



Raideliikenteen staattinen kuormavaikutus stokastisin menetelmin

Petteri Pakkanen

Esityksen sisältö

1. Tutkimuksen taustasta ja tavoitteista
2. Lähtötietojen hankintaa ja esittelyä
3. Simulaation rakenne
4. Simulaatiotulokset
5. Ääriarvojakaumien sovitus tuloksiin
6. Yhteenvetoa ja jatkotutkimus-tarpeita

Tutkimuksen taustasta

- Tehty Tampereen yliopiston (ent. TTY) ja Väyläviraston (ent. LiVi) yhteistyönä. Lähtötietojen osalta mukana myös Solita Oy.
- Osa suurempaa Shift2Rail-hanketta, jonka tavoitteina edistää: raideliikenteen elinkaarikustannusten alentumista, rautateiden kapasiteetin tuplaamista ja raideliikenteen luotettavuuden ja täsmällisyyden kasvattamista 50 %:lla
 - Hankkeessa on mukana monia yliopistoja, alan yrityksiä ja viranomaisia eri puolilta Eurooppaa
 - Lisätietoa: <https://shift2rail.org/>
- Tämän tutkimuksen liittyminen suurempaan kuvaan → liittyy kaikilta osin
 - Todelliset kuormavaikutukset, millainen ero suunnittelukuormiin? Esim. LM71 on tehty alkujaan erilaisilla vaunuilla kuin Suomessa on käytössä, eikä Suomen liikenne ollut mukana myöskään LM71 myöhemmässä verifiointissa
 - Osana mahdollista tilastollisiin menetelmiin perustuvaa mitoitusta → esim. olemassa olevan sillan luotettavuuden määrittäminen seuraavalle 10 vuodelle eli perusteltu jatkoaika sillalle

Tutkimuksen tavoitteista

- Pää tavoitteena Suomen todellista tavararaideliikennettä (henkilöliikenne ei aiheuta kuormavaikutusten ääriarvoja) jäljittelevä stokastinen simulaatio (Monte Carlo simulaatio), MathCad:lla tehtävä työkalu
 - Tehdä simulaatiot erikseen eri rataosilta
 - Mahdollistaa eri asteisten kuormavaikutusten esiintymistodennäköisyyden arvioinnin eri mittaisilla ajanjaksoilla → teoreettisesta ääriarvojakaumasta
 - Ominaiskuormavaikutuksen määrittäminen ja vertaaminen kuormakaavioilla saataviin vaikutuksiin
 - Yhdistää kuhunkin suurimpaan kuormavaikutukseen myös junan, joka sen aiheuttaa
- Tulosten tulkinta ja vertailu lähtötietoihin → paikalliset erityispiirteet
 - Tilastolliset parametrit eri mittauspisteiden välisissä tuloksissa ja mittauspisteiden sisäisissä tuloksissa
 - Eri kalustotyyppien esiintyvyyden vaikutus eri kuormavaikutuksiin
- Tutkimusraportti
 - Esitellään lähtötietoja ja tuloksia tarkemmin
 - Käydään läpi matemaattisia perusteita,
 - Myös historiallista perspektiiviä siltoihin, kuormakaavioihin yms.

Lähtötietojen hankinta

- Käyttettiin hyväksi VALTSU-järjestelmästä saatavaa tietoa, tarkemmin pyörävoimailmaisimien akselimassamittauksia ja RFID-lukijoiden nappaamaa kalustotietoa.
 - VALTSU yhdistää valvontalaitteistoiden kuten pyörävoimailmaisimen mittaustiedon RFID-lukijoiden keräämään tietoon → saadaan yhdistettyä akselimassa oikeaan vaunutyyppiin
 - Hankitut lähtötiedot: Tavarajunien vuotuinen määrä, junien kokonaismassat, junien vaunumäärät, veturi- ja vaunutyypin määrät, veturi- ja vaunutyypin akselimassajakaumat, vaunutyypin peräkkäisyysjakaumat.
 - Lisäksi eri mittauspisteiltä otteita, joissa näkyy mittauspaikan ohi menneet junat karkeasti seuraavalla tietosisällöllä: vaunutyyppi, akselin järjestysnumero, akselimassa, nopeus. Tämä oli vaihtoehto tutkia vaunutyypin geometrioita, mutta nopeuden kautta lasketut tulokset antoivat melko erilaisia arvoja akselivälille, joten kaikkien mukana olleiden vaunujen geometriatieto on hankittu eri lähteistä ja asiantuntijoilta. Tällä tiedolla saatiin kuitenkin muodostettua kokonaisten junien painojakaumia ja verrattua niitä simulaation tuottamiin painojakaumiin.
- Pyörävoimailmaisimia yht. 16 kpl, kolmelta ilmaisimelta puuttuu RFID-lukija
 - Mittauspisteet, joissa ei ole RFID-lukijaa, on jätetty simulaation ulkopuolelle. Samoin yksi mittauspiste, jossa oli lähinnä venäläisiä vaunuja, joissa taas ei ole RFID-lähetintä.

