

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikan koulutus

Jani Ikonen

Tärinävaimentimien Toiminta Pakkasella

Opinnäytetyö
Syyskuu 2018



OPINNÄYTETYÖ
Syyskuu 2018
Konetekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80220 JOENSUU
(013) 260 600

Tekijä(t)
Jani Ikonen

Nimeke
Tärinänvaimentimien toiminta pakkasella

Toimeksiantaja
Karelia-AMK

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin tärinänvaimentimien toimintaan ja niiden mitoitukseen. Opinnäytetyön tarkoituksena oli koota tarkennettu mitoitusohje tärinänvaimentimille pakkaseen. Opinnäytetyössä perehdyttiin tärinänvaimentimissa käytettyihin kumimateriaaleihin ja miten vaimentimet tulee asentaa. Opinnäytetyössä perehdyttiin myös kumien mekaanisiin ominaisuuksiin ja selvitettiin, mitä mekaanisia ominaisuuksia pakkasella tulee tutkia.

Opinnäytetyössä tutkittiin ensin materiaalivaihtoehtoja tärinänvaimentimille. Sen jälkeen valituille materiaaleille (luonnon-, EPDM- ja kloropreenikumi) tehtiin DMA-testit. DMA-testit suoritti Mikpolisin tutkimusyksikkö, koska Karelia-AMK:lla ei ollut käytettävissä DMA-testikonetta. Testitulosten pohjalta tehtiin laskuja, joilla selvitettiin miten, vaimennus muuttuu eri lämpötiloissa. Laskutulosten pohjalta koottiin myös tärinänvaimentimien valinnassa pakkaselle huomioitavia asioita.

Tarkennettua tärinänvaimentimien mitoitusohjetta pakkaselle ei saatu laadittua. Kuitenkin ohje tärinänvaimentimien optimointiin pakkaselle saatiin laadittua. Ohjetta ei ole vielä käytännössä testattu. Lopussa pohdittiin myös, mitä olisi voinut tehdä toisin tarkempien ja parempien tulosten saamiseksi.

Kieli

suomi

Sivuja 41

Liitteet 11

Asiasanat

tärinänvaimennin, kumi, DMA, luonnonkumi, kloropreenikumi, EPDM-kumi



THESIS
September 2018
Degree Programme in Mechanical and
Production Engineering

Tikkarinne 9
80220 JOENSUU
FINLAND
(013) 260 600

Author (s)
Jani Ikonen

Title
Operating of Anti-Vibration Mounts in Freezing Temperatures

Commissioned by
Karelia-UAS

Abstract

The purpose of this thesis was to focus on the operation and dimensioning of anti-vibration mounts. The aim of the thesis was to compile a focused dimensioning plan for vibration mounts for freezing temperatures. This thesis focused on rubber materials used in vibration mounts and how the mounts should be installed. The mechanical properties of rubbers were studied as well as what mechanical properties should be studied in freezing temperatures.

First, various material options for vibration mounts were studied. Then the selected materials (natural chloroprene and EPDM-rubber) were subjected to DMA-tests. DMA-tests were performed by the Mikpolis research unit, as Karelia-UAS had no DMA-test machines available. Calculations were made based on the test results to see how the attenuation changes in different temperatures. Based on the results of the calculations, some things to be considered for selecting of the vibration mounts for freezing temperatures were also compiled.

An advanced vibration mount design instruction for freezing temperatures could not be drawn up. However, the instructions for optimizing vibration mounts for freezing temperatures was made. The guide has not yet been tested in practice. In the end, it was also considered else could have been done to get better and more accurate results. This would have required additional DMA-tests, for example testing the same material in three different hardness.

Language
Finnish

Pages 41
Appendices 11
Pages of Appendices

Keywords

vibration mount, rubber, DMA, natural rubber, chloroprene rubber, EPDM-rubber

Sisältö

Tiivistelmä	
Abstract	
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	
1 Johdanto	6
1.1 Työn tavoite	6
1.2 Työn raja	6
2 Tärinävaimentimet	7
2.1 Materiaalit	8
2.1.1 Polyuretaani (PUR)	9
2.1.2 EPDM-kumi	10
2.1.3 Luonnonkumi ja isopreenikumi (NR ja IR)	11
2.1.4 Kloropreenikumi eli neopreeni (CR)	12
2.2 Vaimentimien toimintaperiaate	13
2.3 Lämpötilan vaikutus kumeihin	14
3 Kumien mekaaniset ominaisuudet sekä vaimentimien valinta/testaus	15
3.1 Vaimennus	15
3.2 Kovuus	17
3.3 Kimmomoduuli	17
3.4 Jäännöspuristuma	18
3.5 Puristuksen alaisen kumin laskentaa	19
3.6 Tärinävaimentimien ja kumimateriaalien testausmenetelmät	22
3.7 DMA-testaus	22
3.8 Tärinävaimentimien valintaperusteet/laskenta	25
4 DMA-testit	27
4.1 DMA-testitulosten analysointi	27
4.1.1 NR	28
4.1.2 CR	28
4.1.3 EPDM	29
4.2 DMA-testitulosten yhteenveto	30
4.3 Laskut testitulosten pohjalta	30
4.4 Laskutulosten analysointi ja johtopäätökset	33
4.5 Tärinävaimentimien toiminnan optimointi pakkaselle	36
5 Pohdinta	38
Lähteet	40
Liitteet	

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

daN	Dekanewtonia (10 Newtonia)
Elastomeeri	Amorfinen polymeeri, joka venyy vähintään kaksinkertaiseksi ja palautuu nopeasti alkuperäiseen muotoonsa, kun venymän aiheuttanut voima poistetaan
Amorfinen aine	Kiinteää ainetta, jonka atomijärjestys ei ole jaksollinen
Polymeeri	Molekyyli, jossa useat (vähintään 50 kpl) pienet molekyylit ovat liittyneet toisiinsa kemiallisin sidoksin
ShA	Shoren kovuus A-luokka.

1 Johdanto

Tärinänvaimentimia käytetään nykyään useissa kohteissa, esimerkiksi ilmalämpöpumpuissa, koneissa ja autoteollisuudessa. Käyttökohteita ja –olosuhteita on paljon, joten on kummallista, ettei tärinänvaimentimien toiminnasta pakkasella ole paljoa dokumentoitua tietoa. Tärinänvaimentimien mitoitus on suunniteltu yleisesti 0°C yläpuolelle, tämä aiheuttaa sen, että pakkasella tärinänvaimennus ei toimi välttämättä oikein, ja vaimentimet vain pahentavat tärinää.

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia tärinänvaimentimien toimintaa ja ominaisuuksia alle 0 °C:een ja pyrkiä rakentamaan tutkitusta tiedosta uusi tarkennettu mitoitusohje tärinänvaimentimien valintaa. Jotta tärinänvaimentimia voitaisiin tutkia, pitää myös olla laite jolla tärinänvaimentimia voidaan mitata. Tällaista laitetta ei Karelia-ammattikorkeakoululla ollut, joten vaimenninmateriaalien testit jouduttiin ulkoistamaan. Materiaalitestit tehtiin DMA-menetelmällä ja testit suoritti tutkimusyksikkö Mikpolis Mikkelissä.

1.1 Työn tavoite

Työn tavoitteina oli tärinänvaimentimien testaus ja uuden mitoitusohjeen laatiminen. DMA-testeistä saatiin ulos muuttujia eri kumimateriaalien arvoille, joista laskettiin, kuinka vaimentimet toimivat eri lämpötiloilla. Lopuksi testitulosten ja laskujen pohjalta tarkennettiin mitoitusohjetta, jotta vaimentimet toimisivat paremmin pakkasella.

1.2 Työn rajaus

Koska tärinänvaimentimia on useita erilaisia, rajattiin työ tärinänvaimentimiin, joita käytetään erityisesti ilmalämpöpumppujen ulkoyksikön kiinnityksessä. Ilmalämpöpumput toimivat

yleensä -20 °C:seen asti, joten -20 °C on pienin lämpötila, jossa vaimentimia tutkittiin. Kuitenkin työssä päädyttiin laskemaan vaimentimien toiminta välille -30 - +30 °C, koska siitä saa paremman kuvan vaimentimien käyttäytymisestä, kun lämpötila nousee tai laskee.

2 Tärinänvaimentimet

Tärinänvaimentimia tarvitaan nykyään useissa kohteissa, jonka takia niitä on useita erilaisia. Vaikkakin tärinänvaimentimia on useita malleja, on niillä sama toimintaperiaate: ne vähentävät resonointia ja tärinää hiljentäen samalla laitteen meluhaittoja. Tärinänvaimentimilta vaadittuja ominaisuuksia ovat muun muassa joustavuus ja vaimennus. Joustavuudella tarkoitetaan, kuinka hyvin vaimennin palaa alkuasentoonsa, ja vaimennuksella jarrutusvoimaa, mikä vähentää värähtelyä.

Suurin osa vakiotärinänvaimentimista valmistetaan luonnonkumista, sen dynaamisten ominaisuuksien vuoksi. Normaaleissa olosuhteissa luonnonkumiseoksista valmistetut vaimentimet takaavat pitkäkestoista vakautta etenkin, jos viruminen on rajoitettua. Epänormaaleja olosuhteita ovat muun muassa:

- yli 70 °C:n lämpötilat
- epäsopiva ympäristö (öljyt, polttoaineet)
- pitkäaikainen kosketus happoihin, emäksiin tai syövyttäviin nesteisiin.

Kylmiä lämpötiloja ei ole mainittu epänormaaleissa lämpötiloissa. [1.]

Tärinänvaimennus voi olla aktiivista tai passiivista. Aktiivisessa tärinänvaimennuksessa pyritään minimoimaan koneen aiheuttaman melun ja tärinän kulkeutuminen ympäristöön. Tällaisia koneita ovat esim. puristimet, stanssit, työstökoneet, turbiinit, generaattorit ja pumpput. Passiivinen tärinänvaimennus on herkkien ja koneiden, joiden tulee olla tarkkoja, suojaamista ympäristön värinältä (esim. liikenne ja muut koneet). Tällaisia laitteita ovat esim. mitaus-, hioma- tai laboratoriolaitteet. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin aktiiviseen tärinänvaimennukseen.

2.1 Materiaalit

Tärinänvaimentimet valmistetaan kumeista ja metalleista. Vaimentimessa kumi toimii vaimentimena ja metalli kiinnityskappaleena. Yleisimmät kumit, joita vaimentimissa käytetään ovat luonnonkumiseokset, muita materiaaleja ovat mm. kloropreenikumi (neopreeni), silikoni ja EPDM-kumi. Tärinänvaimentimissa käytettyjä materiaaleja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tärinänvaimentimissa käytettyjä materiaaleja. [2.]

Typy	colour	material	resistance	temperature
CR	blue	Neoprén Chloroprene	atmospheric effects, ozone, sea water, salt solutions, weak acids, occasional contact with fuel without aroma oils	-35 °C+ 82°C
EPDM	red	EPDM Ethylene-propylene	warm air, hot water, ozone, various chemical substances without strong solvents, oils and acids	-35 °C+ 121°C
NBR	yellow	Buna-N / Nitril Nitril-butadiene	fuels and mineral oils containing up to 30% aromatic, natural gas	-35 °C+ 99°C
CSM	green	hypalon	chemicals in general, including strong and weak acids with the exception of mineral, herbal and aromatic oils	-35 °C+ 107°C
IR	white	natural rubber	food products, drinking water, except for vegetable oils	-35 °C+ 92°C

Vaimentimet, joissa käytetään luonnollisia tai synteettisiä elastomeerejä, takaavat aina yhdistelmän joustoa ja vaimennusta. Tärinänvaimentimet toimivat kuten iskunvaimentimet,

mutta ne ei eivät ole iskunvaimentimia. Tärinänvaimentimia voidaan verrata auton iskunvaimentimiin, joissa jousi hoitaa jouston ja iskunvaimennin (hydraulisyylinteri) voiman vaimennuksen. Tärinänvaimentimissa kumi korvaa sekä jousen sekä hydraulisyylinterin. Seuraavissa kappaleissa käsitellään tärinänvaimentimien materiaaleja tarkemmin. [1.]

2.1.1 Polyuretaani (PUR)

Polyuretaani on kertamuovi, joka on venyvää ja kulutusta kestävä. Tämän vuoksi sillä on hyvä iskunvaimennuskyky. Sen takia polyuretaania käytetään tärinänvaimentimissa. Polyuretaania saa perusväreissä, ja rotaatiovalu parantaa pinnan laatua tekemällä siitä tasavärisen ja sileän. [3.]

Uretaanikumilla on hyvä sitkeys ja kulutuskestävyys, hyvä öljynkestävyys sekä hyvä sään ja otsonin kestävyys. Valitettavasti sen huonoja puolia ovat, että se ei kestä kuuma vettä tai höyryä. Uretaanikumin ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Uretaanikumin ominaisuuksia.

Ominaisuus	U Uretaanikumi
Vetolujuus, MN/m ²	15-30
Murtovenymä	100-800
Käyttölämpötila	
pitkäaikainen, °C	60
lyhytaikainen, °C	80
pakkanen, °C	0-20
Jäännöspuristuma, °C/%	70/20-60
Kimmoisuus	erinomainen
Sähköiset ominaisuudet	hyvä
Kestävyys	
sää ja otsoni	erinomainen
hapot	huono
emäkset	huono
öljyt -alfiittiset	hyvä
öljyt -aromaattiset	huono
kulutus	erittäin hyvä
liekki	huono
säteily	hyvä
kemikaalit	rajallinen
Kaasutiiviys	hyvä
Liimattavuus	hyvä

Polyuretaanit sisältävät useita erityyppisiä muoveja. Polyuretaani jaetaan yleensä kahteen ryhmään: pehmeään solupolyuretaaniin sekä kovaan solupolyuretaaniin. Pehmeä on avosuoluista ja kova yleensä umpisoluista. Ilman vaahdotusta polyuretaani on kimmoisaa ja kulutuksen kestävä. [3.]

Uretaanikumeja käytetään ainakin autojen alustojen rakenteissa joustavina holkkeina, toisin sanoen puslina. Uretaanikumista valmistetut puslat ovat yleensä jäykempiä kuin luonnonkumista valmistetut. Uretaanikumilla on laaja kovuusalue, sitä saa geelimäisestä kumista asti aina auton renkaita vastaavaan kovuuteen.

2.1.2 EPDM-kumi

EPDM-kumi eli eteenipropeenikumi on synteettinen M-luokan kumi. M viittaa ASTM standardin D-1418 luokitteluun; M luokkaan kuuluvat kumit ovat tyydyttyneen ketjun polyeteenityyppiä. EPDM-kumi toimii aina -50 °C:seen asti. [6.]

EPDM-kumin ominaisuuksia on esitelty taulukossa 3. EPDM-kumin tärkeimpinä ominaisuuksia ovat:

- hyvä kulutuksen, happojen ja emäksien kestävyys
- erinomainen sään kestävyys
- hyvä alhaisten lämpötilojen joustavuus
- hyvä lämmönkestävyys
- huono öljynkestävyys
- huono liimattavuus (tarvitsee omanlaisen liiman)
- saatavuus laajalla kovuudella (25-90 ShA)

Taulukko 3. EDPM-kumin ominaisuuksia.

Ominaisuus	EDPM
	Eteenipropreeni-kumi
Vetolujuus, MN/m ²	4-18
Murtovenymä	100-400
Käyttölämpötila	
pitkäaikainen, °C	80
lyhytaikainen, °C	150
pakkanen, -°C	30-60
Jäännöspuristuma, °C/%	100/25-60
Kimmoisuus	hyvä
Sähköiset ominaisuudet	erittäin hyvä
Kestävyys	
sää ja otsoni	erinomainen
hapot	hyvä
emäkset	hyvä
öljyt -alfiittiset	huono
öljyt -aromaattiset	huono
kulutus	hyvä
liekki	huono
säteily	huono
kemikaalit	rajallinen
Kaasutiiviys	tydyttävä
Liimattavuus	huono

2.1.3 Luonnonkumi ja isopreenikumi (NR ja IR)

Luonnonkumi (mm. lateksi) on valmistettu trooppisten puulajien maitiaisnesteestä, erityisesti brasilialaisesta kumipuusta. Luonnonkumi on yleisin joustinmateriaali, jota värinänvaimennuksessa käytetään. Luonnonkumien kovuus on yleensä välillä 25-95 ShA. Luonnonkumin ominaisuuksia on eritelty taulukossa 4.

Isopreenikumit ovat synteettisiä luonnonkumien vastikkeita. Isopreenikumit valmistetaan yleensä maaöljystä. Isopreenikumeilla on samankaltaiset ominaisuudet kuin luonnonkumeilla. Niitä voidaan käyttää sellaisenaan, mutta yleensä niitä sekoitetaan muihin kumimateriaaleihin [7.]

Taulukko 4. Luonnonkumin ominaisuuksia (isopreenikumilla vastaavat).

Ominaisuus	NR
	Luonnonkumi
Vetolujuus, MN/m ²	4-25
Murtovenymä	100-600
Käyttölämpötila	
pitkäaikainen, °C	60
lyhytaikainen, °C	100
pakkanen, -°C	30-60
Jäännöspuristuma, °C/%	70/20-60
Kimmoisuus	erinomainen
Sähköiset ominaisuudet	erittäin hyvä
Kestävyys	
sää ja otsoni	huono
hapot	hyvä
emäkset	hyvä
öljyt -alfiittiset	huono
öljyt -aromaattiset	huono
kulutus	erittäin hyvä
liekki	huono
säteily	hyvä
kemikaalit	rajallinen
Kaasutiiviyys	hyvä
Liimattavuus	erittäin hyvä

2.1.4 Kloropreenikumi eli neopreeni (CR)

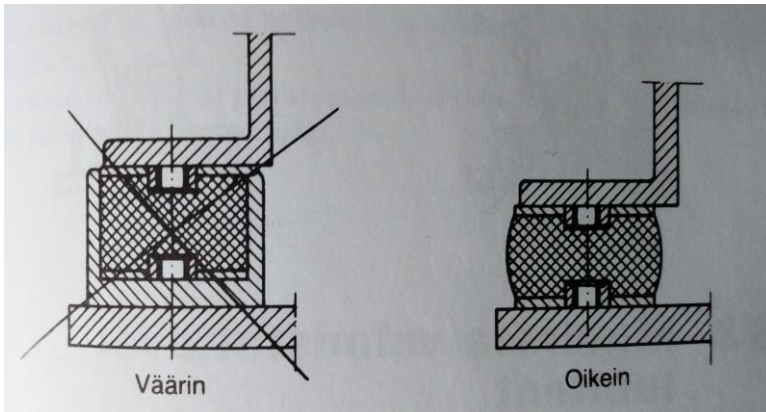
Kloropreenikumi eli neopreeni on synteettinen kumi. Toisin kuin luonnonkumeilla, kloropreenikumilla on hyvä sään ja otsonin kestävyys, ja se kestää myös öljyriskeitä luonnonkumeja paremmin. Kloropreenikumia saa ainakin kovuusasteella 40-90 ShA. Muita kloropreenikumin ominaisuuksia on eritelty taulukossa 5. [8.]

