

Petteri Pakkanen

RAIDELIIKENTEEN AIHEUTTAMA STAATTINEN KUORMAVAIKUTUS SIL- TARAKENTEISIIN

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Huhtikuu 2019

TIIVISTELMÄ

PETTERI PAKKANEN: Raideliikenteen aiheuttama staattinen kuormavaikutus siltarakenteisiin

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 141 sivua, 42 liitesivua

Huhtikuu 2019

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen

Avainsanat: raideliikenne, kuorma, stokastinen, Monte-Carlo simulaatio, silta

Suunnittelussa raideliikenteen kuormavaikutukset silloille lasketaan eurokoodin standardin SFS-EN 1991-2 mukaan. Standardissa esitetään kuormakaavioita, joista LM71-kaavioita tulee käyttää aina ja muita kaavioita tapauskohtaisesti. Kaavioiden lisäksi kuormavaikutukseen vaikuttaa kaaviossa käytettävien kuormien luokittelukerroin α , joka on valittu kussakin eurokoodien vaikutuspiirissä olevassa maassa kansallisesti. Suomessa α :n arvoksi on valittu 1,46. Se on suurin standardissa esitetty luokka, joka vastaa junaa, jonka akselimassat ovat 35 tonnia. Suomen rataverkon suurin sallittu akselimassa on kuitenkin tällä hetkellä 25 tonnia, joten paikallisten kuormavaikutusten lähempi tarkastelu oli tämän perusteella tarpeellista.

Työssä tutkittiin Suomen raideliikenteen staattista kuormavaikutusta vertaamalla sitä LM71-kaavion vaikutuksiin. Dynaamisen suurennuskertoimen tasoon ei siis tässä otettu kantaa. Paikallisia kuormavaikutuksia arvioitiin stokastisen simulaatiotyökalun avulla, jolla muodostettiin todellisen kaltaisia tilastollisiin jakaumiin perustuvia tavarajunia. Henkilöliikenteen junia ei otettu tutkimukseen mukaan, koska oli selvää, ettei niiden kuormavaikutus staattisessa tapauksessa ole määräävä. Junien muodostuksen perustana olleet jakaumat saatiin rataverkolla sijaitsevien pyörävoimailmaisimien ja RFID-lukijoiden vuoden aikana keräämän datan perusteella. Pyörävoimailmaisimia on eri puolilla rataverkkoa ja jokainen mittauspiste simuloitiin erikseen, koska raideliikenteessä on paikallisia eroja myös Suomen sisällä. Simulaation lopussa jokaisen junan aiheuttamat kuormavaikutusten ääriarvot tallennettiin. Yksittäisiä junia muodostettiin kullakin mittauspisteellä 10 vuoden liikennettä vastaava määrä, sillä oletuksella, että liikennemäärä on sama jokaisena vuonna. Tulosten jälkikäsitelyssä ääriarvojakaumat muodostettiin lopulta kuu-kauden aikana ääriarvon tuottaneiden junien kuormavaikutuksista ja saatuihin jakaumiin sovitettiin ääriarvojakaumista Gumbel- sekä Weibull-jakaumat, joista luetaan 100 vuoden toistumiskuormavaikutusten arvot. Lisäksi yksittäisten tulosten jakaumia testattiin tarkemmin ja niihin sovitettiin myös yleistettyä ääriarvojakaumaa (GEV-jakaumaa).

Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella raideliikenteen staattinen kuormavaikutus on hyvin lähellä kuormakaavioiden LM71 ja SW/0 kuormavaikutuksia luokittelukertoimella $\alpha=1,1$. Luokittelukertoimella 1,1 kerrottuna kuormakaaviot vastaavat junaa, jonka sallitut akselimassat ovat 25 tonnia. Muutamassa tutkitussa tapauksessa $\alpha=1,1$ luokittelu ei kuitenkaan aivan riitä. Tulokset ovat siis odotettuja, mutta suoraan akselimassan perusteella tehtävä luokittelu osoittautui Suomen liikenteellä hieman epävarmaksi. Mahdolliseen luokittelukertoimen muutokseen tarvitaan vielä lisätutkimuksia.

ABSTRACT

PETTERI PAKKANEN: Static load effects caused by the rail traffic on bridge structures

Tampere University

Master of Science Thesis, 141 pages, 42 Appendix pages

April 2019

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural design

Examiner: Professor Anssi Laaksonen

Keywords: rail traffic, load, stochastic, Monte-Carlo simulation, bridge

In the structural design the load effects of the rail traffic on bridges are calculated according to the Eurocode standard SFS EN 1991-2. The load schemes are presented in the standard, of which the LM71 has to be always used, but the other schemes are used depending on the case. In addition, the schemes show a classification coefficient α , which has been nationally chosen in each country that are in the Eurocode's sphere of influence. In Finland, α has a value 1,46. It is the biggest class presented in the standard that corresponds the train with the axle mass of 35 tons. As the heaviest allowed axle mass on Finland's track network is currently 25 tons, a closer examination of the local road effects was necessary to know if the value of α is unnecessarily large.

In the thesis, the static load effect of Finland's rail traffic was studied by comparing it with the effects of the LM71-scheme. The level of the dynamic factor ϕ a stand was then not included in this study. The local load effects were estimated with stochastic simulation tool, with which realistic freight trains based on statistical distributions were generated. Passenger trains were thus not included in the study as their load effect in a static case was not a determining factor. The generation of the trains was based on the distributions that were obtained during one year, based on the data collected by the wheel impact detectors and RFID-readers in different measuring points. As these points are located on different parts of the track network and the network has local differences, every measuring point was simulated separately. At the end of the simulation, the extreme values of the load effects of every train were saved. Single trains were generated at each measuring point to correspond the traffic of ten years, with the assumption that the volume of train traffic remains stable each year. In the post-processing of the results, the extreme value distributions were eventually formed according to the load effects of the trains that produced the extreme values during one month. Then, the Gumbel- and Weibull -distributions, from which the values of load effect for the 100 year return period are read, were fitted to the empirical distributions. Furthermore, the distributions of few single results were tested in more detail to which a generalized extreme value distribution (the GEV distribution) was fitted.

On the basis of the results obtained in the study, the static load effects of the rail traffic is near the load effects caused by the schemes LM71 and SW/0 with classification coefficient $\alpha=1,1$. With the coefficient 1,1 the load schemes correspond trains with the axle mass of 25 tons. However, in a few examined cases $\alpha=1,1$ is not quite enough. These results are thus expected, but the classification based on the allowed axle mass has uncertainties with regard to the rail traffic in Finland. Further examination is therefore needed before the possible alteration to the classification coefficient.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen yliopiston rakennustekniikan laitoksella. Työ on myös osa suurempaa EU:n ja yritysten rahoittamaa Shift2Rail-hanketta, jonka missiona on edistää raideliikenteen ylläpitokustannusten puolittamista, kapasiteetin tuplaamista ja luotettavuuden ja täsmällisyyden lisäämistä puolella. Työn tilaajana on toiminut Väylävirasto, joka on yksi Shift2Rail-hankkeen jäsenistä.

Työn ohjauksesta ja tarkastuksesta Tampereen yliopistossa ovat vastanneet professori Anssi Laaksonen sekä tohtorikoulutettava Olli Asp. Väylävirastosta työtä ovat olleet ohjaamassa Tuomas Kaira, Heikki Lilja, Panu Tolla sekä Timo Tirkkonen. Haluan kiittää koko ohjausryhmää siitä, että olette vieneet työtäni oikeaan suuntaan, mutta antaneet myös tehdä omia valintoja työn suhteen. Kiitos myös kaikista arvokkaista tiedonjyvistä, jotka ovat johdattaneet asioiden tarkempaan tutkimiseen ja oivallusten syntyymiseen.

Lisäksi haluan kiittää kalustoon liittyvissä kysymyksissä auttaneita Mika Frilanderia ja Simo Toikkasta Väylävirastosta ja Juha Mälkiää VR Transpointista. sekä projektiin lähtötietodataa toimittanutta Topi Pohjosahoa Solita Oy:stä. Kiitos myös koko Tampereen yliopiston Betoni- ja siltarakenteiden tutkimusryhmälle rennosta ja hyvästä ilmapiiristä, jossa on ollut hyvä tehdä kovaa keskittymistä vaativaa työtä. Kiitettävien listalle kuuluvat myös Sweco Rakenneteknikka Oy:stä yksikön päällikkö Sami Noponen, jonka kautta sain ensimmäisenä vihjeen tästä työstä sekä osastopäällikkö Mauri Kuvaja, joka myös osaltaan rohkaisi tarttumaan tähän haastavaan työhön ja mahdollisti työskentelyni myös yliopistolla.

Suurin kiitos kuuluu tietenkin perheelle ja ystäville. Te olette kannustaneet aina eteenpäin ja teidän seurassa on saanut unohtaa työkiireet ja ladata akut aina seuraavaa rutistusta varten.

Tampereella, 27.4.2019

Petteri Pakkanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	2
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	2
1.3	Tutkimuksen rajaukset	3
1.4	Tutkimusmenetelmät ja tuotokset	4
2.	YLEISTÄ SUOMEN RATAYMPÄRISTÖSTÄ.....	6
2.1	Suomen rataverkko.....	6
2.1.1	Rataverkon kehittyminen tulevaisuudessa	8
2.1.2	Rataverkon paikalliset erityispiirteet	10
2.2	Suomen rataverkossa liikennöivä kalusto	10
2.2.1	Tavaraliikenteen kalusto	11
2.2.2	Henkilöliikenteen kalusto	14
2.2.3	Yliraskaat vaunut	15
2.3	Rautatiesillat Suomessa.....	16
2.3.1	Rautatiesiltojen kehitys	18
2.3.2	Rautatiesiltojen kunto nyt ja tulevaisuudessa	24
3.	RADAN KUORMITUSTA MITTAAVA JÄRJESTELMÄ.....	27
3.1	Pyörävoimailmaisimet.....	27
3.2	Kaluston tunnistava RFID-järjestelmä	28
3.3	Mittauspisteiden sijainti	29
4.	RAIDELIIKENTEEN KUORMA-VAIKUTUKSET	31
4.1	Kuormituksen ja kuormitusohjeiden kehittyminen	31
4.2	LM71-kuormakaaviosta	37
4.3	Kiskoliikennestandardista EN 15528	41
5.	LÄHTÖTIETOJEN ESITTELYT.....	44
5.1	Raideliikenteestä hankittu mittausdata.....	44
5.1.1	Liikennemäärät.....	45
5.1.2	Kokonaismassa- ja vaunumääräjakaumat	47
5.1.3	Vaunutyypin jakauma	49
5.1.4	Akselimassajakaumat eri vaunutyypeille.....	51
5.1.5	Suurimmat akselimassat.....	53
5.1.6	Vaunutyypin peräkkäisyys	55
5.2	Vaunukokoonpanojen systemaattisuus ja epäsystemaattisuus.....	57
6.	STOKASTISEN KUORMAN MÄÄRITYKSEN MATEMAATTISIA PERUSTEITA.....	58
6.1	Todennäköisyysmatematiikan käsitteitä ja menetelmiä.....	58
6.1.1	Joukko-oppi, todennäköisyyden aksiomat ja Boolean algebra	59
6.1.2	Suhteellinen frekvenssi	61
6.1.3	Klassinen ja tilastollinen todennäköisyys	62
6.1.4	Stokastinen muuttuja ja kertymäfunktio	63

6.2	Tilastomatematiikan käsitteitä ja menetelmiä	68
6.2.1	Satunnaisotantaan liittyviä suureita	68
6.2.2	Ääriarvoteoriasta	69
6.2.3	Tyypin I ääriarvojakauma (Gumbel).....	71
6.2.4	Tyypin III ääriarvojakauma (Weibull).....	73
6.2.5	Yleistetty ääriarvojakauma (GEV).....	75
6.2.6	Jakauman testaus.....	77
7.	RAIDELIIKENTEEN KUORMA-VAIKUTUSTEN SIMULOINTI.....	83
7.1	Monte Carlo-simulaatio ja sen osa-alueet	83
7.1.1	Pseudosatunnaislukugeneraattori	84
7.1.2	Satunnaismuuttujien kertymäfunktiot ja jakaumien generointi	85
7.2	Simulaatiolla tarkasteltavat ilmiöt ja simulaation kulku	86
7.3	Vaikutusviivat	88
7.4	Simulaation tulokset.....	90
7.4.1	Kuormavaikutusten todennäköisyyksien lukeminen ekstrapoloituista jakaumista	91
7.4.2	Vertailua simulaation tulosten ekstrapoloinnista Gumbel- ja Weibull-jakaumilla.....	93
7.4.3	Simulaation tulosten vertailu mittauspisteittäin.....	113
7.4.4	Vertailu LM71-kuormakaavion antamiin kuormavaikutuksiin ...	122
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	133
8.1	Yhteenveto ja päätelmät	133
8.2	Jatkotutkimustarpeet.....	134
	LÄHTEET.....	136

LIITE 1: SIMULAATIOISSA KÄYTETTYJEN VETUREIDEN JA VAUNUJEN KAAVIOKUVAT

LIITE 2: RAUTATIESILTOJEN JAKAUMAT RAKENNUSMATERIAALIN JA KOKONAISPITUUDEN MUKAAN VUOSIKYMMENITTÄIN

LIITE 3: TUTKITUT VAIKUTUSVIIVAT

LIITE 4: KUORMA-VAIKUTUKSET VERRATTUNA LM71 JA SW/0 KUORMA-
KAAVIOIHIN TAULUKKOMUODOSSA

LIITE 5: KUORMA-VAIKUTUKSET VERRATTUNA LM71 JA SW/0 KUORMA-
KAAVIOIHIN VIIVAKAAVIOINA

LIITE 6: SIMULOITUJEN ÄÄRIARVOJAKAUMIEN TILASTOLLISIA PARAMETREJA

LYHENTEET JA MERKINNÄT

D4, E4	Rautatieinfran ja -kaluston luokittelussa käytettäviä luokkia
ERRI	European Rail Research Institute, Euroopan rautateiden tutkimuslaitos
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
LM2000	Load Model 2000, ERRI:n laatima raideliikenteen kuormakaavio, jota ei ole otettu käyttöön
LM71	Load Model 71, UIC:n vuonna 1971 kehittämä raideliikenteen kuormakaavio normaalille liikenteelle
RFID	Radio frequency identification, radiotaajuinen etätunnistus
SW/0	Raideliikenteen kuormakaavio normaalille liikenteelle, jota käytetään jatkuvilla silloilla LM71:n lisäksi
SW/2	Raideliikenteen kuormakaavio raskaalle liikenteelle, käytetään tapauskohtaisesti
UIC	Union Internationale des Chemins de fer, Kansainvälinen rautatiejärjestö
a	Edellisen satunnaisluvun kerroin lineaarisessa kongruenssissa
c	Kertomaan lisättävä arvo lineaarisessa kongruenssissa
c_n, d_n	Otosmaksimin lineaarisen muunnoksen jakauman lokaation ja skaalan stabiloivat vakioiden jonot
e	Neperin luku
f	Satunnaismuuttujan tiheysfunktio
F	Satunnaismuuttujan kertymäfunktio
H	Ei-degeneroitunut jakaumafunktio
m	Modulo lineaarisessa kongruenssissa
M	Taivutusmomentti
n	Havaintojen lukumäärä otoksessa
Pr, p	Tapahtuman todennäköisyys
Q_k	ERRI:n tutkimuksessa käytetty termi raideliikenteen ominaiskuormalle
r	Otosvaihteluväli
R	Referenssiajanjakso
s	Otoskeskihajonta
s^2	Otosvarianssi
S	Otosavaruus
T	Diskreetin kertymäfunktion arvo
T_R	Keskimääräinen toistumisjakso
u	Muotoparametri Gumbel-jakaumassa
V	Variaatiokerroin
x	Funktion muuttuja, jatkuvan kertymäfunktion käänteisfunktion arvo
\bar{x}	Otoskeskiarvo
x_f	Jakauman päätepiste
x_i	Yksittäinen havaintoarvo otoksessa
x_{max}, x_{min}	Otosmaksimi ja -minimi
X_i	Yksittäinen riippumaton ei-degeneroitunut satunnaismuuttuja

X_0	Siemenluku lineaarisessa kongruenssissa
α	Kuormakaavioissa LM71 ja SW/0 käytettävä luokittelukerroin, muotoparametri Weibull-jakaumassa
β	Skaalaparametri Weibull-jakaumassa
γ	Eulerin-Macheronin vakio
μ	Otoskeskiarvo, paikkaparametri Gumbel- ja GEV-jakaumissa
ξ	Muotoparametri GEV-jakaumassa
σ	Skaalaparametri Gumbel- ja GEV-jakaumissa
$\Lambda(x)$	Standardimuotoinen Gumbel-funktio
$\Phi_\alpha(x)$	Standardimuotoinen Fréchet-funktio
ψ_α	Standardimuotoinen Weibull-funktio

TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

Bruttotonni	Junan veturien ja vaunujen yhteinen bruttopaino tonneina
Deterministinen simulaatio	Simulaatio, jossa alkutila määrää lopputilan
Dynaaminen suurennuskerroin	Huomio jännitysten dynaamisen suurennusvaikutuksen ja värähtelyn vaikutuksen rakenteessa, ei huomioi resonanssivaikutusta
Ei-degeneroitunut satunnaismuuttuja	Satunnaismuuttuja, jonka jakauma ei ole keskittynyt yhteen pisteeseen
FinEst-link	Helsingin ja Tallinnan välistä liikkumista kehittävä virkamiesvetoinen projekti. Tässä yhteydessä tarkoitetaan lähinnä Helsinki-Tallinna rautatietunnelia
Fréchet-jakauma	Päätepisteetön paksuhäntäinen ääriarvojakauma, jonka tiheys laskee polynomisesti
GEV-jakauma	Yhdistää kolme klassisen ääriarvoteorian jakaumaa yhdeksi jakaumaperheeksi. Muotoparametri kertoo, mihin ääriarvojakaumaan otos kuuluu
Gumbel-jakauma	Päätepisteetön ohut- tai keskipaksuhäntäinen ääriarvojakauma, jonka tiheys laskee eksponentiaalisesti. Toimii myös minimiääriarvoille
Jäämeren rata	Suomesta Norjan kautta Jäämerelle selvitetty ratayhteys
Kvantiili	Leikkauspiste, joka jakaa todennäköisyysjakauman yhtä todennäköisiin osiin. Enimmillään kvantiileja voi olla yksi vähemmän kuin hvain-toja
MathCad	PTC:n tekniseen laskentaan tarkoitettu tietokoneohjelma
Matlab	The MathWorks:n numeerisen laskennan tietokoneohjelma ja ohjelmassa käytettävä ohjelmointikieli
Monte Carlo-simulaatio	Ks. Stokastinen simulaatio
Müller-Breslaun menetelmä	Menetelmä influenssiviivojen määrittämiseen

Päällysrakenneluokka	Jokaisella radalla on päällysrakenneluokka, johon vaikuttaa kiskojen, ratapölkkyjen ja tukikerroksen laatu
Rail Baltica	Baltian maiden, Puolan sekä epäsuorasti myös Suomen yhteinen ratahanke, jonka tavoitteena on yhdistää alueen rataverkko osaksi koko Euroopan rataverkkoa
Staatinn kuormavaikutus	Paikallaan pysyvän muuttumattoman kuorman aiheuttama kuormavaikutus
Stokastinen simulaatio	Simulaatio, jonka alkutilasta muodostuu eri simulaatiokierroksilla eri lopputila
Taarapaino	Vaunun omapaino
Tenderi	Höyryveturin hiilivaunu
VALTSU-järjestelmä	Liikkuvan kaluston valvontaan käytetty tietojärjestelmä
Weibull-jakauma	Ääriarvojakauma, jonka oikea päätepiste on äärellinen
Välivaunu	Vaunu, jossa on kaksi erilaista kytkinjärjestelmää. Yhdistää eri kytkinjärjestelmillä varustetut vaunut

1. JOHDANTO

Kantavat rakenteet, kuten tässä tutkimuksessa sillat, on suunniteltu kestäväksi niille määritetyt kuormat. Vaikka näin suunnitellaankin, niin ei voida sanoa, että rakenne varmasti kestä, koska materiaalien ominaisuuksiin sekä kuormiin liittyy aina satunnaisuutta. Yleensä rakenteiden mitoitus Suomessa tapahtuu erityislaatuisia kohteita lukuun ottamatta Eurokoodi-standardissa ja kansallisissa liitteissä määritettyjen rajatilamitoitusten avulla, jossa materiaaleille ja kuormille on määritetty valmiiksi kutakin rajatilaa, käyttöikä, seuraamusluokkaa ja toteutusluokkaa vastaavat osavarmuusluvut sekä luotettavuusluokkaa vastaava kuormakerroin. Tällä menetelmällä päästään esimerkiksi standardin määrittämiin vauriotodennäköisyyksien raja-arvoihin, kun rakenteeseen kohdistuva kuormavaikutus on yhtä suuri kuin rakenteen laskettu kestävyys. Kun laskettu kestävyys on suurempi kuin laskettu kuormavaikutus, niin vauriotodennäköisyys on määritetyn raja-arvon alapuolella ja on saavutettu standardin asettama riittävä varmuus. Voidaan siis sanoa, että asiallisesti suunniteltu ja rakennettu rakenne kestä standardin asettamalla varmuudella. Se mikä standardin asettama varmuus on, vaihtelee Eurokoodissakin jonkin verran eri maiden välillä, koska kansallisin liittein voidaan tiettyihin kertoimiin edelleen vaikuttaa maakohtaisesti. Edelleen mentäessä muihin maanosiin, voivat vauriotodennäköisyyden raja-arvot olla huomattavan erilaisia kuin Eurokoodissa. Rakenteiden varmuutta määritteleekin lopulta poliittinen päätöksenteko, yleinen mielipide sekä vaurion seuraukset ihmishenkien ja kustannusten näkökulmasta [1].

Kaikissa kuormissa on siis satunnaisuutta, toisissa hyvin vähän ja toisissa taas huomattavan paljon. Satunnaisuuden määrä riippuu paljon siitä kuinka paljon ihminen voi toimenteillään vaikuttaa johonkin kuormaan. Esimerkiksi materiaalien paino vaihtelee yleensä hyvin vähän ja se pysyy rakenteessa yleensä hyvin muuttumattomana koko rakenteen käyttöajan, koska rakennusmateriaalit syntyvät ihmisen kehittämien ja hallitsemien prosessien tuloksena. Luonnonkuormat kuten lumikerroksen paksuus ja lumen tiheys taas voivat vaihdella huomattavastikin, koska luonnonilmiöiden tapahtumiseen ihminen ei voi vaikuttaa, vaan sitä voidaan ainoastaan ennustaa. Lumikuorman tapauksessa suuri satunnaisvaihtelu huomioidaan käyttämällä lumikuorman ominaisarvona keskimäärin 50 vuoden toistumisjaksolla esiintyvää lumikuormaa [2], jolloin suunnittelukuorman ylitykset ovat harvinaisia, mutta kuitenkin mahdollisia ajoittain. Hyötykuormat kuten tässä tarkemmin käsiteltävä raideliikennekuorma menee luonteeltaan omapainon ja luonnonkuormien väliin. Tiedämme esimerkiksi kaluston ja voimme ohjata kaluston kehitystä, mutta toisaalta kalustossa voi olla ylikuormaa inhimillisen erehdyksen tai teknisen vian vuoksi.

1.1 Tutkimuksen tausta

Tämä tutkimus keskittyy tarkastelemaan todellisesta raideliikenteestä aiheutuvia staattisia kuormavaikutuksia rautatiesiltoihin Suomessa. Tutkimus liittyy Liikenneviraston ja Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen solmimaan ”ElinkaariTe-hokasVäylänpito – ETEVÄ” – yhteistyösopimukseen. ETEVÄ-yhteistyön tavoitteina on löytää ratkaisuja esimerkiksi ratarakenteiden ja –komponenttien elinkaaren pidentämiseen niukemmilla resursseilla, uutta teknologiaa hyödyntäen. ETEVÄ on jatkoa Liikenneviraston ja TTY:n aikaisemmille ”Elinkaaritehokas rata” –tutkimusohjelmille (TERA I ja II). Näiden tutkimusohjelmien puitteissa on tutkittu elinkaaritaloudellisuuden vaikutavia asioita, joista tämän tutkimuksen tärkeiksi taustatiedoiksi nousee pyörävoimailmaisista kootun mittausdatan analysointi Pasi Samppalan diplomityössä: *Rautateille asennettujen pyörävoimailmaisimien mittausdata ja pyörävoiman raja-arvot* sekä luotettavuusanalyysien matemaattisiin perusteisiin ja muuhun tausta-aineistoon perehtyvä tutkimus *Luotettavuusanalyysin perusteita siltojen kantavuuden arvioinnissa*, jonka on tehnyt Olli Asp Tampereen teknillisestä yliopistosta. Näiden lisäksi taustatietona on käytetty Liikenneviraston *Siltojen suunnittelussa käytetyt kuormat ja osavarmuusluvut* selvitystä tieliikenteen kuormista. ETEVÄ-hankkeen lisäksi tämä tutkimus on osa Euroopan Unionin ja yritysten rahoittamaa kansainvälistä Shift2Rail-hanketta, jossa yhtenä teemana on myös ylläpitokulujen alentaminen, johon elinkaaritaloudellisuus vahvasti vaikuttaa.

Tällä hetkellä rautatiesiltojen mitoittava liikennekuorma saadaan aikaan Eurokoodissa määriteltujen kuormakaavioiden avulla. Kuormakaavioiden perustyyppi on kuormakaavio LM71, joka kuvaa normaalin raideliikenteen aiheuttaman pystykuormituksen staattista vaikutusta. Kaavio koostuu neljästä 250 kN:n ominaisakselikuormasta sekä 80 kN/m ominaisnauhakuormasta ja sen tarkoituksena on kuvata raideliikennettä, jonka akselipainot ovat 22,5 tonnia [3].

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä tutkimuksessa perehdytään määrittämään raideliikenteestä aiheutuvaa kuormavaikutusta Suomessa vaikuttavien mitattujen kuormien avulla. Liikennekuorma on luonteeltaan melko satunnainen, kuten luonnonkuormatkin. Ei tosin yhtä satunnainen, koska rai-teilla liikkuva kalusto on suunnitelmallisesti valittu ja kalustoa pyritään käyttämään ohjeiden mukaan. Vaikka ihmisen hallitsemassa järjestelmässä on luotu rajoja, niin inhimilliset virheet ovat silti mahdollisia, jolloin esimerkiksi liikenteen ylikuormia voi syntyä. Luonnonkuormiin verrattuna liikennekuormat ovat tietyllä tavalla monimutkaisempia rakenteiden kannalta, koska ne koostuvat pistemäisistä kuormista, jotka voivat sijaita monella eri tavalla toisiinsa nähden ja niiden suuruus vaihtelee. Luonnonkuormien perusta taas on yksi tilastollisesta todennäköisyydestä luettu arvo, tuulen tapauksessa tuulen nopeus ja lumen tapauksessa lumikuorma maassa. Liikennekuormassa ei ole olemassa täl-

laista aluekohtaista arvoa, jonka pohjalta erikoistapauksia lähdetään tutkimaan, vaan liikennekuormaa voidaan pitää jo itsessään erikoistapauksena rakenteiden mittakaavassa. Tämän vuoksi liikennekuormaa joudutaan kuvaamaan kaavioilla, joita tulee suunnittelussa edelleen kuljettaa koko sillan kannen matkan. Tällainen liikkuva kaavio tuotetaan siitä syystä, että kuormien pistemäisyydestä johtuen pelkillä tasaisilla kuormilla joudutaisiin tiettyjen paikallisten kuormavaikutusten takia käyttämään todella suurta tasaista kuormaa, jolloin taas globaalit kuormavaikutukset kasvaisivat suhteettoman suuriksi.

Tutkimuksen päätavoitteena on laatia Suomen todellista raideliikennettä kuvaava simulaatiomalli, jolla voidaan tuottaa tilastolliseen todennäköisyyteen perustuvia liikenteen aiheuttamia kuormavaikutusten ääriarvoja ja toistumiskuormia halutuilla aikajaksoilla, joiden mittaaminen fyysisesti olisi mahdotonta. Saatuja tuloksi verrataan edelleen Eurokoodin suunnittelukuormakaavioiden antamiin tuloksiin ja vertailun perusteella tehdään johtopäätöksiä siitä, kuvaako Eurokoodin kuormakaaviot järkevällä tarkkuudella Suomen raideliikennettä. Itse kaavion muotoon ei tässä työssä lähdetä ottamaan kantaa, mutta muodon lisäksi kaavioilla on Eurokoodissa luokittelukerroin α , joka antaa kaavion kuormia kertovan kertoimen kullekin akselipaino-luokalle. Tälle kertoimelle pyritään löytämään sopiva arvo, joka kuvaisi hyvin ja riittävän varmasti Suomen raideliikenteen kuormavaikutuksia. Tällä hetkellä Suomessa käytetään kerrointa $\alpha=1,46$. Kyseisellä kertoimen arvolla voitaisiin kaavion mukaan mitoittaa sillat raideliikenteelle, jossa akselimassat ovat 35 tonnia [3]. Suomessa akselimassat ovat kuitenkin vain 25 tonnia, jota vastaava kerroin on $\alpha=1,1$. Tämän perusteella Suomessa käytettävät suunnittelukuormat voisivat olla ylisuuria, joten tällä tutkimuksella pyritään osoittamaan, onko todella näin. Jo tässä vaiheessa on kuitenkin hyvä todeta, että suunnittelukuorman valintaa ei välttämättä kannata tehdä pelkästään nykyisestä kuormavaikutuksesta tehdyn ennustuksen perusteella, vaan lähtökohtaisesti sadaksi vuodeksi suunniteltavien siltojen tapauksessa on katsottava myös tulevaisuuteen tämän hetken lähtökohtien kautta. Niinpä tämän työn tutkimustulokset ovat vain yksi päätöksenteon muuttujista, joiden perusteella mahdollista luokittelukertoimen muuttamista tulee pohtia.

1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan stokastisin menetelmin junien aiheuttamaa staattista kuormavaikutusta radoilta kerätyn mittausdatan perusteella. Simulaatiolla laaditaan mittausdataan perustuvia todellisen kaltaisia satunnaisia junia, mutta ei ainakaan tietoisesti juuri sellaisia kuin mittausjärjestelmä on havainnut. Deterministiset tarkastelut on jätetty tämän tutkimuksen ulkopuolelle, koska diplomityön puitteissa tutkimuksesta tulisi liian raskas. Ainoastaan eri vaunujen akseligeometriat on syötetty simulaatioon deterministisinä suureina, koska niissä vaikuttava valmistustoleransseista ja lämpövaihteiluista johtuva hajonta on tämän tutkimuksen kannalta merkityksetöntä.

Kuormavaikutusten tarkempi vertailu tehdään Eurokoodin luokiteltujen kuormakaavioiden LM71 ja SW/0 kanssa sekä ratojen ja kaluston luokittelussa käytettyjen standardin EN 15528 kaavioiden D4 ja E4 kanssa. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi myös vanhempia kuormakaavioita, mutta niitä ei vertailla tarkemmin simulaatiotulosten kanssa. Kuormakaaviota SW/2 ei tutkita tässä työssä tarkemmin, koska se on luokittelematon ja käytössä hankekohtaisesti [3].

Työn puitteissa tarkastellaan vain yksiraiteista tapausta. Eli vierekkäisten raiteiden intensiteettiin ei oteta tässä vaiheessa kantaa. Myöskään sillan poikittaisia kuormavaikutuksia tai vääntöä ei tutkita, vaan vaikutuksia tarkastellaan ainoastaan yksikulotteisella palkkimallilla, jonka avulla saadaan pääsuunnan voimasuureista ratkaistuksi taivutusmomentit ja leikkausvoimat.

Simulaatiotulosten jatkokäsittelyssä valitaan lopuksi ääriarvojen jakaumaa kuvaava jakaumafunktio. Ääriarvojakaumien tyypeistä on tässä työssä tarkasteltu tarkemmin vain yleisen ääriarvoteorian ääriarvojakauman tyyppiä I (Gumbel) ja III (Weibull), joiden avulla on laadittu 100 vuoden toistumiskuormavaikutukset. Tyypin II (Fréchet) ääriarvojakauma jätetään tuloslaadinnan ulkopuolelle, koska se ei äärimmäisen harvinaisia ääri-ilmiöitä kuvaavan luonteensa vuoksi sovi todennäköisesti raideliikenteen kuormavaikutusten ääriarvojakaumaksi, jossa ääriarvot pakkautuvat sallitun rajoille. Muutamia tuloksia tarkastellaan lisäksi yleistetyn ääriarvojakauman (GEV) avulla.

Työssä tarkastellaan ainoastaan liikennekuorman ominaiskuormavaikutuksia eli eri rajatilatarkastelut ja yhdistelyt muiden kuormien kanssa rajautuvat pois. Tutkimuksen ulkopuolelle jäävät myös junien aiheuttamat dynaamiset kuormat ja vaakakuormat, rakenteiden omapaino sekä kaikki muut ulkoiset kuormat.

1.4 Tutkimusmenetelmät ja tuotokset

Diplomityön tutkimusmenetelminä on käytetty kirjallisuustutkimusta sekä tutkimuksen aikana tehtyä simulaatio-työkalua, joka perustuu rautateille asennettujen mittalaitteiden keräämään dataan ja Monte Carlo -algoritmeihin.

Kirjallisuustutkimus painottuu pääasiassa Suomen rataverkon ja siltojen erityispiirteisiin sekä rataverkolla liikennöivään kalustoon ja erilaisten kalustojen vaikutuksiin rakenteissa. Lisäksi kirjallisuustutkimuksessa on käyty läpi stokastisen simuloinnin matemaattisia periaatteita ja lainalaisuuksia. Näin tehdyn kirjallisuustutkimuksen avulla ollaan saatu valittua itse simulaatioon tämän tutkimuksen kannalta oleellimmat tiedot, kuten käytettävät siltojen jännevälit ja käytettävä kalusto. Matemaattisia periaatteita käsittelevä osuus taas käsittelee simulaatioon rakennettujen toimintojen teoreettista taustaa ja auttaa lukijaa ymmärtämään paremmin, millaisesta asiasta tutkimuksessa on kyse.

Tärkein tutkimusmenetelmä on simulaatio-työkalu, joka myös tehtiin tutkimuksen aikana. Työkaluun syötetään raideliikenteestä mitattua dataa, joka on esikäsitelty tutkimuksen kannalta optimaaliseksi. Simulaatiossa hyödynnetään Monte Carlo -algoritmeja siten, että saadaan luotua satunnaisia junia, jotka kuitenkin noudattavat tiettyjä lainalaisuuksia. Simulointikertoja lisäämällä luotujen satunnaisjunien joukko alkaa muistuttaa yhä enemmän sen mittauspisteen todellista junaliikennettä, josta eri parametrien data on ohjelmaan syötetty. Simulaation tuloksena saatavia kuormavaikutusjakaumia verrataan edelleen Eurokoodin LM71-kuormakaavion kuormavaikutuksiin, jotta saadaan tietoa nykyisen kuormakaavion soveltuvuudesta siltojen suunnitteluun Suomessa.

2. YLEISTÄ SUOMEN RATAYMPÄRISTÖSTÄ

Tässä luvussa kerrotaan lyhyesti Suomen rataverkon nykytilanteesta ja tulevaisuudesta sekä esitetään tärkeimpiä rataverkkoa kuvaavia tunnuslukuja työn aihepiirin kannalta. Lisäksi luodaan katsaus rataverkon historian kehitysaskeliin ja etenkin rautatiesiltojen kehitykseen. Myös raideliikenteen kalustosta ja sen kehityksestä kerrotaan lyhyesti. Kaikkia kehityksen vaiheita ei tämän työn puitteissa ole mahdollista eikä mielekästäkään kertoa, mutta mukaan on pyritty ottamaan merkittävimmät tapahtumat ja niiden vaikutukset siltöjen kuormiin.

2.1 Suomen rataverkko

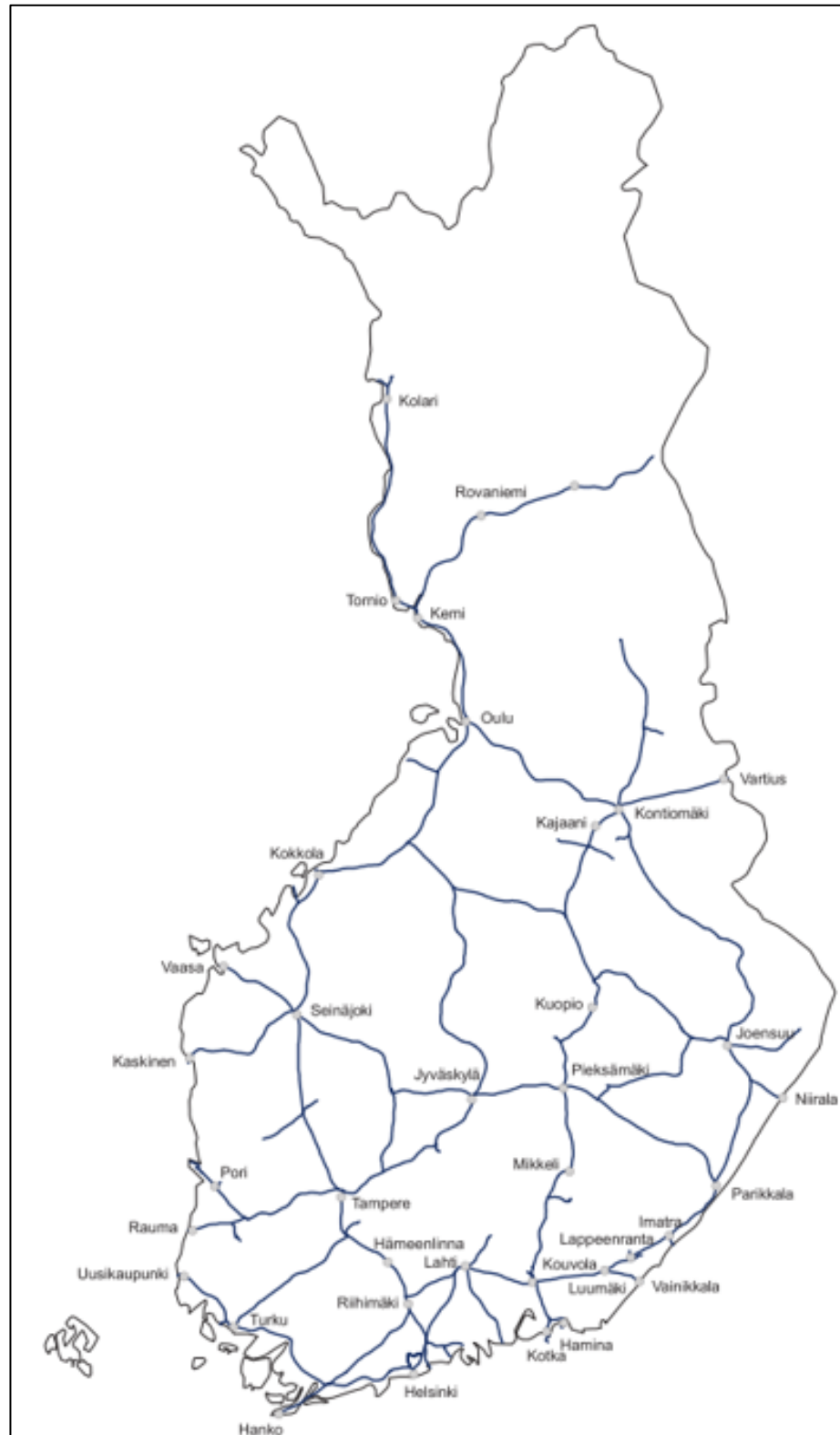
Suomen rataverkon ratapituus oli vuoden 2016 lopussa yhteensä 5926 km, josta yksirai-teista rataa 5244 km eli 88,5 % koko ratapituudesta [4]. Rataverkko on esitetty kuvassa 2.1. Rataverkosta on raideyhteydet sekä Ruotsiin, että Venäjälle ja tulevaisuudessa mah-dollisesti myös Viroon, mikäli Suomenlahden ali suunniteltava tunneli toteutuu. Suomen rataverkolla on käytössä nimellismitaltaan 1524 mm leveä raideleveys. Tämä on lähellä Venäjän rataverkon raideleveyttä, joka on 1520 mm ja se mahdollistaa venäläisen kalus-ton liikkumisen Suomen rataverkolla. Ruotsissa taas on käytössä yleinen eurooppalainen raideleveys, joka on 1435 mm [5]. Virossa on tällä hetkellä sama raideleveys kuin Venä-jällä, mutta tulevaisuudessa toteutettavan Rail Baltican raideleveys olisi yleinen 1435 mm [6]. Suomen rataverkosta ei siis voi suoraan liittyä Ruotsin rataverkkoon tai tulevaan Rail Balticaan kuin muuttuvaraideleveyksistä kalustoa tai telinvaihto kalustoa käyttämällä [7].

Sallittuna akselipainona käytetään suurimmalla osalla rataverkkoa 225 kN. Tämän lisäksi on rataosia, joilla painorajoitus on korkeampi 250 kN. Nämä rataosat on nähtävissä ku-vassa 2.2. Lisäksi koko rataverkolla on rajoitettu liikkuvan kaluston metripaino arvoon 80 kN/m. [8]

Suurimmat junapituudet vaihtelevat rataosittain. Sallittuun junapituuteen vaikuttaa radan osalta liikennepaikkojen sivuraiteiden pituudet, joita junan on tarvittaessa voitava käyt-tää. Rataosien mitoituksessa käytetään junapituuksia 700, 750, 925 ja 1100 metriä. [8]

Rataverkon nopeusrajoitukset ovat suurimmillaan henkilöliikenteelle 220 km/h ja tavara-liikenteelle 120 km/h. Rataosilla, joilla ei ole junankulunvalvontajärjestelmää, suurin sal-littu nopeus on 80 km/h. Suomen rataverkossa on jonkin verran alennettuja nopeusrajoi-tuksia johtuen monista radan kuntoon sekä geometriaan liittyvistä syistä. Radan ja sen ympäristön kuntoon liittyviä syitä ovat esimerkiksi päällysrakenteen alentunut kunto, ra-dan sijainti pehmeiköllä, kalliroleikkausten huono kunto, vaihteiden kunto ja geomet-riavirheet. Rataympäristöön liittyviä syitä taas ovat esimerkiksi huonot näkemät, tärinära-joitukset ja liian lähellä raidetta sijaitsevat sillan tuet. Yleinen syy nopeusrajoituksille on

myös rataosalla olevan sillan huono kunto, sillan alkuperäinen alhainen kantavuus tai se, että silta on avattava. Sillan huono kunto rajoittaa junien nopeuden pahimmillaan vain 20 kilometriin tunnissa. Myös tunneleiden huono kunto tai niiden aiheuttama painevaikutus voi rajoittaa junien nopeusrajoituksia. [8]

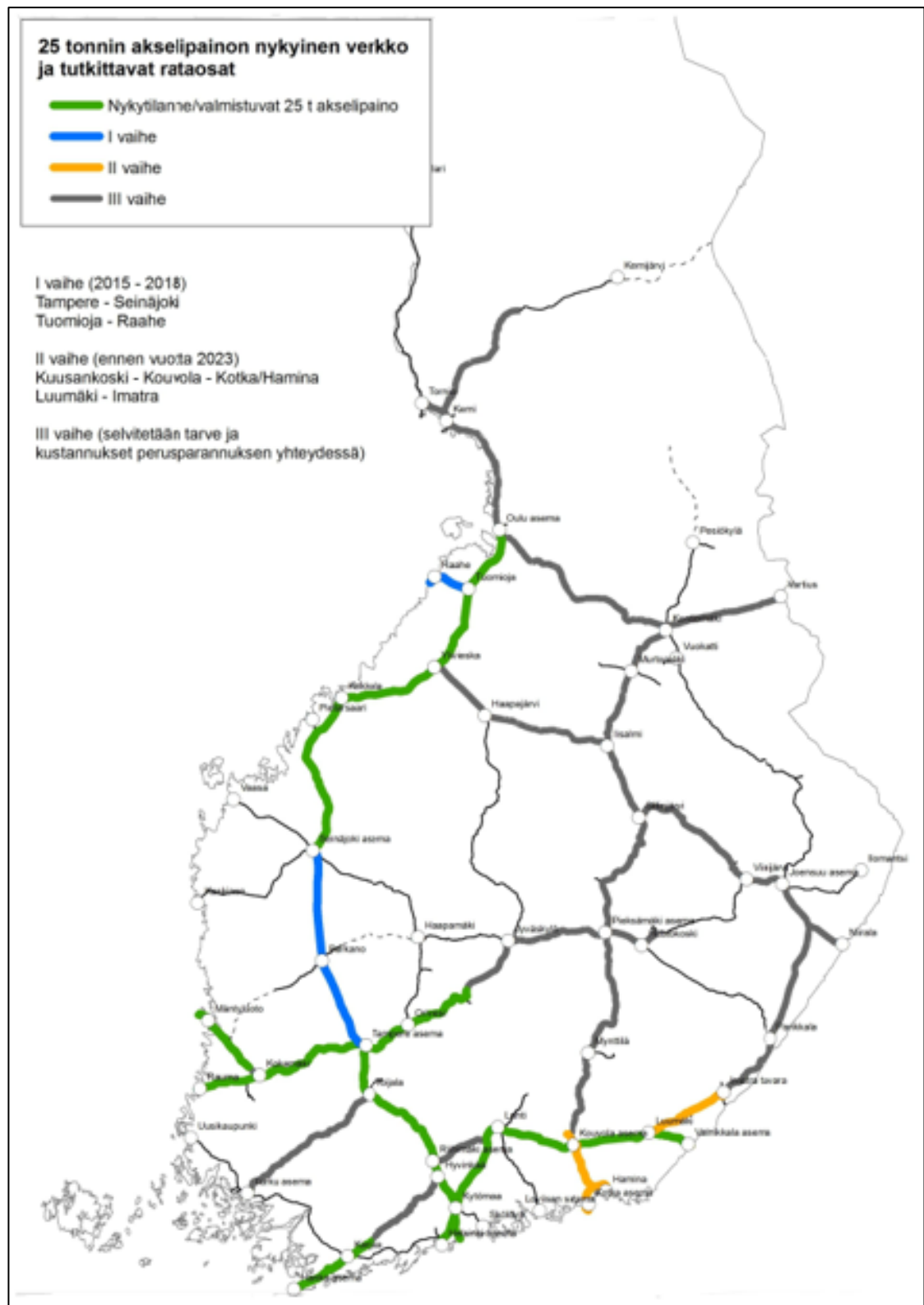


Kuva 2.1 Suomen rataverkko [4].

2.1.1 Rataverkon kehittyminen tulevaisuudessa

Tässä kappaleessa käsitellään rataverkon kehittämistavoitteita akselipainon ja junapituuksien suhteen, koska lähinnä vain niillä on merkitystä staattisiin kuormavaikutuksiin. Akselipainoissa tavoitteena on nostaa joitakin rataosia 22,5 tonnin radoista 25 tonnin radoiksi. Rataosat, joihin muutos halutaan, esitetään kuvassa 2.2. Rataosia, joilla on jo selvä tavoite saavuttaa 25 tonnin akselipainot, on vain melko paikallisesti. Merkittävä osuus rataverkosta on kuitenkin selvityksen alla akselipainon nostoa koskien, mutta näiden rataosien konkreettisesta aikataulusta ei vielä ole tietoa. Yli 25 tonnin ratoja ei ollut näköpiirissä vuonna 2015 julkaistussa selvityksessä *Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2015, Rataverkon välityskyvyn kehityskuva 2035*. Kyseisen selvityksen perusteella kuormavaikutukset eivät siis kokonaisuudessaan muutu rataverkon myötä lähitulevaisuudessa dramaattisesti. [9] Selvityksen jälkeen vuonna 2017 tapahtui kuitenkin merkittävä muutos tähän näkymään, kun Liikenne- ja viestintäministeriö pyysi Liikennevirastoa selvittämään mahdollisen Jäämeren radan toteuttamista yhdessä Norjan liikenneviranomaisten kanssa [10]. Vuonna 2018 julkaistussa raportissa *Jäämeren ratayhteyden kysyntäpotentiaalin ja vaikutusten arviointi*, kerrotaan, että linjausten mitoittavana akselipainona käytetään 300 kN nopeudella 100 km/h, mikä tarkoittaisi jo selvää lisäystä tämän hetkisiin kuormiin verrattuna. Raportissa on tutkittu kuljetuskysyntää, joten ratayhteydelle on annettu arvio valmistumisvuodesta, joka on 2030. Tämä on kuitenkin vain laskelmia varten tehty oletus, eikä radasta siis ole olemassa mitään päätöksiä. Raportista on myös luettavissa, että tällä hetkellä radan yhteiskuntataloudellinen kannattavuus jäisi alhaiseksi, joten radan toteutuminen on epävarmaa. Mikäli rata kuitenkin toteutuisi ja se muodostaisi yhteyden Rail Baltican ja FinEst-linkin kautta Eurooppaan, tarvittaisiin myös nykyiselle rataverkolle erittäin suuria investointeja etenkin Helsinki – Oulu välille. [11]

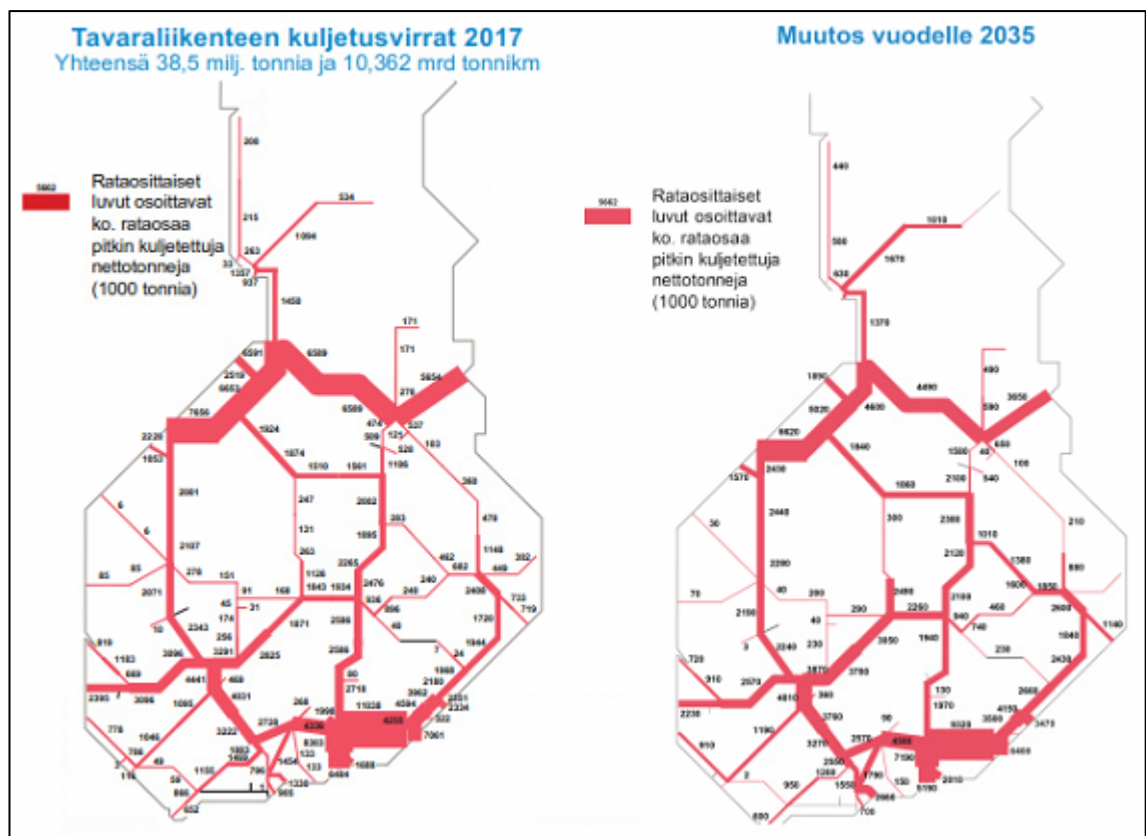
Junapituuksien kasvamisen vaikutukset kuormavaikutuksiin ovat jo melko teoreettisia, koska nykyisellään tavarajunien pituuksina käytetään pääsääntöisesti 1100 m (vain tyhjävaunukuljetuksissa Kotka/Hamina – Vainikkala suuntaan), 925 m (Vartius – Oulu ja Vainikkala – Sköldvik) ja 400 – 600 m muilla reiteillä. Lähitulevaisuudessa junapituudet pysyvät näissä samoissa mitoissa ja ainoastaan paikallisesti halutaan tehdä mahdolliseksi esimerkiksi 1100 m pitkien junien liikennöinti myös täysinä reitillä Vainikkala – Kouvola – Kotka/Hamina. [9] Junat ovat siis jo nyt selkeästi pidempiä kuin sillat Suomessa. Tulevaisuudessa on toki mahdollista, että Suomessakin rakennetaan pidempiä siltoja kuin nykyiset ovat, mutta todennäköisesti siltapituudet eivät kuitenkaan tavoita junapituuksia.



Kuva 2.2 25 tonnin rataverkko vuonna 2015 ja tärkeimmät kehityskohteet tulevaisuudessa [9].

2.1.2 Rataverkon paikalliset erityispiirteet

Rataverkon paikallisista erityispiirteistä tähän työhön liittyy eniten se, millaisia kuljetuksia eri puolilla rataverkkoa tehdään, koska se vaikuttaa radalla esiintyviin vaunutyyppihin ja kuorman tilavuuspainon hajontaan. Tällaisia kuljetusten erityispiirteitä syntyy kaivosten, tehtaiden, raja-asemien ja satamien välille. Näillä väleillä tapahtuu myös selkeästi suurin osa tavaraliikenteestä, kuten kuvasta 2.3 voidaan nähdä. Muita erityispiirteitä aiheuttavat myös maaston muodot, jotka vaikuttavat siltapituuksiin. Itse juniin maastonmuodot vaikuttavat lähinnä junan kokonaisuudessa rajoittavasti ja toisaalta ne johtavat usein suurempiin veturimääriin [12].



Kuva 2.3 Tavaraliikenteen kuljetusvirrat vuonna 2017 ja ennustus vuodelle 2035 [13].

2.2 Suomen rataverkossa liikennöivä kalusto

Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi Suomen rataverkolla liikennöivää kalustoa. Tavaraliikenteen kalustoa käydään luonnollisesti tarkemmin läpi, koska se on tutkittavassa datassa mukana. Sen sijaan ratatyökoneita ei käsitellä lainkaan ja henkilöliikenteen kalustosta kerrotaan vain perustelut, miksi myös se on jätetty tästä tutkimuksesta sivuun. Mainittakoon erityistapauksena myös 32-akselinen suurkuormavaunu Osg, jota käytetään raskaissa erikoiskuljetuksissa. Tätä vaunutyyppiä ei myöskään käsitellä tässä yhteydessä,

koska sen käyttö on hyvin harvinaista ja toisaalta akselimassa on maltillinen 14 tonnia [14].



Kuva 2.4 Erikoiskuljetuksissa käytettävä suurkuormausvaunu Osg [17].

2.2.1 Tavaraliikenteen kalusto

Taulukosta 2.2 nähdään, että tavaraliikenteen kaluston määrä on pudonnut vuodesta 1965 asti. Suurimmillaan kaluston määrä on ollut vuoden 1950 tienoilla, jota ennen kaluston määrä onkin koko ajan kasvanut lukuun ottamatta vuosien 1920 ja 1945 pieniä notkahduksia. Tavaraliikenteen tonnimäärät ovat kuitenkin nykyään lähes kaksinkertaiset verrattuna aikaan, jolloin kaluston määrä oli suurimmillaan. [15] Tätä eroa selittää osin akselipainojen nousu (taulukko 2.1) sekä kuljetusnopeuksien kasvu, jolloin samaa kalustoa on ehditty käyttää vuoden aikana useammin kuin aiemmin.

Taulukko 2.1 Kaluston akselipainojen kehitys [16].

Akselipaino (tonnia)	Vuosiluvut
13	-1944
13,1	1944-1946
13,5	1946-1953
14,5	1953-1955
14,8	1955-1956
14,9	1956-1957
15	1957-1960
20	1960-1984
22	1984-1985
22,5	1985-2002
25	2002-

Yleisesti myös kaluston hallinta on parantunut ja vaunujen käyttö voidaan suunnitella niin, että vaunut eivät seisoisi turhaan tyhjänä. Toki alati muuttuvassa maailmassa on aina varmasti jonkin verran kohtaanto-ongelmia myös vaunujen saralla eli tietyn tyyppisiä vaunuja saatetaan tarvita yllättäen enemmän kuin niitä on ja vastaavasti taas toisen

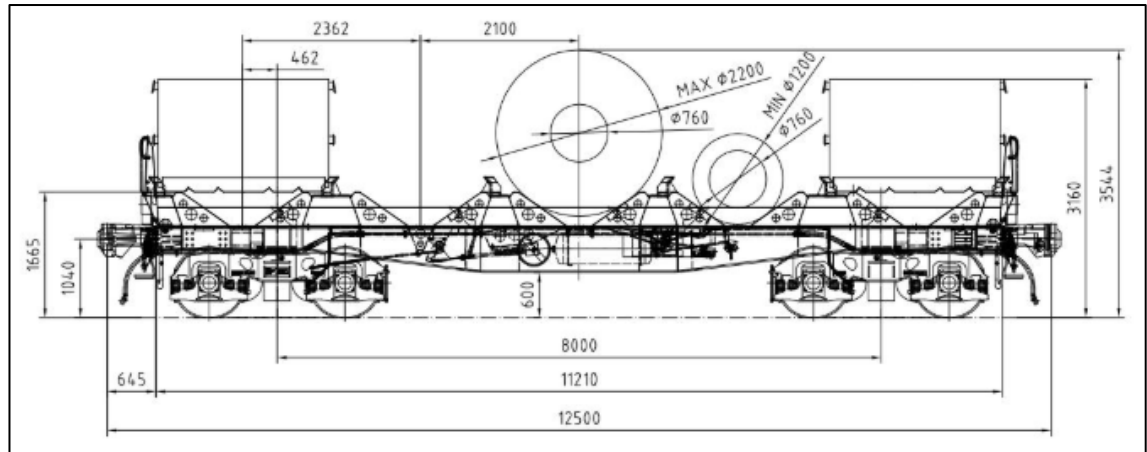
tyyppinen vaunu voi käydä turhaksi. Kohtaanto-ongelmat voivat aiheuttaa tilastonotkahuksen, jos tiettyä vaunutyyppiä ei esimerkiksi saada riittävän nopeasti täyttämään jonkin teollisuuden alan tarvetta.

Vuonna 2017 tavaraliikenteen vaunujen kokonaismäärä on ollut 8 821 kappaletta. Näistä 6 141 kappaletta on 4-akselisia ja 2 679 kappaletta 2-akselisia. Vaunujen kokonaiskantavuus on 438 288 tonnia, josta yhden vaunun keskimääräiseksi kantavuudeksi saadaan noin 49,69 tonnia. Akselikohtaiseksi kantavuudeksi saadaan keskimäärin noin 14,65 tonnia. Karkeasti tyypittämällä vaunuista on 3 690 kappaletta katettuja vaunuja, 4 697 kappaletta avonaisia vaunuja ja 434 kappaletta säiliövaunuja. [15]

Taulukko 2.2 Ratapituuden, kaluston, henkilökunnan ja kuljetusten määrän kehitys [15].

Vuosi - År	Liikkuva kalusto • Rullande materiel 31.12.										Henkilökunta keskim. • Personal i medeltal		Henkilöliikenne • Persontrafik		Tavaraliikenne • Godstrafik		
	Ratapiälius • Banlängd 31.12. ¹⁾		Vetokalusto • Dragfordon								Päättömiset • I huvudsak för anställda	Sivuttömiset • I blyss för anställda	Maksikon luku ²⁾ • Antal resor ²⁾		Paino, 1 000 tonnia ³⁾ • Vikt, 1 000 ton ³⁾		
	Ratapiälius • Spårilängd 31.12. ¹⁾	Km	Höyryveturit • Ånglok	Dieselveiturit • Diesellok	Dieselmootorivaunut ja kiskoaivot • Dieselmotorvagnar och rälsvagnar	Sähkämootorivaunut • Elmotorvagnar	Sähkëveiturit • Ellok	Pienvetokalusto • Smådragfordon	Yhteensä • Sammanlagt	Henkilöliikenteen vaunut • Vagnar i persontrafik			Tavaraliikenteen vaunut • Vagnar i godstrafik	1 000	1 000	1 000	1 000
1862	108	-	6	-	-	-	-	-	6	13	142	-	-	39	-	13	-
1870	483	531	43	-	-	-	-	-	43	110	993	-	-	2 404	18 028	132	7 925
1880	852	1 005	98	-	-	-	-	-	98	231	2 178	1 594	-	1 813	65 870	506	49 480
1890	1 876	2 179	151	-	-	-	-	-	151	370	3 594	2 612	-	2 542	128 076	954	104 052
1900	2 650	3 304	310	-	-	-	-	-	310	755	8 547	10 282	-	8 899	337 173	2 463	343 370
1910	3 356	4 568	500	-	-	-	-	-	500	1 114	14 149	15 179	-	14 463	554 928	3 880	462 005
1920	3 987	5 567	539	-	-	-	-	-	539	958	13 016	24 105	-	17 549	775 488	5 439	931 679
1930	5 010	6 983	773	-	3	-	-	-	776	1 364	22 012	29 165	-	22 033	1 035 028	9 574	1 592 327
1935	5 367	7 497	740	1	13	-	-	-	754	1 428	23 348	28 845	-	20 052	947 038	12 334	1 979 598
1938	5 407	7 858	747	2	20	-	-	-	769	1 469	24 513	31 212	-	23 714	1 227 670	13 731	2 283 070
1945	4 668	6 715	741	4	22	-	-	-	767	1 471	23 261	38 547	-	61 344	3 202 595	11 489	3 445 637
1950	4 798	7 022	821	4	20	-	-	-	845	1 648	27 855	38 423	-	45 656	2 182 570	15 803	3 445 637
1955	4 889	7 453	798	18	80	-	-	-	896	1 617	26 169	36 073	-	39 444	2 280 463	19 158	4 482 223
1960	5 314	8 166	659	120	192	-	-	-	971	1 495	26 543	35 340	550	36 603	2 342 928	19 041	4 865 000
1965	5 458	9 560	514	306	261	-	184	1 265	1 380	26 887	34 903	558	31 171	2 049 624	20 556	5 182 900	
1970	5 804	8 795	262	331	272	20	278	1 163	1 080	25 045	27 690	410	23 357	2 156 236	23 620	6 270 300	
1975	5 918	8 938	250	369	223	60	27	1 188	1 055	24 862	29 002	277	35 546	3 135 164	22 657	6 438 200	
1980	6 075	9 157	-	395	182	96	84	263	1 020	1 102	23 848	28 726	297	39 310	3 215 652	29 574	8 335 400
1985	5 877	8 923	-	384	104	100	110	238	936	1 109	17 796	26 310	165	40 419	3 223 988	30 781	8 067 100
1990	5 846	8 844	-	358	-	100	110	236	804	1 001	15 395	20 162	45	45 998	3 330 900	34 562	8 356 700
1995	5 859	8 977	-	346	-	100	111	217	774	992	14 618	15 228	-	44 420	3 184 400	39 387	9 292 900
2000	5 854	8 705	-	299	-	112	130	212	753	1 047	12 292	12 722	-	54 783	3 405 000	40 501	10 106 600
2001	5 850	8 734	-	285	-	112	140	205	742	1 056	11 933	12 225	-	54 987	3 282 000	41 678	9 857 300
2002	5 850	8 736	-	279	-	119	148	202	748	1 077	11 528	11 711	-	57 695	3 318 000	41 679	9 663 800
2003	5 851	8 707	-	273	-	119	156	201	749	1 060	11 324	11 115	-	59 969	3 338 000	43 503	10 047 100
2004	5 741	8 596	-	258	-	129	156	217	780	1 029	11 445	10 748	-	60 134	3 352 000	42 663	10 105 200
2005	5 732	8 587	-	257	10	147	156	132	702	1 084	11 162	10 305	-	63 493	3 478 000	40 722	9 705 800
2006	5 905	8 830	-	249	16	147	156	129	697	1 083	10 971	10 180	-	63 803	3 540 000	43 560	11 059 600
2007	5 899	8 816	-	245	16	148	156	129	694	1 024	10 790	9 988	-	66 685	3 778 000	40 288	10 434 100
2008	5 919	8 848	-	235	16	148	156	107	662	1 035	10 934	9 992	-	69 937	4 052 000	41 937	10 776 500
2009	5 919	8 847	-	224	16	149	156	96	641	1 033	10 524	9 935	-	67 555	3 876 000	32 860	8 872 300
2010	5 919	8 862	-	224	16	152	156	96	644	1 071	10 464	9 612	-	68 950	3 959 000	35 795	9 749 600
2011	5 944	8 885	-	223	16	158	155	91	643	1 102	10 364	8 990	-	68 376	3 882 000	34 827	9 395 200
2012	5 944	8 883	-	224	16	167	155	90	652	1 131	9 817	8 786	-	69 331	4 035 000	35 267	9 275 000
2013	5 944	8 523	-	221	16	171	155	89	652	1 163	9 457	8 097	-	69 318	4 053 000	36 433	9 470 100
2014	5 944	8 485	-	216	16	178	155	88	653	1 181	9 078	7 592	-	68 262	3 874 000	37 008	9 597 000
2015	5 923	8 483	-	213	16	178	156	87	650	1 101	8 854	7 059	-	75 952	4 113 000	33 392	8 468 000
2016	5 926	8 520	-	216	16	178	155	85	650	1 203	8 876	6 494	-	82 115	3 868 000	36 161	9 455 000
2017	5 926	8 513	-	218	16	218	165	64	681	1 227	8 821	6 065	-	85 703	4 270 672	38 467	10 362 000

Kaikkea kalustoa ei tässä yhteydessä voi tarkasti käydä läpi, mutta kalustosta enemmän kiinnostunut lukija pääsee ainakin alkuun VR Transpoint:n internetsivuilta eli lähteestä [17] löytyvän kalustokatalogin avulla. Kyseisestä katalogista löytyy yleisimmistä vauunuista lyhyt kuvaus, kantavuudet ja mitat sekä kuvan 2.5 kaltainen kaaviokuva ja kuvan 2.6 kaltainen valokuva.



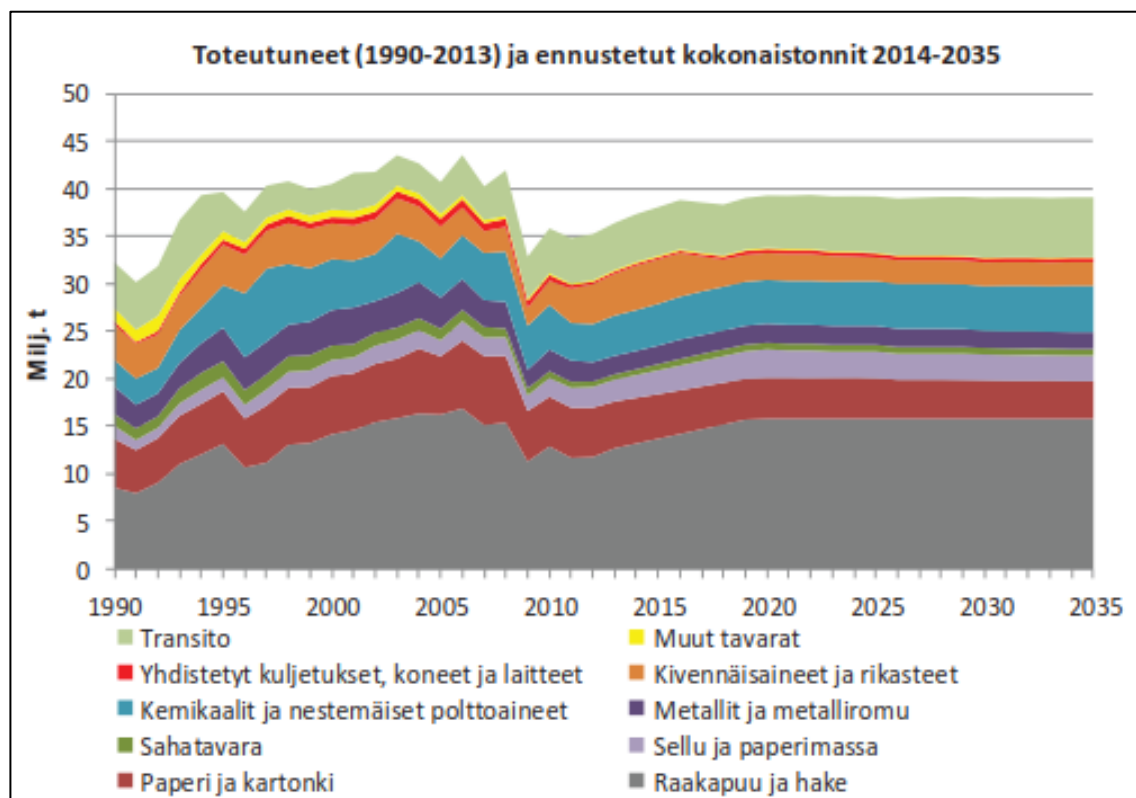
Kuva 2.5 Teräskelavaunujen Shmmns-tw ja Shmmn-tw kaaviokuva sivulta [17].

Kaikista simulaatiossa käytetyistä vauunuista ja vetureista on esitetty yksinkertaistetut kaaviokuvat liitteessä 1.



Kuva 2.6 Taimn-t rikastevaunuja [40].

Vuonna 2014 laaditun rataverkon tavaraliikenne-ennusteen perusteella tavaraliikenteen määrä ja sen jakaantuminen eri teollisuudenalojen tuotteiden välillä näyttäisi pysyvän melko samanlaisena koko ennustusjakson ajan vuoteen 2035 saakka [13]. Tämän perusteella tavaraliikenteen kalustossa ei oletettavasti tapahdu merkittäviä muutoksia, mutta vanhempaa kalustoa toki korvataan uudemmallalla. Vanhoissa vaunuissa sallitut akselimassat ovat pienempiä, joten lähitulevaisuudessa kalusto tulee todennäköisesti homogenisoidumaan akselimassojen osalta, sillä toisaalta ei ole vielä näköpiirissä, että Suomen rai-
deinfraa alettaisiin kehittää yli 25 tonnin akselipainoille, ellei Jäämeren rataa päätetä rakentaa.



Kuva 2.7 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste vuodelta 2014 [13].

2.2.2 Henkilöliikenteen kalusto

Henkilöliikenteen kalustoa käydään tässä kappaleessa läpi vain pintapuolisesti, koska sillä on niin vähäinen merkitys tai ei ollenkaan merkitystä tässä työssä käsiteltävälle staattisen kuormavaikutuksen määrittämiselle. Staattista kuormavaikutusta määriteltäessä vaikutusta on lähinnä kaikkein painavimmilla ja toisaalta kevyimmillä vaunuilla. Raskaimmat aiheuttavat aina suurimmat rasitukset, mutta toisaalta ne myös keventävät jatkuvassa rakenteessa toisen kentän kuormituksia, kun taas kevyimmät vaunut keventävät toisen kentän rasituksia vähiten. Tästä johtuen keskipainoinen henkilöliikenne on karsittu pois datasta, jolloin myös datan käsittely on nopeampaa ja ennen kaikkea simulaatiolla lasket-
tavien kierrosten lukumäärä on vähäisempi.

Henkilöliikenteen kalustossa akselivälit ovat pitkiä ja akselimassat ovat yleensä reilusti suurimpien sallittujen akselipainojen alapuolella. Pasi Samppalan diplomityössä *Rautateille asennettujen pyörävoimailmaisimpien mittausdata ja pyörävoiman raja-arvot*, raide-liikenne on jaettu karkeasti kolmeen eri akselipainoluokkaan. Akselipainoluokat ovat 5 – 7 tonnia eli tyhjät tavaravaunut, 21 – 22,5 tonnia eli täydet tavaravaunut sekä 13 – 15 tonnia, joka sisältää enimmäkseen henkilöliikenteen vaunuja [18].

2.2.3 Yliraskaat vaunut

Mikäli vaunun akselipaino ylittää rataosan sallitun akselipainon, luokitellaan se yliraskaaksi kyseisellä rataosalla. Tarkoituksellinen ylikuormaaminen on kiellettyä ja liika-kuorma on purettava heti ensimmäisellä mahdollisella liikennepaikalla, jos kuorma on yli 5 % sallittua painavampi vaunun suurimman akselipainon ollessa 225 kN ja yli 2 % sallittua painavampi vaunun suurimman akselipainon ollessa 250 kN. Satunnaisen tarpeen tullessa voidaan yliraskaita vaunuja kuljettaa tilapäisesti, mutta niistä on ilmoitettava radan kunnossapitäjälle, jotta radan kuntoa voidaan tarkkailla. Lisäksi tulee noudattaa erikoiskuljetuksia koskevia määräyksiä. Raskaammilla 25 tonnin radoilla ei saa kuljettaa yliraskaita vaunuja tilapäisesti edes poikkeustoimenpitein. [8]

Taulukko 2.3 Joidenkin ratojen päällysrakenneluokkia ja sallittuja nopeuksia [km/h] eri akselipainoilla [8].

Rataosa	Luokka		Henkilöjunat		Tavarajunat			
	Litkennevrasto	SFS-EN 15528	veturijunat	moottorijunat	≤160 kN	160 ≤ 200 kN	200 ≤ 225 kN	225 ≤ 250 kN
Kerava asema–Kytömaa								
itäisin raide	D	E4	120	120	120	120	100	100
Kytömaa–Kyrölä	D	E4	200	200	120	120	100	100
Kyrölä–Purola								
läntinen raide	D	E4	200	200	120	120	100	100
Kyrölä–Purola keskiraide	D	E4	200	200	120	120	100	100
Kyrölä–Purola itäinen raide	D	E4	120	120	120	120	100	100
Purola–Riihimäki asema	D	E4	200	200	120	120	100	100
Kerava–Hakosilta								
Kytömaa–Hakosilta	D	E4	200	220	120	120	100	100
Kerava–Sköldvik								
Kytömaa–Sköldvik	D	D4	80	80	80	80	80	–
Olli–Porvoo²								
Kerava–Vuosaari	D	E4	–	–	80	80	80	80
Riihimäki–Tampere								
Riihimäki asema–Saaksjärvi	D	E4	200	200	120	120	100	100
Saaksjärvi–Tampere tavara								
läntinen raide	D	E4	200	200	120	120	100	100

Ylikuormiin liittyvät säännöt on laadittu erikseen kotimaisille ja läntisen yhdysliikenteen vaunuille sekä itäisen yhdysliikenteen vaunuille. Alla olevassa taulukossa 2.4 on esitetty suurimmat sallitut nopeudet kotimaisen ja läntisen yhdysliikenteen vaunuille.

Taulukko 2.4 22,5 tonnin radoilla noudatettavat rajoitukset mikäli junassa on yksittäisiä ylliraskaita vaunuja, joiden akselipaino on korkeintaan taulukon mukainen [8].

Päällysrakenneluokka	Suurin akselipaino kN	Nopeus km/h
A	225 ¹	20 ¹
B1	235	35
B2	235	50
C1, C2, D	235	80

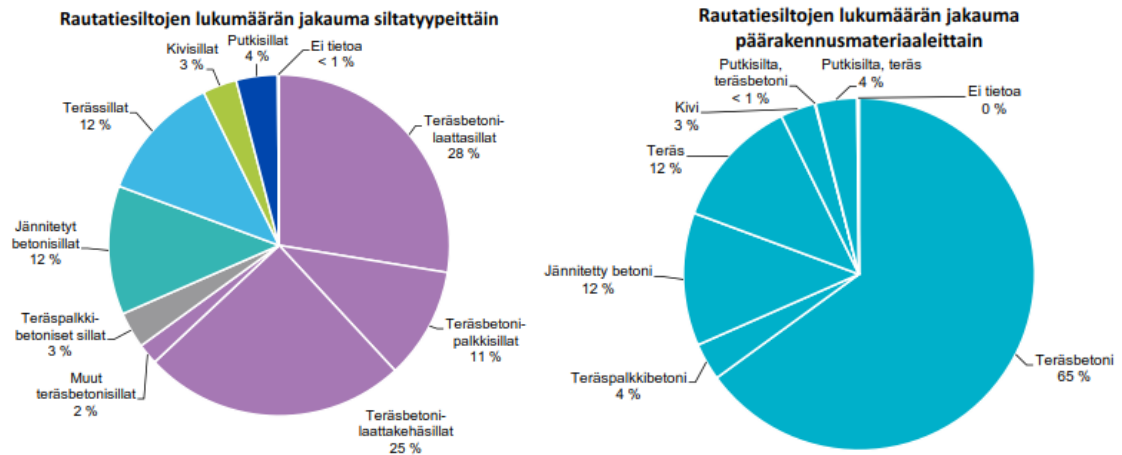
Päällysrakenneluokassa A sallittu akselipaino on vain 20 tonnia, joten yksittäiset sallitut akselipainot ovat vain 22,5 tonnia, kuten taulukossa 2.4 esitetään.

Itäisen yhdysliikenteen vaunuja koskevia sääntöjä on hieman enemmän. Päällysrakenneluokkien C ja D rataosuuksilla, joissa liikennöinti on sallittu enintään 250 kN akselipainoilla, saa itäisen yhdysliikenteen vaunuja, joiden akselipainot ovat yli 225 kN, mutta korkeintaan 250 kN kuljettaa 60 km/h nopeudella. Rataosuuksilla, joissa sallittu akselipaino on 225 kN ja päällysrakenneluokka C tai D, voi junassa olla yksittäisiä yli 225 kN, mutta enintään 235 kN akselipainoisia itäisen yhdysliikenteen vaunuja ja tällöinkin nopeusrajoitus on 60 km/h. Lisäksi joillekin tällaisille rataosuuksille voidaan luvanvaraisesti kuljettaa enintään 245 kN akselipainoisia itäisen yhdysliikenteen vaunuja, jolloin myös nopeusrajoitus on lupakohtainen. Päällysrakenneluokan B rataosuuksilla voi kuljettaa tilapäisesti luvanvaraisena erikoiskuljetuksena korkeintaan 235 kN akselipainoisia itäisen yhdysliikenteen vaunuja. B1-päällysrakenneluokan rataosuudella nopeusrajoitus on tällöin 35 km/h ja B2-luokan rataosuudella 50 km/h. [8]

2.3 Rautatiesillat Suomessa

Ylivoimaisesti yleisin materiaali käytössä olevissa rautatiesilloissa on betoni. Teräsbetonin ja jännitetyn betonin osuus rautatiesiltojen päärakennusmateriaalina oli vuoden 2017 alussa yhteensä 77 %. Tämän lisäksi ulkoisesti betonisillan näköisiä teräspalkkibetonisilltoja, joissa betonikannattajan sisään on valettu teräspalkit, on 4 %:n osuus. Toisena tulee terässillat, joiden osuus on 12 %. Tähän osuuteen sisältyy myös liittopalkkisillat, joissa myös betonilla on suuri rooli. Lisäksi teräksiset putkisillat on eritelty omaksi ryhmäkseen ja niiden osuus on 4 %. [19] Lyhytjänteisiä putkisilltoja tehdään teräksestä nykyään suhteellisen paljon, joten ne tulevat todennäköisesti pitämään osuutensa tai kasvattamaan sitä tulevaisuudessa. Sen sijaan hiemankin suurempia siltoja tehdään nykyään teräksestä vähän verrattuna betonisiin ja niissä betoni tulee todennäköisesti lisäämään osuuttaan edelleen. Teräspalkkibetonisilltojen osuus pienenee, koska sellaisia ei enää tehdä ja nykyiset tulevat jossain vaiheessa saamaan purkutuomion. Samoin tulee käymään kivisilloille,

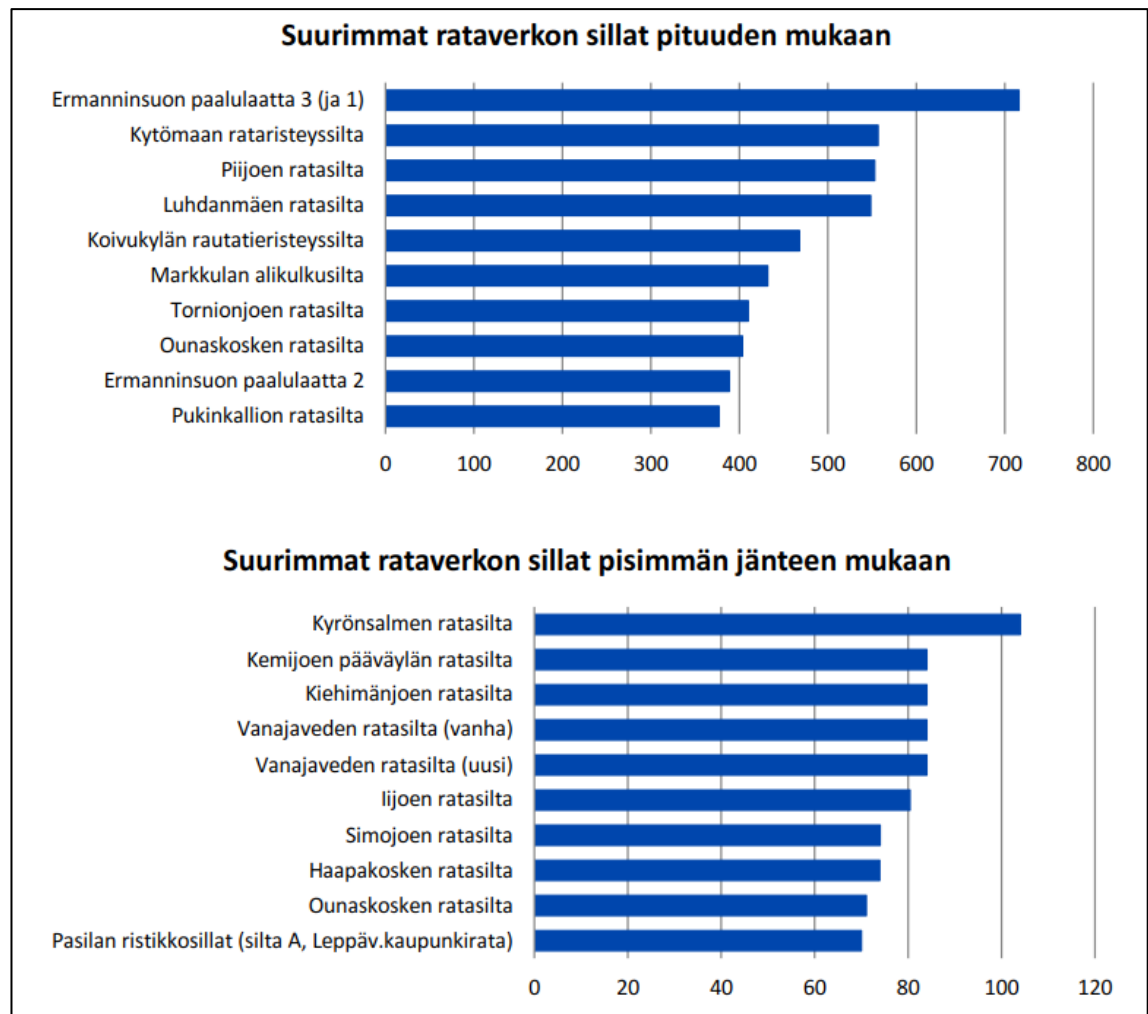
joita on kuitenkin edelleen 3 %:n osuus, niiden pitkistä iästä huolimatta. Puisia rautatie-siltoja ei Suomessa ole ollut käytössä pitkään aikaan. Alla kuvassa 2.8 on esitetty ympyrädiagrammit rautatiesilloista siltatyypeittäin sekä päärakennusmateriaaleittain.



Kuva 2.8 Rautatiesiltojen lukumäärän jakaumat siltatyypeittäin ja päärakennusmateriaaleittain vuoden 2017 alussa [19].

Siltatyypeistä yleisin on teräsbetoni-laattasilta, joiden osuus kaikista silloista on 28 %. Toiseksi yleisin on teräsbetoni-laattakehäsilta, joita on paljon varsinkin matkustaja-asemien alueilla niin sanottuina asematunneleina. Kaupunkialueilla ja taajamissa kehäsiltoja on myös muuten paljon kevyenliikenteen väyliä varten. Niiden osuus vuoden 2017 alussa oli 25 %. Seuraavaksi yleisimpiä ovat jännitetyt betonisillat, terässillat ja teräsbetoni-palkkisillat. Näistä teräsbetoni-palkkisillat tulevat menettämään osuuttaan, koska jännittämällä saadaan aikaan matalampi rakennekorkeus. Jännitettyjen siltojen osuus taas luonnollisesti kasvaa. Teräspalkki-betonisiltojen, terässiltojen ja kivisiltojen osuudet pienenevät, kuten jo materiaalien osalta todettiin.

Kokonaispituudeltaan ja jännemitoiltaan suomalaiset rautatiesillat eivät ole erityisen pitkiä. Tämä johtuu siitä, että Suomessa ei ole kovinkaan leveitä jokilaaksoja ylitettävänä eikä täällä ole niin suuria ja nopeasti kasvaneita kaupunkeja, jotka olisivat vaatineet kaupunkirakenteen ylittäviä maasiltoja. Kuvassa 2.9 on lueteltu kymmenen kokonaispituudeltaan ja jännemitaltaan pisintä rataverkon siltaa. Pisimmät sillat ovat pituudeltaan melko samanmittaisia eli yksittäisiä muita huomattavasti pidempiä rautatiesiltoja ei ole. Pisimmän sillan paikkaa tilastossa pitää Ermanninsuon paalulaatta, joka on kuitenkin pehmeikkösilta eli sen alittaa jonkinlainen ainakin kaksi metriä leveä vähintään eläinten kulkureittinä toimiva aukko, jolloin sillan määritelmä täyttyy. Liitteessä 2 on vielä esitetty rautatiesillat vuosikymmenittäin rakennusmateriaalin ja kokonaispituuden mukaan lajiteltuna.



Kuva 2.9 Suurimmat rataverkon sillat pituuden ja jännemitan mukaan [20].

2.3.1 Rautatiesiltojen kehitys

Rautateiden rakentaminen Suomessa alkoi vuonna 1857 Helsingin ja Hämeenlinnan välisen rautatien rakentamisella. Tällöin Suomessa ei ollut vielä juurikaan kokemusta sillanrakennuksesta. Muutamia kivi- ja terässilloja lukuun ottamatta Suomessa oli siihen asti rakennettu ainoastaan puusilloja. Rautatierakentamisen myötä jouduttiin kuitenkin miettimään uusia laskentaperusteita sekä rakenteita niin alusrakenteen kuin päällysrakenteenkin osalta, johtuen raideliikenteen verrattain suurista kuormista. Ensimmäisten rautatiesiltojen osalta päädyttiin silti edelleen valitsemaan materiaaliksi useimmiten puu. Pidempijänteiset sillat olivat tyypiltään erilaisia ansassilloja sekä paraabeliristikkosilloja. Pisin kaideansassillan jännemitta oli 17,8 m ja pisin ristikkosillan jännemitta oli 29 m. [21]

Vuoteen 1874 mennessä oli rakennettu vasta muutamat suurimmat rautatiesillat teräksestä. Terässillat olivat tyypiltään esimerkiksi levypalkkisilloja ja kaideansaristikoita, joista Riihimäki-Pietari radalla Kymijoen sillan jännemitta oli 63,8 m. Puun laajamittainen käyttö noihin hetkiin asti oli johtunut puun edullisuudesta. Pian kuitenkin huomattiin

puun huono soveltuvuus rautatiesiltoihin, koska niihin aiheutui kalliita korjauksia ja pitkällä aikajänteellä rakentamisessa saadut säästöt vaihtuivatkin ylimääräisiksi kustannuksiksi. Tällöin teräksen suosio rautatiesiltojen rakennusmateriaalina alkoi nousta. Vuosina 1875-1879 lähes kaikki Riihimäki-Pietari-radnan puusilloista korvattiin teräksisillä silloilla ja Turku-Tampere-Hämeenlinna-radalle (1874-1876) valittiin kaikkien siltojen rakennusmateriaaliksi teräs. [21]



Kuva 2.10 Vuonna 1900 valmistunut Bobäckinpuron ratasilta Kirkkonummella [22].

