosten pitäisi olla samoja. Todellisuudessa elementtimenetelmä mallintaa rakenteen aina jonkin verran todellista jäykemmäksi (nk. diskreointivirhe) jonka seurauksena ominaistajuudet ovat FE-laskennassa tarkkaa ratkaisua korkeampia. Korkeammassa muodoissa diskreointivirhe kasvaa (muodon aallonpituutta kuvataan pienemmällä määrällä elementtejä kuin matalammassa muodoissa).

Abaqus antaa kaikissa muissa muodoissa paitsi 2,1 –muodossa hieman lähempänä teoreettista olevan tuloksen molempien ohjelmien ollessa silti varsin tarkkoja. Pääsyyinä eroon lienee Abaquksen S4R5 –elementtien käyttämä Kirchoff-tyyppinen ohutlevyelementtiformulaatio, joka vastaa teoreettisesti

	<p style="text-align: center;"><i>Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia</i></p> <p style="text-align: center;">Ikkunalasin ominaismuodot</p> <p style="text-align: center;">Lujax</p>	<p>Dokumentin numero.: D058/04</p> <p>Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01</p> <p>Sivu: 9</p>
--	--	---

Navierin ratkaisun oletusta merkityksettömästä leikkausmuodonmuutoksesta paksuuden yli NEi-Nastranin formulaation ilmeisesti pohjautuessa Mindlin-tyyppiseen (paksukuori-)oletukseen.

Virhettä voisi tarvittaessa pienentää verkkoa tihentämällä ja/tai käyttämällä korkeampiasteisia elementtejä. Tihennystarve riippuu käyttökohteesta ja tarkkuusvaatimuksista, nyt käytetty verkko riittää 10% insinööritarkkuuteen tarkasteltavalla taajuusalueella molemmilla ohjelmilla.

KAKSI LASILEVYÄ, PAINE- JA INERTIAKYTKENTÄ

Ikkunalasit kiihdyttävät värähdellessään myös ympäröivää ja niiden välistä ilmaa, mikä lisää värähtelyyn liittyvää massaa teoreettiseen tulokseen verrattuna, jossa huomioidaan pelkästään lasin oma massa. Lisämassa alentaa ominaistuuksia.

Ulko- ja sisälasin värähdellessä vastakkaisessa vaiheessa esim. 1,1 –muodossa tai muissa vastaavissa muodoissa, joissa ilmatilavuus lasien välillä vaihtelee, myös keskimääräinen ilmanpaine lasien välillä vaihtelee, mikä lisää muodon tehollista jäykkyyttä ja ominaistajuutta.

ABAQUS-ohjelmistossa on mahdollista huomioida lasilevyjen välillä ja niiden ulkopuolella värähtelevä ilmamassa kahdella tavalla; Ensimmäisessä muodostetaan pelkästään lasien välinen tila reunaelementeillä, joiden sisään jäävän ilman paineen oletetaan muuttuvan adiabaattisesti tilavuuden muuttuessa. Tällä tavoin voidaan huomioida kytkettyjen muotojen lisääntynyt ”ilmajousen” lisäämä jäykkyys muodoissa, joissa ilmaraon tilavuus vaihtelee, mutta ei ilman aiheuttamaa lisämassaa hydraulisilla elementeillä. Toisessa, tässä raportissa noudatettavassa tavassa muodostetaan akustisista elementeistä lasien väliin ja niiden ulkopuolelle verkko, jolla huomioidaan myös lasien mukana värähtelevän ilman massa. Ilmaa myös virtaa rakenteen raoista ilmanpaineen vaihdella aiheuttaen painehäviöitä eli lisäten vaimennusta, mutta tätä ilmiötä ei nyt yritetty simuloida.

Tässä tarkastelussa tarkastellaan kahta samanlaista lasilevyä kuin edellä, joiden välissä on adiabaattisesti käyttäytyvä, 50mm paksu, tiivistetty ilmatila. Laskennassa käytettävä ilman bulkkimoduli (dp/dv) on merenpinnan tasolla $1,4 \times 1 \text{ bar} = 0,142 \text{ MPa}$ ja ilman tiheys $1,225 \text{ kg/m}^3$. Tarkastelu tehdään akustisilla solidielementeillä, jotka kytketään lasilevyjen siirtymiin. Kiinteillä reunoilla akustisten elementtien reunaehdot kuvautuvat vapaiksi. Kytkentä akustisten ja rakenteellisten elementtien välillä toteutetaan *tie -tyyppisillä sidoksilla. Akustisen (slave) lineaarisolidiverkon elementtitiheydeksi lasilevyjen välillä määritettiin 25mm, jolla lasilevyjen väliin syntyi 2 elementin verkko. Laskennoissa ei huomioitu akustista vaimennusta.

