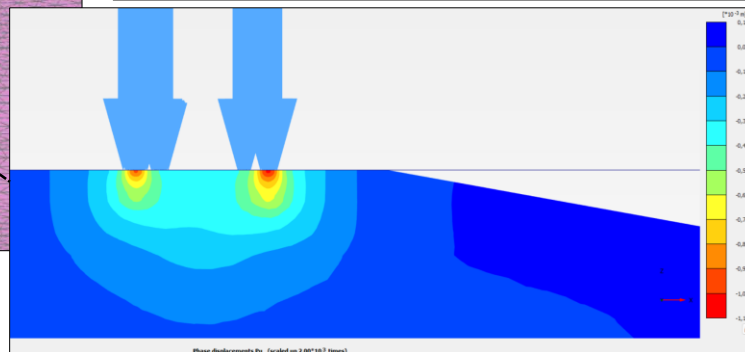
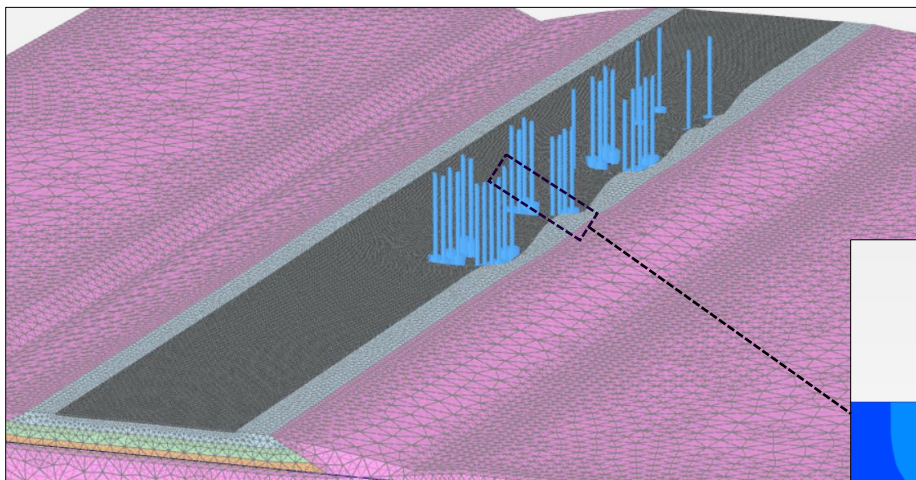


HCT-yhdistelmien tierasitusmallinnukset



Jukka Isometsä, Pauli Kolisoja, Nuutti Vuorimies
Tutkimuskeskus Terra / Tampereen yliopisto
17.12.2025

Esipuhe

Tämän tutkimuksen toimeksiantajina ovat olleet Metsäteho Oy sekä Tuoretie Oy, jonka lisäksi tutkimuksen ohjausryhmätyöskentelyssä ovat olleet mukana myös Traficom sekä Väylävirasto.

Lämpimät kiitokset myös kaikille ajoneuvoyhdistelmiä koskeneita tietoja mallinnusten lähtötiedoksi toimittaneille kuljetusyrityksille.

Sisällys

- Tutkimuksen tausta ja toteutustapa (dia 4)
- Kuormitusajoneuvot (diat 6-9)
- Mallinnetut tiepoikkileikkaukset (dia 10)
- Ajoneuvokohtaiset kuormitusvasteet (diat 11-19)
- Yhteenvedo kuormitusvastetarkasteluista (dia 20)
- Leikkausmuodonmuutosten tarkastelu (diat 21-30)
- Yhteenvedo muodonmuutostarkasteluista (dia 31)
- Kuormitusekvivalenttikerrointen vertailu (diat 32-37)
- Yhteenvedo ekvivalenttikerrointitarkasteluista (dia 38)
- Mallinnusmenetelmän rajoituksista (dia 39)
- Mahdollisia jatkotutkimusnäkökulmia (dia 40)
- Yhteenvedo kaikista tarkasteluista (dia 41)
- Lähteet (dia 42)

Tutkimuksen tausta ja toteutustapa

Tampereen yliopisto toteutti Karstulassa (Mt 697, tieosa 21) sarjan koekuormituksia raskailla ajoneuvoyhdistelmillä vuonna 2022

- Tutkimuksessa verrattiin 75 t 9-akvittisen ja 92 t 12-akselisen yhdistelmän kuormitusvaikutuksia ohutpäällysteisellä (30–40 mm) tiellä (Vuorimies et al. 2023).
- Koekuormitusten elementtimenetelmämallinnukset (FEM) sekä rakennemallien verifiointit raportoitiin Jukka Isometsän (2024) diplomityössä.

FEM tarkasteluita laajennettiin Tampereen yliopiston vuoden 2024 tutkimuksessa

- Tutkimuksessa mallinnettiin kolme ajoneuvoyhdistelmää: 84 t/10 aks. ja 100 t/12 aks. terminaaliautot sekä 76 t/9 aks. puutavara-auto (vertailuajoneuvo) kahdessa mittauspoikkileikkauksessa (MPL 1 turve, MPL 2 siltti/moreeni).
- Staattisessa analyysissä tarkasteltiin mm. asfaltin alapinnan vetomuodonmuutoksia, kantavan kerroksen jännityksiä, muodonmuutosvasteita sekä kuormitusvastaavuuskertoimia. (Isometsä et al. 2024).

FEM tarkasteluita laajennettiin edelleen kolmella uudella konttiyhdistelmällä Tampereen yliopiston vuoden 2025 tutkimuksissa

- Tutkimuksessa mallinnettiin kolme ajoneuvoyhdistelmää (80 t/11 aks., 85 t/11 aks. sekä 86 t/11 aks. konttiyhdistelmät) osana tutkimusta elinkeinoelämän HCT-tyyppiyhdistelmistä.
- FEM mallinnukset tehtiin samoille kahdelle tiepoikkileikkaukselle kuin aiemmassa tutkimuksessa (MPL 1 turvepohjamaalla, MPL 2 siltti/moreenipohjamaalla).

Kuvia mallinnetuista ajoneuvoista

75 t (koekuormitusajoneuvo 2022)



Kuva: Kuljetus Villman Oy

92 t (koekuormitusajoneuvo 2022)



Kuva: Kari Malmstedt Oy

76 t (mallinnus 2024)



Kuva: Jouko Peltoniemi Oy

100 t (mallinnus 2024)

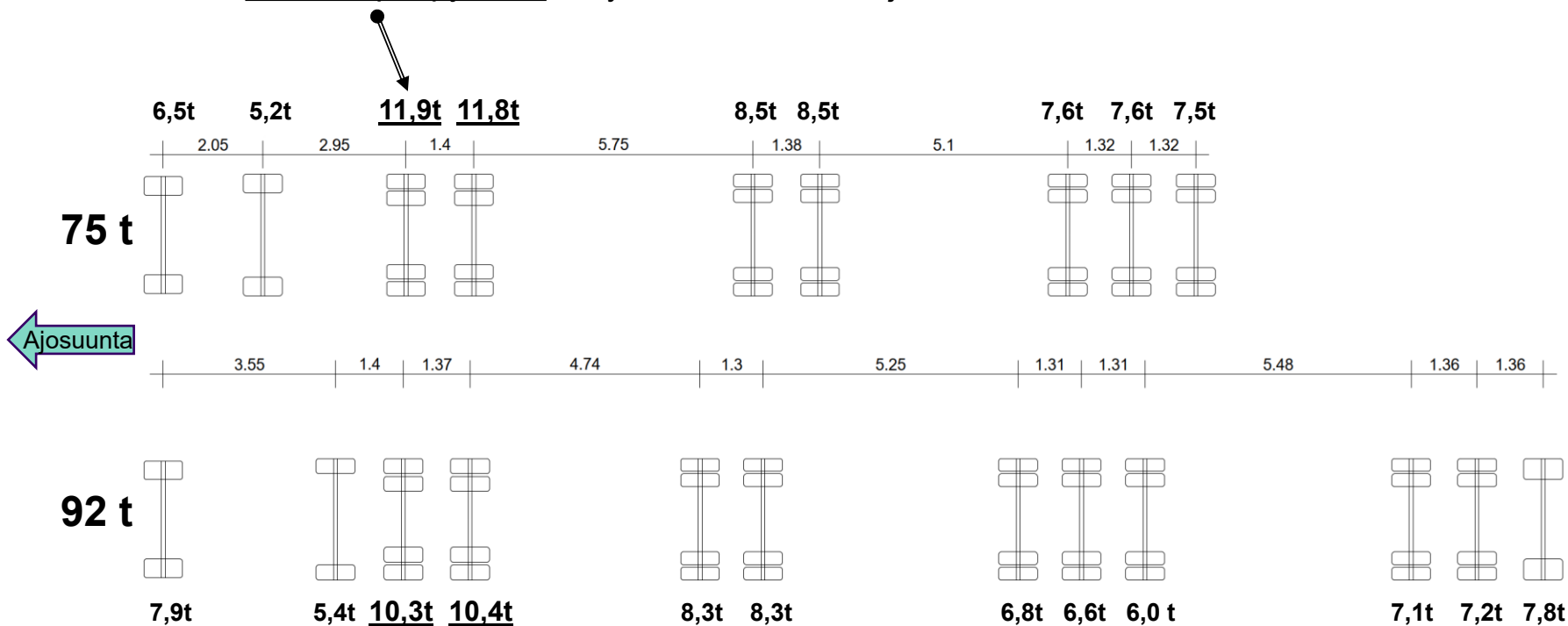


Kuva: Orpe Kuljetus Oy

Kuormitusajoneuvot 2022 – Mt 697 Karstula

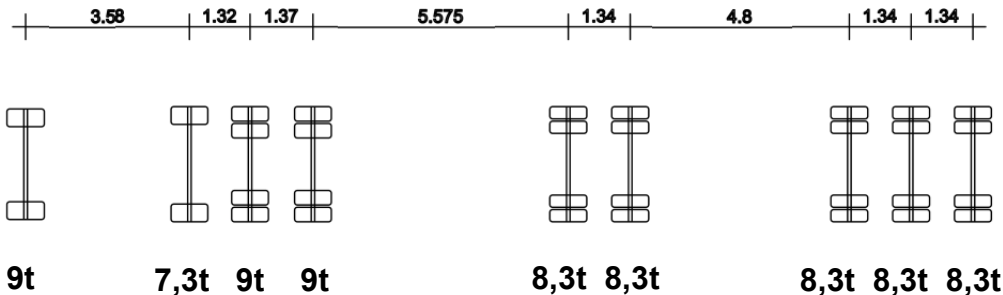
Vuorimies N, Varin P & Kolisoja P (2023) Ohutpäällysteisen tierakenteen rasittumisen vertailututkimus 2022 - Kuormituskokeet 92- ja 75-tonnisilla ajoneuvoyhdistelmillä, Väyläviraston julkaisu 59/2023

HCT:n vetävien paripyörien leveydet olivat 315 mm ja 75 tonnisen 295 mm



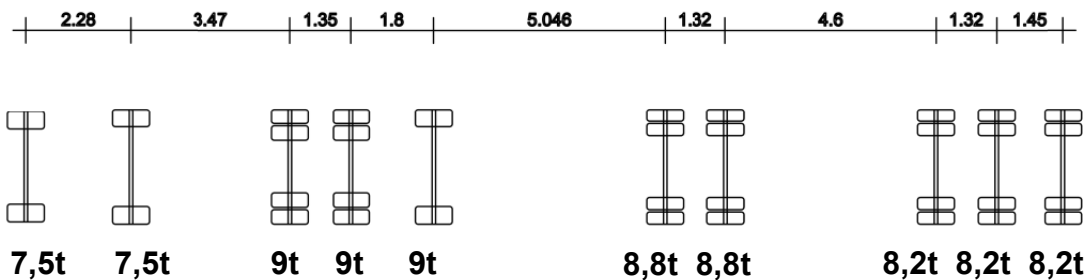
Vuonna 2024 mallinnetut ajoneuvoyhdistelmät

