

Kitkan mittaaminen kuljetuksen aikana

Juha Pesonen

Opinnäytetyö
2013

Logistiikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala





Tekijä(t) PESONEN, Juha	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 07.02.2013
	Sivumäärä 63	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi Kitkan mittaaminen kuljetuksen aikana		
Koulutusohjelma Logistiikka, ylempi AMK		
Työn ohjaaja(t) Ahonen, Pertti; Lehtola, Pasi; Käenmäki, Jouko		
Toimeksiantaja(t) JAMK Logistiikka		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö käsittelee kitkan mittaamista kuormatilan ja kuljetettavan tuotteen väliltä kuljetuksen aikana. Päätaivoitteita oli kolme: luoda mittausjärjestelmä kitkan mittausta varten, varmistaa mittaustavan toimivuus erilaisissa testeissä ja mitata kitkan jakauma todellisista kuljetustilanteista. Ennen mittaustavan suunnittelua ja testausta kerättiin kirjallisuudesta taustatietoa mittavälineistä, kuljetusten aikaisista kiihtyvyyksistä ja kuorman varmistuksesta, mittavirheen määrittämisestä sekä kitkaan liittyvistä fysiikan laeista.</p> <p>Mittausjärjestelmää testattiin erilaisissa ympäristöissä sen toimivuuden takaamiseksi ja tarkkuuden selvittämiseksi. Testeissä koekappaleen ja alustan välistä kitkaa mitattiin käyttämällä veto- ja kiihtyvyyssantureita sekä Dewetron-mittalaitetta. Järjestelmän toiminta perustui koekappaleeseen kiinnitettyjen kuormaliinon kireyksien sekä koekappaleeseen kohdistuvan kiihtyvyyden mittaamiseen. Testejä tehtiin kallistettavalla kuormatilan osalla, henkilöauton peräkärryllä sekä kuorma-autolla. Testit aloitettiin laboratoriossa ja kun järjestelmän toimintakyky oli varmistettu, käytettiin kuorma-autoa testiympäristönä. Parhaimmat tulokset saavutettiin kuorma-autolla tehdyillä mittauksilla.</p> <p>Testien aikana kohdattiin useita haasteita, kuten kallistustestin sopimattomuus mittaustavan testaamiseen ja hyvin liukas keli kuorma-autotestien aikana. Mittausjärjestelmän toimintakyky saatiin kuitenkin selvitettyä haasteista huolimatta. Järjestelmällä pystyttiin mittaamaan kitka erilaisissa ympäristöissä tietyillä reunaehdoilla, mutta sen tarkkuus vaihteli suuresti. Osa epätarkkuudesta johtui antureista ja osa mittaajan sekä mittausympäristön aiheuttamista virheistä. Järjestelmällä ei pystytty mittaamaan kitkan jakaumaa, mutta se todistettiin toimivaksi ja sitä jatkokehitetään opinnäytetyön jälkeen.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Kitka, kitkan mittaaminen, kiihtyvyyden mittaaminen, kiihtyvyyssanturi, voima-anturi, kuormanvarmistus		
Muut tiedot		



Author(s) PESONEN, Juha	Type of publication Master's Thesis	Date 07022013
	Pages 63	Language Finnish
		Permission for web publication (X)
Title Measurement of friction during transport		
Degree Programme Master's Degree Programme in Logistics		
Tutor(s) AHONEN, Pertti; LEHTOLA, Pasi; KÄENMÄKI, Jouko		
Assigned by JAMK Logistics		
Abstract <p>The thesis work was about measuring friction during transport between an object on the cargo platform and the platform itself. There were three main goals: to create a friction measurement system, evaluate the system's performance in different measurement situations and to measure the friction distribution in transport situations. Before designing the measurement system, a literature review was done about measurement equipment, accelerations occurring during transport, cargo securing, measurement uncertainty and laws of physics regarding the manner of measurement.</p> <p>The measurement system was tested in different situations to make sure it works properly and to test its accuracy. In the tests friction between a test object and a surface was measured by using strain gauges, accelerometers and a data logger. The system measured the changes in tightness of the lashing belts attached to the test object and the accelerations directed at the test object. Tests were done on a tilting platform, light weight trailer and truck. First test was done in logistics laboratory and after validating the system's performance a truck was used for the final test. The best outcome was achieved with the tests done with the truck.</p> <p>Many obstacles were encountered during the tests like the unsuitableness of the tilting platform for validating the system and very slippery weather during the final measurements done with the truck. Fortunately the evaluation of the measurement system's performance was done despite the obstacles. The measurement system was able to measure friction in different situations with a few preconditions but with low accuracy. Part of the inaccuracy was due to the measurement situation and the measurer and part to the used sensors. Unfortunately with the system measurement of friction distribution wasn't possible at this point. However the system was proved to be functioning correctly and it will be further developed.</p>		
Keywords Friction, friction measurement, acceleration measurement, accelerometer, strain gauge, cargo securing		
Miscellaneous		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	4
1.1	Tutkimuskysymykset.....	5
1.2	Tutkimusmenetelmät.....	6
1.3	Kuormanvarmistus.....	6
2	KITKAN LASKENNAN PERUSTEET	7
2.1	Kiihtyvyys.....	7
2.2	Vektorit	8
2.3	Kitka	9
2.4	Kitkan mittaaminen	11
2.5	Tärinän ja ilmankosteuden vaikutus kitkaan.....	12
3	ANTURIT	14
3.1	Kiihtyvyysanturit.....	14
3.1.1	Pietsosähkö ja pietsoresistiiviset anturit.....	16
3.1.2	MEMS-anturit	17
3.2	Venymäliuska-anturit.....	18
4	MITTAUKSEN EPÄVARMUUSTEKIJÄT JA NIIDEN ARVIOINTI.....	22
4.1	Datan analysointiin perustuva tapa	26
4.2	Heuristinen menetelmä	27
5	KULJETETTAVAAN KAPPALEESEEN KOHDISTUVAT VOIMAT	28
5.1	Jarrutus	28
5.2	Kaarreajo.....	29
5.3	Väistö	30
6	MITTAVÄLINEET.....	31
6.1	Kiihtyvyysanturit.....	31
6.2	Vetoanturit	32
6.3	Dewetron -mittalaite	32
6.4	Dewesoft.....	33
6.5	Mittausvirhe.....	34

7	KITKAN MITTAUSTAVAT	36
7.1	Kiihtyvyyden eron mittaamiseen perustuva kitkan määrittäminen	36
7.2	Vetoanturien käyttöön perustuva kitkan määrittäminen	36
8	JÄRJESTELMÄN TESTAUS	39
8.1	Mittausten sisältö	39
8.2	Testit kallistettavalla alustalla kalibroimattomilla vetoantureilla	41
8.2.1	Kiihtyvyyksien eron perustuva kitkan määrittäminen	41
8.2.2	Vetoantureiden käyttö kitkan määrittämisessä	43
8.3	Testit kallistettavalla alustalla kalibroituilla vetoantureilla	47
8.4	Kitkan määrittäminen vetämällä sidottua koekappaletta	50
8.5	Testit henkilöauton peräkärjellä	51
8.6	Testit kuorma-autolla	55
9	POHDINTA	59
	LÄHTEET	61

KUVIOT

KUVIO 1.	Vektori A ja sen komponenttivektorit A_x ja A_y	9
KUVIO 2.	Vapaakappalekuva	10
KUVIO 3.	Lepo- ja liukukitka	11
KUVIO 4	Kuormatilasta mitatun tärinän tehospektritiheys (Bernad ym. 2011, 8)	14
KUVIO 5.	Pietsoresistiivisen MEMS-kiihtyvyyssanturin rakenne (Maluf 2004, 98)	18
KUVIO 6.	Resistanssia mittaavia venymäliuskoja	19
KUVIO 7.	Kappaleeseen vaikuttavat voimat jarrutuksen aikana (Kaps 2011, 5)	29
KUVIO 8.	Kaarraajossa tuotteeseen vaikuttavat voimat (Kaps 2011, 7)	30
KUVIO 9.	Väistötilanteessa tuotteeseen kohdistuvat voimat (Kaps 2011, 9)	31
KUVIO 10.	Kahden kiihtyvyyssanturin mittaustietojen vertailu	34
KUVIO 11.	Vapaakappalekuva kappaleeseen vaikuttavista voimista sivusta	37
KUVIO 12.	Vapaakappalekuva kappaleeseen vaikuttavista voimista edestä	37
KUVIO 13.	Vapaakappalekuva kappaleeseen vaikuttavista voimista ylhäältä	38
KUVIO 14.	Mittausasetelma ensimmäisissä testeissä	40
KUVIO 15.	Kiihtyvyyssarvot koekappaleesta ja alustasta, kun kappale alkaa liukua	41
KUVIO 16.	Kohina mittaussignaali	42

KUVIO 17. Kiihtyvyyssarvot koekappaleesta ja alustasta sekä alustan kallistuskulma.....	43
KUVIO 18. Vetoantureiden, kulmakertoimen ja kulman mittaustiedot ensimmäisessä testissä kalibroimattomilla vetoantureilla	44
KUVIO 19. Vetoantureiden, kulmakertoimen ja kulman mittaustiedot toisessa testissä kalibroimattomilla vetoantureilla	45
KUVIO 20. Vetoantureiden, kulmakertoimen ja kulman mittaustiedot kolmannessa testissä kalibroimattomilla vetoantureilla	46
KUVIO 21. Vetoantureiden, kulmakertoimen ja kulman mittaustiedot neljännessä testissä kalibroimattomilla vetoantureilla	47
KUVIO 22. Vetoantureiden, kulman ja kitkakertoimen mittaustiedot testissä kalibroiduilla voima-antureilla.....	48
KUVIO 23. Paperi koekappaleen alla.....	50
KUVIO 24. Mittausjärjestely voiman vaikuttaessa vaakatasossa.....	51
KUVIO 25. Kahden jarrutuskokeen hidastuvuudet X-akselilla.....	52
KUVIO 26. Kiihtyvyy- ja kitkakerroin tiedot kolmannelta henkilöauton peräkärjellä suoritetusta testistä	55
KUVIO 27. Mittausjärjestely kuorma-autossa	56
KUVIO 28. Mittaustiedot koekappaleen liikkumishetkeltä	58

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Mittavälineiden virheiden suuruudet ja esimerkkilaskussa käytetyt arvot.....	35
TAULUKKO 2. Suurimman mittausvirheen laskentaan käytetyt virheiden ylä- ja alarajat.....	35
TAULUKKO 3. Kuormaliinojen kireyksiä vaikutus kitkakertoimeen	49
TAULUKKO 4. Korrelaatiokertoimet henkilöauton peräkärjellä suoritetuista testeistä	54
TAULUKKO 5. Kitkakertoimien suurin arvo, keskiarvo sekä hidastuvuuden keskiarvo.....	54
TAULUKKO 6. Korrelaatiokertoimet ja hidastuvuuden keskiarvo kuorma-autotesteissä	59

1 JOHDANTO

Kuormanvarmistus on kuljetusmuodosta riippumatta erittäin tärkeää toteuttaa huolellisesti ja ammattitaidolla. Kuljetuksen aikana tuotteet altistuvat useille erilaisille rasituksille, kuten suurille kiihtyvyyksille, sääolosuhteiden vaihteluille ja tärinälle. Kaikki rasitukset kohdistuvat myös kuormanvarmistukseen, mikä pitää ottaa huomioon ennalta. On arvioitu, että tieliikenteessä jopa 20 - 25 % kaikista raskaiden ajoneuvojen tapaturmista johtuu huonosti toteutetusta kuormanvarmistuksesta. Aiheesta on kuitenkin hyvin vähän luotettavaa tutkimustietoa tai tilastoja (European Commission Conference on Cargo Securing and Roadside Technical Checks 2009, 5-6).

EU-maissa on erilaiset lait koskien kuormanvarmistusta. Lakien lisäksi on erilaisia dokumentteja, kuten standardit SFS-EN 12195-1:2010 ja IMO/ILO/ENECE sekä Euroopan komission teettämä Best Practice Guidelines, jotka sisältävät kuormanvarmistukseen liittyviä ohjeita. Standardit eivät kuitenkaan velvoita noudattamaan niiden sisältöä, vaan maiden lait määrittävät kuormanvarmistuksen vaatimustason.

Kuormanvarmistuksessa kitka on tärkeä tekijä sidonnan tai tuennan toteutustapaa suunniteltaessa. Kitkan määrittäminen voi olla hankalaa, vaikka aiheeseen on olemassa taulukoita, jotka kertovat tiettyjen materiaaliparien väliset kitkakertoimet. Kitkan määrittäminen on kuormanvarmistajan, eli useimmiten kuljettajan, vastuulla. Jos kitkan katsotaan olevan suuri, vähentää se muiden sidonta- ja tuentavälineiden käyttöä. Kitkan käyttäminen kuormanvarmistamiseksi onkin Suomessa kiistanalainen aihe, jonka ympärillä on argumentteja puolesta ja vastaan. Tällä hetkellä kuormanvarmistuksessa kitka voidaan ottaa huomioon, vaikka sen suuruus voi vaihdella tapauskohtaisesti suurestikin.

Kuorma varmistusstandardin SFS-EN 12195-1:2010 mukaan kitka kahden materiaalin välillä määritetään vetämällä materiaaleja vastakkain ja mittaamalla liikkeeseen tarvittava voima tai mittaamalla kallistuspöydällä kulma, jossa testikappale alkaa liikkua. Kuljetuksen aikana kitkaan kuitenkin vaikuttavat useat tekijät, kuten tärinä, nopeat pystysuuntaiset tärähdykset, materiaalien väliset epäpuhtaudet sekä kuormatilan pohjan epästabiiliteetti (Romero 2005, 1). Kaikkia näitä tekijöitä ei ole otettu laboratoriotutkimuksissa huomioon, joten käytännön tutkimukselle on tarve olemassa.

Kitkakertoimen suuruudesta ajoneuvon liikkeessä on tehty tutkimus ”Field determination of cargo-deck friction coefficients” (Romero 2005), jossa kitka mitattiin pysäyttämällä hitaasti

liikkuva ajoneuvo kuormatilassa olevan testikappaleen avulla. Testikappale oli kiinnitettynä ajoneuvon ulkopuoliseen tolppaan, jolloin tietyn etäisyyden päässä tolpasta testikappale alkoi hidastaa ajoneuvon liikettä liukumalla kuormatilan pohjaa pitkin. Kitka laskettiin testikappaleen liukuman matkan avulla. Tutkimuksessa mitattu kitka oli lähellä laboratoriotutkimusten arvoja, mutta keskihajonta oli huomattavasti suurempi.

Suomen lainsäädäntö vaatii kuormanvarmistuksen kestäväen kuorman painon eteenpäin sekä puolet kuorman painosta sivuille ja taaksepäin. Liikkuvan poliisin mukaan ratsioissa tavataan kuljetuksia, joissa kuormaa ei ole sidottu lainkaan, koska kuorma on lastattu kuormatilan etuseinää vasten ja kuljettaja uskoo kitkan olevan yli 0,5, jolloin sivuttain kuormanvarmistusta ei tarvita.

Tällä opinnäytetyöllä on kolme päätavoitetta:

- Luoda mittausjärjestelmä, jolla pystytään mittaamaan kitkan vaihtelu kuljetuksen aikana
- Varmistaa mittausjärjestelmän toimivuus ja tulosten paikkansapitävyys
- Mitata kitkan jakauma todellisissa kuljetustilanteissa ja selvittää tuotteen kohdistuvat kiihtyvyydet kuljetuksen ajalta.

Tutkimuksen tilaajana on Jyväskylän ammattikorkeakoulun logistiikan tulosalue, jolla on pitkät perinteet kuljetusten turvallisuuden tutkimisessa. Tästä on esimerkkinä tutkimus uusien ja käytettyjen kuormaliinojen kestävydestä vuodelta 2007. Tutkimuksessa selvisi muun muassa, että kuormanvarmistukseen on käytetty vanhoja kuormaliinoja, joiden kestävyys jäi huomattavasti alle nimellislajuuden, jolloin niiden käyttö kuormanvarmistukseen ei ole enää turvallista. Tutkimuksen tulokset pääsivät kansallisiin uutisiin.

Opinnäytetyön idea tuli Jyväskylän ammattikorkeakoulun logistiikan tulosalueen lehtorilta Jouko Käenmäeltä. Käenmäki on toiminut pitkään kuormanvarmistuksen parissa ja kitkan vaihtelun mittaaminen kuljetuksen aikana oli hänen mielestään uusi ja tutkimuksen arvoinen kohde.

1.1 Tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön aiheena on mitata kitka kuljetettavan tuotteen ja kuormatilan pohjan väliltä ja sen muutokset kuljetuksen aikana. Tutkimuskysymyksenä on ”mikä on kitkan jakauma kuljetuksen aikana?”. Jotta kysymykseen pystyy vastaamaan, pitää tehdä useita mittauksia

erilaisista maantieliikenteessä tapahtuvista tilanteista. Valmista mittausmenetelmää tutkimuksen tarpeeseen ei ole olemassa, joten ensimmäinen osa opinnäytetyötä on mittausmenetelmän suunnitteleminen, toteuttaminen ja toimivuuden todentaminen. Kitkamittauksia tehdessä selvitetään myös tuotteeseen kohdistuvien kiihtyvyyksien suunnat ja suuruudet.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyön tutkimus on kvantitatiivista tutkimusta. Kvantitatiivisella, eli määrällisellä tutkimuksella luodaan yleistettävissä olevaa tietoa tutkimuskohteesta. Määrällisessä tutkimuksessa havaintoaineistoa voidaan hankkia useilla eri tavoilla kuten haastatteluilla ja kyselyillä. Havaintoaineiston analysointiin käytetään laskennallisia ja tilastotieteen keinoja, joilla pyritään häivyttämään subjektiiviset tulokset. Tulosten analysoinnissa käytetään käsitteitä ja välineitä, joilla kuvataan koko joukon toimintaa. Yksi tilastotieteen välineistä on keskiarvo, joka kuvaa miten aineiston kaikki kohteet asettuvat keskimäärin ja miten yksittäiset havainnot sijoittuvat koko joukkoon nähden. (Anttila.)

Kvantitatiivisen tutkimuksen lisäksi opinnäytetyö sisältää tiedonkeruumenetelmän suunnittelun ja toteuttamisen. Tiedonkeruumenetelmän valmistumisen jälkeen kerätään tietoa kitkasta mahdollisimman useilla keskenään vertailtavissa olevilla mittauksilla.

1.3 Kuormanvarmistus

Kuormanvarmistaminen on välttämätöntä muiden tienkäyttäjien turvallisuuden takaamiseksi ja kuljetusvahinkojen estämiseksi. Tämän vuoksi kuorma ei saa päästä liikkumaan kuormatilassa kuljetuksen aikana, vaikka ajoneuvo joutuisi tekemään yllättäviä ja nopeita ajoliikkeitä. Tuotteita voidaan kuljettaa maantieliikenteen lisäksi myös muissa kuljetusmuodoissa, joten kuorma pitää tukea tai sitoa kaikkien käytettävien kuljetusmuotojen vaatimusten mukaisesti. Yllättävien ajotapahtumien lisäksi kuormaan kohdistuu tärinää, joka pyrkii siirtämään kappaletta kuormatilassa. Tämä tulee ottaa huomioon kiristämällä kuorman sidontalaitteet kuljetuksen aikana. (Hokkanen, Inkinen & Käenmäki 2012, 446.)

Suomen lainsäädännössä kuormanvarmistusta käsitellään seuraavilla tavoilla. Tieliikennelaisessa ajoneuvon kuormaamisen vaatimukset on kirjoitettu seuraavasti: ” Ajoneuvo on kuormattava siten, ettei kuorma voi vaarantaa henkilöitä, vahingoittaa omaisuutta, laahata maata,

puodota tielle, pölytä häiritsevästi tai aiheuttaa muuta siihen verrattavaa haittaa taikka synnyttää tarpeetonta melua.” (L 3.4.1981/267, 87.)

Myös asetuksessa ajoneuvojen käytöstä tiellä (A 4.12.1992/1257, 47 §) käsitellään pykälässä 47 kuormanvarmistusta. Asetuksessa määritetään kuormanvarmistuksen olevan riittävä, kun kuorma ei oleellisesti liiku, jos siihen kohdistuu 10 m/s^2 kiihtyvyys eteenpäin ja 5 m/s^2 kiihtyvyys poikittain. Lisäksi mainitaan, että kitkan tarjoaman pidätyskyvyn saa ottaa huomioon kuormanvarmistuksen lujuuden arvioinnissa.

Kitkalla on suuri merkitys kuormanvarmistukseen vaadittavien kuormaliinojen määrän laskennassa. Seuraavassa on esimerkki miten kitkakertoimen (μ) muuttaminen 0,4:stä 0,2:een vaikuttaa kuormanvarmistukseen tarvittavien kuormaliinojen määrään. Esimerkki on laskettu standardin SFS-EN 12195-1:2010 mukaan. Esimerkissä maantiellä kuljetettava kappale on massaltaan 1000 kg (m) ja kuormaliinan standardinmukainen kiristysvoima on 5200 N (F_T). Kuormaliinan ja kuormatilan välinen kulma on 80° (α). Tarvittava kuormaliinojen määrä lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$n \geq \frac{(c_{xy} - \mu * c_z) * m * g}{2 * \mu * \sin \alpha * F_T}$$

Muita tarvittavia tietoja ovat X- ja Y-suuntien suurin kiihtyvyyserroin (C_{xy}), pystysuuntainen kiihtyvyyserroin (C_z) ja painovoima (g). Kitkakertoimen ollessa 0,4 tarvitaan yksi kuormaliina, mutta kitkakertoimen puolittaminen lisää kuormaliinojen tarpeen jo kolmeen.

2 KITKAN LASKENNAN PERUSTEET

2.1 Kiihtyvyys

Kun kappaleen nopeus muuttuu tietyssä ajassa, kutsutaan tätä muutosta kiihtyvyydeksi. Useimmiten kiihtyvyyden yksikkönä käytetään $\frac{m}{s^2}$ SI-järjestelmän mukaan. Yhdysvalloissa on myös käytössä yksikkö $\frac{ft}{s^2}$. Kiihtyvyys voi olla positiivista, negatiivista tai nolla, aivan kuten nopeuskin. (Serway 1996, 28-29.)

Kiihtyvyys voidaan ilmoittaa keskiarvona tietyltä ajanjaksolta, eli keskikihtyvyytenä tai hetkellisenä kiihtyvyytenä. Esimerkiksi testissä, jossa ajoneuvo kiihdyttää levosta lähtien tiettyyn

nopeuteen ja pysähtyy, keskikihtyvyys on $0 \frac{m}{s^2}$, mutta hetkellisesti kiihtyvyys on ollut positiivinen ja negatiivinen. Keskikihtyvyys lasketaan kaavalla $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$. Mitä lyhyemmän ajanjakson aikana kiihtyvyyttä tarkastellaan, sitä tarkemmin hetkellinen kiihtyvyys voidaan laskea. Hetkellinen kiihtyvyys voidaan laskea nopeuden ensimmäisenä aikaderivaattana $a = \frac{dv}{dt}$ ja paikan toisena aikaderivaattana $a = \frac{d^2x}{dt^2}$. (Serway 1996, 29-30.)

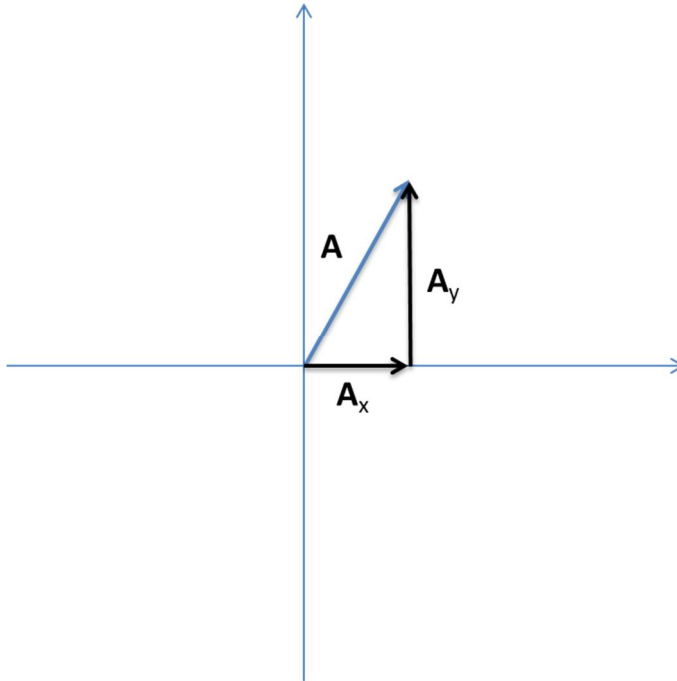
2.2 Vektorit

Suureet voidaan jakaa kahteen ryhmään, vektoreihin ja skalaareihin. Vektori sisältää suuruuden ja suunnan, kun taas skalaari ilmoittaa vain suuruuden. Skalaareita ovat esimerkiksi massa, tiheys ja tilavuus ja vektoreita esimerkiksi voima ja kiihtyvyys. Graafisesti esitettynä vektori on tietyn mittainen jana, jolla on alku ja loppupiste. Janan loppupisteessä on nuoli osoittamassa vektorin suunnan. Tekstissä vektorit merkitään usein lihavoidulla kirjaimella. Jos kyseessä on esimerkiksi voima, esitetään se tekstissä joko \mathbf{F} tai lisäämällä kirjaimen päälle viiva \vec{F} . (Suvanto 2008, 41.)

Vektorien yhteen- ja vähennyslasku on tarpeellista useissa käytännön ongelmissa. Jos esimerkiksi autoa vedetään ojasta kahdella köydellä, joista autoon kohdistuu voimat \mathbf{F}_1 ja \mathbf{F}_2 , voidaan laskea kuinka suurella ja minkä suuntaisella voimalla \mathbf{F}_1 ja \mathbf{F}_2 voitaisiin korvata. Laskenta voidaan tehdä graafisesti tai komponenttien avulla. (Suvanto 2008, 41.) Jotta vektorien yhteen laskenta on mahdollista, pitää vektorien yksiköiden olla samat. Sama sääntö pätee myös skalaareihin. Graafisessa ratkaisussa vektorit piirretään tietyssä skaalassa paperille, niin että vektori \mathbf{F}_2 alkaa vektorin \mathbf{F}_1 päätepisteestä. Tulos on vektorin \mathbf{F}_1 alkupisteen ja vektorin \mathbf{F}_2 loppupisteen väliin piirrettävä viiva, eli resultantti $\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$. Sama metodi pätee myös useamman vektorin yhteen- ja vähennyslaskussa. (Serway 1996, 56-57.)