Taulukko 5. Neopreenin ominaisuuksia.

Ominaisuus	CR
	Kloropreeni- kumi
Vetolujuus, MN/m ²	4-20
Murtovenymä	100-500
Käyttölämpötila	
pitkäaikainen, °C	70
lyhytaikainen, °C	130
pakkanen, °C	20-50
Jäännöspuristuma, °C/%	100/30-80
Kimmoisuus	hyvä
Sähköiset ominaisuudet	hyvä
Kestävyys	
sää ja otsoni	erittäin hyvä
hapot	hyvä
emäkset	hyvä
öljyt -alfiittiset	tyyydyttävä
öljyt -aromaattiset	huono
kulutus	hyvä
liekki	erittäin hyvä
säteily	hyvä
kemikaalit	rajallinen
Kaasutiiviys	hyvä
Liimattavuus	hyvä

2.2 Vaimentimien toimintaperiaate

Kumin käyttö vaimentimissa perustuu kumien hyvään sisäiseen vaimennuskykyyn, mikä teräksillä on pieni. Nopeissa dynaamisissa ilmiöissä on joskus syytä välttää liian suurta vaimennusta, koska osa värähtelystä muuttuu lämpöenergiaksi, mikä saattaa vaikuttaa vaimentimen kumin käyttöikänsä. Jotta vaimentimet toimisivat joustavasti, tulee ne asentaa niin, että kumi on puristuksissa, leikkausvoimia tulee välttää (on kuitenkin olemassa vaimentimia, jotka on tarkoitettu leikkausjännitykseen). Kuviossa 1 on oikea asennustapa tärinänvaimentimille. Materiaalin mukaan vaimennin tulee myös suojata suoralta auringonpaisteelta. Aina-kaan luonnonkumeista valmistetut tuotteet eivät kestä auringon valoa kovin hyvin, vaan kovettuvat ja halkeilevat.



Kuvio 1. Tärinänvaimentimen oikea asennustapa.

Vaimentimien tehtäviä ovat: tärinäneristys, iskunvaimennus ja ääneneristys. Vaimentimia ovat muun muassa: vaimenninmatot ja -kiskot sekä yksikkövaimentimet. Olosuhteet ja asennusmahdollisuudet määrittävät, minkälaista vaimenninta voi tai tulee käyttää. Kumivaimennin tulee asentaa niin, että se ei joudu vetojännitykseen. Myöskään koneen ja perustan välille ei saa syntyä metallista kosketusta, muuten kone resonoi. Resonoinnista seuraa melua ja tärinää, ja se voi vaikuttaa alustan tai koneen käyttöikänsä. [5.]

2.3 Lämpötilan vaikutus kumeihin

Lämpötila vaikuttaa eri kumityyppeihin eri tavoin, osalla kumeista on parempi pakkaskestävyys ja lämmönkestävyys kuin toisilla. Liitteestä 1 nähdään, että silikonilla ja luonnonkumilla on parhaat pakkaskestävyydet. Silikoni kestää myös kuumuutta erittäin hyvin. Silikonia ei käytetä kuitenkaan ilmalämpöpumppujen tärinänvaimentimissa, silikonivaimentimia käytetään lähinnä pienissä vaimennuskohteissa. Lämpötila vaikuttaa myös kumin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten kimmomoduuliin ja jäännöspuristumaan. Opinnäytetyön kokeellisessa osassa testattiin tärinänvaimentimien mekaanisia ominaisuuksia eri lämpötiloissa.

Yleensä kumit kestävät hyvin lämpöä, suurimmalla osalla kumeista pitkäaikainen käyttölämpötila on välillä 60-80 °C, poikkeuksena silikon- ja fluorikumit, niillä on korkeampi. Kumit

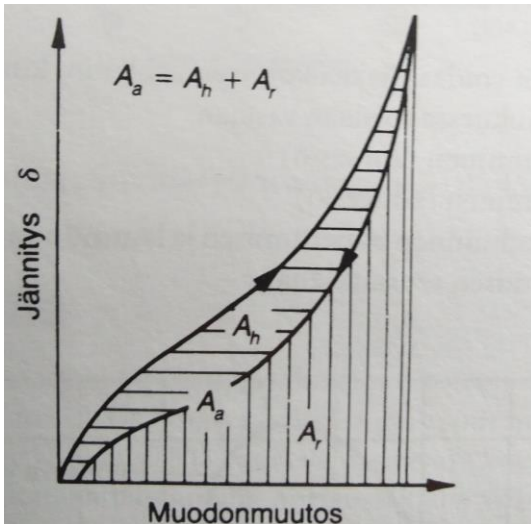
kestävät myös yli 100 °C:n lyhytaikaisia vaikutuksia. Pakkaskestävyys kumeilla on yleensä välillä -20 - -50 °C. Vaikka suurin osa kumeista kestää pakkasta hyvin, muuttuvat niiden mekaaniset ominaisuudet liikaa vaimennuksen kannalta.

3 Kumien mekaaniset ominaisuudet sekä vaimentimien valinta/tes- taus

Kuten muillakin materiaaleilla niin kumillakin on tiettyjä mekaanisia ominaisuuksia. Seuraavissa kappaleissa on esitelty ominaisuuksia, jotka vaikuttavat tärinänvaimentimien toimintaan niin yleisesti kuin pakkasellakin. Etenkin kumien kimmomoduuli vaikuttaa vaimennukseen suuresti. Opinnäytetyön kokeellisessa osassa tehtiin DMA-testit kolmelle kumimateriaalille, joista saatiin kumien kimmomoduulit eri lämpötiloille.

3.1 Vaimennus

Kumeilla on erittäin hyvä vaimennuskyky. Kun kumia käytetään vaimentimena kumin viskoelastisten ominaisuuksien johdosta osa mekaanisesta energiasta, joka kumiin kohdistuu, muuttuu lämpöenergiaksi. Hystereesihäviöksi kutsutaan ilmiötä, joka muuttaa osan kumin jousienergiasta lämmöksi, kun kumia kuormitetaan ja sen jälkeen vapautetaan. Kuviossa 2 on selitetty hystereesihäviö, jota erotus A_h kuvaa. [5.]



Kuvio 2. Hystereesihäviö A_h . Pinta-alojen erotus on hystereesihäviö ($A_h = A_a - A_r$).

Kumiin vaimennuskyky vaihtelee lämpötilan ja kumityypin mukaan. Standardin ASTM D 945 mukaisesti on vaimennukseksi saatu 5-40% arvoja. Kun vaimennusominaisuuksia arvioidaan, voidaan niiden arviointiin käyttää kumin kimpoamaa. Suuri kimpoama vastaa alhaista vaimenemista.

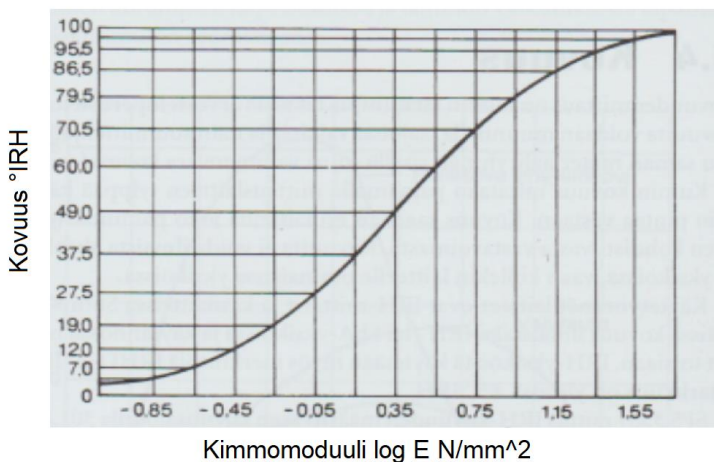
Kimpoamaa voi käyttää suoraan kumin vaimennusominaisuuksien arvioinnissa. Mitä pienempi kimpoama on, sitä paremmin kumi toimii vaimentimena. Kimpoama on muodonmuutoksesta saadun ja siihen vaaditun energian suhde, se ilmoitetaan yleensä prosentteina. Taulukossa 6 on eräiden kumimateriaalien kimpoama arvoja. [5.]

Taulukko 6. Kumimateriaalien kimpoama-arvoja. Lüpken kimpoama liittyy standardeihin ISO 4662 ja SIS 16 22 15.

Nokisekoituksessa käytetty raakakumi. Kovuus 65 Shore-A	Lüpken kimpoama %
Luonnonkumi	78
Styreenibutadieenikumi	67
Kloropreenikumi	74
Butyylikumi	24
Nitriilikumi	31

3.2 Kovuus

Kovuudenmittaus on tärkeimpiä kumin teknisiä arvosteluperusteita. Kumien kovuuksia voidaan muunnella laajalla mittakaavalla. Näin samalla kumityypillä voi olla hyvinkin suuret erot kovuudessa. Kumien kovuuden mittauksessa käytetään IRH-mittareita ja käsilaitteissa Shore-mittareita. Näiden mittareiden arvot ovat joko IRH- tai ShA-yksiköissä. IRH- ja ShA-yksiköt vastaavat käytännössä toisiaan. Kumin kovuuden ja muiden lujuusominaisuuksien välillä ei ole riippuvuutta, mutta kovuus antaa kuitenkin käsityksen kumin kimmomoduulista. Kuviossa 3 on esitetty kovuuden ja kimmomoduulin riippuvuus toisistaan. Taulukossa 9 (s.20) on hyvä esimerkki kimmomoduulin muutoksesta kovuuden suhteen. [5.]



Kuvio 3. Kumin kimmomoduulin ja kovuuden riippuvuus toisistaan.

3.3 Kimmomoduuli

Kimmomoduuli voidaan määrittää joko venytyksestä tai puristuksesta. Kimmomoduulin arvo riippuu käytetystä menetelmästä ja voiman suuruudesta, jolla kappaletta venytetään tai puristetaan. Useilla materiaaleilla kimmomoduuli on vakio kuten metalleilla. Kumien kimmomoduulit eivät kuitenkaan ole vakioita, vaan ne muuttuvat olosuhteiden mukaan. Esimerkiksi

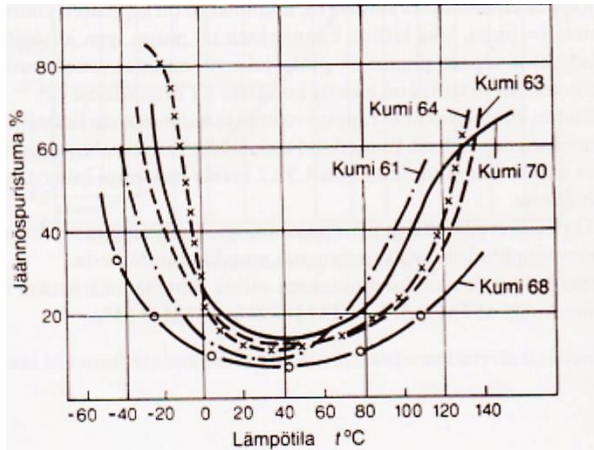
lämpötilan laskiessa kumin kimmomoduuli kasvaa. Kumien kimmomoduulit ovat yleensä välillä 2-30 MPa, kuitenkin kylmissä olosuhteissa kumien kimmomoduulit kasvavat huomattavasti suuremmiksi. Kimmomoduuli E saadaan laskemalla seuraavasti:

$$E = \frac{\frac{\text{Pintaa vastaan kohtisuoraan painettu voima}}{\text{Pinta - ala}}}{\frac{\text{Voiman suuntainen pituuden muutos}}{\text{Alkuperäinen pituus}}}$$

Kumin kokoonpuristuvuus on pieni, samaa luokkaa kuin vedellä. Kumia puristettaessa tapahtuu muodonmuutoksia, joiden takia kumin kimmomoduuli on jousivakion kaltainen suure, joka riippuu kappaleen muodosta. Kumin kimmomoduuli riippuu voiman ja muototekijän suuruudesta sekä lisäksi muodonmuutoksen nopeudesta ja lämpötilasta. Esimerkiksi nopeissa muodonmuutoksissa (iskut) voi kumien kimmomoduuli olla 1,3-2 kertaa suurempi kuin staattisessa jännityksessä, tai kylmissä olosuhteissa kumien kimmomoduuli voi kasvaa yli 500 kertaisiksi verrattuna lämpimiin olosuhteisiin. Kumin täyteaineiden takia kimmomoduuliin vaikuttavat myös aikaisemmat muodonmuutokset ja muodonmuutosamplitudi. [5.]

3.4 Jäännöspuristuma

Kumien jäännöspuristuma on hyvä tuntee, kun kumia valitaan vaihteleviin rasituksiin, esim. tärinänvaimentimiin. Jäännöspuristumalla tarkoitetaan pysyväksi jääneen puristuman ja kohteessa käytetyn puristuman suhdetta prosentteina. Jäännöspuristuma riippuu sekä ajasta että lämpötilasta. Lämpimässä jäännöspuristuma jää pysyväksi, kun taas pakkasessa syntynyt puristuma palautuu osittain lämpötilan noustessa. Kuviossa 4 on esitetty eri kumityyppien jäännöspuristumia riippuen lämpötilasta. Taulukossa 7 on esitetty kumityypit niiden numeroinnin mukaan. [5.]



Kuvio 4. Kumien jäännöspuristuma riippuen lämpötilasta.

Taulukko 7. Kumien numerointi ja kumityypit.

Kumityyppi	Kumi
Kumi 61	Yleiskumit
Kumi 62	Butyylikumi
Kumi 63	Öljynkestävätkumit
Kumi 64	Kloropreenikumi
Kumi 65	Akryylikumi
Kumi 66	Uretaanikumi
Kumi 67	Fluorikumi
Kumi 68	Silikonikumi
Kumi 69	Kloorisulfoni-eteenikumi
Kumi 70	Eteeni-propeenikumi

3.5 Puristuksen alaisen kumin laskentaa

Kumien muodonmuutosominaisuudet riippuvat muototekijästä S . S on kuormitettujen pintojen pinta-alan suhde vapaiden pintojen pinta-alaan.

$$S = \frac{A_{Kuormitettu}}{A_{Kuormittamaton}}$$

Kumiholkin säteisjäykkyys on K_r . Arvo voidaan laskea sekä lyhyille, että pitkille holkeille. Lyhyeksi holkiksi määritellään $D > L$ ja pitkäksi $D < L$, eli jos holkin halkaisija on suurempi kuin kumin korkeus, on holkki ns. lyhyt. Kuviossa 5 on esitetty holkin mitat D , d ja L . Säteisjäykkyys (K_r) voidaan laskea kaavalla:

$$K_r = \frac{F}{X} = \beta LG$$

jossa β = kerroin, saadaan taulukosta (taulukko 8)

L = holkin pituus

G = liukumoduuli (taulukko 9)

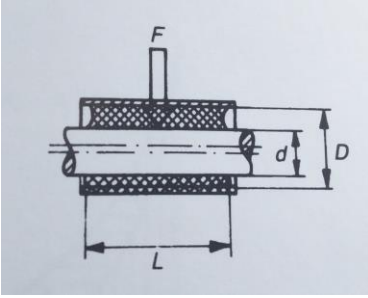
X = muodonmuutos

Taulukko 8. Kertoimet β_L ja β_S suhteen d/D mukaan. (β_S on lyhyen holkin laskenta arvo ja β_L pitkän holkin laskenta arvo.)

d/D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
β_L	9,5	18,3	34	66	135	310	900	3400	32000
β_S	5,2	7,9	11,1	15,3	21	30	44	70	150

Taulukko 9. Laskennassa tarvittavia arvoja (E_0 , G ja k) luonnonkumille.

Kovuus °IRH ±2	Kimmomoduuli E_0 N/mm ²	Liukumoduuli G N/mm ²	k
30	0,92	0,30	0,93
35	1,18	0,37	0,89
40	1,50	0,45	0,85
45	1,80	0,54	0,80
50	2,20	0,64	0,73
55	3,25	0,81	0,64
60	4,45	1,06	0,57
65	5,85	1,37	0,54
70	7,35	1,73	0,53
75	9,40	2,22	0,52

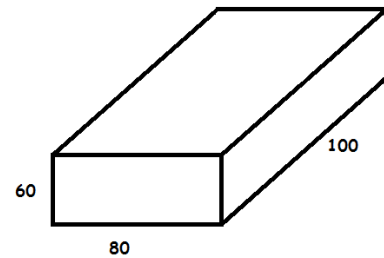


Kuvio 5. Laskenta-arvot D , d ja L saadaan kuvion mukaisista mitoista.

Esimerkki:

Kuvan mukaista luonnonkumikappaletta painetaan voimalla 500 N päältäpäin. Mikä on kumin puristuma, jos kumin kovuus on 50 °IRH.

$$\frac{F}{X} = \frac{E_c * A}{t}$$



jossa

$$F = 500N$$

$$X = \text{puristuma}$$

$$A = 8000\text{mm}^2$$

$$t = 60\text{mm}$$

$$E_c = E_0(1 + 2 * k * S^2)$$

$$E_0 = 2,20 \frac{N}{\text{mm}^2} \text{ (taulukko 9)}$$

$$k = 0,73 \text{ (taulukko 8)}$$

$$S = \frac{(100\text{mm} * 80\text{mm})}{(2 * 80\text{mm} * 60\text{mm} + 2 * 60\text{mm} * 1000\text{mm})} \rightarrow S = 0,37$$

$$E_c = \frac{2,20N}{\text{mm}^2} * (1 + 2 * 0,73 * 0,37^2) \rightarrow E_c = \frac{2,64N}{\text{mm}^2}$$

$$X = \frac{F * t}{E_c * A} = \frac{500N * 60\text{mm}}{2,64 \frac{N}{\text{mm}^2} * 8000\text{mm}^2} \rightarrow X \approx 1,42\text{mm}$$

Kuvan mukainen kumikappale puristuu noin 1,42 mm 500 N:n voimalla. [5.]

