



Kitkan vaikutus kuorman varmistukseen

Tuotekuljetukset maantieliikenteessä

Janne Mäkelä

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2024

Logistiikan tutkinto-ohjelma

Janne Mäkelä

Kitkan vaikutus kuorman varmistukseen. Tuotekuljetukset maantieliikenteessä.

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Toukokuu 2024**, 38 sivua

Logistiikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: Kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyö käsitteli kitkakertoimien määrittämistä ennestään tutkimattomille materiaalipareille ja niiden vaikutusta toimeksiantajan kuormanvarmistusohjeisiin. Päättävänä oli siis määrittää uusia kitkakertoimia. Työn taustana on metsäteollisuuden tuotteiden kuljetukset maanteillä, joista puuttui laskennallista taustatietoa. Tässä yhteydessä opinnäytetyön tilaaja Stora Enso Oyj lähestyi Jyväskylän ammattikorkeakoulua ja tilasi aiheesta opinnäytetyön.

Tutkimuksen mittaukset suoritettiin yhteistyössä osapuolten kanssa ammattiopisto Gradian alueella Lievestuoreella. Tutkimuksessa mitattiin vedon voimaa erilaisille tuotteille maantiekuljetuksissa yleisessä käytössä oleville kuormatilojen pohjille. Voiman kautta saatiin laskettua kitkakertoimet materiaalipareille. Toteutus tapahtui autenttisissa, kuljetuksia vastaavissa olosuhteissa. Vedossa käytettiin pyöräkuormaajan puomin kääntökehää, johon oli yhdistetty voima-anturi Tede H619, mittalaitteena toimi Dewetron DEWE-43 ja mittausohjelmistona DewesoftX 2023.5. Jokainen testiveto tallennettiin ja nimettiin myöhempää analyysia varten.

Tuloksiksi saatiin määritettyä kitkakertoimia, jotka aikaisempiin, jo tiedossa oleviin materiaalipareihin peilattuna olivat varsin vertailukelpoisia. Tulokset olivat linjassa pakkausten materiaalien ja kuormatilojen alustojen suhteen. Tulosten virheanalyysi osoitti niiden olevan testausolosuhteisiin nähden varsin hyviä. Osa materiaalipareista jäi odottamaan jatkotutkimuksia, mutta tietyt keskeiset kitkakertoimet saatiin selvitettyä.

Selvitettyjen kitkakertoimien vaikutus toimeksiantajan kuormanvarmistusohjeisiin jäi varsin vähäiseksi. Niiden vaikutus perustui lähinnä jo olemassa olevan tiedon tukemiseen laskennallisten menetelmien kautta. Kuorman varmistus on hyvin monitahoinen, erilaisten muuttujien kenttä, johon liittyy myös muita tekijöitä kuin esimerkiksi ainoastaan sidonta tai tuenta. Tämän asian suhteen asioita jäi edelleen auki ja aiheiden jatkojalostamiselle on edelleen tarvetta.

Avainsanat (asiasanat)

Kitka, kitkan mittaaminen, kuorman varmistus, logistiikka, maantiekuljetus

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Ei lisätietoja

Janne Mäkelä

Fractions effect to load securing. Product transport in roads.

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2024, 38 pages.

Bachelor's degree program in logistics. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The thesis handled with the determination of friction coefficients for previously unexamined material pairs and their effect on the client's load securing instructions. The main goal was therefore to determine new coefficients of friction. The background of the work is the transport of forest industry products on roads, for which there was a lack of background information for calculations of cargo securing. In this context, Stora Enso Oyj, the client of the thesis, approached Jyväskylä University of Applied Sciences and ordered a thesis on the subject.

The measurements of the study were carried out in cooperation with the parties involved in the vocational school of Gradia area of in Lievestuore. In the study, the force of friction was measured for various products on the cargo spaces commonly used in road transport. Through force, the friction coefficients for material pairs were calculated. The implementation took place in authentic, transportation-like conditions. Wheel loader's boom was used for the pulling, with a Teda H619 force sensor connected to it, Dewetron DEWE-43 as the measuring device and DewesoftX 2023.5 as the measuring software. Each test was recorded and named for later analysis.

As a result, friction coefficients were determined, and when they were compared to previous, already known material pairs, were quite comparable. The results were in line with to materials and load space platforms. Error analysis of the results showed that they were quite good considering the testing conditions. Some of the material pairs have to wait for further research, but certain key friction coefficients were clarified.

The effect of the determined friction coefficients on the client's load securing instructions was quite small. Effect was mainly based on supporting already existing knowledge through calculations. Load securing is a very complex field of various variables. It also involves other aspects than, for example, only securing the load. Regarding this issue, there were still some issues left open and there is still a need for further studies of the topics.

Keywords/tags (subjects)

Friction, friction measurement, load securing, logistics, road transport

Miscellaneous (Confidential information)

Non

Sisältö

1 Johdanto	3
1.1 Tutkittavat materiaaliparit	4
1.2 Mittausmenetelmät	8
2 Kitka	10
2.1 Kitka fysiikassa.....	10
2.2 Kitka maantiekuljetuksissa	12
2.3 Laskennallinen viitekehys.....	13
3 Mittausten tulokset	19
3.1 Kitkakertoimet.....	19
3.2 Kuormanvarmistus	20
3.3 Epävarmuustekijät.....	26
4 Pohdinta.....	32
Lähteet	34
Liitteet	35
Liite 1. Kitkakertoimia	35
Liite 2. Mittauspöytäkirja	36
Liite 3. Mittausohjelmiston mallikuvat.	37

Kuviot

Kuvio 1. Materiaaliparit.	4
Kuvio 2. Vanerilattia.....	5
Kuvio 3. Alumiinilattia.....	5
Kuvio 4. Kitkavaneriperävaunun tiedot.	6
Kuvio 5. Kartonkirullat ja kitkavaneri perävaunu.....	6
Kuvio 6. Kartonkirullat.....	7
Kuvio 7. Selluyksiköt.....	8
Kuvio 8. Kartonkirullien keskinäinen testi.....	8
Kuvio 9. Vetokokeiden suoritus.	9
Kuvio 10. Vapaakappalekuva.	10
Kuvio 11. Sidontavoima eteenpäin.	13
Kuvio 12. Sidontavoima sivulle ja taaksepäin.	13
Kuvio 13. Sidontavoima ylöspäin	14
Kuvio 14. Sidontakulma ja sidontavyön liukumisen varmistaminen.	15

Kuvio 15. Kitkasidonnan komponentit.....	16
Kuvio 16. Kitkasidonnan kaavat	16
Kuvio 17. Vakavuuden kaavat	17
Kuvio 18. Vakavuuden komponentit.....	18
Kuvio 19. Kaatumista koskevat sidontayhtälöt.....	18
Kuvio 20. Hidastuvuutta vastaava voima eteenpäin	21
Kuvio 21. Sidontaesimerkit	21
Kuvio 22. Kitkavoima kartonkirullalle	22
Kuvio 23. Kiristysvoima	22
Kuvio 24. Sidontavöiden lukumäärä	23
Kuvio 25. Päällekkäin kuormatut rullat.....	23
Kuvio 26. Vakavuus kartonkirullilla	24
Kuvio 27. Kaatuminen ja kitkasidonnan voima	24
Kuvio 28. Hidastuvuus.....	25
Kuvio 29. Kitkavoima.....	25
Kuvio 30. Testiajankohdan sää.....	27
Kuvio 31. Testivetojen voimat. Vaneri-kartonki tavanomainen pakkaus.	27
Kuvio 32. Käyrä voiman kasvun suhteen.	30
Kuvio 33. Rullien käsittely.	32

Taulukot

Taulukko 1. Kitkakertoimet.....	20
Taulukko 2. Keskihajonnan vaikutus kitkakertoimeen.	28
Taulukko 3. Virheanalyysi.	29
Taulukko 4. Kokonaisvirheen vaikutus kitkakertoimeen.	31

1 Johdanto

Kuorman varmistamisen laatu ja määräykset maanteiden tavaraliikenteessä ovat viime vuosikymmeninä olleet paljon julkisuudessa. Se on osaltaan kannustanut myös yrityksiä kehittämään omia kuormanvarmistamisohjeistuksiaan lakien ja määräysten pohjalta. Opinnäytetyön on tarkoitus olla mukana osaltaan tässä kehitystyössä, opinnäytetyön tilaajan Stora Enso Oyj:n toimeksiannosta. Maantiellä tapahtuvien kuljetusten kuormien varmistamisen määräysten säädöspohjana Suomessa ovat mm. Tieliikennelaki (729/2018), Ajoneuvolaki (82/2021), Liikenne- ja viestintävirasto Traficom:n Tieliikennelakia selittävät määräykset sekä Suomen Standardoimisliitto SFS Ry:n standardi SFS-EN 12195-1, joka perustuu Euroopan komission alalle harmonisoimiin standardeihin. Viitteellisenä ohjeena toimii myös Euroopan komission julkaisu; Eurooppalaisia parhaita toimintatapoja koskevat suuntaviivat 2014, kuorman varmistaminen tieliikenteessä.

Metsäteollisuuden tuotteiden kuljettaminen on Suomen meri-, rautatie- ja maantieliikenteessä hyvin tärkeässä asemassa. Esimerkiksi yksin toimeksiantajan Imatran yksiköissä vuosittainen tuotantokapasiteetti on 1,2 milj. tonnia kuluttajapakkauskartonkia sekä 1,3 milj. tonnia sellua. (Stora Enso Oyj, Imatran tehtaat 2024) Stora Enso Oyj:llä on Suomessa kaiken kaikkiaan erilaisia tuotantoyksiköitä toistakymmentä kappaletta eri puolilla maata. Tuotteiden maantiekuljetuksien kuormanvarmistusohjeistuksissa on kuitenkin ollut puutteita kiinnitysvoimien laskennallisissa taustatiedoissa, kuten juuri kitkakertoimissa. Tämän seurauksena opinnäytetyön tilaaja halusi määrittää uusia kitkakertoimia materiaalipareille, joilta kertoimet määräyksistä vielä puuttuvat, ja jotka ovat yleisimpiä toimeksiantajan kuljetuksissa. Uuden tiedon on tarkoitus selkiyttää ja täsmentää yrityksen sidontaohjeiden oikeellisuutta sekä mahdollisesti olla myös laajemmin ohjeistusten perustana. Erityisesti valvovien viranomaisten, kuljetusyritysten ja lähettävien tahojen kuormanvarmistamista koskevien näkemysten yhteneviksi saaminen olisi tärkeä tulevaisuudessa. Nimenomaan kitka on aiheuttanut jonkin verran erimielisyyksiä eri tahojen mielipiteissä. Tässä yhteydessä opinnäytetyön tutkimuksen seuraajana on myös Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.

Tutkimuksen päätavoitteena oli siis määrittää uusia kitkakertoimia erilaisille, ja ennen määrittämättömille materiaalipareille sekä sitä kautta arvioida kuormien sidonnan ohjeistuksen ja määräysten pätevyyttä. Vetokokeet suoritettiin 4.12.2023 Lievestuoreella Jyväskylän koulutuskuntayhtymään kuuluvan ammattiopisto Gradian alueella. Testit suoritettiin yhteistyössä opinnäytetyön tekijän, Jyväskylän ammattikorkeakoulun, toimeksiantajan sekä ammattiopisto Gradian kanssa.

Pääosa laskelmista perustuu Suomen Standardoimisliitto SFS Ry:n standardiin SFS-EN 12195-1. Toimeksiantajan kuormanvarmistuksiin tekemät ohjeet perustuvat niin ikään samaan standardiin. Standardissa on ohjeistuksia myös rautatie- ja merikuljetuksiin, mutta tutkimuksen näkökulmana olivat vain maantiekuljetukset. Lisäksi Saksan ja Itävallan alueella tapahtuvissa maantiekuljetuksissa ohjeena toimii myös Saksan insinööriiliiton laatima VDI 2700 (Stora Enso Cargo Handling and Securing Manual, 24.).