Lujax tmi	<i>Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia</i>	Dokumentin numero.: D058/04
	Ikkunalasin ominaismuodot	Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01
	Lujax	Sivu: 10

Seuraavassa taulukossa on esitetty päätulokset 20 ensimmäiselle muodolle


Taulukko 2 Ilmavälikytkenällä saatuja laskennallisia tuloksia

Muoto	Taajuus (Hz)	Muoto	Taajuus (Hz)
1,2 s	13.311	2,2 a	57.367
1,1 a	14.008	2,3 s	63.180
1,2 a	20.847	1,5 s	63.267
1,3 s	26.107	2,3 a	68.696
1,3 a	32.415	1,5 a	70.889
1,4 s	43.090	2,4 s	79.811
2,1 s	44.000	1,1 s	82.596
1,4 a	48.969	2,4 a	84.910
2,1 a	50.669	1,6 s	88.143
2,2 s	51.217	1,6 a	98.689

Taulukon muodossa kirjain a tarkoittaa antimetristä ja s symmetristä muotoa lasien värähtelyillä keskitason suhteen. Antimetrisissä muodoissa lasilevyt värähtelevät samassa vaiheessa (samaa suuntaan) ja symmetrisissä muodoissa vastakkaisissa vaiheissa toistensa suhteen. Tuloksista voi havaita antimetristen muotojen taajuuksien olevan lähes samoja kuin yksittäisen lasin tapauksessa. Antimetrisissä muodoissa ilmapatsas siirtyy lähinnä lasin normaalin suunnassa ja sen aiheuttama lisämassa on mitätön.

Symmetrisissä tapauksissa taajuudet ovat selvästi alempia lukuun ottamatta tapausta 1,1s. Symmetrisissä muodoissa lasien väliin jäävä ilmapatsasta kiihdytetään lasien tason suunnassa muotojen kupujen pakottaessa ilmapatsaan kiihtymään lasin tason suunnassa, mikä aiheuttaa efektiivisen massan kasvua. Muodossa 1,1s sen sijaan ilmapatsaan tilavuus vaihtelee, mikä aiheuttaa painevaihteluita ja efektiivisen jäykkyyden kasvua. Myös värähtelymuoto vääristyy selvästi verrattuna pelkän lasin ominaismuotoon, ks. liite.

Antimetriset muodot ovat muodoltaan lähes identtisiä yksittäisen lasilevyn värähtelymuotojen kanssa. Symmetrisissä muodoissa sen sijaan on havaittavissa selvää poikkeamaa verrattuna tilanteeseen ilman kytkentää (ks liitteet).

	Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia	Dokumentin numero.: D058/04
	Ikkunalasin ominaismuodot	Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01
Lujax		Sivu: 11

KAKSI LASIA, ILMARAKO JA ULKOPUOLINEN ILMAMASSA

Tämä laskentamalli on muuten samanlainen kuin edellinen tapaus, mutta lisäksi mallinnettiin 3m säteinen puolipallo ilmaa lasien ulkopuolella akustisilla solidielementeillä keskimäisesti lasien suhteen. Pallon ulkopinnalla on käytetty äärettömän rajapinnan kuvaavia akustisia elementtejä. Ulkopuolisen solidipallon elementtikoko lasin ulkopuolella on 380mm.

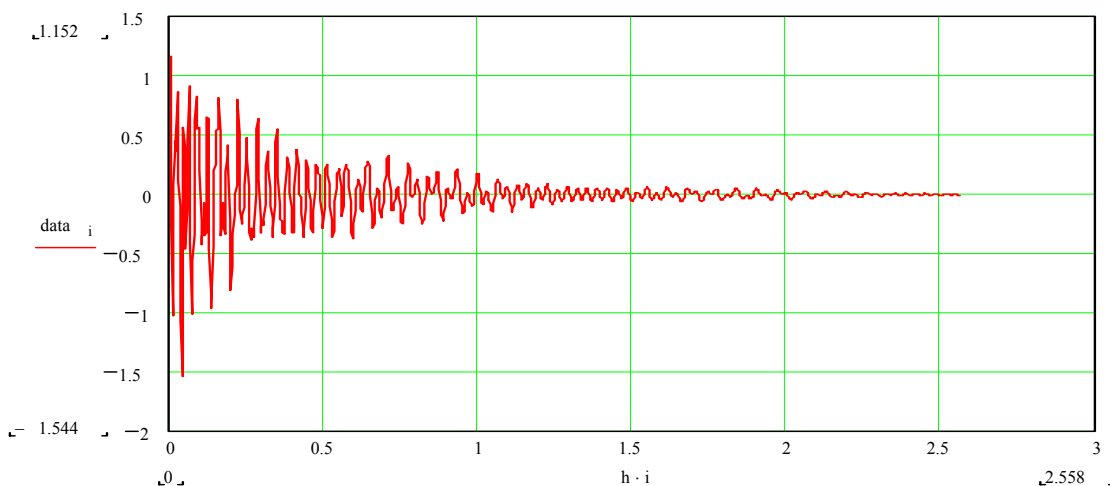
Tällä laskentamallilla saatiin 35 alle 100 Hz ominaismuotoa. Alla on listattu 10 ensimmäistä muotoa. Useilla muodoilla saattoi havaita muotojen tuplaantumisen (esim 1,3s ja 1,3a) hieman toisistaan poikkeavilla muodoilla ja taajuuksilla. Olennaisin vaikutus ulkopuolisen ilmassan huomioimisesta on ominaistajuuksien aleneminen. Verrattuna tilanteeseen jossa pelkkä lasien välinen ilmatila oli mallinnettu, taajuusero on 0,1 - 0,5 Hz luokkaa alimmilla ominaismuodoilla. Tuplautuneissa ominaismuodoissa muotojen keskimääräinen ominaistajuus on alentunut saman verran.