3.6 Tärinävaimentimien ja kumimateriaalien testausmenetelmät

Kumeja voidaan testata monella eri menetelmällä. Yleisimpiä kumimateriaalien testausmenetelmiä ovat kovuuskokeet, kulutuskestävyyden testaaminen, repimisherkkyyuskokeet sekä DMA-testit. Tärinävaimentimia testatessa niille tehdään yleensä vain kuormitustesti.

Kuormitustestissä tärinävaimentimeen kohdistetaan kohtisuora voima, jota kasvatetaan lineaarisesti, pienemmillä vaimentimilla esim. 0-10 N ja suuremmilla vaimentimilla voidaan mennä yli 10000 N voimiin. Pienillä vaimentimilla on testi hyvä aloittaa 0 N:sta, mutta suuremmilla vaimentimilla testi voidaan aloittaa esim. 1000 N voimalla (riippuu vaimentimen kestosta). Testissä saadaan mitattua puristuma ja jousivakio. Saaduista arvoista voidaan laskea myös vaimentimen ominaistajuus tietylle painolle. Kuormitustesti tulisi suorittaa vaimentimille laajalla lämpötila-alueella, jos haluttaisiin selvittää, kuinka vaimentimet toimivat pakkasella.

Koska autoteollisuus on suurin kumimateriaalien käyttäjä (80 % kaikista kumeista menee autoteollisuuteen, etenkin rengasteollisuuteen), on autonrenkaille olemassa paljon testejä. Autonrenkaista testataan mm. kulutuskestävyyttä, pitoa, puhkeamisvoimaa ja melua jne.

3.7 DMA-testaus

DMA:lla (Dynamic Mechanical Analysis) voidaan mitata kumista tai muusta polymeerisestä materiaalista mekaanisia ominaisuuksia, kuten jäykkyyttä. DMA-menetelmällä on erittäin hyvä tutkia kumiin viskoelastisuutta. Mittaus voidaan suorittaa esim. ajan tai lämpötilan funktiona. Mittaus voidaan tehdä vääntämällä, puristamalla tai taivuttamalla materiaalia (kuviossa 6 s. 24 on kaksi yleistä mittaustapaa). Kuviossa 7 s. 25 on esitetty tyypillinen DMA-testeri. Kuviossa 8 s.25 on esitetty polykarbonaatin kimmokerroin (sininen ja vihreä) ja häviömoduuli (oranssi), jotka on saatu polykarbonaatin DMA-testistä. Kuvion mukainen testi on suoritettu taajuutta muuttamalla.

Kumien viskoelastisia ominaisuuksia tutkitaan DMA:lla, jossa sinimuotoista voimaa kohdistetaan tutkittavaan materiaaliin ja voiman aiheuttama venymä/puristuma mitataan. DMA-testissä muutetaan yleensä taajuutta tai lämpötilaa, mutta myös voimaa voidaan muuttaa. Taajuuden, lämpötilan tai voiman vaihtelu aiheuttaa erilaisia variaatioita testissä, ja siitä voidaan havaita mm. lasittumispiste. Opinnäytetyössä DMA-testi ajettiin taajuudella 50 Hz välille $-120\text{ °C} - 100\text{ °C}$. Poikkeuksena luonnonkumi, jolle oli jo valmiit tulokset. Taajuudeksi valittiin 50 Hz, koska se on lähellä ilmalämpöpumppujen pyörimisnopeutta.

Yksi tärkeimpiä DMA-testin variaatioita on lasittumispisteen lämpötilan mittaaminen. Amorfisilla polymeereillä on lasittumispiste, jonka yläpuolella niillä on kumimaisia ominaisuuksia. Lasi-siirtymässä varastointimoduuli laskee dramaattisesti ja häviömoduuli saavuttaa maksimiarvon.

Täysin elastisella ja kiinteällä aineella mitatut jännitys ja venymä/puristuma ovat täydellisesti samassa vaiheessa. Viskoelastisilla polymeereillä on ominaisuus, että jossain vaiheessa DMA-testiä esiintyy viivettä jännityksen ja venymän välille. Esim. kun kappaletta jännitetään, venyminen tapahtuu ”viiveellä” (ei lineaarisesti). Jos näin käy, ovat seuraavat yhtälöt voimassa:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(t\omega + \delta)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \sin(t\omega)$$

joissa $\sigma = \text{jännitys}$

$\epsilon = \text{venymä}$

$\omega = \text{venymän värähtelytaajuus}$

$t = \text{aika}$

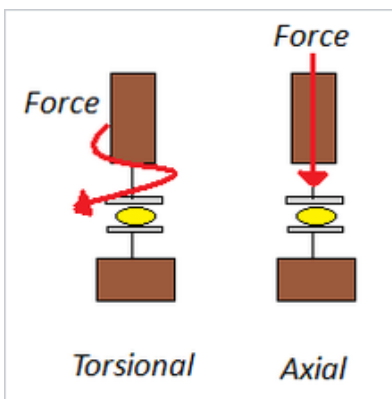
$\delta = \text{vaihekulma (vaihe - ero)}$

Varastomoduuli mittaa varastoitua energiaa elastisessa osassa. Häviökerroin mittaa energiaa, joka muuttuu lämmöksi (viskoosi osa). Varastointi- ja häviömoduuli määritellään seuraavalla tavalla:

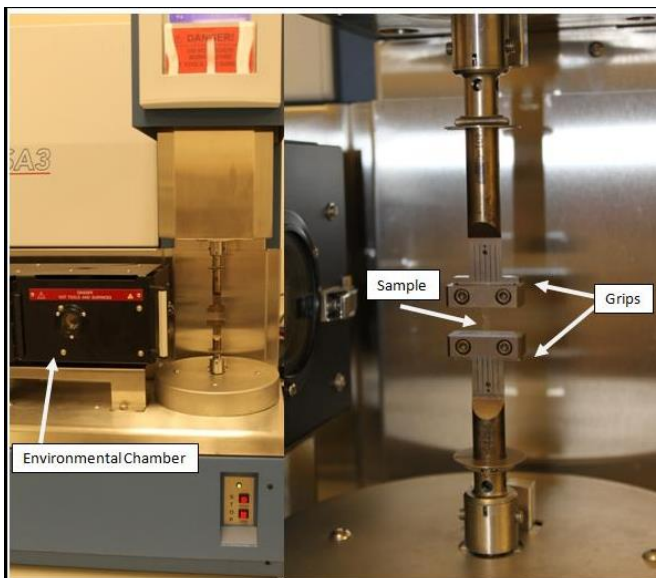
$$\text{Varastomoduuli } E' = \frac{\sigma_0}{\sigma_0} \cos \delta$$

$$\text{Häviömoduuli } E'' = \frac{\sigma_0}{\sigma_0} \sin \delta$$

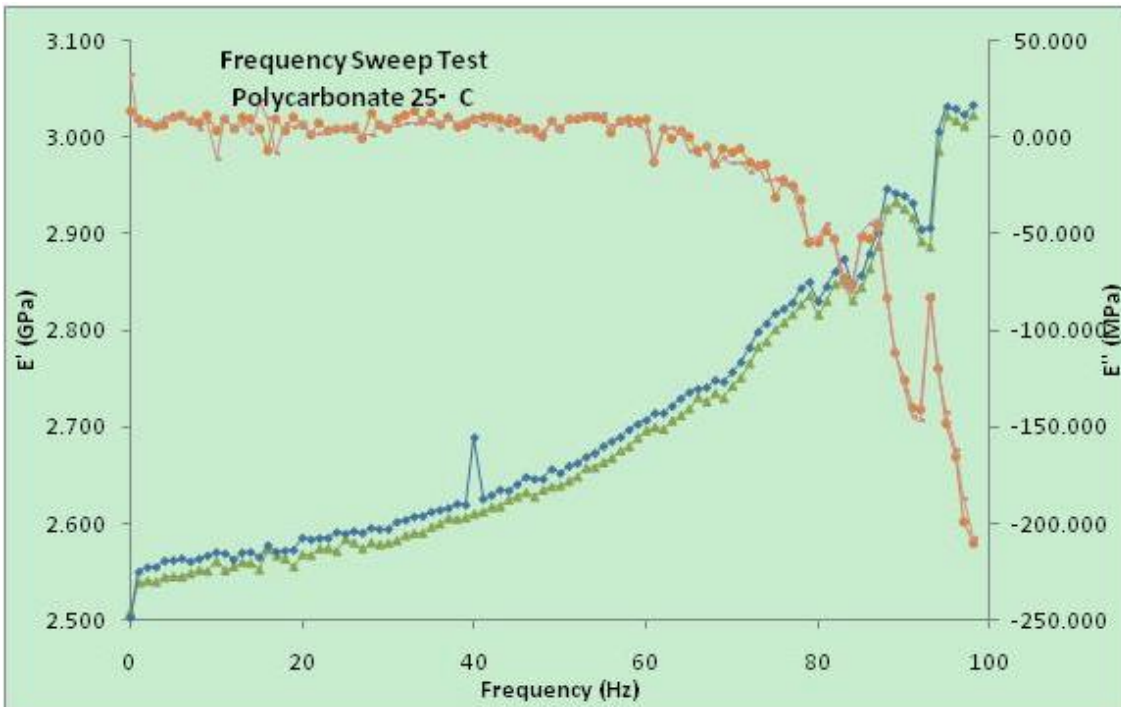
$$\text{Vaihekulma } \delta = \arctan \frac{E''}{E'}$$



Kuvio 6. DMA-testeissä käytetyt rasitusmenetelmät: vääntö ja taivutus (puristus).



Kuvio 7. DMA-testeri. Testikappale kiinnitetään leukojen väliin. Kyseisessä testerissä on kammio, jolla voidaan simuloida eri lämpötiloja.



Kuvio 8. Polykarbonaatin DMA-testistä saatua dataa: kimmokerroin (sininen ja vihreä) ja häviömoduuli (oranssi).

3.8 Tärinävaimentimien valintaperusteet/laskenta

Kun tärinävaimentimia valitaan käyttökohteisiin, täytyy selvittää koneen aiheuttamat voimat, jotta voidaan valita oikea tärinävaimennin dynaamisin perustein. Myös ympäristö on hyvä huomioida, mutta ilmalämpöpumppujen vaimentimien valintaan ei ympäristö vaikuta juuri ollenkaan (lämpötila on oikeastaan ainut ilmaston muuttuja). Tärinävaimentimien laskennassa tarvittavia kaavoja ovat:

$$\omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T} \left(\frac{\text{Rad}}{\text{s}} \right)$$

$$T = \frac{1}{n}$$

joissa $\omega = \text{värähtely}$
 $T = \text{jakso}$
 $n = \text{kierrosta sekunnissa}$

Jousituksen ominaistajuus, jos ei yksikölle ω ei ole annettu arvoa (rajakulmataajuus vahvistuksen ja vaimennuksen välillä):

$$\frac{\omega}{\omega_0} < \sqrt{2} \rightarrow \frac{\omega}{\sqrt{2}} < \omega_0$$

Esimerkkilasku:

Koneen paino on 1200 daN eli 12000 N. Kone pyörii nopeudella 1500 RPM ja koneella on kuusi kiinnityskohtaa. Koska koneella on kuusi kiinnityskohtaa, voidaan koneen kiinnityksessä käyttää kuutta tärinänvaimenninta. Jaetaan koneen paino tärinänvaimentimien määrällä, jolloin saadaan voima, jonka yhden vaimentimen on kestettävä. Eli yhden vaimentimen on kestettävä 2000 N:n eli 200 daN:n voima.

1500 RPM on 25 Hz:ä eikä vaimennettu tärinä ei saa ylittää jousituksen ominaistajuutta 1500 RPM:lle. Jousituksen ominaistajuus 1500 RPM:lle on:

$$\frac{25\text{Hz}}{\sqrt{2}} = \omega_0 \rightarrow \omega_0 = 17,7\text{Hz}$$

Vaimennettu tärinä ei saa ylittää 17,7 Hz.

1500 RPM:ssa 3 mm:n joustolla saadaan noin 85 % vaimennus (liite 2). Arvoilla jotka nyt on laskettu tai katsottu liitteestä 2, voidaan valita tärinänvaimennin Paulstra Industryn katalogista. Liitteestä 2 nähdään myös, että 3 mm vaimennuksella vaimennetun tärinän taajuus on noin 9 Hz. Sopiva tärinänvaimennin on esim. sivulta 80 löytyvä STABILEX® 530622 koivuus 45 ShA. [1.]

4 DMA-testit

DMA-testit suoritettiin Mikkelissä, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa. Testit suorittivat tutkimusyksikkö Mikpolis. DMA-testiin valittiin materiaaleiksi luonnonkumi (NR), neopreeni (eli kloropreenikumi, CR) ja EPDM-kumi. Näihin materiaaleihin päädyttiin hyvien mekaanisten ominaisuuksien takia. Kyseisillä materiaaleilla on hyvä pakkasen kesto, ja etenkin CR- ja EPDM-kumit kestävät ulkoilmaa hyvin. Luonnonkumille on kuitenkin ominaista etenkin auringosta johtuva halkeilu. Luonnonkumivaimentimet olisi hyvä suojata ainakin aurinolta, niiden eliniän pidentämiseksi. DMA-testitulokset ovat liitteinä lopussa (liitteet 3-5 PDF-kaavioina ja liitteet 6-8 Excel-taulukkoina).

DMA-testit suoritettiin puristamalla ja käyttämällä 50 Hz taajuutta. Mikpolisilla oli valmiit testitulokset luonnonkumille, mutta kloropreenikumille ja EPDM-kumille jouduttiin ajamaan testit. Testit ajettiin -120 °C:sta aina +100 °C:seen asti.

4.1 DMA-testitulosten analysointi

Seuraavissa kappaleissa on analysoitu DMA-testeistä saatuja tuloksia. Opinnäytetyön kannalta tärkeimpiä arvoja testituloksissa ovat E' eli kimmomoduuli ja $\tan \delta$ eli häviötekijä. Molemmat arvoista vaikuttavat merkittävästi materiaalin vaimennuskykyyn.

4.1.1 NR

Liitteessä 3 on DMA-testitulokset luonnonkumille. Luonnonkumin kimmomoduuli pysyy suhteellisen tasaisena aina -40 °C :seen asti. -40 °C :n jälkeen kimmomoduuli lähtee hurjaan nousuun, eli kumi menee suhteellisen kovaksi. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä ilmalämpöpumpujen vaimennuksen kannalta, koska pumput toimivat yleensä vain -20 °C :seen asti. Luonnonkumi on myös yleisin vaimentimissa käytettävä kumimateriaali. On myös huomioitavaa, että luonnonkumin kimmomoduuli muuttuu vain 2 MPa välillä $-25 - 50\text{ °C}$, mikä tekee luonnonkumista hyvän vaimennusmateriaalin, jos sitä katsoo lämpötilan vaihtelun kannalta.

Tan d:n eli häviötekijän arvo lähtee nousuun luonnonkumilla noin $+25\text{ °C}$:ssa ja kiihtyy 0 °C :n jälkeen. Häviötekijän arvo ja kimmomoduulista saatava jousivakio eli k vaikuttavat vaimentimen vaimennusvakioon, mikä taas vaikuttaa vaimentimen vaimennuskykyyn ja alustaan siirtyvään rasitukseen. Häviötekijä on häviömoduulin ja varastomoduulin (kimmokerroin) suhde.

4.1.2 CR

Liitteessä 4 on DMA-testitulokset kloropreenikumille. Kaaviosta näkee selvästi, kuinka kloropreenikumin kimmomoduuli lähtee nousuun -25 °C :n jälkeen, mikä tarkoittaa, että se menee kovaksi ja menettää vaimennuskykyään. Mutta tulee muistaa, että ilmalämpöpumput toimivat yleensä minimissään -20 °C :ssa, joten kimmomoduulin nousu -25 °C jälkeen ei tulisi vaikuttaa ilmalämpöpumpun vaimennukseen. Alle -25 °C :ssa kloropreenikumi on hyödytön vaimennusmateriaali, eli se toimii tärinänvoimistajana (lisää tärinää).

Häviötekijän arvo nousee kloropreenikumilla tasaisesti n. $+25\text{ °C}$:seen asti. $+25\text{ °C}$ jälkeen häviötekijän arvo kasvaa jyrkästi välillä $-31.2 - +25\text{ °C}$. Se miten tämä vaikuttaa tärinänvaimennukseen, selviää laskuissa. Kloropreenikumin kimmomoduulikin pysyy suhteellisen

tasaisena välillä +25 - -25 °C, muuttuu vain n. 73 MPa. Muutos on kuitenkin jo 36.5-kertainen verrattuna luonnonkumiin.

Taulukossa 10 on vertailtu kloropreeni- ja luonnonkumin kimmomoduuleita. 50 °C:sta 0 °C:seen kumien kimmomoduulin suhde on suhteellisen järkevä. -25 °C:ssa kloropreenikumi on melkein 21 kertaa jäykempää kuin luonnonkumi. -50 °C:ssa jäykkyyden ero on jo melkein 100-kertainen.

Taulukko 10. CR- ja NR-kumien kimmomoduulin vertailu.

Lämpötila	Kimmomoduuli		Suhde CR/NR
	NR	CR	
50	2 Mpa	8 MPa	4
25	2 Mpa	10 MPa	5
0	2 Mpa	15 MPa	7.5
-25	4 Mpa	83 MPa	20.75
-50	39 Mpa	3750 MPa	96.15384615

4.1.3 EPDM

Liitteessä 5 on DMA-testitulokset EPDM-kumille. EPDM-kumi käyttäytyy lähes identtisesti kloropreenikumin kanssa, EPDM-kumi on kuitenkin hiukan jäykempää kuin kloropreenikumi, n. 9 MPa +25 °C:ssa, vaikkakin ero on pieni 25 °C:ssa, on ero jo n. 164 MPa -25 °C:ssa.

Häviötekijän arvokin EPDM-kumille käyttäytyy lähes identtisesti kloropreenikumin kanssa. Kuitenkin EPDM-kumin häviötekijän arvo on pienempi kuin kloropreenikumin, n. puolet pienempi koko matkalla.

Taulukossa 11 on vertailtu EPDM- ja luonnonkumin kimmomoduuleita. Välillä 50-25 °C suhde on järkevä, EPDM-kumi on 6-10 kertaa jäykempää. Kuitenkin 0 °C:ssa EPDM-kumi

on jo melkein 33 kertaa jäykempää kuin luonnonkumivaimennin, ja -25 °C:ssa melkein 62 kertaa jäykempää.