76 t



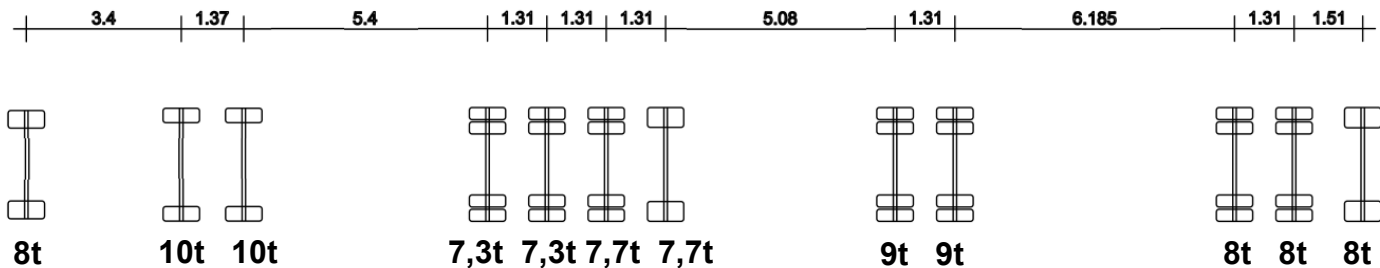
Puutavarayhdistelmä

84 t



Terminaaliauto

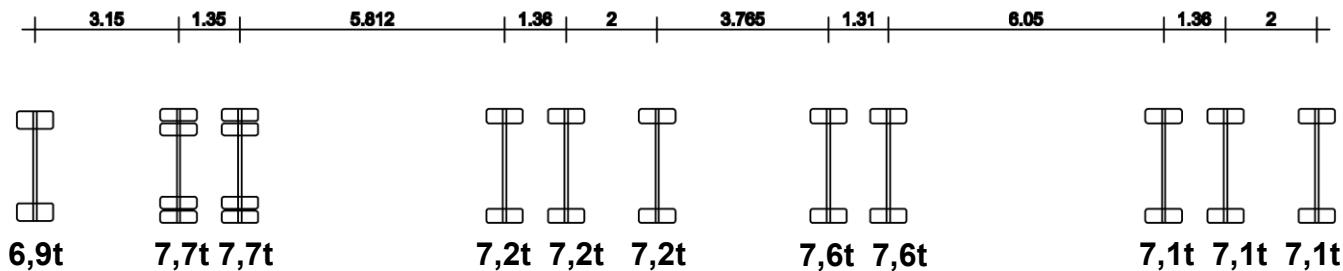
100 t



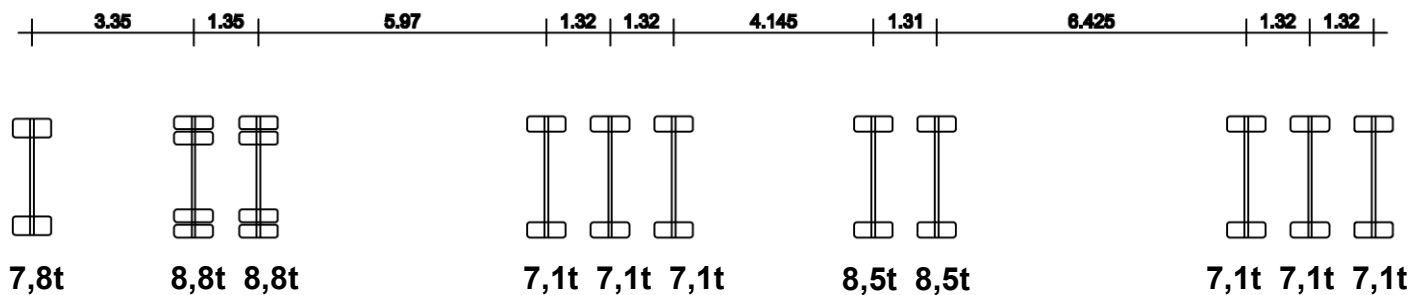
Terminaaliauto

Vuonna 2025 mallinnetut konttiyhdistelmät

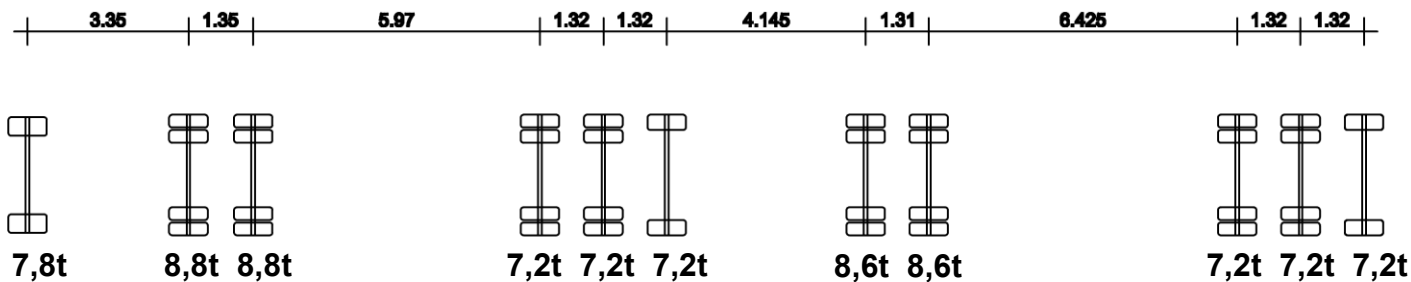
80 t



85 t

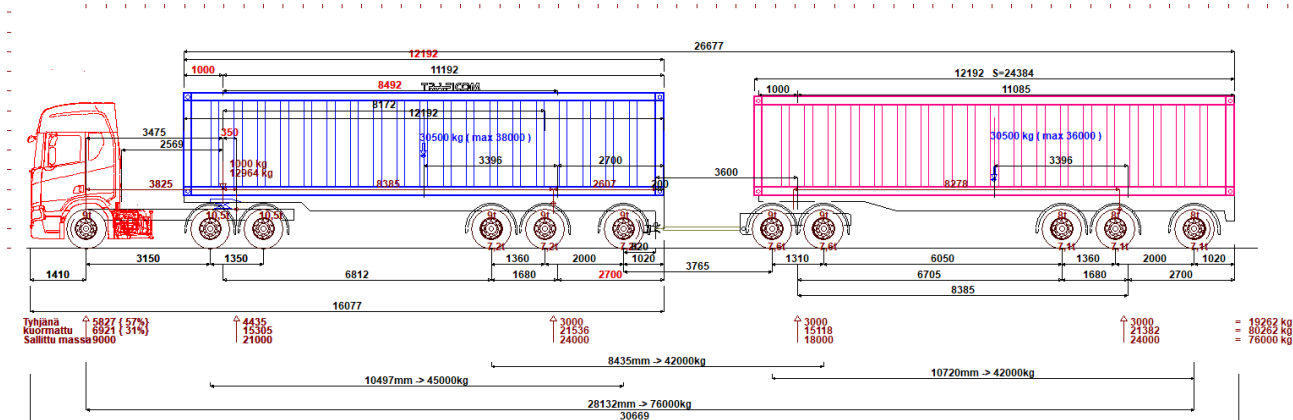


86 t



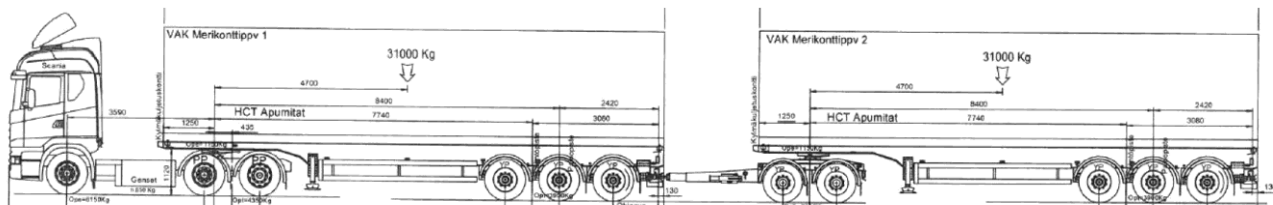
Vuonna 2025 mallinnetut konttiyhdistelmät

80 t



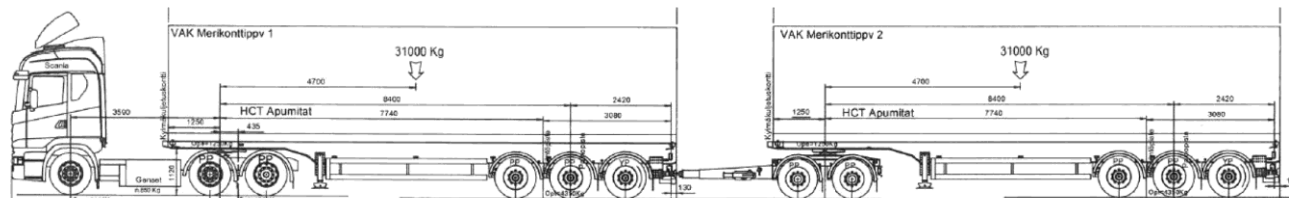
Kuva: Traficom

85 t



Kuva: Kuljetusliike Järvimäki / VAK

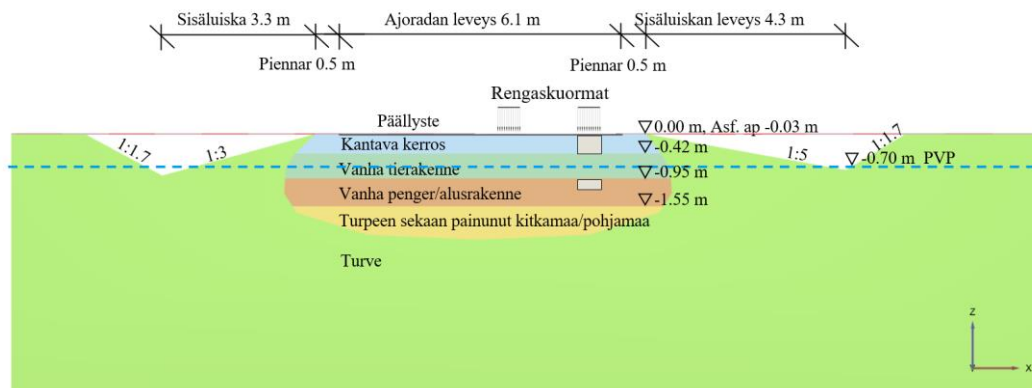
86 t



Kuva: Kuljetusliike Järvimäki / VAK

Mallinnetut tierakenteet (Mt 697, to 21)

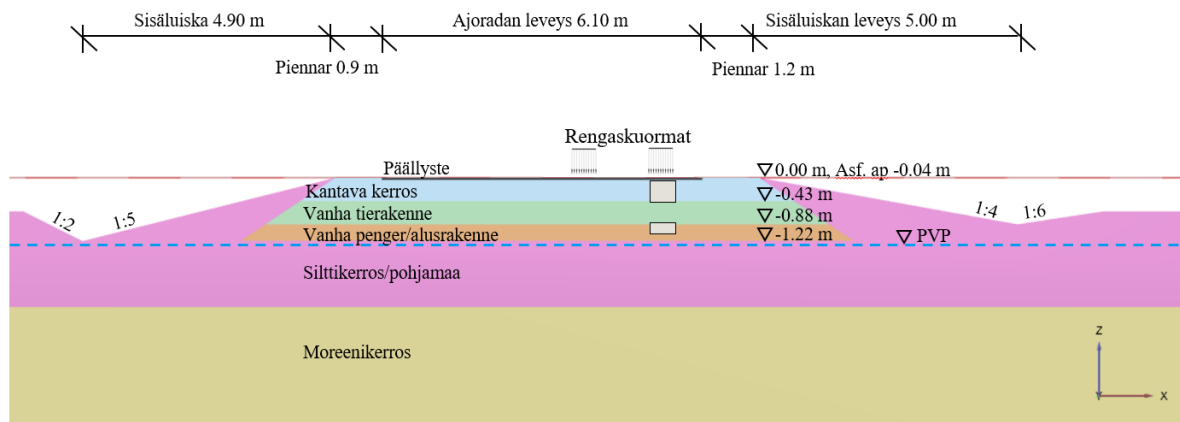
MPL 1 (PL 765)



Deviatoriset vasteet (harmaat laatikot): kantava kerros [-0,04; -0,45], alusrakenne [-0,95; -1,15]

Tavalliset vasteet: asfaltin alapinta -0,03 m, kantavan kerroksen yläosa -0,18 m ja pohjamaa -1,55 m (MPL 1)

MPL 2 (PL 1410)



Deviatoriset vasteet (harmaat laatikot): kantava kerros [-0,05; -0,43], alusrakenne [-0,90; -1,12]

Tavalliset vasteet: asfaltin alapinta -0,04 m, kantavan kerroksen yläosa -0,18 m ja pohjamaa -1,22 m (MPL 2)