Geometrinen ratkaiseminen voi olla joihinkin sovelluksiin liian epätarkka, jolloin laskentaan käytetään vektorin projektioita XY-koordinaatistossa. Vektorin projektioita kutsutaan komponenteiksi. Jokainen vektori voidaan kuvata komponenttien avulla. Kuviossa 1 on vektori \mathbf{A} esitettynä XY-koordinaatistossa. Vektori \mathbf{A} voidaan ilmoittaa kahden muun vektorin \mathbf{A}_x ja \mathbf{A}_y summana. Kuten kuviosta voi huomata, muodostava \mathbf{A} , \mathbf{A}_x ja \mathbf{A}_y suorakulmaisen kolmion, jossa \mathbf{A} on hypotenuusa. Komponentti \mathbf{A}_x kuvaa vektorin \mathbf{A} projektiota X-akselin suunnassa ja \mathbf{A}_y Y-akselin suunnassa. Komponentit voivat olla positiivisia tai negatiivisia. Komponentti \mathbf{A}_x on positiivinen, kun vektori \mathbf{A} osoittaa X-akselin positiiviseen suuntaan ja negatiivinen, jos \mathbf{A}

osoittaa X-akselin negatiiviseen suuntaan. Sama lainalaisuus pätee A_y komponenttiin Y-akselin suunnassa. (Serway 1996, 59-60.)



KUVIO 1. Vektori A ja sen komponenttivektorit A_x ja A_y

Trigonometrian keinoin pystytään laskemaan komponenttien A_x ja A_y suuruudet kaavoilla

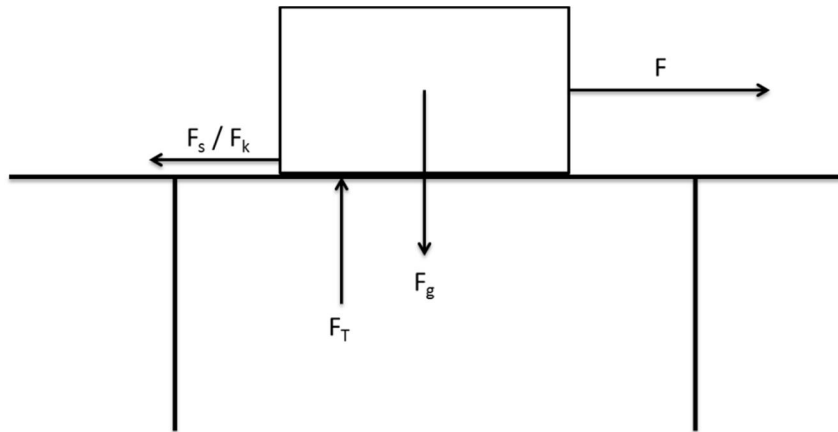
$A_x = A \cos \theta$ ja $A_y = A \sin \theta$. Vastaavasti vektorin A suuruus voidaan laskea kaavalla

$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$ ja suunta kaavalla $\tan \theta = \frac{A_y}{A_x}$. Vektori A voidaan siis ilmoittaa komponenttien A_x ja A_y avulla tai suuruuden ja suunnan avulla. (Serway 1996, 60.)

2.3 Kitka

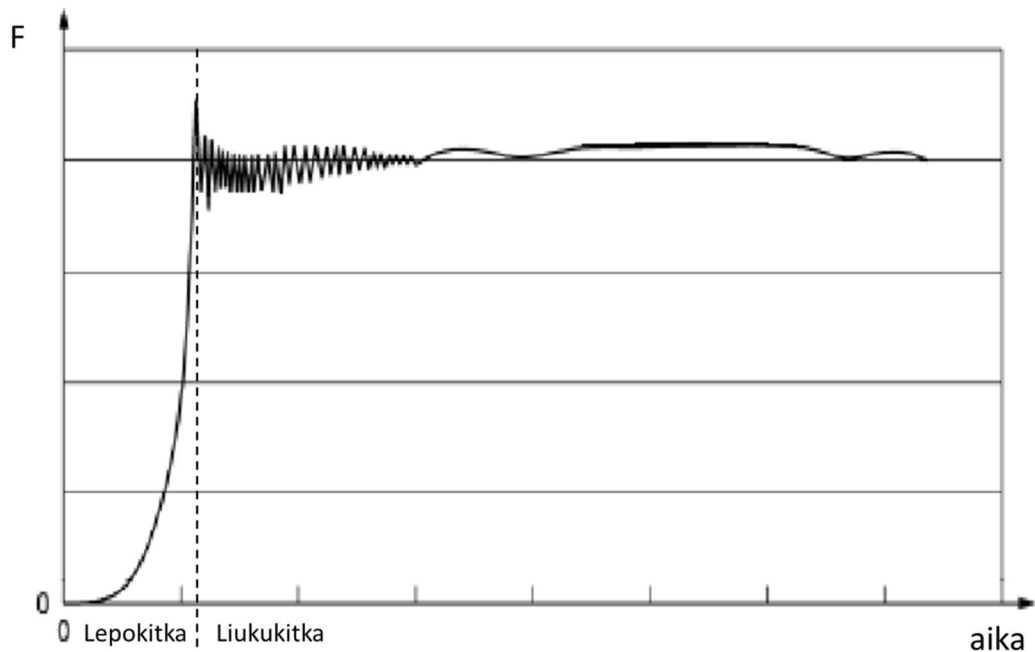
Kappaleen liikkua tason päällä, reagoi kappale tason kanssa, mikä hidastaa kappaleen liikettä. Tätä liikettä vastustavaa voimaa kutsutaan kitkaksi. Kitka muodostuu materiaalien pintojen epätasaisuudesta ja myös kemiallisesta sidoksesta pintojen välillä. Epätasaisuus tarkoittaa pintojen erilaisia ulokkeita, jotka mekaanisesti estävät pintojen välistä liikettä. Jos pinnat ovat todella epätasaisia, on kitkan määrittäminen hankalaa, koska materiaalit voivat helposti hyppiä toisiaan vasten. Kemiallinen sidos perustuu atomien tai molekyylien elektrostaattiseen voimaan. (Serway 1996, 124.)

Kuviossa 2 on laatikko pöydän päällä. F_s on lepokitkavoima, F_T pinnan tukivoima, F_g painovoima ja F kappaletta siirtävä voima. Kun laatikkoa pyritään siirtämään työntämällä tai vetämällä voiman F suuntaan, vastustaa kitka liikettä. Kitkavoima F_s on yhtä suuri kuin voima F , niin pitkään kuin kappale pysyy paikoillaan. Tätä kitkaa kutsutaan staattiseksi kitkaksi tai lepokitkaksi. (Serway 1996, 124.)



KUVIO 2. Vapaakappalekuva

Kun kuviossa 2 olevaan kappaleeseen kohdistuva voima F suurenee, lähtee kappale lopulta liikkeelle. Juuri ennen liikkeellelähtöä lepokitka on suurimmillaan. Kun kappale on liikkeessä, liikettä hidastava voima on pienempi kuin lepokitka. Tätä liikettä hidastavaa voimaa kutsutaan kineettiseksi kitkaksi tai liukukitkaksi F_k . Kuviossa 3 on esitettyä kuinka lepokitka muuttuu liukukitkaksi, kun kappaleeseen kohdistuva voima F on riittävän suuri. (Serway 1996, 124.)



KUVIO 3. Lepo- ja liukukitka

Molemmat lepokitkan maksimiarvo ja liukukitka ovat verrannollisia kappaleeseen vaikuttavaan tukivoimaan, eli sekä lepo- että liukukitkalle on olemassa kertoimet, joilla kitkavoima voidaan laskea. Kitkavoima saadaan yhtälöstä μF_T , eli kitkakerroin kertaa tukivoima. Materiaalien välisiä kitkakertoimia on kokeellisesti määritetty ja niistä on tehty valmiita taulukoita. Esimerkiksi kuparin ja teräksen välinen lepokitkakerroin on 0,53 ja liukukitkakerroin 0,36. Taulukoiden kitkakertoimet ovat kuitenkin vain suuntaa-antavia ja varsinkin erittäin sileillä ja muotoaan muuttavilla materiaaleilla fysiikan lait kuvaavat huonosti pintojen välistä vuorovaikutusta. (Suvanto 2008, 123-124.)

2.4 Kitkan mittaaminen

Kitka voidaan mitata kallistuskokeella, jossa materiaalit ovat kallistettavalla alustalla tai mittaamalla vaakatasossa olevalla alustalla materiaalien liikuttamiseen vaadittava voima. Kummankin mittaustavan taustalla on Newtonin I laki, eli jatkuvuuden laki. Laissa määritellään, että kappale pysyy levossa tai jatkaa suoraviivaista liikkeessä, kun siihen kohdistuvien voimien summa on nolla. (Suvanto 2008, 50.)

Kallistuskokeessa toinen materiaali asetetaan pohjaksi kallistettavalle tasolle. Pohjaksi tulevan materiaalin tulee olla kiinteästi kiinnitetty, jottei se liiku kallistuksen aikana tai kun kappale alkaa liikkua sen päällä. Toinen materiaaleista asetetaan pohjan päälle. Kun tasoa

kallistetaan, alkaa pohjan päällä oleva materiaali liukua, kun kitkavoima ei riitä enää pitämään sitä paikallaan. Pohjan päällä olevaan materiaaliin vaikuttavat vain paino-, tuki- ja kitkavoima. Kulman suurentuessa tukivoima pienenee ja tason suuntainen voima suurenee. Lepokitkakerroin voidaan laskea kaavalla $\tan\theta$, jossa θ on kallistuksen kulma. Kallistuskokeella liukukitkan mittaaminen on haastavaa, koska kappaleen tulisi liikkua tasaista nopeutta tasoa pitkin. (Serway 1996, 127.)

Standardin SFS-EN 12195-1 mukaan kitkakertoimen määrittämisessä kallistuskokeella tulee tehdä viisi mittausta. Näiden viiden testin paras ja huonoin tulos jätetään huomiotta ja jäljelläjääneistä tuloksista lasketaan keskiarvo. Testien välissä pitää huolehtia materiaalien puhtaudesta ja kunnosta, jotta tulokset olisivat luotettavia. Mittauksissa määritetään kallistuskulma, jossa kappale lähtee liikkeelle. Kallistuskulman avulla voidaan laskea kaavalla $\tan\theta =$ lepokitkakerroin. Standardin mukaan lepokitkakerroin kerrotaan luvulla 0,925, jolloin saadaan kitkakerroin, jota voidaan käyttää kuormanvarmistukseen liittyvässä laskennassa. (SFS-EN 12195-1, 2010, 38.)

Kitkan mittauksessa vetämällä materiaalia vaakatasossa olevalla tasolla, mitataan materiaalin liikuttamiseen vaadittava voima. Ennen kun veto aloitetaan, vaikuttaa vedettävään kappaleeseen vain paino- ja tukivoima. Kun kappaleeseen kohdistetaan veto, aktivoituu kitkavoima täsmälleen vetävän voiman suuruisena. Tässä vaiheessa voimien summa on vielä nolla, koska kappale ei liiku. Kun vetävää voimaa lisätään riittävästi, lähtee kappale liikkeelle. Liikkeellelähtöön vaadittava voima mitataan, jolloin pystytään laskemaan kitkavoima. Kitkavoimaa vertaamalla pinnan tukivoimaan, voidaan laskea kitkakerroin. Kappaleen ollessa liikkeessä, voidaan mitata liukukitkan suuruus vertaamalla vetoa vastustavaa voimaa pinnan tukivoimaan. (Suvanto 2008, 122-123.)

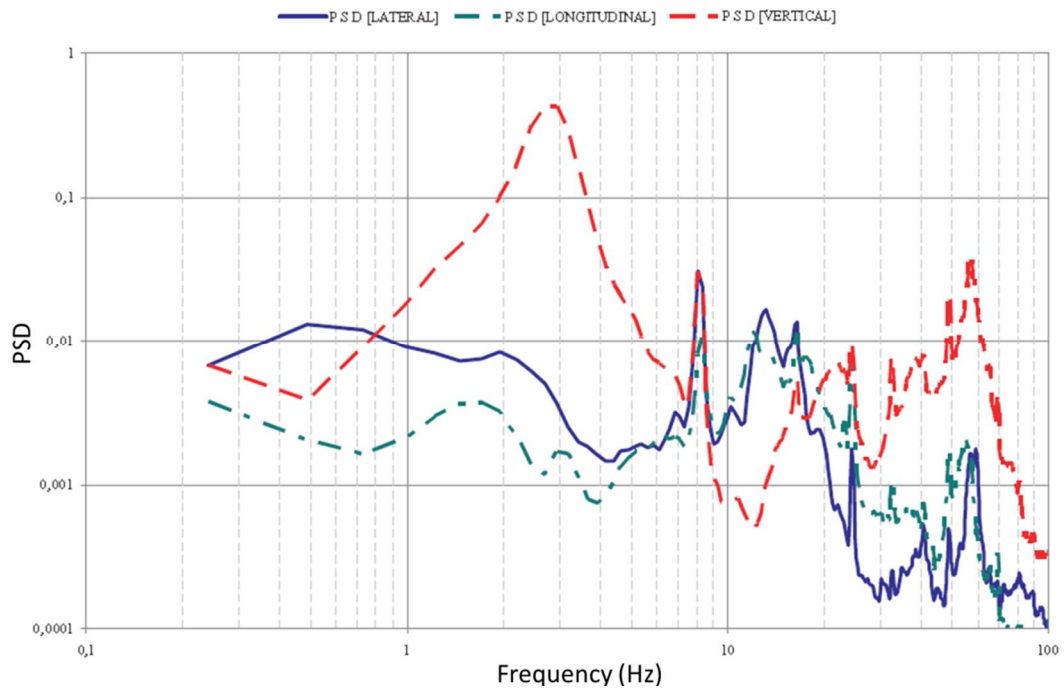
2.5 Tärinän ja ilmankosteuden vaikutus kitkaan

Chowdhury ja Helali (Chowdhury & Helali 2006) mittasivat tärinän ja ilmankosteuden vaikutusta kitkaan laboratorio-olosuhteissa. Tutkimus toteutettiin säähuoneessa, jotta ilmankosteus ja lämpötila pystyttiin pitämään halutulla tasolla. Kitkan mittaamisessa käytettiin laitetta, jossa pyörivän levyn päälle asetettiin neula. Pyörivästä levystä neulaan kohdistuvaa voimaa mitattiin voima-antureilla kahdesta suunnasta, jotta kitkavoima voitiin laskea. Pyörivään levyyn kohdistettiin tärinä halutulla amplitudilla ja taajuudella sen vaikutuksen mittaamista varten. (Chowdhury & Helali 2006, 958-959.)

Tutkimuksessa todetaan, että värinällä ja ilmankosteudella on kitkaa pienentävä vaikutus. Mittauksissa suurin käytetty värinän taajuus oli 500 Hz. Tällä taajuudella kitkakerroin oli 45 % pienempi kuin mittauksessa ilman värinää. 100 Hz taajuudella kitkakerroin oli noin 8 % pienempi. Ilmankosteuden nostaminen 60 %:sta 80 %:iin pienensi kitkakerrointa noin 20 %. Tutkimuksessa myös todettiin, että ilmankosteuden vaikutus väheni värinän taajuuden noustessa. (Chowdhury & Helali 2006,960-963.)

Tutkimus toteutettiin erilaisilla metallisilla pinnoilla ja käytössä oli taajuuksia 100 Hz ja 500 Hz väliltä. Tuloksista voidaan tehdä johtopäätös, että värinä ja ilmankosteus vaikuttavat kitkaan, mutta tuloksia ei tule yleistää koskemaan myös muita materiaalipareja, kuten esimerkiksi puu ja metalli. Vaikutukset voivat olla samansuuntaisia, mutta vaikutuksen suuruutta ei voi määrittää tämän tutkimuksen pohjalta. Yhdistelmäajoneuvon kuormatilassa mitatut voimakkaimmat värinän taajuudet ovat huomattavasti matalampia kuin tutkimuksessa käytetyt taajuudet. Kuormatilasta mitattavista taajuuksista voidaan erottaa kolme kategoriaa: 3-4 Hz jousituksesta, 15-20 Hz renkaista ja 40-55 Hz korirakenteesta (Lu, Ishikawa, Kitazawa & Satake 2010, 105).

Kuviossa 4 on esitettyä kuormatilasta mitatun värinän tehospektritiheys. Suurimmat värinän amplitudit ovat alle 100 Hz alueella, mikä ei kuitenkaan sulje pois värinän vaikutusta kitkaan kuormatilassa. Lisäksi kuormatilassa tuotteeseen vaikuttava värinä ei ole vain yhdensuuntaista, vaan se vaikuttaa Z, X ja Y-akselien suuntaisesti. Kuormatilassa kappaleeseen vaikuttavan värinän simulointi laboratorioissa on erittäin haastavaa, koska todellisessa kuljetuksessa ilmenee myös nopeita voimakkaita iskuja esimerkiksi tien epätasaisuuden vuoksi. (Bernad, Laspalas, Gonzáles, Núñez & Buil 2011, 11-12; Lu ym. 2010, 103.)



KUVIO 4 Kuormatilasta mitatun värinän tehosppektritiheys (Bernad ym. 2011, 8)

3 ANTURIT

3.1 Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssanturit ovat laitteita, joilla pystytään mittamaan tiettyyn kohteeseen kohdistuvaa värinää tai kiihtyvyyttä (Introduction to Accelerometers 2012). Ensimmäiset kiihtyvyyssanturit valmistettiin jo 1920-luvulla, mutta laajempi valmistus aloitettiin 1930-luvun lopulla, kun venymäliuskojen hyödyntäminen kiihtyvyyssanturien valmistuksessa alkoi. Vielä 1940-luvun lopulla venymäliuskoihin perustuneilla kiihtyvyyssantureilla ei pystytty mittaamaan nopeita hetkellisiä kiihtyvyyksiä ja anturin käyttämän signaalin taso oli hyvin matala, jolloin virheet mittauksessa korostuivat varsinkin pienillä kiihtyvyyksillä. 1950-luvulla pietsosähköiset kiihtyvyyssanturit yleistyivät. Näillä antureiden taajuusvaste oli tasaisempi jopa 10 000 Hz asti, kun venymäliuska-antureiden taajuusvaste vääristyi jo 200 Hz taajuudessa. 1960-luvun lopulla antureihin rakennettiin sisään analogista elektroniikkaa, jonka avulla antureiden käyttö helpottui ja mittausten laatu parani. Seuraava hyppäys teknologiassa tapahtui 1990-luvun lopulla, kun siirryttiin digitaalisen elektroniikan käyttöön. Viimeisen viidentoista vuoden aikana suurimmat muutokset alalla ovat olleet digitaalitekniikan käyttöönotto, kova hintakilpailu, joka on pudottanut kiihtyvyyssantureiden hintoja sekä MEMS-teknologialla valmistettujen antureiden laajamittainen käyttö useissa eri sovelluksissa. (Walter 2007, 85-86 & 90-92.)

Kiihtyvyyssantureilla on erilaisia teknisiä ominaisuuksia, jotka käydään seuraavaksi läpi. Näiden ominaisuuksien ymmärtäminen on tärkeää oikean anturin valinnan ja mittauksen luotettavuuden arvioinnin kannalta. Seuraavassa listassa käytetään antureiden valmistajien käyttämiä merkintätapoja eikä SI-järjestelmän mukaisia termejä. Listassa g tarkoittaa painovoimaa ja Hz mitattavaa taajuusalueita.

- Herkkyys: Herkkyys tarkoittaa anturin antaman jännitteen muutosta kiihtyvyyden yksikköä kohden. Herkkyys ilmoitetaan usein yksikkönä $\frac{mV}{g}$. Ilmoitettu herkkyys on mitattu tietyssä lämpötilassa ja tietyllä syöttöjännitteellä.
- Taajuusalue: Taajuusalue tarkoittaa taajuuskaistaa, jonka sisällä anturi pystyy mitaamaan kiihtyvyyttä. Antureissa voi olla sisäänrakennettuna mitattavaa taajuusalueita rajoittavaa elektroniikkaa. Rajaus voidaan tehdä myös anturin ulkoisella laitteella, kuten ali- tai ylipäästösuodattimella. Taajuusalue ilmoitetaan hertseinä.
- Poikittaisherakkyys: Poikittaisherakkyys tarkoittaa kiihtyvyyden vuotamista mittaussakseliin suorakulmassa olevasta akselistä. Esimerkiksi X-akseliin nähden Y- ja Z-akselit ovat suorakulmassa ja näissä akseleissa tapahtuva kiihtyvyys vaikuttaa myös X-akselin mittaustulokseen. Poikittaisherakkyys ilmoitetaan prosentteina. Esimerkiksi 3 % poikittaisherakkyys tarkoittaa, että Z-akselin kiihtyvyydestä 3 % vuotaa X- ja Y-akselien mittaustuloksiin. (Freescale 2007.)
- Kohina ja kohinatiheys: Anturin kohina määrittää pienimmän mitattavan kiihtyvyyden. Kohinaa pienemmät kiihtyvyydet sekoittuvat kohinaan, jolloin niitä ei voida mitata. Pohjakohinan määrää voidaan pienentää kaventamalla mitattavaa taajuuskaistaa. (Freescale 2007.) Kohina aiheutuu mittalaitteiden sähköisistä ja mekaanisista komponenteista, mutta siihen vaikuttaa myös mittaustilanne, jos esimerkiksi kiihtyvyyssanturi ei ole riittävän hyvin kiinnitettynä mittaustilanteeseen (Mayo 2008). Anturista aiheutuva kohinatiheys voidaan laskea kaavalla $\frac{\mu g}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{(Taajuuskaista * 1,6)}$. Tuloksen yksikkö on tyypillisesti mg-RMS. (Accelerometer specifications – quick definitions 2012) Kohina on satunnaista ja normaalisti jakautunut. RMS-arvo kertoo kohinan ensimmäisen keskihajonnan suuruuden, eli 68,26 % kohinasta on rms-arvoa pienempää. Jos todennäköisyyttä rms-arvon ylittävälle kohinalle halutaan pienentää, pitää keskihajontojen määrää kasvattaa. Esimerkiksi 99,74 % todennäköisyyden saavuttamiseksi pitää rms-arvoa kertoa kolmella. (Mayo 2008.)
- Epälineaarisuus: Kiihtyvyyssanturi muuttaa mitatun kiihtyvyyden jännitteeksi. Ideaalitalanteessa jännite muuttuu lineaarisesti kiihtyvyyden muuttuessa. Käytännössä kiihtyvyyssantureissa on epälineaarisuutta, eli jännite muuttuu eri määrän kiihtyvyyden yksikköä kohden mittaustilanteen eri osissa. Epälineaarisuus voidaan ilmoitetaan pro-

sentteina, voltteina tai kiihtyvyytenä. (Freescale 2007.) Voltteina ilmoitettuna se las-
ketaan seuraavalla kaavalla:

$$Jännite (0 g) - \frac{1}{2} * (Jännite (1 g) + Jännite (-1 g)) \text{ (Piccirillo 2005)}$$

- Taajuusvaste: Taajuusvaste ilmoittaa kuinka paljon anturin herkkyys muuttuu kiihtyvyyden taajuuden muuttuessa. Muutosta verrataan referenssiherkkyteen, joka on mitattu tietyllä taajuudella, kuten 50 Hz. Muutos voidaan ilmoittaa prosentteina tai desibeleinä tietylle taajuusalueelle. Ilmoitetun taajuusalueen ulkopuolella herkkyys voi muuttua ilmoitettua enemmän ja mittaustulokset ovat epätarkkoja. (Practical understanding of key accelerometer specifications 2011.)
- Offset: Kiihtyvyyssanturi antaa tietyn jännitteen, kun siihen ei kohdistu kiihtyvyyttä. Tätä jännitettä kutsutaan offsetiksi. Käyttölämpötilan muuttuessa offset-jännite voi muuttua. Suurin mahdollinen muutos toimintalämpötilan sisällä ilmoitetaan erona referenssilämpötilassa mitattuun jännitteeseen. (Freescale 2007.)
- Shokin kesto: Kiihtyvyyssantureihin voi kohdistua lyhytkestoisia ja suuria kiihtyvyyksiä, jos ne esimerkiksi tippuvat asennettaessa lattialle. Shokin kesto ilmoittaa kuinka suuria kiihtyvyyksiä anturi kestää ilman rikkoutumista. (Maluf 2004, 97.)
- Mittausala: Mittausalalla ilmoitetaan suurin positiivinen ja negatiivinen kiihtyvyys, jonka kiihtyvyyssanturi pystyy mittaamaan. (Introduction to accelerometers 2012)
- Ratiometrinen virhe: Ideaaltilanteessa kiihtyvyyssanturi on ratiometrinen, eli syöttöjännitteen muuttuessa myös anturin antama jännite muuttuu samassa suhteessa. Ratiometrinen virhe ilmoittaa kuinka paljon herkkyiden muutos poikkeaa syöttöjännitteen muutoksesta. (Freescale 2007.)

3.1.1 Pietsosähkö ja pietsoresistiiviset anturit

Pietsosähköiset materiaalit luovat sähkövaraukset, kun niihin kohdistuu mekaaninen rasitus. Vastaavasti materiaali supistuu tai laajenee, kun siihen kohdistetaan jännite. Pietsosähköisiä materiaaleja ovat luonnossa esiintyvä kvartsi ja keinotekoiset ferroelektriset aineet. Näitä materiaaleja voidaan käyttää antureissa mittaamaan voimaa, vääntöä ja painetta. (Gatti & Ferrari 1999, 669-670.) Pietsosähköiset anturit ovat luotettavia ja kestäviä, koska niissä ei ole liikkuvia osia. Ne ovat myös kevyitä ja niiden poikittaisherkkyys on hyvä, eli kiihtyvyydet muilla akseleilla kuin mittausakselilla vaikuttavat vain vähän mittaukseen. Matalien taajuuksien mittaaminen pietsosähköantureilla on epätarkkaa eikä staattista kiihtyvyyttä ei pystytä mittaamaan. (Gatti & Ferrari 1999, 673-674.)

