

Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Geoengineering

Standardin EN 14770 soveltuvuus vaihekulman ja kompleksimoduulien mittaamiseen

27.6.2018

Eveliina Niittyniemi

Tekijä Eveliina Niittyneemi

Työn nimi Standardin EN 14770 soveltuvuus vaihekulman ja kompleksimoduulien mittaamiseen

Koulutusohjelma Geoengineering

Pääaine Geoengineering

Pääaineen koodi -

-

-

Päivämäärä 27.6.2018

Sivumäärä 76 s.

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tässä erikoistyössä tutustutaan EN 14770 standardiin. Erikoistyössä tutkittiin näytteen iän vaikutusta tuloksiin ja huomattiin, että näytteen ikä luo epävarmuutta tulosten verrattavuuteen. Suositeltavaa olisi vertailla saman ikäisiä näytteitä keskenään. Työssä vertailtiin eri standardeja ja teknistä määrystä keskenään ja huomattiin, että standardien välillä on suuriakin eroavaisuuksia. Lisäksi erikoistyössä tutustuttiin eri lämpötilojen ja taajuuksien sopivuuteen kullekin testigeometrialle.

-

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	1
2 Testauslaitteisto ja testin suorittaminen.....	2
2.1 Erilaiset bitumiladut	4
3 Standardit dynaamis-mekaanisen kokeen suorittamiseen	5
3.1 Työkalut laadukkaaseen mittaamiseen.	5
3.2 Standardit dynaamis-mekaanisen kokeen suorittamiseen	6
4 Näytteen valmistaminen ja tulokset standardin EN 14770 mukaisessa dynaamis-mekaanisessa kokeessa.....	12
4.1 Näytteen valmistaminen ja näytteen testaus.....	12
4.2 Kompleksimoduulin ja vaihekulman riippuvuus testaus taajuudesta ja lämpötilasta	18
5 Tulosten luotettavuus.....	22
5.1 Bitumi 160/220 RTFOT, 25mm	22
5.2 Bitumi 160/220 RTFOT, 8mm	24
5.3 Bitumi KB RTFOT PAV, 8mm.....	26
6 Näytteen iän vaikutus koetulokseen	29
6.1 Bitumi 160/220 RTFOT, 25mm	30
6.2 Bitumi 160/220 RTFOT, 8mm	46
6.3 Kumibitumi: KB_RTFO_T_PAV_A 8mm	58
7 Kommentteja liittyen kokeen suorittamiseen	72
Lähteet	75

1 Johdanto

Tässä raportissa tarkastellaan eurooppalaisen standardin EN 14770 (2012) soveltuvuutta bitumin kompleksimoduulin ja vaihekulman mittaamiseen. Tätä standardia vertaillaan AASHTO STANDARD T315-10 (2012) standardiin ja CEN/TS 15324 (2008) tekniseen määräykseen. Näissä kolmessa kompleksimoduuli ja vaihekulma mitataan dynaamis-mekaanisella kokeella, jossa testauslaitteena käytetään dynaamista leikkausreometriä. Reometrillä kompleksimoduuli ja vaihekulma mitataan eri lämpötiloilla ja taajuuksilla. Raportissa tarkastellaan lämpötilan ja taajuuden vaikutusta saatujen tulosten luotettavuuteen. Raportissa käsitellään dynaamisen leikkausreometrin toimintaperiaatetta ja dynaamis-mekaanisen kokeen suorittamista. Lisäksi käsitellään kokeen toistettavuuteen ja uusittavuuteen liittyvää teoriaa.

Tämä tutkimusraportti keskittyy EN 14770 -standardilla suoritettavaan dynaamis-mekaaniseen kokeeseen. Dynaamis-mekaaninen koe suoritetaan kahdelle eri bitumityypille, joista toinen on tiebitumia ja toinen kumibitumia. Kokeessa käytetään kahden kokoista mittapäätä. Tutkimusraportissa esitellään saadut tulokset kuvaajina. Tutkimusraportissa tarkastellaan eri testigeometrioiden luotettavuutta.

Raportissa tarkastellaan näytteen iän vaikutusta kokeen tuloksiin. Tarkoituksena on selvittää vaikuttaako näytteen ikä kokeen toistettavuuteen. Vertailu tapahtuu piirtämällä saman bitumilaadun eri-ikäiset näytteet samaan kuvaajaan ja vertailemalla kompleksimoduulien ja vaihekulmien arvoja eri päivien näytteillä. Raportissa esitellään eri mittageometrioiden kannalta parhaat taajuudet sekä lämpötilat.

2 Testauslaitteisto ja testin suorittaminen

Dynaamisen leikkausreometrin (DSR) avulla on mahdollista tarkkailla bitumin viskoosista ja elastista käyttäytymistä eri lämpötiloissa (Pavement interactive). Näitä bitumin ominaisuuksia tutkitaan viskoelastisella alueella (Simonen 2011, s.38). Reometrillä voidaan mitata bitumin kompleksimoduulia sekä vaihekulmaa (Lehtimäki 2012, s.17). Kompleksimoduuli määritetään jännityksen huippuarvon ja venymän huippuarvon välisenä suhteena, kun värähtely on sinimuotoista (EN 14770 2012, s.4). Kompleksimoduuli jakautuu kahteen osaan, varastomoduuliin G' ja häviömoduuliin G'' . (Lehtimäki 2012, s.17.) Kompleksimoduuli G^* kuvaa bitumin jäykkyyttä ja vaihekulma bitumin elastisuutta (Aromaa 2016, 29). Mitä suurempi bitumin kompleksimoduuli on, sitä jäykempää bitumi on. G' kuvaa bitumin elastista käyttäytymistä ja G'' bitumin viskoosista käyttäytymistä. (Rossi 2015.) Vaihekulma on jännityksen ja venymän välinen vaihe-ero harmonisessa värähtelyssä (EN 14770 2012, s.4).

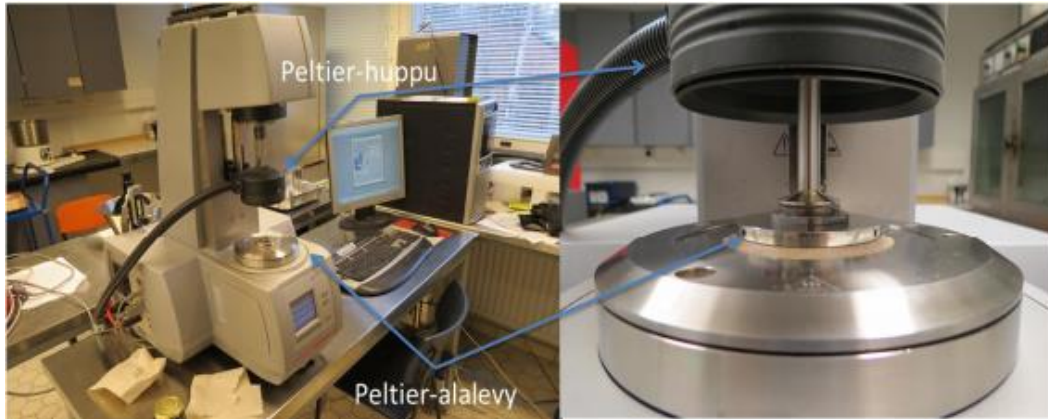
Kompleksimoduulin ja vaihekulman keskinäisen suhteen avulla voidaan arvioida sideaineen viskoosista ja elastista käyttäytymistä (Iwanski 2012). Paras päällysteen kuormituskäyttävyys savutetaan sideaineen kompleksimoduulin arvon ollessa suuri korkeissa lämpötiloissa. Tällöin liikenne aiheuttaa vähemmän pysyviä muodonmuutoksia päällysteeseen. (Rossi 2015, s.127.) Dynaamis-mekaanisella kokeella voidaan tutkia bitumin soveltuvuutta eri lämpötiloihin ja kuormitukseen (taajuus). Tällä tavoin voidaan tarkastella sen sopivuutta tierakenteeseen. Bitumin kompleksimoduulin ja vaihekulman selvittäminen on tärkeää, koska niiden arvot vaikuttavat päällysteen vaurioitumistyyppisiin, kuten deformaatiourautumiseen ja pakkaushalkeiluun (Aromaa 2016, s.29.) Dynaamis-mekaanisella kokeella voidaan etsiä bitumityyppejä, jotka kestävät paremmin liikenteen kuormitusta.

Dynaamisia leikkausreometrejä on kahdenlaisia: jännitysohjatut reometrit ja muodonmuutosohjatut reometrit (Laukkanen 2013). Toimintaperiaatteena reometrissa on asettaa valmistettu bituminäyte kahden levyn väliin, trimmata se sopivaksi kuumennetulla trimmauslaitteella ja lämmittää näyte testauslämpötilaan. Ennen näytteen asettamista reometriin myös laitteisto lämmitetään. (Pavement interactive.) Näytteen asettamisen jälkeen aloitetaan testaus, jossa pientä (noin 0,05-0,5g) asfalttinäytettä leikataan vaakasuunnassa (Laukkanen 2013). Testattava bituminäyte voidaan siirtää testilaitteeseen esimerkiksi suoraa kaatamalla, aiemmin valettuna muottina tai ampullin avulla (EN 14770 2012).

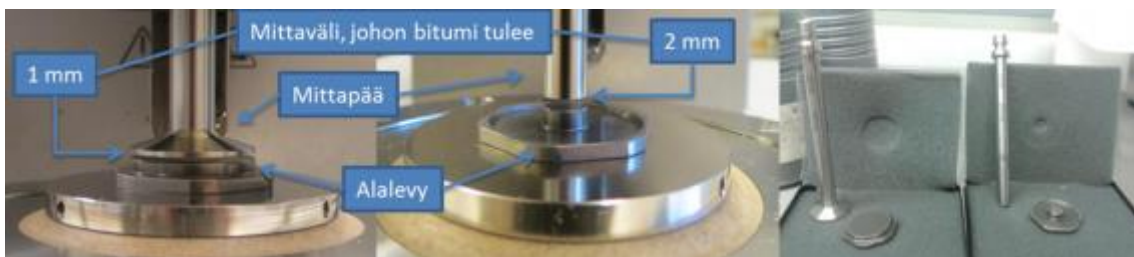
Levyistä alempi levy pysyy paikallaan ja ylempää levyä liikutetaan niin, että aikaansaadetaan oskilloiva, sinimuotoinen muodonmuutos leikkaussuunnassa. Tälle sinimuotoiselle muodonmuutokselle määritetään amplitudi sekä taajuus. (Aromaa 2016, s.18.) Testauslämpötila, valmistetun näytteen koko ja testausalustan koko vaihtelevat testattavasta bitumista riippuen (Pavement interactive). Mittaus lämpötilat ja taajuudet voidaan valita hyvin laajoilta lämpötila- ja taajuusalueilta (Lehtimäki 2012, s.17). Dynaamis-mekaaninen koe on pyyhkäisytesti, joka tarkoittaa sitä, että jokaisella lämpötilalla näytettä kuormitetaan valitun taajuusalueen taajuuksilla (Hintz & Bahia 2013, s.1).

Tässä raportissa kuvattu dynaamis-mekaaninen koe tehdään Anton Paar MCR 302 –mallisella dynaamisella leikkausreometrillä. Kyseinen reometri on jännitysohjattu, mutta se toimii myös muodonmuutosohjatusti. Reometrissä on Peltier-alalevy sekä huppu. (Laukkanen 2013.) Kyseisten alalevyn ja hupun avulla mittauslämpötilojen tarkka kontrollointi

on mahdollista (Aromaa 2016, s.46). Alla olevissa kuvissa 2.1 ja 2.2 näytetään reometrin osat. Kuvat ovat otettu Aromaan (2016) diplomityöstä. Kuvassa 2.3 näytteet ovat asetettu testauslaitteistoon. Kuvasta voi nähdä 8mm ja 25mm testigeometriat. On olemassa erilaisia testigeometrioita. Testigeometriavaihtoehdot ovat esitettyinä kuvassa 2.4. Tässä koeksessa käytettiin testigeometriaa A. (Laukkanen 2013.)



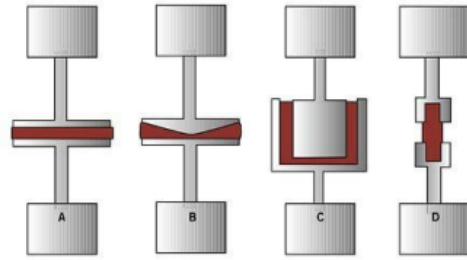
Kuva 2.1. Anton Paar MCR 302 –reometri



Kuva 2.2. Reometrin mittausgeometria ja tarvittavat osat



Kuva 2.3. Näytteet asetettuina testauslaitteistoon 8mm ja 25mm testigeometrioihin



- A: levy-levy-geometria (parallel plate / plate-plate)
- B: kartio-levy-geometria (cone and plate)
- C: sylinterigeometria (concentric cylinders)
- D: vääntösauvageometria (torsion bar)

Kuva 2.4. DSR:n mahdolliset testigeometriat

2.1 Erilaiset bitumiladut

Sideaineella tarkoitetaan sellaista materiaalia, joka sitoo kiviaineksen yhteen ja varmistaa asfalttimassan koheesion (EN 12597 2014, s.6). Bitumi on raakaöljystä valmistettava sideaine, joka on käyttölämpötilassa hyvin viskoosia ainetta. Bitumeja käsitellään normaalisti kuumennettuna. Bitumituotteet voidaan jakaa ryhmiin valmistustavan mukaan. Tällaisia ryhmiä ovat tiebitumit, puhalletut bitumit, polymeerimodifioidut bitumit, kumibitumi, bitumiemulsiot ja fluksi. (Pank 2011.)

Tiebitumien ominaisuuksia kuvataan tunkeumaluokalla, joka kertoo bitumin kovuuden ja, jonka avulla on mahdollista arvioida myös muita bitumin fysikaalisia ominaisuuksia. (Pank 2011) Tiebitumia käytetään peittämään kiviainetta ja asfalttirouhetta. Sitä käytetään päällystettyjen teiden rakentamisessa ja kunnossapidossa. (EN 12597 2014.)

Modifioidulla bitumilla tarkoitetaan bitumista sideainetta, jonka reologisia ominaisuuksia on muutettu tuotannon aikana yhdellä tai useammalla kemiallisella aineella (EN 12597 2014). Polymeerimodifioidut bitumilla tarkoitetaan bitumia, johon on lisätty polymeerejä. Tällä polymeerien lisäämisellä pyritään parantamaan bitumin ominaisuuksia. Parannettavia ominaisuuksia voivat olla lujuus, venymä, joustavuus ja palautettavuus, kylmäominaisuudet, korkeiden lämpötilojen ominaisuudet, väsymiskestävyys, tarttuvuus ja säänkestävyys. Polymeerin tulee liuota bitumiin, jolloin bitumi ja polymeeri toimivat yhdessä sideaineena. Kumibitumi tarkoittaa polymeerimodifioitua bitumia, jossa polymeerinä käytetään kumia. Kumi antaa bitumille kumimaisia ominaisuuksia. (Pank 2011.)

3 Standardit dynaamis-mekaanisen kokeen suorittamiseen

Tässä luvussa käsitellään laadukkaan mittaamisen teoriaa sekä vertaillaan dynaamisella leikkausreometrillä suoritettavan kokeen standardeja. Laadukkaan mittaamisen työkaluja käsitellään tässä luvussa, koska standardien avulla pyritään luotettaviin koetuloksiin.

3.1 Työkalut laadukkaaseen mittaamiseen.

Kokeen onnistumista tarkastellaan keskiarvon, keskihajonnan sekä variaatiokertoimen avulla. Tässä alaluvussa käsitellään mm. näihin käsitteisiin liittyvää teoriaa.

Keskiarvo on tavallisin keskiluku, joka kuvaa muuttujan jakauman keskikohtaa mitatulla ulottuvuudella (Tilastokeskus a). Keskiarvo määritetään kaavalla $\bar{x} = \sum x/n$, jossa x on muuttujien arvo ja n on muuttujien määrä.

Keskihajonta on hajontaluku, jonka avulla voidaan selvittää havaintoarvojen sijoittuminen muuttujan jakauman keskikohdan ympärille (Tilastokeskus b). Keskihajonta määri-

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

tetään kaavalla: , jossa \bar{x} =keskiarvo, x =muuttuja ja n =muuttujien määrä. (Opetushallitus.)

Variaatiokerroin on tilastollinen hajontaluku, joka määritellään keskiarvon ja hajonnan suhteutuksena (Tilastokeskus b). Variaatiokertoimen kaava on $V = s / \bar{x}$, jossa s =keskihajonta ja \bar{x} =keskiarvo. Hajontaluvut kuvaavat sitä, kuinka muuttujan arvot vaihtelevat käytety keskiluvun ympärillä. (KvantiMOTV 2017.)

Mittausten kannalta tärkeitä käsitteitä ovat selektiivisyys sekä spesifisyys. Selektiivisyys määrittää sitä, miten hyvin mittausmenetelmällä voidaan määrittää haluttu muuttuja tai aine ilman, että muut komponentit häiritsevät määrittämistä. Spesifinen tutkimusmenetelmä on täysin selektiivinen analysoitavalle komponentille. (Hiltunen jne. 2011.)

Jotta kokeesta saadut tulokset ovat vertailukelpoisia, tulee kokeen olla hyvin uusittava. Kokeen uusittavuus tarkoittaa, että eri mittapaikoilla ja eri laitteilla saadut tulokset ovat samankaltaisia. Tällainen täsmällisyys kokeen suorittamiseen saavutetaan sillä, että kokeet tehdään samasta näytteestä ja samalla menetelmällä. Koe tulee suorittaa samalla tavoin jokaisella testauskerralla ja jokaisessa testausyksilössä. Kokeen toistettavuus tarkoittaa sitä, että mittauksen täsmällisyyttä niin, että vaaditut toistettavuusehdot täyttyvät. Toistettavuus voidaan saavuttaa silloin, kun testaukset tehdään ajallisesti mahdollisimman lähekkäin ja testissä on mm. samat laitteet, reagenssit ja lämpötilat. Kokeen toistettavuus voidaan määrittää tekemällä rinnakkaismäärittäyksiä vaihtelevilla näytteillä. Jos sarjojen välinen hajonta on suurempaa verrattuna sarjojen sisäiseen hajontaan, sarjojen välillä esiintyy todellista vaihtelua (Hiltunen ym. 2011.) Toistettavuus tarkoittaa sitä, että kokeessa tulee olla sellaiset olosuhteet, joissa sama käyttäjä saa riippumattomia koetuloksia käyttäen samaa menetelmää, samaa laboratoriota, samoja laitteita ja samoja testauskohteita peräkkäisillä mittauksilla. (EN 12697-1, 2013).

Lineaarisuus ja mittausalue ovat tärkeitä käsitteitä tässä raporissa käsitellyn kokeen kannalta. Lineaarisuudella tarkoitetaan sitä, että analyttinen menetelmä antaa määritellyllä testialueella hyväksyttävän lineaarisen korrelaation tulosten ja tutkittavan ominaisuuden välille. Mittausalue tarkoittaa puolestaan sellaista joukkoa arvoja, jotka voidaan mitata samalla mittauslaitteella tai -järjestelyllä. Arvoille on määritetty epävarmuus. (Hiltunen jne 2011.)

3.2 Standardit dynaamis-mekaanisen kokeen suorittamiseen

Dynaamis-mekaanisen kokeen suorittamiseen on olemassa toisistaan työvaiheiltaan poikkeavia standardeja ja teknillisiä määräyksiä. Tässä luvussa vertaillaan Standardin EN 14770, AASHTO STANDARD T315-10:in ja teknisen määräyksen CEN/TS 15324 työvaiheita toisiinsa. Standardien ja teknisen määräyksen alkuperäiset, englanninkieliset nimet ovat:

- EN 14770, Bitumen and bituminous binders. Determination of complex shear modulus and phase angle. Dynamic shear rheometer (DSR).

-AASHTO STANDARD T315-10, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)

- CEN/TS 15324, Bitumen and bituminous binders. Determination of equiviscous temperature based on Low Shear Viscosity using a Dynamic Shear Rheometer in low frequency oscillation mode.

Standardien eroavaisuuksien tunteminen on tärkeää, koska eri standardit saattavat tuottaa erilaisia tuloksia, jolloin kokeet eivät ole vertailukelpoisia eivätkä uusittavia. Jos halutaan saada vertailukelpoisia tuloksia, tulee koe suorittaa samalla jokaisella testauskerralla ja jokaisessa testausyksilössä. Standardoimalla koetta voidaan vähentää mittauksesta johtuvaa virhettä. (Hiltunen ym. 2011, s.20.) Standardoimalla työvaiheet kokeen toistettavuus ja uusittavuus paranevat.

Alla olevassa taulukossa 2.1 kerrotaan edellä esiteltyjen standardien työvaiheet. Taulukosta voidaan nähdä, että dynaamis-mekaanisen kokeen suorittamisessa on eroavaisuuksia standardeittain esimerkiksi lämmitys ja säilytysajoissa sekä suosituksissa näytteen siirtämiseksi reometriin. Standardeissa korostetaan eri työvaiheita. Standardissa EN 14770 näytteen lämmittämiseen tarvittava aika on määritelty AASHTO standardia selkeämmin. AASHTO –standardissa annetaan maksimilämpötila, kun standardissa EN 14770 määritellään tarkka lämpötila. CEN/TS 15324 standardissa näytteen lämmittämisen lämpötilaa ei määritetä.

Suuri ero standardeissa on näytteen säilyttämiseen liittyvissä ajoissa. Standardissa EN 14770 säilytysaika on 2h-3vrk kuin AASHTO -standardissa tämä aika on max 2h. CEN/TS 15324 mukaan näytettä tulee säilyttää minimissään 24h. EN 14770 ja CEN/TS 15324 testaaminen on joustavampaa, koska näytteitä voidaan tehdä kerralla useampia. Toisaalta on tärkeää selvittää, millaisia vaikutuksia näytteen vanhenemisella on kokeen tuloksiin.

Standardista EN 14770 epäselväksi jää, mitä testausalustalla tarkoitetaan. Standardit eivät myöskään ota kantaa siihen, miten trimmaustyökalua tulisi käyttää ja lämmittää. Muihin-kaan siirtämiseen liittyviin apuvälineisiin ei tarkemmin standardeissa oteta kantaa.

Taulukko 2.1. Eri standardien työvaiheet

Työvaihe	EN 14770	AASHTO STANDARD T315-10	CEN/TS 15324
Näytteiden lämmittäminen	<p>-Näyte asetetaan asettaa uuniin</p> <p>-Uunin lämpötila on 85 ± 5 celsiusastetta sideaineen pehmenemispisteen yläpuolella tai maksimissaan 180 celsiusastetta.</p> <p>-Polymeeri-muunnelluille bitumeille lämpötila määritetään EN 12594 mukaisesti.</p> <p>-Näytteiden lämmitys korkeintaan kahdesti</p> <p>-Uudelleen kuumennus ajat eri näytekoolle ovat:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 50-100g näytteelle max.30min • 100-500g näytteelle max. 1h • 500g-1kg näytteelle max. 2h. <p>-Liutinta sisältävä bitumi ja emulsiobitumi tulevat lämmittää maksimissaan 100 celsiusasteen lämpötilaan.</p>	<p>-Bitumia lämmitetään lämpötilaan, jossa se on sopivan juoksevaa käsittelyä ja kaatamista varten.</p> <p>-Normaalisti lämpötila ei saa kohota suuremaksi kuin 163 celsiusastetta.</p> <p>-Tiettyjä muunneltuja tai ikääntyneitä bitumeita voidaan lämmitää tätä suurempaan lämpötilaan.</p> <p>-Lämmittämisen aikana näyte tulee peittää ja sitä tulee sekoittaa homogeenisuuden ja ilmakuplien poistamiseksi.</p>	-
Näytteen jakaminen	<p>-Näyte tulee sekoittaa lastalla homogeenisuuden varmentamiseksi.</p> <p>-Varmistetaan tarvittava määrä näytteitä + 50%.</p> <p>- Kaadetaan näyte muottiin.</p>	-	-

	<p>-Halkaisijat muoteille esimerkiksi 25mm ja 8mm.</p> <p>-Muotissa oleva näyte tulee tasoittaa trimmaustyökalulla viilentämisen jälkeen oikeaan korkeuteen</p>		
Näytteen varastoiminen	<p>-Näyte varastoidaan huoneen lämpötilassa ennen uudelleen muokkausta tai testin suorittamista.</p> <p>-Minimi säilytysaika puhtaalle bitumille on 2h ja polymerisoidulle bitumille 12h sekä maksimaalinen aika 3 vuorokautta.</p>	<p>-Käytettäessä muottia, näytettä kaadetaan muottiin ja sen annetaan jäätyä huoneen lämpötilaan.</p> <p>-Maksimiaika säilytykselle on 2h.</p>	<p>-Peitettyjä näytettä varastoidaan huoneen lämpötilassa ennen testin aloittamista.</p> <p>-Testi tulee suorittaa seitsemässä vuorokaudessa. Minimiaikana näytteen kaatamiselle on 24 tuntia.</p>
Näytteen asettamisen reometriin: valu	-	<p>Menetelmää voidaan hyödyntää reometrisissä, josta toinen levy voidaan poistaa vaikuttamatta nolla asetukseen.</p> <p>-Näyte kaadetaan levylle asettamalla bitumia sisältävä astia 15mm levyn yläpuolelle.</p> <p>-Bitumia kaadetaan jatkuvana vanana alemmalle levylle, kunnes se peittää levyn lukuun ottamatta 2mm kaistaletta levyn reunalta.</p> <p>-Odotetaan näytteen jäykkenemistä.</p> <p>-Näyte voidaan siirtää ja asettaa reometriin.</p>	-

<p>Näytteen asettamisen: kaato suoraan geometriaan</p>		<p>-Bitumi asetetaan toiselle levyllä metallisella tai lasisella sauvalla (4-5mm), lastalla tai, jollain muulla työkalulla. -Näyte trimmataan välittömästi. Lasista sauvaa käytetään erityisesti testattaessa 8mm alustalla.</p>	<p>-Sopiva määrä bitumia mitataan ja siirretään keskelle mittausgeometriaa.</p>
<p>Näytteen asettamisen reometriin: Ampulli</p>	<p>-Ei sovellu polymerisoiduille bitumeille. -Sideaine lämmitetään 85±5 celsiusastetta pehmenemispistettä korkeampaan lämpötilaan. -Homogeenisuus varmistetaan sekoittamalla bitumia, jonka jälkeen sitä kaadetaan sopiva määrä. -Näytteen tulee antaa stabiloitua minimissään 2h.</p>		<p>-Ampulli on 10ml kokoinen. -Bitumia kaadetaan ampullista sopiva määrä testigeometriaan.</p>
<p>Näytteen asettamisen reometriin: muotti tai alusta</p>	<p>-Näytettä lämmitetään aiemmin mainitun maksimimäärän ajan, jonka jälkeen se jaetaan muotteihin ja säilytetään 2h-3 vuorokautta. -Ennen kokeen aloittamista näyte voidaan asettaa jääkaappiin, jonka lämpötila on noin 5 celsiusastetta. -Maksimiaika näytteen kylmentämiseksi on 30 minuuttia. -Asettaminen reometriin tulee tehdä niin pian kuin mahdollista kylmentämisen jälkeen.</p>	<p>-Suoraan siirtäminen tai valu ovat suositeltavia vaihtoehtoja. -Muottia ei saa kylmentää, koska tämä saattaa vaikuttaa moduulin tai vaihekulmaan. Lisäksi pinnan kosteus saattaa aiheuttaa ongelmia. -Muottiin tehty näyte tulee asettaa alemmalle tai ylemmälle alustalle. Asettaessa alemmalle tasolle, näyte poistetaan muotista ja asetetaan keskelle levyä.</p>	<p>-Näytteen valmistaminen muottiin on tämän standardin mukaan suositeltavaa. -Näyte kaadetaan muottiin. Useita muotteja kannattaa valaata tässä vaiheessa, jotta näytteen liialta lämmittämiseltä vältytään. -Näytteen voin tarvittaessa asettaa jääkaappiin irrottamisen helpottamiseksi. Suositeltava aika on 10min, eikä aika saa ylittää 30min.</p>

		<p>-Näyte keskitetään ylemmälle alustalle sen vielä ollessa muotissa ja painetaan ylemmälle levyille. Tämän jälkeen muotti poistetaan varovasti.</p> <p>-Tiettyjä materiaaleja ei ole mahdollista poistaa muotista kylmentämättä. Näiden asettamiseen tulee käyttää muita menetelmiä tai kylmentää jääkaapissa maksimissaan 10 minuuttia.</p>	<p>- Näyte asetetaan puhdistetulle testialustalle.</p>
Reometrin lämmittämien	<p>-Reometrin levyt tulee lämmittää 20±5 celsiusastetta pehmenemispistettä suuremaan lämpötilaan tai 90±5 celsiusasteeseen.</p> <p>- Lämmityksen tulee kestää minimissään 30 minuuttia.</p>	<p>-25 mm levy tulee esilämmittää alimpaan testilämpötilaan ja 8 mm levy tulee lämmitellä 34-46 celsiusasteeseen..</p>	<p>-Molempien reometrien levyjen tulee olla samassa lämpötilassa.</p>
Raon asettaminen ja näytteen siirto	<p>-Asetetaan rako haluttuun korkeuteen 0,5mm-2,0mm+0,025-0,050mm.</p> <p>-Lämmitetään 5min, jonka jälkeen ylimääräinen bitumi trimmataan pois.</p> <p>-Väli muutetaan ±0,01 mm halutusta raon korkeudesta.</p> <p>-Raot: 1mm/25mm ja 2mm/25mm.</p>	<p>-Näyte tulee kaataa alustalle, siirtää suoraan tai käyttää silikonista muottia.</p> <p>-Muotin annetaan viilentyä huoneen lämpöön.</p> <p>-Asettamisen jälkeen näyte trimmataan niin, että rako on mittausraako suurempi.</p> <p>-Raot asetetaan 1,05mm/25mm ja 2,1mm/8mm korkeudelle.</p> <p>-Trimmauksen jälkeen väli pienennetään.</p>	<p>-Ensin näyte asetetaan reometriin.</p> <p>-Reometri asetetaan valittuun testauskorkeuteen +0,05mm.</p> <p>-Näyte trimmataan.</p> <p>-Väli muutetaan suunniteltuun testausväliin ±0,01mm.</p>

		Suosittelut testausarvot ovat 1mm/25mm ja 2mm/8mm	
Testaus	<p>-Mittaus aloitetaan alimasta lämpötilasta.</p> <p>-Testilämpötilaa kasvatettaessa muutosnopeus tulisi olla korkeintaan 5 celsiusastetta minuutissa.</p> <p>-Testaus jatkuu, kunnes G* arvo ylittää arvon joka on tarkoituksenmukainen valitulle testigeometrialle.</p> <p>-Vaihdetaan testigeometria seuraaville lämpötiloille. Uusi testi tulee aloittaa 6 tunnin kuluessa. Osittain lämpötiloja tulee testata päällekkäin, eikä G* ero eri geometrioiden välillä saa olla enempää kuin 15% tai leikkausmoduuli enempää kuin 3°.</p>	-	<p>-Lämpötilan pyyhkäisy: Testaus aloitetaan pienimmästä lämpötilasta ja lopetetaan korkeimpaan.</p> <p>-Testaussyklejä tulee tehdä ainakin kaksi.</p> <p>-Jokaisen lämpötilamuutoksen kohdalla tulee varmistaa, että terminen tasapaino saavutetaan.</p> <p>-On suositeltavaa tehdä 1 celsiusasteen kasvulla testiä.</p> <p>-Lämpötilapyyhkäisy on suositeltavaa tehdä taajuudella 0,01Hz ja venymän suuruus 0,1.</p>

4 Näytteen valmistaminen ja tulokset standardin EN 14770 mukaisessa dynaamis-mekaanisessa kokeessa

Tässä luvussa kuvataan dynaamis-mekaaniseen kokeeseen liittyvät tiedot. Lisäksi käsitellään taajuuden ja lämpötilan vaikutusta kompleksimoduuliin G^* sekä vaihekulmaan δ . Dynaamis-mekaaninen koe suoritettiin Aalto-yliopiston laboratoriossa ja tuloksia vaihdettiin kolmen eri laboratorion kesken. Bitumityypeille tehtiin näin rinnakkaisia kokeita talvella 2017/2018. Saadut tulokset ovat peräisin Aalto-yliopiston laboratoriossa suoritetuista kokeista.

Kokeeseen käytetty EN 14770 –standardi on eurooppalainen standardi, jossa kuvataan Dynaamisen leikkausreometrin käyttöön liittyviä bitumin reologisten ominaisuuksien mittaamiseen liittyviä työvaiheita. Standardia voidaan hyödyntää tuoreisiin, ikääntyneisiin ja elvytettyihin bituminäytteisiin. Standardia voidaan hyödyntää lisäksi ohennettuihin ja emulsiota sisältäviin bitumeihin. (EN 14770 2012, s.4.)

4.1 Näytteen valmistaminen ja näytteen testaus

Tässä kappaleessa kuvaillaan Aalto-yliopiston tulkitsema tapa suorittaa dynaamis-mekaaninen koe standardin EN 14770 avulla. Dynaamis-mekaaninen koe suoritetaan kahdella eri bitumi tyypillä: bitumi 160/220 RTFOT ja kumibitumilla RTFOT PAV A. Kokeen suoritus aika on 6 tuntia, jonka takia yhtenä päivänä voidaan tehdä kaksi koetta.

Bitumin 160/220 RTFOT testaamiseen käytetään 8 mm ja 25 mm testausgeometrioita ja kumibitumin testaamiseen 8 mm testigeometriaa. Koe suoritetaan lämpötilavälillä 10-100 °C mittaussvälin ollessa 10°C. Kokeessa käytettävät pyyhkäisytaajuudet ovat esitelty taulukossa 4.1. Näyte lämmitetään aluksi trimmauslämpötilaan, joka voi olla esimerkiksi 50-60 °C (Aromaa 2016, s.47). Tässä kokeessa käytettyjen bitumien trimmauslämpötilat ovat suuremmat 65-95 °C. Trimmauksen jälkeen näytteen lämpötilaa lasketaan 5 °C minuutissa siihen asti, kun lämpötila on 10 °C. Tämän jälkeen näyte taajuuspyyhkäistään taulukossa 4.1 esitetyillä taajuuksilla. Ensimmäisen taajuuspyyhkäisyn jälkeen lämpötilaa nostetaan 10 °C. Sama toistuu jokaisen lämpötilan noston jälkeen 100 °C asti.