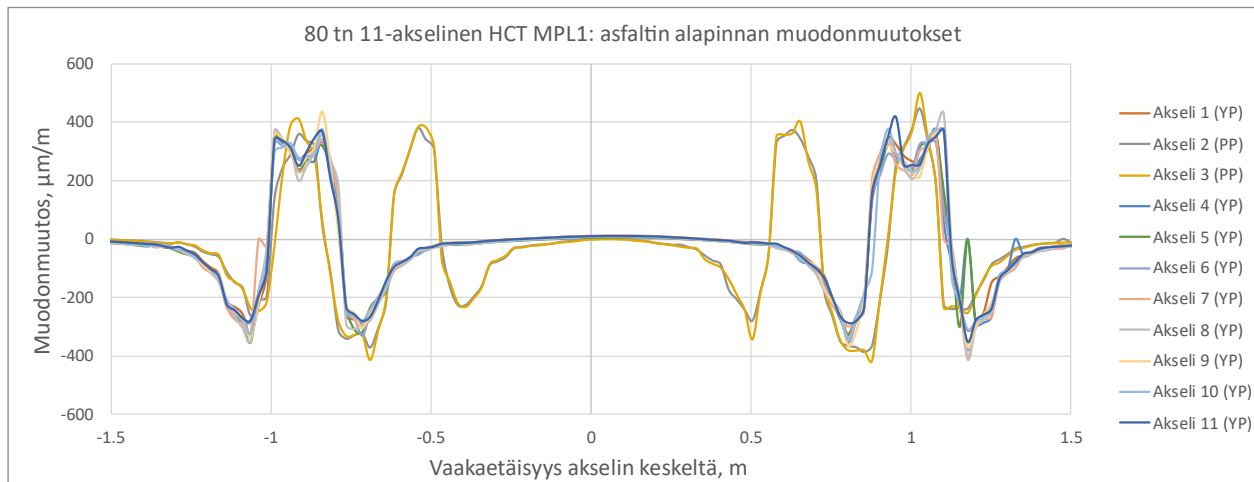
MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (syvyys: -0,03; -0,04 m) (80 tn 11-akselinen HCT)

*Vetomuodonmuutos:
positiivinen*

*YP=Yksikköpyörillä
varustettu akseli*

*PP=Paripyörillä
varustettu akseli*

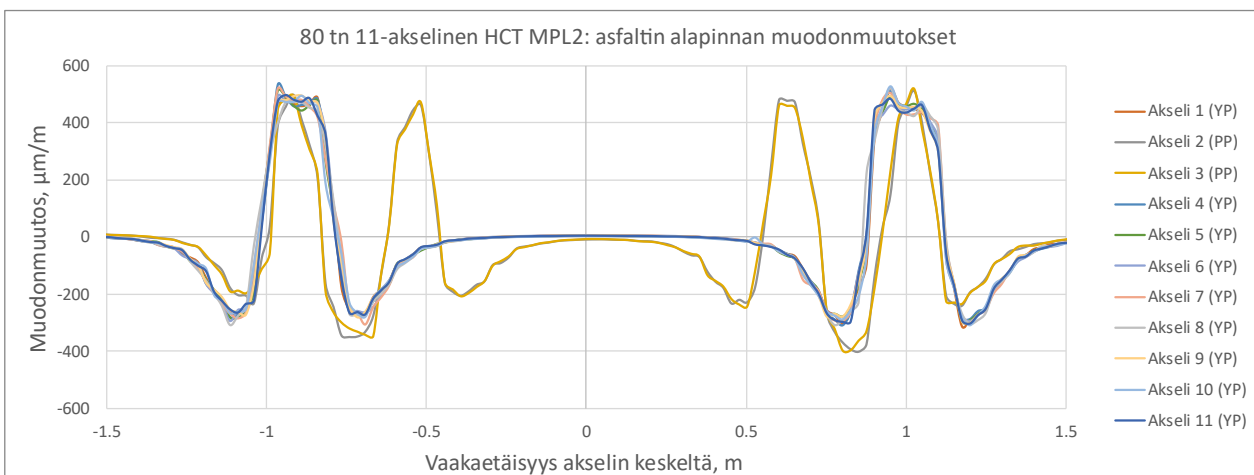
*MPL 1 asfaltin ap -0,03 m
MPL 2 asfaltin ap -0,04 m*



 **6,9t**

 **7,7t**
 **7,7t**

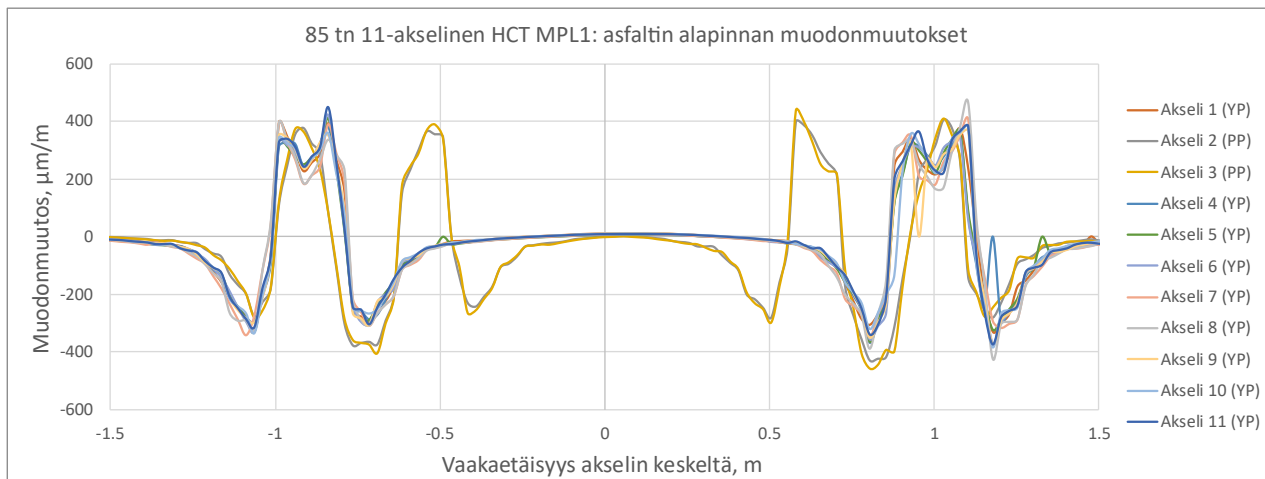
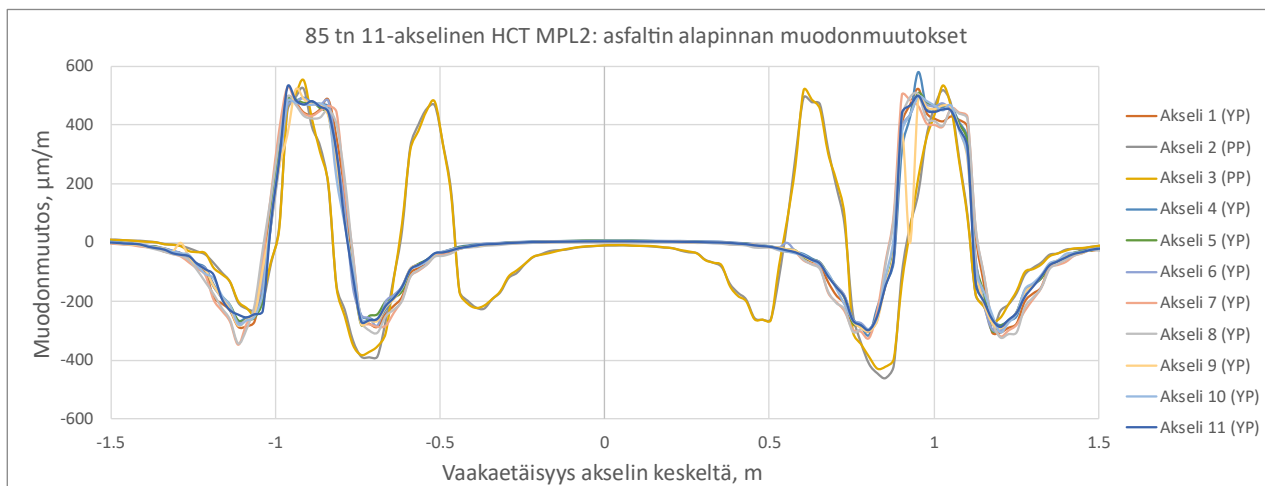
 **7,2t**
 **7,2t**
 **7,2t**



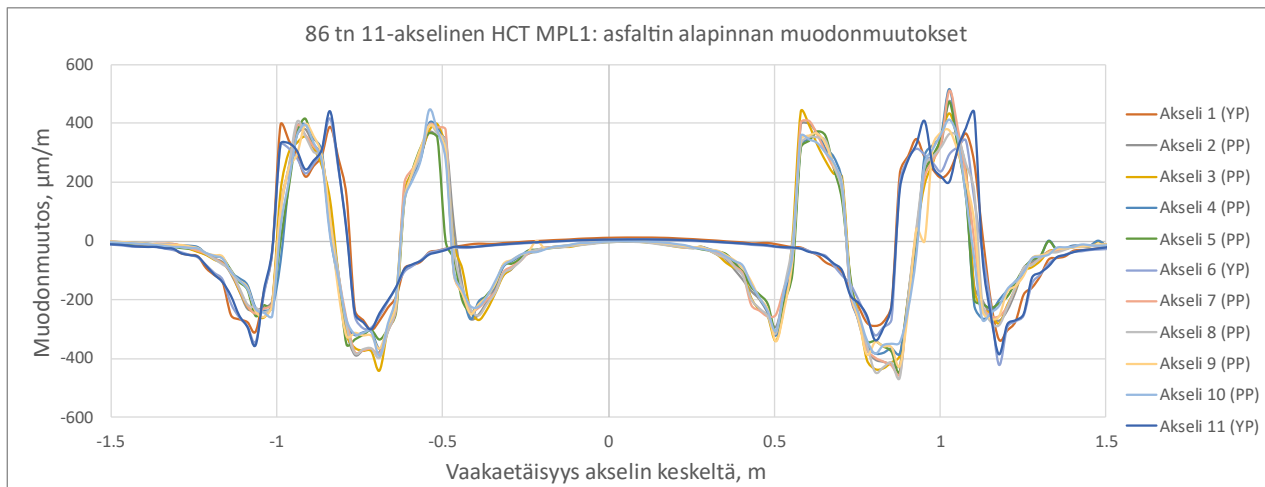
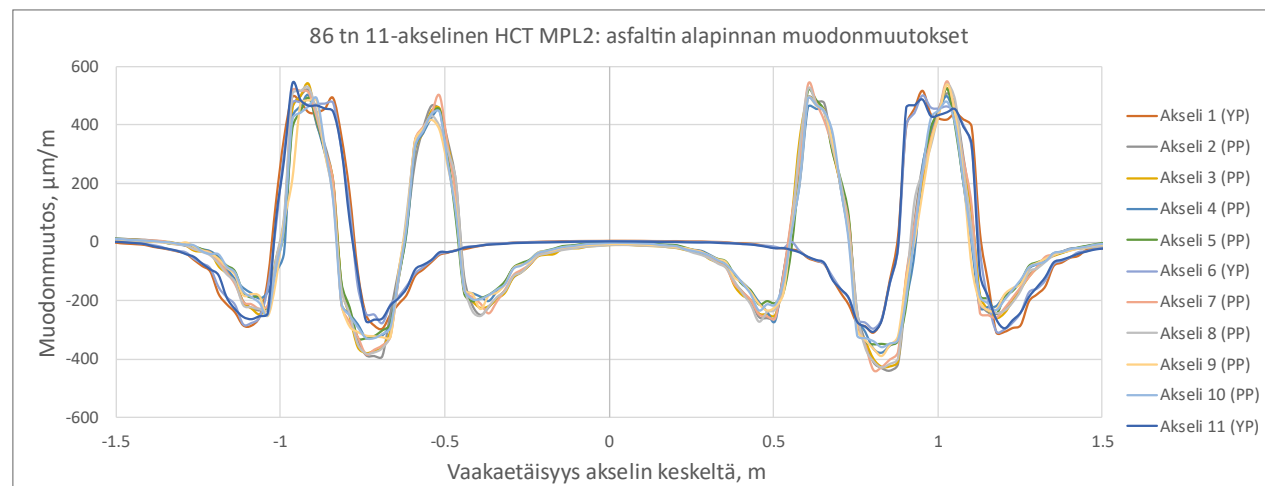
 **7,6t**
 **7,6t**