Taulukko 3 Kymmenen ensimmäistä ominaistajuutta mallilla jossa on huomioitu ulkopuolinen ilmassa

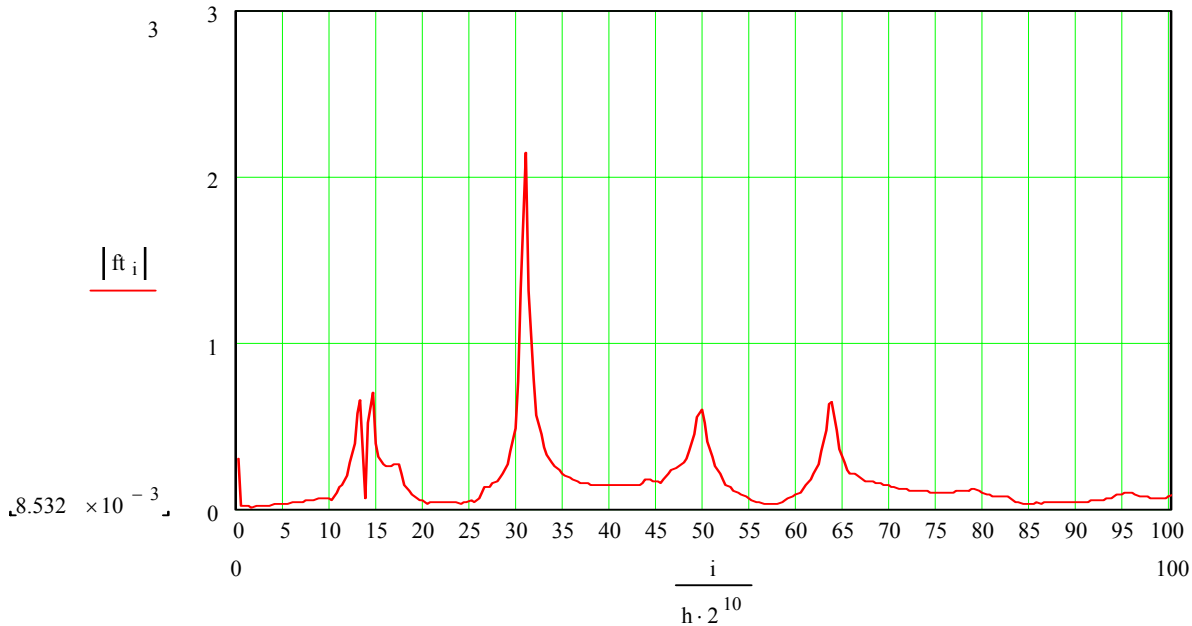
Muoto	Taajuus (Hz)	Muoto	Taajuus (Hz)
1,2 s	13.214	1,3 a	28.637
1,1 a	13.574	1,3 a	32.019
1,2 a	20.467	1,4 s	42.596
1,3 s	25.816	2,1 s	43.539
1,3 s	28.413	1,4 a	48.219

MITTAUSTULOS

Mittaus suoritettiin yhdellä kiihtyvyyssanturilla joka sijoitettiin lasin keskialueelle siten että myös epäsymmetristen muotojen solmukohdat pääosin väistettiin. Lasin värähtelyt herätettiin suhteellisen pehmeällä iskulla, jonka jälkeen lasin omaa vaimenevaa värähtelyä mitattiin 400 näytteen sekuntinopeudella $2^{10}=1028$ näytteen ajan. Rakenteen oma, vaimeneva värähtely herätteen loppumisen jälkeen vastaa tässä tapauksessa rakenteen eri muotojen yhdistettyä impulssivastetta.



Kuva 2 Kiihtyvyyssmittaus, pystyakselilla kiihtyvyyys [g], vaaka-akselilla aika sekunteina.



Kuva 3 Kiihtyvyyksmittauksen FFT-muunnoksen amplitudikäyrä, vaaka-akselilla taajuus [Hz] välillä 0-100 Hz


$$f_n = \begin{pmatrix} 30.875 \\ 13.013 \\ 14.405 \\ 16.775 \\ 49.562 \\ 63.489 \end{pmatrix} \quad \zeta_n = \begin{pmatrix} 1.036 \\ 1.245 \\ 2.728 \\ 3.187 \\ 1.585 \\ 0.944 \end{pmatrix} \%$$

Kuva 4: Mittaustuloksista estimoituja vaimentamattomia ominaistajuuksia ja näitä vastaavat suhteelliset vaimennukset.

Ensimmäinen ominaistajuus vastaa melko hyvin antimetristä 1,3 –muotoa. Seuraavat kaksi taajuutta 13,013 Hz ja 14,405 Hz taajuuksilla ovat lähellä 1,2s – ja 1,1 a -taajuuksia. Seuraava taajuus 16,775 on samaa luokkaa kuin 1,2a –taajuus 20,467 Hz, mutta ero on melko suuri. Viides taajuus 49,562 on lähes sama kuin 1,4a ja 2,1a –muotojen taajuudet ulkoilman kytkentä huomioiden. Kuudennen muodon taajuus 63,489 on lähellä 2,3s– ja 1,5s -muotojen taajuutta.

Mahdollisesti 16,775 Hz taajuudella havaittu ominaismuoto on todellinen 1,1s –muoto. Ikkunoissa on aina pienet tuuletusraot joiden kautta ilmanpaine pääsee tasaantumaan. Raot ovat pieniä, joten niiden kautta tapahtuva tasaantuminen aiheuttaa ilman viskositeetun vuoksi painehäviöitä ja tehollista vaimennusta, mikä onkin mitatussa ominaismuodossa suhteellisen suurta.