1900-luvun alussa kiven osuus siltojen päällysrakenteena oli olematonta. Vuoteen 1912 mennessä oli vain 12 kappaletta kiviholveja, joiden jännemitat olivat 3-6 metriä. Vuonna 1915 rautatiehallitus antoi kuitenkin kehotuksen, jossa kivi- betoni- ja rautabetonisilloille tuli antaa etusija, mikäli paikalliset olosuhteet olivat kivirakenteille suotuisat. Tästä johtuen kivi- ja betonisiltojen lukumäärä lähti selvään nousuun ja vuoteen 1937 mennessä niitä oli rautateilla jo 104 kappaletta. Näistä suuri osa oli edelleen lyhyitä 3-4 metrin aukkoisia holveja, mutta mukaan mahtui joitakin pidempiäkin siltoja, kuten vapaa-aukoltaan 20 metrinen Löytöojan holvisilta Jänisjärvi-Leskelä radalla. Yli kuuden metrin aukolla varustettuja siltoja oli yhteensä 31 kappaletta. Myös muutamia betonisiltoja alkoi ilmaantua heti kehotuksen jälkeen. Suurin osa betonisilloistakin oli pieniä holveja, mutta esimerkiksi Vapaussodassa tuhoutunut Kokemäen joen ylittävä Pahakosken teräksinen ristikkorakenteinen ratasilta korvattiin teräsbetonisella kaksoisholvilla, jonka vapaat aukot olivat 42,2 + 42,2 m. Pahakosken siltaan valittiin materiaaliksi betoni, koska silta täytyi saada uudelleen käyttöön nopeasti. Teräsbetoniin käyttö suurissa silloissa koki kuitenkin takaiskun, kun vuonna 1923 valmistuneen kuvassa 2.11 näkyvän Kymijoen ylittävän Korian sillan (13,5 + 13,5 + 70 + 13,5 + 13,5 m) rakennustöissä sattui onnettomuus, jossa

valun aikana tapahtui osittainen telineen sortuma aiheuttaen siltaan kiertymiä ja siirtymiä, joista aiheutui suuritöisiä korjauksia. Niinpä 1920- ja 1930-lukujen suuremmat sillat rakennettiin edelleen teräksestä. Terässilloille laadittiin myös tyyppisuunnitelmia, jotka kattoivat levypalkki- ja ristikkosillat jännemitta-alueella 4-84 m. Vuoteen 1937 mennessä oli käytössä jo 79 normaalipiirustusta. Normaalipiirustusten myötä ristikkosilloissa siirryttiin kokonaan kaideansaristikoihin, joista suurin oli Ounaskosken ratasilta jännemitoilla 35 + 35 + 70 + 70 + 70 + 35 m. [21]



Kuva 2.11 Kymijoen ylittävät Korian ratasillat. Etualalla 1920-luvun teräsbetoninen holvisilta ja takana vanha teräsristikkosilta 1870-luvulta, joka toimii nykyään kevyen liikenteen käytössä [23].

1940-luvulla siltojen kehitystä ei juuri tapahtunut toisen maailmansodan vuoksi. Sodan aikana tuhoutui kaikkiaan 240 rumpua ja siltaa. Tuhoutuneiden siltojen tilalle rakennettiin ensin väliaikaisia pukkisilloja puusta, kaikkiaan noin 200 kappaletta. Niiden avulla ratoja saatiin liikennöitäväan kuntoon, mutta nopeutta jouduttiin rajoittamaan 10-15 kilometriin tunnissa ja junissa käytettiin vain kevyttä kalustoa. Varsinaisen siltojen jälleenrakentamisen voidaan katsoa alkaneen vuonna 1949 ja 1950-luvun alussa rakennettiin Pohjois-Suomen suuria siltoja uudelleen. Moni näistä tehtiin kunnostamalla vanhan tuhotun sillan vielä käyttökelpoisia osia, koska materiaaleista oli pulaa. Näin rakennettu silta on esimerkiksi Ounaskosken silta, jossa on kaksi 84 metrin ja kaksi 70 metrin jännettä. Viimeiset Pohjois-Suomen väliaikaiset sillat saatiin poistettua vuonna 1954. [21]

1900-luvun loppuvuosikymmeninä rakennettiin muutamia merkittäviä raideyhteyksiä, joissa myös sillanrakennustaito nousi tärkeään rooliin. Mainittakoon näistä Tampere-Parikano-Seinäjoki-rata, joka rakennettiin vuosina 1962-1971. Hankkeiden yhteydessä päästiin käyttämään myös uutta siltatyyppeä, jännitettyä betonisiltaa. Ensimmäiset jännitetyt betonisillat rakennettiin rautateille vuonna 1959. Ne olivat jännemitaltaan vaatimattomia, Orimattilan rautatiesilta 16 m ja Porlammin rautatiesilta 20 m. Näillä jännemitoilla ei saatu vielä parasta etua jännityksestä. 1970-luvulla jännitettyjä rautatiesiltoja rakennettiin jo hieman enemmän, joista Markkulan alikulkusilta (kuvassa 2.12) on merkittävin. Sen kokonaispituus on 432m ja jänteet (31,55 + 11 x 32 + 31,55 m). Sillan päällysrakenne koostuu kolmestatoista erillisestä jännitetystä laattapalkista. [21]



Kuva 2.12 Markkulan alikulkusilta [22].

Jännitetyt rautatiesillat olivat siis vielä 1970-luvulla kokonaan jännitettyjä eli niissä ei sallittu betonin halkeilua. 1980-luvulla myös rautatiesilloissa alettiin siirtyä osittain jännitettyihin ratkaisuihin, jolloin rakenteista saatiin jatkuvia ja näin myös kustannustehokkaita. Ensimmäinen osittain jännitetty rautatiesilta on Porin Tahkoluodon radan silta ja pisin jännitetty jänne löytyy vuonna 1993 rakennetusta Halikonjoen ratasillasta, jossa pääjänne on 50 m. Toinen uusi siltatyyppeä, joka tuli Suomen rautateilla käyttöön vasta 1990-luvulla, on liittorakenteinen silta, jossa leveälaippaiset teräspalkit ovat betonirakenteen sisässä kokonaan tai alalappaa lukuun ottamatta. Tällaisia siltoja rakennettiin jo 1900-luvun alkuvuosikymmeninä, mutta tuolloin kantavaksi rakenteeksi laskettiin vain teräspalkit. Suomen ja tietävästi Pohjoismaiden ainoa ”tavanomainen” liittopalkkisilta, jossa teräspalkit ja betonilaatta on yhdistetty teräspalkin ylälaipan liittimillä, on kuvan 2.13 Lassinkosken ratasilta Halikossa. Se on rakennettu vuonna 1988. [21]



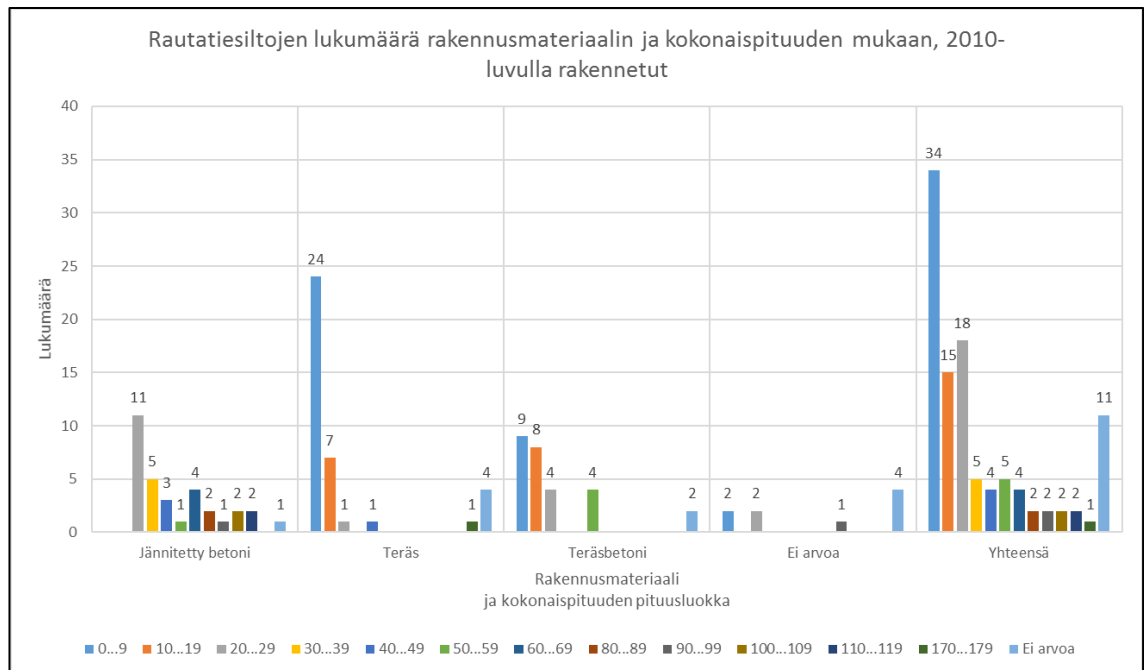
Kuva 2.13 Lassinkosken ratalilta [22].

2010-luvun rautatiesillat ovat taitorakennerekisterissä tehdyn haun perusteella enimmäkseen betonisia. Suurimmat sillat ovat enimmäkseen jännitettyjä betonisilloja. Pisin silta on kuitenkin teräksinen vuonna 2011 valmistunut kuvan 2.14 Tikkalansaaren nostosilta, jonka nostettava osa on teräksinen ristikko ja jännemitaltaan 50 m. Seuraavaksi pisin terässilta on vuonna 2013 valmistunut Osolankosken ratalilta, joka on tyypiltään teräksinen kaukalopalkkisilta ja jännemitta on 21 m, joten Tikkalansaaren nostosilta on jännemitaltaan erityisen pitkä terässilta 2010-luvulla. Tästä voidaan päätellä, että teräs ei ole tällä hetkellä kilpailukykyinen pitkissä rautatiesilloissa nostosilloja lukuun ottamatta, joissa se on valittava keveytensä vuoksi. Muuten 2010-luvun terässillat ovat lähinnä lyhyitä palkki- ja putkisilloja. Pisin betonisilta on vuonna 2010 valmistunut Vantaanjoen ratalilta, joka on tyypiltään Jännitetty betoninen jatkuva ulokepalkkisilta ja jännemitat ovat $2 + 32 + 40 + 32 + 2$ m. Betonisilloilla seuraavaksi pisin jännemitta on 37,5 m, joten Vantaanjoen ratalilta ei ole mitenkään poikkeuksellisen pitkä. Betonisilloja on paljon ja niiden jännemitat vaihtelevat melko tasaisesti aina lyhkäisiin laattasilloihin asti, joista lyhin on jännemitaltaan 2,46 m. [21]



Kuva 2.14 Tikkalansaaren nostosilta Kuopiossa [24].

Alla kuvassa 2.15 vielä taitorakennerekisteristä haettu koonti 2010-luvun rautatiesilloista rakennusmateriaalin ja kannen pituuden mukaan. Taitorakennerekisterissä osalla silloista ei ole metatietokannan kaikissa kohdissa arvoa, joten siltoja menee kohtuullisen paljon kohtaan ”Ei arvoa”. Muilta vuosikymmeniltä vastaavat koonnit löytyvät liitteestä 2.



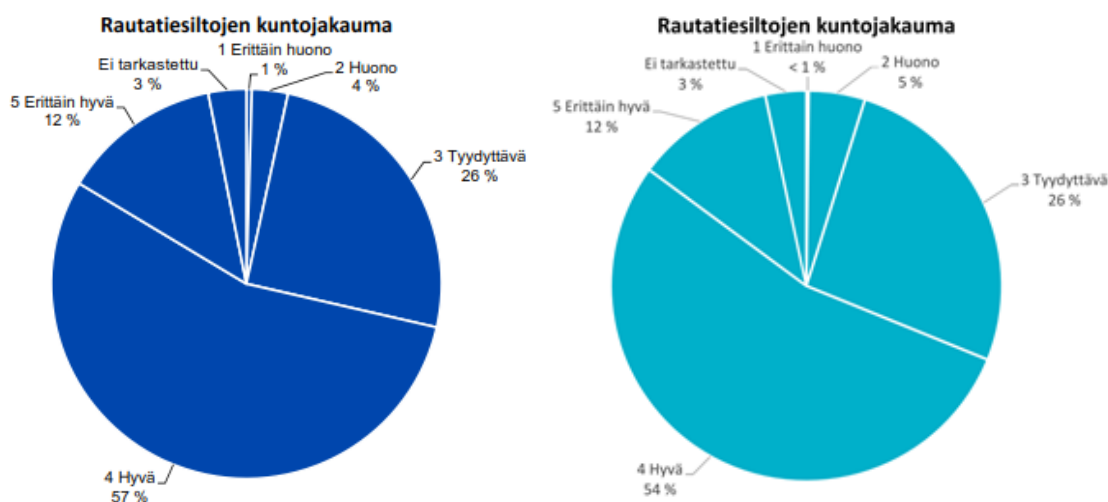
Kuva 2.15 Rautatiesiltojen lukumäärä rakennusmateriaalin ja kannen pituuden mukaan 2010-luvulla [22].

2.3.2 Rautatiesiltojen kunto nyt ja tulevaisuudessa

Siltojen kunto on esitetty viisiportaisen kuntoluokituksen avulla. Eri kuntoluokat tarkoittavat ylläpidon näkökulmasta karkeasti seuraavaa [19]:

- Erittäin hyvä – ei ylläpitotarpeita
- Hyvä – vähäistä kunnostusta
- Tyydyttävä – peruskorjaus tulossa
- Huono – peruskorjaus nyt
- Erittäin huono – peruskorjaus myöhässä

Kuvassa 2.16 on esitetty rataverkon siltojen kuntojakauman tilanne sekä vuoden 2017, että vuoden 2018 alussa. Kuvasta voidaan huomata, että huonon kuntoluokan saaneiden siltojen määrä on noussut noin yhdellä prosenttiyksiköllä ja hyvän kuntoluokan saaneiden siltojen määrä taas laskenut noin kolmella prosenttiyksiköllä vuoden aikana. Erittäin huonon kuntoluokan omaavien siltojen määrä on ilmeisesti laskenut hieman, koska prosenttiyksikön eteen on lisätty pienempi kuin merkki. Kokonaisuudessaan tilanne on hieman heikentynyt, jos lasketaan taulukoista 2.5 ja 2.6 kuntoluokkien keskiarvo. Vuoden 2017 alun kuntoluokan keskiarvoksi saadaan taulukosta 2.5 noin 3,80 ja taulukosta 2.6 saadaan vuoden 2018 alun kuntoluokan keskiarvo, joka on hieman alhaisempi, noin 3,74. Ero on hyvin pieni ja kuntoluokan keskiarvo on näiden lukujen läheisyydessä myös muutaman vuoden vanhemmissa *Liikenneviraston sillat* tilastokatsauksissa, joten voidaan päätellä, että tällä hetkellä on pystytty vakiinnuttamaan siltojen kunto melko hyvin.



Kuva 2.16 Rautatiesiltojen kuntojakauma 1.1.2017 (tumman sininen) [19] ja 1.1.2018 (vaalean sininen) [20].

Taulukko 2.5 Rautatiesiltojen kuntoluokan jakauma kunnossapitoalueittain 1.1.2017 [19].

Rautatiesiltojen kuntoluokan jakauma Kp-alueittain

Kp-alue	Kuntoluokka						Yhteensä
	5	4	3	2	1	Ei tarkastettu	
1 Pääkaupunkiseutu	107	177	46	11		12	353
2 Lounaisrannikko	2	137	42	5		5	191
3 (Riihimäki) - Seinäjoki	64	146	71	12	2	15	310
4 Rauma/Pori - (Pieksämäki)	1	136	75	4	1	6	223
5 Haapamäen tähti	5	61	57	12	2	3	140
6 Savon rata	40	83	43	7	1	1	175
7 Karjalan rata	16	188	41	4	1	1	251
8 Ylä-Savo	2	91	71	4		2	170
9 Pohjanmaan rata	61	46	8	1	1	27	144
10 Keski-Suomi		48	13	2		1	64
11 (Oulu) - Kainuu	6	91	46		1		144
12 (Oulu) - Lappi	16	126	95	10	2	3	252
Yhteensä	320	1330	608	72	11	76	2417

5 = Erittäin hyvä, 4 = Hyvä, 3 = Tyydyttävä, 2 = Huono, 1 = Erittäin huono

Taulukko 2.6 Rautatiesiltojen kuntoluokan jakauma kunnossapitoalueittain 1.1.2018 [20].

Rataverkon siltojen kuntoluokan jakauma Kp-alueittain

Kp-alue	Kuntoluokka						Yhteensä
	5	4	3	2	1	Ei tarkastettu	
1 Pääkaupunkiseutu	106	184	55	13		22	380
2 Lounaisrannikko	1	152	48	12		5	218
3 (Riihimäki) - Seinäjoki	50	142	89	26	1	13	321
4 Rauma/Pori - (Pieksämäki)		132	95	12	1	6	246
5 Haapamäen tähti	4	66	50	17		2	139
6 Savon rata	36	88	44	11	1	1	181
7 Karjalan rata	16	187	48	4		3	258
8 Ylä-Savo	2	94	69	5		4	174
9 Pohjanmaan rata	56	49	3	2		25	135
10 Keski-Suomi		45	19	2		1	67
11 (Oulu) - Kainuu	5	88	50				143
12 (Oulu) - Lappi	13	131	92	13	2	3	254
Yhteensä	289	1358	662	117	5	85	2516

5 = Erittäin hyvä, 4 = Hyvä, 3 = Tyydyttävä, 2 = Huono, 1 = Erittäin huono

Vaikka tilanne siltojen kunnan suhteen on melko stabiili, niin ei voida puhua, että tilanne on hyvä, koska erittäin huonoon kuntoluokkaan lukeutuvia siltoja esiintyy ja huonoon kuntoluokkaan on joutunut yhä useampi silta. Tämä tarkoittaa sitä, että silloissa on korjausvelkaa, jota ei saada pois ilman lisärahoitusta. Koko rataverkon korjausvelan arvioidaan oleva 1,1 miljardia euroa [25]. Vuonna 2017 on uutisoitu, että korjausvelan kasvu yleisesti kaikissa liikenneverkoissa on saatu taitettua 600 miljoonan lisärahoituksen turvin, joka oli kohdistettu vuosille 2016-2018 [13]. Tämä rahoitus on siis käytetty ja korjausvelan voidaan olettaa lähtevän nousuun, mikäli nykyistä rahoitustasoa ei saada nostettua, koska siltojen määrä myös jatkaa koko ajan kasvuaan, jolloin samalla rahalla tulisi pystyä pitämään useampi silta kunnossa.

Vuonna 2017 Liikenne- ja viestintäministeriö asetti parlamentaarisen työryhmän arvioimaan liikenneverkon rahoitusta. Päällimmäisinä asioina työryhmän loppuraportissa tulivat esiin 12-vuotisen valtakunnallisen liikennejärjestelmäsuunnitelman laatiminen sekä

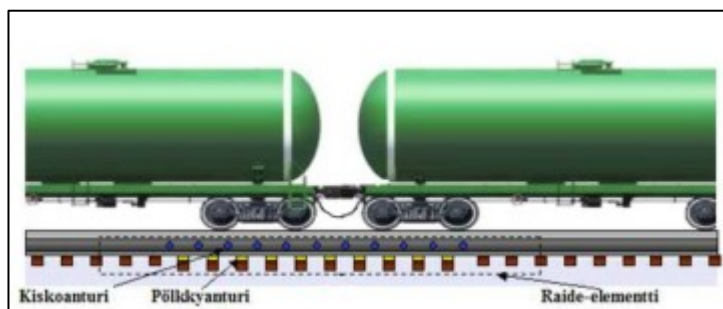
pitkäjänteisen ja riittävä rahoitustason nosto sekä perusväylänpidon hankkeissa, että kehittämishankkeissa. Lisäksi ehdotettiin talousarviorahoituksen lisäksi muiden rahoitusmahdollisuuksien hyödyntämistä. [13] Kyseisillä toimenpiteillä siltojen kuntoa voidaan parantaa, mutta nykyisellä tavalla siltojen kunto tulee siis heikkenemään. Siltojen kuten myös muun rataverkon tila tulevaisuudessa riippuu paljon seuraavien hallitusten poliittisista päätöksistä. Työryhmän painottama 12-vuotinen liikennejärjestelmäsuunnitelma auttaisi ennakoimaan huomattavasti infran kehittymistä, kun nyt sitä on lähes mahdotonta ennustaa, koska investoinnit perustuvat usein lyhytjänteiseen politiikkaan.

3. RADAN KUORMITUSTA MITTAAVA JÄRJESTELMÄ

Tässä työssä hyödynnettävä radan kuormitusta mittaava järjestelmä on tarkoitettu pääasiassa kunnossapidon apuvälineeksi. Järjestelmä tutkii kaluston pyöräkertojen vaurioita ja antaa automaattisesti ilmoituksen liikenteenohjaukseen tai kaluston kunnossapitoon, mikäli havaitsee raja-arvon ylittävän pyöräkerran. Järjestelmään on liitetty myös RFID-tunnistus, jolla vika saadaan identifioitua heti oikeaan vaunuun ja akseliin [26]. Tässä luvussa kerrotaan lyhyesti järjestelmästä ja sen toiminnasta.

3.1 Pyörävoimailmaisimet

Suomessa tällä hetkellä käytössä olevat pyörävoimailmaisimet ovat Tamtron Oy:n valmistamia Tamtron Scalex Wild-mittausjärjestelmiä. Järjestelmä on valittu koekäytön perusteella, jossa oli mukana mittausjärjestelmät kolmelta valmistajalta [27]. Pyörävoimailmaisimien on asennettu raiteeseen ja se koostuu anturoiduista ratapölkkyistä ja kiskoista. Pyörävoimailmaisimet tunnistavat pyöräkerrat ja mittaavat pyöräkerrasta aiheutuvat staattiset ja dynaamiset kuormat kiskon pinnassa. Pyöräkerran tunnistus tapahtuu joko pyörästömittojen tai RFID-lukijan avulla. Kuormien mittaus perustuu voima-antureihin [26]. Alla periaatekuva pyörävoimailmaisimesta.



Kuva 3.1 Periaatekuva pyörävoimailmaisimesta [26].

Järjestelmään tallentuu kaikki dynaamiset piikkiarvot, joiden avulla järjestelmä havainnoi pyörän kulkukehän vikoja kuten lovia. Staattisen arvon perusteella taas huomataan kuormausvirheet kuten ylikuorma [8]. Laite ilmoittaa automaattisesti myös vaunukohtaiset painot, jolloin niillä saadaan helposti tietoa kiskoilla liikkuvista tonnimääristä kokonaisuudessaan ja kuljetettavien tuotteiden tai raaka-aineiden mukaan. Pyörävoimailmaisimet antavat luotettavia tuloksia junan vauhdin ollessa 10-250 km/h [28]. Näytteenottotajuus on suuri ja pyörä ehtii tehdä kaksi kokonaista pyörähdystä mittalaitteen matkalla.

Tässä työssä ei perehdytä juuri kaluston ja radan kuntoon liittyviin asioihin, mutta todetakaan, että pyörävoimailmaisimet ovat säästäneet huomattavasti resursseja pyörävikojen

havainnoinnissa ja havainnoinnista on tullut tasapuolista eli eri toimenpiteille on määritetty raja-arvot, joiden perusteella toimenpiteisiin ryhdytään. Aikaisemmin kalustovauriot ovat olleet tarkastajan silmämääräisiä tai lovipyörien tapauksessa jopa kuulon perusteella tehtyjä arvioita. Oikea-aikaisella vaurioihin puuttumisella on saatu myös pidennettyä esimerkiksi pyörien käyttöikää, kun vaaditut korjaukset on tehty ajallaan [27]. Alla valokuva käytössä olevasta pyörävoimailmaisimesta.



Kuva 3.2 Tamtron pyörävoimailmaisimien [27].

Tässä työssä hyödynnetään ainoastaan pyörävoimailmaisimen antamia staattisia kuormia, koska tutkimus keskittyy ainoastaan staattisiin kuormavaikutuksiin. Mittalaitteiden antamia dynaamisia piikkiarvoja voitaisiin kuitenkin jatkossa käyttää tutkimukseen, jossa määritettäisiin raideliikenteen siltojen dynaamiseen lisäkertoimeen liittyviä lähtötietoja.

3.2 Kaluston tunnistava RFID-järjestelmä

RFID eli *Radio Frequency Identification* tarkoittaa yleisesti tekniikkaa, joka havainnoi, tunnistaa ja yksilöi asioita radioaaltojen avulla automaattisesti [29]. RFID-tekniikka soveltuu kaluston tunnistamiseen hyvin, koska kohteiden luku onnistuu kaukaa ja nopeasti. Lisäksi RFID-tunnisteet kestävät koteloituina koviakin räsituksia jopa kymmeniä vuosia [11], joten ne ovat ylläpidon kannalta vaivattomia. RFID-tunnisteet on kiinnitetty vaunuihin ja vetureihin. Niihin on tallennettu vaunun tai veturin yksilölliset tunnistetiedot. RFID-lukijat, jotka sijaitsevat pyörävoimailmaisimien ohessa radan vieressä, lukevat RFID-tunnisteesta siihen tallennettuja tietoja ja lähettävät tiedot edelleen VALTSU-jär-

jestelmään. VALTSU-järjestelmässä tietoon yhdistetään edelleen muiden laitteiden keräämää tietoa, jonka jälkeen tieto lähtee esimerkiksi pyörävoiman raja-arvojen ylittyessä vielä kaluston kunnossapitoon [30]. Alla kuva radan varteen asennetusta RFID-lukijalaitteesta.



Kuva 3.3 RFID-antenni ja kytkentäkotelo [26].

3.3 Mittauspisteiden sijainti

Pyörävoimailmaisimien sijoittelussa on pyritty siihen, että liikennöivä kalusto ylittää vähintään yhden mittalaitteen tavanomaisilla reiteillään [8]. Lisäksi sijainnin on oltava sellainen, että juna voidaan pysäyttää jo seuraavalle liikennepaikalle mahdollisen hälytyksen sattuessa [31]. Tätä työtä tehdessä pyörävoimailmaisimien dataa saatiin yhteensä 16:sta mittauspisteestä, mutta *Rautateiden verkkoselostus 2019* liikkuvan kaluston valvontalaitteet 2019 karttaan (kuva 3.4) on merkitty vielä yksi pyörävoimailmaisin lisää Utin kohdalle. Kyseinen laite on ensimmäinen Suomeen asennettu pyörävoimailmaisin ja testiyksilö [31], joten se on ilmeisesti jätetty yleisen järjestelmän ulkopuolelle. Raja-asemien pyörävoimailmaisimien yhteydessä taas ei valitettavasti ole RFID-lukijoita, mutta toisaalta niissä suuri osa liikenteestä on venäläistä kalustoa, joissa ei ole RFID-lähetintäkään antamassa tietoja. Kartassa näkyy myös kaikki muut liikkuvan kaluston vikoja havainnoivat laitteistot.

4. RAIDELIIKENTEN KUORMAVAIKUTUKSET

Tässä luvussa käydään läpi historiallinen katsaus Suomen rataverkon liikennekuormiin ja niitä kuvaaviin kuormakaavioihin. Lisäksi esitetään kuormakaaviota vertailevia kuvaajia ja kerrotaan nykyisin käytössä olevan LM71-kaavion määräyksestä ja sen saamista kriittistä, jonka vuoksi kaavioille on tehty verifiointeja myöhemmin. Lopuksi kerrotaan vielä ratojen ja kaluston luokittelun perusteista.

4.1 Kuormituksen ja kuormitusohjeiden kehittyminen

Ensimmäisten rautatiesiltojen suunnittelun perustana käytetyistä kuormista ei ole tarkkaa tietoa. 1860-luvulla tilattiin ensimmäiset terässillat Englannista ja tämän jälkeen siltoja tilattiin myös Belgiasta ja Saksasta. Ulkomailta tilattujen siltojen suunnitteluperusteina lienee käytetty näiden maiden omia määräyksiä ja kuormitusohjeita. Ensimmäisenä suomalaisena kuormakaaviona pidetään vuoden 1899 kaavioksi nimettyä kaaviota, joka koostui 8-12 tonnin painoisista akseleista. Kyseistä kaaviota on käytetty kuitenkin aiemminkin ainakin vuosina 1879 – 1883 rakennetun Tampere – Vaasa-radon siltojen suunnittelussa. Kyseisten siltojen kuormana käytettiin kaavion ohella myös tasaista kuormaa 4,3 tonnia metriä kohti. Vuoden 1899 kaavion kuormat nousivat siten, että Oulu – Tornio sillat suunniteltiin jo 9-15 tonnin akselipainoille ja vuosina 1905 – 1910 rakennettujen Parikkala – Savonlinna, Rovaniemi – Kemijärvi ja Joensuu – Lieksa ratojen yhteydessä käytettiin jo pienimpinä akselipainoina 12 tonnia. [21]

Taulukko 4.1 1800- ja 1900-lukujen taitteen kuormakaaviot [32].

Nimi/ Vuosi/ Mitoitus- menetelmä	Huom.!	Dynaaminen suurennuskerroin	Osavarmuusluku
V. 1899 /68/ Sallitut jännitykset	Vetureita ja tendereitä 2 paria	1,5	-
<p>Diagram showing axle loads and spacings for V. 1899 /68/:</p> <ul style="list-style-type: none"> Veturi: Three axles with 120 kN each, spaced 2.47, 1.84, and 1.84. Tenderi: Three axles with 80 kN each, spaced 3.60, 1.63, and 1.63. Vaunu: Two axles with 80 kN each, spaced 1.95 and 1.95. Vaunu: Two axles with 80 kN each, spaced 3.65 and 1.95. Vaunu: Two axles with 80 kN each, spaced 1.95 and 1.95. 			
V. 1902 /57/ Sallitut jännitykset	Vetureita ja tendereitä 2 paria	1,5	-
<p>Diagram showing axle loads and spacings for V. 1902 /57/:</p> <ul style="list-style-type: none"> Veturi ja tenderi: Four axles with 94 kN, 94 kN, 150 kN, and 150 kN, spaced 1.00, 1.50, 1.85, and 2.40. Tenderi: Two axles with 130 kN each, spaced 2.50 and 2.70. Vaunu: Two axles with 100 kN each, spaced 1.60 and 2.05. Vaunu: Two axles with 100 kN each, spaced 3.60 and 2.05. Vaunu: Two axles with 100 kN each, spaced 2.85 and 2.05. 			
V. 1903 /57/ Sallitut jännitykset	Vetureita ja tendereitä 2 paria	1,5	-
<p>Diagram showing axle loads and spacings for V. 1903 /57/:</p> <ul style="list-style-type: none"> Veturi: Four axles with 150 kN each, spaced 2.50, 1.30, 1.30, and 1.30. Tenderi: Three axles with 120 kN each, spaced 2.00, 2.00, and 1.60. Vaunu: Two axles with 120 kN each, spaced 1.60 and 1.85. Vaunu: Two axles with 120 kN each, spaced 1.65 and 3.30. Vaunu: Two axles with 120 kN each, spaced 1.65 and 1.65. 			

Suomen ensimmäinen virallinen normi rautatiesiltojen laskentaan julkaistiin vuonna 1910. Normi sisälsi myös uuden kuormakaavion, jossa oli 15 tonnin akselipainoryhmä kuvaamassa jo melko raskasta veturia. Tämän lisäksi pituus- ja poikkikannattimet tuli tarkastaa kolmella 17 tonnin tai yhdellä 20 tonnin akselilla. Kyseisessä normissa esitettiin ohjeita myös muille kuormille, kuten tuuli- ja jarrukuormille. Lisäksi se sisälsi rakenteiden mekaniikkaan liittyvää ohjeistusta. Kuormakaavio vaihtui kuitenkin jo vuonna 1914 Venäjän rautateiden kuormakaavioon silloisen yhdysliikenteen ja muutenkin alati nousevien kalustokuormien vuoksi. Kyseinen kaavio oli yli 40 % suurempi vaikutuksiltaan kuin vuoden 1910 kaavio ja se kattoi normaaliliikenteen aina 1990-luvun lopulle asti. Vuosituhannen vaihteessa 7 % rautatiesilloista oli rakennettu vuoden 1914 kuormakaavion mukaan. [21]

Taulukko 4.2 Vuosien 1910 ja 1914 kuormakaaviot [32].

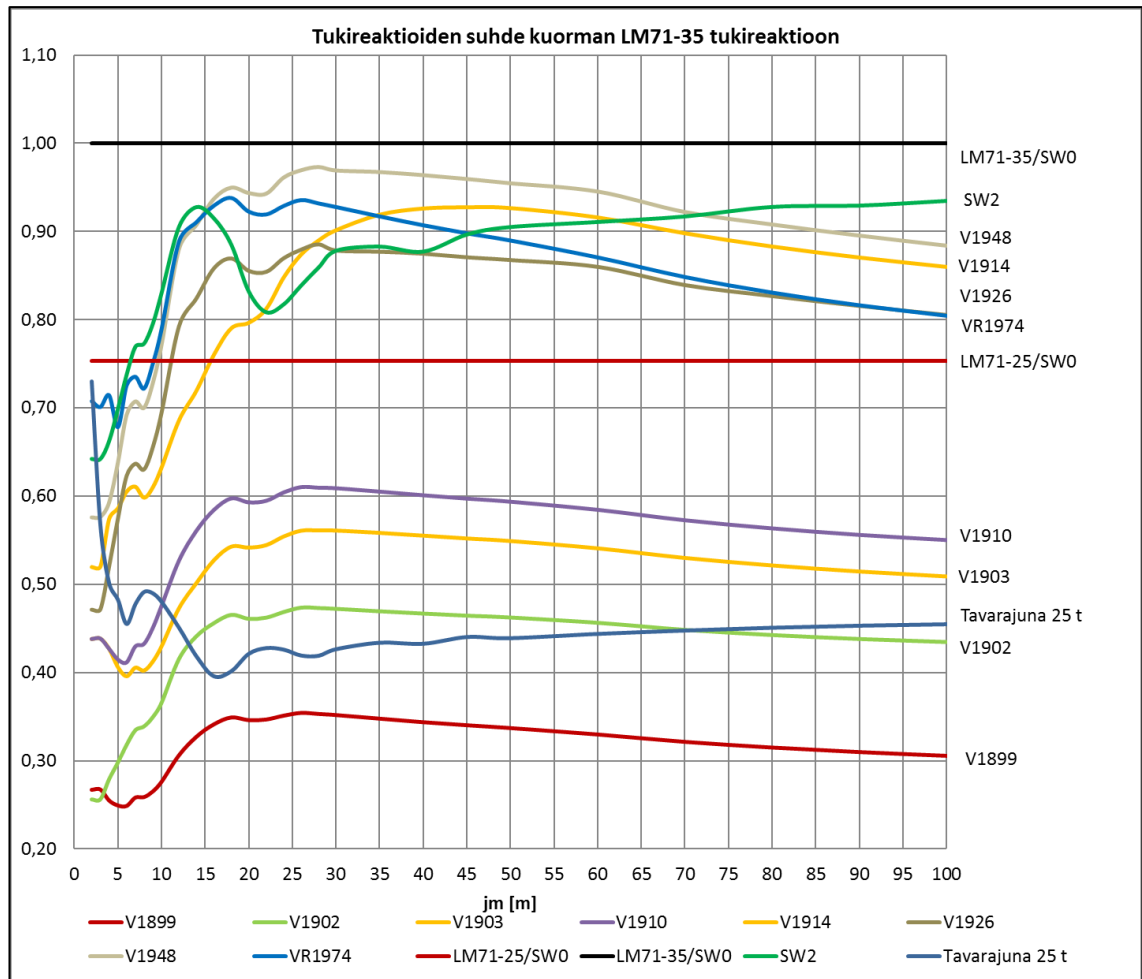
V. 1910 /62/ Sallitut jännitykset	Vetureita ja tendereitä 2 paria	1,5	-
<p>The diagram for V. 1910 shows axle weights of 150 kN for locomotives and 120 kN for wagons. Spacings between axles are 2,00, 1,30, 1,30, 1,30, 2,00, 1,50, 1,60, 1,60, 1,60, 1,60, 3,20, 1,60, 1,60, 3,20, 1,60, 1,60, 3,20, 1,60.</p>			
V. 1914 /63/ Sallitut jännitykset	Vetureita ja tendereitä 2 paria	1,5	-
<p>The diagram for V. 1914 shows axle weights of 200 kN for locomotives and 140 kN for tenders, and 120 kN for wagons. Spacings between axles are 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 2,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 3,00, 1,50, 3,00, 1,50, 3,00, 1,50, 3,00, 1,50, 1,50.</p>			

Vuonna 1926 julkaistiin ”Normaalimääräyksiä rautaisten rautatiesiltojen laskemisesta”, joka sisälsi ohjeita teräsiltojen kuormituksesta, lisävoimista, sallituista jännityksistä ja mitoituksesta. Julkaisu sisälsi kuormakaavion, jossa veturin akselipainoja laskettiin vuoden 1914 kaavion 20 tonnista 18 tonniin. Veturiin tuli kuitenkin seitsemän akselia aieman viiden sijaan. Tenderiä ei enää tässä kaaviossa ollut ja vaunujen akselipainot nousivat myös 18 tonniin aiempien 14 ja 12 tonnin akselien sijaan. Tämä kaavio antoi kuitenkin lyhyillä jännemitoilla pienempiä kuormavaikutuksia kuin vuoden 1914 kaavio, johtuen kevyemmästä veturista. Vasta yli 15 metrin jänteillä vaikutukset olivat suuremmat vanhaan verrattuna. Veturin keventäminen kuormakaaviossa oli erikoinen ratkaisu, koska veturien painot jatkoivat nousuaan 1930- ja 1940-luvuilla. Sotien jälkeen alettiin myös käyttää raskasta venäläistä vaunukalustoa, joten kuormitusmääräykset uusittiin jälleen vuonna 1948. [21]

Taulukko 4.3 Vuoden 1926 kuormakaavio [32].

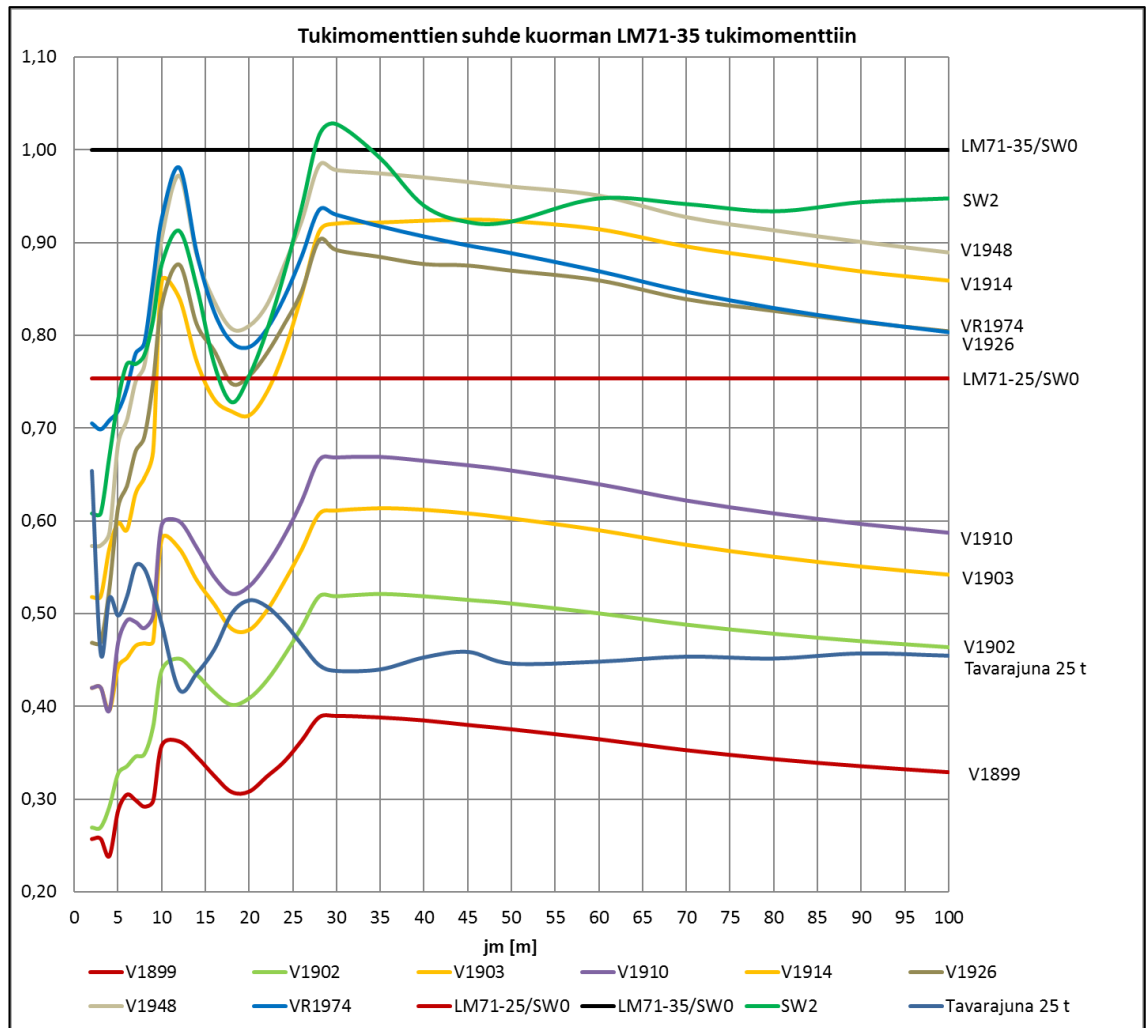
V. 1926 /64/ Sallitut jännitykset	Vetureita ja tendereitä 2 paria	1,34-1,66	-
<p>The diagram for V. 1926 shows axle weights of 180 kN for locomotives and tenders, and 180 kN for wagons. Spacings between axles are 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 4,50, 1,50, 1,50, 1,50, 1,50, 4,50, 1,50, 1,50.</p>			

Vuoden 1948 kuormakaaviossa veturi pysyi seitsemän akselisena, mutta akselipainot palautettiin 18 tonnista takaisin 20 tonniin. Vaunujen akselit korvattiin uudessa kaaviossa nauhakuormalla, jonka suuruus oli 7,5 tonnia metriä kohti. Akselikuormia, nauhakuormaa ja tyhjiä vaunuja voitiin sijoitella epäedullisimmalla tavalla. Lisäksi sillat tuli tarkastaa neljälle 22 tonnin akselille. Seuraava kuormakaavio VR-74 julkaistiin nimensä mukaisesti vasta vuonna 1974 ja se oli samanlainen vuoden 1948 kuormakaavion kanssa lukuun ottamatta vaihtoehtoista neljän akselin ryhmää, jossa akselipainot nousivat 22 tonnista 25 tonniin. Vuonna 1971 Kansainvälinen rautatieliitto UIC oli hyväksynyt myös



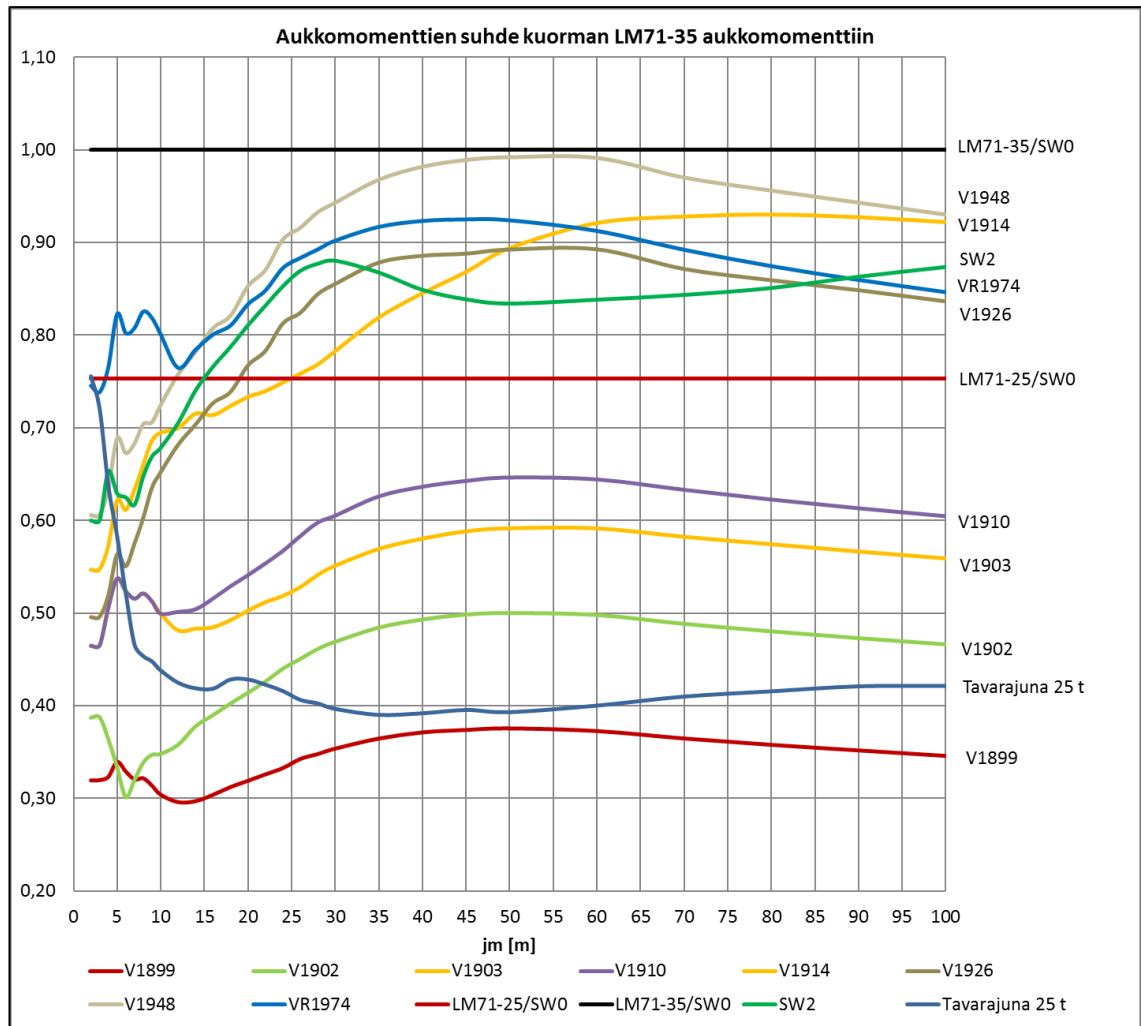
Kuva 4.2 Eri kuormakaavioiden ja 25 tonnin tavarajunan aiheuttamat tukireaktiot suhteessa LM71- ja SW/0-kaavioiden aiheuttamiin tukireaktioihin [32].

Toisena huomiona kuvaajista voidaan mainita 25 tonnin tavarajunan kuormavaikutus, joka jää aivan lyhimpiä jännemittoja lukuun ottamatta reilusti LM71-25-kaavion kuormavaikutusten alapuolelle. Kuvaajissa käytetystä 25 tonnin tavarajunasta ei ole tarkempaa tietoa eli onko käytetty vain jotakin 25 tonnin vaunua vai onko käytetty kaikkia 25 tonnin vaunuja ja piirretty eri vaunujen aiheuttaman kuormavaikutuksen vaihteluvälin maksimi kuvaajaan. Joka tapauksessa ero on selvä, kuten tuleekin olla, koska akselimassoissa tapahtuu reaali maailmassa sallitun massan ylityksiä. Näissä kuvaajissa oleva 25 tonnin tavarajuna lienee siis ideaali juna, jonka jokainen akseli on massaltaan 25 tonnia. Kuormakaavion täytyy siis huomioida ylitykset akselimassoissa ja pyrkiä vielä ennustamaan todennäköisyyksiin perustuen ylityksen suuruus tulevaisuuteen. Tätä asiaa käsitellään tässä työssä kappaleessa 7.4 ja sen alakappaleissa. Näissä alakappaleissa sekä liitteissä 3 ja 4 esitellään lisäksi tuloksia ja verrataan niitä myös LM71-kuormakaavioihin.



Kuva 4.3 Eri kuormakaavioiden ja 25 tonnin tavarajunan aiheuttamat tukimomentit suhteessa LM71- ja SW/0-kaavioiden aiheuttamiin tukimomentteihin [32].

Kuvan 4.3 tukimomenteissa huomataan kaavion SW/0 vaikutus alkaen hieman yli 10 m jännemitoista päättyen noin 25 m jännemittaan. Tällä kohdalla muiden kaavioiden käyrät putoavat selvästi alaspäin. SW/0-kaavio on tehty nimenomaan antamaan riittävän suuria tukimomenteja, joita LM71-kaavio ei anna. Muilla kaavioilla lienee hieman samanlaista ongelmaa, että tukimomentit jäävät tällä tietyllä jännevälialueella suhteellisen alhaisiksi. Samalla myös huomataan, että 25 tonnin tavarajunan kuormavaikutukset lähestyvät tässä samassa kohdassa myös SW/0-kaaviota eli todellinen kuorma nousee suhteessa kaikkiin kuormakaavioihin. Lisäksi edellisen jännevälialueen jälkeen oman huippunsa kaavioon tekee SW/2 kaavio, joka koostuu SW/0 kaavion tavoin kahdesta erillään olevasta nauha-kuormasta ja aiheuttaa juurikin suuria tukimomenteja. SW/2-kaavion nauhakuormat ovat kauempana toisistaan kuin SW/0-kaavion, joten se alkaa tehdä huippuaan siinä missä SW/0-kaavion huippu alkaa taittua laskuksi.

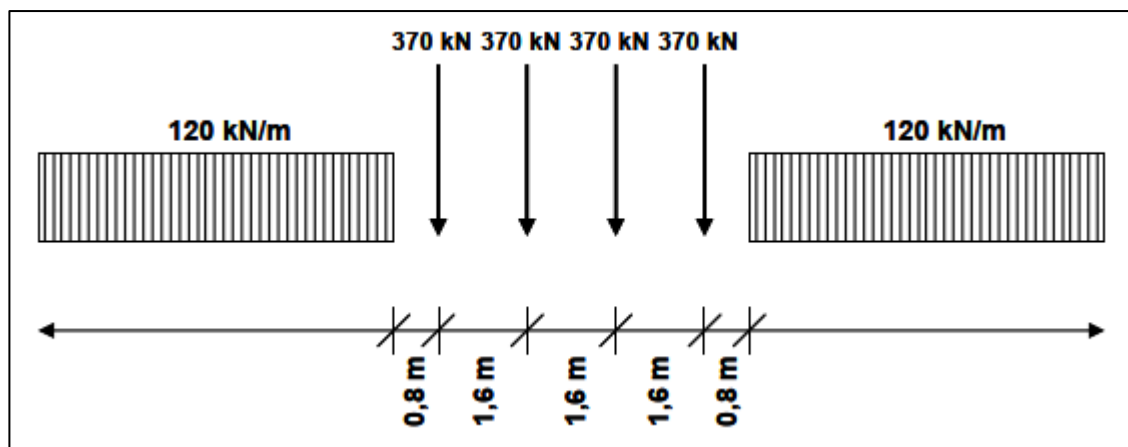


Kuva 4.4 Eri kuormakaavioiden ja 25 tonnin tavarajunan aiheuttamat aukkomomentit suhteessa LM71- ja SW/0-kaavioiden aiheuttamiin aukkomomentteihin [32].

4.2 LM71-kuormakaaviosta

Kuormakaavio LM71 on Kansainvälisen Rautatieliiton UIC:n vuonna 1971 määrittelemä. Itse määrittelyn taustoista ei tätä kirjoitettaessa löytynyt kovinkaan tarkkoja tietoja, mutta muutamia perusasioita saatiin kuitenkin tietoon. LM71 määrittely on tehty simulatiolaskelmien avulla. Simulaatiossa on käytetty yksiaukkoisia kannattajia pituudeltaan 1-200 m. Junina on käytetty ainakin kuvan 4.6 kuutta erilaista tyyppijunaa. Tarkempaa tietoa siitä miksi kyseiset junat on valittu ei ole, mutta ilmeisesti ne on valikoituneet jostakin junapopulaatiosta pahimman kuormavaikutuksen antavina. Tämän kirjoittajalla ei ole tietoa myöskään siitä, onko erilaisia tyyppijunia ollut enemmänkin mukana määrittelyssä. Lisäksi LM71:stä kerrotaan, että kuormavaikutusten ominaisarvoiksi on valittu yhden vuoden ääriarvojakauman 99 %:n fraktiili. Tämän perusteella simulaatiossa olisi kyse stokastisesta simulaatiosta, eli erilaisia tyyppijunia on ajettu satunnaisesti ja sekaisin janteen yli ja yliajettuja junia olisi ollut jonkin aikajakson mukainen määrä. Siitä ei kuitenkaan ole tietoa, kuinka tyyppijunia on sekoitettu keskenään eli millainen tyyppijunien

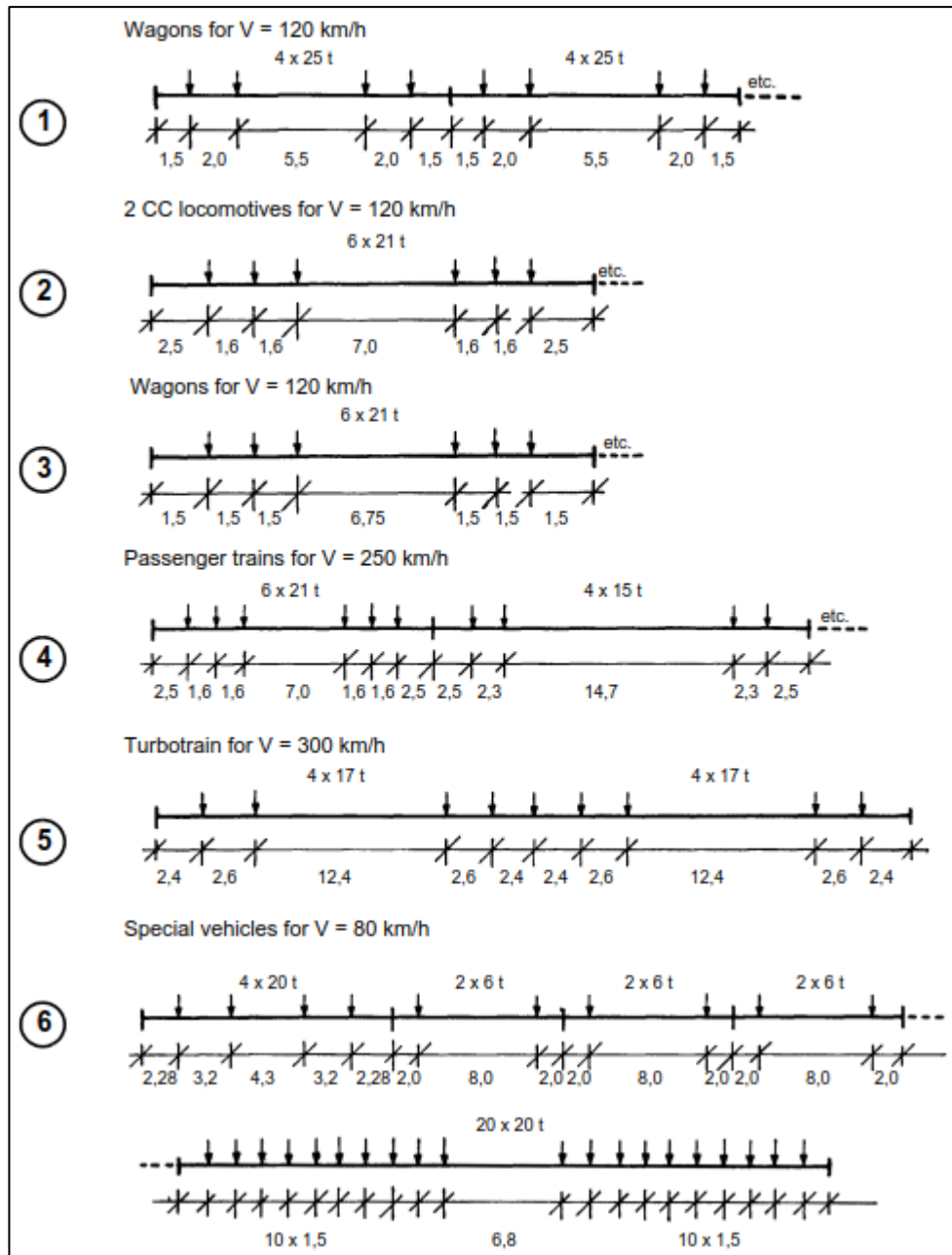
jakauma on ollut simulaatiossa ja millaisia tyyppijunien sisältämien vaunujen peräkkäisyyksien jakaumat ovat olleet. Tietoa ei ole myöskään siitä, millaista hajontaa akselipainoille on käytetty tai mikä on ollut liikenteen vuotuinen kokonaismäärä. Joka tapauksessa kuormakaavio on tehty siten, että se antaa vähintään samat kuormavaikutukset kuin simuloitu liikenne. Rautatieliikenteen murtorajatilan osavarmuuskerroin 1,45 on saatu, kun simuloitujen kuormavaikutusten ääriarvojakaumista on otettu edelleen 99,999 %:n fraktiili. Johtuen siitä, että kuormakaaviota varten on simuloitu vain yksiaukkoisten siltojen kuormavaikutuksia, LM71:n on todettu myöhemmin olevan liian kevyt välituen tukimomentin arviointiin. Näitä tilanteita varten on laadittu erilliset kuormakaaviot SW/0 ja SW/2, joista tämän työn puitteissa ei tehdä tarkempaa selvitystä. [34] Kuvassa 4.5 ja taulukossa 4.4 on esitetty LM71-kuormakaavio ja sen nykymuotoinen luokittelu.



Kuva 4.5 Suomessa käytössä oleva luokiteltu kuormakaavio LM71-35, jossa luokittelukerroin $\alpha = 1,46$ [3].

Taulukko 4.4 Kuormakaavion LM71 luokittelu [3].

Suurin sallittu akselipaino [t]	Luokitellun kuormakaavion tunnus	Kerroin α	Luokitellun kuormakaavion akseli-kuorma Q_v [kN]	Luokitellun kuorma-kaavion nauha-kuorma q_v [kN/m]
35	LM71-35	1,46	370	120
30	LM71-30	1,33	330	106
27,5	LM71-27,5	1,21	300	96
25	LM71-25	1,10	275	88
22,5	LM71-22,5	1,00	250	80
17	LM71-17	0,75	188	60



Kuva 4.6 Erilaisia ”tyyppijunia”, joita on käytetty UIC LM71:n määrittämisessä [35].

Vuonna 1993 on tehty ERRI:n toimesta tutkimus, jossa on tarkistettu LM71 kuormakaavion toimivuutta silloiselle raideliikenteelle Euroopan kansainvälisillä radoilla. Tutkimuksen teko on vaikuttanut tuolloin LM71 kuormakaavion saama kritiikki, jonka mukaan LM71 ei kykene antamaan riittävää kuormareserviä 100 vuoden käyttöikä varten, koska akselipainojen nostot olivat tuolloinkin ajankohtaisia monissa Euroopan maissa. Samaan aikaan rajatilamitoitus alettiin yleisesti hyväksyä Euroopassa rautatiesiltojen mitoituksessa, joten suunnittelukuormien tarkistus senkin puolesta oli tullut ajankohtaiseksi [36]. LM71 otettiin kahdeksan vuotta myöhemmin vuonna 2001 käyttöön myös Suomessa ja luokittelukerros valittiin 35-tonnisten akselien mukaan, vaikka Suomessa korkeimmat sallitut akselipainot ovat 25 tonnia [32].

Tutkimuksessa kartoitettiin Euroopan kansainvälisten ratojen sen aikaista ja tulevaisuuden liikennettä kyselyllä, joka lähetettiin kaikille rautateitä hallinnoiville organisaatioille, jotka olivat edustettuina UIC:n Sillat alikomiteassa. Kyselyllä haluttiin vastaukset esimerkiksi seuraaviin asioihin: rataosat, jotka on luokiteltu kansainväliselle liikenteelle, näiden rataosien pituus, keskimääräinen junien määrä päivässä näillä rataosilla, tavarajunien osuus junien kokonaismäärästä, tavarajunan bruttotonnien keskiarvo sekä kaikkien junien vuosittainen kokonaisbruttotoni. Näiden lisäksi oli vielä suuri määrä yksityiskohdaisempia kysymyksiä, joilla tutkimukseen saatiin valittua erityyppisiä oikeita vetureita, vaunuja ja moottorijunia yksityiskohtaisine tietoineen. Vastauksia ei tullut kuitenkaan kuin 16:lta organisaatiolta enemmän ja vähemmän täydellisinä ja näistäkin muutama myöhässä. Raidepituudeksi muutettuna kyselyllä saatiin vastaukset 47 323:n raidekilometrin matkalta.

Tutkimuksessa tehtiin sekä deterministisiä, että stokastisia simulaatioita. Deterministisiä simulaatioita oli tehty eri nopeusluokkien junille erikseen. Tarkasteluja tehtiin sekä dynaamisen lisäkerroimen kanssa, että ilman. Dynaaminen lisäkerroin oli laskettu samoin kuin UIC ohjeistaa ja kuten se myös nykyään Eurokoodissa on. Influenssipituudet ovat tässäkin tutkimuksessa 1-200 m, mutta mukana on huomattavasti monipuolisemmin influenssiivoja kuin LM71:n alkuperäisessä määrittäyksessä, jossa oli mukana vain yksiaukkoiset jänneet. Deterministisistä tarkasteluista saatiin suuria ylitysprosentteja verrattuna LM71-kuormakaavion antamiin voimasuureisiin. Yksiaukkoisissa rakenteissa ylitykset olivat dynaamisen kertoimen kanssa 42 % ja ilman dynaamista kerrointa 35 %, kaksiaukkoisissa ylitykset dynaamisen kertoimen kanssa 60 % ja ilman dynaamista kerrointa 55 % ja neljäaukkoisissa ylitykset dynaamisen kertoimen kanssa 52 % ja ilman dynaamista kerrointa 45 %. [37]

Stokastisissa simulaatioissa käytettiin 124 erilaista junaa. Tavarajunien osalta tehtiin vielä vaunutyypin sekoitusta junien kesken. Lisäksi oli sekoitettu täysiä, puolitäysiä ja tyhjiä vaunuja keskenään. Influensseja käytettiin hieman vähemmän kuin deterministisessä simulaatioissa. Influenssipituuksina oli 3, 5, 10, 20 ja 50 m ja staattisina järjestelminä mukana olivat 1- ja 2-aukkoiset palkit sekä langerpalkki. Ominaisarvona Q_k , jota on verrattu LM71:n ominaisarvoon ilman dynaamista lisäkerrointa on käytetty seuraavan kaavan mukaista arvoa:

$$Q_k = \max(Q_{k1}, Q_{k2}) \quad (4.1)$$

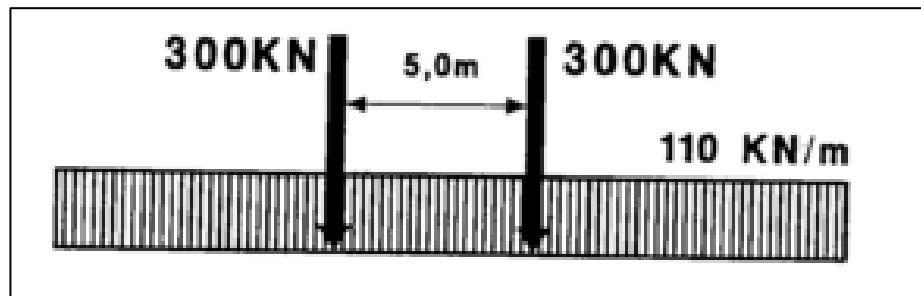
jossa

Q_{k1} = normaaliliikenteen aiheuttama suurin kuormavaikutus (ei sisällä siis erikoiskuljetuksia eikä tulevaisuuteen ennustettuja junia)

Q_{k2} = 99 %:n fraktiili kaiken liikenteen aiheuttamasta kuormavaikutusten kertymäfunktioista

Myös stokastisella simulaatiolla oltiin päästy samaan johtopäätökseen, että LM71 ei ole kuormavaikutuksiltaan riittävä kansainvälisillä radoilla tulevaisuudessa. [37]

Yksi tutkimuksen tavoitteista oli myös laatia uusi parempi kuormakaavio LM71:n tilalle. Tutkimuksessa saatiinkin aikaan kuormakaavio, jonka nimeksi annettiin LM2000. Tämä kaavio koostuu kahdesta 300 kN akselikuormasta ja jatkuvasta 110 kN/m nauha-kuormasta.



Kuva 4.7 Kuormakaavio LM2000 [37].

Tutkimuksen mukaan LM2000 yhdessä dynaamisen lisäkertoimen ϕ_{2000} kanssa olisi ollut optimaalisin kuvaamaan tutkimuksessa käytettyä liikennettä. Tutkimusryhmä antoi kuitenkin vaihtoehtoiseksi mahdollisuudeksi käyttää edelleen LM71-kaaviota, jolloin kaikkia siihen liittyviä asetuksia ei tarvitsisi tehdä uudelleen. Jotta tutkimuksessa käytetyn liikenteen kuormavaikutuksiin päästäisiin, niin LM-71 kaaviota tulisi kuitenkin kertoa joko 1,4:llä ja käyttää dynaamista lisäkerrointa ϕ_2 tai kertoa 1,3:lla ja käyttää dynaamista lisäkerrointa ϕ_{class} . ϕ_2 on sama kuin UIC:n määrittelemä dynaaminen lisäkerroin, joka on myös Eurokoodissa. [37] Kyseisen tutkimuksen tulosten perusteella voidaankin sanoa, että Suomen valitsema LM71-35, joka on 1,46-kertainen alkuperäiseen LM71:een verrattuna, ei vaikuta niin suurelta kuin alun perin ajateltiin.

4.3 Kiskoliikennestandardista EN 15528

Standardin EN 15528 ratojen luokittelujärjestelmä on tehty helpottamaan radan infrastruktuurin ja kaluston yhteensopivuuden tarkastusta. Tarkemmin sanottuna luokittelu-prosessin tuloksena saatava radan luokitus edustaa radan infrastruktuurin kykyä kestää vastaavan luokan kaluston aiheuttaman kuormituksen [38]. Standardi myös luonnollisesti ohjaa kaluston valmistajia valmistamaan kaluston niin, että ne menevät jonkin tietyn luokan asettamien reunaehtojen sisään. Ratojen infrastruktuuria hallinnoivat tahot taas luokittelevat hallinnoimansa radat ja valvoo, että niillä kulkee vain radan luokan mukaisia vaunuja ja vetureita. Luokittelujärjestelmän ansiosta on myös helppo kehittää rataverkkoa tiettyä kalustojoukkoa varten.

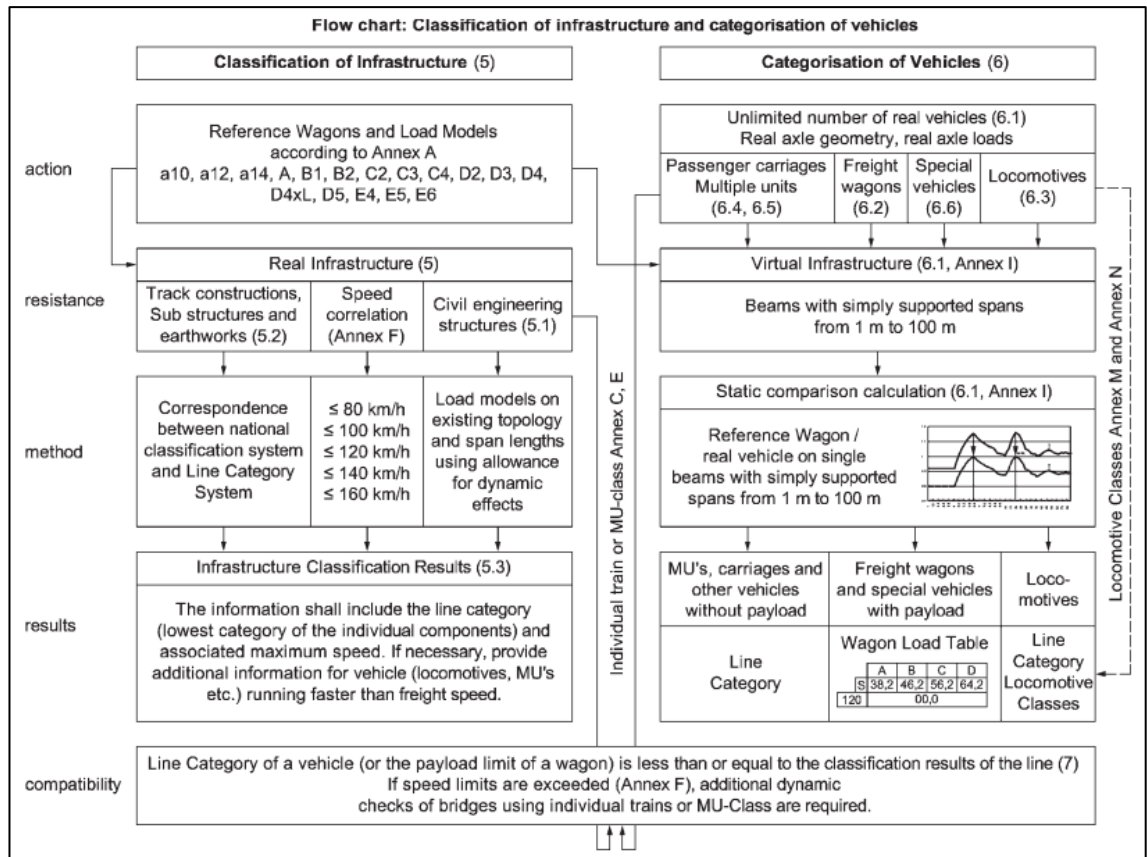
Luokittelujärjestelmässä on useita luokkia, joista luokkia A, B1, C2, C3, C4, D2, D3 ja D4 voidaan käyttää kattamaan kaikenlaisia ajoneuvoja ja tavaravaunuja. Luokat D5, E4, E5 ja E6 kattavat raskaita tavaravaunuja. Vetureita voidaan kattaa luokilla B1, B2, C2,

C3, C4, D2, D3, D4, D4xL, L4 ja L6. Matkustajavaunut ja itse vetävät moniyksikkövaunut voidaan kattaa luokilla a10, a12, a14, B1, C2 ja D2. Näistä a10, a12 ja a14 on kehitetty erityisesti kevyelle kalustolle maksimissaan 14 t akselipainoille [38].

Reference wagon	Axle load P (t)	Geometrical characteristics	Mass per unit length p (t/m) ^a
E4	25,0		8,0
E5	25,0		8,8
E6	25,0		10,0
Additional reference wagons may be used to manage special traffic on specific lines (e.g. reference wagon F with axle load P equal to 27,5 t or G with axle load P equal to 30,0 t).			
^a The value for "p" results from the relationship: (number of axles) x P / (length of reference wagon). The reference wagon is defined by "P" and the geometrical characteristics.			

Kuva 4.8 Vaunujen geometriset ominaisuudet E-luokissa. Kuhunkin luokkaan kuuluvan vaunun akselin massa saa olla korkeintaan 25 t ja akseleiden väliset etäisyydet ja ylitykset eivät saa alittaa kaavion mittoja ilman painorajoituksia [38].

Kullekin luokalle on siis kuvan 4.7 mukaiset referenssivaunut. Referenssivaunujen jonon aiheuttamaa kuormavaikutusta käytetään lähtötietona infrastruktuurin luokittelussa eli referenssivaunujen jono määrittää suoraan millaiset kuormavaikutukset missäkin luokassa ovat sallitut. Referenssivaunuja käytetään myös kaluston kategorisointiin vertaamalla oikean kaluston ja referenssivaunujen jonon aiheuttamia kuormavaikutuksia. Kuormavaikutuksia tulee verrata niveltuetuilla 1-100 m pitkillä jänteillä. Mikäli vaunussa on esimerkiksi enemmän akseleita tai sen akselimassat ovat suuremmat kuin sen radan luokan referenssivaunussa, jonne vaunu halutaan ottaa käyttöön, voidaan vaunu luokitella myös tähän alempaan luokkaan, mutta tällöin vaunulle on asetettava painorajoitus. [38] Referenssivaunujen staattisen kuormavaikutuksen lisäksi luokittelussa on huomioitava dynaamiset vaikutukset eri luokissa, joista tarkemmin itse standardissa. Alla vielä kaaviokuva luokittelujen kulusta.



Kuva 4.9 Infrastruktuurin ja kaluston luokitteluprosessit kuvaava vuokaavio [38].

5. LÄHTÖTIETOJEN ESITTELYT

Tässä luvussa käydään läpi tutkimuksen käyttöön saatua lähtötietodataa tavarajunaliikenteestä. Luvussa on kerrottu lyhyesti mistä päin rataverkkoa tietoja on saatu ja mitä tietoja on käytetty edelleen simulaatioissa. Lisäksi on esitetty joitakin jakaumia datasta ja kerrottu millaiset jakaumat ovat tyypillisiä.

5.1 Raideliikenteestä hankittu mittausdata

Tutkimusta varten saatiin mittausdataa VALTSU-järjestelmää ylläpitävältä Solita Oy:ltä. Dataan sisältyi liikennemäärät, junien kokonaismassat, junien vaunumäärät, junien vaunutyypin jakaumat ja vaunutyypin akselimassajakaumat jokaiselta mittauspisteeltä erikseen. Lisäksi saatiin tieto vaunutyypin peräkkäisyydestä keskimäärin kaikkien mittauspisteiden perusteella. Lähes jokaisesta mittauspisteestä saatiin myös ”mikroaika” dataa, joka sisälsi jokaisesta akselistä mittausajan, alku-, loppu- ja keskinopeuden, vaunutyypin tunnuksen, akselin järjestysnumeron sekä akselin molempien pyörien massat erikseen. Data on vuoden ajanjaksolta ja aikaväli on vuoden 2017 maaliskuun alusta vuosi eteenpäin.

Taulukko 5.1 Mittauspisteiden tunnukset ja sallittu akselimassa.

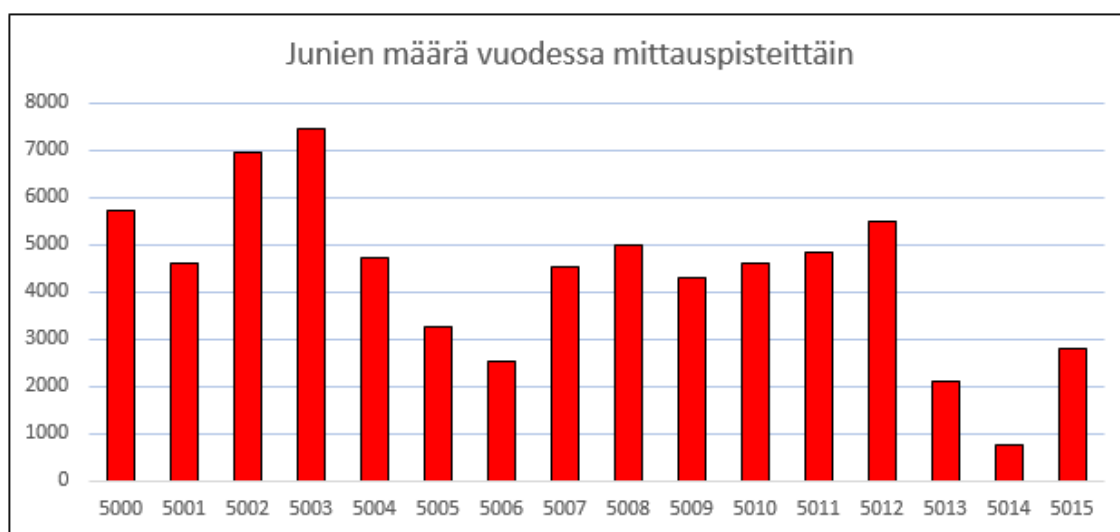
Tunnus	Paikan nimi	Sallittu akselimassa	RFID-tunnistus	Mukana simulaatiossa
5000	Alhojärvi	25 t	Kyllä	Kyllä
5001	Hammassahti	22,5 t	Kyllä	Kyllä
5002	Kaitjärvi (eteläinen raide)	25 t	Kyllä	Kyllä
5003	Kaitjärvi (pohjoinen raide)	25 t	Kyllä	Kyllä
5004	Kannus (itäinen raide)	25 t	Kyllä	Kyllä
5005	Kannus (läntinen raide)	25 t	Kyllä	Kyllä
5006	Lautiosaari	22,5 t	Kyllä	Kyllä
5007	Mattila	25 t	Kyllä	Kyllä
5008	Paltamo	22,5 t	Kyllä	Kyllä
5009	Selänpää	22,5 t	Kyllä	Kyllä
5010	Vainikkala	25 t	Ei	Ei
5011	Suontee	22,5 t	Kyllä	Kyllä
5012	Tupos	25 t	Kyllä	Kyllä
5013	Imatrankoski	22,5 t	Ei	Ei
5014	Niirala	22,5 t	Ei	Ei
5015	Vartius	22,5 t	Ei	Ei

Mittauspisteillä 5010 (Vainikkala), 5013 (Imatrankoski), 5014 (Niirala) ja 5015 (Vartius) ei valitettavasti ole RFID – lukijoita, joten niiden osalta ei tässä yhteydessä voitu tehdä tarkempia analyysyjä, koska vaunutyypin tarkempi tunnistaminen olisi ollut todella työlästä ja siltikin epäluotettavaa.

Venäläisten vaunujen kohdalla eri ominaisuuksien jakaumien tuottaminen vaati jonkin verran enemmän käsityötä, koska pyörävoimailmaisimen tunnistus ei ole tarkkuudeltaan täydellinen, vaan joidenkin akselien kohdalla datassa oli useampi vaunutyyppeä, jolle pyörävoimailmaisim ajatteli akselin kuuluvan. Tällaisten vaunujen tai akselien sisältämä arvo on jaettu tasan kaikille niille tyypeille, joita ilmaisimen tunnistus ehdottaa. Kuvitellaan, että mittauspisteellä 5010 on 2 253 kappaletta vaunutyyppeä VGOBO / VO / VOF akselimassaltaan 20 000 kg. Eli pyörävoimailmaisim on antanut kolme eri vaihtoehtoa siitä, mille vaunutyypille akseli kuuluu. Kyseinen kappalemäärä 2 253 jaetaan tasan kolmelle eri vaunutyypille, joten jokainen vaunutyyppeä saa 751 kappaletta kyseistä akselimassaa omaan jakaumaansa. Kaikkien tietojen kanssa, jotka sisältävät useampaa vaunutyyppeä, on menetelty tällä tavalla.

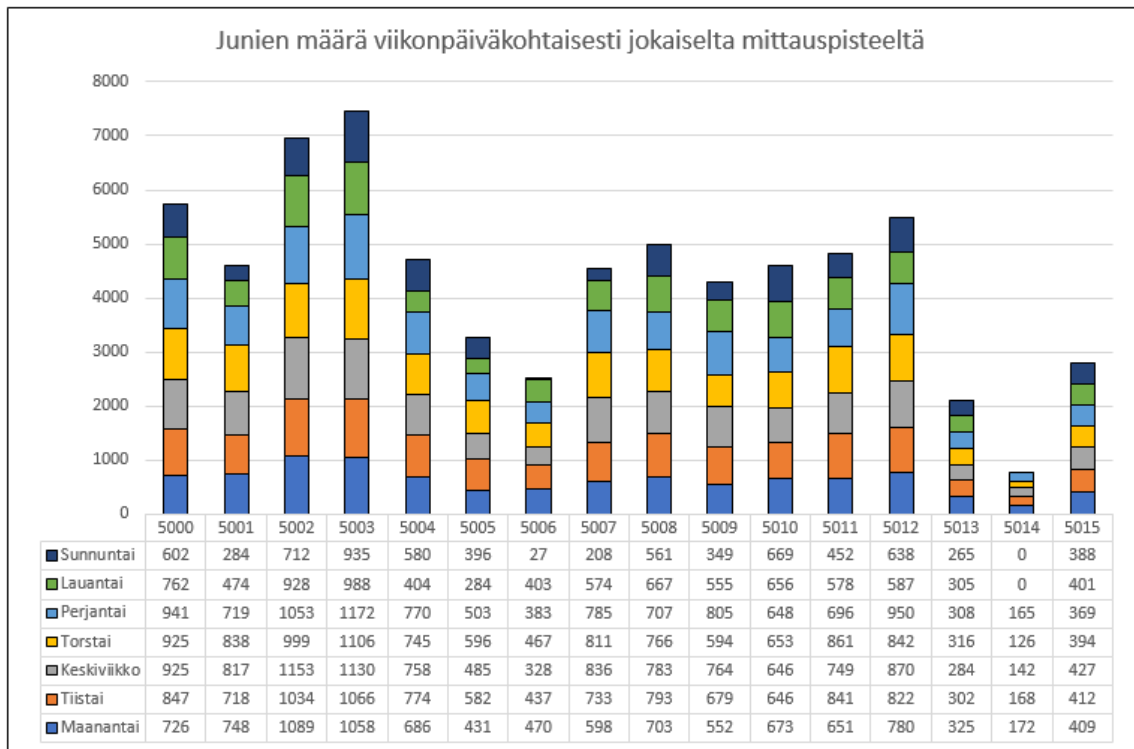
5.1.1 Liikennemäärät

Liikennemääristä tarvittiin koko vuoden junamäärä mittauspistekohtaisesti. Lisäksi haluttiin liikennemäärät viikonpäivittäin, jotta voidaan tarkastella mahdollista arkipäivien ja viikonloppujen tai ylipäätään kussakin mittauspisteessä vilkkaimpien päivien liikennettä. Ainoastaan vilkkaampia viikonpäiviä simuloimalla saadaan useammin kuormituksen ääriarvon toteuttavia junia, mutta toisaalta taas simuloitukierrosten määrä vähenee. Oletettavasti näillä liikennemäärien erilaisella laskentatavalla ei ole merkittävää vaikutusta lopputulokseen, mutta asian tutkiminen voi olla kuitenkin tarpeellista. Tämän työn puitteissa ei kuitenkaan ehditty tekemään tätä vertailua, jossa hiljaisempien viikonloppujen liikenne olisi pudotettu pois. Toisaalta noin puolessa mittauspisteitä viikonloput olivat käytännössä yhtä vilkkaita kuin arkipäivät, joten niiden osalta vertailu olisi todennäköisesti suhteellisen turhaa. Alla olevassa kuvassa 5.1 on esitetty vuodessa mittauspisteiden ylittäneiden tavarajunien määrät.



Kuva 5.1 Vuodessa mittauspisteiden ylittäneiden tavarajunien määrät.

Suurin liikennemäärä junamäärissä mitattuna oli mittauspisteellä 5003 Kaitjärvi pohjoinen raide, 7455 junaa ja pienin liikennemäärä mittauspisteellä 5014 Niirala, 773 junaa. Kuvassa 5.2 näkyy junamäärien jakautuminen viikonpäivittäin kullakin mittauspisteellä.



Kuva 5.2 Junamäärien jakautuminen eri viikonpäiville mittauspisteittäin.

Vilkaampia päiviä simuloimalla saadaan useammin päivittäisistä ääriarvoista suurempia, mutta toisaalta taas simuloitukierrosten kerroin putoaa kaavan 5.1 mukaan.

$$n = \frac{n_{\text{vilkkaut}}}{7}, \quad (5.1)$$

jossa

n_{vilkkaut} = valittujen viikonpäivien lukumäärä

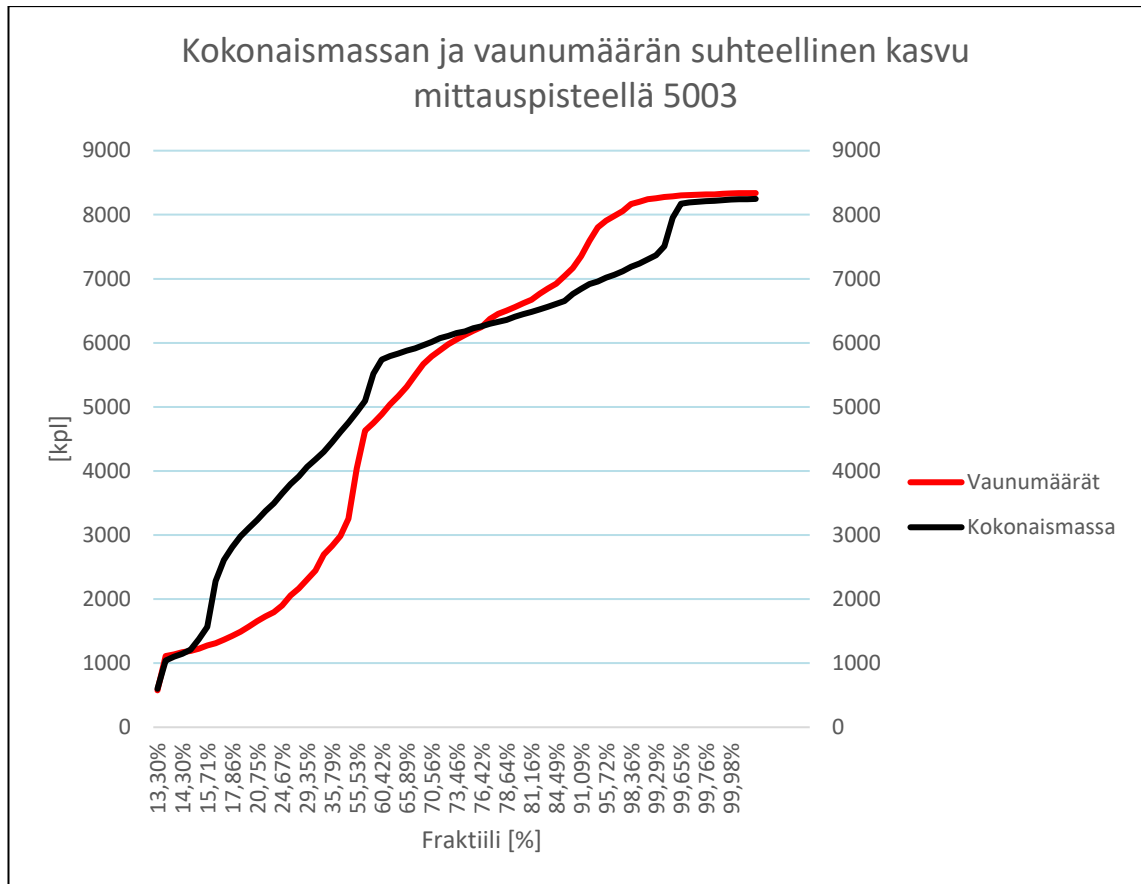
Toisin sanoen siis esimerkiksi simuloimalla vain arkipäivät eli viisi päivää, saadaan päivittäisiä ääriarvoja vuoden simuloinnissa 365 kappaletta sijaan $365 \times 5/7$ eli n. 261 kappaletta ja kuukausittaisia ääriarvoja 12 kappaletta sijasta $12 \times 5/7$ eli n. 8,5 kappaletta. Koska kuukausittaisten ääriarvojen tapauksessa oltaisiin jo niin kaukana tasaluvusta, niin simulaatio olisi järkevää tehdä vuoden liikenteen sijaan kymmenen vuoden liikenteellä, jolloin kuukausittaisia ääriarvoja olisi noin 85 kappaletta. Toisaalta kuukausittaisten ääriarvojen määrää ei ole järkevää ottaa myöskään kaikkia päiviä simuloitaessa yhden vuoden ajalta, koska 12 on vielä melko pieni luku jakauman muodostuksessa.