Taulukko 11. EPDM- ja NR-kumien vertailu.

Lämpötila	Kimmomoduuli		Suhde EMPD/NR
	NR	EPDM	
50	2 MPa	12 MPa	6
25	2 MPa	19 MPa	9.5
0	2 MPa	65 MPa	32.5
-25	4 MPa	247 MPa	61.75
-50	39 MPa	2447 MPa	62.74358974

4.2 DMA-testitulosten yhteenveto

DMA-testituloksista näkee jo suhteellisen helposti, että luonnonkumi on paras vaimenninmateriaali, ainakin jos vertaa sitä EPDM- ja kloropreenikumiin. Myöskin kumimateriaalien kimmomoduuli kasvaa pakkasasteilla nopeasti hyvinkin suuriksi. Tästä voi päätellä, että tärinänvaimentimet menettävät vaimennuskykyään, mitä alemmas lämpötila laskee.

Häviötekijän arvo on toinen merkittävä arvo, joka vaikuttaa suoraan vaimennukseen, mutta siitä on hankala arvioida suoraan, kuinka se vaimennukseen vaikuttaa. Laskutulosten pohjalta voi sanoa, että mitä suurempi häviötekijän arvo on, sitä enemmän voimaa alustaan siirtyy.

4.3 Laskut testitulosten pohjalta

DMA-testeistä saatuja arvoja, joita tärinänvaimentimien laskennassa tarvitaan ovat:

- $E = \text{kimmokerroin}$

- $\tan d = \text{varastomoduuli/kimmomoduuli}$

Muita laskennassa tarvittavia arvoja/mittoja ovat:

- vaimentimen mitat:

$$A = \text{vaimentimenpinta - ala } (\pi r^2)$$

$$y_0 = \text{vaimentimen lepokorkeus}$$

$$d = \text{vaimentimen halkaisija}$$

- koneen tiedot:

$$m = \text{koneen massa}$$

$$m_0 = \text{koneen massa per vaimennin (tässä tapauksessa } \frac{m}{4} \text{)}$$

$$n = \text{pyörimisnopeus josta saadaan } \omega$$

- laskennalliset muuttujat ja arvot:

$$k = \text{jousivakio } \left(\frac{E * A}{y_0} \right)$$

$$c = \text{vaimennuskerroin } \left(\frac{\tan d * k}{\omega} \right)$$

$$\zeta = \text{vaimennussuhde } \left(\frac{c}{2m\omega} \right)$$

$$\omega_0 = \text{vaimenematon ominaistajuus } \left(\sqrt{\frac{k}{m_0} * 1000} \right)$$

$$\omega_1 = \text{pakkovoiman taajuus } (\omega_0 * \sqrt{1 - \zeta})$$

$$r = \text{pakkovoiman taajuuden suhde ominaistajuuteen } \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)$$

$$t = \text{voimansiirtvyvyys alustaan } \left(\sqrt{\frac{1 + (2 * \zeta * r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2 * \zeta * r)^2}} \right)$$

Tässä esimerkissä käytetään luonnonkumivaimenninta, jonka mitat ovat 20 mm*25 mm (halkaisija x korkeus) ja lämpötila on +30 °C. Lasketaan ensin jousivakio k:

$$k = \frac{E * A}{y_0} = \frac{1,6992 \text{MPa} * (\pi * (10 \text{mm})^2)}{25 \text{mm}}$$

$$k = 21,35 \text{ N/mm}$$

Pumpun pyörimisnopeudesta $n=20$ 1/s saadaan $\omega=125,664$ rad/s. Lasketaan seuraavaksi vaimennuskerroin c :

$$c = \frac{\tan d * k}{\omega} = \frac{0,0856 * \frac{21,35N}{mm}}{125,664 \frac{rad}{s}}$$

$$c = 0,01455$$

Seuraavaksi lasketaan vaimennussuhde ja vaimenemattoman ominaistajuus:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega} = \frac{0,01455}{2 * 60kg * \frac{125,664rad}{s}}$$

$$\zeta = 9,85413 * 10^{-7}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_0}} = \sqrt{\frac{\frac{21,35N}{mm}}{15kg} * 1000}$$

$$\omega_0 = 37,697 \text{ rad/s}$$

Seuraavaksi voidaan laskea pakkovoiman taajuus:

$$\omega_1 = \omega_0 * \sqrt{1 - \zeta} = 37,697 \text{ rad/s} * \sqrt{1 - 9,85413 * 10^{-7}}$$

$$\omega_1 = 37,697 \text{ rad/s}$$

Enää tarvitsee vain laskea pakkovoiman taajuuden suhde ominaistajuuteen, jotta päästäisiin alustaan siirtyviin voimiin. Pakkovoiman suhde ominaistajuuteen lasketaan:

$$r = \frac{\omega}{\omega_1} = \frac{\frac{125,664 \text{ rad}}{s}}{37,697 \text{ rad/s}}$$

$$r = 3,333$$

Nyt voidaan laskea alustaan siirtyvät voimat:

$$t = \sqrt{\frac{1 + (2 * \zeta * r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2 * \zeta * r)^2}} = \sqrt{\frac{1 + (2 * 9,85413 * 10^{-7} * 3,333)^2}{(1 - 3,333^2)^2 + (2 * 9,85413 * 10^{-7} * 3,333)^2}}$$

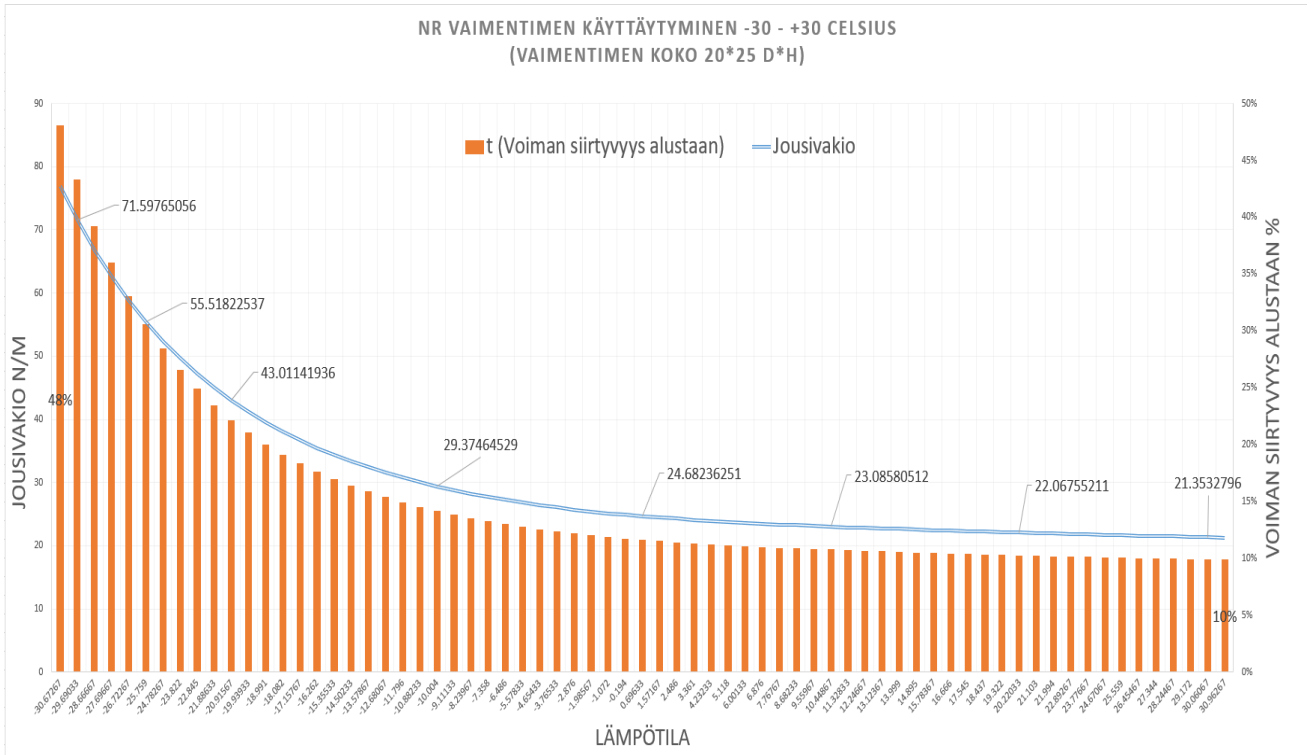
$$t \approx 10\%$$

+30 °C:ssa alustaan siirtyy n. 10 % voimista, joita tärinä aiheuttaa.

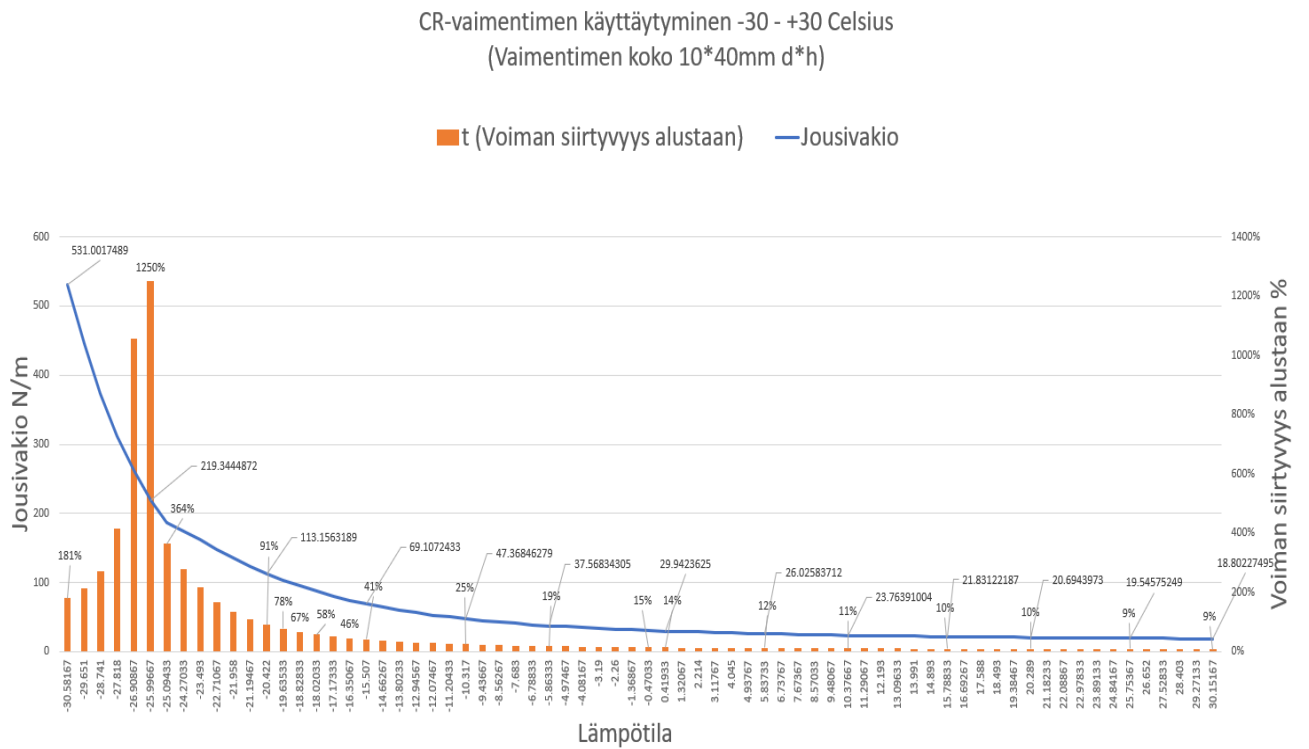
Näillä kaavoilla laskettiin jokaiselle vaimentimelle tarkat arvot, lämpötilavälille -30 - +30 °C. Jokaista vaimenninta oli 4 kpl, vaimentimen kokoja jouduttiin muuttamaan CR- ja EPDM-kumille, jotta tulokset olisivat järkevämpiä. Vaimennettavan koneen paino oli 60 kg. Laskutulokset löytyvät liitteistä 9-11.

4.4 Laskutulosten analysointi ja johtopäätökset

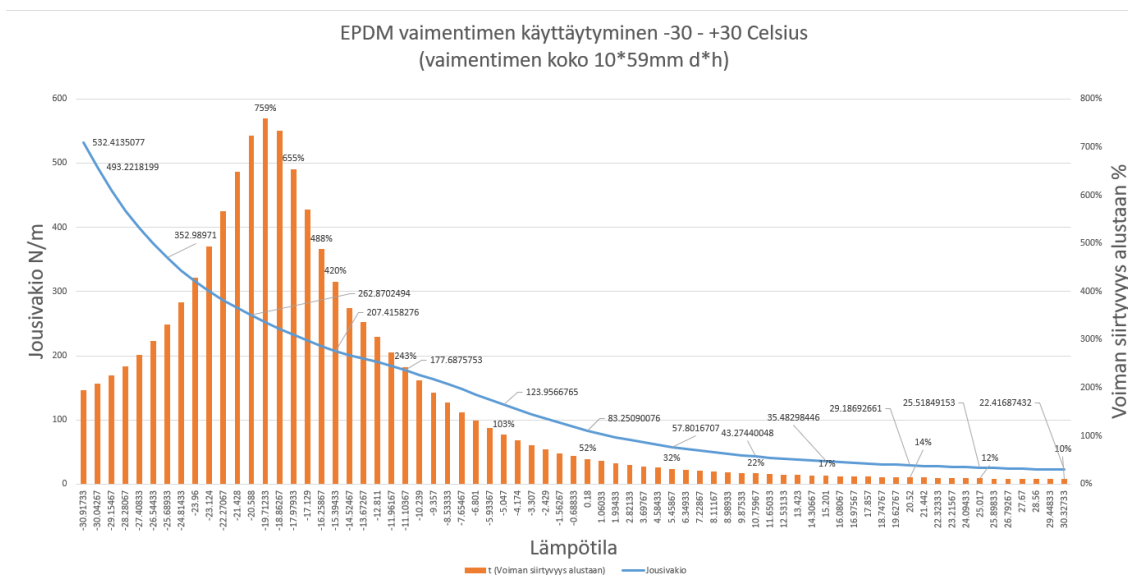
Liitteissä 9-11 olevista laskutuloksista koottiin diagrammit (kuviot 9-11), joista näkee, kuinka vaimentimen jousivakio ja sen alustaan siirtämät voimat muuttuvat lämpötilan suhteen.



Kuvio 9. 20 mm x 25 mm luonnonkumivaimentimen käyttäytyminen eri lämpötiloissa (lämpötila väli -30 – 30 °C).



Kuvio 10. 10 mm x 40 mm kloropreenikumivaimentimen käyttäytyminen eri lämpötiloissa.



Kuvio 11. 10 mm x 59 mm EPDM-kumivaimentimen käyttäytyminen eri lämpötiloissa.

Kuviossa 9 on luonnonkumivaimentimen käyttäytyminen -30 - +30 °C:ssa. Kaaviosta näkee, että vaimentimen jousivakio nousee tasaisesti ja myös alustaan siirtyvien voimien määrä pysyy tasaisena, melkein koko lämpötilavälillä. Jousivakion nousu kiihtyy hieman -10 °C:n jälkeen, ja samalla alustaan siirtyvät voimatkin lähtevät nousuun. Kuitenkin -30 °C:ssa alustaan siirtyvät voimat ovat vain n. 48 % koneen aiheuttamista voimista. -20 °C:ssa alustaan siirtyy vain n. 20 % voimista. +30 °C:ssa voimat ovat 10 % luokkaa. Kaavion perusteella luonnonkumivaimennin toimii erittäin hyvin -30 °C:seen asti.

Kuviossa 10 on kloropreenikumivaimentimen käyttäytyminen -30 - +30 °C:ssa. Kloropreenikumivaimentimellakin jousivakio nousee tasaisesti aina -10 °C:seen, jonka jälkeen jousivakion nousu kiihtyy hieman. Huomattavaa on, kuinka jousivakio ottaa piikin -25 °C:n jälkeen. Myös alustaan siirtyvät voimat nousevat tasaisesti -15 °C:een asti, jonka jälkeen voimat kasvavat suuresti. Huomattavaa on myös piikki -25 °C:ssa, jonka jälkeen voimat lähtevät laskuun, kyseinen piikki johtuu siitä, että ominaistaajuus on sama kuin pakkovoiman taajuus (vaimennin on resonanssissa pakkovoiman kanssa). Kaavion perusteella voisi sanoa, että kloropreenikumivaimennin toimii hyvin n. -15 - -19 °C:seen asti, jonka jälkeen se vain voimistaa värinää.

Kuviossa 11 on EPDM-kumivaimentimen käyttäytyminen $-30 - +30$ °C:ssa. EPDM-kumivaimentimen jousivakio nousee tasaisesti $+30$ °C:sta n. 0 °C:seen asti. 0 °C:n jälkeen jousivakion nousu kiihtyy ja EPDM-kumi menettää vaimennuskykyään. -30 °C:ssa EPDM-kumin jousivakio on jo n. 535 N/mm. Alustaan siirtyvät voimatkin kasvavat tasaisesti välillä $+30 - 0$ °C, 10 prosentista n. 50 prosenttiin. Nollasta °C:sta -5 °C:seen alustaan siirtyvät voimat kasvavat jo 100 prosenttiin. Koska alustaan siirtyvät voimat kasvavat pakkasella EPDM-kumilla tosi suuriksi, EPDM-kumia ei voi käyttää kuin lämpimissä olosuhteissa vaimentimena.

Kuvioiden 9-11 perusteella voi todeta, että luonnonkumi on näistä kolmesta materiaalista kaikkein paras vaimennusmateriaali, etenkin kylmiin olosuhteisiin. Kloropreenikumikin toimii yllättävän hyvin n. -20 °C:seen asti, mutta on sen jälkeen hyödytön vaimentimena. EPDM-kumivaimennin taas toimii hyvin silloin, kun lämpötila on nollan yläpuolella. EPDM-kumi kestää myös mennä hieman nollan alapuolelle, mutta se menettää niin nopeasti vaimennuskykynsä. Siksi sitä ei voi suositella käytettäväksi vaimentimena, jos on mahdollista, että lämpötila tippuu alle 0 °C:n

4.5 Tärinävaimentimien toiminnan optimointi pakkaselle

Jotta tärinävaimentimien pakkastoimivuuden haluaisi optimoida mahdollisimman hyväksi, tulee huomioida seuraavat asiat:

- Vaimentimen halkaisijan tulee olla mahdollisimman pieni.
- Vaimentimen korkeuden tulee olla mahdollisimman suuri.
- Vaimentimen tulisi joustaa mahdollisimman paljon.
- Kone, jota vaimennetaan, tulisi suojata lumelta/muulta painolta, jotta tärinävaimentimen maksimikuormaa ei ylitettäisi.