Taulukko 4.1 Dynaamis-mekaanisessa kokeessa käytetyt taajuudet

Dynaamis-mekaanisessa kokeessa käytettävät taajuudet	
0,01592 Hz	0,3429 Hz
0,07387 Hz	0,1592 Hz,
0,3429 Hz	0,7387 Hz
1,592 Hz	3,429 Hz
7,387 Hz	15,92 Hz

Tässä osiossa kuvaillaan bitumin 160_220_RTFOT valmistaminen muotilla. Bitumin 160_220_RTFOT pehmenemispiste on 47,4 °C ja käytettävä näytemäärä 0,53kg. Näytettä lämmitetään 130°C:ssa kahden tunnin ajan. Tämän jälkeen näyte jaetaan kuuteen 75g erään. Muottien jakovaiheessa yksi 75g erä kuumennetaan uudelleen 30 minuutin ajan 130°C:ssa. Näyte jaetaan 25mm ja 8mm testigeometrioiden muotteihin, jonka jälkeen niitä säilytetään huoneenlämmössä. Ennen kokeen aloittamista muotti asetetaan jääkaappiin, jonka jälkeen bituminäyte irrotetaan muotista. Reometriä esilämmitetään 30 minuutin ajan, jonka jälkeen näyte asetetaan reometriin. Näytettä lämmitetään 5 minuutin ajan testilaitteen ollessa trimmauskorkeudessa. Trimmauslämpötila on tälle bitumityypille 65°C ja trimmaamiseen käytetään trimmaustyökalua. Näytteitä valmistetaan kahdessa erässä molemmille testigeometrioille. Ensimmäisen erän näytteitä valmistetaan kolme kappaletta kummallekin testigeometrialle ja toisesta erästä valmistetaan kaksi näyte kappaletta kummallekin testigeometrialle.

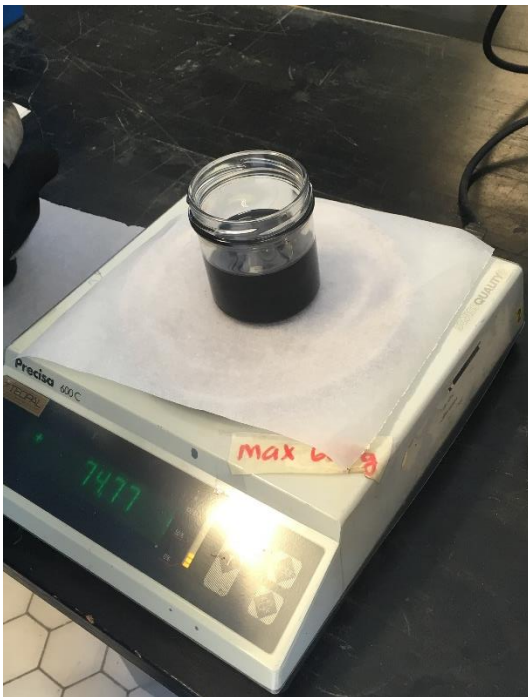
Tässä kappaleessa kuvaillaan kumibitumin jakaminen muotteihin. Kumibitumin RTFOT PAV A bitumin pehmenemispiste on 82,4°C ja näytemäärä on pienempi kuin 300g. Näytettä lämmitetään 180°C:ssa 2 tunnin ajan, jonka jälkeen näyte jaetaan neljään 60g erään. Muottienvalu vaiheessa 60g erää lämmitetään uudelleen 180°C 30 minuutin ajan. Tämän jälkeen näytteitä säilytetään huoneenlämmössä. Minimiaika säilyttämiselle on 12 tuntia ja maksimi aika 3 vuorokautta. Tätä bitumityyppiä ei laiteta jääkaappiin ennen koetta, koska näytteen irrottaminen muotista onnistuu ilman viilentämistä. Mittapäitä esilämmitetään 30 minuuttia ja näytettä lämmitetään trimmausasennossa 5 minuutin ajan. Trimmaus suoritetaan trimmaustyökalulla. Ensimmäinen näyte trimmataan 90°C. 95°C osoitetaan paremmaksi trimmauslämpötilaksi, jonka takia loput neljä näytettä trimmataan tässä lämpötilassa.

Bitumilaadun näytteitä jaetaan muotteihin kaksi kertaa, kahdella eri viikolla. Ensimmäisellä viikolla tehdään testinäytteet valmiiksi kolmelle saman bitumin testauskerralle ja toisella viikolla kahdelle testauskerralle. Näytteitä tulee siis yhteensä viisi jokaiselle bitumilaadulle. Näytteiden testit aloitetaan jaosta seuraavana päivänä. Jokaisen bitumin kohdalla toistuu näin sama järjestys. Päivä 0 tapahtuu näytteen lämmittäminen, jakaminen ja kolmen ensimmäisen päivän näytteiden muottiin valmistaminen. Päivinä 1, 2 ja 3 tapahtuu näytteen kokeet. Seuraavalla viikolla on uudelleen päivä 0, jolloin valmistetaan muotit kahdelle seuraavalle päivälle. Päivä 4 ja päivä 5 ovat päivät jolloin seuraavan viikon näytteet testataan.

Alla olevissa kuvissa on esitettynä dynaamis-mekaanisen kokeen suoritusvaiheet.



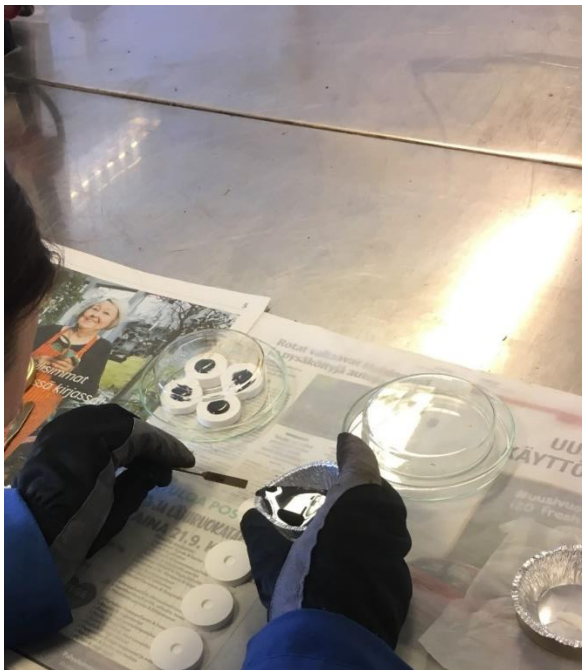
Kuva 3.1. Näyte lämmitetään standardissa määriteltyyn lämpötilaan, sitä hämmennetään ja sen juoksevuus tarkastetaan



Kuva 3.2. Näyte jaetaan vaakaa apuna käyttäen pienimpiin, noin 75 gramman annoksiin, jonka jälkeen jaetut näytteet asetetaan jääkaappiin



Kuva 3.3 Näyte kuumennetaan uunissa uudelleen ja jaetaan 8mm ja 25mm testigeometrioidelle sopiviin muotteihin



Kuva 3.4 Näytteen jakaminen muotteihin



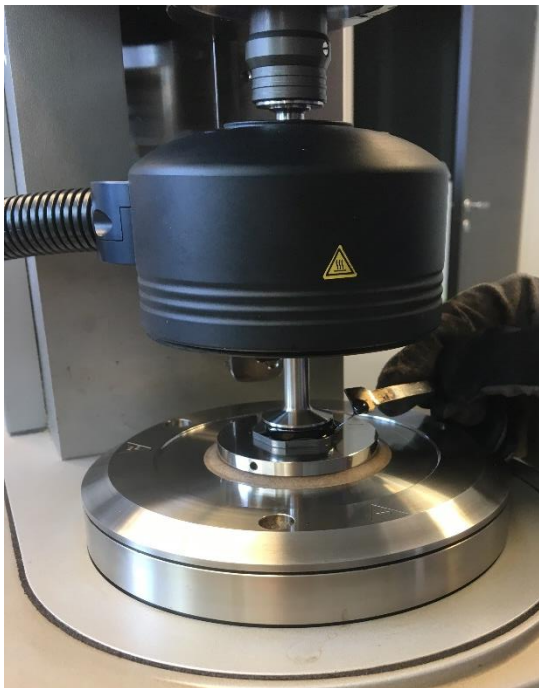
Kuva 3.5 Bitumi kaadettuna 8mm ja 25mm testigeometrioille sopiviin muotteihin



Kuva 3.6. Jääkaapissa viilennetyn näytteen muotista irrottaminen paperille



Kuva 3.7 Näytteen siirtäminen reometriin



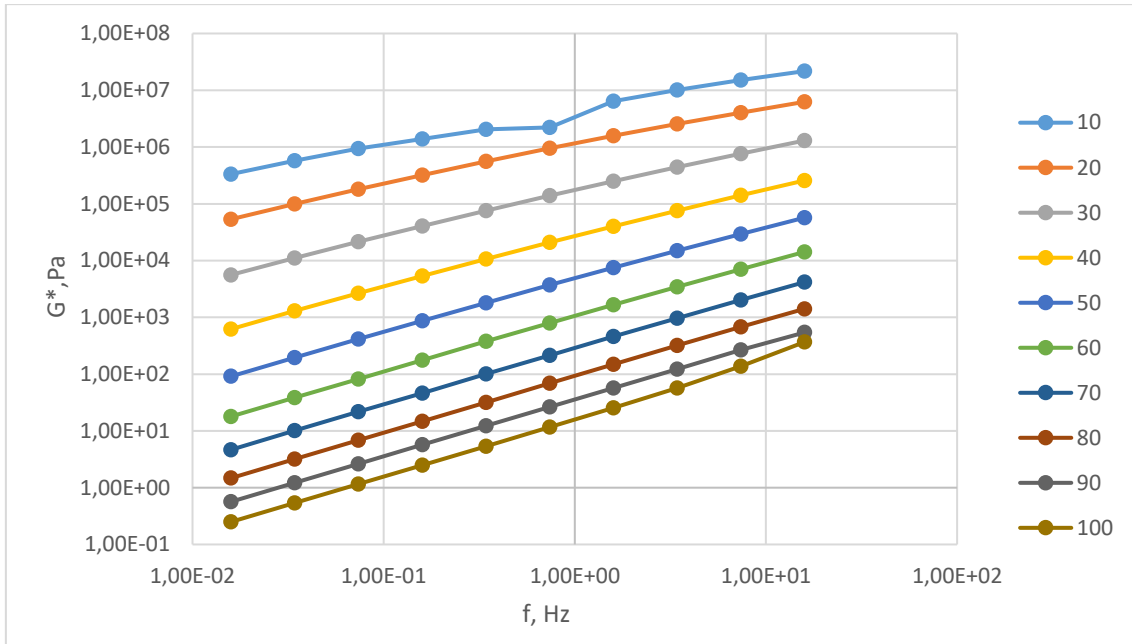
Kuva 3.8 Näytteen trimmaaminen trimmauskorkeudessa trimmaustyökalulla, joka on lämmitetty kuumalla levyllä



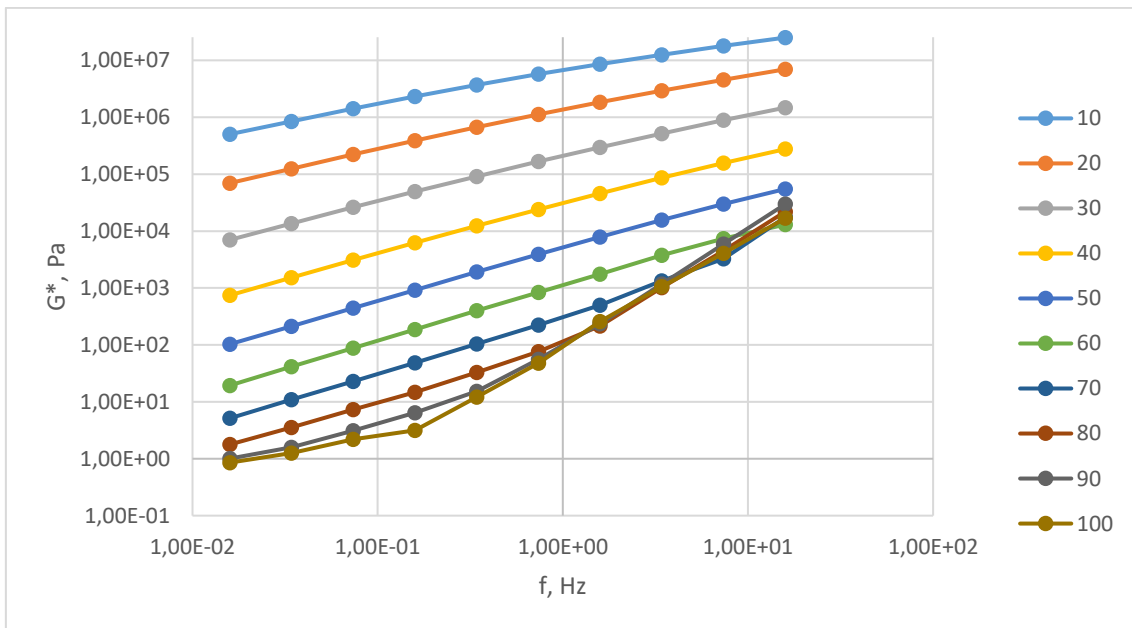
Kuva 3.9 Trimmattu näyte reometrissä

4.2 Kompleksimoduulin ja vaihekulman riippuvuus testaus taajuudesta ja lämpötilasta

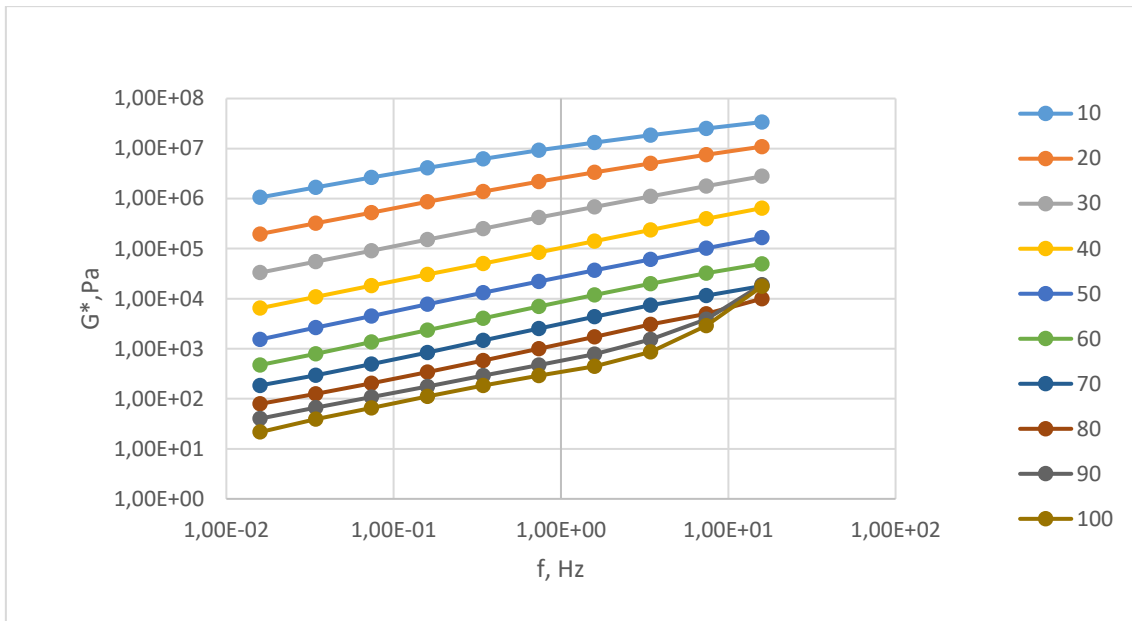
Isotermisissä kuvaajissa 4.1, 4.2 ja 4.3 esitetään kompleksimoduulin riippuvuus taajuudesta eri testauslämpötiloissa. Tarkasteltavana ovat kunkin testaussarjan ensimmäiset näytteet eli päivän 1 näytteet. Kuvaajista nähdään kompleksimoduulien arvojen pienenevän testauslämpötilan kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että bitumin jäykkyys ja elastiset ominaisuudet pienenevät lämpötilan kasvaessa (Pavementinteractive 2018). Taajuuden kasvaessa kompleksimoduulin arvo kasvaa.



Kuvaaja 4.1. 25mm:in testigeometrialla testatun RTFOT – 160/220 bitumin kompleksimoduulin riippuvuus taajuudesta eri testauslämpötiloilla päivän 1 näytteessä

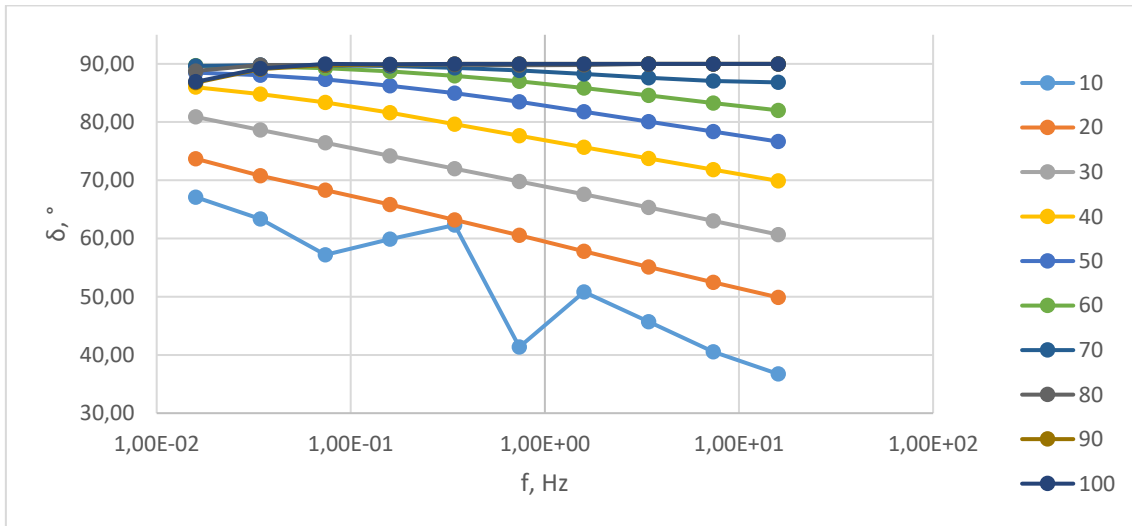


Kuvaaja 4.2. Päivän 1 RFTOT – 160/220 bituminäytteen kompleksimoduulien riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa 8mm testigeometrialla

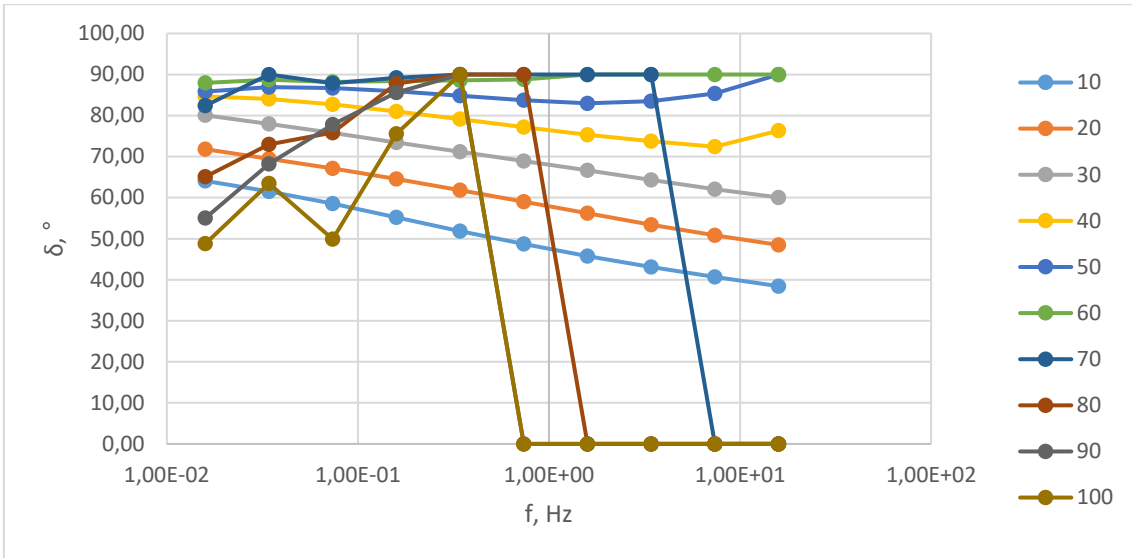


Kuvaaja 4.3. Päivän 1 kumibitumin RTFOT PAV näytteen kompleksimoduulien riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa 8mm testigeometrialla

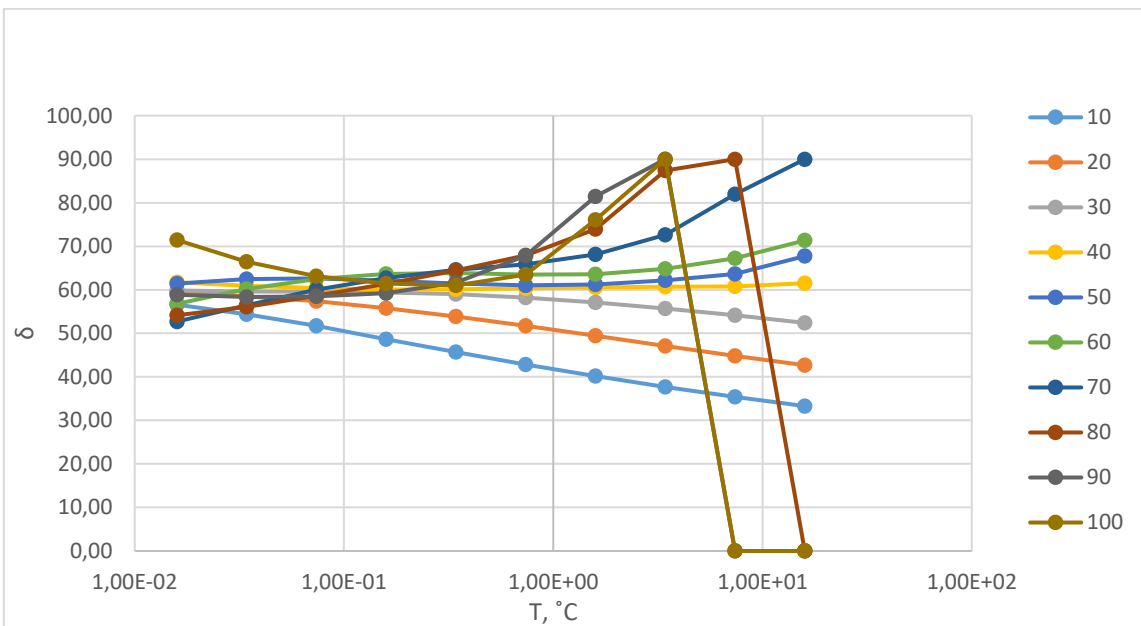
Isotermiset kuvaajat 4.4, 4.5 ja 4.6 esittävät vaihekulman riippuvuuden taajuudesta eri lämpötiloissa. Kuvaajista voidaan nähdä, että vaihekulma kasvaa lämpötilan kasvaessa. Kuvaajista huomataan, että koe ei ole onnistunut 8 mm testigeometrian suurimmilla lämpötiloilla.



Kuvaaja 4.4. RFTOF -160/220 bitumin vaihekulman riippuvuus taajuudesta 25mm testi-geometrialla eri lämpötiloissa



Kuvaaja 4.5. RFTOF -160/220 bitumin vaihekulman riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa 8mm testigeometrialla



Kuvaaja 3.6. RTFOT PAV bitumin vaihekulman riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa 8mm testigeometrialla.

5 Tulosten luotettavuus

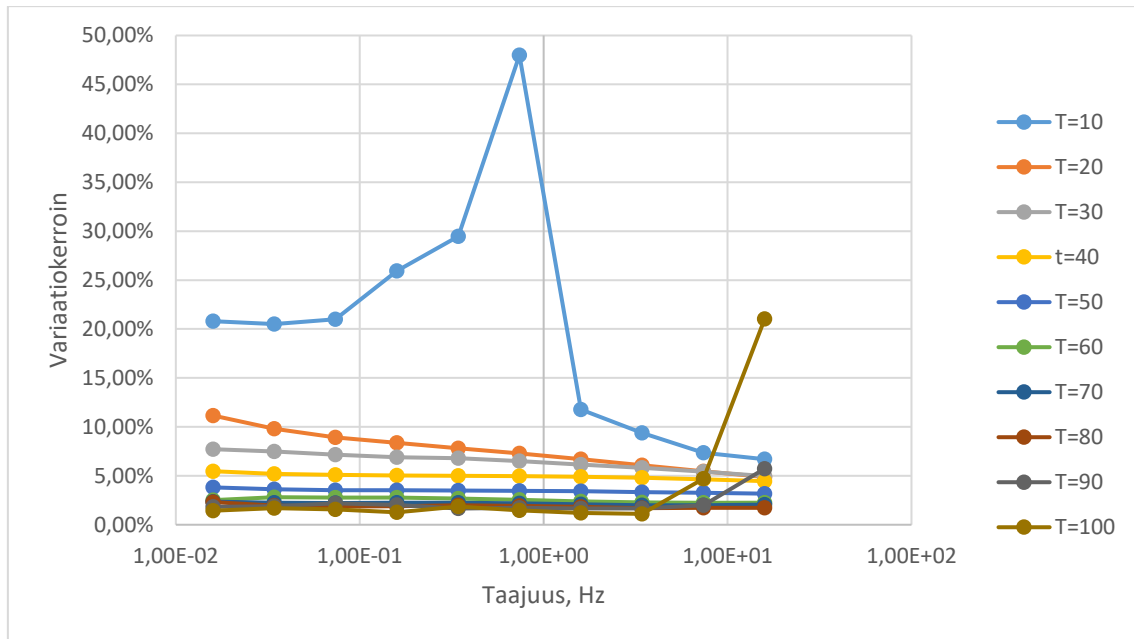
Tässä luvussa käsitellään kokeen toistettavuutta vertailemalla variaatiokertoimia eri lämpötiloissa ja eri taajuuksilla. Luvussa käsitellään kolmen eri testaustyyppin tuloksien toistettavuus. Kuten edellä on todettu, jotta koe olisi toistettava, tulisi tulosten olla samankaltaisia samoilla laitteilla ja menetelminä tehtynä. Tässä kokeessa yksi toistettavuutta rajoittava tekijä saattaa olla se, että näytteet ovat testaushetkellä eri ikäisiä. Näytteiden iän vaikutusta tuloksiin käsitellään seuraavassa luvussa 6.

5.1 Bitumi 160/220 RTFOT, 25mm

Kuvaajassa 4.1 esitetään kompleksimoduulin variaatiokertoimen riippuvuus taajuudesta. Kuvaajasta nähdään, että kokeen toistettavuus on huonoin 10°C lämpötilassa. Ero on suuri erityisesti pienissä lämpötiloissa. Koe ei anna luotettavia tuloksia kompleksimoduulille tässä lämpötilassa. Kuvaajasta nähdään, että kompleksimoduulien variaatiokertoimet pienenevät 10°C:sta 80 °C:een asti. 90°C:ssa ja 100°C:ssa variaatiokertoimien arvot kasvavat uudelleen suurimmilla taajuuksilla. Keskiarvoisesti kokeen toistettavuus on paras suurilla lämpötiloilla, jos suurimmat taajuudet jätetään huomioimatta.

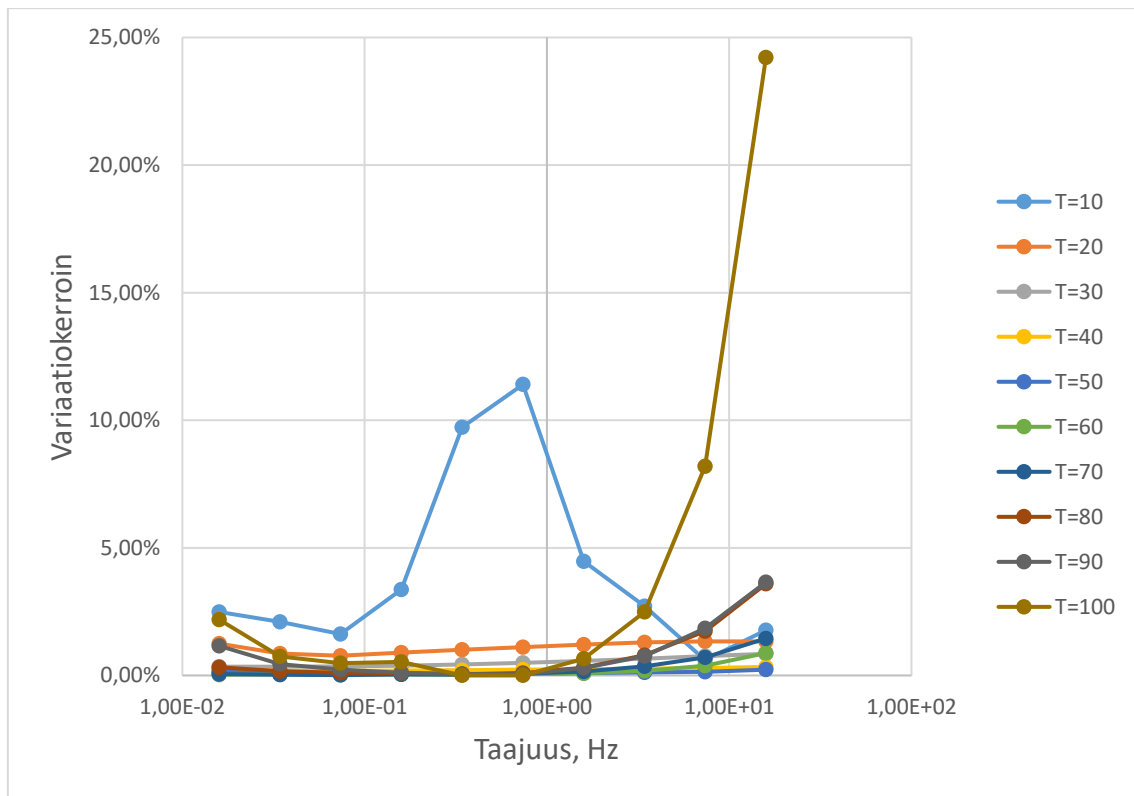
Tarkasteltaessa kompleksimoduulien variaatiokertoimia eri taajuuksilla, huomataan, että keskiarvallisesti tarkkuus kasvaa taajuuden kasvaessa. Tästä poikkeuksena ovat lämpötilat 90°C ja 100°C. Tämä saattaa johtua siitä, että tässä lämpötilassa bitumi pehmenee liikaa. Keskiarvallisesti laskettuna taajuus 3,43 Hz antaa pienimmät variaatiokertoimet. Lisäksi taajuudet 7,39 Hz ja 1,59Hz tuottavat pienen variaatiokertoimen verrattuna muihin käytettyihin taajuuksiin.

Yhteenvetona voidaan todeta, että 25mm testigeometrialla parhaiten toistettavat kompleksimoduulien tulokset saadaan lämpötilan kasvaessa ja taajuuden kasvaessa. Lämpötilalla on suurempi merkitys kokeen toistettavuuteen kuin taajuudella. Tuloksista voidaan päätellä, että suurimmilla taajuuksilla ja lämpötiloilla ylitetään mahdollisesti testaukseen sopiva testausalue. Saattaa olla, että 10 celsiusasteen lämpötilassa bitumi on tällä testigeometrialla liian jähmeää, jolloin ei saada luotettavia tuloksia.



Kuvaaja 5.1. RTFOT-160/220 bitumin kompleksimoduulin variaatiokertoimen riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa käytettäessä 25 mm testigeometriaa

Kuvaajassa 5.2 kuvataan vaihekulman variaatiokertoimien riippuvuudet taajuudesta eri lämpötiloissa. Tutkittaessa vaihekulmien arvoja koko testauslämpötilavälillä erilaisilla taajuuksilla, huomataan, että keskiarvoisesti pienemmät variaatiokertoimien arvot saadaan taajuudella 1,59Hz. Testilämpötilassa 50 °C varianssikertoimien keskiarvo on pienemmällä. Tämän jälkeen arvot suurenevät pienempään ja suurempaan lämpötilaan siirryttäessä. Suurin vaihteluväli vaihekulmien arvoissa on 10°C:ssa. Variaatiokertoimien arvot suurenevät selvästi 100°C:ssa suuremmilla taajuuksilla. Tästä voidaan todeta, että lämpötila-taajuusarvot ovat liian suuria tälle testausgeometrialle. Tämä saattaa johtua siitä, että näissä lämpötiloissa bitumi pehmenee liikaa.