Kiihtyvyyssantureissa pietsosähköiseen materiaaliin on kiinnitetty hitausmassa, joka liikkuessaan aiheuttaa mekaanisen rasitteen materiaaliin, joka muodostaa sähkövarauksen. Varauksen suuruudesta pystytään laskemaan kiihtyvyyden suuruus. Joissakin antureissa pietsosähköinen materiaali toimii hitausmassana, jolloin erillistä hitausmassaa ei tarvita. (Gatti & Ferrari 1999, 670.)

Pietsoresistiiviset kiihtyvyyssanturit toimivat piivastuksilla, jotka muuttavat resistanssia mekaanisen rasituksen mukaan. Vastukset ovat siltaan kytkettyinä ja tuottavat jännitteen kiihtyvyyden taajuuden ja voimakkuuden mukaisesti. (Bouten, Koekkoek, Verduin, Kodde, Janssen 1997, 137.) Pietsosähköisiin kiihtyvyyssantureihin verrattuna pietsoresistiiviset kiihtyvyyssanturit eivät ole yhtä tarkkoja ja niiden mittausalue on suppeampi, mutta niillä pystytään mittaamaan staattista kiihtyvyyttä, kuten painovoima vaikutusta. (Gatti & Ferrari 1999, 676.)

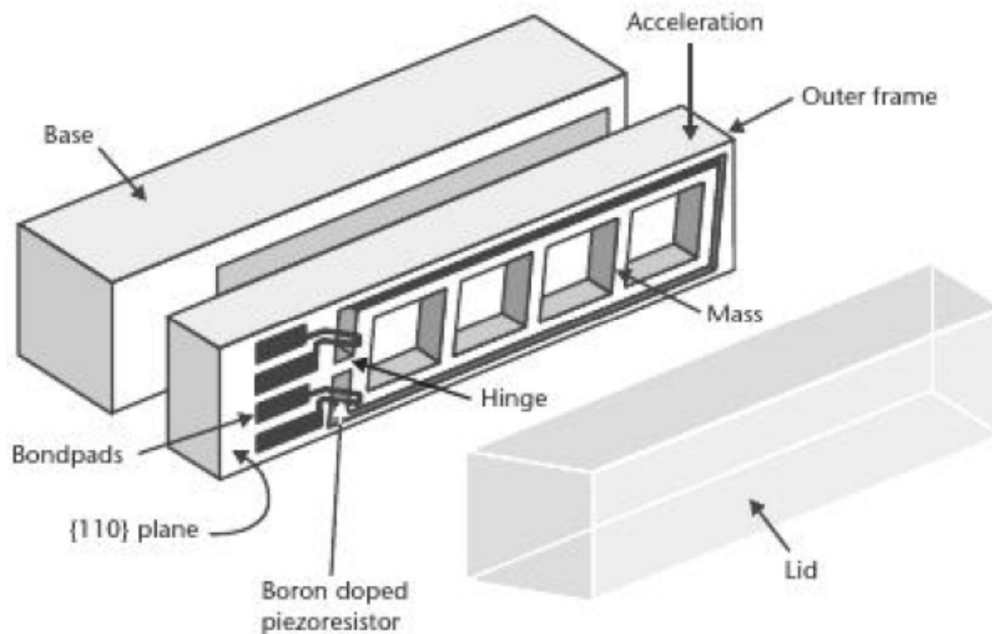
3.1.2 MEMS-anturit

MEMS-termille (microelectromechanical systems) ei ole yksiselitteistä kuvausta, koska se on käsitteenä hyvin laaja. Yksinkertainen kuvaus MEMS:lle on tuotantotapa, jolla pystytään suunnittelemaan ja tuottamaan miniatyyrikokoisia mekaanisia ja sähkömekaanisia tuotteita, kuten paine- ja kiihtyvyyssantureita. Yksittäin MEMS-tuotteet ovat yksinkertaisia tiettyä tarvetta varten suunniteltuja laitteita, mutta niiden yhteiskäyttö mahdollistaa laajan valikoiman toiminnallisuuksia. Tätä tekniikkaa käytetään jo hyvin laajasti eri sovelluksissa. Esimerkiksi uusissa ajoneuvoissa turvatyynyn laukaisu toteutetaan MEMS-tekniikalla tuotetun kiihtyvyyssanturin antaman digitaalisen tiedon perusteella. (Maluf 2004, 2-3.)

Ensimmäiset MEMS-kiihtyvyyssanturit valmistettiin jo vuonna 1979, mutta laajempi käyttöönotto on tapahtunut vasta 90-luvulla. Kaikissa MEMS-kiihtyvyyssantureissa on sama perusrakenne, joka koostuu jousen varassa olevasta hitausmassasta. Antureiden välillä on eroja hitausmassan suhteellisen paikan havaitsemisessa, kun siihen kohdistuu ulkopuolinen voima. Eniten käytetty tapa on kapasitiivinen, jossa hitausmassa toimii toisena kondensaattorin johdelevyistä. (Maluf 2004, 96-97.)

MEMS-kiihtyvyyssanturit ovat joko pietsoresistiivisiä tai kapasitiivisiä. Pietsoresistiiviset anturit valmistetaan vain etsaamalla, mutta kapasitiiviset anturit voidaan valmistaa myös syväetsaamalla tai käyttämällä litografiaa. Eri valmistustavoilla voidaan vaikuttaa antureiden ominaisuuksiin, kuten shokin kestoon, herkkyyteen ja mittausalueeseen. Kuviossa 5 on esitetty-

nä pietsoresistiivisen kiihtyvyyssanturin rakenne. Kuviossa olevat pietsovastukset ovat vain 4,2 μm mittaisia. (Maluf 2004, 98-103.)



KUVIO 5. Pietsoresistiivisen MEMS-kiihtyvyyssanturin rakenne (Maluf 2004, 98)

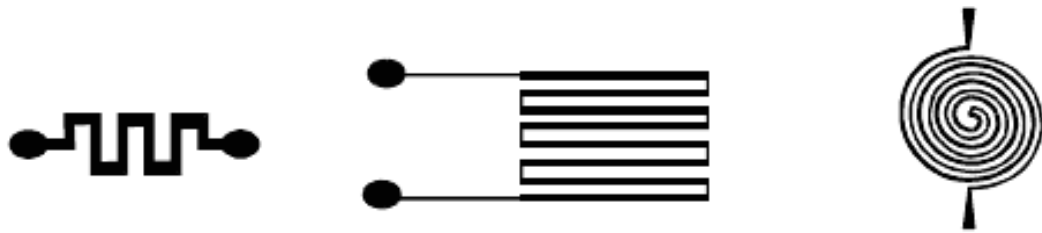
3.2 Venymäliuska-anturit

Venymäliuska-anturien toiminta perustuu venymäliuskoihin. Venymäliuskat ilmoittavat kappaleen mittojen muutoksen joko resistanssin tai kapasitanssin muutoksena. Venymäliuskaan kohdistuu sama rasitus kuin kohteeseen johon se on kiinnitetty, jolloin resistanssia tai kapasitanssia mittaamalla voidaan laskea kappaleeseen kohdistuva rasite. Venymäliuskoja käytetään mm. veto- ja paineantureissa sekä kappaleisiin kohdistuvien rasitusten mittaamisessa. (Nawrocki 2005, 41-42.)

Kapasiivisissa venymäliuskoissa mitataan kahden levyn välistä kapasitanssin muutosta. Kapasitanssin muutos on verrannollinen venymäliuskaan kohdistuvaan voimaan, jolloin vaikuttavan voiman laskeminen on mahdollista. Tätä venymäliuskamallia käytetään lähinnä paineantureissa. (Nawrocki 2005, 47-48.)

Resistanssin muutokseen perustuva venymäliuska on mekaanisen rasituksen mittaamiseen suunniteltu lankavastus. Vastus voidaan tehdä metallilangasta tai puolijohhteesta. Metallilan-

ka voidaan tehdä useasta eri metalliseoksesta, kuten konstantaanista ja mangaanista. Jokaisella metalliseoksella on erilaiset ominaisuudet, kuten resistanssi ja lämpölaajenemiskerroin. Kuviossa 6 on esitettyä erilaisia metallilangasta tehtyjen venymäliuskojen malleja. Metalliseoksen valinnassa on erittäin tärkeää huomioida lämpötilan muutoksen aiheuttama vaikutus resistanssiin, koska se voi aiheuttaa epätarkkuutta mittaustulokseen. Lämpötilan vaikutusta voidaan vähentää käyttämällä kompensoivaa venymäliuskaa mittauksessa tai mittamalla vastusarvon muutosta siltakytkennän avulla. (Nawrocki 2005, 42-46.)



KUVIO 6. Resistanssia mittaavia venymäliuskoja

Venymäliuskat valmistetaan joko matala- tai korkearesistanssisiksi. Matalaresistanssiset vastukset toimivat 120 Ω ja 500 Ω välillä, kun korkearesistanssiset vastukset toimivat 1 k Ω ja 5 k Ω välillä. Tyypillisesti vastus on joko 120 Ω tai 350 Ω . Mitattava resistanssin muutos on pieni, koska esimerkiksi 500 Ω venymäliuskan resistanssin muutos on suurimmillaan 2 Ω . (Nawrocki 2005, 44.) Puolijohteesta tehdyillä vastuksilla saadaan aikaiseksi suurempia muutoksia resistanssissa, mutta niiden lämpötilan kesto on heikompi kuin metallilangasta tehdyillä vastuksilla (Nawrocki 2005, 47).

Seuraavaksi käydään läpi muutamia venymäliuskoihin perustuvien vetoantureiden ominaisuuksia, jotka on tärkeää ottaa huomioon ennen mittausta.

- Maksimikapasiteetti: Suurin anturiin kohdistettava rasitus, joka ei aiheuta mittaustulon virheen suurenemista.
- Rated Output (R.O.): Anturin luoma signaalin taso, kun anturiin kohdistetaan sen kapasiteetin suuruinen rasitus. Yksikkönä käytetään mV/V.
- Mittausalue: Mittausalue tarkoittaa pienimmän ja suurimman anturiin kohdistuvan rasituksen väliä, jonka sisällä mittaustulot pysyvät luvatuissa rajoissa.
- Safe load limit (Turvaraja): Suurin anturiin kohdistettava rasitus, joka ei vielä muuta anturin toimintakykyä pysyvästi.

- Resoluutio: Pienin mahdollinen fyysinen rasitus, joka aiheuttaa muutoksen signaalin tasossa. Tätä pienempiä rasituksia ei pysty mittaamaan, koska ne sekoittuvat kohde-
naan.
- Herkkyys: Herkkyys tarkoittaa anturin antaman jännitteen muutosta fyysisen rasituksen yksikköä kohden.
- Epälineaarisuus: Vetoanturi muuttaa mitatun rasituksen jännitteeksi. Ideaalitilanteessa jännite muuttuu lineaarisesti rasituksen muuttuessa. Käytännössä epälineaarisuuden vuoksi jännite muuttuu eri määrän rasituksen yksikköä kohden mittausalueen eri osissa. Epälineaarisuus ilmoitetaan prosentteina R.O:sta.
- Hystereesi: Vetoanturista mitattava jännite tietyllä rasituksella riippuu rasituksen suuruudesta ja rasituksen muutosnopeudesta. Eri mittauskerroilla voidaan samalla rasituksella saada eriävät mittaustulokset hystereesin vuoksi. Hystereesi ilmoitetaan prosentteina R.O.:sta.
- Toistettavuus: Anturin antama mittaustulos voi vaihdella, vaikka rasitus ja muut tekijät mittauskertojen välillä pysyisi samana. Tätä mittaustuloksen vaihtelua kutsutaan toistettavuudeksi ja virheen suuruutta toistettavuusvirheeksi. (OIML R 60 2000, 6-7 ja Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 84-85.)

Vetoanturi antaa tietyn jännitteen, kun siihen ei kohdistu rasitusta. Niin sanottu nollakohta voi kuitenkin muuttua mittauksen aikana, mikä aiheuttaa mittausvirhettä. Seuraavassa on lista ominaisuuksista, jotka vaikuttavat vetoanturin nollakohdan tarkkuuteen.

- Zero balance: Vetoanturista mitattava jännite, kun siihen ei kohdistu rasitusta. Jännitteen suuruus voi vaihdella ja vaihtelu ilmoitetaan prosenttiosuutena R.O.:sta.
- Zero float: Vetoantureiden antaman signaalin voimakkuus ilman rasitusta voi muuttua anturiin kohdistuneen yhtä suuren puristuksen ja vedon jälkeen. Tätä signaalin muutosta kutsutaan nimellä Zero float ja se ilmoitetaan prosenttiosuutena kokonaiskapasiteetista (%FS).
- Zero stability: Tällä termillä kuvataan kuinka paljon anturin zero balance muuttuu tietyn ajan kuluessa, kun kaikki muut muuttujat pysyvät muuttumattomina. (OIML R 60 2000, 6-7 ja Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 84-85.)

Vetoanturit voivat olla herkkiä lämpötilan vaikutuksille. Lämpötila voi aiheuttaa kahta erilaista virhettä, jotka voidaan ottaa huomioon, kun mittausta suoritettaessa mitataan myös lämpötila. Seuraavassa on toimintalämpötilaan ja lämpötilan muutoksen aiheuttamiin virheisiin liittyviä tekijöitä.

- Kompensoitu toimintalämpötila: Toimintalämpötila, jonka sisällä vetoanturin zero balance ja tarkkuus pysyvät luvatuissa rajoissa. Vetoanturia voi usein käyttää myös suuremmissa tai pienemmissä lämpötiloissa, mutta silloin epävarmuustekijät kasvavat. Vetoantureista ilmoitetaan myös suurin ja pienin mahdollinen lämpötila, jossa vetoanturia voi käyttää ilman sen rikkoontumista.
- Lämpötilan muutokset voivat vaikuttaa vetoanturin zero balanceen ja rasituksen alla muodostuvaan jännitteeseen. Lämpötilan muutoksen vaikutukset esitetään usein kuvaajana kompensoidulle toimintalämpötilalle. Lämpötilan vaikutus zero balanceen ilmoitetaan prosentteina R.O.:sta ja yksikkönä on mV/V/°C. Lämpötilan vaikutus anturin luomaan jännitteeseen rasituksen alla ilmoitetaan prosentteina rasittavasta kuormasta ja yksikköinä on kg/°C tai kg/°F. (OIML R 60 2000, 6-7 ja Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 84-85.)

Vetoanturin tarkkuus

Vetoanturin tarkkuuteen vaikuttavat useat tekijät. Edellisessä kappaleessa käsiteltiin vetoantureiden ominaisuuksia ja mittaustarkkuuteen vaikuttavat virheet. Seuraavaksi käydään läpi miten eri virhemahdollisuuksista voidaan laskea suurin mahdollinen kokonaisvirhe.

Mittaustarkkuuteen vaikuttavat epälineaarisuus, hystereesi, toistettavuus sekä lämpötilan muutoksen aiheuttamat virheet zero balanceen ja R.O.:hon. Epälineaarisuus, hystereesi ja toistettavuus voidaan esittää yhtenä yhdistettynä virheenä. Seuraavalla kaavalla voi laskea anturin tarkkuuden, jos tiedossa on yhdistetty virhe. (How to Use Load Cells, 3-4.)

$$\varepsilon > \sqrt{\varepsilon_c^2 + \left(\frac{\varepsilon_z * L * N}{W_1} * t\right)^2 + (\varepsilon_s * t)^2}$$

- ε : Vetoanturin tarkkuus (%)
- ε_c : Yhdistettyvirhe (%)
- ε_z : Lämpötilan vaikutus zero balanceen (%/°C)
- ε_s : Lämpötilan vaikutus jännitteeseen (%/°C)
- L : Vetoanturin kapasiteetti
- N : Vetoantureiden kappalemäärä
- W_1 : Suurin mitattava rasiitus
- t : Lämpötilan vaihteluväli mittauksen aikana (°C)

Jos yhdistettyä virhettä ei ole määritelty vetoanturin teknisissä tiedoissa, lasketaan tarkkuus seuraavalla kaavalla.

$$\varepsilon > \sqrt{\varepsilon_L^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_R^2 + \left(\frac{\varepsilon_Z * L * N}{W_1} * t\right)^2 + (\varepsilon_S * t)^2}$$

- ε : Vetoanturin tarkkuus (%)
- ε_L : Epälineaarisuus (%)
- ε_H : Hystereesivirhe (%)
- ε_R : Toistettavuusvirhe (%)
- ε_Z : Lämpötilan vaikutus zero balanceen (%/°C)
- ε_S : Lämpötilan vaikutus jännitteeseen (%/°C)
- L : Vetoanturin kapasiteetti
- N : Vetoantureiden kappalemäärä
- W_1 : Suurin mitattava rasitus
- t : Lämpötilan vaihteluväli mittauksen aikana (°C)

Nollatasapainoon liittyvä virheen voi poistaa kaavasta, jos mittauksen aikana nollapiste voidaan kalibroida uudestaan. Samoin lämpötilan aiheuttama virhe muuttuu merkityksettömäksi, jos sovelluksessa lämpötila pysyy vakiona. (How to Use Load Cells, 3-4.) Kuten kaavoista voi huomata, on lämpötilalla erittäin suuri vaikutus mittauksen tarkkuuteen. Jos lämpötila pysyy vakiona mittauksessa, jää mittausvirheeksi vain yhdistettyvirhe, eli epälineaarisuus, hystereesivirhe ja toistettavuusvirhe.

4 MITTAUKSEN EPÄVARMUUSTEKIJÄT JA NIIDEN ARVIOINTI

Mittaus on prosessi, jolla arvioidaan mitattavaa suuretta. Kaikkiin mittauksiin liittyy myös virhe. Virheen suuruutta ei pysty tarkasti ilmoittamaan, mutta arviota siitä kutsutaan mittauksen epävarmuudeksi. Mittauksen epävarmuustekijöiden arvio on tilastotieteellinen kuvaus mittausvirheestä. Mittaustuloksiin tulisikin aina lisätä tieto tuloksen epävarmuudesta. (Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 8.)

Epävarmuuden arvioinnissa on kuusi vaihetta. Ensimmäinen vaihe on mitattavan fyysisen suureen määrittäminen. Mitattava suure voi olla suoraan mitattavissa tai se voidaan johtaa muita suureita mittaamalla. Ensimmäistä tapaa kutsutaan suoraksi ja jälkimmäistä moniulotteiseksi mittaukseksi. Jos kyseessä on moniulotteinen mittaus, on tärkeää luoda matemaatti-

nen kaava, joka kuvaa suureiden suhteet toisiinsa. Tässä vaiheessa tulee myös kuvata mittalaitteet, ympäristön vaikutukset, tekniset tiedot mittalaitteista, standardit ja mittausprosessi. Näitä tietoja käytetään epävarmuustekijöiden arvioinnissa. (Mts. 8.)

Toisessa vaiheessa luodaan virhemalli, joka on algebrallinen kuvaus eri osavirheiden osuudesta mittauksessa. Virhekuvaus suurelle q on seuraavan kaavan mukainen:

$$\varepsilon_q = c_x \varepsilon_x + c_y \varepsilon_y + c_z \varepsilon_z$$

- ε_q : virhe q :ssa
- ε_x : virhe mitatussa suureessa x
- ε_y : virhe mitatussa suureessa y
- ε_z : virhe mitatussa suureessa z

Kaavassa c_x , c_y ja c_z ovat herkkyyskertoimia, jotka määrittelevät virheiden x , y ja z suhteellisen vaikutuksen kokonaisvirheeseen q . Herkkyyskertoimet määritellään seuraavasti: (Mts. 9)

$$c_x = \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right), c_y = \left(\frac{\partial q}{\partial y} \right), c_z = \left(\frac{\partial q}{\partial z} \right)$$

Kolmannessa vaiheessa tunnistetaan mittausvirheet ja niiden jakaumat. Mittausprosessin virheet ovat peruselementtejä epävarmuuden analysoinnissa. Kun nämä peruselementit on tunnistettu, voidaan niille luoda epävarmuusarviot. Yleisimmät huomioon otettavat tekijät ovat kalibroitivirhe, toistettavuus, resoluutiovirhe, mittaajan aiheuttama virhe, ympäristön vaikutus ja virheet datan käsittelyssä. (Mts. 9.)

Joissain mittaustapahtumissa toistettavuutta ja resoluutiovirhettä ei pidä laskea erikseen epävarmuusanalyysissä. Yksinkertaistettuna voidaan todeta, että jos mittauksen toistettavuusvirhe on pienempi kuin resoluutio, vain resoluutiovirhe otetaan huomioon. Jos toistettavuusvirhe on suurempi kuin resoluutio, niin kummatkin virheet otetaan huomioon epävarmuusanalyysissä. (Mts. 10-11.)

Kolmanteen vaiheeseen kuuluu myös virheiden todennäköisyysjakaumien valinta. Todennäköisyysjakauma on matemaattinen esitys mittausvirheen suuruudesta ja sen tapahtumato-dennäköisyydestä. Jotta mittausvirheen ja – epävarmuuden keskinäinen suhde tulee selvemmin esille, pitää virhejakaumia käydä läpi. Virhejakauma voi olla esimerkiksi normaali-, logaritmisen tai eksponenttijakauman mallinen. Jokaiselle jakaumalle on omat matemaatti-

set kaavat, joita jakauman laskentaan käytetään. Tärkeimpiä mittauksesta laskettavia tunnuslukuja ovat keskihajonta, keskiarvo ja moodi. Useimmin käytettyjä jakaumia ovat normaalijakauma ja logaritminen jakauma. Ellei tiedossa ole virhejakaumaa, suosituksena on käyttää normaalijakaumaa oletusarvona ja logaritmistä jakaumaa, jos jakauman ei ole symmetrinen. (Mts. 12-14.)

Virhejakauma kertoo kuinka todennäköistä tietyn virheen esiintyminen on mittauksessa. Neljännessä vaiheessa arvioidaan mittauksen epävarmuutta tilastotieteen keinoin. Erittäin tärkeä kuvaaja on varianssi, joka on keskihajonnan neliöjuuri. Varianssi tilastotieteessä kuvaa kuinka kaukana odotusarvosta jakauma keskimäärin on. Epävarmuuden laskennassa on käytössä aksioomia, eli perusoletuksia, jotka kuvaavat mittausvirheen, mittauksen epävarmuuden ja varianssin suhteen. Aksioomat ovat seuraavat:

- Mittausvirheet ovat satunnaisia muuttujia, jotka seuraavat todennäköisyysjakaumia
- Epävarmuus mitatussa arvossa on yhtä suuri kuin epävarmuus mittausvirheessä
- Mittauksen epävarmuus on mittausvirheen varianssin neliöjuuri.

Virhejakauman varianssin arviointiin on kaksi tapaa. Ensimmäinen tapa pohjautuu kerätyn datan analysointiin ja toinen tekniseen tietotaitoon tai kokemukseen mittausprosesseista. (Mts. 14-15.) Arviointitavat käydään läpi tarkemmin luvun lopussa.

Kun eri virheille on laskettu niiden epävarmuudet, eli varianssit, lasketaan ne viidennessä vaiheessa yhteen. Kuten edellä on mainittu, on mittauksen epävarmuus mittausvirheen varianssin neliöjuuri. Eri virhekomponenttien yhdistämiseksi voidaankin käyttää varianssien yhteenlaskua. Yleinen kuvaus mittausepävarmuudesta varianssien avulla on seuraavan kaavan mukaan:

$$u_{\varepsilon_z}^2 = a^2 u_{\varepsilon_x}^2 + b^2 u_{\varepsilon_y}^2 + 2abcov(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$$

Kaavan viimeinen termi, kovarianssi kuvaa kahden satunnaisen muuttujan riippuvuutta toisistaan. Kovarianssia käytetään laskutoimituksessa harvoin ja useammin käytetäänkin korrelaatiokerrointa, joka määritellään seuraavan kaavan mukaisesti: (Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 16-17 & Uncertainty Analysis Principles and Methods 2007, 52.)

$$\rho_{\varepsilon_x \varepsilon_y} = \frac{cov(\varepsilon_x \varepsilon_y)}{u_{\varepsilon_x} u_{\varepsilon_y}}$$

Jos virhelähteiden korrelaatiokerroin on yksi, eli virhelähteet ovat täysin riippuvaisia toisistaan, lasketaan epävarmuudet yhteen lineaarisesti. Jos korrelaatiota ei ole, eli korrelaatiokerroin on nolla, lasketaan epävarmuudet yhteen ottamalla neliösummasta neliöjuuri. Korrelaatiokertoimen ollessa -1, eli virhelähteiden välillä on negatiivinen korrelaatio, on yhdistetty epävarmuus epävarmuuksien erotuksen itseisarvo. Yleensä mittausprosessissa ei ole korreloivia virheitä. Esimerkiksi resoluutiovirheen ja ympäristön vaikutuksilla ei ole korrelaatiota keskenään. Jos korrelaatiota kahden virheen välillä on, käytetään keskinäiskorrelaatiota. (Uncertainty Analysis Principles and Methods 2007, 53.)

Epävarmuuden arvioinnissa vapausaste tarkoittaa tiedon määrää, jota käytetään epävarmuuden laskentaan. Tämän vuoksi vapausaste on tiedettävä yhteenlasketun epävarmuuden määrittämisessä. Valitettavasti vapausasteen määrittäminen ei ole vain epävarmuuskomponenttien vapausasteiden summa. Yhteenlaskettu vapausaste v_{eff} yhteenlasketulle epävarmuudelle u_T eri epävarmuuskomponenteista u_i ja niiden vapausasteista v_i n:lle kappaleelle virheitä Welch-Statteerwaiten kaavan mukaan on: (Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 20.)

$$v_{eff} = \frac{u_T^4}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^4 u_i^4}{v_i}}$$

Viimeinen vaihe on tulosten raportointi, joka on erittäin tärkeä vaihe laaduntarkkailun kannalta. Tämän vuoksi raportin tulisi olla muodossa, joka on helppolukuinen ja helposti ymmärrettävä. Raportin tulisi sisältää seuraavat tiedot:

- Arvio mitattavan suureen arvosta, epävarmuustekijöiden summa ja vapausasteet
- Funktio mitattavan suureen ja mittaustulosten välillä ja herkkyyskertoimet
- Jokaisen mitatun suureen arvot, epävarmuuden suuruus ja vapausasteet
- Lista mittausprosessin epävarmuuksista ja vapausasteista jokaiselle komponentille ja kuvaus niiden arvioinnista
- Lista soveltuvista korrelaatiokertoimista sisältäen mahdolliset keskinäiskorrelaatiot komponenttien epävarmuuksien välillä.