 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

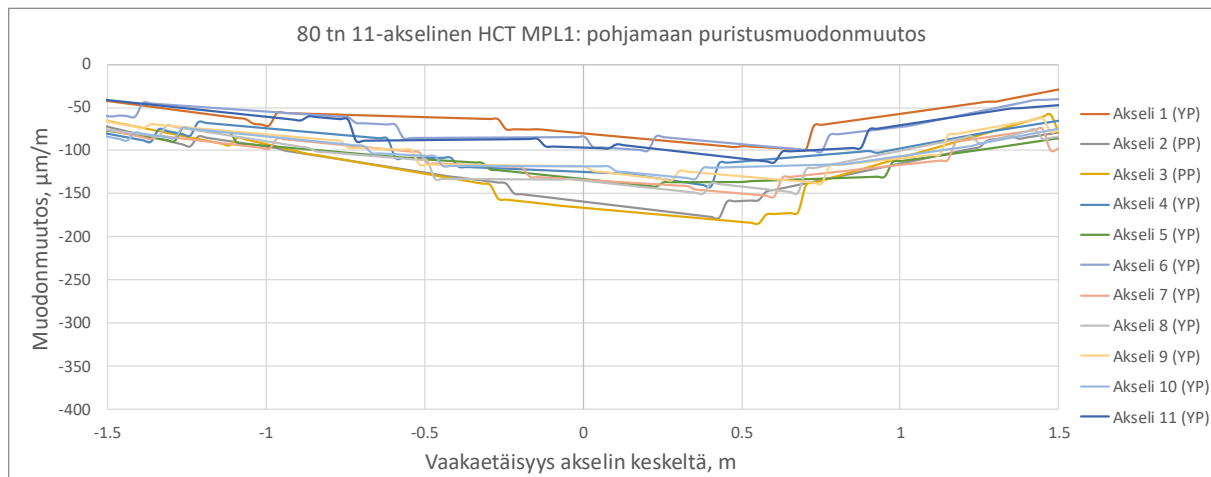
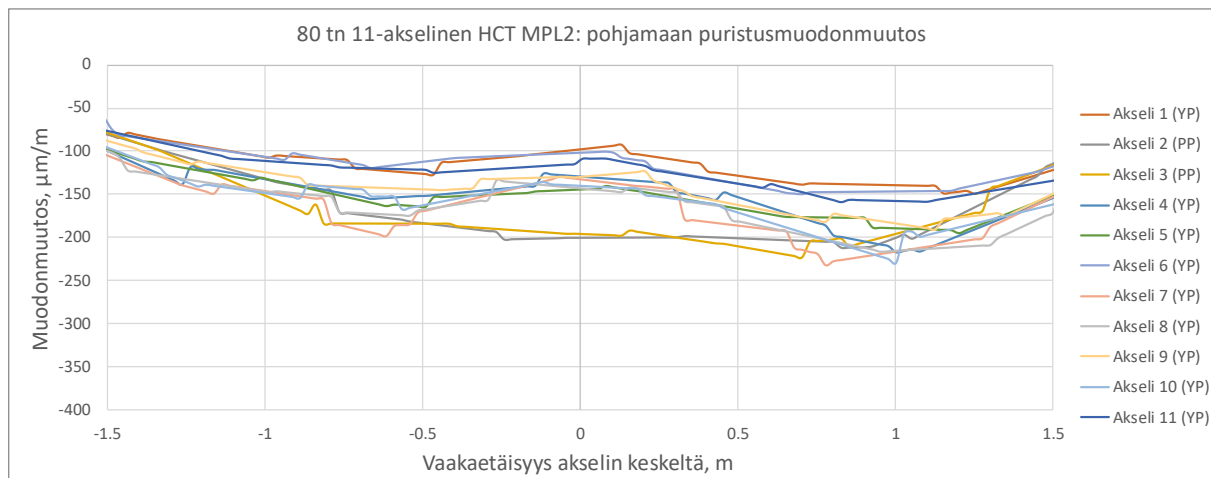
MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (syvyys: -0,03; -0,04 m) (85 tn 11-akselinen HCT)


 **7,8t**
 **8,8t**
 **8,8t**
 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

 **8,5t**
 **8,5t**
 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

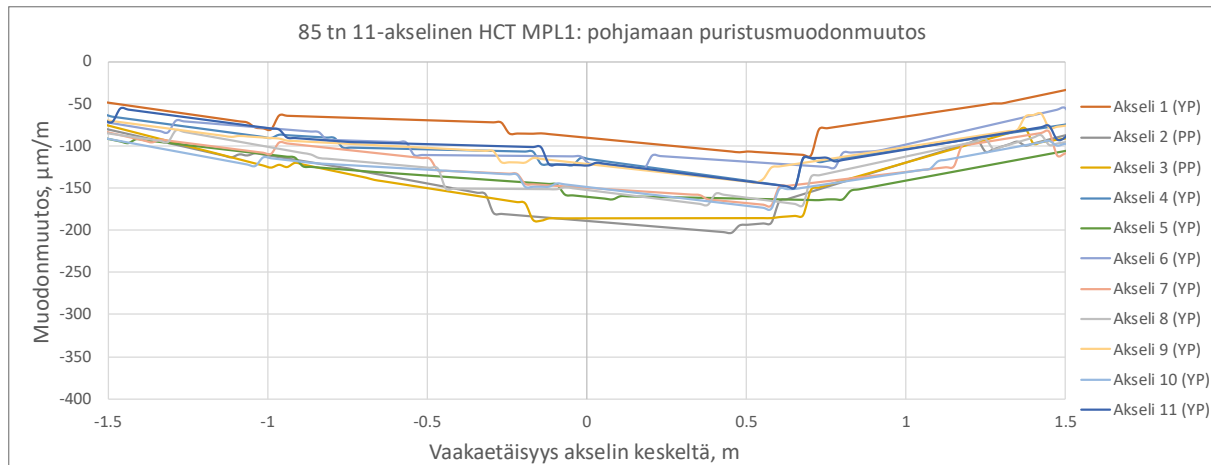
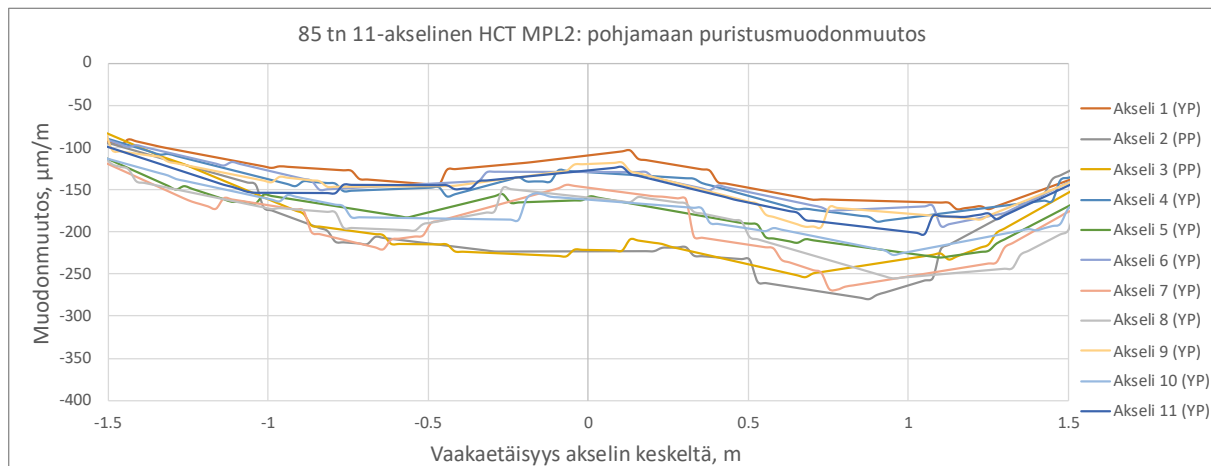
MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (syvyys: -0,03; -0,04 m) (86 tn 11-akselinen HCT)


 **7,8t**
 **8,8t**
 **8,8t**
 **7,2t**
 **7,2t**
 **7,2t**

 **8,6t**
 **8,6t**
 **7,2t**
 **7,2t**
 **7,2t**

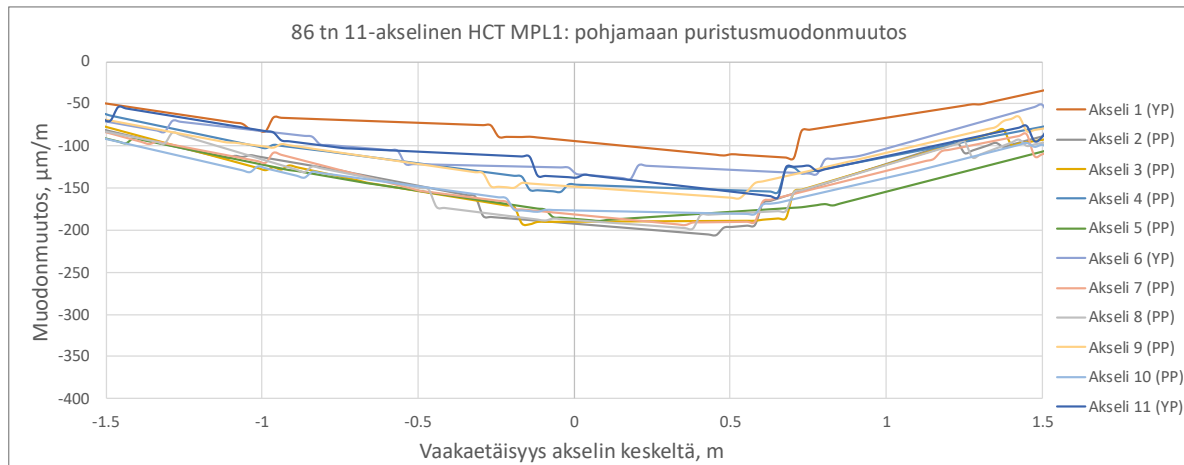
Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (80 tn 11-akselinen HCT)


 **6,9t**
 **7,7t**
 **7,7t**
 **7,2t**
 **7,2t**
 **7,2t**

 **7,6t**
 **7,6t**
 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (85 tn 11-akselinen HCT)


 **7,8t**
 **8,8t**
8,8t
 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

 **8,5t**
 **8,5t**
 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

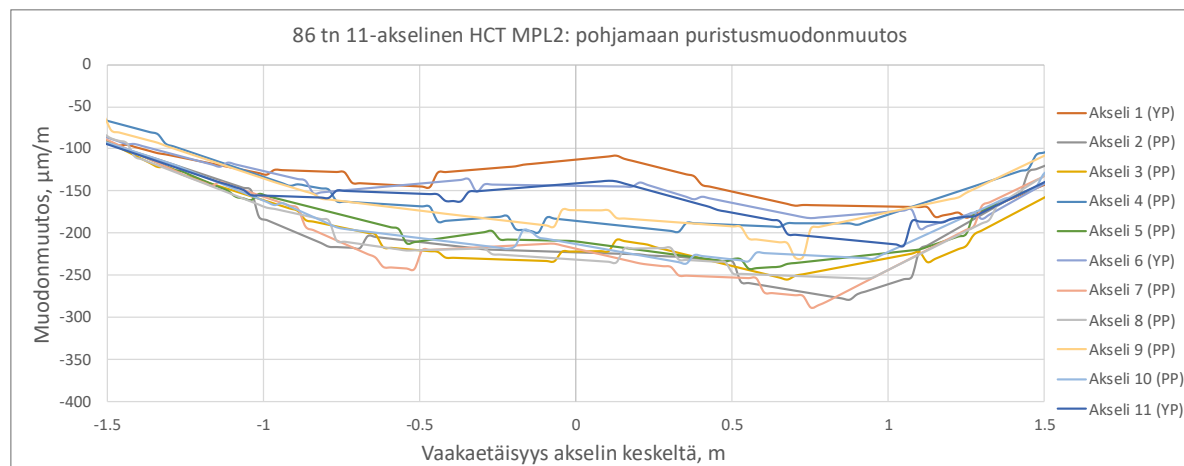
Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (86 tn 11-akselinen HCT)