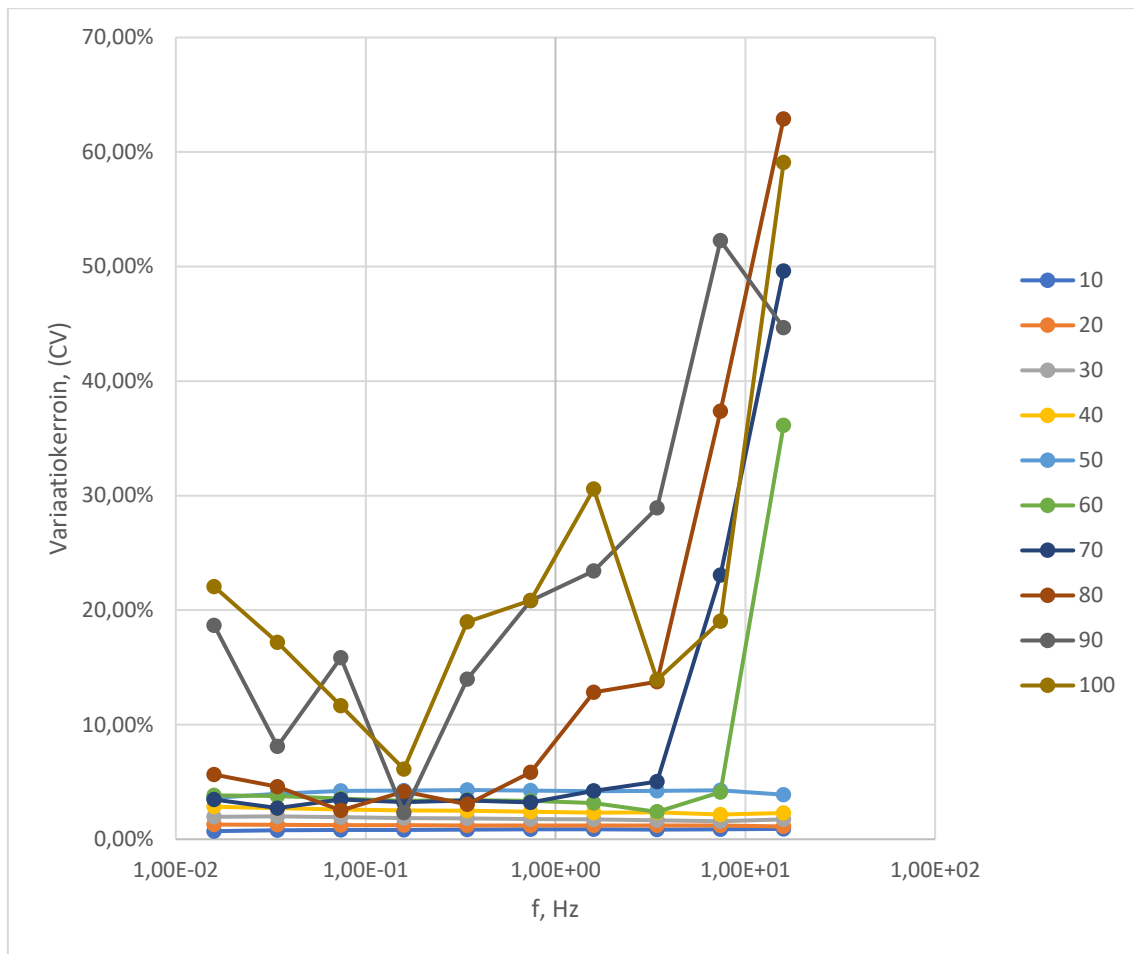


Kuvaaja 5.2. RFTOT 160/220 bitumin vaihekulman variaatiokertoimen riippuvuus taajuudesta eri vakiolämpötiloissa 25mm testigeometrialla

5.2 Bitumi 160/220 RTFOT, 8mm

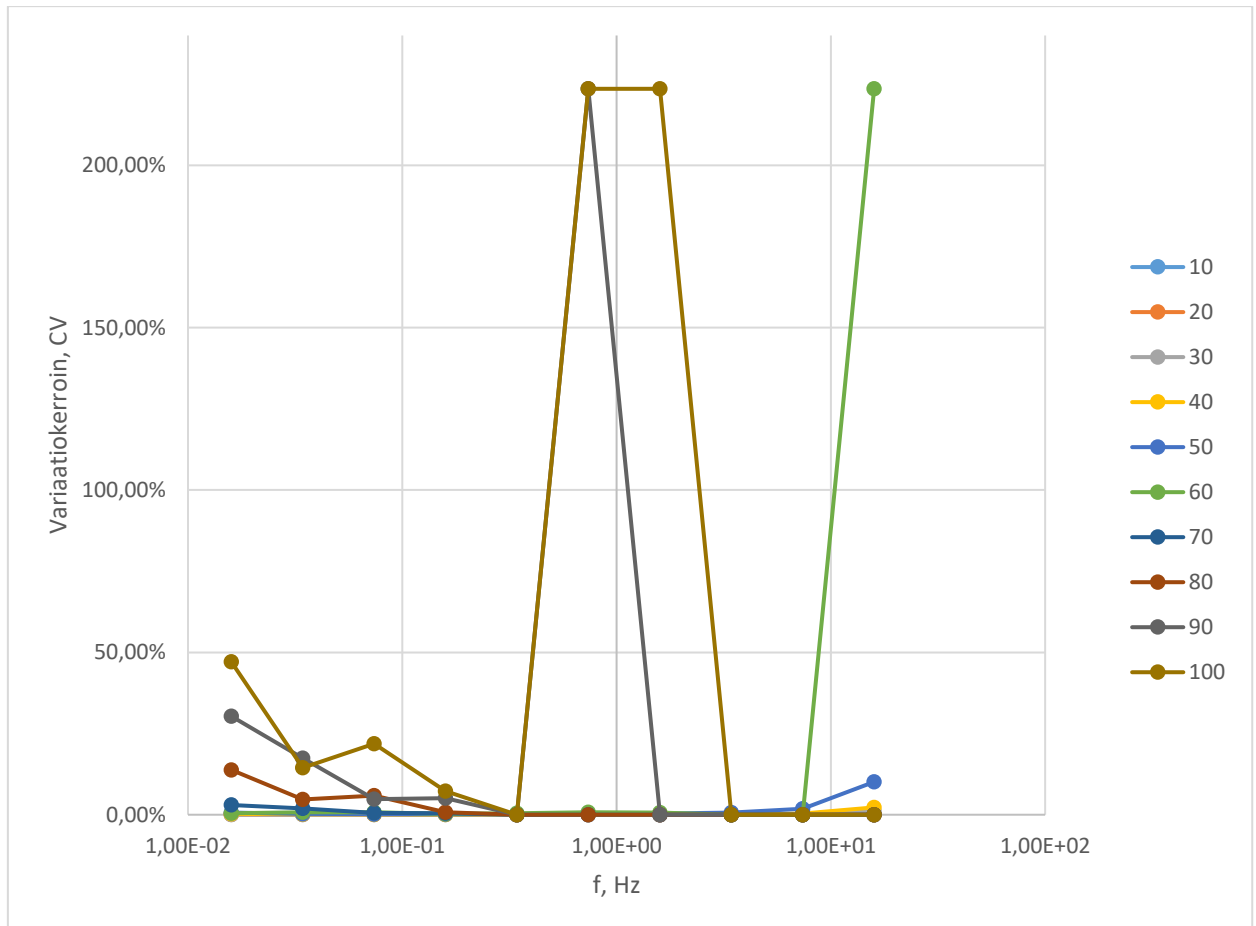
Kuvaajassa 5.3 esitetään kompleksimoduulien variaatiokertoimien ja taajuuden riippuvuus eri lämpötiloissa. Kokeen paras toistettavuus on 8mm testigeometrialla pienissä lämpötiloissa: variaatiokertoimet ovat pienimmillään 10°C:ssa. Pienillä lämpötiloilla testigeometria antaa hyvin toistettavia tuloksia. Kuvaajasta 5.3 nähdään, että variaatiokertoimien arvot kasvavat suuremmilla lämpötiloilla. Lämpötilassa 60°C variaatiokertoimen arvo kasvaa ensimmäistä kertaa suuremmilla taajuuksilla. Tämän jälkeen lämpötiloissa 70-100°C variaatiokertoimien arvot ovat suuria erityisesti suurilla taajuuksilla. 8mm testigeometria ei sovellu korkeille testilämpötiloille, koska kokeen toistettavuus on näissä lämpötiloissa huono. Bitumin liika pehmeneminen 100 celsiusasteessa aiheuttaa mahdollisesti toistettavuuden huononemisen.

Laskettaessa keskiarvoa variaatiokertoimista eri taajuuksilla, nähdään, että taajuudella 0,1592Hz saadaan pienin variaatiokertoimien keskiarvo. Taajuudet 0,07387Hz ja 0,03429Hz antavat seuraavaksi parhaat tulokset. Suurin variaatiokertoimien keskiarvo saadaan taajuudella 15,92Hz. Kuten kuvaajasta 5.3 voidaan päätellä, suuremmilla taajuuksilla tulokset ovat pieniä taajuuksia huonommat.



Kuvaaja 5.3. RTFOT 160/220 bitumin kompleksimoduulin variaatiokerroimen riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa 8 mm testigeometrialla

Kuvaajassa 5.4 esitetään vaihekulmien variaatiokerroimien riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa. Tutkittaessa vaihekulmaa, pienimmät variaatiokerroimien keskiarvot saadaan 10°C-40°C ja 70°C. Pienin arvo saadaan lämpötilassa 20°C. Suurin vaihtelu on lämpötilassa 100°C, jossa variaatiokerroimien keskiarvo oli 53,79%. 90°C ja 100°C lämpötiloissa erot taajuuksittain ovat suuria. Pienimmät variaatiokerroimet ovat taajuuksilla 0,3429Hz, 3,429Hz ja 7,387Hz.

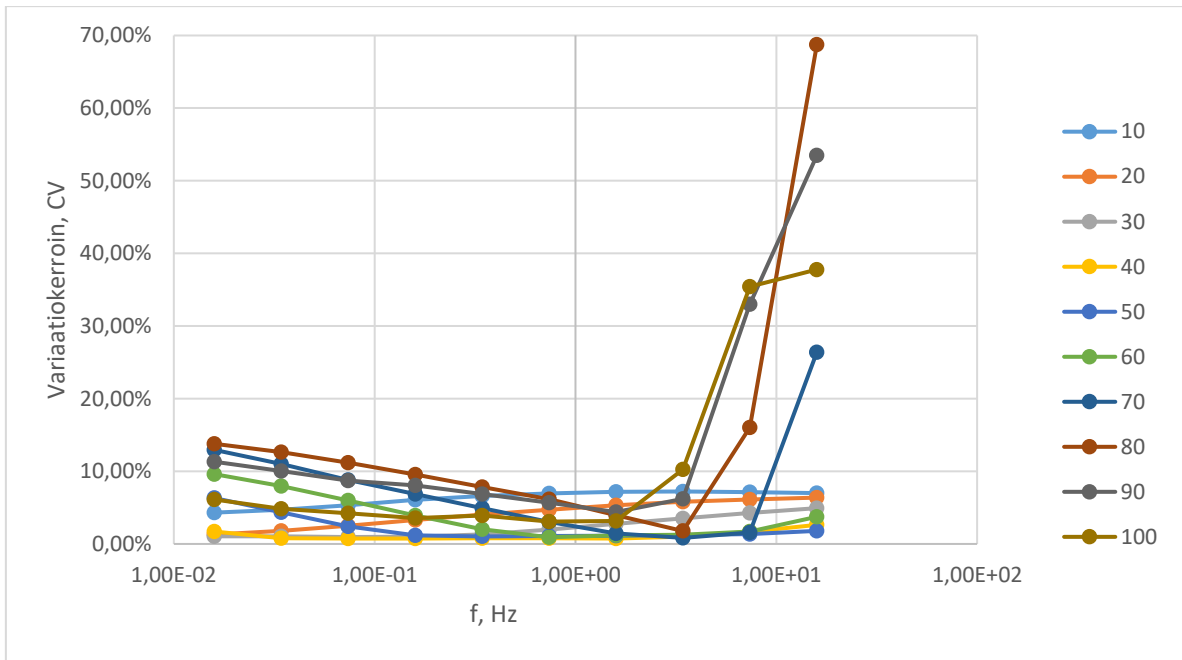


Kuvaaja 5.4. RTFOT 160/220 bitumin vaihekulman variaatiokerroimen riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa 8mm testigeometrialla

Yhteenvedonä 8 mm testigeometriasta voidaan sanoa, että testigeometria toimii parhaiten pienissä lämpötiloissa ja pienillä taajuuksilla. Toistettavuus huononee suuremmilla lämpötiloilla ja suurilla taajuuksilla. Tulokset ovat vastakkaisia verrattuna 25mm testigeometriaan, jossa tulokset paranivat suurissa lämpötiloissa ja suurilla taajuuksilla ja huononivat pienillä lämpötiloilla ja taajuuksilla. Tämä määrittää sen, millaisilla testialueella eri geometrioita voidaan parhaiten käyttää.

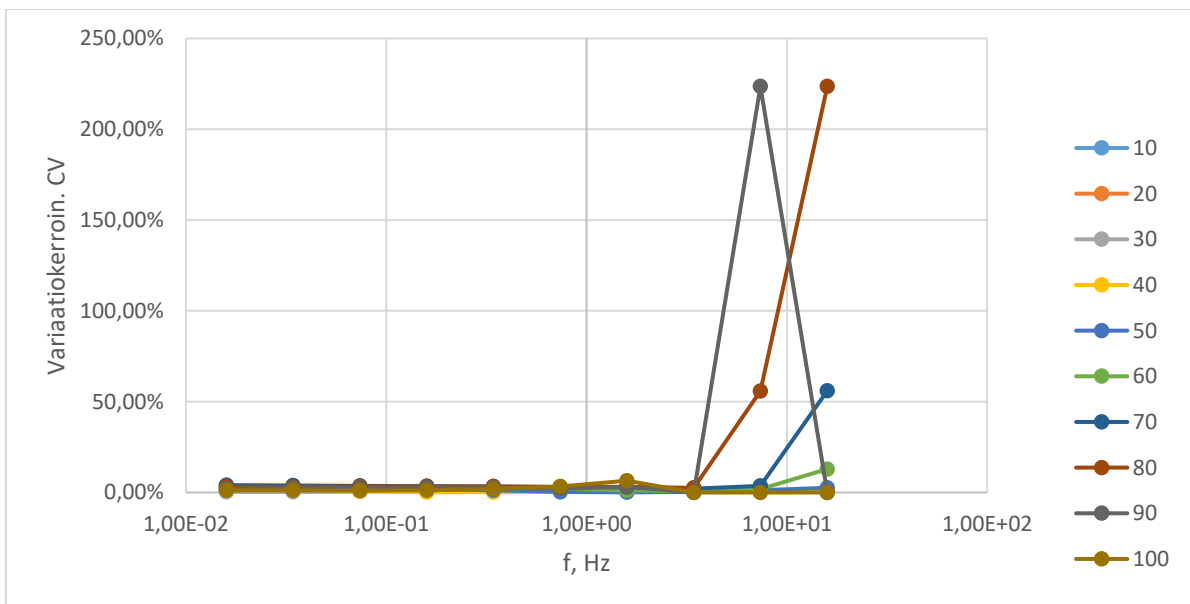
5.3 Bitumi KB RTFOT PAV, 8mm

Kuvaajassa 5.5 esitetään kompleksimoduulien variaatiokerroimien riippuvuudet taajuuksista. Kuvaajasta nähdään, että 40-60 °C lämpötiloissa variaatiokerroimien arvot pysyvät pieninä. Suuremmissa lämpötiloissa erityisesti suurilla taajuuksilla kokeen toistettavuus huononee ja variaatiokerroimien arvot kasvavat. Taajuudet 0,592Hz, 0,3429Hz, 0,7387Hz ja 3,429Hz antavat keskiarvillisesti parhaat tulokset. Keskiarvillisesti huonoimmat tulokset saadaan taajuuksilla 7,387Hz ja 15,92Hz.



Kuvaaja 5.5. KB RTFOT PAV bitumin kompleksimoduulin variaatiokerroimen riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa 8mm testigeometrialla

Kuvaajassa 5.6 näytetään vaihekulman variaatiokerroimen riippuvuus taajuudesta. Kuvaajasta huomataan, että kokeen toistettavuus on parhaimmillaan pienemmillä lämpötiloilla. Kokeen toistettavuus huononee selvästi siirryttäessä suurempiin lämpötiloihin. Keskiarvoillisesti parhaat taajuudet ovat 3,429Hz, 0,7387Hz ja 0,3429Hz. Heikoimmat tulokset tulivat suurilla taajuuksilla 7,387Hz ja 15,92Hz



Kuvaaja 5.6. KB RTFOT PAV bitumin vaihekulman variaatiokerroimen riippuvuus taajuudesta eri lämpötiloissa 8mm testigeometrialla

Yhteenvetona voidaan sanoa, että kylmempi testauslämpötila sopii tälle bitumilaadulle ja mittageometrialle suurta paremmin. Suurilla taajuuksilla ja lämpötiloilla testausalue ei

enää ole sopiva, mikä voidaan havaita kokeen toistettavuuden huononemisena. Tämä voi johtua siitä, ettei bitumi ole enää lineaarisesti viskoelastisella alueella (LVE-alue). Viskoelastisella alueella tarkoitetaan sitä, että valitulla kuormitusajalla ja lämpötilalla muodonmuutos on suoraan verrannollinen jännityksen suuruuteen (Aromaa 2016, s.14). Sama ilmiö voi selittää myös sitä, miksi 25mm testigeometriaa käytettäessä pienillä taajuuksilla ja lämpötiloilla testattaessa, variaatiokertoimien arvot kasvoivat.

6 Näytteen iän vaikutus koetulokseen

Bitumin vanhentumisen syitä ovat hapettuminen, bitumien kevyimpien komponenttien haihtuminen ja absorptio sekä fysikaalinen ja steerinen kovettuminen. Bitumin vanheneminen vaikuttaa bitumin reologisiin sekä mekaanisiin ominaisuuksiin ja se kasvattaa bitumin jäykkyyttä, mikä näkyy kompleksimoduulin arvon suurentumisena ja vaihekulman pienenemisenä. (Aromaa, s.30-32.)

Tässä osiossa verrataan eri ikäisten näytteiden leikkausmoduuleita ja vaihekulmia toisiinsa. Tarkoituksena on selvittää, vaikuttaako näytteen ikä kompleksimoduulin ja vaihekulman arvoon. Vanhentumisen tutkiminen on tärkeää, koska vanheneminen vaikuttaa eri ikäisten näytteiden vertaamiseen keskenään. Lisäksi eri standardit reagoivat aikaan eri tavalla: eurooppalaisen standardin EN 14770 mukaan näytteitä tulee säilyttää huoneenlämmössä kahdesta tunnista kolmeen vuorokauteen. AASHTO T515-10 -standardissa puolestaan maksimi säilytysaika on kaksi tuntia. Näytteiden iät näkyvät alla olevissa taulukoissa 6.1 ja 6.2.

Taulukko 6.1. RTFOT 160/220 –bitumin testauksen aikataulu 25mm ja 8mm testi-geometrioilla.

Muotit valettu	Kellon-aika	25 mm mittapää	Mittaus alkoi	Kellon-aika	Muotin ikä	8 mm mittapää	Mittaus alkoi	Kellon-aika	Muotin-ikä
27.helmi	9:38	1	27.helmi	12:57	3:19	A	28.helmi	9:15	23:37
1-3 ja A ja B		2	28.helmi	15:00	1 d 5:22	B	1.maalis	9:10	23:32
5.maalis	10:15	3	1.maalis	15:00	2 d 5:22	C	5.maalis	14:07	3:52
4-5 ja C-E		4	6.maalis	9:10	22:55	D	6.maalis	15:51	1 d 5:36
		5	7.maalis	9:08	1 d 22:53	E	7.maalis	15:31	1 d 5:16

Taulukko 6.2. KB RTFOT PAV –kumibitumin testauksen aikataulu 8 mm testigeometrialla.

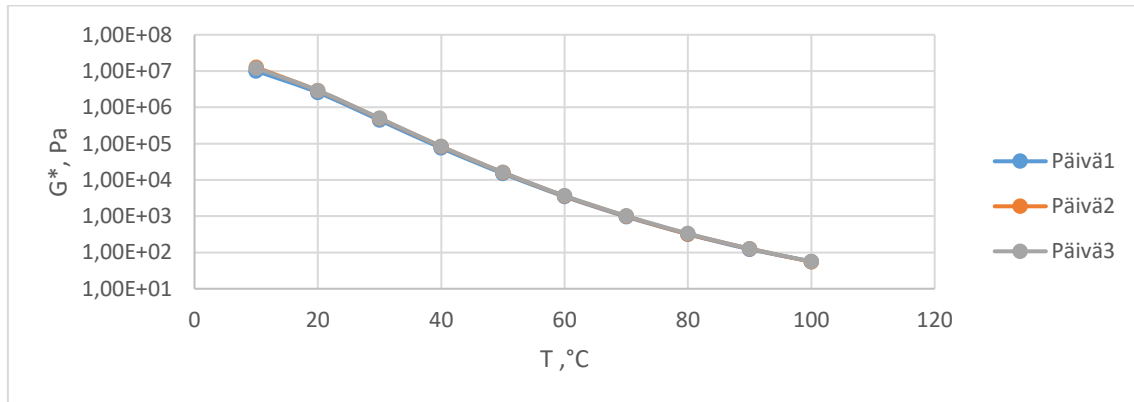
Muotit valettu	Kellon-aika	8 mittapää	mittaus alkoi	Kellonaika	muotin ikä
7.maalis	10:00	A	8.maalis	9:24	23:24
A ja B		B	9.maalis	9:11	1 d 23:11
12.maalis	10:26	C	13.maalis	9:06	22:40
C-E		D	13.maalis	15:53	1 d 5:27
		E	14.maalis	10:36	2 d 0:10

Seuraavissa alaluvuissa 6.1-6.3 esitetään leikkausmoduulin riippuvuutta lämpötilasta sekä vaihekulman riippuvuus lämpötilasta eri ikäisillä näytteillä taajuuksilla 3,43 Hz ja 0,07387Hz. Kuvaajat ovat isokroonisia. Tarkastellut taajuudet ovat taajuusalueen ylä- ja alapäästä ja ne antavat keskiarvoisesti pienen vaihtelun variaatiokertoimissa, jonka takia ne on valittu tarkastelutaajuuksiksi.

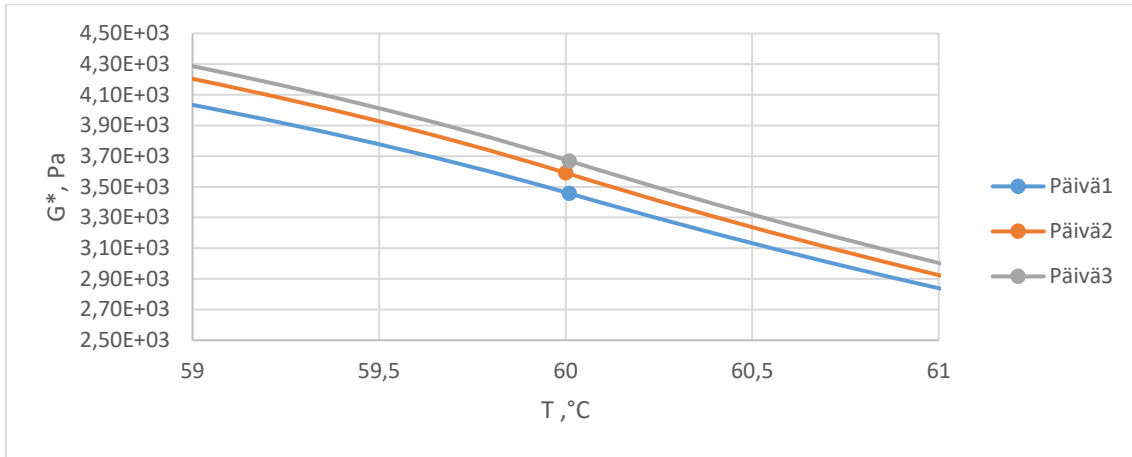
6.1 Bitumi 160/220 RTFOT, 25mm

Kuvaajat 6.1 ja 6.4 kuvaavat päivien 1, 2 ja 3 kompleksimoduulien arvoja koko lämpötilavälillä. Kuvaajat 6.2, 6.3, 6.5 ja 6.6 kuvaavat tarkennettuna näytteiden kompleksimoduulien käyttäytymistä valituissa lämpötiloissa. Tarkennetuista kuvaajista nähdään, että näytteet asettuvat ikäjärjestykseen. Päivän 1 näytteen kompleksimoduuli on pienempi kuin päivän 2 ja päivän 3 kompleksimoduulien näytteet tarkastelulämpötilassa. Sama ei toteudu kaikissa lämpötiloissa ja esimerkiksi lämpötilassa 10 °C näytteet eivät asetu ikäjärjestykseen. Toisaalta tässä lämpötilassa variaatiokertoimien arvot ovat suurempia kuin muissa lämpötiloissa.

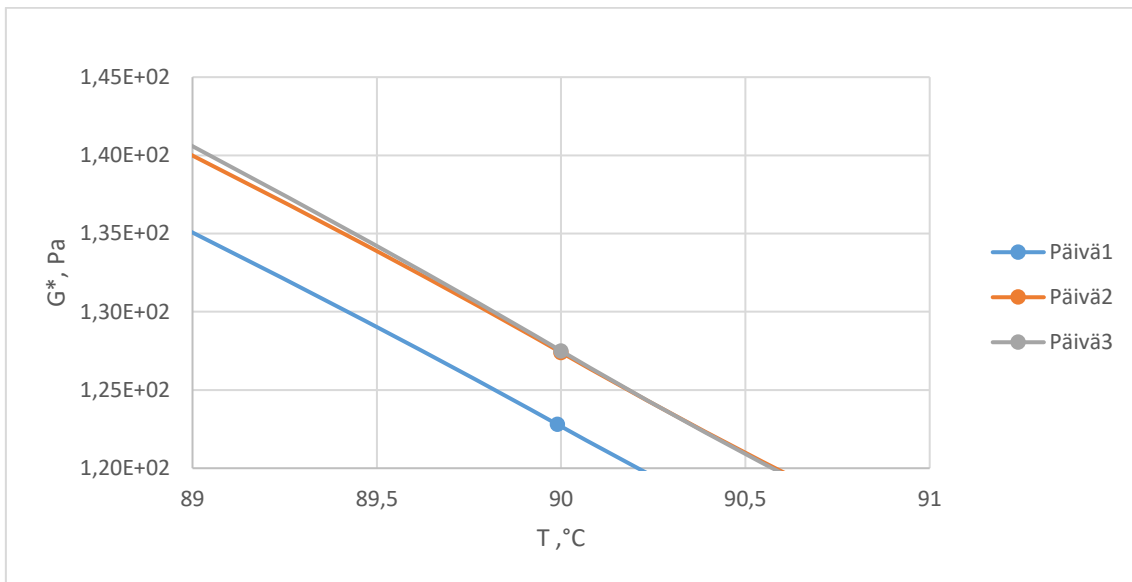
Kuvaajissa 6.7 ja 6.10 vaihekulman arvon riippuvuutta lämpötilasta valituilla taajuuksilla. Näistä kuvaajista nähdään, että suurimmat vaihtelut vaihekulmissa ovat taajuudella 3,43Hz suurissa sekä pienissä lämpötiloissa ja taajuudella 0,07387Hz pienissä lämpötiloissa. Näytteet eivät ole vanhenemisjärjestyksessä. Lämpötilavälin keskivaiheessa nähdään pienempiä eroja päivien 1,2 ja 3 välillä. Lämpötilavälin keskivaiheella näytteet asettuvat ikäjärjestykseen. Tarkennetuista kuvaajista 6.8, 6.9, 6.11 ja 6.12 nähdään, että näissä valituissa lämpötiloissa näytteet asettuvat ikäjärjestykseen. Päivän 3 näytteen vaihekulma on pienin ja päivän 1 vaihekulma on suurin.



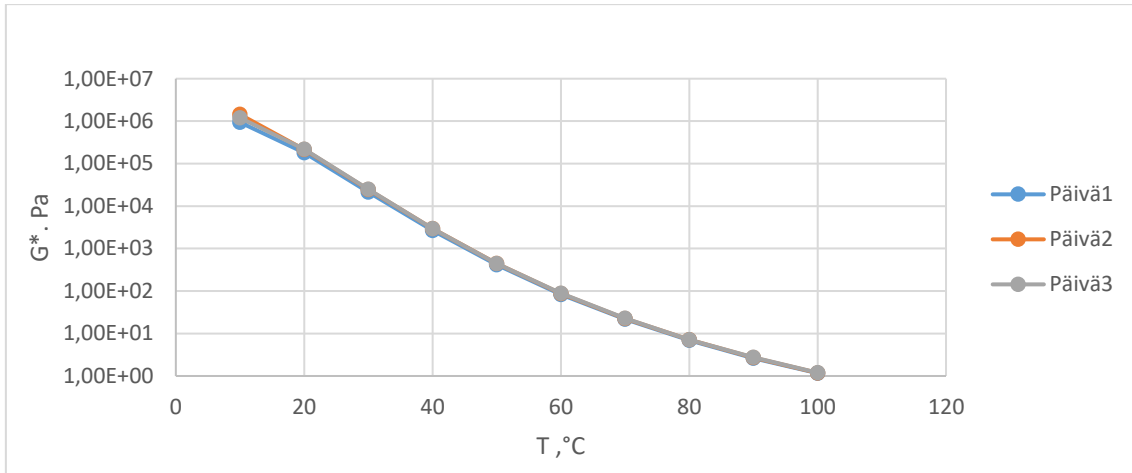
Kuvaaja 6.1. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulia kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuuksella 3,43 Hz



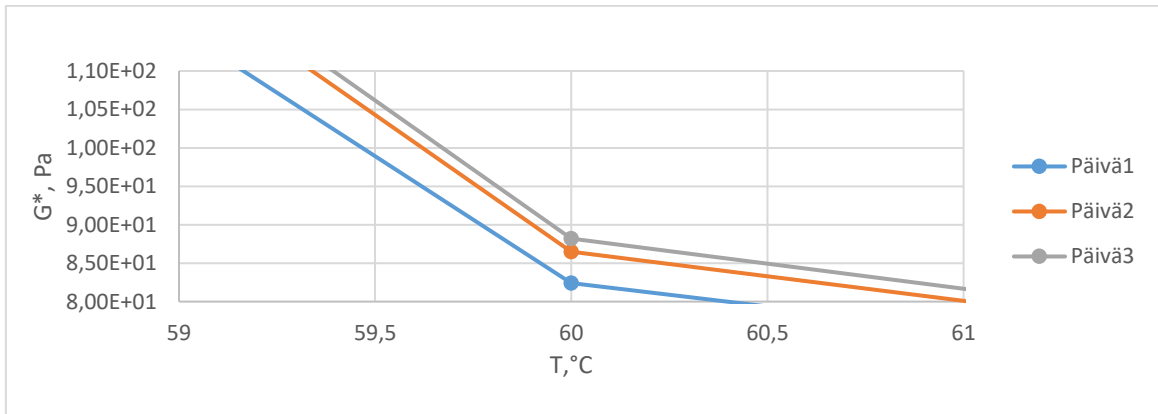
Kuvaaja 6.2. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulia kuvaava tarkennettu ja isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



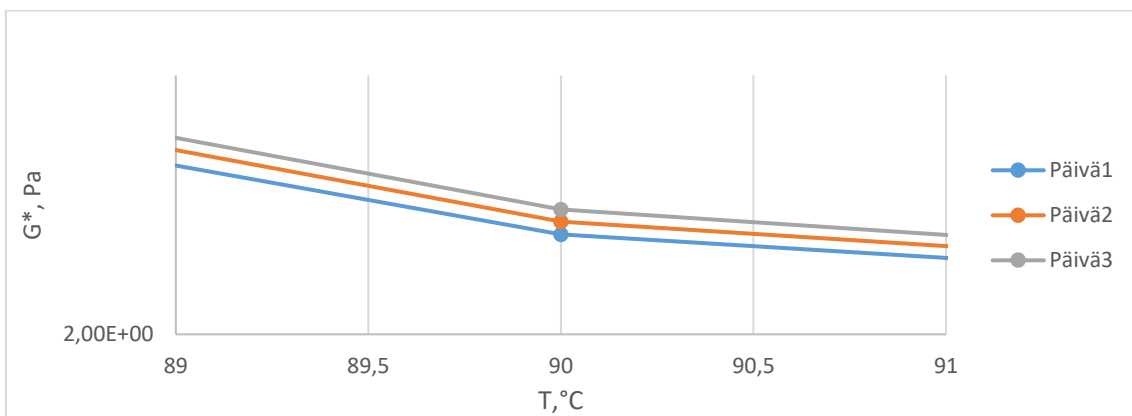
Kuvaaja 6.3. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43Hz



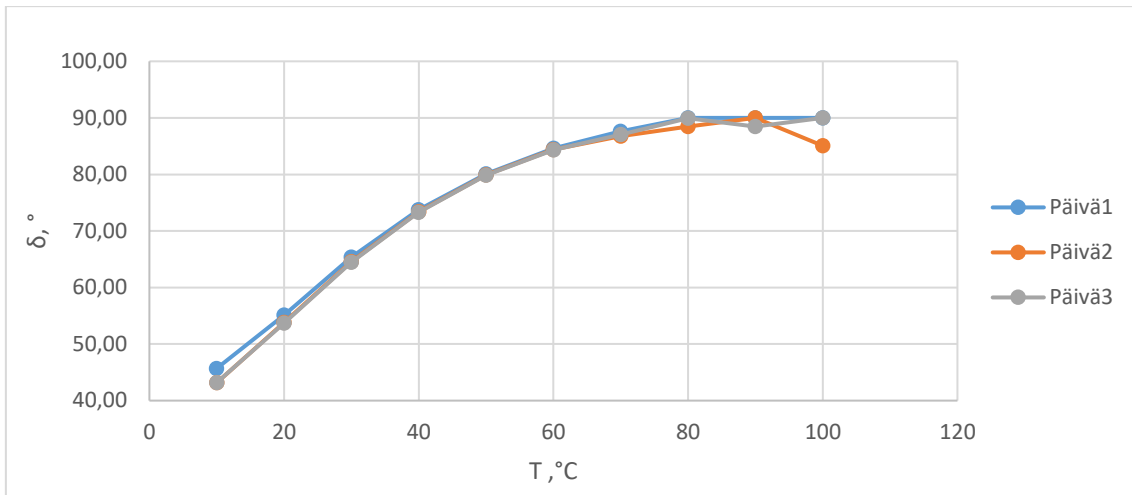
Kuvaaja 6.4. 160/220 RTFOT kompleksimoduulin suhdetta lämpötilaan kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