Raportissa on tärkeää kuvata mittausprosessi mittalaitteineen ja antaa mahdollista lisätietoa mittauksesta. Esimerkiksi mittauspöytäkirjat voivat auttaa analyysin tulosten esittämisessä. Raportoinnin yhteydessä olisi myös hyvä käsitellä mittauksen luottamusrajat ja laajennettu epävarmuus. Luottamusrajoilla kuvataan ylä- ja alarajaa, joiden sisällä todellinen tulos on

tietyllä luottamustasolla tai todennäköisyydellä. Luottamusrajat lasketaan joko normaali- tai studentin t-jakaumalla. Laajennetulla epävarmuudella tarkoitetaan ylä- ja alarajaa, joiden välissä suureen todellisen arvon uskotaan olevan. Epävarmuus ja laajennettu epävarmuus ovat termejä, jotka menevät helposti sekaisin, joten mittauksen yhteenlasketusta epävarmuudesta tulisikin käyttää termiä standardiepävarmuus. (Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 21-22.)

4.1 Datan analysointiin perustuva tapa

Ensimmäinen, eli kerätyn materiaalin analysointiin perustuva tapa, vaatii useita itsenäisiä mittauksia suureesta. Näytepopulaatiosta tehdään päätelmiä tilastotieteen ja jakauman muodon perusteella. Jakauman hahmottamisessa on histogrammi erittäin hyvä työkalu.

Satunnaiset virheet noudattavat useimmiten normaalijakaumaa. Näytteistä lasketaan tilastotieteen kaavoilla keskiarvo ja keskihajonta, joiden oletetaan kuvaavan koko populaation jakauman keskiarvoa ja keskihajontaa. Kolmas tarvittava tieto on vapausasteet. Keskiarvo on luku, joka voidaan olettaa tulevan mittauksen tulokseksi. Näytteiden keskihajonta antaa arvon miten populaation arvot ovat sijoittuneet keskiarvon ympärille. Se ilmoittaa myös epävarmuuden satunnaisesti populaatiosta otetusta arvossa. Jos epävarmuudella halutaan mittauksen tuloksen sijaan kuvata keskiarvon epävarmuutta, tulee käyttää seuraavaa kaavaa, jossa keskihajonta jaetaan otoksen neliöjuurella: (Uncertainty Analysis Principles and Methods 2007, 49-50.)

$$s_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

Kun keskiarvo, keskihajonta ja vapausasteet on määritetty, voidaan laskea luottamusrajat, joiden sisällä keskiarvo on tietyllä luottamustasolla. Luottamusrajat voidaan ilmoittaa keskihajonnan kerrannaisina. Normaalijakaumaa noudattaville tuloksille luottamusrajat määritetään t-jakaumalla, jonka arvo riippuu halutusta luottamustasosta (C) ja vapausasteista. Luottamusrajat lasketaan seuraavalla kaavalla, jossa α on $(1-C/100)$ ja $v = n-1$. (Uncertainty Analysis Principles and Methods 2007, 50.)

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2,v} \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

4.2 Heuristinen menetelmä

Joissain tapauksissa mittausvirheen jakauma joudutaan määrittelemään aiemmista mittauksista ja mittausvirheistä saadulla kokemuksella. Tätä menetelmää kutsutaan heuristiseksi menetelmäksi. Kalibrointivirhe, resoluutiovirhe, käyttäjän tekemät virheet ja ympäristön vaikutukset ovat muuttujia, joita usein joudutaan arvioimaan heuristisesti arvioimalla virheen suuruus ja sen todennäköisyys. (Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 27.)

Heuristinen menetelmä on päinvastainen datan analysointiin perustuvaan menetelmään verrattuna. Epävarmuuden määrittäminen aloitetaan mittaustuloksen ylä- ja alarajojen, tuloksen todennäköisyyden ja vapausasteiden määrittämisellä. Näiden lukujen avulla määritetään keskihajonta tai epävarmuus. (Uncertainty Analysis Principles and Methods 2007, 50.)

Mittausvirheiden todennäköisyydet noudattavat aina tiettyä todennäköisyysjakaumaa. Jokaiselle todennäköisyysjakaumalle on omat laskukaavansa, joiden avulla epävarmuutta voidaan arvioida. Jos virheen arvioidaan noudattavan normaalijakaumaa, voidaan epävarmuus laskea seuraavan kaavan mukaan: (Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 27.)

$$u = \frac{L}{\Phi^{-1}\left(\frac{1+p}{2}\right)}$$

Kaavassa $\pm L$ on virheen ylä- ja alaraja, p on virherajojen paikkansapitävyyden todennäköisyys ja $\Phi^{-1}()$ on käänteinen normaalijakauman funktio. Virheen rajat on voitu saada esimerkiksi valmistajan antamista tiedoista tai kalibrointidokumenteista. (Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 27-28.)

Jos heuristisen mallin virherajoihin tai virherajojen todennäköisyyteen liittyy epävarmuus, täytyy vapausaste ottaa huomioon laskennassa. Kuten datan analysointiin perustuvassa määrittelytavassa, vapausaste määrittelee kuinka paljon tietoa käytetään arvion tekemiseen ja sitä käytetään luottamusrajojen määrittelyyn. Vapausasteiden määrittämisen kaava käydään läpi myöhemmin tässä luvussa. (Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods 2010, 28.)

Vapausasteen määrittämisen jälkeen voidaan arvioida keskihajonnan tai epävarmuuden suuruutta. Jos virheen oletetaan noudattavan normaalijakaumaa, keskihajonta lasketaan jaka-

malla virherajojen väliin jäävä alue t-jakauman kertoimella, joka määritellään vapausasteen ja virherajojen todennäköisyyden avulla. (Uncertainty Analysis Principles and Methods 2007, 50.)

5 KULJETETTAVAAN KAPPALEESEEN KOHDISTUVAT VOIMAT

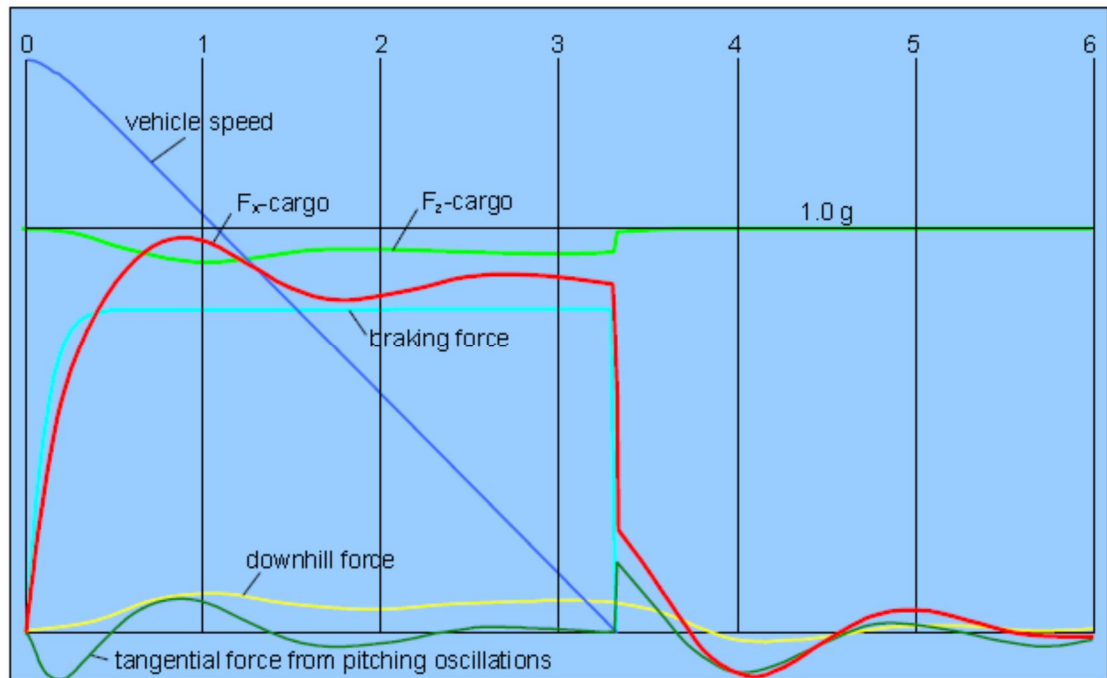
Opinnäytetyön aihe liittyy vahvasti kuormanvarmistukseen, joten kuormaan kohdistuvien voimien selvitys erilaisissa tieliikennetilanteissa on tarpeellista. Tällaisia tilanteita ovat hätäjarrutukset, väistöt ja kaarreajo sekä normaali maantiellä ajaminen. Jarrutusten ja väistöjen aikana kuormatilassa olevaan kappaleeseen kohdistuu useiden voimien summa, joka saattaa aiheuttaa kuormanvarmistuksen pettämisen. Kuljetustilanteissa kappaleeseen vaikuttavat painovoima, pinnan tukivoima, kitkavoima sekä ajoneuvon aiheuttama kiihtyvyyys. Kuormanvarmistuksen aiheuttamia voimia kuljetettavaan kappaleeseen ei oteta huomioon tässä vaiheessa tarkastelua. Edellä mainittujen voimien lisäksi kuljettaviin tuotteisiin kohdistuu tärinää, joka vaikuttaa kitkavoimaan. Seuraavien lukujen sisältö perustuu Hermann Kapsin (2011) tekemään raporttiin, jossa käsitellään kuormanvarmistusstandardeissa käytettävien laskentakaavojen todenmukaisuutta.

5.1 Jarrutus

Jarrutuksen aikana kuljetettavaan kappaleeseen kohdistuu useita voimia. Kappaleeseen vaikuttavat samat voimat kuin kuljetuksen aikana, mutta näiden voimien lisäksi kappaletta kuljettavan ajoneuvon rakenne ja tien ominaisuudet vaikuttavat tilanteeseen. Jarruttaessa kappale pyrkii jatkamaan liikettään. Liikettä hidastaa kitkavoima ja käytännössä myös kuormanvarmistuksessa käytetyt välineet. Kappaleeseen vaikuttaa myös kuormakorin liikkeet. Jarrutuksen alussa hidastuvuus aiheuttaa kuormakorin kallistumisen eteenpäin. Kallistus vähentää kitkavoimaa ja lisää kappaletta kuormatilan suuntaisesti liikuttavaa voimakomponenttia. Sama tai vastakkainen vaikutus voi olla käytettävällä tieosuudella, riippuen tien kallistuksen suunnasta. (Kaps 2011, 4.)

Kuormakorin kallistuminen ei pysy vakiona, vaan kuormakori heilahtelee jarrutuksen aikana. Heilahtelu vaikuttaa kappaleen vakauteen ja voi edesauttaa sen liikkumista kuormatilan päällä. Kuviossa 7 on esitettyinä kappaleeseen kohdistuvat voimat jarrutuksen aikana. Kuten kuvioista voi huomata, kappaleen kohdistuva ajoneuvon suuntainen voima F_x ei koostu pelkästään jarrutuksen aiheuttamasta hidastuvuudesta, vaan se on usean tekijän summa. Suurim-

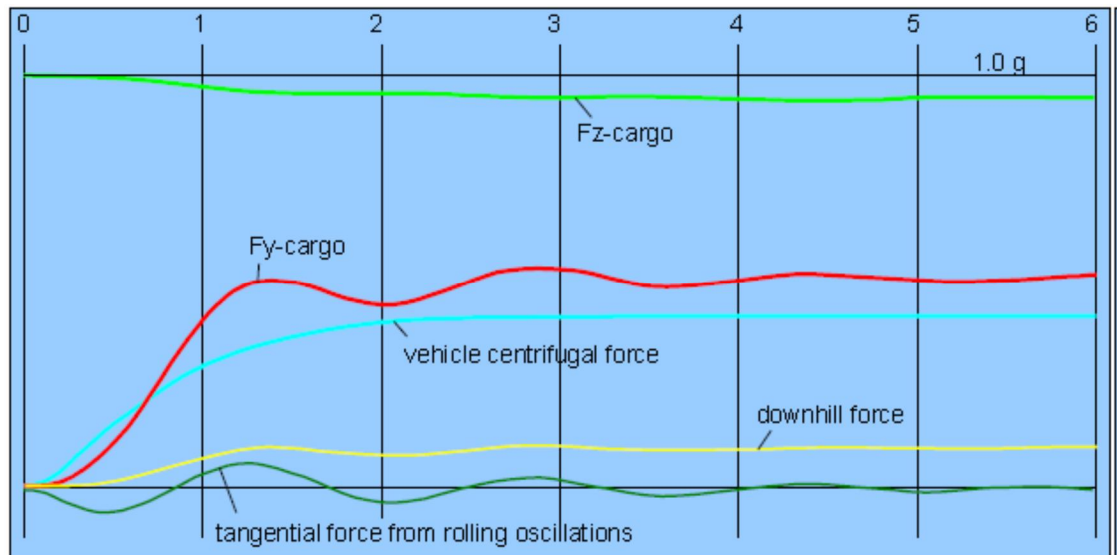
millaan hidastuvuus on 0,98 g ja samanaikaisesti pystysuuntaan vaikuttava normaalivoima on vain 0,92 g. (Kaps 2011, 4-5.)



KUVIO 7. Kappaleeseen vaikuttavat voimat jarrutuksen aikana (Kaps 2011, 5)

5.2 Kaarreajo

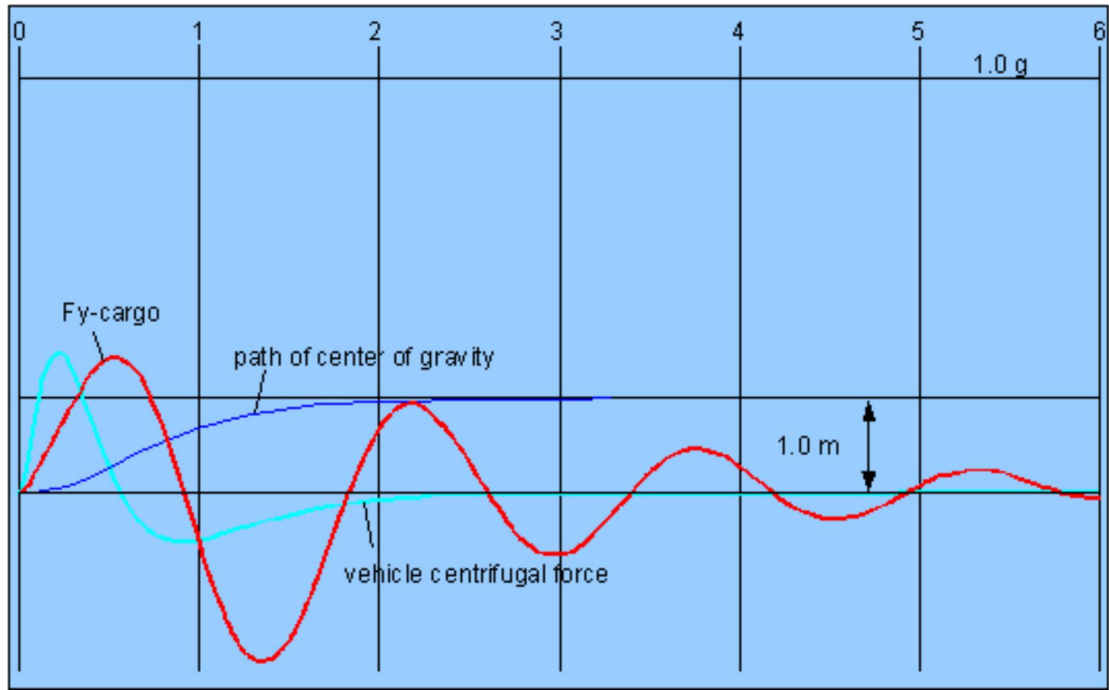
Kaarreajosta aiheutuu kuormaan hyvin samantapaisia voimia kuin jarrutuksessa. Kappaletta kuormakoriin nähden poikittain siirtävä voima ei koostu pelkästään keskeisvoimasta, vaan se on usean tekijän summa. Ajettava tie voi olla ulkomutkaan päin kallistunut, mikä vaikuttaa koko ajoneuvon kallistumiseen. Kuormatila kallistuu mutkassa ulospäin, mikä lisää kallistus-kulmaa. Lisäksi kuormakori ei ole vakaa, vaan se heilahtelee kaarreajon aikana ja vaikuttaa kuljetettavaan kappaleeseen. Kuviossa 8 on esitettyinä kappaleeseen kohdistuvat voimat kaarreajossa. Poikittain kuormatilaan nähden vaikuttava voima F_y on usean tekijän summa ja on suurimmillaan 0,54 g. Normaalivoima on melkein koko kaarreajon ajan 0,95 g. (Kaps 2011, 6-7.)



KUVIO 8. Kaarreaajossa tuotteeseen vaikuttavat voimat (Kaps 2011, 7)

5.3 Väistö

Väistötilanteessa kuljetettavaan kappaleeseen kohdistuvaan poikittaiseen voimaan vaikuttaa useat tekijät, jotka ovat samoja kuin edellä käsitellyissä tapauksissa. Kuviossa 9 on esitettyä keskeisvoiman vaikutus väistön aikana. F_y kuvaa kuorman kohdistuvaa kuormatilaan nähden poikittaista voimaa. Kuvaajasta voidaan havaita kuinka keskeisvoima F_y -voima ovat selvästi eri vaiheessa. Noin 0,5 sekunnin kohdalla oleva piikki aiheutuu pelkästään kuormatilan kallistuksesta ja kuormatilan heilahdusten aiheuttamista voimista, koska keskeisvoima on samalla hetkellä nolla. Suurimmillaan F_y -voima on 0,41 g. (Kaps 2011, 9-10.)



KUVIO 9. Väistötilanteessa tuotteeseen kohdistuvat voimat (Kaps 2011, 9)

6 MITTAVÄLINEET

Tässä kappaleessa käsitellään mittauksen yhteydessä käytettävien antureiden tekniikkaa. Käytettävien antureiden toiminnan ymmärtäminen on tärkeää mittauksen luotettavuuden kannalta. Mittausta suunniteltaessa ja toteutettaessa pitää tietää antureiden ominaisuudet, jotta mittauksella saavutetaan haluttu tulos.

6.1 Kiihtyvyyssanturit

JAMK Logistiikalla on käytössään VTI Technologies SCA1000 ja SCA1020 MEMS-kiihtyvyyssantureita sekä kaksi PCB 604B31 pietsosähköanturia. SCA1000 ja 1020-sarjan antureilla pystyy mittaamaan $\pm 1,7$ g kiihtyvyyksiä ja staattista kiihtyvyyttä. PCB-anturit mittaavat dynaamista kiihtyvyyttä, eli tärinää kolmen akselin suuntaisesti. Näillä antureilla pystytään mittaamaan jopa 50 g kiihtyvyyksiä, mutta niitä ei käytetä kitkan mittaukseen tässä tutkimuksessa.

VTI Technologies SCA1000/SCA1020

SCA1000 ja SCA1020 kiihtyvyyssanturit mittaavat kiihtyvyyttä kahden akselin suuntaan. Mallien välillä ainoa ero on mitta-akseleiden suunnat. SCA1000 -malli mittaa kiihtyvyyttä X- ja Y-

akseleiden suuntaan ja SCSA1020 -malli X- ja Z-akseleiden suuntaan. Kyseisiä antureita käytetään mm. ajoneuvoteollisuudessa. Antureiden toiminta perustuu mekaanisen varren päässä olevan massan liikkeen mittaamiseen.

Antureiden mittausala $\pm 1,7$ g riittää tutkimuksen tarpeisiin, koska mittauksissa käytetään materiaaleja, joiden kitkakertoimet ovat noin 0,5 eikä testeissä pystytä ajoneuvoilla saavuttamaan yli yhden g:n hidastuvuutta tai kiihtyvyyttä. Kuten Kaps:n (Kaps 2010) tutkimuksestakin voi päätellä, eivät kiihtyvyydet nouse raskailla ajoneuvoilla rajuissakaan kuljetustapahtumissa yli 1 g. Antureiden kohinatiheys on $80 \frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$, jolloin pienin mitattava kiihtyvyys taajuusalueella 0-100 Hz on $80 \frac{\mu g}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{(100 * 1,6)} \approx 1010 \mu g\text{-RMS}$, eli 1 mg-rms. Antureilla ei voisi mitata alle $0,01 \frac{m}{s^2}$ kiihtyvyyksiä kohinan vuoksi. Kohinan lisäksi epätarkkuutta mittaustulokseen aiheuttavat ristiakseliherkkyys, epälineaarisuus sekä lämpötilan vaihtelusta aiheutuva virhe anturin herkkydessä ja 0-pisteessä. (SCA1000 and SCA1020 Series Accelerometer, 2.)

6.2 Vetoanturit

JAMK Logistiikalla on käytössä useita Tede-Huntleigh Model 619-vetoantureita. Antureilla voi mitata sekä puristusta että vetoa 50000 N asti ja ne ovat hinnaltaan edullisia. Tavanomaisimmin antureita käytetään erilaisissa teollisissa prosesseissa, kuten punnituksissa ja voiman mittaamisessa. Antureissa on kompensoiva venymäliuska, jolla vähennetään lämpötilan aiheuttamia virheitä mittaustulokseen. (S-Type Alloy Steel Load Cell 2010, 1-2.)

6.3 Dewetron -mittalaite

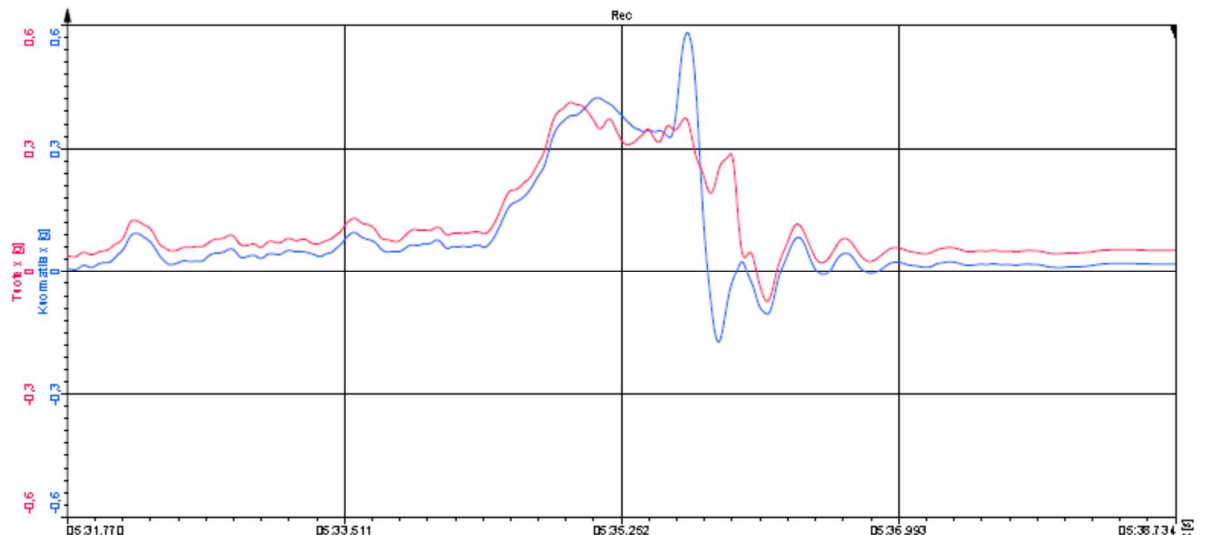
Mittauksissa käytetään Dewetronin valmistamia tiedonkeruujärjestelmiä Dewe-101 ja Dewe-43. Näillä laitteilla pystytään mittaamaan ja tallentamaan soveltuvien antureiden avulla tietoa halutusta suureesta. Kummassakin laitteessa on 8 analogista ja digitaalista liitäntää sekä 2 CAN-väyläliitäntää. Laitteissa on myös analogisen signaalin muokkain, analogi-digitaalimuunnin ja ne antavat tarvittaessa käyttöjännitteen antureille. Kummankin laitteen AD-muunnin käyttää 24 bitin erottelutarkkuutta, eli sisään tuleva signaali jaetaan 2^{24} osaan. Signaalin käsittelystä aiheutuva virhe on kummassakin laitteessa 0,05 % käytettävästä mittausalasta. Esimerkiksi käytettäessä ± 10 V mittausalaa virhe on $0,0005 * 20 \text{ V} = 1 \text{ mV}$.

Dewe-101 tiedonkeruujärjestelmä sisältää myös tietokoneen, joten kerätty data tallentuu suoraan laitteen omalle kovalevylle. Dewe-43 laite sisältää samat liitännät, vahvistimet ja AD-muuntajan kuin Dewe-101, mutta siinä ei ole sisäänrakennettua tietokonetta. Laitteen käyttöön vaaditaan tietokone, joka yhdistetään USB-johdon avulla Dewe-43:seen. Kummatkin tiedonkeruujärjestelmät pystyvät toimimaan $-20\text{ °C} - 50\text{ °C}$ lämpötiloissa. (DEWE-101 Minitaur Automotive Analyzer, 5.)

6.4 Dewesoft

Dewesoft on ohjelmisto kerätyn tiedon prosessointiin, tallentamiseen ja analysointiin. Ohjelmisto on jaettu tallennus ja analysointi -osiin. Tallennus -osaa käytetään mittauksen yhteydessä, kun mittaustietoja tallennetaan. Analysointi -osaa käytetään jo tallennetun tiedon analysoinnissa ja muokkaamisessa. Kummassakin osassa on useita erilaisia työkaluja tiedon käsittelyyn. Suurin ero osien välillä liittyy niiden käytettävyyteen. Tallennus -osaa voi käyttää vain mittalaitteen kanssa, kun analysointi-osa on käytettävissä missä tahansa tietokoneessa, kunhan mittausdata on saatavilla. (Dewesoft v7.0.3. Data acquisition, processing, analyzing and storage software 2011, 2.)