Lähtötietojen hankinta

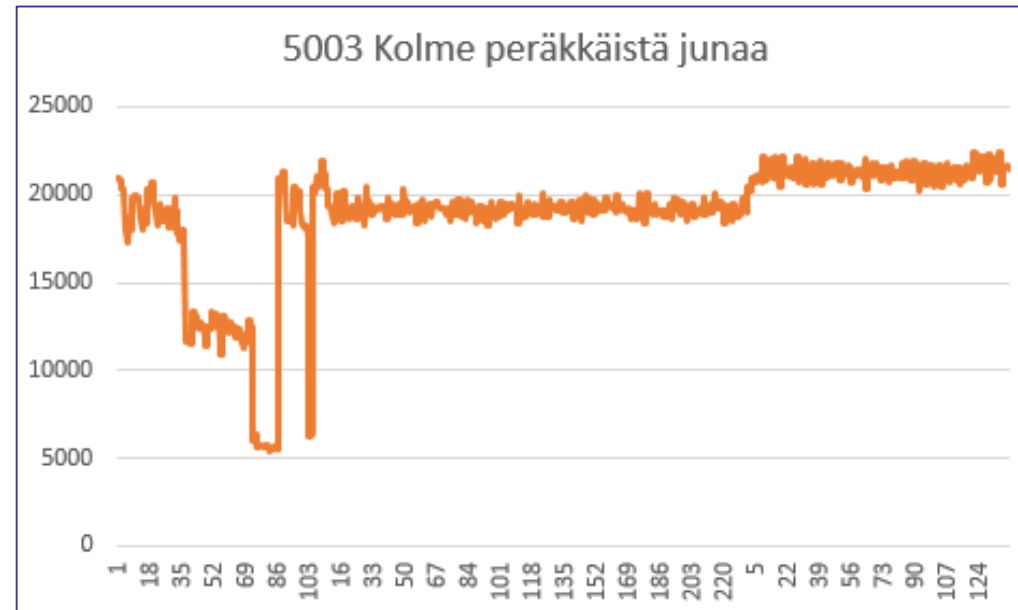
Mittauspisteiden tunnuksset ja sallittu akselimassa

Tunnus	Paikan nimi	Sallittu akselimassa	RFID-tunnistus	Mukana simulaatiossa
5000	Alhojärvi	25 t	Kyllä	Kyllä
5001	Hammaslahti	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	Kyllä	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

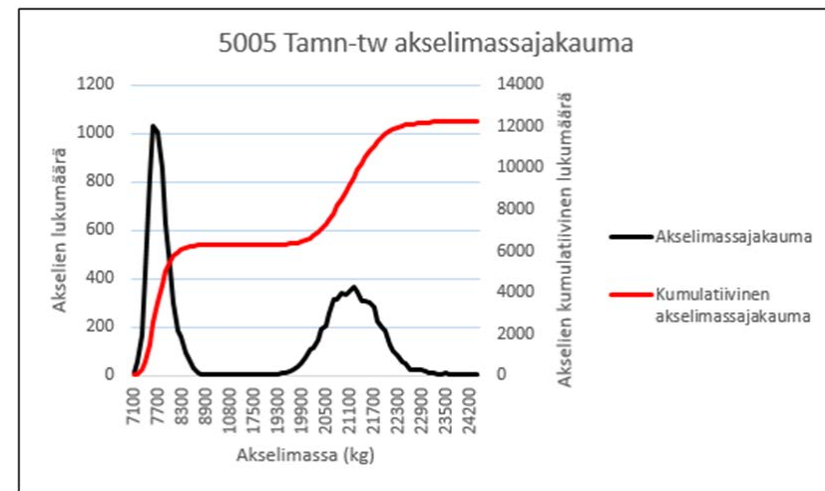
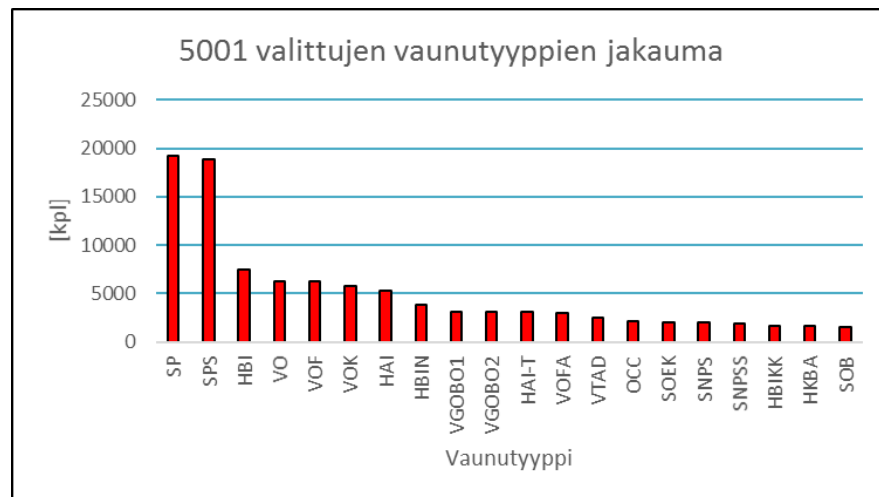
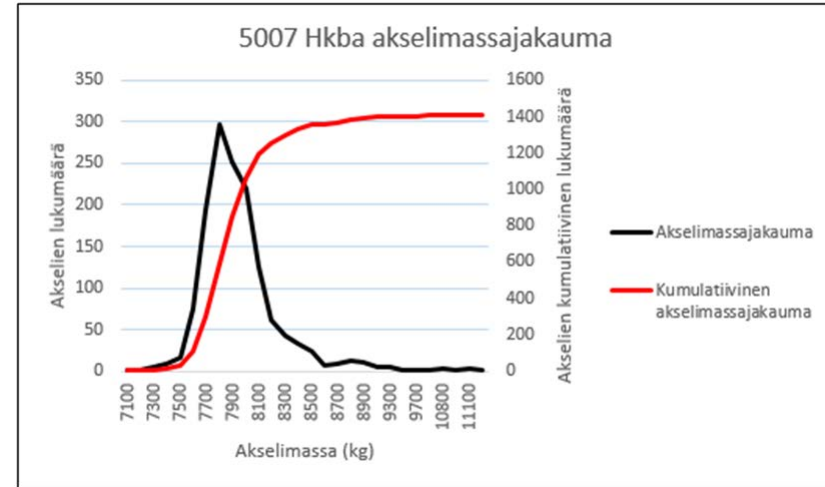
Lähtötietojen esittelyä