Taulukossa 12 on verrattu alustaan siirtyviä eri kokoisilla luonnonkumivaimentimilla -20 °C:ssa. Taulukosta näkee, kuinka vaimentimen koko vaikuttaa suoraan alustaan siirtyviin voimiin. Halkaisijan ja korkeuden suhde tulisi olla mahdollisimman pieni.

Taulukko 12. Alustaan siirtyvät voimat eri kokoisilla luonnonkumivaimentimilla -20 °C:ssa (vaimentimen koko on millimetreinä).

Vaimentimen koko (d*h)	Alustaan siirtyvät voimat
16x25	13%
20x25	22%
20x30	18%
25.5x40	23%
30x40	34%

Vaimentimien valinta voidaan tehdä Paulstra Industryn ohjeen mukaan. Siinä tarvittavia tietoja ovat:

- koneen paino $m = 60 \text{ kg}$
- pyörimisnopeus $= 1200 \text{ RPM}$
- 4 kpl kiinnityskohtia

Näistä saadaan määritettyä voima vaimenninta kohden:

$$\frac{60 \text{ kg} * \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2}}{4} = 147,15 \text{ N} \approx 15 \text{ daN}$$

Vaimentimien tulee kestää vähintään 15 daN voima. Liitteestä 1 nähdään, että 1200 kierrokselle minuutissa minimijouston arvo on 1,3 mm. Valitaan vaimennin, jolla on joustoa n. 1,5 mm, vaimennin toimii hyvin +20 °C:ssa, mutta -20 °C:ssa vaimentimen jousivakio on jo melkein 2-kertainen. Vaimenninta valittaessa tulee muistaa yllä mainitut asiat. Kyseisessäkin tapauksessa vaimentimen pakkastoimivuutta voi parantaa valitsemalla isommalla joustolla oleva vaimennin.

5 Pohdinta

Työntavoite oli tutkia eri vaimenninmateriaaleja, ja niiden pohjalta tehdä tarkennettu valinta-ohje tärinävaimentimille. Testit onnistuivat hyvin ja niistä saatiin koottua hyvät diagrammit ja taulukot.

DMA-testeissä verrattiin luonnon-, kloropreeni- ja EPDM-kumia. Näistä kolmesta luonnonkumi on kaikkein paras vaimennin pakkasella. Myös kloropreenikumi toimii pakkasella n. -20 °C:seen asti hyvin. Taulukossa 13 on verrattu alustaan siirtyviä voimia kumimateriaalien kesken eri lämpötiloissa. EPDM-vaimentimen lämpötilariippuvuuden vuoksi ei sovellu vaihtuviin lämpötiloihin kylmemmissä olosuhteissa.

Tulee kuitenkin muistaa, että kumimateriaaleja on huomattavasti enemmän kuin nämä kolme, joita tutkittiin. Jos asiaan haluaisi perehtyä tarkemmin tulisi DMA-testejä suorittaa lisää muillekin materiaaleille ja verrata niistä saatuja tuloksia luonnon- tai kloropreenikumiin.

Taulukko 13. Materiaalien alustaan siirtämän voiman vertailu.

Materiaalit ja alustaan siirtyvät voimat			
Lämpötila	Luonnonkumi	Kloropreenikumi	EPDM-kumi
30	10%	9%	10%
20	10%	10%	14%
10	11%	11%	22%
0	12%	14%	52%
-10	15%	25%	190%
-20	22%	91%	723%
-30	48%	181%	195%

Huomioitavaa on myös, että kumien kimmomoduuli on verrannollinen kumien kovuuteen, ja sitä kautta jousivakioon ja alustaan siirtyviin voimiin. Testeissä käytettyjen materiaalien kovuudet olivat:

- luonnonkumi 35+/-5 ShA
- kloropreenikumi 65+/-5 ShA
- EPDM-kumi 70+/-5 ShA

Ainakin teoriassa, pehmeämmillä EPDM- ja kloropreenikumeilla olisi mahdollista saavuttaa luonnonkumia vastaavat, ehkä jopa paremmat pakkasominaisuudet.

Huomasin myös laskuja tehdessäni, että EPDM-kumi toimii sitä paremmin, mitä painavampi vaimennettava kone on. Ainut ongelma on vain, että vaimennin itsessään jää tosi pieneksi koneen painoon nähden, mikä tekee kiinnityksestä hankalaa, etenkin pultit jäisivät tosi pieniksi.

Mielestäni opinnäytetyö onnistui yleisesti hyvin. Opin paljon kumeista ja tärinänvaimennuksesta, ja siitä miten paljon kylmyys vaikuttaa kumimateriaaleihin. DMA-testejä olisi voinut tehdä useammalle materiaalille, tai ainakin eri kovuuksille. Esim. samaa materiaalia voisi olla 3 eri kovuuksia, niin näkisi, kuinka paljon vaimennus vaihtelee kovuuksien suhteen.

Lähteet

1. Hutchinson Paulstra. Yritys. 2015. <http://www.paulstra-industry.com/catalogue/2015/en/index.html>. 11.2.2017
2. Kohaflex Ltd. Yritys. 2011. <http://www.kohaflex.sk/en/products/rubber-expansion-joints/general-information/>. 13.3.2017
3. Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. Porvoo: WS Bookwell Oy.
4. FP FinnProfiles. Yritys. 2017. <http://www.finnprofiles.com/materiaalit/kumi-profiilit.html>. 20.2.2017.
5. Metalliteollisuuden keskusliitto, MET, 2001. Raaka-aine käsikirja 4: Muovit ja kumit. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus OY.
6. Wikipedia. 2017. https://en.wikipedia.org/wiki/EPDM_rubber 20.2.2017
7. Wikipedia. 2017. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kumi> 20.2.2017
8. Wikipedia. 2017. <https://en.wikipedia.org/wiki/Neoprene> 20.2.2017

Liitteet

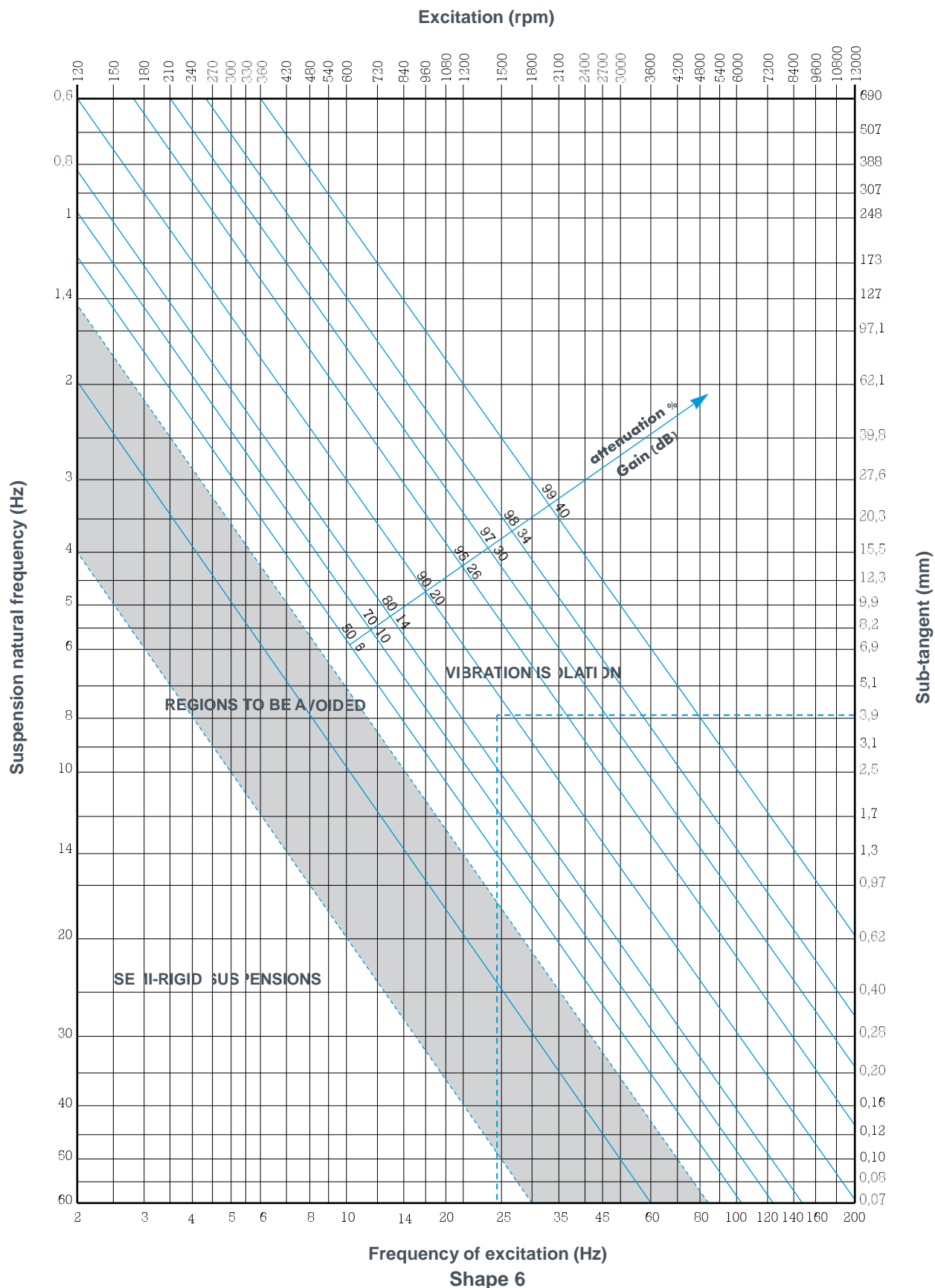
- 1 Kumityyppien ominaisuudet
- 2 Vaimennus funktiona, luonnollinen taajuus ja taajuuden viritys, abakus
- 3 DMA-testitulokset NR PDF (Mikpolis)
- 4 DMA-testitulokset CR PDF (Mikpolis)
- 5 DMA-testitulokset EPDM PDF (Mikpolis)
- 6 DMA-testitulokset NR Excel (Mikpolis)
- 7 DMA-testitulokset CR Excel (Mikpolis)
- 8 DMA-testitulokset EPDM Excel (Mikpolis)
- 9 Laskutulokset NR
- 10 Laskutulokset CR
- 11 Laskutulokset EPDM

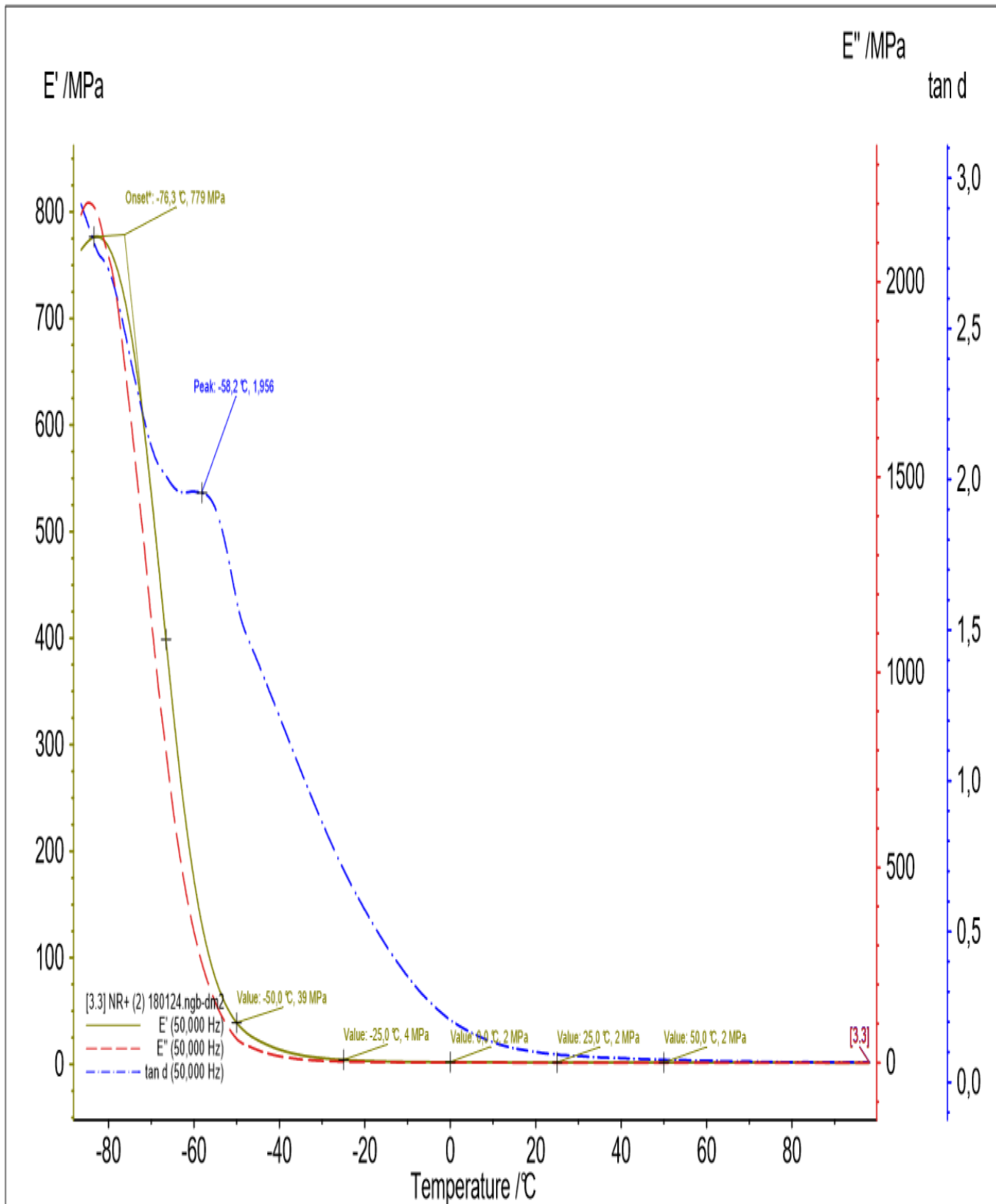
Kumilaatujen ominaisuudet

Ominaisuus	NR	SBR	IRR	NBR	ECO, CO	CR	U	PM	Q	GSM	EDPM
	Luonnonkumi	Styreeni butadienikumi	Butyylikumi	Nitrilikumi	Epikloorihydriini- kumi	Kloropreeni- kumi	Uretaanikumi	Fuonikumi	Silikonikumi	Kloorisulfonoitu polyeteenikumi	Eteenipropreeni- kumi
Vetolujuus, MN/m ²	4-25	4-25	4-15	4-18	4-18	4-20	15-30	7-15	3-10	4-12	4-18
Murtovenyä	100-600	100-500	100-800	100-400	100-500	100-500	100-800	100-200	100-400	100-500	100-400
Käyttämispöytä											
pitkäaikainen, °C	60	70	80	70	80	70	60	175	200	80	80
lyhytaikainen, °C	100	100	140	130	150	130	80	250	275	150	150
pakkanen, °C	30-60	20-50	10-40	10-50	10-50	20-50	0-20	20-40	50-80	20-40	30-60
Jäänsöpäytymä, °C/%	70/20-60	70/20-60	100/20-80	100/20-60	100/20-60	100/30-80	70/20-60	175/30-50	150/20-60	100/60-80	100/25-60
Kimmoisuus	erinomainen	erinomainen	tydyttävä	hyvä	hyvä	hyvä	erinomainen	tydyttävä	tydyttävä	hyvä	hyvä
Sähköiset ominaisuudet	erittäin hyvä	erittäin hyvä	erittäin hyvä	tydyttävä	huono	hyvä	hyvä	hyvä	erittäin hyvä	erittäin hyvä	erittäin hyvä
Kestävyys											
säätä otsoni	huono	huono	hyvä	tydyttävä	erittäin hyvä	erittäin hyvä	erinomainen	erinomainen	erittäin hyvä	erinomainen	erinomainen
hapot	hyvä	hyvä	erittäin hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	huono	hyvä	tydyttävä	erittäin hyvä	hyvä
emäkiset	hyvä	hyvä	erittäin hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	huono	tydyttävä	huono	erittäin hyvä	hyvä
öljyt-alfiittiset	huono	huono	huono	erittäin hyvä	erittäin hyvä	tydyttävä	hyvä	erittäin hyvä	huono	huono	huono
öljyt-aromaattiset	huono	huono	huono	hyvä	hyvä	huono	huono	erittäin hyvä	huono	huono	huono
kulutus	erittäin hyvä	erittäin hyvä	tydyttävä	hyvä	hyvä	hyvä	erittäin hyvä	hyvä	tydyttävä	hyvä	hyvä
fiikki	huono	huono	huono	huono	hyvä	erittäin hyvä	huono	erittäin hyvä	tydyttävä	hyvä	huono
sävelly	hyvä	hyvä	huono	hyvä	huono	hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	huono
kemikaalit	rajallinen	rajallinen	rajallinen	rajallinen	rajallinen	rajallinen	rajallinen	rajallinen	rajallinen	rajallinen	rajallinen
kaasutiivis	hyvä	hyvä	erinomainen	hyvä	erittäin hyvä	hyvä	hyvä	erittäin hyvä	tydyttävä	erittäin hyvä	tydyttävä
ilmätiivius	erittäin hyvä	erittäin hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	hyvä	tydyttävä	hyvä	hyvä	huono