1.1 Tutkittavat materiaali- parit

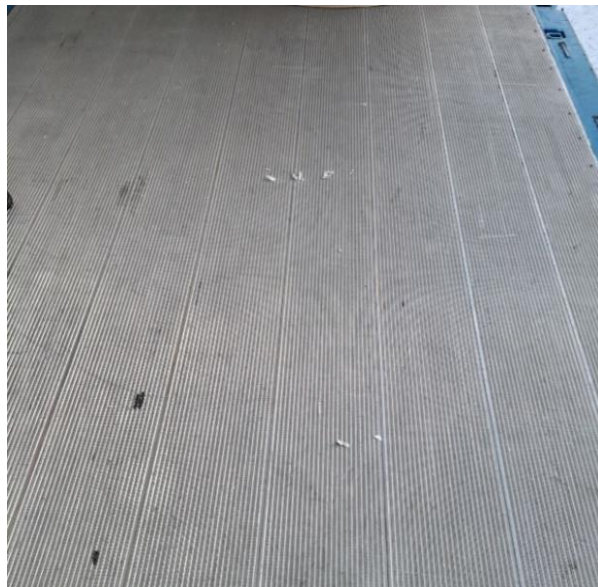
Tutkittaviksi materiaali-
pareiksi opinnäytetyöhön valittiin materiaaleja, joiden kitkakertoimia ei aikaisemmin vielä ollut määritetty. Kuviossa 1 on listattu materiaali-
parit ilman jaottelua pakkaus-
materiaalien mukaan. Tarkempi luettelo tutkimuksen materiaali-
pareista on liitteessä 2. Kuormatila-
pohjien osalta yhtenä kohteena käytettiin kuviossa 2 nähtävää vanerilattiaa, joka on yleisin pohja esimerkiksi pressukapelliautoissa ja siten myös Euroopassa yleisenä olevassa puoliperävaunuliikenteessä. Kuviossa 3 pitkittäisuritettu alumiinilattia, jota käytetään kotimaan tavaraliikenteessä erityisesti elintarvikeliikenteessä, mutta myös ns. paluuliikenteessä paljolti metsäteollisuuden tuotteiden kuljetuksessa. Näitä ajoneuvoja käytetään sekä kotimaanliikenteessä, että yleisesti Euroopan alueella maantieliikenteessä.

Materiaali- parit
Vaneri - Selluyksikkö
Selluyksiköiden keskinäinen kitka
Vaneri - Kartonkirulla
Kartonkirullien keskinäinen kitka
Alumiini-Selluyksikkö
Alumiini-Kartonkirulla
Kitkavaneri-Kartonkirulla

Kuvio 1. Materiaali-
parit.



Kuvio 2. Vanerilattia.



Kuvio 3. Alumiinilattia.

Alumiinilattiainen kuormakori oli Fokor Oy:n 2009 valmistama ja kulumiseltaan lähes uuden veroinen. Vanerilattiainen perävaunu oli NTM:n (Oy Närpiön puu ja metalli) niin ikään vuonna 2009 valmistama, jossa oli myös vain vähän kulumisen jälkiä. Lisäksi tutkimusten lopussa saimme testattavaksi, kuviossa 5 nähtävän, Schmitz Cargobull AG:n valmistaman ns. kitkavaneripohjaisen (anti slip

floor) perävaunun, joka oli valmistettu vuonna 2011 ja kunnoltaan erinomainen. Kuviossa 4 nähtävään Schmitz Cargobull AG:n antamat kitkakertoimet kolmen tuotteen osalta. Lukuun ottamatta viimeksi mainittua, kuormatilat olivat olleet noin kaksi vuorokautta kuivassa ja lämpimässä hallissa ennen testien suorittamista. Kuitenkin myös viimeksi mainittu kitkavaneripohja oli kuiva ja puhdas vetokokeiden aikana.

Schmitz Cargobull Antirutschboden		
Anti slip floor		
getestet nach VDI 2700 Bl. 14 (Sept. 2011)		
DEKRA Prüfbericht Nr. 201126978		
Elastocoat C 6335/101		
Reibwert des Bodens		
friction coefficient		
Prüfergebnisse		
test results		
Prüfkriterium testing criterion	Gleitreibbeiwert μ in Längsrichtung longitudinal direction	Gleitreibbeiwert μ in Querrichtung transverse direction
Euro-Holzpalette (EPAL)	0,66	0,68
Euro-Gitterbox (EPAL)	0,60	0,60
Papierrolle/paper roll	0,65	0,65
1252415		

Kuvio 4. Kitkavaneriperävaunun tiedot.



Kuvio 5. Kartonkirullat ja kitkavaneri perävaunu.

Materiaaliparien toiset puoliskot, eli siis itse testattavat materiaalit, saatiin toimeksiantajalta erilaisina kuljetettavina tuotteina. Nämä olivat siis täysin autenttisia, tavallisestikin kuljetuksissa

esiintyviä metsäteollisuuden tuotteita. Testeissä käytettiin kartonkirullia kahdessa erilaisessa pakkauksessa. Kuviossa 6 näemme esimerkit testeissä käytetyistä kartonkirullista. Toinen pakkauksista oli toimeksiantajan yleisessä käytössä oleva tavanomaisesta pakkausmateriaalista valmistettu rulla. Toisessa testattiin toimeksiantajan yhteistyökumppanin valmistamaa erikoismateriaalia, jonka tarkoitus oli lisätä kitkaa rullan ja kuormatilan välillä. Nämä kitkamateriaalilla pakatut rullat ovat kuvioissa 6 merkitty punaisella merkillä. Lisäksi tuotteina olivat sellun kotimaan pakkaamaton yksikkö, kuviossa 7 vasemmalla sekä sellun pakattu vientiyksikkö kuviossa 7 oikealla. Myös kuviossa 8 nähtävät, kuljetettavien tuotteiden keskinäiset kitkakertoimet määritettiin tutkimuksessa. Lisäksi testattiin kaksi erilaista kitkaa lisäävää mattoa tutkimuksessa. Kaiken kaikkiaan erilaisia testipareja syntyi 21 ja testivetoja suoritettiin 127 kappaletta.



Kuvio 6. Kartonkirullat.

Kartonkiyksikköjen painot vaihtelivat 1351 kg ja 2395 kg välillä. Sellun pakattu vientiyksikkö sekä kotimaan pakkaamaton yksikkö puolestaan painoivat 2000 kg. Myös tuotteiden kunto tarkastettiin ennen testivetoja ja tarvittaessa suoritettiin niiden puhdistus. Yksikköjen ulkoiset mitat vaihtelivat jonkin verran, mutta kitkan kannalta se on merkityksetöntä.



Kuvio 7. Selluyksiköt.



Kuvio 8. Kartonkirullien keskinäinen testi.

1.2 Mittausmenetelmät

Mittausten käytännön toimet toteutettiin ajoneuvojen kuormatilojen avulla aidoissa olosuhteissa ammattipisto Gradian tiloissa. Vetolaitteena testissä käytettiin pyöräkuormaajan kallistussäätöä,

johon oli liitettyä silmukkanostovyö vedettävän kappaleen ympärille pujotettuna. Silmukkanostovyö oli asetettu vedettävän kohteen alalaitaan kallistumisen estämiseksi, kuitenkin siten, että se ei missään vaiheessa koskettanut alustana olevaan materiaalia. Näiden välissä vedon voimaa mittasi voima-anturi Tedeä H619 5000 kg, mittalaitteena toimi Dewetron DEWE-43 ja mittausohjelmistona DewesoftX 2023.5. Lisäksi materiaalien keskinäisen kitkan mittauksessa, kuvio 8, alempi yksikkö sidottiin paikalleen liikkumisen estämiseksi vedon aikana. Jokaiselle materiaaliparille suoritettiin vähintään viisi vetokoetta kuvion 9 osoittamalla tavalla. Liitteessä 3 näemme esimerkkikuvat mittausohjelmiston antamasta kuvioista vetosuorituksen ajalta. Liitteen kuvat ovat tavanomaisessa pakkauksessa olevien kartonkirullien testejä vanerilattiatasolla. Jokaisesta mitaussuorituksesta on tallennettu ja nimetty tiedosto, josta tuloksia voitiin tarkastella myös myöhemmin.



Kuvio 9. Vetokokeiden suoritus.

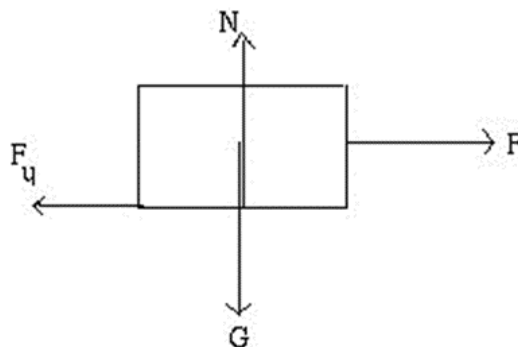
Suorituksessa tavoiteltiin SFS Ry:n standardissaan SFS-EN 12195-1, liitteessä B.1 antaman ohjeiden mukaista vetotestiä. Jokainen veto aloitettiin silmukkanostovyön ollessa löysänä. Veto suoritettiin testiohjelmiston tallennuksen aloituksen jälkeen. Suoritus ja tallennus päätettiin, kun mittausoh-

jelma antoi indikaation kappaleen liikkeelle lähdöstä. Testisuoritusta valvottiin myös silmämääräisesti vähintään kahden henkilön toimesta. Jokainen mittaus tallennettiin tietokoneelle ja ohjelmiston tekemän testikäyrän perusteella vedot olivat tasaisia ja verrattain samanlaisia nopeudeltaan sekä voiman kasvun määrältään. Tiedostot nimettiin yksilöllisesti niiden tunnistamiseksi myöhempäälle analyysiä varten. Koelaitteisto muodostui siis tavoitellen standardin kohdan B.1.3 vetokoe, tilannetta. Komponentit olivat vaakasuuntainen lattiataso, koelaitte, kytkentälaitte sekä tietokonepohjainen laskentajärjestelmä. Näytteenottotaajuudeksi oli mittalaitteistossa asetettu standardin mukainen 50Hz ja vetonopeudessa tavoiteltiin 100 mm/min (SFS-EN 12195-1. 37).

2 Kitka

2.1 Kitka fysiikassa

Newtonin III lain mukaan ”kahden kappaleen vuoro vaikuttaessa kappaleet vaikuttavat toisiinsa vastakkaissuuntaisilla, mutta yhtä suurilla voimilla.” Tätä Newtonin kolmatta lakia kutsutaan arkikielissä, hieman virheellisestikin, voiman ja vastavoiman laiksi. Kyse on voimien laskennallisen vektorisumman saamisesta nolaksi. Näin ollen esimerkiksi kappaletta liikuttamaan pyrkii tietty voima ja sitä vastustaa toinen yhtä suuri voima. Liikenteessä auton liikuttamiseen tarvitaan moottorin synnyttämää voimaa, joka välittyy voimansiirron ja renkaiden välityksellä tiehen. Tätä autoa eteenpäin vievää voimaa puolestaan vastustaa esimerkiksi ilmanvastus sekä renkaiden ja tien rajapinnassa vaikuttava kitkavoima. (Suvanto 2008, 117.)



Kuvio 10. Vapaakappalekuva.