- Junat koostuu usein vain täysistä tai tyhjästä vaunuista, mutta ”sekajunatkaan” eivät ole harvinaisia. Sekajunissa tyhjät ja täyden vaunut myös vaihtelevat junan matkalla eli nopealla tarkastelulla ei ainakaan näkynyt, että täydet vaunut pyrittäisiin laittamaan esimerkiksi junan etuosaan.
 - Kaikkein pisimmät junat vielä tyhjiä (ratatekniset rajoitteet), ei huomioitu simulaatiossa
 - Kaksoisraiteisilla mittauspisteillä havaittavissa, että toista raidetta käyttää enemmän täydet ja toista tyhjät junat
 - VAK-kuljetuksissa on myös suojavaunusääntöjä (tyhjiä vaunuja välissä), mutta näitä ei ole simulaatioon otettu mukaan
- Vaunutyyppit laitettiin esiintyvyyden mukaan järjestykseen ja yleisimmät valittiin simulaatioon kunnes 95% peittoaste tavaraliikenteen vaunumäärästä oli saavutettu. 95% valikoitui rajaksi, koska koko Suomen keskimääräisellä liikenteellä kaikki kuormavaikutuksen kannalta merkittävät vaunut jäivät tämän sisään
 - Poikkeuksena MP5012, jossa otettiin harvinaiset 8-akseliset VGOBO vaunut 95% ulkopuolelta
- Vaunutyyppien akselimassajakaumat tyypillisesti kaksikyttäisiä eli tyhjät ja täydet vaunut erottuvat selvästi, puolitäydet harvinaisia
 - Poikkeusvaunujakin on, esimerkiksi väливаunu HKBA

Lähtötietojen esittelyä

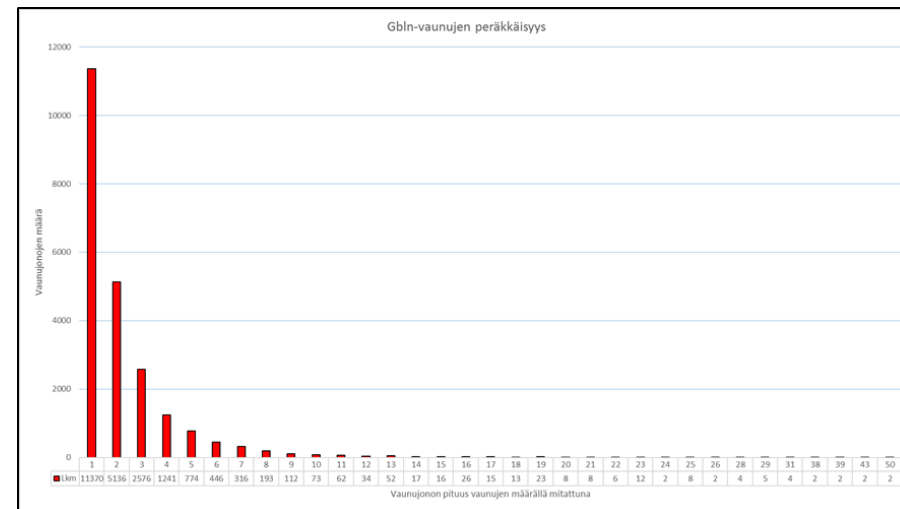
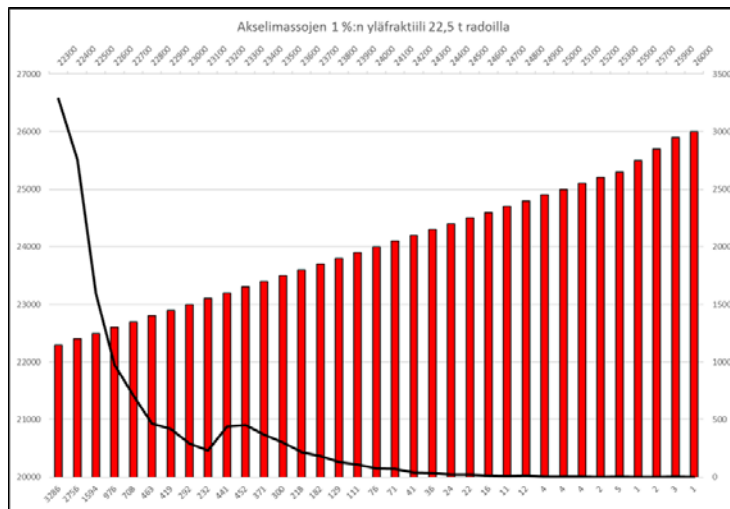