Tarkemman käsityksen saamiseksi tilanteesta sekä sisä- että ulkolasi tulisi varustaa riittävällä määrällä samanaikaisesti kiihtyvyyttä mittaavia antureita, joilla voitaisiin selvittää taajuuksien lisäksi myös värähtelymuodot ja vaihe-erot.

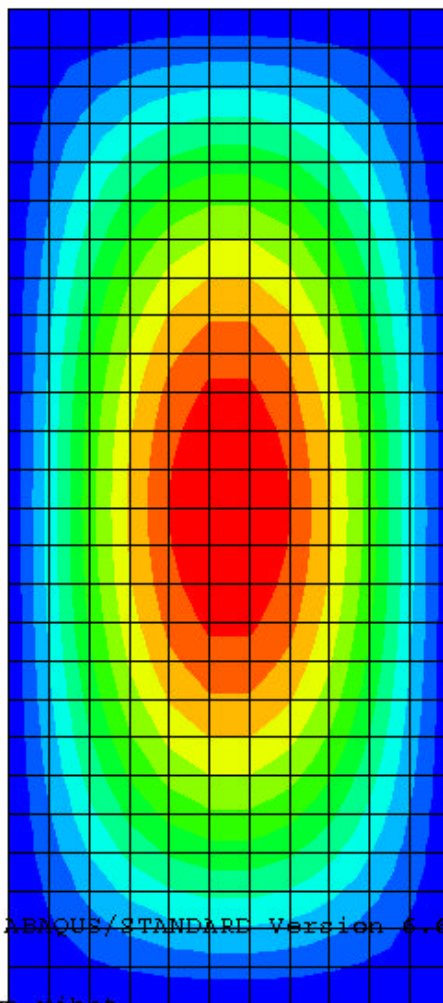
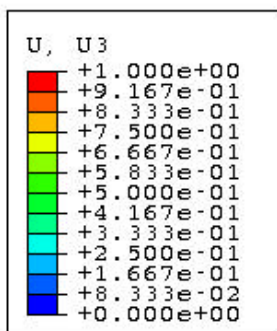
	<p style="text-align: center;"><i>Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia</i></p> <p style="text-align: center;">Ikkunalasin ominaismuodot</p> <p style="text-align: center;">Lujax</p>	<p>Dokumentin numero.: D058/04</p> <p>Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01</p> <p>Sivu: 13</p>
--	--	---

PÄÄTELMIÄ

1. Kytkemättömien FE-laskentamallien tulokset ovat lähellä teoreettisia tuloksia erityisesti alemmilla värähtelymuodoilla kun laskennassa käytetään samoja oletuksia.
2. Mittaustulokset vastaavat laskennallisia arvoja pääosin hyvin kun huomioidaan ilmapatsaan kytkentäilmiöt. Poikkeuksen muodostaa n. 16 Hz taajuudella havaittu, voimakkaasti vaimennettu muoto, joka voi johtua mallinnusoletuksissa huomioimatta jätetyn tuuletusraon vaikutuksista 1,1s –muodon yhteydessä. Raon ja viskositeettivaimennuksen huomioiminen on periaatteessa mahdollista sisällyttää laskentamalliin, mutta käytännössä hyvin häiriöaltista tuloksen ollessa herkän raon muodon yksityiskohdille.
3. Lasilevyjen välisen ilmapatsaan aiheuttaman kytkennän huomioiminen aiheuttaa merkittäviä muutoksia ominaismuotoihin ja –taajuuksiin symmetrisissä muodoissa verrattuna yhdelle lasilevyille laskettuihin teoreettisiin tuloksiin ilman kytkentää. Antimetrisissä muodoissa muutos on vähäinen.
4. Lasien ulkoisen ilmamassan kytkennän huomiointi aiheuttaa pienehkön moodimassan lisäyksen sekä ilmeisesti akustisten muotojen vuorovaikutusilmiöitä (ominaismuotojen tuplaantumista).
5. Perinteisesti levyjen värähtelylaskennassa käytetään Navierin oletuksia, jossa levy ei ole vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa reunaehtoja lukuunottamatta. Levyjen ollessa suhteellisen ohuita ja keveitä tulee vuorovaikutus ympäristön kanssa yhä merkittävämmäksi ja ne on syytä huomioida erityisesti tarkkuusvaatimusten kasvaessa.
6. Laskennan validointi mittaamalla on syytä suorittaa silloin, kun kyseessä on kriittinen rakenne ja epävarmat reunaehdot. Esimerkiksi tässä tapauksessa mittausta lienee järkevää verrattuna ilmaraoit huomioivan, hankalan ja kalliin laskentamallin muodostamiseen, jos 1,1s –muodon värähtelyominaisuuksien selvittäminen katsotaan oleelliseksi; Ominaismuotojen mittaaminen kiihtyvyyssantureilla valmiista prototyypistä on varsin helppo toimenpide. Todellinen ilmarakojen käyttäytyminen riippuu valmistustekniikasta, asennustoleransseista jne., joista ei useinkaan ole saatavissa luotettavaa tietoa, vaan niiden kalibrointi pitäisi joka tapauksessa suorittaa mittaustuloksiin. Tällaisessa tapauksessa raon muodossa ja käyttäytymisessä on luultavasti myös suurta vaihtelua eri ikkunalasien kesken.