Dewesoftilla voi mm. tehdä mittaustiedoista erilaisia kuvaajia, analysoida tietoja tilastotieteen keinoilla ja tietoja voi käsitellä matemaattisesti luomalla itse matemaattiset kaavat tai käyttämällä valmiita funktioita. Kaikki antureista kerätty data on synkronissa toisiinsa nähden, eli tietojen analysointi tietyltä ajanhetkeltä on helppoa. Kuviossa 10 on esitettyä kuinka kahden kiihtyvyyssanturin mittaustietoja voidaan vertailla asettamalla ne samaan kuvaajaan.



KUVIO 10. Kahden kiihtyvyyssanturin mittaustietojen vertailu

6.5 Mittausvirhe

Eri mittavälineiden mittausrvirheet lasketaan käyttämällä hyväksi kuorma-autolla suoritettua testistä saatuja mittausrarvoja. Testin arvojen avulla lasketaan mittavälineiden prosentuaaliset virheet. Todellisesta mittauksesta saadut arvot ovat pakollisia mittausrvirheen laskennassa, koska voima-anturin mittausrvirhe riippuu käytettävästä kuormaliinon kireydestä, mitatut kiihtyvyydet Z- X- ja Y-akseleilta vaikuttavat toisiinsa ristikkäisherkkyyden vuoksi ja lämpötilan vaihtelua mittauksen aikana ei voi etukäteen tietää.

Voima-anturin virheen laskentaan käytetään luvussa 3.2 esitettyä kaavaa, kun yhdistetty virhe on tiedossa. Kiihtyvyyssanturin virheen laskentaan käytetään taulukkoa, johon syötetään testissä saavutetut kiihtyvyydet ja kiihtyvyyssanturin eri virhekomponenttien suuruudet. Kiihtyvyyssanturin virheeseen lasketaan lämpötilan aiheuttamat virheet, ratiometrinen virhe, epälineaarisuus ja ristikkäisherkkyyys. Lämpötilan aiheuttama virhe on hyvin pieni, koska anturit kalibroidaan mittaushetkellä vallitsevassa lämpötilassa ja mittauksen aikana lämpötila ei juuri vaihtele. Muita virhettä aiheuttavia tekijöitä ovat kuormaliinan kulman mittauksen epätarkkuus sekä anturitietojen tallentamiseen käytetty Dewetron -mittalaite. Taulukossa 1 on esitettyä eri mittalaitteiden virheiden suuruudet prosentteina ja kuorma-autolla suoritettua testistä saadut mittausrvirheen laskentaan käytetyt arvot.

TAULUKKO 1. Mittavälineiden virheiden suuruudet ja esimerkkilaskussa käytetyt arvot

	Kiihtyvyys X	Kiihtyvyys Z	Vetoanturit	Kulma	Massa	Dewetron
Virheen suuruus	3,4 %	4,0 %	1,2 %	2,2 %	1,2 %	0,05 %
Käytetty arvo	0,8 G	1,0 G	1300 N	23 °	157 kg	

Kitkakerroin ja sen mittausvirhe kuorma-autolla suoritettussa testissä oli $0,61 \pm 0,05$. Mittausvirhe laskettiin käyttämällä maksimi-minimi periaatteella. Siinä kitkakertoimen laskukaavaan sijoitetaan suurimman ja pienimmän kitkakertoimen aiheuttavat arvot. Laskennassa käytetyt arvot saatiin lisäämällä tai vähentämällä kuorma-autotestissä mitattuihin arvoihin virheen suuruus. Suurimman ja pienimmän kitkakertoimen erotus jaettiin kahdella. Kitkakertoimen laskukaava on jakolasku, jonka osoittajassa on koekappaleeseen vaakatasossa vaikuttavat voimat ja nimittäjässä tukivoimaan vaikuttavat voimat. Mahdollisimman suuri kitkakerroin saadaan, kun osoittaja on mahdollisimman suuri ja nimittäjä mahdollisimman pieni. Mahdollisimman pieni tulos saadaan toimimalla päinvastoin. Taulukossa 2 on esitettyä kuinka suurin ja pienin kitkakertoimen arvo saavutettiin. Taulukossa ”ylä” tarkoittaa lukua, jossa prosentuaalinen virhe on lisättyä mittauksen arvoon ja ”ala” tarkoittaa virhettä, jossa prosentuaalinen virhe on vähennetty mittauksen arvosta. Kuten taulukosta 2 voidaan huomata, saavutetaan mittausvirheen ylä- ja alaraja käyttämällä virheiden rajoja käänteisesti.

TAULUKKO 2. Suurimman mittausvirheen laskentaan käytetyt virheiden ylä- ja alarajat

Yläraja				Alaraja			
Nimittäjä		Osoittaja		Nimittäjä		Osoittaja	
Kiiht X	ylä	Kiiht Z	ala	Kiiht X	ala	Kiiht Z	ylä
Massa	ylä	Massa	ylä	Massa	ala	Massa	ala
Veto-T	ala	Veto-T	ala	Veto-T	ylä	Veto-T	ylä
Veto-E	ylä	Veto-E	ylä	Veto-E	ala	Veto-E	ala
Kulma alfa	ala	Kulma alfa	ala	Kulma alfa	ylä	Kulma alfa	ylä
Kulma beta	ala	Kulma beta	ala	Kulma beta	ylä	Kulma beta	ylä

Suurin mittausvirhe on tapahtumana erittäin harvinainen, koska yhdenkin virheen muutos ala- tai yläarvosta aiheuttaa mittavirheen pienenemisen. Mittausvirhe on normaalisti jakautunut, joten todennäköisin mittavirhe on alle 0,05. Virheen keskihajontaa tai keskiarvoa ei pysty luotettavasti laskemaan.

7 KITKAN MITTAUSTAVAT

7.1 Kiihtyvyyden eron mittaamiseen perustuva kitkan määrittäminen

Kitka kuljetettavan kappaleen ja kuormatilan pohjan väliltä voidaan mitata käyttäen kiihtyvyyssantureita. Kiihtyvyyssantureilla pystytään mittaamaan kuormatilaan ja kuljetettavaan kappaleeseen kohdistuvat kiihtyvyydet. Kun kappale alkaa liikkua kuormatilan päällä, voidaan se havaita kiihtyvyyssantureiden mittaamista erisuuruuksista kiihtyvyyksistä. Kitkakertoimen laskemiseen käytetään Newtonin II-lakia, jonka mukaan kappaleen kiihtyvyys on kappaleeseen vaikuttavien voimien summa jaettuna kappaleen massalla $\bar{a} = \frac{\sum \bar{F}}{m}$. Esimerkiksi jos ajoneuvon hidastuvuus a_1 on $5 \frac{m}{s^2}$ ja kappaleesta mitattu hidastuvuus a_2 on $3 \frac{m}{s^2}$, hidastaa liukukitka kappaleen liikettä $2 \frac{m}{s^2}$, eli liukukitkakerroin on noin 0,2. Tulos on laskettu kaavalla:

$$a_2 * m = a_1 * m - \mu * m * g$$

Tämän mittaustavan kanssa ei voi käyttää kuormanvarmistusta, eli se on tarkoitettu vain tutkimuskäyttöön. Tutkimuksessa käytettävää ajoneuvoa tulee käyttää suljetulla alueella, kuten ajoharjoitteluradalla. Liikenteessä tutkimusta ei voi tehdä, koska kuorman tulee aina olla varmistettuna kuljetuksen aikana.

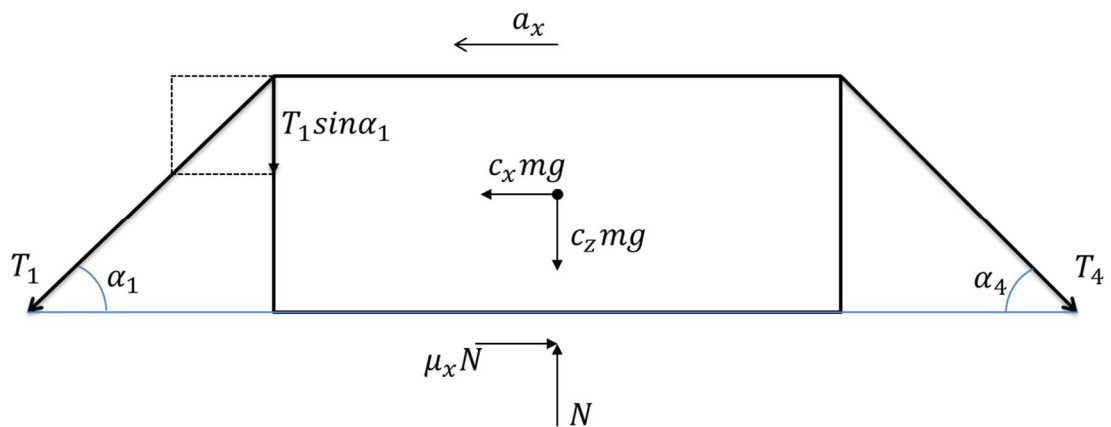
Käytössä olevat kiihtyvyyssanturit mittaavat myös kallistukset X- ja Y-tasossa kiihtyvyydeksi, koska painovoima vaikuttaa antureihin. Jos testin aikana kuormatila ei ole suorassa, aiheuttaa se virhettä mittaukseen. Kuormatilan kallistuminen voi tapahtua esimerkiksi kovissa jarrutuksissa ja nopeissa käänöksissä. Esimerkiksi jarrutuksessa kolmen asteen kallistus eteenpäin aiheuttaa $0,5 \frac{m}{s^2}$ lisäyksen mitattuun hidastuvuuteen ja vähentää normaalivoimaa $0,01 \frac{m}{s^2}$. Samalla kiihtyvyyssanturi on kolmen asteen kulmassa liikkeeseen nähden, mikä vähentää mitattua hidastuvuutta, koska hidastuvuus ei kohdistu suorassa kulmassa kiihtyvyyden mittaavaan anturiin. Kuormatilan kallistusta ei tutkimuksessa käytössä olevilla antureilla pystytä jarrutuksen aikana mittaamaan, joten yhteisvaikutusta ei arvioitu. Testin tekemisellä ylä- tai alamäessä on sama vaikutus kuormatilan kallistumisen kanssa.

7.2 Vetoanturien käyttöön perustuva kitkan määrittäminen

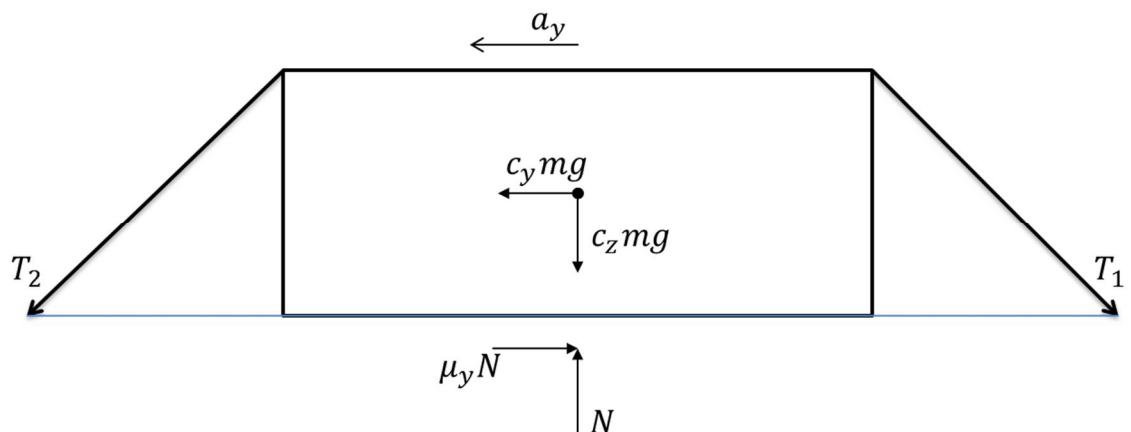
Toinen mittaustapa perustuu veto- ja kiihtyvyyssantureiden käyttöön. Testeissä käytettävään kappaleeseen kiinnitetään neljä vetoanturia, yksi jokaiseen kulmaan. Vetoanturit kiinnitetään ketjuilla sidontapisteisiin kappaleen vapaan liikkumisen estämiseksi. Jos kappale pyrkii mit-

tauksen aikana liikkumaan, eli kitka ei pysty pitämään kappaletta paikallaan, aiheuttaa se ketjujen kiristymistä ja löystymistä, mikä voidaan havaita vetoanturien avulla. Kuormatilan liikettä seurataan kiihtyvyyssantureiden avulla. Kiihtyvyyssanturit mittaavat kiihtyvyyttä kolmen akselin suuntaan, jolloin kappaleeseen vaikuttavat voimat saadaan selville. Ilman kuormatilan kiihtyvyyden mittaamista ei kitkaa voitaisi laskea.

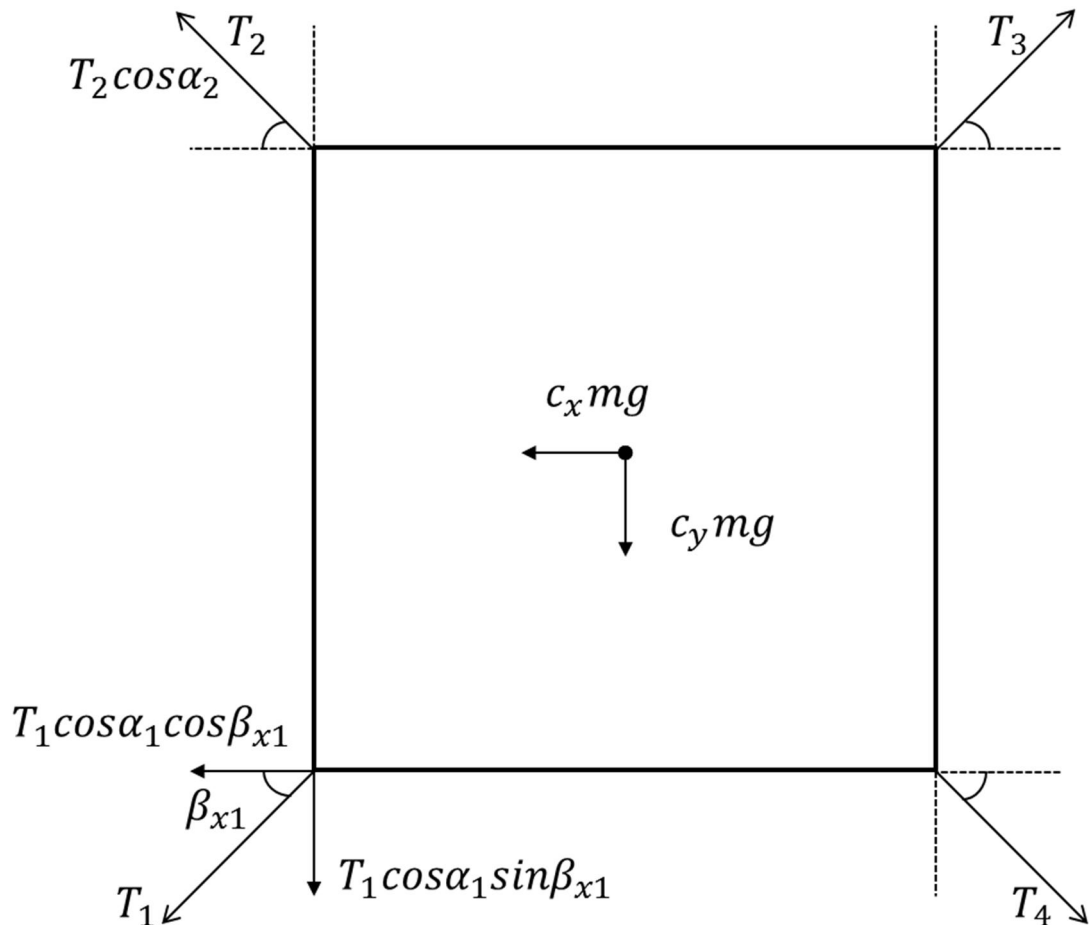
Kappaleeseen kuljetuksen aikana vaikuttavat tukivoima, painovoima, kitkavoima, ajoneuvosta kohdistuvat kiihtyvyydet ja sidonnan aiheuttama voima. Testissä käytettävästä koekappaleesta tulee tuntee paino, jotta tuki- ja kitkavoima pystytään laskemaan. Kaikki muut kappaleeseen vaikuttavat voimat pystytään mittaamaan, joten kitkavoima jää ainoaksi tuntemattomaksi tekijäksi. Vapaakappalekuviissa 11 -13 on esitettyinä kappaleeseen vaikuttavat voimat.



KUVIO 11. Vapaakappalekuva kappaleeseen vaikuttavista voimista sivusta



KUVIO 12. Vapaakappalekuva kappaleeseen vaikuttavista voimista edestä



KUVIO 13. Vapaakappalekuva kappaleeseen vaikuttavista voimista ylhäältä

Seuraavilla kolmella kaavalla pystytään kitka laskemaan antureiden antamien tietojen perusteella. Ensimmäisellä kaavalla lasketaan kappaleeseen vaikuttava tukivoima, jonka laskemiseen käytetään koekappaleen massaa, Z-suuntaan mittaavan kiihtyvyyssanturin mittatietoa sekä kaikkien neljän vetoanturin mittaamaa vetoa. Toisella kaavalla lasketaan eteen- ja taaksepäin vaikuttavien voimien summa, jossa ainut tuntematon tekijä on kitkakerroin. Laskemiseen käytetään X-suuntaan mittaavan kiihtyvyyssanturin tietoa, kaikkien neljän vetoanturin mittaustulosta ja ensimmäisellä kaavalla laskettua tukivoimaa. Kolmannella kaavalla lasketaan sivuttain vaikuttava kitka ja kitkakerroin samalla tavalla kuin kaavalla kaksi X-suuntaan. Käytännössä testit suorettiin kahdella voima-anturilla ja käyttäen kahta ensimmäistä kaavaa.

$$N = c_z mg + T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 + T_3 \sin \alpha_3 + T_4 \sin \alpha_4$$

$$c_x mg + T_1 \cos \alpha_1 \cos \beta_{x1} + T_2 \cos \alpha_2 \cos \beta_{x2} - \mu_x N - T_3 \cos \alpha_3 \cos \beta_{x3} - T_4 \cos \alpha_4 \cos \beta_{x4} = 0$$

$$c_y mg + T_2 \cos \alpha_2 \sin \beta_{x2} + T_3 \cos \alpha_3 \sin \beta_{x3} - \mu_y N - T_1 \cos \alpha_1 \sin \beta_{x1} - T_4 \cos \alpha_4 \sin \beta_{x4} = 0$$

8 JÄRJESTELMÄN TESTAUS

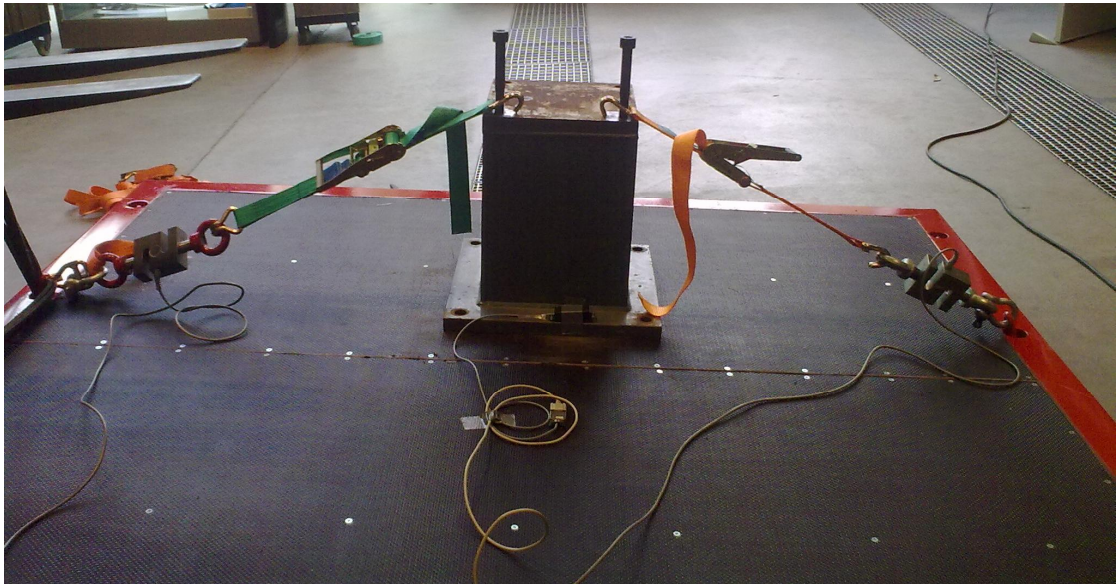
8.1 Mittausten sisältö

Käytännön testit aloitettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun logistiikkalaboratoriossa 2,5 metriä pitkällä kuormatilan osalla, jota pystyttiin kallistamaan trukin avulla. Koekappaleena käytettiin 157 kg painavaa metallikappaletta, johon kiinnitettiin kuormaliinat ja voima-anturit. Testeissä koekappale kiinnitettiin alustaan kahdella kuormaliinalla, koska käytössä ei ollut neljää Dewetron-mittalaitteeseen kytkettävää voima-anturia. Samalla testi oli myös yksinkertaisempi toteuttaa, ilman että testin tarkoitus olisi kärsinyt.

Kaikki testit aloitettiin mittaamalla testikappaleen ja alustan välinen kitkakerroin. Kallistuskokeissa mittaus tehtiin kallistamalla alustaa kunnes kappale lähti liikkeelle. Koekappale alkoi liikkua 18 asteen kulmassa, jolloin kitkakerroin on noin 0,32. Kitkakerroin lasketaan alustan kulmasta kaavalla $\tan\theta$. Muissa kuin kallistustesteissä kitkakerroin määritettiin vetämällä kappaletta alustaa pitkin ja mittaamalla liikkeellelähtoon vaadittava voima.

Kallistustestien tavoitteena oli selvittää minkälaisia arvoja kiihtyvyyks- ja voima-antureita käyttämällä kitka saavuttaa ja onko kitkan laskentaan käytettävä laskentakaava oikein. Lisäksi tavoitteena oli selvittää voidaanko kitkaa mitata mittaamalla kappaleeseen ja alustaan kohdistuvien kiihtyvyyksien erotus. Kallistustestien avulla pyrittiin myös selvittämään onko mittaustavassa tai -välineiden käytössä virheitä, jotka estäisivät kitkan mittaamisen.

Kallistustesteissä alustaan ja testikappaleeseen kiinnitettiin kiihtyvyyksianturit. Alustaan kiinnitetty anturi mittasi nostokulmaa, jonka avulla voitiin laskea testikappaleeseen vaikuttava tukivoima ja alustan suuntaisesti vaikuttava voimakomponentti. Testeissä, joissa testikappale piti kiinnittää alustaan, se oli kiinnitettynä ylä- ja alapuolelta kuormaliinoilla. Kuormaliinoihin oli kiinnitettynä voima-anturit, jotka mittasivat kuormaliinoihin kohdistuvaa vetoa. Vetoantureiden avulla pystyttiin selvittämään kuinka pitkään kitka pystyi pitämään kappaleen paikollaan ja kuinka paljon kuormaliinat kiristyivät tai löysenivät kallistustestin aikana. Kuviossa 14 on esitetty ensimmäisten mittausten mittausasetelma, kun käytössä oli kalibroimattomat vetoanturit.



KUVIO 14. Mittausasetelma ensimmäisissä testeissä

Kitkakertoimen ei pitäisi kallistuksen jatkuessa yli 18 asteen muuttua, vaan koekappaleen tulisi aiheuttaa muutos kuormaliinojen kireyksiin. Jos laskentakaava on toteutettu oikein, tulisi alustan kaltevuudesta ja voima-antureiden mittaustuloksista lasketun kitkakertoimen pysyä noin 0,3:ssa, vaikka alustan kallistusta jatketaan yli 18 asteen. Ennen mittausta oletuksena oli, että ylemmän kuormaliinan tulisi kiristyä ja alemman löystyä, koska koekappale pyrkii liukumaan alustaa pitkin.

Voima-antureiden kalibroinnin jälkeen kallistustestit uusittiin, jotta mittausvirhe tuloksissa olisi pienempi. Muutoksena ensimmäisiin testeihin kokeiltiin myös kartonkia koekappaleen alla, jotta matalamman kitkakertoimen vaikutus laskentaan voitiin todeta. Seuraava vaihe laboratoriomittausten jälkeen oli käytännön testaus henkilöauton peräkäräryssä. Testauksessa käytettiin kahta voima-anturia sekä kiihtyvyyden- ja lämpötila-anturia. Testien avulla pystyttiin toteamaan järjestelmän toimivuus, kun kiihtyvyys ei ollut yhtä tasaista kuin kallistustesteissä ja tulosten avulla voitiin suunnitella seuraavaa vaihetta, joka oli testaus kuorma-autossa.