ABAQUE

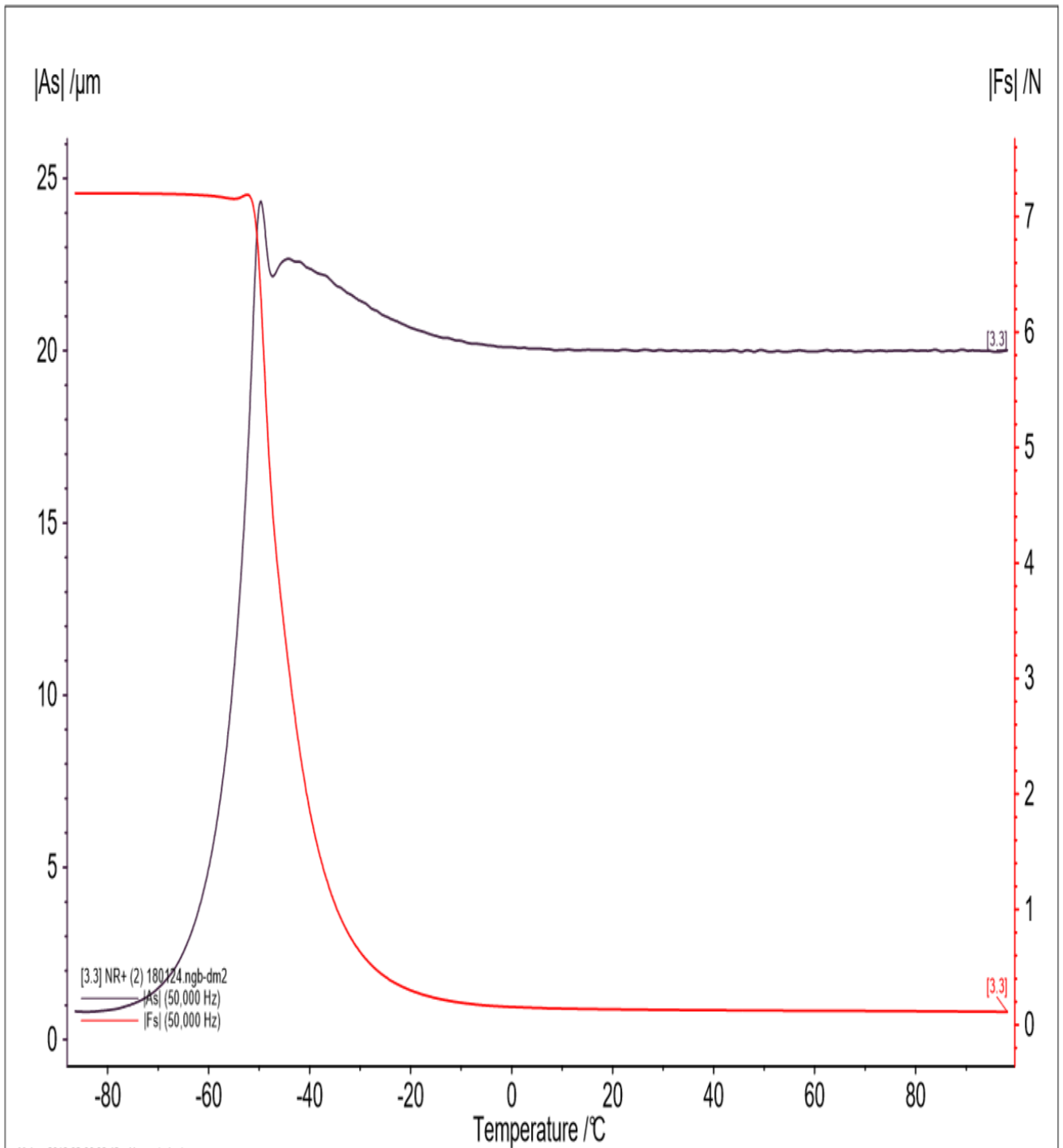
Attenuation as a function of natural frequency and frequency of excitation. (A theoretical graph for a mounting system without damping)





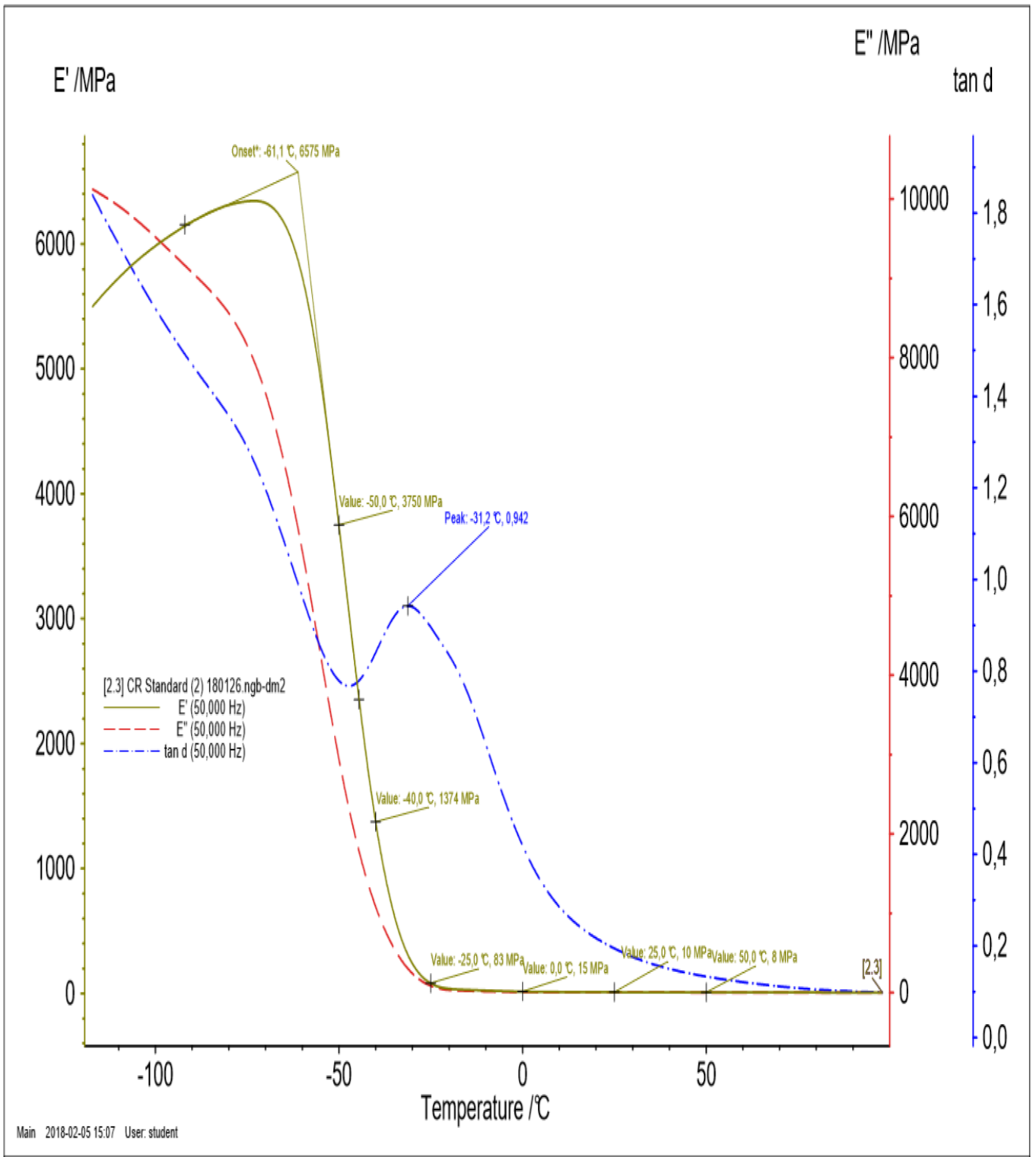
Main 2018-02-06 08:42 User: student

Instrument : NETZSCH DMA 242		File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\Karelia\NR+ (2) 180124.ngb-dm2	
Identity : 2	Sample dim. : 6,000x4,420x5,200 mm	Temp. range : -70,0°C/2,0(K/min)/100,0°C	Calibration : DMA242C_dynamic_mass150623.mm2
Date/time : 24.1.2018 13:01:59	Deform. mode : Compression	Segments : 3/3	Calibration : empty system_150623_netzsch.em2
Laboratory : Mikopolis-XAMK	Amplitude : 20,00 um	Frequency : 50,000000Hz	Calibration : Compression_D3mm_100114.cm8
Operator : ANy	DF/CSF : 7,26 N / 0,00 N	Atmosphere :	Calibration : 150623_rotatio tuning.rm2
Project : Karelia	PF : 1,10	Flow rate : 0 ml/min	Temp.calib. : TCAL 150702.tm2
Sample/shape : NR+Cubic	Material :	Smoothing : 3e-005/0,1 - multiple sm coeffs.	

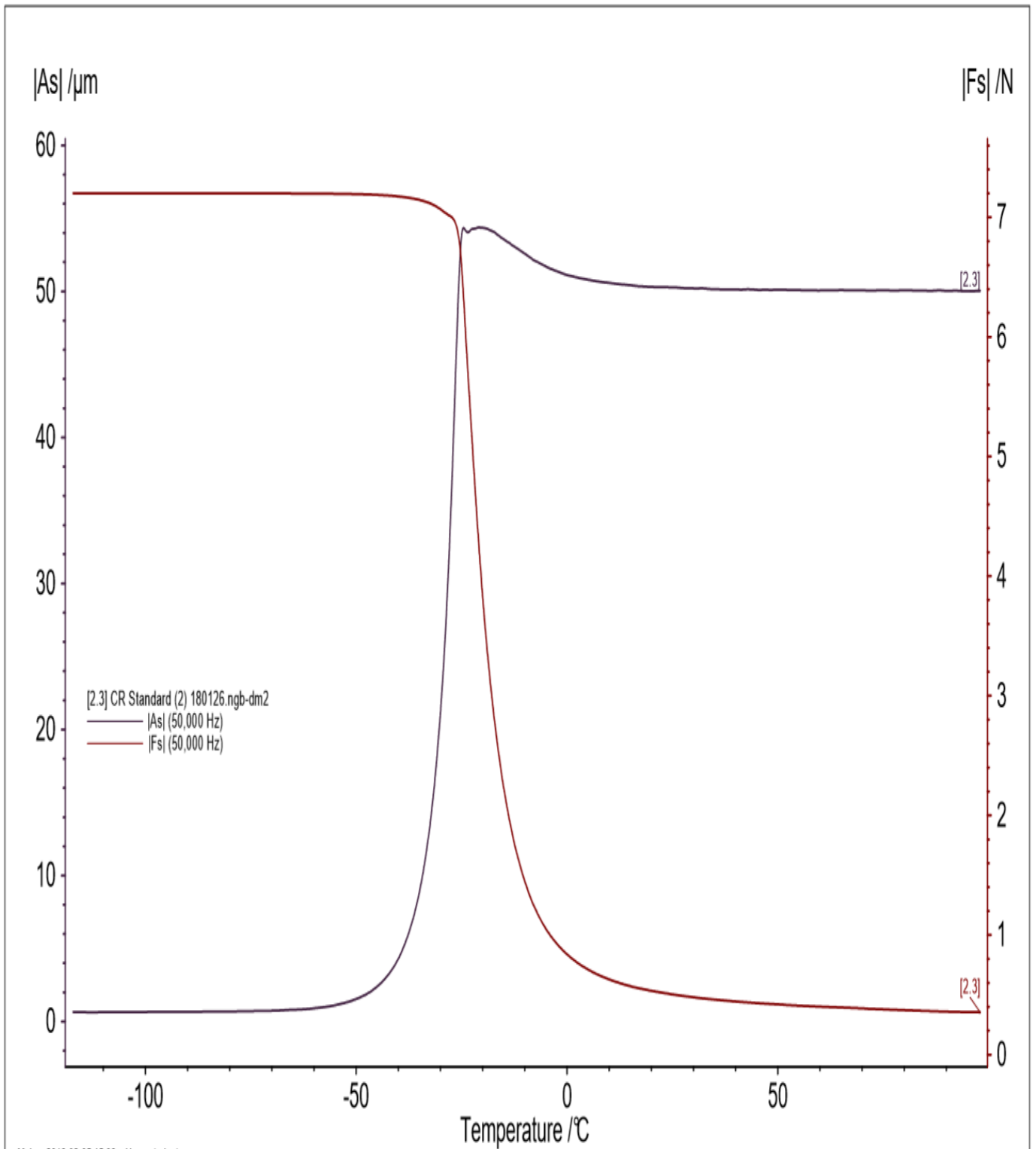


Main 2018-02-06 08:42 User: student

Instrument : NETZSCH DMA 242		File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\Karelia\NR+ (2) 180124.ngb-dm2	
Identity : 2	Sample dim. : 6,00x4,42x5,200 mm	Temp. range : -70,0°C/2,0(K/min)/100,0°C	Calibration : DMA242C_dynamic_mass150623.mm2
Date/time : 24.1.2018 13:01:59	Deform. mode : Compression	Segments : 3/3	Calibration : empty system_150623_netzsch.em2
Laboratory : Mikpolis-XAMK	Amplitude : 20,00 μm	Frequency : 50,000000Hz	Calibration : Compression_D3mm_100114.cm8
Operator : ANy	DF/CSF : 7,26 N / 0,00 N	Atmosphere :	Calibration : 150623_rotatio tuning.rm2
Project : Karelia	PF : 1,10	Flow rate : 0 ml/min	Temp.calib. : TCAL 150702.tm2
Sample/shape : NR+Cubic	Material :	Smoothing : 3e-005/0,1 - multiple sm.coeffs.	

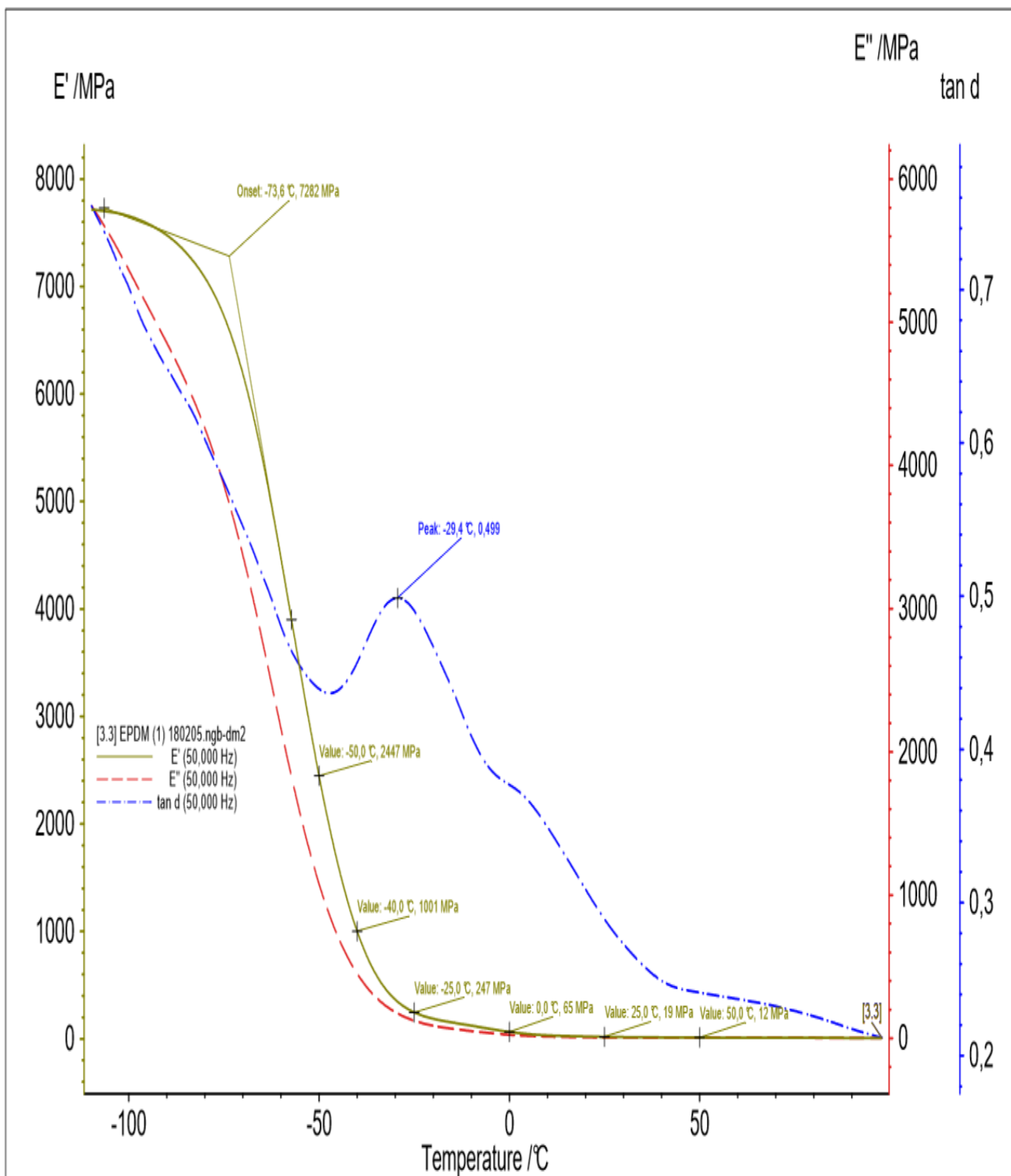


Instrument : NETZSCH DMA 242		File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\Karelia\CR Standard (2) 180126.ngb-dm2	
Identity : 2	Sample dim. : 3,700x2,200x1,650 mm	Temp. range : -100,0°C/2,0(K/min)/100,0°C	Calibration : DMA242C_dynamic_mass150623.mm2
Date/time : 26.1.2018 12:05:21	Deform. mode : Compression	Segments : 3/3	Calibration : empty system_150623_netzsch.em2
Laboratory : Mikopolis-XAMK	Amplitude : 20,00...50,00 um	Frequency : 50,000000Hz	Calibration : Compression_D3mm_100114.cm8
Operator : ANy	DF/CSF : 7,26 N / 0,00 N	Atmosphere :	Calibration : 150623_rotatio_tuning.rm2
Project : Karelia	PF : 1,10	Flow rate : 0 ml/min	Temp.calib. : TCAL 150702.tn2
Sample/shape : CR Standard /Cubic	Material :	Smoothing : 3e-005/0,1 - multiple sm.coeffs.	