Lähtötietojen esittelyä



Lähtötietojen esittelyä

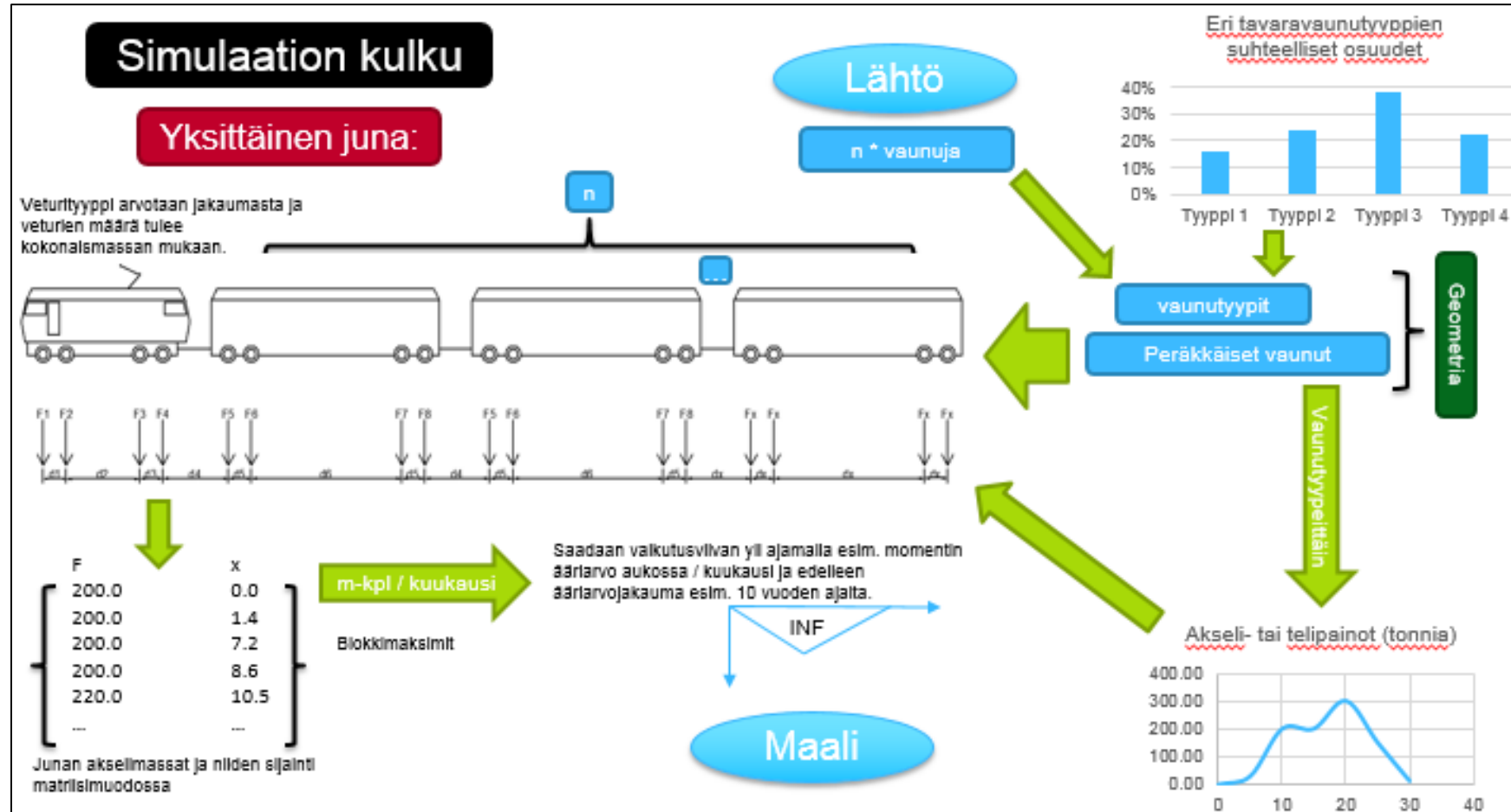
- Sallittujen akselimassojen ylityksiä esiintyy. 22,5 t radoilla sallitun ylittää alle 1 % akseleista ja 25 t radoilla sallitun ylittää vain reilu 0,6 ‰ akseleista
 - 22,5 t radoilla sallittu yksittäiset ylikuormat tietyin ehdoin
 - 25 t radoilla ei saisi ylityksiä tulla ja mikäli ylikuormaa on 2 % tai enemmän, tulee ylikuorma purkaa heti seuraavalla mahdollisella liikennepaikalla, vastaava raja 22,5 t radoilla on 5 %
- Peräkkäisyysjakaumat vaihtelee paljon vaunutyypeittäin
 - Yleisesti peräkkäisiä vaunuja on usein vain yksi tai muutamia, todella pitkät putket samaa vaunutyyppiä ovat harvinaisia