Vaikka ääriarvojen suuruus onkin keskimäärin hieman suurempaa vain vilkkaita päiviä simuloitaessa, niin lopputuloksena saatuun kuormavaikutukseen vaikuttaa vielä se, miltä

fraktiililta tulos luetaan. Kun vuoden aikana saatuja päivittäisiä ääriarvoja on saatu 261 kappaletta, niin toistumiskuorma luetaan vastaavasti hieman alemmalta fraktiililta, kuin se luettaisiin kaikkien 365 päivän tapauksessa. Tästä tarkemmin kappaleessa 7.4.1.

5.1.2 Kokonaismassa- ja vaunumääräjakaumat

Todellisen kaltaisia junia muodostettaessa tulee ensimmäiseksi saada aikaan junan pituus vaunumäärien mukaan. Kokonaismassa korreloi melko vahvasti vaunumäärän kanssa, joten simulaatiossa on päädytty arpomaan sekä kokonaismassa, että vaunumäärä samalla satunnaismuuttujalla. Samalla satunnaismuuttujalla arvotut vaunumäärä ja kokonaismassa aiheuttavat sen, että simulaatioon ei tule kokonaismassaltaan pieniä ja pituudeltaan suuria junia eli tyhjiä pitkiä junia eikä myöskään täysiä lyhyitä junia. Simulaatiossa kokonaismassaa käytetään kuitenkin vain veturien määrän valintaan, joten lopputuloksen kannalta tällä ei ole juurikaan merkitystä. Simulaation myöhemmässä vaiheessa junasta voi syntyä edelleen tyhjä pitkä juna, jolla on mahdollisesti yksi tai kaksi veturia liikaa tai päinvastoin täysi lyhyt juna, jolloin vetureita voi olla liian vähän. Kuvassa 5.3 on esitetty mittauspisteen 5003 kokonaismassan- ja vaunumäärän kasvuvauhdit pienimmistä arvoista suurimpiin arvoihin ja huomataan, että kasvu on lähes yhtä nopeaa, mikä tietenkin on loogistakin.

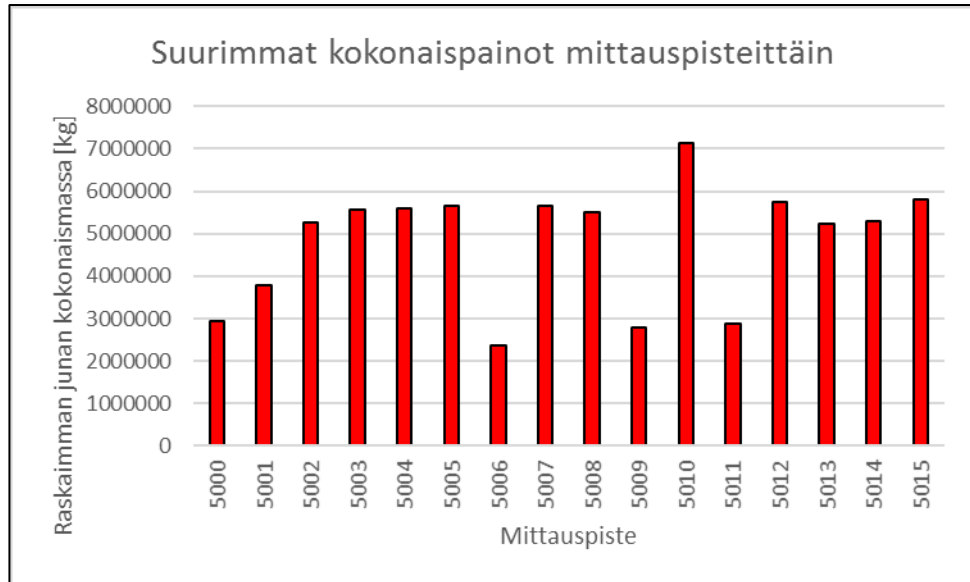


Kuva 5.3 Kokonaismassan ja vaunumäärän kumulatiiviset jakaumat mittauspisteellä 5003.

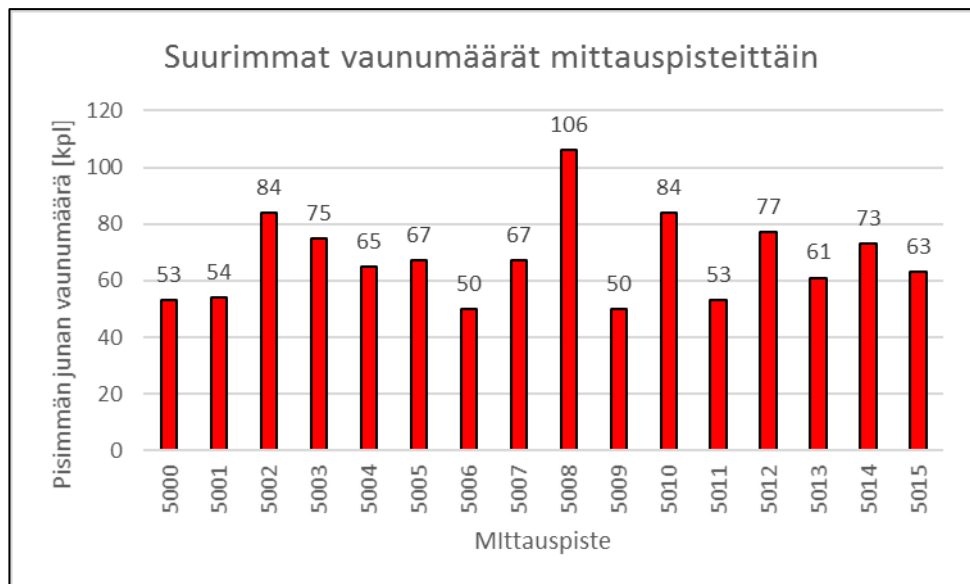
Veturimäärien muodostamiseen on olemassa myös muita tapoja kuin arpoa ne samalla satunnaismuuttujalla kuin kokonaismassa, mutta tämän työn puitteissa niitä ei ehditty toteuttaa. Yksi tapa olisi arpoa alussa ainoastaan vaunujen lukumäärä ja antaa simulaation määrittää veturit vasta siinä vaiheessa, kun vaunujono ja edelleen akselimassojen summa on selvillä. Näin saataisiin simuloidulle junalle täsmälleen tarvittava määrä vetureita.

Kokonaismassa- ja vaunumääräjakaumat vaihtelevat jonkin verran eri mittauspisteiden välillä. Kaikkia jakaumia ei tässä esitetä, mutta jokaisen mittauspisteen raskaimmat ja vaunumäärältään pisimmät junat on esitetty kuvissa 5.4 ja 5.5. Suurimmat kokonaismassat ovat suhteellisen saman suuruisia eri mittauspisteillä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että kyseinen kokonaismassa on lähellä jonkin veturikokoonpanon vetokapasiteettia. Muutamia poikkeuksiakin kuitenkin löytyy, mittauspisteillä 5000, 5001, 5006, 5009 ja 5011 raskaimman junan kokonaispaino on selvästi pienempi. Näistä neljä on 22,5 tonnin ratoja ja ainoastaan mittauspiste 5000 on 25 tonnin radalla. Mittauspiste 5010 erottuu selvästi raskaimmalla junalla, kyseinen mittauspiste on Vainikkala ja se on 25 tonnin radalla. Vaunumäärältään pisimpien junien mitat sen sijaan vaihtelevat hieman enemmän. Tämä voi johtua siitä, että eri vaunutyypit ovat hyvin eri pituisia ja eri mittauspisteillä kuljetetaan usein erilaisia vaunuja, jolloin metrimääräinen pituus voi hyvinkin olla samaa

luokkaa monilla mittauspisteillä. Vaunupituus olisi siis mielenkiintoista saada myös metreinä, mutta nyt sitä ei ollut lähtötietodatassa mukana. Mittauspisteiden pisimmistä junista lyhyimmät löytyvät samoista mittauspisteistä kuin mittauspisteiden raskaimpien junien kevyimmät junat. Pisin juna sen sijaan löytyy mittauspisteeltä 5008 eikä 5010, jossa on raskain juna.



Kuva 5.4 Raskaimmat yksittäiset junat mittauspisteittäin.



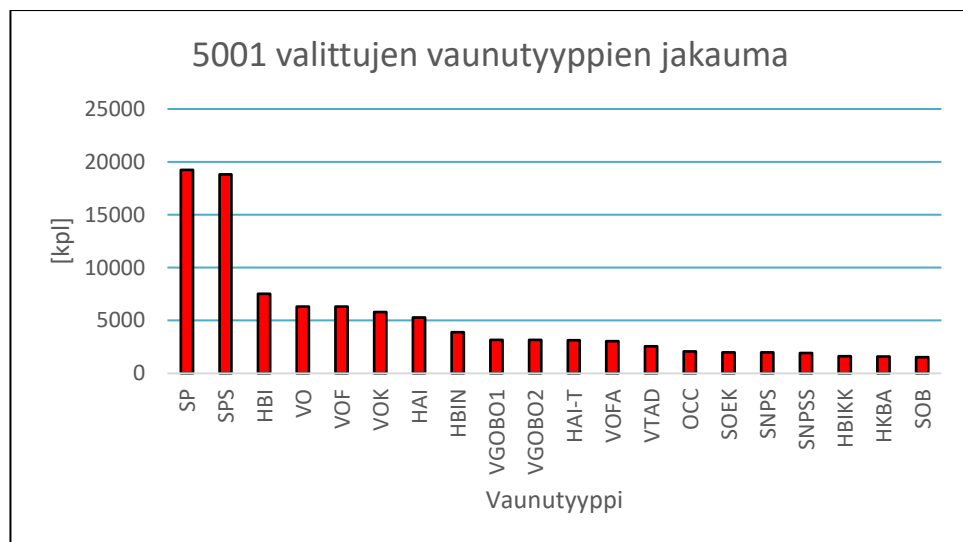
Kuva 5.5 Pisimmät yksittäiset junat vaunujen määrässä mitattuna mittauspisteittäin.

5.1.3 Vaunutyyppien jakauma

Vaunutyyppien yleisyys vaihtelee hyvin paljon. Harvinaisimmat vaunut, veturit tai työkonet esiintyivät mittauspisteillä vain yksittäisiä kertoja. Yleisimmät veturit ja vaunut taas esiintyivät mittauspisteillä kymmeniä tuhansia, jotkut vaunut jopa satoja tuhansia

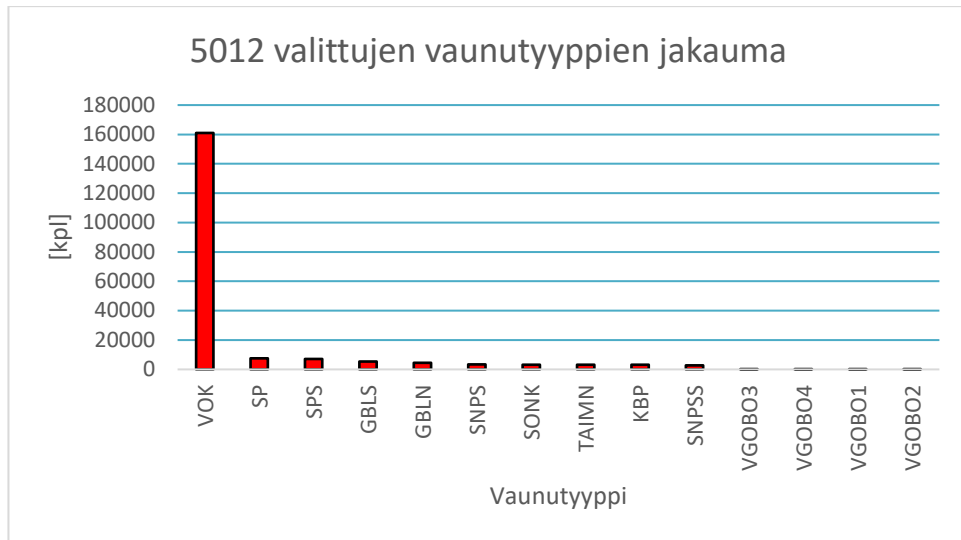
kertoja. Yhteensä datassa esiintyi lähes 150 eri vaunutyyppeä, joista noin 10 oli matkustajavaunuja tai lähiliikenteen moottorijunia, jotka jostain syystä olivat tulleet mukaan, vaikka dataan oli seulottu vain tavaraliikenne.

Vaunutyyppeiden määrä on kuitenkin todella suuri, joten niiden osalta tehtiin karsintaa. Karsiminen tehtiin asettamalla vaunutyypit esiintymistodennäköisyyden mukaiseen järjestykseen ja valitsemalla todennäköisimmästä lähtien vaunutyyppejä siihen asti, että saatiin 95 %:n peitto koko tavaraliikenteestä. Tähän peittoprosenttiin puolestaan päädyttiin tekemällä karsinta koko Suomen keskimääräiselle liikenteelle ja katsomalla missä kohti on vielä staattisen kuormavaikutuksen kannalta merkittäviä vaunuja. Tällaisia merkittäviä vaunuja olivat teräskelavaunut Shmms-tw ja Shmmn-tw, jotka molemmat jäivät 95 %:n peiton sisään.



Kuva 5.6 Mittauspisteen 5001 simulaatioon valikoituneet vaunutyypit frekvenssijärjestyksessä.

Paikalliset piirteet vaikuttavat myös paljon vaunutyyppeihin, kuten voidaan huomata kuvista 5.6 ja 5.7. On rataosuuksia, joilla edellä mainittuja teräskelavaunuja ei kulje juuri ollenkaan ja toisaalta taas jossain ne ovat yleisimmästä päästä. Tämän vuoksi vaunutyyppeiden jakaumat on tehty jokaiselta mittauspisteeltä erikseen. Kaikilla mittauspisteillä on käytetty samaa 95 %:n peittoastetta. Poikkeuksena oli kuitenkin mittauspiste 5012, jossa otettiin 95 %:n peittoprosentin ulkopuolelta mukaan sillä mittauspisteellä erittäin harvinainen Vgobo-vaunutyyppi, koska se oli ainoa paikka, jossa kyseistä vaunutyyppeä esiintyi 8-akselisenakin versiona. Kyseiset vaunut olivat samalla ainoat koko datassa esiintyneet 8-akseliset vaunut.

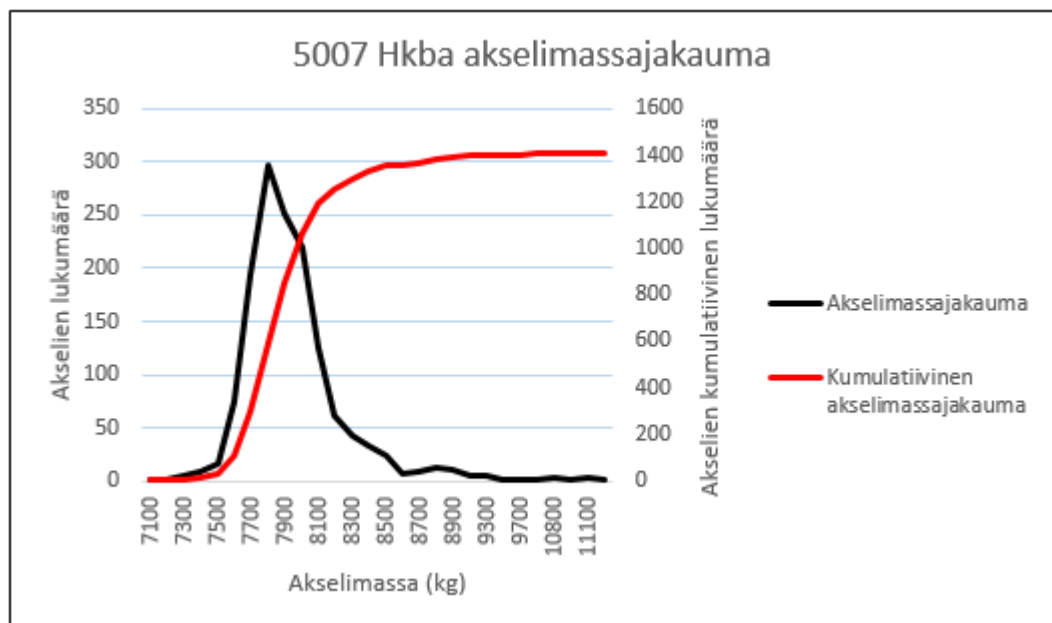


Kuva 5.7 Mittauspisteen 5012 simulaatioon valikoituneet vaunutyyppit frekvenssijärjestyksessä.

Kaikki simulaatioissa käytetyt vaunutyyppit ja niiden geometriat ja sallitut akselimassat on esitetty liitteessä 1.

5.1.4 Akselimassajakaumat eri vaunutyypeille

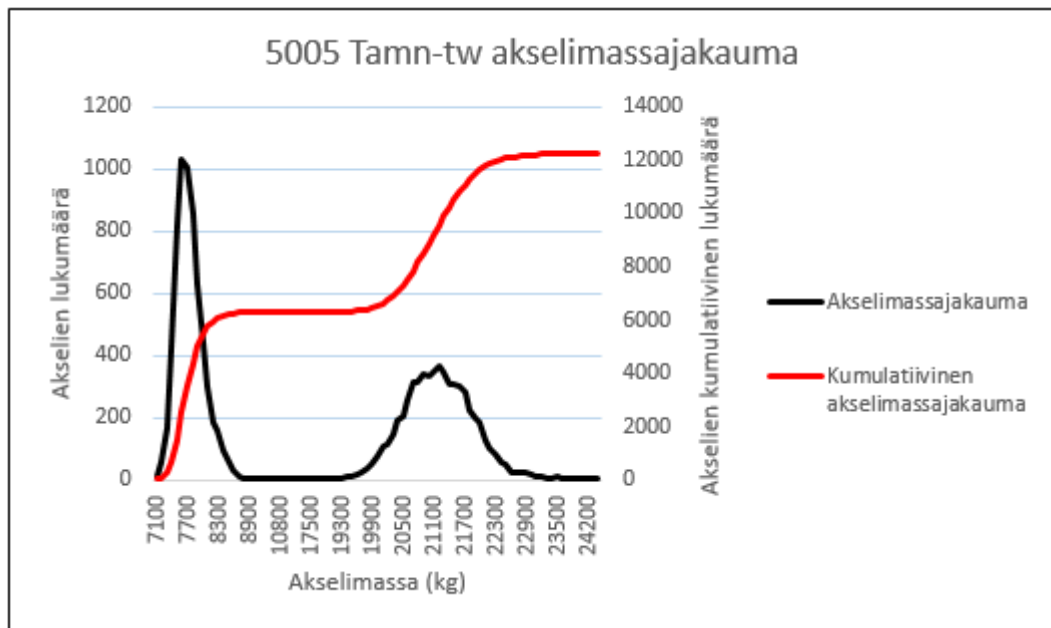
Jokaiselle vaunutyyppille on saatu akselimassajakaumat, joista nähdään eri akselimassojen yleisyydet eri vaunutyypeillä. Tyypillisesti akselimassajakaumien muoto on hyvin samanlainen eri vaunutyypeillä, mutta poikkeuksiakin on, kuten välivaununa käytettävä Hkba [39], joka kulkee kuvan 5.8 mukaan lähestulkoon aina tyhjänä.



Kuva 5.8 Hkba – välivaunun akselimassajakaumat mittauspisteellä 5007, Mattila.

Myös akselimassojen maksimiarvot ovat eri vaunutyypeillä usein samaa suuruusluokkaa, koska eri vaunutyytit on suunniteltu kuljettamaan usein ainakin 22,5 tonnin massat. Toki on varsinkin vanhempaa kalustoa, jossa sallittu akselimassa on alle 22,5 tonnia. Seuraavassa käsitellään tyyppillistä akselimassajakaumaa ja pohditaan sen muodon aiheuttamia syitä.

Kuvassa 5.9 on näytetty tyyppin Tamn-tw akselimassajakauma mittauspisteellä 5005, joka noudattaa tyyppillistä akselimassajakaumaa. Jakaumasta huomataan kaksi piikkiä, tyhjä ja täydet vaunut. Voidaan siis päätellä, kuten myös olettaa saattaa, että vaunut pyritään lastaamaan täyteen ja puolityhjiä vaunuja on liikenteessä vain harvoin. Täysien vaunujen akselimassoissa on jonkin verran enemmän hajontaa kuin tyhjien vaunujen massassa johtuen luonnollisesti siitä, että eri lastaajat saattavat täyttää vaunut hieman eri tavalla. Toinen syy voi olla lastattavan tavaran tilavuuspaino, kuten tässä tapauksessa rikastevaunulla Tamn-tw voidaan kuljettaa erilaisia rikasteita. Puutuotteita kuljettavien vaunujen akselimassojen hajontaa tulee suoraan puun tiheyden suuresta hajonnasta sekä ilmankosteuden merkittävästä vaikutuksesta puun tilavuuspainoon.



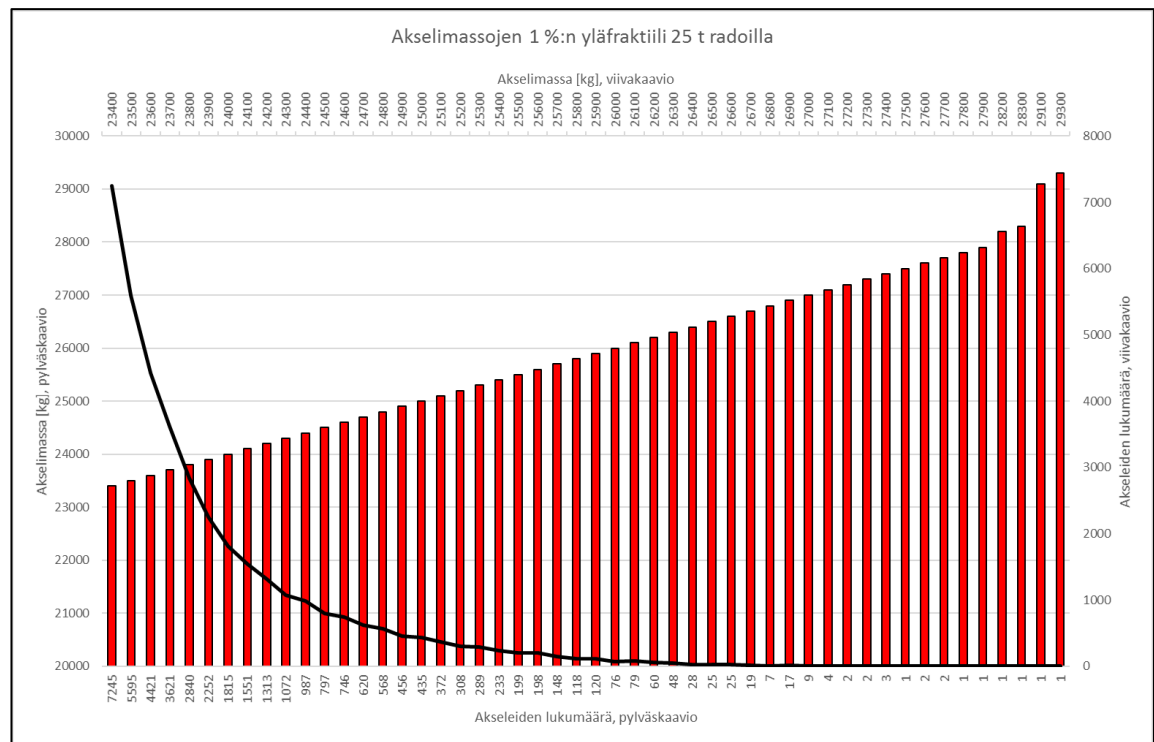
Kuva 5.9 Rikastevaunun tyyppiä Tamn-tw akselimassajakaumat mittauspisteellä 5005, Kannus, läntinen raide.

Sekä tyhjiä, että täysissä vaunuissa akselimassojen hajontaa aiheuttavat Tamn-tw vaunutyyppin osalta hieman vaihtelevat taaramassat, jotka on ilmoitettu olevan 31,2 – 31,8 tonnia [40]. Täysissä vaunuissa hajontaa aiheuttaa lisäksi kuormamassa, joka kyseisellä vaunutyyppillä voi olla 58,2 – 58,8 / 68,2 – 68,8 tonnia [40]. Taaramassaltaan suurempaan vaunuun menee siis 0,6 tonnia vähemmän kuormaa, koska vaunu itsessään on 0,6 tonnia raskaampi. Vaunun sallittu akselimassa on 25 t, mutta suurimmassa osassa rataverkkoa sallittu akselimassa on vain 22,5 t, jonka vuoksi kuormamassassakin on erotettu kaksi eri massaa. Tämä voi vaikuttaa täysien vaunujen akselimassojen hajontaan huomattavasti

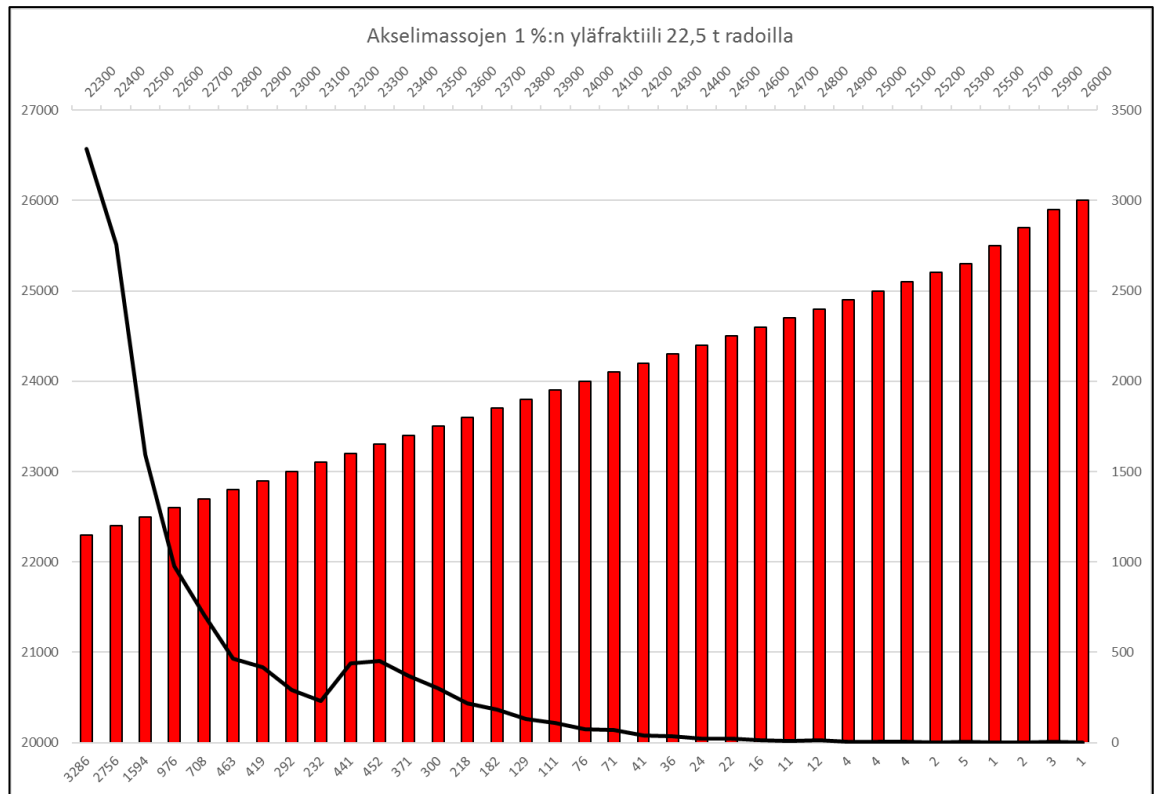
niillä mittauspisteillä, joilla rata on sallittu 25 tonnin akselimassalle, koska osa mittauspisteen ohi kulkevista vaunuista on voitu lastata paikassa, jossa rata on sallittu vain 22,5 tonnin akselimassalle. Kyseinen mittauspiste 5005 sijaitsee juuri 25 tonnin rataosuudella. Kuvasta 4.4 kuitenkin huomataan, että mittauspisteen Tamn-tw vaunut ovat lähes poikkeuksetta alle 22,5 tonnin akseleilla, josta voidaan todeta, että todennäköisesti lähes kaikki tai kaikki vaunut on kuormattu 22,5 tonnin rataosuudella tai ne jossakin vaiheessa joutuvat liikkumaan 22,5 tonnin rataosuudella. Yli 22,5 tonnin kuormat johtuvat todennäköisesti ainakin osittain vahingossa ylikuormatuista vaunuista sekä talvisin myös vau-nuihin kertyvästä lumesta ja jäädästä [41]. Lisäksi pyörävoimailmaisimien antamissa akse- limassoissa on virhemarginaali $\pm 5\%$.

5.1.5 Suurimmat akselimassat

Tarkastellaan vielä kaikkein suurimpia mitattuja akselimassoja erikseen. Alla olevissa kuvissa 5.10 ja 5.11 on esitetty datassa esiintyvät suurimmat akselimassat 25 tonnin ja 22,5 tonnin radoilla kaikista vaunutyypeistä yhteensä. Kuvaajissa pylväsdiagrammilla esitetään akselimassojen suuruutta ja viivalla vastaavan akselimassan esiintyvyyttä.



Kuva 5.10 Suurimmat akselimassat 25 tonnin radoilla.



Kuva 5.11 Suurimmat akselimassat 22,5 tonnin radoilla.

Ylikuormattuja akseleita 25 tonnin radalla esiintyi 2400 kappaletta, kun laskettiin luokat 25 100 kg ja siitä ylöspäin. Ylipainoisten akselien painon noustessa melko lineaarisesti, laskee akselien frekvenssit melko samassa tahdissa, kunnes selvemmissä ylipainoissa ollaan aivan yksittäisissä lukumäärissä. Kaksi suurinta akselimassaa on selkeästi suurempia kuin näitä suuruusjärjestyksessä edeltävät massat. Tuollainen hyppäys voi olla todellinen tai sitten mittausvirhe, kun pyörävoimailmaisimen virhemarginaali akselimassalle on $\pm 5\%$. Laskemalla suoraan virhemarginaalin mukaan, niin tuloksissa 23 600 kg painava akselimassa voisi olla oikeasti hieman ylliraskas. Toisaalta tuloksissa 26 250 kg painava akseli voi olla sallitun 25 tonnin painoinen. Todettakoon siis vielä, että todellisuudessa pylväsdiagrammi voi olla täysin tasaisesti kasvava tai siellä voi olla enemmänkin pykälää. Sama koskee viivakuvaajaa, joka nyt käyttäytyy hyvin oletetun näköisesti, mutta todellisuudessa siellä voi olla pieniä kuoppiakin.

22,5 tonnin radalla ylipainoisia akseleita esiintyi 5629 kappaletta, kun laskettiin luokat 22 600 kg ja siitä ylöspäin. Akselimassat nousevat melko tasaisesti, eikä yksittäisiä selvästi suurempia massoja esiinny. Akselimassojen frekvenssissä tapahtuu hyppy 23 100 kg jälkeen, jossa suurempia massoja esiintyykin useammin kuin muutamaa luokkaa kevyempiä massoja. Ilmiön tarkempaa syytä ei jääty tutkimaan, mutta kyseessä voi olla jokin tietyn tyyppiset vaunut, joissa täyteen lastattaessa kuorma voi ylittyä hieman johtuen vaikkapa ilmakestästä. Toisaalta se voi johtua luvanvaraisista ylliraskaista erikois-

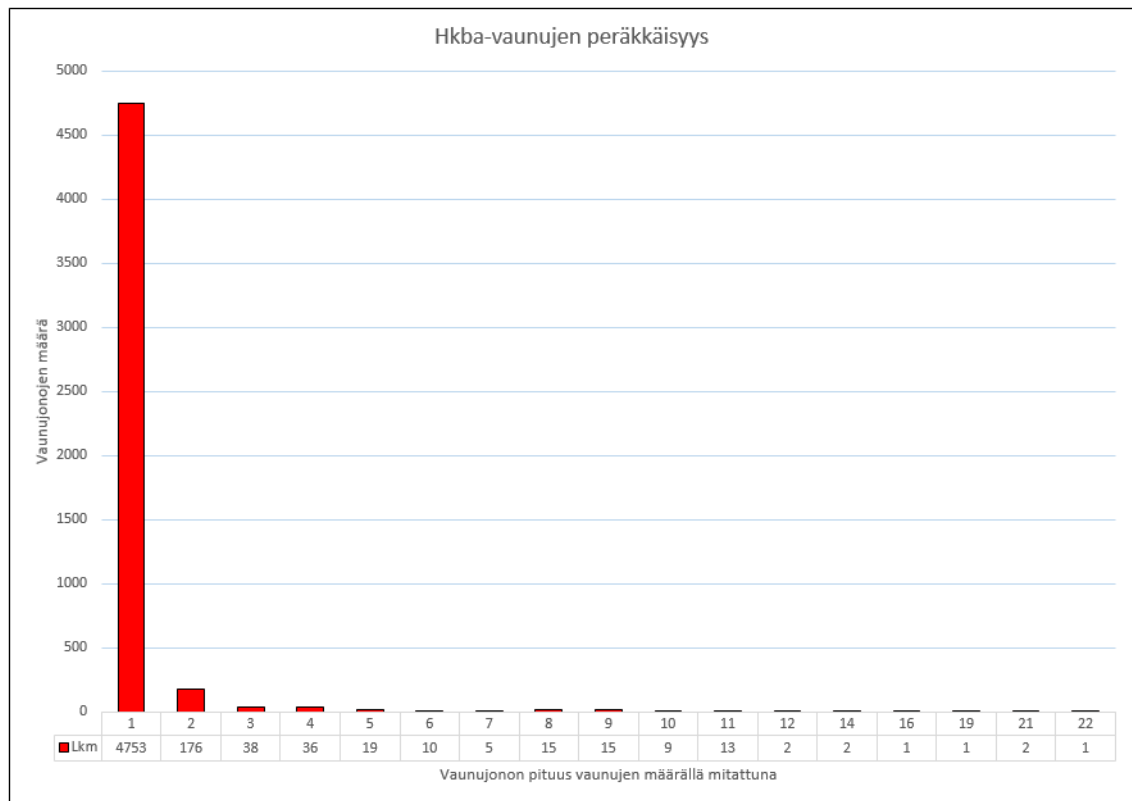
kuljetuksista, jolloin vaunuja on kuljetettu pienemmällä nopeudella. Mittausvirhe se tuskin on, koska akseleita on kohtalaisen paljon, mutta toki asiaa voisi tutkia tarkastelemalla useamman vuoden dataa.

Ylipainoisia akseleita on datan mukaan aika paljon. Tilanne ei kuitenkaan ole kokonaiskuormavaikutuksen kannalta välttämättä niin dramaattinen, koska kuten todettiin, osa ylipainoisista akseleista kuuluneeseen kappaleessa 2.2.3 käsiteltyihin luvanvaraisiin ylipainoisiin juniin, joiden nopeutta on vastaavasti rajoitettu riippuen ylikuorman määrästä.

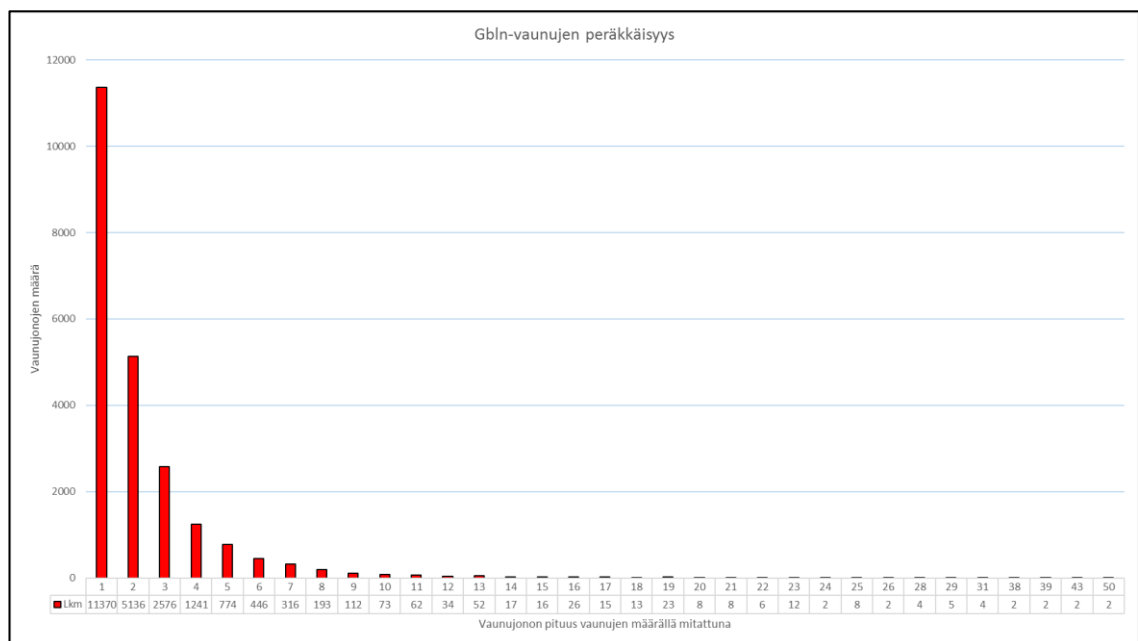
5.1.6 Vaunutyyppien peräkkäisyys

Mikäli kokoonpanot järjestettäisiin vain arpomalla yksittäin vaunutyyppiä jonoon, tulisi junasta todennäköisesti erittäin kirjava ja samaa vaunutyyppiä ei olisi todennäköisesti usein yhtä enempää peräkkäin. Siksi todellisen kaltaisten junakokoonpanojen muodostamiseen tarvittiin myös tieto siitä, kuinka monta saman vaunutyyppin edustajaa on peräkkäin milläkin todennäköisyydellä.

Vaunutyyppien peräkkäisyys vaihtelee hyvin paljon vaunutyypeittäin. Esimerkiksi välivaunuina käytettävät tyypit (kuten Hkba) [39] ovat hyvin usein vain mahdollistamassa eri kytkinjärjestelmillä varustettujen vaunujonon liittymisen yhteen, joten niitä on harvemmin peräkkäin, kuten seuraavan sivun kuvasta 5.12 huomataan. Tietyntyyppiset kuljetusvaunut, joilla kuljetetaan suurten tehtaiden massatuotteita, voivat taas olla hyvinkin pitkiä. Kaikkein pisimmät samaa vaunutyyppiä edustavat jonot löytyvät kuitenkin venäläisistä vaunutyypeistä. Venäläisten vaunujen osalta peräkkäisyyden suureen lukumäärään vaikuttaa ainakin se, että vaunutyyppit ei ole niin tarkasti tyypitetty kuin suomalaiset vaunut, vaan saman tyyppitunnuksen alla voi olla hyvinkin erilaisia vaunuja ja tyyppitunnus kertoo oikeastaan vain vaunun käyttötarkoituksen. Kuvassa 5.13 on näytetty melko tyyppillisen peräkkäisyysjakauman omaavan Gbln-vaunutyyppin peräkkäisyysjakauma.



Kuva 5.12 Välivaununa käytettävän Hkba-vaunutyypin peräkkäisyysjakauma.



Kuva 5.13 Gbln-vaunutyypin peräkkäisyysjakauma

5.2 Vaunukokoonpanojen systemaattisuus ja epäsystemaattisuus

Vaunukokoonpanojen systemaattisuutta tutkittiin siltä kannalta, että löytyykö jotain sääntöä siihen, kuinka tyhjt ja täydet vaunut on sijoitettu toisiinsa nähden. Mittausjärjestelmästä saatiin dataa, josta nähtiin mittauspisteen ylittäneet akselit ylitysjärjestyksessä. Lisäksi tiedettiin mihin vaunuun ja mihin kohtaan tätä vaunua akseli kuului sekä edelleen mihin junaan vaunu kuului.

Havaintojen perusteella junat sisälsivät yleensä kohtalaisen pitkiä täysien tai tyhjien vaunujen jonoja, riippuen kuitenkin mittauspisteestä. Kaksiraiteisilla osuuksilla sijaitsevilla mittauspisteellä saattoi täydet tai tyhjt junat olla hyvin selvänä enemmistönä, johtuen ilmeisesti siitä, että junat kulkevat pääsääntöisesti toista raidetta yhteen suuntaan eli täysillä junilla mennään esimerkiksi kohti satamia toista raidetta ja tyhjillä junilla palataan takaisin toista raidetta. Silmämääräisten tarkastelujen perusteella tyhjien ja täysien vaunujen jonot junien sisällä sijaitsivat toisiinsa nähden eri tavoilla, joskin ehkä yleisemmin niin, että täysien vaunujen jono on junan etuosassa. Ei kuitenkaan ollut harvinaista, että junan keulassa oli jono tyhjiä vaunuja ja näiden perässä jono täysii, eikä sellainenkaan mahdoton, jossa tyhjiä ja täysii jonoja vuorotteli junassa useampaan kertaan.

Tietyissä vaarallisten aineiden kuljetuksissa on eksakteja sääntöjä siitä, kuinka monta tyhjtä vaunua eli suojavaunuina toimivaa vaunua junassa tulee olla. Tarvittavien suojavaunujen määrä vaihtelee jonkin verran riippuen kuljetettavasta aineesta sekä siitä, että kuljetetaanko ainetta säiliövaunuilla vai muilla vaunuilla, joissa aine on pienemmissä pakkausissa tai irtotavarana [42].

Vaikka systemaattisuutta jonkin verran tutkittiin, niin tehtiin kuitenkin päätös, ettei simulaatio-ohjelmaan lähdetä lisäämään siihen liittyviä yksityiskohtia, vaan päätettiin luoda junat täysin jakaumiin perustuen. Tähän päädyttiin siitä syystä, että datasta poimitut yksittäiset junat ja simulaatiolla luodut junat antoivat monenlaisia ja kuitenkin samankaltaisia akselimassajonoja. Yksityiskohtaisten sääntöjen lisäys olisi todennäköisesti vaikuttanut hyvin vähän, mutta se olisi monimutkaistanut simulaatio-ohjelman tekoa huomattavasti. Lisäksi olisi ollut suuri työ pelkästään löytää kaikki vaunujen kytkentöihin liittyvät säännöt ja päättää mitkä niistä otetaan mukaan, koska kaikkien sääntöjen ohjelmointi olisi ollut mahdotonta.

6. STOKASTISEN KUORMAN MÄÄRITYKSEN MATEMAATTISIA PERUSTEITA

Tässä luvussa käydään läpi stokastisen simulaation kannalta keskeisiä matemaattisia perusteita. Stokastinen eli tilastollinen simulaatio perustuu tilastoihin ja niistä saataviin todennäköisyyksiin, joten luku jakaantuu kahteen pääkappaleeseen 6.1, joka käsittelee todennäköisyysmatematiikan keskeisimpiä asioita ja 6.2, jossa esitellään tilastomatematiikan aiheita ja ääriarvoteoriaa. Osa kappaleessa 6.1 esitetyistä asioista voidaan katsoa olevan enemmän tilastomatematiikkaakin, mutta ne on esitetty jo kappaleessa 6.1, jotta asioissa edettäisiin jollakin tarkkuudella perusteista kohti pidemmälle meneviä aiheita.

6.1 Todennäköisyysmatematiikan käsitteitä ja menetelmiä

Todennäköisyyslaskenta itsessään pyrkii tekemään satunnaisilmiöistä matemaattisia malleja, joilla yritetään kuvata sekä ilmiön satunnaisia, että systemaattisia piirteitä. Ilmiön satunnainen määritelmä täyttyy, mikäli ilmiö voi päätyä alkutilasta useaan erilaiseen lopputilaan ja ilmiön lopputilan tulosta ei voida ennustaa tarkasti alkutilan perusteella, mutta lopputilan tulosvaihtoehtojen suhteellisten frekvenssien tulee kuitenkin ilmiön toistuessa käyttäytyä säännönmukaisesti. Tämän työn tapauksessa juna täyttää satunnaisuuden määritelmän, koska ei tiedetä tarkkaan, millaisia junakokonaisuuksia luonnossa on tulossa tai vastaavasti millaisia simulaattori arpoo, mutta tiedetään kuinka eri ominaisuudet, kuten vaunutyyppit ovat junissa jakautuneet tähän mennessä ja nämä jakaumat vaikuttavat junien muodostumiseen tehden niistä todellisen kaltaisia. Systemaattisen eli deterministisen ilmiön määritelmä taas täyttyy, kun ilmiön alkutilan perusteella voidaan ennustaa tarkasti tulos. Tässä työssä determinististä luonnetta edustaa junan arvonnän jälkeinen tapahtuma eli junan kulku sillan yli. Siinä vaiheessa on siis junan ominaisuudet valittu ja ne tuottavat niin tarkkoja kuormavaikutuksia kuin junan etenemisen hypyksi on valittu mekaniikan laskusääntöjen mukaisesti junan kulkiessa sillan yli. Siis tässä vaiheessa tulos on kausaaliteettisessä suhteessa junan etenemän arvoon, kun junan arvonnassa saatujen junien kokoonpanot ovat ainoastaan korrelaatioissa aiemmin havaittujen junien kanssa. [43]

Käsitellään ilmiön satunnaisuuden säännönmukaisuutta eli tilastollista stabiliteettia enemmän kappaleessa 6.2, jossa käsitellään todennäköisyyslaskentaan kiinteästi liittyvää tilastomatematiikkaa. Seuraavissa alakappaleissa sen sijaan jatketaan todennäköisyysmatematiikalla ja käydään lyhyesti läpi keskeisimpiä todennäköisyyslaskennan käsitteitä ja menetelmiä.

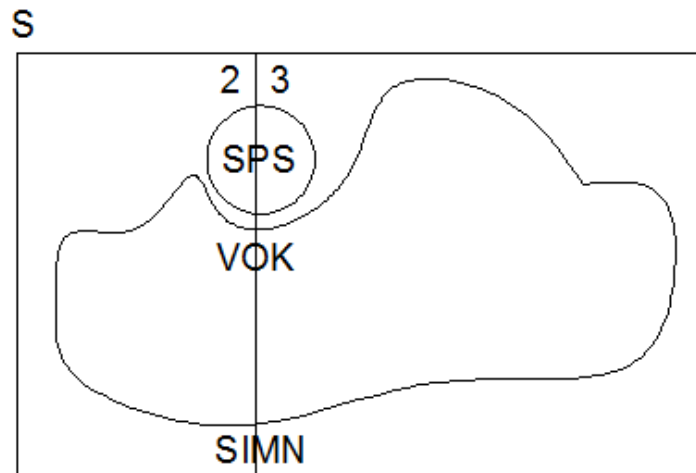
6.1.1 Joukko-oppi, todennäköisyyden aksiomat ja Boolean algebra

Joukko-oppi

Joukko-oppi muodostaa todennäköisyysteorian perustan. Joukko-opissa joukko sisältää alkioita ja joukot on hyvin määritetty, kun jokainen joukon alkio tunnetaan. Koko systeemin perustana on perusjoukko, johon kaikki joukot ja edelleen kaikki alkiot kuuluvat. [43] [44] Tässä työssä voidaan joukkojen hierarkia kuvata seuraavasti:

- Perusjoukko $S =$ ”Kaikki mittauspisteen ylittänyt kalusto”
- Perusjoukon sisässä olevia joukkoja $A, B, C, \dots, X, \dots =$ ”Vaunujen määrä junassa 1, 2, 3, ..., 85, ...”
- Joukkojen sisässä olevia osajoukkoja $A_2, B_2, C_2, \dots, X_2, \dots =$ ”Vaunutyyppit VOK, SIM, SIMN, ..., SPS, ...”
- Osajoukkojen sisässä olevia alkioita $a, b, c, \dots, d, \dots =$ ”Akselimassat 8900, 8900, 9000, ..., 22000, ...”

Edellisen lisäksi osajoukkojen sisällä on toinen rinnakkainen alkioiden ryhmä, joka on peräkkäisyyttä ilmaisevat lukuarvot. Kaikki joukot ovat siis äärellisiä ja osajoukot ovat pistevieraita, vaikka ne sisältävätkin samoja akselimassoja kuin toiset osajoukot, niin systeemi on luotu siten, että ne saavat vain omia akselimassojaan, koska se on hyvän lähtötietodatan vuoksi tässä mahdollista. Koska tässä työssä on hyvin paljon joukkoja, osajoukkoja ja alkioita, niin tehdään havainnollistava Venn-diagrammi esitys huomattavasti yksinkertaisemmalla kuvitteellisella junaliikenteellä. Otetaan kuvan 6.1 esimerkkiin mahdolliseksi kaksi eri vaunumäärää ja kolme eri vaunutyyppiä, jolloin asia pystytään hahmottamaan vielä graafisesti. Kuvassa S on otosavaruus eli kaikki junat, suorakaiteen muotoiset joukot 2 ja 3 kuvaavat yksittäisen junan vaunujen määrää. Näiden osajoukkoina on edelleen kolme vaunutyyppiä, SPS, VOK ja SIMN. Kuvan tapauksessa kaikkia vaunutyyppiejä esiintyy sekä kahden, että kolmen vaunun junissa. Osajoukkojen eli vaunutyyppien sisällä on edelleen kunkin vaunutyyppin akselimassoja, mutta niiden esittäminen on jätetty kuvasta pois.



Kuva 6.1 Venn-diagrammi kuvitteellisesta junaliikenteestä.

Boolean algebrat

Boolean algebra on symbolisen logiikan muoto, joka on saanut nimensä keksijänsä George Boolean (1815-1864) mukaan. Se on matemaattinen menettelytapa, jolla voidaan manipuloita loogisia suhteita symbolisessa muodossa. Erona perinteiseen algebraan on, että Boolean algebrassa esimerkiksi $a + b$ tarkoittaa $a \vee b$ eli a 'tai' b. [45] Boolean algebra on myös symmetrinen järjestelmä, mikä tekee siitä hyvin yksinkertaisen verrattuna epäsymmetriseen perinteiseen algebraan. Esimerkkinä summa- ja kertolaskut [46]:

$$\text{Perinteinen algebra:} \quad A + A + A + \dots = nA; A * A * A * \dots = A^n \quad (6.1)$$

$$\text{Boolean algebra:} \quad A + A + A + \dots = A; A * A * A * \dots = A \quad (6.2)$$

Boolean algebran määritelmä joukkoperheelle F täyttyy, mikäli seuraavat ehdot eli Boolean aksioomat pätevät siihen:

- i. Tyhjä joukko \emptyset on joukkoperheen F alkio: $\emptyset \in F$
- ii. Joukon A ollessa joukkoperheen F alkio, myös joukon komplementti A^c on joukkoperheen F alkio: $A \in F \rightarrow A^c \in F$
- iii. Joukkojen A ja B ollessa joukkoperheen F alkioita, myös niiden yhdiste $A \cup B$ on joukkoperheen F alkio: $A \in F, B \in F \rightarrow A \cup B \in F$

jossa

S = äärellinen joukko

A = joukon S osajoukko

F = joukon S osajoukkojen muodostama perhe eli $A \in F \rightarrow A \subset S$

Todennäköisyyden aksioomat

Todennäköisyyden aksioomilla tarkoitetaan todennäköisyyslaskennan matemaattista teoriaa, jonka avulla todennäköisyyttä voidaan käsitellä matemaattisen mittateorian mukaisena mittana. Erona esimerkiksi pituusmittaan on vain se, että todennäköisyysmitta on normeerattu siten, että ylärajana on 1. Tämän työn puitteissa jätetään käsittelemättä äärettömään eli mielivaltaiseen otosavaruuteen liittyvä teoria, eli käsitellään tässä yhteydessä ainoastaan äärelliseen otosavaruuteen liittyvää teoriaa, koska työssä tarvitaan ainoastaan sitä. Seuraavassa äärellisen otosavaruuden kolme aksioomaa esitettyinä:

- i. $Pr(S) = 1$
- ii. $0 \leq Pr(A) \leq 1, \text{ kaikille } A \in F$
- iii. $A \in F, B \in F, A \cap B = \emptyset \rightarrow Pr(A \cup B) = Pr(A) + Pr(B)$

jossa

S	= äärellinen joukko
A	= joukon S osajoukko
F	= joukon S osajoukkojen muodostama Boolean algebra
Pr	= joukkofunktio, joka liittää jokaiseen Boolean algebraan F kuuluvaan joukon S osajoukkoon A reaaliluvun

Aksioomien mukaan todennäköisyys Pr on siis positiivinen, normeerattu ja äärellisesti additiivinen mitta. Soveltamalla äärellisen otosavaruuden tapahtumiin Boolean algebran aksioomia sekä edelleen joukko-opin laskusääntöjä, saadaan muodostettua uusia tapahtumia, joiden todennäköisyydet saadaan edellisten aksioomien ja niistä johdettujen todennäköisyyslaskennan laskusääntöjen avulla. Todennäköisyyslaskennan laskusääntöjä ei lähdetä käymään tässä läpi, vaan niihin voi tutustua esimerkiksi lähteessä. [44]

6.1.2 Suhteellinen frekvenssi

Tässä työssä käytetään satunnaisotoksia, joiden tapahtumilla on jokin frekvenssi koetoistojen sisällä, joiden todennäköisyydet ovat edelleen suhteellisia frekvenssejä. Käydään tässä läpi määritelmä, jonka perusteella suhteellinen frekvenssi on todennäköisyys.

Merkitään satunnaiskokeen äärellistä otosavaruutta kirjaimella S ja olkoon $A \subset S$, jokin satunnaiskokeen tapahtuma. Satunnaiskoetta toistetaan n kertaa ja tapahtuman A frekvenssiä eli lukumäärää koetoistojen joukossa merkitään f_A . Jolloin:

$$\frac{f_A}{n}$$

on tapahtuman A suhteellinen frekvenssi. Käytetään sille merkintää:

$$Pr_f(A) = \frac{f_A}{n} \quad (6.3)$$

Äärellisen todennäköisyyden aksioomien kautta voidaan perustella suhteellisen frekvenssin olevan todennäköisyys:

Aksiooma (i): Ototavaruuden S ollessa varma tapahtuma, on tapahtuman frekvenssi koetoistojen määrä eli $f_S = n$, jolloin

$$Pr_f(S) = \frac{f_S}{n} = \frac{n}{n} = 1 \quad (6.4)$$

Aksiooma (ii): Kaikille tapahtumille $A \subset S$ pätee $0 \leq f_A \leq n$, joten

$$0 \leq Pr_f(A) = \frac{f_A}{n} \leq 1 \quad (6.5)$$

Aksiooma (iii): Mikäli tapahtuman A lisäksi on tapahtuma B ja ne ovat toisensa poissulkevia eli $A \cap B = \emptyset$ niin $f_{A \cup B} = f_A + f_B$, jolloin

$$Pr_f(A \cup B) = \frac{f_{A \cup B}}{n} = \frac{f_A + f_B}{n} = \frac{f_A}{n} + \frac{f_B}{n} = Pr_f(A) + Pr_f(B) \quad (6.6)$$

Siis suhteellinen frekvenssi täyttää äärellisen todennäköisyyden aksioomien määritelmät ja on näin äärellisen todennäköisyyden erikoistapaus. Kun koetoistojen lukumäärä kasvaa riittävän suureksi ja tapahtuman suhteellinen frekvenssi alkaa stabiloitua, voidaan suhteellista frekvenssiä alkaa tällöin kutsua tilastolliseksi todennäköisyydeksi. [43]

6.1.3 Klassinen ja tilastollinen todennäköisyys

Klassisella todennäköisyydellä tarkoitetaan yhtä todennäköisten tulosvaihtoehtojen suhteellista frekvenssiä. Tulosvaihtoehtoja on myös oltava äärellinen määrä klassisen todennäköisyyden piirissä. Tällaista todennäköisyyttä on reaalimaailmassa hyvin vähän tai on mahdotonta todistaa sen olemassaoloa, joten klassista todennäköisyyttä voikin pitää reaalimaailman epätäydellisyyksien puitteissa teoreettisena todennäköisyytenä. Klassista todennäköisyyttä havainnollistetaan usein virheettömien noppien avulla ja todennäköisyyslaskentakin juontaa juurensa 1600-luvun noppapeleihin. Kunkin silmäluvun todennäköisyys on yhden suhde kuuteen, koska nopassa on kuusi identtistä tahkoa. Hyvällä nopalla varmasti päästäisiinkin hyvin lähelle tuota tarkkaa todennäköisyyttä, mutta voidaan kuitenkin epäillä, että pienistä epätäydellisyyksistä johtuen tuohon tarkkaan klassiseen todennäköisyyteen ei päästä suurillakaan toistomäärillä. Klassisen todennäköisyyden määritelmä kaavana [43] [44]:

$$Pr(A) = \frac{k}{n} \quad (6.7)$$

jossa

$Pr(A)$	= tapahtuman "A" klassinen todennäköisyys
k	= tapahtumalle "A" suotuisat yhtä todennäköiset tulosvaihtoehdot
n	= satunnaiskokeen kaikki mahdolliset yhtä todennäköiset tulosvaihtoehdot

Reaalimaailmassa harva ilmiö sisältää edes teoriassa yhtä todennäköisiä tulosvaihtoehtoja ja useimmissa ilmiöissä tulosvaihtoehtoja on katsonnasta riippuen ääretön määrä. Tällaisten tulosvaihtoehtojen suhteellista frekvenssiä on mahdotonta päätellä ilman satunnaiskoetta, sillä ne eivät kuulu klassisen todennäköisyyden piiriin. Tällaisten ilmiöiden todennäköisyydet kuuluvat tilastollisen eli empiirisen todennäköisyyden piiriin. Empiirinen todennäköisyys selvitetään satunnaiskoetta toistamalla. Kun jonkin tapahtuman suhteellinen frekvenssi alkaa lähestyä jotakin kiinteää lukua toistojen lukumäärän kasvaessa, voidaan saatua kiinteää lukua pitää kyseisen tapahtuman empiirisenä todennäköisyytenä. Empiirisen todennäköisyyden määritelmä kaavana on saman näköinen kuin klassisenkin todennäköisyyden, termien sisällön ollessa kuitenkin hyvin erilainen:

$$Pr(A) = \frac{f}{n} \quad (6.8)$$

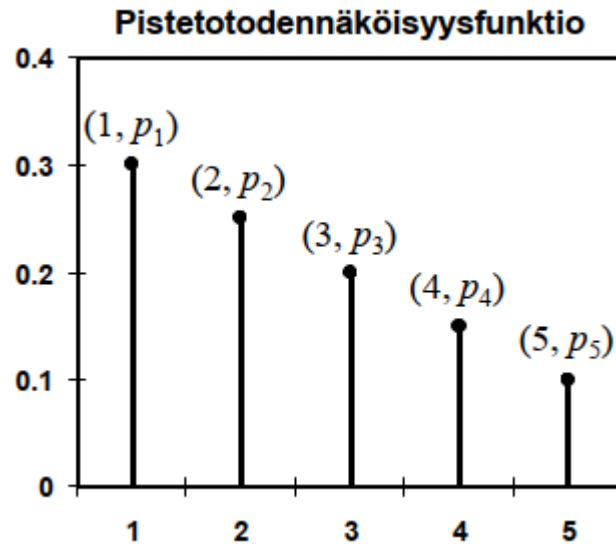
jossa

$Pr(A)$	= tapahtuman "A" empiirinen todennäköisyys
f	= tapahtuman "A" lukumäärällinen realisoituminen koetoistoissa
n	= satunnaiskokeen toistojen kokonaismäärä

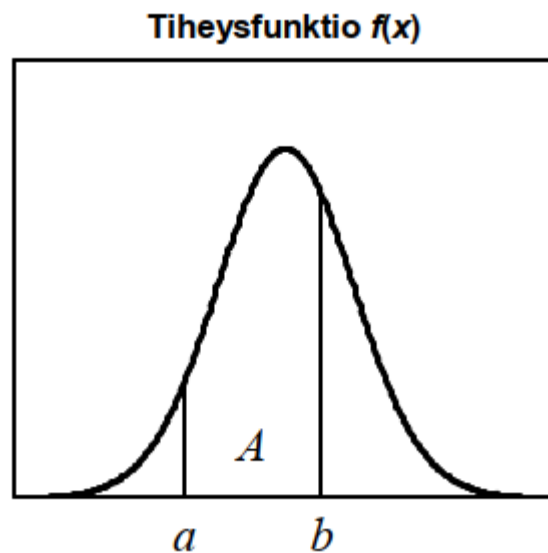
Myös tässä työssä käytettävät junat ja niiden ominaisuuksia kuvaavat jakaumat sisältävät kuhunkin ominaisuuteen sisältyvien tapahtumien jonkin asteisia empiirisiä todennäköisyyksiä. Suoranaisesti lähtötietojakaumiin sisältyvät suhteelliset frekvenssit eivät tässä työssä täytä täysin empiirisen todennäköisyyden määritelmää, koska frekvenssien stabiilisuutta ei ole testattu, vaan jakaumat ovat vain satunnaiset vuoden mittaiset otokset datasta. Junat ja niiden ominaisuudet myös muuttuvat ajan kuluessa, joten lähtötietojakaumien tarkka määrittely on siinä mielessä turhaa ja tämän työn puitteissa se olisi ollut myös aikataulullisesti mahdotonta. Lisäksi on muistettava se, että empiirisen todennäköisyyden määritelmän mukaisen raja-arvon olemassa oloa ei lopulta takaa mikään, joten tällaisissa tapauksissa ollaan tietyllä tavalla aina jonkinasteisen "sivistyneen arvauksen" varassa. [43] [44]

6.1.4 Stokastinen muuttuja ja kertymäfunktio

Satunnaisilmiöiden matemaattista mallinnusta varten ilmiön tulosvaihtoehdot tulee kuvata numeerisesti. Tähän tarkoitukseen käytetään satunnaismuuttujaa eli stokastista muuttujaa. Se on reaaliarvoinen funktio, johon tapahtuman tulosvaihtoehtojen todennäköisyydet liitetään. Diskreetin satunnaismuuttujan tapauksessa funktio on pistetodennäköisyysfunktio (kuva 6.2) ja jatkuvan satunnaismuuttujan tapauksessa tiheysfunktio (kuva 6.3). [47]



Kuva 6.2 Diskreetin satunnaismuuttujan pistetodennäköisyysfunktio [47].



Kuva 6.3 Jatkuvan jakauman, tässä tapauksessa normaalijakauman tiheysfunktio [47].

Havainnollistetaan kumpaakin satunnaismuuttujatyyppeä yksinkertaisten esimerkkien avulla:

Tunnetuin diskreetti jakauma syntyy kolikonheitossa, jossa kaksi alkeistapahtumaa ”kruuna” ja ”klaava” muodostavat otosavaruuden S . Reaaliarvoisella funktiolla f eli tässä tapauksessa heiton sattumanvaraisuuden vuoksi satunnaismuuttujalla, saadaan alkeistapahtumat edelleen numeeriseen muotoon:

$$\begin{aligned} f(\text{kruuna}) &= 1 \\ f(\text{klaava}) &= 0 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Virheettömän kolikon tapauksessa nämä funktion kaksi mahdollista arvoa saavat molemmat oletuksena todennäköisyysiksi:

$$\begin{aligned} Pr(f = 1) &= \frac{1}{2} \\ Pr(f = 0) &= \frac{1}{2} \end{aligned} \tag{6.10}$$

Näin satunnaismuuttujan arvoihin on liitetty todennäköisyydet, jotka yhdessä muodostavat satunnaismuuttujan todennäköisyysjakauman, joka on tässä tapauksessa diskreetti. [47] Satunnaismuuttujan arvojen realisoitumisen määrää kuitenkin sattuma, joten oletettu todennäköisyysjakauma ei välttämättä realisoidu vielä lähellekään muutamilla heitoilla, vaan heittoja tarvitaan todennäköisesti paljon ennen kuin oletettua jakaumaa aletaan lähestyä. Toki oletettuun jakaumaan voidaan päätyä vain kahdella heitolla, mutta se on sattumaa, jonka todennäköisyys on tietenkin $\frac{1}{2}$. Tässä työssä vastaavanlaista diskreettiä satunnaismuuttujaa edustaa esimerkiksi jonkin mittauspisteen vaunutyypit, jotka ovat kaikki erillisiä arvoja. Vaunutyyppejä on enemmän kuin kolikossa puolia ja kunkin vaunutyypin oletettu todennäköisyys tulee tilastollisen jakauman eikä virheettömän geometrian mukaan, mutta muuten idea on sama.

Jatkuva jakauma taas voi olla mikä vain reaaliarvoinen jakauma, kuten suomalaisten painojakauma tai tässä tapauksessa akselimassajakauma. Siinä jakaumalla on jokin ala- ja yläraja, joiden välillä voi olla ääretön määrä arvoja. Käytännössä eri painojen arvoja ei voida loputtoman tarkasti ilmaista, vaan esimerkiksi ihmisten painot ilmoitetaan yleensä kilogramman kymmenyksen tarkkuudella ja tässä työssä käytetyt akseleiden painot ilmoitetaan sadan kilogramman tarkkuudella, jolloin kyseessä ei itseasiassa ole jatkuva jakauma, vaan jälleen diskreetti jakauma. Akselimassojen tapauksessa ala- ja ylärajan välille mahtuu kuitenkin todella suuri määrä arvoja, eikä suurta virhettä tapahdu, vaikka havaintoarvojen väliset todennäköisyydet interpoloidaan lähimpään 100 kilogramman tarkkuudella ilmoitettuun havaintoarvoon, jolloin jakaumaa voidaan kutsua sekajakau-maksi. Tässä työssä lähtötietojen satunnaismuuttujat ovat sellaisia, että niistä mikään ei ole jatkuva jakauma sellaisenaan, vaan niihin täytyisi sovittaa jokin jatkuva funktio. Esimerkiksi akselimassojen tapauksessa sovituksena voisi toimia sekoitettu normaalija-kauma, koska akselimassojen jakaumassa on kaksi huippua. Jatkuvan jakauman sovittaminen jokaiseen lähtötietojakaumaan olisi kuitenkin työlästä ja tarkkuus ei välttämättä olisi edes samaa luokkaa kuin interpoloidulla diskreetillä jakaumalla, kun siinä vain on riittävän monta eri havaintoarvoa. Simulaation tuloksena saataviin kuormavaikutuksiin sen sijaan sovitetaan jatkuvat funktiot, jolloin kuormavaikutuksista tulee teoriassa jatkuvia satunnaismuuttujia. Jatkuvan satunnaismuuttujan tapauksessa todennäköisyydet saadaan liitettyä reaaliin arvoihin tiheysfunktion avulla, joka määritellään seuraavin eh-doin:

Olkoon $\xi: S \rightarrow$ jatkuva satunnaismuuttuja. Reaaliarvoinen funktio f määrittelee jatkuvan satunnaismuuttujan ξ tiheysfunktion, kun:

1. $f(x)$ on jatkuva
2. $f(x) \geq 0$ kaikille x
3. $Pr(a \leq \xi \leq b) = \int_a^b f(x)dx$
4. $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$

Eli tiheysfunktion tulee olla jatkuva ja kaikkialla ei-negatiivinen, jonka reaaliakselien väleihin integraalit ovat todennäköisyyksiä ja koko reaaliakselin integraali on 1. [47]

Pistetodennäköisyys- ja tiheysfunktioiden lisäksi tarvitaan kertymäfunktiota, joka kuvaa satunnaismuuttujan reaalilukujen joukon välille $[0,1]$. Kertymäfunktion avulla voidaan määrittää minkä tahansa kyseiseen satunnaisilmiöön liittyvän tapahtuman todennäköisyyden. Vaikka kertymäfunktiokin on luonnollisesti erilainen diskreetillä ja jatkuvalla satunnaismuuttujalla, on sen määritelmä kuitenkin sama molemmille:

Olkoon $\xi: S \rightarrow$ satunnaismuuttuja ja $F(x) = Pr(\xi \leq x)$ sen kertymäfunktio, jolla on seuraavat ominaisuudet [47]:

1. $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$
2. $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$
3. F on funktiona ei-vähenevä: $F(x_1) \leq F(x_2)$, jos $x_1 \leq x_2$
4. F on funktiona jatkuva oikealta: $\lim_{h \rightarrow 0+} F(x+h) = F(x)$

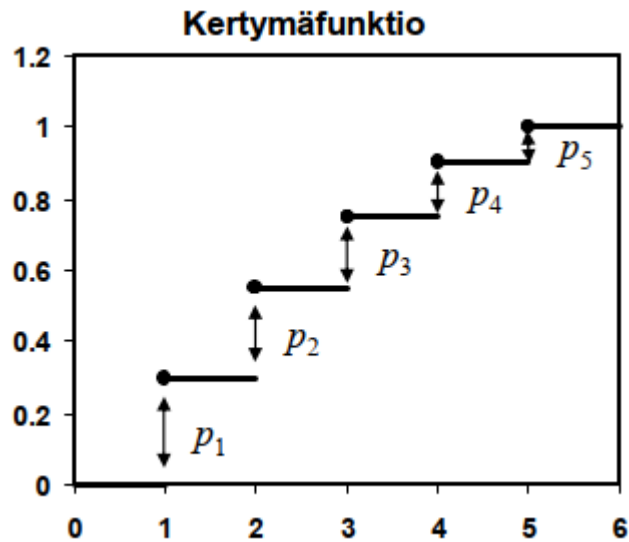
Esitetään vielä yhteydet kertymäfunktion ja pistetodennäköisyysfunktion sekä kertymäfunktion ja tiheysfunktion välille.

Pistetodennäköisyys- ja kertymäfunktion yhteys [47]:

$$Pr(\xi = x_i) = p_i = F(x_i) - F(x_{i-1}), x_i \in T \quad (6.11)$$

jossa

T on satunnaismuuttujan ξ saamien arvojen joukko



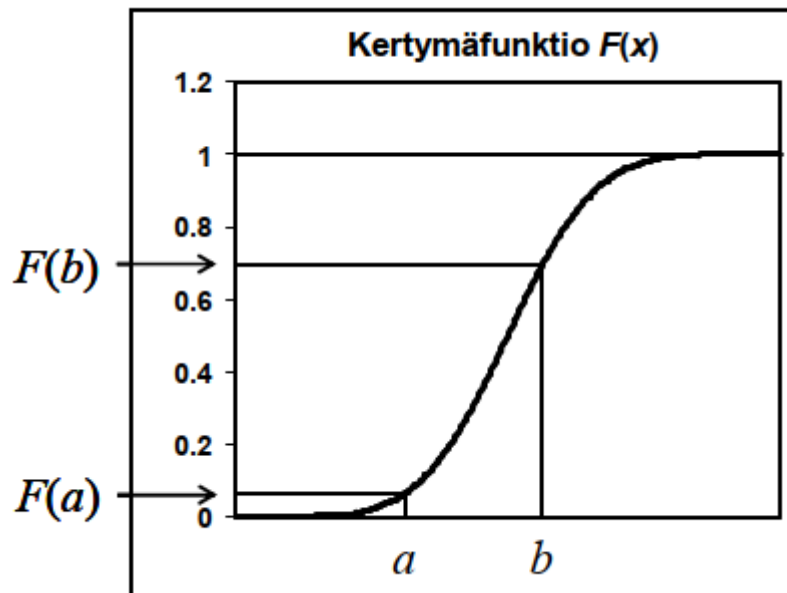
Kuva 6.4 Diskreetin satunnaismuuttujan kertymäfunktion [47].

Tiheys- ja kertymäfunktion yhteys:

Olkoon ξ jatkuva satunnaismuuttuja, $f(x)$ satunnaismuuttujan tiheysfunktio ja $F(x) = Pr(\xi \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$ satunnaismuuttujan kertymäfunktion. Tällöin:

$$f(x) = F'(x) = \frac{d}{dx}F(x) \quad (6.12)$$

Jatkuvan jakauman kertymäfunktion on siis tiheysfunktion integraali.



Kuva 6.5 Jatkuvan jakauman, tässä tapauksessa normaalijakauman kertymäfunktion [47].

6.2 Tilastomatematiikan käsitteitä ja menetelmiä

Tässä kappaleessa esitellään työn kannalta keskeisimmät tilastomatemattiset menetelmät pääpiirteittäin. Kaiken taustateorian läpikäyminen lyhyestikin näin laajasta aiheesta on mahdotonta käydä läpi tässä yhteydessä, joten aiheesta enemmän kiinnostuneiden lukijoiden kannattaa tutustua tarkemmin lähdemateriaaliin. Tässä kappaleessa on kuitenkin tarkoitus saada lukijan muodostamaan itselleen jonkinlainen kokonaiskuva työhön liittyvistä tilastomatemattisista käsitteistä ja menetelmistä, joista ääriarvojakaumat ja niiden testaus ovat tärkeimmässä roolissa.

6.2.1 Satunnaisotantaan liittyviä suureita

Käydään tässä läpi tärkeimmät satunnaisotantaan liittyvät suureet. Kaavoissa otossuureita on merkitty pienillä kirjaimilla, joka tarkoittaa yleensä kirjallisuudessa yhden otoksen sisäisiä realisoituneita suureita. Mikäli samat suureet merkittäisiin isoilla kirjaimilla, tarkoitettaisiin sillä kyseisen suureen satunnaismuuttujaa. [1] [48] [49]

Otoskeskiarvo, eli otoksen havaintoarvojen summa jaettuna havaintojen määrällä:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.13)$$

Otosvarianssi, joka kuvaa otoksen havaintoarvojen vaihtelua otoskeskiarvon ympärillä:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6.14)$$

Otoskeskihajonta, joka myös kuvaa havaintoarvojen vaihtelua otoskeskiarvon ympärillä ja jolla on myös sama mittayksikkö kuin otoskeskiarvolla:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (6.15)$$

Variaatiokerroin, eli otoskeskihajonnan ja otoskeskiarvon osamäärä kuvaa hajonnan suhteellisuutta:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \times [100\%] \quad (6.16)$$

Näiden lisäksi tärkeitä perussuureita ovat otosmaksimi ja -minimi, joiden avulla saadaan otosvaihteluväli.

Otosmaksimi, eli otoksen suurin havaintoarvo:

$$x_{max} = \max(x_1, \dots, x_n) \quad (6.17)$$

Otosminimi, eli otoksen pienin havaintoarvo:

$$x_{min} = \min(x_1, \dots, x_n) \quad (6.18)$$

Otosvaihteluväli, eli otoksen suurimman ja pienimmän havaintoarvon erotus:

$$r = x_{max} - x_{min} \quad (6.19)$$

joissa

n = havaintojen lukumäärä otoksessa

x_i = yksittäinen havaintoarvo

6.2.2 Ääriarvoteoriasta

Ääriarvolla tarkoitetaan satunnaismuuttujajoukossa esiintyvää pienintä tai suurinta arvoa [50]. Satunnaismuuttujajoukko on kuitenkin vain joukko toisistaan riippumattomia havaintoja, joten kyseessä on vasta empiirinen ääriarvo joltakin mitatulta jaksolta. Koska havaintoja ei ole käytännössä mahdollista hankkia kuin joltakin äärelliseltä ajanjaksolta korkeintaan nykyhetkeen asti ja toisaalta esimerkiksi luonnonkuormien osalta ääriarvojakamat muuttuvat pitkällä aikajänteellä, tarvitaan teorettinen malli, jolla voidaan arvioida eri ajanjaksoilla tulevaisuudessa esiintyviä ääriarvoja.

Ääriarvoteoria on tilastotieteen osa-alue, jossa tutkitaan otosmaksimien eli tietyillä ajanjaksoilla tapahtuvien ääriarvojen käyttäytymistä, josta voidaan päätellä edelleen teorettinen ääriarvojakama. Käytetään otosmaksimeille määritelmää [51]:

$$M_1 = X_1, \quad M_n = \max(X_1, \dots, X_n), \quad n \geq 2 \quad (6.20)$$

jossa

X_1, \dots, X_n = jono riippumattomia ja samoin jakautuneita ei-degeneroituneita satunnaismuuttujia (*iid-satunnaismuuttujia*)

Teoriassa otosmaksimien täsmällinen jakauma voidaan johtaa tarkasti kaikilla n :

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(M_n \leq x) &= \mathbb{P}(X_1 \leq x, \dots, X_n \leq x) \\ &= \prod_{i=1}^n \mathbb{P}(X_i \leq x) = F^n(x), \quad x \in \mathbb{R}, \quad n \in \mathbb{N} \end{aligned} \quad (6.21)$$

jossa

F = on iid-satunnaismuuttujien kertymäfunktio

Edellisen esityksen hyödyllisyys käytännön sovelluksien kannalta on kuitenkin rajallinen, koska jakauman F tarkka muoto ei ole tiedossa. Jakauma F voidaan toki estimoida havaitusta jakaumasta jollakin estimointimenetelmällä ja sijoittaa estimaatti \hat{F} edelliseen esitykseen. Toisaalta voidaan edetä myös niin, että jätetään F tuntemattomaksi ja etsitään suoraan malli maksimien jakaumalle F^n .

Tutkitaan otosmaksimin jakaumaa yleisessä tapauksessa. Satunnaismuuttujien ääriarvot osuvat maksimien tapauksessa jakauman oikeanpuoleiseen häntään, joten otosmaksimin M_n asympotoottinen käyttäytyminen tapauksessa $n \rightarrow \infty$ on oltava yhteydessä jakauman F häntään lähellä oikeanpuoleista päätepistettä.

$$x_f = \sup\{x \in \mathbb{R} | F(x) \leq 1\} \quad (6.22)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(M_n \leq x) &= F^n(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0, & x \leq x_f \leq \infty, \\ \mathbb{P}(M_n \leq x) &= F^n(x) = 1, & x \geq x_f, x_f \leq \infty \end{aligned} \quad (6.23)$$

Yllä olevasta tarkastelusta huomataan, että tapauksessa $n \rightarrow \infty$ otosmaksimin todennäköisyysmassa keskittyy todellakin päätepisteeseen x_f . Edellinen ei vielä kerro itse jakaumasta mitään, vaan otosmaksimien tarkempaa käyttäytymistä saadaan selville tarkastelemalla keskitettyjen ja normalisoitujen maksimien suppenemista jakauman suhteen. Muodostetaan otosmaksimin M_n lineaarinen muunnos

$$M_n^* = \frac{M_n - d_n}{c_n} \quad (6.24)$$

jossa (c_n) ja (d_n) ovat jono vakioita, jotka sopivasti valittuina stabiloivat otosmaksimin lineaarisen muunnoksen jakauman lokaation ja skaalan, kun n kasvaa. Seuraavaksi esitettävä lause on klassisen ääriarvoteorian perusta ja se on nimetty lauseen kehittäneiden henkilöiden mukaan Fisher-Tippet, Gnedenko -teoreemaksi. Lauseen mukaan jakauman täytyy olla yksi kolmesta standardista ääriarvojakaumasta, mikäli M_n^* :lle on olemassa normeerausvakioiden jonot, joilla se suppenee heikosti tähän jakaumaan, kun $n \rightarrow \infty$.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}\left(\frac{M_n - d_n}{c_n} \leq x\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} F^n(c_n x + d_n) = H(x), x \in \mathbb{R}, c_n > 0, d_n \in \mathbb{R} \quad (6.25)$$

jossa H on ei-degeneroitunut jakaumafunktio, joka on tyypiltään yksi kolmesta ääriarvojakaumasta, jotka on esitetty alla standardimuodoissaan:

$$I \text{ (Gumbel): } \Lambda(x) = e^{\{-e^{-x}\}}, \quad x \in \mathbb{R}, \quad (6.26)$$

$$II \text{ (Fréchet): } \Phi_\alpha(x) \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ e^{\{-x^{-\alpha}\}}, & x \geq 0 \end{cases}, \quad \alpha > 0, \quad (6.27)$$

$$III \text{ (Weibull): } \psi_{\alpha}(x) \begin{cases} e^{\{-(-x)^{-\alpha}\}}, & x \leq 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}, \quad \alpha > 0. \quad (6.28)$$

Yllä olevat ääriarvojakaumat ovat iid-satunnaismuuttujien $X_1, X_2 \dots$ otosmaksimien M_n^* ainoat mahdolliset rajajakaumat, jotka ovat riippumattomia satunnaismuuttujien X_i jakaumasta F . [51]

Seuraavissa kappaleissa 6.2.2 ja 6.2.3 käsitellään tarkemmin Gumbel- ja Weibull-jakaumia. Frechet-jakaumaa ei käydä tässä työssä tarkemmin läpi, koska kyseinen jakauma ei sovellu raideliikenteen kuormavaikutusten arviointiin. Frechet-jakauman hännän vaihtaminen on hyvin hidasta eli se soveltuu paremmin luonnonilmiöiden arviointiin, kuten tulviin, joiden ääriarvot vaihtelevat hyvin paljon vuodesta toiseen. Raideliikenteessä taas kuormien ääriarvot pakkaantuvat suhteellisen pienelle välille, koska akselimassoihin pyritään vaikuttamaan säännöillä. Kappaleessa 6.2.4 kerrotaan vielä GEV-jakaumasta eli yleistetystä ääriarvojakaumasta (*generalized extreme value distribution*), joka yhdistää nämä kolme ääriarvojakaumaa yhdeksi jakaumaperheeksi. [51]

6.2.3 Tyypin I ääriarvojakauma (Gumbel)

Gumbel-jakauma on ääriarvoanalyysissä hyvin perinteinen malli, jolla on lähes samanlainen asema kuin normaalijakaumalla muissa tilastollisissa sovelluksissa. Merkittävä etu käytön kannalta Gumbelin-jakauman tapauksessa on, että se voidaan määrittellä pelkkien paikka- ja skaalaparametrien avulla, kuten Gaussin tapauksessa. [52] Jakauma on saanut nimensä saksalaisen matemaatikon Emil Gumbelin (1891-1966) mukaan.

Gumbel-jakauman maksimiarvojakauman kertymäfunktio esitetään usein muodossa (53)

$$F(x; \mu, \sigma) = e^{\left[-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}\right]} \quad (6.29)$$

ja tiheysfunktio muodossa

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} e^{\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) - e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}\right]} \quad (6.30)$$

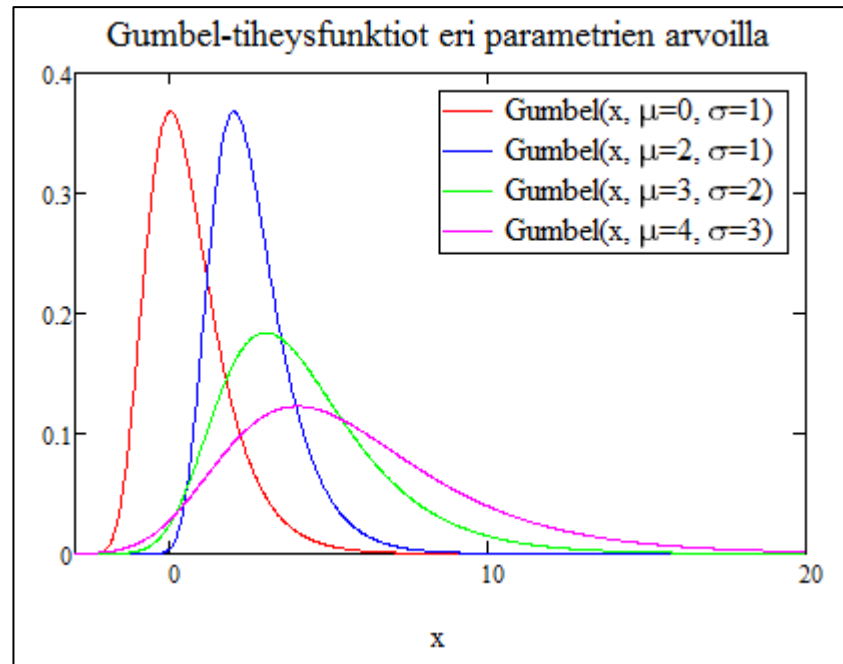
joissa

e = Neperin luku

σ = skaalaparametri, $\sigma > 0 \wedge \in \mathbb{R}$

μ = paikkaparametri, $\mu \in \mathbb{R}$

Funktio eroaa standardimuodostaan siis siten, että x on korvattu tekijällä $(x - \mu)/\sigma$.



Kuva 6.6 Parametrien vaikutus Gumbel-jakauman tiheysfunktion muotoon.

Gumbel-jakauman funktioiden ulkomuoto ja muuttujia kuvaavat symbolit eroavat kuitenkin hyvin paljon eri lähteissä ja ne esitetään usein jo eteenpäin johdetuissa muodoissa. Seuraavaksi esitettävät funktiot sisältävät parametrit, joihin on sijoitettu sisään kaavat, joissa on muuttujina otoksen keskiarvo ja –hajonta. Funktio ei ole Gumbelin-funktio perusmuodossaan, vaan sen sisältämille parametreille on jo suoritettu estimointi momenttimenetelmällä. Tämä funktio on mainittu sen vuoksi, että sillä on helppo lähteä luomaan teoreettista ääriarvojakaumaa, koska ainoastaan otoksen keskiarvo- ja hajonta tarvitsee tietää. Momenttimenetelmällä estimoidun Gumbel-jakauman kertymäfunktio on muotoa [54]:

$$F(x; \alpha, u) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (6.31)$$

ja tiheysfunktio on muotoa:

$$f(x; \alpha, u) = \alpha e^{-\alpha(x-u)} e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (6.32)$$

joissa

- e = Neperin luku
- α = skaalaparametri, $\alpha > 0 \wedge \alpha \in \mathbb{R}$
- u = muotoparametri, $u \in \mathbb{R}$

Muoto ja skaalaparametrit estimoidaan momenttimenetelmällä, jonka johtamista ei käydä tässä tarkemmin läpi. Lopputuloksena saadaan parametrien estimaateille hyvin yksinkertaiset kaavat:

$$\hat{\alpha} = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}}, \quad \hat{\mu} = \mu - \frac{\gamma}{\alpha} \quad (6.33)$$

joissa

σ = otoksen keskihajonta
 μ = otoksen keskiarvo
 γ = Eulerin-Macheronin vakio

Esitellään myös suurimman uskottavuuden estimointi, jota pidetään usein parhaana estimointimenetelmänä ääriarvojakaumien kanssa. Siinä paikka- ja skaalaparametrit ratkaistaan numeerisesti. Ensiksi ratkaistaan skaalaparametrin estimaatti σ_n seuraavasta yhtälöstä iteratiivisesti, jossa σ :n alkuarvauksena voi käyttää pienimmän neliösumman estimaattia. [52]

$$\sigma - n^{-1} \sum_{i \leq n} x_i + \frac{[\sum_{i \leq n} x_i \exp(\frac{-x_i}{\sigma})]}{[\sum_{i \leq n} \exp(\frac{-x_i}{\sigma})]} = 0 \quad (6.34)$$

Tämän jälkeen ratkaistaan lokaatioparametri μ_n suoraan seuraavasta kaavasta

$$\mu_n = -\sigma_n \log \left[n^{-1} \sum_{i \leq n} \exp\left(\frac{-x_i}{\sigma_n}\right) \right] \quad (6.35)$$

6.2.4 Tyypin III ääriarvojakauma (Weibull)

Weibull-jakauma on saanut nimensä ruotsalaisen insinöörin ja matemaatikon Waloddi Weibull:n (1887-1979) mukaan, joka kehitti jakauman vuonna 1937 ja esitteli sen yksityiskohtaisesti vuonna 1951. Weibull-jakaumaa sovelletaan paljon luotettavuusanalyysissä, vauriotodennäköisyyksien laskemiseen ajan funktiona sekä ääriarvojen mallintamiseen monissa tapauksissa [55].