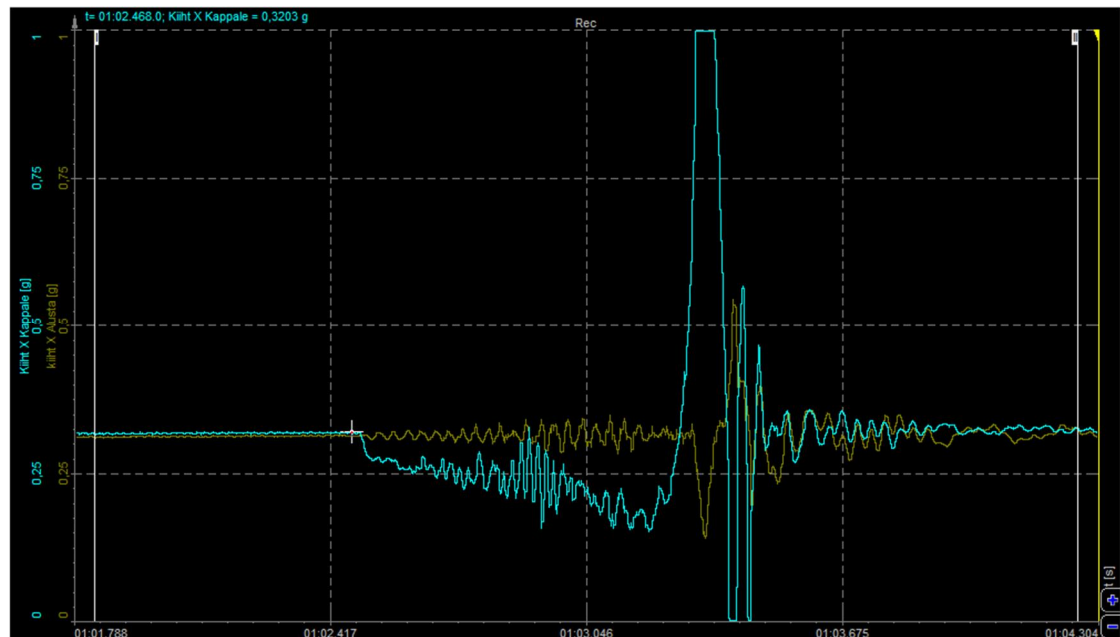
Kuorma-autossa testin sisältö oli hyvin samanlainen kuin peräkäräryllä toteutetussa testissä, mutta mittaukseen lisättiin Z-akselin suuntaisen kiihtyvyyden mittaus. Tällä tavoin voitiin ottaa pystysuuntainen kiihtyvyys huomioon kitkakertoimen laskennassa, jolloin epävarmuutta mittaustulokseen aiheuttavien komponenttien määrä väheni. Kuorma-auton mittausympäristö poikkesi peräkäräryn mittausympäristöstä. Esimerkiksi kuormatilan pohjan materiaali ja koekappaleeseen jousituksesta, renkaista sekä rungosta aiheutuva värinä olivat erilaisia, joten testit olivat tarpeelliset.

Viimeisenä testinä suoritettiin kallistustestien simulointi vaakatasossa. Testissä koekappale kiinnitettiin alustaan samalla tavalla kuin kallistustestissä. Koekappaletta vedettiin vaakatasossa kuormaliinalla, johon oli kiinnitetty vetoanturi. Testissä pyrittiin selvittämään ovatko tulokset samanlaisia kallistustestien kanssa. Valitettavasti käytössä oli vain kaksi Dewetroniin liitettävää voima-anturia, joten kolmannen voima-anturin mittaustulos tallennettiin videokameralla. Videokamera kuvasi voima-anturin mittalaitetta ja kuvamateriaali nauhoitettiin Dewetronilla. Kitkakertoimen laskenta piti tehdä manuaalisesti jälkikäteen.

8.2 Testit kallistettavalla alustalla kalibroimattomilla vetoantureilla

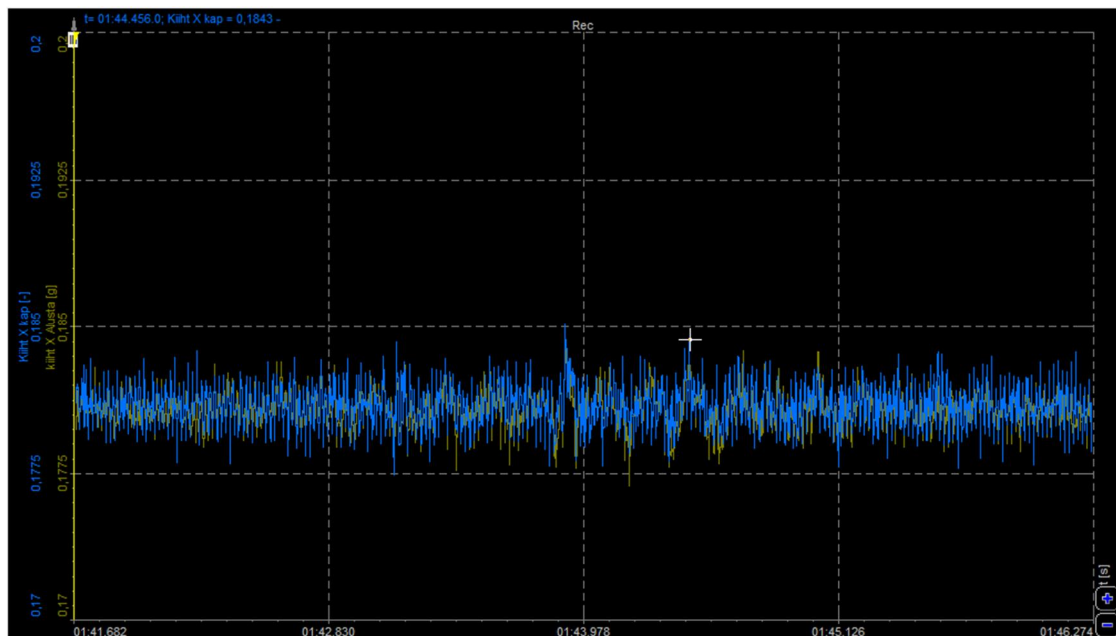
8.2.1 Kiihtyvyyksien eroon perustuva kitkan määrittäminen

Kitkakertoimen määrittämisen jälkeen testit alkoivat kiihtyvyyksien erotuksen perusteella laskettavan kitkakertoimen testaamisella. Kiihtyvyyksistä pystytään selvästi erottamaan kohta, jossa kappale lähtee liikkeelle. Kuviossa 15 on esitettyä kiihtyvyyssarvo mitattuna kallistuksen suuntaisesti alustasta ja koekappaleesta. Korkea piikki kiihtyvyydessä liikkeellelähdön jälkeen aiheutuu kuormaliinasta, joka pysäytti koekappaleen liikkeen noin 40 cm liukumisen jälkeen



KUVIO 15. Kiihtyvyyssarvot koekappaleesta ja alustasta, kun kappale alkaa liukua

Testin perusteella kallistettavalla alustalla kitkan määrittäminen on mahdollista kiihtyvyyssarjoja tulkitsemisella. Käytännössä on hyvin haasteellista löytää mittauksesta kohta, jossa kappale alkaa liikkua, jos koekappaleen liike on hyvin lyhyt. Mittausdatassa on myös virhettä aiheuttavaa kohinaa, kuten kuvion 16 havaita. Kuvion kiihtyvyyssarvot ovat hetkettä, jossa alusta on ollut paikallaan. Häiriö vaikeuttaa liikkeellelähtökohdan löytämistä, koska kiihtyvyyksistä piirretyt janat risteävät jatkuvasti toisiaan. Tämän vuoksi kiihtyvyyserojen tulisi olla huomattavasti suuremmat kuin kohinan, jotta liike tulisi selvästi esille. Käytännössä kappaleeseen kohdistuu enemmän tärinää kuin testiolosuhteissa, jolloin kiihtyvyyserojen syiden päätely vaikeutuu.

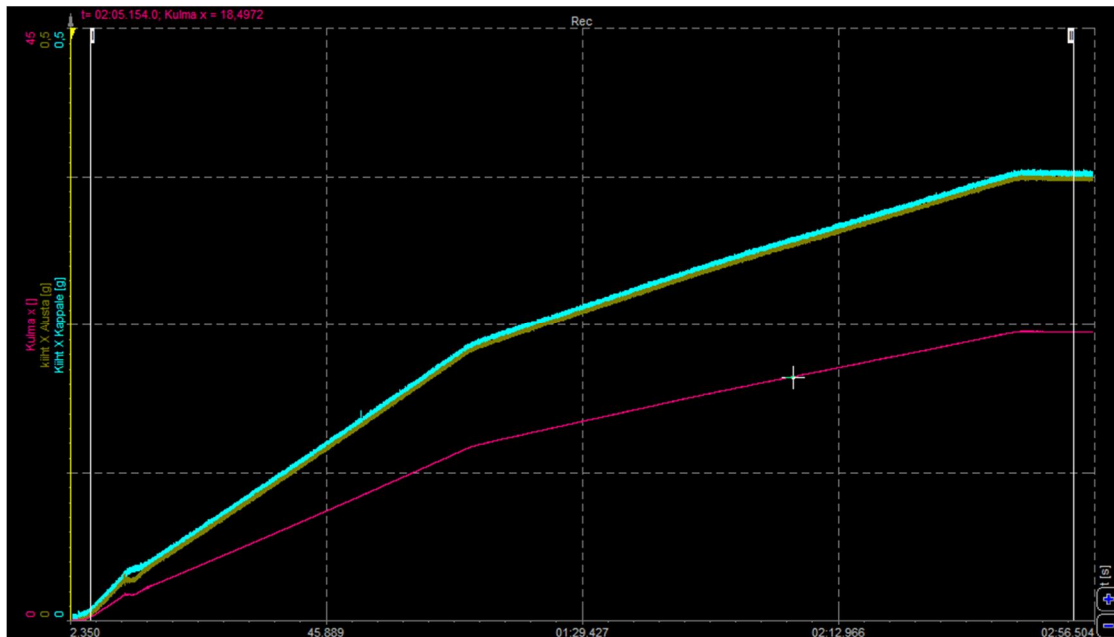


KUVIO 16. Kohina mittaussignaali

Tulokseen vaikuttaa myös alustan ja koekappaleen kaltevuus. Jos koekappaleeseen ja alustaan kiinnitetty kiihtyvyyssanturit eivät ole täysin suorassa, aiheuttaa se virheen laskentaan. Tämä virhe voidaan tosin ainakin osittain korjata, kun alustan paikallaan ollessa lasketaan kiihtyvyyssantureiden mittaustulosten erotus.

Kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksista piirrettyjen janojen seurannan lisäksi eroja pystyisi hakemaan laskemalla mittaustulosten erotuksen. Kun erotus ylittäisi tietyn rajan, voisi mittaustuloksista päätellä onko kappale ollut liikkeellä vai onko mittauksessa ollut esimerkiksi virhe tai onko kiihtyvyyssanturiin osunut isku.

Kun kappale oli kiinnitettyä kuormaliinoilla alustaan ja vetoantureita käytettiin apuna kitkan määrittämisessä, ei kiihtyvyyksien välillä ollut kallistustestin aikana mainittavia eroja. Kuviossa 17 on esitettyä kiihtyvyyksarvot ja kallistuskulma testin aikana. Violetissa janassa olevan rasti on 18,5 asteen kohdalla, jolloin koekappale olisi lähtenyt liikkeelle ilman kuormaliinoja. Mittaustapa on siis käytettävissä vain ilman kuormanvarmistusta.



KUVIO 17. Kiihtyvyyksarvot koekappaleesta ja alustasta sekä alustan kallistuskulma

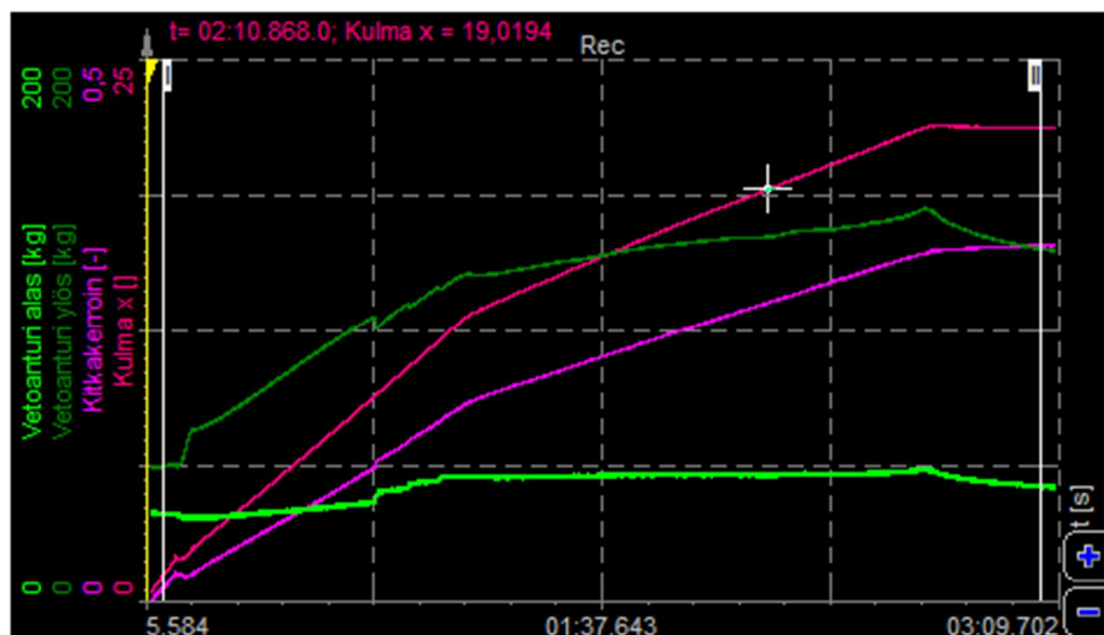
8.2.2 Vetoantureiden käyttö kitkan määrittämisessä

Dewesoft-ohjelmassa käytettiin kitkan laskentaan seuraavia kaavoja:

- Kallistuskulma: $\text{asin}('kiiht X') \cdot 180/\pi$, jossa alustaan kiinnitetyn kiihtyvyyksanturin mitaamasta kiihtyvyyksarvosta lasketaan kallistuskulma radiaaneina. Radiaanit muutetaan asteiksi kertomalla tulos $180/\pi$.
- Kitkakerroin: $(157 \cdot 9.81 \cdot \sin('Kulma x'/180 \cdot \pi) + 'Vetoanturi alas' \cdot \cos(29/180 \cdot \pi) - 'Vetoanturi ylös' \cdot \cos(37/180 \cdot \pi)) / (157 \cdot 9.81 \cdot \cos('Kulma x'/180 \cdot \pi) + 'Vetoanturi ylös' \cdot \sin(37/180 \cdot \pi) + 'Vetoanturi alas' \cdot \sin(29/180 \cdot \pi))$, jossa lasketaan tukivoimaan vaikuttavat ja alustan suuntaisesti vaikuttavat voimakomponentit. Funktioon on sijoitettu kuormaliinojen kulmat ja kappaleen massa testin aikana.

Ensimmäisessä testissä alustaa kallistettiin noin 22 asteen kulmaan, jossa kappaleen pitäisi liukua pintaa pitkin ilman kuormaliinoja. 22-asteen kulmassa kitkan laskentakaava antoi kit-

kakertoimeksi arvon 0,33, joka on hyvin lähellä testien alussa mitattua arvoa kitkakertoimesta. Kuviosta 18 voidaan huomata kuinka kumpikin kuormaliina kiristyi kallistuksen aikana, vaikkakin koekappaleen alapuolella ollut kuormaliina kiristyi vain hyvin vähän. Oletuksena oli, että alempi kuormaliina löystyisi, koska kappale pyrkii liikkumaan alustalla alaspäin. Kuormaliinojen epänormaalin kiristymisen aiheutti alustan nosto samasta sidontapisteestä kuin mihin ylempi kuormaliina oli kiinnitetty. Nosto muutti sidontapisteen lenkin asentoa siten, että kuormaliinat kiristyivät. Kallistuksen alussa kumpikin kuormaliina oli melko löysällä. Veto ylemmässä kuormaliinassa oli 500 N ja alemmassa 300 N. Kaikki vetoantureilla mitatut arvot ovat suuntaa-antavia, koska tarkkaa kalibrointia ei voitu tehdä.

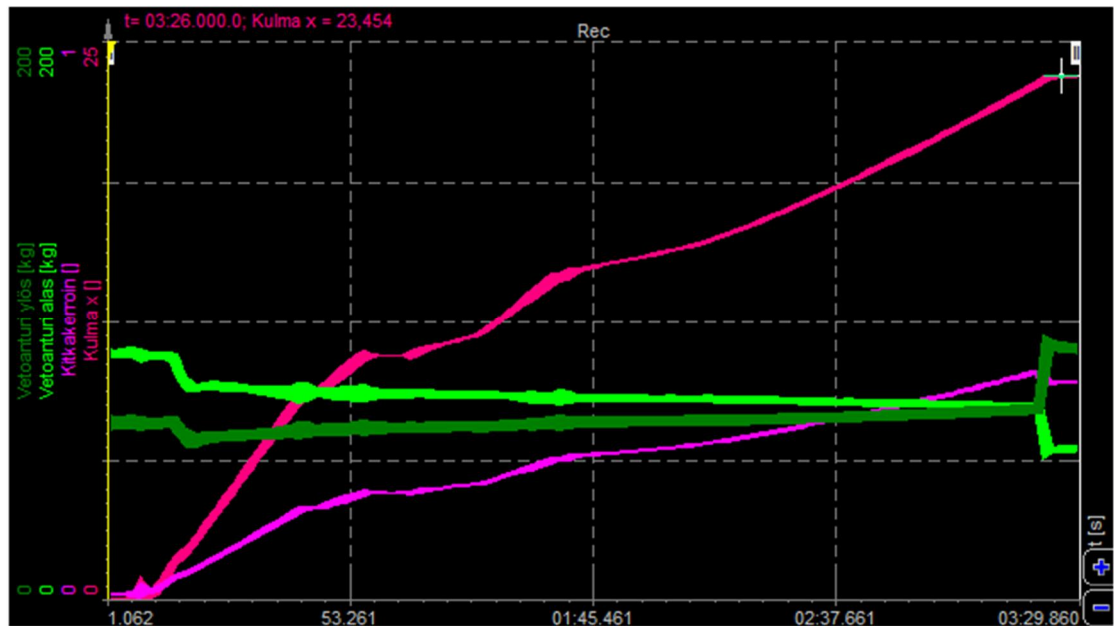


KUVIO 18. Vetoantureiden, kulmakertoimen ja kulman mittaustiedot ensimmäisessä testissä kalibroimattomilla vetoantureilla

Toisessa testissä alustaa kallistettiin hiukan enemmän 23 asteeseen asti ja kuormaliinat olivat hiukan kireämmällä. Alustan nosto tapahtui eri sidontapisteestä, jotta se ei vaikuttaisi kuormaliinojen kireyteen. Veto ylemmässä kuormaliinassa oli 700 N ja alemmassa 900 N. Kallistuksen lopuksi laskentakaava antoi kitkakertoimeksi 0,39, joka on huomattavasti alkuperäistä mittausta suurempi arvo. Suurimpana erona datasta voidaan huomata kuormaliinojen kireyksien käyttäytyminen. Tällä kertaa veto ylemmässä kuormaliinassa lisääntyi 900 N:iin ja alemmassa väheni 600 N:iin. Mittauksen lopussa on huomattavissa kohta, jossa koekappale pyrki lähtemään liikkeelle alustalla. Liike vaikutti suuresti kuormaliinojen kireyteen,

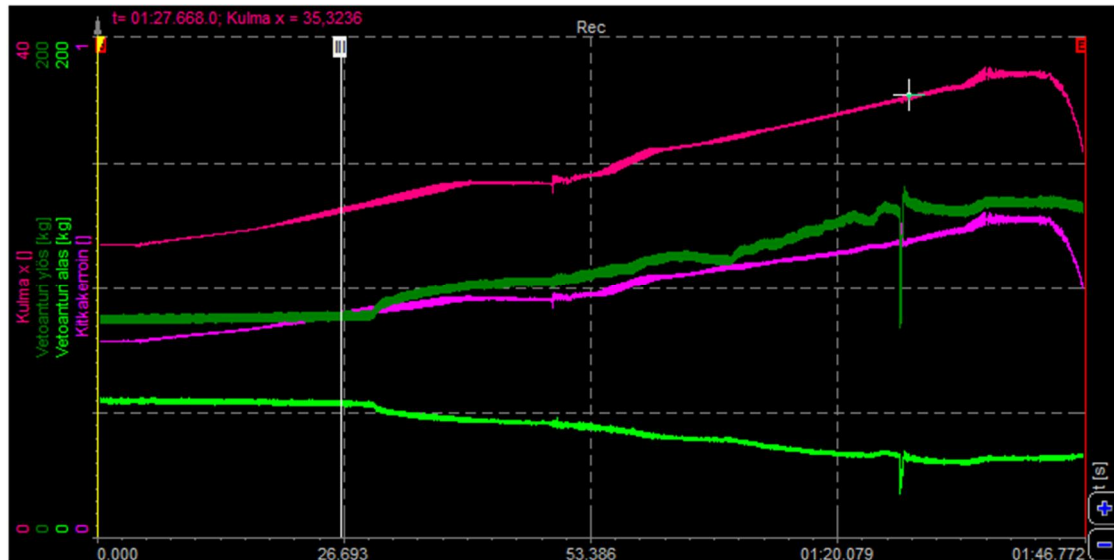
mutta vain vähän laskettuun kitkakertoimeen, kuten kuviosta 19 voidaan huomata. Vetoantureiden löystyminen kallistuksen alussa aiheutuu alustan rakenteen joustamisesta.

Kallistuskulmaa esittävä janan leveys vaihtelee kuvaajassa. Tämä johtuu alustan noston aiheuttamasta pienestä nykimisestä, jonka kiihtyvyyssanturi mittaa ja se välittyy kallistuskulmaan. Nykiminen myös heikentää mittauksen luotettavuutta, koska nykivä liike voi aiheuttaa koekappaleen liikkeelle lähtemisen ennen kuin tarvittava kallistuskulma saavutetaan.



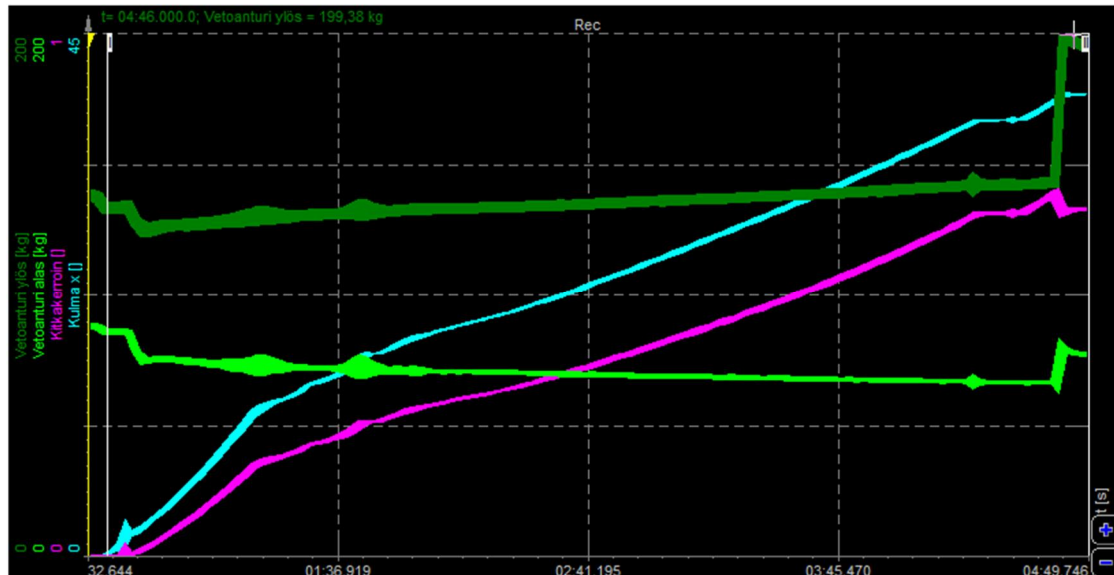
KUVIO 19. Vetoantureiden, kulmakertoimen ja kulman mittaustiedot toisessa testissä kalibroimattomilla vetoantureilla

Kolmannessa testissä nostoa jatkettiin 23 asteesta johon edellinen testi loppui, jotta nähtäisiin miten laskettu kitkakerroin reagoi suuriin kallistuskulmiin. Testin lopussa saavutettiin 37 asteen kallistuskulma ja laskentakaava antoi kitkakertoimeksi arvon 0,64, joka on huomattavasti enemmän kuin metalli-puu yhdistelmällä tulisi olla. Ennen testin loppua noin 35 asteen kallistuskulmalla koekappale nytkähti, joka aiheutti muutokset vetoantureiden mittauksiin. Kuormaliinojen kireydet jatkoivat oletettua muutosta, eli ylempi kuormaliina kiristyi ja alempi löystyi testin aikana. Kuten kuviosta 20 voi huomata, ylempi kuormaliina kiristyi 800 N vedosta 1400 N vetoon, joka on huomattava muutos. Alempi kuormaliina löystyi 600 N vedosta 300 N vetoon, jolloin kuormaliina oli jo huomattavan löysällä.



KUVIO 20. Vetoantureiden, kulmakertoimen ja kulman mittaustiedot kolmannessa testissä kalibroimattomilla vetoantureilla

Neljännessä testissä kuormaliinat kiristettiin edellisiä testejä kireämmälle, jotta kireyden vaikutusta mittaukseen voitaisiin analysoida. Veto ylemmässä kuormaliinassa oli alussa 1400 N ja alemmassa 900 N. Veto lisääntyi ylemmässä kuormaliinassa 2000 N:iin ja väheni alemmassa kuormaliinassa 800 N:iin. Kallistusta jatkettiin 40 asteen kulmaan asti, jolloin koekappale liikahti alustalla. Liikahduksen pystyy näkemään vetoantureiden mittaustietojen kuvaajista kuviossa 21. Laskettu kitkakerroin oli liikahduksen jälkeen 0,66, joka on samaa suuruusluokkaa edellisen testin tuloksen kanssa, mutta liian suuri verrattuna todelliseen kitkakertoimeen kappaleiden välillä. Kitkakerroin pienenee liikahduksen jälkeen, mikä johtuu ylemmän kuormaliinan kiristymisestä. Kappale pysyy pienemmällä kitkavoimalla paikoillaan kireämmän kuormaliinan vuoksi. Edellistä testiä kireämmät kuormaliinat eivät juuri vaikuttaneet mitattuun kitkakertoimeen. 30 asteen kohdalla kitkakerroin oli vain 0,01 vähemmän edellisen testin kanssa. Neljännen testin jälkeen koekappale punnittiin, koska koekappaleen massaa tarvitaan kitkakertoimen laskennassa.