Simulaation rakenne

- Lähtötiedot viedään simulaatioon empiirisinä todennäköisyysjakaumina, joista saadaan tasajakaumasta $[0,1]$ pseudosatunnaisluvuilla arvottua satunnaismuuttujalle, kuten akselimassalle arvo.
 - Ensimmäisenä toimenpide tehdään junan kokonaismassalle ja vaunumäärälle, joista kokonaismassa määrää edelleen vetureiden määrän
 - Toisena arvotaan veturityypit ja reilu määrä vaunutyyppejä samalla jokaiselle vaunutyypille on arvottu peräkkäisyys
 - Tämän jälkeen muodostetaan veturit ja vaunut jonoon ja leikataan jono kokonaisvaunumäärän määräämästä kohdasta
 - Arvotaan vetureille ja vaunuille akselimassat, yksi akselimassa per kalustoyksikkö ja massoja tulee joka kalustoyksikölle sen akselien lukumäärän verran
- Lopuksi tehdään ei satunnaiset toimenpiteet
 - Jokainen kalustoyksikkö saa geometriavektorinsa, jotka yhdistetään yhdeksi pötköksi ja saadaan pari aiemmin muodostetulle akselimassavektorille
 - Viedään akselit eri vaikutusviivojen yli ja tallennetaan jokaisen junan aiheuttama suurin rasitus jokaisessa vaikutusviivassa
 - Toistetaan sama esim. 10 vuoden junille

Simulaation rakenne



Simulaatiotulokset

- Tuloksia tuotettiin sekä 1 vuoden, että 10 vuoden mittaisista simulaatioista
 - Jokaisen junan aiheuttama rasituksen ääriarvo tallennettiin
 - Ääriarvojakaumat blokkimaksimimenetelmällä, tehtiin ääriarvojakaumat kolmella eri kokoisella blokilla, päivän, viikon ja kuukauden
- Lopullisina tuloksina päädyttiin käyttämään 10 vuoden simulaation tuloksia ja niistä kuukausittaisia ääriarvoja
 - 1 vuoden jakson koettiin olevan turhan lyhyt, eikä siitä saanut varsinkaan kuukausittaisista ääriarvoista kovin hyvää jakaumaa (vain 12 arvoa)
 - Kuukauden blokkimaksimiin päädyttiin siten, että tulosten muuttumista seurattiin päivittäisten, viikoittaisten ja kuukausittaisten välillä → tulosten erot viikoittaisista kuukausittaisiin pieneni vielä reilusti verrattuna päivittäisillä ja viikoittaisilla saatuihin eroihin