Lujax tmi	<i>Laskennan ja mittausten vertailua ja validointia</i> Ikkunalasin ominaismuodot Lujax	Dokumentin numero.: D058/04 Julkaisu: R2 Päiväys: 2007-01-01 Sivu: 14
------------------	---	---

LIITTEET



2
3
1

ODB: viba.odb

ABAQUS/STANDARD Version 6.6-2

Thu Dec 28 16:02:23 Nor

Step: kahden levyn vibat

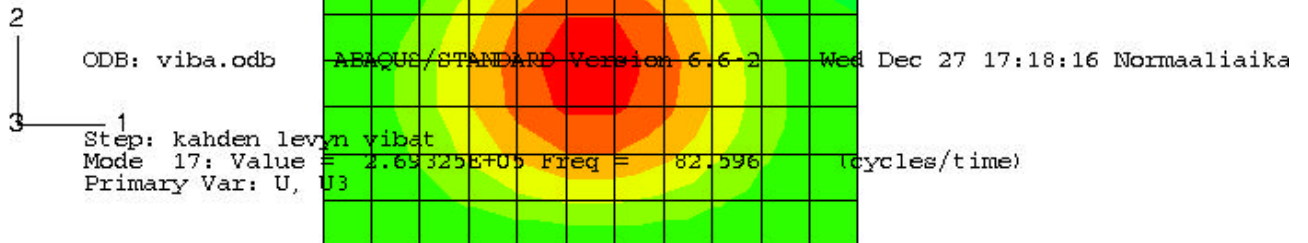
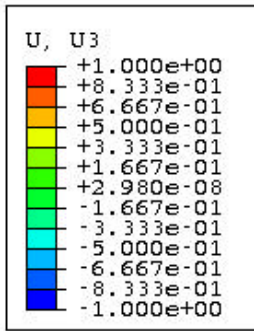
Mode 2: Value = 7274.5

Freq = 13.574

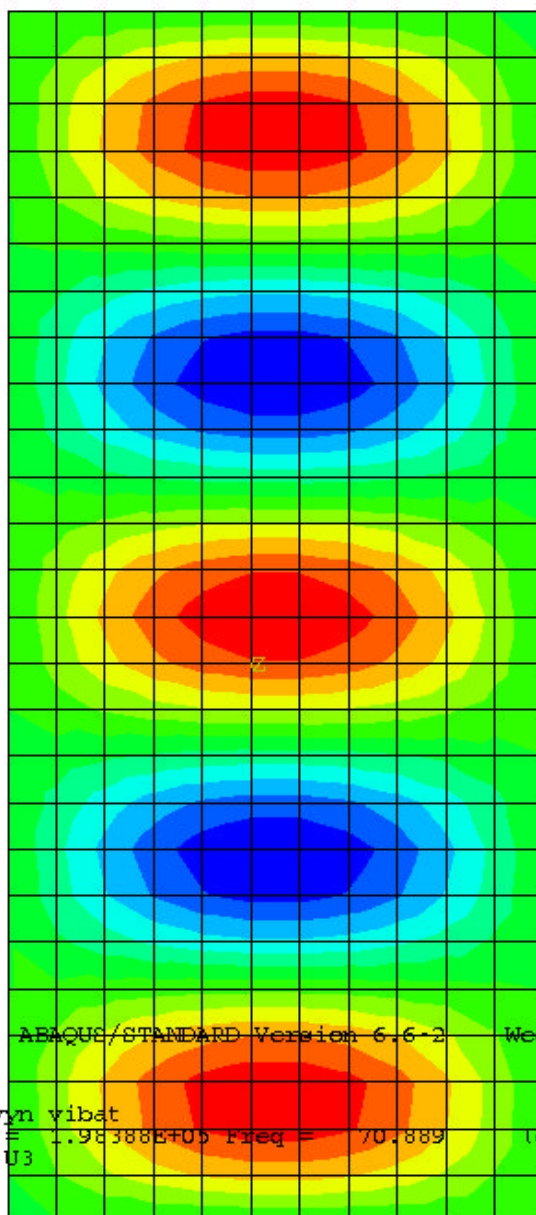
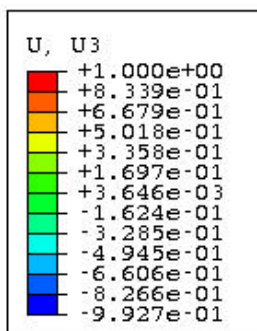
(cycles/time)

Primary Var: U, U3

Tulos kohtisuoran suunnan siirtymille 1,1 a -muodolle mallilla, jossa oli mallinnettu lasilevyjen välinen ilmatilakytKentä sekä ulkopuolinen ilmassa. Värähtelytaajuus tässä 13,57 Hz, ilman kytkentää 14,02 Hz samalla lasin elementtiverkolla.



Tulos kohtisuoran suunnan siirtymille 1,1 s -muodolle mallilla, jossa oli mallinnettu lasilevyjen välinen ilmatilakytkeä ja ulkoinen ilmassa. Ilman ilmatilan mallinnusta muodossa on vain yksi kupu, tässä kolme (kaikki samaan suuntaan samassa levyssä). Värähtelytaajuus tässä 82,6 Hz, ilman kytkettä 14,02 Hz samalla lasin elementtiverkolla.