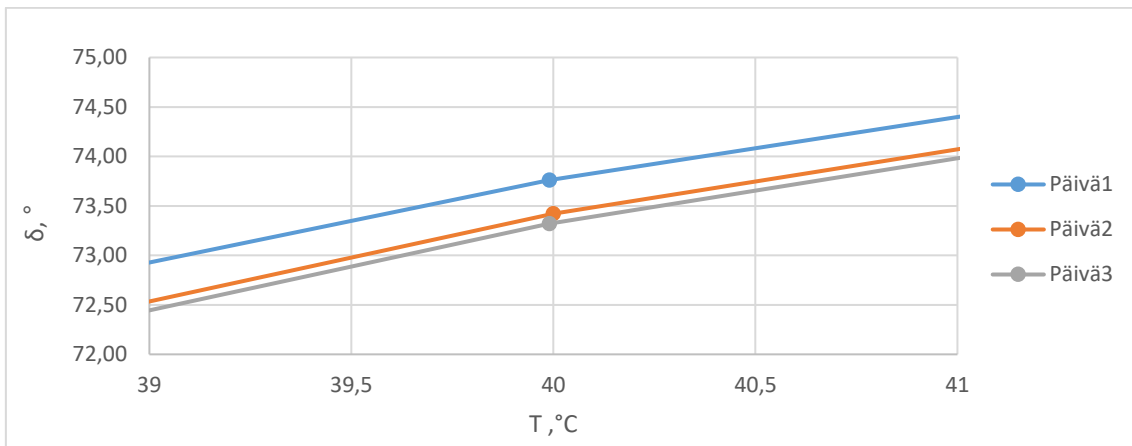
Kuvaaja 6.5. 160/220 RTFOT bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan riippuvuutta kuvaava tarkennettu ja isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



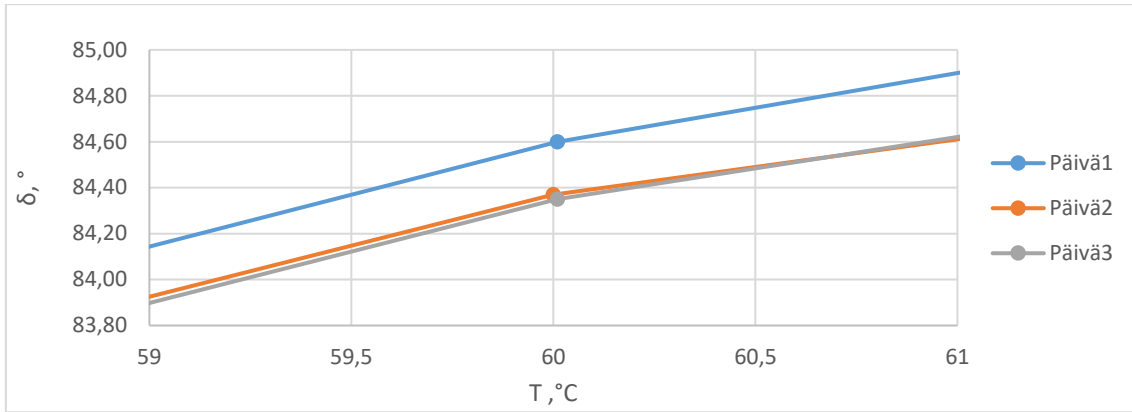
Kuvaaja 6.6. 160/220 RTFOT bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan riippuvuutta kuvaava tarkennettu ja isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



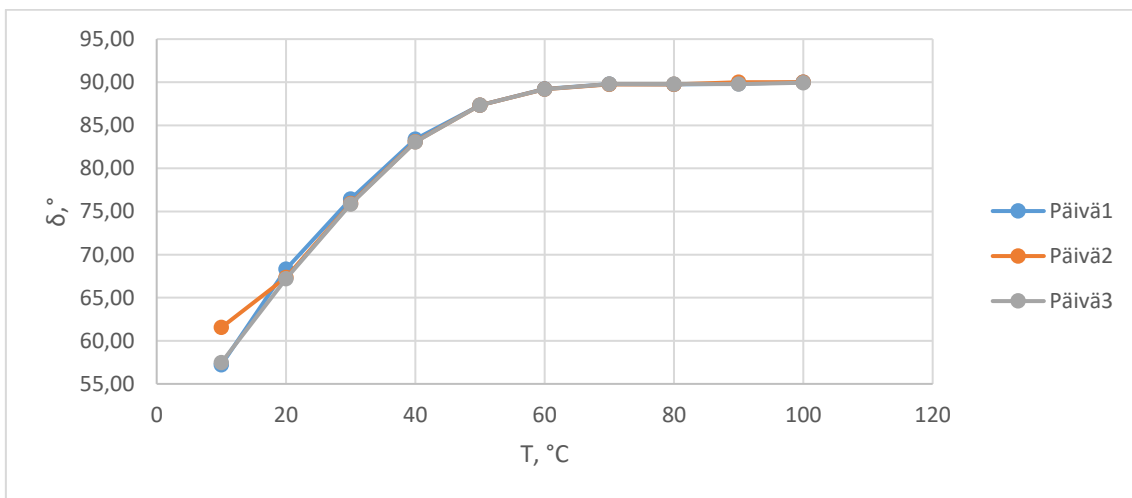
Kuvaaja 6.7. 160/220 RTFOT bitumin vaihekulman ja lämpötilan riippuvuutta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



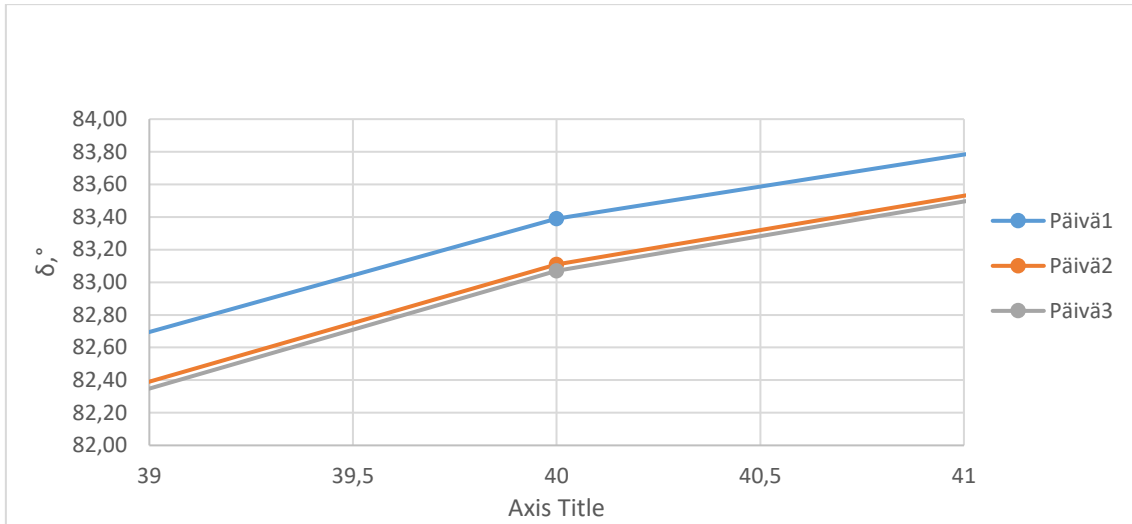
Kuvaaja 6.8. 160/220 RTFOT bitumin vaihekulman ja lämpötilan riippuvuutta kuvaava tarkennettu ja isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



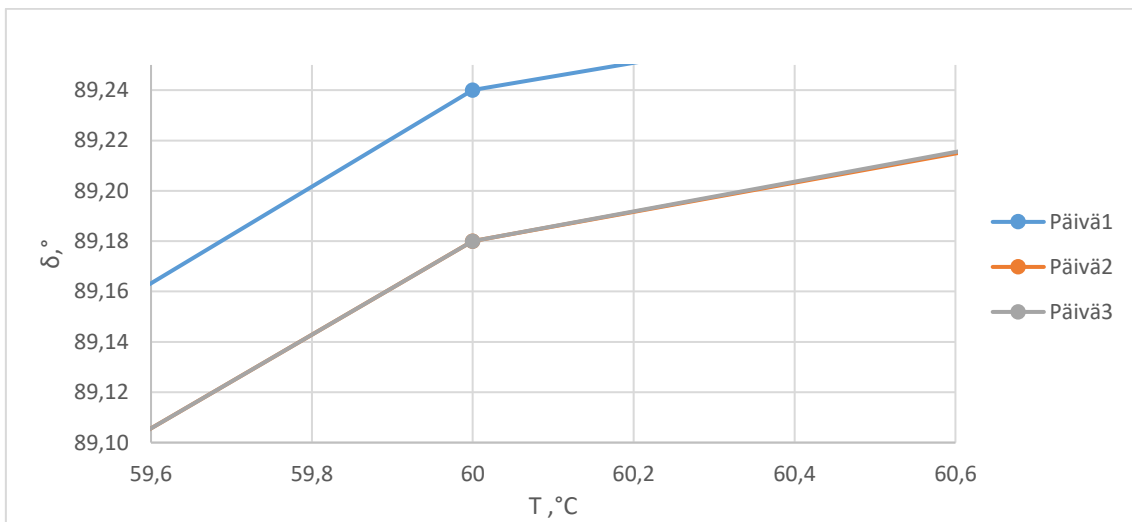
Kuvaaja 6.9. 160/220 RTFOT bitumin vaihekulman ja taajuuden suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



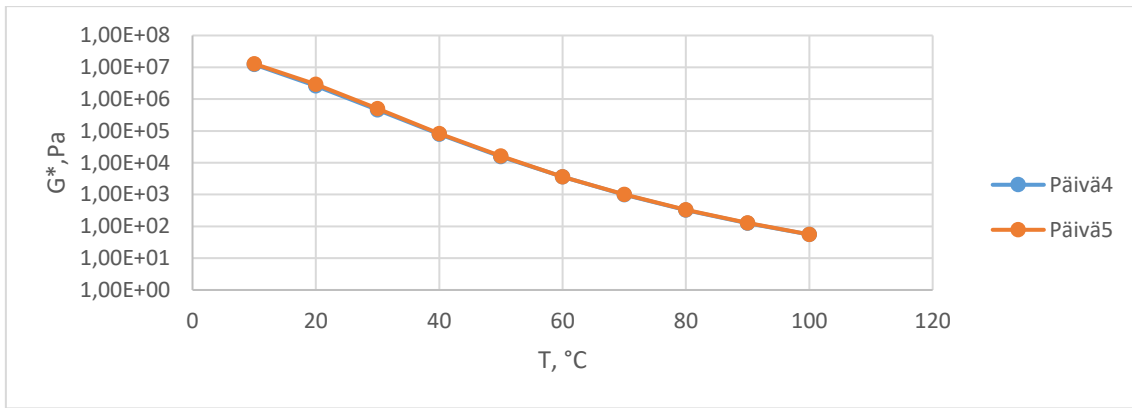
Kuvaaja 6.10. 160/220 RTFOT bitumin vaihekulman ja taajuuden suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



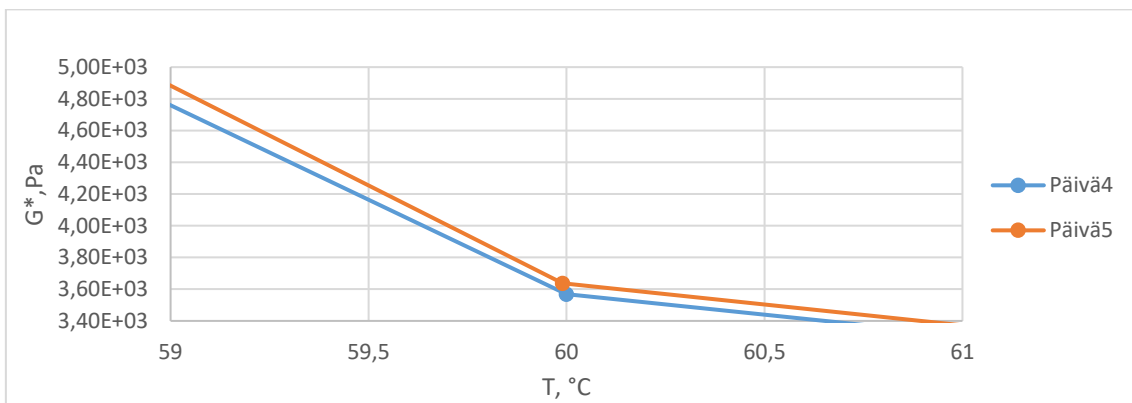
Kuvaaja 6.11. 160/220 RTFOT bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



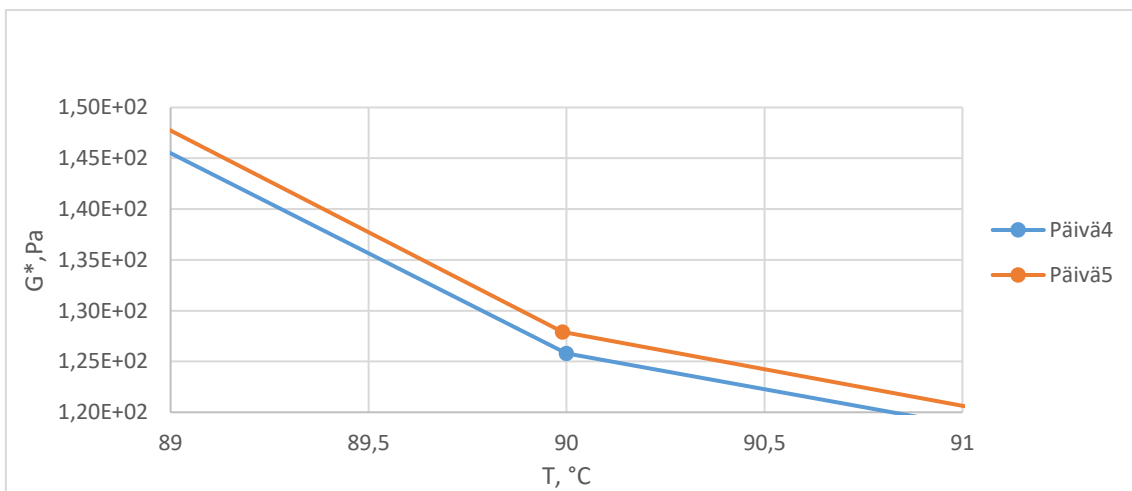
Kuvaaja 6.12. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan riippuvuutta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



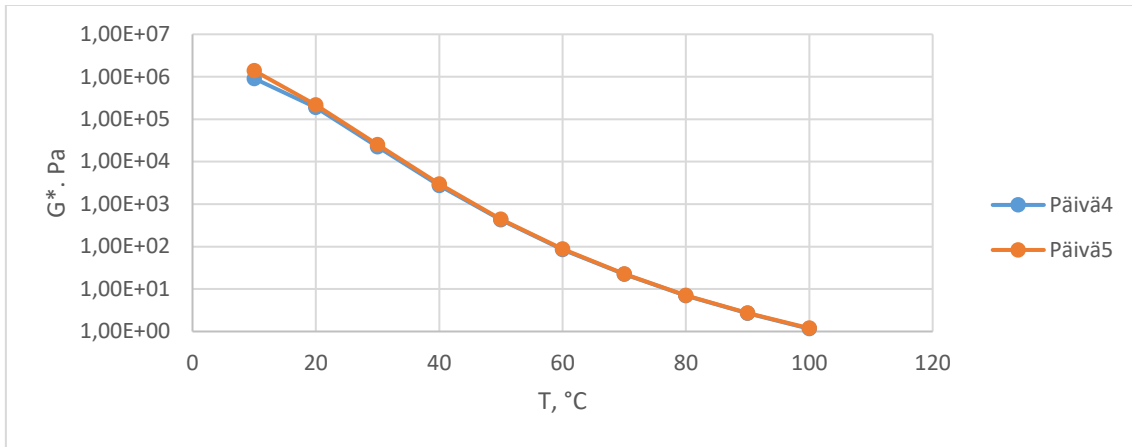
Kuvaaja 6.13. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



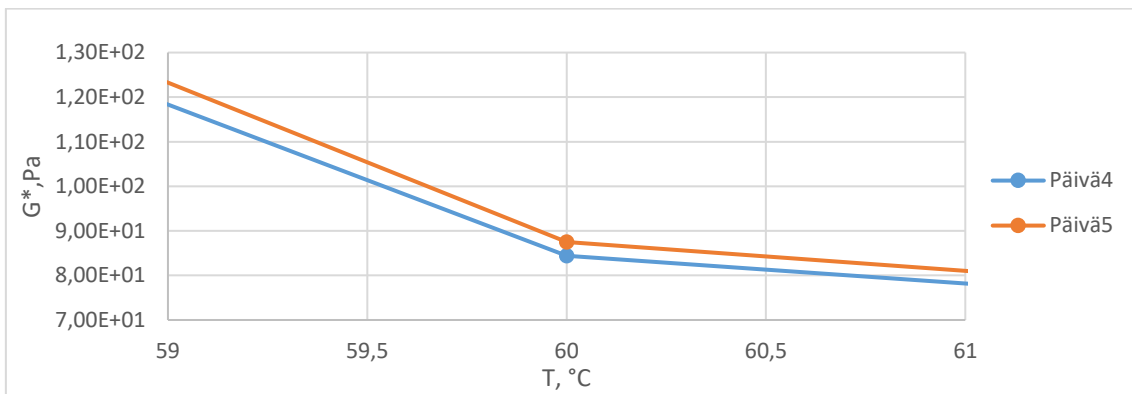
Kuvaaja 6.14. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



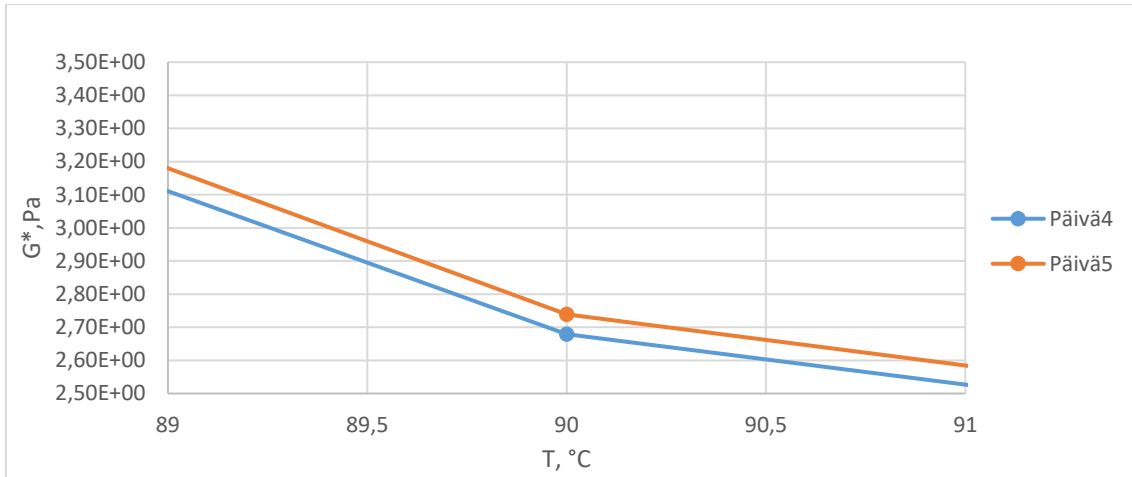
Kuvaaja 6.15. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



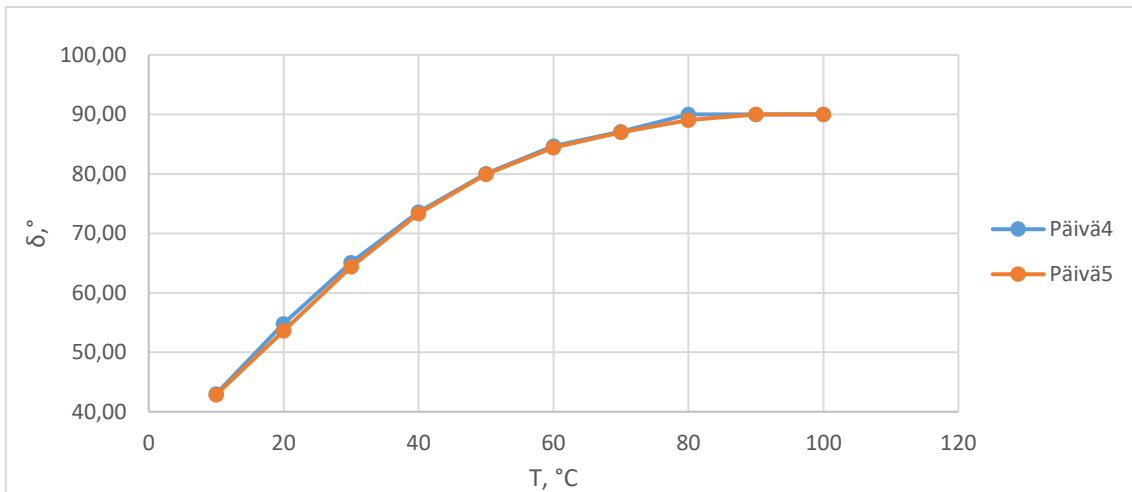
Kuvaaja 6.16. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava, isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz.



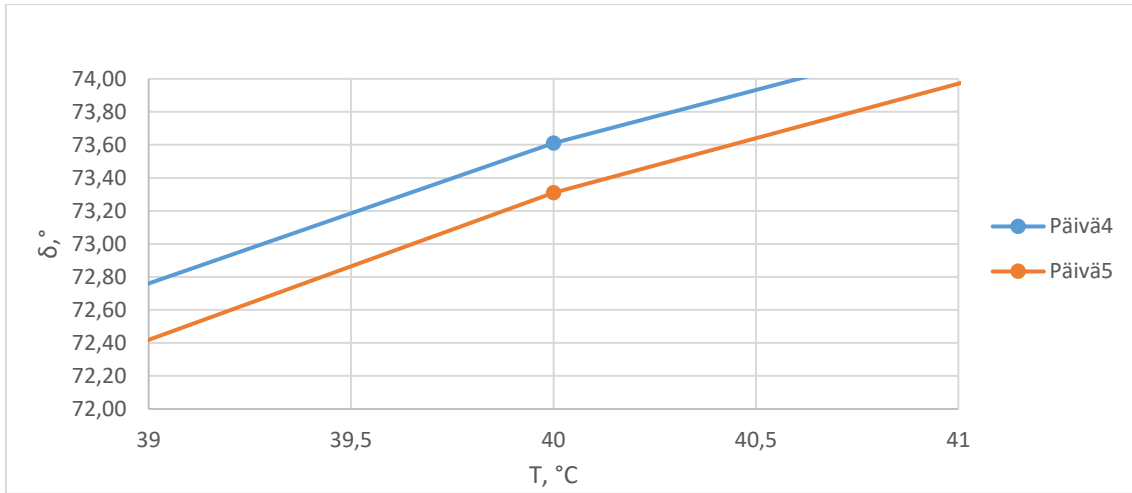
Kuvaaja 6.17. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



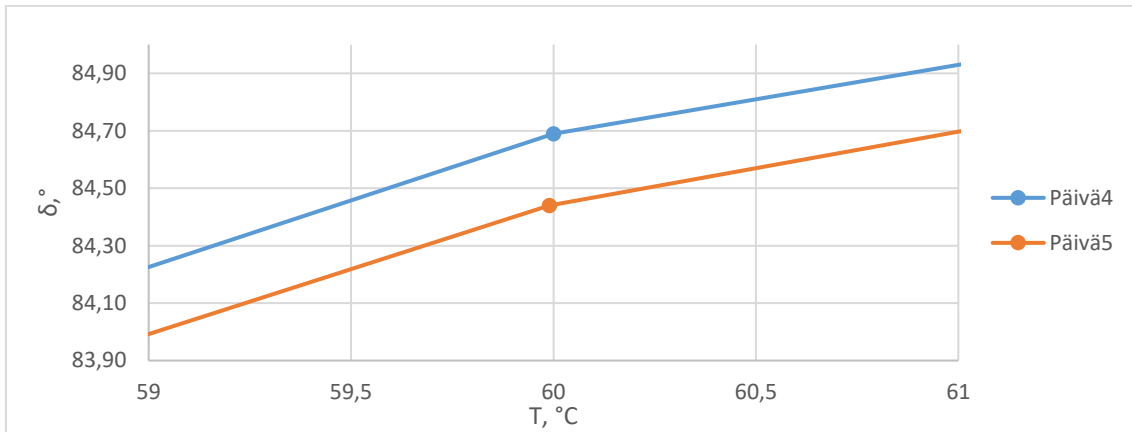
Kuvaaja 6.18. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



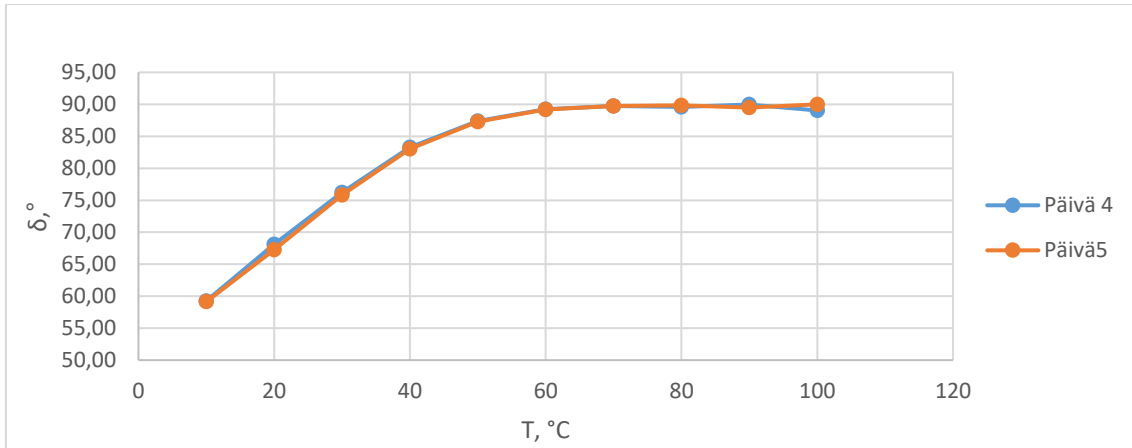
Kuvaaja 6.19. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



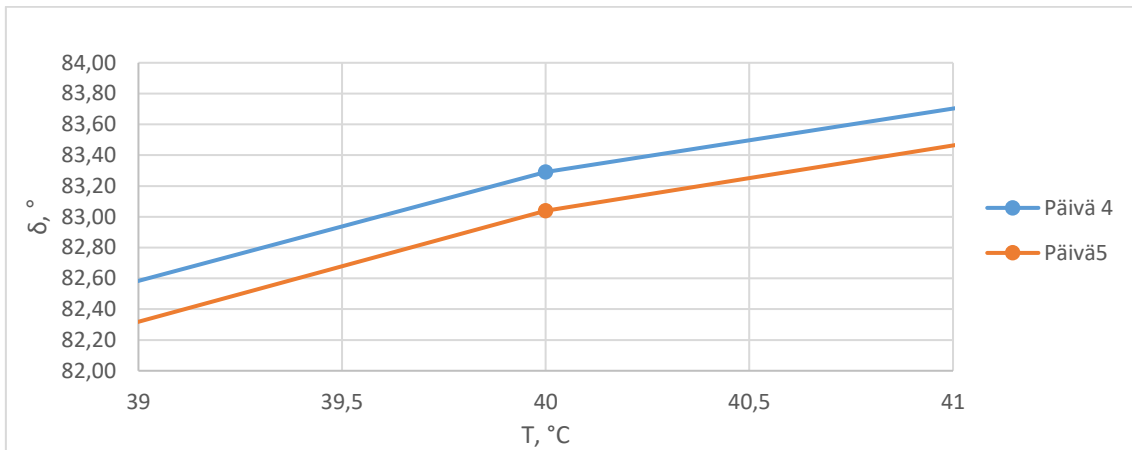
Kuvaaja 6.20. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



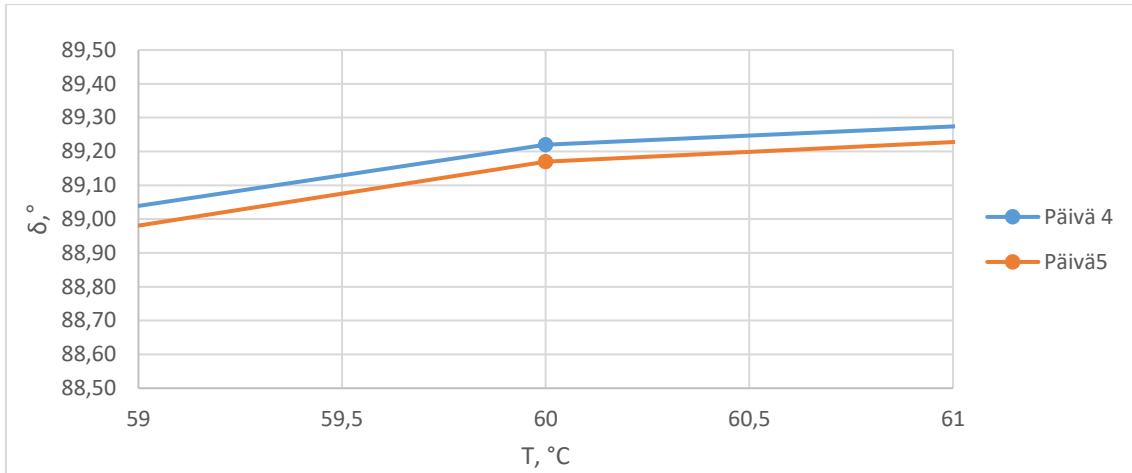
Kuvaaja 6.21. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



Kuvaaja 6.22. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz

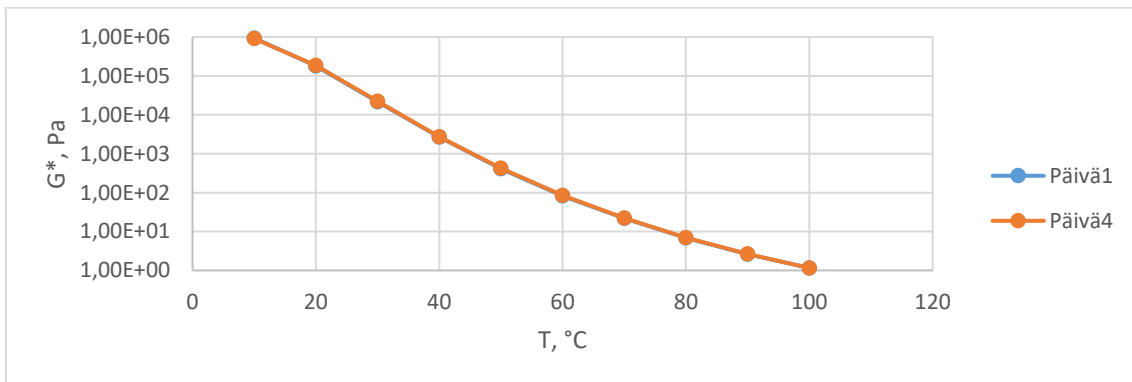


Kuvaaja 6.23. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz

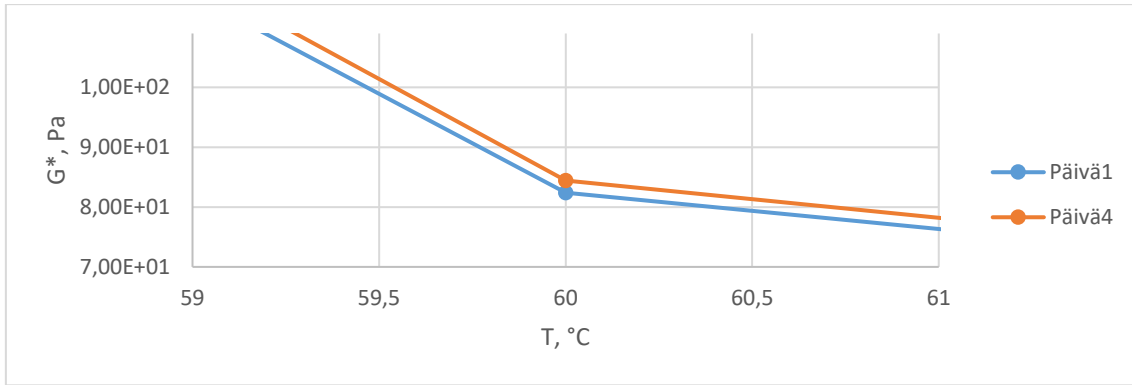


Kuvaaja 6.24. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz

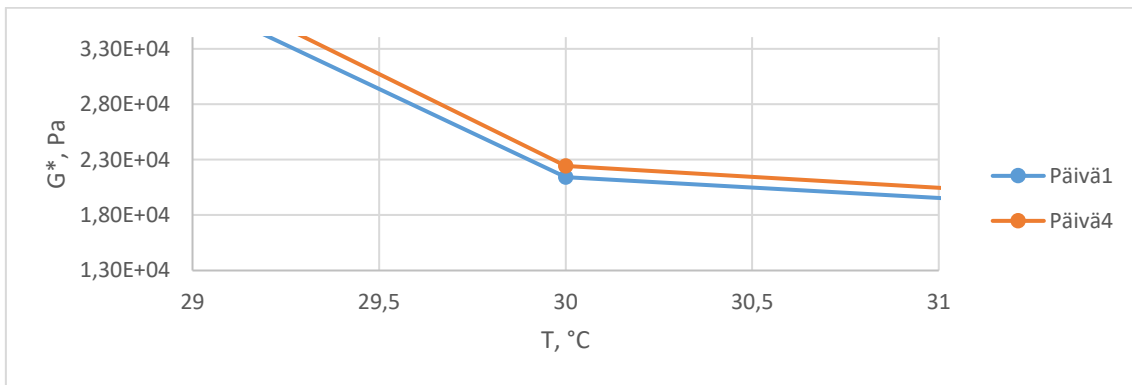
Kuvaajissa 6.25-6.36 vertaillaan ensimmäisen ja neljännen päivän tuloksia sekä toisen ja viidennen päivän tuloksia toisiinsa. Näissä tuloksissa mielenkiintoista on se, että näytteet asettuvat samalla tavalla verrattuna aiempien näytteiden kuvaajien kanssa. Päivän 1 näytteiden kompleksimoduuli on pienempi verrattuna päivän 4 kompleksimoduuliin ja päivän 1 näytteen vaihekulma on suurempi verrattuna päivän 4 vaihekulmaan. Sama nähdään päivän 2 ja päivän 5 käyttäytymisessä.