Muista ääriarvojakaumista poiketen Weibull-jakaumalla on äärellinen oikea päätepiste [51]. Tästä johtuen sen voi ajatella sopivan hyvin raideliikenteen aiheuttamien äärimmäisten kuormavaikutusten arviointiin, koska raideliikenteen akselikuormia rajoittaa kaluston ja radan asettamat painorajoitukset, joita tulisi noudattaa.

Weibull-jakauman kertymäfunktio on muotoa [56]:

$$F(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (6.36)$$

ja tiheysfunktio on muotoa

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (6.37)$$

joissa

- e = Neperin luku
 α = muotoparametri, $\alpha > 0$
 β = skaalaparametri, $\beta > 0$

Muoto- ja skaalaparametrit saadaan estimoitua otoksesta eli ääriarvohavainnoista. Estimointitapoja on useita, kuten pienimmän neliösumman estimaattorit (*least-squares estimators*) ja momenttimenetelmät (*methods of moments*). Tässä esitetään kuitenkin suurimman uskottavuuden estimaattori (SUE) (*maximum-likelihood estimator*), joka on ääriarvojen tapauksessa useimmin käytetty estimointimenetelmä. Menetelmällä on useita toivottuja ominaisuuksia, joita muilla menetelmillä ei usein ole. Näitä ovat esimerkiksi asymptoottinen tehokkuus eli asymptoottinen normaalisuus ja estimaattorin tarkentuvuus, joista tarkentuvuudella tarkoitetaan estimaatin $\hat{\theta}_n$ suppenemista todennäköisyyden suhteen todelliseen arvoon θ kun $n \rightarrow \infty$. [51] Weibull-jakauman tapauksessa SU-estimoinnilla parametrit saadaan kahden seuraavan yhtälön toteutuessa [56]:

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\alpha}} \ln X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\alpha}}} - \frac{1}{\hat{\alpha}} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln X_i}{n} \quad (6.38)$$

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\alpha}}}{n} \right)^{\frac{1}{\hat{\alpha}}} \quad (6.39)$$

jossa

- X_i = satunnaismuuttuja eli yksi havainto otoksesta
 n = otoksen suuruus eli havaintojen lukumäärä

Ensimmäisestä yhtälöstä voidaan ratkaista α Newtonin menetelmällä ja β saadaan ratkaistua tämän jälkeen suoraan. Newtonin iteraation rekursiivinen askel on kaavan (6.40) mukainen

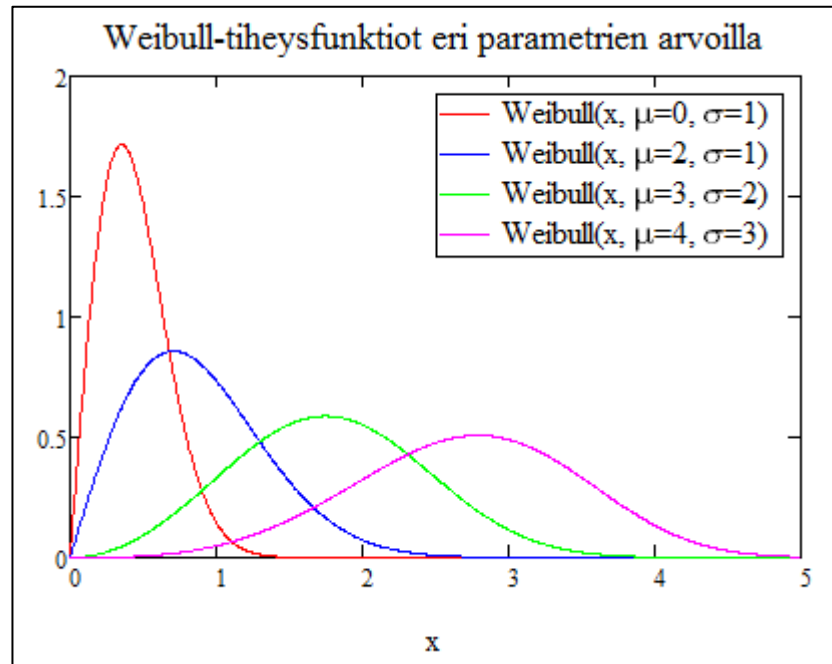
$$\hat{\alpha}_{k+1} = \hat{\alpha}_k + \frac{A + \frac{1}{\hat{\alpha}_k} - \frac{C_k}{B_k}}{\frac{1}{\hat{\alpha}_k^2} + \frac{(B_k H_k - C_k^2)}{B_k^2}} \quad (6.40)$$

jossa

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \ln X_i}{n}, \quad B_k = \sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\alpha}_k}, \quad C_k = \sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\alpha}_k} \ln X_i, \quad H_k = \sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\alpha}_k} (\ln X_i)^2$$

α :lle voidaan käyttää seuraavaa alkuarvausta (6.41), jolla iteraatioprosessi on tehokas

$$\hat{\alpha}_0 = \left\{ \frac{\left(\frac{6}{\pi^2} \right) \left[\sum_{i=1}^n (\ln X_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \ln X_i)^2}{n} \right]}{n-1} \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (6.41)$$



Kuva 6.7 Parametrien vaikutus Weibull-jakauman tiheysfunktion muotoon.

6.2.5 Yleistetty ääriarvojakauma (GEV)

Yleistetty ääriarvojakauma yhdistää siis teoreeman (5.26) kolme jakaumaperhettä yhdeksi. Näin ollen tilastollisessa tarkastelussa ei tarvitse ensin valita jotakin kolmesta jakaumasta, vaan GEV-jakauman estimoiduista parametreista muotoparametri ξ kertoo suoraan otoksen ääriarvojakauman tyyppin. Muotoparametrilla $\xi > 0$ yleinen ääriarvojakauma vastaa Fréchet-jakaumaa, vastaavasti $\xi < 0$ tarkoittaa jakauman noudattavan Weibull-jakaumaa ja muotoparametrin arvolla $\xi = 0$ lähestytään Gumbel-jakaumaa. [53]

Yleistetyn ääriarvojakauman standardimuoto parametrilla ξ

$$H(x; \xi) = \begin{cases} e^{\left[-(1+\xi x)^{-\frac{1}{\xi}} \right]}, & \xi \neq 0 \\ e^{(-e^{-x})}, & \xi = 0 \end{cases} \quad (6.42)$$

jossa

$$1 + \xi x > 0$$

Yleinen lokaatio-skaala –perhe saadaan edelleen asettamalla

$$H(x; \xi, \mu, \sigma) := H\left(\frac{(x - \mu)}{\sigma}; \xi\right), \quad \begin{array}{l} x > \mu - \frac{\sigma}{\xi}, \text{ kun } \xi > 0, \\ x < \mu - \frac{\sigma}{\xi}, \text{ kun } \xi < 0, \\ x \in \mathbb{R}, \text{ kun } \xi = 0. \end{array} \quad (6.43)$$

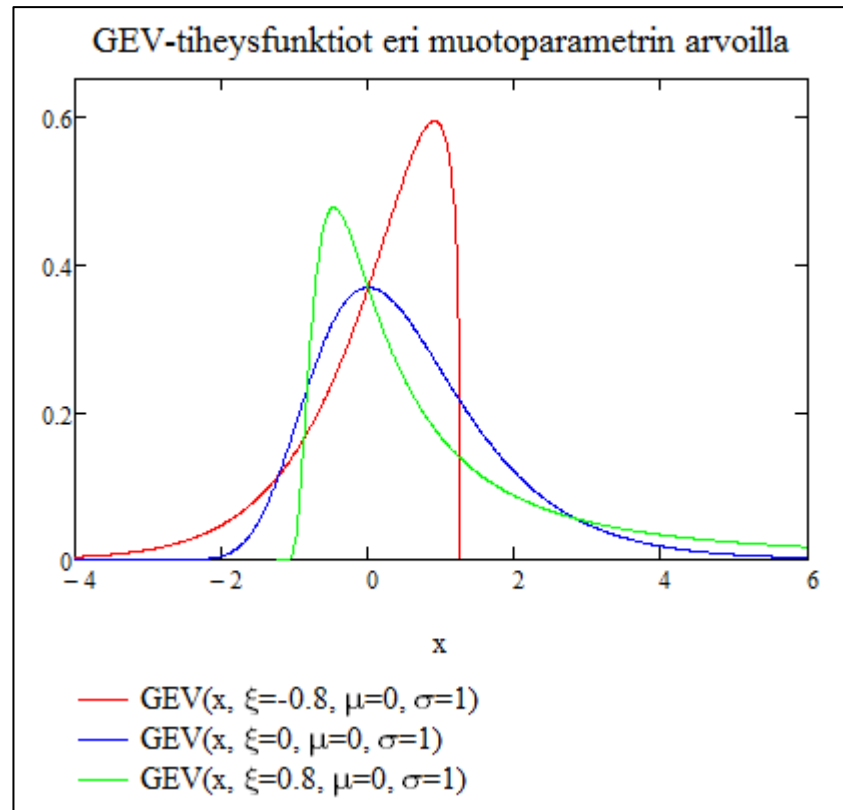
jossa

- μ = paikkaparametri, $\mu \in \mathbb{R}$
- σ = skaalaparametri, $\sigma > 0$
- ξ = GEV-jakauman muotoparametri

GEV-jakauman tiheysfunktio:

$$f(x; \xi, \mu, \sigma) = \begin{cases} \left[\left(\frac{1}{\sigma} \right) \exp \left[- \left[1 + \xi \frac{(x - \mu)}{\sigma} \right]^{\frac{-1}{\xi}} \right] \left[1 + \xi \frac{(x - \mu)}{\sigma} \right]^{-1 - \frac{1}{\xi}} \right], & \xi \neq 0 \\ \left(\frac{1}{\sigma} \right) \exp \left[- \exp \left[\frac{-(x - \mu)}{\sigma} \right] - \frac{(x - \mu)}{\sigma} \right], & \xi = 0 \end{cases} \quad (6.44)$$

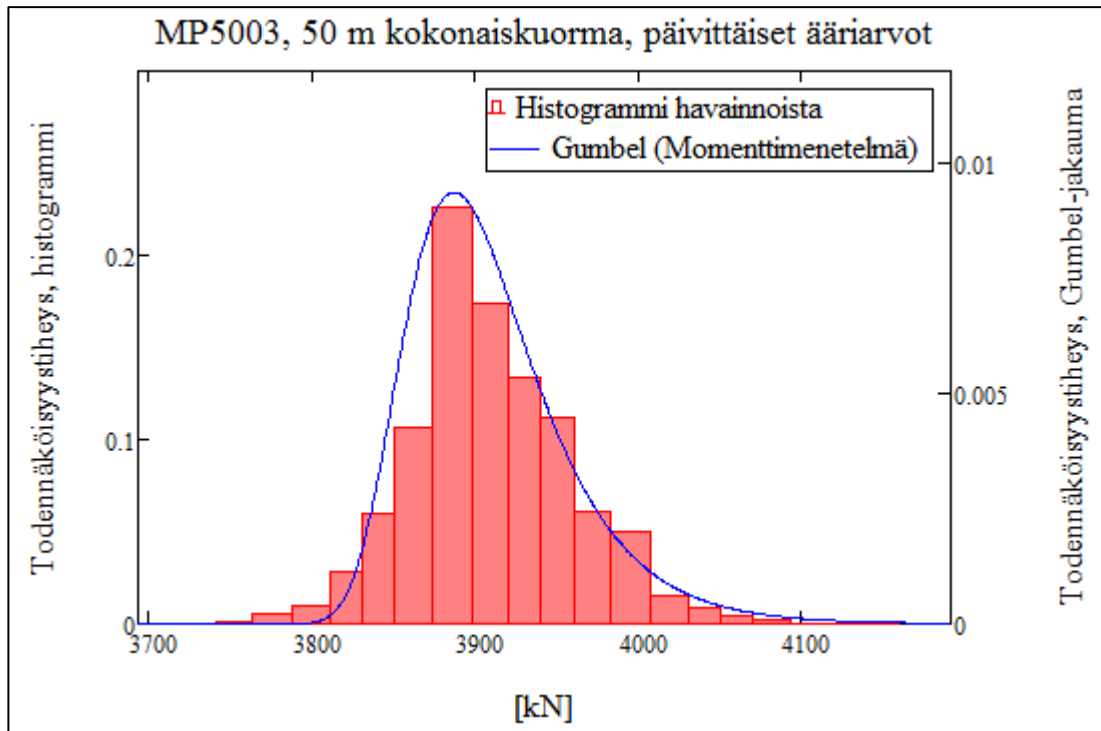
Kuvassa 6.8 on esitetty muotoparametrin vaikutusta GEV-jakauman muotoon. Sininen käyrä vastaa Gumbel-jakaumaa, punainen käyrä on vahvasti Weibull-jakautunut ja vihreä lähestyy Fréchet-jakaumaa.



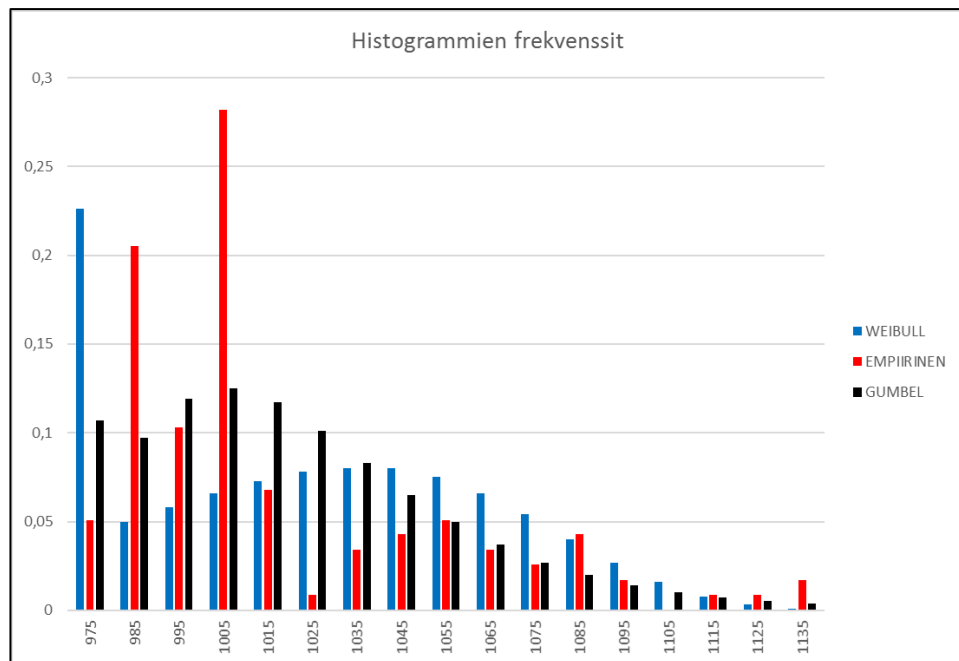
Kuva 6.8 Muotoparametrin vaikutus GEV-jakauman tiheysfunktion muotoon.

6.2.6 Jakauman testaus

Jakauman sopivuutta havaintoihin voidaan testata erilaisilla silmämääräisillä tarkaste-
luilla sekä testisuureilla. Silmämääräisesti voidaan tarkastella esimerkiksi havaintojen
histogrammipylväikön päälle asetettua teoreettisen jakauman tiheysfunktiota ja tutkia
kuinka hyvin jakauma noudattelee histogrammikuvaajan frekvenssejä. Toinen vaihtoehto
on muuntaa myös teoreettinen jakauma histogrammipylväiköksi ja verrata frekvenssejä
vierekkäin.

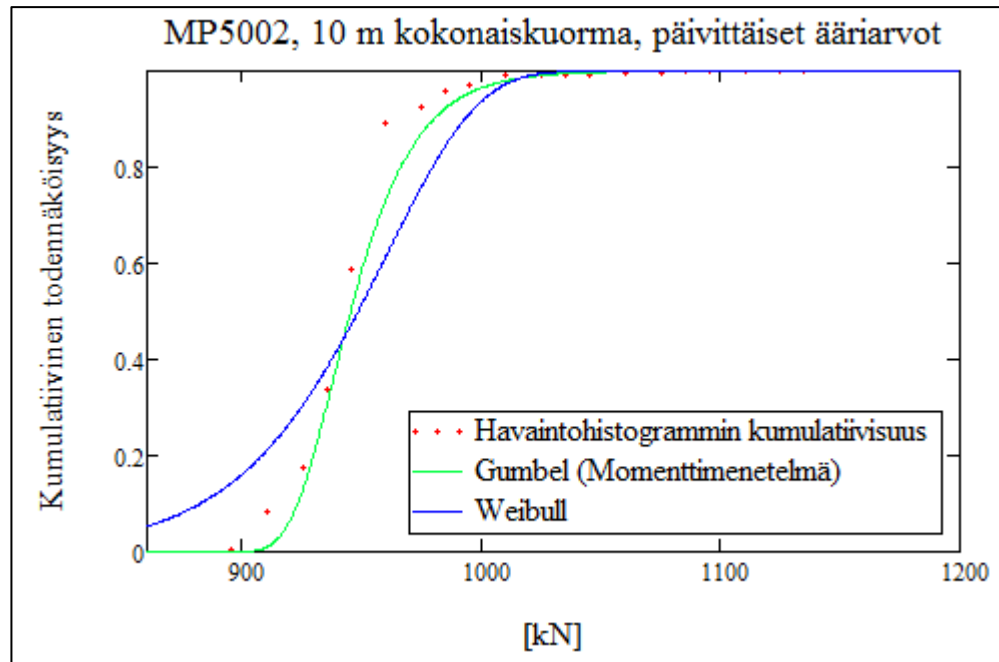


Kuva 6.9 Mittauspisteen 5003 10 vuoden simulaatiosta saatu päivittäisen ääriarvo-jakauman histogrammipylväikkö ja siihen sovitettu Gumbel-jakauma. Esimerkki.

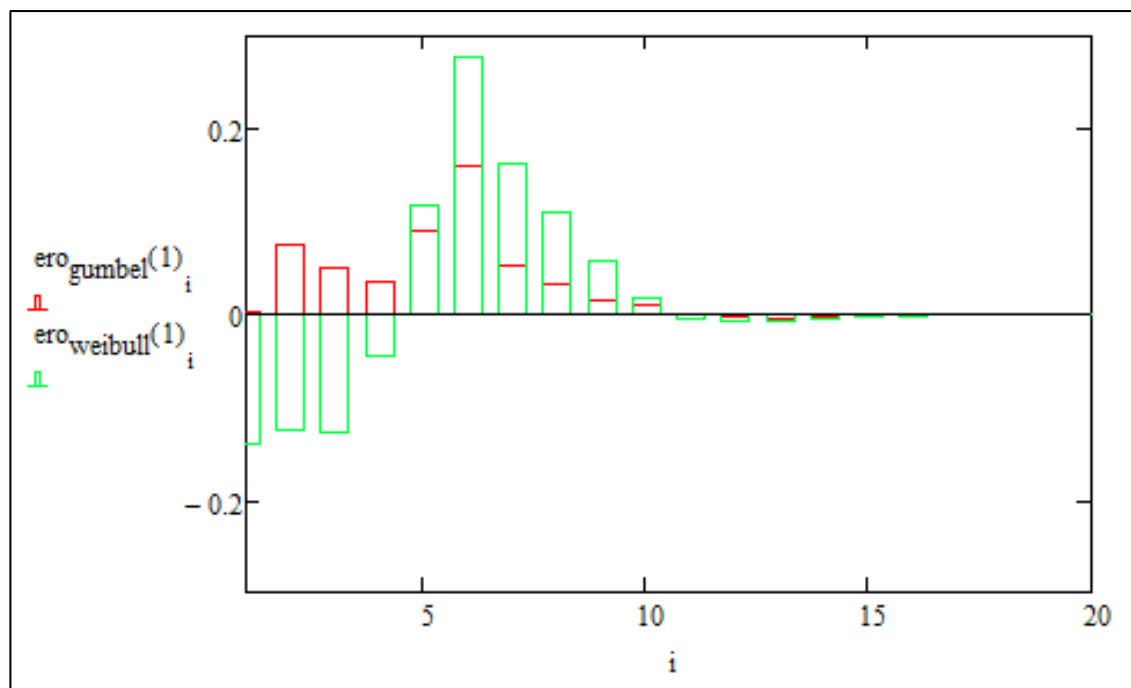


Kuva 6.10 Empiirinen jakauma ja teoreettiset jakaumat histogrammeina rinnakkain. Vaaka-akselilla kuorma [kN] ja pystyakselilla todennäköisyys. Esimerkki.

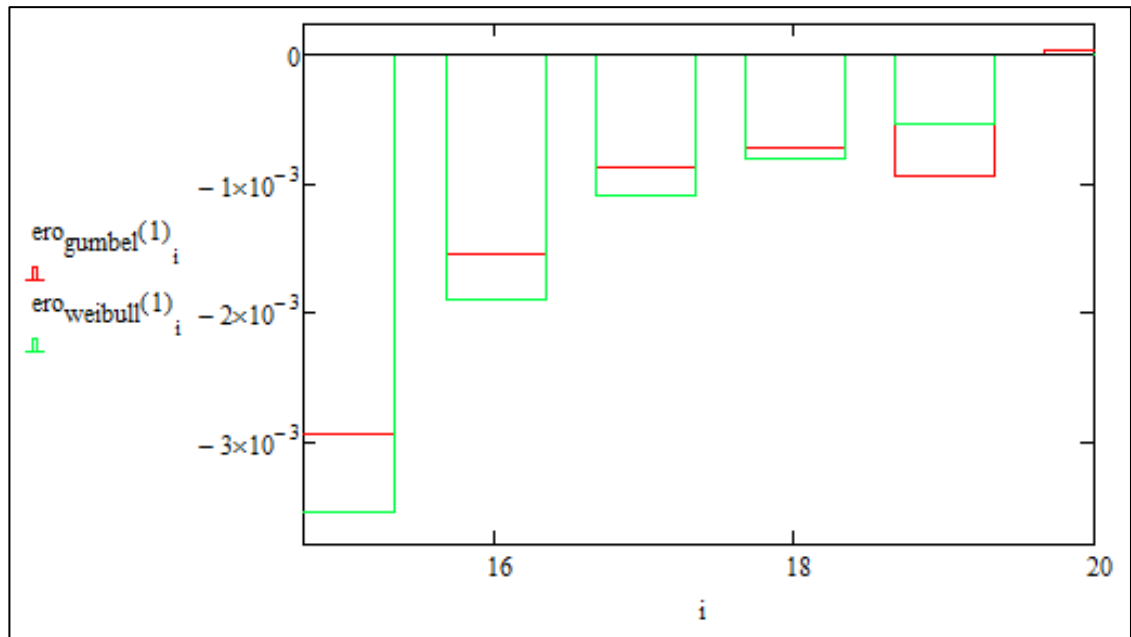
Lisäksi voidaan verrata kumulatiivisia jakaumia, kuten kuvassa 6.7 ja tehdä edelleen kuvaajia, jotka kuvaavat teoreettisen jakauman eroa empiiriseen jakaumaan esimerkiksi palkkikaaviolla, kuten kuvissa 6.8 ja 6.9 on tehty. Näin ero eri jakaumien välillä voidaan saada hieman selymmäksi.



Kuva 6.11 Kumulatiiviset jakaumat, viivoilla kuvattu teoreettiset ääriarvojakaumat ja pisteillä empirisen ääriarvojakauman histogrammipisteet. Esimerkki.



Kuva 6.12 Teoreettisten kumulatiivisten jakaumien eroa empirisen kumulatiivisen jakauman histogrammipisteisiin havainnollistettu pylväskaaviolla. Vaaka-akselilla histogrammipylvään järjestysnumero ja pystyakselilla teoreettisten ääriarvojakaumien suhteellinen ero empiristen ääriarvojen histogrammijakaumaan. Esimerkki.



Kuva 6.13 Kuvan 6.7 loppupään pylvääät suurennettuna. Esimerkki.

Yllä esitetystä graafisista esityksistä voi kuitenkin usein olla vaikea hahmottaa kaikkein parhaiten sopiva jakauma, koska jakaumat voivat olla silmämääräisesti hyvin samankaltaisia ja niiden erojen havaitseminen tiheysfunktion ja kertymäfunktion mutkittlevasta muodosta tuottaa hankaluuksia. Todennäköisyyskuvaajalla (*Probability-Probability plot / P-P plot*) voidaan näitä eroja havaita hieman paremmin. Toisaalta sekään ei ole paras tapa tutkia hännän sopivuutta, joka nimenomaan ääriarvojen tapauksessa on tärkeää. Häntää voidaan graafisesti tutkia parhaiten kvantiilikuvaajan (*Quantile-Quantile plot / Q-Q plot*) avulla.

Kvantiilikuvaajassa otosdatan arvot järjestetään pienimmästä suurimpaan. Tässä työssä kvantiilikuvaajat on tehty Matlab-ohjelmalla, jossa jokainen otosdatan arvo muodostaa oman kvantiilinsa. Otoksen kvantiilit tulostuvat y-akselille ja näitä kvantiileja vastaavat teoreettisen jakauman arvot tulostuvat x-akselille. Tarkemmin sanottuna Matlab-ohjelman kvantiilikuvaajan lauseella kvantiileja $x_{(i)}$ verrataan todennäköisyyttä $\frac{i-0.5}{n}$ vastaaviin teoreettisen jakauman $F(x)$ kvantiileihin [57] [58]:

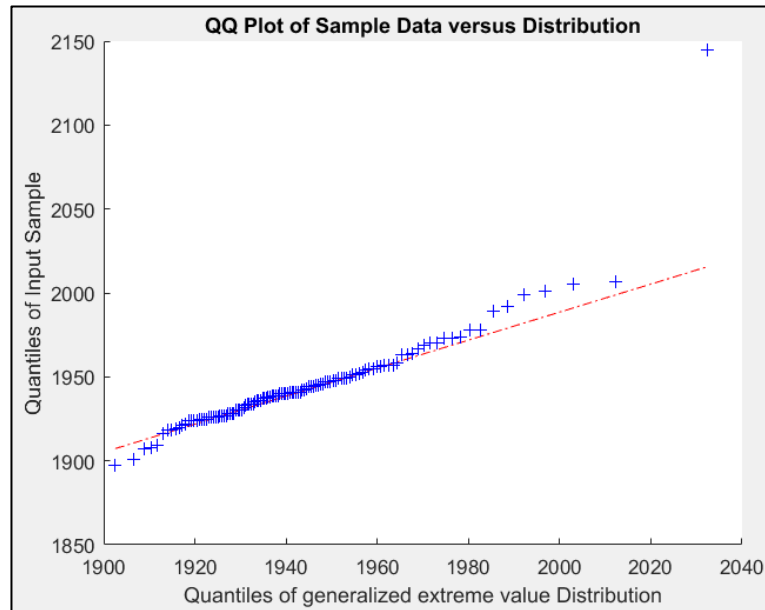
$$f_{(i)} = F^{-1}\left(\frac{i-0.5}{n}\right), \quad i = 1, \dots, n \quad (6.45)$$

jossa

n = otoksen havaintojen määrä

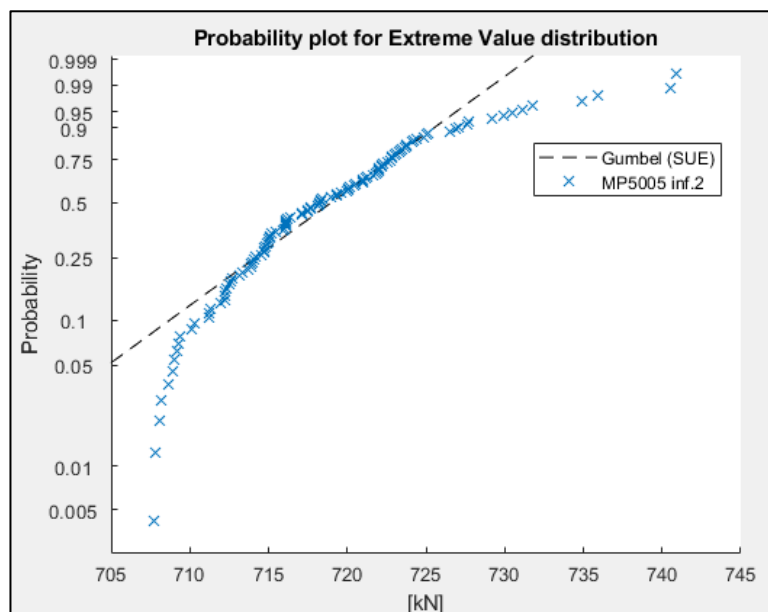
Kun otoksen pisteet asettuvat teoreettisen jakauman suoralle, voidaan havaintoaineiston hyväksyä noudattavan kyseistä teoreettista jakaumaa. Muutama suoralta poikkeavat satunnaiset arvot ovat myös hyväksyttäviä, kunhan pisteet eivät muodosta selviä kuplia tai

lähde käyritysmään johonkin suuntaan suoralta. Kuvassa 6.14 pisteet asettuvat hyvin suoralle aivan oikean pään häntää lukuun ottamatta.



Kuva 6.14 *Q-Q – kuvaaja, jossa on verrattu GEV-jakauman ja havaittujen ääriarvojen kvantileja. Esimerkki.*

Todennäköisyyskuvaajassa otosdata tulostetaan suuruusjärjestyksessä x-akselille ja jokainen arvo on jälleen oma kvantiilinsa, jotka sovitetaan teoreettisen jakauman kvantileihin, mutta nyt kvantiilit on muutettu todennäköisyyksiksi. Teoreettisen jakauman suora kulkee datan ensimmäisen ja kolmannen kvartiilin kautta, joten kuvaajasta voidaan päätellä juuri jakauman keskivaiheen käyttäytymistä suuren todennäköisyyssmassan alueella.



Kuva 6.15 *P-P – kuvaaja, jossa on verrattu Gumbel-jakauman ja havaittujen ääriarvojen todennäköisyyksiä. Esimerkki.*

Todennäköisyyskuvaajan y-akseli skaalautuu lisäksi logaritmisesti ääriarvojakaumien tapauksessa, joka hieman hankaloittaa kuvan lukemista. Myös todennäköisyyskuvaajassa pisteiden tulee asettua teoreettisen jakauman suoralle, jotta jakauman voidaan hyväksyä noudattavan vertailtavana olevaa teoreettista jakaumaa. Kuvassa 6.15 huomataan, että kumpikaan häntä ei noudata jakaumaa lainkaan, vaikka todennäköisyyskuvaaja ei edes tuo häntien eroja niin dramaattisesti esiin kuin kvantiilikuvaaja. [56] [59]

Lisäksi jakaumia voidaan tutkia erilaisilla testisuureilla. Mainittakoon näistä Kolmogorov-Smirnovin testisuure, joka mittaa esimerkiksi teoreettisen ja empiirisen jakauman kumulatiivisen frekvenssin erotusta. [56]

7. RAIDELIIKENTEEN KUORMAVAIKUTUSTEN SIMULOINTI

Tämän tutkimuksen keskeisimpänä menetelmänä käytettiin MathCad – ohjelmalla tehtyä simulaatio-ohjelmaa. Käytetty simulaatio perustuu junien muodostuksen osalta ”Monte Carlo – algoritmeihin”. Junien aiheuttamat kuormavaikutukset taas saadaan liikkuvan kuorman tapauksessa vaikutusviivojen avulla. Tässä luvussa kerrotaan tutkimuksessa käytetyn simulaation periaatteista, tuloksista sekä vertailuista LM71 – kuormakaavion kanssa.

7.1 Monte Carlo-simulaatio ja sen osa-alueet

Monte Carlo-simulaatio on nykyään yleisnimitys stokastiselle simuloinnille, joka on numeerinen menetelmä, jossa hyödynnetään satunnaislukuja. Menetelmän nimi juontaa juurensa Monacon kasinon rulettipöydistä toisen maailmansodan ajalta, jolloin ensimmäisiä digitaalisia tietokoneita kehitettiin. Näiden koneiden ensimmäisiä tehtäviä oli Monte Carlo-menetelmään perustuen tehdä laskelmat vetypommin valmistamista varten, jotka algebrallisesti olisivat olleet mahdottomia. Vetypommi toimi kuten pitikin, joten Monte Carlo-menetelmästä syntyi menestys, joskin kyseenalaisten tapahtumien kautta. Menetelmää on toki käytetty jo analogisten tietokoneiden aikaan ja sen peruseriaatteet on tunnettu huomattavasti kauemmin. Jo 1700-luvulla Buffon määritteli neulakokeellaan piin likiarvon. [60] [61]

Monte Carlo simulaatio sisältää usein seuraavat seitsemän osa-aluetta:

1. **Matemaattinen malli.** MC-simulaation tapauksessa tarkasteltavien ilmiöiden satunnaisuuttujen kertymäfunktio, jotka voidaan muodostaa esimerkiksi kokeellisten havaintojen perusteella. Tässä työssä kyseisiä ilmiöitä ovat esimerkiksi vauvutyypin, akselimassojen ja peräkkäisyyksien esiintyminen ja niiden kertymäfunktio on luotu pyörävoimailmaisimien keräämien havaintojen perusteella.
2. **Satunnaislukugeneraattori.** Satunnaislukugeneraattorin tulee arpoa satunnaislukuja tasajakaumasta, jolloin sattumanvaraiset tulokset noudattavat edelleen kertymäfunktioita.
3. **Otoksen määrittely.** Otoksen määrittely on sääntö, joka valitsee otoksen generoitujen satunnaislukujen joukosta. Tai kuten tässä työssä, jossa tapahtuma ”juna ylittää pyörävoimailmaisimen” on suhteellisen harvinainen, käytettiin otoksena junien ylitykset kymmenessä vuodessa, vaikka havaintoaineistona oli vain yksi vuosi. Satunnaislukuja generoitiin siis kymmenen kertaa enemmän kuin havainnot ja otos oli koko tämä joukko.

4. **Luokittelu ja todennäköisyyksien laskenta.** Otoksen alkioit eli tässä tapauksessa esimerkiksi yksittäisten junien aiheuttamat taivutusmomentit yksiaukkoisen sillan jänteen keskipisteessä voidaan laittaa suuruusjärjestykseen ja eri taivutusmomenttien arvoille saadaan todennäköisyydet tai toisinpäin jollakin todennäköisyydellä taivutusmomentti on jonkin arvon alapuolella. Tässä työssä on kuitenkin otettu kuukauden aikana yliajaneiden junien maksimit ja tehty niistä jakauma, johon on edelleen sovitettu ääriarvojakaumia, joista on edelleen saatu halutun fraktiilin arvo eli MC-simulaatiota ei ole ohjelmoitu suoraan luomaan kuukausittaisia ääriarvoja, vaan MC-simulaation tuloksia prosessoidaan edelleen toisella työkalulla.
5. **Virhearviointi.** Saatuun tulokseen liittyy aina tilastollinen virhe, joka tulee myös ilmoittaa. Toistokokeen toistokertojen määrän ollessa suuri, voidaan virhettä arvioida laskemalla keskiarvon keskivirhe. [62]
6. **Varianssin supistaminen.** Erilaisia tekniikoita, joilla pienennetään arvioidun ratkaisun varianssia ja nopeutetaan simulaatiota. Ei käytetty tässä työssä.
7. **Rinnastaminen ja vektorisointi.** Tietokoneiden laskenta-arkkitehtuurin tehokkaan käytön mahdollistavia algoritmejä.

Monte Carlo-menetelmän etuina ovat sen soveltuvuus epäjatkuvien funktioiden ja epäyhtenäisten alueiden käsittelyyn, ongelmien yksinkertaistuminen verrattuna analyttiseen ratkaisuun ja vähäinen muistin tarve tietokoneessa. Haittoina sen sijaan voidaan pitää otoksen määrittämistä eli milloin satunnaislukuja on riittävästi, jotta saadaan tulos tarvittavalla tarkkuudella, hidasta suppenemista, pitkää prosessointiaikaa ja pienten tekijöiden vaikutusten hukkumista tilastollisen yleistämisen takia. [60]

7.1.1 Pseudosatunnaislukugeneraattori

Todellisten satunnaislukujen generointi tietokoneella on erittäin raskasta ja niiden soveltuvuus simulaatioihin on muutenkin kyseenalaista, koska todellista satunnaislukujonoa ei voi toistaa. Todellisten satunnaislukujen sijaan simulaatioissa käytetäänkin näennäisiä satunnaislukuja eli pseudosatunnaislukuja, joita voidaan generoida tehokkaasti ja useimpien käytännön sovellusten kannalta riittävän laadukkaasti [63]. Seuraavassa esitetään muutamia vaatimuksia, jotka pseudosatunnaislukugeneraattorin tulee täyttää [64]:

- Arvottujen lukuarvojen täytyy noudattaa tasajakaumaa eli määrittelyjoukon kaikkien arvojen tulee esiintyä yhtä todennäköisesti.
- Arvottujen lukuarvojen tulee olla tilastollisesti itsenäisiä eli edellinen lukuarvo satunnaislukuketjussa ei saa vaikuttaa seuraavaan lukuarvoon.
- Tuotetun satunnaislukujen sarjan tulee olla toistettavissa, jotta simulointikoe voidaan tarvittaessa kahdentaa.
- Satunnaislukujen sarja täytyy olla ei-toistettava mitä tahansa haluttua pituutta varten eli sarjan sisällä ei saa olla ”alisarjoja”. Tämä ei ole teoriassa mahdollista,

mutta käytännön tarkoitusta varten tarvittava toistumisjakso on riittävä. Satunnaislukugeneraattorin toistettavuusjaksoa kutsutaan sen periodiksi.

- Satunnaislukujen tuottaminen täytyy olla nopeaa. Yleensä simulaatioissa vaaditaan erittäin suuri määrä satunnaislukuja, joten hidas generaattori voi lisätä merkittävästi simulaatioaikaa ja lisätä näin myös kustannuksia.
- Satunnaislukujen tuottamiseen käytettävän menetelmän tulisi käyttää mahdollisimman vähän muistia.

Mathcad – ohjelmassa $\text{rnd}(x)$ – funktion satunnaislukugeneraattori perustuu lineaariseen kongruenssiin [65]. Kyseisen tyyppinen generaattori on helppo toteuttaa ja nopea käyttää. Se ei ole satunnaisuuden laadultaan parhaimmasta päästä, mutta riittävä tämän työn kaltaisissa tilastollisissa sovellutuksissa. Moniin fysiikan ilmiöiden simulointeihin käytetään monimutkaisempia algoritmeja (Pertti Laininen, Todennäköisyys ja sen tilastollinen soveltaminen). Lineaarisen kongruenssin generaattorin algoritmi on muotoa [63]:

$$X_n = (a \times X_{n-1} + c) \bmod m, \quad (7.1)$$

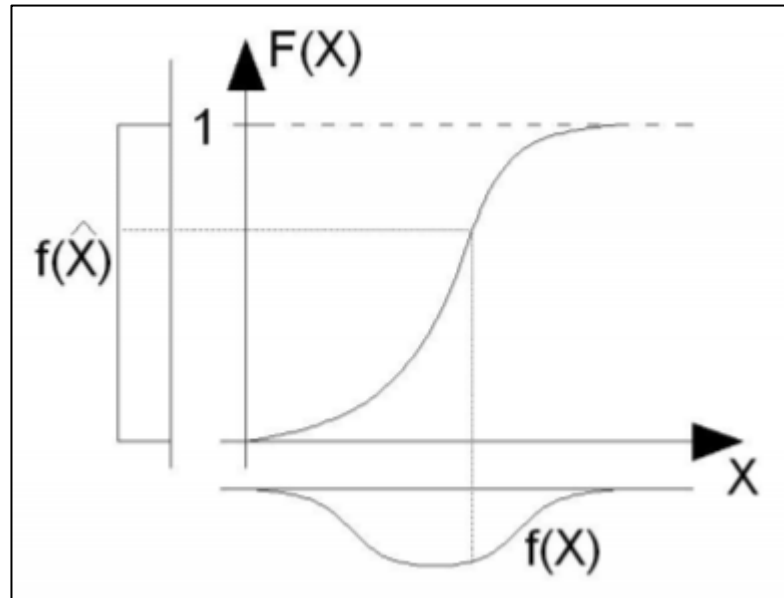
jossa

- X_n = satunnaislukusekvenssin n :s arvo
- m = modulona käytettävä arvo, $m > 0$
- a = edellisen satunnaisluvun kerroin, $0 < a < m$
- c = kertomaan lisättävä arvo
- X_0 = siemenluku, $0 \leq X_0 \leq m$
- ja $\{m, a\} \in \mathbb{Z}_+ \wedge \{c, X_0\} \in \mathbb{N}_0$

7.1.2 Satunnaismuuttujien kertymäfunktiot ja jakaumien generointi

Simulaation lähtötietoina käytettävät satunnaismuuttujat, kuten akselimassat ovat jakaumia, jotka on muodostettu otoksesta, joka on tässä tapauksessa yhtä kuin yhden vuoden tavarajunaliikenne. Jokaisen satunnaismuuttujan jakauma on siis muodostunut yhden vuoden tavarajunaliikenteestä ja alkioiden määrässä pienimmätkin jakaumat eli junan kokonaisuus- ja vaunumääräjakaumat sisältävät tuhansia alkioita. Näin ollen voidaan käyttää suoraan empiirisii kertymäfunktioita jakaumien generoimiseen, kun toinen mahdollisuus olisi sovittaa jokin teoreettinen jakauma kuvaamaan empiiristä jakaumaa. Käyttämällä empiiristä kertymäfunktioita, otosarvojen välillä todennäköisyys on tuntematon, mutta väliarvot voidaan johtaa lineaarisella interpolaatiolla. Jatkuvien jakaumien generointi tapahtuu käännteiskertymämenetelmällä (kuva 7.1), jonka vaiheet ovat [1] [66]:

1. Generoidaan tasajakaumasta $[0,1)$ satunnaisluku \hat{x}
2. Saadulla satunnaisluvulla lasketaan kertymäfunktion käänteisfunktion arvo $x = F^{-1}(\hat{x})$
3. Tulostetaan x



Kuva 7.1 Käänteiskertymämenetelmän periaatekuva [1].

Esimerkiksi veturi- ja vaunutyyppien jakaumat taas ovat täysin diskreettejä jakaumia, koska kullakin tulosvaihtoehdolla on pistetodennäköisyys eikä veturi- tai vaunutyypeillä ole toistensa välissä mitään välitulosta, joka voitaisiin interpoloida. Mahdolliset jakauman tulokset ovat siis T_1, \dots, T_m ja tulosten vastaavat todennäköisyydet ovat p_1, \dots, p_m , missä $p_1, \dots, p_m > 0$ ja $p_1 + \dots + p_m = 1$. Tällaisen diskreetin jakauman mukaiset tapaukset generoidaan seuraavasti [66]:

1. Generoidaan tasajakaumasta $[0,1)$ satunnaisluku \hat{x}
2. Etsitään indeksi i , jossa $p_0 + \dots + p_i \leq \hat{x} < p_0 + \dots + p_{i+1}$, kun $p_0 = 0$
3. Tulostetaan T_{i+1}

Puhuttaessa tässä tekstissä jonkin ominaisuuden arvonnasta, tarkoitetaan sillä tuloksen generointia joko lineaarisella interpoloinnilla jatkuvaksi muokatusta tai diskreetistä jakaumasta edellä esitetyillä prosesseilla. Kyseiset prosessit toistetaan useita kertoja yhtä juna muodostettaessa eli simulaatiolla muodostettava juna koostuu useista ominaisuuksista, joista jokainen määritetään omista jakaumistaan kyseisillä menetelmillä.

7.2 Simulaatiolla tarkasteltavat ilmiöt ja simulaation kulku

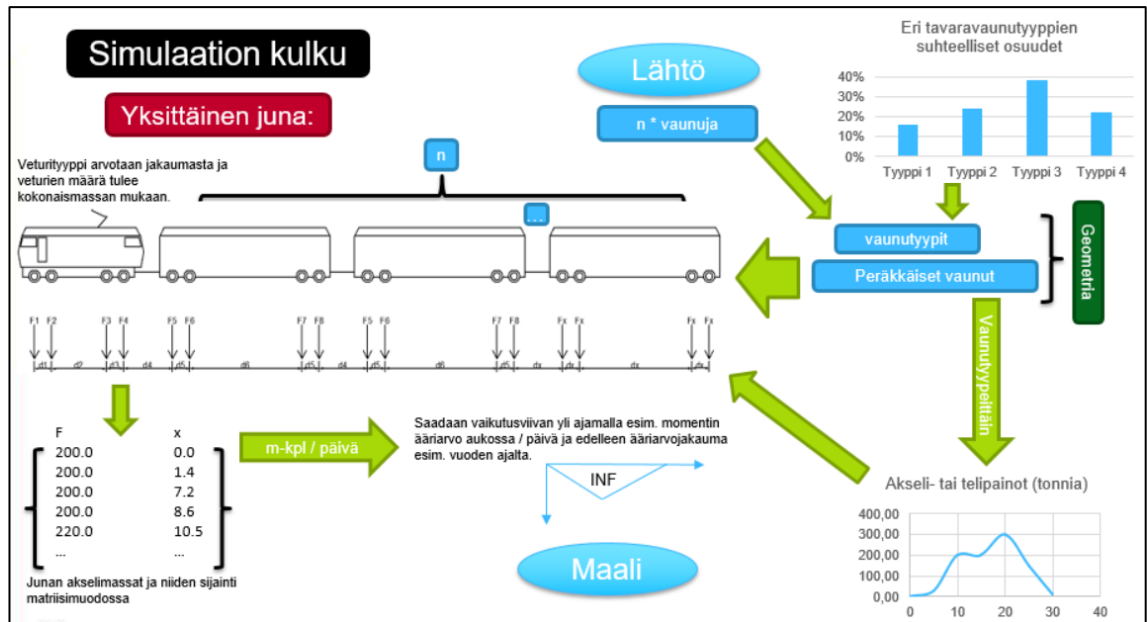
Simulaation tarkoituksena on selvittää tämänhetkinen Suomessa vaikuttava raideliikenteen kuormavaikutus. Simulaation tuloksena saadaan yksittäisten junien aiheuttamia

kuormavaikutusten ääriarvoja, joista voidaan muodostaa edelleen erilaisia empiirisiä ääriarvojakaumia. Tämän jälkeen empiirisiin ääriarvojakaumiin sovitetaan teoreettisia ääriarvojakaumia, joista voidaan lukea eurokoodin raideliikenteen ominaiskuorman määrittelyn mukaiset 100 vuoden toistumisjaksolla esiintyvät toistumiskuormavaikutukset.

Kuormavaikutuksista tutkitaan viivapituuksille syntyvää tukireaktiota, yksiaukkoisten siltojen leikkausvoimaa tuella ja keskellä kenttää, yksiaukkoisen sillan taivutusmomenttia keskellä kenttää, kaksiaukkoisen sillan ylä- ja alapinnan taivutusmomenttia kentässä sekä tukimomenttia sekä kolmiaukkoisen sillan ylä- ja alapinnan taivutusmomenttia keskikentän keskellä.

Kuvassa 7.2 on havainnollistettu simulaation kulkua, jossa vaiheet ovat seuraavat

1. Mittauspisteen kokonaimassa- vaunumääräjakaumasta arvotaan satunnaisluvulla junalle kokonaispaino sekä kokonaispituus vaunujen määrässä.
2. Veturityyppijakaumasta arvotaan veturin tyyppi ja veturien määrä saadaan kokonaisuusmassan perusteella.
3. Mittauspisteen vaunutyypijakaumasta arvotaan sadan kappaleen jono vaunutyyppejä.
4. Kullekin jonon vaunutyypille arvotaan kyseisen vaunutyypin peräkkäisyysjakaumasta peräkkäisyyden arvo.
5. Muodostetaan uusi jono, jossa kukin vaunutyyppi esiintyy peräkkäin yhtä montaa kertaa, kuin peräkkäisyyden arvo on ollut.
6. Katkaistaan jono kohdasta, jolloin aiemmin arvottu junan vaunumäärä tulee täyteen. Yhdistetään veturit ja vaunut yhdeksi jonoksi.
7. Arvotaan jokaiselle veturille ja vaunulle akselimassa, kunkin veturi- ja vaunutyypin akselimassajakaumasta. Yksi akselimassa vaunua kohti.
8. Lisätään kunkin vaunutyypin geometriatieto eli akselien määrä ja niiden etäisyydet.
9. Muodostetaan akselit jonoon oikeilla etäisyyksillä ja kullekin akselille vastaava aiemmin arvottu akselimassa.
10. Ajetaan akselijono kaikkien viivainfluenssien yli ja tallennetaan akselijonon aiheuttamat maksimi- ja minimitulos.
11. Toistetaan junan muodostus esimerkiksi 10 vuoden junamäärän mukaan, joka tarkoittaa kymmeniä tuhansia toistoja yhtä mittauspistettä kohti.
12. Tuloksena saadaan yksittäisten junien aiheuttamien kuormavaikutusten ääriarvojen jakaumat jokaiselle viivainfluenssille.
13. Jälkikäsitellyssä yksittäisten junien ääriarvot jaetaan kuukauden mittaisiin blokkeihin ja muodostetaan ääriarvojakauma näistä kuukausittaisista ääriarvoista.
14. Lopuksi ääriarvojakaumaan sovitetaan teoreettinen ääriarvojakauma, josta voidaan lukea jonkin aikavälin toistumiskuormavaikutuksen arvo.

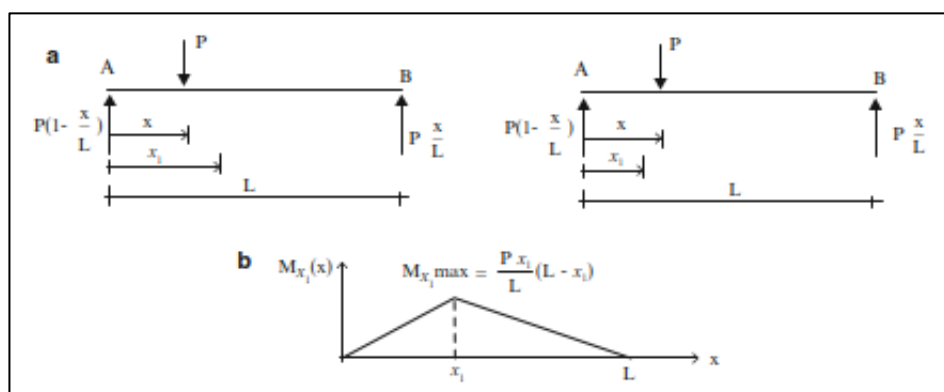


Kuva 7.2 Yksinkertaistettu kaaviokuva simulaation kulusta, jossa esitetty simulaation toiminnot pääpiirteittäin.

7.3 Vaikutusviivat

Liikkuvan kuorman tapauksessa rakenteen voimasuureiden tarkasteluun tarvitaan vaikutusviivoja. Vaikutusviivan toimintaperiaate on se, että sillä voidaan tarkastella missä pisteessä tahansa vaikuttavien pistekuormien vaikutusta johonkin tiettyyn pisteeseen, kuten sillan välitukeen.

Vaikutusviiva määritellään staattisesti määrätyn rakenteen tapauksessa normaalien rakenteen sisäisten ja ulkoisten tasapainoehtojen avulla siten, että valitaan tarkasteltava piste ja lasketaan voiman vaikutus kustakin pisteestä tarkasteltavaan pisteeseen. Yksinkertaisin esimerkki on taivutusmomentin vaikutusviivan ratkaisu yksiaukkoiselle palkille.



Kuva 7.3 Vapaakappalekuvat yksiaukkoisesta palkista sekä vaikutusviiva taivutusmomentille pisteessä x_1 [67].

Kuvassa 7.3 on esitetty vapaakappalekuvat taivutusmomentin influenssiviivan laske-
miseksi yksiaukkoiselle palkille x :n funktiona. Kohdassa x vaikuttavan pistekuorman ai-
heuttamat momentit pisteessä x_1 saadaan laskettua seuraavilla funktioilla [67]:

$$M_{x_1}(x) = \frac{Px}{L}(L - x_1), \quad \text{kun } x < x_1 \quad (7.2)$$

$$M_{x_1}(x) = Px_1 \left(1 - \frac{x}{L}\right), \quad \text{kun } x > x_1 \quad (7.3)$$

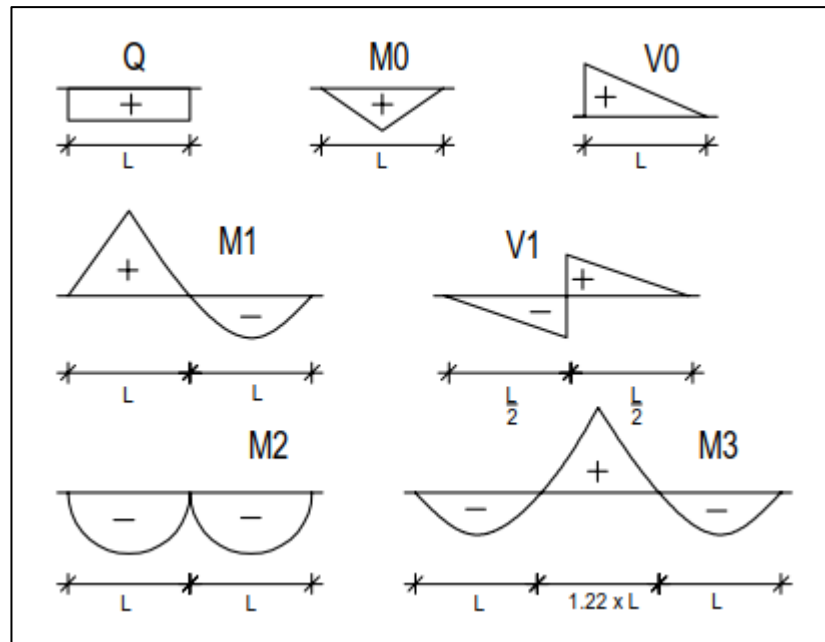
Staattisesti määräämättömän rakenteen vaikutusviivan ratkaisu analyttisesti on huomattavasti hankalampaa, eikä sellaisen esitystä käydä tässä läpi. Lähteessä [67] on esitelty Müller-Breslaun menetelmä, jolla tällaisten rakenteiden influenssiviivoja voi ratkaista.

Eräs tapa ratkaista influenssiviivoja on tehdä FEM-malli, jossa laitetaan yksikkövoima liikkumaan viivaelementin yli jollakin riittävän tiheällä hyppäyksellä. FEM-ohjelmasta voidaan ottaa samalla ulos kaikkien pisteiden tulokset, joihin yksikkökuorman vaikutusta viivan matkalta halutaan tutkia. Tulokseksi kullekin vaikutukselle saadaan vektori, jossa kukin alkio on yksikkövoiman aiheuttama vaikutus määrätystä pisteestä viivaelementiltä. Laskettujen pisteiden välisiltä alueilta vaikutukset voidaan laskea lineaarisella interpolatiolla, jolloin laskettujen pisteiden väliltä saatavat arvot eivät staattisesti määräämättömän rakenteen tapauksessa ole täysin tarkkoja, mutta tarpeeksi tiheällä laskentapistevälillä virhe pienenee mitättömäksi.

Tässä työssä oli yhteensä 53 erilaista vaikutusviivaa käytössä. Näistä 45 saatiin suoraan lähtötietona aiemmin tehdystä vastaavantyyppisestä tutkimuksesta tieliikenteen kuorma-
vaikutuksille. Näiden lisäksi tähän tutkimukseen tehtiin kahdeksan influenssiviivaa lyhyemmille jänneväleille, joilla saatiin tarkempaa tietoa yksittäisten telien ja teliparien aiheuttamista vaikutuksista. Alla työssä käytetyt influenssiviivat taulukoituna sekä influenssien muodot kuvattuna.

Taulukko 7.1 Simulaatiossa käytetyt influenssiviivat.

Rakenne	Suure	Symboli	L							
			2 m	6 m	10 m	20 m	30 m	50 m	100 m	200 m
Jatkuva tuki / penger	Pystykuorman resultantti	Q	1	2	3	4	5	6	7	8
Vapaasti tuettu yksiaukkoinen	Kenttämomentsi	M0	9	10	11	12	13	14	-	-
	Leikkausvoima tuella (tukir.)	V0	15	16	17	18	19	20	-	-
	Leikkausvoima kentässä	V1	21	22	23	24	25	26	-	-
Vapaasti tuettu kaksiaukkoinen symm. 1 : 1	Momentti + kenttä	M1+	-	-	27	28	29	30	31	-
	Momentti - kenttä	M1-	-	-	32	33	34	35	36	-
	Momentti välituella	M2	-	-	37	38	39	40	41	-
Vapaasti tuettu kolmiaukkoinen symm. 1 : 1.22 : 1	Momentti + kenttä	M3+	-	-	42	43	44	45	46	47
	Momentti - kenttä	M3-	-	-	48	49	50	51	52	53



Kuva 7.4 Simulaatiossa käytettyjen influenssiiviivojen muodot.

7.4 Simulaation tulokset

Tämän työn puitteissa tehtiin simulaatiot sekä yhden, että kymmenen vuoden liikennemäärillä. Simulaatiot tehtiin erikseen kaikilta mittauspisteiltä, joista oli riittävän hyvä lähtötiedodata käytettävissä. Yhteensä 16:sta mittauspisteestä saatiin simuloitua 12. Mittauspisteitä 5010, 5013, 5014 ja 5015 ei simuloitu, koska näiltä mittauspisteiltä puuttui vaunut tunnistava RFID-lukija. Näistä 5013, 5014 ja 5015 ovat vähäliikenteisimmistä päästä ja 22,5 t ratoja. 5010 taas on Vainikkalan raja-aseman läheisyydessä, jossa liikennemäärät ovat melko keskimääräisiä ja radan sallittu akselipaino 25 t. Vainikkalan erikoisuutena on myös se, että siellä junien nopeudet ovat hyvin alhaiset, koska ollaan niin lähellä rajaa.

Tuloksiksi itse simulaatioista saatiin jokaisen erillisen junan aiheuttama rasituksen ääriarvo kullakin kappaleessa 7.3 esitetyllä vaikutusviivalla. Simulaatio tallentaa tulokset automaattisesti PRN-tiedostoihin, joista ne voidaan edelleen lukea jatkokäsittelyä varten. Jatkokäsittely tehtiin myös Mathcad – ohjelmalla, josta taas tallennettiin tulokset suoraan excel – taulukoksi, joka on hyvä tapa esitellä saatujen tuloksien kokonaisuutta. Taulukoista laadittiin edelleen erilaisia kuvaajia, jotka havainnollistavat paremmin simulaatiotulosten ja kuormakaavioiden eroja. LM71-kuormakaavion lisäksi vaikutusviivojen yli ajettiin ratojen luokittelussa käytettävät D4 ja E4 referenssijunat sekä muutamia raskaimpia todellisia vaunuja jonoissa siten, että jokaisella akselilla vaikutti suurin sallittu akselipaino. Näin saatiin mielenkiintoisia deterministisiä vertailukäyriä kuvaajiin.

Seuraavissa kappaleissa käydään tarkemmin läpi simulaatiotulosten jatkokäsittelyä ja lopullisten tulosten vertailua käytössä olevaan kuormakaavioon LM71.

7.4.1 Kuormavaikutusten todennäköisyyksien lukeminen ekstrapoloituista jakaumista

Kuten aikaisemmin todettiin, simulaatioita suoritettiin 1 vuoden ja 10 vuoden liikennemäärillä, joista tulosjakaumiksi otettiin edelleen päivittäisten, viikoittaisten ja kuukausittaisten referenssijaksojen ääriarvojakaumat. Sillat kuitenkin suunnitellaan perustapauksessa 100 vuoden käyttöiälle, jolloin ominaiskuormavaikutuksena pidetään 100 vuoden toistumiskuormaa. 100 vuoden suora simulointi ei onnistu MathCad-sovelluksella, joten tulokset on luettava referenssijakson teoreettisen ääriarvojakauman hännän alueelta. Toistumisjakson ja referenssijakson kautta saadaan kaavan 7.4 mukaisesti fraktiili, jolta ominaiskuormavaikutuksen lukuarvo voidaan referenssijakson ääriarvojakaumasta lukea [68]:

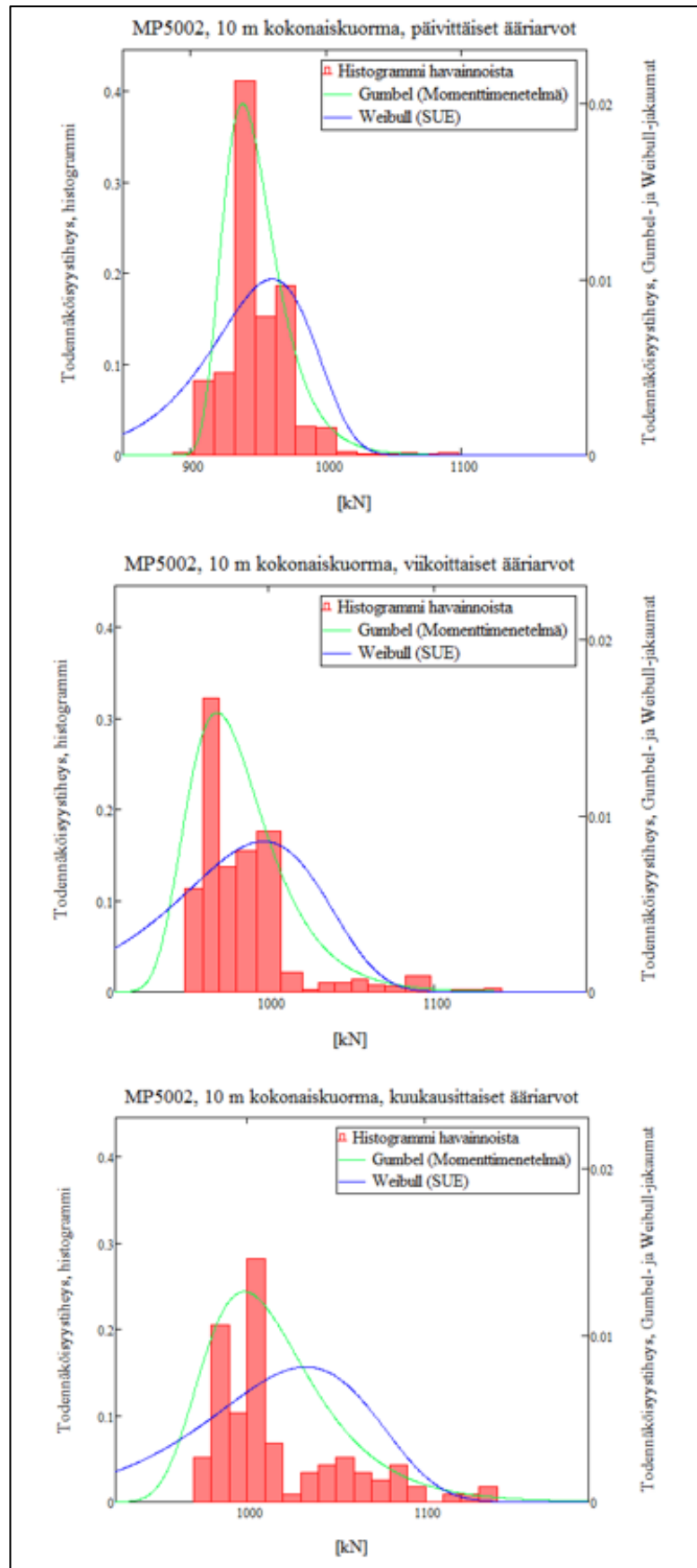
$$T_R = \frac{R}{p} \quad (7.4)$$

jossa

- R = referenssiajanjakso
- T_R = keskimääräinen toistumisjakso
- p = ylitystodennäköisyys

Referenssiajanjakson ollessa 10 vuotta, saadaan ylitystodennäköisyydeksi 10 % eli keskimääräinen toistumiskuormavaikutus luetaan 90 % fraktiilin kohdalta. Vastaavasti vuoden referenssiajanjaksolta saadusta ääriarvojakaumasta luetaan tulos 99 % fraktiilin kohdalta. Edelleen, kun tulos katsotaan päivittäisten ääriarvojen jakaumasta, saadaan tulos $1 - (1/36500) = 99,9972605$ % fraktiilista ja kuukausittaisten jakaumalta $1 - (1/1200) = 99,9166666$ % fraktiilista.

Seuraavan sivun kuvassa 7.5 on esitetty mittauspisteen 5002 10 m kokonaiskuorman ääriarvojakauman histogrammit sekä sovitetut Gumbel- ja Weibull-jakaumat 10 vuoden simulaation päivittäisten, viikoittaisten ja kuukausittaisten ääriarvojakaumien pohjalta. Ylimmäisenä päivittäisten, keskellä viikoittaisten ja alimmaisena kuukausittaisten ääriarvojen jakaumat.



Kuva 7.5 Ylhäältä alkaen päivittäisten, viikoittaisten ja kuukausittaisten ääriarvojakaumien histogrammit sekä sovitetut Gumbel- ja Weibull-jakaumat.

Kuvasta 7.5 huomataan, että histogrammin painopiste siirtyy referenssiajanjakson kasvaessa oikealle suurempiin kokonaiskuorman arvoihin. Tämä on selvää, koska kuukausittaisten ääriarvojen sisään mahtuu noin 4 viikoittaista ääriarvoa, jotka eivät todennäköisesti ole kaikki yhtä suuria, vaan niistä suurin on valikoitunut kuukausittaiseksi ääriarvoksi. Edelleen viikoittaisen ääriarvon sisällä on viikoittaiseksi ääriarvoksi valikoituneen päivittäisen ääriarvon lisäksi 6 muuta päivittäistä ääriarvoa. Pienin havainto siis kasvaa, kun referenssijakso pitenee, mutta suurin havainto on luonnollisesti kaikissa empiirisissä jakaumissa yhtä suuri. Pidemmällä referenssijaksolla suurempien kuormien realisoituminen on tietenkin todennäköisempää, mutta vastaavasti tulos luetaan alemmalta fraktiililta, kuten kappaleen alussa todettiin. Taulukossa 7.2 on vielä kyseisen mittauspisteen lasketut arvot Gumbel- ja Weibull-jakaumilla, kun referenssiajanjaksona on ollut päivä, viikko ja kuukausi.

Taulukko 7.2 *Sadan vuoden toistumiskuormat 10 m viivapituudella mittauspisteellä 5002 eri referenssiajanjaksoilla Gumbel- ja Weibull-jakaumilla*

100 vuoden toistumiskuorma			
	Päivittäisistä ääriarvoista	Viikoittaisista ääriarvoista	Kuukausittaisista ääriarvoista
Gumbel	1132 kN	1168 kN	1204 kN
Weibull	1052 kN	1096 kN	1128 kN

Suurin havainto kyseisellä mittauspisteellä oli vastaavasti 1138 kN. Sen perusteella voidaan päätellä heti, että kyseisillä teoreettisilla ääriarvojakaumilla päivittäinen ääriarvojakauma ei sovellu tulosten ottoon, koska 100 vuoden toistumiskuormat jäävät havaintoa pienemmiksi. Weibull-jakaumasta luettu 100 vuoden toistumiskuorma jää havaintoja pienemmäksi myös viikoittaisten ja kuukausittaisten ääriarvojen pohjalta. Kuukausittaisesta jakaumasta tehdyt ekstrapoloinnit antavat jo havaintoja suuremmat tulokset kummallakin jakaumatyyppillä.

7.4.2 Vertailua simulaation tulosten ekstrapoloinnista Gumbel- ja Weibull-jakaumilla

Kaikista simulaatitulosista ekstrapoloitiin LM71-kaavion kanssa vertailukelpoiset arvot sekä Gumbel- että Weibull-jakaumalla. Gumbel-jakauman valinnan perusteena oli se, että eurokoodin taustadokumentissa ENV-1991-3 on mainittu liikennekuorman noudatettavan juuri Gumbel-jakaumaa. Weibull-jakaumaa taas päädyttiin kokeilemaan siitä syystä, että raideliikennekuorma eroaa luonteeltaan jonkin verran tieliikennekuormista, koska akselimassojen valvonta on esimerkiksi paljon tiukempaa, joten suuria ylikuormia esiintyy raiteilla vähemmän. Toisaalta junien vaunujen kuormakapasiteetti pyritään käyttämään melko täydellisesti, kuten myös kuorma-autoissa, mutta kuorma-autot ajavat

enemmän myös tyhjemmällä kuormalla, mikäli kyseessä on jakelukuljetus, jossa kuormasta otetaan välillä osa pois tai päinvastoin. Näin ollen voisi olettaa, että raidekuormissa suurien kuormien hajonta on paljon pienempi kuin tieliikenteessä kuorma-autoilla. Weibull-jakauman hännän oikean päätepisteen ollessa äärellinen, sen ajateltiin voivan toimia hyvin raideliikennekuormille, joissa yksittäiset rajusti suuremmat arvot ovat harvinaisia.

Tarkastellaan ensiksi tuloksien lukuarvoja kokonaisuudessaan seuraavalta sivulta alkavista tulostaulukoista 7.3 – 7.4. Tulostaulukot on laadittu erikseen Gumbel- ja Weibull-jakaumista saaduille tuloksille. Jokaisen influenssiviivan suurin tulos on merkitty taulukoissa punaisella ja pienin vihreällä. Lopuksi on vielä taulukko 7.5, joka kertoo prosentteina Gumbel- ja Weibull-jakaumien tuottamat erot. Gumbel- ja Weibull-jakaumien tuloserot käsittelevästä taulukosta nähdään, että Weibull-jakauman tuottamat tulokset ovat poikkeuksetta pienemmät kuin Gumbel-jakauman vastaavat. Tulos on odotetun mukainen ja näin täytyykin olla, kun samaan jakaumaan sovitetaan kyseisiä teoreettisia jakaumia, koska Gumbel-jakauman oikea häntä on paksumpi. Gumbel-jakauman tuottama tulos verrattuna Weibull-jakauman tuottamaan tulokseen on pienimmillään 0,8 % suurempi ja suurimmillaan jopa 21,4 % suurempi. Näitä Gumbel-jakauman antamia huomattavasti suurempia arvoja esiintyy eniten mittauspiteellä 5006. Tuloksen ero on pääsääntöisesti sitä suurempi, mitä suurempi empiirisen jakauman variaatiokerroin on, mutta siihen vaikuttaa tämän lisäksi jakauman muoto eli todennäköisyysmassojen jakautuminen. Mitä nopeammin todennäköisyysmassa putoaa oikealla nolllaan, sitä selvemmin Gumbel-jakauma antaa suurempia arvoja. Liitteen 5 taulukosta 3 voidaan havaita, että mittauspiteillä 5006 ja 5012 variaatiokertoimet ovat usein suuria, joissa myös tuloserot ovat usein suuria.

Taulukko 7.3 Gumbel-ääriarvojakauman 99,916... % fraktiilit 10 vuoden liikenteen simuloinnista, kun ääriarvoina käytetty kuukauden suurinta arvoa. Punaisella kukin influenssin suurin arvo ja vihreällä pienin arvo.

	Nro.	L	MP 5000	MP 5001	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5006	MP 5007	MP 5008	MP 5009	MP 5011	MP 5012
Q	1	2	525.7	530.7	527.2	526.1	529.4	528.9	524.0	526.0	526.0	528.6	520.7	526.2
	2	6	763.6	977.5	978.5	993.7	756.6	752.1	753.6	982.2	762.8	757.3	749.8	1039.0
	3	10	1311.1	1279.3	1204.3	1225.0	1061.6	1053.0	1250.9	1273.2	1237.3	1149.7	1257.1	1287.6
	4	20	1909.5	1947.5	1961.4	1955.1	1938.1	1935.8	2046.0	1930.7	2015.4	1990.5	1964.7	2135.7
	5	30	2592.0	2852.6	2830.4	2824.9	2653.1	2629.1	2853.7	2823.0	2637.4	2623.9	2661.4	3039.4
	6	50	3981.8	4222.6	4202.1	4210.7	4203.1	4274.7	3839.6	4178.3	4370.8	3756.6	4085.6	5014.4
	7	100	7359.8	7875.6	7917.3	7912.8	8178.4	8141.0	6410.1	7948.4	7385.2	7606.3	7338.1	8897.1
	8	200	14604.4	15532.0	15022.8	14899.7	15020.0	15033.0	9369.1	15173.4	13416.7	15300.5	14521.1	17746.2
M0	9	2	130.5	131.2	130.6	130.3	129.9	130.3	130.0	130.0	130.3	130.0	130.0	130.5
	10	6	647.7	640.8	634.4	640.8	597.3	597.6	636.1	638.7	656.5	632.4	654.8	602.9
	11	10	1373.3	1533.6	1511.6	1521.5	1433.4	1425.1	1448.0	1488.9	1420.1	1401.4	1426.7	1649.8
	12	20	4482.8	4563.8	4308.0	4325.5	4391.3	4439.3	4673.4	4530.0	4616.0	4514.8	4582.9	6111.6
	13	30	9338.8	9634.8	9489.2	9581.0	9583.4	9629.2	9913.6	9395.3	10019.4	9444.6	9540.7	11133.7
	14	50	24301.1	25151.3	25202.9	25278.3	25498.0	25584.0	30268.9	25018.6	27611.0	24102.0	24492.4	28554.8
V0	15	2	284.7	276.9	279.4	280.3	277.6	282.2	288.4	284.3	281.3	284.4	283.5	276.6
	16	6	468.6	518.4	513.4	513.6	500.5	498.9	467.5	503.6	467.0	461.8	452.0	482.3
	17	10	641.1	692.4	689.4	697.5	679.8	672.5	644.7	691.1	640.3	632.8	633.8	707.1
	18	20	997.3	1051.6	1070.5	1074.7	1038.1	1025.0	1059.0	1052.5	1026.6	977.8	997.8	1245.0
	19	30	1361.1	1428.9	1437.8	1431.1	1407.0	1393.8	1456.6	1423.9	1437.4	1340.0	1350.4	1666.2
	20	50	2083.1	2173.1	2178.0	2207.1	2160.0	2163.1	2434.8	2153.8	2293.1	2031.4	2051.2	2585.1
V1	21	2	131.4	129.4	130.5	130.7	130.4	131.3	130.0	131.2	131.6	129.9	130.5	131.1
	22	6	181.9	180.4	179.6	180.6	180.3	182.1	180.7	180.6	181.0	178.7	180.2	180.7
	23	10	214.2	230.1	232.9	232.4	226.0	224.7	221.7	228.6	216.5	216.3	219.8	216.2
	24	20	324.4	328.5	324.2	330.0	320.2	318.3	321.3	327.8	316.1	323.4	318.0	319.6
	25	30	434.6	437.5	412.2	412.3	387.8	385.8	441.1	423.3	433.2	428.5	435.3	391.0
	26	50	642.9	642.7	629.3	602.5	576.3	580.9	634.9	628.2	625.9	635.6	630.0	610.2
M1+	27	10	1034.1	1060.8	1074.9	1072.7	1050.3	1015.4	1028.2	1062.5	1048.7	1031.9	1044.0	1127.4
	28	20	3564.9	3592.5	3558.0	3478.3	3215.1	3124.9	3711.4	3678.7	3582.1	3618.4	3581.1	3851.6
	29	30	7473.8	7449.2	7017.9	7243.7	6865.3	6691.3	7585.2	7547.5	7649.0	7838.9	7557.1	7665.2
	30	50	19447.2	19526.8	18599.0	18955.9	18761.5	18723.0	23061.8	19482.2	21433.3	19896.2	20051.6	21135.3
	31	100	70271.3	75603.1	72238.9	72098.6	73812.7	75376.1	66382.4	71905.9	77266.2	72799.5	69270.7	85180.6
M1-	32	10	1022.6	1044.9	1013.5	1025.3	984.9	956.8	1087.2	1044.6	1057.6	1012.6	1056.3	1089.5
	33	20	3504.9	3571.6	3469.4	3476.3	3026.6	3035.8	3549.1	3481.6	3437.2	3502.0	3447.0	3366.6
	34	30	7534.2	7303.4	7006.3	7271.7	6598.3	6571.9	7459.4	7283.8	7549.9	7538.7	7374.8	7724.1
	35	50	18777.0	19138.8	18502.2	18780.7	18472.4	18327.2	22227.0	19320.5	20905.1	20360.5	19579.4	20837.1
	36	100	68285.0	73091.9	71563.5	70267.9	73519.3	72653.0	66532.9	70365.3	77372.6	73691.5	68765.1	84186.0
M2	37	10	1274.7	1344.4	1353.3	1345.7	1309.5	1307.1	1333.9	1313.8	1322.2	1283.2	1337.5	1568.2
	38	20	4041.3	4181.3	4215.2	4179.8	4147.8	4122.5	5032.5	4193.8	4412.8	4164.5	4237.9	5608.0
	39	30	8444.1	8884.5	8963.9	8951.1	9036.6	9177.4	7598.8	8880.3	9702.9	8327.6	8592.6	10786.1
	40	50	22627.8	24047.9	23918.8	24034.2	24610.8	24779.1	21408.7	23837.1	23811.3	23054.0	22528.1	28632.6
	41	100	90220.4	95130.7	92477.3	92018.1	93372.4	94802.3	59781.4	93420.7	83073.1	93785.0	89257.6	117523.9
M3+	42	10	756.8	776.9	758.0	773.5	724.4	705.6	741.6	759.0	735.6	748.8	732.4	743.7
	43	20	2465.4	2538.0	2337.8	2300.1	2218.8	2254.8	2589.1	2423.3	2562.6	2557.7	2516.4	2368.2
	44	30	5327.1	5440.0	5193.0	5220.6	4812.5	4870.6	5312.5	5727.7	5574.2	5203.5	5539.9	5255.3
	45	50	12993.4	13607.5	13432.6	13496.3	13208.3	13331.6	15145.9	13526.1	14076.9	13718.7	13497.5	13844.7
	46	100	52044.1	51952.8	53483.9	54983.5	52933.9	53454.6	46232.7	54161.8	48057.6	49668.4	49343.0	56044.3
	47	200	205744.3	209277.0	216259.0	212210.4	214117.0	213030.2	126631.4	213113.1	185005.9	205308.5	204245.5	207372.9
	48	10	741.2	792.6	800.6	802.2	766.4	749.5	763.9	792.7	765.3	752.2	775.5	778.5
M3-	49	20	2260.1	2330.6	2289.5	2236.5	2233.1	2191.8	2345.1	2283.4	2323.8	2293.0	2317.8	2422.4
	50	30	5324.6	5272.9	5018.7	5264.3	4578.3	4608.6	5278.0	5138.1	5149.9	5115.5	5218.8	5261.8
	51	50	14065.4	14052.0	12730.3	12956.5	12647.1	12737.2	15044.3	13652.7	14091.5	14433.4	14032.6	14744.4
	52	100	46616.3	50557.9	48377.8	48589.0	50091.8	50013.5	49678.9	48650.5	55102.7	50061.6	47377.3	55459.2
	53	200	184025.5	198009.0	193858.8	188545.1	197365.0	196914.0	129905.7	188590.7	179377.9	195654.8	184300.8	215241.1

Taulukko 7.4 Weibull-ääriarvojakauman 99,916... % fraktiilit 10 vuoden liikenteen simuloinnista, kun ääriarvoina käytetty kuukauden suurinta arvoa. Punaisella kukin influenssin suurin arvo ja vihreällä pienin.

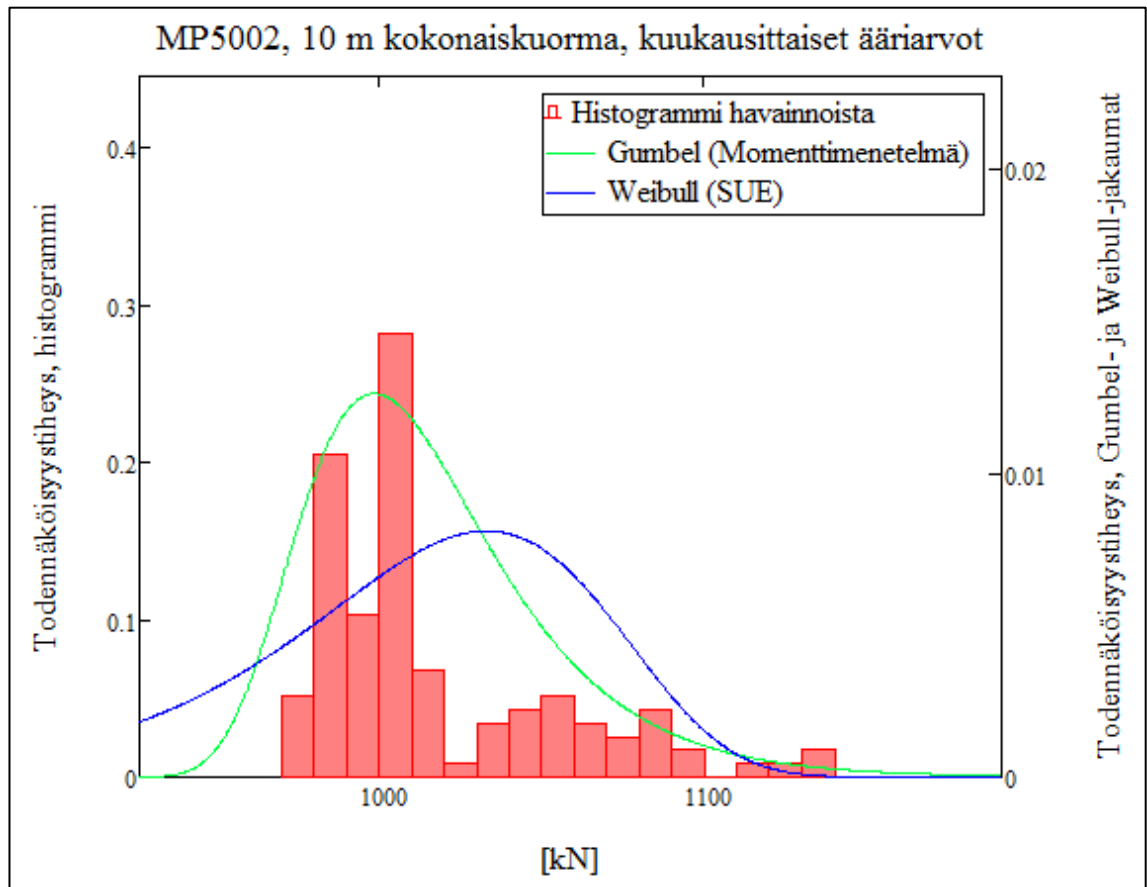
	Nro.	L	MP 5000	MP 5001	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5006	MP 5007	MP 5008	MP 5009	MP 5011	MP 5012
Q	1	2	505,9	509,9	509,8	509,3	510,2	509,5	506,2	507,1	509,9	501,8	502,5	510,1
	2	6	747,5	941,0	950,8	964,5	741,0	737,7	735,3	934,3	745,8	735,7	731,3	935,7
	3	10	1171,5	1151,2	1128,4	1131,4	1020,5	1016,8	1153,1	1145,3	1150,6	1089,6	1148,9	1243,2
	4	20	1853,8	1891,5	1919,5	1920,7	1887,5	1879,3	1904,7	1890,7	1901,5	1847,5	1866,9	2046,0
	5	30	2477,1	2713,1	2758,2	2769,5	2605,7	2565,7	2549,8	2695,4	2537,7	2481,5	2530,8	2924,2
	6	50	3859,1	4096,7	4126,5	4131,9	4052,2	4066,7	3371,4	4062,3	4064,4	3655,1	3932,4	4802,7
	7	100	7221,0	7595,6	7748,8	7776,1	7706,9	7700,9	5685,1	7691,8	7193,1	7065,3	7198,8	8666,8
	8	200	13805,5	14525,6	14546,3	14709,9	14445,5	14456,7	9040,3	14648,9	13217,1	13581,7	13710,8	16972,3
M0	9	2	126,1	126,3	126,5	126,2	126,0	126,2	125,3	125,6	126,5	125,5	125,8	126,6
	10	6	603,0	617,9	613,9	621,3	575,7	569,0	604,7	610,9	614,7	597,7	610,8	585,8
	11	10	1310,5	1478,1	1476,0	1483,8	1387,3	1375,5	1345,6	1435,7	1333,5	1315,9	1343,2	1527,2
	12	20	4273,2	4385,5	4215,9	4222,2	4228,3	4256,1	4396,1	4353,7	4334,6	4280,2	4359,8	5568,0
	13	30	8987,1	9312,8	9268,0	9382,6	9214,9	9206,2	9252,9	9136,9	9363,0	9011,9	9202,0	10664,0
	14	50	23660,3	24630,2	24643,6	24727,7	24649,8	24641,4	25047,2	24344,4	25028,1	23222,4	23657,8	27792,3
V0	15	2	271,9	267,1	270,4	270,2	268,6	271,1	273,7	272,4	270,9	267,3	270,4	268,9
	16	6	450,2	494,6	495,5	495,3	479,0	474,2	474,2	486,0	452,0	441,7	435,5	465,4
	17	10	622,5	668,2	670,2	676,5	655,3	648,4	621,8	667,2	624,1	612,2	611,0	685,9
	18	20	962,2	1020,6	1042,7	1049,9	1007,1	994,0	985,2	1025,5	988,3	947,1	968,4	1159,3
	19	30	1314,2	1380,5	1408,0	1400,7	1371,4	1355,5	1353,4	1385,1	1361,8	1296,6	1310,4	1577,4
	20	50	2066,4	2107,4	2136,8	2163,8	2102,8	2097,2	2033,2	2102,2	2114,7	1960,8	2002,0	2455,4
V1	21	2	126,6	125,6	126,4	126,3	126,4	126,6	125,7	126,0	127,0	125,6	125,9	126,9
	22	6	175,4	174,3	174,2	174,5	174,8	175,4	174,6	174,7	175,3	171,4	174,1	175,1
	23	10	206,8	220,9	224,6	225,1	216,0	214,8	212,4	221,1	211,2	210,1	210,3	210,8
	24	20	314,6	316,4	313,8	317,7	306,4	302,9	311,0	314,7	303,8	310,6	307,8	303,1
	25	30	401,8	410,0	387,3	389,1	368,4	365,5	409,2	399,4	406,2	397,9	409,8	371,4
	26	50	591,7	602,5	590,2	567,7	544,3	548,0	594,5	595,4	596,7	588,5	594,3	562,1
M1+	27	10	1003,1	1023,1	1038,0	1042,0	998,5	975,1	992,0	1020,4	996,8	991,6	992,9	1093,2
	28	20	3323,5	3399,1	3428,1	3278,7	3096,8	2987,9	3436,1	3434,1	3335,1	3354,4	3357,9	3558,8
	29	30	6978,3	7025,3	6733,9	6803,7	6528,9	6358,0	7079,7	7121,0	7067,8	7074,6	7154,3	7189,6
	30	50	18270,8	18283,2	17983,6	18254,9	18001,8	17748,6	18993,5	18458,1	18958,6	18026,0	18434,1	19880,5
	31	100	66809,1	69835,6	69991,4	70499,3	70089,8	71130,9	56077,5	69908,0	70584,6	65984,4	65960,5	79527,6
M1-	32	10	976,3	996,9	980,1	988,3	941,8	909,8	1019,1	992,8	993,3	961,0	1002,8	1030,2
	33	20	3262,7	3328,9	3254,5	3205,6	2903,4	2884,2	3283,2	3256,9	3229,7	3190,4	3245,5	3267,8
	34	30	6934,5	6915,4	6711,8	6818,7	6306,4	6249,0	6998,8	6846,1	6935,4	6849,3	6960,2	7185,6
	35	50	17571,0	17831,7	17956,8	17991,1	17605,0	17364,1	18593,0	18165,1	18587,1	18085,2	17994,0	19100,4
	36	100	65525,9	67843,7	69173,6	68974,8	69798,5	69088,4	56417,8	68276,2	69879,4	65162,1	65395,6	77670,9
M2	37	10	1208,3	1301,5	1317,9	1316,1	1262,8	1254,7	1248,2	1278,4	1237,5	1205,3	1240,6	1404,3
	38	20	3916,1	4062,0	4125,6	4090,0	4011,8	3990,7	4226,3	4112,8	4063,5	3965,8	4046,5	5216,6
	39	30	8269,9	8681,8	8771,8	8821,3	8756,3	8829,4	7048,5	8680,4	8878,4	8073,4	8411,4	10282,1
	40	50	22162,7	23334,3	23489,5	23666,1	23609,0	23669,8	18519,7	23329,4	22684,9	21937,0	22021,8	27307,0
	41	100	85512,1	89572,5	90487,5	90692,9	89517,0	90635,9	56841,8	90335,9	82173,8	84306,8	84867,7	108355,2
M3+	42	10	733,3	747,9	738,3	749,8	692,3	673,6	720,3	727,2	694,4	714,2	706,0	712,6
	43	20	2280,8	2391,7	2250,0	2191,1	2105,9	2110,7	2407,7	2294,4	2332,1	2355,2	2358,7	2205,7
	44	30	4959,4	5005,0	4941,3	4971,6	4598,5	4565,4	4865,0	5200,8	4948,1	4741,2	5077,9	5121,4
	45	50	12253,2	12700,0	12807,1	12792,1	12318,2	12477,4	12966,6	12801,0	13113,6	12397,3	12602,9	12960,7
	46	100	48504,0	48775,5	50110,5	51564,1	49198,3	49356,8	39151,1	50644,8	45485,8	45617,3	46940,0	51725,5
	47	200	191174,6	193678,6	202123,7	204120,6	198940,8	198237,7	116657,5	200678,3	177326,1	182400,7	188709,6	197204,9
M3-	48	10	717,2	763,1	771,4	777,2	726,5	718,2	734,0	757,5	725,7	722,3	736,9	756,0
	49	20	2130,1	2198,5	2205,3	2153,8	2126,3	2082,7	2177,4	2179,5	2167,6	2144,8	2198,2	2273,3
	50	30	4888,6	4999,2	4780,4	4854,3	4387,0	4362,7	4962,6	4826,1	4860,9	4777,3	4932,1	5000,9
	51	50	12767,1	12812,8	12237,9	12380,1	12042,9	11996,9	12938,2	12748,5	12820,3	12757,3	12836,0	13796,7
	52	100	44685,0	46887,7	46987,5	47240,9	47747,9	47237,9	41676,2	47184,5	48662,2	44428,7	45244,9	50740,2
	53	200	175149,1	183489,6	184895,1	184696,6	186746,5	185213,7	120594,4	181955,6	173911,5	173299,3	173127,5	198737,7

Taulukko 7.5 Gumbel-jakaumilla saatujen kuormavaikutusten ero Weibull-jakaumilla saatuihin kuormavaikutuksiin. Prosenttiluku ilmaisee, kuinka paljon suurempi Gumbel-jakaumalla saatu kuormavaikutus on verrattuna Weibull-jakaumalla saatuun.