2
3
1

ODB: vibra.odb

ABAQUS/STANDARD Version 6.6-2

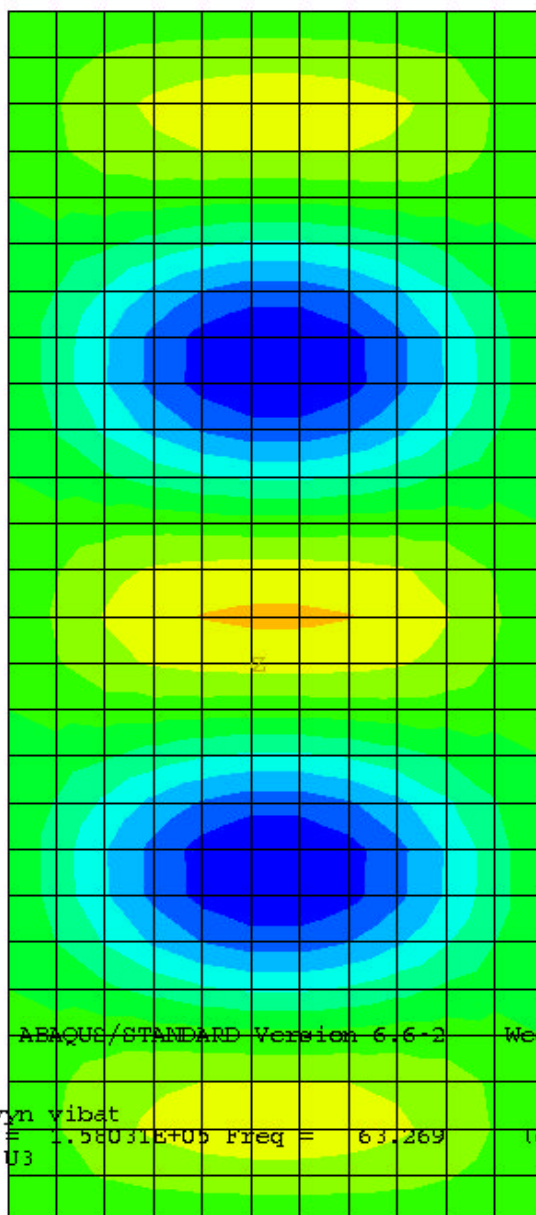
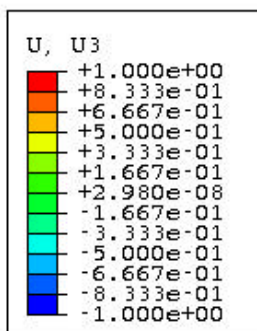
Wed Dec 27 17:18:16 Normaal aika

Step: kahden levyn vibat

Mode 15: Value = 1.98388E+05 Freq = 70.889 (cycles/time)

Primary Var: U, U3

Lasiin välisellä ilmatilalla ja ulkoisella ilmassalla kytketty 1,5 a -muoto. Kytketty taajuus 70,89 Hz, ilman kytkentää 70,96 Hz samalla lasin laskentaverkolla.