Toisiaan vasten olevien kappaleiden välissä vaikuttaa kitkavoima, joka vastustaa liikettä. Kuviossa 10 voidaan erottaa voimat ja niiden vastavektorit. Kappaleen painovoima on G ja sen vastakkainen voima on pinnan tukivoima N . Kappaletta liikuttava voima on puolestaan F ja sitä kuvassa vastustava voima on kitkavoima F_{μ} . Fysiikassa voidaan erottaa lepokitkavoima ja liikekitkavoima, joista jälkimmäinen on hieman pienempi. Lepokitka tai staattinen kitka tarkoittaa voimaa, joka vaaditaan, että kappale lähtee liikkeelle sen ollessa paikallaan levossa. Kitkan suunta ja suuruus määräytyvät tilanteen mukaan. Liikekitkavoima, toisin sanoen kineettinen kitka taas vastustaa pintojen välissä liikettä kappaleen ollessa liikkeellä. Kitkavoima määritetään kaavalla $F_{\mu} = \mu G = \mu mg$. Kaavassa μ tarkoittaa eri materiaalipareille määritettyä kitkakerrointa (Liite 1.), joka antaa indikaation parin kitkavoimasta. Muut voimaan vaikuttavat komponentit ovat tarkasteltavan kappaleen massa sekään putoamiskiihtyvyyden g ($9,80665 \text{ m/s}^2$). (Suvanto 2008, 121–123.)

Kivioja, Kivivuori ja Salonen (1998) mukaan fysiikassa voidaan toisaalta erottaa myös kappaleen ulkoinen ja sisäinen kitka. Ulkoinen kitka tarkoittaa kitkaa sen perinteisesti ymmärretyssä muodossa tarkoittaen edellä mainittua lepo- ja liikekitkaa. Sisäinen kitka liittyy materiaalien sisällä tapahtuvaan molekyylien liikkeeseen pois tasapainoasemasta. Osa sisäisestä kitkasta muuttuu lämmöksi tai muodon muutokseksi. Kitkalla on paljon haittoja, joita pyritään vähentämään, mutta myös etuja ja hyödyntämismahdollisuuksia, joihin tässä tutkimuksessa keskityttiin. Tutkimuksessa huomiossa on erityisesti lepokitka, johon liittyy siis myös ulkoisen kitkan käsite, mutta tutkimus perustuu lepokitkan käsitteeseen sekä lepokitkakertoimien määrittämiseen. (Kivioja, Kivivuori & Salonen 1998, 63.)

Atomitasolla ei ole olemassa yleistä mallia kitkan tarkastelulle. Myös tämän vuoksi eri aineiden välistä kitkaa on tärkeä tutkia. Mikroskooppisella tasolla materiaaleihin vaikuttaa adheesio, eli aineiden välinen vetovoima. Materiaali kuluu myös mikroskooppisella tasolla. Kulumismekanismia on erilaisia ja ne riippuvat materiaaleista ja olosuhteista. Pinnan rakenteella on myös merkitystä kulumiseen. Karkealla pinnalla on suurempi kitka, joten kulumisenkin on suurempaa. Tutkimuksen tilanteessa kyseessä oli abrasiivinen kulumisen, jossa kovempi materiaali kuluttaa pehmeämpää. Kulumisen matemaattinen mallintaminen on hyvin haasteellista ja se ei ole yksiselitteistä. Perinteisesti sen kuitenkin ajatellaan olevan suoraan verrannollista normaalivoimaan ja liukumismatkaan, sekä kääntäen verrannollista pehmeämmän materiaalin kovuuteen. (Haataja 2021, 6–16.)

2.2 Kitka maantiekuljetuksissa

Kitka on kuljetusalalla monessa suhteessa sekä hyöty että haitta. Auton tekniikka moottoreineen ja voimansiirtoineen on toimittava mahdollisimman vähällä kitkalla aiheuttaen mahdollisimman vähän tehohäviötä. Renkaiden on toisaalta annetta optimaalinen pito, mutta myös polttoaineta- louden kannalta oltava mahdollisimman vähän kuluttavat. Toisaalta jarruissa suuren kitkan merki- tys on taas päin vastainen. (Suvanto 2008, 121.) Hyvin monessa tieliikenteen kuormanvarmistuk- seen liittyvissä laskelmissa tarvitaan kitkaan liittyviä lukuja. Kuorman varmistamisessa kitkaa voidaan myös lisätä eri keinoin, kuten esimerkiksi sidonnalla sekä kitkaa lisäävillä matoilla kuorma- tilan ja kuorman välissä (Kuorman varmistaminen tieliikenteessä 2014, 33.).

Tieliikennelain mukaan kuorman varmistuksessa voidaan ottaa kitkavoima huomioon, jos kuorman liike, ml. tärinä on estetty sitomalla, tukemalla tai mulla vastaavalla tavalla. Näin ollen kitkan vaiku- tus ei siis yksin koskaan riitä. Lisäksi kuormasta on tehtävä mahdollisimman matala ja yhtenäinen kokonaisuus. Kuorman on pysyttävä paikoillaan kaikissa mahdollisissa jarrutuksissa, kiihdyksissä sekä kaarteissa ajettaessa. (Tieliikennelaki 729/2018, 108–109§.) Tieliikenne- ja Ajoneuvolakia tar- kentaa Traficomien määräys, jossa annetaan yksityiskohtaisemmat ohjeet koskien ajoneuvon hy- väksyntää, kuorman sidontaan ja varmistamiseen käytettävistä välineistä sekä kuorman varmist- misessa käytettävistä menetelmistä ja ajotilanteisiin liittyvistä hidastuvuuksien raja-arvoista. Määräyksen kohdassa 8.1 Kuorman varmistaminen, annetaan kitkakertoimia, joiden avulla sidon- nan voimia voidaan määrittää tarkemmin. (TRAFICOM/149639/03.04.03.00/2019)

Suomen Standardoimisliitto SFS Ry antaa standardissaan SFS-EN 12195-1 Maantieajoneuvojen kuormanvarmistus, turvallisuus, osa 1: kiinnitysvoimien laskenta, tarkat ohjeet tavaraliikenteen kuormanvarmistuksen kiinnitysvoimien laskennalle. Standardissa annetaan myös menetelmiä kit- kakertoimien määrittämiseksi. Kitkakertoimia on määritetty kokeellisessa fysiikassa jo jonkin ver- ran, mutta muutamia vähemmän yleisiä materiaalipareja on tähän asti vielä ollut määrittämättä. Tämän standardin pohjalta tutkimuksessa määritettiin uusia kitkakertoimia materiaalipareille, joilta ne ennestään olivat puuttuneet mm. toimeksiantajan käytänteistä.

2.3 Laskennallinen viitekehys

Kuorman varmistamisen peruslähtökohta on siis se, että sillä estetään kuorman liikkuminen kuljetusvälineeseen nähden. Kuormanvarmistamisen keinoja ovat lukinta, tuenta, sidonta tai tuennan ja sidonnan yhdistelmä. Tieliikennelain mukaan kuorman liike on estettävä kaikissa suunnissa kuljetusvälineeseen nähden. Liikenne- ja viestintävirasto Traficomien määräys kuormakoreista ja kuorman varmistamisesta pohjautuvat siis SFS:n standardiin SFS-EN 12195-1, jota sovelletaan kokonaismassaltaan yli 3500 kg ajoneuvoihin maantieliikenteessä. Traficomien määräyksen TRAFICOM/149639/03.04.03.00/2019 mukaan kuorma tulee varmistaa edellä mainituin keinoin siten, että se pysyy paikoillaan siihen kohdistuessa eteenpäin 8 m/s^2 hidastuvuutta vastaa voima sekä taaksepäin ja sivulle 5 m/s^2 vastaava voima. Standardissa tätä vastaava voima eteenpäin lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$F_x = mc_x g$$

Kuvio 11. Sidontavoima eteenpäin. (SFS-EN 12195-1, 7.)

Kaavassa F_x on kuorman aiheuttama pituussuuntainen voima, m on kuorman massa, c_x on kiihtyvyyserroin, jolla kerrottuna saadaan laskettua kuorman kiihtyvyys $a = c_x x$, jossa c_x siis pituussuunnassa on 0,8 ja g on maan putoamiskiihtyvyys ($9,80665 \text{ m/s}^2$). Sivulle ja taaksepäin laskettaessa kaava on seuraava.

$$F_y = mc_y g$$

Kuvio 12. Sidontavoima sivulle ja taaksepäin. (SFS-EN 12195-1, 7.)

Tällöin voima F_y on poikittainen voima, jonka standardin mukainen kiihtyvyyserroin c_y on 0,5. Myös voima taaksepäin lasketaan kertoimella 0,5. Sekä pituussuuntaisen, että poikittaisen voiman

kaavat antavat siis Traficomien määräyksen mukaiset likiarvoiset kiihtyvyydet 8 m/s^2 ja 5 m/s^2 . Vastaavasti pystysuuntaiset voimat lasketaan kaavalla, jossa kerroin c_z on 1,0:

$$F_z = mc_z g$$

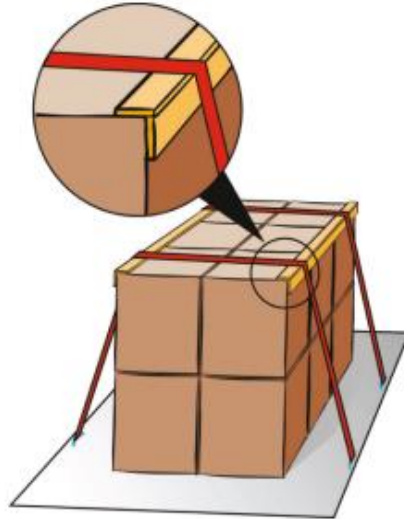
Kuvio 13. Sidontavoima ylöspäin. (SFS-EN 12195-1, 7.)

Edellä esitellyt kaavat antavat siis voiman, jonka kuormanvarmistuksen tulee kestää. Kiihtyvyyserktoimet puolestaan tuovat laskentakaavoja lähemmäksi standardin käytännöllistä näkökulmaa. Eri suuntien yhdistelmien tapauksessa on huomioitava suurin asianmukainen kiihtyvyyserroin. (SFS-EN 12195-1, 10.) Standardissa annettavat laskentakaavat perustuvat symmetrisiin pituus tai poikittaissuuntaisiin sidontoihin. Kuormanvarmistuksessa voidaan käyttää lukitsemista, tuentaa, sidontaa tai tuennan ja sidonnan yhdistelmää. (SFS-EN 12195-1, 4.) Kuormaa paikallaan pitää lisäksi myös kuljetettavan kappaleen ja kuormatilan välinen kitka, joka voidaan ottaa huomioon kuormanvarmistuksen kannalta tarpeellisia voimia laskettaessa. (SFS-EN 12195-1, 11.)

Kitkan yhteydessä on varmistettava, että kontaktipinnat ovat puhtaat ja niissä ei saa olla lunta tai jäätä. Jos edellä mainittuja puutteita esiintyy, kitkakerroin putoaa 0,2:een. (SFS-EN 12195-1, 39.) Liitteessä 1 on esitelty jo aikaisemmin määritettyjä kitkakertoimia. Turvallisen kuljettamisen vaatimus on, että voimien summa ja momenttien summat ovat nollat. Sidonnan kaksi perusmenetelmää ovat kitkasidonta ja suoraidonta. Sidonnassa käytettävien kiinnityslaitteiden ja apuvälineiden tulee kestää niihin merkityt voimat standardien EN 12195-2, EN 12195-3 ja EN 12195-4 mukaisesti, ja niiden tulee olla ehjät. (SFS-EN 12195-1, 11–12.)