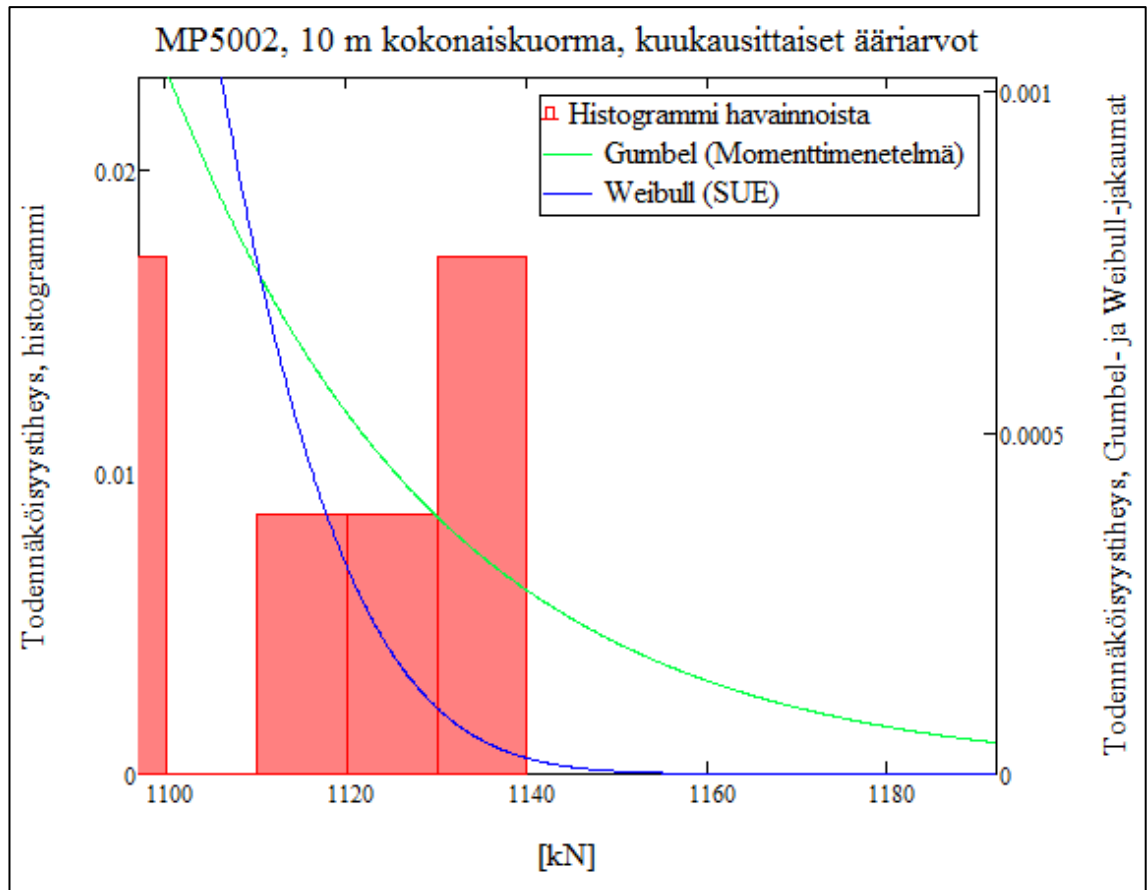
	Nro.	L	MP 5000	MP 5001	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5006	MP 5007	MP 5008	MP 5009	MP 5011	MP 5012
Q	1	2	3,9%	4,1%	3,4%	3,3%	3,8%	3,8%	3,5%	3,7%	3,2%	5,3%	3,6%	3,2%
	2	6	2,2%	3,9%	2,9%	3,0%	2,1%	2,0%	2,5%	5,1%	2,3%	2,9%	2,5%	11,0%
	3	10	11,9%	11,1%	6,7%	8,3%	4,0%	3,6%	8,5%	11,2%	7,5%	5,5%	9,4%	3,6%
	4	20	3,0%	3,0%	2,2%	1,8%	2,7%	3,0%	7,4%	2,1%	6,0%	7,7%	5,2%	4,4%
	5	30	4,6%	5,1%	2,6%	2,0%	1,8%	2,5%	11,9%	4,7%	3,9%	5,7%	5,2%	3,9%
	6	50	3,2%	3,1%	1,8%	1,9%	3,7%	5,1%	13,9%	2,9%	7,5%	2,8%	3,9%	4,4%
	7	100	1,9%	3,7%	2,2%	1,8%	6,1%	5,7%	12,8%	3,3%	2,7%	7,7%	1,9%	2,7%
	8	200	5,8%	6,9%	3,3%	1,3%	4,0%	4,0%	3,6%	3,6%	1,5%	12,7%	5,9%	4,6%
M0	9	2	3,4%	3,9%	3,2%	3,3%	3,1%	3,2%	3,7%	3,5%	3,0%	3,6%	3,3%	3,1%
	10	6	7,4%	3,7%	3,3%	3,2%	3,7%	5,0%	5,2%	4,5%	6,8%	5,8%	7,2%	2,9%
	11	10	4,8%	3,8%	2,4%	2,5%	3,3%	3,6%	7,6%	3,7%	6,5%	6,5%	6,2%	8,0%
	12	20	4,9%	4,1%	2,2%	2,4%	3,9%	4,3%	6,3%	4,1%	6,5%	5,5%	5,1%	9,8%
	13	30	3,9%	3,5%	2,4%	2,1%	4,0%	4,6%	7,1%	2,8%	7,0%	4,8%	3,7%	4,4%
14	50	2,7%	2,1%	2,3%	2,2%	3,4%	3,8%	20,8%	2,8%	10,3%	3,8%	3,5%	2,7%	
V0	15	2	4,7%	3,7%	3,3%	3,8%	3,4%	4,1%	5,4%	4,4%	3,8%	6,4%	4,8%	2,9%
	16	6	4,1%	4,8%	3,6%	3,7%	4,5%	5,2%	3,8%	3,6%	3,3%	4,6%	3,8%	3,6%
	17	10	3,0%	3,6%	2,9%	3,1%	3,7%	3,7%	3,7%	3,6%	2,6%	3,4%	3,7%	3,1%
	18	20	3,6%	3,0%	2,7%	2,4%	3,1%	3,1%	7,5%	2,6%	3,9%	3,2%	3,0%	7,4%
	19	30	3,6%	3,5%	2,1%	2,2%	2,6%	2,8%	7,6%	2,8%	5,6%	3,4%	3,1%	5,6%
	20	50	0,8%	3,1%	1,9%	2,0%	2,7%	3,1%	19,8%	2,5%	8,4%	3,6%	2,5%	5,3%
V1	21	2	3,9%	3,0%	3,3%	3,4%	3,2%	3,7%	3,4%	4,1%	3,6%	3,4%	3,7%	3,3%
	22	6	3,7%	3,5%	3,0%	3,5%	3,2%	3,8%	3,5%	3,4%	3,3%	4,3%	3,5%	3,2%
	23	10	3,6%	4,2%	3,7%	3,3%	4,7%	4,6%	4,4%	3,4%	2,5%	3,0%	4,5%	2,6%
	24	20	3,1%	3,8%	3,3%	3,9%	4,5%	5,1%	3,3%	4,2%	4,0%	4,1%	3,3%	5,4%
	25	30	8,2%	6,7%	6,4%	6,0%	5,3%	5,5%	7,8%	6,0%	6,7%	7,7%	6,2%	5,3%
	26	50	8,7%	6,7%	6,6%	6,1%	5,9%	6,0%	6,8%	5,5%	4,9%	8,0%	6,0%	8,6%
M1+	27	10	3,1%	3,7%	3,6%	2,9%	5,2%	4,1%	3,7%	4,1%	5,2%	4,1%	5,1%	3,1%
	28	20	7,3%	5,7%	3,8%	6,1%	3,8%	4,6%	8,0%	7,1%	7,4%	7,9%	6,6%	8,2%
	29	30	7,1%	6,0%	4,2%	6,5%	5,2%	5,2%	7,1%	6,0%	8,2%	10,8%	5,6%	6,6%
	30	50	6,4%	6,8%	3,4%	3,8%	4,2%	5,5%	21,4%	5,5%	13,1%	10,4%	8,8%	6,3%
	31	100	5,2%	8,3%	3,2%	2,3%	5,3%	6,0%	18,4%	2,9%	9,5%	10,3%	5,0%	7,1%
M1-	32	10	4,7%	4,8%	3,4%	3,7%	4,6%	5,2%	6,7%	5,2%	6,5%	5,4%	5,3%	5,8%
	33	20	7,4%	7,3%	6,6%	8,4%	4,2%	5,3%	8,1%	6,9%	6,4%	9,8%	6,2%	3,0%
	34	30	8,6%	5,6%	4,4%	6,6%	4,6%	5,2%	6,6%	6,4%	8,9%	10,1%	6,0%	7,5%
	35	50	6,9%	7,3%	3,0%	4,4%	4,9%	5,5%	19,5%	6,4%	12,5%	12,6%	8,8%	9,1%
	36	100	4,2%	7,7%	3,5%	1,9%	5,3%	5,2%	17,9%	3,1%	10,7%	13,1%	5,2%	8,4%
M2	37	10	5,5%	3,3%	2,7%	2,3%	3,7%	4,2%	6,9%	2,8%	6,8%	6,5%	7,8%	11,7%
	38	20	3,2%	2,9%	2,2%	2,2%	3,4%	3,3%	19,1%	2,0%	8,6%	5,0%	4,7%	7,5%
	39	30	2,1%	2,3%	2,2%	1,5%	3,2%	3,9%	7,8%	2,3%	9,3%	3,1%	2,2%	4,9%
	40	50	2,1%	3,1%	1,8%	1,6%	4,2%	4,7%	15,6%	2,2%	5,0%	5,1%	2,3%	4,9%
	41	100	5,5%	6,2%	2,2%	1,5%	4,3%	4,6%	5,2%	3,4%	1,1%	11,2%	5,2%	8,5%
M3+	42	10	3,2%	3,9%	2,7%	3,2%	4,6%	4,7%	3,0%	4,4%	5,9%	4,8%	3,7%	4,4%
	43	20	8,1%	6,1%	3,9%	5,0%	5,4%	6,8%	7,5%	5,6%	9,9%	8,6%	6,7%	7,4%
	44	30	7,4%	8,7%	5,1%	5,0%	4,7%	6,7%	9,2%	10,1%	12,7%	9,8%	9,1%	2,6%
	45	50	6,0%	7,1%	4,9%	5,5%	7,2%	6,8%	16,8%	5,7%	7,3%	10,7%	7,1%	6,8%
	46	100	7,3%	6,5%	6,7%	6,6%	7,6%	8,3%	18,1%	6,9%	5,7%	8,9%	5,1%	8,3%
	47	200	7,6%	8,1%	7,0%	4,0%	7,6%	7,5%	8,5%	6,2%	4,3%	12,6%	8,2%	5,2%
M3-	48	10	3,3%	3,9%	3,8%	3,2%	5,5%	4,4%	4,1%	4,6%	5,5%	4,1%	5,2%	3,0%
	49	20	6,1%	6,0%	3,8%	3,8%	5,0%	5,2%	7,7%	4,8%	7,2%	6,9%	5,4%	6,6%
	50	30	8,9%	5,5%	5,0%	8,4%	4,4%	5,6%	6,4%	6,5%	5,9%	7,1%	5,8%	5,2%
	51	50	10,2%	9,7%	4,0%	4,7%	5,0%	6,2%	16,3%	7,1%	9,9%	13,1%	9,3%	6,9%
	52	100	4,3%	7,8%	3,0%	2,9%	4,9%	5,9%	19,2%	3,1%	13,2%	12,7%	4,7%	9,3%
	53	200	5,1%	7,9%	4,8%	2,1%	5,7%	6,3%	7,7%	3,6%	3,1%	12,9%	6,5%	8,3%
MAKS			11,9%	11,1%	7,0%	8,4%	7,6%	8,3%	21,4%	11,2%	13,2%	13,1%	9,4%	11,7%
MIN			0,8%	2,1%	1,8%	1,3%	1,8%	2,0%	2,5%	2,0%	1,1%	2,8%	1,9%	2,6%
KA			5,1%	5,2%	3,6%	3,6%	4,3%	4,8%	9,2%	4,5%	6,4%	7,0%	5,2%	5,7%

Tarkastellaan seuraavaksi yksittäisiä jakaumia tarkemmin. Otetaan ensimmäisenä käsitelyyn tulos, jossa Gumbel- ja Weibull-jakauman tuottamat tulokset eroavat toisistaan tavallisella tavalla. Tällainen on esimerkiksi influenssin 3 tulos mittauspisteellä 5002,

jossa Gumbel-jakauma antaa 6,7 % suuremman tuloksen kuin Weibull-jakauma. Aloitetaan tarkastelemalla graafisesti tiheysfunktioiden eroja ja niiden istumista empiirisen jakauman histogrammiin, kuvat 7.6 ja 7.7.

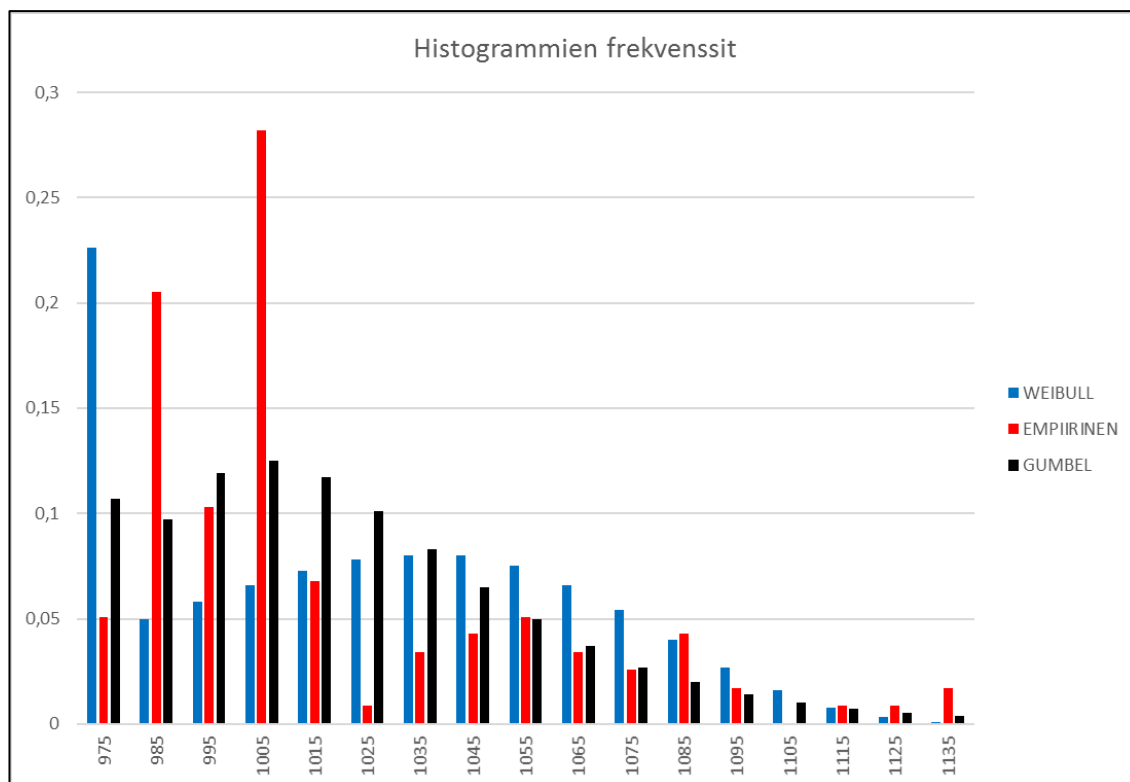


Kuva 7.6 Mittauspisteen 5002 10 metrin viivakuorman empiirisen jakauman histogrammi ja päälle sovitettuna Gumbel- ja Weibull-jakaumien tiheysfunktioiden käyrät.



Kuva 7.7 Mittauspisteen 5002 10 metrin viivakuorman empiirisen jakauman histogrammi ja päälle sovitettuna Gumbel- ja Weibull-jakaumien tiheysfunktioiden käyrien hännät suurennettuna.

Kuvista huomataan, että Gumbel-jakauma sopii yleisesti huomattavasti paremmin kyseiseen tulosjakaumaan. Myös Gumbel-jakauman häntä näyttää zoomauksen perusteella istuvan paremmin, tosin sen tarkempi tarkastelu on hieman hankalaa tällaisesta kuvaajasta. Weibull-jakauman häntä näyttäisi tyssäävän aika pian havaintojen jälkeen, joten sen voisi olettaa olevan turhan ohut. Tarkastellaan vielä kuvassa 7.8 tulosjakauman histogrammia Gumbel- ja Weibull-jakaumista tuotettuihin histogrammeihin, jolloin ne ovat myös samassa skaalassa.



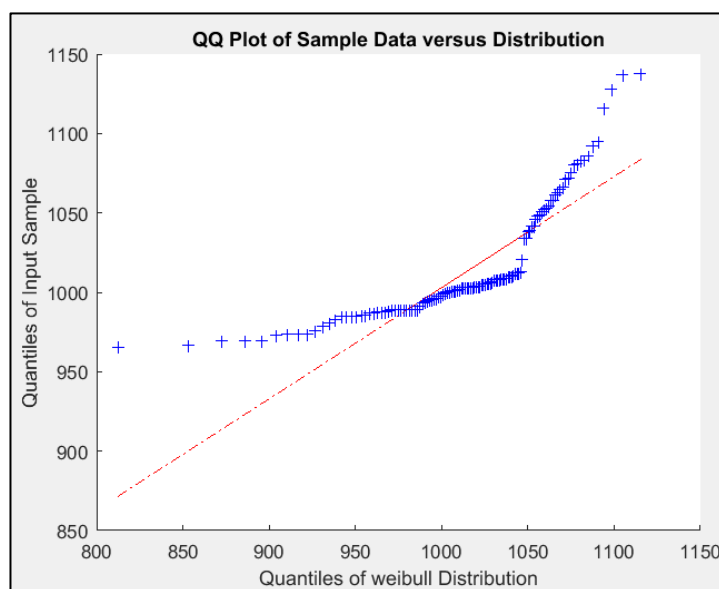
Kuva 7.8 Mittauspisteen 5002 10 metrin viivakuorman empiirisen ja sovitettujen Gumbel- ja Weibull-jakaumien histogrammit. Vaaka-akselilla kuorma [kN] ja pystyakselilla todennäköisyys.

Gumbel-jakaumakin antaa pienempiä frekvenssejä suuriin tuloksiin kuin itse tulosjakauma, mutta todella suuriin fraktiileihin mentäessä jakauma antaa toki suurempia tuloksia kuin havainnot ovat eli häntä on ainakin alustavasti riittävän paksu. Suurin havainto on 1138 kN kyseisessä tulosjakaumassa ja Gumbel-jakaumalla saatu 100 vuoden toistumiskuorma on 1204,3 kN. Weibull-jakaumalla 100 vuoden toistumiskuorma jää pienemmäksi ollen 1128,4 kN, joka on jo hiukan pienempi kuin on havaittu. Tästä voidaan päätellä, ettei ainakaan Weibull-jakauma ole sopiva kyseiselle tulosjakaumalle. Paras tapa verrata hännän sopivuutta graafisesti tuloksiin on kuitenkin kvantiilikuvaaja, jossa otoksen kvantiileja verrataan teoreettisen jakauman kvantiileihin.

Kuvissa 7.9 ja 7.10 on Matlab-ohjelmalla tehdyt kvantiilikuvat havainnoista Weibull-jakaumaan ja Gumbel-jakaumaan nähden. Kuvaajista huomataan, että Weibull-jakauma ei sovellu kuvaamaan kyseistä jakaumaa. Gumbel-jakauma sopii paremmin, mutta myös sen istuvuudessa on toivomisen varaa, koska keskivaiheilla on selvää kuplaa. Gumbel-jakauman oikea häntä sopii kuitenkin hyvin. Kvantiilikuvaajia on tuotettu ainoastaan kuu-kauden referenssijakson perusteella ja 10 vuoden simulaatiolla. Weibull- ja GEV-jakaumat on estimoitu Matlabissa suurimman uskottavuuden menetelmällä, koska Weibull-jakauman parametrit estimoitii myös MathCad-työkalulla samalla menetelmällä ja Matlab käyttää oletusarvoisesti kyseistä menetelmää parametrien estimointiin. Gumbel-ja-

kaumien estimointiin käytettiin Matlab-ohjelmassa sekä suurimman uskottavuuden menetelmää, että momenttimenetelmää. Näin siksi, että MathCad-ohjelman tuloslaskelmissa käytettiin momenttimenetelmää, mutta Matlab tarkasteluissa GEV-jakaumat estimoidaan suurimman uskottavuuden menetelmällä, jolloin samalla tavalla estimoitu Gumbel-jakauma on vertailukelpoisempi näissä tapauksissa.

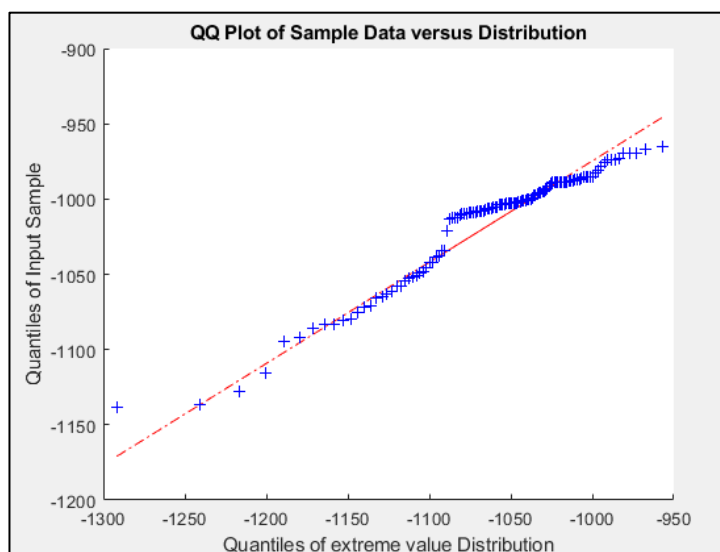
Gumbel-jakauman kvantiilikuvaajista on vielä mainittava, että niitä luetaan tässä työssä päinvastoin kuin Weibull- ja GEV-jakaumien kuvaajia. Tämä johtuu siitä, että kvantiilikuvaajat on tehty Matlab-ohjelman valmiilla funktioilla ja ohjelmassa tulee syöttää Gumbel-jakauman tapauksessa empiiriset arvot negatiivisina, kun haetaan ääriarvojen maksimia. Tässä työssä tarkasteltavat ääriarvojen maksimit löytyvät siis Gumbel-jakaumien kvantiilikuvaajissa vasemmasta alakulmasta, kun muiden jakaumien kuvaajissa ne ovat loogisesti oikeassa yläkulmassa. Lisäksi Gumbel-jakauman kvantiilikuvaajissa on asteikoissa lukuarvojen edessä miinusmerkit, mutta ne ovat tosiasiallisesti positiivisia.



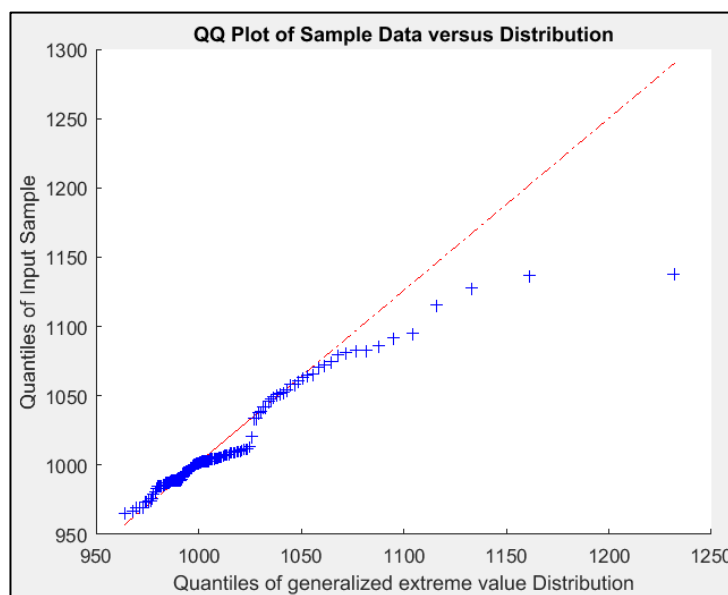
Kuva 7.9 *Q-Q kuvaaja havainnoista suhteessa Weibull-jakaumaan. Punainen suora kuvaa Weibull-jakauman kvantiileja ja siniset rastit havaintojen kvantiileja.*

Kvantiilikuvaajista tehtyjen havaintojen perusteella päädyttiin tekemään yksittäisissä pisteissä graafista vertailua myös yleistetyllä ääriarvojakaumalla (GEV). Kuvassa 7.11 on esitetty havaintojen ja GEV-jakauman välinen kvantiilikuva. Huomataan, että GEV-jakauman kvantiilit osuvat parhaiten yhteen havaintojen kvantiilien kanssa muualla paitsi aivan oikeassa hännässä. Hännän oikea pää on selvästi liian paksu, muutamat suurimmat empiirisen jakauman havainnot siis jäävät selkeästi GEV-jakauman alapuolelle. Siinä mielessä GEV-jakauma on siis parempi, että sen antamat tulokset ovat varmemmalla puolella verrattuna Gumbel- ja Weibull-jakaumiin. Tässä tapauksessa näyttää kuitenkin siltä, että SU-estimoitu Gumbel-jakauma sopii hännän osalta parhaiten ja samalla muissa kohdissa ero GEV-jakaumaan on pieni, jolloin se lienee tässä tutkituista jakaumista sopivin. GEV-jakaumalle ei ehditty työn puitteissa tekemään työkalua, joka olisi laskenut suoraan

kaikkien mittauspisteiden kaikkien influenssien sadan vuoden toistumiskuormavaikutuksen. Tämän vuoksi GEV-jakaumien tarkastelu rajoittuu vain näihin yksittäisiin jakaumiin, jotka tulostensa puolesta on nostettu lähempään tarkasteluun.



Kuva 7.10 *Q-Q kuvaaja havainnoista suhteessa Gumbel-jakaumaan. Punainen suora kuvaa Gumbel-jakauman kvantiileja ja siniset rastit havaintojen kvantiileja.*



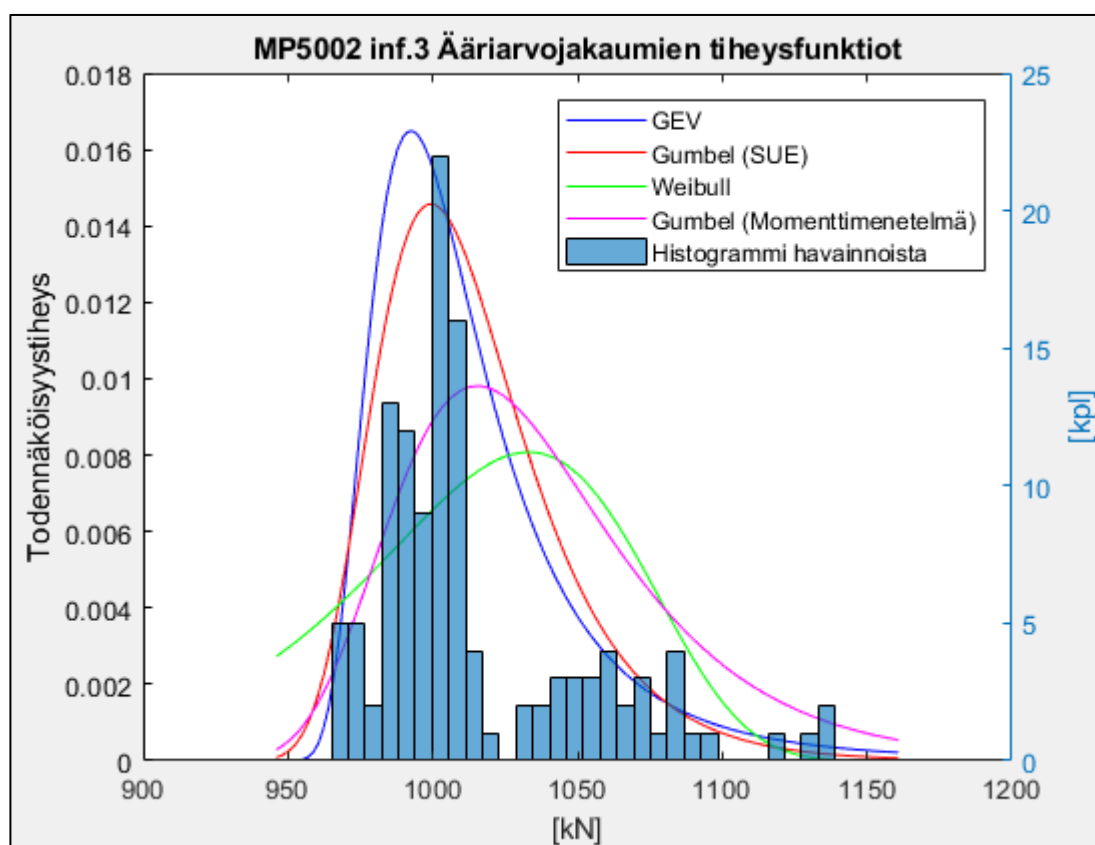
Kuva 7.11 *Q-Q kuvaaja havainnoista suhteessa GEV-jakaumaan. Punainen suora kuvaa GEV-jakauman kvantiileja ja siniset rastit havaintojen kvantiileja.*

Taulukon 7.6 Matlab-ohjelman estimoimista parametreista nähdään, että GEV-jakauma saa muotoparametrille ξ positiivisen arvon. Tämä tarkoittaa sitä, että datan perusteella estimoitu yleistetty ääriarvojakauma on tyypiltään paksuhäntäinen Fréchet-jakauma, joka huomattiin jo kuvasta 7.11. Kaikkien jakaumien kvantiilikuvaajien keskivaiheille jää kuplaa, joten tässä mikään tutkituista jakaumista ei sovi kovin täydellisesti. Tämä johtuu

siitä, että empiirinen jakauma on hajonnut kahtia, jolloin kahtiajaon kohdalle syntyy väkisin mutka. Tästä syystä voidaankin epäillä, että kyseisessä tapauksessa tarvittaisiin mahdollisesti lisää simulointikierrroksia, jotta jakauma yhdentyisi.

Taulukko 7.6 *GEV-jakauman parametrit mittauspisteen 5002 influenssin 3 datasta.*

GEV-jakauman parametrit		
ξ	σ	μ
0,210101	22,7722	996,705

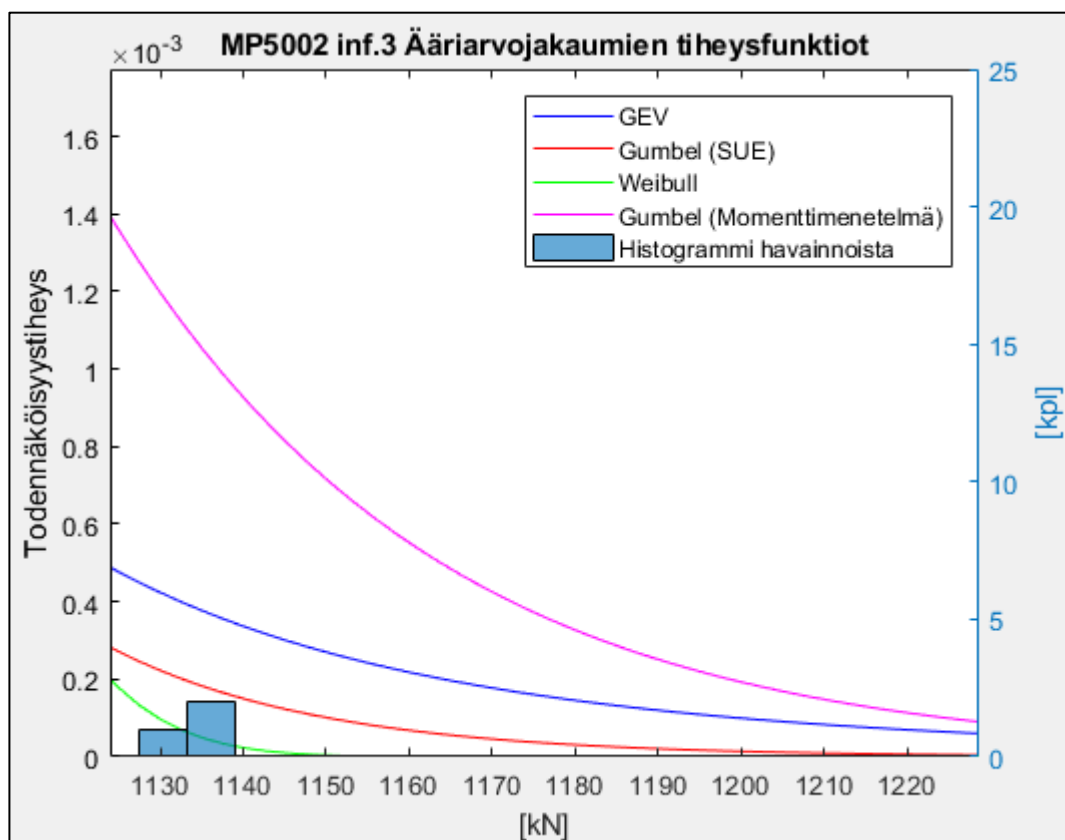


Kuva 7.12 *Matlab-ohjelmassa lisätty tulostaulukoissa tarkasteltujen jakaumien lisäksi GEV-jakauma ja suurimman uskottavuuden menetelmällä estimoitu Gumbel-jakauma.*

Yllä olevasta kuvasta 7.12 huomataan myös kuinka suuri vaikutus estimointimenetelmällä voi olla jakauman muotoon. Momenttimenetelmällä estimoitu Gumbel-jakauma on huomattavasti leveämpi kuin suurimman uskottavuuden menetelmällä estimoitu Gumbel-jakauma, joka pyrkii mukailemaan empiiristä jakaumaa mahdollisimman hyvin joka kohdassa.

Kuvassa 7.13 verrataan vielä kaikkien jakaumien häntiä ja huomataan, että momenttimenetelmällä estimoidun Gumbel-jakauman häntä näyttää jopa yhtä paksulta kuin Frechet-jakaumaa muistuttavan GEV-jakauman. Jatkamalla kuvaa oikealle GEV-jakauman häntä

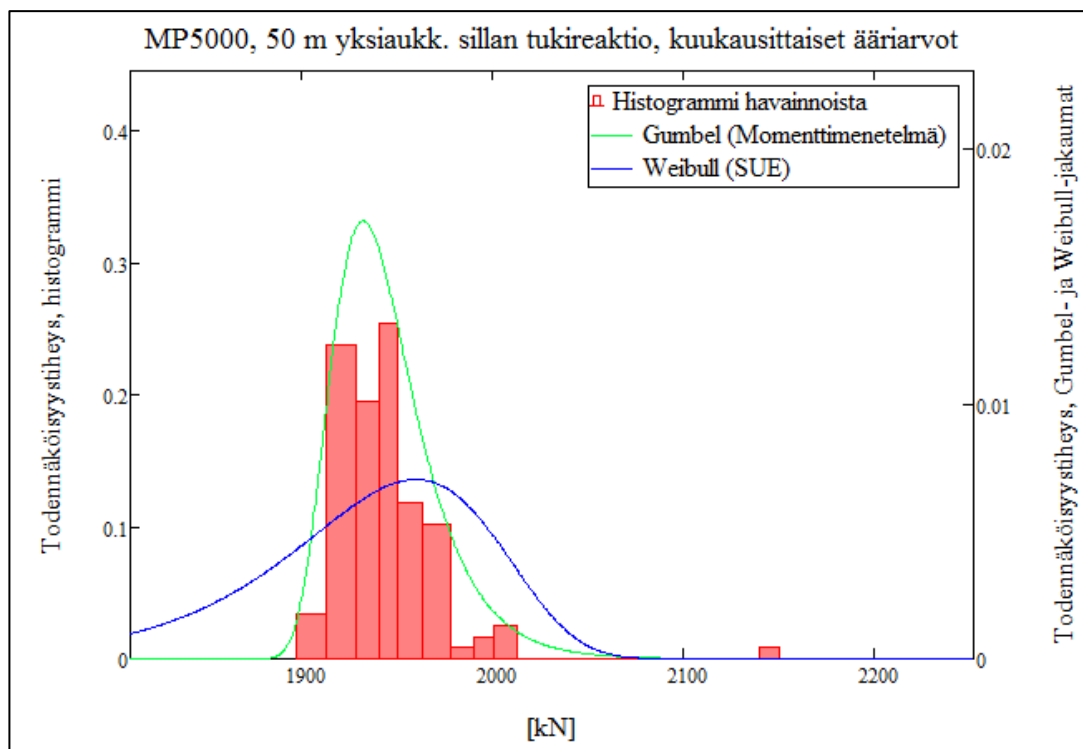
tulee kuitenkin ohittamaan Gumbel-jakauman hännän. GEV-jakauma antaa 100 vuoden toistumiskuormaksi 1369 kN eli vielä lähes 14 % suuremman arvon kuin momenttimenetelmällä estimoitu Gumbel-jakauma.



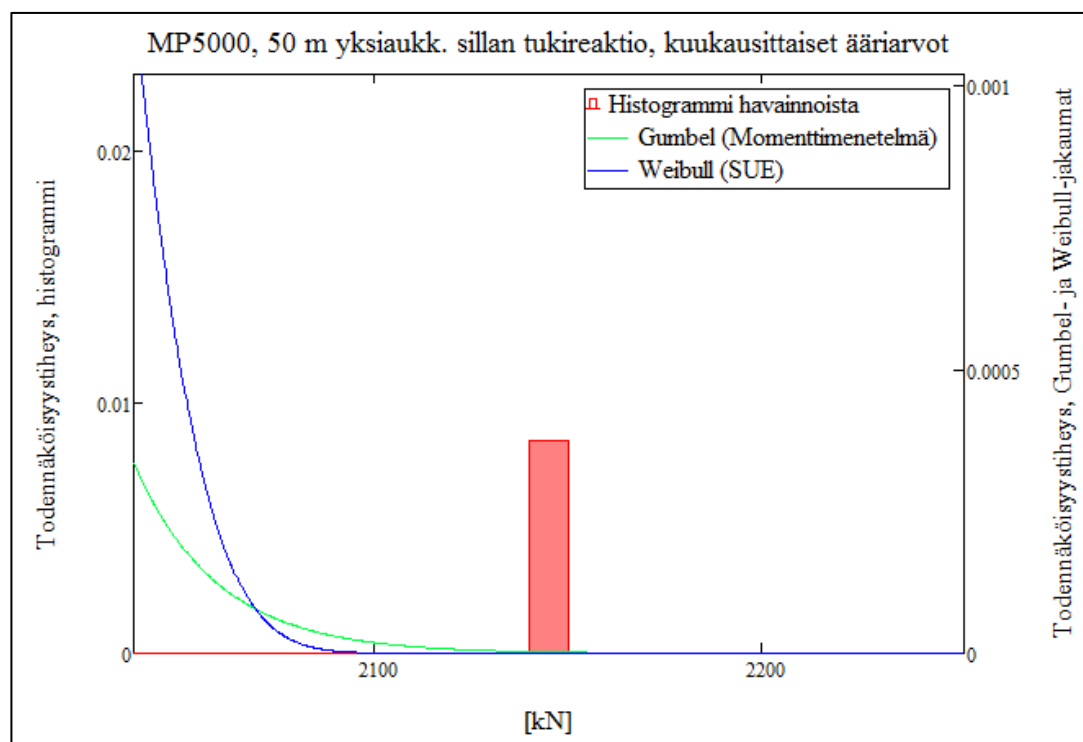
Kuva 7.13 Jakaumien hännät suurennettuna.

Vaikka häntien erot näyttävät tiheysfunktioiden kuvissa suhteellisen pieniltä, niin toistumiskuormien arvoissa on melko suuria eroja jakaumasta riippuen, koska arvot luetaan 100 vuoden toistumiskuorman tapauksessa niin kaukaa hännältä.

Tarkastellaan seuraavaksi mittauspisteen 5000 influenssia 20, jossa Weibull-jakauma antoi vain hieman pienemmän sadan vuoden toistumiskuormavaikutuksen kuin Gumbel-jakauma. Ensimmäisenä kuvissa 7.15 ja 7.16 jälleen ainoastaan tulostaulukoissa mukana olevien jakaumien tiheysfunktiot empiirisen jakauman histogrammien päällä. Tällä kertaa empiirisen jakauma on erikoinen, sillä se sisältää yhden huomattavasti muita suuremman arvon. Tämän vuoksi Gumbel- ja Weibull-jakaumat antavat hyvin lähelle samanlaiset arvot.



Kuva 7.14 Mittauspisteen 5000 50 metrisen yksiaukkoisen sillan tukireaktion empiirisen jakauman histogrammi ja päälle sovitettuna Gumbel- ja Weibull-jakaumien tiheysfunktioiden käyrät.



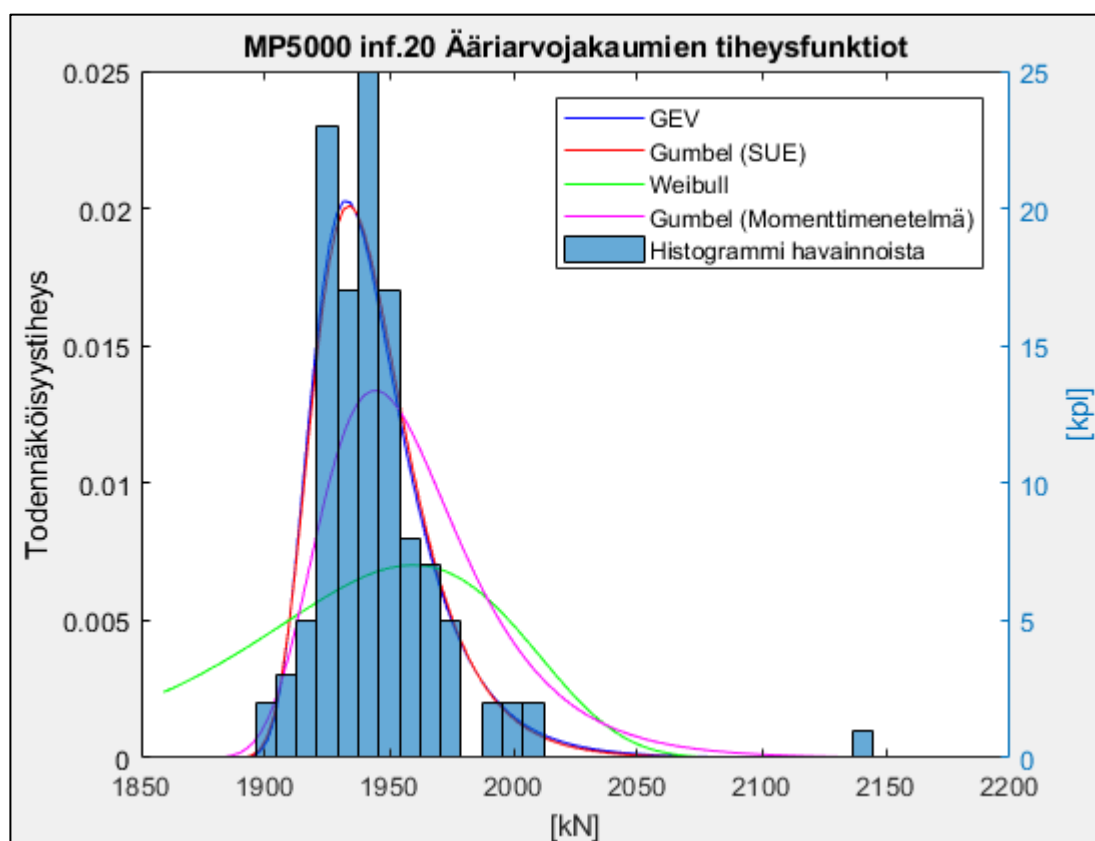
Kuva 7.15 Mittauspisteen 5000 50 metrisen yksiaukkoisen sillan tukireaktion empiirisen jakauman histogrammi ja päälle sovitettujen Gumbel- ja Weibull-jakaumien tiheysfunktioiden käyrien hännät suurennettuna.

Matlabilla tarkasteltiin jälleen tulostaulukon jakaumien lisäksi GEV-jakauma sekä Gumbel-jakauma suurimman uskottavuuden estmoinnilla. GEV-jakauman parametrisoinnin yhteydessä huomattiin sen saavan muotoparametrin arvoksi hyvin lähelle 0, joka tarkoittaa jakauman noudattavan tällä kertaa lähestulkoon Gumbel-jakaumaa.

Taulukko 7.7 GEV-jakauman parametrit mittauspisteen 5000 influenssin 20 datasta.

GEV-jakauman parametrit		
ξ	σ	μ
0,039757	18,13	1933,32

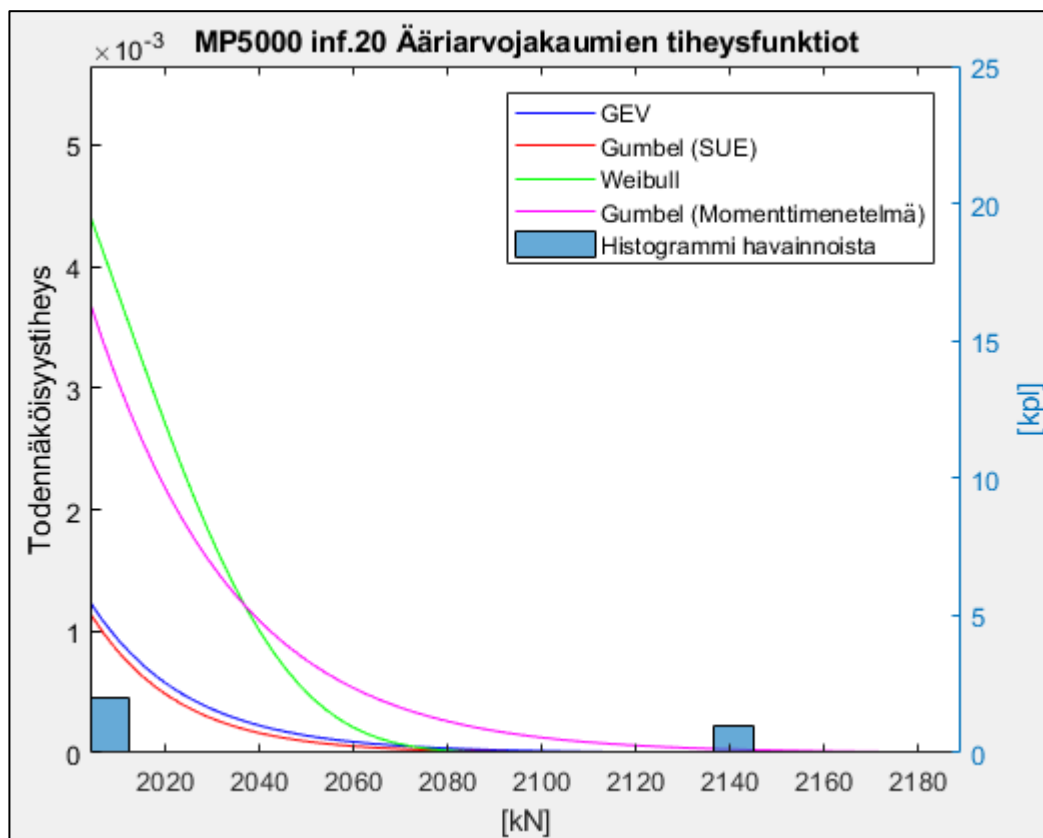
Myös alla olevasta tiheysfunktioiden kuvaajasta huomataan, että GEV-jakauma on nyt todella lähellä Gumbel-jakaumaa, joka on estimoitu suurimman uskottavuuden menetelmällä.



Kuva 7.16 Kaikkien tarkasteltavien jakaumien tiheysfunktiot.

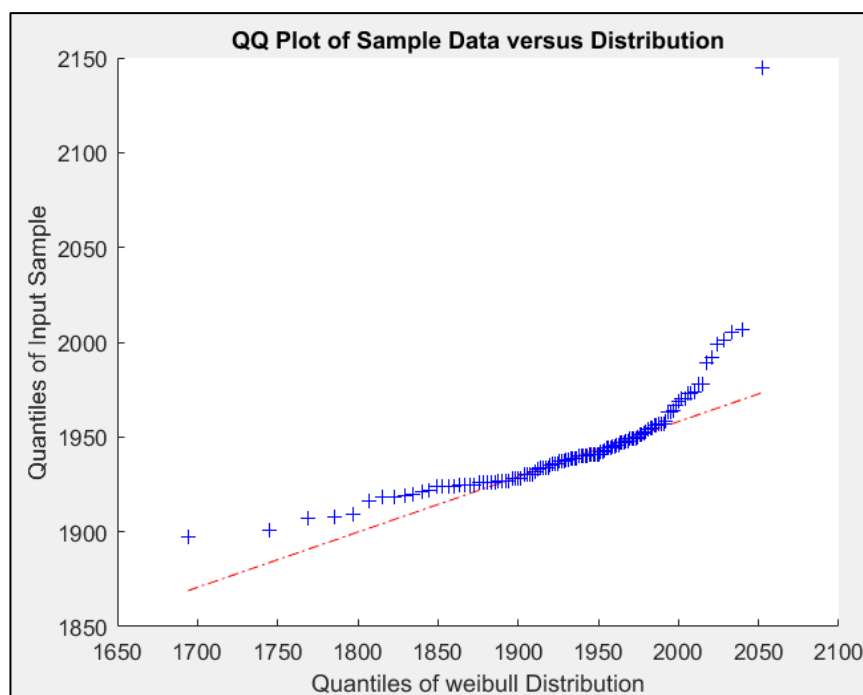
Tulostaulukoista saadaan Gumbel-jakauman 100 vuoden toistumiskuorma 2083 kN ja Weibull-jakaumalle vastaavasti 2066 kN. Molemmat ovat alle suurimman havaitun kuorman, mikä on mahdollista, koska suurin havaittu kuorma on tässä jakaumassa niin poikkeuksellisen suuri muihin havaintoihin nähden. Tämän jakauman kohdalla olisi syytä tutkia tarkemmin mistä yksittäinen suuri arvo tulee ja tuleeko niitä enemmän tai yhtyykö

muu todennäköisyysmassa siihen, mikäli simuloidaan vielä pidempi ajanjakso. GEV-jakauman 100-vuoden toistumiskuormaksi saatiin 2082 kN eli sekin jää havainnon alapuolelle. Kuvien 7.18 ja 7.19 perusteella olisi voinut veikata GEV-jakauman arvoksi vielä pienempää, mutta ilmeisesti muotoparametrin pienikin positiivinen arvo tekee hänestä kaukana oikealla jonkin verran vahvemman kuin momenttimenetelmällä estimoidulla Gumbel-jakaumalla.

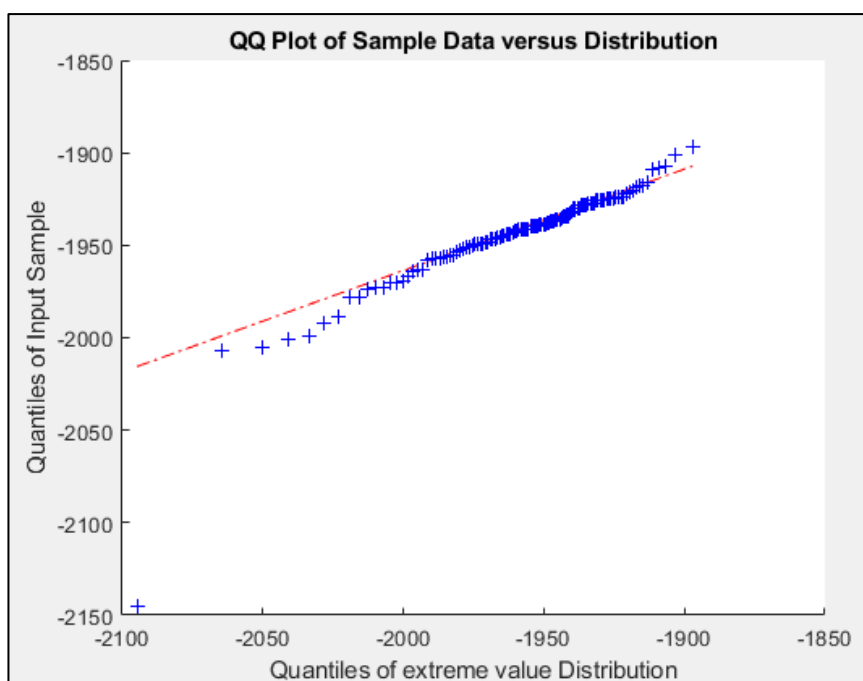


Kuva 7.17 Tiheysfunktioiden hännät suurennettuna.

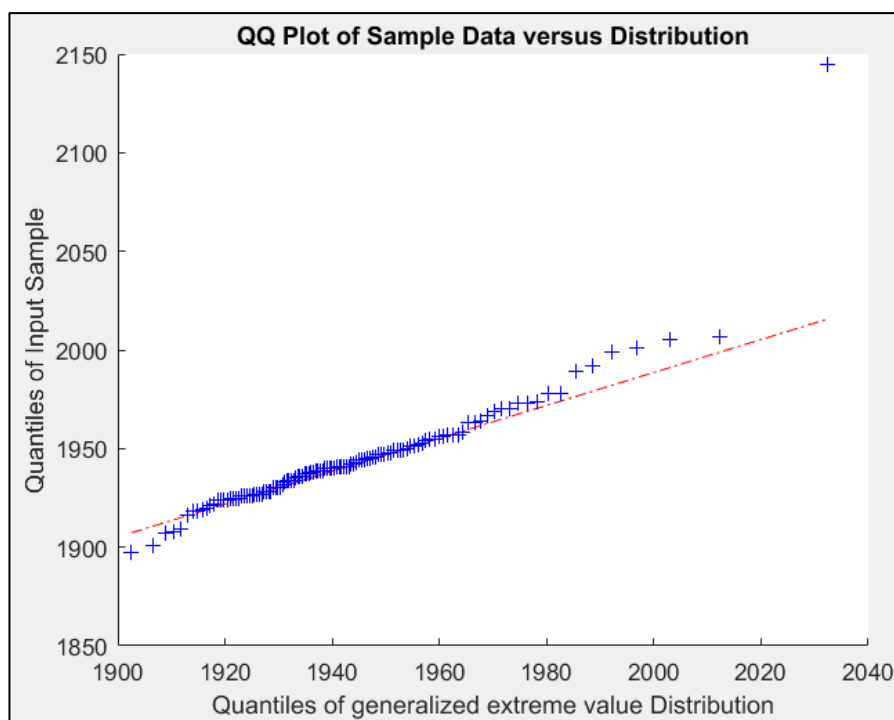
Myös kvantiilikuvajista (kuvat 7.20-7.22) huomataan, että Gumbel- ja GEV-jakaumat sopivat empiiriseen jakaumaan parhaiten. Kummassakin tapauksessa otoksen kvantiilit asettuvat melko hyvin teoreettisten kvantiilien suoralle aivan oikeanpuoleista häntää lukuunottamatta.



Kuva 7.18 *Q-Q*-kuvaaja mittauspisteen 5000 influenssin 20 havainnoista suhteessa Weibull-jakaumaan. Punainen suora kuvaa Weibull-jakauman kvantileja ja siniset rastit havaintojen kvantileja.



Kuva 7.19 *Q-Q*-kuvaaja mittauspisteen 5000 influenssin 20 havainnoista suhteessa momenttimenetelmällä estimoituun Gumbel-jakaumaan. Punainen suora kuvaa Gumbel-jakauman kvantileja ja siniset rastit havaintojen kvantileja.



Kuva 7.20 *Q-Q kuva mittauspisteen 5000 influenssin 20 havainnoista suhteessa GEV-jakaumaan. Punainen suora kuvaa GEV-jakauman kvantiileja ja siniset rastit havaintojen kvantiileja.*

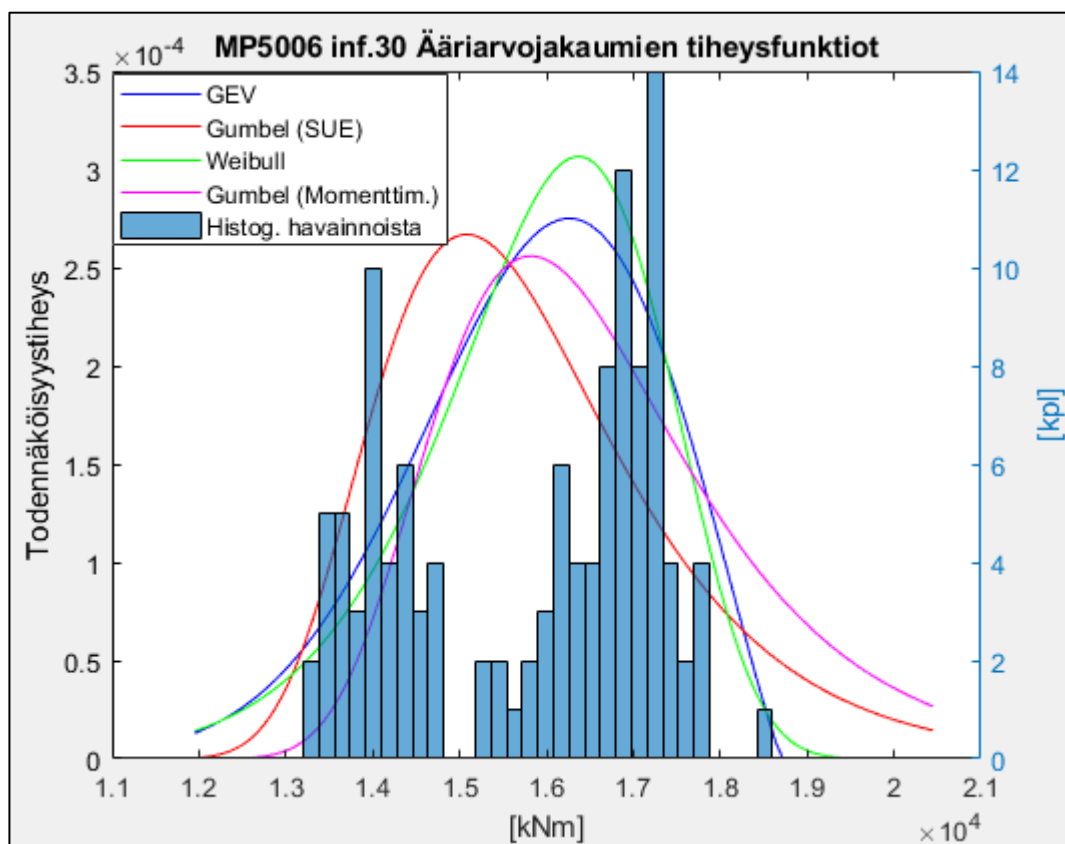
Tarkastellaan lopuksi vielä mittauspisteen 5006 influenssia 30 eli yksiaukkoisen 50 m jänteen kenttämomenttia, jossa Gumbel-jakauman antama sadan vuoden toistumiskuormavaikutus oli suhteessa suurin verrattuna Weibull-jakauman antamaan kuormavaikutukseen.

Taulukko 7.8 *GEV-jakauman parametrit mittauspisteen 5006 influenssin 30 datasta.*

GEV-jakauman parametrit		
ξ	σ	μ
-0,46431	1522,92	15435,8

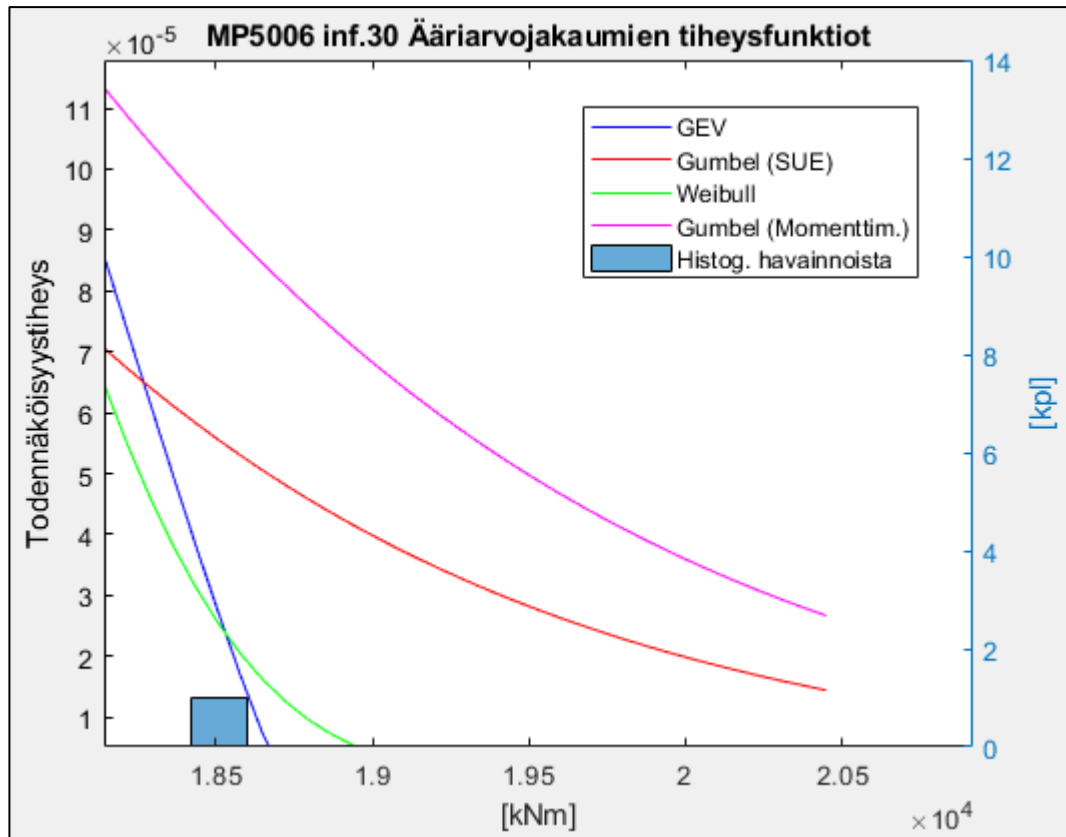
Taulukosta 7.8 nähdään, että GEV-jakauman parametri ξ on selvästi negatiivinen, jonka mukaan jakauma noudattelisi tällä kertaa vahvasti Weibull-jakaumaa. Kuvasta 7.23 nähdään, että empiirinen ääriarvojakauma on myös tällä kertaa hieman poikkeuksellinen, koska se muodostuu kahdesta selkeästä todennäköisyysmassasta. Tällöin jakauman hajonta on myös erittäin suuri ja Liitteen 5 taulukosta 3 nähdään myös, että kyseisen jakauman variaatiokerroin on yksi suurimmista. Kokonaisuudessaan jakauman todennäköisyystiheys kuitenkin putoaa lopulta melko dramaattisesti lähes kerralla nolleen, joten sen puolesta Weibull-jakauman häntä lienee parhaiten sopiva. Gumbel-jakaumien hännät ovat tässä tapauksessa aivan liian paksuja. Tulostaulukoista saadaan 100 vuoden toistumiskenttämomentiksi Gumbel-jakaumalla 23 062 kNm ja Weibull-jakaumalla 18 994

kNm suurimman yksittäisen havainnon ollessa 18 590 kNm. GEV-jakauman 100 vuoden toistumiskenttämomentiksi saatiin 18 594 kNm, joka on vain niukasti 10 vuoden havaintojakson maksimiarvoa suurempi.



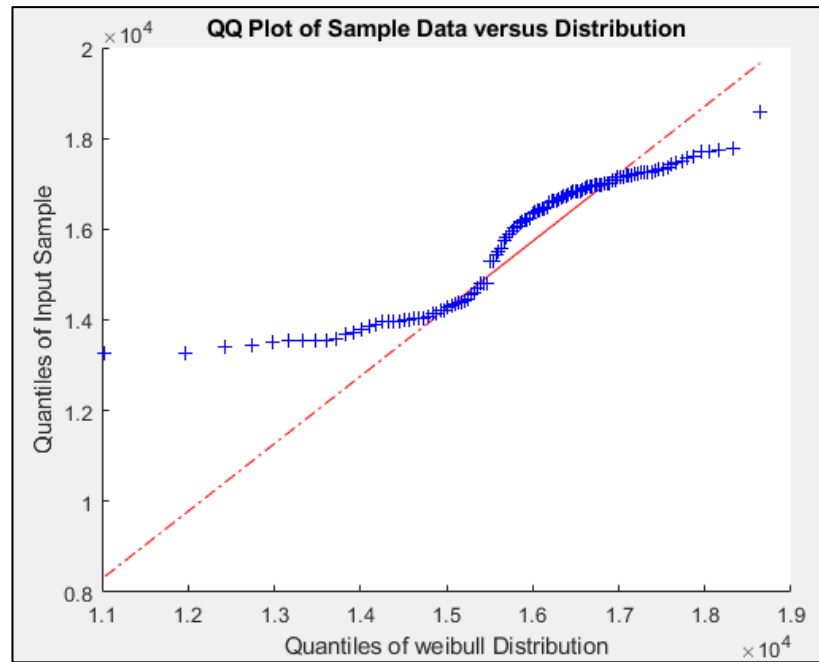
Kuva 7.21 Tarkasteltavien jakaumien tiheysfunktiot.

Tämänkin jakauman tapauksessa olisi hyvä lisätä simulointikierroksia ja katsoa yhtyykö vasemmanpuoleinen todennäköisyysmassa oikeanpuoleiseen. Tällä hetkellä empiirinen jakauma ei noudata periaatteessa alkuunkaan ääriarvojakaumia, koska se on kaksihuip-puinen. Yksi vaihtoehto voisi myös olla jakaumien sovitukset pelkästään oikeanpuoleiseen todennäköisyysmassaan.

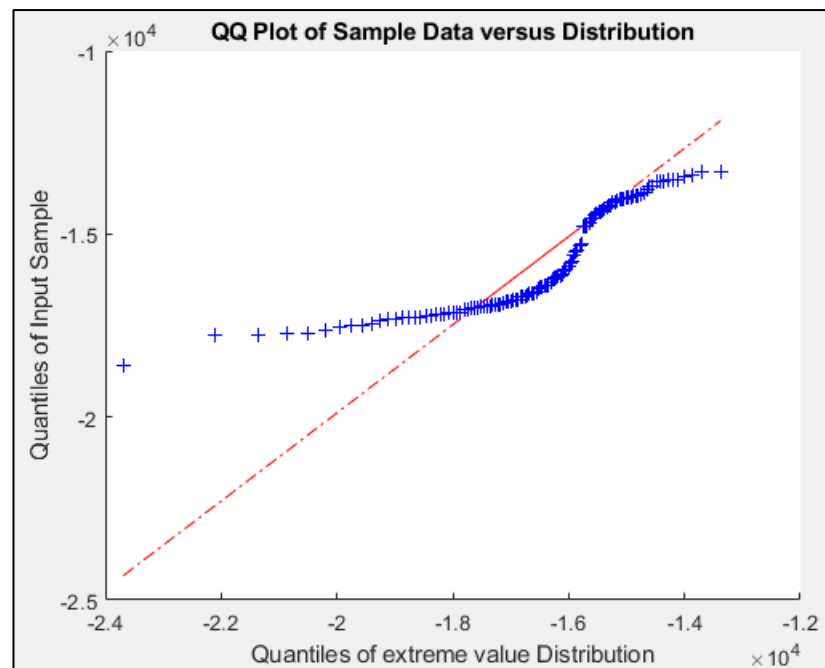


Kuva 7.22 Tiheysfunktioiden hännät suurennettuna.

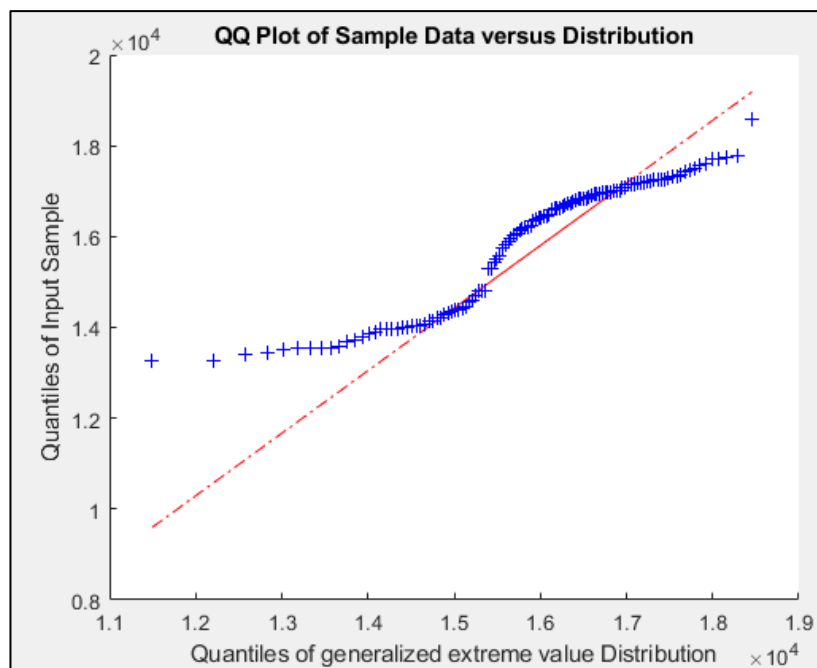
Myös kvantiilikuvaajat (7.25-7.27) menevät S-kirjaimen muotoiseksi, koska jakaumassa on kaksi huippua. Weibull-jakauman vasen häntä on myös aina verraten paksu ja erottuu kvantiilikuvaajassa, mutta sen merkitys ääriarvon maksimia haettaessa on kuitenkin vähäinen, sillä jakauman valinnassa nimenomaan oikealla hännällä on enemmän painoarvoa.



Kuva 7.25 *Q-Q -kuvaaja mittauspisteen 5006 influenssin 30 havainnoista suhteessa Weibull-jakaumaan. Punainen suora kuvaa Weibull-jakauman kvantileja ja siniset rasti havaintojen kvantileja.*



Kuva 7.23 *Q-Q -kuvaaja mittauspisteen 5006 influenssin 30 havainnoista suhteessa momenttimenetelmällä estimoituun Gumbel-jakaumaan. Punainen suora kuvaa Gumbel-jakauman kvantileja ja siniset rasti havaintojen kvantileja.*



Kuva 7.24 *Q-Q*-kuvaaja mittauspisteen 5006 influenssin 30 havainnoista suhteessa GEV-jakaumaan. Punainen suora kuvaa GEV-jakauman kvantiileja ja siniset rastit havaintojen kvantiileja.

Yleisesti voi todeta, että tarkempaan tarkasteluun valitut jakaumat olivat hyvin erilaisia, eikä eri kuormavaikutusten ääriarvojakaumat varmaankaan noudata samaa jakaumaperhettä, koska kaluston ja influenssiviivojen mittojen vaihtelu tuo tuloksiin variaatiota, vaikka ääriarvoja tuottava akselimassojen joukko olisikin normaalijakautunut.

7.4.3 Simulaation tulosten vertailu mittauspisteittäin

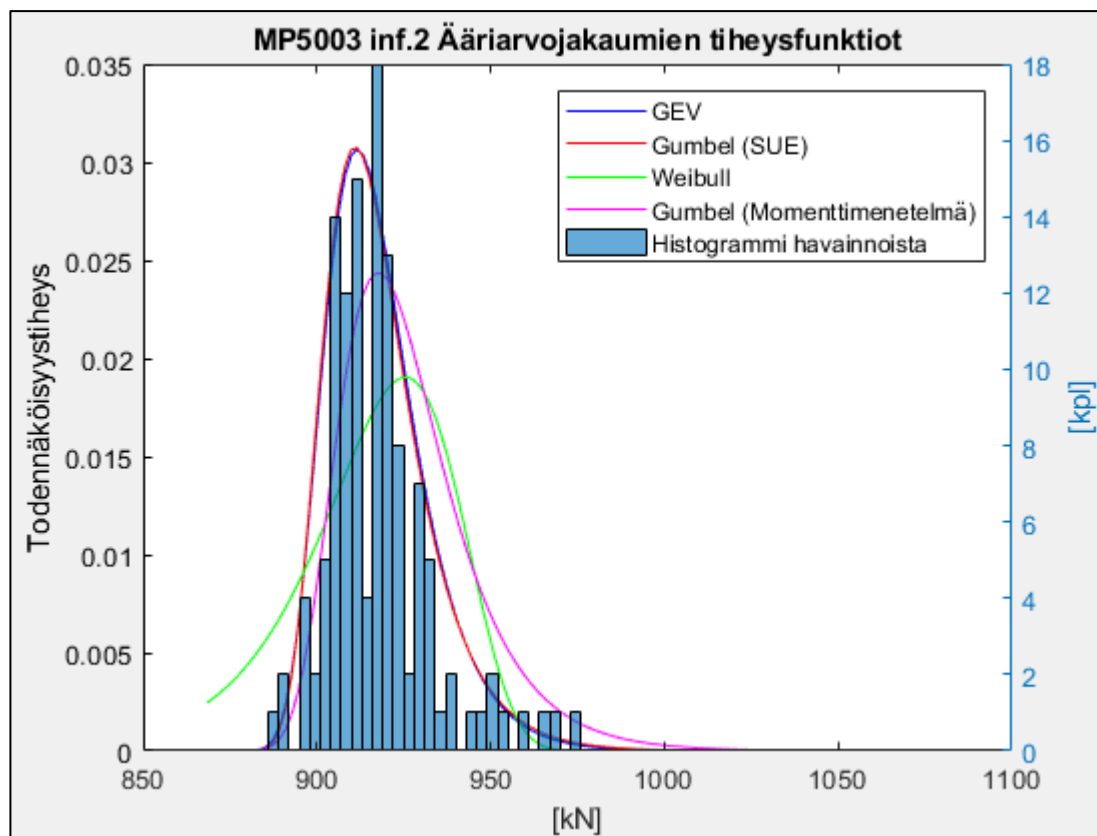
Vertaillaan sekä Gumbel- että Weibull-ääriarvojakaumien tuloksia mittauspisteiden välillä. Eri mittauspisteiden välisiä eroja voi tutkia myös edellisessä kappaleessa esiteltyjen tulostaulukoiden avulla. Tutkitaan tässä kappaleessa, onko mittauspisteen tuloksissa havaittavissa tiheysfunktioiden avulla jotakin, jonka voi lähtötietojen kautta tunnistaa kyseiselle mittauspisteelle ominaiseksi. Helpoiten näitä lähtötietojen vaikutuksia saadaan vertailtua viivakuormien avulla ja suhteellisen lyhyillä influensseilla.

Verrataan influenssiviivan 2 tuloksia mittauspisteillä 5003 ja 5005. Molemmat ovat 25 tonnin ratoja, mutta mittauspisteellä 5003 on huomattavasti suurempi viivakuorman arvo kuuden metrin influenssiviivalla.

Taulukko 7.9 *GEV-jakauman parametrit mittauspisteen 5003 influenssiviivan 2 datasta.*

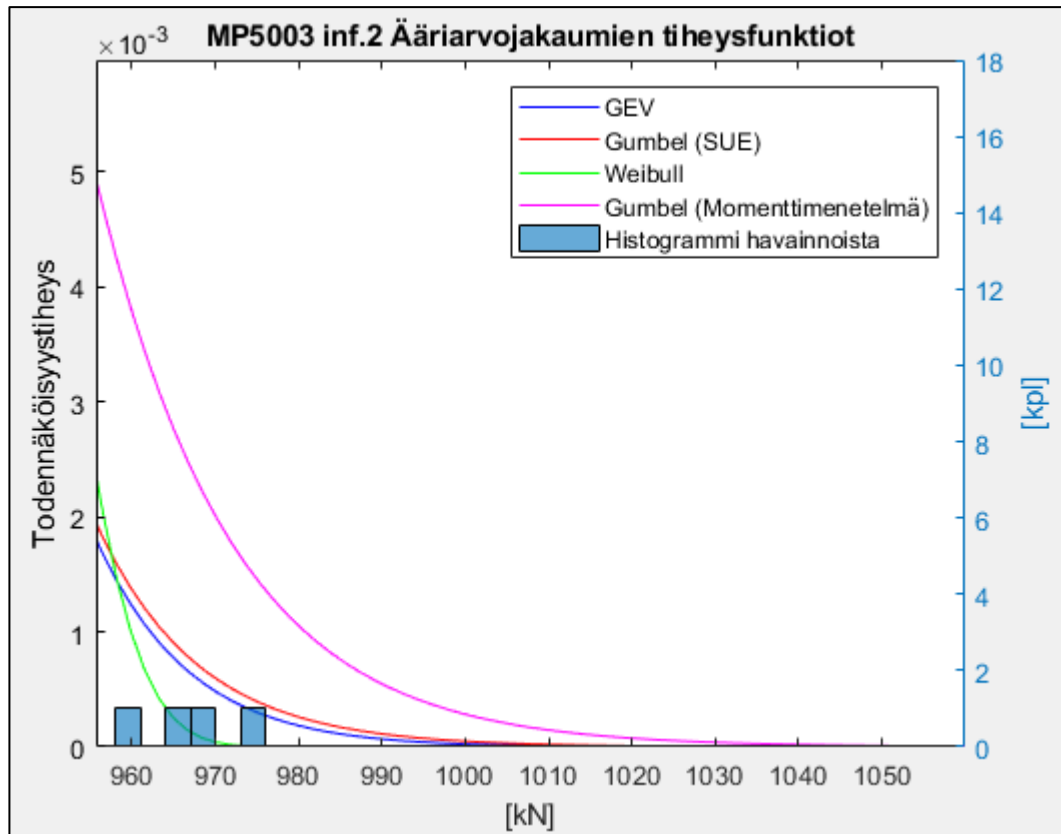
GEV-jakauman parametrit		
ξ	σ	μ
-0,03089	12,0066	911,218

Taulukon 7.9 GEV-jakauman muotoparametrissa ξ huomataan, että jakauma on sen perusteella vain hieman Gumbel-jakaumasta kohti Weibull-jakaumaa. Sama huomataan seuraavilla sivuilla kuvien 7.28 ja 7.29 tiheysfunktioiden kuvaajista, joissa GEV- ja suurimman uskottavuuden menetelmällä estimoitu Gumbel-jakauma kulkevat päällekkäin ja vasta suurennetusta kuvasta nähdään, että GEV-jakauman häntä on hieman ohuempi. Kuvista 7.30 ja 7.31 huomataan, että myös mittauspisteen 5005 GEV-jakauma on hyvin lähellä Gumbel-jakaumaa ja jälleen hieman Weibull-jakauman suuntaan. Tämä on hyvin odotetun mukainen tulos, koska kyseinen influenssiviiva mittaa kuuden metrin matkalle kertyvää painoa eli käytännössä lyhyen ylityksen omaavien kahden peräkkäisen vaunun telejä tai pidemmällä ylityksellä varustettujen vaunujen tapauksessa toisen vaunun teliä ja toisen vaunun yhtä akselia. Telipainot koostuvat kahdesta akselipainoista, jotka ovat jokseenkin kaksihuippuisesti normaalijakaantuneet. Kuuden metrin viivakuormaa mittaavat viivainfluenssit ovat siis edelleen suoraan kolmen tai neljän akselipainon summia, jolloin jakauman kaksihuippuisuus mahdollisesti tasoittuu, koska samalle influenssiviivalle voi osua sekä raskaita, että kevyitä akseleita. Tämä tosin jää vain spekulointitasolle, koska simulaatiosta ei saada ulos kuin junakohtaiset ääriarvot, jolloin vain raskaimmat kolmen tai neljän akselin ryppäät tallentuvat. Oletettavasti kaksihuippuinen sekoitettu normaalijakauma kuitenkin lähestyy tavallista normaalijakaumaa ja tästä syystä ääriarvojakaumat näyttävät noudattavan melko hyvin Gumbel-jakaumaa, koska normaalijakauman ääriarvot ovat Gumbel-jakautuneet.



Kuva 7.25 Tarkasteltavien jakaumien tiheysfunktiot.

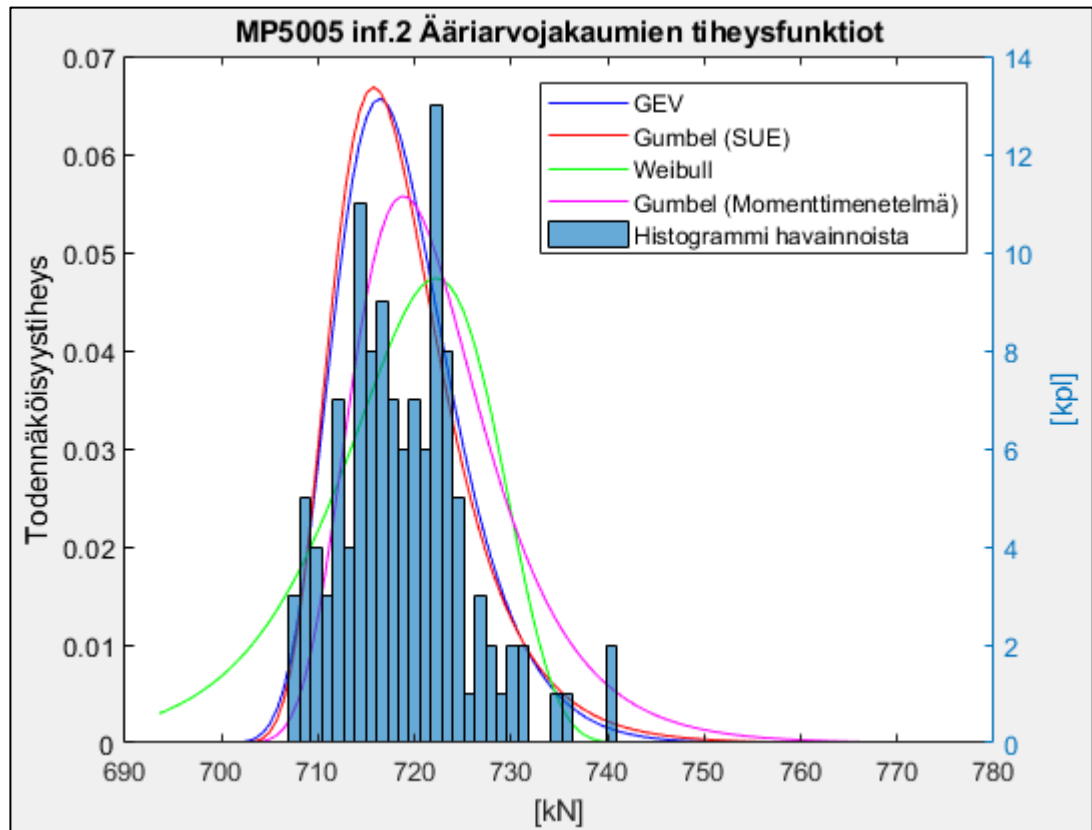
Jakaumien muodot ovat siis hyvin samanlaiset, joten eron on johduttava joko siitä, että mittauspisteellä 5003 kulkee painavampia vaunuja tai mittauspisteellä 5005 kulkee geometrialtaan sellaisia vaunuja, joissa ainoastaan kolme akselia voi osua samaan aikaan kuuden metrin influenssiviivalle.



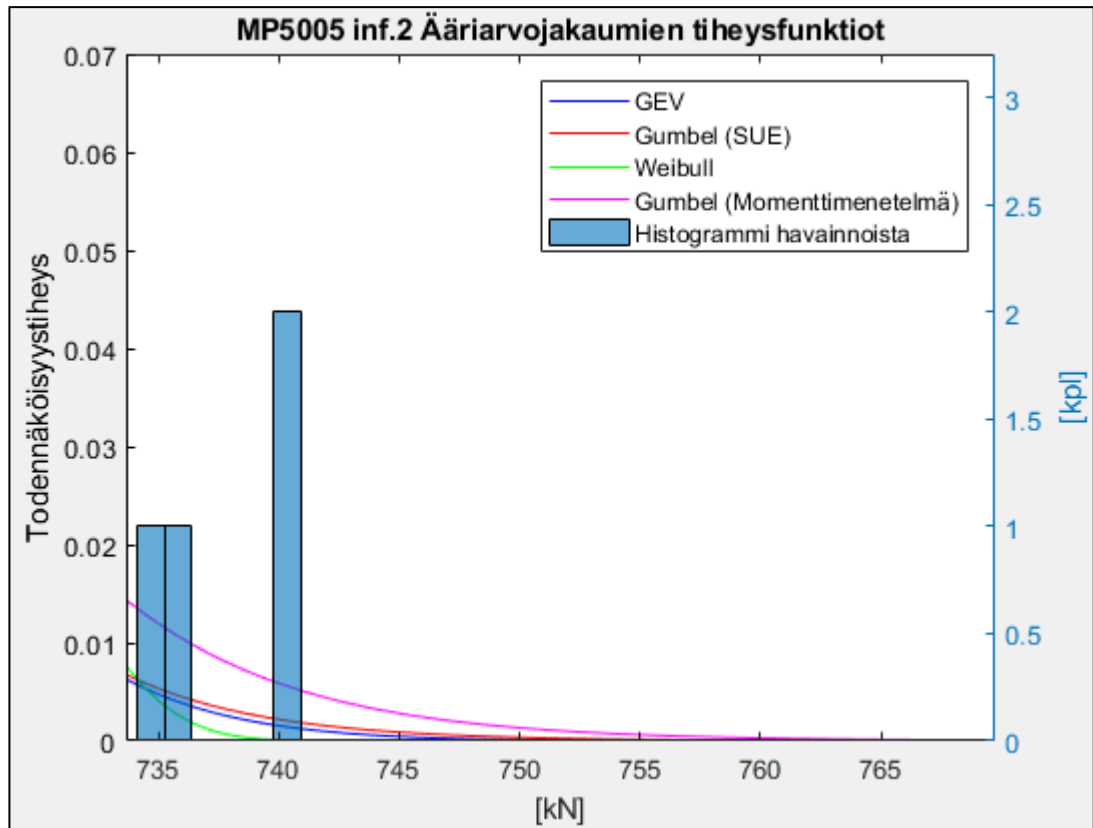
Kuva 7.29 Tiheysfunktioiden hännät suurennettuna

Taulukko 7.10 GEV-jakauman parametrit mittauspisteen 5005 influenssiviivan 2 datasta.