2
3
1

ODB: vibra.odb

ABAQUS/STANDARD Version 6.6-2

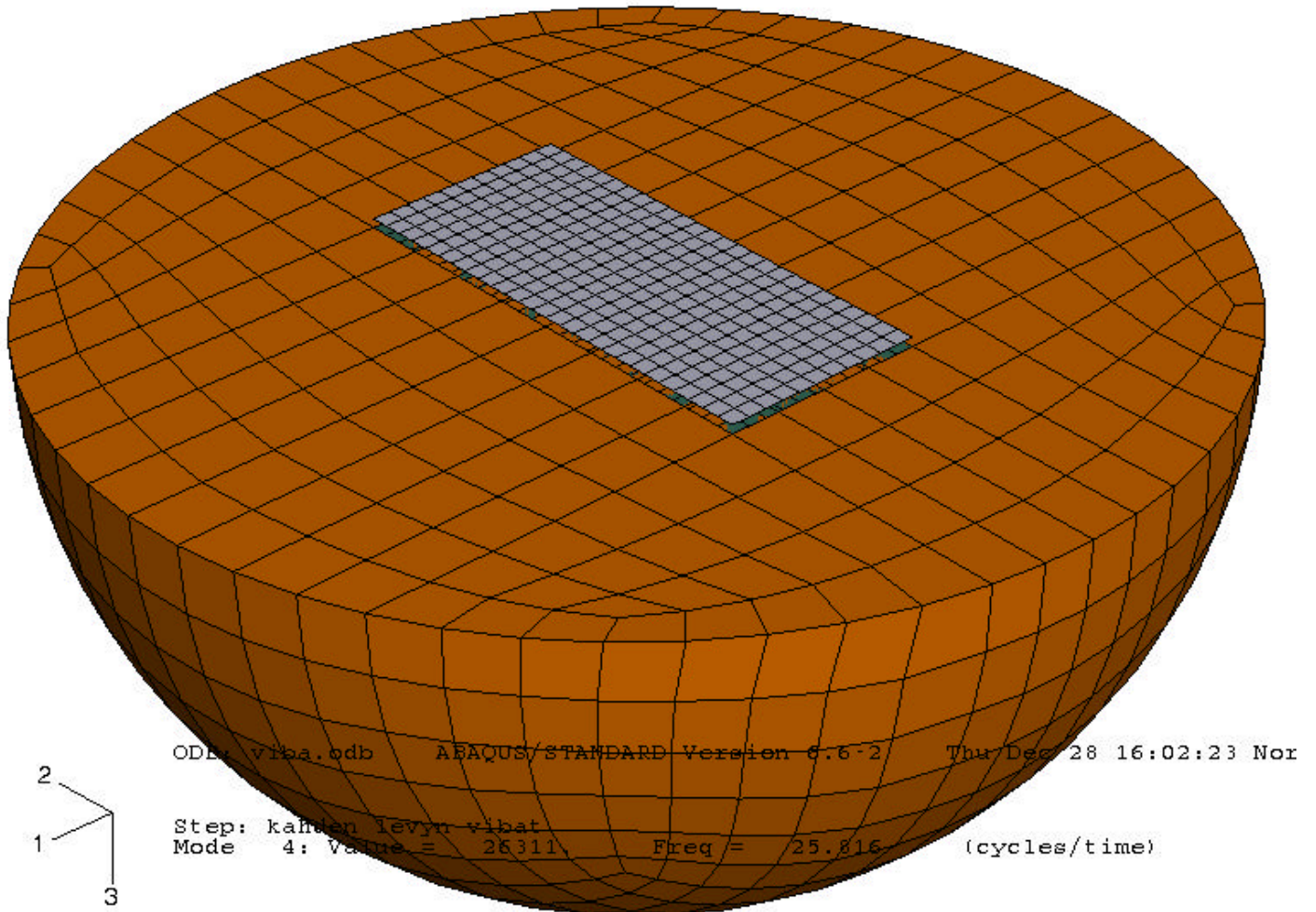
Wed Dec 27 17:18:16 Normaal aika

Step: kahden levyn vibat

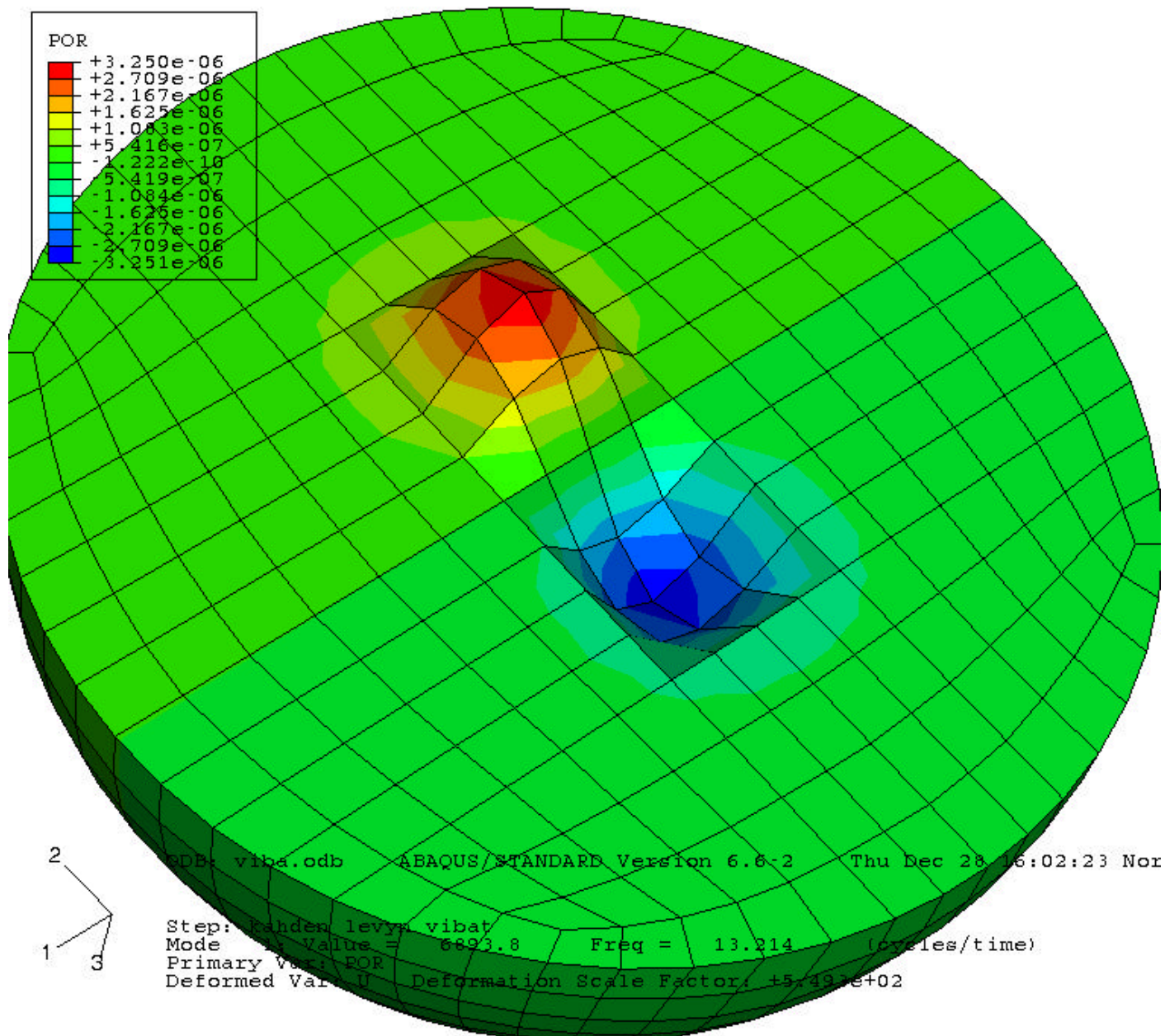
Mode 13: Value = 1.58031E+05 Freq = 63.269 (cycles/time)