7,8t

8,8t
8,8t

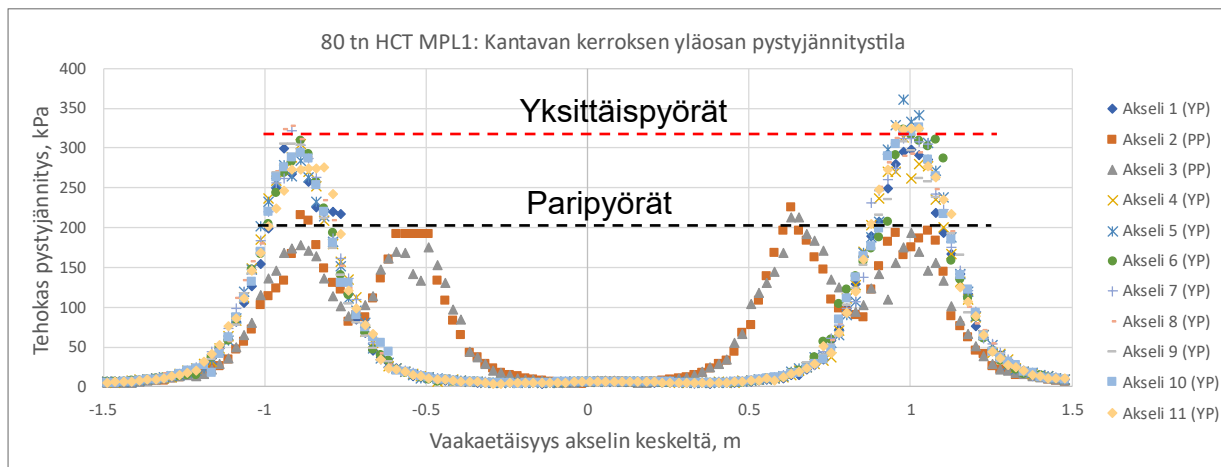
7,2t
7,2t
7,2t



8,6t
8,6t

7,2t
7,2t
7,2t

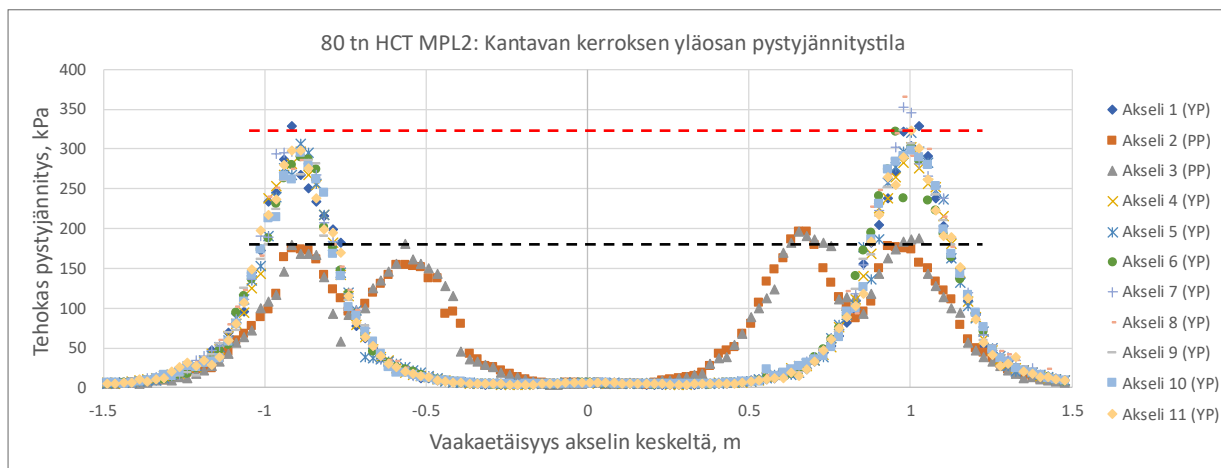
Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (80 tn 11-akselinen HCT)



6,9t

7,7t
7,7t

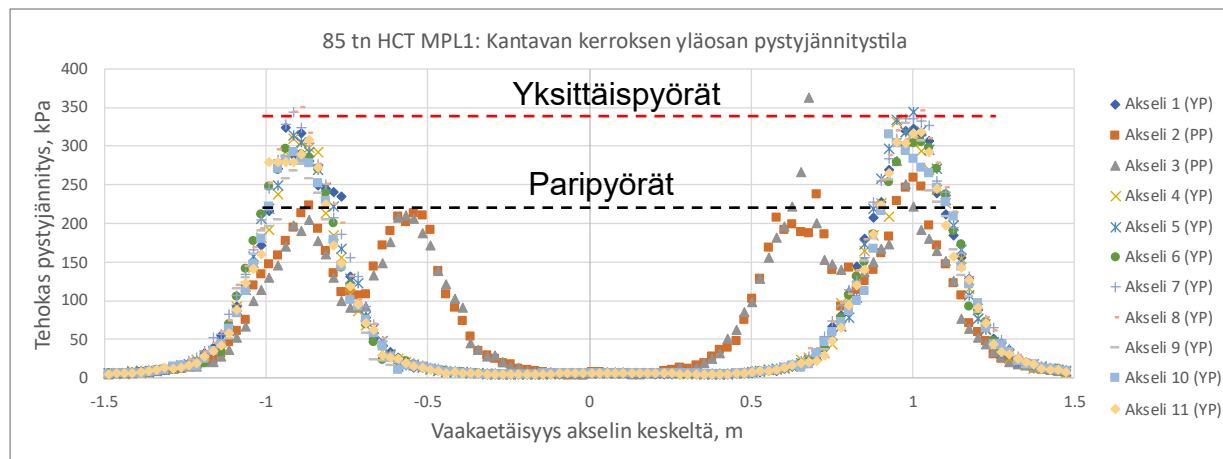
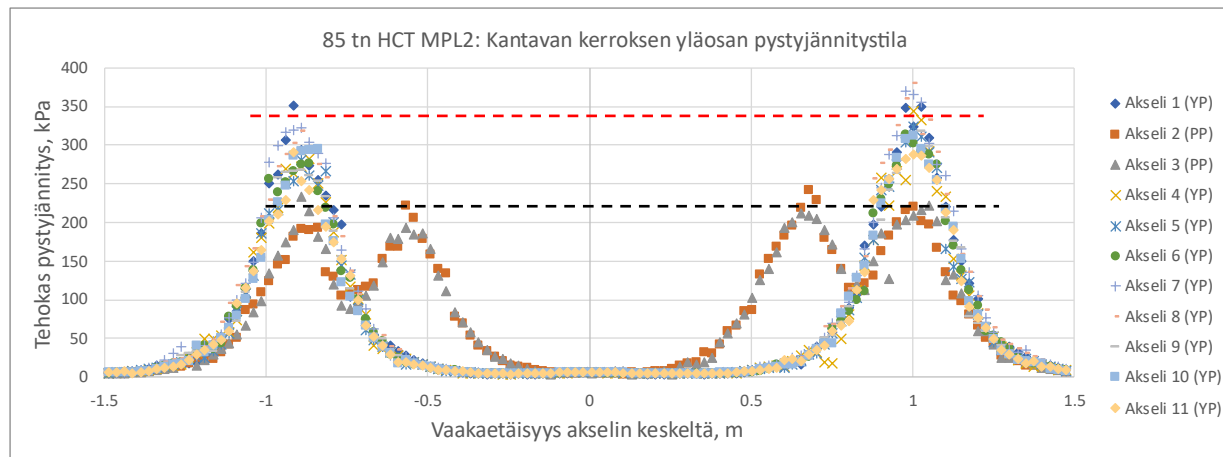
7,2t
 7,2t
 7,2t



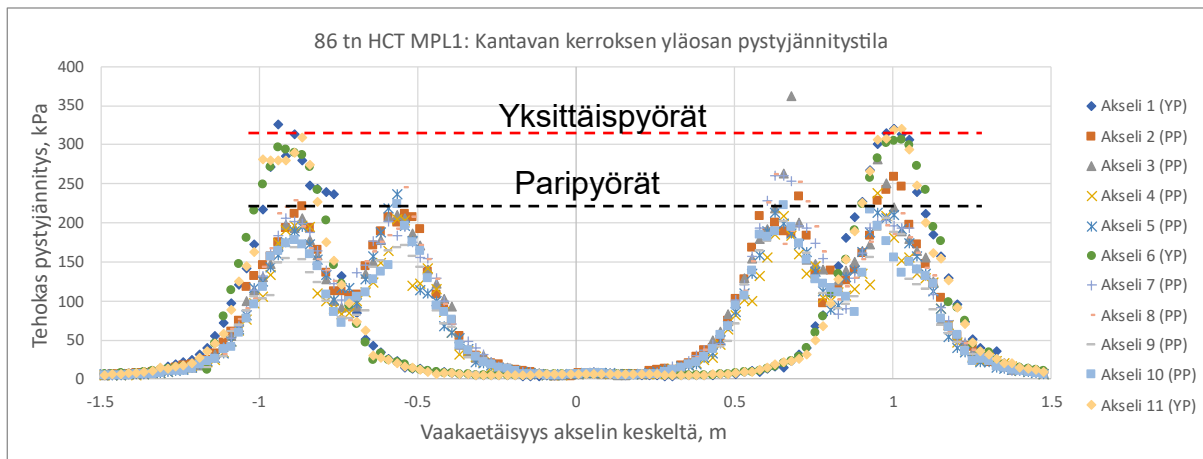
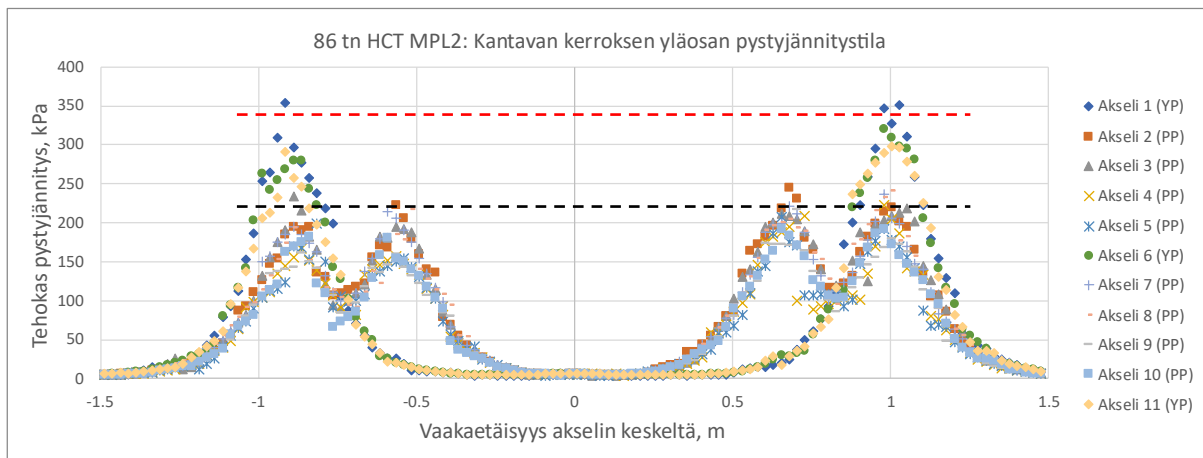
7,6t
 7,6t

7,1t
 7,1t
 7,1t

Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (85 tn 11-akselinen HCT)


 **7,8t**
 **8,8t**
 **8,8t**
 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

 **8,5t**
 **8,5t**
 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

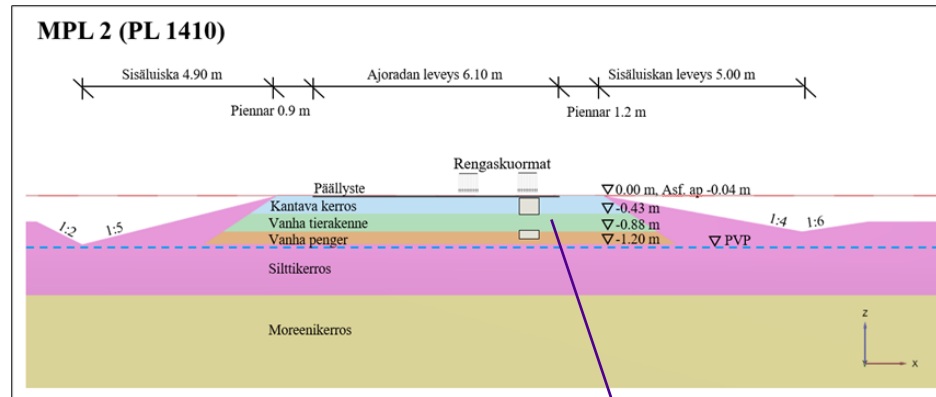
Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (86 tn 11-akselinen HCT)


 **7,8t**
 **8,8t**
 **8,8t**
 **7,2t**
 **7,2t**
 **7,2t**

 **8,6t**
 **8,6t**
 **7,2t**
 **7,2t**
 **7,2t**

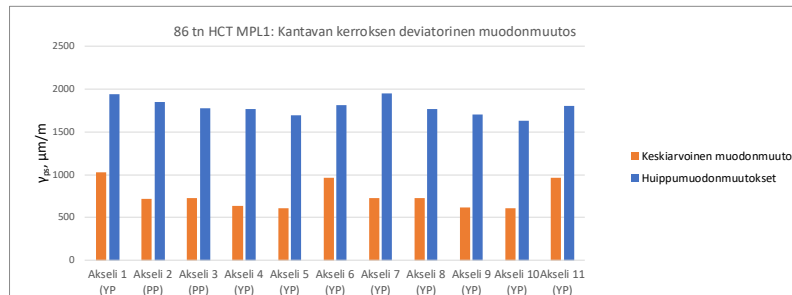
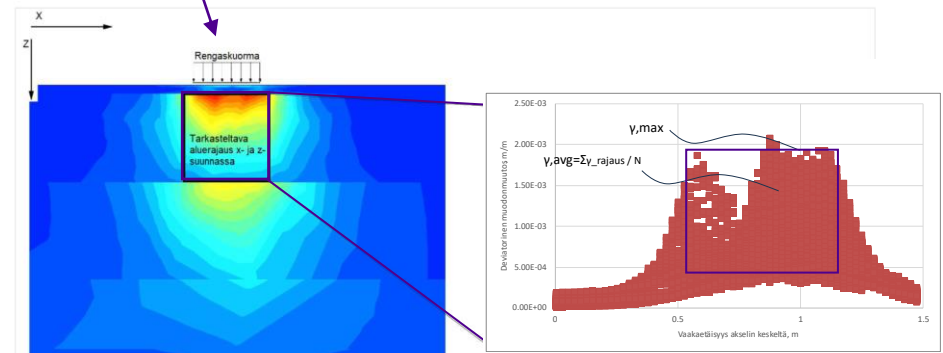
Yhteenveto vastetarkasteluista (diat 11-19)