GEV-jakauman parametrit		
ξ	σ	μ
-0,07126	5,61661	715,956

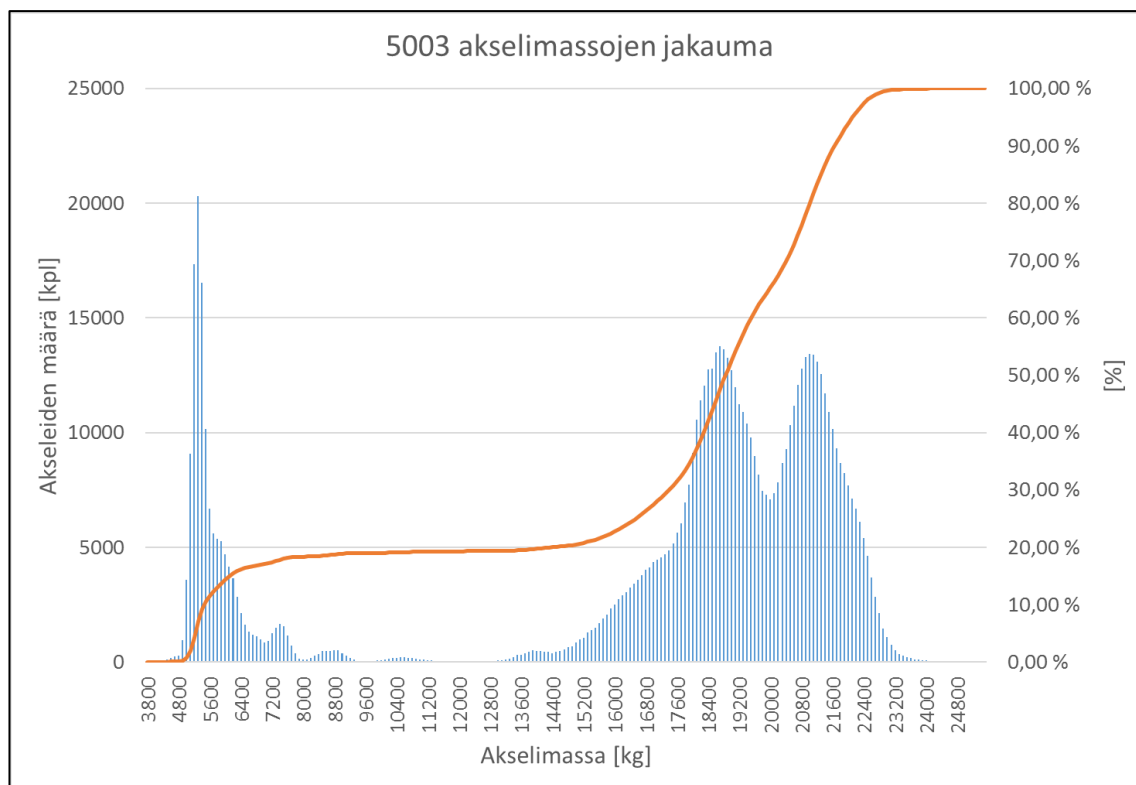


Kuva 7.26 Tarkasteltavien jakaumien tiheysfunktiot.



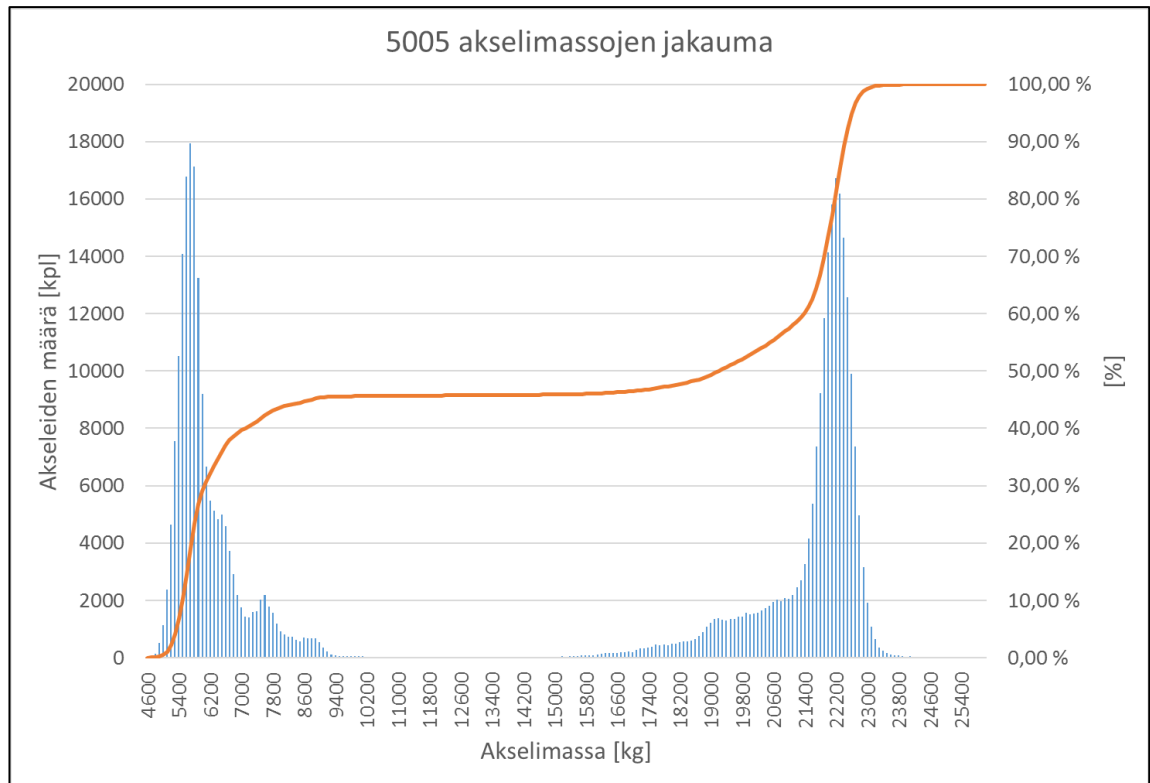
Kuva 7.27 Tiheysfunktioiden hännät suurennettuna.

Seuraavien sivujen kuvista 7.32 ja 7.33 huomataan, että akselimassajakaumat eroavat toisistaan siten, että mittauspisteellä 5003 vain 20 % vaunuista on tyhjiä tai lähes tyhjiä. Mittauspisteellä 5005 vastaavasti lähes puolet vaunuista on tyhjiä tai lähes tyhjiä.



Kuva 7.28 Mittauspisteen 5003 akselimassajakauma.

Kaikkein suurimmissa akselimassoissa ei kuitenkaan ole suurta eroa, joten kuukausittaisissa ääriarvoissa pitäisi kummankin mittauspisteen tapauksessa olla suunnilleen samansuureita akselien määriä. Mittauspisteillä esiintyviä vaunutyyppejä taulukosta 7.11 tutkimalla huomataan, että mittauspisteellä 5005 ei ole ollenkaan Vgobo-vaunuja, joista Vgobo1-tyyppin vaunulla on erittäin lyhyt ylitys, vain 1,035 m. Lisäksi telin akselien väli on vain 1,85 m, joten kyseisellä vaunutyyppillä mahtuu neljä akselia pituudelle $2 \cdot 1,035 \text{ m} + 2 \cdot 1,85 \text{ m} = 5,77 \text{ m}$. Mittauspisteen 5005 vaunutyypeistä tiiveimmän akseligeometrian omaa teräskelavaunut Shmmn-tw ja Shmms-tw, joiden ylitys on 1,25 m ja telin akselien väli 1,8 m. Kyseisillä vaunutyypeillä mahtuu neljä akselia näin ollen pituudelle $2 \cdot 1,25 \text{ m} + 2 \cdot 1,8 \text{ m} = 6,1 \text{ m}$ eli ne eivät aivan mahdu influenssiviivan matkalle. Ainoat vaunutyyppit, joissa neljä akselia mahtuu kuuden metrin matkalle ovat Vgobo1, Vgobo3 ja Vgobo4. Näitä vaunutyyppejä esiintyy mittauspisteillä 5001, 5002, 5003, 5007 ja 5012. Tästä syystä kyseisillä mittauspisteillä useat tulokset varsinkin lyhyemmillä influenssiviivoilla ovat hieman muita suuremmat, kuten taulukoista 7.3-7.4 huomataan. Mittauspiste 5012 on ainoa mittauspiste, jossa esiintyy Vgobo3 ja Vgobo4 vaunuja. Kyseiset vaunut ovat 8-akselisia ja niiden akseligeometria on selvästi kaikista tiivein ja ne aiheuttavat myös selvästi suurimman metripainon. Tästä syystä erittäin moni tulos on suurin mittauspisteellä 5012.

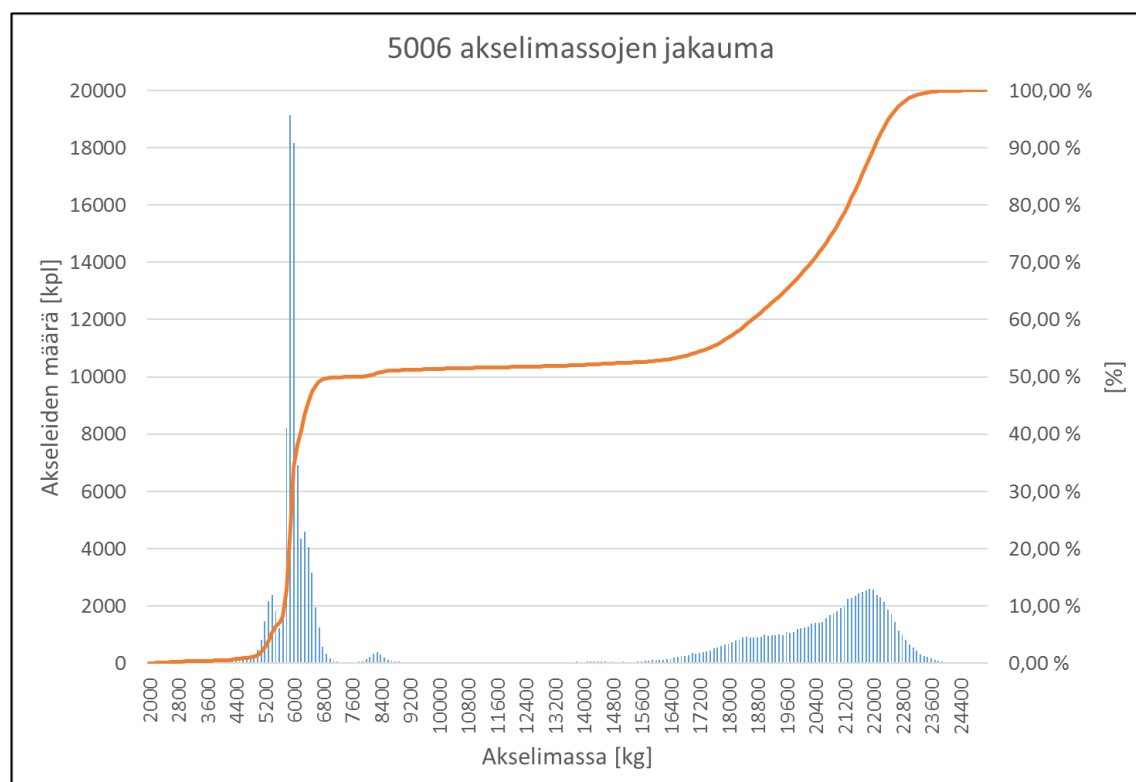


Kuva 7.29 Mittauspisteen 5005 akselimassajakauma.

Taulukko 7.11 Mittauspisteillä 5003 ja 5005 esiintyvät vaunutyytit.

5003		5005	
FAKKS	0,94 %	GBLN	1,89 %
GBLN	4,26 %	GBLS	4,61 %
GBLS	4,96 %	KBP	1,44 %
HAI	7,05 %	OME	0,63 %
HAIN	0,93 %	SGMMNS-W	2,66 %
HAI-T	3,92 %	SHMMNS-TW	7,30 %
HBI	2,90 %	SHMMN-TW	2,09 %
HBIN	0,96 %	SNPS	0,92 %
OCC	0,79 %	SNPSS	0,64 %
SIM	1,85 %	SONK	1,05 %
SIMN-T	1,10 %	SP	2,34 %
SP	6,62 %	SPS	2,30 %
SPS	6,34 %	TAD	1,03 %
VGOBO1	11,45 %	TAIMN	0,98 %
VGOBO2	11,45 %	TAMN-TW	3,08 %
VO	4,68 %	UAN-T	1,60 %
VOF	4,68 %	VOK	57,19 %
VOK	4,27 %	ZA	0,91 %
VTAD	20,85 %	ZAENS-W	1,33 %
		ZANS	1,68 %
		ZAN-V	4,33 %

Tarkastellaan vielä mittauspisteen 5006 akselimassajakaumaa, koska kyseisen mittauspiste sijaitsee radalla, jossa sallittu akselipaino on 22,5 tonnia, mutta silti kyseisellä mittauspisteellä monella influenssiviivalla tulee suurempi tulos kuin muissa mittauspisteissä. Edellisessä kappaleessa huomattiin, että ainakin yhden tuloksen tapauksessa hajonta oli erittäin suurta kyseisen mittauspisteen ääriarvoissa. Hajonta näyttää olevan suurta myös täysien tai lähes täysien vaunujen akselimassoissa, kuten kuvasta 7.34 nähdään. Mittauspisteellä ei esiinny erityisen suuria akselimassoja, mutta akselimassat ovat jakaantuneet melko tasaisesti, eikä selvää piikkiä ole havaittavissa, kuten esimerkiksi mittauspisteellä 5005. Toinen erikoisuus on se, että mittauspisteellä 5006 esiintyy simulaatiossa vain seitsemän eri vaunutyyppeä, jotka ovat Kbp, Laaiis, Occ, Snps, Snpss, Sp ja Sps. Liitteen 1 vaunugeometrioista voidaan huomata, että kyseisissä vaunuissa akselit sijaitsevat melko kaukana toisistaan ja toisaalta esimerkiksi Laaiis-vaunussa on täysin erilainen geometria kuin muissa, koska siinä vaunun keskellä on kaksi akselia lähellä toisiaan ja reunoissa on yksittäiset akselit. Ilmeisesti akselimassojen hajonta yhdessä erilaisten vaunujen kanssa saa myös kuormavaikutusten hajonnan suureksi tietyillä influenssiviivan pituuksilla. Kaikista pisimmillä influenssiviivoilla kyseisen mittauspisteen kuormavaikutukset ovat taas pienimmät. Tämä johtunee siitä, että hajonta ei enää riitä kasvattamaan tulosta suuremmaksi kuin muilla mittauspisteillä, joissa on yleensä sellaisia vaunutyyppejä, joissa akselit ovat lähempänä toisiaan, jolloin metripaino on suurempi.

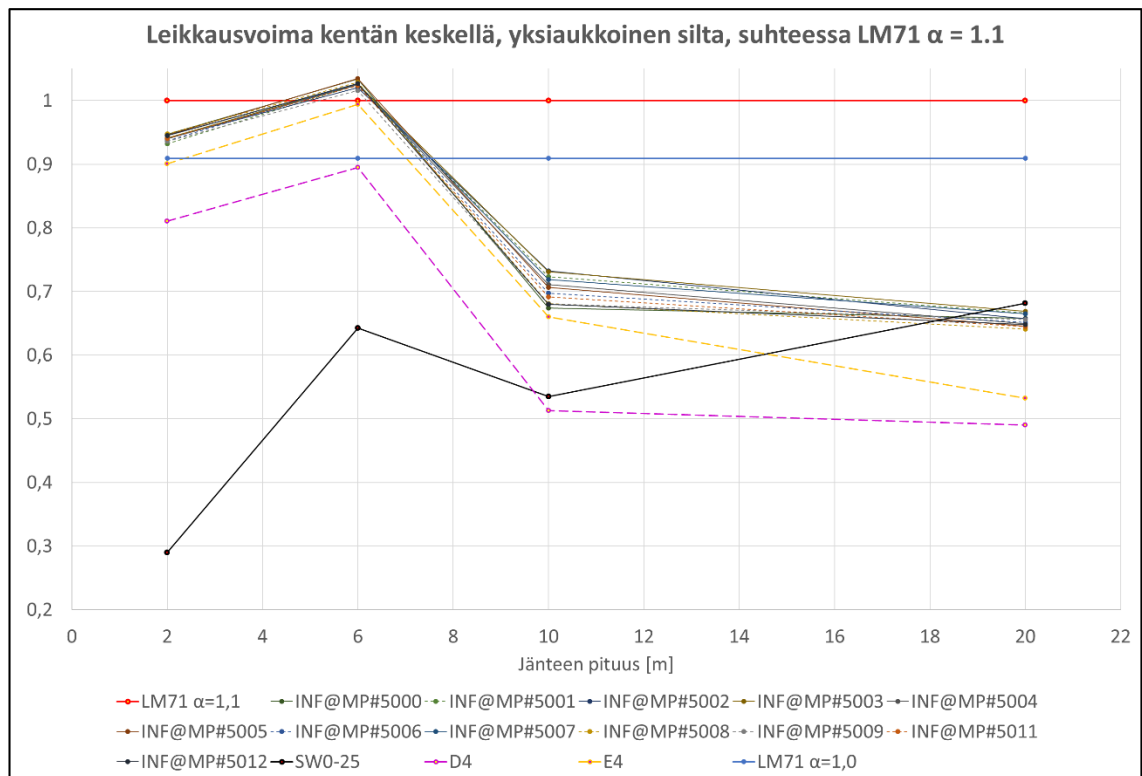


Kuva 7.30 Mittauspisteen 5006 akselimassajakauma.

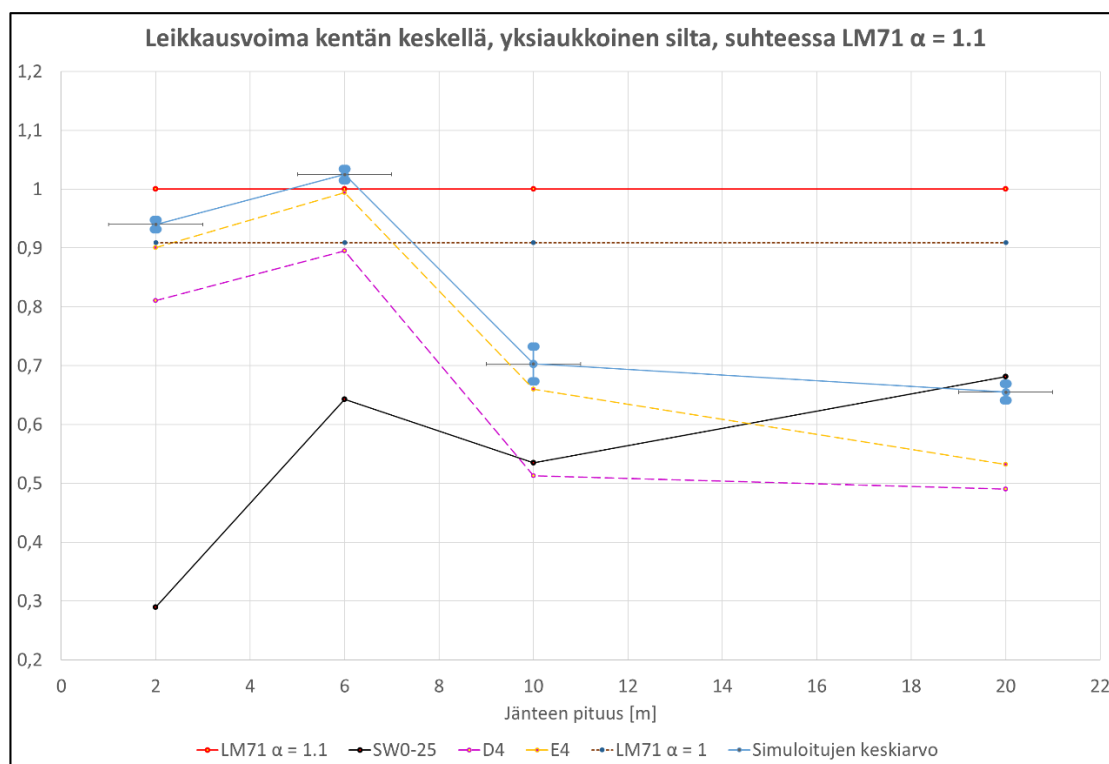
Edellä tehtyjä päätelmiä eri vaunutyypin vaikutuksista kuormavaikutuksiin voitaisiin tutkia myös simulaatiotyökaluun tehtävällä toiminnolla, joka tallentaisi suurimman kuormavaikutuksen aiheuttavan junan sisältämät vaunut. Tällaista toimintoa ei tämän työn puitteissa ehditty kuitenkaan tekemään, joten simulaation perusteella merkittävimmät vaunutyypit ovat siltä osin pimennossa. Lähtötietojen perusteella toki saadaan osviittaa merkittävimmistä vaunuista sallitun akselimassan ja geometrian perusteella, kuten edellä todettiin. Sallitun akselimassan ja geometrian lisäksi yksi kiinnostava asia on se, mitkä vaunutyypit sisältävät ylikuormattuja akseleita milläkin mittauspisteellä. Tällä tiedolla voidaan päätellä ainakin lyhyempien influenssien välisiä eroja. Raskaammilla 25 tonnin radoilla yleisimpiä ylikuormattuja vaunuja ovat teräskelavaunut Shmmn-tw ja Shmms-tw. Näitä esiintyy erityisesti mittauspisteillä 5004 ja 5007, mutta myös mittauspisteellä 5005. Mittauspisteillä 5004 ja 5007 esiintyvät ylikuormatut vaunut eivät kuitenkaan näytä kasvattavan lyhyidenkin influenssien kuormavaikutuksia suuremmiksi, vaan jälleen voidaan todeta, että jakauman hajonnalla on suurempi merkitys. Venäläisistä vaunuista Vok-tyypin vaunuilla on eniten ylikuormauksia 25 tonnin radoilla. Kevyemmillä 22,5 tonnin radoilla yleisimpiä ylikuormattuja vaunuja ovat venäläiset vaunut sekä raakapuuvaunut Snps ja Snps. Lukumääräisesti eniten ylikuormattuja vaunuja 22,5 tonnin radoilla on mittauspisteellä 5006, jossa moni kuormavaikutus oli poikkeuksellisen suuri 22,5 tonnin radalle. Tässäkin tapauksessa suurempi vaikutus on jakaumien hajonnalla, mutta ylikuormillakin on tietenkin jonkinlainen vaikutus.

7.4.4 Vertailu LM71-kuormakaavion antamiin kuormavaikutuksiin

Liitteessä 4 on esitetty taulukot, joissa näytetään mitkä tulokset ylittävät Eurokoodin kuormakaavioiden kuormavaikutukset. Taulukoista huomataan, että ylityksiä tulee lähinnä lyhyemmällä influenssiviivoilla, koska niissä yksittäiset ylikuormatut akselit vaikuttavat heti. Liitteen 4 taulukoissa on vertailtu erikseen 22,5 t ja 25 t ratoja niitä vastaaviin kuormakaavioihin eli 22,5 t ratoja on verrattu kuormakaavioihin luokittelukertoimella $\alpha = 1$ ja 25 t ratoja on verrattu kuormakaavioihin luokittelukertoimella $\alpha = 1,1$. Ylityksiä tulee myös enemmän 22,5 t radoilla, koska niillä on suhteessa enemmän sallitun akselimassan ylittäviä akseleita kuin 25 t radoilla. Kuvassa 7.35 on esitetty Gumbel-jakaumasta luetut 100 vuoden toistumisleikkausvoimat jokaiselta mittauspisteeltä erikseen. Lisäksi kuvassa on esitetty kuormakaavioiden ja luokittelukaavioiden antamat kuormavaikutukset. LM71 $\alpha = 1,1$ on asetettu suoraksi arvoon 1, johon muiden suhteellisia vaikutuksia verrataan. Kuvassa 7.36 on taas esitetty kaikkien mittauspisteiden kuormavaikutusten keskiarvo sekä suurin ja pienin arvo virhepalkkina, jolloin kuvaaja pysyy hieman selkeämpänä.

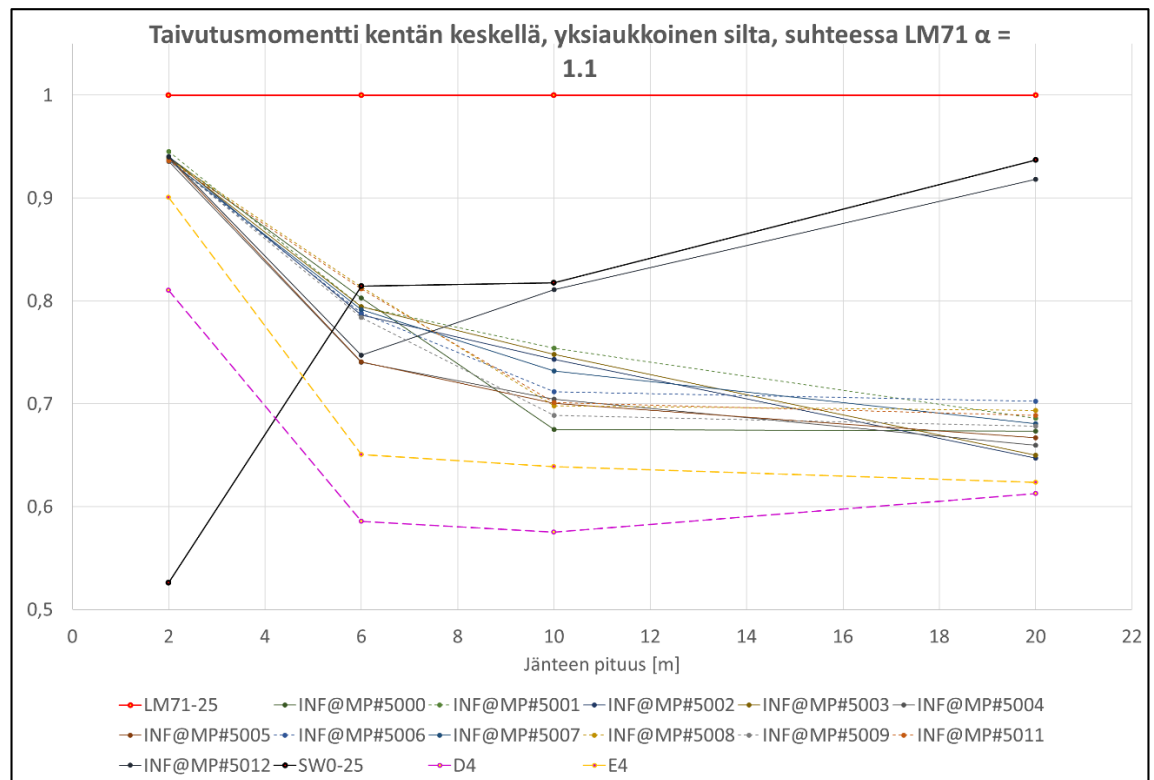


Kuva 7.35 Gumbel-jakaumasta saatujen 100 vuoden toistumisleikkausvoimien suhde kuormakaavioiden ja luokittelukaavioiden leikkausvoimiin yksijänteisen sillan kentässä.

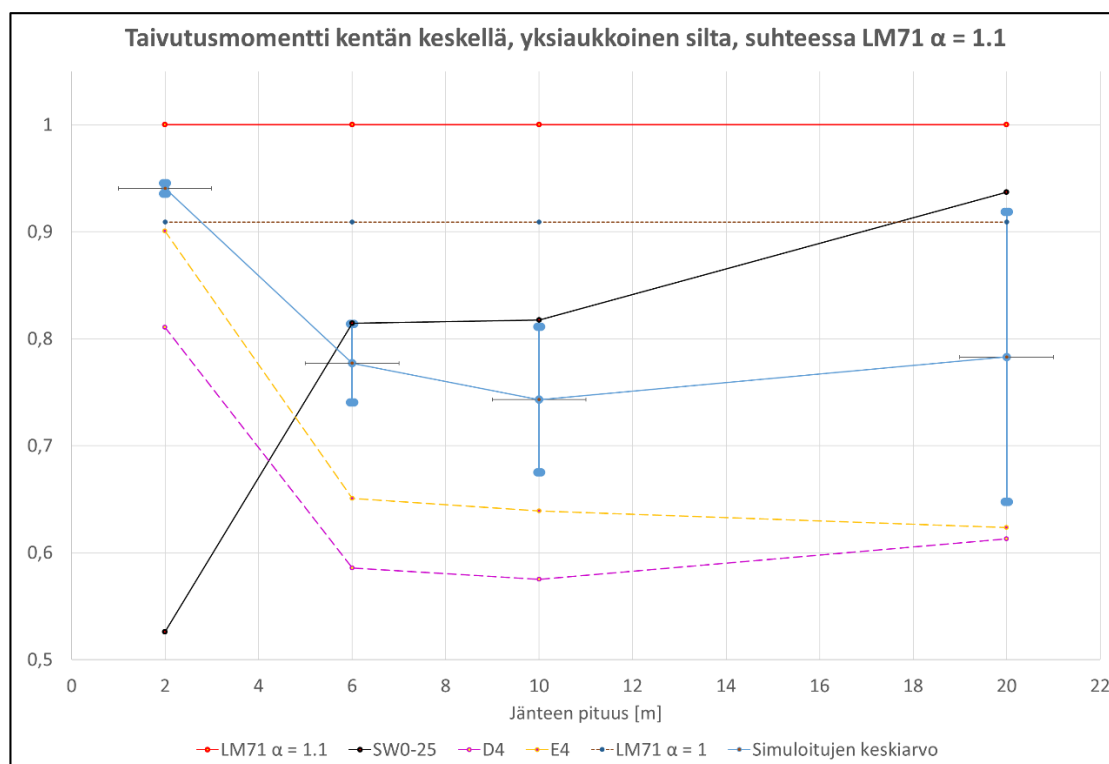


Kuva 7.36 Gumbel-jakaumista saatujen kaikkien mittauspisteiden 100 vuoden toistumisleikkausvoimien keskiarvo verrattuna kuormakaavioiden antamiin leikkausvoimiin. Virhepalkki näyttää mittauspistekohtaisen suurimman ja pienimmän 100 vuoden toistumisleikkausvoiman. Yksiaukkoisen sillan kenttämomentti.

Kuten kuvista 7.35 ja 7.36 huomataan, niin kuuden metrin influenssipituudella myös kaikilla 22,5 tonnin radoilla ylitetään kuormakaavioiden leikkausvoima myös luokittelukertoimella $\alpha = 1,1$. Leikkausvoiman arvoissa jänteen keskellä ei ole myöskään juuri hajontaa eri mittauspisteiden välillä, koska ne ovat suoraan verrannolliset vain muutamaankin akseliin lyhyillä influenssiviivoilla. Myöskään kaluston pienet geometriaerot eivät vaikuta juuri, sillä akseleilla, jotka juuri yltyvät vaikutusviivalle, ei ole juuri vaikutusta kentän keskelle. Kuormavaikutukset seurailevat hyvin myös luokittelukaavioiden kuormavaikutuksia, ollen kuitenkin 100-vuoden toistumiskuormavaikutuksina luonnollisesti selvästi suuremmat. Kuvien 7.35 ja 7.36 mukaan saa kuvan, että junakuorman vaikutus olisi hyvin samanlainen eri puolilla rataverkkoa, mutta näin ei ole muiden kuormavaikutusten osalta. Esimerkiksi taivutusmomentin kuormavaikutukset eroavat toisistaan jo huomattavasti enemmän lyhyilläkin influenssiviivoilla, kuten kuvista 7.37 ja 7.38 nähdään. Kuvassa 7.37 on jälleen esitetty kaikkien mittauspisteiden tulokset ja kuvassa 7.38 näiden keskiarvo sekä suurin ja pienin arvo virhepalkkina.



Kuva 7.37 Gumbel-jakaumasta saatujen 100 vuoden toistumistaivutusmomenttien suhde kuormakaavioiden ja luokittelukaavioiden taivutusmomenttiin yksijänteisen sillan kentässä

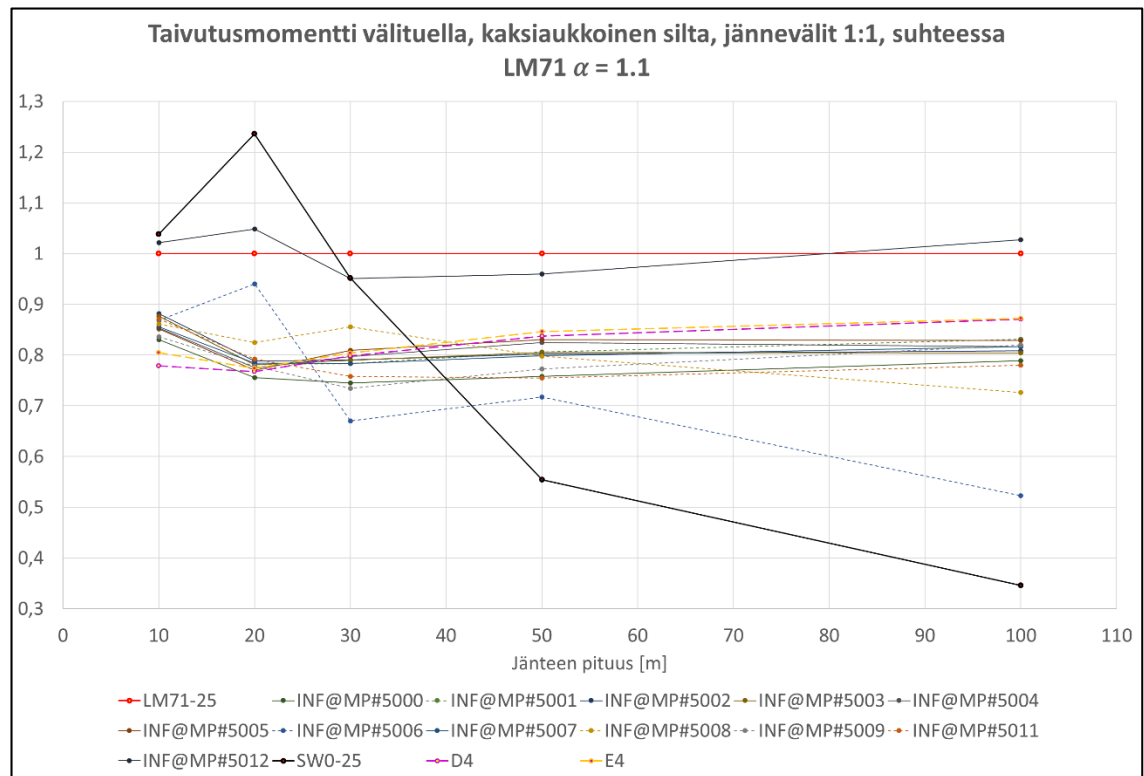


Kuva 7.38 Gumbel-jakaumista saatujen kaikkien mittauspisteiden 100 vuoden toistumistaivutusmomenttien keskiarvo verrattuna kuormakaavioiden antamiin taivutusmomentteihin. Virhepalkki näyttää mittauspistekohtaisen suurimman ja pienimmän 100 vuoden toistumistaivutusmomentin. Yksiaukkoisen sillan kenttämomentti.

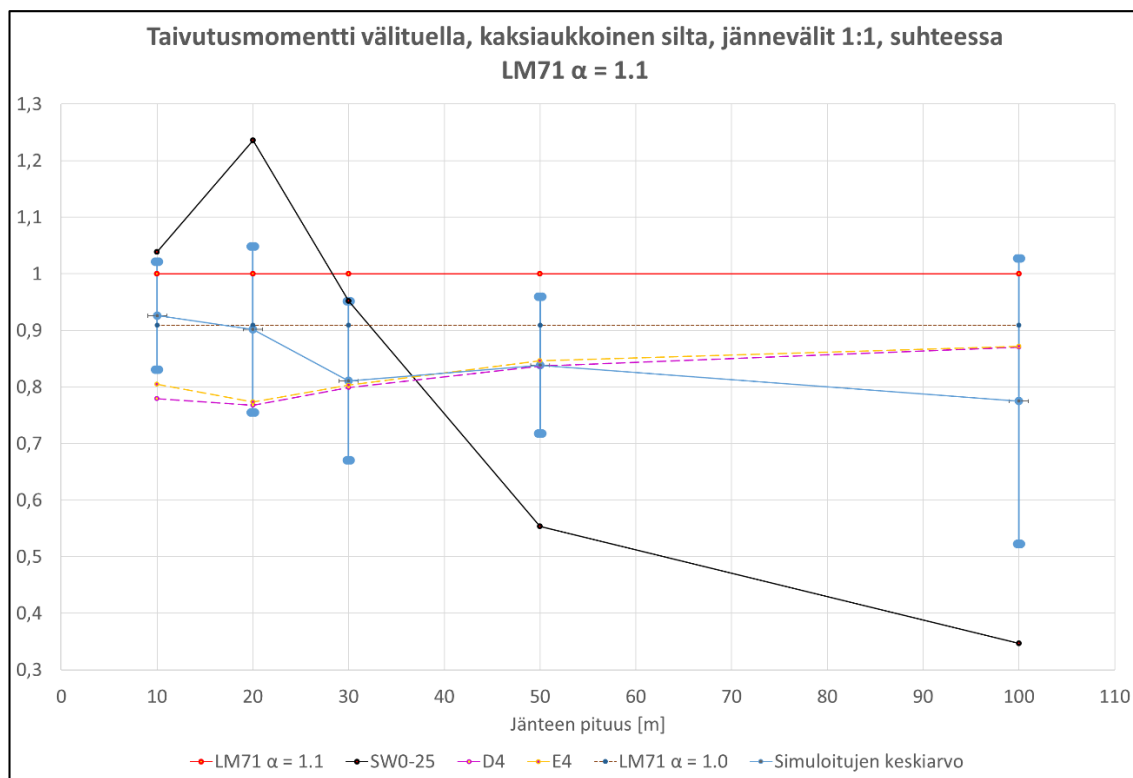
Kuvassa kuuden metrin jälkeen jyrkkään nousuun lähtevä käyrä on mittauspisteen 5012, jossa kyseisen vaikutuksen aiheuttavat 8-akseliset Vgobo-vaunut. Muuten taivutusmomenttienkin hajonta mittauspisteiden välillä on vielä melko pientä ja kaikki vaikutukset jäävät hyvin LM71-kuormakaavion alapuolelle, koska kaavion neljä pistekuormaa aiheuttavat näin lyhyillä influenssiviivoilla merkittävän osan taivutusmomentista ja kyseiset pistekuormat sijaitsevat vielä lähempänä toisiaan kuin 8-akselisessa Vgobo-vaunussa.

Tarkastellaan vielä tukimomenteja, joissa 100-vuoden toistumistukimomentti ylitti sekä LM71- että SW/0-kuormakaaviot 100 metrin influenssiviivalla, kun toistumistukimomentit otettiin Gumbel-jakaumasta. Kuvista 7.39 ja 7.40 nähdään, että mittauspisteen 5012 kuormavaikutukset ylittävät LM71-kaavion vaikutukset myös 10 ja 20 metrin influenssiviivoilla, mutta näissä tapauksissa SW/0-kaavio paikkaa tilanteen. Hieman erikoista on se, että mittauspisteen 5012 kuormavaikutus käy välillä LM71-kuormavaikutuksen alapuolella ja kasvaa jälleen 100 metrin vaikutusviivalla suuremmaksi. LM71-kaaviossa vaikuttaa pistekuormien lisäksi jatkuva nauhakuorma, jonka vaikutus pitkillä influenssiviivoilla on merkitsevä ja sen suuruus on yhtä suuri, olipa influenssiviiva kuinka pitkä tahansa. Oikeassa liikennekuormassa, myös raideliikenteen tapauksessa on todennäköistä, että liikennekuorman metripaino pienenee, kun junan pituus kasvaa. Tässä näyttäisi käyvän toisinpäin, tosin valtavasta erosta ei ole kyse. Sadan metrin influenssiviivalla

myös ääriarvojen hajonta on varmasti suurempaa, mikä voi ajaa Gumbel-jakauman hänen huomattavasti paksummaksi kuin lyhyemmällä influenssiviivoilla.

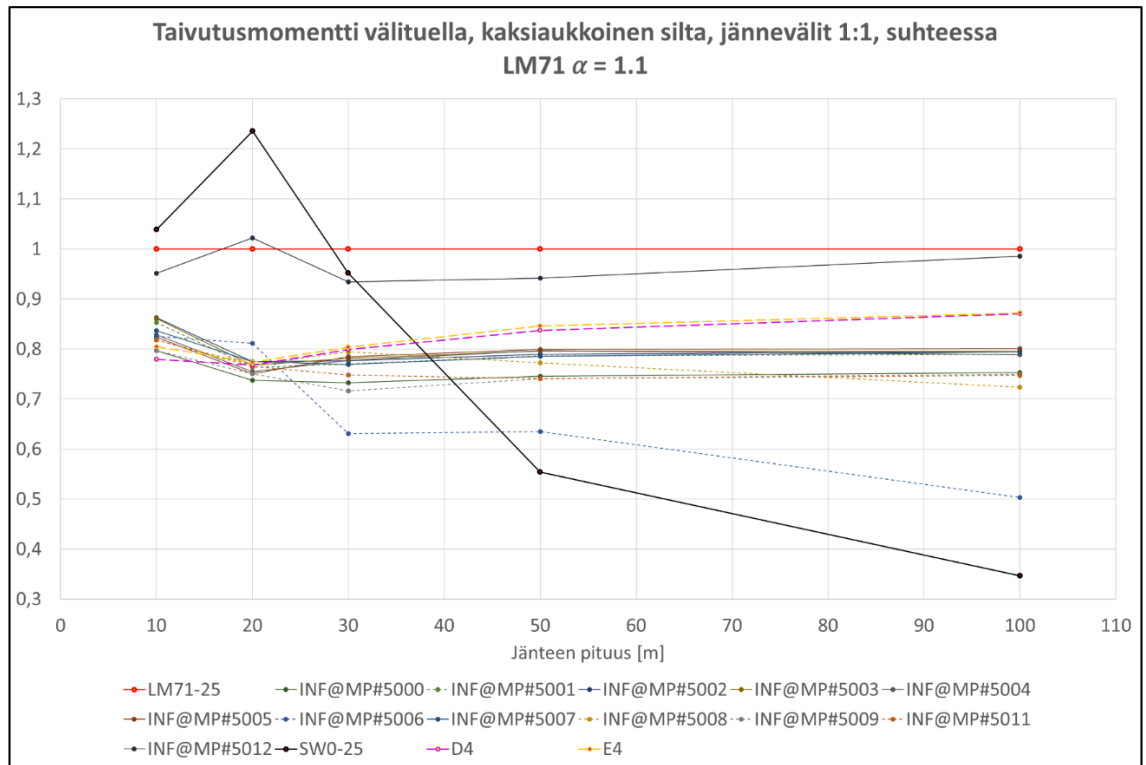


Kuva 7.39 Gumbel-jakaumasta saatujen 100 vuoden toistumistaivutusmomenttien suhde kuormakaavioiden ja luokittelukaavioiden taivutusmomenttiin kaksiaukkoisen sil- lan välituella.

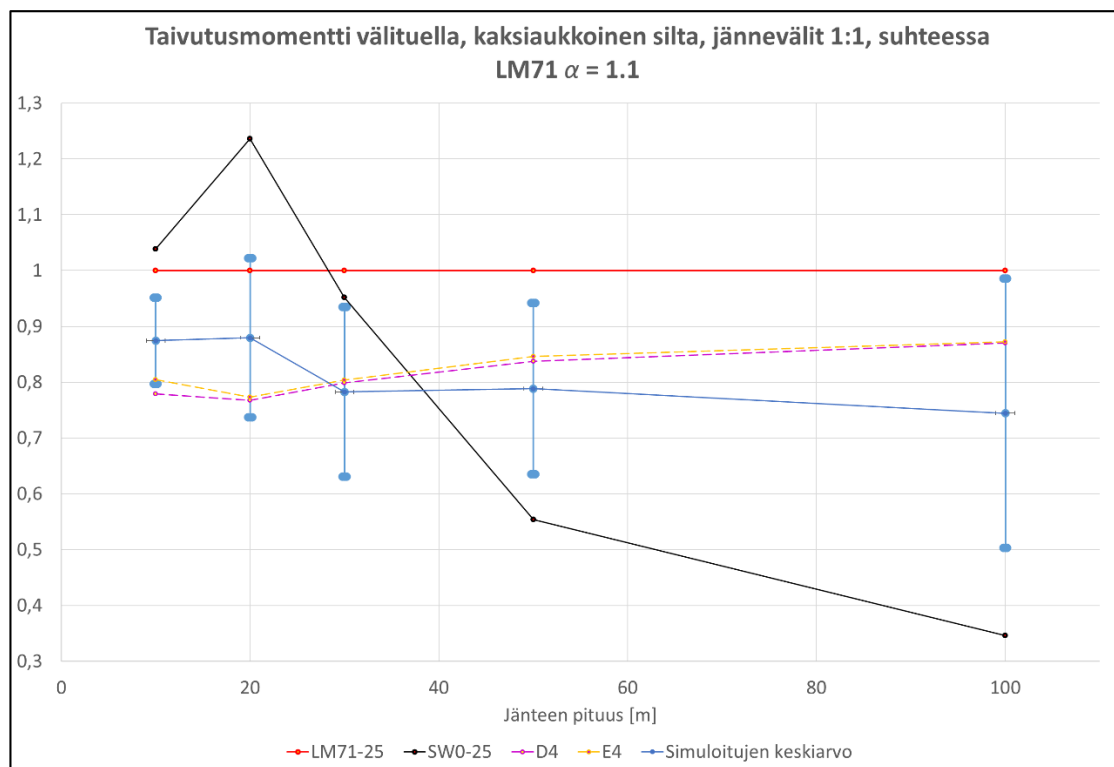


Kuva 7.40 Gumbel-jakaumasta saatujen kaikkien mittauspisteiden 100 vuoden toistumistaivutusmomenttien keskiarvo verrattuna kuormakaavioiden antamiin taivutusmomentteihin. Virhepalkki näyttää mittauspistekohtaisen suurimman ja pienimmän 100 vuoden toistumisleikkausvoiman. Kaksiaukkoisen sillan välituen taivutusmomentti.

Myös joillakin muilla mittauspisteillä kuormavaikutus hieman nousee verrattuna kuormakaavioon, kun influenssipituus kasvaa, mutta suurimmalla osalla se pysyy suhteessa täysin samana ja yhdellä laskee voimakkaastikin. Voimakas lasku tapahtuu mittauspisteellä 5006, jossa huomattiin jo edellisessä kappaleessa, että kuormattujen vaunujen akselipainojen hajonta on suurta, joten simulaatio ei todennäköisesti generoi sinne kaikkein painavimpia vaunuja yhtä montaa peräkkäin kuin muilla mittauspisteillä. Lyhyemmällä 20 m influenssiviivalla kyseisellä mittauspisteellä taas on verrattain suuri tukimomentti, joka voi johtua Laaiis-vaunuista, joiden geometria on erilainen kuin muissa vaunuissa, kuten liitteestä 1 nähdään. Ne ovat hyvin pitkiä vaunuja, joissa kaksi akselia sijaitsee melko keskellä vaunua, reilun neljän metrin päässä toisistaan ja kaksi muuta akselia reilun kymmenen metrin päässä keskipisteestä, joten ne aiheuttavat juuri 20 m influenssiviivalla suuren tukimomentin. Niissä ei myöskään ole yhtä pitkä ylitys kuin toisessa pitkässä vaunussa eli Habbin-vaunussa, joten seuraavakin vaunu aiheuttaa jonkin verran tukimomenttia. Toisaalta suurempi arvo voi johtua myös suuresta hajonnasta ääriarvojen välillä, joka lienee todennäköisempää. Suuren hajonnan tuloksiin voi kuitenkin aiheuttaa se, että kyseisellä mittauspisteellä esiintyy vähän vaunutyyppäjä, joiden joukossa erikoinen Laaiis. Kuvissa 7.41 ja 7.42 on verrattu samojen influenssiviivojen tuloksia Weibull-jakaumasta. Mittauspiste 5006 erottuu edelleen suurempana 20 metrin influenssiviivalla, mutta ei niin selkeästi muihin verrattuna kuin Gumbel-jakaumalla.

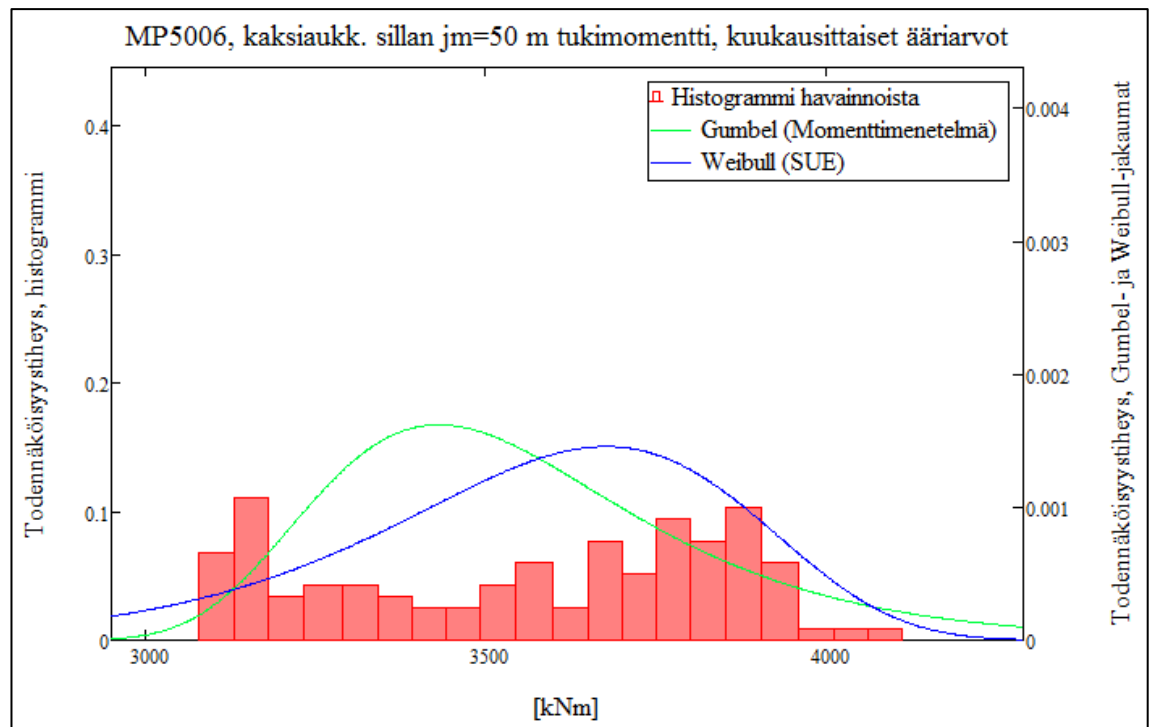


Kuva 7.31 Weibull-jakaumasta saatujen 100 vuoden toistumistaivutusmomenttien suhde kuormakaavioiden ja luokittelukaavioiden taivutusmomenttiin kaksiaukkoisen sil-
lan välituella.



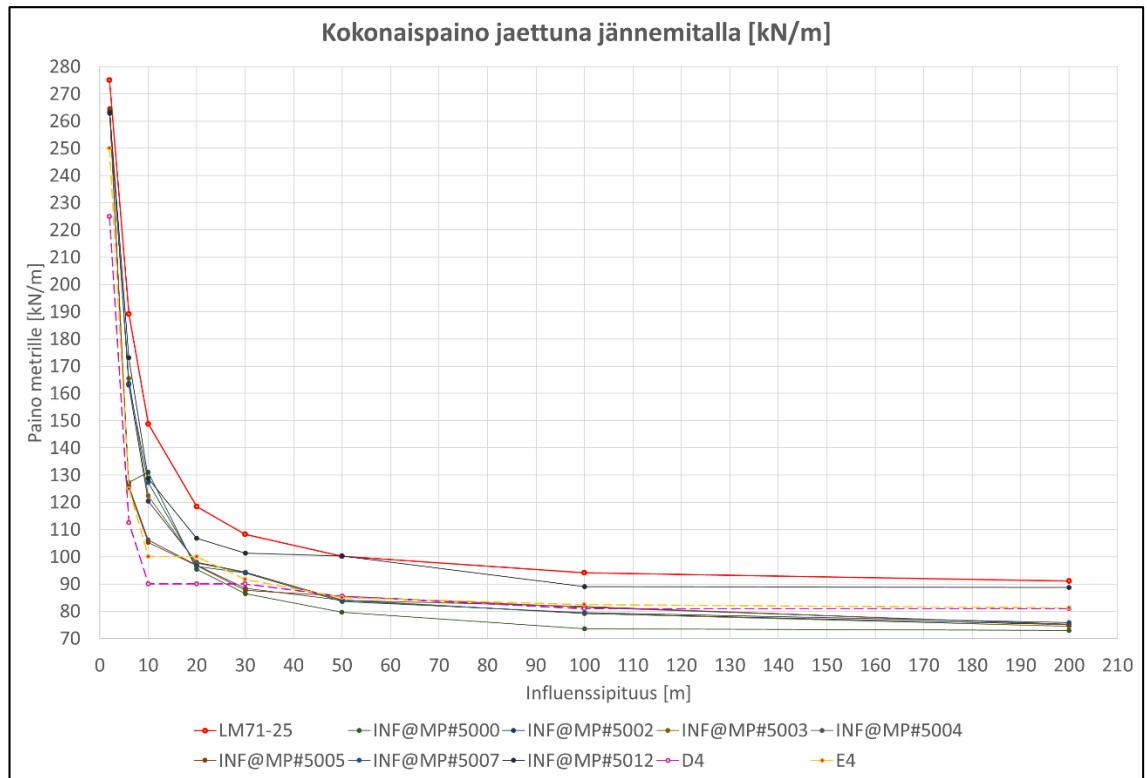
Kuva 7.32 Weibull-jakaumasta saatujen kaikkien mittauspisteiden 100 vuoden toistumistaivutusmomenttien keskiarvo verrattuna kuormakaavioiden antamiin taivutusmomentteihin. Virhepalkki näyttää mittauspistekohtaisen suurimman ja pienimmän 100 vuoden toistumisleikkausvoiman. Kaksiaukkoisen sillan välituen taivutusmomentti.

Kuvassa 7.43 on vielä kyseisen influenssiviivan kuukausittaiset ääriarvot ja niihin sovitettut Gumbel- ja Weibull-jakaumat, josta nähdään ääriarvojakauman hajonnan olevan erittäin suurta. Suurin havainto kyseisellä mittauspisteellä on 4110 kNm ja esimerkiksi mittauspisteellä 5002 suurin havainto on 4170 kNm ja mittauspisteellä 5007 vastaavasti 4210 kNm, vaikka 100 vuoden toistumiskuormavaikutus jää kummallakin alemmas kuin mittauspisteellä 5006. Tästä huomataan jälleen kuinka paljon hajonta vaikuttaa tuloksiin. Liitteessä 4 on esitetty vielä kaikkien influenssiviivojen tulokset viivakaavioina. Niissä ei esitetä kuitenkaan jokaisen mittauspisteen kuormavaikutusta erikseen, vaan ainoastaan 22,5 t ja 25 t ratojen pienimmät ja suurimmat vaikutukset, jolloin kuvaajat pysyvät hie-man selvempinä.



Kuva 7.33 Mittauspisteen 5006 influenssin 38 kuukausittaisten ääriarvojen histogrammit sekä sovitetut Gumbel- ja Weibull-jakaumat.

Verrataan lopuksi vielä metrikuorman suhdetta influenssipituuteen. Kuvasta 7.44 huomataan, että simuloimalla saadut metrikuormat jäävät juuri LM71-kaavion metrikuorman alapuolelle ja käyrien muodot noudattelevat pääsääntöisesti toisiaan.



Kuva 7.34 Metripainon muutos influenssipituuden kasvaessa. Verrattu 25 tonnin rajojen simulaatiotuloksia kuormakaavioon LM71 $\alpha=1.1$ sekä luokittelukaavioihin D4 ja E4.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Yhteenveto ja päätelmät

Tässä diplomityössä tutkittiin Suomessa vaikuttavan todellisen raideliikenteen staattista kuormavaikutusta siltoihin. Käytännössä tutkittiin vain tavaraliikenteen vaikutusta, koska henkilöliikenteen kalusto ei tuota määrääviä kuormavaikutuksia staattisen kuorman tapauksessa. Kuormavaikutukset luotiin Monte Carlo-simulaatiolla, jonka lähtötietona käytettiin yhden vuoden aikana kerättyä dataa ja juna simuloitiin kymmenen vuoden liikennemäärää vastaava määrä. Simulaatiolla generoitiin mittauspistekohtaiseen dataan perustuvia kokonaisia juna, joista jokaisen junan aiheuttamat kuormavaikutusten ääriarvot tallennettiin. Yksitáisten junien aiheuttamia ääriarvoja käsiteltiin jälkikäteen tekemällä eri mittaisten ajanjaksojen ääriarvojakaumia, joihin sovitettiin teoreettisia ääriarvojakaumia. Täydelliset tulostaulukot tuotettiin kuukausittaisten ääriarvojakaumien perusteella, joihin sovitettiin sekä Gumbel-, että Weibull-jakaumat. Teoreettisista jakaumista luettiin 100 vuoden toistumiskuormavaikutusten arvot, joita verrattiin samaan toistumisjaksoon perustuvan suunnittelukuormakaavion LM71 kuormavaikutuksiin.

Kuormavaikutuksia vertailtiin kullakin mittauspisteellä sen sallittua akselipainoa vastaavalla luokittelukertoimella α kerrottuun kuormakaavioon. Simulaatioiden pohjalta luodut teoreettiset kuormavaikutukset jäivät pääsääntöisesti kuormakaavioiden vaikutusten alapuolelle, mutta poikkeuksiakin oli. Varsinkin lyhyemmillä influenssiviivoilla ylityksiä tapahtui jonkin verran, mutta ylitykset eivät olleet kuitenkaan rajuja. Raskaammilla 25 tonnin akselipainot sallivilla radoilla suurimmat ylitykset vastaavaan kuormakaavioon verrattuna olivat luokkaa 5 % ja kevyemmilla 22,5 tonnin akselipainot sallivilla radoilla vastaavasti luokkaa 15 %. 22,5 tonnin ratojen suurempia ylityksiä selittää se, että niillä kulkee luvanvaraisia yli 22,5 tonnin akselipainoilla varustettuja juna, joten tulos on looginen.

Yksi keskeisimmistä kysymyksistä tutkimuksen alussa oli, että kuinka hyvin kuormakaavioiden sallittuun akselipainoon liitetty luokittelukerroin toimii Suomen raideliikenteen kuormavaikutuksille. Kuten juuri todettiin, olivat kuormavaikutukset tutkituilla influenssiviivoilla enimmillään vain 5 % yli kuormakaavioiden LM71 ja SW/0, kun luokittelukertoimena oli $\alpha = 1,1$. Tämä tarkoittaa sitä, että tutkitut kuormavaikutukset jäisivät kaikki alle kuormakaavion vaikutusten, mikäli luokittelukerroin olisi $\alpha = 1,155$. Valmiista luokittelukertoimista lähinnä tätä olisi $\alpha = 1,21$. Tämä vastaa kaavion mukaan 27,5 tonnin sallittua akselipainoa. Tämän työn tuloksiin verrattuna kyseinen kaavio antaisi vähintään lähes 5 % suuremmat kuormavaikutukset. Ero ei ole valtava, eikä kyseistä luokittelukerointa voi tämän työn pohjalta suositella, koska influenssiviivojen kohtalai-

sen suuresta määrästä huolimatta katveitakin jää. Seuraavaa arvoa $\alpha = 1,33$ voidaan puhtaasti kuormavaikutusten näkökulmasta jo harkita, koska kyseisellä luokittelukertoimella kuormavaikutukset olisivat jo yli 15 % suuremmat kuin tässä työssä saadut tulokset. Kyseisellä luokittelukertoimella kerrottu kaavio vastaisi 30 tonnin sallittua akselipainoa, kun nykyisin käytössä oleva luokittelukerroin vastaa 35 tonnin sallittua akselipainoa.

Työssä ei otettu tarkemmin kantaa kuormakaavioiden muotoon, mutta tämän työn tulosten perusteella näyttäisi, että myös kaavioiden muoto toimii ainakin melko tarkoituksenmukaisesti ja simuloitujen vaikutukset kulkevat pääsääntöisesti samaa rataa kuin kuormakaavioiden vaikutukset. Myös kuormakaavion SW/0 tarpeellisuus ja toimivuus huomattiin.

8.2 Jatkotutkimustarpeet

Raideliikenteen staattisten kuormavaikutuksen selvittäminen on perustana muiden kuormavaikutusten tutkimiselle. Tämän diplomityön puitteissa tehdyt stokastiset tarkastelut ovat antaneet jo hyvin kuvaa Suomessa vaikuttavasta todellisesta staattisesta kuormavaikutuksesta, mutta tulosta tarkentavia toimenpiteitä on vielä tehtävä, jotta tuloksille ja menetelmille saadaan lisää reliabiliteettia. Toimenpiteillä tarkoitetaan lähinnä vaihtoehtoisia menetelmiä simuloinnissa sekä simulaatiomallin tarkennusta ja toimenpiteiden vaikutusten vertailua nyt tehtyyn simulaatioon. Simulaation lähtötietona käytetystä datasta voitaisiin esimerkiksi painottaa edelleen vain tavarajunaliikenteen raskainta kalustoa, jolloin kuormavaikutusten keskiarvo kasvaa, mutta hajonta pienenee.

Yksi tarkempaa tarkastelua vaativa asia on sallittuja suurempien akselikuormien sijainnit. Näiden sallittua suurempia kuormia sisältävien akselien sijainnin jakautuminen junassa on tärkeää selvittää, jotta nähdään kuinka suuren vaikutuksen ylikuormat todellisuudessa antavat. Mikäli ylikuormat sijaitsevat usein lähellä toisiaan sen sijaan, että olisivat jakaantuneet tasaisesti junan matkalla, voi kuormavaikutus olla merkittävästi suurempi sillan globaaleissa kuormavaikutuksissa. Mikäli ylikuormat sijaitsevat hajanaisesti siellä täällä, vaikuttavat ne lähinnä lokaalisti ja nämä vaikutukset näkyvät jo jollain tavalla nykyisessä simulaatiossa. Ylikuormien tutkimiseksi on tätä kirjoitettaessa aloitettu jo tutkimusprojekti Tampereen yliopistolla, Kansainvälisen rautatiejärjestön UIC:n tilaamana.

Staattista kuormavaikutusta on tutkittava lisäksi moniraiteisten siltojen kannalta. Kuormavaikutukseksi tulee taivutusmomentin ja leikkausvoiman lisäksi vääntömomentti, joka on helposti johdettavissa leikkausvoiman influensseista. Vaativin työ on kuitenkin selvittää itse kuorma eri raiteilla. Eurokoodi vaatii LM 71 tai SW/0 kuormakaavion vaikutusta täytenä, kun kuorma on yhdellä tai kahdella raiteella ja 0,75 kertaisena, kun kuorma on kolmella tai useammalla raiteella [69]. Todellista liikennettä voidaan simuloida tarkemmin myös juuri tämän probleeman näkökulmasta ja saada vertailuarvoja suhteessa eurokoodin kertoimiin. Tämän asian selvittäminen on erityisen kiinnostavaa useampi kuin kaksiraiteisilla silloilla, joita sijaitsee lähinnä vilkkaiden ratapihojen läheisyydessä.

Staattisten kuormavaikutusten lisäksi näillä samankaltaisilla menetelmillä tulisi selvittää Suomessa käytettävän raideliikenteen kaluston sekä itse radan ideaalin kunnon poikkeavuuksista aiheutuvat todelliset parametrit osaksi dynaamisia suurennuskertoimia. Kaluston epätäydellisyyksien osalta tämä onnistuu suhteellisen helposti, koska pyörävoimailmaisimet kykenevät erottamaan pyörän aiheuttamat dynaamiset piikkiarvot. Radan vaikutuksia taas tulisi mitata toiseen suuntaan eli mittalaitteiden tulisi sijaita kalustossa. Kaluston epätäydellisyyksien aiheuttamat piikkiarvot vaikuttavat varsin vähän globaaleihin kuormavaikutuksiin, koska puhutaan kiskon pintaan vaikuttavasta erittäin lyhytkestoisesta iskusta, jota radan tukikerros vaimentaa hyvin paljon. Lyhyillä silloilla ja tukien läheisyydessä näilläkin iskuilla lienee kuitenkin merkitystä itse sillan kuormavaikutuksiin. Vaikutuksien suhdetta muihin dynaamisiin vaikutuksiin tulisi verrata ja samalla saataisiin tietoa siitä, kuinka hyvin eurokoodin dynaamiset suurennuskertoimet Φ_2 ja Φ_3 , jotka vastaavat huolellisesti kunnossapidetyn raiteen ja tavanomaisesti kunnossapidetyn raiteen tapausta, huomioivat näitä piikkiarvoja. Dynaamisten kuormien selvitys näiden piikkiarvojenkin osalta olisi erittäin mielenkiintoista juuri siitä syystä, että niihin vaikuttaa paljon kaluston ja radan kunto, joka vaihtelee oletettavasti huomattavan paljon Euroopan sisällä johtuen eri maiden taloudellisista statuksista sekä maantieteellisistä sijainneista. Vauraammissa maissa radat ja kalusto ovat oletettavasti paremmassa kunnossa, maantieteellinen sijainti taas vaikuttaa esimerkiksi roudan vaikutuksiin, joka toki vaikuttaa lähinnä penkereissä eikä niinkään silloissa.

Edellä esitettyjen asioiden pohjalta on edelleen hyvä miettiä mille tasolle suunnittelu-kuormat halutaan asettaa Suomessa. Tähän tarkasteluun tulisi ottaa mukaan myös erilaisia skenaarioita rautatieliikenteen yleisen tulevaisuuden suhteen Suomessa ja tehdä päätökset peilaten nykyiseen tilanteeseen ja tulevaisuuteen. Nykyistä 100 vuoden toistumiskuormavaikutusta ei siis kannata ottaa ainoaksi perusteeksi suunnittelukuormalle, vaan asiaa tulee tarkastella huomattavasti laajemmin rakennus- ja ylläpitokustannusten sekä rataverkon kilpailukyvyinkin kannalta.

LÄHTEET

- [1] Luotettavuusanalyysin perusteita siltojen kantavuuden arvioinnissa, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2014, Liikennevirasto, Helsinki, 2014, 110 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2014-20_luotettavuusanalyysin_perusteita_web.pdf
- [2] SFS-EN 1991-1-4, Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2011, 254 s.
- [3] Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet NCCI1, Liikenneviraston ohjeita 24/2017, Liikennevirasto, Helsinki, 2017, 75 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-24_ncci1_web.pdf
- [4] Rautatietilasto 2016, Liikenneviraston tilastoja 9/2017, Liikennevirasto, Helsinki, 2017, 52 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lti_2017-09_rautatietilasto_2016_web.pdf
- [5] Logistiikan maailma. Saatavissa: <http://www.logistiikanmaailma.fi/kuljetus/rautatiekuljetus/rataverkko/> (Viitattu 15.11.2018)
- [6] Rail Baltica. Saatavissa: <http://www.railbaltica.org/about-rail-baltica/technical-params/> (Viitattu 5.1.2019)
- [7] Rautateiden henkilöliikenteen kehitys Baltian maissa, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 35/2010, Liikennevirasto, Helsinki, 2010, 83 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2010-35_rautateiden_henkiloliikenteen_web.pdf
- [8] Rautateiden verkkoselostus 2019, Liikenneviraston väylätietoja 2/2017, Liikennevirasto, Helsinki, 2017, 72 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lv_2017-02_rautateiden_verkkoselostus_2019_web.pdf
- [9] Rataverkon välityskyvyn kehityskuva 2035, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2015, Liikennevirasto, Helsinki, 2015, 64 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-33_rataverkon_valityskyvyn_web.pdf
- [10] Jäämeren rataselvitys, Liikennevirasto, Helsinki, 2018, 29 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lr_2018_jaameren_rataselvitys_web.pdf
- [11] Jäämeren ratayhteyden kysyntäpotentiaalin ja vaikutusten arviointi, Raportti, Ramboll, Espoo, 2018, 70 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/ramboll_jaameren_ratayhteyden_web.pdf

- [12] Raidegeometrian suunnittelu, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2011, Liikennevirasto, Helsinki, 2011, 161 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2011-22_raidegeometrian_suunnittelu_web.pdf
- [13] Rataverkon kokonaiskuva, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37/2018, Liikennevirasto, Helsinki, 2018, 90 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-37_rataverkon_kokonaiskuva_web.pdf
- [14] Siltojen kantavuuslaskentaohje, Liikenneviraston ohjeita 36/2015, Liikennevirasto, Helsinki, 2015, 61 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2015-36_siltojen_kantavuuslaskentaohje_web.pdf
- [15] Rautatietilasto 2017, Liikenneviraston tilastoja 8/2018, Liikennevirasto, Helsinki, 2018, 52 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-08_rautatietilasto_2017_web.pdf
- [16] Rataverkon luokittelun vertailu kantavuuden mukaan, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2010, Liikennevirasto, Helsinki, 2010, 53 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2010-21_rataverkon_luokittelun_web.pdf
- [17] VR Transpoint, Kalustokuvasto. Saatavissa: <https://www.vrtranspoint.fi/fi/vr-transpoint/asiakkaan-opas/kalusto/rautatiekalusto/> (Viitattu 8.7.2018)
- [18] Samppala P. Rautateille asennettujen pyörävoimailmaisimien mittausdata ja pyörävoiman raja-arvot, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011, 100 s.
- [19] Liikenneviraston sillat 1.1.2017, Liikenneviraston tilastoja 8/2017, Liikennevirasto, Helsinki, 2017, 90 s. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2017-08_liikenneviraston_sillat_web.pdf
- [20] Liikenneviraston sillat 1.1.2018, Liikenneviraston tilastoja 7/2018, Liikennevirasto, Helsinki, 2018, 73 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-07_liikenneviraston_sillat_web.pdf
- [21] Siltojemme historia, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki, 2004, 525 s.
- [22] Taitorakennerekisteri.
- [23] Museovirasto, Korian silta. Saatavissa: http://www.rky.fi/read/asp/r_kohde_det.aspx?KOHDE_ID=395 (Viitattu 21.11.2018)
- [24] Avattavat sillat, Liikenneviraston ohjeita 1/2018, Liikennevirasto, Helsinki, 2018, 79 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-01_avattavat_sillat_web.pdf

- [25] Liikenneväylien korjausvelka 2017, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 44/2017, Liikennevirasto, Helsinki, 2017, 24 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2017-44_liikennevaylien_korjausvelka_web.pdf
- [26] Liikkuvan kaluston valvontalaitteet ja radan kunnossapito, Liikenneviraston ohjeita 13/2014, Liikennevirasto, Helsinki, 2014, 23 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2014-13_liikkuvan_kaluston_web.pdf
- [27] Tamtron, Kuljetus ja logistiikka. Saatavissa: <https://www.tamtrongroup.com/fi/kuljetus-ja-logistiikka/> (Viitattu 21.12.2018)
- [28] Tamtron, Tamtron Scalex Wild pyörävoimien mittaus- ja punnitusjärjestelmä. Saatavissa: <https://www.tamtrongroup.com/fi/product/tamtron-scalex-wild-pyoravoimien-mittausjarjestelma/> (Viitattu 12.8.2018)
- [29] RFID Lab. Saatavissa: <http://www.rfidlab.fi/rfid-teknologia/mita-on-rfid/> (Viitattu 12.8.2018)
- [30] Liikenteenharjoittajan rajapinnat, Liikennevirasto, Helsinki, 2017, 51 s. Saatavissa: https://vayla.fi/documents/20473/388727/2017-09-25_Liikenteenharjoittajan+rajapinnat+dokumentti_v2.0.pdf/5179d0e4-3eaf-42ab-8bb4-2428452c6989
- [31] Rautateiden liikkuvan kaluston kunnan valvonta runkoverkolla, Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 3/2008, Ratahallintokeskus, Helsinki, 2008, 71 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf4/rhk_2008-a3_rautateiden_liikkuvan_web.pdf
- [32] RIL 179-2018 Sillat, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki, 2018, 509 s.
- [33] RIL 144-1997 Rakenteiden kuormitusohjeet. 2. painos, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki, 1998, 185 s.
- [34] Geißler K. Handbuch Brückenbau. Ernst & Sohn; 2014. 1362 s.
- [35] UIC-Code 776-1. 2006: Loads to be considered in railway bridge design. 5. painos, Kansainvälinen rautatiejärjestö, 2006, 46 s.
- [36] ERRI D 192/RP 1: Loading diagram to be taken into consideration for the calculation of rail-carrying structures on lines used by international services, Theoretical basis for verifying the present UIC 71 loading, Euroopan rautateiden tutkimuslaitos, Utrecht, 1993, 146 s.
- [37] ERRI D 192/RP 5: Loading diagram to be taken into consideration for the calculation of rail-carrying structures on lines used by international services, Final report, Euroopan rautateiden tutkimuslaitos, Utrecht, 1996, 43 s.
- [38] SFS-EN 15528, Kiskoliikenne. Ratalinjojen luokitus. Rautatievaunujen kuormitusrajat ja infrastruktuuri, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2015, 92 s.

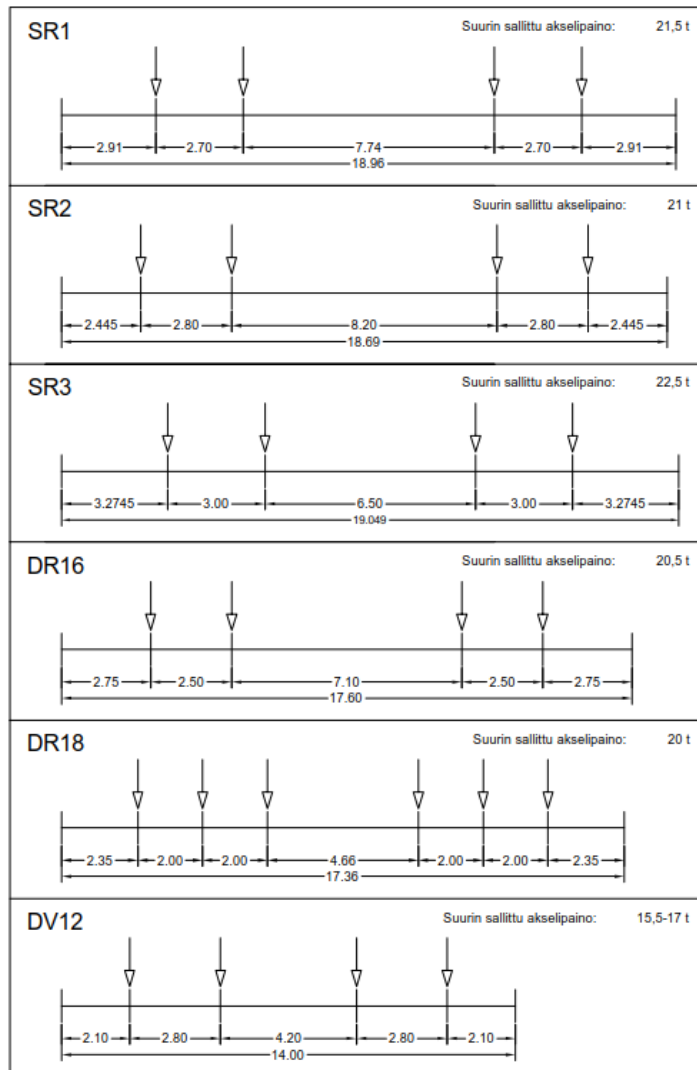
- [39] Tavaravaunujen suurimmasta sallitusta kuormasta, junapainosta ja junan kokoonpanosta, Määräys, Rautatievirasto, Helsinki, 2008, 14 s. Saatavissa: https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1386849375/6b7b3e3cc664e49f2f81755008144f5a/13790-K-RVI-725-412-2008_TAV.pdf
- [40] VR Transpoint, Kalustokuvasto, Rikastevaunu Taimn-t, Tamn-tw. Saatavissa: <https://www.vrtranspoint.fi/fi/vr-transpoint/asiakkaan-opas/kalusto/rautatiekalusto/kotimaan-liikenteen-vaunut/irtotavaravaunut/rikastevaunu/rikastevaunut---taimn-t-tamn-tw/> (Viitattu 8.7.2018)
- [41] Heinonen T-R. Lumen irtoaminen junakalustosta raiteen epäjatkuvuuskohtissa, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2012, 115 s. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21203/Heinonen.pdf?sequence=1>
- [42] Vaarallisten aineiden kuljetusmääräykset Suomen tasavallan ja Venäjän federaation välisessä suorassa kansainvälisessä rautatieliikenteessä, 2017. Saatavissa: https://www.trafi.fi/filebank/a/1513936530/50799d7b645297831415c7e461df6072/28904-Rautatie_2018_rus-fi_tekniset_maaraykset.pdf
- [43] Mellin I. Todennäköisyyslaskenta: Todennäköisyys ja sen laskusäännöt, TKK, 111 s. Saatavissa: <http://math.tkk.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/TodLaskLaskusaannot.pdf>
- [44] Mellin I. Johdatus todennäköisyyslaskentaan: Todennäköisyyden aksiomat, TKK, 2004, 106 s. Saatavissa: http://salserver.org.aalto.fi/vanhat_sivut/Opinnot/Mat-2.090/pdf_varasto/TODAK100.pdf
- [45] Law J. & Rennie R. A dictionary of physics 7. painos. Oxford university press, 2015.
- [46] Allen R. Basic mathematics. Macmillan and company limited, Lontoo 1962, 512 s.
- [47] Mellin I. Todennäköisyyslaskenta : Satunnaismuuttujat ja todennäköisyysjakaumat, TKK, 198 s. Saatavissa: <http://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/TodLaskSatMuutjaJak.pdf>
- [48] Mellin I. Tilastollinen päättely: Otosjakaumat, TKK, 2007, 37 s. Saatavissa: https://math.aalto.fi/opetus/til_paattely/luennot/TilPOtosjak100.pdf
- [49] Pohjavirta A. & Ruohonen K. Laaja tilastomatematiikka, Tampereen teknillinen yliopisto, 2005, 136 s. Saatavissa: <http://math.tut.fi/~ruohonen/LTM.pdf>
- [50] Valkeila E. Ääriarvoista. Rakenteiden Mekaniikka Vol. 41, Nro. 2, 2008, s. 79-85. Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki. Saatavissa: http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2008/nro2/RakMek_41_2_2008_1.pdf

- [51] Leppisaari M. Äärimmäisten ilmiöiden mallintamisesta, Tutkielma, 2013, 182 s. Saatavissa: https://www.actuary.fi/julkaisut/shv-tyot/aarimmaisten-ilmioiden-mallintamisesta/SHV_116_Leppisaari_Matias.pdf
- [52] Reiss R.-D. & Thomas M. Statistical Analysis of Extreme Values with Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields 3. painos, Berliini, 2007, 511 s.
- [53] Hurme H-K. Teräksen tilastollinen rakenneanalyysi, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2009, 75 s. Saatavissa: http://math.tut.fi/~ruohonen/Diplomitoita/Diplomityo_HKH.pdf
- [54] Ang A. H-S. & Tang W.H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II-Decision, Risk, and Reliability. 1. painos, John Wiley & Sons, Inc, 1984, 562 p.
- [55] Ronninger C. Reliability Analyses with Weibull, 2012, 150 s. Saatavissa: <http://www.crgraph.com/Weibull.pdf>
- [56] Law A.M. Simulation modeling & analysis. 5. painos. Tucson, Arizona, USA: McGraw-Hill Education; 2013. 776 s.
- [57] Laininen P. Tilastollisen analyysin perusteet. 5. painos. Helsinki, Otatieto / Gaudeamus, Helsinki University Press; 2000. 281 s.
- [58] Mathworks, qqplot. Saatavissa: <https://se.mathworks.com/help/stats/qqplot.html> (Viitattu 14.3.2019)
- [59] Mathworks, probplot. Saatavissa: <https://se.mathworks.com/help/stats/probplot.html> (Viitattu 14.3.2019)
- [60] Monte Carlo -menetelmät matemaattisen mallinnuksen apuna. Saatavissa: http://salserver.org.aalto.fi/vanhat_sivut/Opinnot/Mat-2.3130/verkkoeokskut2002/verkkoxq04.html
- [61] Atomic Heritage Foundation, Computing and the Manhattan project. Saatavissa: <https://www.atomicheritage.org/history/computing-and-manhattan-project> (Viitattu 20.12.2018)
- [62] Mittaustulosten käsittely. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/177285/mod_resource/content/1/AloituisMatsku.pdf (Viitattu 22.12.2018)
- [63] TUTWiki, Satunnaislukujen generoinnin käytäntöjä. Saatavissa: <https://wiki.tut.fi/Tietoturva/Tutkielmat/2008-38> (Viitattu 22.12.2018)
- [64] Graybeal W.J. & Pooch U.W. Simulation: Principles and Methods. 1. painos. Cambridge: Winthrop Publishers, INC; 1980. 249 s.

- [65] Mathsoft. Mathcad 11 User's Guide, Mathsoft Engineering & Education, Inc, Cambridge, 2002, 473 s. Saatavissa: <https://community.ptc.com/.../PTCMathcad/.../1/Mathcad%2011%20Users%20Guide.pdf> (Viitattu 17.12.2018)
- [66] Ruohonen K. Tilastomatematiikka, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011, 87 s. Saatavissa: <http://math.tut.fi/~ruohonen/TM.pdf>
- [67] Connor J.J. & Faraji S. Fundamentals of Structural Engineering. Springer, New York, 2013, 1143 s.
- [68] Siltojen suunnittelussa käytetyt kuormat ja osavarmuusluvut, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 12/2016, Liikennevirasto, Helsinki, 68 s. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-12_siltojen_suunnittelussa_web.pdf
- [69] SFS-EN 1991-2, Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2004, 143 s.