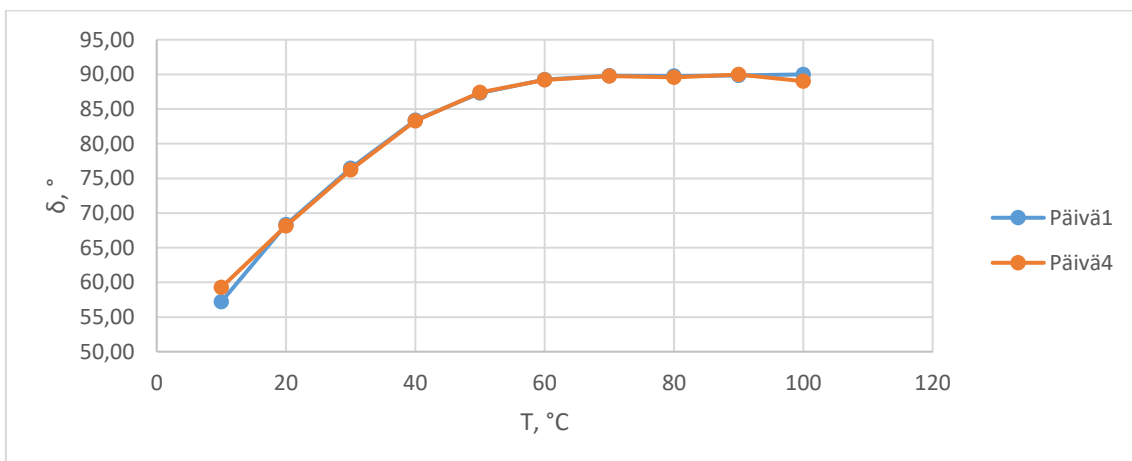
Kuvaaja 6.25. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



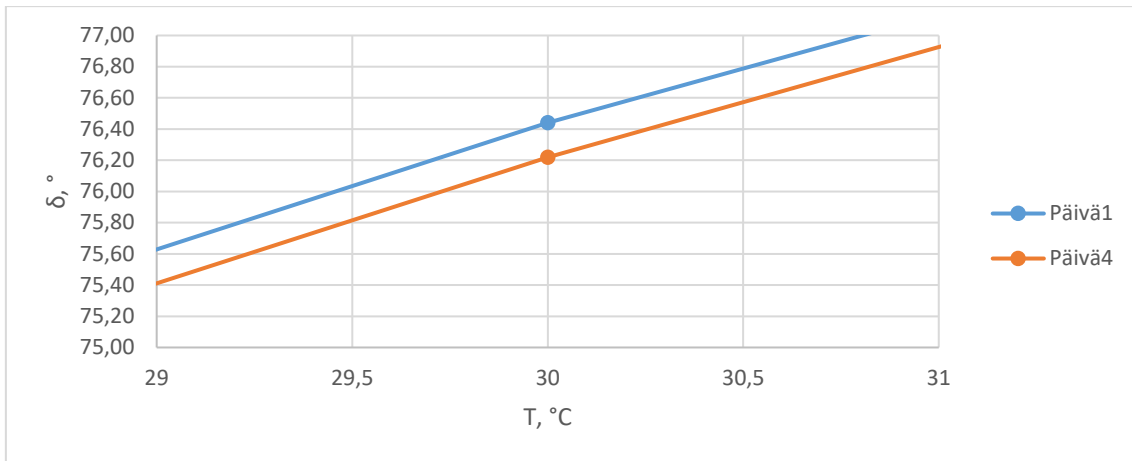
Kuvaaja 6.26. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



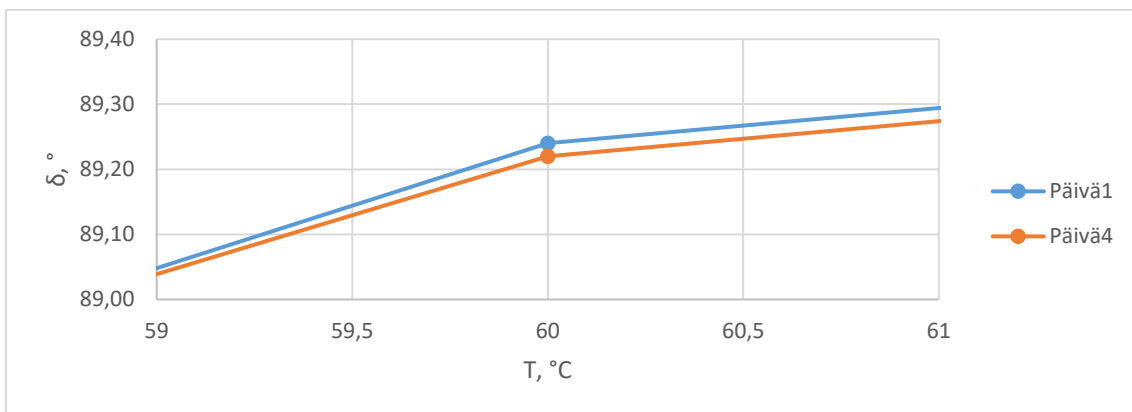
Kuvaaja 6.27. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



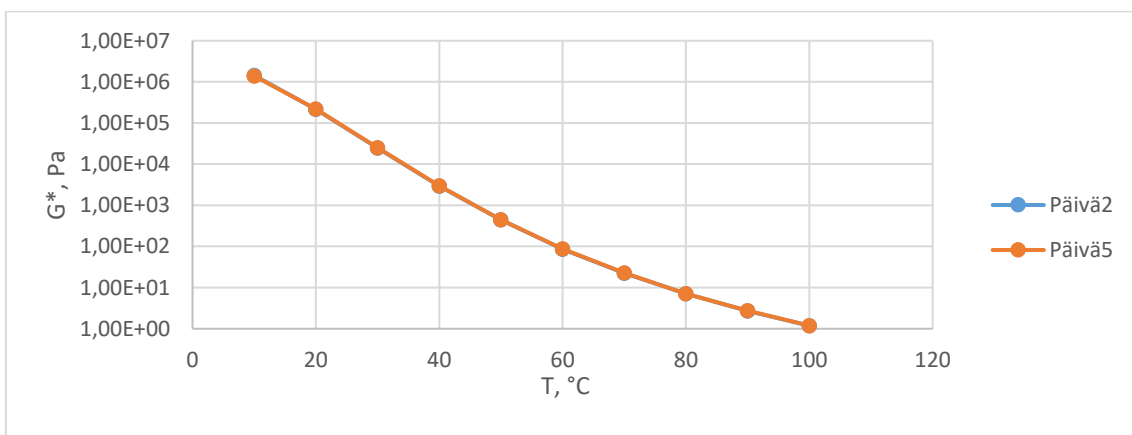
Kuvaaja 6.28. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



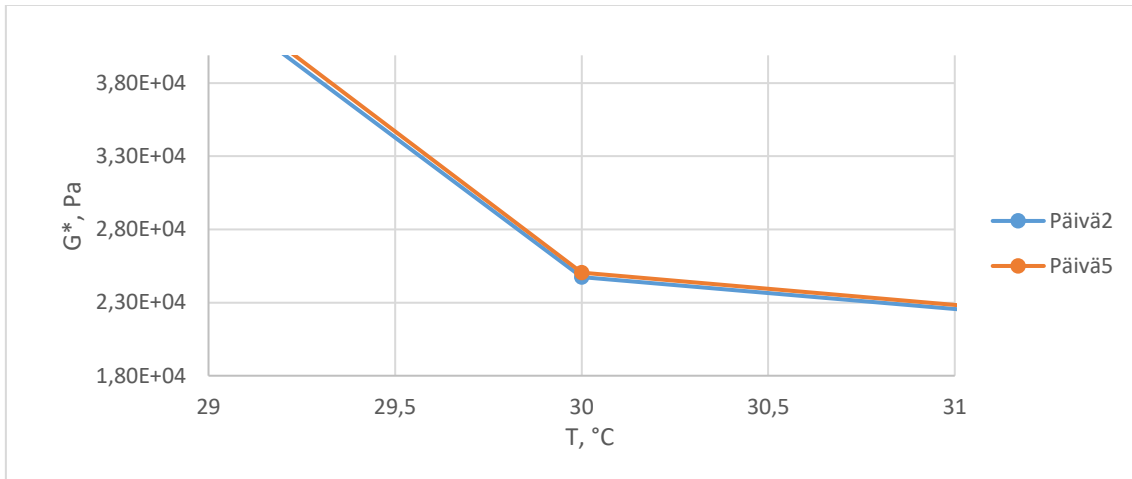
Kuvaaja 6.29. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



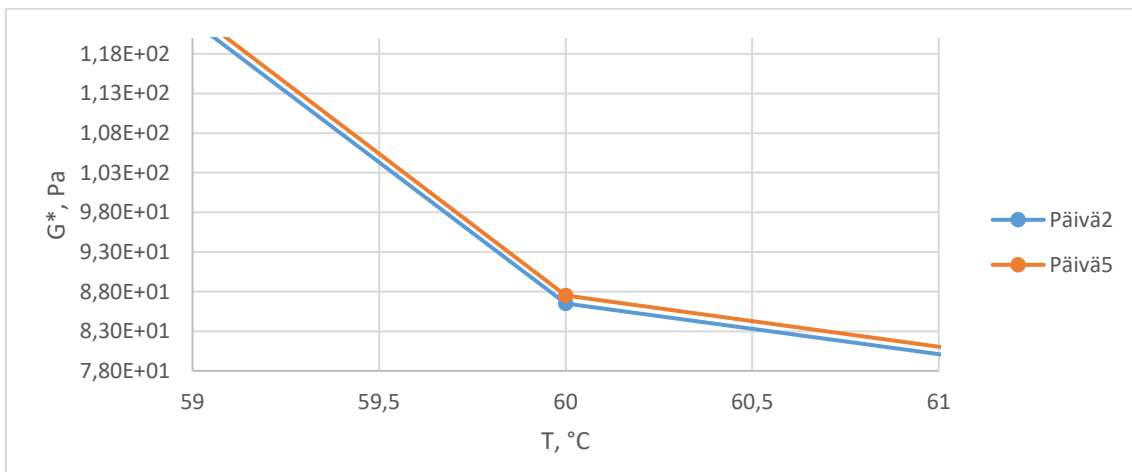
Kuvaaja 6.30. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



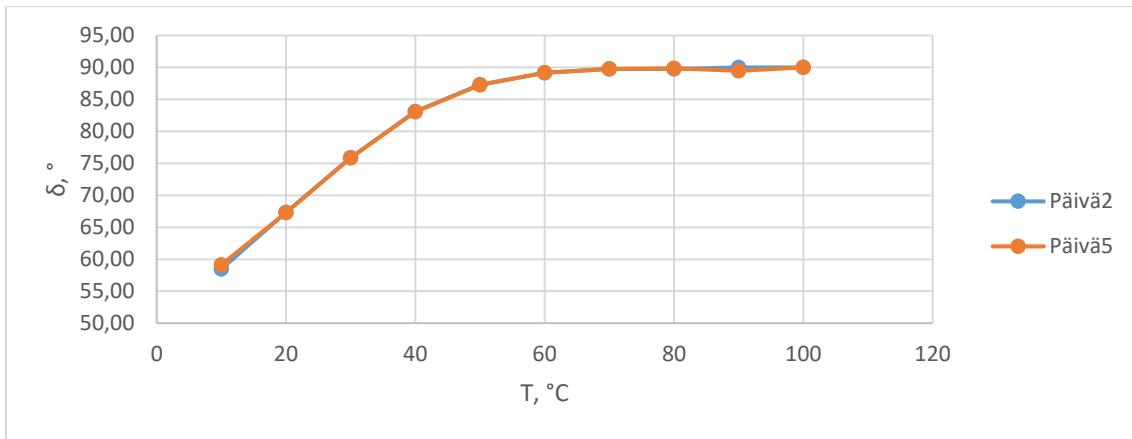
Kuvaaja 6.31. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



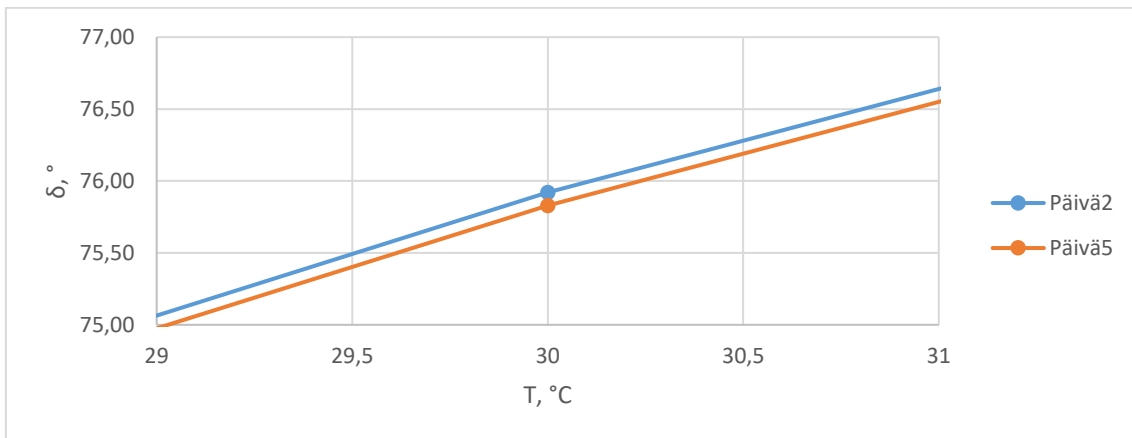
Kuvaaja 6.32. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



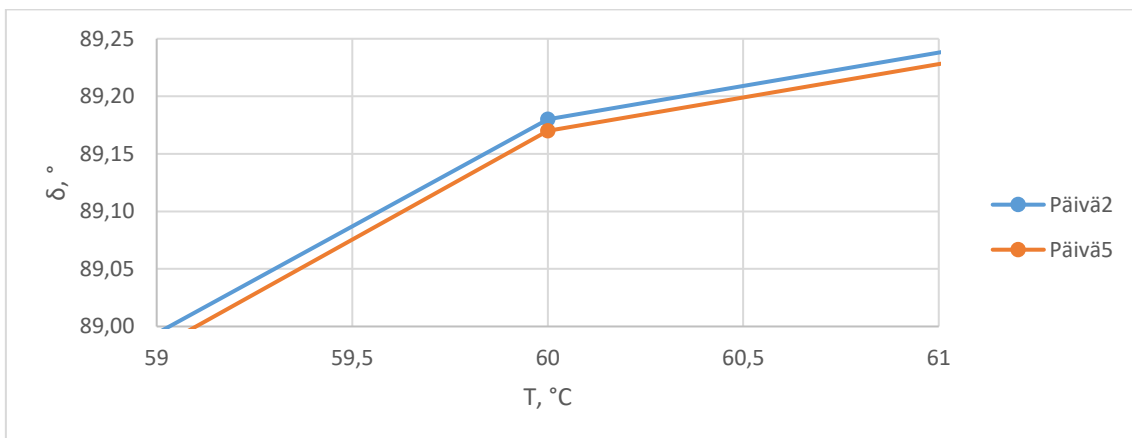
Kuvaaja 6.33. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.34. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.35. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz

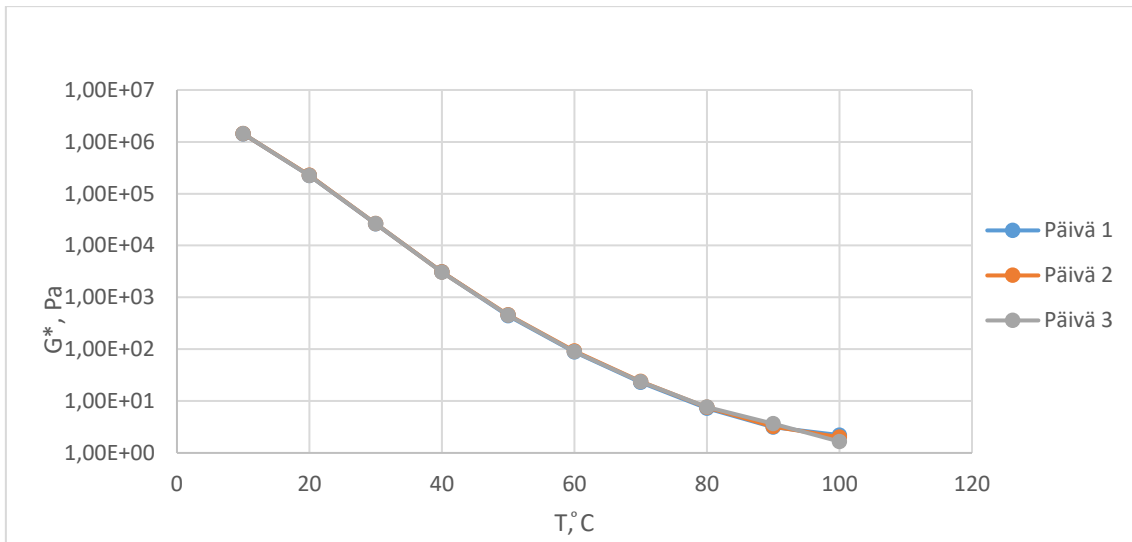


Kuvaaja 6.36. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz

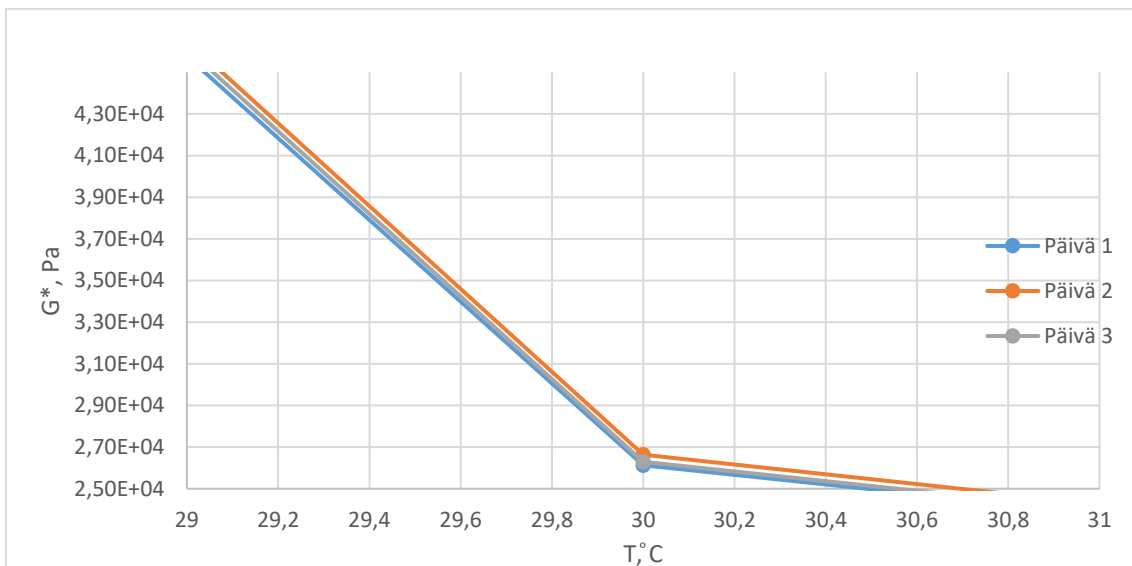
6.2 Bitumi 160/220 RTFOT, 8mm

Kuvaajissa 6.37 ja 6.40 esitetään eri ikäisten näytteiden kompleksimoduulien arvot eri taajuuksilla. Kuvaajissa 6.38, 6.39, 6.41 ja 6.42 esitetään tarkennetusti eri ikäisten näytteiden kompleksimoduuli tietyillä lämpötiloilla. Kuvaajista nähdään, etteivät eri päivien näytteet asetu ikäjärjestykseen.

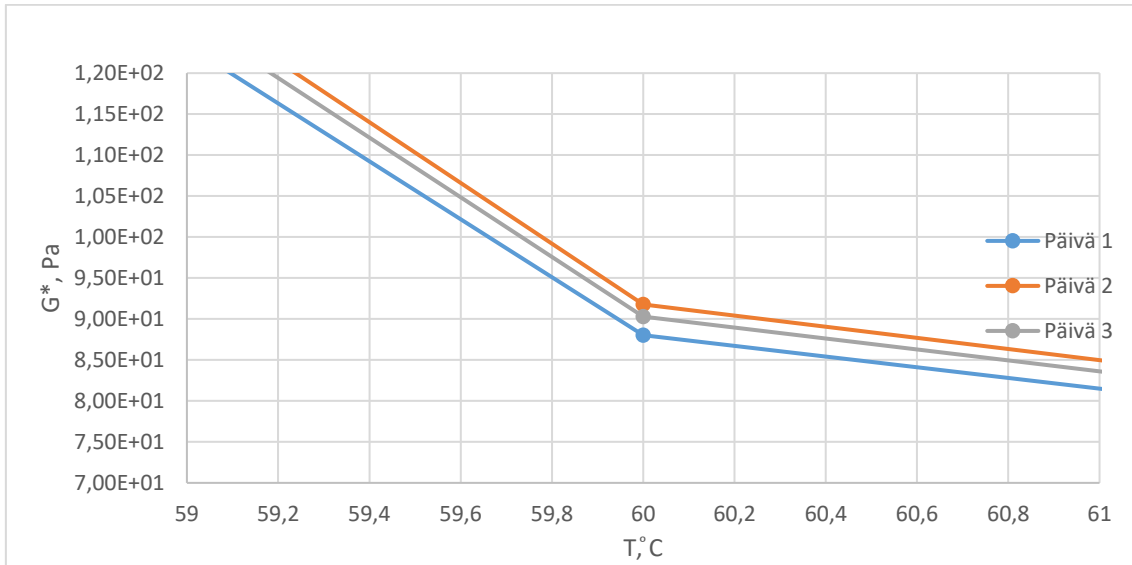
Kuvaajissa 6.43-6.48 esitetään eri ikäisten näytteiden vaihekulman riippuvuus lämpötilasta eri taajuuksilla. Kuvaajat eivät tässäkään tapauksessa asetu ikäjärjestykseen.



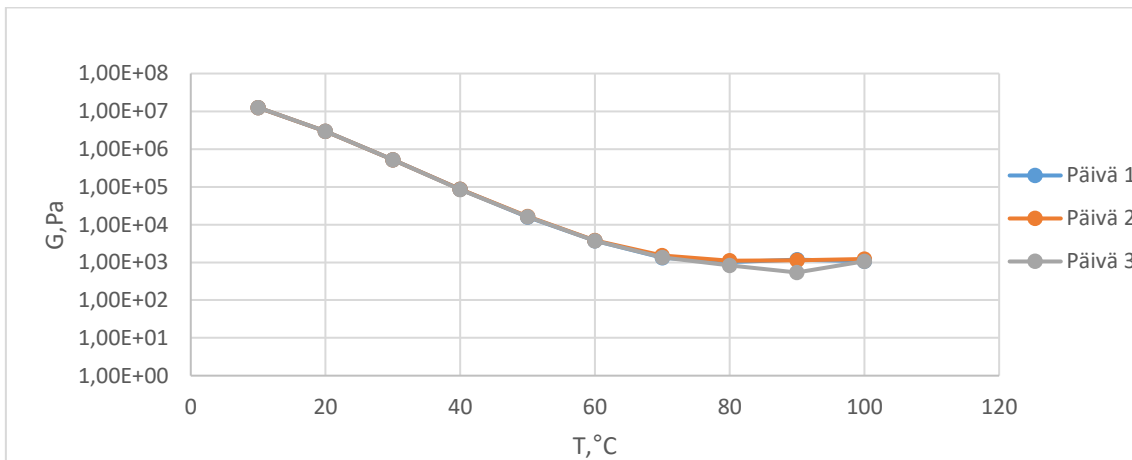
Kuvaaja 6.37. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



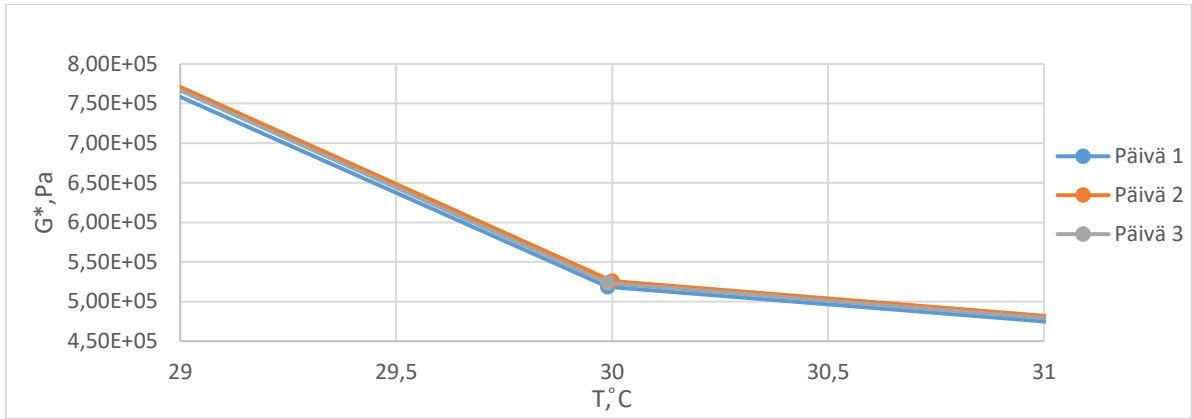
Kuvaaja 6.38. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



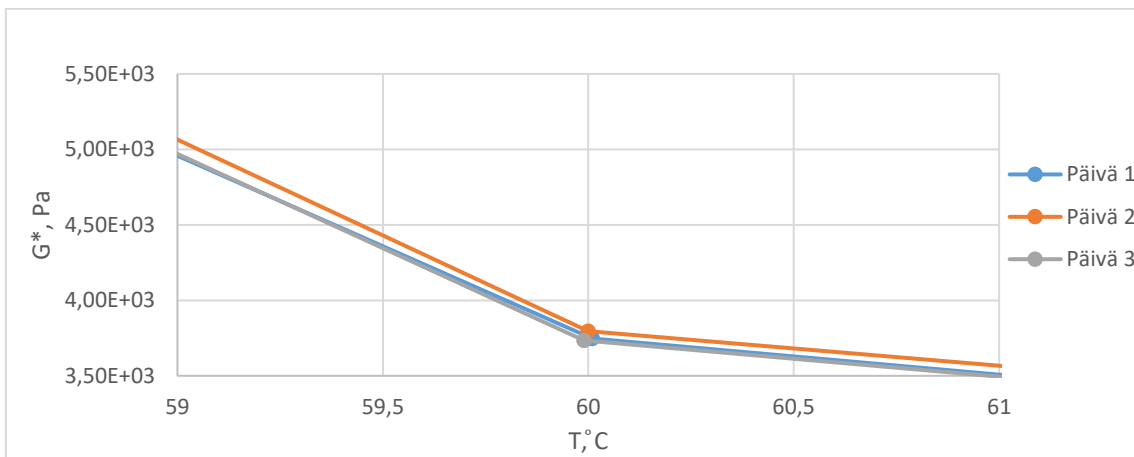
Kuvaaja 6.39. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu 60 °C kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



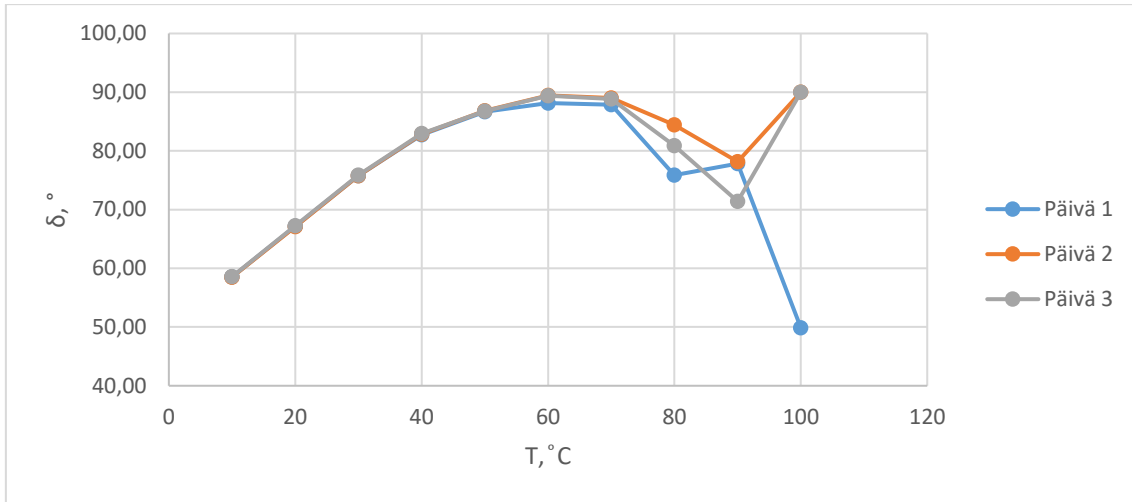
Kuvaaja 6.40. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



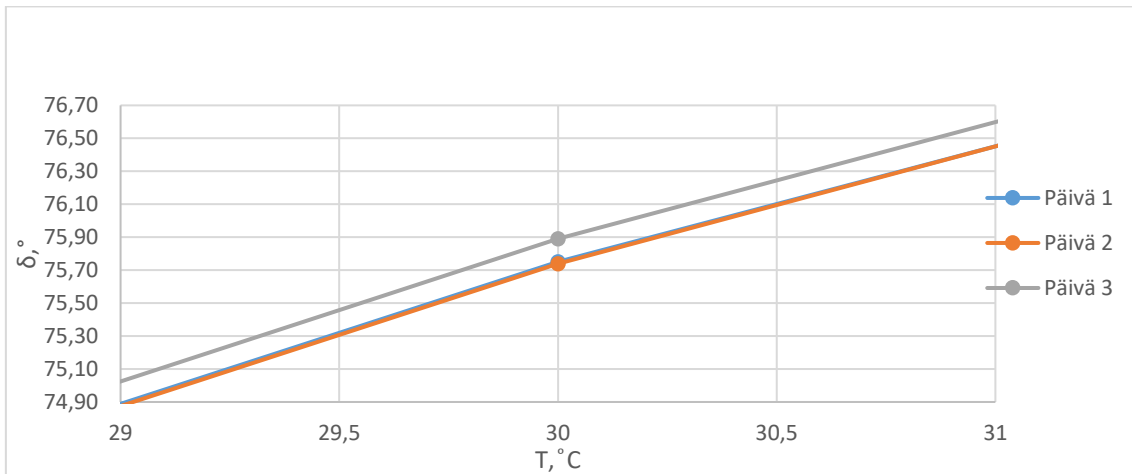
Kuvaaja 6.41. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



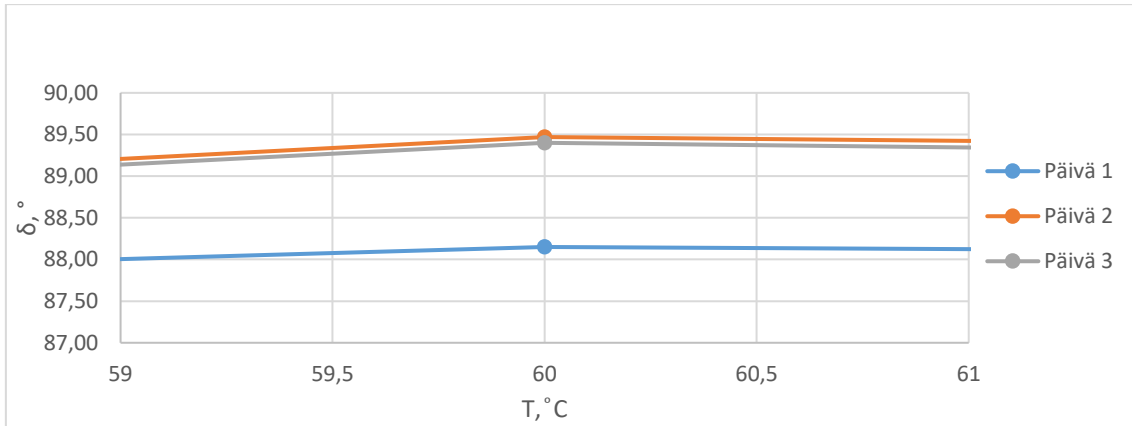
Kuvaaja 6.42. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



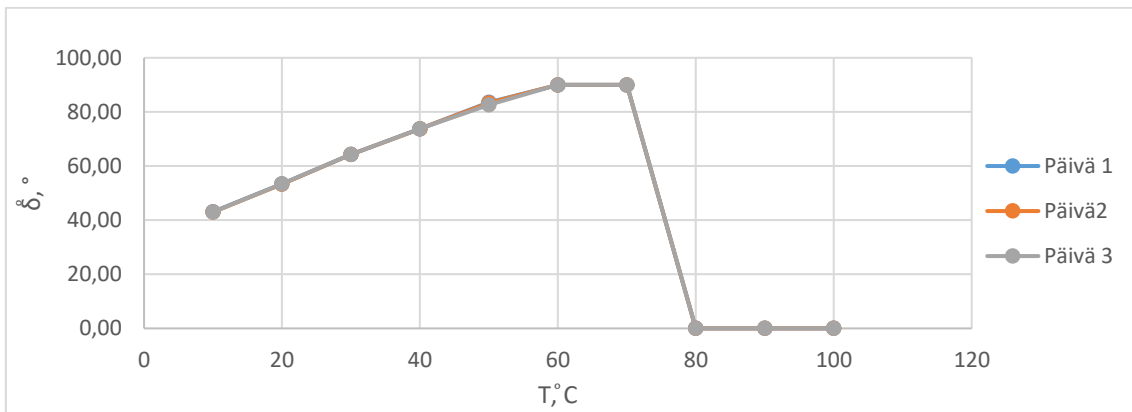
Kuvaaja 6.43. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