- **Asfaltin alapinnan vetomuodonmuutokset**
 - Huippuarvot (400–600 $\mu\text{m}/\text{m}$) edustavat suuria rasituksia päällysteen kestoiän kannalta ohutpäällysteisellä tiellä.
 - Akseliston rengastuksella on pieni vaikutus vetomuodonmuutosten huippuarvoihin, ja eri poikkileikkausten sekä ajoneuvoyhdistelmien välillä eroavaisuudet jäivät pienehköiksi.
 - MPL 1:ssä asfaltin alapinnan venymät olivat hieman pienempiä kuin MPL 2:ssa. Tähän voi vaikuttaa se, että pehmeä pohjamaa jousti kokonaisuutena ajoneuvokuormituksen alla.
- **Pohjamaan puristusmuodonmuutokset**
 - Pohjamaan puristusmuodonmuutokset olivat maltillisia. Suurimmat arvot olivat raskaimpien akseleiden/telien kohdalla. Rengastuksella todettiin olevan vähäinen vaikutus pohjamaan tason puristusmuodonmuutoksiin.
 - MPL 1 vasteet olivat pienempiä kuin MPL 2. Syynä tähän oli suurempi tarkastelusyvyys sekä turpeeseen painunut kitkamaakerros.
 - Poikkileikkausten välinen ero näkyi selvästi: suurimmat muodonmuutokset olivat MPL 1 akseleiden keskikohdalla ja MPL 2 ajourien kohdalla.
- **Kantavan kerroksen pystyjännitystila 180 mm syvyydessä tien pinnasta**
 - Ohuen päällystekerroksen vuoksi kantavan kerroksen pystyjännitykset olivat suuria, erityisesti yksikköpyörien alla ($\geq 350 \text{ kPa}$; paripyörät $\sim 250 \text{ kPa}$).
 - MPL 1:ssä pystyjännitykset hieman suurempia ohuemman päällysteen takia.

Deviatoristen leikkausmuodonmuutosten käsittely



Mallinnetun deviatorisen muodonmuutoskentän (aluerajauksessa +50 000 solmun data) muuntaminen edustaviksi arvoiksi akseleittain



Kantavan kerroksen deviatoriset muodonmuutokset (80 tn 11-akselinen HCT)

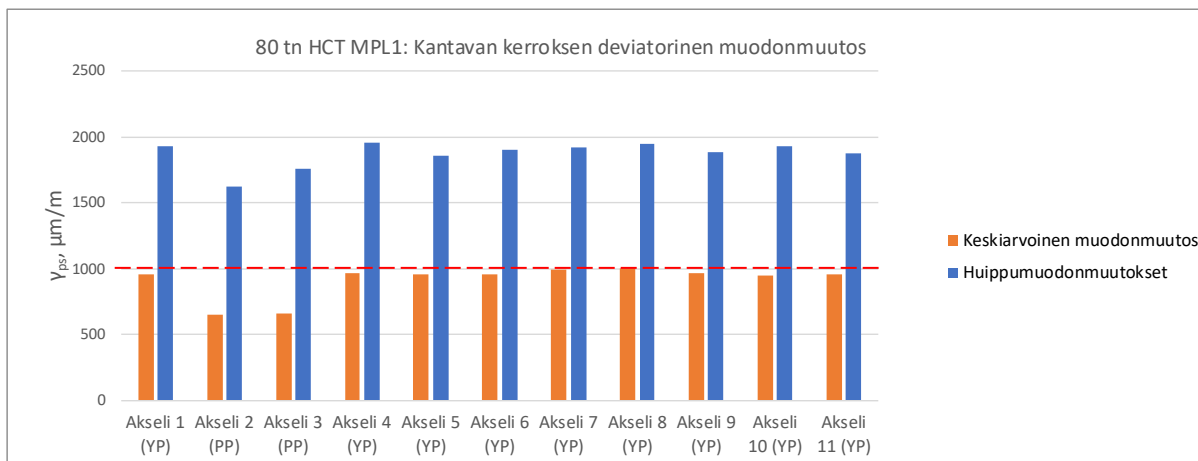
Päällysteen paksuus
30 mm

YP=Yksikköpyörillä
varustettu akseli

PP=Paripyörillä
varustettu akseli

Päällysteen paksuus
40 mm

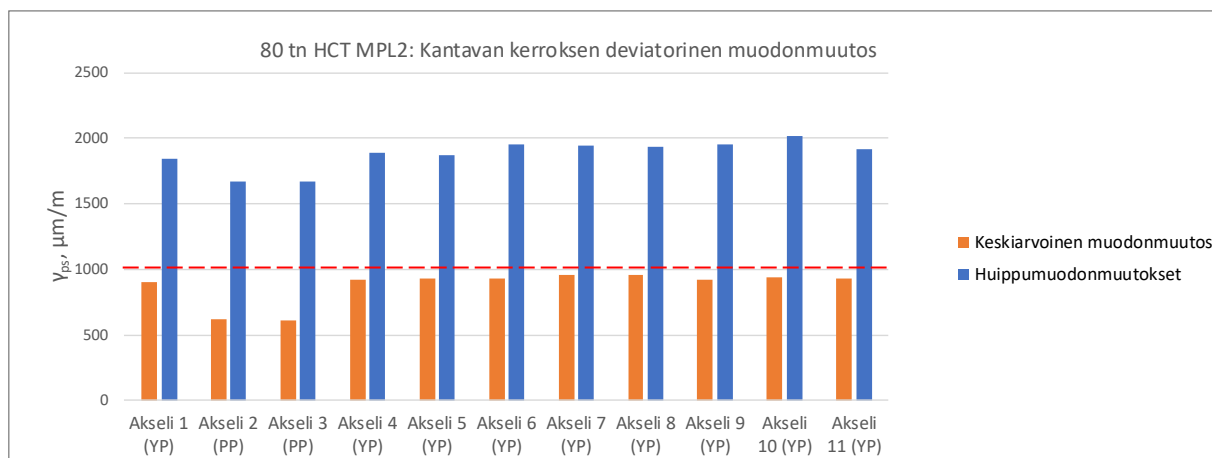
Punainen katkoviiva (1000 $\mu\text{m/m}$, 0.1%). Yli 1000 $\mu\text{m/m}$ arvojen
otaksutaan aiheuttavan nopeasti kehittyviä pysyviä
muodonmuutoksia



 **6,9t**

 **7,7t**
 **7,7t**

 **7,2t**
 **7,2t**
 **7,2t**

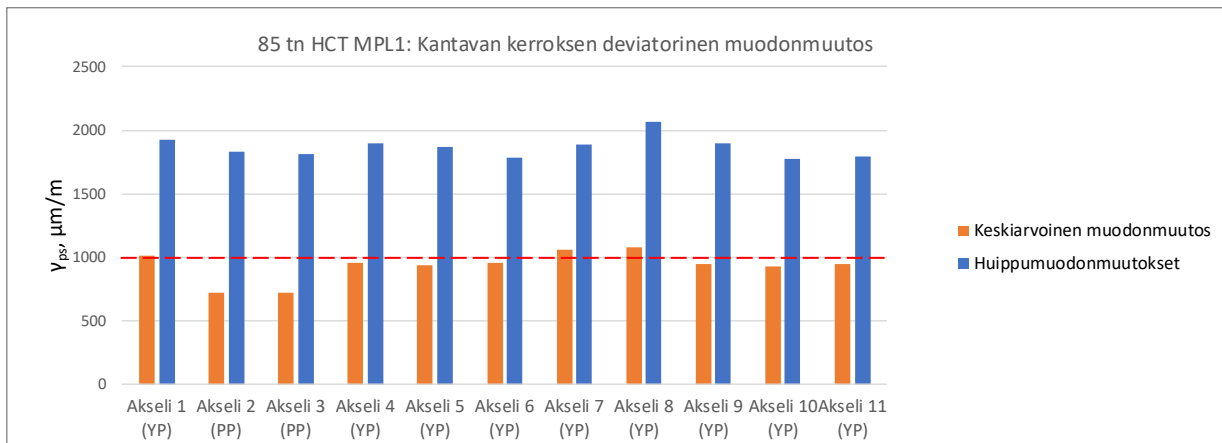


 **7,6t**
 **7,6t**

 **7,1t**
 **7,1t**
 **7,1t**

Kantavan kerroksen deviatoriset muodonmuutokset (85 tn 11-akselinen HCT)

Päällysteen paksuus
30 mm

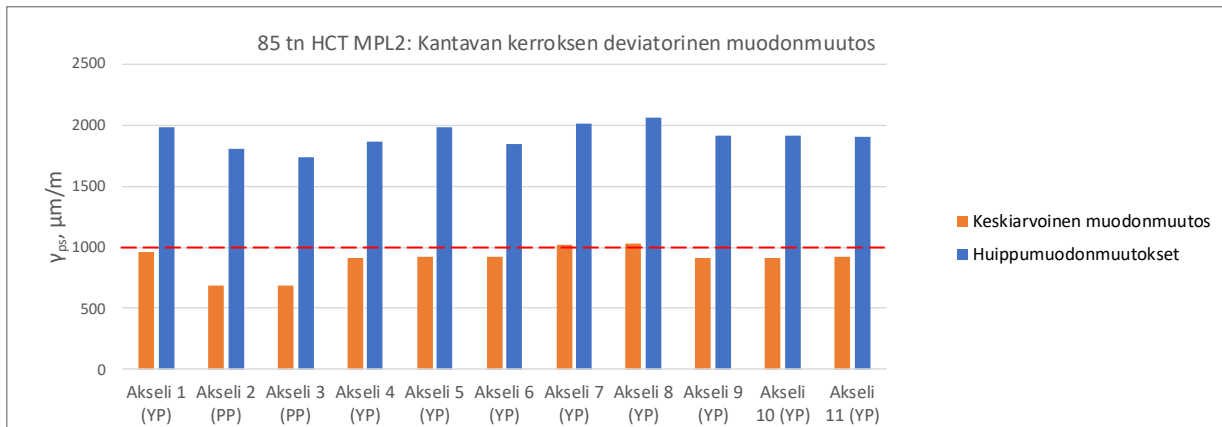


 7,8t

 8,8t
 8,8t

 7,1t
 7,1t
 7,1t

Päällysteen paksuus
40 mm

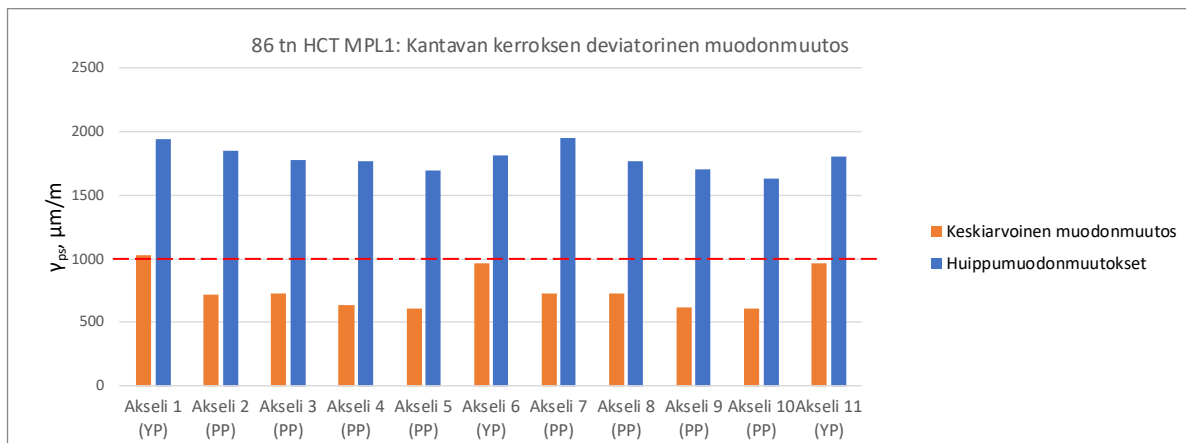


 8,5t
 8,5t

 7,1t
 7,1t
 7,1t

Kantavan kerroksen deviatoriset muodonmuutokset (86 tn 11-akselinen HCT)