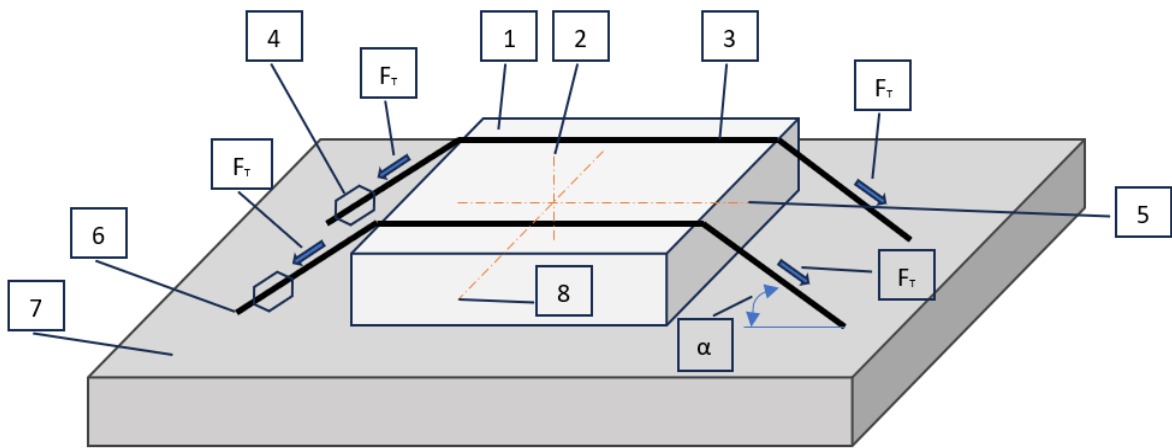
Kuorman ylisidonnalla, eli kitkasidonnalla, pyritään lisäämään kitkavoimaa kuljetettavan yksikön ja kuormatilan pohjan välillä lisäämällä kuorman painovoimaan pystysuuntainen voimakomponentti. (SFS-EN 12195-1, 14.) Sidontavoitaa käytettäessä on huomioitava, että kiristysvoimien jakautuminen tapahtuu tasaisesti sidontavyön eri kohtiin. Sidoksen kulman kuormatilan alustaan nähden on oltava mahdollisimman suuri kuljetettavan yksikön ylälaidassa. Lisäksi on varmistettava, että sidontavyö liukuu mahdollisimman pienellä kitkalla kulman yli, jotta kiristymisen jakautuu tasaisesti

eri puolille kuljetettavaa yksikköä. Tässä apuna toimivat muun muassa kuviossa 14 nähtävät ns. kulmasuojat, jotka helpottavat liukumista, mutta myös suojaavat kuormaa sekä sidontavyötä terävien kulmien aiheuttamilta vaurioilta. (Kuorman varmistaminen tieliikenteessä 2014, 36–43.)



Kuvio 14. Sidontakulma ja sidontavyön liukumisen varmistaminen. (Kuorman varmistaminen tieliikenteessä 2014, 77.)

Jos kuljetettavan kuorman laatu, esimerkiksi painumisen vuoksi vaatii, on suoritettava jälkikiristys pienen matkan jälkeen. Standardin mukaiset laskelmat perustuvat teoreettisiin periaatteisiin. Muillakin tekijöillä voi olla vaikutuksia sidontaan kuten: jälkikiristäminen ei ole mahdollista, tapahtuu itsekiristymisilmiö, tai kulmakitkan vaikutus on suuri. Laskelmissa sidontavyön kiristysvoimana F_T on käytettävä standardin mukaista kiristysvoimaa S_{TF} . Kuljetusliikkeet käyttävät yleisesti sidontavälineitä, joilla S_{TF} -arvo 250–500 daN ja niiden LC-arvo on 1600–2000 daN. LC-arvo tarkoittaa sidontavälineen suurinta sallittua jännitysvoimaa, joka se on suunniteltu kestämään. S_{TF} -arvo taas kertoo kiristysvoiman, kun sidontavyö on kiristetty normaaliin käsikireyteen. Valmistajat ilmoittavat usein sidontavälineelle kaksi LC-arvoa, joista vain pienempi arvo on määritelty standardissa. (Kuorman varmistaminen tieliikenteessä 2014, 31–32.) Sidontavälineeseen kohdistuvan voiman, joka on saatu aikaan kiristyslaitteilla tai joka aiheutuu sidontavälineeseen vaikuttavista kuorman liikkeistä tai ajoneuvon rungon liikkeistä, voidaan mitata tarvittaessa kiristysvoiman osoittimella (SFS-EN 12195-1. 6).



Kuvio 15. Kitkasidonnan komponentit.

Kuviossa 15 selitetään kiristysvoiman laskennalle olennaiset komponentit kitkasidonnassa. Merkkien selitteet ovat: 1 Kuorma, 2 Pysty akseli, 3 Sidontaväline, 4 Kiristyslaite, 5 Poikittaisakseli 6 Sidontapiste 7 Vaakataso 8 Pituusakseli (SFS-EN 12195-1. 15).

Kuviossa 16 nähdään kitkasidonnan laskelmissa käytettävät kiristysvoiman ja sidontavälineiden lukumäärän kaavat. Kuviossa F_T on kiristysvoima, c_x pituussuuntainen kiihtyvyyserroin (0,8), μ kitka-kerroin, c_z pystysuuntainen kiihtyvyyserroin (1,0), m kuorman massa, g maan putoamiskiihtyvyys ($9,80665 \text{ m/s}^2$), n sidontavälineiden lukumäärä, α pystysidontakulma ja f_s kitkasidonnan varmuuskerroin. Varmuuskerrointa f_s käytetään arvolla 1,1 kaikissa vaakasuunnissa, paitsi maantiekuljetuksissa arvolla 1,25 kulkusuuntaan nähden.

$$F_T \geq \frac{(c_x - \mu c_z)mg}{2n\mu \times \sin \alpha} f_s$$

$$n \geq \frac{(c_x - \mu c_z)mg}{2\mu \times \sin \alpha \times F_T} f_s$$

Kuvio 16. Kitkasidonnan kaavat. (SFS-EN 12195-1, 15.)

Kitkaan liittyvien laskelmien lisäksi kuorman varmistamisessa tulee huomioida myös jäykän kappaleen vakavuus. Vakavuus määritetään seuraavilla yhtälöillä kuviossa 17.

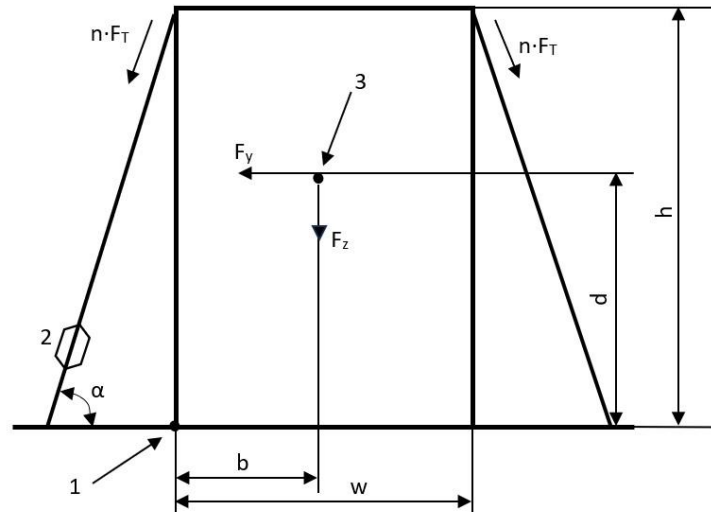
$$(1) F_z \times b_{x,y} > F_{x,y} \times d$$

$$(2) b_{x,y} > \frac{F_{x,y}}{F_z} d$$

$$(3) b_{x,y} > \frac{c_{x,y}}{c_z} d$$

Kuvio 17. Vakavuuden kaavat. (SFS-EN 12195-1, 12.)

Tässä d on kuorman painopisteen korkeus kaatoreunasta ja $b_{x,y}$ etäisyys kuorman alaosan keskipisteestä kaatoreunaan. Jos ehdot täyttyvät, kuormaa voidaan pitää vakaana. Muutoin kaatumisen mahdollisuus on otettava huomioon varmistuslaskelmia tehtäessä, jolloin laskelmissa kitkasidonassa sovelletaan kaatumiseen kaavoja poikittaissuunnassa sekä pitkittäissuunnassa. (SFS-EN 12195-1, 12.) Kuviossa 18 on kuvattu vakavuuden komponentit. Homogeenisessa ja symmetrisessä kappaleessa painopisteen paikka sijaitsee symmetria-akselin puolella välissä. (Suvanto 2008, 243.) Tätä hieman yksinkertaistettua sääntöä voidaan käyttää laskelmien tukena kaatumiseen liittyvissä kaavoissa, jos sen ehdot täyttyvät ko. kappaleen kohdalla.



Kuvio 18. Vakavuuden komponentit.

Kuviossa 18 h on kappaleen korkeus, w kappaleen leveys, n sidontavälineiden lukumäärä, piste 1 kaatoreuna, 2 kiristyslaite ja 3 painopiste. Jos kuviossa 17 olevat ehdot eivät täyty, tulevat voimaan kaatumista koskevat sidontayhtälöt. Kuviossa 19 on poikittaissuuntaan sovellettava kitkasidonnan yhtälö (1) sekä pituussuuntaan sovellettava yhtälö (2). (SFS-EN 12195-1. 16)

$$(1) n \times F_T \geq \frac{(c_y d - c_z b) mg}{w \times \sin \alpha} f_s$$

$$(2) 2n \times F_T \times \sin \alpha \frac{1}{2} \geq mg (c_x d - c_z b) \times f_s$$

Kuvio 19. Kaatumista koskevat sidontayhtälöt. (SFS-EN 12195-1, 16.)

Useista kappaleista muodostuvat rivit tulee sijoittaa aina mahdollisimman tiiviisti toisiaan vasten. Kuormarivien sisäinen kitka voidaan ottaa huomioon, jos sen olemassaolo on taattu sopivilla toimenpiteillä kuten yhteen sidonnalla tai paineen kestävällä pakkauksella (SFS-EN 12195-1, 17). Tässäkin tapauksessa kaikki yksiköt on kuitenkin varmistettava. Jos yksikkö ei ole herkkä kaatumaan (kuvio 17), on kuitenkin varmistettava, että yksikkö ei liu'u mihinkään suuntaan (Tieliikennelaki 729/2018, 109§.).

Standardeissa EN 12642 XL ja EN 12642 L määritellään ajoneuvon rakenteelle lujuudet mm. sen seinien osalta eteen-, sivulle- ja taaksepäin kohdistuville voimille. Näitä voidaan käyttää sidonnan asemasta, tai sidonnan apuna tuennan muodossa kuorman varmistamisessa. Standardin EN 12642 L mukaan luokitellun etupäädyn lujuus on 40 % hyötykuormasta, suurimmillaan kuitenkin 5000 daN sekä sivuseinien 30 %. Standardissa EN 12642 XL vastaavat luvut ovat 50 % ja 40 %. Esimerkiksi L-luokitellussa verhokapelliperävaunussa sivuseinät ovat ainoastaan säältä suojaamista varten. Luokiteltujen seinien osalta, kitkan ollessa tarpeeksi suuri ja kuorman ollessa tiivis sekä seiniin tuettu, seinien tuenta riittää yksi kestävään täyden hyötykuorman aiheuttamat voimat. Tällöin täyttyy myös Tieliikennelain 109§ kohta paikallaan pysymisen vaatimuksesta. (Kuorman varmistaminen tieliikenteessä 2014, 16–17.)

3 Mittausten tulokset

3.1 Kitkakertoimet

Standardissa SFS-EN 12195-1, kitkakertoimien laskentatavoiksi annetaan kaksi vaihtoehtoa: kallistuskoe sekä vetokoe. Koska suoritetuissa kokeissa vetonopeutta ei pystytty täysin aukottomasti määrittämään sekä vedon voimaa laskemaan 30 % per mittaus standardin kohdan B.1.3 mukaisesti, vetokokeet suoritettiin mahdollisimman lähelle sitä mukailleen. Tämän vuoksi kitkakertoimen laskennassa käytettiin kitkavoiman peruskaavaa varmuuskertoimella 0,925. Tulokset laskettiin kaavalla: vetojen voimien keskiarvo (N) / vedettävän yksikön paino (N) x varmuuskerroin 0,925. Tutkimusten perusteella lasketut kitkakertoimet ovat nähtävissä taulukossa 1, sekä tarkemmin eriteltynä liitteessä 2. Vetovoimien keskiarvo laskettiin kolmesta jäljelle jääneestä edustavasta tuloksesta, kun suurin ja pienin tulos hylättiin. On myös huomioitava liittyen muutamaa testitulokseen, että ”yli 0,6:n kitka kerrointa saa käyttää vain, jos se on vahvistettu standardin EN 12195-1:2010 mukaisella koetodistuksella.” (TRAFICOM/149639/03.04.03.00/2019, 8.) Tuloksien kannalta täytyy myös todeta, että Stora Enson yhteistyökumppanin tarjoama pakkausmateriaali ei liisännyt kitkaa.