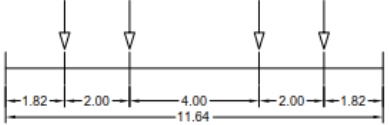
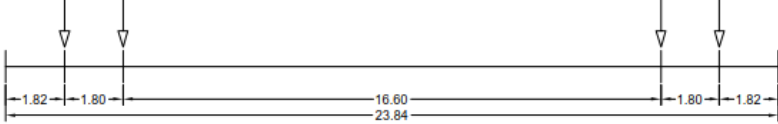
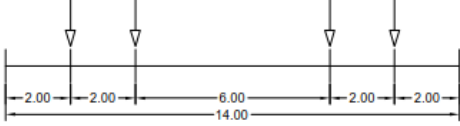
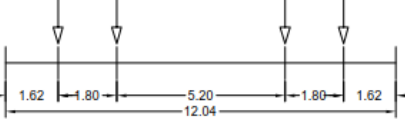
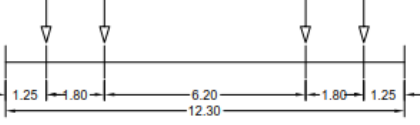
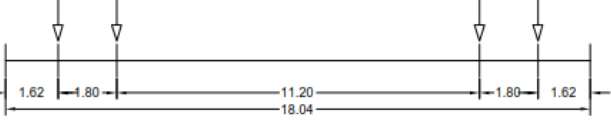
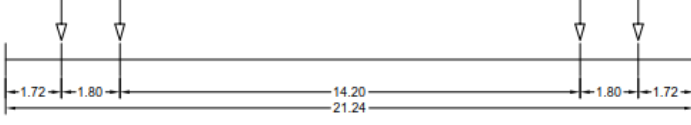
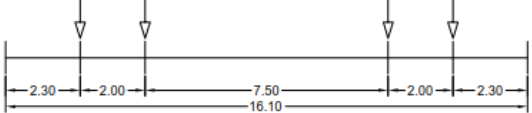
LIITE 1: SIMULAATIOISSA KÄYTETTYJEN VETUREIDEN JA VAUNUJEN KAAVIOKUVAT

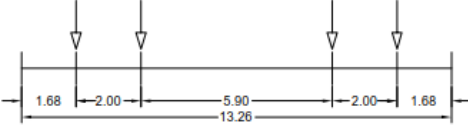
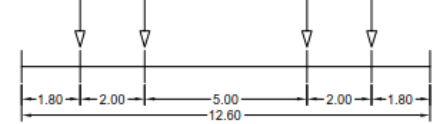
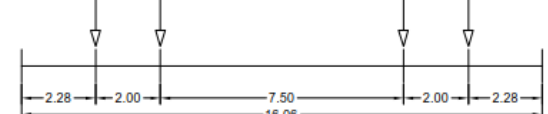
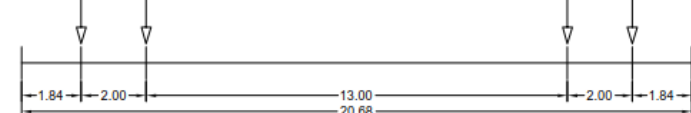
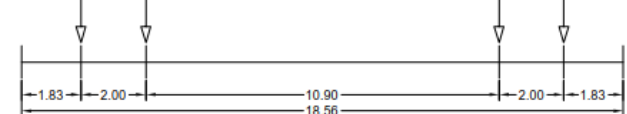
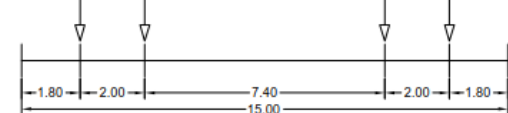
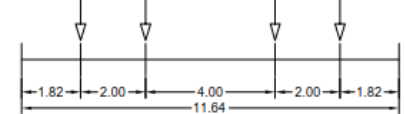
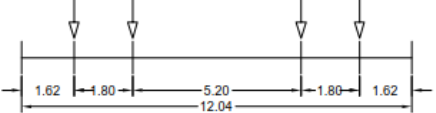
Simulaatioissa käytetyt veturit



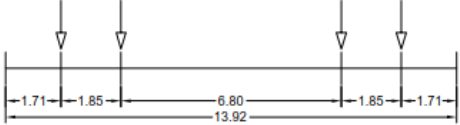
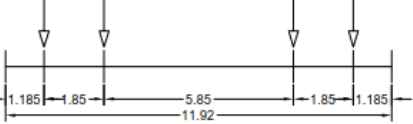
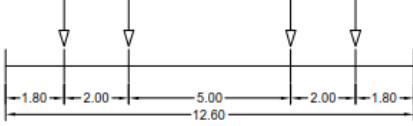
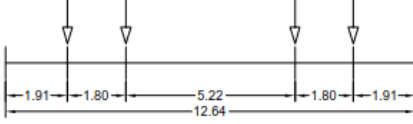
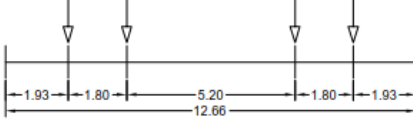
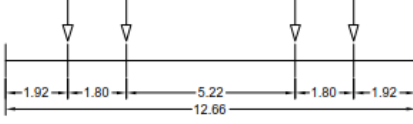
Simulaatioissa käytetyt vaunut

<p>FAKKS</p>	<p>Suurin sallittu akselpaino: 20 t</p>
<p>GBLN, GBLS</p>	<p>Suurin sallittu akselpaino: 21,3 t (GBLN) 22,3 t (GBLS)</p>
<p>HABBIN</p>	<p>Suurin sallittu akselpaino: 25 t</p>
<p>HAI, HAI-T, HAIN</p>	<p>Suurin sallittu akselpaino: 20 t (HAI, HAI-T) 22,5 t (HAIN)</p>
<p>HBI, HBIKK, HBIN, HKBA</p>	<p>Suurin sallittu akselpaino: 19,85 t (HBI) 19,9 t (HBIKK) 22,5 t (HBIN) 20 t (HKBA)</p>
<p>KBP</p>	<p>Suurin sallittu akselpaino: 22,5 t</p>
<p>LAAIS</p>	<p>Suurin sallittu akselpaino: 22,5 t</p>
<p>OCC</p>	<p>Suurin sallittu akselpaino: 19,95 t</p>

<p>OME</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 19,95 t</p>
<p>RBNQSS</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,5 t</p>
<p>SGMMNS-W</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,5 t</p>
<p>SHIMMN</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,5 t</p>
<p>SHMMN-TW, SHMMNS-TW</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 25 t</p>
<p>SIM, SIMN, SIMN-T, SIM-U, SIMNS</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,5 t (SIM, SIMN) 25 t (SIMN-T) 22,4 t (SIM-U, SIMNS)</p>
<p>SNPS, SNPSS</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,5 t</p>
<p>SOB</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 20 t</p>

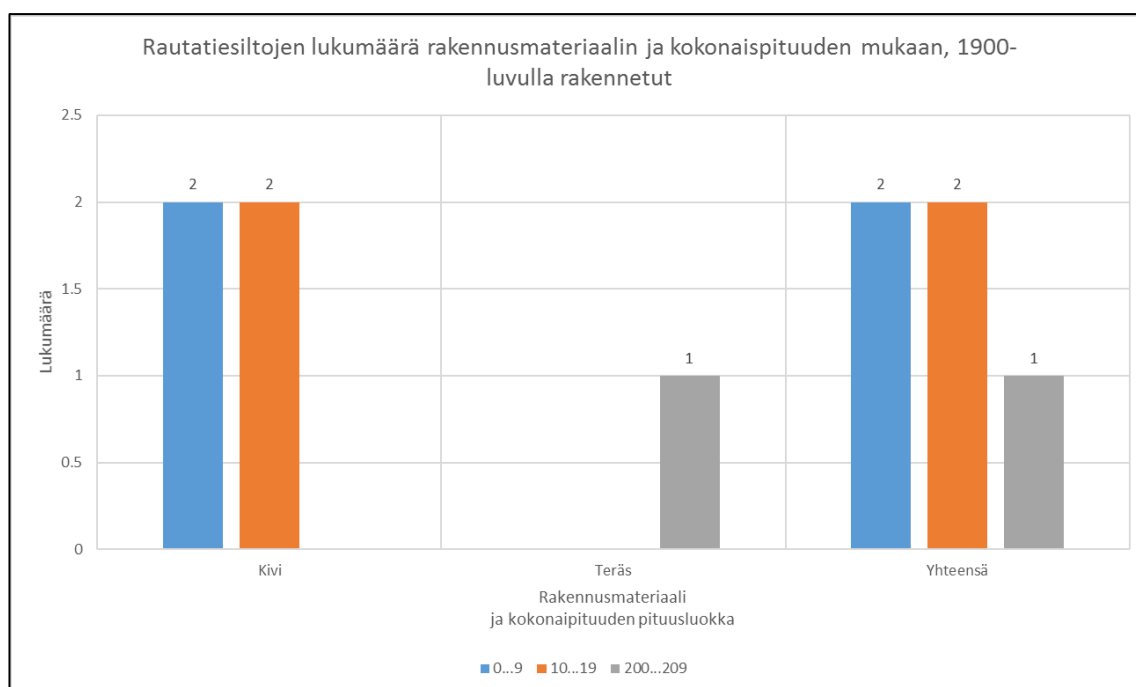
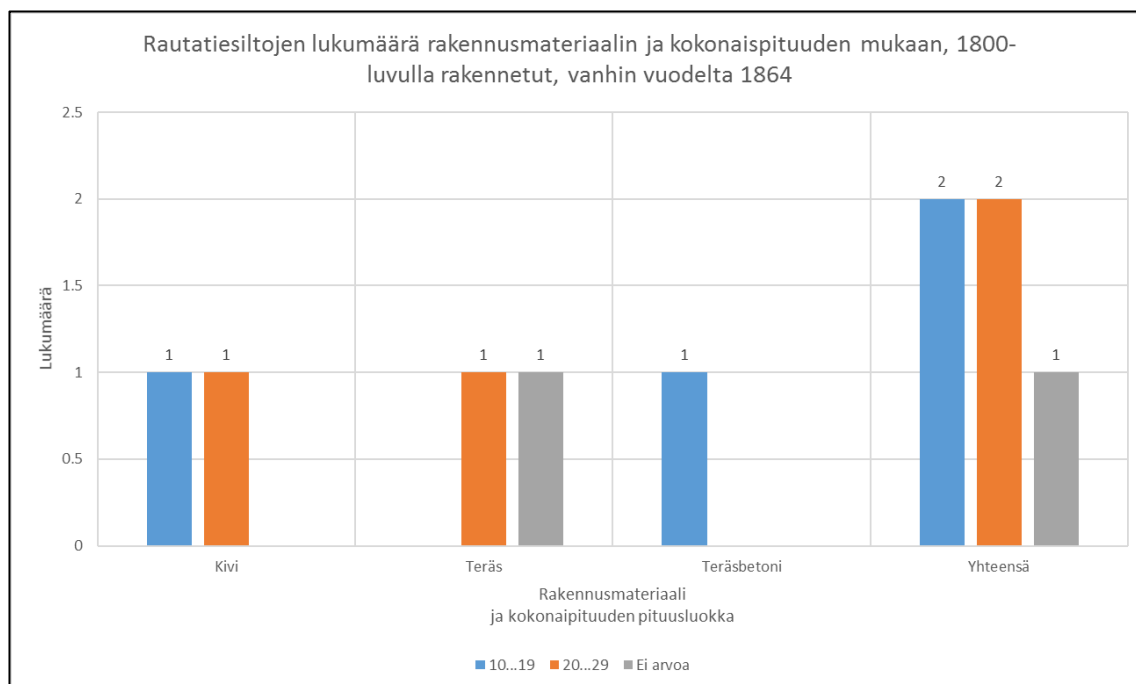
<p>SOEK</p> 	<p>Suurin sallittu akselpaino: 20 t</p>
<p>SOF</p> 	<p>Suurin sallittu akselpaino: 20 t</p>
<p>SONK</p> 	<p>Suurin sallittu akselpaino: 19,5 t</p>
<p>SP, SPA, SPS</p> 	<p>Suurin sallittu akselpaino: 20 t (SP, SPA) 19,9 t (SPS)</p>
<p>TABD</p> 	<p>Suurin sallittu akselpaino: 20 t</p>
<p>TAD</p> 	<p>Suurin sallittu akselpaino: 20 t</p>
<p>TAIMN</p> 	<p>Suurin sallittu akselpaino: 20 t</p>
<p>TAIMN-U, TAU</p> 	<p>Suurin sallittu akselpaino: 22,4 t (TAIMN-U) 22,5 t (TAU)</p>

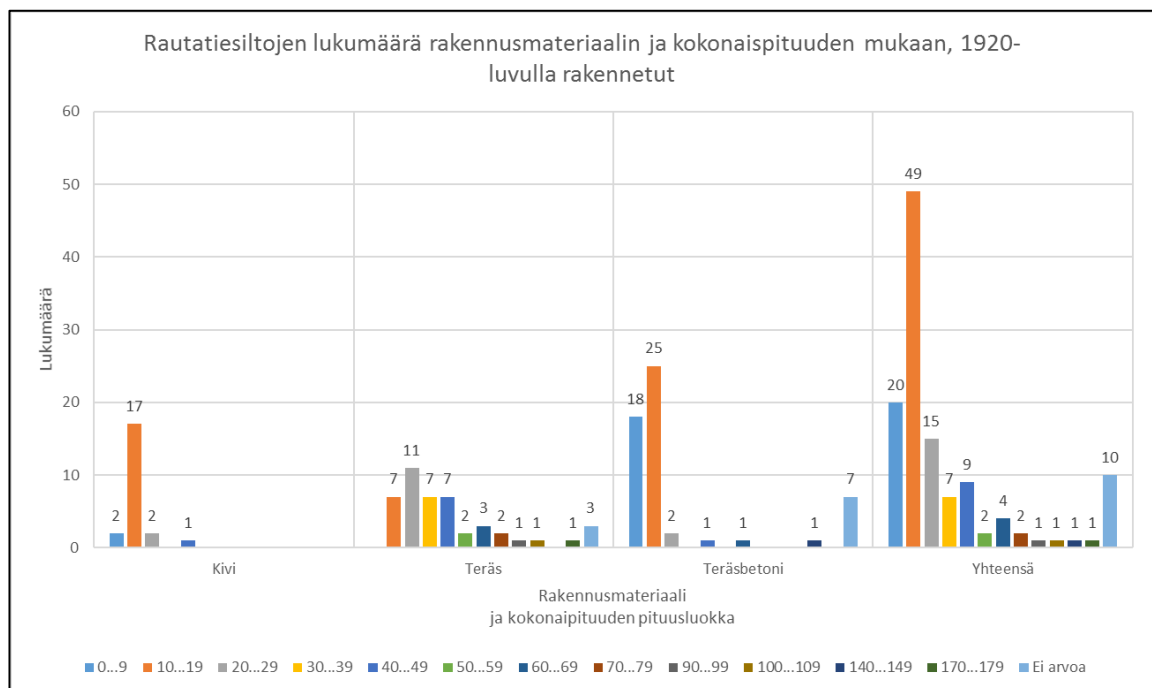
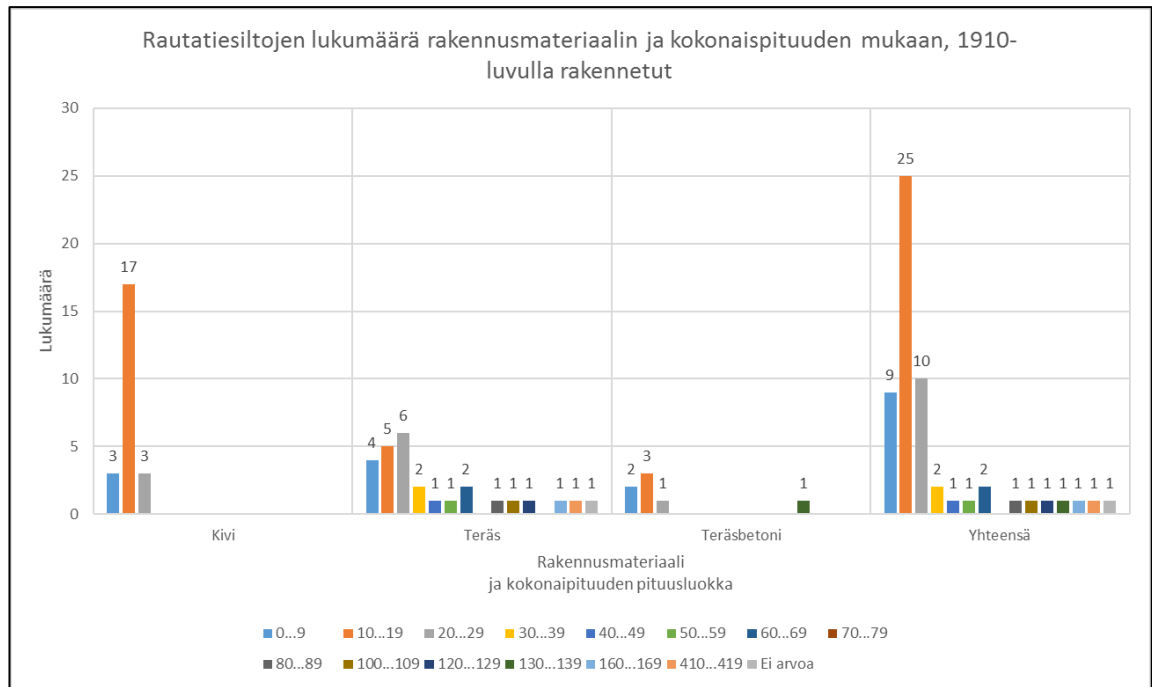
<p>TAMN-TW</p>	<p>Suurin sallittu akselipaino: 25 t</p>
<p>UAN-T</p>	<p>Suurin sallittu akselipaino: 25 t</p>
<p>VGOBO-1</p>	<p>Suurin sallittu akselipaino: 23,25 t</p>
<p>VGOBO-2</p>	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22 t</p>
<p>VGOBO-3</p>	<p>Suurin sallittu akselipaino: ei tiedossa</p>
<p>VGOBO-4</p>	<p>Suurin sallittu akselipaino: 21,63 t</p>
<p>VO, VOF</p>	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,5 t (VO) 21,5 t (VOF)</p>
<p>VOFA</p>	<p>Suurin sallittu akselipaino: 21,5 t</p>

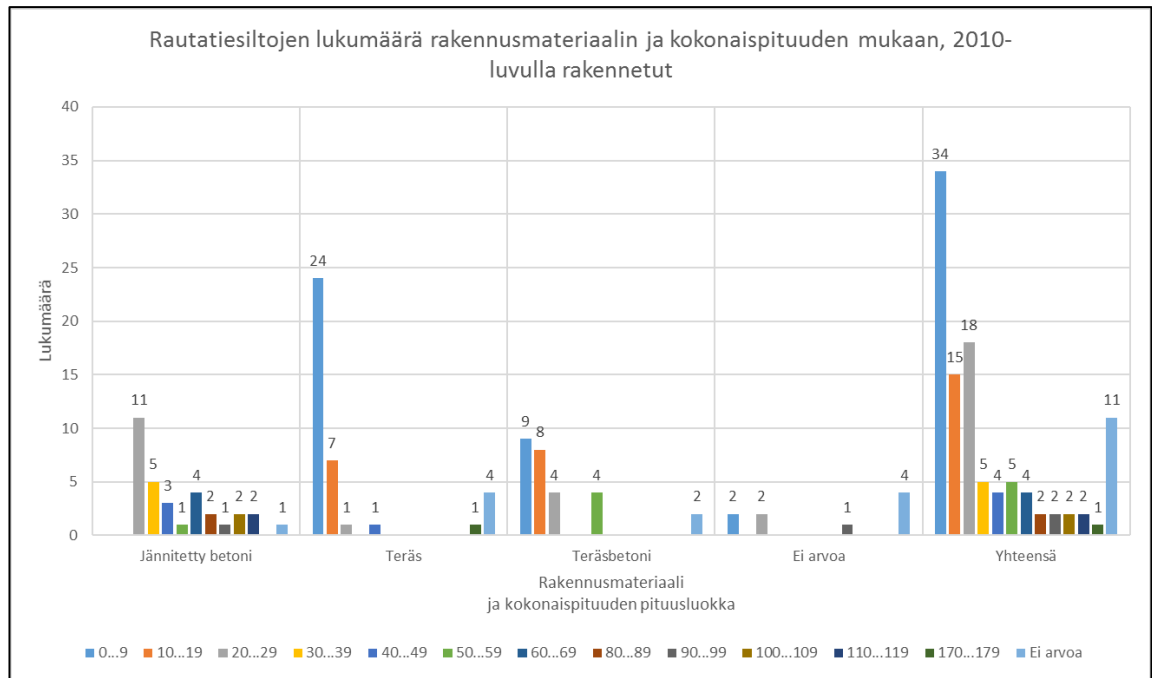
<p>VOK</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,5 t</p>
<p>VTAD</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 19,5 t</p>
<p>ZA, ZAS</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,5 t (ZA) 22 t (ZAS)</p>
<p>ZAENS-W</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 21,5 t</p>
<p>ZAN-V</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 22,4 t</p>
<p>ZANS</p> 	<p>Suurin sallittu akselipaino: 21,5 t</p>

LIITE 2: RAUTATIESILTOJEN JAKAUMAT RAKENNUSMATERIAALIN JA KOKONAISPITUUDEN MUKAAN VUOSIKYMMENITTÄIN

Jakaumat on laadittu Taitorakennerekisterissä tehtyjen hakuehtojen perusteella. Kaikista ajansaatossa tehdyistä ja varsinkaan aivan vanhimmista rautatiesilloista ei ole merkintää Taitorakennerekisterissä, joten jakaumat ovat vain suuntaa antavia. Esimerkiksi aivan rautateiden historian alussa rakennettuja puusiltoja ei Taitorakennerekisteriin ole kirjattu.

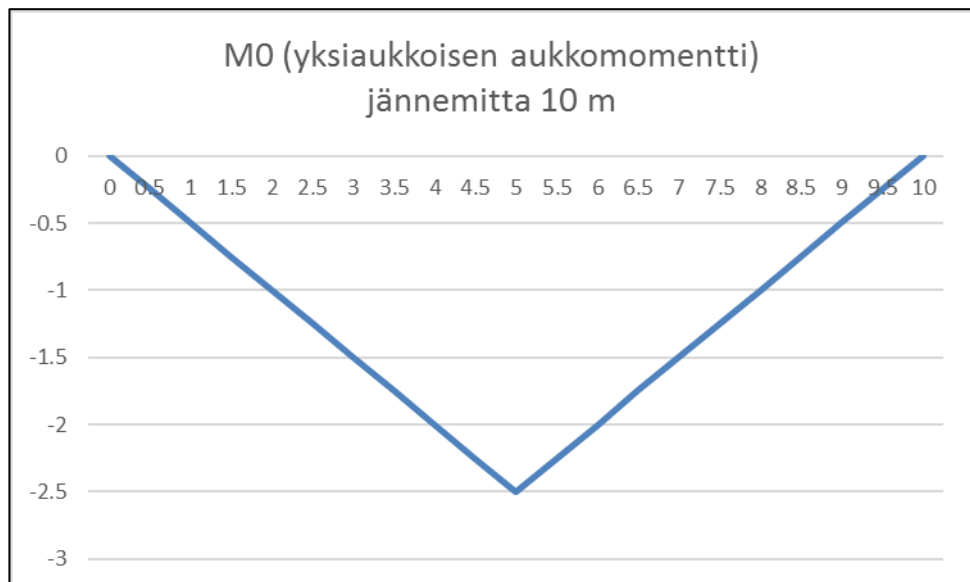
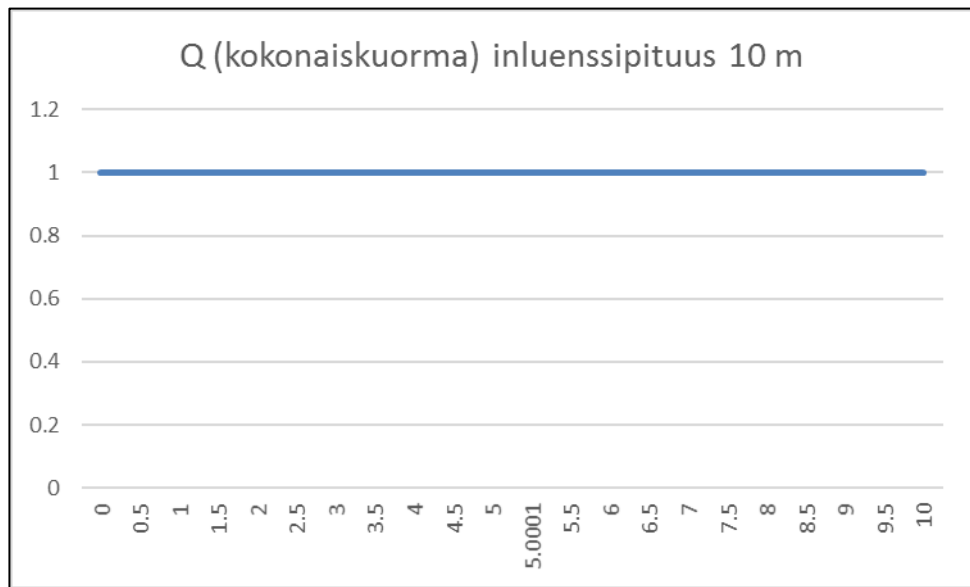


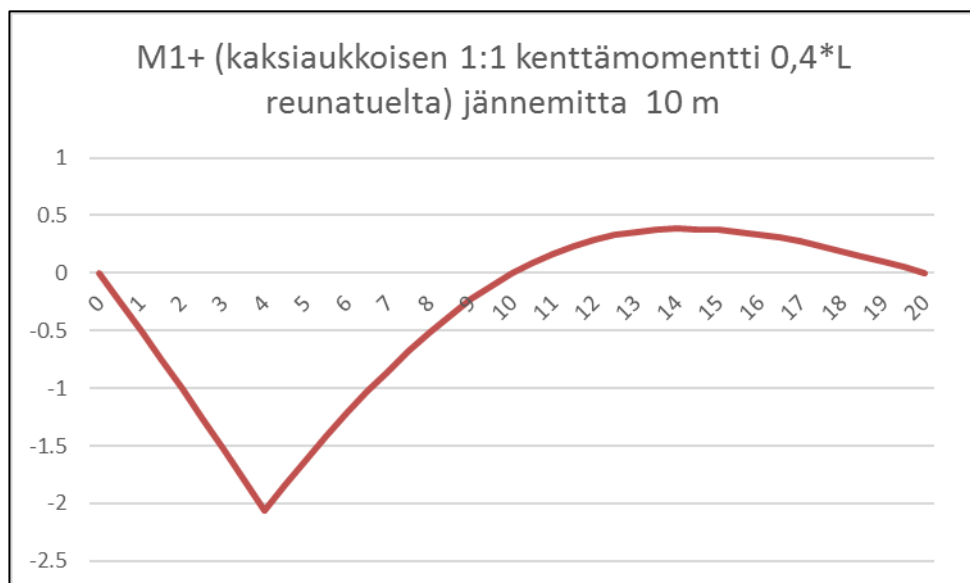
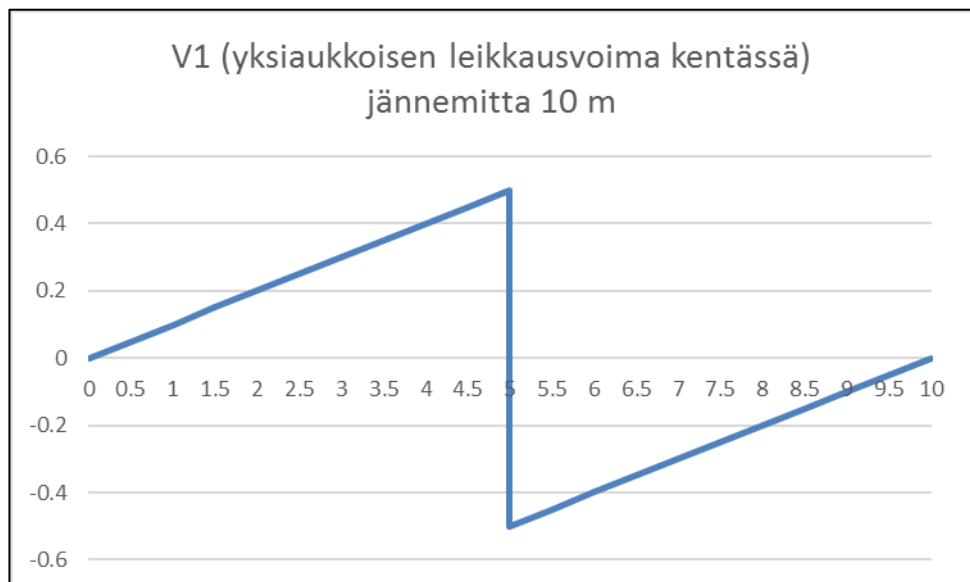
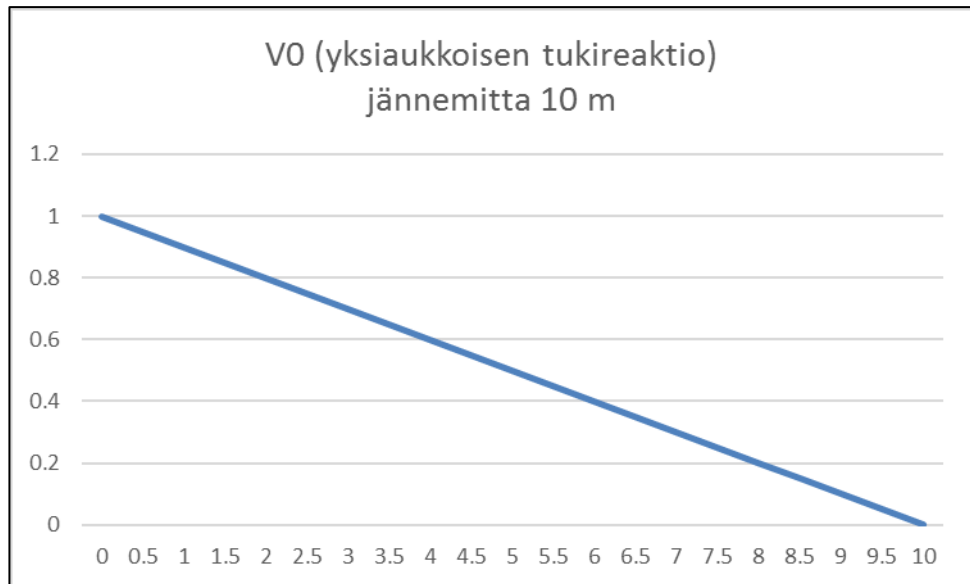


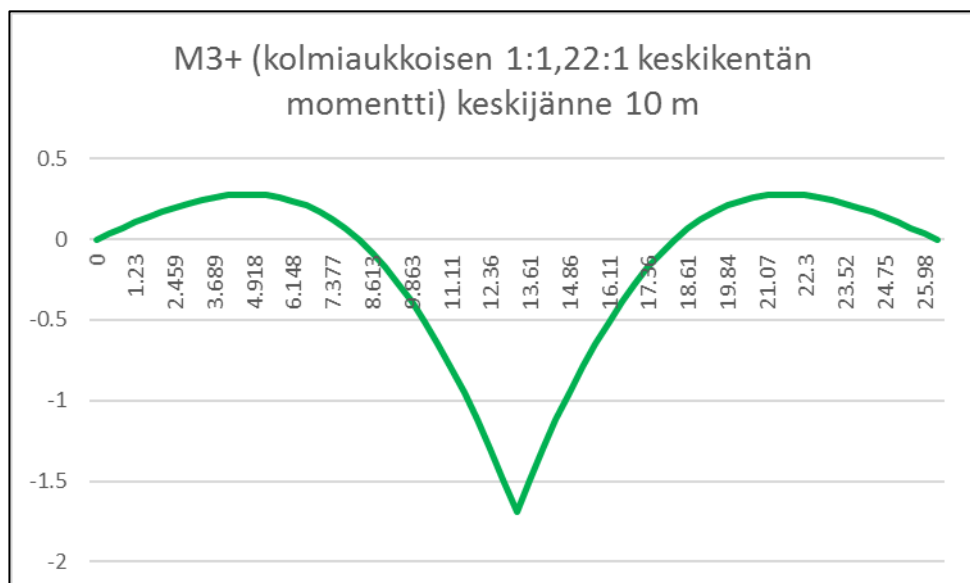
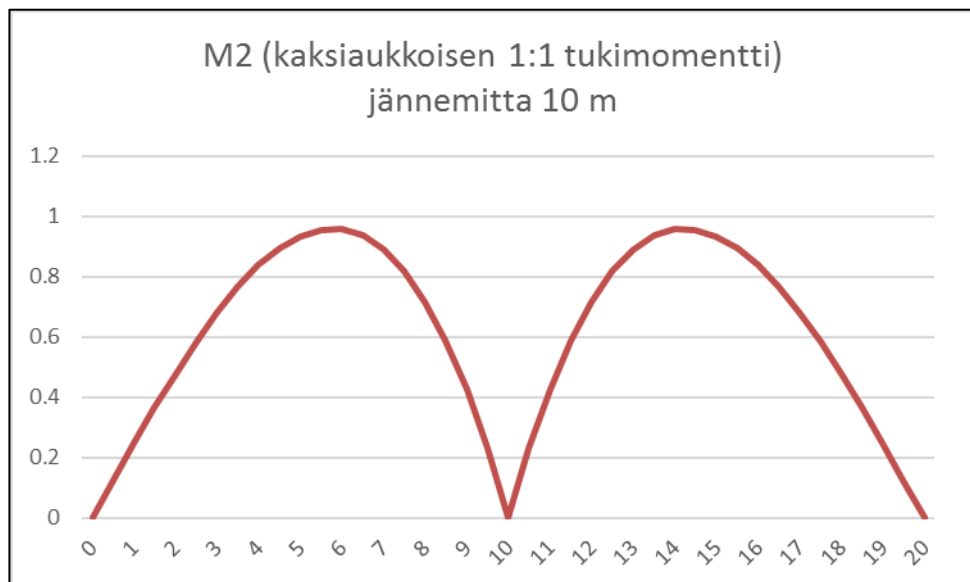
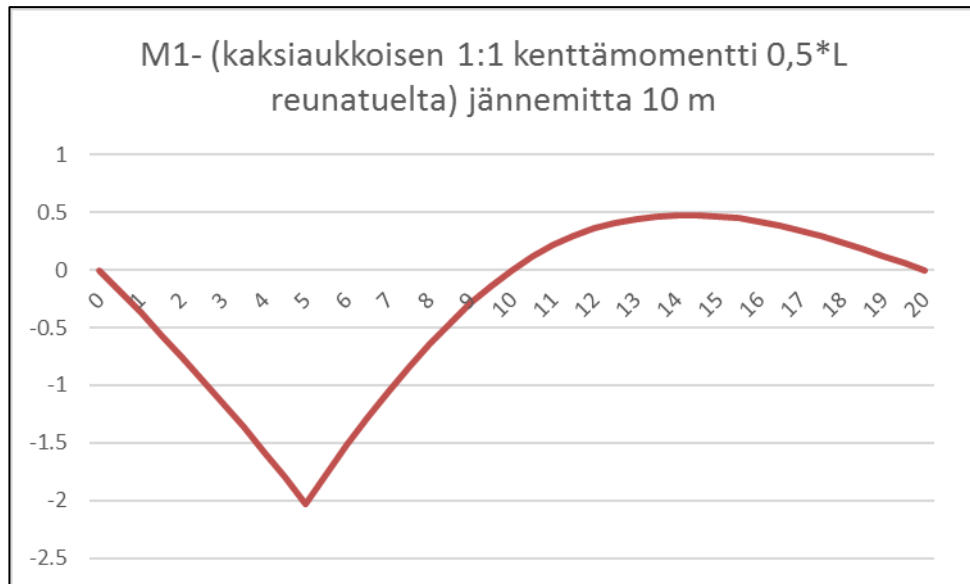


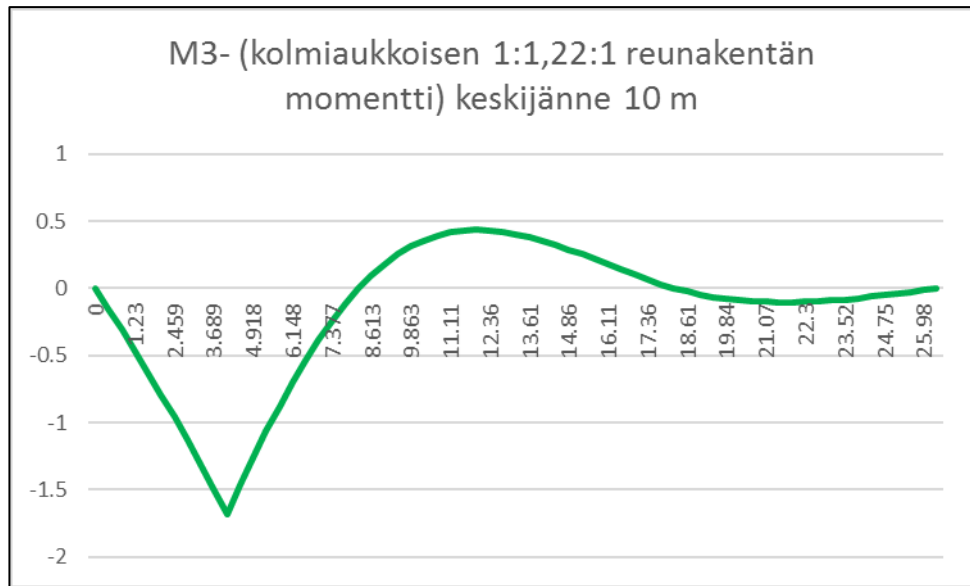
LIITE 3: TUTKITUT VAIKUTUSVIIVAT

Tässä liitteessä on esitetty kaikki simulaatioissa mukana olleet vaikutusviivat influenssipituudella 10 m. Vaikutusviivat on jaettu kahteenkymmeneen saman pituiseen osaan influenssipituudella L ja kussakin pisteessä on vaikutuskerroin, jolla kerrotaan akselipaino kyseisessä pisteessä, jolloin saadaan tarkasteltavassa pisteessä vaikuttava kuormavaikutus.









LIITE 4: KUORMAVAIKUTUKSET VERRATTUNA LM-71 JA SW/0 KUORMAKAAVIOIHIN TAULUKKOMUODOSSA

Taulukoissa sarakkeet vasemmalta oikealle: influenssin tyyppi, influenssin numero, influenssipituus, luokittelukaavion D4 tai E4 kuormavaikutus, kuormakaavion SW/0 kuormavaikutus, kuormakaavion LM71 kuormavaikutus, eri mittauspisteiden kuormavaikutukset. Influenssityypit ja influenssinumerot näkyvät kappaleen 7.3 kuvissa. Mittauspisteiden kuormavaikutukset saavat lisäksi punaisen värin, mikäli kuormavaikutus on suurempi kuin LM71- tai SW/0-kaavion antama kuormavaikutus ja oranssi, mikäli kuormavaikutus on suurempi kuin LM71-kaaviossa, mutta pienempi kuin SW/0 kaaviossa.

Taulukko 1 Kuormavaikutukset D4-luokittelukaaviolla, LM71-22,5 ja SW0-22,5 kuormakaaviolla sekä 22,5 tonnin radoilta Weibull-jakauman perusteella

	Nro.	L	D4	SW/0 $\alpha=1$	LM71 $\alpha=1$	MP 5001	MP 5006	MP 5008	MP 5009	MP 5011
Q	1	2	450	278,7	500,0	509,9	506,2	509,9	501,8	502,5
	2	6	675	796,4	1032	941,0	735,3	745,8	735,7	731,3
	3	10	900	1327	1352	1151,2	1153,1	1150,6	1089,6	1148,9
	4	20	1800	1991	2152	1891,5	1904,7	1901,5	1847,5	1866,9
	5	30	2700	3278	2952	2713,1	2549,8	2537,7	2481,5	2530,8
	6	50	4275	3982	4552	4096,7	3371,4	4064,4	3655,1	3932,4
	7	100	8100	3982	8552	7595,6	5685,1	7193,1	7065,3	7198,8
	8	200	16200	3982	16555	14525,6	9040,3	13217,1	13581,7	13710,8
M0	9	2	112,5	66,4	126,2	126,3	125,3	126,5	125,5	125,8
	10	6	472,5	597,3	733,4	617,9	604,7	614,7	597,7	610,8
	11	10	1170	1659	1849	1478,1	1345,6	1333,5	1315,9	1343,2
	12	20	4078	6222	6049	4385,5	4396,1	4334,6	4280,2	4359,8
	13	30	9163	11520	12245	9312,8	9252,9	9363,0	9011,9	9202,0
	14	50	25110	29565	30645	24630,2	25047,2	25028,1	23222,4	23657,8
V0	15	2	247,5	139,4	300,0	267,1	273,7	270,9	267,3	270,4
	16	6	427,5	404,8	584,1	494,6	450,2	452,0	441,7	435,5
	17	10	585	670,0	822,3	668,2	621,8	624,1	612,2	611,0
	18	20	978,8	1249	1289	1020,6	985,2	988,3	947,1	968,4
	19	30	1373	1706	1709	1380,5	1353,4	1361,8	1296,6	1310,4
	20	50	2168	2580	2525	2107,4	2033,2	2114,7	1960,8	2002,0
V1	21	2	112,5	36,5	126,2	125,6	125,7	127,0	125,6	125,9
	22	6	157,5	102,8	160,0	174,3	174,6	175,3	171,4	174,1
	23	10	163,1	169,1	289,1	220,9	212,4	211,2	210,1	210,3
	24	20	241,9	335,5	448,4	316,4	311,0	303,8	310,6	307,8
	25	30	346,5	500,9	567,6	410,0	409,2	406,2	397,9	409,8
	26	50	540,9	729,1	783,0	602,5	594,5	596,7	588,5	594,3
M1+	27	10	773,2	1263	1443	1023,1	992,0	996,8	991,6	992,9
	28	20	3145	4787	4705	3399,1	3436,1	3335,1	3354,4	3357,9
	29	30	6875	8806	9500	7025,3	7079,7	7067,8	7074,6	7154,3
	30	50	19140	23233	23664	18283,2	18993,5	18958,6	18026,0	18434,1
	31	100	76150	63426	85709	69835,6	56077,5	70586,4	65984,4	65960,5
M1-	32	10	725,8	1247	1415	996,9	1019,1	993,3	961,0	1002,8
	33	20	3070	4718	4634	3328,9	3283,2	3229,7	3190,4	3245,5
	34	30	6865	8804	9364	6915,4	6998,8	6935,4	6849,3	6960,2
	35	50	18910	22405	23336	17831,7	18593,0	18587,1	18085,2	17994,0
	36	100	75160	62103	84582	67843,7	56417,8	69879,4	65162,1	65395,6
M2	37	10	1196	1449	1395	1301,5	1248,2	1237,5	1205,3	1240,6
	38	20	4107	6013	4865	4062,0	4226,3	4063,5	3965,8	4046,5
	39	30	9057	9812	10309	8681,8	7048,5	8878,4	8073,4	8411,4
	40	50	24980	15025	27127	23334,3	18519,7	22684,9	21937,0	22021,8
	41	100	99570	36025	104000	89572,5	56841,8	82173,8	84306,8	84867,7
M3+	42	10	493,8	841,8	1085	747,9	720,3	694,4	714,2	706,0
	43	20	1909	2930	3584	2391,7	2407,7	2332,1	2355,2	2358,7
	44	30	4122	6055	7241	5005,0	4865,0	4948,1	4741,2	5077,9
	45	50	11410	16947	17991	12700,0	12966,6	13113,6	12397,3	12602,9
	46	100	45270	48937	64836	48775,5	39151,1	45485,8	45617,3	46940,0
	47	200	181100	115565	244091	193678,6	116657,5	177326,1	182400,7	188709,6
M3-	48	10	568,7	845	1049	763,1	734,0	725,7	722,3	736,9
	49	20	2160	3362	3501	2198,5	2177,4	2167,6	2144,8	2198,2
	50	30	4670	6571	7069	4999,2	4962,6	4860,9	4777,3	4932,1
	51	50	12830	15586	17536	12812,8	12938,2	12820,3	12757,3	12836,0
	52	100	51060	48068	63073	46887,7	41676,2	48662,2	44428,7	45244,9
	53	200	204000	114342	237182	183489,6	120594,4	173911,5	173299,3	173127,5

Taulukko 2 Kuormavaikutukset E4-luokittelukaaviolla, LM71-25 ja SW0-25 kuormakaavioilla sekä 25 tonnin radoilta Weibull-jakauman perusteella

	Nro.	L	E4	SW/0 $\alpha=1.1$	LM71 $\alpha=1.1$	MP 5000	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5007	MP 5012
Q	1	2	500	306,6	550	505,9	509,8	509,3	510,2	509,5	507,1	510,1
	2	6	750	876	1135	747,5	950,8	964,5	741,0	737,7	934,3	935,7
	3	10	1000	1460	1487	1171,5	1128,4	1131,4	1020,5	1016,8	1145,3	1243,2
	4	20	2000	2190	2367	1853,8	1919,5	1920,7	1887,5	1879,3	1890,7	2046,0
	5	30	2750	3606	3247	2477,1	2758,2	2769,5	2605,7	2565,7	2695,4	2924,2
	6	50	4250	4380	5007	3859,1	4126,5	4131,9	4052,2	4066,7	4062,3	4802,7
	7	100	8250	4380	9407	7221,0	7748,8	7776,1	7706,9	7700,9	7691,8	8666,8
	8	200	16250	4380	18210	13805,5	14546,3	14709,9	14445,5	14456,7	14648,9	16972,3
M0	9	2	125	73	138,8	126,1	126,5	126,2	126,0	126,2	125,6	126,6
	10	6	525	657	806,7	603,0	613,9	621,3	575,7	569,0	610,9	585,8
	11	10	1300	1825	2034	1310,5	1476,0	1483,8	1387,3	1375,5	1435,7	1527,2
	12	20	4150	6844	6654	4273,2	4215,9	4222,2	4228,3	4256,1	4353,7	5568,0
	13	30	9150	12672	13470	8987,1	9268,0	9382,6	9214,9	9206,2	9136,9	10664,0
14	50	25000	32522	33710	23660,3	24643,6	24727,7	24649,8	24641,4	24344,4	27792,3	
V0	15	2	275	153,3	330	271,9	270,4	270,2	268,6	271,1	272,4	268,9
	16	6	475	445,3	642,5	450,2	495,5	495,3	479,0	474,2	486,0	465,4
	17	10	670	737	904,5	622,5	670,2	676,5	655,3	648,4	667,2	685,9
	18	20	1045	1374	1418	962,2	1042,7	1049,9	1007,1	994,0	1025,5	1159,3
	19	30	1433	1877	1880	1314,2	1408,0	1400,7	1371,4	1355,5	1385,1	1577,4
20	50	2236	2838	2777	2066,4	2136,8	2163,8	2102,8	2097,2	2102,2	2455,4	
V1	21	2	125	40,2	138,8	126,6	126,4	126,3	126,4	126,6	126,0	126,9
	22	6	175	113,1	176	175,4	174,2	174,5	174,8	175,4	174,7	175,1
	23	10	210	186	318	206,8	224,6	225,1	216,0	214,8	221,1	210,8
	24	20	262,5	369	493,2	314,6	313,8	317,7	306,4	302,9	314,7	303,1
	25	30	368,3	551	624,4	401,8	387,3	389,1	368,4	365,5	399,4	371,4
26	50	560	802	861,3	591,7	590,2	567,7	544,3	548,0	595,4	562,1	
M1+	27	10	905,2	1389	1587	1003,1	1038,0	1042,0	998,5	975,1	1020,4	1093,2
	28	20	3332	5266	5176	3323,5	3428,1	3278,7	3096,8	2987,9	3434,1	3558,8
	29	30	6842	9687	10450	6978,3	6733,9	6803,7	6528,9	6358,0	7121,0	7189,6
	30	50	19080	25556	26030	18270,8	17983,6	18254,9	18001,8	17748,6	18458,1	19880,5
	31	100	76210	69769	94280	66809,1	69991,4	70499,3	70089,8	71130,9	69908,0	79527,6
M1-	32	10	819,1	1372	1556	976,3	980,1	988,3	941,8	909,8	992,8	1030,2
	33	20	3188	5190	5097	3262,7	3254,5	3205,6	2903,4	2884,2	3256,9	3267,8
	34	30	6938	9684	10300	6934,5	6711,8	6818,7	6306,4	6249,0	6846,1	7185,6
	35	50	18860	24645	25670	17571,0	17956,8	17991,1	17605,0	17364,1	18165,1	19100,4
	36	100	75230	68313	93040	65525,9	69173,6	68974,8	69798,5	69088,4	68276,2	77670,9
M2	37	10	1235	1594	1535	1208,3	1317,9	1316,1	1262,8	1254,7	1278,4	1404,3
	38	20	4139	6614	5351	3916,1	4125,6	4090,0	4011,8	3990,7	4112,8	5216,6
	39	30	9113	10793	11340	8269,9	8771,8	8821,3	8756,3	8829,4	8680,4	10282,1
	40	50	25250	16527	29840	22162,7	23489,5	23666,1	23609,0	23669,8	23329,4	27307,0
	41	100	99770	39627	114400	85512,1	90487,5	90692,9	89517,0	90635,9	90335,9	108355,2
M3+	42	10	582,4	926	1194	733,3	738,3	749,8	692,3	673,6	727,2	712,6
	43	20	1995	3223	3942	2280,8	2250,0	2191,1	2105,9	2110,7	2294,4	2205,7
	44	30	4240	6660	7965	4959,4	4941,3	4971,6	4598,5	4565,4	5200,8	5121,4
	45	50	11480	18642	19790	12253,2	12807,1	12792,1	12318,2	12477,4	12801,0	12960,7
	46	100	45400	53831	71320	48504,0	50110,5	51564,1	49198,3	49356,8	50644,8	51725,5
	47	200	181200	127121	268500	191174,6	202123,7	204120,6	198940,8	198237,7	200678,3	197204,9
M3-	48	10	642,5	930	1154	717,2	771,4	777,2	726,5	718,2	757,5	756,0
	49	20	2244	3698	3851	2130,1	2205,3	2153,8	2126,3	2082,7	2179,5	2273,3
	50	30	4667	7228	7776	4888,6	4780,4	4854,3	4387,0	4362,7	4826,1	5000,9
	51	50	12920	17145	19290	12767,1	12237,9	12380,1	12042,9	11996,9	12748,5	13796,7
	52	100	51160	52875	69380	44685,0	46987,5	47240,9	47747,9	47237,9	47184,5	50740,2
	53	200	204000	125776	260900	175149,1	184895,1	184696,6	186746,5	185213,7	181955,6	198737,7

Taulukko 3 Kuormavaikutukset D4-luokittelukaaviolla, LM71-22,5 ja SW0-22,5 kuormakaaviolla sekä 22,5 tonnin radoilta Gumbel-jakauman perusteella

Nro.	L	D4	SW/0 $\alpha=1$	LM71 $\alpha=1$	MP 5001	MP 5006	MP 5008	MP 5009	MP 5011
1	2	450	278,7	500,0	530,7	524,0	526,0	528,6	520,7
2	6	675	796,4	1032	977,5	753,6	762,8	757,3	749,8
3	10	900	1327	1352	1279,3	1250,9	1237,3	1149,7	1257,1
4	20	1800	1991	2152	1947,5	2046,0	2015,4	1990,5	1964,7
5	30	2700	3278	2952	2852,6	2853,7	2637,4	2623,9	2661,4
6	50	4275	3982	4552	4222,6	3839,6	4370,8	3756,6	4085,6
7	100	8100	3982	8552	7875,6	6410,1	7385,2	7606,3	7338,1
8	200	16200	3982	16555	15532,0	9369,1	13416,7	15300,5	14521,1
9	2	112,5	66,4	126,2	131,2	130,0	130,3	130,0	130,0
10	6	472,5	597,3	733,4	640,8	636,1	656,5	632,4	654,8
11	10	1170	1659	1849	1533,6	1448,0	1420,1	1401,4	1426,7
12	20	4078	6222	6049	4563,8	4673,4	4616,0	4514,8	4582,9
13	30	9163	11520	12245	9634,8	9913,6	10019,4	9444,6	9540,7
14	50	25110	29565	30645	25151,3	30268,9	27611,0	24102,0	24492,4
15	2	247,5	139,4	300,0	276,9	288,4	281,3	284,4	283,5
16	6	427,5	404,8	584,1	518,4	467,5	467,0	461,8	452,0
17	10	585	670,0	822,3	692,4	644,7	640,3	632,8	633,8
18	20	978,8	1249	1289	1051,6	1059,0	1026,6	977,8	997,8
19	30	1373	1706	1709	1428,9	1456,6	1437,4	1340,0	1350,4
20	50	2168	2580	2525	2173,1	2434,8	2293,1	2031,4	2051,2
21	2	112,5	36,5	126,2	129,4	130,0	131,6	129,9	130,5
22	6	157,5	102,8	160,0	180,4	180,7	181,0	178,7	180,2
23	10	163,1	169,1	289,1	230,1	221,7	216,5	216,3	219,8
24	20	241,9	335,5	448,4	328,5	321,3	316,1	323,4	318,0
25	30	346,5	500,9	567,6	437,5	441,1	433,2	428,5	435,3
26	50	540,9	729,1	783,0	642,7	634,9	625,9	635,6	630,0
27	10	773,2	1263	1443	1060,8	1028,2	1048,7	1031,9	1044,0
28	20	3145	4787	4705	3592,5	3711,4	3582,1	3618,4	3581,1
29	30	6875	8806	9500	7449,2	7585,2	7649,0	7838,9	7557,1
30	50	19140	23233	23664	19526,8	23061,8	21433,3	19896,2	20051,6
31	100	76150	63426	85709	75603,1	66382,4	77266,2	72799,5	69270,7
32	10	725,8	1247	1415	1044,9	1087,2	1057,6	1012,6	1056,3
33	20	3070	4718	4634	3571,6	3549,1	3437,2	3502,0	3447,0
34	30	6865	8804	9364	7303,4	7459,4	7549,9	7538,7	7374,8
35	50	18910	22405	23336	19138,8	22227,0	20905,1	20360,5	19579,4
36	100	75160	62103	84582	73091,9	66532,9	77372,6	73691,5	68765,1
37	10	1196	1449	1395	1344,4	1333,9	1322,2	1283,2	1337,5
38	20	4107	6013	4865	4181,3	5032,5	4412,8	4164,5	4237,9
39	30	9057	9812	10309	8884,5	7598,8	9702,9	8327,6	8592,6
40	50	24980	15025	27127	24047,9	21408,7	23811,3	23054,0	22528,1
41	100	99570	36025	104000	95130,7	59781,4	83073,1	93785,0	89257,6
42	10	493,8	841,8	1085	776,9	741,6	735,6	748,8	732,4
43	20	1909	2930	3584	2538,0	2589,1	2562,6	2557,7	2516,4
44	30	4122	6055	7241	5440,0	5312,5	5574,2	5203,5	5539,9
45	50	11410	16947	17991	13607,5	15145,9	14076,9	13718,7	13497,5
46	100	45270	48937	64836	51952,8	46232,7	48057,6	49668,4	49343,0
47	200	181100	115565	244091	209277,0	126631,4	185005,9	205308,5	204245,5
48	10	568,7	845,5	1049	792,6	763,9	765,3	752,2	775,5
49	20	2160	3362	3501	2330,6	2345,1	2323,8	2293,0	2317,8
50	30	4670	6571	7069	5272,9	5278,0	5149,9	5115,5	5218,8
51	50	12830	15586	17536	14052,0	15044,3	14091,5	14433,4	14032,6
52	100	51060	48068	63073	50557,9	49678,9	55102,7	50061,6	47377,3
53	200	204000	114342	237182	198009,0	129905,7	179377,9	195654,8	184300,8

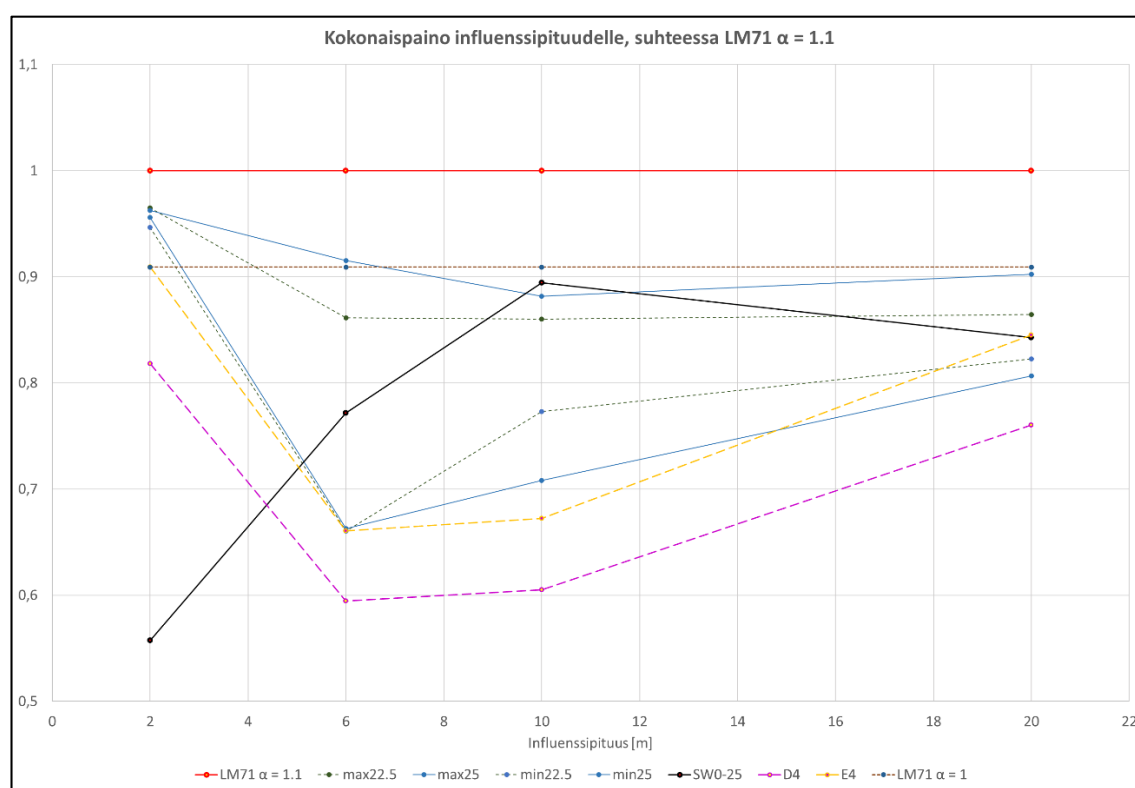
Taulukko 8 Kuormavaikutukset E4-luokittelukaaviolla, LM71-25 ja SW0-25 kuorma-kaavioilla sekä 25 tonnin radoilta Gumbel-jakauman perusteella

	Nro.	L	E4	SW/0 $\alpha=1.1$	LM71 $\alpha=1.1$	MP 5000	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5007	MP 5012
Q	1	2	500	306,6	550	525,7	527,2	526,1	529,4	528,9	526,0	526,2
	2	6	750	876	1135	763,6	978,5	993,7	756,6	752,1	982,2	1039,0
	3	10	1000	1460	1487	1311,1	1204,3	1225,0	1061,6	1053,0	1273,2	1287,6
	4	20	2000	2190	2367	1909,5	1961,4	1955,1	1938,1	1935,8	1930,7	2135,7
	5	30	2750	3606	3247	2592,0	2830,4	2824,9	2653,1	2629,1	2823,0	3039,4
	6	50	4250	4380	5007	3981,8	4202,1	4210,7	4203,1	4274,7	4178,3	5014,4
	7	100	8250	4380	9407	7359,8	7917,3	7912,8	8178,4	8141,0	7948,4	8897,1
	8	200	16250	4380	18210	14604,4	15022,8	14899,7	15020,0	15033,0	15173,4	17746,2
M0	9	2	125	73	138,8	130,5	130,6	130,3	129,9	130,3	130,0	130,5
	10	6	525	657	806,7	647,7	634,4	640,8	597,3	597,6	638,7	602,9
	11	10	1300	1825	2034	1373,3	1511,6	1521,5	1433,4	1425,1	1488,9	1649,8
	12	20	4150	6844	6654	4482,8	4308,0	4325,5	4391,3	4439,3	4530,0	6111,6
	13	30	9150	12672	13470	9338,8	9489,2	9581,0	9583,4	9629,2	9395,3	11133,7
	14	50	25000	32522	33710	24301,1	25202,9	25278,3	25498,0	25584,0	25018,6	28554,8
V0	15	2	275	153,3	330	284,7	279,4	280,3	277,6	282,2	284,3	276,6
	16	6	475	445,3	642,5	468,6	513,4	513,6	500,5	498,9	503,6	482,3
	17	10	670	737	904,5	641,1	689,4	697,5	679,8	672,5	691,1	707,1
	18	20	1045	1374	1418	997,3	1070,5	1074,7	1038,1	1025,0	1052,5	1245,0
	19	30	1433	1877	1880	1361,1	1437,8	1431,1	1407,0	1393,8	1423,9	1666,2
	20	50	2236	2838	2777	2083,1	2178,0	2207,1	2160,0	2163,1	2153,8	2585,1
V1	21	2	125	40,2	138,8	131,4	130,5	130,7	130,4	131,3	131,2	131,1
	22	6	175	113,1	176	181,9	179,6	180,6	180,3	182,1	180,6	180,7
	23	10	210	186	318	214,2	232,9	232,4	226,0	224,7	228,6	216,2
	24	20	262,5	369	493,2	324,4	324,2	330,0	320,2	318,3	327,8	319,6
	25	30	368,3	551	624,4	434,6	412,2	412,3	387,8	385,8	423,3	391,0
	26	50	560	802	861,3	642,9	629,3	602,5	576,3	580,9	628,2	610,2
M1+	27	10	905,2	1389	1587	1034,1	1074,9	1072,7	1050,3	1015,4	1062,5	1127,4
	28	20	3332	5266	5176	3564,9	3558,0	3478,3	3215,1	3124,9	3678,7	3851,6
	29	30	6842	9687	10450	7473,8	7017,9	7243,7	6865,3	6691,3	7547,5	7665,2
	30	50	19080	25556	26030	19447,2	18599,0	18955,9	18761,5	18723,0	19482,2	21135,3
	31	100	76210	69769	94280	70271,3	72238,9	72098,6	73812,7	75376,1	71905,9	85180,6
M1-	32	10	819,1	1372	1556	1022,6	1013,5	1025,3	984,9	956,8	1044,6	1089,5
	33	20	3188	5190	5097	3504,9	3469,4	3476,3	3026,6	3035,8	3481,6	3366,6
	34	30	6938	9684	10300	7534,2	7006,3	7271,7	6598,3	6571,9	7283,8	7724,1
	35	50	18860	24645	25670	18777,0	18502,2	18780,7	18472,4	18327,2	19320,5	20837,1
	36	100	75230	68313	93040	68285,0	71563,5	70267,9	73519,3	72653,0	70365,3	84186,0
M2	37	10	1235	1594	1535	1274,7	1353,3	1345,7	1309,5	1307,1	1313,8	1568,2
	38	20	4139	6614	5351	4041,3	4215,2	4179,8	4147,8	4122,5	4193,8	5608,0
	39	30	9113	10793	11340	8444,1	8963,9	8951,1	9036,6	9177,4	8880,3	10786,1
	40	50	25250	16527	29840	22627,8	23918,8	24034,2	24610,8	24779,1	23837,1	28632,6
	41	100	99770	39627	114400	90220,4	92477,3	92018,1	93372,4	94802,3	93420,7	117523,9
M3+	42	10	582,4	926	1194	756,8	758,0	773,5	724,4	705,6	759,0	743,7
	43	20	1995	3223	3942	2465,4	2337,8	2300,1	2218,8	2254,8	2423,3	2368,2
	44	30	4240	6660	7965	5327,1	5193,0	5220,6	4812,5	4870,6	5727,7	5255,3
	45	50	11480	18642	19790	12993,4	13432,6	13496,3	13208,3	13331,6	13526,1	13844,7
	46	100	45400	53831	71320	52044,1	53483,9	54983,5	52933,9	53454,6	54161,8	56044,3
	47	200	181200	127121	268500	205744,3	216259,0	212210,4	214117,0	213030,2	213113,1	207372,9
M3-	48	10	642,5	930	1154	741,2	800,6	802,2	766,4	749,5	792,7	778,5
	49	20	2244	3698	3851	2260,1	2289,5	2236,5	2233,1	2191,8	2283,4	2422,4
	50	30	4667	7228	7776	5324,6	5018,7	5264,3	4578,3	4608,6	5138,1	5261,8
	51	50	12920	17145	19290	14065,4	12730,3	12956,5	12647,1	12737,2	13652,7	14744,4
	52	100	51160	52875	69380	46616,3	48377,8	48589,0	50091,8	50013,5	48650,5	55459,2
53	200	204000	125776	260900	184025,5	193858,8	188545,1	197365,0	196914,0	188590,7	215241,1	

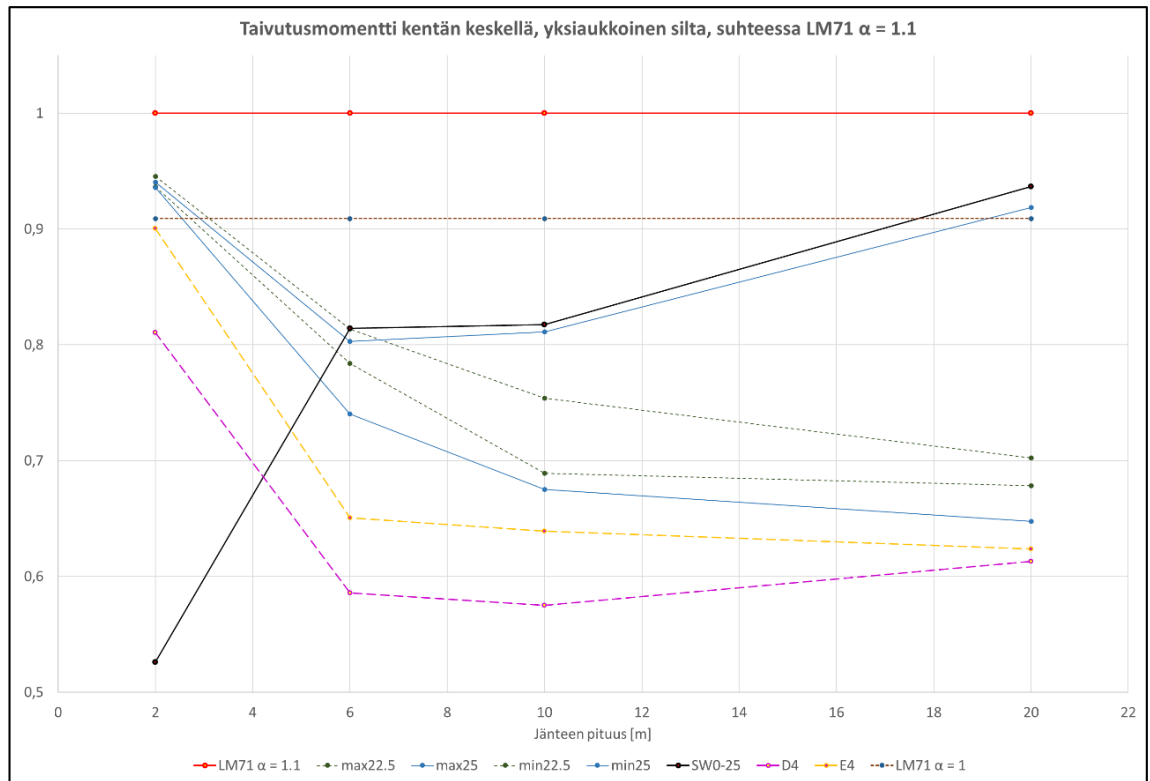
LIITE 5: KUORMAVAIKUTUKSET VERRATTUNA LM-71 JA SW/0 KUORMAKAAVIOIHIN VIIVAKAAVIOINA

Kuvaajissa esitetään sekä 22,5 tonnin, että 25 tonnin ratojen pienimmät ja suurimmat kuormavaikutukset, joten niistä havaitsee eri mittauspisteiden välistä hajontaa. Kuormavaikutuksia verrataan LM71-25 kaavioon, joka näkyy suorana arvossa 1. Tämän lisäksi verrokkina on myös LM71-22.5 kaavion vaikutus ja sellaisilla influensseilla, joissa mennään LM71-25 kaavion vaikutusten yli, verrataan myös raskaampaan kaavioon LM71-27.5. Lisäksi mukana on infran ja kaluston luokittelussa käytettävät D4- ja E4-kaaviot sekä mitoituskaavio SW/0-25.

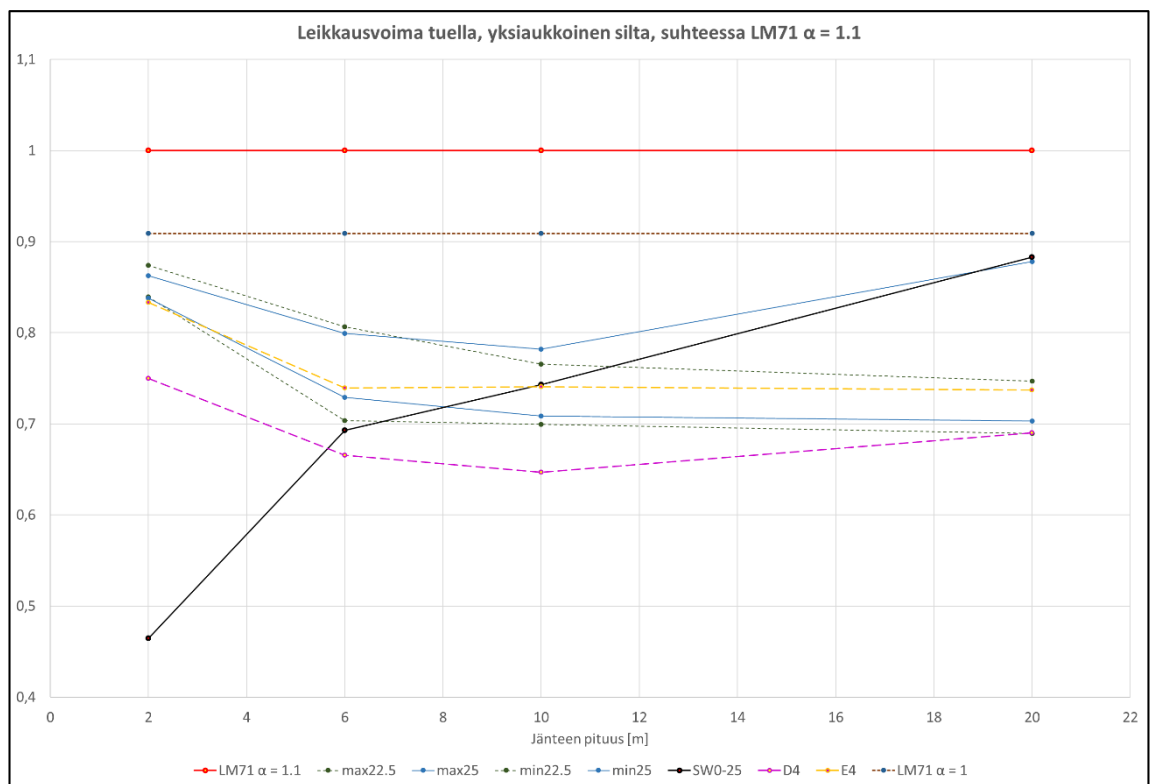
Influenssipituudet 2-20 m, kuormavaikutukset Gumbel-jakaumasta:



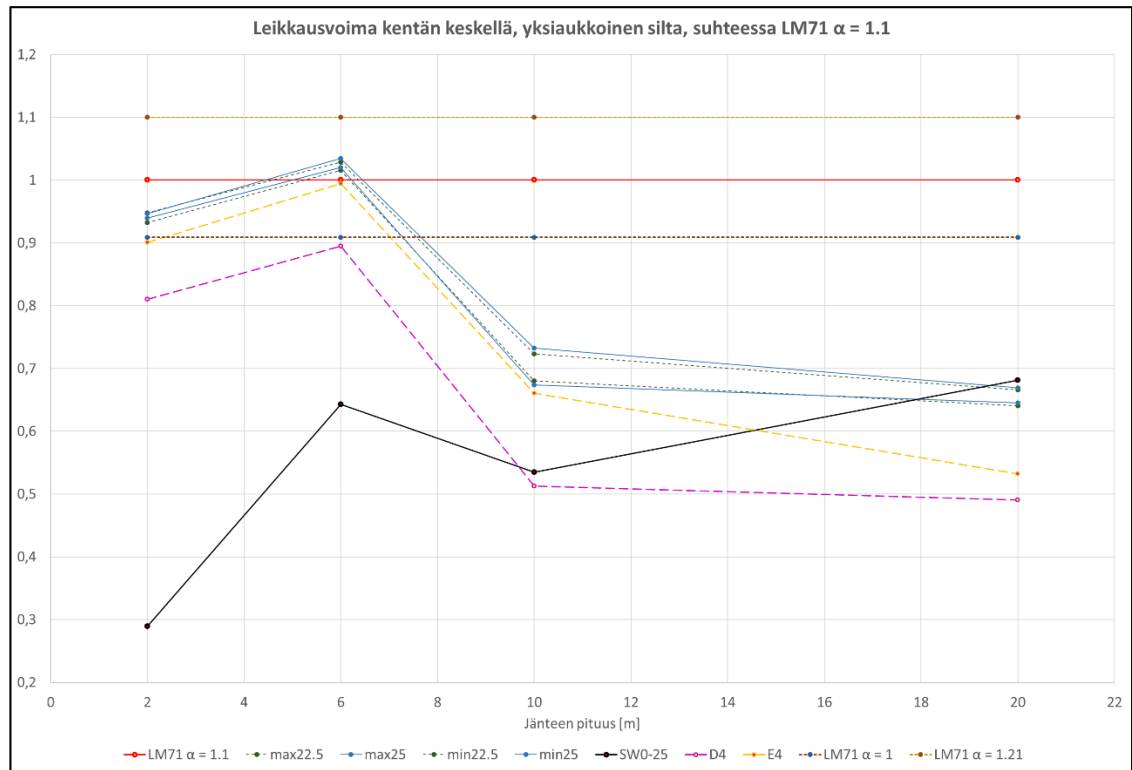
Kuva 1 Kokonaispainot suhteessa kuormakaavioihin, influenssipituuksilla 2-20 m, Gumbel-jakaumasta.



Kuva 2 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen kentässä, influenssipituuksilla 2-20 m, Gumbel-jakaumasta.

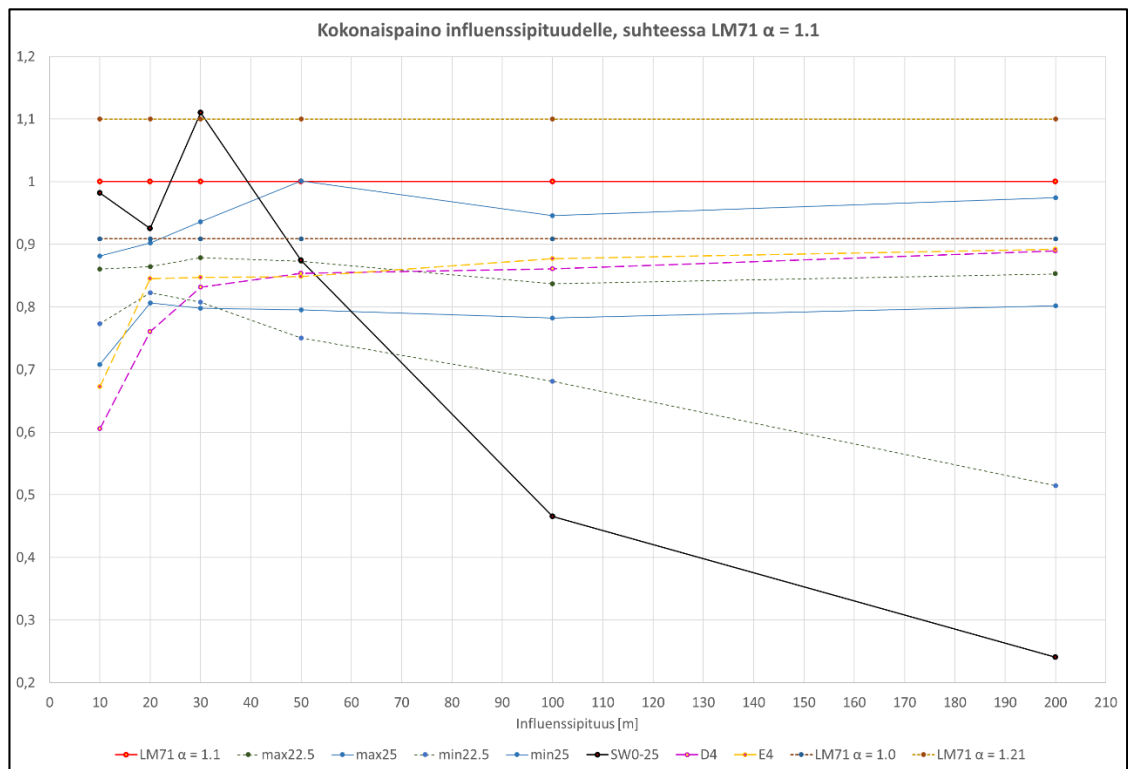


Kuva 3 Leikkausvoimat suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen tuella, influenssipituuksilla 2-20 m, Gumbel-jakaumasta.

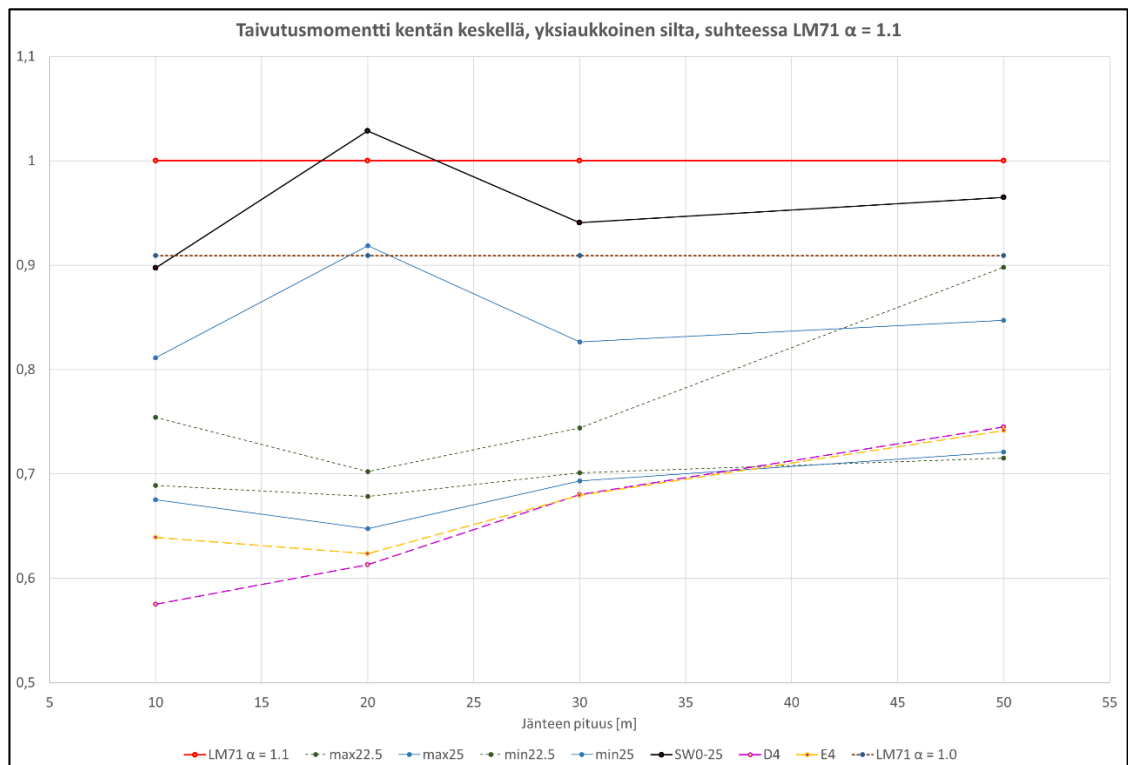


Kuva 4 Leikkausvoimat suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen kentän keskellä, influenssipituuksilla 2-20 m, Gumbel-jakaumasta.

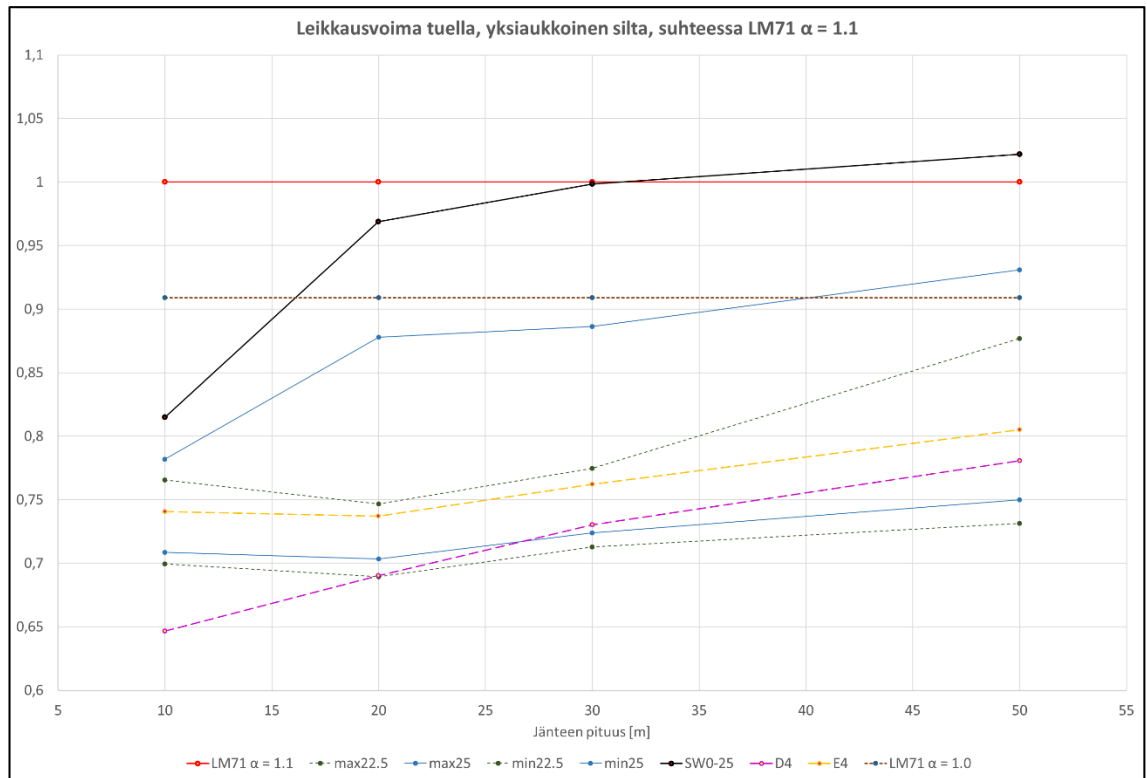
Influenssipituudet 10 m ja suuremmat, kuormavaikutukset Gumbel-jakaumasta:



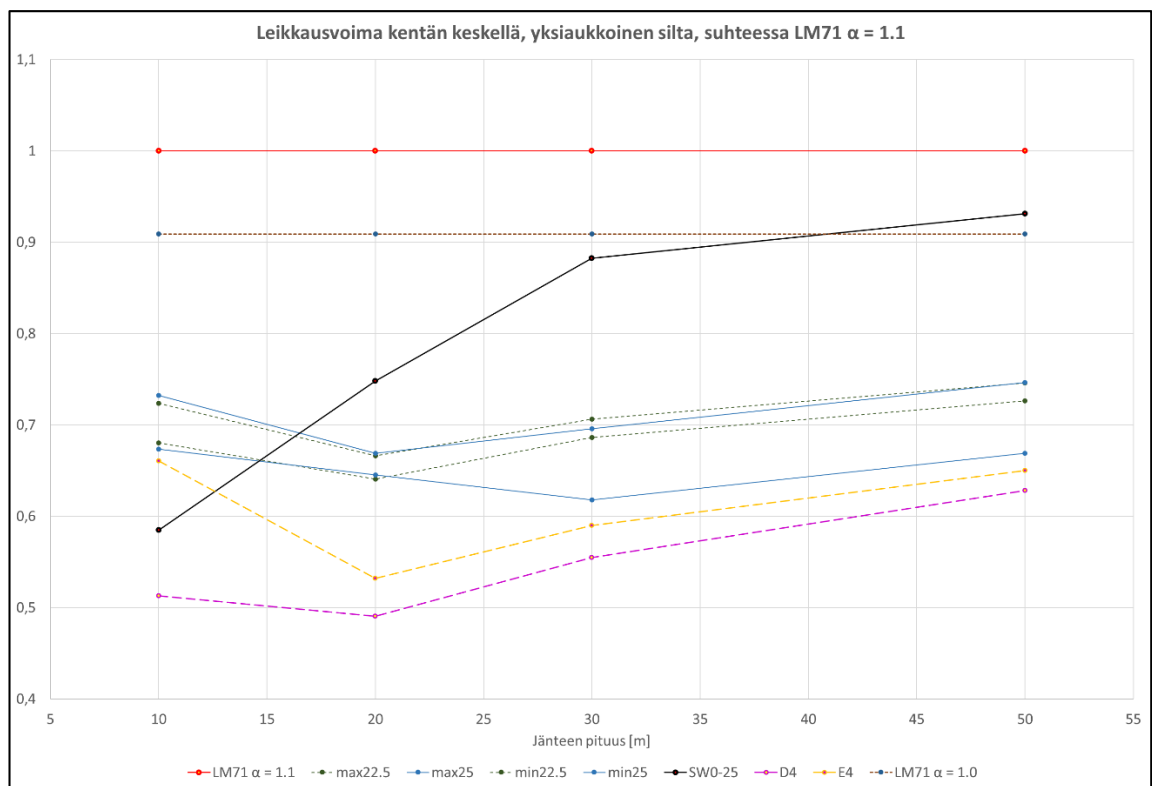
Kuva 5 Kokonaispainot suhteessa kuormakaavioihin, influenssipituuksilla 10-200 m, Gumbel-jakaumasta.



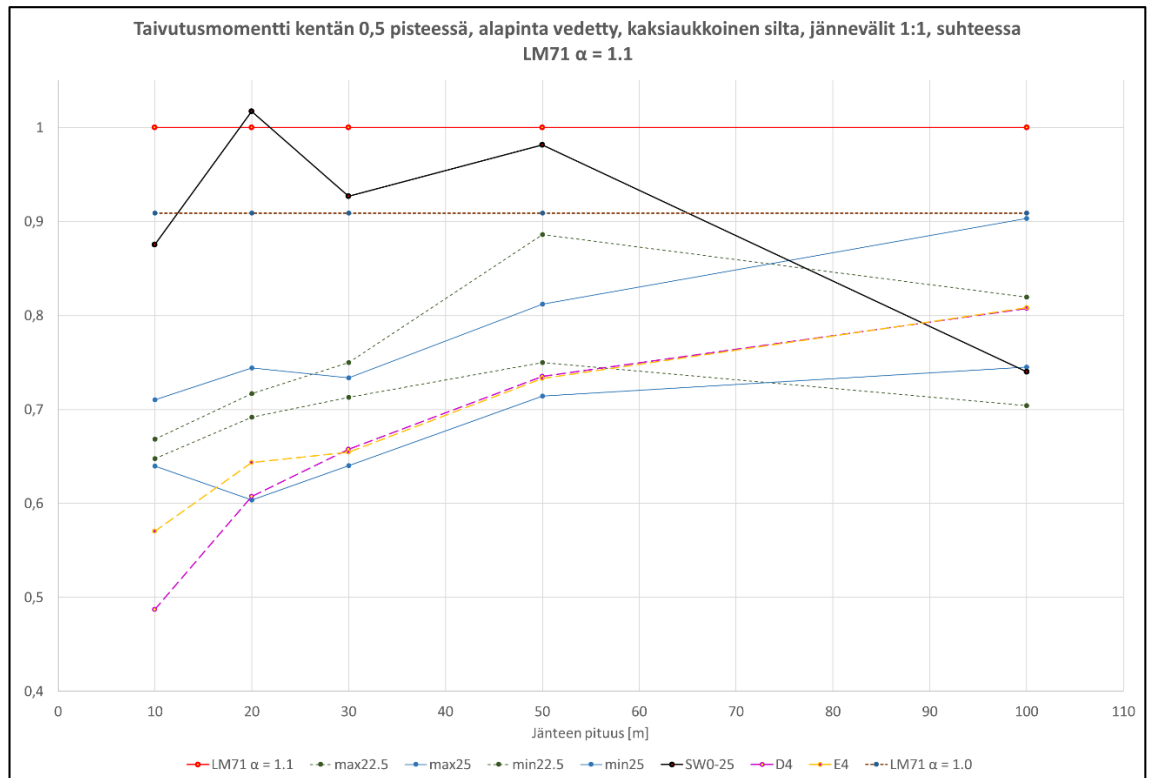
Kuva 6 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen kentässä, influenssipituuksilla 10-50 m, Gumbel-jakaumasta.



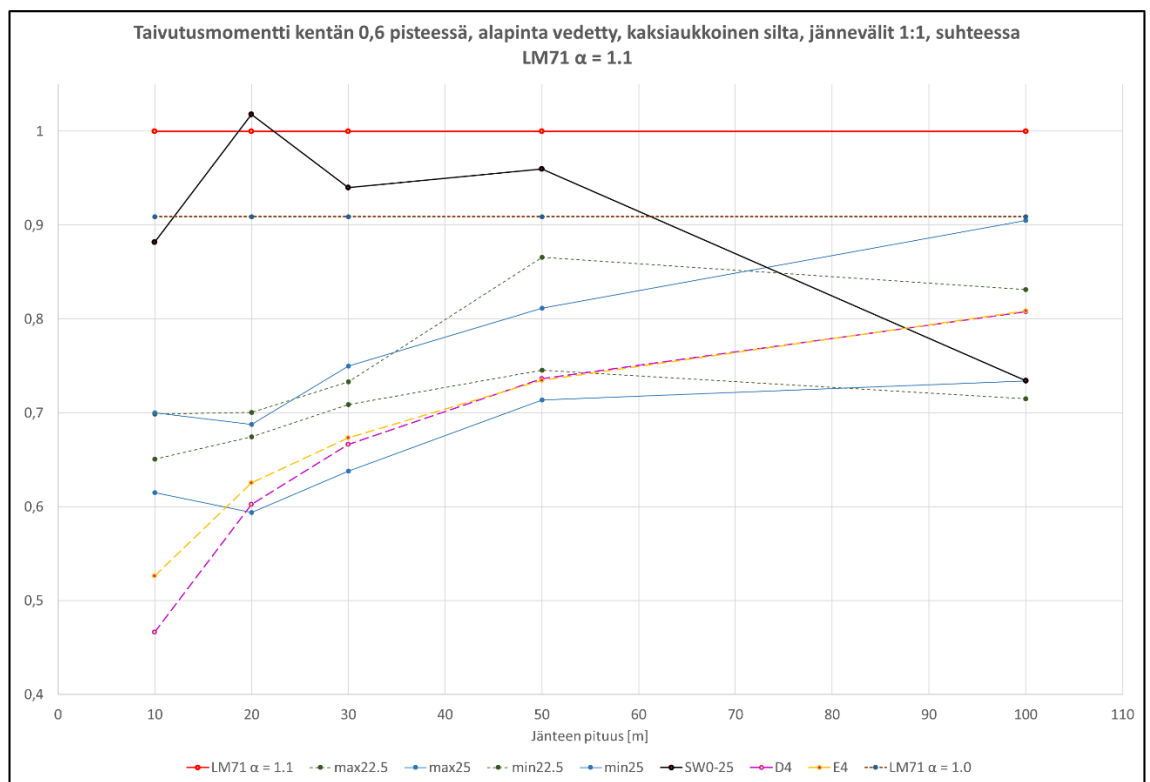
Kuva 7 Leikkausvoimat suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen tuella, influenssipituuksilla 10-50 m, Gumbel-jakaumasta.