Simulaatiotulokset

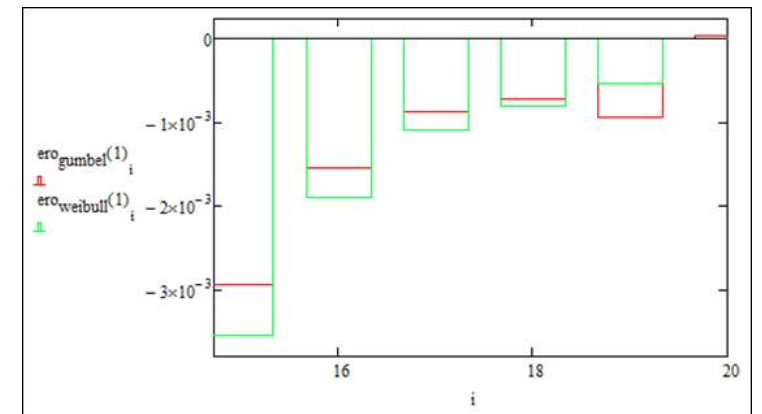
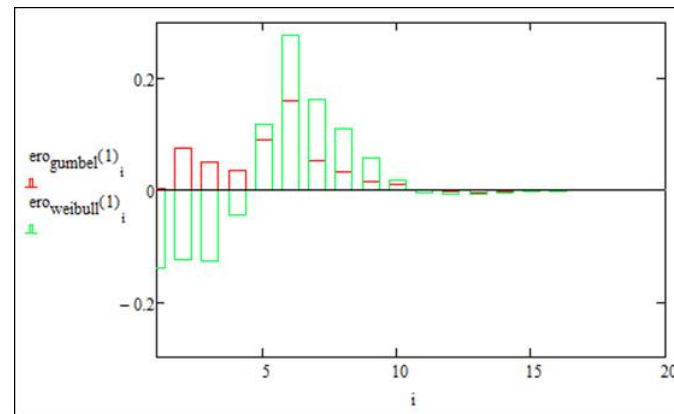
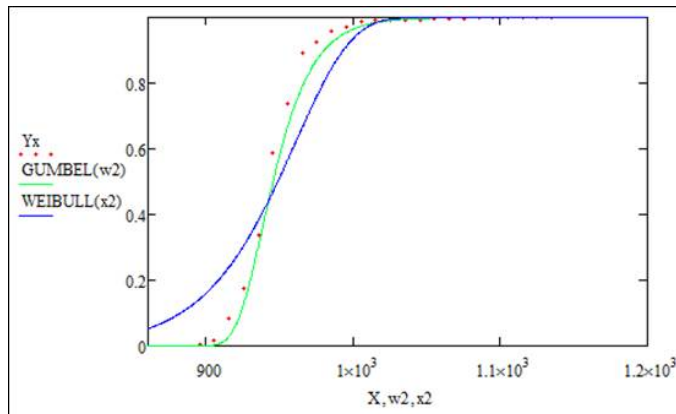
- Tulokset ajettiin yhteensä 53 eri viivainfluenssista
 - Viivakuormat
 - 1-aukkoisista: tukireaktio, kenttämomentti, leikkausvoima kentän keskellä
 - 2-aukkoisista: kenttämomentti $0,4 \cdot L$ reunatueltä, kenttämomentti keskellä kenttää, tukimomentti välituella
 - 3-aukkoisista: kenttämomentti keskiaukon keskellä, kenttämomentti reuna-aukon keskellä
 - Influenssien pituudet 2, 6, 10, 20, 30, 50, 100 ja 200 m. Lyhimpiä ja pisimpiä ei käytetty kaikissa influenssityypeissä.

Ääriarvojakaumien sovitus tuloksiin

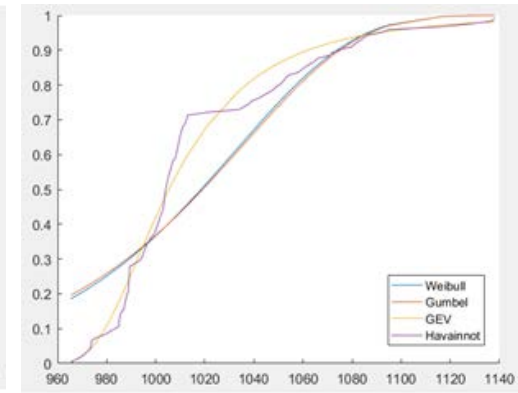
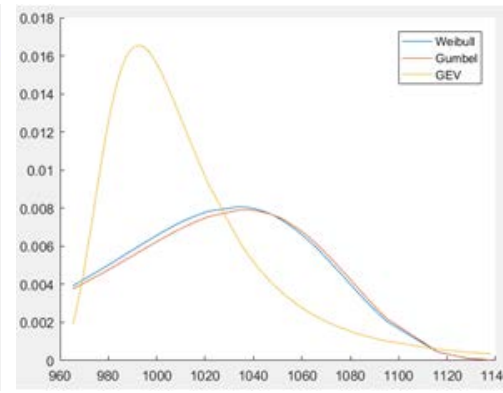
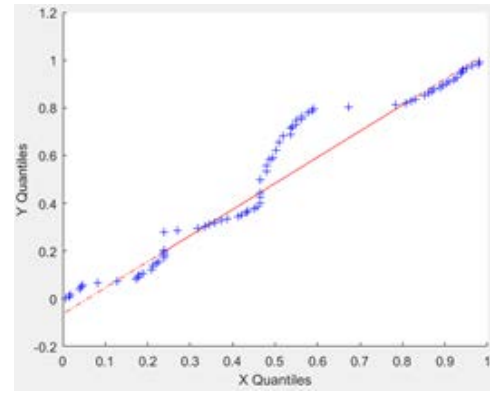
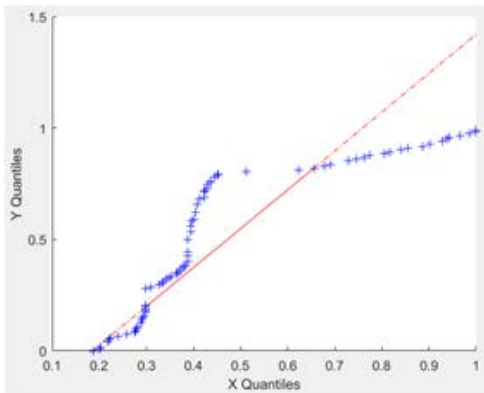
- Ääriarvojakaumia on kolmea tyyppiä: Gumbel, Weibull ja Frechet
 - Lisäksi nämä saadaan yhdistettyä yhdeksi jakaumaperheeksi, jota kutsutaan yleiseksi ääriarvojakaumaksi (GEV), jossa 1 parametri lisää
 - Jakaumatyyppien oikean hännän (määrittelee maksimiarvot) paksuus vaihtelee, Frechet paksuin, Weibull-jakaumalla oikea päätepiste, Gumbel näiden välillä
- Gumbel- ja Weibull-jakaumat sovitettiin kaikkiin tuloksiin
 - Gumbel-jakauman parametreinä käytettiin empiirisen jakauman keskiarvoa ja hajontaa (momenttimenetelmä)
 - Weibull-jakauman parametrit estimoitiin suurimman uskottavuuden menetelmällä
- Satunnaisia jakaumia testattiin vertaamalla todennäköisyysjakaumien käyriä histogrammeihin, lisäksi tehtiin kvantiilikuvaajia.