Päällysteen paksuus
30 mm

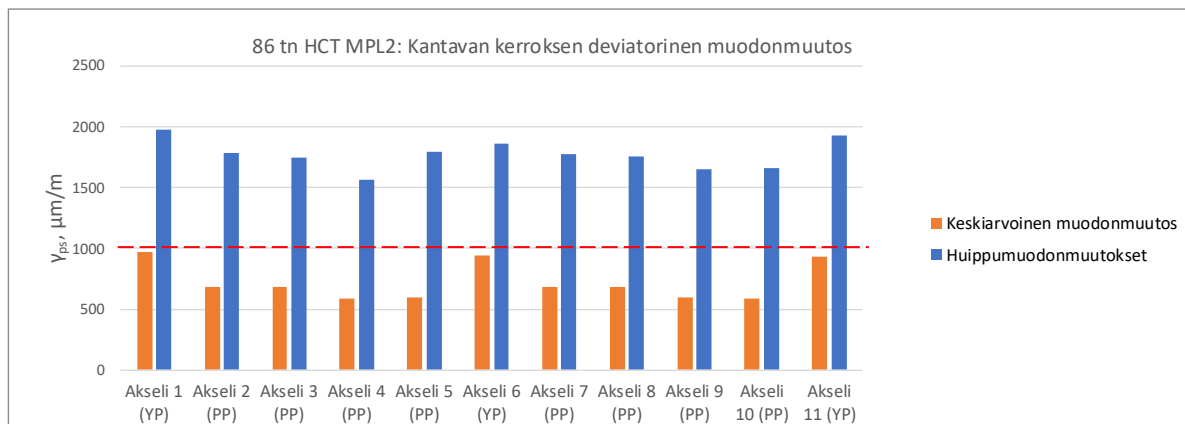


 7,8t

 8,8t
 8,8t

 7,2t
 7,2t
 7,2t

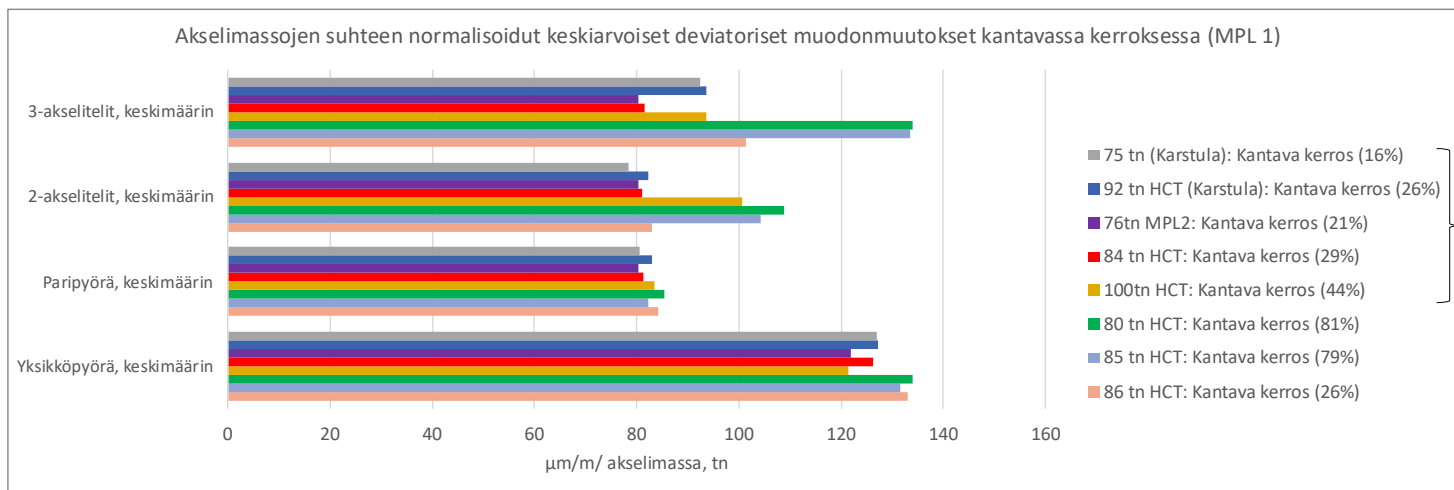
Päällysteen paksuus
40 mm



 8,6t
 8,6t

 7,2t
 7,2t
 7,2t

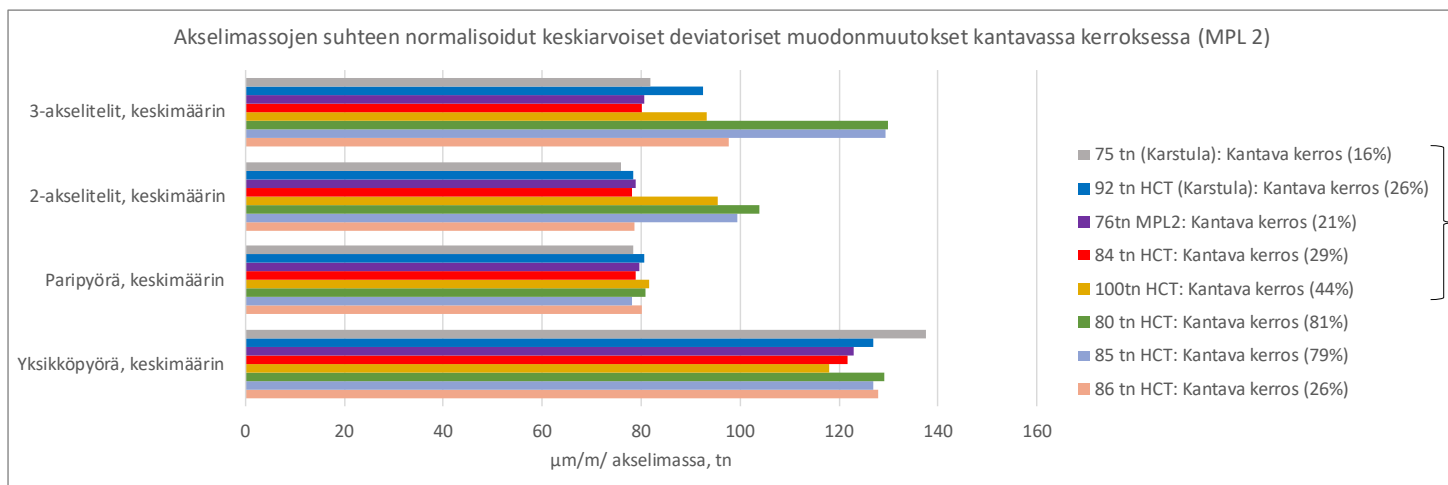
Normalisoidut deviatoriset muodonmuutokset kantavassa kerroksessa



Isometsä,
Kolisoja &
Vuorimies
(2024)

Päällysteen paksuus
30 mm

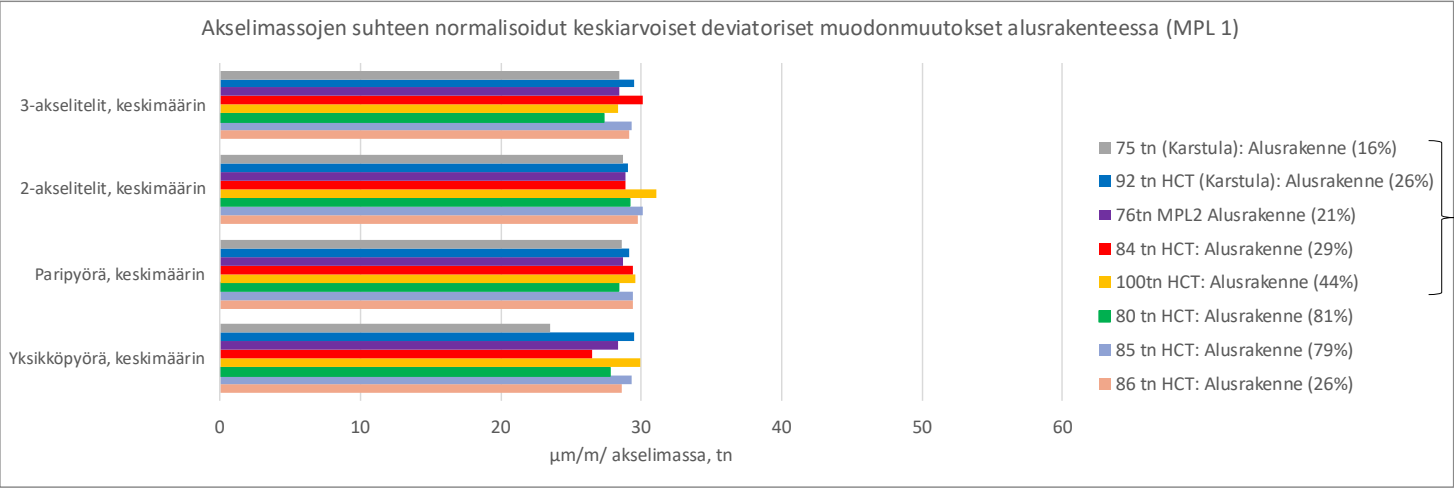
(%): yksikköpyöräakseleiden
massan osuus ajoneuvon
kokonaismassasta



Isometsä,
Kolisoja &
Vuorimies
(2024)

Päällysteen paksuus
40 mm

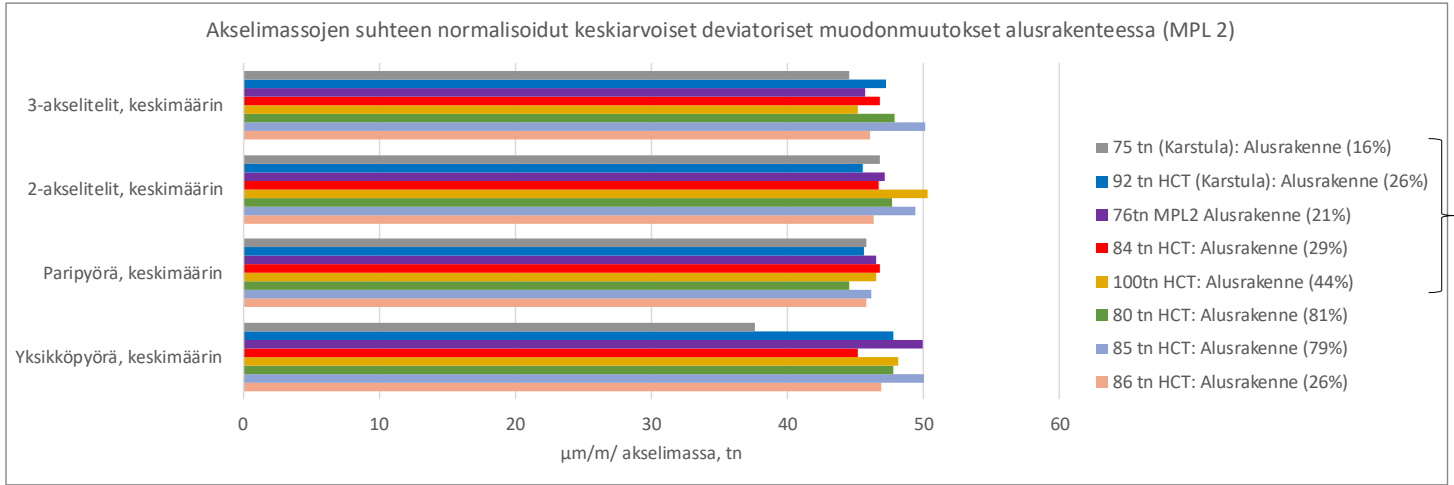
Normalisoidut deviatoriset muodonmuutokset alusrakenteessa



Päällysteen paksuus
30 mm

Isometsä,
Kolisoja &
Vuorimies
(2024)

(%): yksikköpyöräakseleiden
massan osuus ajoneuvon
kokonaismassasta

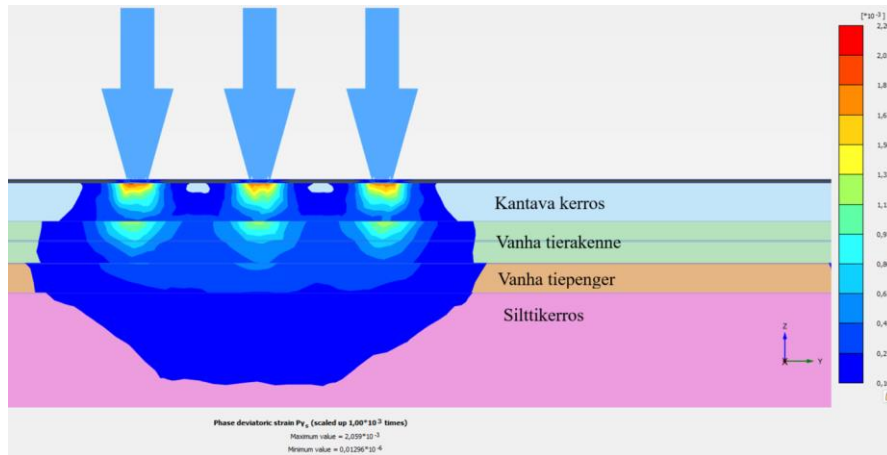


Päällysteen paksuus
40 mm

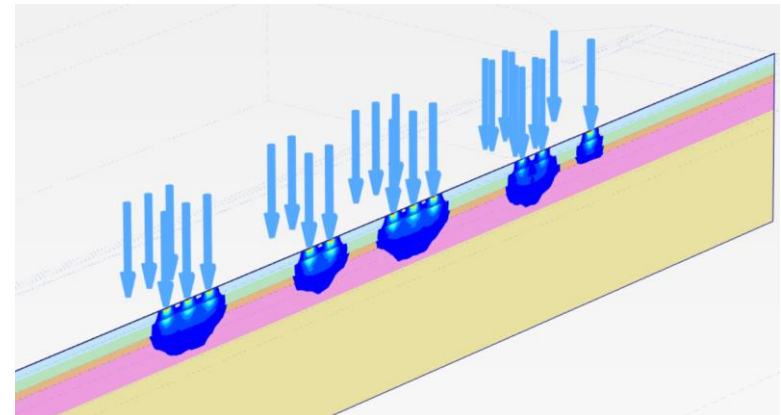
Isometsä,
Kolisoja &
Vuorimies
(2024)