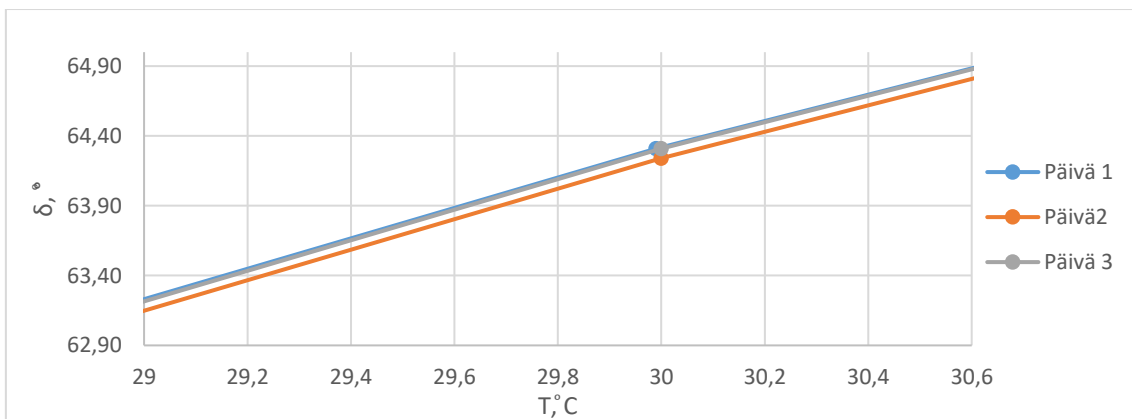
Kuvaaja 6.44. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



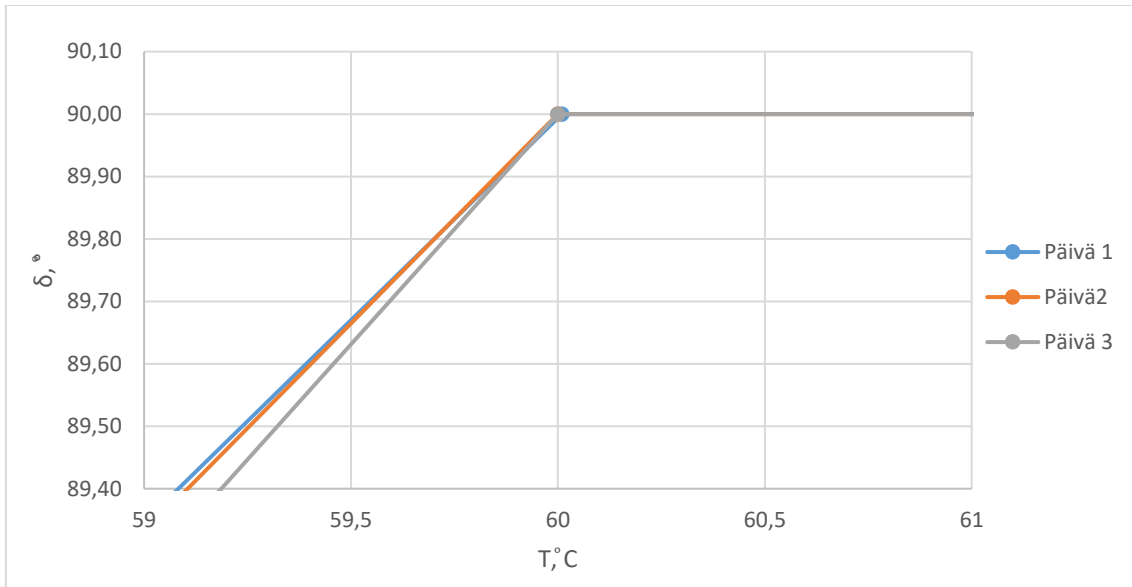
Kuvaaja 6.45. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.46. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



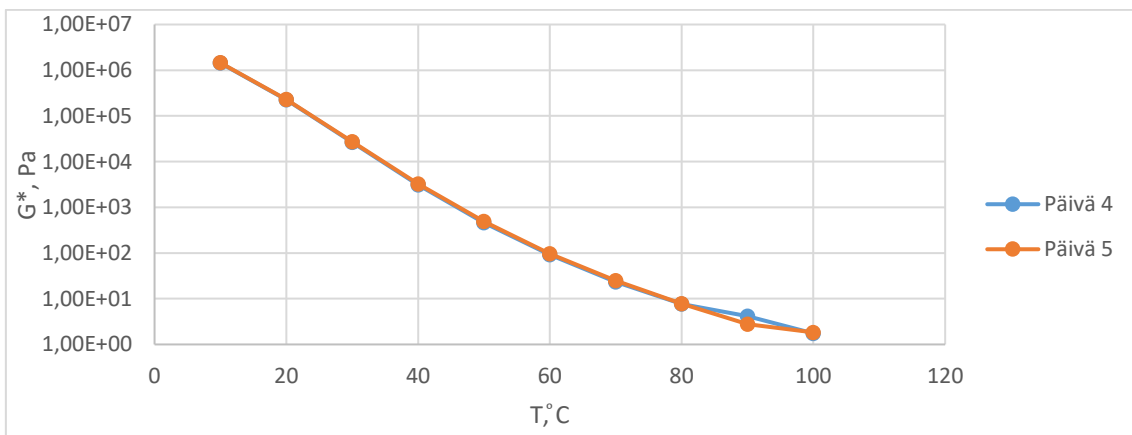
Kuvaaja 6.47. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



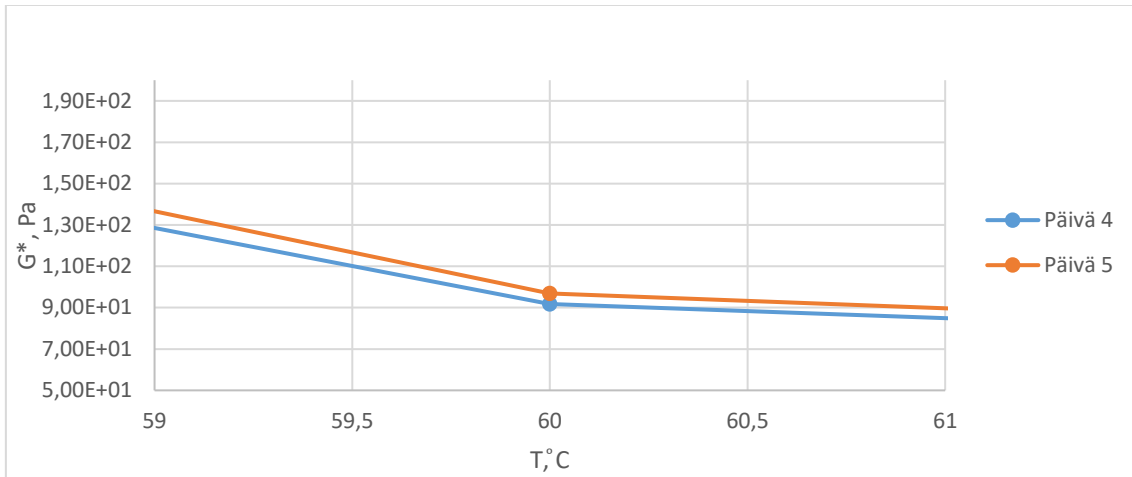
Kuvaaja 6.48. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

Alla olevissa kuvaajissa 6.49-6.54 kuvataan päivien 4 ja 5 näytteiden kompleksimoduulien riippuvuutta lämpötilasta. Tarkennetuissa kuvaajissa näkyy, että näytteet asettuvat ikäjärjestykseen. Jokaisessa tarkennetussa kuvassa päivän 5 näytteellä oli korkeampi kompleksimoduuli kuin päivän 4 näytteellä.

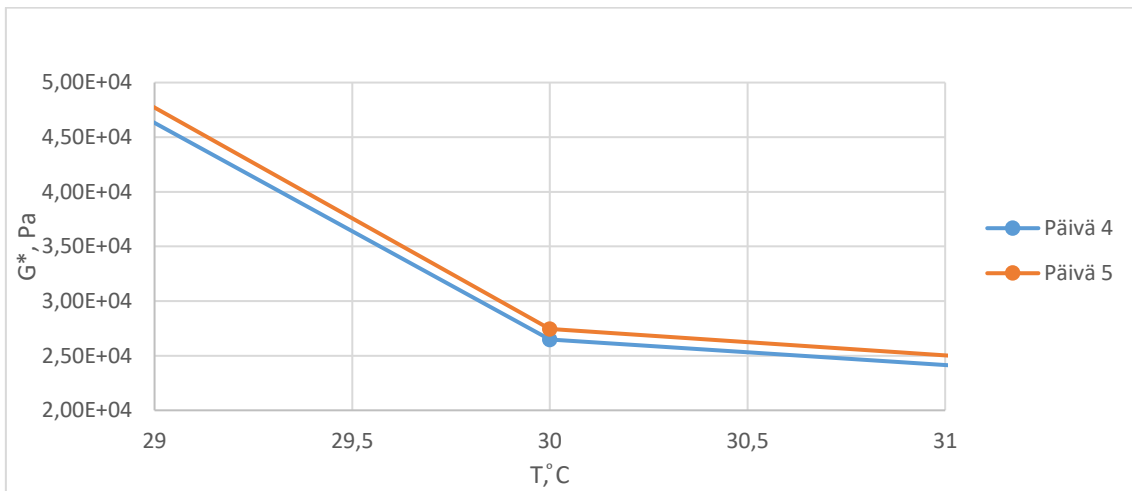
Kuvaajissa 6.55-6.60 kuvataan vaihekulman vaikutusta lämpötilaan. Kuvaajasta 5.58 nähdään, että koe ei antanut luotettavaa arvoa korkeassa lämpötilassa ja korkealla taajuudella. Tarkennetuista kuvaajista nähdään, että jokaisessa tarkastelupisteessä vaihekulma on suurempi päivän 4 näytteessä. Näytteen vanheneminen voisi osaksi selittää tätä.



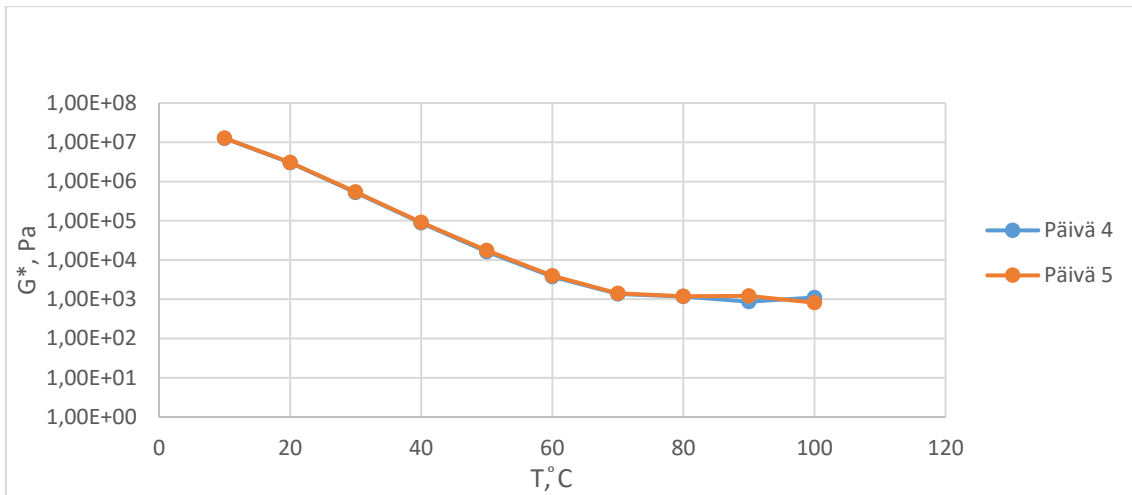
Kuvaaja 6.49. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



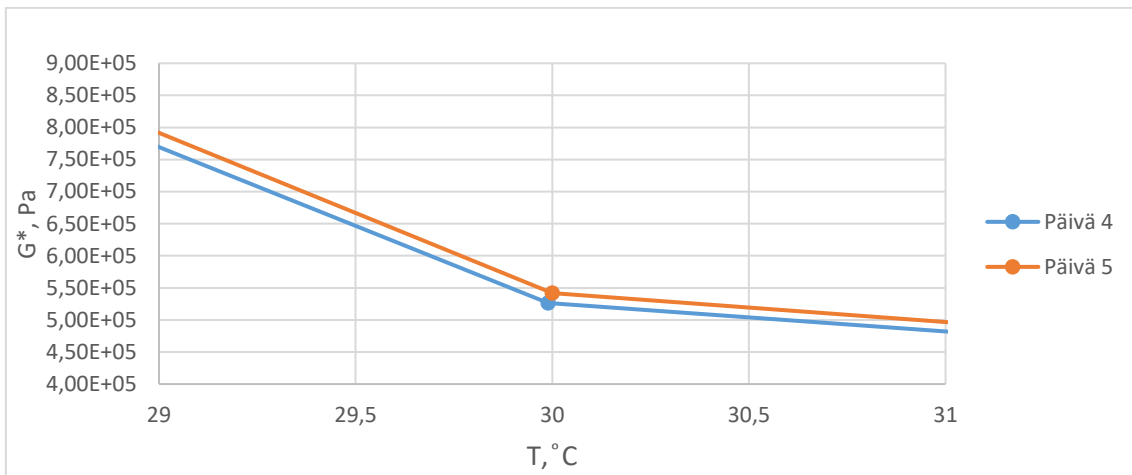
Kuvaaja 6.50. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



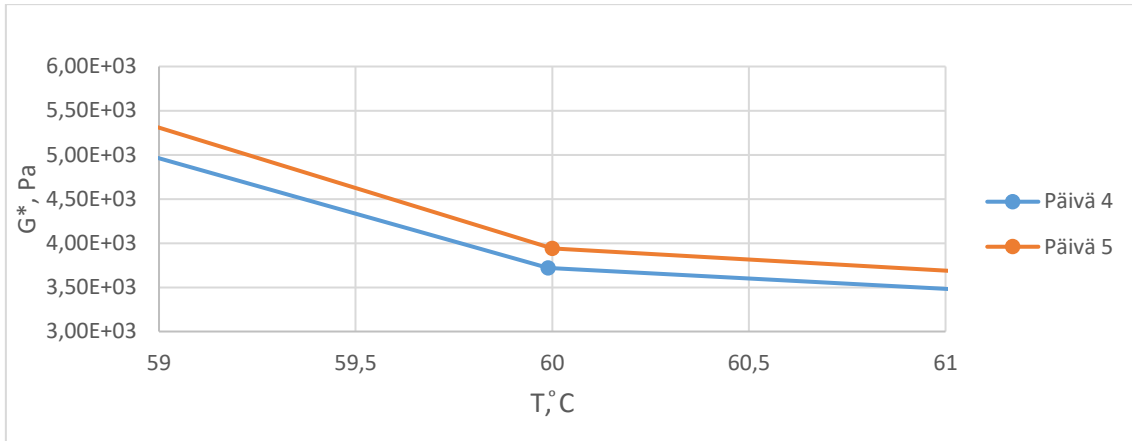
Kuvaaja 6.51. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



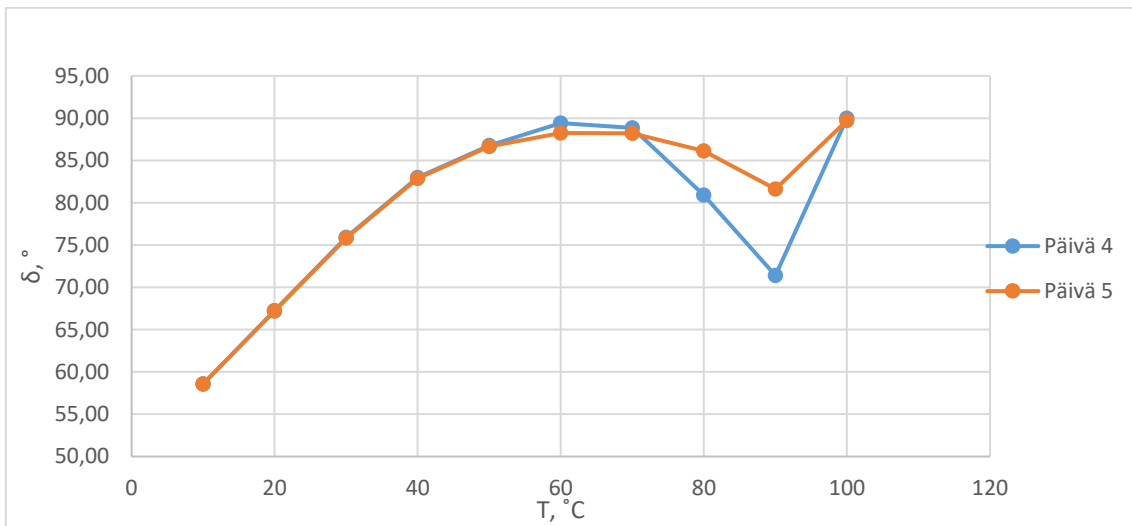
Kuvaaja 6.52. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



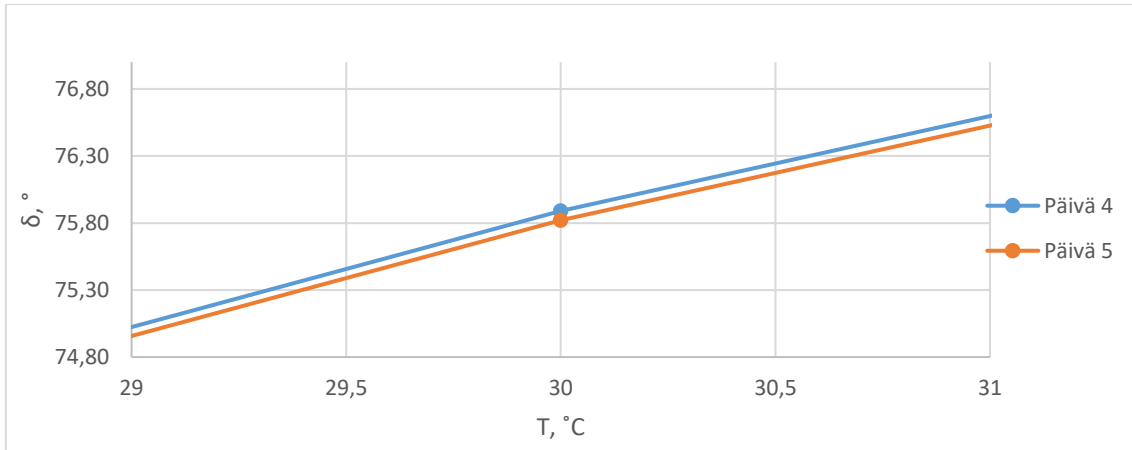
Kuvaaja 6.53. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



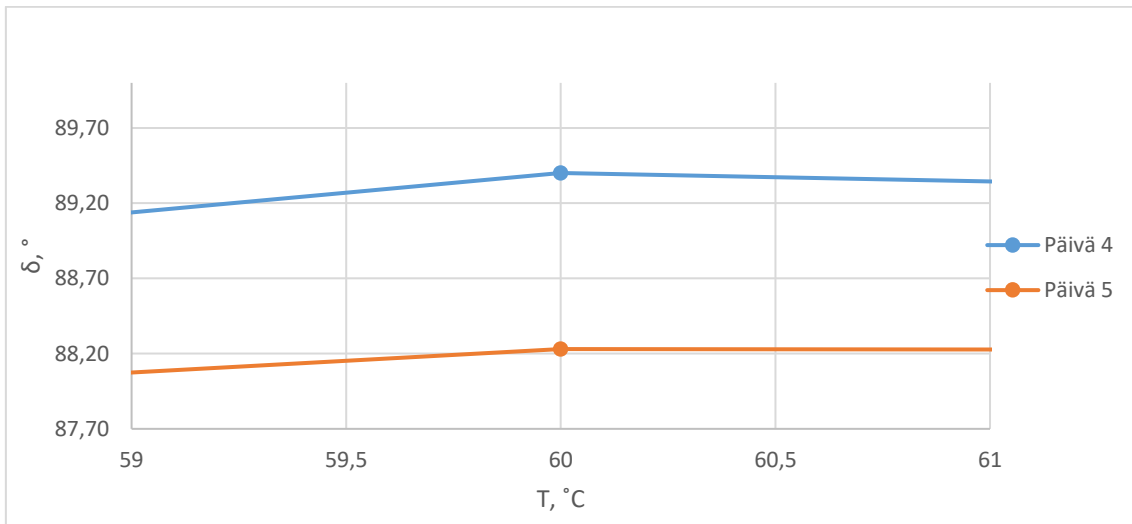
Kuvaaja 6.54. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



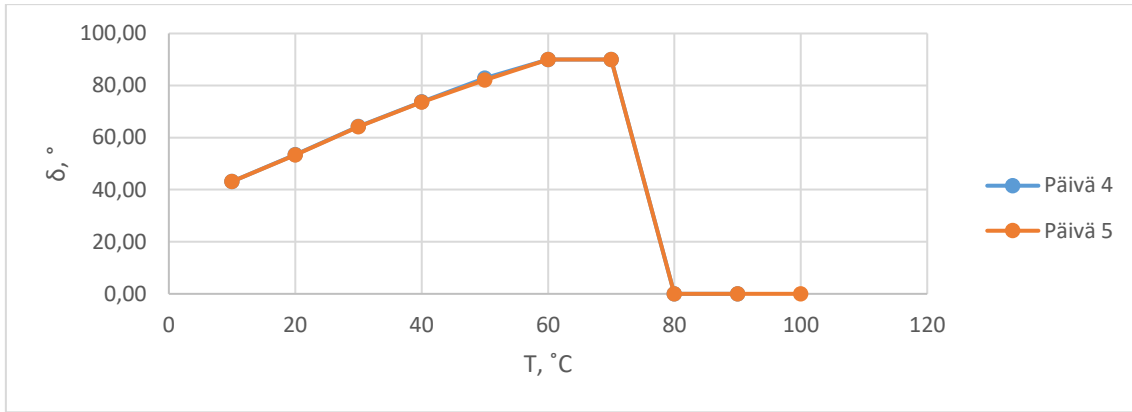
Kuvaaja 6.55. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



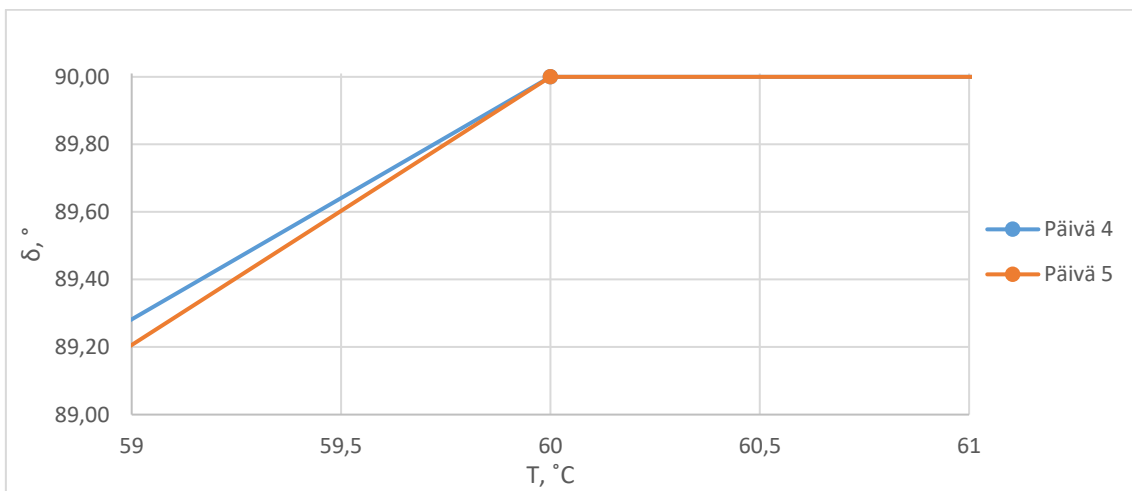
Kuvaaja 6.56. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



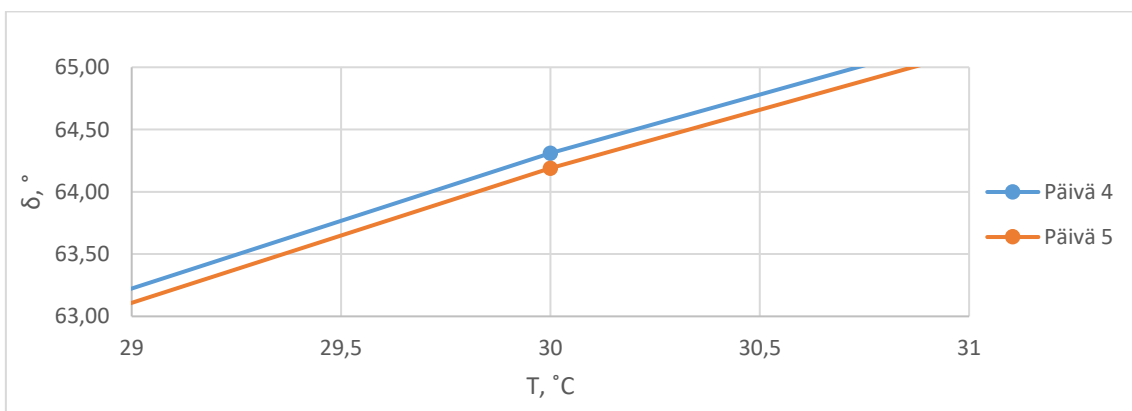
Kuvaaja 6.57. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.58. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

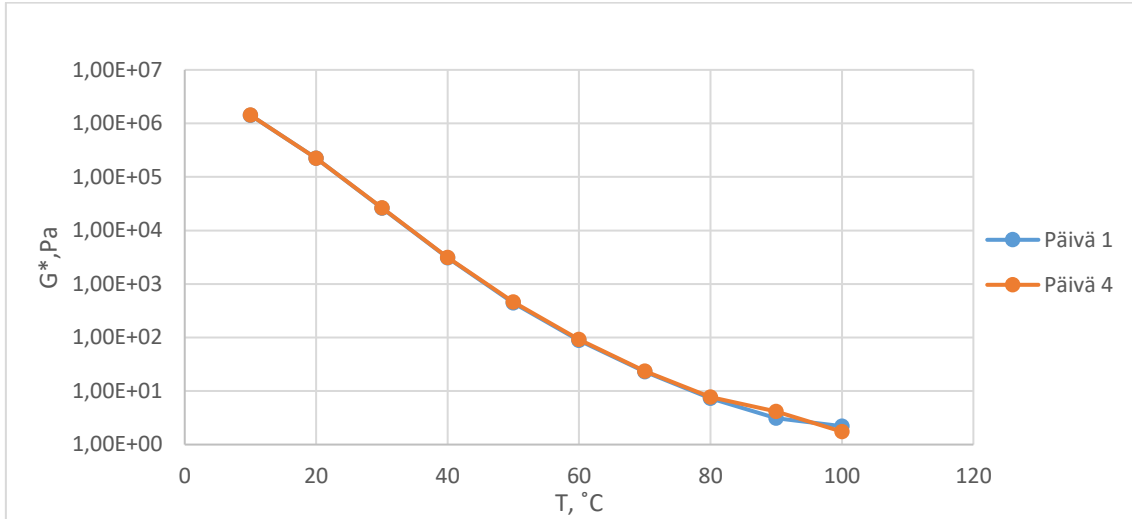


Kuvaaja 6.59. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

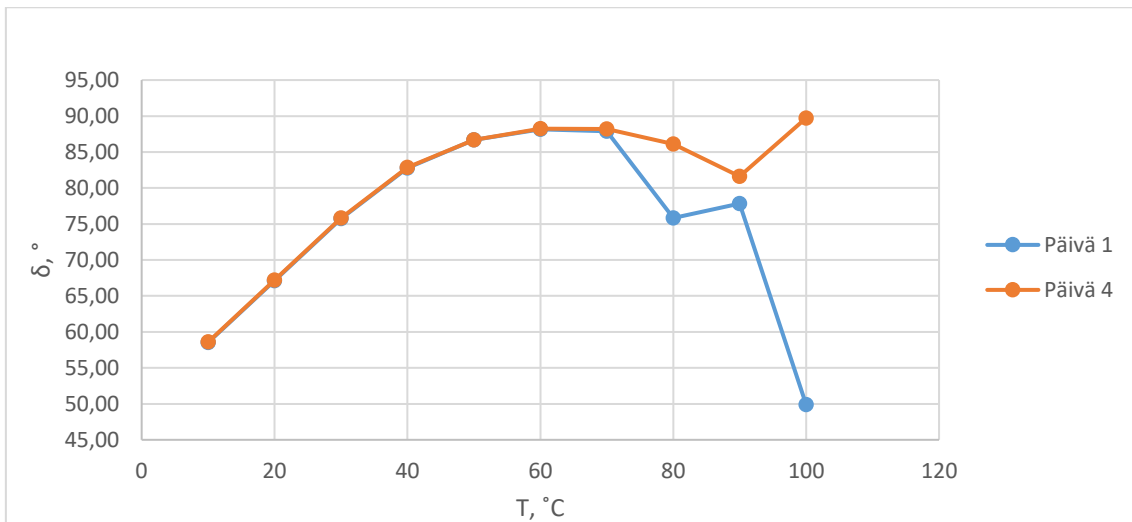


Kuvaaja 6.60. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

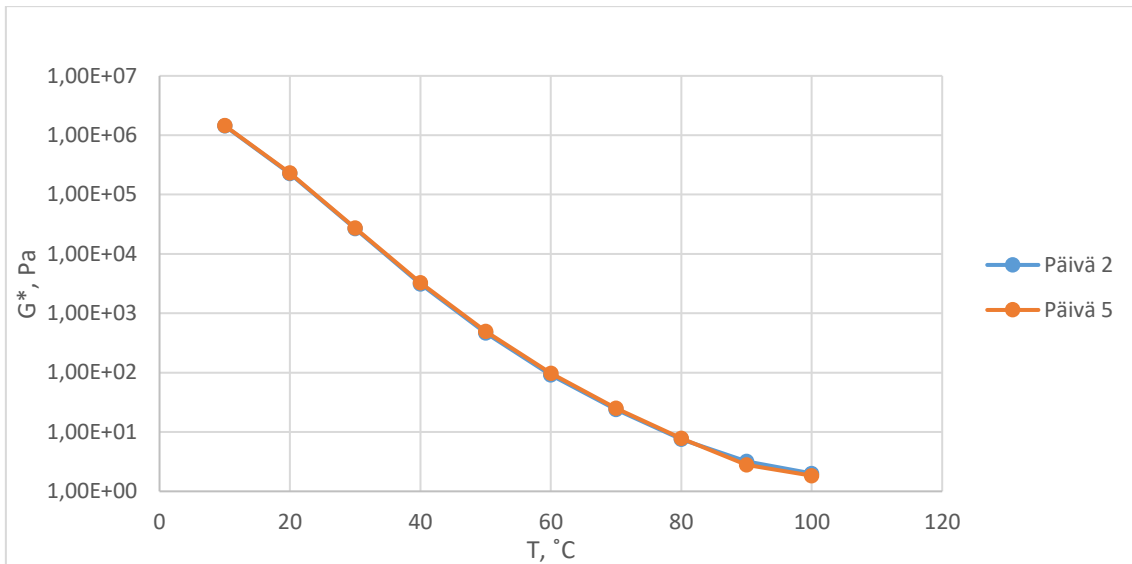
Seuraavissa kuvaajissa verrataan näytteitä 1 ja 4 sekä 2 ja 5.



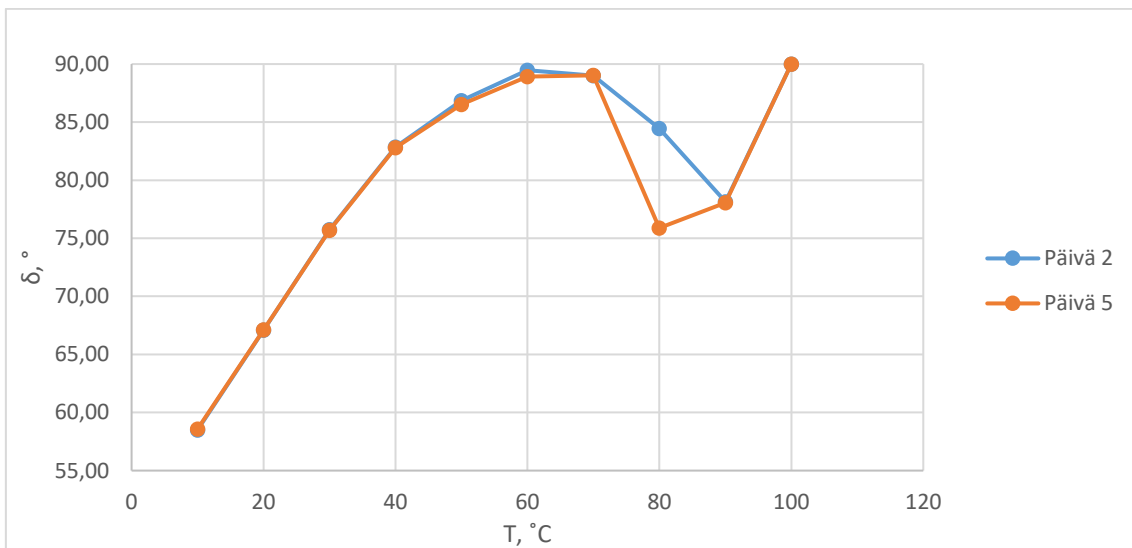
Kuvaaja 6.61. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilän suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.62. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilän suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.63. Bitumin 160/220 RTFOT kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz

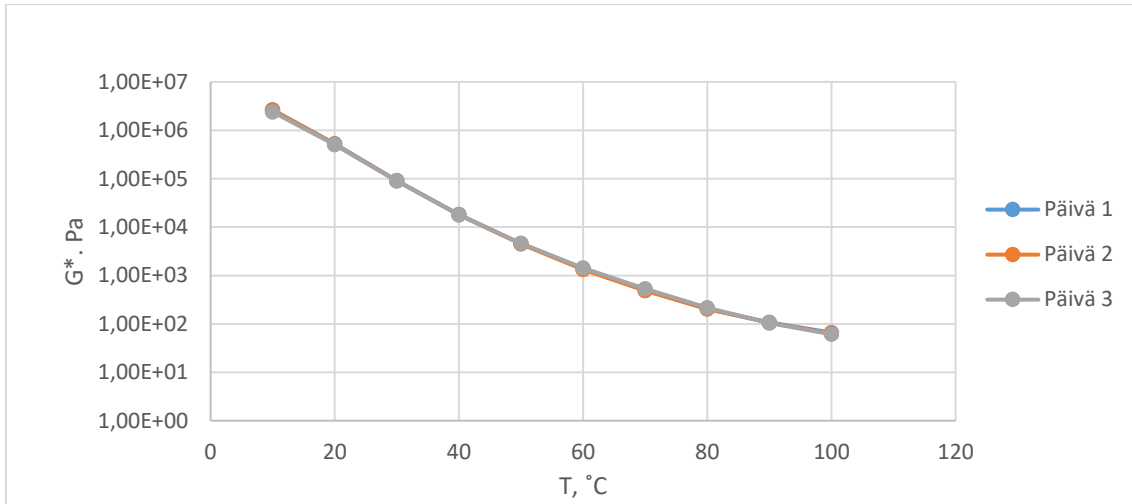


Kuvaaja 6.64. Bitumin 160/220 RTFOT vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz

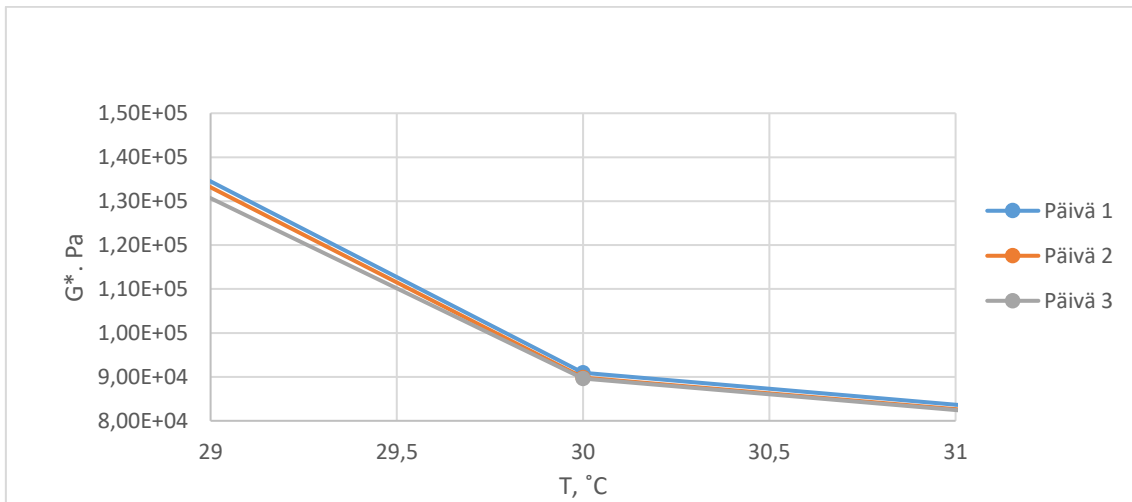
6.3 Kumibitumi: KB_RTFO_T_PAV_A 8mm

Tässä alaluvussa esitetään kumibitumin kuvaajat eri ikäisillä näytteillä. Kuvaajat 6.65-6.70 kuvaavat päivien 1,2 ja 3 kompleksimoduulien riippuvuutta lämpötiloista. Kuvaajista nähdään, että näytteet asettuvat lähtökohtaisesti iän mukaiseen järjestykseen.