Ääriarvojakaumien sovitus tuloksiin

- Satunnainen kvantiilikuvaaja tehtiin myös empiirisen jakauman ja GEV-jakauman välille, huomattiin GEV-jakauman noudattavan parhaiten tuloksia, muotoparametrin viitatessa Frechet-jakauman suuntaan
 - Näin testattu vain yksittäisiä jakaumia, täytyisi testata kaikki läpi
 - Silmämääräisen testauksen lisäksi analyyttisiä testausmenetelmiä, kuten Kolmogorov-Smirnovin testi



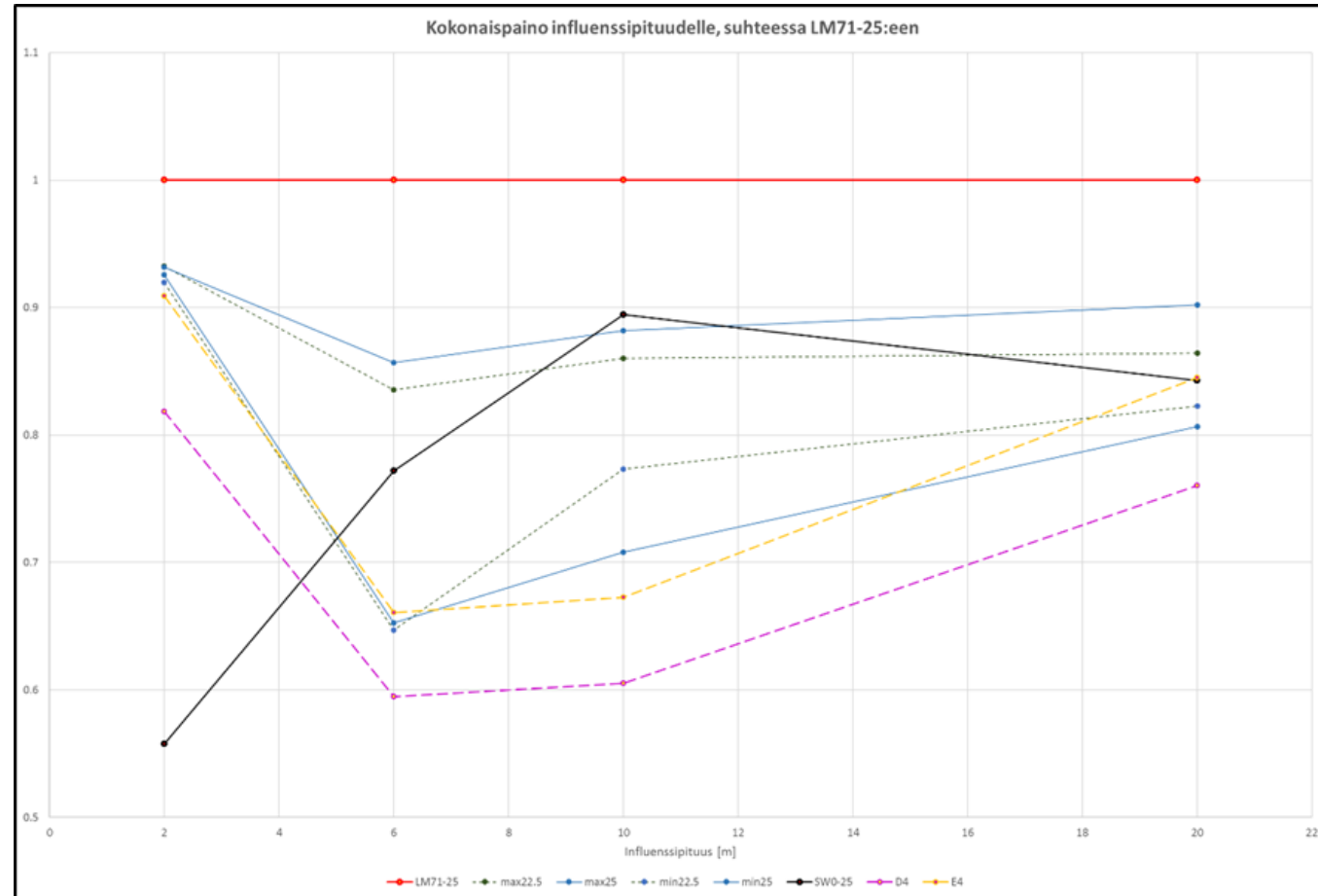
Ääriarvojakaumien sovitus tuloksiin



	N.ro.	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	1275.2	1237.3	1149.7	1257.1	1267.6
	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	7605.3	7338.1	8897.1
	8	200	14604.4	15532.0	15022.8	14899.7	15020.0	15083.0	9369.1	15173.4	13416.7	15300.5	14521.1	17746.2
MD	9	2	130.5	131.2	130.6	130.3	129.9	130.3	130.0	130.3	130.0	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	9938.8	9634.8	9489.2	9581.0	9583.4	9629.2	9913.6	9935.3	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
VO	15	2	284.7	276.9	279.4	280.3	277.6	282.2	284.3	281.3	281.3	284.4	283.5	276.6
	16	6	468.6	518.4	513.4	513.6	500.5	498.9	467.5	508.6	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	1069.0	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	2454.8	2153.8	2293.1	2031.4	2051.2	2585.1

	N.ro.	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	3.2%	3.5%	3.0%	2.9%	3.3%	3.3%	2.8%	3.1%	2.8%	4.5%	2.9%	2.8%
	2	6	1.4%	3.1%	2.2%	2.2%	1.7%	1.5%	2.0%	4.1%	1.8%	2.4%	2.1%	7.0%
	3	10	10.0%	9.7%	4.9%	6.6%	3.3%	2.8%	7.3%	9.9%	6.4%	3.6%	7.4%	-0.6%
	4	20	2.4%	2.4%	1.6%	1.3%	2.1%	2.5%	6.1%	1.7%	4.7%	6.4%	4.3%	2.3%