Taulukko 1. Kitkakertoimet.

Materiaaliparit	Kitkakertoimet
Vaneripohja-Sellun pakattu vientiyksikkö	0,32
Vaneripohja-Sellun pakkaamaton kotimaanyksikkö	0,45
Vaneripohja-Kartonkirulla (normaalipakkaus)	0,49
Vaneripohja-Kartonkirulla (kitkamateriaalipakkaus)	0,44
Alumiinipohja-Sellun pakattu vientiyksikkö	0,42
Alumiinipohja-Sellun pakkaam. Kotim. yks. pitkittäin	0,44
Alumiinipohja-Sellun pakkaam. Kotim. yks. poikittain	0,48
Alumiinipohja-Kartonkirulla (normaalip.) pitkittäin	0,43
Alumiinipohja-Kartonkirulla (normaalip.) poikittain	0,46
Alumiinipohja-Kartonkirulla (kitkamateriaalipakkaus)	0,42
Vaneripohja-Kartonkirulla kitkamatolla (normaalip.)	0,61
Vaneripohja-Kartonkirulla Haklift kitkam. (normaalip.)	0,51
Kitkavaneripohja-Kartonkirulla (normaalipakkaus)	0,75
Sellun pakkamatt. kotimaanyks. keskinäinen kitka	0,56
Kartonkirullien keskinäinen kitka (normaalipakkaus)	0,53
Kartonkirullien keskinäinen kitka (kitkamateriaalipakk.)	0,55

3.2 Kuormanvarmistus

Mittaustulosten vaikutukset kuormanvarmistukseen riippuvat hyvin paljon kyseessä olevan materiaalin muodosta ja koostumuksesta. Esimerkiksi yksittäisen kartonkirullan ollessa pystyssä kuormatilassa lattialla yhdessä rivissä etuseinään tuettuna on tilanne aivan eri, kuin sellun kotimaan yksiköiden ollessa päällekkäin kuormatilan keskellä. Myös etuseinän luokitus ja esimerkiksi rullien korkeudet sekä se, että onko rullia lastattu päällekkäin, vaikuttaa kuormanvarmistukseen. Joka tapauksessa tutkimuksessa saadut uudet kitkakertoimet täsmentävät kullekin tilanteelle käytettävän sidontavoiman kaavan sisältöä.

Traficomien määräyksen TRAFICOM/149639/03.04.03.00/2019 mukaan kuorma tulee varmistaa siten, että se pysyy paikoillaan siihen kohdistuessa eteenpäin 8 m/s^2 hidastuvuutta vastaa voima

sekä taaksepäin ja sivuille 5 m/s^2 vastaava voima. Jos siis käytännössä otetaan esimerkkinä testeissä käytetty kartonkirulla, joka painoi 1361 kg . Sen täytyy pysyä paikoillaan eteenpäin 8 m/s^2 hidastuvuutta vastaavalla voimalla. Tämä voima eteenpäin lasketaan kuviossa 20 nähtävällä kaavalla.

$$F_x = mc_x g = 1361 \text{ kg} \times 0,8 \times 9,80665 \text{ m/s}^2 = 10677 \text{ N}$$

Kuvio 20. Hidastuvuutta vastaava voima eteenpäin. (SFS-EN 12195-1, 7.)

Sivulle- ja taaksepäin voimaa laskettaessa kiihtyvyyserroin c on $0,5$, joten eteenpäin varmistettava voima on suurempi, joten se kattaa myös niiden vastaavan voiman. Tämä pätee siis, jos varmistus perustuu vain kitkaan ja ylisidontaan. Jos laskelmissa huomioidaan myös tuenta etuseinään, tulee sivuttaissuunnan tuenta tai sidonta silloin ottaa huomioon omana komponenttina Kuvion 20 osoittaman voiman kuormanvarmistuksen eri keinojen tulee kestää, jotta kuorman varmistus on riittävä. Kuviossa 21 esimerkit etuseinään tuetuista kartonkirulla-kuormista.



Kuvio 21. Sidontaesimerkit. (Stora Enso. Cargo Handling and Securing Manual, 31.)

Kitkavoima 1361 kg :n kartonkirullalle ilman sidontaa vanerisella kuormatilapohjalla saadaan kuviossa 22 nähtävällä kaavalla perustuen tutkimuksessa saatuun kitkakertoimeen.

$$F_{\mu} = \mu mg = 0,49 \times 1361 \text{ kg} \times 9,80665 \text{ m/s}^2 = 6540 \text{ N}$$

Kuvio 22. Kitkavoima kartonkirullalle. (Suvanto 2008, 123.)

Tämä ei siis yksin riitä täyttämään Traficomien määräyksen 8 m/s^2 hidastuvuudelle asettamaa voimavaatimusta. Aluksi paikallaan pysymiseen tarvitaan sidontaa, tuenta tai niiden yhdistelmää. Näiden voimien lisäksi tarvitaan kitkavoimaa, joka täydentää edellä mainittuja kuormanvarmistus menetelmiä. Sidontavoiman pystykomponentti lisää kitkavoimaa ja näin ollen vähentää mahdollisen puuttuvan voiman määrää. Kiristysvoiman on siis tarkoitus lisätä kitkavoimaa tarpeellinen määrä. Tämä S_{TF} -arvo tulee siis ylittyä käytettävästä sidontavyöstä sekä kiristimestä löytyvästä merkinnästä, jotta ne täyttävät vaaditut voimavaatimukset. Kiristysvoima lasketaan kuviossa 23 nähtävällä kaavalla, jossa sidontakulmaksi valitaan 60° .

$$F_T \geq \frac{mg(c_{x,y} - \mu c_z)}{2n \times \mu \times \sin \alpha} \times f_s \Rightarrow \frac{1361 \text{ kg} \times 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times (0,8 - 0,49 \times 1,0)}{2 \times 1 \times 0,49 \times \sin 60^\circ} \times 1,25 = 6094 \text{ N}$$

Kuvio 23. Kiristysvoima. (SFS-EN 12195-1, 15.)

Toimeksiantajan sidontaohje velvoittaa käyttämään kartonkirullien alla ja niiden välissä kitkamattoja. Tutkimusten perusteella kitkamatalle saatiin kitkakertoimeksi 0,61. Tällä kertoimella laskettuna kiristysvoima edellä mainitulla kartonkirullalla on noin 3000 N. Molemmissa tapauksissa yksi S_{TF} -arvon ylittävä sidontavyö riittää tarvittavan voiman lisäämiseen.

Sidontavälineiden lukumäärä voidaan laskea myös suoraan, jos tiedetään kappaleen kitkakerroin ja paino sekä sidontavyön S_{TF} -arvo. Tällöin sidontaväiden lukumäärä lasketaan kuvion 16 mukaisella kaavalla. Oletetaan että tilanteessa on samalla pakkausmateriaalilla oleva 2389 kg:n kartonkirulla ja sidontavyön standardin mukainen kiristysvoima on 500 daN. Käytetään pituussuuntaisia arvoja sekä 60° pystysidontakulmaa, joka saadaan laskettua rullan korkeuden ja leveyden sekä

kuormatilan leveyden avulla. Tällöin sidontavöiden lukumäärä lasketaan kuviossa 24 esitetyllä tavalla. (SFS-EN 12195-1, 15.)

$$n = \frac{(0,8 - 0,49 \times 1,0) \times 2389 \text{ kg} \times 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2 \times 0,49 \times \sin 60^\circ \times 5000 \text{ N}} \times 1,25 = 2,14$$

Kuvio 24. Sidontavöiden lukumäärä. (SFS-EN 12195-1, 15.)

Kartonkirullan laskennallinen sidontavöiden lukumäärä ylittää arvon kaksi, eli voitã tarvitaan kolme, jotta kuorma saadaan varmistettua standardin mukaisesti. Edellä mainittu tilanne siis ilman muuta varmistusmenetelmää, kuten esimerkiksi etuseinään tuentaa. Jos kuvion 24 mukainen tilanne lasketaan toimeksiantajan käyttämän kitkamaton kertoimella 0,61, saadaan tulokseksi 1,05, joka tulee pyöristää kahteen kappaleeseen sidontavöitä. Tässä tilanteessa kitkakertoimella on ratkaiseva merkitys sidontavöiden lukumäärän laskemisessa.



Kuvio 25. Päälekkäin kuormatut rullat.

Kuorman vakavuus huomioon otettaessa lähtökohtana on kuvion 17 mukainen ehto $b_{x,y} > c_{x,y} / c_z \times d$. Eli kun pituussuuntaisen c_x (tai sivusuuntaisen c_y) kiihtyvyyuskertoimen suhde ylöspäin suuntautuvaan kiihtyvyyuskertoimeen kerrottuna painopisteen korkeudella on pienempi, kuin etäisyys kuorman alaosan keskipisteestä kaatoreunaan, ei kaatumista tarvitse huomioida. Jos tämä ehto ylittyy, kitkasidonnassa tulee huomioida myös kaatuminen. Toimeksiantajan tuotekuljetuksissa tämä täytyy huomioida kartonkirullien osalta kahdessa tilanteessa: rullien ollessa itsessään tarpeeksi korkeita tai kuormaustilanteessa lastattaessa kaksi rullaa päällekkäin. Kuviossa 25 nähtävässä kahden rullan tilanteessa asiaa käsitellään yhtenä korkeana yksikkönä ja vakavuus tulee tarkistaa kuviossa 26 esitetyllä tavalla. Esimerkkinä käytetään testeissä käytettyjä 1361 kg rullia, joiden leveys on 1198 mm ja halkaisija 1460 mm. Tällöin vakavuus eteenpäin määritetään kuviossa 26 kappaleen symmetriaehdon voimassa ollessa. (SFS-EN 12195-1, 12.)

$$b_x > \frac{c_x}{c_z} \times d \Rightarrow \frac{1460\text{mm}}{2} > \frac{0,8}{1} \times 1198\text{mm} \Rightarrow 730\text{mm} > 958\text{mm}$$

Kuvio 26. Vakavuus kartonkirullilla.

Kuviosta 26 nähdään, että vakavuus ehto ei tilanteessa täyty, joten kahden päällekkäin olevan kartonkirullan varmistuksessa huomioon täytyy ottaa myös kaatumisen estäminen kitkasidonnalla. Oletetaan esimerkissä sidontavälineiden sidontakulmaksi 80° sekä se, että ne on sijoitettu symmetrisesti, jolloin sidontavälineessä vaikuttava voima pitkittäissuunnassa F_T saadaan laskettua kuviossa 27 esitetyllä kaavalla. Sidontavälineiden lukumääräksi oletetaan laskentavaiheessa yksi.

$$F_T \geq \frac{m g (c_x d - c_z b)}{n \times \sin \alpha} \times f_s \Rightarrow \frac{2722\text{kg} \times 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times (0,8 \times 1,1198\text{m} - 1,0 \times 0,73\text{m})}{1 \times \sin 80^\circ} \times 1,25 = 5619\text{N}$$

Kuvio 27. Kaatuminen ja kitkasidonnann voima. (SFS-EN 12195-1, 16.)