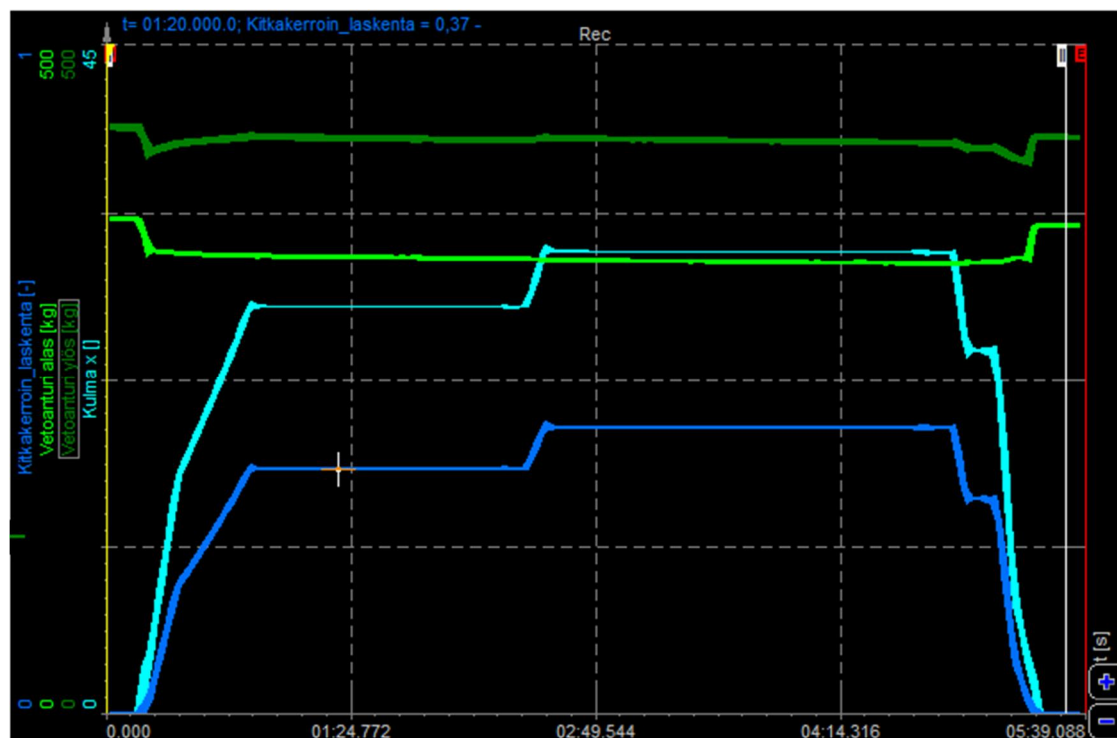
KUVIO 21. Vetoantureiden, kulmakertoimen ja kulman mittaustiedot neljännessä testissä kalibroimattomilla vetoantureilla

Kalibroimattomilla vetoantureilla suoritettujen testien perusteella voitiin päätellä, että mitattavilaineissa, laskentakaavoissa tai mittausjärjestelyssä oli virhettä aiheuttavia tekijöitä, joita ei ollut otettu huomioon mittauksen suunnittelussa. Seuraavat testit suoritettiin, kun vetoanturit pystyttiin kalibroimaan. Kalibroinnilla pystyttiin rajaamaan vetoantureiden virhe pois mittausta haittaavista tekijöistä. Testeissä pyrittiin selvittämään mikä aiheuttaa liian suuren koekappaleen ja alustan välisen kitkakertoimen.

8.3 Testit kallistettavalla alustalla kalibroituilla vetoantureilla

Kalibroituilla vetoantureilla testejä tehtiin samalla periaatteella kuin ensimmäisellä kerralla. Muutaman testin välillä ei liinoja uudelleen kiristetty tai löysennetty, vaan toinen kallistusta jatkettiin heti ensimmäisen perään. Tällä tavoin selvitettiin vaikuttaako kallistuksen aikana tapahtuva koekappaleen mahdollinen liikkuminen mittaustuloksiin ja pystyykö ilman mittausjärjestelyyn puuttumista mittaamaan kitkakertoimen useasti peräkkäin, vai vaatiiko järjestelmä jokaisen mittauksen jälkeen uudelleen asettamisen. Mittaustulokset olivat hyvin samankaltaisia kalibroimattomilla vetoantureilla suoritettujen testien tulosten kanssa. Testeissä kitkakertoimen jatkoi kasvu 0,33 jälkeen, vaikka näin ei periaatteessa pitäisi tapahtua. Koekappaleen ja alustan väliin asetettiin myös kartonkia, joka on huomattavasti liukkaampaa materiaalia kuin kallistettava alusta, jolloin vetoantureiden tulisi mitata nopeammin muutoksia kuormaliinojen kireyksissä kallistuksen aikana. Tulokset olivat kuitenkin muiden testien kanssa samanlaisia.

Testien aikana lähimmäksi oletettua kitkakerrointa päästiin, kun kuormaliinat olivat todella kireällä. Kolmannessa testissä ylemmässä kuormaliinassa oli alussa 4300 N vetoa ja alemmassa 3600 N. Testin kuvaaja on kuviossa 22. Testin aikana kummassakin kuormaliinassa kireys muuttui vain 100 N. Kuormaliinojen kireydellä oli vaikutusta mittaustuloksiin. Jos kuormaliinat olivat todella löysällä, kitkakertoimen arvot olivat korkeampia kuin kiristetyillä kuormaliinoilla. Taulukossa 3 on esitettyinä viidestä eri testistä kuormaliinojen kireydet kallistuksen alussa ja lasketut kitkakertoimet tietyissä kulmissa. Korkeat kitkakertoimet löysillä kuormaliinoilla ovat loogisia, koska silloin kuormaliinojen vaikutus tukivoimaan on pieni. Kun kuormaliinat ovat kireämmällä, on tukivoima suurempi, jolloin kappale pysyy paikallaan pienemmällä kitkakertoimella.



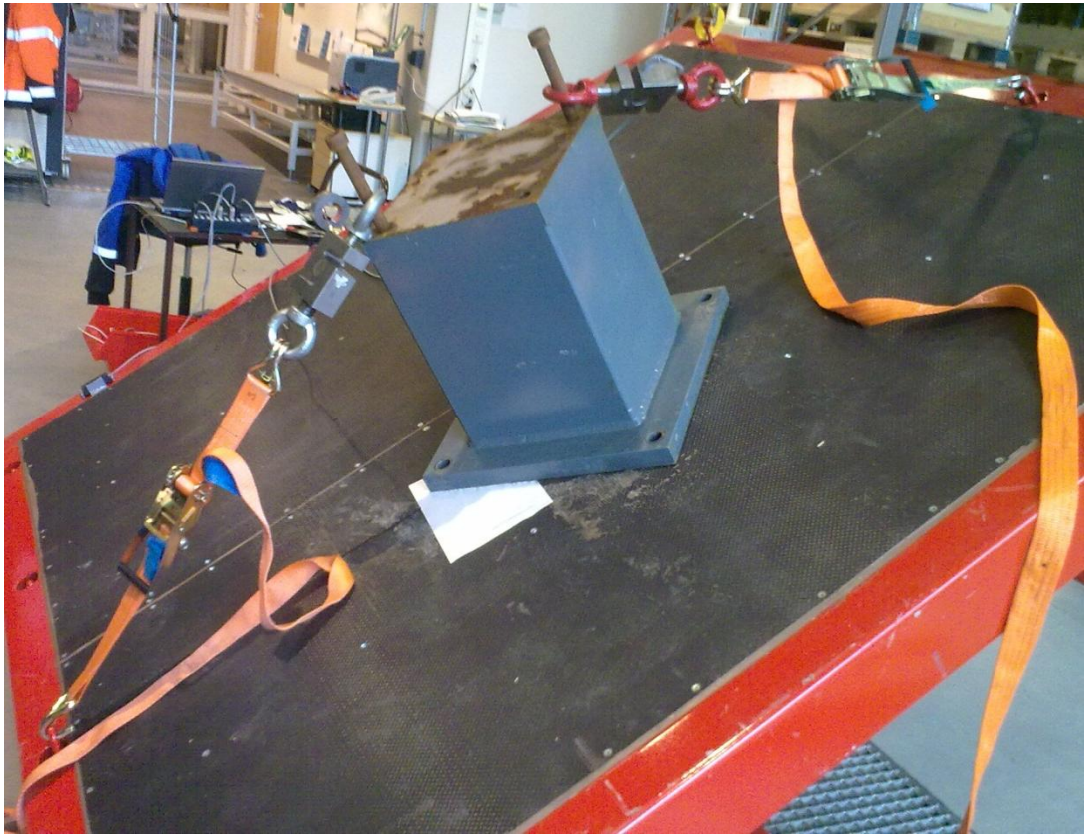
KUVIO 22. Vetoantureiden, kulman ja kitkakertoimen mittaustiedot testissä kalibroiduilla voima-antureilla

TAULUKKO 3. Kuormaliinojen kireyksien vaikutus kitkakertoimeen

Testin no.	Alustan kulma	Laskettu kitkakerroin	Kuormaliinojen kireydet
3	18, 23, 28	0,22; 0,29; 0,37	4300 N / 3600 N
4	18, 23, 28	0,30; 0,40; 0,49	590 N / 390 N
7	18, 23, 28	0,27; 0,36; 0,45	1700 N / 1500 N
8	18, 23, 28	0,32; 0,42; 0,53	390 N / 290 N
9	18, 23, 28	0,30; 0,39; 0,48	1100 N / 980 N
10	18, 23, 28	0,29; 0,38; 0,48	780 N / 490 N

Vetoantureiden epätarkkuus oli rajattu pois virheistä, joten koekappaleen ja alustan välissä tapahtui jotain, joka aiheutti kitkakertoimen suurenemisen. Teoriassa, jos koekappale kallistetaan 22 asteen kulmaan, alemman liinan veto on 1000 N, liinojen kulmat alustaan nähden on 29 astetta ja kitkakerroin on 0,33, niin ylemmän liinan vedon tulisi olla 790 N, jotta kappale pysyisi paikallaan. Testeissä tämä ei toteutunut.

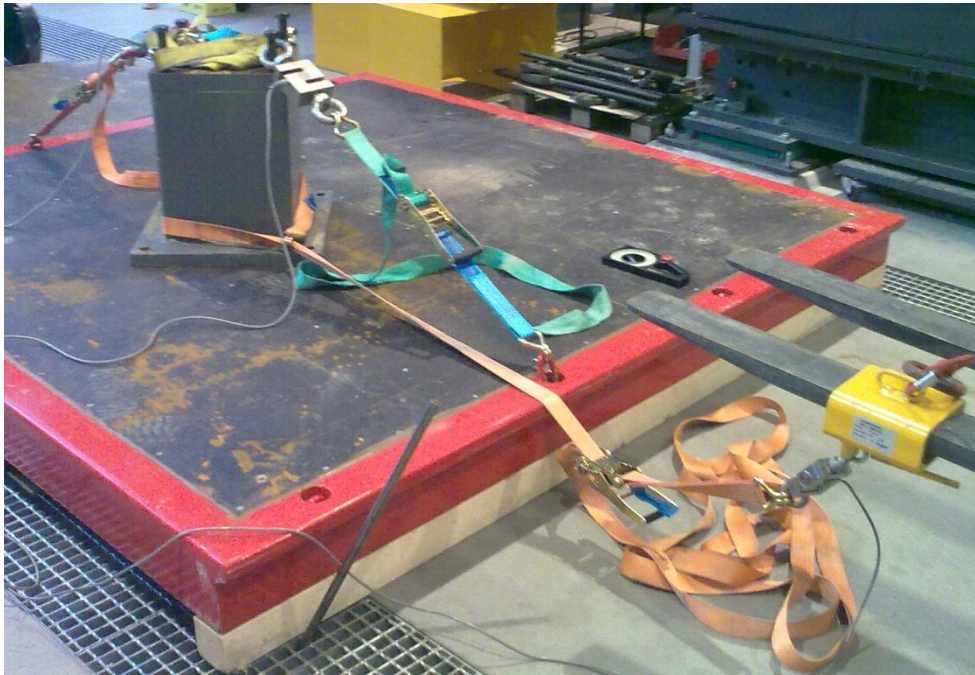
Kolmannen testimittauksen aikana huomattiin, että koekappale kallistuu hiukan ylemmän kuormaliinan vedosta. Kuviossa 23 on esitettyä kuinka paperi mahtuu koekappaleen ja alustan väliin. Koekappale kiilautuu alustaa vasten yhdellä tahkolla, jolloin kappaleen massan ja kuormaliinojen aiheuttamat alustaa vasten kohdistuvat voimat kohdistuvat hyvin pienelle alalle. Tämä aiheuttaa suuren paineen ja voi aikaansaada alustassa muodon muutosta, joka vaikuttaa kappaleiden väliseen kitkaan. Muodonmuutos voi myös tukea kappaletta liukumista vasten, jolloin kitkaa ei pysty luotettavasti mittaamaan. Kallistustestien jälkeen seuraavat kokeet tapahtuivat henkilöauton peräkäräryssä.



KUVIO 23. Paperi koekappaleen alla

8.4 Kitkan määrittäminen vetämällä sidottua koekappaletta

Kallistettavalla alustalla tehdyn testauksen jälkeen tehtiin lisää testejä vetämällä kappaletta alustan päällä ilman kallistamista. Tällä tavoin haluttiin selvittää jatkuuko koekappaleen kallistuminen, vaikka liikuttava voima kohdistuu siihen vaakatasossa. Testin suorittamiseen tarvittiin kolme voima-anturia. Kaksi oli kiinnitettyinä kuormaliinoihin ja kolmannella mitattiin vaakatasossa koekappaleeseen vaikuttava voima. Mittajärjestely on esitettyinä kuvassa 24. Kolmatta voima-anturia ei voinut kiinnittää Dewetron-mittalaitteeseen, joten kitkakerrointa ei pystynyt laskemaan suoraan Dewesoftilla. Kolmas voima-anturi oli kiinnitettyä omaan mittalaitteeseen, jonka näyttöä kuvasi Dewetroniin yhdistetty kamera. Tällä tavoin Dewesoftissa oli kaikkien kolmen anturin mittatiedot käytössä samalta ajan hetkeltä. Kitkakerroin juuri ennen kappaleen liikkeellelähtöä laskettiin voima-antureiden mittatietojen perusteella taulukkolaskentaohjelmassa.



KUVIO 24. Mittausjärjestely voiman vaikuttaessa vaakatasossa

Mittaukset aloitettiin kitkakertoimen määrittämisellä. Aiempina kertoina kitkakerroin määritettiin kallistamalla alustaa kunnes koekappale lähti liikkeelle, mutta vaakatasossa kitkakerroin määritettiin jakamalla liikkeelle lähtöön tarvittavan voima kappaleen painolla. Kitkakertoimeksi mitattiin 0,42, joka on korkeampi kuin kallistustesteissä.

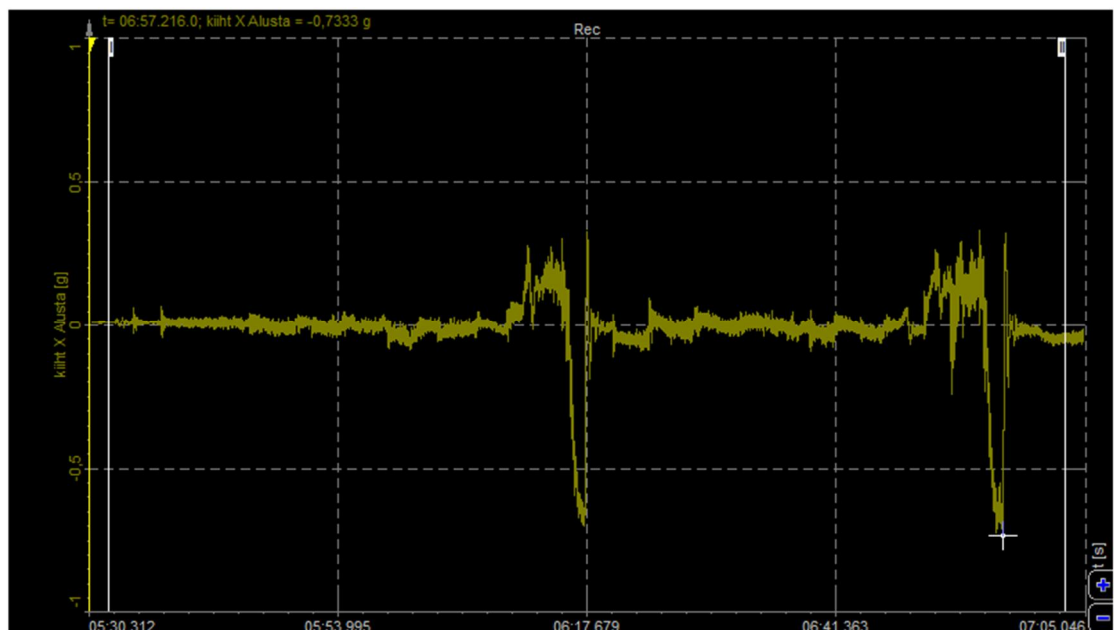
Onnistuneita testejä suoritettiin vain kaksi kappaletta Dewetronin käyttövirheen vuoksi. Muutamassa mittauksessa Dewetron ei tallentanut kuin videokameran signaalin, jolloin kahden muun voima-anturin tiedot jäivät tallentamatta. Onnistuneiden mittausten tuloksien avulla lasketut kitkakertoimet olivat 0,40 ja 0,36. Tulokset todistavat, että vaakatasossa mitatut kitkakeroinarvot ovat lähellä ennen testejä mitattua arvoa. Kallistustestien ongelmaa ei havaittu yhdessäkään mittauksessa. Epävarmuutta mittauksiin aiheutti kameran päivitystaajuus, joka oli 5 kuvaa sekunnissa, joten kappaleeseen kohdistunut veto liikkeellelähtötilanteessa saattoi olla 0,2 sekuntia vanhaa tietoa. Tämä saattoi pienentää laskettuja kitkakertoimia, koska veto on suurimmillaan juuri ennen liikkeellelähtöä.

8.5 Testit henkilöauton peräkärillä

Henkilöauton peräkärillä toteutettavilla testeillä päästiin lähemmäksi todellista kuljetustilannetta ja kuorma-autossa toteutettavaa testiä. Testeillä selvitettiin miten mittalaitteet ja kitkakertoimen laskentakaava toimivat, kun testejä ei tehdä hitaasti kallistettavalla alustalla.

Testeissä peräkärrollä käytettiin samoja laitteita kuin kallistustesteissä ja lisäksi lämpötilan mittaamiseen termoparia.

Kallistustestien aikana mitattu kiihtyvyyden muutos oli huomattavasti rauhallisempaa kuin ajoneuvolla jarruttaessa, kuten kuviosta 25 voidaan huomata. Kuviossa on esitetty kahden ensimmäisen jarrutuskokeen hidastuvuudet X-akselilla. Suurin saavutettu hidastuvuus ensimmäisessä testissä oli 0,7 G, joka riittää sitomattoman kappaleen liikkeelle lähtemiseen. Testien jälkeen mitattu kitkakerroin kappaleen ja alustan välille oli 0,48, joka oli odotettua korkeampi. Kitkakerroin määritettiin mittaamalla tarvittava voima kappaleen liikkeelle lähtöön. Kuormaliinat kiinnitettiin peräkärryn päihin, jolloin kulmat peräkärryn suhteen jäivät alhaisiksi. Kulmat olivat 24 ja 21 astetta. Mittausten aikana kiihtyvyyssanturi oli kiinnitetty peräkärryn takapäähän.



KUVIO 25. Kahden jarrutuskokeen hidastuvuudet X-akselilla

Peräkärrollä suoritetuissa testeissä eivät kallistuskokeen laskukaavat enää toimineet, vaan niitä piti muokata testejä varten. Kaavat tehtiin tukivoiman ja kitkakertoimen laskentaan. Tukivoima laskettiin kappaleen massan, gravitaatiokiihtyvyyden, vetoantureiden mittausten ja kuormaliinojen kulmien avulla. Kitkakertoimen laskentakaavassa X-akselin suuntainen kiihtyvyys kerrottiin -1:llä, koska kiihtyvyyssanturi oli asennettu 180° vaakatasossa väärin päin. Kaavassa lasketaan kaikki vaakatasossa koekappaleeseen vaikuttavat voimat yhteen ja jaetaan lopputulos tukivoimalla. Kaavoissa Veto_P_Taka on peräkärryn takaosassa olevan veto-

anturin mittaustieto, Veto_H_Etu peräkärryn etuosassa olevan vetoanturin mittaustieto ja kiihtX kiihtyvyyssanturin X-akselin mittaustieto. Kaavat ovat seuraavat:

- Tukivoima (N):

$$157 \cdot 9.81 + 9.81 \cdot \text{Veto_P_Taka} \cdot \sin(\pi \cdot 21/180) + 9.81 \cdot \text{Veto_H_Etu} \cdot \sin(\pi \cdot 24/180)$$
- Kitkakerroin: $(-1 \cdot \text{kiiht X} \cdot 157 \cdot 9.81 - 9.81 \cdot \text{Veto_P_Taka} \cdot \cos(21 \cdot \pi/180) + 9.81 \cdot \text{Veto_H_Etu} \cdot \cos(24 \cdot \pi/180)) / N$

Kolmen testin aikana suoritettiin yhteensä 10 jarrutusta. Testien välissä koekappaleen mahdollinen liikkuminen tutkittiin ja varmistettiin kuormaliinoiden kulmat ja kalibroitiin vetoantureiden 0-kohdat. Vetoanturien kalibroinnilla mittausten välissä pystyttiin pienentämään mitausvirhettä. Jarrutukset tehtiin tasaisella maalla ja ne pyrittiin toteuttamaan vain X-akselin suunnassa, jolloin Y-akselin kiihtyvyydet pysyisivät mahdollisimman pieninä. Testit suoritettiin märällä asfaltilla, joten jarrutuksissa ei saatu aikaiseksi suurimpia mahdollisia hidastuuksia.

Analyysi testeistä

Peräkärri oli liian kevytrakenteinen koekappaleelle, koska koekappaleen alla ollut vaneri ”eli” testin aikana. Vanerin epästabilisuus aiheutti paineen epätasaisen jakautumisen koekappaleen alla. Tällä saattoi olla samoja vaikutuksia kuin kallistustestien aikana koekappaleen kallistumisella. Peräkärryn vaneri oli myös hyvin pehmeää, jolloin koekappaleen kulma upposi vaneriin estäen liikkumista kitkaa mitattaessa vetämällä. Koekappaleen kulma on voinut upota vaneriin myös jarrutustestien aikana, jolloin tulokset eivät ole luotettavia.

Jokaisessa testissä oli erilaiset kuormaliinoiden kireydet. Ensimmäisessä testissä kuormaliinat olivat kireimmillään ja viimeisessä löysimmillään. Taulukossa 4 on esitettyä kuinka kuormaliinoiden kireydet, kiihtyvyydet X- ja Y-suuntiin sekä kitkakertoimen laskenta korreloivat keskenään. Lisäksi taulukossa on esitettyä testin ajalta lasketut kuormaliinoiden kireyksien keskiarvot. Kuten tuloksista voi huomata, korreloivat kuormaliinoiden kireydet ja kitkakerroin Y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden kanssa hyvin heikosti. Tästä voidaan päätellä, että Y-akselin suuntaisella kiihtyvyydellä ei ole suurta vaikutusta kuormaliinoiden kireyksiin tai kitkakertoimen laskentaan. X-akselin suuntainen kiihtyvyys korreloi paremmin kuormaliinoiden kireyksen kanssa, vaikka testien välillä on eroja. Esimerkiksi testissä yksi korrelaatiokerroin VT-X oli -0,41 ja testissä kaksi -0,83. Testien välillä ainoa muutettu tekijä oli kuormaliinoiden kireys, mutta pienen otoskoon vuoksi ei päätelmiä korrelaatiokertoimen muutoksesta voi tehdä. Lisäksi epävarmuutta tuloksiin aiheutti peräkärryn pehmeä pohjavaneri.

TAULUKKO 4. Korrelaatiokertoimet henkilöauton peräkärrollä suoritetuista testeistä

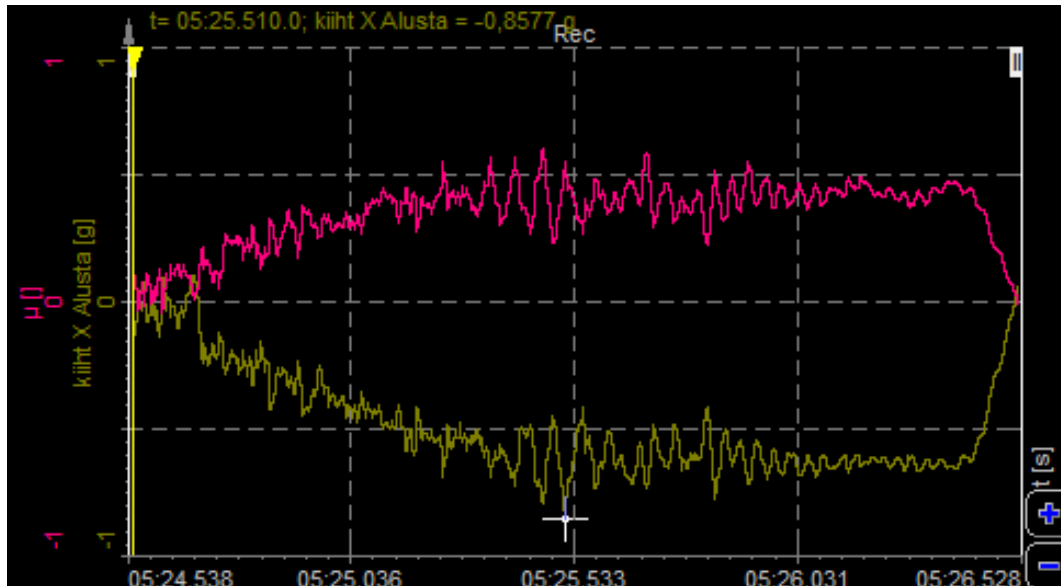
	VE-Y	VT-Y	VE-X	VT-X	X- μ	Y- μ	VE_AVG	VT_AVG
Testi 1	0,15	-0,10	0,63	-0,41	-0,92	-0,19	127	84
Testi 2	0,16	-0,09	0,65	-0,83	-0,87	-0,13	81	73
Testi 3	0,04	-0,08	0,40	-0,46	-0,73	-0,08	53	32

Jarrutusten aikana mittaustiedoista lasketut kitkakertoimet vaihtelevat suuresti. Kuten taulukosta 5 voidaan huomata, pienin arvo on 0,39 ja suurin 0,72. Kaikista kymmenestä jarrutuksesta laskettu keskiarvo on 0,51, joka on todella lähellä kappaleen liikkeellelähdön vaatiman voiman mittauksella laskettua kitkakerrointa. Vain testissä 1 kummastakin jarrutuksesta laskettu kitkakerroin on ollut lähellä ennen testejä määritettyä kitkakerrointa.