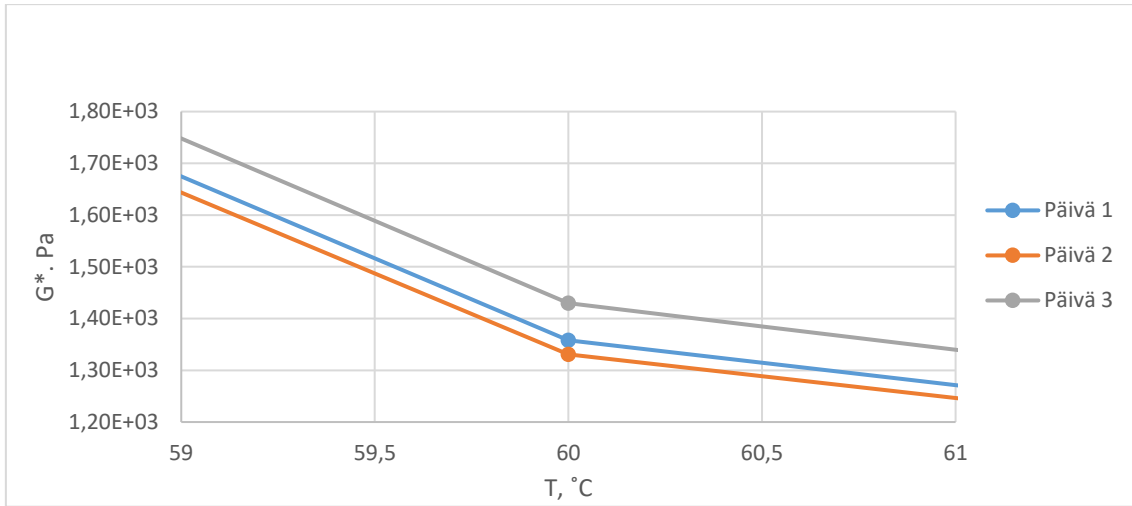
Kuvaajat 6.71-6.76 kuvaavat vaihekulman riippuvuutta lämpötilasta. Kuvaajat asettuvat ikäjärjestykseen.



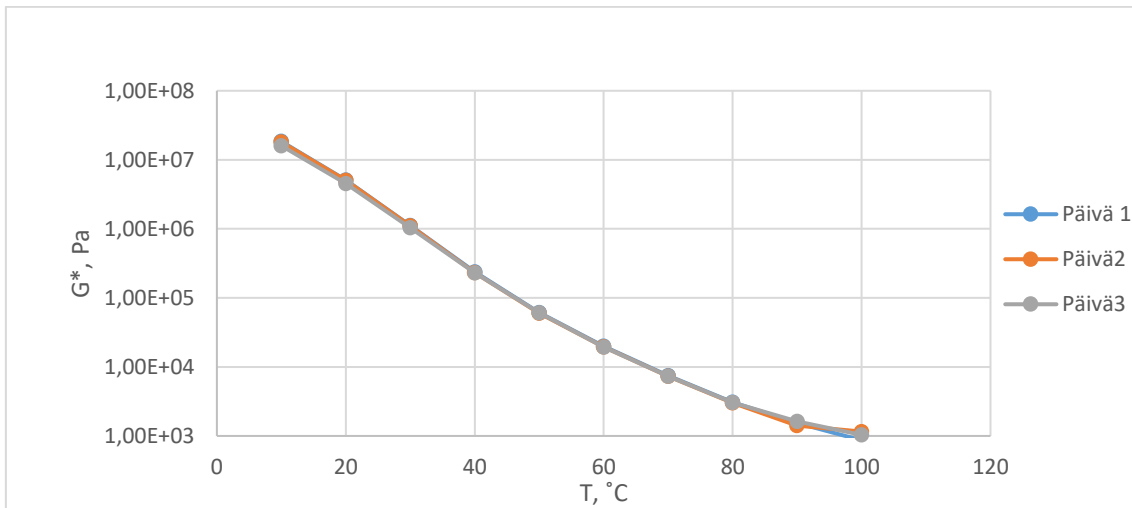
Kuvaaja 6.65. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



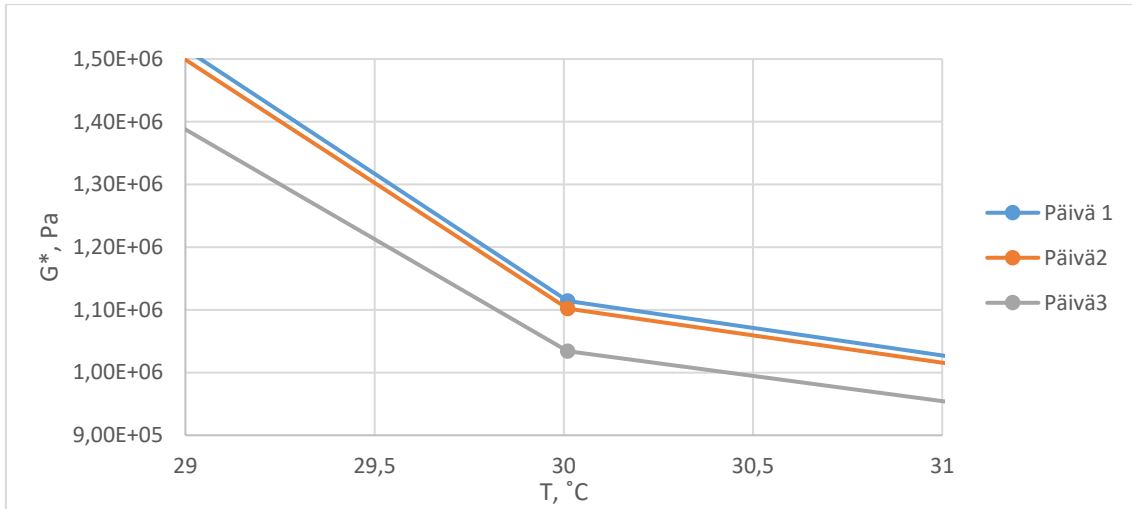
Kuvaaja 6.66. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



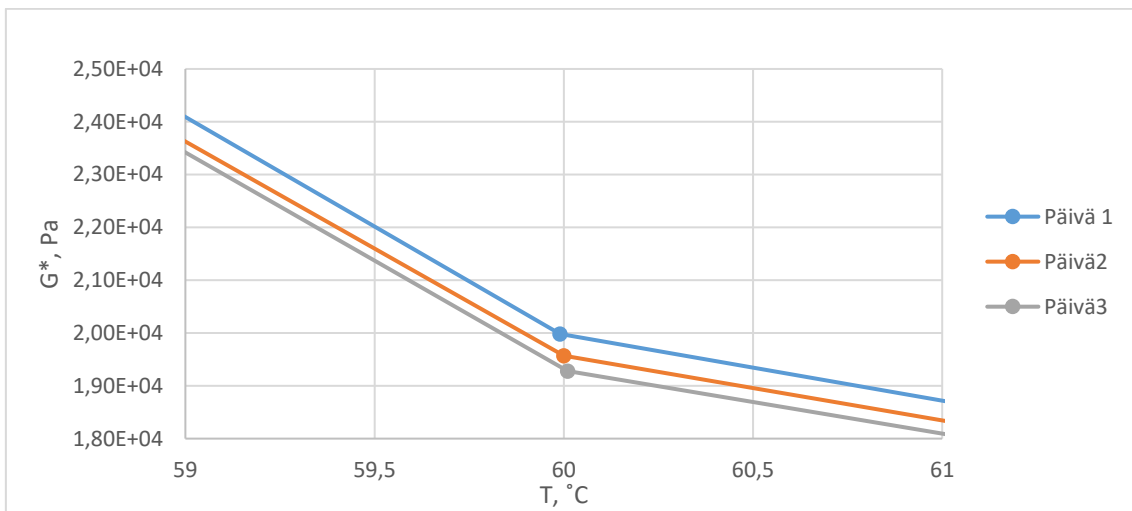
Kuvaaja 6.67. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



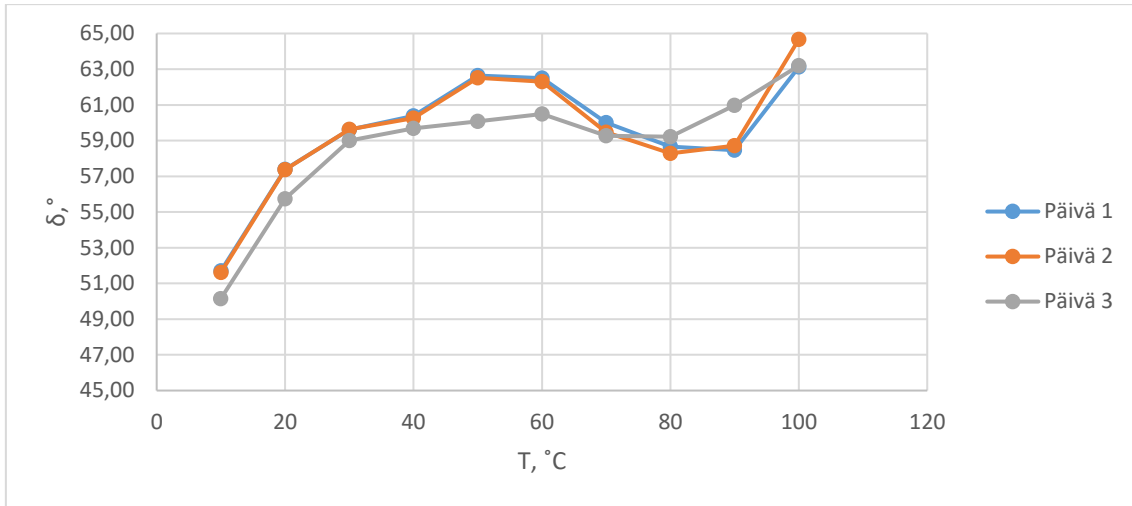
Kuvaaja 6.68. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



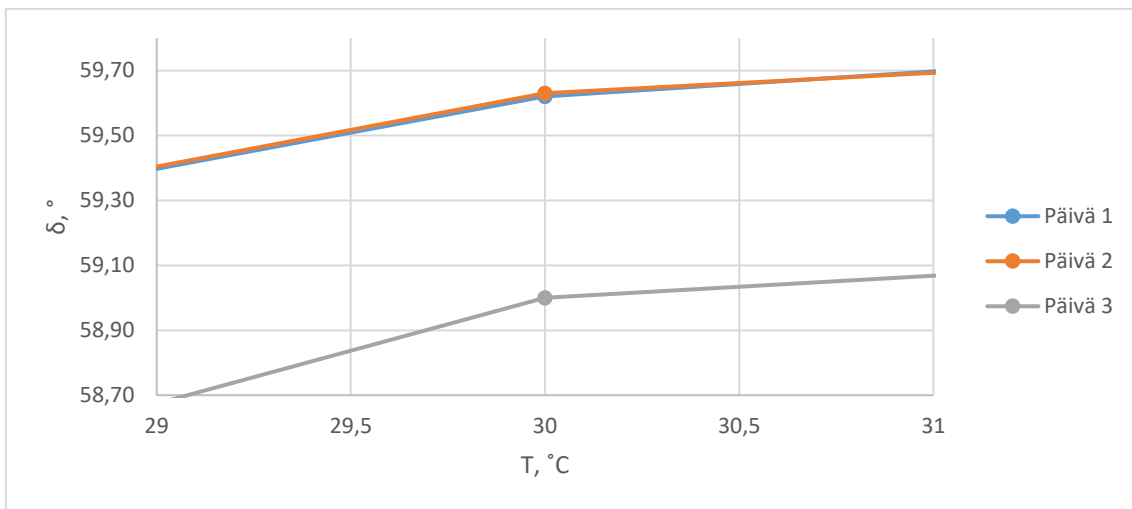
Kuvaaja 6.69. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



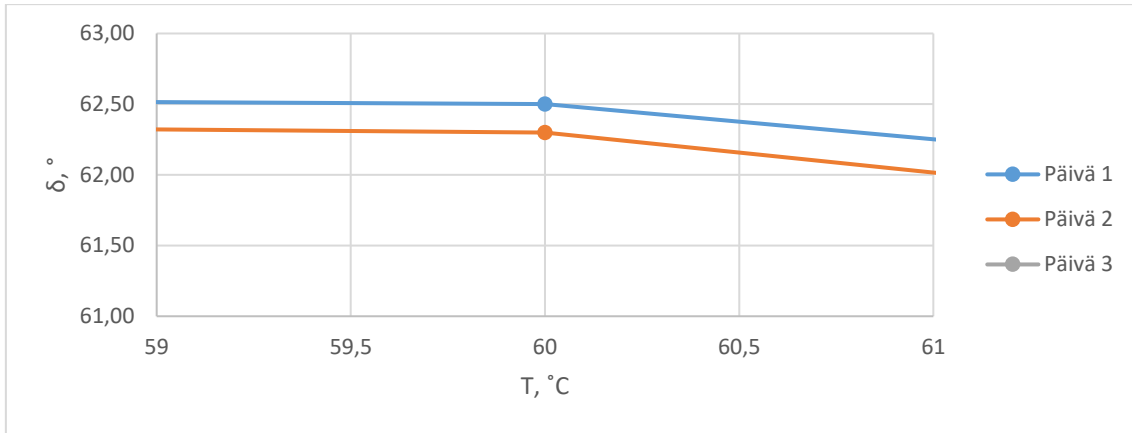
Kuvaaja 6.70. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



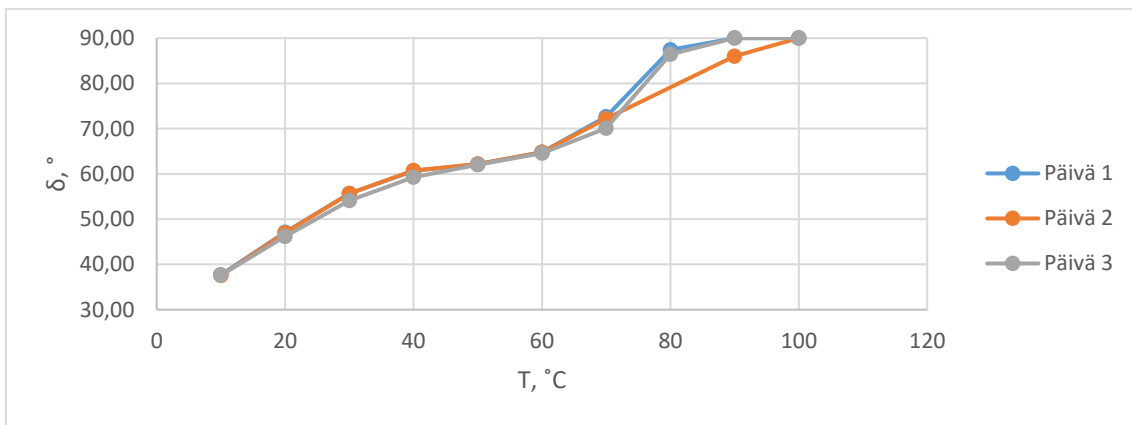
Kuvaaja 6.71. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



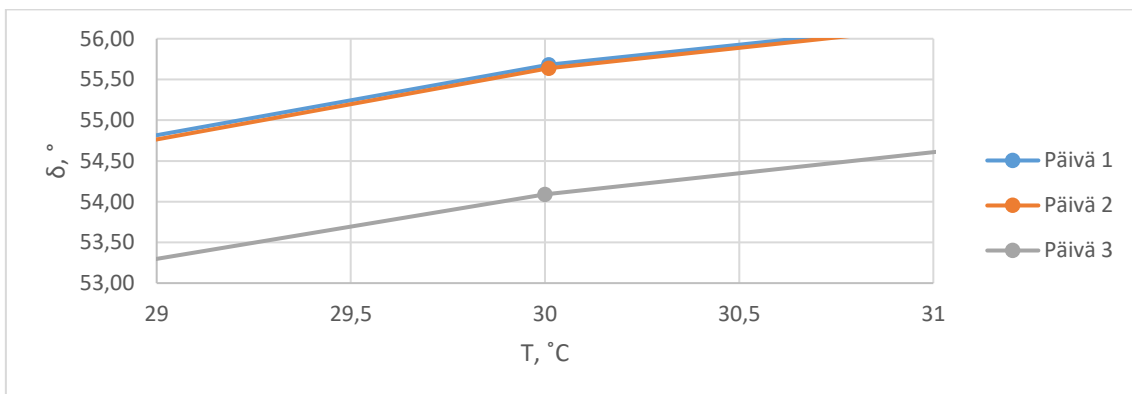
Kuvaaja 6.72. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



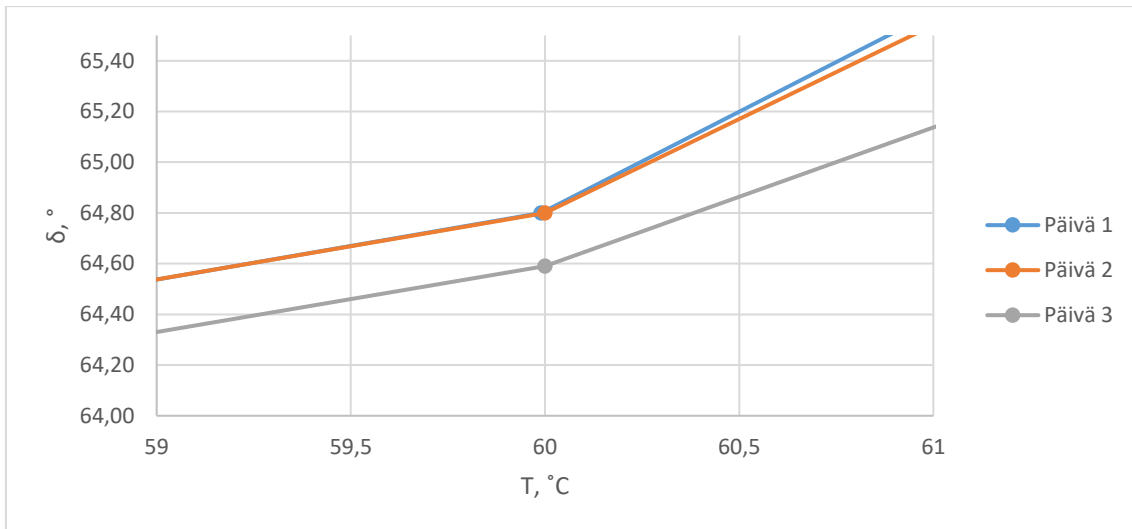
Kuvaaja 6.73. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.74. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

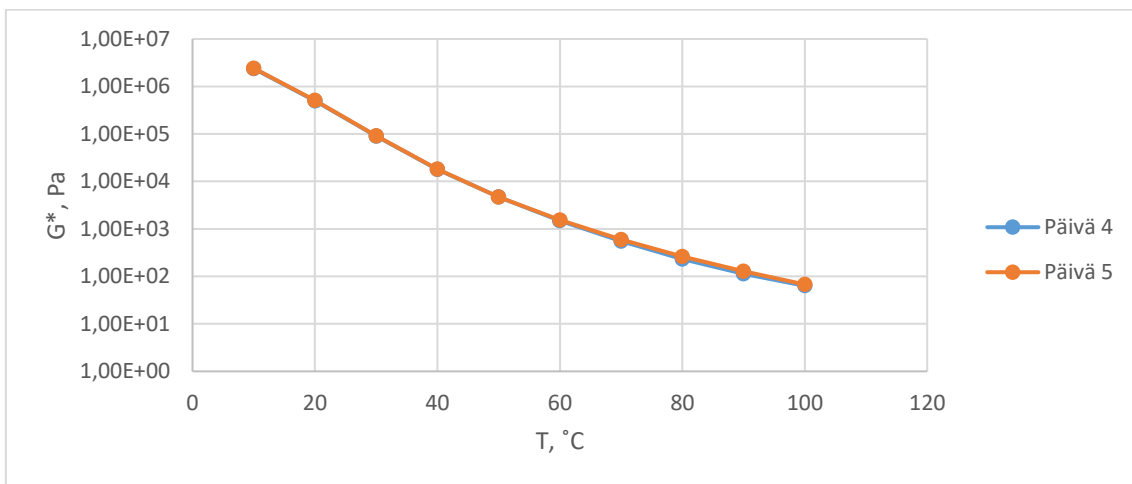


Kuvaaja 6.75. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

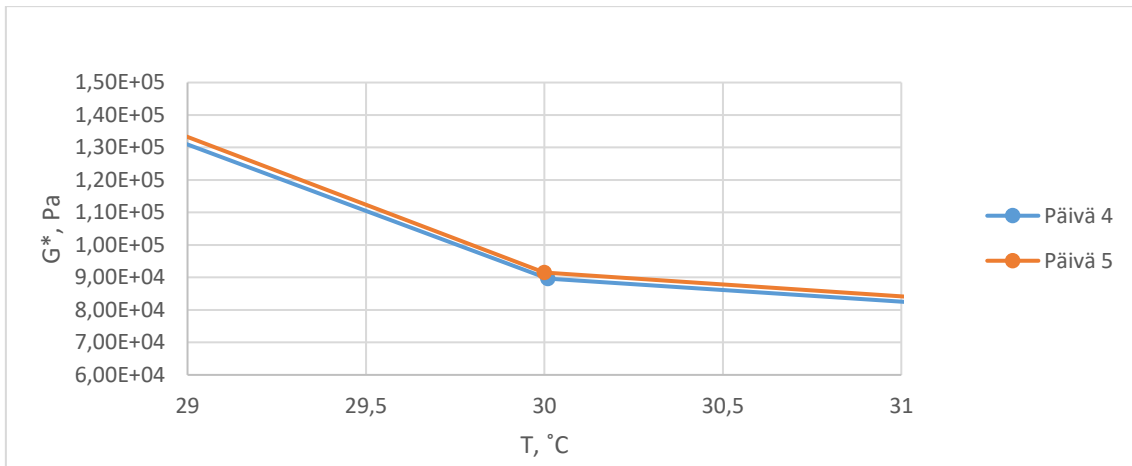


Kuvaaja 6.76. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

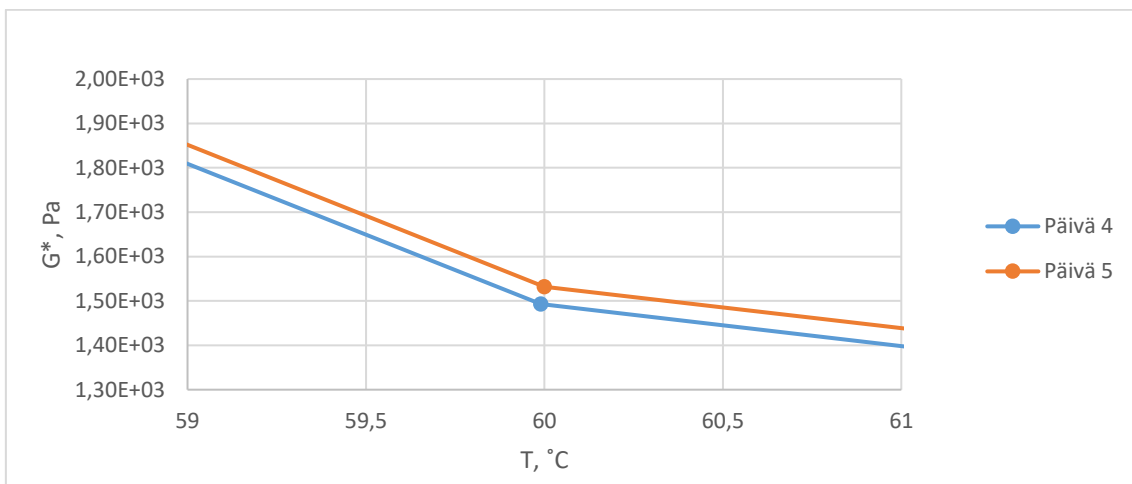
Alla olevissa kuvaajissa esitetään päivien 4 ja 5 kompleksimoduulien ja vaihekulmien riippuvuus eri lämpötiloista.



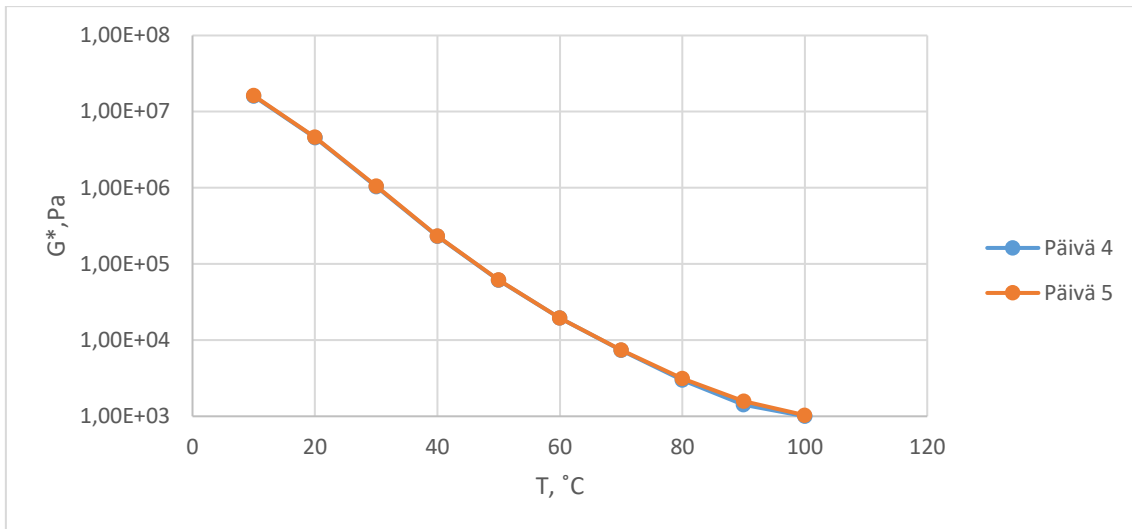
Kuvaaja 6.77. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



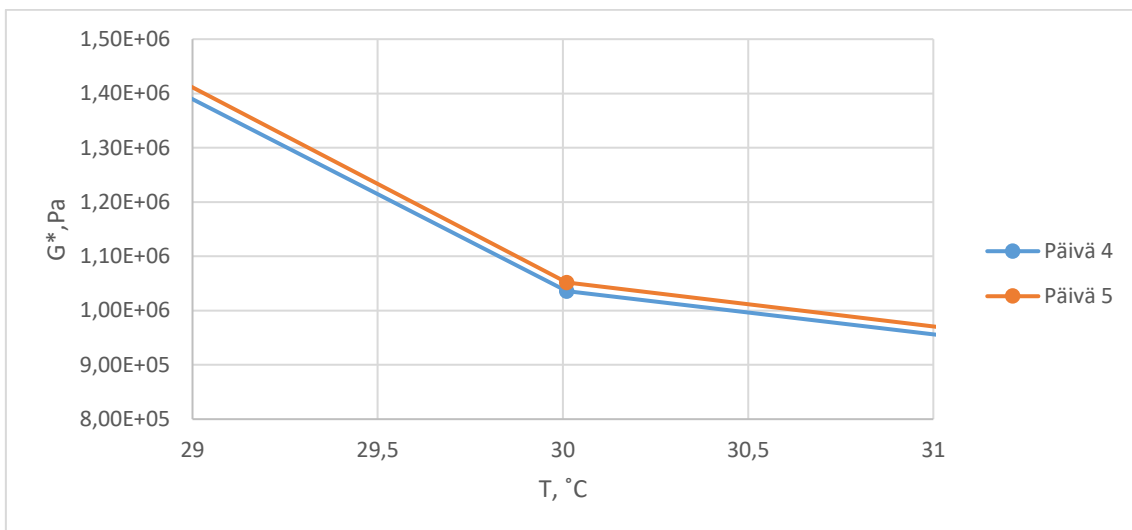
Kuvaaja 6.78. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



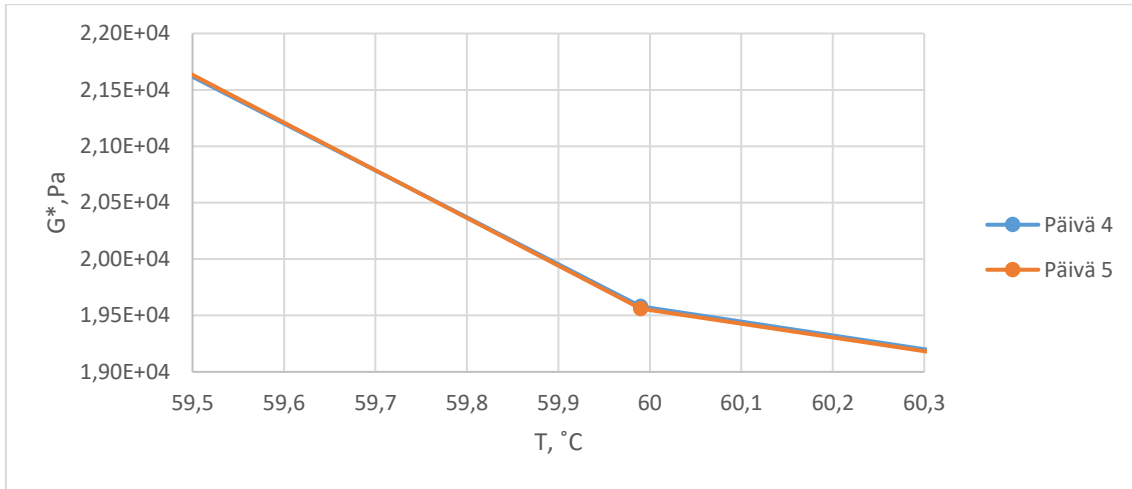
Kuvaaja 6.79. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



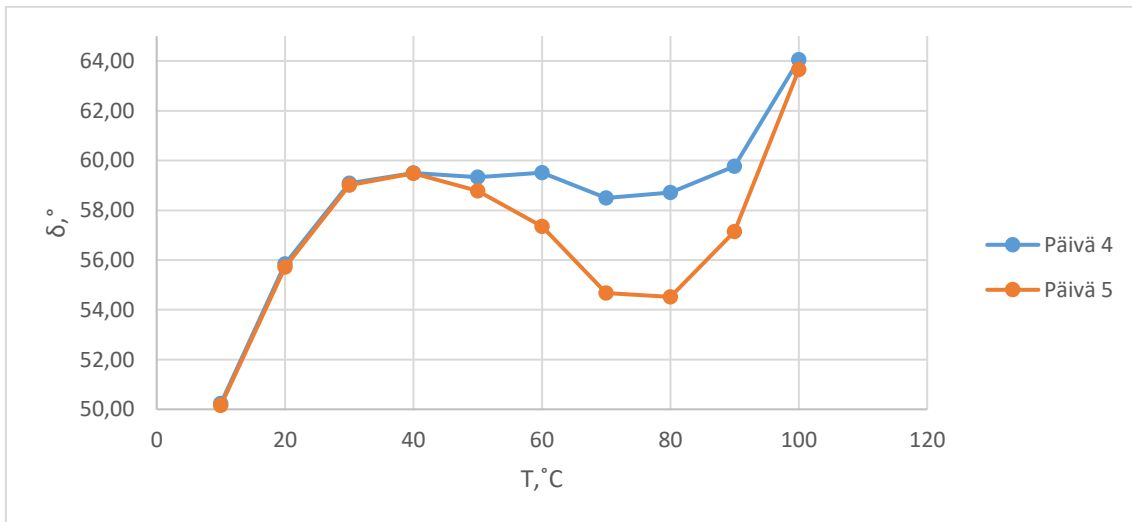
Kuvaaja 6.80. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