Kaatuminen eteenpäin estetään siis sitomalla rullat yhdellä liinalla, jonka S_{TF} -arvo on vähintään 562daN. Kuljetuksissa yleisesti käytössä olevien sidontavöiden S_{TF} -arvot ovat noin 250-500daN, joten sidontaan vaaditaan kaksi sidontavyötä. (Kuorman varmistaminen tieliikenteessä 2014, 31–32.) Kaatuminen sivulle- tai eteenpäin voidaan estää myös tukemalla rullat kuormatilan seiniin. Standardissa EN 12642 XL etuseinän tuenta kyvyille annetaan 50 % osuus hyötykuorman painosta, joka on kuitenkin yleisimmin rajattu arvoon 135000 N arvoa. Tämä osaltaan vähentää kitkasidonnin tai ristikkäissidonnin kaatumisen estävän komponentin tarvetta sekä kattaa osittain tai jopa kokonaan myös eteenpäin suuntautuvan voiman sidonnalle antamaa tarvetta. Jos oletetaan hyötykuormaksi kuvion 21 osoittamalla tavalla keskelle lastatut yhdeksän kappaletta noin 2400 kg kartonkirullaa tuettuna XL etuseinää vasten, tällöin 8 m/s^2 hidastuvuudelle vastaava voima on koko hyötykuormalle 169459 N, joka nähdään kuviosta 28.

$$F_x = mc_x g = 9 \times 2400 \text{ kg} \times 0,8 \times 9,80665 \text{ m/s}^2 = 169459 \text{ N}$$

Kuvio 28. Hidastuvuus.

$$F_\mu = \mu m g = 9 \times 0,49 \times 2400 \text{ kg} \times 9,80665 \text{ m/s}^2 = 103794 \text{ N}$$

Kuvio 29. Kitkavoima.

XL-luokan etuseinä kestää siis yleisimmin 135000 N voiman. Esimerkin tapauksessa kitkavoima antaa puolestaan rullille 103794 N paikallaan pitävän voiman, kuvion 29 mukaan. Tällöin etuseinän tuennan ja kitkan antama voima 238794 N on suurempi kuin hidastuvuuden asettama 169459 N voimavaatimus, ja tämä riittää pitämään kuorman paikoillaan. L-luokan etuseinän osalta seinän kestävyys ja kitka yhdessä eivät riitä täyttämään paikoillaan pysymisen vaatimusta, vaan kuorma on varmistettava sitomalla. Vastaava arvo L-luokan etuseinän kestävyuden osalta on 50000 N, mikä antaa yhdessä kitkavoiman kanssa antaa 153794 N arvon, ja tämä ei siis esimerkin tilanteessa riitä kattamaan hidastuvuuden asettamaa vaatimusta. (Schmitz Cargobull 2024.) Tieliikennelain

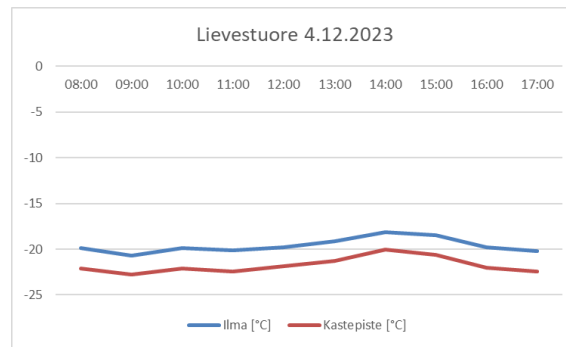
paikallaan pysymisen vaatimuksen sekä mahdollisesti kuvion 26 vakavuuden ehdon jäädessä täyttymättä, kuorma tulee kuitenkin aina sitoa, tukea tai lukita paikallaan pysymisen varmistamiseksi. Tässä yhteydessä on myös syytä mainita epävakasta jäykistä kappaleista muodostuva rivi, jota voidaan käsitellä yhtenäisenä kuormayksikkönä, ja niiden sisäinen kitka voidaan ottaa huomioon, jos kitkan olemassaolo voidaan taata sopivilla toimenpiteillä.

Tutkimuksen tulokset eivät itsessään muuta toimeksiantajan sidontaohjeita, vaan ne vahvistavat ne oikeiksi. Maanteille lähetettävien erilaisten kuormien variaatioiden kuitenkin ollessa kohtalaisen suuri, vaatisi vielä varsin paljon lisälaskelmia, jotta voitaisiin päästä kaikkien versioiden laskennalliseen tulokseen.

3.3 Epävarmuustekijät

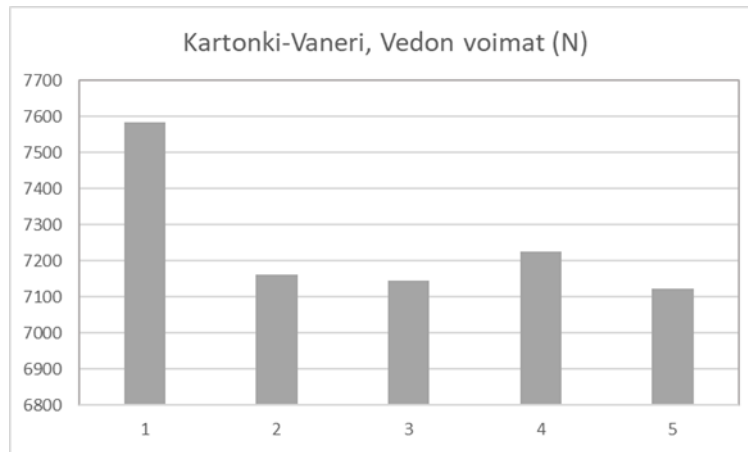
Fysiikka on todellista maailmaa kokeellisesti tutkiva tiede, joten kaikki mitatut ja niiden pohjalta määritetyt suureet ovat likiarvoja. Samaa suuretta mitattaessa herkällä mittalaitteella poikkeavat lukemat aina jonkin verran toisistaan. Välillä saadaan keskiarvoa pienempiä ja välillä suurempia arvoja. Tätä kutsutaan satunnaiseksi virheeksi ja se voidaan ilmaista esimerkiksi keskihajontana, joka kuvaa poikkeamaa tulosten keskiarvosta. Mittauksissa voi olla myös systemaattisia virheitä ja sen aiheuttaja on hieman helpompi tunnistaa. Absoluuttisesta virheestä puhuttaessa tarkoitetaan tarkkaa mitattavaa virhettä, joka voidaan ilmoittaa esimerkiksi millimetreinä. Toisaalta puhutaan myös suhteellisesta virheestä, joka ilmoitetaan prosentteina. (Suvanto 2008, 27–30.)

Olosuhteet olivat tutkimuksen suorittamisen aikana tasaiset ja sää oli sateeton. Kastepiste ei ylittänyt missään vaiheessa lämpötilaa, joten olosuhteet olivat kuivat ja testeihin sopivat. Lämpötila vaihteli tutkimuksen aikana klo 14:n 18,1 C° ja klo 9:n 20,7C° välillä. Kuviossa 30 nähdään Lievestuoreen testausajankohdan sään vaihtelu suhteessa kastepisteeseen (Ilmatieteenlaitos, havaintojen lataus 2024.). Sään vuoksi satunnaisen virheen mahdollisuus oli siis hyvin pieni sekä kuormati-
lojen pohjien, että testattavien materiaalien pysyessä koko testipäivän samankaltaisina. Mittalaitteen valmistajan ilmoittamien tietojen mukaan lämpötilan vaihtelu sekä varsinkin sen al-
haisuus vaikuttivat jonkin verran anturin antamaan tulokseen.



Kuvio 30. Testiajankohdan sää. (Ilmatieteenlaitos 2023.)

Laskennallisen tarkkuuden osalta testitulosten vedon voimille laskettiin keskihajonnat materiaali-parikohtaisesti. Keskihajonnat olivat mittauksissa varsin maltillisia ja näin saadut suhteelliset poikkeamat melko pieniä. Taulukossa 2 voimien suuruuksien keskihajonta on viety vaikutuksena kitkakertoimeen. Jonkin verran mittauksissa esiintyi systemaattista poikkeamaa ensimmäisen vedon osalta. Materiaaliparien ensimmäiset testivedot olivat voimaltaan jonkin verran suurempia, kuin muut vedot. Tämä poikkeama tuloksissa poistui suurimman ja pienimmän tuloksen hylkäämisessä. Ensimmäisen vedon ongelma näkyy selvästi kuviossa 31, jossa nähdään vaneripohjaisen ja normaalipakkauksisen materiaaliparin kaikkien viiden testivedon voimat.



Kuvio 31. Testivetojen voimat. Vaneri-kartonki tavanomainen pakkaus.

Muutamissa materiaalipareissa keskihajonnan kuvastama poikkeama kitkakertoimessa nousi 5 %, poikkeamien keskiarvon ollessa kuitenkin koko mittauksessa vain 1,5 %. Kitkakertoimeen suhteutettuna muutos keskiarvolla mitattuna oli vain $\pm 0,006$ yksikköä. Tutkimuksessa keskihajonta

laskettiin kaikkien testivetojen mukaisesti. Mukana oli siis myös tutkimuksessa hylätyt suurin ja pienin tulos.

Taulukko 2. Keskihajonnan vaikutus kitkakertoimeen.

Materiaaliparit	Kitkakertoimet	Keskihajonta	Suhteellinen poikkeama
Vaneripohja-Sellun pakattu vientiyksikkö	0,32	± 0,016	5,0 %
Vaneripohja-Sellun pakkaamaton kotimaanyksikkö	0,45	± 0,012	2,1 %
Vaneripohja-Kartonkirulla (normaalipakkaus)	0,49	± 0,002	0,5 %
Vaneripohja-Kartonkirulla (kitkamateriaalipakkaus)	0,44	± 0,025	5,7 %
Alumiinipohja-Sellun pakattu vientiyksikkö	0,42	± 0,011	2,6 %
Alumiinipohja-Sellun pakkaam. Kotim. yks. pitkittäin	0,44	± 0,002	0,5 %
Alumiinipohja-Sellun pakkaam. Kotim. yks. poikittain	0,48	± 0,003	0,6 %
Alumiinipohja-Kartonkirulla (normaalip.) pitkittäin	0,43	± 0,001	0,3 %
Alumiinipohja-Kartonkirulla (normaalip.) poikittain	0,46	± 0,001	0,2 %
Alumiinipohja-Kartonkirulla (kitkamateriaalipakkaus) pitk.	0,42	± 0,003	0,8 %
Vaneripohja-Kartonkirulla kitkamaton (normaalip.)	0,61	± 0,008	1,3 %
Vaneripohja-Kartonkirulla Haklift kitkam. (normaalip.)	0,51	± 0,002	0,5 %
Kitkavaneripohja-Kartonkirulla (normaalipakkaus)	0,75	± 0,004	0,5 %
Sellun pakkamatt. kotimaanyks. keskinäinen kitka	0,56	± 0,012	2,1 %
Kartonkirullien keskinäinen kitka (normaalipakkaus)	0,53	± 0,017	3,2 %
Kartonkirullien keskinäinen kitka (kitkamateriaalipakk.)	0,55	± 0,004	0,7 %
Koko mittauksen keskiarvot:		± 0,006	1,5 %

Pitkittäisuritetulla alumiinisella kuormatilapohjalla puolestaan tehdyt vetokokeet poikkesivat n. 0,03–0,04 yksikön verran uriin nähden tehtyjen poikittaisten ja pitkittäisten vetojen osalta. Tämä antaa tiedon pienestä erosta kitkakertoimissa vedon suunnan suhteen, mutta käyttötarkoituksen kannalta on syytä käyttää vain pienempää pitkittäissuuntaista kerrointa. Taulukossa 2 nähdään lepokitkavoiman keskihajonnan aiheuttamat absoluuttiset ja suhteelliset poikkeamat kitkakertoimeen vietyinä materiaalipareittain.