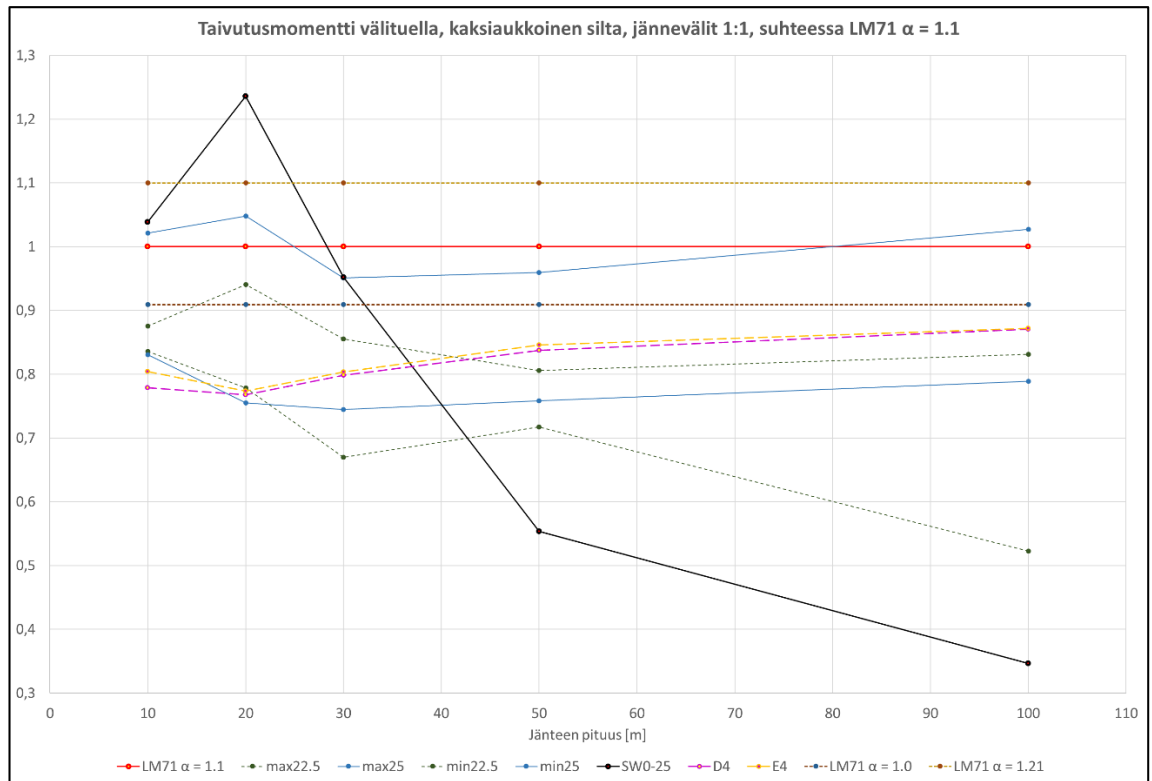
Kuva 8 Leikkausvoimat suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen kentän keskellä, influenssipituuksilla 10-50 m, Gumbel-jakaumasta.



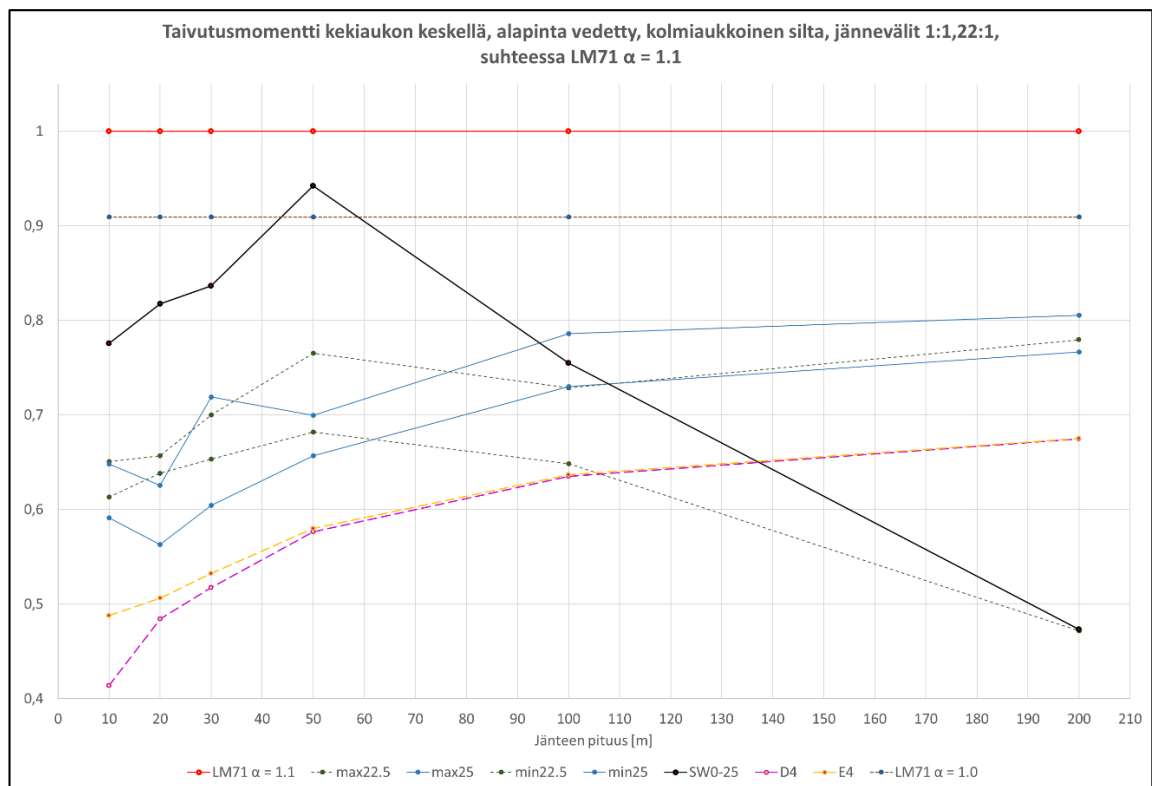
Kuva 9 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kaksiaukkoisen kentän keskellä, influenssipituuksilla 10-100 m, Gumbel-jakaumasta.



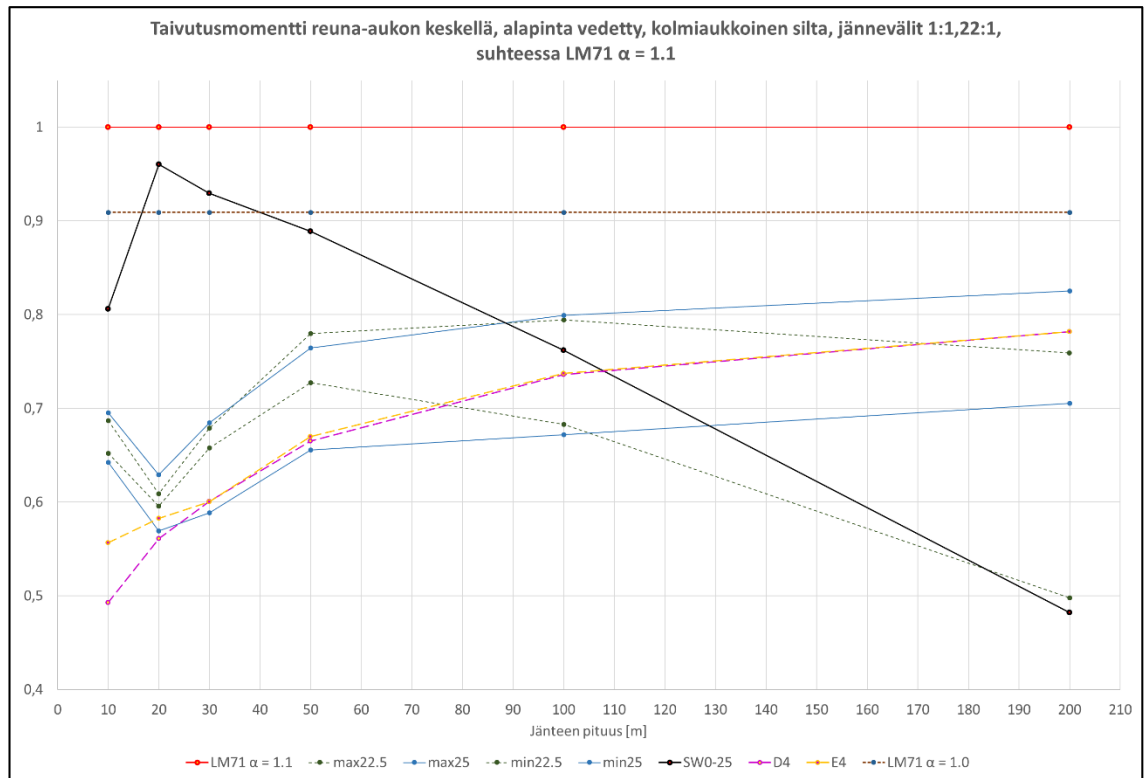
Kuva 10 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kaksiaukkoisen kentän 0.6 pisteessä reunalta, influenssipituuksilla 10-100 m, Gumbel-jakaumasta.



Kuva 11 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kaksiaukkoisen tuella, influenssipituuksilla 10-100 m, Gumbel-jakaumasta.

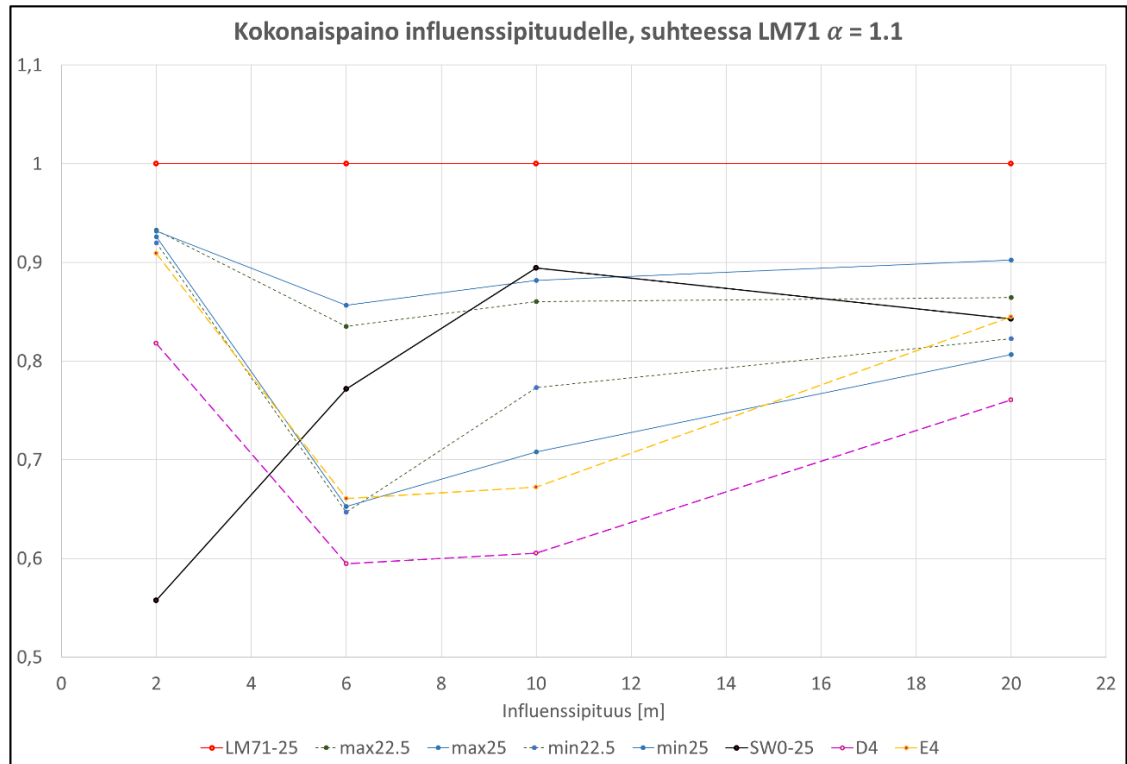


Kuva 12 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kolmiaukkoisen keskikentän keskellä, influenssipituuksilla 10-200 m, Gumbel-jakaumasta.

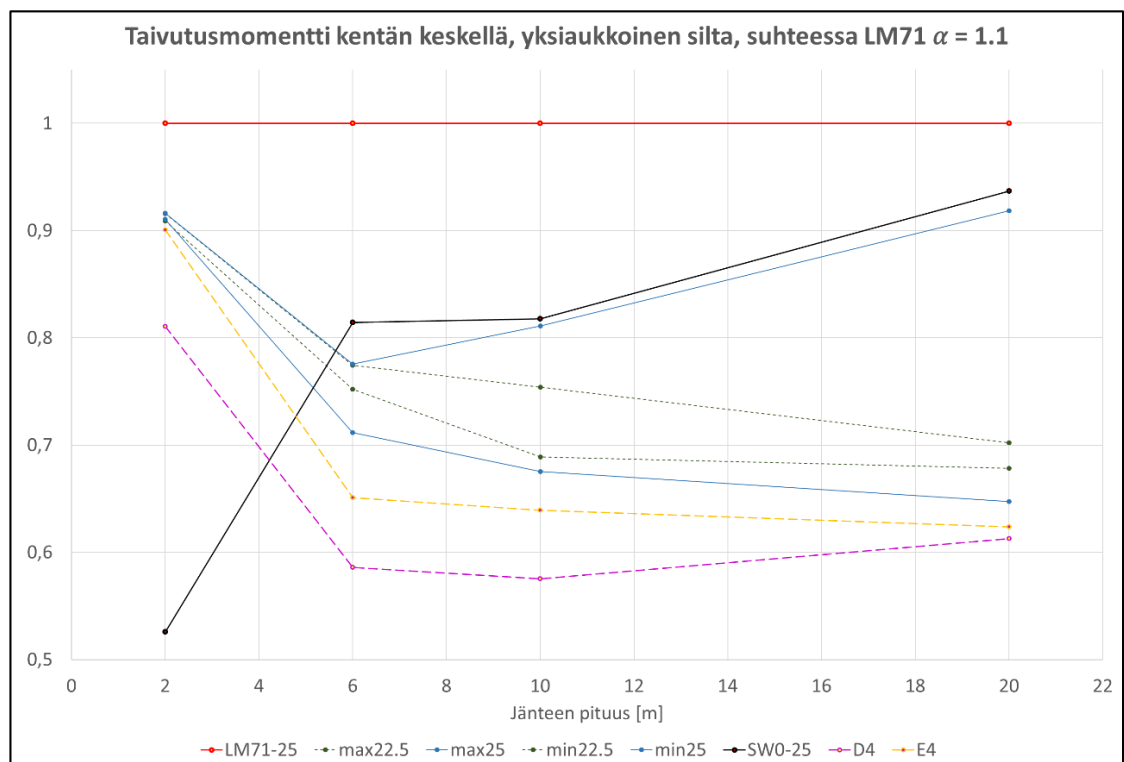


Kuva 13 *Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kolmiaukkoisen reunaken-
tän keskellä, influenssipituuksilla 10-200 m, Gumbel-jakaumasta.*

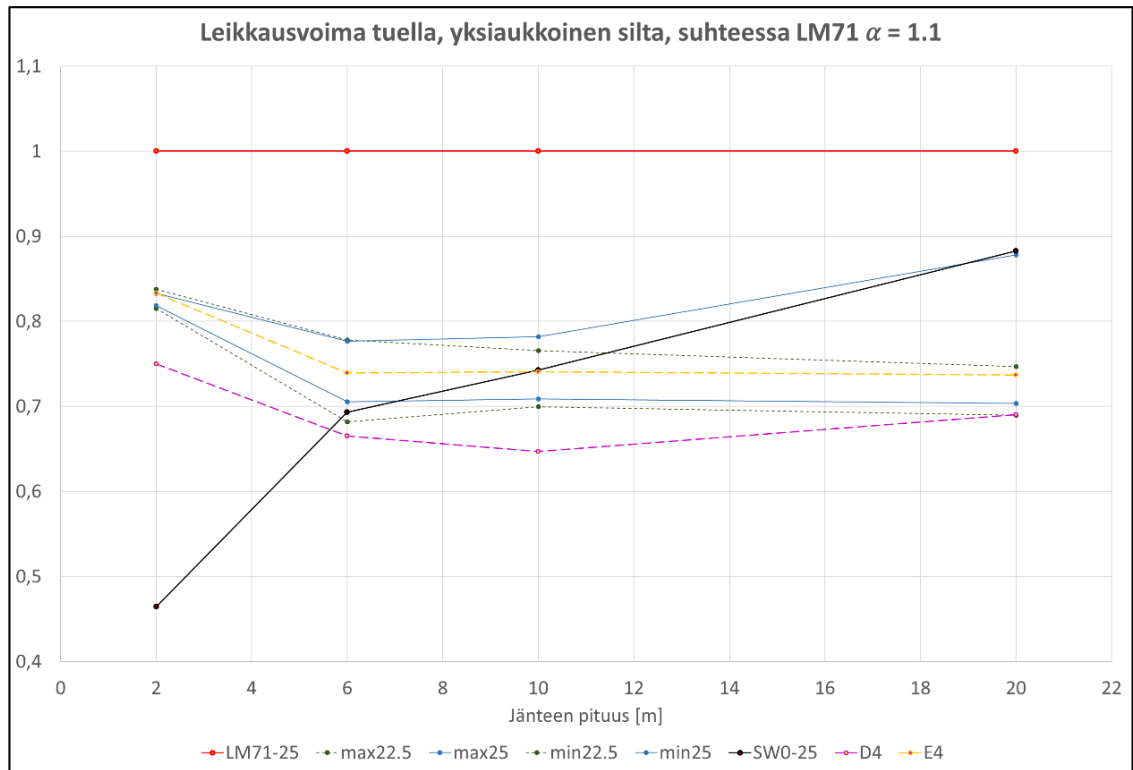
Influenssipituudet 2-20 m, kuormavaikutukset Weibull-jakaumasta:



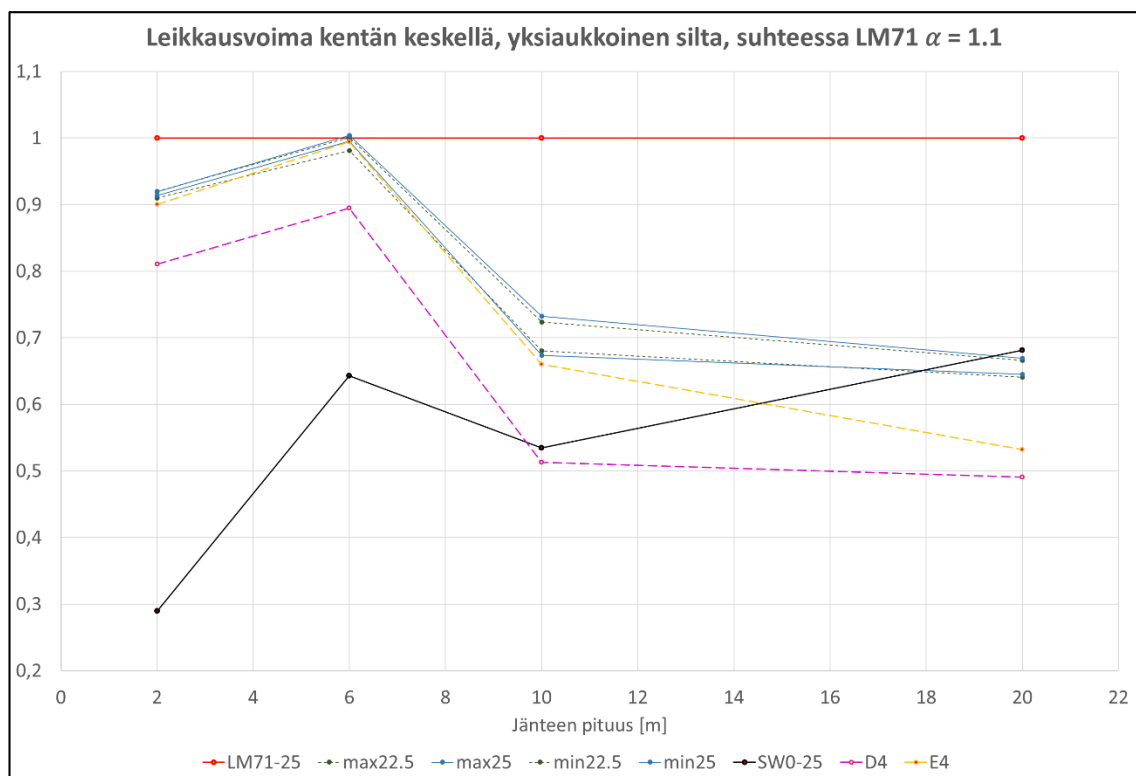
Kuva 14 Kokonaispainot suhteessa kuormakaavioihin, influenssipituuksilla 2-20 m, Weibull-jakaumasta.



Kuva 15 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen kentässä, influenssipituuksilla 2-20 m, Weibull-jakaumasta.

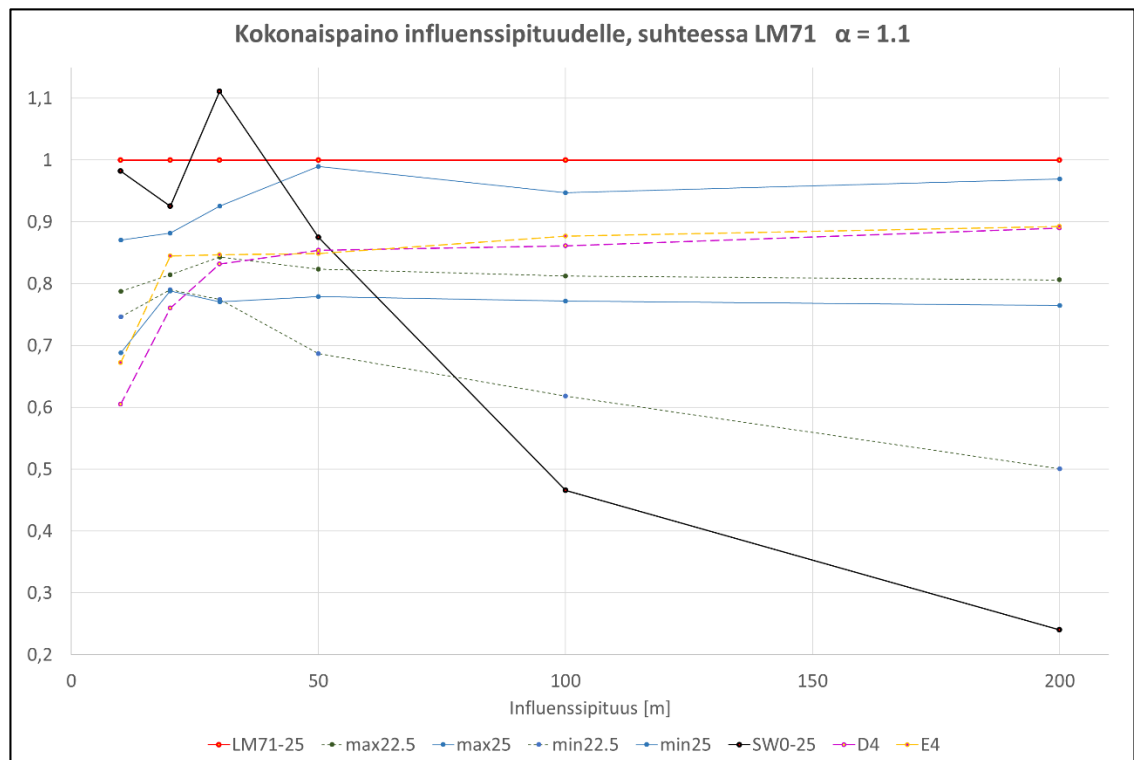


Kuva 16 Leikkausvoimat suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen tuella, influenssipituuksilla 2-20 m, Weibull-jakaumasta.

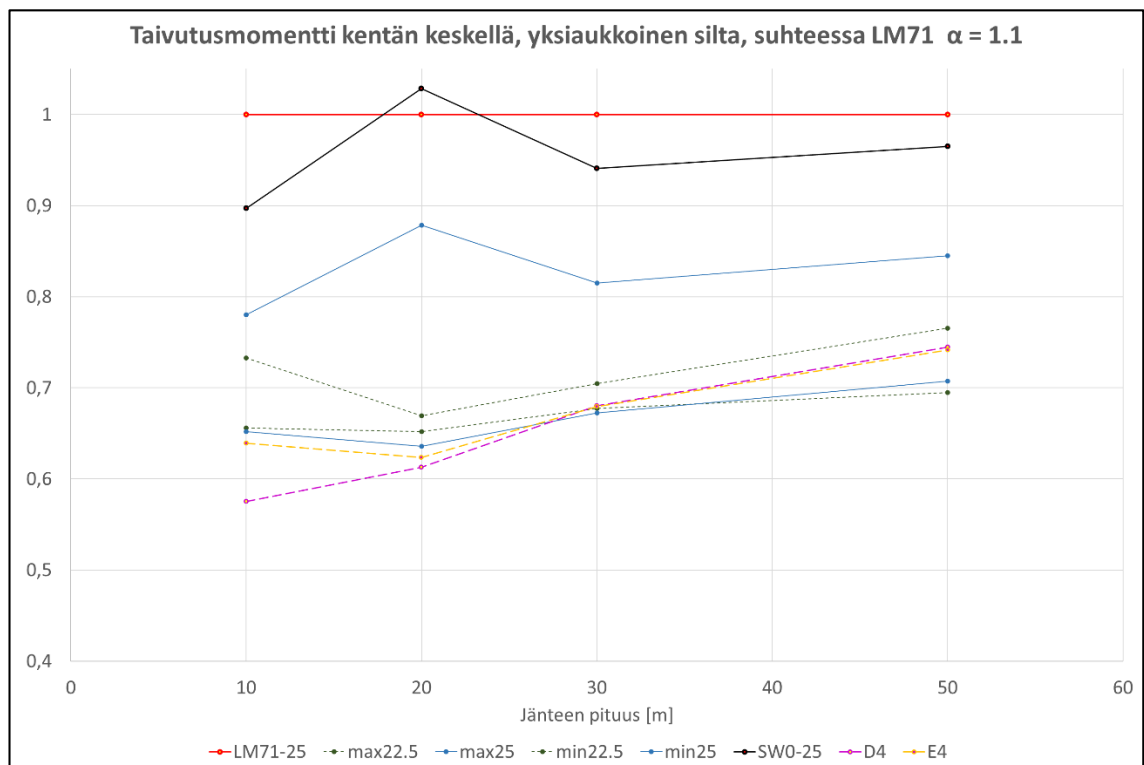


Kuva 17 Leikkausvoimat suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen kentän keskellä, influenssipituuksilla 2-20 m, Weibull-jakaumasta.

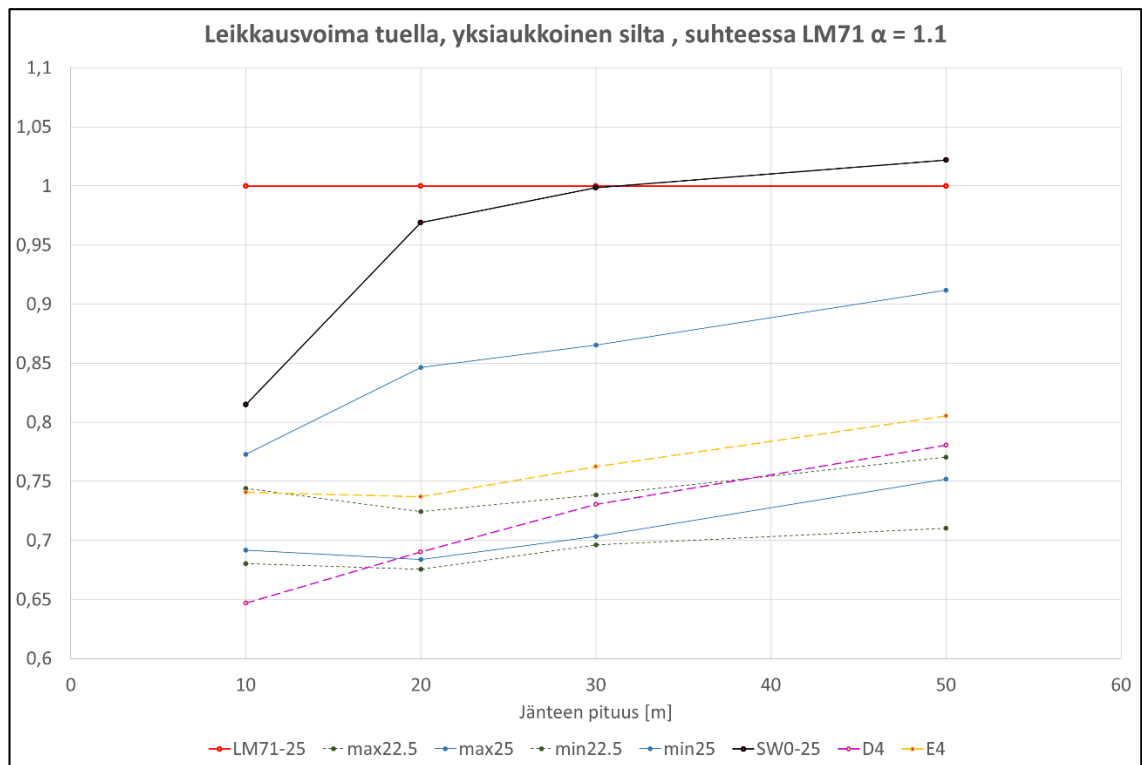
Influenssipituudet 10 m ja suuremmat, kuormavaikutukset Weibull-jakaumasta:



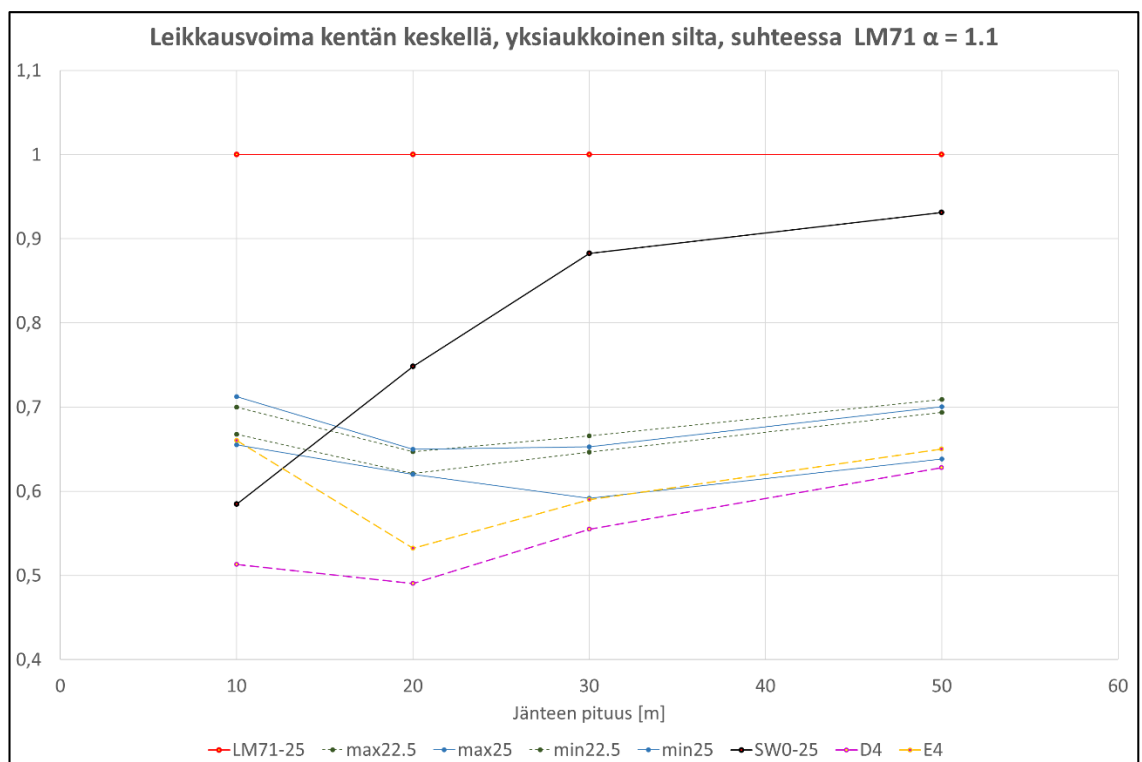
Kuva 18 Kokonaispainot suhteessa kuormakaavioihin, influenssipituuksilla 10-200 m, Weibull-jakaumasta.



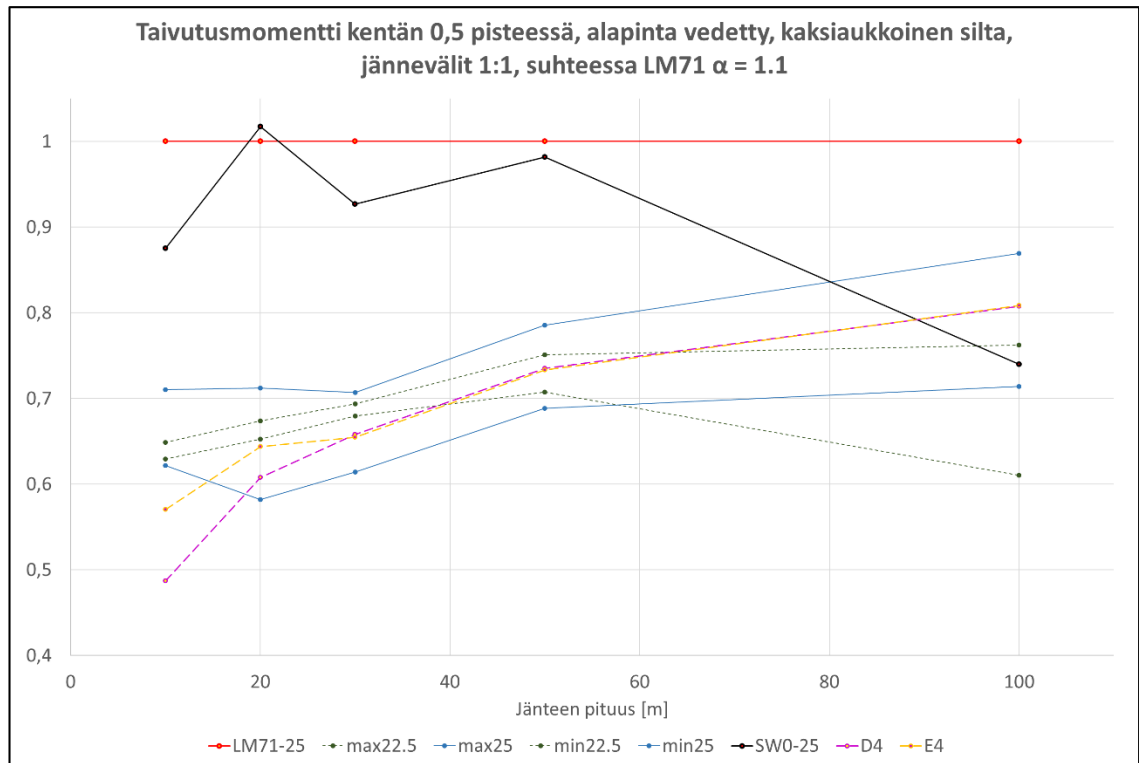
Kuva 19 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen kentässä, influenssipituuksilla 10-50 m, Weibull-jakaumasta.



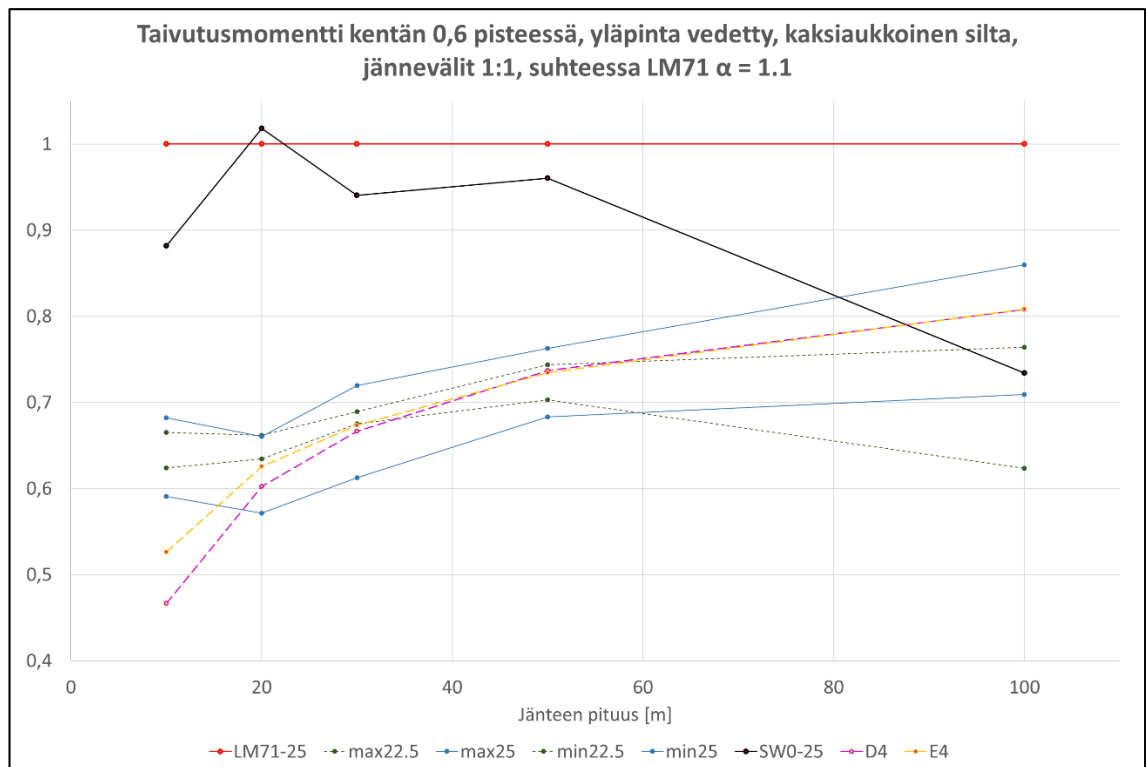
Kuva 20 Leikkausvoimat suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen tuella, influenssipituuksilla 10-50 m, Weibull-jakaumasta.



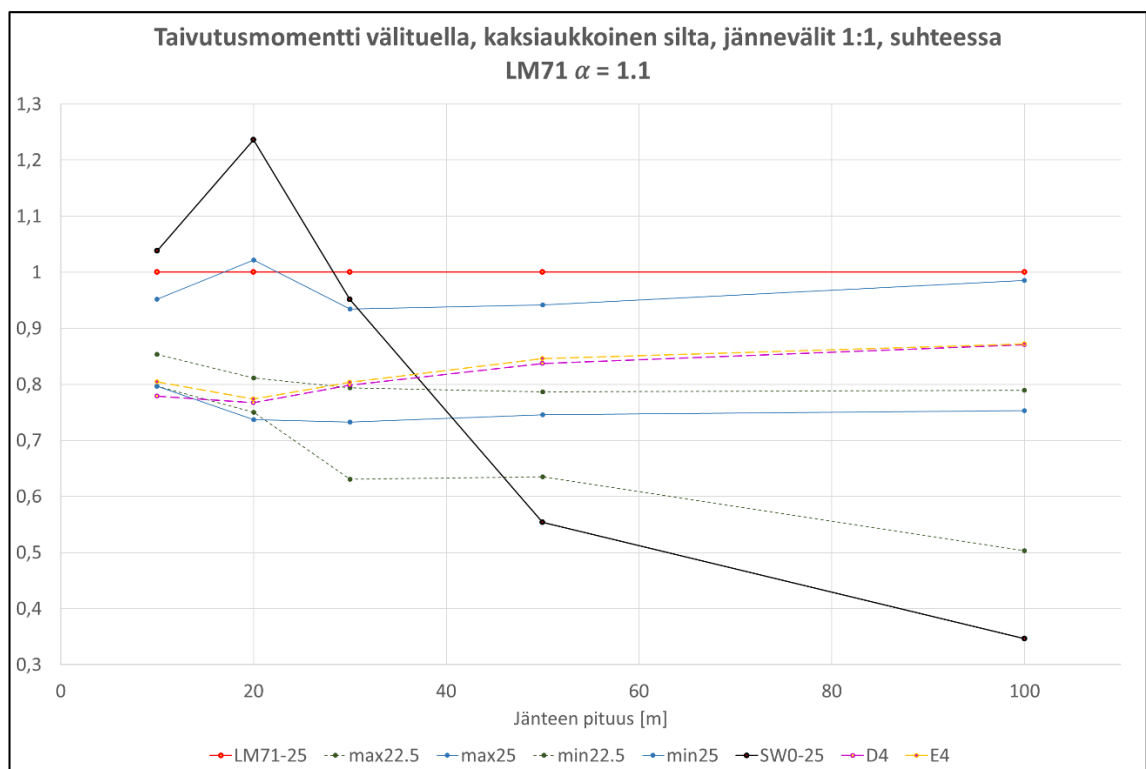
Kuva 21 Leikkausvoimat suhteessa kuormakaavioihin yksiaukkoisen kentän keskellä, influenssipituuksilla 10-50 m, Weibull-jakaumasta.



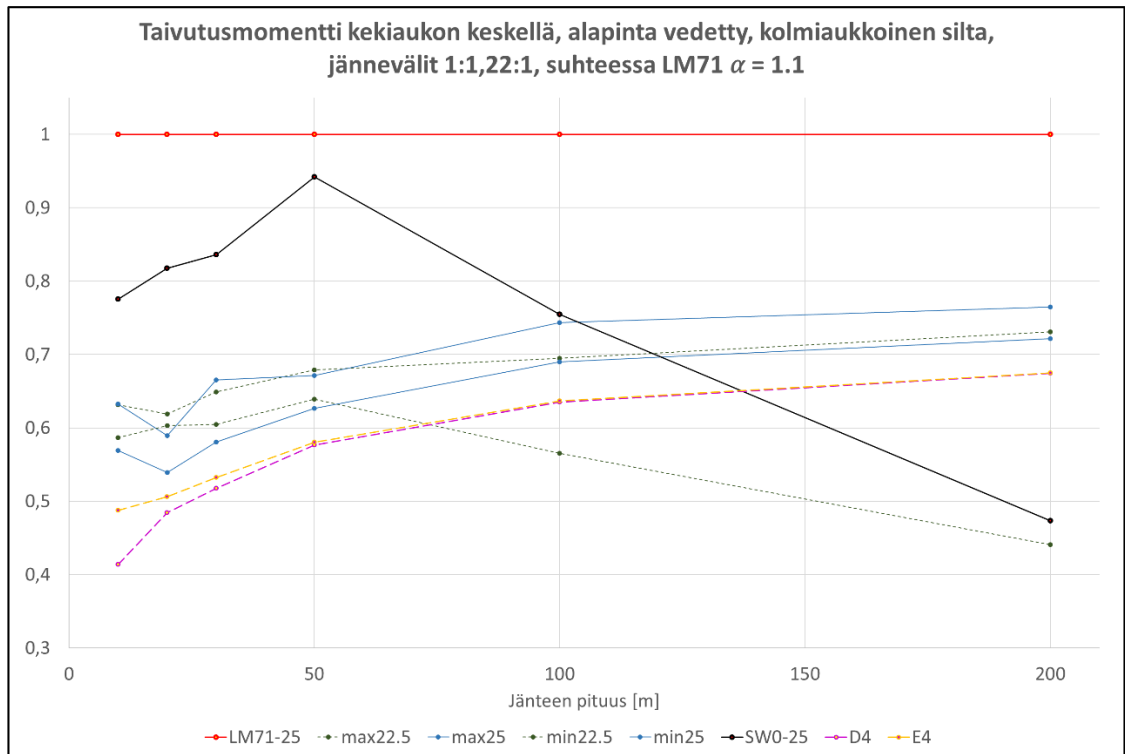
Kuva 22 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kaksiaukkoisen kentän keskellä, influenssipituuksilla 10-100 m, Weibull-jakaumasta.



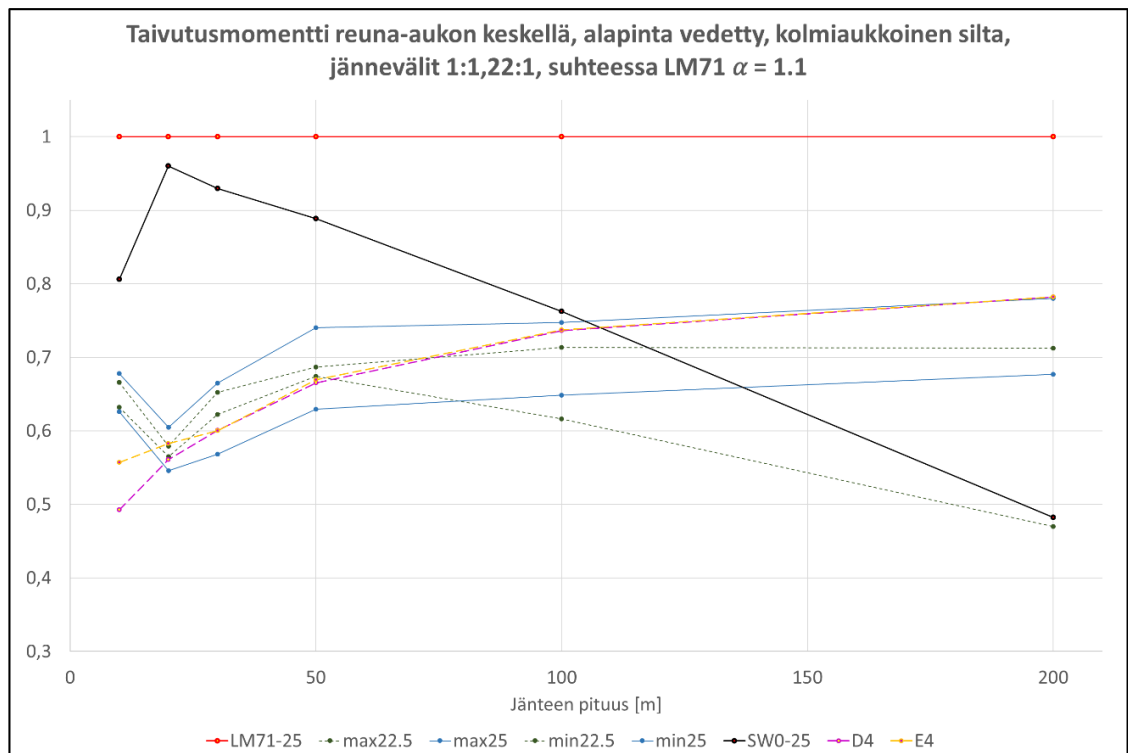
Kuva 23 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kaksiaukkoisen kentän 0.6 pisteessä reunalta, influenssipituuksilla 10-100 m, Weibull-jakaumasta.



Kuva 24 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kaksiaukkoisen tuella, influenssipituuksilla 10-100 m, Weibull-jakaumasta.



Kuva 25 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kolmiaukkoisen keskikentän keskellä, influenssipituuksilla 10-200 m, Weibull-jakaumasta.



Kuva 26 Taivutusmomentit suhteessa kuormakaavioihin kolmiaukkoisen reunakentän keskellä, influenssipituuksilla 10-200 m, Weibull-jakaumasta.

LIITE 6: SIMULOITUJEN ÄÄRIARVOJAKAUMIENJAKAUMIEN TI- LASTOLLISIA PARAMETREJÄ

Taulukko 1 Kymmenen vuoden kuukaussittaisen ääriarvojen keskiarvot.

	Nro.	L	MP 5000	MP 5001	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5006	MP 5007	MP 5008	MP 5009	MP 5011	MP 5012
Q	1	2	485,6	490,9	497,3	497,3	495,8	493,6	485,8	487,8	498,4	476,7	480,8	498,4
	2	6	716,1	898,7	914,0	917,7	721,7	718,8	715,1	881,1	723,5	711,1	711,7	749,7
	3	10	1050,0	1061,0	1015,0	1025,0	978,8	973,8	1074,0	1064,0	1078,0	976,2	1021,0	981,6
	4	20	1785,0	1830,0	1858,0	1862,0	1828,0	1823,0	1768,0	1847,0	1764,0	1708,0	1769,0	1817,0
	5	30	2330,0	2568,0	2672,0	2676,0	2484,0	2470,0	2266,0	2577,0	2376,0	2282,0	2374,0	2486,0
	6	50	3619,0	3936,0	4024,0	4025,0	3927,0	3902,0	2972,0	3938,0	3785,0	3515,0	3620,0	3991,0
	7	100	6975,0	7302,0	7536,0	7590,0	7273,0	7328,0	4944,0	7406,0	6733,0	6724,0	6938,0	7397,0
	8	200	13080,0	13590,0	14110,0	14450,0	13600,0	13650,0	8589,0	14060,0	12650,0	11960,0	12920,0	13480,0
M0	9	2	120,8	121,5	122,5	122,5	122,3	121,8	120,1	120,8	122,8	120,0	120,6	123,1
	10	6	551,8	586,6	591,4	595,1	547,4	539,1	559,9	573,6	557,0	546,5	566,6	525,4
	11	10	1218,0	1406,0	1421,0	1426,0	1330,0	1315,0	1242,0	1383,0	1229,0	1209,0	1243,0	1215,0
	12	20	4029,0	4106,0	4120,0	4116,0	4052,0	4043,0	4061,0	4102,0	4036,0	3940,0	4044,0	4167,0
	13	30	8544,0	8882,0	9045,0	9065,0	8839,0	8795,0	8450,0	8833,0	8608,0	8368,0	8618,0	8972,0
	14	50	22610,0	23470,0	24010,0	24060,0	23670,0	23610,0	20720,0	23530,0	22790,0	22030,0	22610,0	24060,0
V0	15	2	256,8	255,4	259,4	259,3	259,1	258,4	256,7	257,4	259,7	249,8	254,2	258,5
	16	6	431,4	464,2	475,5	475,5	450,3	446,4	429,1	462,4	436,7	418,1	419,2	437,2
	17	10	602,5	639,3	650,8	652,5	625,7	620,0	596,2	641,0	605,6	583,8	585,0	612,9
	18	20	918,5	980,4	1008,0	1010,0	965,1	953,9	915,5	986,5	921,5	885,3	913,3	944,2
	19	30	1265,0	1333,0	1365,0	1367,0	1313,0	1306,0	1216,0	1338,0	1264,0	1227,0	1261,0	1313,0
	20	50	1944,0	2040,0	2086,0	2091,0	2023,0	2011,0	1729,0	2047,0	1964,0	1891,0	1936,0	2049,0
V1	21	2	120,9	121,3	122,4	122,5	122,2	122,2	120,0	120,9	123,3	120,1	120,3	123,2
	22	6	167,4	167,5	168,6	168,4	169,0	168,7	166,8	167,7	169,9	164,1	166,2	169,9
	23	10	197,8	210,3	216,0	216,1	204,6	202,9	199,4	210,5	201,3	195,7	198,5	201,3
	24	20	303,0	300,7	299,4	300,3	289,9	283,2	300,9	299,2	288,2	295,0	293,5	286,7
	25	30	367,3	376,0	355,1	355,9	348,4	342,1	374,4	371,6	370,8	363,8	376,2	344,3
	26	50	538,5	554,8	529,6	531,0	510,3	504,2	548,8	549,5	548,7	536,1	549,9	501,0
M1+	27	10	971,4	985,3	994,6	996,3	937,0	906,9	951,3	973,9	926,2	938,2	939,1	915,7
	28	20	3047,0	3143,0	3100,0	3025,0	2894,0	2843,0	3136,0	3156,0	3080,0	3027,0	3110,0	2883,0
	29	30	6461,0	6581,0	6312,0	6318,0	6071,0	5985,0	6548,0	6588,0	6532,0	6367,0	6593,0	6109,0
	30	50	16610,0	16970,0	17280,0	17370,0	16870,0	16740,0	15820,0	17290,0	17310,0	15780,0	16810,0	16830,0
	31	100	63800,0	64940,0	67760,0	68320,0	66390,0	66080,0	47510,0	66970,0	63120,0	59620,0	63240,0	66580,0
M1-	32	10	917,7	948,6	945,5	949,4	877,5	852,3	926,6	932,1	910,0	901,9	923,4	864,7
	33	20	2982,0	3063,0	2933,0	2887,0	2749,0	2713,0	3029,0	3057,0	3006,0	2929,0	3034,0	2744,0
	34	30	6301,0	6439,0	6268,0	6238,0	5957,0	5875,0	6403,0	6436,0	6409,0	6228,0	6459,0	5970,0
	35	50	16180,0	16550,0	16970,0	17010,0	16490,0	16350,0	15700,0	16940,0	16930,0	15480,0	16600,0	16480,0
	36	100	62660,0	63720,0	66640,0	67190,0	65450,0	65020,0	47370,0	65860,0	62780,0	58040,0	62300,0	65130,0
M2	37	10	1122,0	1251,0	1283,0	1284,0	1210,0	1198,0	1140,0	1243,0	1132,0	1103,0	1148,0	1107,0
	38	20	3743,0	3918,0	3994,0	3996,0	3855,0	3835,0	3562,0	3911,0	3775,0	3678,0	3779,0	3951,0
	39	30	8022,0	8400,0	8585,0	8586,0	8430,0	8430,0	6452,0	8431,0	8130,0	7804,0	7998,0	8610,0
	40	50	21650,0	22520,0	23000,0	23130,0	22580,0	22590,0	16010,0	22750,0	20610,0	20960,0	21530,0	23060,0
	41	100	81790,0	84810,0	87660,0	89170,0	85130,0	85120,0	52480,0	87150,0	78480,0	75870,0	81180,0	85690,0
M3+	42	10	707,6	712,8	715,5	718,0	651,9	636,9	694,2	694,2	658,2	682,1	676,0	653,5
	43	20	2086,0	2173,0	2142,0	2080,0	1993,0	1956,0	2216,0	2127,0	2075,0	2109,0	2175,0	1941,0
	44	30	4414,0	4530,0	4549,0	4449,0	4259,0	4214,0	4445,0	4619,0	4405,0	4304,0	4557,0	4214,0
	45	50	11410,0	11700,0	12130,0	11930,0	11400,0	11160,0	10970,0	11890,0	11370,0	10980,0	11620,0	11200,0
	46	100	44470,0	44320,0	46950,0	48320,0	44570,0	43960,0	32630,0	46990,0	42800,0	41130,0	43670,0	44630,0
	47	200	176000,0	178500,0	186100,0	196500,0	181500,0	182600,0	107000,0	189300,0	170600,0	158700,0	170900,0	175900,0
M3-	48	10	686,0	729,3	743,7	746,1	675,9	657,6	702,4	719,0	681,8	680,5	691,1	668,4
	49	20	1982,0	2049,0	2102,0	2054,0	1998,0	1968,0	2020,0	2061,0	1988,0	1963,0	2012,0	1965,0
	50	30	4450,0	4589,0	4377,0	4339,0	4094,0	4038,0	4541,0	4561,0	4528,0	4416,0	4564,0	4122,0
	51	50	11330,0	11630,0	11620,0	11620,0	11260,0	11140,0	11150,0	11750,0	11740,0	10850,0	11640,0	11250,0
	52	100	42830,0	43700,0	45450,0	45730,0	44590,0	44110,0	35370,0	44970,0	43710,0	39760,0	42660,0	44530,0
	53	200	166000,0	169500,0	176600,0	180500,0	173500,0	173000,0	108800,0	175800,0	160100,0	153900,0	164200,0	172100,0

Taulukko 2 Kymmenen vuoden kuukausittaisten ääriarvojen keskihajonnat.

	Nro.	L	MP 5000	MP 5001	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5006	MP 5007	MP 5008	MP 5009	MP 5011	MP 5012
Q	1	2	7,97	7,90	5,94	5,72	6,68	6,99	7,60	7,57	5,48	10,31	7,92	5,51
	2	6	9,44	15,64	12,82	15,08	6,92	6,61	7,64	20,06	7,82	9,18	7,57	57,43
	3	10	51,89	43,29	37,50	39,78	16,43	15,71	35,12	41,59	31,71	34,43	46,78	60,74
	4	20	24,75	23,43	20,49	18,55	21,80	22,40	55,17	16,64	49,90	56,12	38,82	63,23
	5	30	51,99	56,51	31,45	29,63	33,54	31,54	116,60	48,78	51,96	67,88	56,99	109,80
	6	50	71,99	56,90	35,36	36,84	54,86	74,02	172,20	47,76	116,30	47,96	92,47	203,20
	7	100	76,30	113,80	75,69	64,09	179,80	161,30	291,10	107,60	129,60	175,20	79,44	297,90
	8	200	302,90	386,20	181,70	89,34	281,30	274,40	154,90	221,70	152,60	663,60	318,60	846,80
M0	9	2	1,91	1,93	1,60	1,56	1,51	1,68	1,97	1,83	1,48	1,99	1,85	1,47
	10	6	19,03	10,75	8,55	9,08	9,90	11,61	15,14	12,92	19,74	17,05	17,51	15,37
	11	10	30,87	25,31	17,94	18,92	20,51	21,89	40,91	21,03	37,93	38,18	36,37	86,28
	12	20	90,18	90,84	37,28	41,64	67,29	78,58	121,60	85,01	115,20	114,20	106,90	386,10
	13	30	157,80	149,50	88,20	102,50	147,70	165,50	290,50	111,60	280,20	213,60	183,20	429,20
	14	50	336,50	333,80	236,00	241,00	363,90	392,00	1896,00	294,60	956,50	411,40	372,80	892,90
V0	15	2	5,54	4,27	3,96	4,17	3,66	4,72	6,29	5,34	4,29	6,87	5,81	3,59
	16	6	7,39	10,74	7,52	7,55	9,97	10,44	7,62	8,18	6,01	8,68	6,51	8,95
	17	10	7,66	10,55	7,66	8,94	10,73	10,42	9,64	9,94	6,90	9,74	9,69	18,71
	18	20	15,65	14,13	12,34	12,90	14,50	14,10	28,50	13,11	20,88	18,35	16,78	59,72
	19	30	19,13	19,10	14,37	12,71	18,64	17,50	47,81	17,07	34,52	22,51	17,76	70,04
	20	50	27,55	26,46	18,30	23,09	27,13	30,28	140,20	21,10	65,25	27,83	22,78	106,50
V1	21	2	2,09	1,60	1,61	1,61	1,63	1,81	1,99	2,04	1,64	1,94	2,02	1,58
	22	6	2,88	2,56	2,18	2,43	2,25	2,66	2,77	2,57	2,21	2,91	2,77	2,14
	23	10	3,26	3,94	3,36	3,24	4,26	4,34	4,42	3,59	3,02	4,09	4,24	2,97
	24	20	4,25	5,53	4,92	5,90	6,01	6,96	4,05	5,69	5,53	5,65	4,87	6,52
	25	30	13,36	12,20	11,35	11,20	7,82	8,68	13,24	10,27	12,39	12,85	11,73	9,26
	26	50	20,73	17,46	19,80	14,18	13,09	15,23	17,09	15,63	15,31	19,75	15,90	21,68
M1+	27	10	12,44	14,99	15,94	15,17	22,49	21,54	15,28	17,58	24,32	18,60	20,82	42,03
	28	20	102,80	89,31	90,84	89,96	63,68	56,00	114,30	103,80	99,61	117,30	93,50	192,20
	29	30	201,10	172,40	140,20	183,70	157,80	140,10	205,90	190,50	221,70	292,10	191,30	308,90
	30	50	564,20	508,20	261,90	314,50	375,80	393,90	1438,00	435,90	819,10	817,90	642,60	854,60
	31	100	1284,00	2117,00	888,90	750,00	1473,00	1845,00	3747,00	979,40	2809,00	2616,00	1197,00	3693,00
M1-	32	10	20,83	19,12	13,50	15,07	21,32	20,75	31,87	22,34	29,29	21,98	26,39	44,63
	33	20	103,80	101,00	106,50	117,10	55,21	64,15	103,30	84,36	85,53	113,70	82,07	123,60
	34	30	244,80	171,50	146,70	205,10	127,40	138,30	209,70	168,30	226,50	260,10	181,80	348,20
	35	50	515,20	514,70	303,90	351,20	394,10	392,70	1296,00	472,80	788,50	969,70	592,00	865,10
	36	100	1116,00	1860,00	977,70	610,20	1602,00	1516,00	3804,00	894,10	2897,00	3108,00	1284,00	3782,00
M2	37	10	30,39	18,44	14,01	12,17	19,85	21,65	38,47	14,00	37,79	35,81	37,68	91,60
	38	20	59,21	52,30	43,84	36,44	58,16	57,05	291,90	56,08	126,70	96,66	91,00	328,90
	39	30	83,82	96,20	75,18	72,45	120,40	148,40	227,70	89,25	312,30	103,90	118,10	431,90
	40	50	195,00	304,20	182,30	178,70	404,00	433,80	1072,00	216,40	636,50	416,20	197,60	1106,00
	41	100	1673,00	2048,00	955,90	564,60	1636,00	1922,00	1449,00	1245,00	911,80	3556,00	1604,00	6320,00
M3+	42	10	9,77	12,73	8,43	11,02	14,40	13,62	9,40	12,87	15,36	13,24	11,19	17,90
	43	20	75,29	72,51	38,78	43,77	44,74	59,26	74,14	58,75	96,74	89,05	67,73	84,78
	44	30	181,30	180,70	127,90	153,20	109,90	130,40	172,30	220,10	232,20	178,60	195,10	206,60
	45	50	313,50	378,70	259,40	311,30	358,10	431,30	828,40	324,00	537,60	544,30	373,10	525,50
	46	100	1505,00	1515,00	1298,00	1322,00	1660,00	1885,00	2701,00	1424,00	1044,00	1696,00	1126,00	2265,00
	47	200	5914,00	6103,00	5994,00	3126,00	6471,00	6038,00	3906,00	4733,00	2861,00	9249,00	6614,00	6254,00
M3-	48	10	10,96	12,57	11,29	11,13	17,97	18,24	12,21	14,63	16,57	14,23	16,76	21,85
	49	20	55,16	55,86	37,20	36,19	46,61	44,44	64,62	44,22	66,73	65,46	60,73	90,70
	50	30	173,70	135,70	127,30	183,80	96,10	113,40	146,30	114,50	123,50	138,90	130,00	226,20
	51	50	543,00	480,80	219,90	264,40	276,30	317,10	773,90	377,60	467,60	711,10	474,80	693,10
	52	100	751,10	1361,00	580,30	567,20	1093,00	1172,00	2841,00	731,50	2261,00	2044,00	937,20	2170,00
	53	200	3569,00	5661,00	3429,00	1601,00	4742,00	4746,00	4195,00	2544,00	3825,00	8288,00	3991,00	8566,00

Taulukko 3 Kymmenen vuoden kuukausittaisten ääriarvojen variaatiokertoimet.

	Nro.	L	MP 5000	MP 5001	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5006	MP 5007	MP 5008	MP 5009	MP 5011	MP 5012
Q	1	2	1,64 %	1,61 %	1,19 %	1,15 %	1,35 %	1,42 %	1,56 %	1,55 %	1,10 %	2,16 %	1,65 %	1,11 %
	2	6	1,32 %	1,74 %	1,40 %	1,64 %	0,96 %	0,92 %	1,07 %	2,28 %	1,08 %	1,29 %	1,06 %	7,66 %
	3	10	4,94 %	4,08 %	3,69 %	3,88 %	1,68 %	1,61 %	3,27 %	3,91 %	2,94 %	3,53 %	4,58 %	6,19 %
	4	20	1,39 %	1,28 %	1,10 %	1,00 %	1,19 %	1,23 %	3,12 %	0,90 %	2,83 %	3,29 %	2,19 %	3,48 %
	5	30	2,23 %	2,20 %	1,18 %	1,11 %	1,35 %	1,28 %	5,15 %	1,89 %	2,19 %	2,97 %	2,40 %	4,42 %
	6	50	1,99 %	1,45 %	0,88 %	0,92 %	1,40 %	1,90 %	5,79 %	1,21 %	3,07 %	1,36 %	2,55 %	5,09 %
	7	100	1,09 %	1,56 %	1,00 %	0,84 %	2,47 %	2,20 %	5,89 %	1,45 %	1,92 %	2,61 %	1,14 %	4,03 %
	8	200	2,32 %	2,84 %	1,29 %	0,62 %	2,07 %	2,01 %	1,80 %	1,58 %	1,21 %	5,55 %	2,47 %	6,28 %
M0	9	2	1,58 %	1,59 %	1,31 %	1,27 %	1,24 %	1,38 %	1,64 %	1,51 %	1,20 %	1,66 %	1,54 %	1,20 %
	10	6	3,45 %	1,83 %	1,45 %	1,53 %	1,81 %	2,15 %	2,70 %	2,25 %	3,54 %	3,12 %	3,09 %	2,93 %
	11	10	2,53 %	1,80 %	1,26 %	1,33 %	1,54 %	1,66 %	3,29 %	1,52 %	3,09 %	3,16 %	2,93 %	7,10 %
	12	20	2,24 %	2,21 %	0,90 %	1,01 %	1,66 %	1,94 %	2,99 %	2,07 %	2,85 %	2,90 %	2,64 %	9,27 %
	13	30	1,85 %	1,68 %	0,98 %	1,13 %	1,67 %	1,88 %	3,44 %	1,26 %	3,26 %	2,55 %	2,13 %	4,78 %
	14	50	1,49 %	1,42 %	0,98 %	1,00 %	1,54 %	1,66 %	9,15 %	1,25 %	4,20 %	1,87 %	1,65 %	3,71 %
V0	15	2	2,16 %	1,67 %	1,53 %	1,61 %	1,41 %	1,83 %	2,45 %	2,07 %	1,65 %	2,75 %	2,29 %	1,39 %
	16	6	1,71 %	2,31 %	1,58 %	1,59 %	2,21 %	2,34 %	1,78 %	1,77 %	1,38 %	2,08 %	1,55 %	2,05 %
	17	10	1,27 %	1,65 %	1,18 %	1,37 %	1,71 %	1,68 %	1,62 %	1,55 %	1,14 %	1,67 %	1,66 %	3,05 %
	18	20	1,70 %	1,44 %	1,22 %	1,28 %	1,50 %	1,48 %	3,11 %	1,33 %	2,27 %	2,07 %	1,84 %	6,32 %
	19	30	1,51 %	1,43 %	1,05 %	0,93 %	1,42 %	1,34 %	3,93 %	1,28 %	2,73 %	1,83 %	1,41 %	5,33 %
	20	50	1,42 %	1,30 %	0,88 %	1,10 %	1,34 %	1,51 %	8,11 %	1,03 %	3,32 %	1,47 %	1,18 %	5,20 %
V1	21	2	1,72 %	1,31 %	1,32 %	1,32 %	1,34 %	1,48 %	1,66 %	1,68 %	1,33 %	1,61 %	1,68 %	1,28 %
	22	6	1,72 %	1,53 %	1,29 %	1,44 %	1,33 %	1,57 %	1,66 %	1,53 %	1,30 %	1,77 %	1,67 %	1,26 %
	23	10	1,65 %	1,87 %	1,55 %	1,50 %	2,08 %	2,14 %	2,22 %	1,70 %	1,50 %	2,09 %	2,14 %	1,48 %
	24	20	1,40 %	1,84 %	1,64 %	1,97 %	2,07 %	2,46 %	1,35 %	1,90 %	1,92 %	1,91 %	1,66 %	2,28 %
	25	30	3,64 %	3,24 %	3,20 %	3,15 %	2,25 %	2,54 %	3,54 %	2,76 %	3,34 %	3,53 %	3,12 %	2,69 %
	26	50	3,85 %	3,15 %	3,74 %	2,67 %	2,57 %	3,02 %	3,11 %	2,84 %	2,79 %	3,68 %	2,89 %	4,33 %
M1+	27	10	1,28 %	1,52 %	1,60 %	1,52 %	2,40 %	2,38 %	1,61 %	1,81 %	2,63 %	1,98 %	2,22 %	4,59 %
	28	20	3,37 %	2,84 %	2,93 %	2,97 %	2,20 %	1,97 %	3,64 %	3,29 %	3,23 %	3,88 %	3,01 %	6,67 %
	29	30	3,11 %	2,62 %	2,22 %	2,91 %	2,60 %	2,34 %	3,14 %	2,89 %	3,39 %	4,59 %	2,90 %	5,06 %
	30	50	3,40 %	2,99 %	1,52 %	1,81 %	2,23 %	2,35 %	9,09 %	2,52 %	4,73 %	5,18 %	3,82 %	5,08 %
	31	100	2,01 %	3,26 %	1,31 %	1,10 %	2,22 %	2,79 %	7,89 %	1,46 %	4,45 %	4,39 %	1,89 %	5,55 %
M1-	32	10	2,27 %	2,02 %	1,43 %	1,59 %	2,43 %	2,43 %	3,44 %	2,40 %	3,22 %	2,44 %	2,86 %	5,16 %
	33	20	3,48 %	3,30 %	3,63 %	4,06 %	2,01 %	2,36 %	3,41 %	2,76 %	2,85 %	3,88 %	2,71 %	4,50 %
	34	30	3,89 %	2,66 %	2,34 %	3,29 %	2,14 %	2,35 %	3,28 %	2,61 %	3,53 %	4,18 %	2,81 %	5,83 %
	35	50	3,18 %	3,11 %	1,79 %	2,06 %	2,39 %	2,40 %	8,25 %	2,79 %	4,66 %	6,26 %	3,57 %	5,25 %
	36	100	1,78 %	2,92 %	1,47 %	0,91 %	2,45 %	2,33 %	8,03 %	1,36 %	4,61 %	5,35 %	2,06 %	5,81 %
M2	37	10	2,71 %	1,47 %	1,09 %	0,95 %	1,64 %	1,81 %	3,37 %	1,13 %	3,34 %	3,25 %	3,28 %	8,27 %
	38	20	1,58 %	1,33 %	1,10 %	0,91 %	1,51 %	1,49 %	8,19 %	1,43 %	3,36 %	2,63 %	2,41 %	8,32 %
	39	30	1,04 %	1,15 %	0,88 %	0,84 %	1,43 %	1,76 %	3,53 %	1,06 %	3,84 %	1,33 %	1,48 %	5,02 %
	40	50	0,90 %	1,35 %	0,79 %	0,77 %	1,79 %	1,92 %	6,70 %	0,95 %	3,09 %	1,99 %	0,92 %	4,80 %
	41	100	2,05 %	2,41 %	1,09 %	0,63 %	1,92 %	2,26 %	2,76 %	1,43 %	1,16 %	4,69 %	1,98 %	7,38 %
M3+	42	10	1,38 %	1,79 %	1,18 %	1,53 %	2,21 %	2,14 %	1,35 %	1,85 %	2,33 %	1,94 %	1,66 %	2,74 %
	43	20	3,61 %	3,34 %	1,81 %	2,10 %	2,24 %	3,03 %	3,35 %	2,76 %	4,66 %	4,22 %	3,11 %	4,37 %
	44	30	4,11 %	3,99 %	2,81 %	3,44 %	2,58 %	3,09 %	3,88 %	4,77 %	5,27 %	4,15 %	4,28 %	4,90 %
	45	50	2,75 %	3,24 %	2,14 %	2,61 %	3,14 %	3,86 %	7,55 %	2,72 %	4,73 %	4,96 %	3,21 %	4,69 %
	46	100	3,38 %	3,42 %	2,76 %	2,74 %	3,72 %	4,29 %	8,28 %	3,03 %	2,44 %	4,12 %	2,58 %	5,08 %
	47	200	3,36 %	3,42 %	3,22 %	1,59 %	3,57 %	3,31 %	3,65 %	2,50 %	1,68 %	5,83 %	3,87 %	3,56 %
M3-	48	10	1,60 %	1,72 %	1,52 %	1,49 %	2,66 %	2,77 %	1,74 %	2,03 %	2,43 %	2,09 %	2,43 %	3,27 %
	49	20	2,78 %	2,73 %	1,77 %	1,76 %	2,33 %	2,26 %	3,20 %	2,15 %	3,36 %	3,33 %	3,02 %	4,62 %
	50	30	3,90 %	2,96 %	2,91 %	4,24 %	2,35 %	2,81 %	3,22 %	2,51 %	2,73 %	3,15 %	2,85 %	5,49 %
	51	50	4,79 %	4,13 %	1,89 %	2,28 %	2,45 %	2,85 %	6,94 %	3,21 %	3,98 %	6,55 %	4,08 %	6,16 %
	52	100	1,75 %	3,11 %	1,28 %	1,24 %	2,45 %	2,66 %	8,03 %	1,63 %	5,17 %	5,14 %	2,20 %	4,87 %
	53	200	2,15 %	3,34 %	1,94 %	0,89 %	2,73 %	2,74 %	3,86 %	1,45 %	2,39 %	5,39 %	2,43 %	4,98 %
MAKS			4,94 %	4,13 %	3,74 %	4,24 %	3,72 %	4,29 %	9,15 %	4,77 %	5,27 %	6,55 %	4,58 %	9,27 %
MIN			0,90 %	1,15 %	0,79 %	0,62 %	0,96 %	0,92 %	1,07 %	0,90 %	1,08 %	1,29 %	0,92 %	1,11 %
KA			2,37 %	2,31 %	1,68 %	1,71 %	2,02 %	2,18 %	4,09 %	2,01 %	2,88 %	3,23 %	2,43 %	4,64 %

Taulukko 4 Kymmenen vuoden kuukausittaisten kuormavaikutusten ääriarvojen keskiarvo suhteessa Gumbel-jakaumasta saatuun sadan vuoden teoreettiseen toistumiskuormavaikutukseen.

	Nro.	L	MP 5000	MP 5001	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5006	MP 5007	MP 5008	MP 5009	MP 5011	MP 5012
Q	1	2	0,92	0,93	0,94	0,95	0,94	0,93	0,93	0,93	0,95	0,90	0,92	0,95
	2	6	0,94	0,92	0,93	0,92	0,95	0,96	0,95	0,90	0,95	0,94	0,95	0,72
	3	10	0,80	0,83	0,84	0,84	0,92	0,92	0,86	0,84	0,87	0,85	0,81	0,76
	4	20	0,93	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,86	0,96	0,88	0,86	0,90	0,85
	5	30	0,90	0,90	0,94	0,95	0,94	0,94	0,79	0,91	0,90	0,87	0,89	0,82
	6	50	0,91	0,93	0,96	0,96	0,93	0,91	0,77	0,94	0,87	0,94	0,89	0,80
	7	100	0,95	0,93	0,95	0,96	0,89	0,90	0,77	0,93	0,91	0,88	0,95	0,83
	8	200	0,90	0,87	0,94	0,97	0,91	0,91	0,92	0,93	0,94	0,78	0,89	0,76
M0	9	2	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,93	0,94	0,92	0,93	0,94
	10	6	0,85	0,92	0,93	0,93	0,92	0,90	0,88	0,90	0,85	0,86	0,87	0,87
	11	10	0,89	0,92	0,94	0,94	0,93	0,92	0,86	0,93	0,87	0,86	0,87	0,74
	12	20	0,90	0,90	0,96	0,95	0,92	0,91	0,87	0,91	0,87	0,87	0,88	0,68
	13	30	0,91	0,92	0,95	0,95	0,92	0,91	0,85	0,94	0,86	0,89	0,90	0,81
14	50	0,93	0,93	0,95	0,95	0,93	0,92	0,68	0,94	0,83	0,91	0,92	0,84	
V0	15	2	0,90	0,92	0,93	0,92	0,93	0,92	0,89	0,91	0,92	0,88	0,90	0,93
	16	6	0,92	0,90	0,93	0,93	0,90	0,89	0,92	0,92	0,94	0,91	0,93	0,91
	17	10	0,94	0,92	0,94	0,94	0,92	0,92	0,92	0,93	0,95	0,92	0,92	0,87
	18	20	0,92	0,93	0,94	0,94	0,93	0,93	0,86	0,94	0,90	0,91	0,92	0,76
	19	30	0,93	0,93	0,95	0,96	0,93	0,94	0,83	0,94	0,88	0,92	0,93	0,79
20	50	0,93	0,94	0,96	0,95	0,94	0,93	0,71	0,95	0,86	0,93	0,94	0,79	
V1	21	2	0,92	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,94	0,92	0,92	0,94
	22	6	0,92	0,93	0,94	0,93	0,94	0,93	0,92	0,93	0,94	0,92	0,92	0,94
	23	10	0,92	0,91	0,93	0,93	0,91	0,90	0,90	0,92	0,93	0,90	0,90	0,93
	24	20	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,89	0,94	0,91	0,91	0,91	0,92	0,90
	25	30	0,85	0,86	0,86	0,86	0,90	0,89	0,85	0,88	0,86	0,85	0,86	0,88
	26	50	0,84	0,86	0,84	0,88	0,89	0,87	0,86	0,87	0,88	0,84	0,87	0,82
M1+	27	10	0,94	0,93	0,93	0,93	0,89	0,89	0,93	0,92	0,88	0,91	0,90	0,81
	28	20	0,85	0,87	0,87	0,87	0,90	0,91	0,84	0,86	0,86	0,84	0,87	0,75
	29	30	0,86	0,88	0,90	0,87	0,88	0,89	0,86	0,87	0,85	0,81	0,87	0,80
	30	50	0,85	0,87	0,93	0,92	0,90	0,89	0,69	0,89	0,81	0,79	0,84	0,80
	31	100	0,91	0,86	0,94	0,95	0,90	0,88	0,72	0,93	0,82	0,82	0,91	0,78
M1-	32	10	0,90	0,91	0,93	0,93	0,89	0,89	0,85	0,89	0,86	0,89	0,87	0,79
	33	20	0,85	0,86	0,85	0,83	0,91	0,89	0,85	0,88	0,87	0,84	0,88	0,82
	34	30	0,84	0,88	0,89	0,86	0,90	0,89	0,86	0,88	0,85	0,83	0,88	0,77
	35	50	0,86	0,86	0,92	0,91	0,89	0,89	0,71	0,88	0,81	0,76	0,85	0,79
	36	100	0,92	0,87	0,93	0,96	0,89	0,89	0,71	0,94	0,81	0,79	0,91	0,77
M2	37	10	0,88	0,93	0,95	0,95	0,92	0,92	0,85	0,95	0,86	0,86	0,86	0,71
	38	20	0,93	0,94	0,95	0,96	0,93	0,93	0,71	0,93	0,86	0,88	0,89	0,70
	39	30	0,95	0,95	0,96	0,96	0,93	0,92	0,85	0,95	0,84	0,94	0,93	0,80
	40	50	0,96	0,94	0,96	0,96	0,92	0,91	0,75	0,95	0,87	0,91	0,96	0,81
	41	100	0,91	0,89	0,95	0,97	0,91	0,90	0,88	0,93	0,94	0,81	0,91	0,73
M3+	42	10	0,93	0,92	0,94	0,93	0,90	0,90	0,94	0,91	0,89	0,91	0,92	0,88
	43	20	0,85	0,86	0,92	0,90	0,90	0,87	0,86	0,88	0,81	0,82	0,86	0,82
	44	30	0,83	0,83	0,88	0,85	0,88	0,87	0,84	0,81	0,79	0,83	0,82	0,80
	45	50	0,88	0,86	0,90	0,88	0,86	0,84	0,72	0,88	0,81	0,80	0,86	0,81
	46	100	0,85	0,85	0,88	0,88	0,84	0,82	0,71	0,87	0,89	0,83	0,89	0,80
	47	200	0,86	0,85	0,86	0,93	0,85	0,86	0,84	0,89	0,92	0,77	0,84	0,85
M3-	48	10	0,93	0,92	0,93	0,93	0,88	0,88	0,92	0,91	0,89	0,90	0,89	0,86
	49	20	0,88	0,88	0,92	0,92	0,89	0,90	0,86	0,90	0,86	0,86	0,87	0,81
	50	30	0,84	0,87	0,87	0,82	0,89	0,88	0,86	0,89	0,88	0,86	0,87	0,78
	51	50	0,81	0,83	0,91	0,90	0,89	0,87	0,74	0,86	0,83	0,75	0,83	0,76
	52	100	0,92	0,86	0,94	0,94	0,89	0,88	0,71	0,92	0,79	0,79	0,90	0,80
	53	200	0,90	0,86	0,91	0,96	0,88	0,88	0,84	0,93	0,89	0,79	0,89	0,80
MAKS			0,96	0,95	0,96	0,97	0,95	0,96	0,95	0,96	0,95	0,94	0,96	0,95
MIN			0,80	0,83	0,84	0,82	0,84	0,82	0,68	0,81	0,79	0,75	0,81	0,68
KA			0,90	0,90	0,92	0,92	0,91	0,90	0,84	0,91	0,88	0,86	0,89	0,82

Taulukko 5 Kymmenen vuoden kuukausittaisten kuormavaikutusten ääriarvojen keskiarvo suhteessa Weibull-jakaumasta saatuun sadan vuoden teoreettiseen toistumis-kuormavaikutukseen.

	Nro.	L	MP 5000	MP 5001	MP 5002	MP 5003	MP 5004	MP 5005	MP 5006	MP 5007	MP 5008	MP 5009	MP 5011	MP 5012
Q	1	2	0,96	0,96	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,98	0,95	0,96	0,98
	2	6	0,96	0,96	0,96	0,95	0,97	0,97	0,97	0,94	0,97	0,97	0,97	0,80
	3	10	0,90	0,92	0,90	0,91	0,96	0,96	0,93	0,93	0,94	0,90	0,89	0,79
	4	20	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,93	0,98	0,93	0,92	0,95	0,89
	5	30	0,94	0,95	0,97	0,97	0,95	0,96	0,89	0,96	0,94	0,92	0,94	0,85
	6	50	0,94	0,96	0,98	0,97	0,97	0,96	0,88	0,97	0,93	0,96	0,92	0,83
	7	100	0,97	0,96	0,97	0,98	0,94	0,95	0,87	0,96	0,94	0,95	0,96	0,85
	8	200	0,95	0,94	0,97	0,98	0,94	0,94	0,95	0,96	0,96	0,88	0,94	0,79
M0	9	2	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96	0,97
	10	6	0,92	0,95	0,96	0,96	0,95	0,95	0,93	0,94	0,91	0,91	0,93	0,90
	11	10	0,93	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,92	0,96	0,92	0,92	0,93	0,80
	12	20	0,94	0,94	0,98	0,97	0,96	0,95	0,92	0,94	0,93	0,92	0,93	0,75
	13	30	0,95	0,95	0,98	0,97	0,96	0,96	0,91	0,97	0,92	0,93	0,94	0,84
14	50	0,96	0,95	0,97	0,97	0,96	0,96	0,83	0,97	0,91	0,95	0,96	0,87	
V0	15	2	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,96	0,93	0,94	0,96
	16	6	0,96	0,94	0,96	0,96	0,94	0,94	0,95	0,95	0,97	0,95	0,96	0,94
	17	10	0,97	0,96	0,97	0,96	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,95	0,96	0,89
	18	20	0,95	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,93	0,96	0,93	0,93	0,94	0,81
	19	30	0,96	0,97	0,97	0,98	0,96	0,96	0,90	0,97	0,93	0,95	0,96	0,83
20	50	0,94	0,97	0,98	0,97	0,96	0,96	0,85	0,97	0,93	0,96	0,97	0,83	
V1	21	2	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,96	0,97	0,96	0,96	0,97
	22	6	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	0,95	0,97
	23	10	0,96	0,95	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,95	0,95	0,93	0,94	0,96
	24	20	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,93	0,97	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	25	30	0,91	0,92	0,92	0,91	0,95	0,94	0,91	0,93	0,91	0,91	0,92	0,93
	26	50	0,91	0,92	0,90	0,94	0,94	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,93	0,89
M1+	27	10	0,97	0,96	0,96	0,96	0,94	0,93	0,96	0,95	0,93	0,95	0,95	0,84
	28	20	0,92	0,92	0,90	0,92	0,93	0,95	0,91	0,92	0,92	0,90	0,93	0,81
	29	30	0,93	0,94	0,94	0,93	0,93	0,94	0,92	0,93	0,92	0,90	0,92	0,85
	30	50	0,91	0,93	0,96	0,95	0,94	0,94	0,83	0,94	0,91	0,88	0,91	0,85
	31	100	0,95	0,93	0,97	0,97	0,95	0,93	0,85	0,96	0,89	0,90	0,96	0,84
M1-	32	10	0,94	0,95	0,96	0,96	0,93	0,94	0,91	0,94	0,92	0,94	0,92	0,84
	33	20	0,91	0,92	0,90	0,90	0,95	0,94	0,92	0,94	0,93	0,92	0,93	0,84
	34	30	0,91	0,93	0,93	0,91	0,94	0,94	0,91	0,94	0,92	0,91	0,93	0,83
	35	50	0,92	0,93	0,95	0,95	0,94	0,94	0,84	0,93	0,91	0,86	0,92	0,86
	36	100	0,96	0,94	0,96	0,97	0,94	0,94	0,84	0,96	0,90	0,89	0,95	0,84
M2	37	10	0,93	0,96	0,97	0,98	0,96	0,95	0,91	0,97	0,91	0,92	0,93	0,79
	38	20	0,96	0,96	0,97	0,98	0,96	0,96	0,84	0,95	0,93	0,93	0,93	0,76
	39	30	0,97	0,97	0,98	0,97	0,96	0,95	0,92	0,97	0,92	0,97	0,95	0,84
	40	50	0,98	0,97	0,98	0,98	0,96	0,95	0,86	0,98	0,91	0,96	0,98	0,84
	41	100	0,96	0,95	0,97	0,98	0,95	0,94	0,92	0,96	0,96	0,90	0,96	0,79
M3+	42	10	0,96	0,95	0,97	0,96	0,94	0,95	0,96	0,95	0,95	0,96	0,96	0,92
	43	20	0,91	0,91	0,95	0,95	0,95	0,93	0,92	0,93	0,89	0,90	0,92	0,88
	44	30	0,89	0,91	0,92	0,89	0,93	0,92	0,91	0,89	0,89	0,91	0,90	0,82
	45	50	0,93	0,92	0,95	0,93	0,93	0,89	0,85	0,93	0,87	0,89	0,92	0,86
	46	100	0,92	0,91	0,94	0,94	0,91	0,89	0,83	0,93	0,94	0,90	0,93	0,86
	47	200	0,92	0,92	0,92	0,96	0,91	0,92	0,92	0,94	0,96	0,87	0,91	0,89
M3-	48	10	0,96	0,96	0,96	0,96	0,93	0,92	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,88
	49	20	0,93	0,93	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,95	0,92	0,92	0,92	0,86
	50	30	0,91	0,92	0,92	0,89	0,93	0,93	0,92	0,95	0,93	0,92	0,93	0,82
	51	50	0,89	0,91	0,95	0,94	0,93	0,93	0,86	0,92	0,92	0,85	0,91	0,82
	52	100	0,96	0,93	0,97	0,97	0,93	0,93	0,85	0,95	0,90	0,89	0,94	0,88
	53	200	0,95	0,92	0,96	0,98	0,93	0,93	0,90	0,97	0,92	0,89	0,95	0,87
MAKS			0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98
MIN			0,89	0,91	0,90	0,89	0,91	0,89	0,83	0,89	0,87	0,85	0,89	0,75
KA			0,94	0,94	0,96	0,96	0,95	0,94	0,91	0,95	0,93	0,92	0,94	0,86