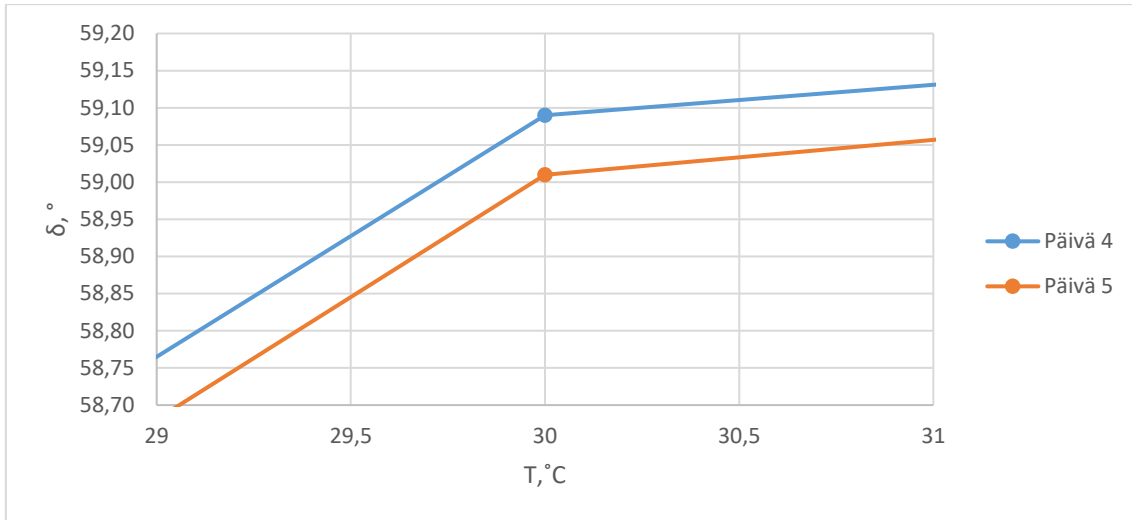
Kuvaaja 6.81. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



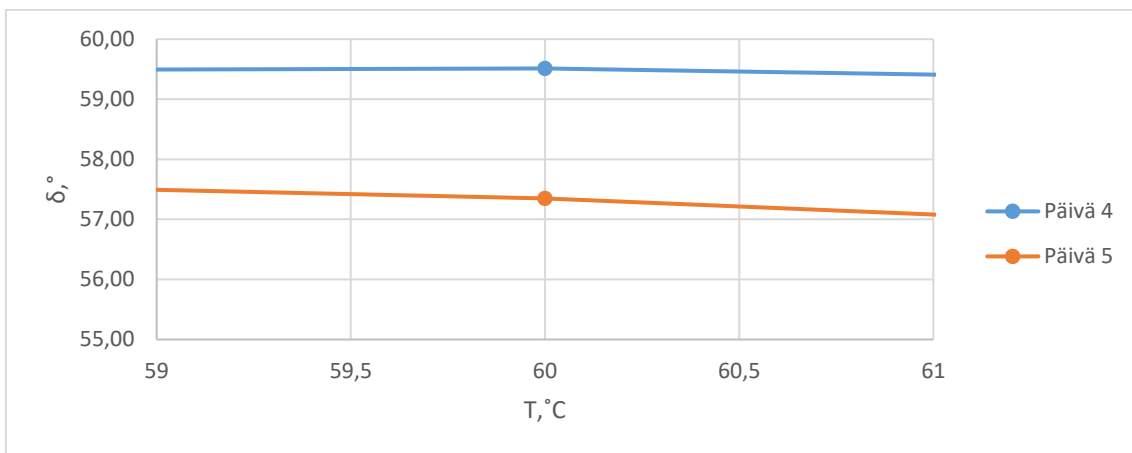
Kuvaaja 6.82. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz



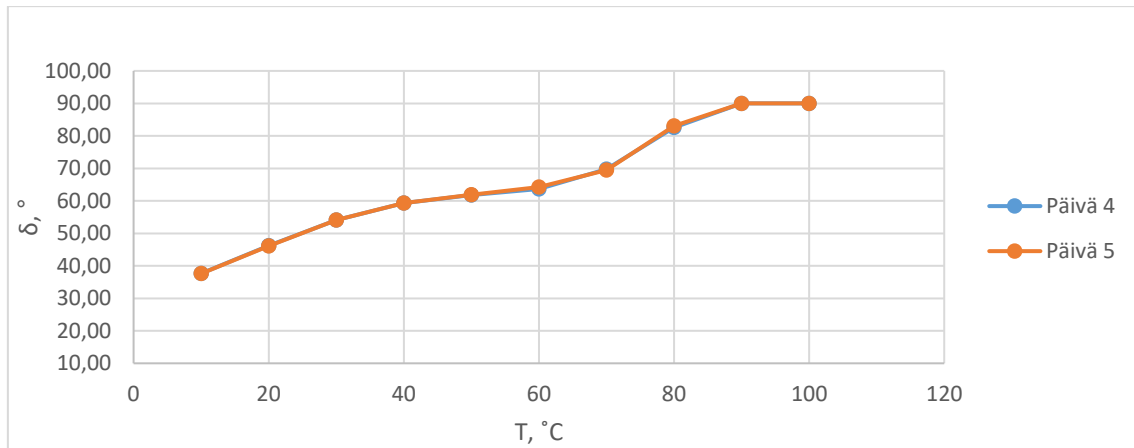
Kuvaaja 6.83. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



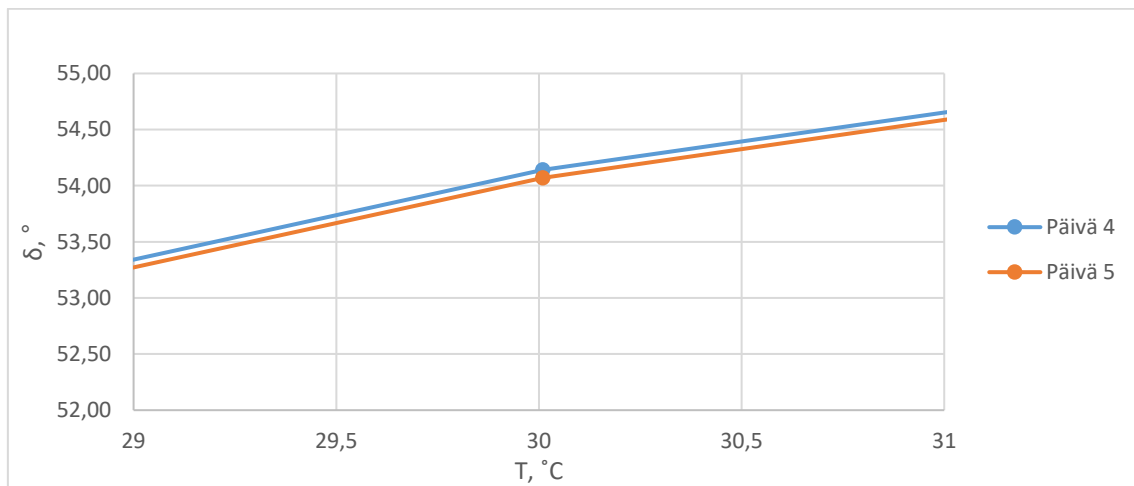
Kuvaaja 6.84. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



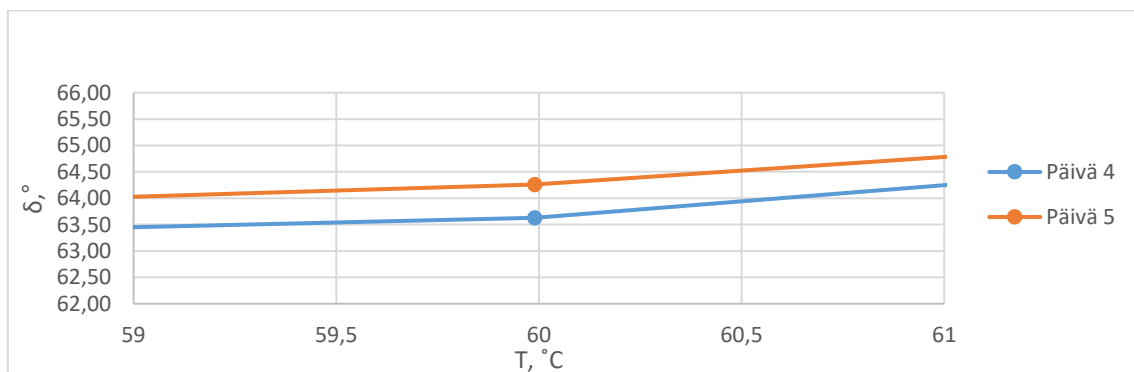
Kuvaaja 6.85. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.86. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

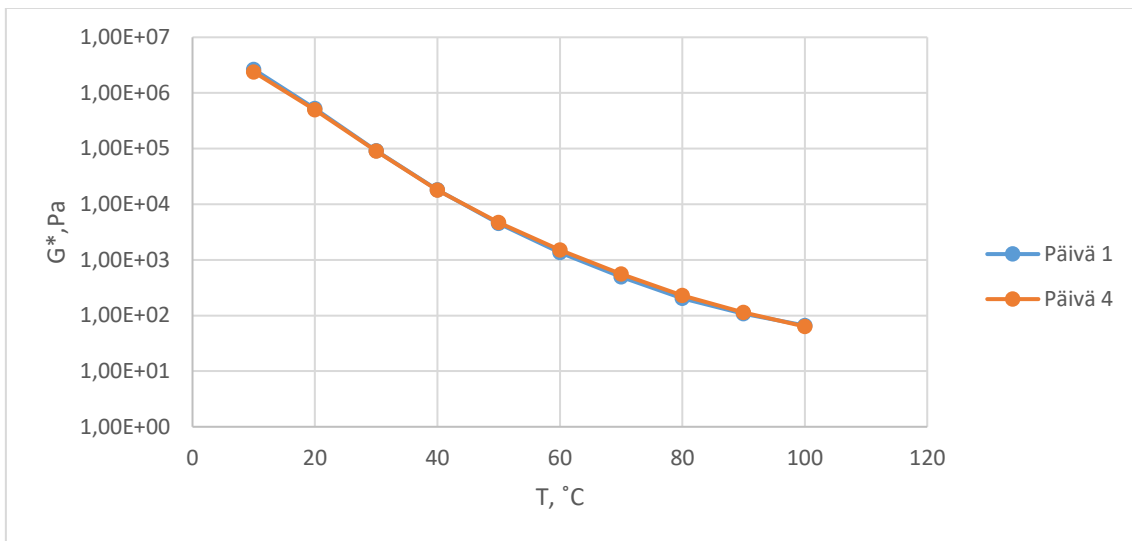


Kuvaaja 6.87. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

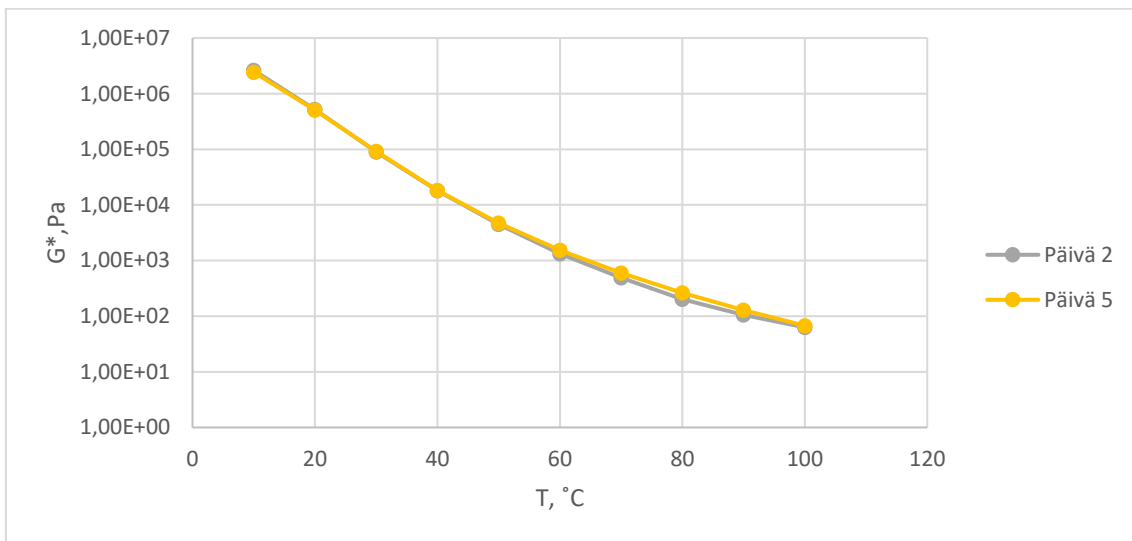


Kuvaaja 6.88. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen ja tarkennettu kuvaaja taajuudella 3,43 Hz

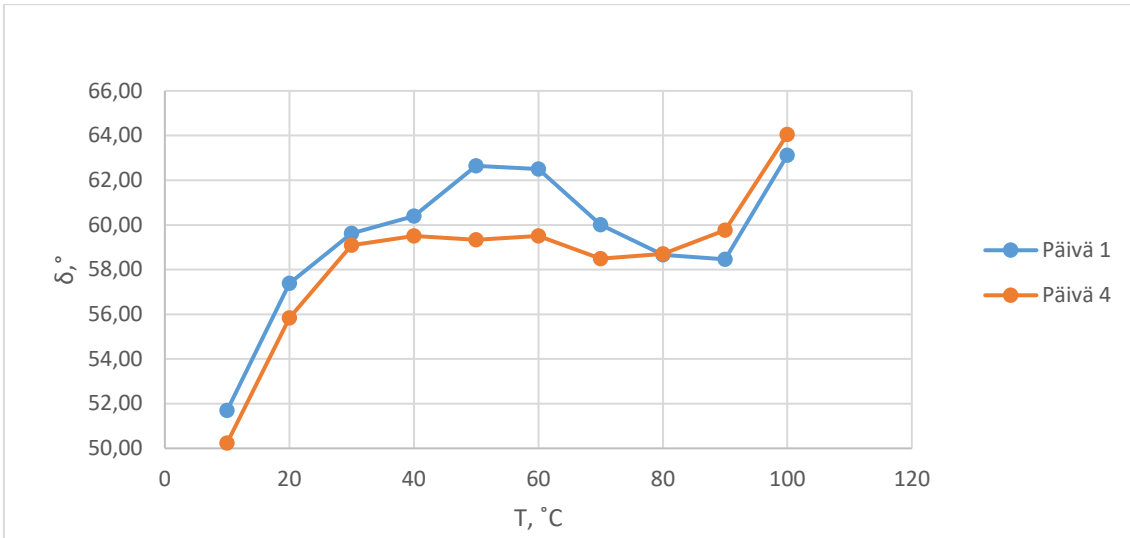
Kuvaajat 6.89-6.92 vertaavat päivien 1 ja 4 sekä 2 ja 5 näytteitä toisiinsa.



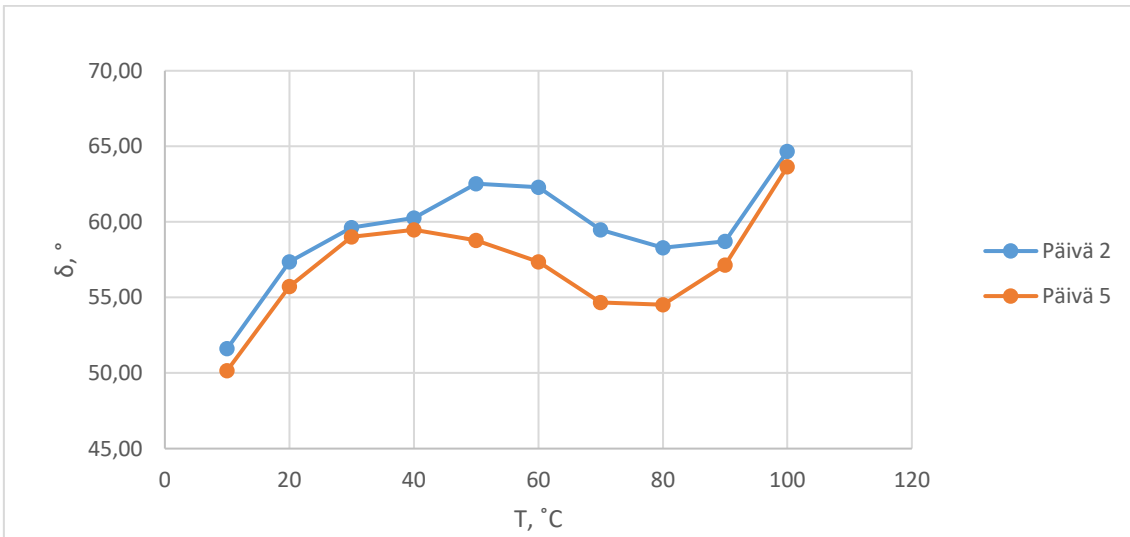
Kuvaaja 6.89. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.90. KB RTFOT PAV A bitumin kompleksimoduulin ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.91. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz



Kuvaaja 6.92. KB RTFOT PAV A bitumin vaihekulman ja lämpötilan suhdetta kuvaava isokrooninen kuvaaja taajuudella 0,07387 Hz

7 Kommentteja liittyen kokeen suorittamiseen

Verrattaessa eri ikäisiä näytteitä keskenään huomataan, että näytteen iällä on vaikutusta kompleksimoduulin ja vaihekulman arvoihin. Tarkempia tutkimuksia näiden erojen syistä tulisi tehdä. Kuten aiemmissa luvuissa todetaan AASHTO standardi T315-10 mukainen näytteen maksimi vanhenemisaika on 2 tuntia. Kokeiden tuloksista voidaan päätellä, että 2 tunnin vanhenemisaika antaisi todennäköisesti tarkemmat tulokset kuin 2 tuntia - 3 vuorokautta vanhojen näytteiden tulokset. Suurimmassa osassa päivien 1,2 ja 3 sekä 4 ja 5 näytteitä vertailevista kuvaajista nähdään, että näytteet 1,2 ja 3 sekä 4 ja 5 asettuvat ikäjärjestykseen. Kuvaajista huomataan, että vanhempien näytteiden kompleksimoduuli on suurempi ja vaihekulma pienempi verrattuna tuoreempaan testattuihin näytteisiin. Tämä tarkoittaa sitä, että vanhempi näyte on jäykempää. Jäykkyyden lisääntyminen viittaa bitumin vanhentumiseen. Kuten aikaisemmissa luvuissa on todettu, bitumin vanhenemisen takia sideaineen viskositeetti ja jäykkyys kasvavat, jolloin bitumi kovenee ja muuttuu hauraaksi (Lehtimäki 2012, s.22). Jatkotutkimuksia tulisi tehdä sen selvittämiseksi, mistä ilmiöistä näytteiden ikäjärjestykseen asettuminen todellisuudessa johtuu.

Kokeen tuloksista nähdään, että näytteiden eriaikainen valmistaminen ja testaaminen aiheuttivat epätarkkuutta testin tuloksiin. Tulevaisuudessa työvaiheet tulisi tehdä mahdollisimman saman aikaisesti ja samalla tavalla. Tämä siksi, että paras toistettavuus ja uusittavuus kokeelle voitaisiin saada, jos testausolosuhteet ja näytteen ikä olisivat mahdollisimman samanlaiset. Koe voitaisiin tulevaisuudessa suorittaa 24 tuntia vanhoille näytteille, jolloin kokeen toistettavuus todennäköisesti paranisi. Tällöin näytteen vanhenemisesta aiheutunut tulosten epätarkkuus voitaisiin minimoida. Jatkotutkimuksissa tulisi tutkia sitä, onko säilytysajan pituudella merkitystä kokeen toistettavuuteen. Tällöin tehtäisiin koe esimerkiksi viidelle 24 tunnin ikäiselle näytteelle ja viidelle 2 tunnin ikäiselle näytteelle. Näin voitaisiin löytää parhaan toistettavuuden antava säilytysaika.

Vertailtaessa päivien 1 ja 4 sekä 2 ja 5 edellisessä luvussa olevia kuvaajia huomataan, että myös näiden kompleksimoduulissa ja vaihekulmissa on eroja. Sama toistuu tarkennettaessa jokaiseen kuvaajaan, jossa vertaillaan 1 ja 4 sekä 2 ja 5 päivän näytteitä toisiinsa. Tarkasteltaessa vaihekulmia nähdään, että päivien 1 ja 2 näytteet asettuvat näytteiden 4 ja 5 yläpuolelle. Näytteiden kompleksimoduuleita tarkasteltaessa näytteet 4 ja 5 asettuvat näytteiden 1 ja 2 yläpuolelle. Näin ei kuitenkaan kuuluisi olla, koska näytteet 1 ja 4 sekä 2 ja 5 ovat testausvaiheessa lähes yhtä vanhoja. Päivien 4 ja 5 näytteet ovat jäykempiä verrattuna päivien 1 ja 2 näytteisiin. Tämä tuo kokeen toistettavuuteen epävarmuutta. Yksi mahdollinen selitys voi olla se, että uudelleen kuumentamisen aikana tai näytteen jakamisen yhteydessä on tapahtunut jotain, minkä takia näytteiden tulokset poikkeavat toisistaan. Selittävänä tekijänä voisi olla esimerkiksi muuttunut kuumennusaika tai -lämpötila. Syitä saman ikäisten näytteiden erilaiseen jäykkyyteen tulee selvittää jatkotutkimuksissa.

Kun näytettä lämmitettiin ennen näytteen jakamista, maksimaaliset lämmitysajat eivät riittäneet siihen, että bitumi olisi ollut tarpeeksi juoksevaa jakamista varten. Samoin kävi etsittäessä sopivaa trimmauslämpötilaa kumibitumille. Standardin mukainen 90 celsiusasteen trimmauslämpötila osoittautui liian pieneksi kumibitumin trimmausta varten. Toisaalta, jos trimmauslämpötilaa kasvatetaan liikaa, alkaa bitumi valua pois mittausteorioiden välistä, jolloin koe epäonnistuu. Trimmauslämpötilaa ei voi nostaa liian

korkeaksi. Sopivien jako- ja trimmauslämpötilojen löytämiseen tulisi vielä perehtyä tarkemmin jatkotutkimuksissa.

Standardin EN 14770 mukaan muotissa oleva näyte tulee trimmata. Tällöin ongelmana voi kuitenkin olla, että näytettä lähtee pinnasta liikaa. Standardissa käsketään lisäksi trimmaamaan näyte vielä reometrissa, mikä ei pitäisi olla tarpeellista, jos näyte on jo trimmattu. Tämän kokeen näytteet trimmattiin näytteen ollessa reometrissä. Tämä menettelytapa osoittautui hyväksi. Kokeen uusittavuus voisi parantua, jos trimmaustyökalu ja sen lämpötila olisi määritelty paremmin.

Testauslämpötiloihin tulee kiinnittää huomiota. Kuten tässä raportissa esitetyistä kuvajista huomataan, suuremmalla mittapäällä, eli 25 mm, tehtävässä testauksessa tulokset ovat epäluotettavat. 8 mm mittageometrian tulokset osoittavat, että liian korkea taajuus ja lämpötila yhdistelmä ei soveltunut tällä mittageometrialle ja tulokset olivat epäluotettavia. Koe antoi luotettavimpia tuloksia lämpötila-alueen keskellä. 100 celsiusasteen lämpötilassa bitumi oli liian pehmeää, jolloin luotettavia tuloksia ei saatu. Toisaalta testattaessa 25mm testigeometrialla 10 celsiusasteen lämpötilassa bitumi oli liian jähmeää, jolloin testaus ei onnistunut. 8mm testigeometrialla testattaessa parhaat tulokset saatiin pienimmillä taajuuksilla mitattuna ja 25mm mittageometrialla suuremmilla taajuuksilla mitattuna. Lämpötilan oli kuitenkin taajuuteen verrattuna suurempi merkitys tarkasteltaessa kokeen onnistuneisuutta. Testausta suunniteltaessa tulisi huomioida tarkemmin se, että bitumi on lineaarisesti viskoelastisella alueella, jolloin saataisiin paremmin toistettavia tuloksia. EN 14770 standardin mukaan testitaajuudet ja lämpötilat tulevat valita niin, että tällä alueella pysytään. Jokaiselle käytettävälle testigeometrialle tulisi määrittää sellainen taajuus ja lämpötila-alue, joka kattaa bitumin lineaarisesti viskoelastisen alueen. Tämän kokeen suorituksessa todennäköistä on, että suurimmilla taajuuksilla ja lämpötiloilla bitumi ei enää ollut lineaarisesti viskoelastisella alueella, jonka takia variaatiokertoimen arvo suureni ja bitumin viskoelastisten ominaisuuksien luotettava selvittäminen ei ollut mahdollista. EN 14770 mukaan alue valitaan tarkastelemalla suurimmassa lämpötilassa tapahtuvaa taajuuspyyhkäisyä pienimmällä taajuudella ja pienimmässä lämpötilassa tapahtuvaa taajuuspyyhkäisyä pienimmällä taajuudella. Näin venymä saadaan määritettyä oikeaksi.

Suomessa on tarkasteltu erityisesti 1,59 Hz (10 rad/s) taajuutta, joka vastaa noin 70km/h etenevää ajoneuvoa (Lehtimäki 2012 s.75). Tässä raportissa tutkittavan EN 14770 standardin mukainen kompleksimoduulin variaatiokertoimien maksimiraja on 10% ja vaihekulman 5%. 160/220 RTFOT bitumin 25 mm mittageometrialla saadut mittaustulokset osoittavat, että 1,5 Hz taajuudella kompleksimoduulien variaatiokertoimien arvot alittavat tämän rajan lukuun ottamatta 10 celsiusasteen lämpötilaa, jossa kompleksimoduulin variaatiokertoimen arvo on 11,78%. Myös vaihekulman variaatiokertoimen arvo on testeissä sallitun rajan sisällä. Tutkittaessa saman bitumityypin tuloksia testattuna 8mm mittageometrialla nähdään, että variaatiokertoimien arvot ovat pieniä 10-70 celsiusasteessa 1,59 Hz taajuudella. Arvot suurenevat 80-100 celsiusasteessa, jolloin variaatiokertoimien arvot kasvavat yli sallitun rajan. Tarkasteltaessa 160/220 RTFOT bitumin koetulosta kokonaisuudessaan kahdella testigeometrialla saadaan bitumille 1,59 Hz taajuudella variaatiokertoimen maksimiarvon alittavat testitulokset. Testi soveltui näin 160/220 RTFOT bitumin ominaisuuksien mittaukseen kahta testigeometriaa ja 1,59 Hz taajuutta käyttäen.

Tällä hetkellä Suomessa mietitään mahdollisuutta siirtää tarkastelu 0,01 Hz taajuuteen ja 25 celsiusasteeseen. Testitaajuuksista tämä taajuus on lähimpänä taajuutta 0,01592 Hz. 25mm mittageometrialla testatun 160/220 RTFOT bitumin tulokset osoittavat, että 20 celsiusasteen lämpötilassa kompleksimoduulin variaatiokertoimen arvo on 11,16% eli se on yli maksimirajan. 30 celsiusasteen lämpötilassa variaatiokertoimen arvo on 7,72% ja se on sallittava. 8mm mittageometriat testituloksien perusteella 20 ja 30 celsiusasteissa variaatiokertoimien arvot alittavat selvästi maksimirajan. Kompleksimoduulien variaatiokertoimien arvot ovat alle 2% ja vaihekulman 0,1%. Variaatiokertoimiltaan pienemmät tulokset saatiin kuitenkin 1,59 Hz taajuudella testattaessa 20 ja 30 celsiusasteen lämpötiloissa. Tämän kokeen perusteella tämän standardin hyödyntäminen 0,01 Hz taajuutta käyttäen on hyväksyttävää.

160/220 RTFOT bitumin ominaisuudet voidaan EN 14770 standardin määrittelemissä rajoissa selvittää kahden testigeometrialla avulla tässä kokeessa käytettyjä taajuuksia ja lämpötiloja hyödyntäen lukuun ottamatta 90 celsiusasteen 15,9 Hz taajuudella tehtyä mitausta sekä 100 celsiusasteessa taajuuksilla 15,92 Hz ja 7,38 Hz suoritettuja mittauksia. Nämä taajuudet voitaisiin rajata testauksen ulkopuolelle, jolloin bitumityypin ominaisuuksia voitaisiin tarkastella lämpötilavälillä 10-100 celsiusastetta ja taajuusalueella 0,01592 Hz-3,429 Hz.

Kumibitumia RTFOT PAV testattiin 8mm testigeometrialla. Saaduista tuloksista voidaan päätellä, että kumibitumin ominaisuudet saatiin hyväksytysti selvitettyä kokonaisuudessaan lämpötilavälillä 10-60 celsiusastetta. 60 celsiusasteessa kompleksimoduulin variaatiokertoimien arvot ovat lähellä kompleksimoduulin variaatiokertoimen maksimiarvoa, mutta kuitenkin alittavat sen. 60 celsiusasteessa ja taajuudella 15,92Hz testattaessa vaihekulman variaatiokertoimen arvo kasvaa kuitenkin yli sallitun rajan. 70 celsiusasteen lämpötilassa variaatiokertoimien arvot ovat liian suuret kahdella pienemmällä ja suurimmalla taajuudella testattaessa. Sama toistuu 80-100 celsiusasteen testituloksissa. Tämän kokeen perusteella koe kannattaa tälle bitumille ja testigeometrialle suorittaa 10-60 celsiusasteen lämpötilassa, jolloin voidaan hyödyntää muita testitaajuuksia lukuun ottamatta 15,92 Hz taajuutta. Jos kumibitumin ominaisuuksia halutaan selvittää koko 10-100 celsiusasteen lämpötila-alueella, tulee taajuudet 0,01592 Hz, 0,03429 Hz, 0,07387 Hz, 7,387 Hz ja 15,92 Hz rajata pois. Tämä pienentäisi taajuusalueen pieneksi, jolloin ensimmäinen vaihtoehto on suositeltavampi.

Standardissa selostettuja kokeen suorittamisvaiheita voi tulkita eri tavalla, jolloin parasta mahdollista kokeen uusittavuutta ei todennäköisesti saavuteta. Testausmenetelmän tulisi olla mahdollisimman yksiselitteinen, jotta eri testaajat erilaisilla testilaitteilla tekisivät testin samoin, jolloin testaajat saisivat samankaltaisia ja vertailtavissa olevia tuloksia. Standardin tarkennuksella ja lisäkokeilla saadut tulokset todennäköisesti tarkentuvat.

Lähteet

AASHTO Designation:T 315-10. (2012). Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer 33 s. Saatavilla: <http://ssl.doas.state.ga.us/PRSapp/bid-documents/124840148400-120-000000023155443.pdf>.

Aromaa, K. (2016).. Bitumin vanhenemisen ja elvyttämisen vaikutukset sen reologisiin ominaisuuksiin. Aalto-yliopisto. Diplomityö. 128 s.

CEN/TS 15342. (2008) Bitumen and bituminous binders. Determination of equiviscous temperature based on Low Shear Viscosity using a Dynamic Shear Rheometer in low frequency oscillation mode. Tekninen määräys. 23 s.

EN 12597. (2014). Bitumen and bituminous binders. Terminology. Suomen standardisoimisliitto sfs. 16s.

EN 12697-1. (2013). Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 1: Liukoisen sideaineen pitoisuus. Suomen standardisoimisliitto sfs. 94 s.

EN 14770. (2012). Bitumen and bituminous binders – Determination of complex shear modulus and phase angle – Dynamic Shear Modulus. Suomen standardisoimisliitto sfs. 15 s.

Hintz, C. ja Bahia, H. (2013). Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue in the dynamic shear rheometer. Road Materials and Pavement Design. Vol:14. S. 231-251.

Iwanski, M. (2012). Rheological characteristics of synthetic wax-modified asphalt binders. vol:57. iss: 9.

KvantiMOTV. (2017). Hajontaluvut. Internetsivu. Luettu; 6.6.2018. Saatavilla: <http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/hajontaluvut/hajontaluvut.html>.

Laukkanen. (2013). Dynaamisen leikkausreometrin käyttö bitumitutkimuksissa. Aalto-yliopisto.

Lehtimäki, H. (2012). Asfalttirouheen elvyttäminen keveillä öljytuotteilla. Aalto-yliopisto. Diplomityö. 105 + 43 s.

Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S. ja Kärhä, P. (2011). Laadukkaan mittaamisen perusteet. Metrologian neuvottelukunta. Mittatekniikan keskus. 137 s.

Opetushallitus. Todennäköisyys ja tilastot. Etälukio. Luettu: 6.6.2018. Saatavilla: http://www02.oph.fi/etalukio/pitka_matematiikka/kurssi6/maa6_esim2.html.

PANK ry. (2011). Sideaineet. 23 s.

Pavement interactive. Dynamic Shear Rheometer. Luettu 24.5.2018. Nettisivu. Saatavilla: <http://www.pavementinteractive.org/dynamic-shear-rheometer/>.

Rossi, J. (2015). Modifioitujen bitumipäällysteiden soveltuvuus vähäliikenteisille teille. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. 193s.

Simonen, M. (2011). Biofluksattujen bitumien ominaisuudet ja käyttö varastoitavissa pehmeissä asfalttibetonimassoissa. Aalto-yliopisto. 106+30 s, Diplomityö.

Tilastokeskus. a. Keskiarvo. Käsitteet. Internetsivu. Luettu 6.6.2018. Saatavilla: <https://www.stat.fi/meta/kas/keskiarvo.html>.

Tilastokeskus. b. Keskihajonta. Käsitteet. Internetsivu. Luettu 6.6.2018. Saatavilla: <https://www.stat.fi/meta/kas/keskihajonta.html>.

Tilastokeskus c. Variaatiokerroin. Käsitteet. Internetsivu. Luettu: 6.6.2018. <https://www.stat.fi/meta/kas/variaatiokerroin.html>.