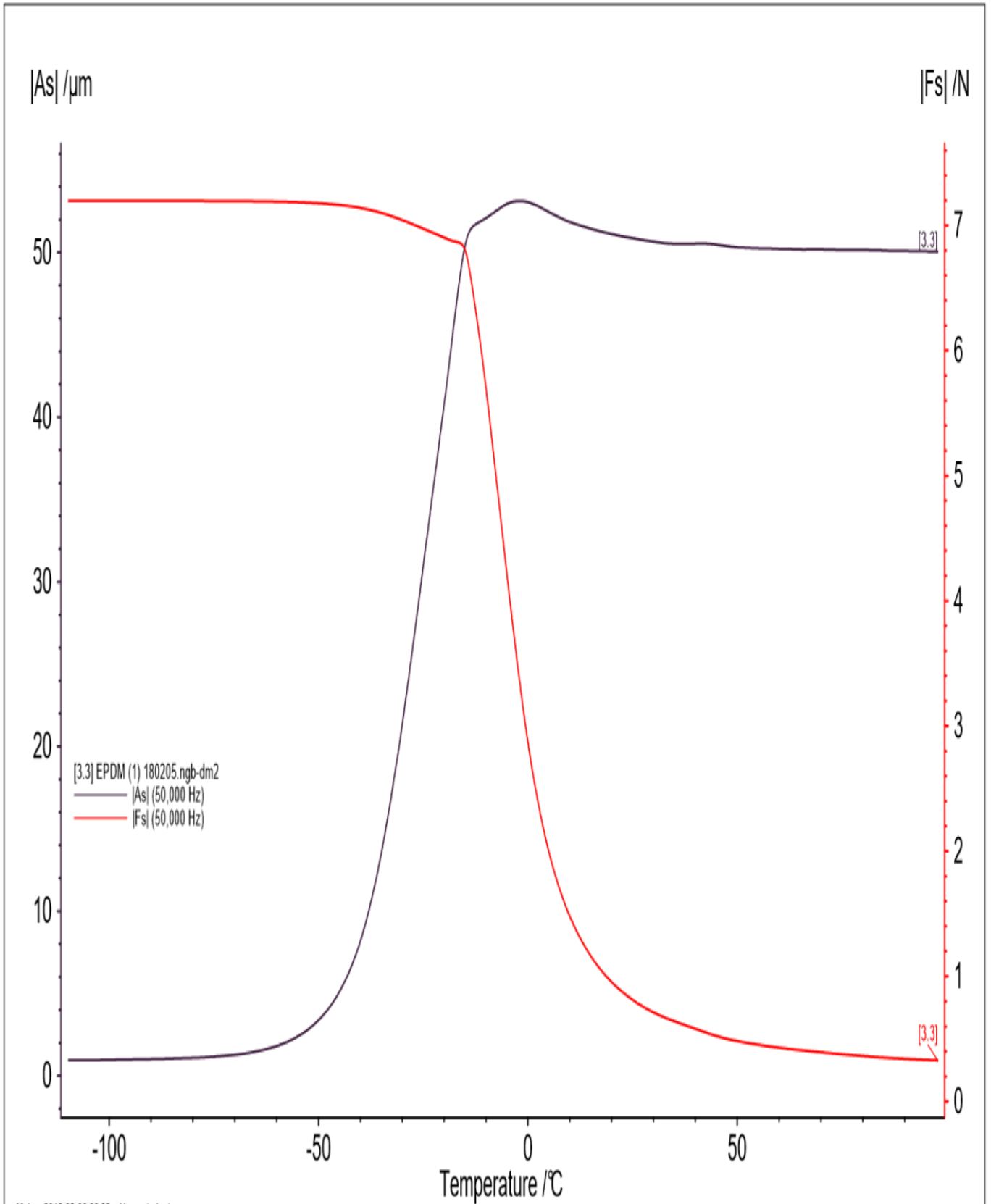
Main 2018-02-05 15:08 User: student

Instrument : NETZSCH DMA 242		File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\Karelia\CR Standard (2) 180126.ngb-dm2	
Identity : 2	Sample dim. : 3,700x2,200x1,650 mm	Temp. range : -100,0°C/2,0(K/min)/100,0°C	Calibration : DMA242C_dynamic_mass150623.mm2
Date/time : 26.1.2018 12:05:21	Deform. mode : Compression	Segments : 3/3	Calibration : empty system_150623_netzsch.em2
Laboratory : Mikpolis-XAMK	Amplitude : 20,00...50,00 um	Frequency : 50,000000Hz	Calibration : Compression_D3mm_100114.cm8
Operator : ANY	DF/CSF : 7,26 N / 0,00 N	Atmosphere :	Calibration : 150623_rotatio tuning.rm2
Project : Karelia	PF : 1,10	Flow rate : 0 ml/min	Temp.calib. : TCAL 150702.tn2
Sample/shape : CR Standard /Cubic	Material :	Smoothing : 3e-005/0,1 - 5	



Main 2018-02-06 08:33 User: student

Instrument : NETZSCH DMA 242		File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\Karelia\EPDM (1) 180205.ngb-dm2	
Identity : 1	Sample dim. : 2,800x1,600x1,400 mm	Temp. range : -100,0°C/2,0(K/min)/100,0°C	Calibration : DMA242C_dynamic_mass150623.mm2
Date/time : 5.2.2018 15:30:05	Deform. mode : Compression	Segments : 3/3	Calibration : empty_system_150623_netzsch.em2
Laboratory : Mikopolis-XAMK	Amplitude : 20,00...50,00 um	Frequency : 50,000000Hz	Calibration : Compression_D3mm_100114.cm8
Operator : Any	DF/CSF : 7,26 N / 0,00 N	Atmosphere :	Calibration : 150623_rotatio_tuning.rm2
Project : Karelia	PF : 1,10	Flow rate : 0 ml/min	Temp.calib. : TCAL 150702.tn2
Sample/shape : EPDM/Cubic	Material :	Smoothing : 3e-005/0,1 - multiple sm.coeffs.	



Main 2018-02-06 08:33 User: student

Instrument : NETZSCH DMA 242		File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\Karelia\EPDM (1) 180205.ngb-dm2	
Identity : 1	Sample dim. : 2,800x1,600x1,400 mm	Temp. range : -100,0°C/2,0(K/min)/100,0°C	Calibration : DMA242C_dynamic_mass150623.mm2
Date/time : 5.2.2018 15:30:05	Deform. mode : Compression	Segments : 3/3	Calibration : empty_system_150623_netzsch.em2
Laboratory : Mikpolis-XAMK	Amplitude : 20,00...50,00 um	Frequency : 50,000000Hz	Calibration : Compression_D3mm_100114.cm8
Operator : ANY	DF/CSF : 7,26 N / 0,00 N	Atmosphere :	Calibration : 150623_rotatio_tuning.rm2
Project : Karelia	PF : 1,10	Flow rate : 0 ml/min	Temp.calib. : TCAL 150702.tm2
Sample/shape : EPDM/Cubic	Material :	Smoothing : 3e-005/0,1 - multiple sm.coeffs.	

Materiaali:	Luonnonkumi		1.57167	1.94982	0.19255
			2.486	1.93279	0.18267
			3.361	1.9199	0.17718
Lämpötila °C	Kimmomoduuli Mpa	tan d	4.23233	1.90709	0.16926
-86.54034	742.96944	2.91933	5.118	1.89231	0.16441
-85.19267	770.86142	2.85382	6.00133	1.88202	0.15667
-83.82933	773.35448	2.84163	6.876	1.87072	0.15045
-82.40767	808.59164	2.68193	7.76767	1.85845	0.14574
-80.95866	759.44761	2.77015	8.68233	1.85242	0.13997
-79.56167	766.67813	2.671	9.55967	1.84123	0.13627
-78.20533	749.0498	2.62696	10.44867	1.83711	0.12996
-76.86333	734.15886	2.5185	11.32833	1.82588	0.12623
-75.55466	698.94834	2.46554	12.24667	1.81796	0.1235
-74.24934	683.308	2.33672	13.12367	1.81019	0.11843
-72.95934	635.98154	2.29368	13.999	1.8043	0.11519
-71.70067	605.77807	2.19587	14.895	1.79491	0.11326
-70.43533	554.18252	2.13736	15.78367	1.78898	0.11
-69.191	508.6738	2.06834	16.666	1.78226	0.10831
-67.94167	454.56628	2.03185	17.545	1.77554	0.10662
-66.714	400.34241	2.03567	18.437	1.76957	0.10333
-65.48333	354.02296	1.98049	19.322	1.76208	0.10322
-64.22733	303.73425	1.96329	20.22033	1.75608	0.0999
-63.02733	261.06692	1.96102	21.103	1.752	0.0985
-61.831	222.52528	1.95164	21.994	1.74473	9.60E-02
-60.65733	187.66065	1.96705	22.89267	1.74063	9.46E-02
-59.474	159.30877	1.95527	23.77667	1.7358	9.47E-02
-58.31433	134.12118	1.95369	24.67067	1.73169	9.32E-02
-57.16067	112.54659	1.95073	25.559	1.72781	8.95E-02
-56.01133	94.64914	1.93432	26.45467	1.71696	9.06E-02
-54.87	79.72508	1.90191	27.344	1.71282	8.92E-02
-53.70567	67.16104	1.84651	28.24467	1.71061	8.96E-02
-52.57067	56.76987	1.78501	29.172	1.70339	8.71E-02
-51.41433	47.78594	1.70256	30.06067	1.69924	8.56E-02
-50.31633	40.47671	1.61851	30.96267	1.69631	8.76E-02
-49.23034	34.66371	1.54031	31.84933	1.69174	8.54E-02
-48.17733	31.45173	1.50125	32.77833	1.68494	8.36E-02
-47.11934	28.69515	1.46713	33.67167	1.68269	8.40E-02
-46.06933	25.8663	1.43017	34.579	1.67813	8.18E-02
-45.00633	23.17031	1.3926	35.481	1.67588	8.22E-02
-43.92867	20.70179	1.3531	36.41167	1.67063	8.17E-02
-42.885	18.55202	1.31757	37.31933	1.66643	8.01E-02
-41.807	16.60697	1.27802	38.24833	1.66314	8.15E-02
-40.787	14.95585	1.24211	39.16233	1.66154	8.02E-02
-39.75433	13.48565	1.20462	40.05933	1.65632	7.97E-02
-38.737	12.21005	1.16864	40.967	1.65143	7.98E-02
-37.70633	11.07047	1.13153	41.86767	1.6521	7.81E-02
-36.664	10.04993	1.09346	42.77934	1.6521	7.81E-02
-35.65133	9.16716	1.05745	43.67567	1.6469	7.75E-02
-34.65233	8.40682	1.02212	44.58633	1.642	7.76E-02
-33.643	7.71989	0.98050	45.48222	1.64267	7.67E-02
-32.64067	7.12947	0.95220	46.38334	1.6394	7.74E-02
-31.66	6.59131	0.9177	47.29067	1.63583	7.41E-02
-30.67267	6.11979	0.8851	48.19533	1.63545	7.65E-02
-29.69033	5.69756	0.85203	49.09167	1.62999	7.52E-02
-28.66667	5.31215	0.81913	49.99333	1.62833	7.39E-02
-27.69667	4.98723	0.78724	50.89167	1.62601	7.43E-02
-26.72267	4.68312	0.75747	51.79633	1.62601	7.43E-02
-25.759	4.413	0.72856	52.69033	1.62083	7.37E-02
-24.78267	4.17369	0.70059	53.59167	1.61916	7.24E-02
-23.822	3.95814	0.67197	54.51567	1.6185	7.41E-02
-22.845	3.75936	0.64623	55.39533	1.61591	7.38E-02
-21.88633	3.58339	0.62058	56.27733	1.61399	7.19E-02
-20.91567	3.42274	0.59556	57.174	1.61141	7.16E-02
-19.93933	3.27798	0.57009	58.06167	1.60906	7.19E-02
-18.991	3.14575	0.54756	58.939	1.60906	7.19E-02
-18.082	3.02923	0.52408	59.829	1.60972	7.03E-02
-17.15767	2.92005	0.50305	60.739	1.60909	7.19E-02
-16.262	2.82405	0.4816	61.62767	1.60649	7.16E-02
-15.35533	2.73055	0.46070	62.50533	1.60199	6.94E-02
-14.50233	2.65618	0.44194	63.396	1.60221	7.01E-02
-13.57867	2.58351	0.42294	64.314	1.59963	6.98E-02
-12.68067	2.51264	0.40365	65.19733	1.59706	6.95E-02
-11.796	2.44955	0.38631	66.08167	1.5947	6.98E-02
-10.88233	2.39373	0.36798	66.95766	1.58957	6.92E-02
-10.004	2.33759	0.3519	67.83867	1.5904	6.82E-02
-9.11133	2.28861	0.33581	68.727	1.58719	6.96E-02
-8.23967	2.2459	0.31989	69.61733	1.58719	6.96E-02
-7.359	2.2053	0.30474	70.522	1.58207	6.90E-02
-6.486	2.16987	0.29059	71.41566	1.58033	6.77E-02
-5.57833	2.13523	0.27826	72.29633	1.57712	6.91E-02
-4.65422	2.1042	0.26442	73.191	1.57521	6.71E-02
-3.76533	2.0731	0.25124	74.115	1.57282	6.75E-02
-2.876	2.04864	0.2402	74.99367	1.56962	6.89E-02
-1.98567	2.0245	0.2299	75.88133	1.57026	6.72E-02
-1.072	2.00113	0.21797	76.76033	1.56771	6.69E-02
-0.194	1.98277	0.20838	77.68833	1.56531	6.72E-02
0.69633	1.96416	0.19972			

Lämpötila Celsius	Jousivakio	Vaimennusvakio c	ζ	ω (vaimenematon) hz	ω (vaimeneva ominaistajuus) hz	r (pakkovoiman taajuuksien suhde ominaistajuuteen)	t (Voiman siirtävyys alustaan)
-30.67267	76.90342356	0.541661728	3.59201E-05	71.6023868	71.60105268	1.755053891	48%
-29.69033	71.59765056	0.485449205	3.21924E-05	69.08818064	69.08706857	1.818917907	43%
-28.66667	66.75444566	0.435134143	2.88557E-05	66.71054173	66.70957923	1.883743049	39%
-27.69667	62.67138052	0.392614695	2.60361E-05	64.63816237	64.6373209	1.944135437	36%
-26.72267	58.84982155	0.354732291	2.35239E-05	62.63642261	62.63568587	2.006263752	33%
-25.759	55.51822537	0.321877808	2.13452E-05	60.83761193	60.83696263	2.065581527	31%
-24.78267	52.44813537	0.292446285	1.93934E-05	59.1315682	59.13099482	2.125174903	28%
-23.822	49.73945418	0.265975134	1.7638E-05	57.58440424	57.58389641	2.182271676	27%
-22.845	47.24151103	0.242941121	1.611105E-05	56.11981886	56.1193668	2.23922174	25%
-21.88633	45.0302068	0.222413851	1.47493E-05	54.79063594	54.79023187	2.293542149	23%
-20.91567	43.01141936	0.203844703	1.35179E-05	53.54837026	53.54800833	2.346748461	22%
-19.93933	41.19231155	0.186874362	1.23925E-05	52.40376039	52.40343568	2.398005102	21%
-18.991	39.53078602	0.172249235	1.14226E-05	51.31600817	51.33571497	2.447880705	20%
-18.082	38.06642686	0.158755886	1.05278E-05	50.37620262	50.37593744	2.494518465	19%
-17.15767	36.69455618	0.146893618	9.74119E-06	49.46012278	49.45988188	2.5407199	18%
-16.262	35.48805893	0.136006248	9.01919E-06	48.64021583	48.63999648	2.583546777	18%
-15.35533	34.3885015	0.126809278	8.36155E-06	47.88075571	47.88055553	2.624524815	17%
-14.50233	33.3785423	0.117387219	7.78448E-06	47.17240881	47.17222521	2.663934245	16%
-13.57867	32.46534415	0.109266972	7.24599E-06	46.52264262	46.52247407	2.701139797	16%
-12.68067	31.57476546	0.101422714	6.7258E-06	45.88010859	45.8799543	2.738967553	15%
-11.796	30.78195314	0.094751044	6.28337E-06	45.30044381	45.30030149	2.774014786	15%
-10.88233	30.08112665	0.088086316	5.84141E-06	44.78178696	44.78165616	2.806142445	15%
-10.004	29.37464529	0.082258736	5.45495E-06	44.25279298	44.25267228	2.839686276	14%
-9.11133	28.75952145	0.076853812	5.09653E-06	43.7870007	43.78688912	2.869893447	14%
-8.23967	28.22281176	0.071844095	4.76431E-06	43.37650037	43.37639704	2.897052654	14%
-7.358	27.71261712	0.067204312	4.45662E-06	42.98264542	42.98254965	2.923598232	13%
-6.486	27.2673906	0.063075951	4.18285E-06	42.6359712	42.63588203	2.947369684	13%
-5.57833	26.83271985	0.059416301	3.94017E-06	42.29477497	42.29469164	2.971146053	13%
-4.65433	26.44215705	0.055641361	3.68983E-06	41.98583654	41.98575908	2.993007841	13%
-3.76533	26.05134292	0.052084564	3.45396E-06	41.67440695	41.67433498	3.015373999	12%
-2.876	25.7439695	0.049208333	3.26323E-06	41.42782438	41.42775679	3.03321519	12%
-1.98567	25.44061731	0.046543255	3.0865E-06	41.18302021	41.18295666	3.051352218	12%
-1.072	25.14756955	0.04361972	2.8926E-06	40.94514179	40.94508257	3.069079319	12%
-0.194	24.91622266	0.0414161	2.74649E-06	40.7563773	40.75631177	3.083294359	12%
0.69633	24.68236251	0.039228204	2.6014E-06	40.56465005	40.56459729	3.097866478	12%
1.57167	24.50216075	0.037543784	2.4897E-06	40.41630096	40.41625065	3.109237104	12%
2.486	24.28815546	0.035306275	2.34132E-06	40.23941307	40.23936596	3.122904726	11%
3.361	24.12617494	0.034016788	2.25581E-06	40.10500795	40.10496272	3.133370477	11%
4.23233	23.96519973	0.032279405	2.14059E-06	39.97098926	39.97094648	3.14387617	11%
5.118	23.77946878	0.031111469	2.06314E-06	39.81579986	39.81575879	3.156129884	11%
6.00133	23.65016082	0.029485607	1.95533E-06	39.70739715	39.70735833	3.164746068	11%
6.876	23.50816084	0.028144982	1.86642E-06	39.58801236	39.58797541	3.17428979	11%
7.76767	23.35397147	0.02708505	1.79613E-06	39.45797044	39.457935	3.184751207	11%
8.68233	23.27819625	0.025928323	1.71943E-06	39.39390499	39.39387112	3.189930377	11%
9.55967	23.13757857	0.025090441	1.66386E-06	39.27474045	39.27470778	3.19960894	11%
10.44867	23.08580512	0.023875082	1.58327E-06	39.23077459	39.23074353	3.203194608	11%
11.32833	22.94468478	0.023048083	1.52842E-06	39.11068462	39.11065474	3.213029978	11%
12.24667	22.84515912	0.022451806	1.48888E-06	39.02576851	39.02573946	3.220021142	11%
13.12667	22.74751842	0.02143808	1.42166E-06	38.94228073	38.94225304	3.22692439	11%
13.999	22.6735025	0.020783732	1.37826E-06	38.87887387	38.87884708	3.232187053	11%
14.895	22.55550428	0.020329151	1.34812E-06	38.77757452	38.77754838	3.240630504	11%
15.78367	22.4809857	0.01967878	1.30499E-06	38.7134651	38.71343984	3.245996911	10%
16.666	22.39653969	0.019303658	1.28011E-06	38.64068641	38.64066168	3.252110619	10%
17.545	22.31209368	0.018930807	1.25539E-06	38.56777038	38.56774617	3.258259002	10%
18.437	22.23707245	0.018284967	1.21256E-06	38.50287647	38.50285313	3.2637505	10%
19.322	22.14295033	0.01818819	1.20614E-06	38.42130514	38.42128197	3.270679678	10%
20.22033	22.06755211	0.017543239	1.16337E-06	38.35583581	38.3558135	3.27626231	10%
21.103	22.01628132	0.0172572	1.1444E-06	38.31125276	38.31123083	3.280074887	10%
21.994	21.9249238	0.016749408	1.11073E-06	38.23168302	38.23166179	3.286901491	10%
22.89267	21.87340168	0.01646636	1.09196E-06	38.18673564	38.18671479	3.290770281	10%
23.77667	21.81270611	0.016438026	1.09008E-06	38.13371746	38.13369668	3.29534551	10%
24.67067	21.76105833	0.016139351	1.07027E-06	38.0885445	38.08852412	3.299253753	10%
25.559	21.71230081	0.0154639	1.02548E-06	38.04585024	38.04583074	3.302956033	10%
26.45467	21.57595569	0.015555658	1.03157E-06	37.92620527	37.92618571	3.313375806	10%
27.344	21.52393092	0.015278354	1.01318E-06	37.88045311	37.88043392	3.317377684	10%
28.24467	21.49615924	0.015327066	1.01641E-06	37.85600722	37.85598798	3.319519919	10%
29.172	21.40543004	0.014836527	9.83878E-07	37.776033	37.77601442	3.326547495	10%
30.06067	21.3532796	0.014545494	9.64578E-07	37.7299772	37.72996953	3.330607147	10%
30.96267	21.31646014	0.014859676	9.85413E-07	37.69744477	37.6974262	3.333482384	10%