Voima-anturin maahantuojan antamien tietojen mukaan laitteen virheen kannalta oleellisin poikkeama on ainoastaan anturin kokonaisvirhe, joka oli ennalta määritelty 100 N:n. Mittalaitteen valmistaja antaa laitteelle lämpötila rajoitteen, joka on alimmillaan -20°C. Mittauspäivän kylmä lämpötila oli laitteen toiminnan kannalta ääriarajoilla, ja tämän vuoksi voima-anturin virhemarginaali oli

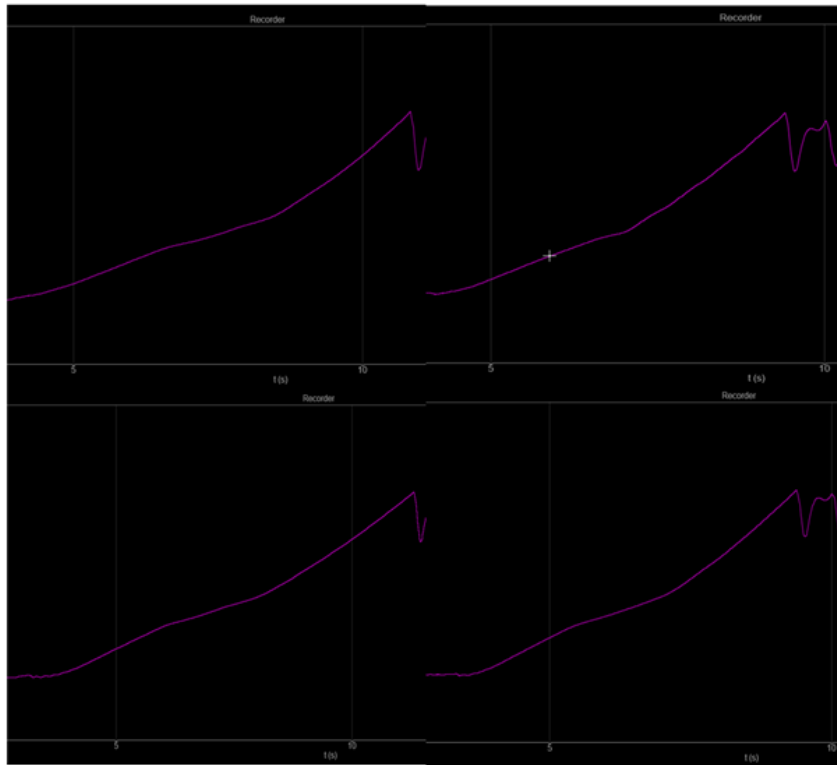
200 N, joka edelleen on verrattain alhainen kokonaisuuteen nähden. Oleellisinta lämpötilan kannalta oli se, että laitteen elektroniikka saavutti ympäristönsä lämpötilan ennen testien aloittamista. Siihen valmistaja ilmoitti 5–30 minuutin toleranssin, jonka ajan mittalaite eittämättä oli testiolosuhteissa ennen mittausten aloittamista. Anturin mekaniikan kannalta suurimmat virheet tulevat puristusmittauksissa. Vetomittauksissa anturin virhemarginaali on jälleen hyvin pieni. Olenaisinta vedoissa oli se, että voima kohdistuu anturiin suoraan, eikä vääntöjä mihinkään suuntaan tapahdu. Kuviosta 9 nähdään mittauksen suoritus, jossa anturi suorassa vetoon nähden sekä 90° kulmassa suhteessa testattavaan kappaleeseen verrattuna. Taulukossa 3 nähdään kootusti tutkimuksessa esiintyviä virheitä sekä kokonaisvirhe, joka on laskettu osavirheiden toisen potenssin neliöjuurella.

Taulukko 3. Virheanalyysi.

Materiaaliparit	Massa (kg)	Vetojen ka. (N)	Massa ($\pm 10N$)	Voima-anturi ($\pm 200N$)	Kokonaisvirhe (N)
Vaneri-Sellu Vienti	2000	6835,71	10	200	200,2
Sellu-Sellu Kotimaa	1000	6008,17	10	200	200,2
Vaneri-Sellu Kotimaa poikittain	2000	9728,33	10	200	200,2
Vaneri-Sellu Kotimaa pitkittäin	2000	9750,50	10	200	200,2
Vaneri-Kart. Normaali pääty	1351	7178,33	10	200	200,2
Vaneri-Kart. GU-pääty	2395	11496,00	10	200	200,2
Kartonki-Kartonki Normaaliit päädyt	1361	7801,50	10	200	200,2
Kartonki GU-Kartonki GU	1622	9612,00	10	200	200,2
Alumiini-Sellu Vienti poikittain	2000	9195,67	10	200	200,2
Alumiini-Sellu Vienti pitkittäin	2000	9057,33	10	200	200,2
Alumiini-Sellu Kotimaa poikittain	2000	10448,00	10	200	200,2
Alumiini-Sellu Kotimaa pitkittäin	2000	9561,67	10	200	200,2
Alumiini-Kartonki GU pitkittäin	2389	10876,33	10	200	200,2
Alumiini-Kartonki GU poikittain	2389	10937,67	10	200	200,2
Alumiini-Kartonki normaali p. pitkittäin	1361	6355,33	10	200	200,2
Alumiini-Kartonki normaali p. poikittain	1361	6700,33	10	200	200,2
Vaneri-Kartonki kitkamatolla norm. P.	1361	8973,67	10	200	200,2
Vaneri-Kartonki Haklift kitkam. X2	1361	7457,33	10	200	200,2
Vaneri-Kartonki Haklift kitkam. X3	1361	7571,67	10	200	200,2
Kitkavaneri-Kartonki norm. pääty	1361	11008,33	10	200	200,2

Vetonopeuden vaikutus tutkimuksen tuloksiin jää osittain tulkinnan varaiseksi. Sitä on lähes mahdoton määrittää tarkasti, mutta jonkin verran satunnaisvirhettä epäilemättä esiintyi, varsinkin vedon nopeudessa. Dewesoft-mittausohjelmiston tekemät tallennukset vedon voimista, sekä voimakäyrän kasvusta osoittavat kuitenkin, että vedot ovat olleet melko tasaisia ja hyvin samankaltaisia

lähes joka suoritus kerralla. Kuviossa 32 näkyy neljä esimerkki käyrää testausvedoista normaalipakauksisen kartonkirullan sekä vanerisen kuormatilapohjan osalta. Käyrät nousevat ajallisesti samankaltaisesti ja ovat myös nousuvoimakkuudeltaan suhteellisen samanmallisia. Myös testi kapaleen liikkeelle lähdön suhteen voimat ovat suuruudeltaan hyvin lähellä toisiaan. Suhteellinen virhe kitkakertoimella tällä materiaaliparilla oli noin 0,5 %.



Kuvio 32. Käyrä voiman kasvun suhteen.

Toimeksiantajan Imatran tehtaan mukaan kartonkirullien painon mittalaitteiden vakaus suoritetaan joka kolmas vuosi, sekä oma tarkistus jokaisen kuukauden ensimmäinen keskiviikko. Tämä antaa mittalaitteille 0,1 kg virhemarginaalin. (Ronkonen 2024) Esimerkiksi 1361 kg kartonkirullassa tämä tarkoittaa 0,007 % suhteellista virhettä ainoastaan rullan massan suhteen. Koska rullien massat ilmoitetaan kilogramman tarkkuudella, se kuitenkin on syytä huomioida kokonaisvirheen arvioinnissa. Liitettäessä massa kitkakertoimen määrittävään laskennalliseen kaavaan, merkitys pienee edelleen. Taulukossa 3 kuitenkin nähdään, että tutkimuksen kannalta kyseessä on hyvin pieni virheen osuus kokonaisuudesta. Taulukossa 4 on laskettu kokonaisvirheen mahdollinen vaikutus kitkakertoimeen.

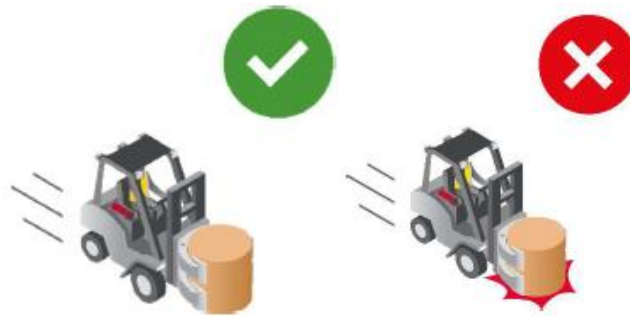
Materiaalien kulumisen osalta tutkimuksessa oli myös hieman vaikea tilanne. Silmämääräisesti ja tulosten perusteella on mahdoton sanoa kulumisen aiheuttaneen mitään vaikutuksia, ainakaan kartonkirullien osalta. Myös pakkaamattoman sellun kohdalla kitkakertoimien suhteellinen virhe vetovoiman perusteella pysyi kohtuullisena noin kahdessa prosentissa vaneripohjalla sekä alumiinipohjalla vieläkin pienempänä. Sellu pakkaamattoman yksikön osalta virheen analysointi on kuitenkin hyvin vaikea pinnan muodon rikkonaisuuden vuoksi. Tässä yhteydessä on myös syytä huomioida, että sellujen kotimaan yksiköiden muoto vaihtelee pinnan tasolla lähes yksilöllisesti. Etenkin edellä mainittujen sellujen pakkausten keskinäisen kitkan mittaus on kyseenalainen ja jättää tulokset lähinnä viitteellisiksi.

Taulukko 4. Kokonaisvirheen vaikutus kitkakertoimeen.

Materiaaliparit	Massa (kg)	Vetojen ka. (N)	Kitkakertoimet	Kokonaisvirhe (N)	Vaikutus kertoimeen
Vaneri-Sellu Vienti	2000	6835,71	0,32	200,2	0,0100
Sellu-Sellu Kotimaa	1000	6008,17	0,56	200,2	0,0200
Vaneri-Sellu Kotimaa poikittain	2000	9728,33	0,45	200,2	0,0100
Vaneri-Sellu Kotimaa pitkittäin	2000	9750,50	0,45	200,2	0,0100
Vaneri-Kart. Normaali pääty	1351	7178,33	0,49	200,2	0,0148
Vaneri-Kart. GU-pääty	2395	11496,00	0,44	200,2	0,0084
Kartonki-Kartonki Normaalit päädyt	1361	7801,50	0,53	200,2	0,0147
Kartonki GU-Kartonki GU	1622	9612,00	0,55	200,2	0,0123
Alumiini-Sellu Vienti poikittain	2000	9195,67	0,43	200,2	0,0100
Alumiini-Sellu Vienti pitkittäin	2000	9057,33	0,42	200,2	0,0100
Alumiini-Sellu Kotimaa poikittain	2000	10448,00	0,48	200,2	0,0100
Alumiini-Sellu Kotimaa pitkittäin	2000	9561,67	0,44	200,2	0,0100
Alumiini-Kartonki GU pitkittäin	2389	10876,33	0,42	200,2	0,0084
Alumiini-Kartonki GU poikittain	2389	10937,67	0,42	200,2	0,0084
Alumiini-Kartonki normaali p. pitkittäin	1361	6355,33	0,43	200,2	0,0147
Alumiini-Kartonki normaali p. poikittain	1361	6700,33	0,46	200,2	0,0147
Vaneri-Kartonki kitkamatolla norm. P.	1361	8973,67	0,61	200,2	0,0147
Vaneri-Kartonki Haklift kitkam. X2	1361	7457,33	0,51	200,2	0,0147
Vaneri-Kartonki Haklift kitkam. X3	1361	7571,67	0,51	200,2	0,0147
Kitkavaneri-Kartonki norm. pääty	1361	11008,33	0,75	200,2	0,0147

Mikroskooppinen kuluminen pinnoissa on äärimmäisen pientä ja vaikutus tutkimuksen tuloksiin on mitätöntä. Myös kulumisen matemaattinen laskeminen on haasteellista eikä myöskään yksiselitteistä. (Haataja 2021, 14–16.) SFS:n standardissa vetokokeiden järjestelyjen osalta mainitaan, että materiaali olisi asetettava uudestaan jokaista mittauksista varten. Tätä vaatimusta mittauksissa ei kuitenkaan kyetty käytännön syistä toteuttamaan. (SFS-EN 12195-1, 37.) Toisaalta materiaalien on kuljetuksissa ja varastoinnissa pysyttävä ehjänä ja niitä ei liikuteta muutoin kuin nostamalla. (Kuvio

33) Tämän vuoksi pakkaukset ovat pääsääntöisesti aina käytännön tilanteissa uutta vastaavassa kunnossa, joten yleisesti kulumisen huomioiminen on kitkan kannalta merkityksetöntä.