TAULUKKO 5. Kitkakertoimien suurin arvo, keskiarvo sekä hidastuvuuden keskiarvo

	Jarrutus 1			Jarrutus 2			Jarrutus 3			Jarrutus 4		
	μ max	μ avg	X avg	μ max	μ avg	X avg	μ max	μ avg	X avg	μ max	μ avg	X avg
Testi 1	0,49	0,37	0,47	0,51	0,34	0,43						
Testi 2	0,39	0,21	0,40	0,41	0,24	0,45	0,38	0,28	0,55	0,43	0,23	0,45
Testi 3	0,72	0,42	0,42	0,60	0,36	0,44	0,57	0,39	0,5	0,60	0,35	0,48

Kuviossa 26 on esitettyä kuinka hidastuvuus muuttui jarrutuksen aikana kolmannessa testissä. Kuten kuviosta voi huomata, hidastuvuus ei ole tasaista, vaan siinä on suurta vaihtelua. Massan hitauden takia nopeat, vaikkakin voimakkaat kiihtyvyydet eivät liikuta koekappaletta. Tämä voidaan huomata myös kuormaliinojen kireyksistä, jotka eivät muutu yhtä nopeasti kuin hidastuvuus. Testeissä 1 ja 2 hidastuvuus on huomattavasti tasaisempaa, eikä samankaltaisia piikkejä ole havaittavissa. Viimeisessä testissä kitkakertoimen arvot ovat huomattavasti suurempia kuin muissa testeissä, vaikka hidastuvuuden keskiarvo jarrutuksen ajalta on samaa tasoa muiden testien kanssa. Suuremmat kitkakertoimet voidaan olettaa johtuvat epätasaisesta jarrutuksesta, jonka aikana hidastuvuus vaihteli suuresti.



KUVIO 26. Kiihtyvyyys- ja kitkakerroin tiedot kolmannelta henkilöauton peräkärnyllä suoritetusta testistä

Todella nopeiden hidastuvuuden vaihteluiden vaikutusta laskentaan pystyy ehkäisemään käyttämällä alipäästösuodatinta. Alipäästösuodattimen avulla voidaan korkeilla taajuuksilla tapahtuvat kiihtyvyydet suodattaa pois. Suodatinta voi käyttää sekä hidastuvuuteen että kuormaliinon kireyteen, jolloin myös vetoantureiden mahdollisten heilahdusten aiheuttamat nopeat muutokset vähenevät. Käyttämällä 10 Hz alipäästösuodatinta viimeisen testin jarrutusten kitkakerroimet olisivat 0,54; 0,47; 0,54; 0,46, jotka ovat huomattavasti lähempänä oletettua kitkakerrointa.

Henkilöauton peräkärnyllä toteutetuilla testeillä pystyttiin todistamaan mittaustavan toiminta, kun kiihtyvyys vaikuttaa vaakatasossa. Laitteisto toimi hyvin ja mittaustulokset olivat loogisia. Ongelmia aiheutti mittaussympäristö ja keli, jossa mittaukset toteutettiin. Henkilöauton peräkärnyin ominaisuudet vaikuttivat mittaustuloksiin ja jarrutukset eivät olleet täysin samantaisia. Lisäksi testejä olisi pitänyt tehdä useampia, jotta eri tekijöiden vaikutukset olisi voitu luotettavasti analysoida.

8.6 Testit kuorma-autolla

Kuorma-autolla suoritettavat testit tehtiin 31.10.2012. Koekappale asetettiin keskelle kuormatilaan kuvion 27 osoittamalla tavalla. Sidontapisteitä ei ollut keskellä kuormatilaa, joten vaadittuja kuormaliinoja varten kiinnitettiin vanttiketjut sidontapisteiden väliin. Vanttiketjuun kiin-

nitettiin voima-anturit ja kuormaliinat. Koekappale sijoitettiin vanttiketjujen keskelle, jolloin kuormatilan ja kummankin kuormaliinan välinen kulma oli 23 astetta. Kuorma-autotestin aikana mitattiin myös Z-akselin suuntainen kiihtyvyys, jotta pystysuuntaisten kiihtyvyyksien mahdollinen vaikutus kitkaan pystyttiin selvittämään. Lisäksi koekappaleeseen kiinnitettiin videokamera, jolla kappaleen liikkuminen todennettiin.



KUVIO 27. Mittausjärjestely kuorma-autossa

Kitkakertoimen laskentaan käytettiin pohjana samoja kaavoja kuin henkilöauton peräkärtyllä suoritetuissa testeissä. Kaavoja muokattiin vain Z-akselin kiihtyvyyden huomioonottamiseksi. Z-akselin kiihtyvyys vaikuttaa vain kappaleen massan osuuteen tukivoimasta, joten kaavoista tarvitsi muokata vain tukivoiman laskentaan tarkoitettua kaavaa. Z-akselin kiihtyvyyttä mitaava kiihtyvyyssanturi kiinnitettiin siten, että kun kuormatila liikkuu alaspäin esimerkiksi kuopassa, vähenee massan aiheuttama tukivoima. Seuraavassa on tukivoiman laskemiseen käytetty kaava:

- Tukivoima (N):

$$157 \cdot \text{KiihtZ}' \cdot 9.81 + 9.81 \cdot \text{Veto_P_Taka}' \cdot \sin(\pi \cdot 23 / 180) + 9.81 \cdot \text{Veto_H_Etu}' \cdot \sin(\pi \cdot 23 / 180)$$

Vetämällä koekappaletta kuormatilan pohjaa pitkin mitattiin kitkakertoimeksi 0,57, joka oli yllättävän korkea. Kuormatila oli vanha ja pohjavaneri kostea sekä pehmeää. Nämä tekijät saattoivat vaikuttaa mittaukseen ja aiheuttivat odotettua korkeamman kitkakertoimen.

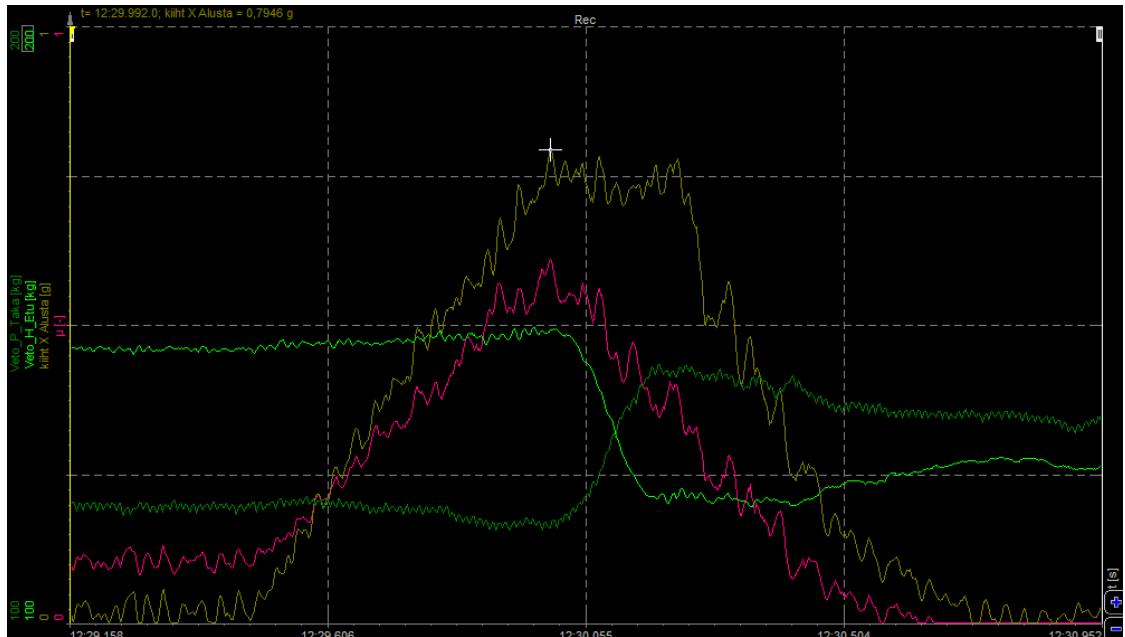
Testeissä ongelmia aiheutti liukas keli. Liukkaan kelin vuoksi tehokkaan jarrutuksen tekeminen oli vaikeaa. Lisäksi kuorma-auton ABS-jarrut aiheuttivat liukkaalla tienpinnalla epätasaisen hidastuvuuden. Nykivä jarrutus ei kuitenkaan aiheuttanut koekappaleen liikkumista. Useimpien jarrutusten hidastuvuus jäi alle 0,5 g:n, joka ei riittänyt koekappaleen liikkeellelähdtöön. Yhdellä jarrutuksella saavutettiin 0,8 g:n hidastuvuus, jolloin koekappale liikkui ja kitkakerroin pystyttiin laskemaan. Kuormaliinat olivat melko kireällä kuorman turvallisuuden takaamiseksi. Kummankin kuormaliinan kireys vaihteli mittausten välillä 1200 N ja 1600 N välillä, jolloin kuormaliinoista ja kappaleen massasta aiheutuva tukivoima oli noin 2500 N.

Analyysi testistä

Kuorma-autossa tehdyllä testillä pyrittiin todentamaan mittalaitteiden toiminta sekä laskentakaavojen toimivuus autenttisisessa toimintaympäristössä. Mittaustapa laskee kitkakertoimen, kun koekappaleeseen kohdistuu voima, joka pystyy liikkuttamaan koekappaletta. Jos koekappale ei pääse liikahtamaan, ei todellista korkeinta mahdollista kitkakerrointa pystytä määrittelemään. Ympäristöstä johtuen täytyi kuormaliinat kiristää melko kireälle, mikä lisäsi kitkavoimaa. Mittavirheen vähentämiseksi vetoanturit kalibroitiin säännöllisin väliajoin jarrutustestien välissä. Lisäksi testien aikana mitattiin lämpötilan vaihtelu, joka oli korkeintaan asteen verran.

Yhdessä jarrutuksessa saavutettiin 0,8 g hidastuvuus, joka riitti koekappaleen lyhyeen liikkumiseen. Kuviossa 28 on esitettynä mittaustiedot kiihtyvyy- ja voima-antureista sekä kitkakertoimen muutos jarrutuksen aikana. Jarrutuksen alkaessa hidastuvuus nousee nopeasti noin 0,7 g:n tasoon, jossa se pysyy 0,3 sekunnin ajan. Saavutettaessa suurin hidastuvuus, joka on kuviossa merkattuna valkoisella ristillä, alkaa kappale liikkua. Koekappaleen liikkeen voi havaita kuormaliinojen kireyksistä. Edessä ollut kuormaliina löystyy ja takana ollut kiristyy jarrutuksen aikana. Suurin kitkakerroin 0,61 on havaittavissa juuri ennen koekappaleen liikkeellelähdtöä samassa ajanhetkessä korkeimman hidastuvuuden kanssa.

Ennen hidastuvuuden laskemista 0,7 g:n tasosta, koekappaleen liike pysähtyy ja kitkakerroin laskee 0,33:een, koska takimmainen kuormaliina kiristyy ja pysäyttää koekappaleen. Matallampi kitkakerroin riittää koekappaleen paikallaan pitämiseksi, koska taaempi kuormaliina on etumaista kireämmällä. Koekappale pysähtyy pisteessä, jossa kuormaliinojen kiristyminen ja löystyminen loppuu.



KUVIO 28. Mittaustiedot koekappaleen liikkumishetkeltä

Kuormaliinojen kireyksien keskiarvossa on vain 20 N ero ennen ja jälkeen jarrutuksen. Kuten kuviosta 28 voi huomata, kuormaliinojen kireyserot tasoittuvat nopeasti koekappaleen pysähtymisen jälkeen. Kireyserojen muuttuminen koekappaleen pysähtymisen jälkeen johtuu kuormaliinojen venymisestä. Jarrutuksen yhteydessä koekappaleen aiheutti massallaan tarkimmaisena kuormaliinan venymisen. Kun koekappale pysähtyi, siihen vaikutti vielä 0,7 g hidastuvuus, jolloin kuormaliinojen kireysero tasoittui hyvin hitaasti. Jarrutuksesta aiheutuneen hidastuvuuden vähentyessä kireyserot tasoittuivat nopeammin päättyen noin 70 N.

Kuorma-autotesteissä suurin saavutettu kitkakerroin oli 0,61, jonka laskentaan käytettiin Z-akselin kiihtyvyydestä. Ilman Z-akselin kiihtyvyydestä kitkakerroin samasta jarrutuksesta olisi 0,60, joten ero ei ole kuin 2 %. Muissa jarrutuksissa ero Z-akselin tietoa käytettäessä saattoi olla jopa 10 % (kitkakerroimet 0,45 ja 0,41), joten pystysuuntaisilla kiihtyvyyksillä on vaikutus kitkakerroimeen. Vaikutus on satunnaista ja sen suuruus riippuu hidastuvuuden suuruudesta, kuormaliinojen kireyksistä, kuormaliinojen kulmista sekä Z-akselin kiihtyvyyden suuruudesta. Kireämmät kuormaliinat tai suuremmat kuormaliinojen kulmat vähentävät Z-akselin suhteellista vaikutusta mittauksessa. Korkea X-akselin suuntainen kiihtyvyys suurentaa ilman Z-akselia ja sen kanssa laskettujen kitkakerrointen absoluuttista eroa, mutta ei vaikuta suhteelliseen eroon. Z-akselin suuntainen kiihtyvyys vaikuttaa luonnollisesti suoraan sekä absoluuttiseen että suhteelliseen eroon suuruuteen.

Y-akselin suuntaiset kiihtyvyydet olivat pienempiä kuorma-autossa kuin henkilöauton peräkäräyssä. Tämä on loogista, koska peräkäräry on huomattavasti kevytrakenteisempi, joka mahdollistaa nopeammat heilahdukset. Y-akselin kiihtyvyydet vaikuttivat kuitenkin enemmän kuorma-autotesteissä kitkakertoimeen, kuten taulukon 6 arvoista voi tulkita. Y-akselin kiihtyvyyksien ja kitkakertoimen korrelaatiokerroin on suurimmillaan 0,5, joka on huomattavasti peräkäräryssä tehtyjä testejä suurempi. Korrelaation vaihteluun 0,12 ja 0,5 välillä ei löytynyt syytä. Esimerkiksi hidastuvuuden suuruus ei vaikuta Y-akselin vaikutukseen kitkakertoimessa, kuten taulukosta voi huomata. Samalla myös X-akselin kiihtyvyyksien ja kitkakertoimen korrelaatio on erittäin hyvä, alimmillaan 0,97, kun peräkärärytösteissä korrelaatio oli alimmillaan vain 0,73. Näistä tuloksista voidaan päätellä, että peräkärärytösteissä mittausolosuhteet vaikuttivat tuloksiin huomattavan paljon. Kuorma-autotesteissä mittausympäristö oli huomattavasti stabiilimpi, jolloin tuloksetkin ovat johdonmukaisempia.

TAULUKKO 6. Korrelaatiokertoimet ja hidastuvuuden keskiarvo kuorma-autotesteissä

	Jarrutustesti									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X-μ	0,98	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,92
Y-μ	0,30	0,27	0,22	0,13	0,30	0,33	0,12	0,37	0,50	0,20
Z-μ	-0,38	-0,04	0,01	-0,27	-0,19	-0,06	-0,07	-0,12	-0,11	-0,29
X AVG	0,20	0,17	0,16	0,23	0,21	0,30	0,32	0,29	0,26	0,38

9 POHDINTA

Työn tarkoitus oli mitata kuinka paljon kitkavoima vaihtelee todellisen kuljetustilanteen aikana. Tutkimus rajattiin koskemaan vain mittausjärjestelmän suunnittelua ja testausta, jotta toteutus oli mahdollinen käytössä olleilla mittalaitteilla ja resursseilla. Kitkakertoimen mittaus tapa osoittautui toimivaksi ja käytännössä toteutuskelpoiseksi, vaikka testit toteutettiin käyttäen kahta voima-anturia neljän sijasta.

Mittaustapa ei sovellu käytettäväksi kaikkien kuljetettävien tuotteiden kanssa, koska kuormaliinoja tai vanttiketjuja ei voi kiristää kuormanvarmistusohjeiden mukaisesti tuotteen lyhyen siirtymisen sallimiseksi. Liike voi tosin olla hyvin lyhyt, esimerkiksi alle senttimetri. Kuormaliinat tulisi kiinnittää kappaleeseen massakeskipisteen korkeudelle, jotta kappaletta kallistava momentti jäisi mahdollisimman pieneksi. Tämä pitää ottaa erityisesti huomioon korkeiden kappaleiden kanssa, koska kuormaliinojen kiinnittäminen kappaleen yläosaan suurentaa kuormaliinojen ja kuormatilan välistä kulmaa sekä myös kuormaliinoista aiheutuvaa

tukivoimaa. Jos kuljetettava tuote on raskas, on testi toteutettava äärimmäistä varovaisuutta harjoittaen, jotta vaaratilanteilta vältyttäisiin.

Mittaustavalle määriteltiin mittausvirhe, joka on $\pm 0,05$ kuorma-autolla suoritettussa testissä. Luku vaikuttaa suurelta, mutta se on virheen maksimiarvo, joka on tapahtumana erittäin harvinainen. Virheen tarkempi määrittely vaatii lisää mittauskertoja hallituissa olosuhteissa. Testien aikana suurimman epävarmuuden mittaukseen aiheutti itse mittausympäristö, minkä voi huomata henkilöauton peräkärryllä toteutetuista mittauksista. Kuorma-autolla tehdyissä testeissä tulokset ovat huomattavasti johdonmukaisempia ja virhe pienempi.

Useissa testeissä laskettu kitkakerroin oli hyvin lähellä vetokokeella määriteltyä kitkakerrointa. Tämä todistaa mittaustavan toimivuuden ja kannustaa jatkamaan mittaustavan kehittämistä. Pienet erot kitkakertoimissa voivat johtua testialustoista, koska pinnat eivät olleet homogeenisia. Esimerkiksi kuorma-auton kuormatilan vaneri oli hyvin kulunut, joten eri kohdista kuormatilaa olisi voinut mitata erilainen kitkakerroin.

Mittaustavasta tulee tulevaisuudessa tarkempi, kun käyttöön otetaan neljä voima-anturia, jolloin Y-akselin suuntaiset kiihtyvyydet voidaan ottaa huomioon. Lisäksi käyttöön otetaan gyroskooppi, jolla voidaan mitata kuormatilan kallistus koetilanteessa. Tällä tavoin koekapaleeseen kohdistuvat voimat X,Y,Z -akseleiden suuntaisesti voidaan mitata entistä tarkemmin. Tutkimuksella saatiin paljon arvokasta tietoa mittaustavan toiminnasta, mittalaitteista ja mittausten käytännön toteutuksesta. Aiheen tiedettiin olevan jo ennen tutkimuksen aloittamista hyvin haasteellinen. Haasteellisuus osoittautui varsinkin käytännön testien toteutuksessa. Mittaustavan hiomiseksi entistä paremmaksi ja tarkemmaksi tarvitaan lisää testausta, jota tullaan tekemään opinnäytetyöprosessin jälkeen.

Kuormanvarmistuksen lainsäädäntöön Suomessa tai EU-tasolla tutkimuksen tuloksilla ei ole laajamittaista vaikutusta. Tulevat mittaukset kertovat kuinka paljon teoreettiset kitkakertoimet eroavat tienpäällä mitatuista. Tällä hetkellä kuljetusten turvallisuudessa kitkakerrointa tärkeämpi asia on kuormanvarmistuksen toteutus tämänhetkistä lakia noudattaen. Valitettavan useat kuljetukset ovat vailla riittävää kuormanvarmistusta, jolloin väittelyllä kitkakertoimen suuruudesta on enää pieni vaikutus kuljetuksen turvallisuuteen. Tämä tutkimus ja sen jatkotutkimukset luovat pohjaa tuleville keskusteluille kuormanvarmistuksen kehityksestä ja lisäävät JAMK logistiikan ammattitaitoa alalla.

LÄHTEET

- Accelerometer specifications – quick definitions. n.d. Analog Devices –yrityksen sivusto. Viitattu 17.7.2012.
http://www.analog.com/en/content/td_accelerometer_specifications_definitions/fca.html
- Anttila, P. Virtuaaliammattikorkeakoulu. Ylemmän AMK-tutkinnon metodifoorumi, opiskelumateriaali. Viitattu 4.1.2013.
<http://www.amk.fi/opintojaksot/0709019/1193463890749.html>
- Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä 4.12.1992/1257. Viitattu 19.10.2012.
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921257>
- Bernad, C., Laspalas, A., Gonzáles, D., Núñez, J. L., Buil, F. 2011. Transport Vibration Laboratory Simulation: On the Necessity of Multiaxis Testing. Packaging technology and science 24, 1-14.
- Bouten, C. V. C., Koekkoek, K. T. M., Verduin, M., Kodde, R., Janssen, J.D. 1997. A Triaxial Accelerometer and Portable Data Processing Unit for the Assessment of Daily Physical Activity. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 44, 136-147.
- Chowdhury, M. A., Helali, M. 2006. The effect of frequency of vibration and humidity on the coefficient of friction. Tribology International 39, 958-962.
- Dewesoft v7.0.3. Data acquisition, processing, analyzing and storage software. n.d. Dewesoft-ohjelman käyttöohjeet. Viitattu 2.8.2012.
<http://www.dewesoft.com/download/section/3>
- DEWE-101 Minitaur Automotive Analyzer. n.d. Dewe-101 mittalaitteen esite. Viitattu 20.10.2012 http://www.dewesoft.com/download?file=Brochure_DS-MINITAUR.pdf
- European Commission Conference on Cargo Securing and Roadside Technical Checks. n.d. Työpajan pöytäkirja. Viitattu 18.10.2012.
http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/cargo_6_10_2009/workshop_minutes.pdf
- Gatti, P., Ferrari, V. 1999. Applied Structural and Mechanical Vibrations : Theory Methods and Measuring Instrumentation. London: Spon Press.
- Hokkanen, S., Inkinen, M., Käenmäki, J. (toim) 2012. Tavaraliikenneyrittäjä. 38. p. Jyväskylä: JAMK
- How to Use Load Cells. n.d. A&D-yrityksen opetusmateriaali venymäliuska-antureille. Viitattu 25.7.2012.
<http://www.aandd.jp/products/weighing/loadcell/introduction/pdf/6-1.pdf>
- Introduction to Accelerometers. n.d. Omega Oy:n sivusto. Viitattu 27.6.2012.
<http://www.omega.com/prodinfo/accelerometers.html>
- J. Piccirillo. 2005. Accelerometers and how they work. Esitys.
<http://www2.usfirst.org/2005comp/Manuals/Acceler1.pdf>

- Kaps, H. 2011. Securing cargo in road transport – Who know the truth? Tutkimusraportti. Viitattu 21.5.2012. http://www.tis-gdv.de/tis_e/ls/ls_im_strassenverkehr/ladungssicherung_im_sv_110517.html
- Lu, F., Ishikawa, Y., Kitazawa, H., Satake, T. 2010. Effect of Vehicle Speed on Shock and Vibration Levels in Truck Transport. *Packaging technology and science* 23, 101-109.
- Maluf, N. 2004. *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering (Second Edition)*. Norwood: Artech House.
- Mayo, S. 2008. Understanding and Interpreting Datasheet Noise Specifications of IEPE Accelerometers. Esitys. http://www.sem.org/PDF/understanding_noise_specifications.pdf
- Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods. NASA Measurement Quality Assurance Handbook – ANNEX 3. n.d. 2010. NASA:n mittauslaadun varmistuksen käsikirja. <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/NHBK873919-3.pdf>
- Nawrocki, W. 2005. *Measurement Systems and Sensors*. Norwood: Artech House.
- OIML R 60. 2000. Metrological regulations for load cells. International Organization of Legal Metrology.
- Practical understanding of key accelerometer specifications. n.d. 2011. Endevco –yrityksen laatima dokumentti. Viitattu 17.7.2012. http://www.endevco.com/news/emails/2011_12/tp328.pdf
- Romero, J., Lozano, A., Martinez, M. 2005. Field Determination of cargo-deck friction coefficients. *American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division (Publication) 118*, 97-101. Viitattu 18.10.2012. <http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, Compendex.
- SCA1000 and SCA1020 Series Accelerometer. n.d. Mura Electronics SCA1000 ja SCA1020-antureiden tekniset tiedot. Viitattu 7.8.2012. http://www.muratamems.fi/sites/default/files/documents/sca1000_accelerometer_180105.pdf
- Serway, R. A. 1996. *Physics for scientists and engineers*. 4. p. USA: Cengage learning.
- SFS EN-12195-1. 2010. Load restraining on road vehicles. Safety. Part 1: Calculations of securing forces. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto
- Suvanto, K. 2008. *Tekniikan fysiikka 1*. 3. p. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- S-Type Alloy Steel Load Cell. 2010. n.d. Teda-Huntleigh Model 619 –anturin tekniset tiedot. Viitattu 20.7.2012. <http://www.vishaypg.com/docs/12056/619.pdf>
- Tieliikennelaki 3.4.1981/267. Viitattu 19.10.2012. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1981/19810267>
- Uncertainty Analysis Principles and Methods. n.d. RCC Document 122-07. 2007. Viitattu 31.7.2012 http://www.wsmr.army.mil/RCCsite/Documents/122-07_Uncertainty%20Analysis%20Principles%20and%20Methods/122-07.pdf

Walter, P. L. 2007. The history of the accelerometer. 1920s -1996 –Prologue and Epilogue, 2006. *Sound&Vibration*, 40th anniversary issue 1/2007, 84-92.