Lämpötila Celsius	Jousivakio	Vaimennusvakio c	ζ (vaimenematon) hz	ω (vaimeneva ominaistajuus) hz	r (pakkovoiman taajuuden suhde ominaistajuuteen)	t (Voiman siirtyvyys alustaan)	
-30.58167	531.0017489	4.147742516	0.000275056	188.1491871	188.1233095	0.667985836	181%
-29.651	445.718445	3.450474077	0.000228817	172.3791258	172.359403	0.729079493	213%
-28.741	373.5738118	2.849048026	0.000188933	157.8129297	157.7980209	0.796357935	273%
-27.818	312.2967132	2.32443695	0.000154144	144.2906126	144.2794914	0.870974141	414%
-26.90867	261.6707723	1.885677325	0.000125048	132.0784545	132.0701962	0.95149178	1056%
-25.99667	219.3444872	1.517213052	0.000100613	120.9254556	120.9193721	1.039235517	1250%
-25.09433	185.8775719	1.227264627	8.13855E-05	111.3186333	111.3141034	1.128910914	364%
-24.27033	174.3770651	1.182734526	7.84325E-05	107.8199317	107.8157033	1.165541774	279%
-23.493	162.3813059	1.094445635	7.25777E-05	104.0452805	104.0415047	1.207822844	218%
-22.71067	147.8072809	0.992382644	6.58094E-05	99.2664028	99.26313641	1.2659655	166%
-21.958	135.7131309	0.916506404	6.07777E-05	95.11856843	95.11567784	1.32116712	134%
-21.19467	123.6925531	0.834363658	5.53305E-05	90.80842586	90.80591359	1.383871393	109%
-20.422	113.1563189	0.761761072	5.05159E-05	86.85479028	86.85259649	1.446861824	91%
-19.63533	103.512572	0.693067318	4.59605E-05	83.07128343	83.06937441	1.512756139	78%
-18.82833	94.84603702	0.62830816	4.1666E-05	79.51772843	79.51607182	1.580356062	67%
-18.02033	87.32219751	0.571295195	3.78852E-05	76.29862275	76.29717744	1.647029554	58%
-17.17333	80.33496165	0.516286818	3.42373E-05	73.18240301	73.18115021	1.717159484	51%
-16.35067	74.44885402	0.469720142	3.11493E-05	70.45038633	70.44928909	1.783746973	46%
-15.507	69.1072433	0.426361408	2.8274E-05	67.87598657	67.87502701	1.851398249	41%
-14.66267	64.40665493	0.387566353	2.57013E-05	65.5269181	65.52607603	1.917766388	37%
-13.80233	60.16104771	0.352161069	2.33534E-05	63.33037592	63.32963643	1.984279608	34%
-12.94567	56.43894764	0.320811327	2.12745E-05	61.34000741	61.33935492	2.04866364	31%
-12.07467	53.0435143	0.29222459	1.93787E-05	59.46624494	59.46566874	2.113214377	29%
-11.20433	50.06660001	0.266836032	1.76951E-05	57.77346566	57.7729545	2.17513034	27%
-10.317	47.36846279	0.243823912	1.61691E-05	56.19517345	56.19471914	2.236219134	25%
-9.43667	44.93908883	0.22311174	1.47956E-05	54.73517384	54.73476892	2.295866204	23%
-8.56267	42.80692916	0.204820653	1.35826E-05	53.42092547	53.42056267	2.352347109	22%
-7.683	40.90447883	0.188602301	1.25071E-05	52.22035288	52.22002632	2.406427476	21%
-6.78833	39.15983462	0.1738426	1.15283E-05	51.09457546	51.09428094	2.45944759	20%
-5.86333	37.56834305	0.160215319	1.06246E-05	50.04554129	50.04527543	2.51100039	19%
-4.97467	36.16416894	0.148396496	9.84085E-06	49.10137061	49.10112901	2.559283435	18%
-4.08167	34.86407973	0.13766827	9.12941E-06	48.21070402	48.21048395	2.606563881	17%
-3.19	33.71333397	0.128134256	8.49717E-06	47.40839164	47.40819022	2.650675032	17%
-2.26	32.62190542	0.118999208	7.89138E-06	46.63468338	46.63449938	2.694651124	16%
-1.36867	31.65166379	0.111160407	7.37155E-06	45.93594366	45.93577435	2.735639225	15%
-0.47033	30.75843046	0.104072826	6.90154E-06	45.28313186	45.2829756	2.775076162	15%
0.41933	29.9423625	0.09749447	6.4653E-06	44.67837844	44.67823401	2.812638165	14%
1.32067	29.15908491	0.091456492	6.0649E-06	44.09012355	44.08998984	2.850164098	14%
2.214	28.45183387	0.086106938	5.71014E-06	43.5521403	43.55201595	2.885370594	14%
3.11767	27.78222303	0.081111264	5.37886E-06	43.03659143	43.03647569	2.919934872	13%
4.045	27.15449355	0.076361387	5.06387E-06	42.54761532	42.5475076	2.953491597	13%
4.93767	26.5550973	0.072173806	4.78617E-06	42.07540636	42.07530567	2.986637985	13%
5.83733	26.02583712	0.068436447	4.53833E-06	41.6540011	41.65390658	3.016852835	12%
6.73767	25.52363389	0.064910094	4.30448E-06	41.2501587	41.25006992	3.046387712	12%
7.63767	25.04147796	0.061613451	4.08587E-06	40.85868163	40.85859815	3.075575566	12%
8.57033	24.61056926	0.058671151	3.89075E-06	40.50561217	40.50553337	3.102383691	12%
9.48067	24.17410387	0.055920444	3.70834E-06	40.14482438	40.14474994	3.130265012	11%
10.37667	23.76391004	0.053337682	3.53706E-06	39.80277213	39.80270174	3.157165234	11%
11.29067	23.4092635	0.051032776	3.38422E-06	39.50465247	39.50458562	3.180990363	11%
12.193	23.05116121	0.048958885	3.24669E-06	39.20132753	39.2012639	3.205603433	11%
13.09633	22.72512279	0.04694265	3.11298E-06	38.92310607	38.92304549	3.228516797	11%
13.991	22.41212199	0.045110066	2.99145E-06	38.65412612	38.6540683	3.250982669	10%
14.893	22.10524729	0.043378905	2.87665E-06	38.38858102	38.38852581	3.273470484	10%
15.78833	21.83122187	0.041889137	2.77786E-06	38.14989897	38.14984598	3.293950549	10%
16.69267	21.58335021	0.040563341	2.68994E-06	37.93270376	37.93265274	3.312810918	10%
17.588	21.33516439	0.039307429	2.60665E-06	37.71398007	37.71393092	3.332023554	10%
18.493	21.12022055	0.038037461	2.52244E-06	37.523522	37.52347468	3.348935759	10%
19.38467	20.90327394	0.03682667	2.44214E-06	37.33030399	37.33025841	3.366269388	10%
20.289	20.6943973	0.03570444	2.36772E-06	37.14332358	37.14327961	3.383215146	10%
21.18233	20.50382044	0.034654448	2.29809E-06	36.97189963	36.97185715	3.398901646	9%
22.08867	20.30289595	0.03358135	2.22693E-06	36.79030303	36.79026206	3.415678473	9%
22.97833	20.10122534	0.032564752	2.15952E-06	36.60712621	36.60708668	3.432769923	9%
23.89133	19.90456164	0.031614152	2.09648E-06	36.42761008	36.42757189	3.449686587	9%
24.84167	19.72992836	0.030704051	2.03613E-06	36.26745865	36.26742173	3.464919758	9%
25.75367	19.54575249	0.029820159	1.97751E-06	36.09778616	36.09775047	3.481206017	9%
26.652	19.38498148	0.029055018	1.92677E-06	35.94902083	35.9489862	3.495611961	9%
27.52833	19.22776441	0.02826854	1.87462E-06	35.80294625	35.8029127	3.509873825	9%
28.403	19.08937725	0.027592649	1.82979E-06	35.67387209	35.67383945	3.522573069	9%
29.27133	18.93799175	0.026968436	1.7884E-06	35.53213734	35.53210556	3.536624249	9%
30.15167	18.80227495	0.026224555	1.73907E-06	35.40459005	35.40455927	3.549365075	9%

Lämpötila Celsius	Jousivakio	Vaimennusvakio c	ζ (vaimenematon) hz	ω (vaimeneva ominaistajuus) hz	r (pakkovoiman taajuuden suhde ominaistajuuteen)	t (Voiman siirtyvyys alustaan)	
-30.91733	532.4135077	2.108491898	0.139823712	188.3991344	174.7320758	0.719179381	195%
-30.04267	493.2218199	1.95328292	0.129531097	181.3324424	169.1812158	0.74277576	209%
-29.15467	457.4718267	1.811703922	0.120142348	174.6371146	163.8108843	0.767126718	226%
-28.28067	426.3289658	1.688370331	0.111963535	168.5880513	158.8701079	0.790983954	245%
-27.40833	398.3917275	1.577731814	0.10462659	162.9706983	154.2096753	0.814888598	269%
-26.54433	374.4803469	1.483036711	0.098346926	158.0042925	150.0336309	0.837570253	297%
-25.68933	352.98971	1.397928363	0.092703004	153.4035441	146.1201568	0.860002541	332%
-24.81433	332.3066354	1.316018167	0.087271165	148.8414448	142.1984173	0.88372085	378%
-23.96	315.7194255	1.250328628	0.082914992	145.0791567	138.9344094	0.904482242	429%
-23.124	300.354628	1.189480151	0.078879852	141.5049182	135.8093515	0.925294943	493%
-22.27067	286.945006	1.136374663	0.075358185	138.3100396	132.9965792	0.944864198	567%
-21.428	274.4150299	1.086752794	0.072067533	135.2565537	130.2916257	0.964803	649%
-20.588	262.8702494	1.041032549	0.069035615	132.3808267	127.7296207	0.983825877	723%
-19.71233	251.8800264	0.997508491	0.066149336	129.5839564	125.224686	1.003505859	759%
-18.86267	242.1298407	0.958895295	0.063588719	127.051129	122.9452762	1.022110893	734%
-17.97933	232.0488559	0.91997205	0.060941227	124.3781481	120.5287003	1.042604009	655%
-17.129	223.6238632	0.885606952	0.058728635	122.0993757	118.459765	1.0608134	570%
-16.25867	215.2320569	0.85237328	0.056524759	119.7864925	116.351799	1.080032344	488%
-15.39433	207.4158276	0.821419039	0.054472042	117.591334	114.3437694	1.09899157	420%
-14.52467	200.1976724	0.792833322	0.052576393	115.5271028	112.4490999	1.117516337	366%
-13.67267	195.6290512	0.774740429	0.05137657	114.2012992	111.2289835	1.129774832	336%
-12.811	190.6669189	0.755089133	0.050073403	112.7436381	109.8846599	1.143596442	306%
-11.96167	184.4457002	0.730451536	0.048439572	110.8890437	108.1699987	1.161724208	274%
-11.10367	177.6875753	0.703687655	0.046664737	108.8385885	106.2687886	1.182508127	243%
-10.239	170.5374036	0.67537117	0.044786942	106.6262643	104.2111814	1.205856267	215%
-9.357	162.9714235	0.645407979	0.042799946	104.234167	101.9791663	1.232248808	190%
-8.53333	155.6553331	0.616434414	0.040878577	101.8676701	99.76384268	1.259611727	169%
-7.65467	147.7425398	0.585097755	0.0388005	99.24466057	97.30024164	1.291504564	149%
-6.801	139.7548275	0.553464398	0.036702748	96.52454867	94.73663187	1.326453175	131%
-5.93367	131.9313432	0.522481425	0.034648126	93.7839159	92.14487487	1.363762296	116%
-5.047	123.9566765	0.490899732	0.0325538	90.90532677	89.41342767	1.405423206	103%
-4.174	116.2814728	0.460503987	0.030538119	88.0460004	86.6911973	1.44955555	91%
-3.307	108.8840205	0.431208209	0.028595382	85.19938204	83.9723924	1.49648834	81%
-2.429	101.9067029	0.40357627	0.026762983	82.42439079	81.31394945	1.54541388	72%
-1.56267	95.23835306	0.377167921	0.025011725	79.68201514	78.67921267	1.597165272	65%
-0.68833	89.00464783	0.352480875	0.023374614	77.03014468	76.12454644	1.650764596	58%
0.18	83.25090076	0.329694584	0.021863551	74.49872516	73.67982104	1.705537613	52%
1.06033	77.97231958	0.30879007	0.020477277	72.09822909	71.35622316	1.761075637	48%
1.93433	73.13341493	0.289626786	0.019206473	69.82521747	69.1514184	1.817225287	44%
2.82133	68.68337556	0.272003506	0.018037793	67.66750848	67.05444508	1.874054822	40%
3.69767	64.69163599	0.25619521	0.016989473	65.67172704	65.11147324	1.929977927	37%
4.58433	61.08367657	0.24190678	0.016041942	63.81414502	63.30022422	1.985201596	34%
5.45867	57.8016707	0.228909208	0.015180013	62.07612031	61.6031604	2.039890573	32%
6.34933	54.7962581	0.217007015	0.014390725	60.44074679	60.00427776	2.094245791	30%
7.22867	52.05238309	0.206140578	0.013670122	58.90805439	58.50402874	2.147949617	28%
8.11167	49.53709888	0.196179417	0.013009552	57.46714938	57.09211471	2.201069391	26%
8.98933	47.26286534	0.187172878	0.012412287	56.13250119	55.78304706	2.25272158	25%
9.87533	45.18921451	0.178960697	0.0118677	54.88728724	54.56062224	2.303194153	23%
10.75967	43.27440048	0.17137755	0.011364827	53.71182395	53.40573903	2.353000041	22%
11.65033	41.43458531	0.164091418	0.01088165	52.55764157	52.27090246	2.40408526	21%
12.53133	39.8031669	0.157630589	0.010453203	51.51256604	51.24262309	2.452327742	20%
13.423	38.24268724	0.151450696	0.010043386	50.49269732	50.23849863	2.501342786	19%
14.30667	36.82696046	0.14584406	0.009671585	49.54927545	49.30908327	2.54849001	18%
15.201	35.48298446	0.140521576	0.009318626	48.63673815	48.40959394	2.595843012	17%
16.08067	34.25118728	0.135643348	0.008995129	47.78506551	47.56966361	2.641677418	17%
16.97567	33.08191578	0.131012738	0.008688052	46.96233653	46.75788588	2.687540375	16%
17.857	32.01348142	0.126781468	0.008407457	46.19774989	46.00313717	2.731633403	15%
18.74767	31.00521654	0.122788485	0.008142664	45.46443045	45.27895131	2.775322805	15%
19.62767	30.07225671	0.119093728	0.007897648	44.77518413	44.59802433	2.817696704	14%
20.52	29.18692661	0.115587598	0.007665141	44.11116761	43.94178324	2.859777116	14%
21.442	28.34500641	0.112253381	0.007444034	43.47030128	43.30820186	2.901614492	13%
22.32333	27.58097373	0.109227619	0.007243381	42.88043356	42.72485164	2.941232124	13%
23.21567	26.86241429	0.106381942	0.007054672	42.31817126	42.16863667	2.980027719	13%
24.09433	26.17259509	0.103650084	0.00687351	41.77127808	41.6274729	3.018768553	12%
25.017	25.51849153	0.101059669	0.006701727	41.24600307	41.10756099	3.056948725	12%
25.89833	24.91779506	0.098680759	0.006543971	40.75765372	40.62407638	3.093330787	12%
26.79267	24.34508005	0.096412663	0.006393563	40.28654039	40.15754661	3.129267517	11%
27.67	23.81734574	0.094322702	0.006254968	39.8474974	39.72267949	3.163525416	11%
28.56	23.31965622	0.092351726	0.006124264	39.42897093	39.30804879	3.196895038	11%
29.44833	22.84353188	0.090466153	0.005999223	39.02437861	38.90714454	3.229836259	11%
30.32733	22.41687432	0.088776481	0.005887173	38.65822406	38.54426226	3.260244166	10%