Kuvio 33. Rullien käsittely. (Stora Enso Cargo Handling and Securing Manual, 19.)

4 Pohdinta

Opinnäytetyön perimmäinen tarkoitus oli määrittää uusia kitkakertoimia ennestään tutkimattomille materiaalipareille. Tutkimustilanteen olosuhteisiin nähden siinä onnistuttiin hyvin. Lähtökohdiana oli mitata voima, jolla mitattava kappale lähtee liikkeelle alustallaan, jonka jälkeen voitiin laskea kyseisille materiaalipareille kitkakerroin. Testiolosuhteet eivät vastanneet laboratorioolosuhteita, mutta olivatkin varsin lähellä todellisia kuljetusolosuhteita ja koko tutkimuksen ajan hyvin samankaltaiset ja tasaiset. Tämä oli toisaalta testien vahvuus, mutta toisaalta myös tiettyssä mielessä heikkous. Saadut tulokset olivat standardin mukaisesti tehty useista riippumattomista vedoista, joista ääripään tulokset hylättiin. Saatu tulos kerrottiin myös varmuuskertoimella 0,925, joka osaltaan antaa tuloksiin luotettavuutta. Uusien kitkakertoimien vertaaminen jo aikaisemmin luotuihin kertoimiin antaa osaltaan indikaation niiden luotettavuudesta.

Vetojen voimien keskihajonta oli testeissä varsin maltillinen, ja niistä aiheutuvat virheet olivat muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta hyvin pieniä. Myös tämä antaa osaltaan luotettavuutta testien tuloksiin. Hieman kyseenalaiseksi tilanteessa jäi pyöräkuormaajan kääntökehällä suoritettun vedon nopeus. Testausohjelmiston tallentamien mittauskäyrien perusteella ne olivat kohtuullisen luotettavia, mutta standardin mukaista 100 mm/min vetonopeutta ei pystytty todentamaan. Osaltaan myös alustan kunnan vaikutus sekä materiaalien kulumisen vaikutus jäi avoimeksi, vaikkakin kulumisella tuskin oli merkittävää vaikutusta tuloksiin. Kulumisen vaikutuksen tutkiminen voisi olla tarpeellinen jatkotutkimuksen kohde kuljetuksissa.

Testitulosten vaikutukset toimeksiantajan sidontaohjeisiin olivat jokseenkin merkityksettömät käytännön kannalta. Uudet kertoimet antavat laskennallista pohjaa ja luotettavuutta jo aikaisemmin määritellyille sidontaohjeille, mutta käytännössä eivät muuta niitä. Esimerkiksi Tieliikennelain vaatimus kuorman liikkumattomuuden varmistamisesta antaa ehdon, jota kitka ei yksin voi korvata. Edellä mainitun takia siis tarvitaan edelleen sidontaa, tuentaa, lukitsemista tai niiden yhdistelmiä. Kitkakertoimien selvittämisellä on positiivisia vaikutuksiakin. Ne antavat selvyden laskennalliselle pohjalle, jota voivat käyttää eri osapuolet tuotteiden kuljetusten ympärillä. Tutkimus jättää edelleen varaa myös lisälaskelmille sekä jatkotutkimukselle aiheen parissa.

Kuormien varmistamiseen liittyy useita keinoja. Monesti niihin liittyy myös käytännön kannalta riskitöitä tilanteita, jolloin varmistamisen kannalta parasta keinoa ei aina kyetä toteuttamaan. Standardeissa EN 12642 XL ja EN 12642 L luokiteltujen etuseinien osalta, niiden optimaalisen hyväksikäytön esteeksi tulee yleensä ajoneuvon akselipainojen ylittyminen. Kuormaa yksinkertaisesti ei kyetä sijoittamaan ajoneuvon siten, että se olisi tuennan kannalta parhaassa mahdollisessa paikassa. Tällöin joudutaan tekemään kompromisseja, jotka usein lisäävät sidonnan tarvetta ja aiheuttavat epäselvyyksiä säännösten tulkinnassa. Tällaisten tilanteiden varalta tutkimus jättää edelleen auki asioita, joihin olisi hyvä perehtyä yhteistyössä viranomaisten kanssa.

Käytännön tasolla kuormanvarmistus on edelleen etupäässä kuljettajan ammattitaidon ja motivaation tuotos. Lait antavat velvoittavan ohjeen, mutta toteutus on kuljettajan ja lähettäjän vastuulla. Tällä opinnäytetyöllä on tässä tilanteessa avustava rooli ohjeistuksien ja valvonnan työkaluna. Kaiken aiheen ympärillä pyörivän toiminnan tarkoituksena on kuitenkin turvallinen ja lainmukainen maantiekuljetus.

Lähteet

Tietoa meistä. Imatran tehtaat. 2024. Stora Enso Oyj. <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-stora-enso/stora-enso-locations/imatra-mill>. Viitattu 28.3.2024.

Suvanto, K. 2008. Tekniikan fysiikka 1. 1.–3. painos. Helsinki: Edita Publishing Oy.

Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen, P. 1997. Tribologia – Kitka, kuluminen ja voitelu. 2. korjattu painos. Helsinki: Hakapaino.

SFS EN-12195-1. 2010. Maantieajoneuvojen kuormanvarmistus. Turvallisuus. Osa 1: Kiinnitysvaihtojen laskenta. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Tieliikennelaki 10.8.2018/729. Viitattu 27.12.2023.

Traficom määräys 149639/03.04.03.00/2019. 2021. Viitattu 27.12.2023.

Haataja, S. 2021. Kitka kemian ilmiönä ja kitkailmiön hyödyntäminen lukion kemian opetuksessa. Joensuu: Itä-Suomen yliopisto.

Euroopan komissio. Eurooppalaisia parhaita toimintatapoja koskevat suuntaviivat 2014. Kuorman varmistaminen tieliikenteessä. 2014. https://www.logy.fi/media/liitetiedostot/lastiturvallisuus/eu_bpg_fi.pdf. Viitattu 26.2.2024.

Scmitz-Cargobull. 2024. Turvallisuus pähkinäkuoressa. <https://www.cargobull.com/fi/tuotteet/semi-remorques-bachees/sattelcurtainsider/power-curtain#Turvallisuus>. Viitattu 14.5.2024.

Ilmatieteenlaitos. 2024. Havaintojen lataus. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>. Viitattu 28.3.2024.

Stora Enso Oyj. Cargo Handling and Securing Manual. 2020. 2. painos. Viitattu 26.2.2024.

Ronkonen, V. Logistiikkainsinööri. Stora Enso Oyj, Imatran tehtaat. Haastattelu 6.3.2024.

Liitteet

Liite 1. Kitkakertoimia

Kosketuspinnan materiaaliyhdistelmät	Kitkakerroin μ
Sahatavara	
Sahatavara – kertopuu/vaneri	0,45
Sahatavara – rihlattu alumiini	0,4
Sahatavara – kutistekalvo	0,3
Sahatavara – ruostumaton teräslevy	0,3
Höylätty puu	
Höylätty puu – kertopuu/vaneri	0,3
Höylätty puu – rihlattu alumiini	0,25
Höylätty puu – ruostumaton teräslevy	0,2
Muovipalletti	
Muovipalletti – kertopuu/vaneri	0,2
Muovipalletti – rihlattu alumiini	0,15
Muovipalletti – ruostumaton teräslevy	0,15
Teräs ja metalli	
Teräshäkki, teräsarkku – kertopuu/vaneri	0,45
Teräspakkaus – rihlattu alumiini	0,3
Teräspakkaus – ruostumaton teräslevy	0,2
Betoni	
Karkea betoni – sahapuinen aluspuu	0,7
Sileä betoni – sahapuinen aluspuu	0,55
Liukuestematto	
Kumi	0,6

Jos kontaktipinnat eivät ole puhtaana öljystä, rasvasta, lumesta, jäädä tai muusta vastaavasta liasta, ei saa käyttää kitkakerrointa, joka on suurempi kuin 0,2. Yli 0,6:n kitkakerrointa saa käyttää vain, jos se on vahvistettu standardin EN 12195-1:2010 mukaisella koetodistuksella.

Liite 2. Mittauspöytäkirja

Materiaaliparit	Paino (N)	Veto 1 (N)	Veto 2 (N)	Veto 3 (N)	Veto 4 (N)	Veto 5 (N)	Veto 6 (N)	Keskihajonta	Vetojen ka. (N)	Kitkakertoimien ka.	Kitkakertoimien ka.
Vaneri-Sellu Vienti	20000	7481	7199	7118	6916	6988	7190	341,39	6835,7143	0,3162	0,3418
Vaneri-Sellu Vienti (puhd. jälkeen)	20000	5721	6531	6454	6220	6370					
Sellu-Sellu Kotimaa	10000	7177	6207	5904	5970	5898		128,18	6008,1667	0,5558	0,6008
Sellu-Sellu Kotim. (siirron jälk.)	10000	7073	6149	5973	5852	5800					
Vaneri-Sellu Kotimaa poikittain	20000	9686	9803	9815	9476	9696		52,95	9728,3333	0,4499	0,4864
Vaneri-Sellu Kotimaa pitkittäin	20000	10577	9755	10010	9707	9530	9390	171,66	9750,5000	0,4510	0,4875
Vaneri-Kart. Normaali pääty	13510	7584	7163	7146	7226	7123		34,41	7178,3333	0,4915	0,5313
Vaneri-Kart. GU-pääty	23950	14279	12346	12121	11952	11888		653,91	11496,0000	0,4440	0,4800
Vaneri-Kart. GU-pääty (puhd. Jälkeen)	23950	10760	10820	10924	10864	10873					
Kartonki-Kartonki Normaaliit päädyt	13610	8167	8353	8092	7829	7733		250,69	7801,5000	0,5302	0,5732
Kartonki-Kartonki Norm. p. (siivouksen jä)	13610	7958	7597	7592	7532	7521					
Kartonki GU-Kartonki GU	16220	9142	9982	9690	9627	9519		70,61	9612,0000	0,5482	0,5926
Alumiini-Sellu Vienti poikittain	20000	9161	9264	9342	9162	8670		48,32	9195,6667	0,4253	0,4598
Alumiini-Sellu Vienti pitkittäin	20000	7826	8735	9135	9302	9409		237,90	9057,3333	0,4189	0,4529
Alumiini-Sellu Kotimaa poikittain	20000	12377	10521	10446	10352	10377		58,80	10448,0000	0,4832	0,5224
Alumiini-Sellu Kotimaa pitkittäin	20000	9788	9624	9505	9518	9543		45,24	9561,6667	0,4422	0,4781
Alumiini-Kartonki GU pitkittäin	23890	11999	10996	10812	10821	10769		84,70	10876,3333	0,4211	0,4553
Alumiini-Kartonki GU poikittain	23890	12096	11129	10941	10743	10567		157,60	10937,6667	0,4235	0,4578
Alumiini-Kartonki normaali p. pitkittäin	13610	6448	6327	6336	6355	6375		15,92	6355,3333	0,4319	0,4670
Alumiini-Kartonki normaali p. poikittain	13610	6686	6741	6678	6692	6723		16,21	6700,3333	0,4554	0,4923
Vaneri-Kartonki kitkamatolla norm. P.	13610	9401	9113	8822	8986	8797		119,12	8973,6667	0,6099	0,6593
Vaneri-Kartonki GU extra	23890	11103	9156	8865	9041	8939		88,64	9045,3333	0,3502	0,3786
Vaneri-Kartonki Haklift kitkam. X2	13610	8450	7511	7485	7376	7248		58,48	7457,3333	0,5068	0,5479
Vaneri-Kartonki Haklift kitkam. X3	13610	7594	7660	7601	7520	7516		36,65	7571,6667	0,5146	0,5563
Kitkavaneri-Kartonki norm. pääty	13610	10991	11132	11089	10945	10882		60,05	11008,3333	0,7482	0,8088

Liite 3. Mittausohjelmiston mallikuvat.