	5	30	3.6%	4.2%	2.1%	1.4%	1.0%	1.8%	9.8%	4.0%	2.8%	4.3%	4.1%	1.1%
	6	50	2.1%	2.4%	1.4%	1.5%	3.2%	4.4%	11.6%	2.3%	6.3%	2.1%	2.5%	1.2%
	7	100	1.3%	3.0%	1.7%	1.4%	5.1%	4.9%	10.3%	2.7%	1.5%	6.8%	1.3%	-0.1%
	8	200	4.9%	5.8%	2.8%	1.0%	3.0%	3.0%	2.8%	2.9%	0.8%	10.4%	4.9%	0.5%
MD	9	2	2.7%	3.3%	2.7%	2.8%	2.6%	2.6%	3.0%	2.9%	2.5%	2.9%	2.6%	2.6%
	10	6	5.9%	2.8%	2.7%	2.4%	2.9%	4.1%	3.9%	3.5%	5.1%	4.3%	5.9%	1.0%
	11	10	3.5%	2.9%	1.8%	1.9%	2.6%	2.8%	6.2%	3.1%	5.1%	5.0%	4.9%	4.0%
	12	20	3.9%	2.9%	1.8%	2.0%	3.1%	3.4%	4.9%	3.0%	5.3%	4.1%	3.8%	4.5%
	13	30	3.1%	2.7%	2.0%	1.5%	3.3%	3.8%	5.6%	2.3%	5.6%	3.5%	2.6%	1.4%
	14	50	1.9%	1.3%	1.8%	1.8%	2.8%	3.1%	17.3%	2.2%	8.7%	2.9%	2.8%	0.2%
VO	15	2	3.7%	2.9%	2.6%	3.1%	2.8%	3.3%	4.3%	3.4%	3.1%	5.3%	3.8%	2.2%
	16	6	3.4%	3.7%	2.9%	3.0%	3.4%	4.2%	3.0%	2.8%	2.8%	3.6%	3.1%	2.6%
	17	10	2.5%	2.9%	2.4%	2.5%	3.0%	3.0%	3.0%	2.9%	2.1%	2.6%	3.0%	1.2%
	18	20	2.9%	2.4%	2.1%	1.7%	2.4%	2.4%	6.2%	2.0%	2.7%	2.1%	2.0%	3.8%
	19	30	2.9%	2.9%	1.6%	1.8%	1.9%	2.2%	5.7%	2.2%	4.3%	2.4%	2.4%	2.4%
	20	50	-0.2%	2.6%	1.5%	1.4%	2.1%	2.4%	16.7%	2.0%	7.2%	3.0%	1.9%	2.1%

Ääriarvojakaumien sovitus tuloksiin



Yhteenvetoa ja jatkotutkimus- tarpeita

- Saatiin tietoa todellisen liikennekuormavaikutuksen tasosta
- Tulosten luotettavuutta lisättävä jakaumien tarkemmalla testauksella, myös Frechet testattava
- Jatkotutkimustarpeita useita
 - Liikenteen kategorisointi nopeusluokkiin, akselimassojen ja nopeuksien kombinaatiot → lähtötietoa dynaamisen kertoimen vertailuun
 - Kaksi- ja useampiraiteisten siltojen kuormavaikutukset
 - Sallitun kuorman ylittävien kuormien tarkemman jakautumisen selvittäminen

Kiitos!
Kysymyksiä?

petteri.pakkanen@tuni.fi