Primary Var: U, U3

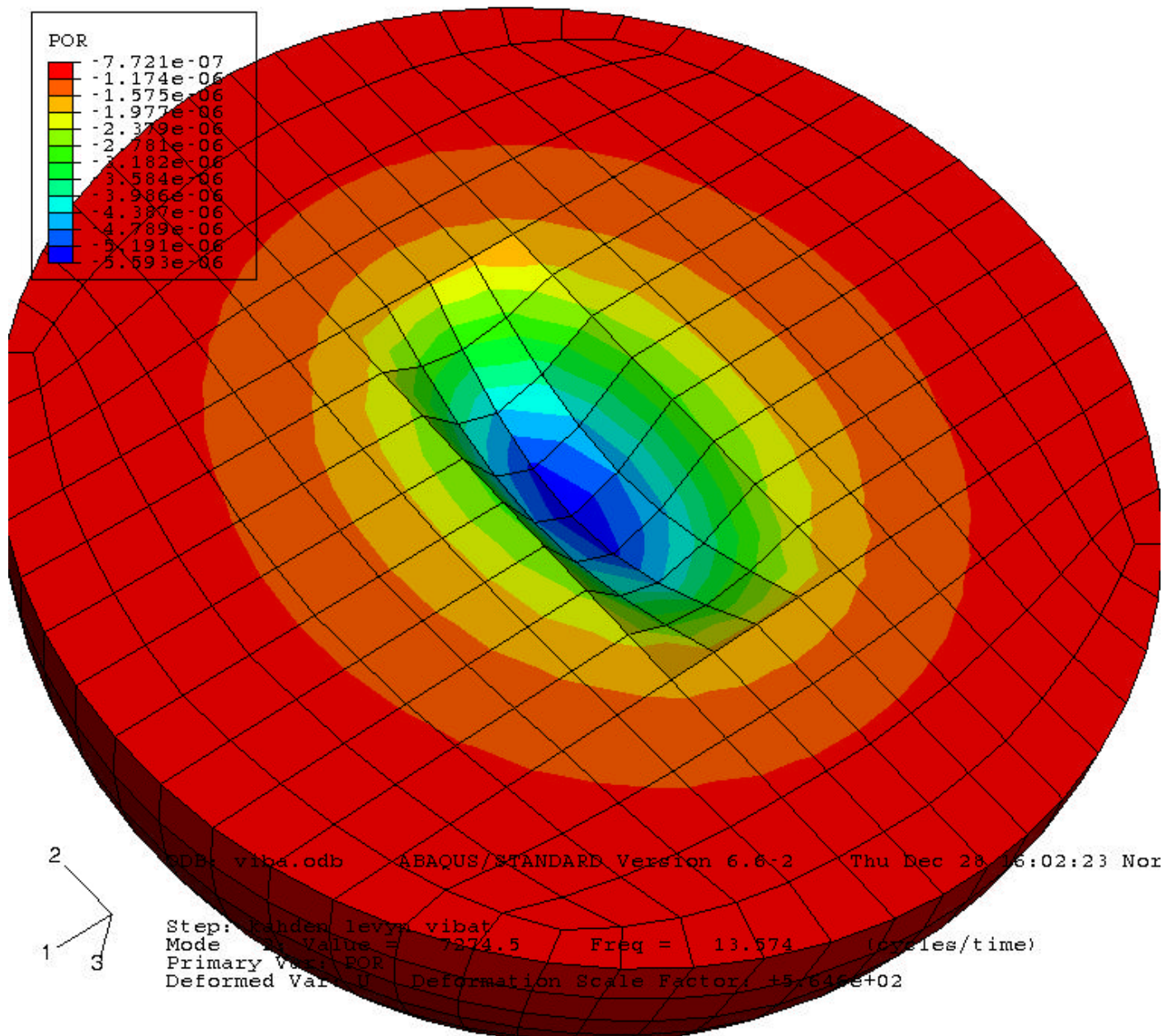
Lasiin välisellä ilmatilalla ja ulkoisella ilmassa kytetty 1,5 s -muoto. Kytetty taajuus 63,27 Hz, ilman kytkentää 70,96 Hz samalla lasin laskentaverkolla.



Ulkoisen ilman laskentamalli. Kuvassa toisen ikkunapinnan ulkopuolinen "ilmapallo" ja lasit. Kuvasta on selvyuden vuoksi jätetty pois lasien välisen ja katsojan puoleisen, vastakkaisen puolisen kanssa symmetrisen ilmamassan laskentaverkko.



Alimman ominaisuuden (1,2 s) suhteelliset siirtymät ja akustiset painetasot toisessa ulkoisessa "ilmapallossa" seinän tasossa.



Toisen ominaismuodon (1,1 a) suhteelliset siirtymät ja akustiset painetasot toisessa ulkoisessa "ilmapallossa" seinän tasossa.