Akselivälien vaikutus staattisessa mallissa

MPL 2 (PL 1410)



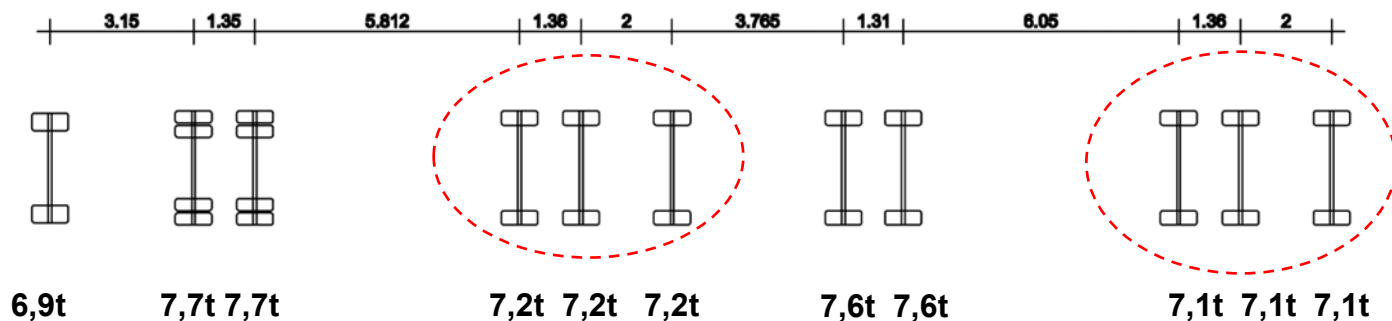
- Staattinen FEM-malli ei huomioi liikkuvan ajoneuvokuormituksen kaikkia piirteitä
- Staattisessa tarkastelussa on kuitenkin havaittavissa kumuloituvaa vaikutusta
 - Kuvissa on esitetty deviatorisen leikkausmuodonmuutoskentän muutoksia eri tierakenteen syvyyksillä.
 - Telin keskimmäisen akselin kohdalla alemmissa kerroksissa sekä pohjamaan tasolla on havaittavissa vierekkäisten akselien vaikutusten kumuloituvaa vaikutusta.
 - Kantavassa kerroksessa kumuloituvaa vaikutusta esiintyy vain vähäisesti.



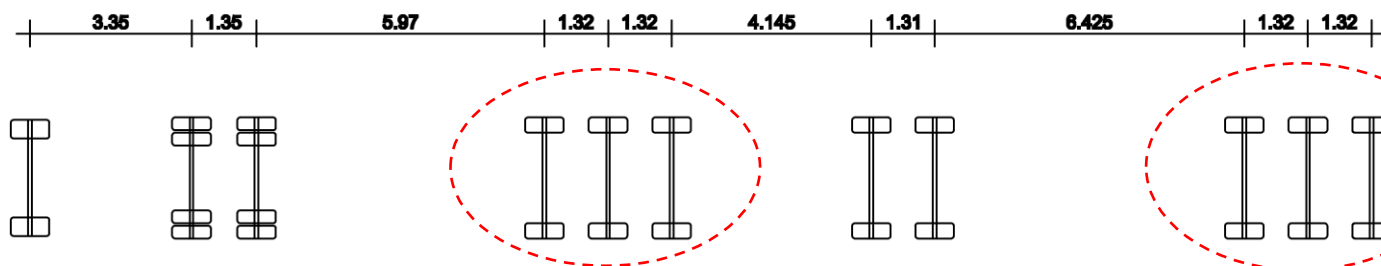
Akselivälien vaikutus staattisessa mallissa

- Akselivälin vaikutuksen havainnollistamiseksi staattisessa mallinnuksessa tehtiin tarkastelu seuraavilla lähtökohdilla:
 - 80 t ajoneuvoyhdistelmän (Ajoneuvo A) akselimassat asetettiin 85 t ajoneuvoyhdistelmän akselistolle (Ajoneuvo B). Rengastukset sekä rengaspaineet pidettiin molemmissa tapauksissa samoina.
 - Huomionarvoisena seikkana nähdään eroavaisuudet 3-akselisten telien akseleiden etäisyyksissä.
- Vertailussa tarkasteltiin
 - Deviatorisen leikkausmuodonmuutoksen huippu- ($\gamma_{\max}$) ja keskiarvoisia (γ_{avg}) tuloksia.

Ajoneuvoyhdistelmä A



Ajoneuvoyhdistelmä B



Akselivälien vaikutus staattisessa mallissa: Vaikutus kantavassa kerroksessa

Maksimiarvot

Akseli nro.	Akselimassa (tn)	$\gamma, \max$ (%)	$\gamma, \max$ (%)	Erot (%)
1	6.92	0.1844	0.1859	+0.8%
2	7.65	0.1668	0.1704	+2.2%
3	7.65	0.1665	0.1611	-3.3%
4	7.18	0.1886	0.1863	-1.2%
5	7.18	0.1868	0.1986	+6.3%
6	7.18	0.1955	0.1880	-3.8%
7	7.56	0.1945	0.1913	-1.6%
8	7.56	0.1936	0.1931	-0.3%
9	7.13	0.1954	0.1924	-1.6%
10	7.13	0.2014	0.1922	-4.5%
11	7.13	0.1921	0.1921	+/-0.0%

Keskiarvot

Akseli nro.	Akselimassa (tn)	γ, avg (%)	γ, avg (%)	Erot (%)
1	6.92	0.0902	0.0907	+0.6%
2	7.65	0.0624	0.0616	-1.2%
3	7.65	0.0614	0.0613	-0.1%
4	7.18	0.0925	0.0922	-0.3%
5	7.18	0.0931	0.0929	-0.1%
6	7.18	0.0928	0.0935	+0.8%
7	7.56	0.0960	0.0959	-0.2%
8	7.56	0.0959	0.0961	+0.2%
9	7.13	0.0922	0.0925	+0.4%
10	7.13	0.0935	0.0931	-0.4%
11	7.13	0.0930	0.0929	-0.1%

- Vertailussa tarkasteltiin deviatorisen muodonmuutoskentän huippu- ($\gamma, \max$) ja keskiarvoisia (γ, avg) tuloksia
 - Erot kantavassa kerroksessa (MPL 2) olivat suhteessa pieniä.

Ajoneuvo A:n akselisto
Ajoneuvo B:n akselisto

Erot (%)
+: Ajoneuvo B:n vasteet ovat suurempia
-: Ajoneuvo A:n vasteet ovat suurempia

Akselivälien vaikutus staattisessa mallissa: Vaikutus alusrakenteessa

Maksimiarvot

Akseli nro.	Akselimassa (tn)	$\gamma, \max$ (%)	$\gamma, \max$ (%)	Erot (%)
1	6.92	0.0425	0.0432	+1.7%
2	7.65	0.0443	0.0435	-1.8%
3	7.65	0.0459	0.0459	+/-0.0%
4	7.18	0.0444	0.0452	+1.7%
5	7.18	0.0442	0.0548	+24.0%
6	7.18	0.0409	0.0479	+17.1%
7	7.56	0.0527	0.0539	+2.3%
8	7.56	0.0530	0.0540	+1.8%
9	7.13	0.0463	0.0467	+0.9%
10	7.13	0.0437	0.0481	+10.2%
11	7.13	0.0443	0.0457	+3.2%

Keskiarvot

Akseli nro.	Akselimassa (tn)	γ, avg (%)	γ, avg (%)	Erot (%)
1	6.92	0.0290	0.0293	+1.1%
2	7.65	0.0342	0.0337	-1.2%
3	7.65	0.0340	0.0340	-0.2%
4	7.18	0.0352	0.0343	-2.4%
5	7.18	0.0348	0.0384	+10.4%
6	7.18	0.0299	0.0349	+16.8%
7	7.56	0.0382	0.0384	+0.4%
8	7.56	0.0385	0.0385	+/-0.0%
9	7.13	0.0345	0.0347	+0.6%
10	7.13	0.0354	0.0382	+7.6%
11	7.13	0.0318	0.0354	+11.6%

- Vertailussa tarkasteltiin deviatorisen muodonmuutoskentän huippu- ($\gamma, \max$) ja keskiarvoisia (γ, avg) tuloksia
- Alusrakenteessa (MPL 2) erot korostuivat
- Selkeimmillään akseliväleillä 5–6 ja 10–11
 - Suhteelliset erot jopa +24.0% ($\gamma, \max$) ja +16.8 % (γ, avg).

Ajoneuvo A:n akselisto
Ajoneuvo B:n akselisto

Erot (%)
+: Ajoneuvo B:n vasteet ovat suurempia
-: Ajoneuvo A:n vasteet ovat suurempia

Yhteenvedo muodonmuutostarkasteluista (diat 21-30)

- **Deviatoriset leikkausmuodonmuutokset (keskiarvoiset ja huippumuodonmuutokset)**
 - Huippumuodonmuutokset kuvaavat riskiä kantavan kerroksen yläosan deformatumiselle (urautuminen). Keskiarvoiset muodonmuutokset puolestaan vastaavat urautumisriskiä päällysrakenteen yläosassa, noin 400 mm syvyyteen saakka.
 - Keskiarvoiset muodonmuutokset olivat 80 tn sekä 85 tn ajoneuvoyhdistelmien osalta lähellä 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$, osalla akseleista 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ ylittyi; yli 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ arvojen otaksutaan aiheuttavan nopeasti kehittyviä pysyviä muodonmuutoksia.
 - 86 tn ajoneuvoyhdistelmän osalta keskiarvoiset muodonmuutokset olivat selkeämmin alle 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$.
- **Akselimassan suhteen normalisoidut keskiarvoiset muodonmuutokset**
 - 80 tn sekä 85 tn erottuivat aiemmasta datasta 3- sekä 2-akselisten telien osalta, johtuen suuremmasta yksikköpyörien määrästä em. teleillä
 - Yksikköpyörät aiheuttavat näissä tarkasteluissa keskimäärin 50–60 % suuremman deviatorisen muodonmuutoksen kantavaan kerrokseen kuin paripyörärenkaat
 - Alusrakenteen kannalta ei ole merkitystä sillä kuormittavatko rakennetta yksikkö- vai paripyörät
- **Akselivälien vaikutus staattisessa mallissa (diat 27–30)**
 - Laskennallisessa tarkastelussa erityisesti 3-akselisilla teleillä akselivälin lyhentyminen aiheutti pohjamaan tasolla muodonmuutosten kasvua.
 - Akseliväleillä on selkeä vaikutus pohjamaahan kohdistuviin muodonmuutoksiin. Sen sijaan vaikutukset ovat vähäisiä kantavan kerroksen deviatoristen muodonmuutosten kannalta.

Ekvivalenttikertoimet (80 tn 11-akselinen HCT)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (80 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipääilysteen paksuus 30 mm (MPL 1)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	6.921	0.095	1.68	1.68	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	7.653	0.065	0.44	0.90	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	7.653	0.066	0.46	5.19	3-akseliteli (YP)
Akseli 4 (YP)	7.179	0.096	1.75		
Akseli 5 (YP)	7.179	0.096	1.71	3.97	2-akseliteli (YP)
Akseli 6 (YP)	7.179	0.096	1.73		
Akseli 7 (YP)	7.559	0.099	1.94	5.10	3-akseliteli (YP)
Akseli 8 (YP)	7.559	0.101	2.03		
Akseli 9 (YP)	7.127	0.096	1.74		
Akseli 10 (YP)	7.127	0.095	1.66	1.71	
Akseli 11 (YP)	7.127	0.096	1.71		
			ESAL	16.8	ΣESAL=16.8

 6,9t

 7,7t

 7,7t

"Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostasonperusteella":
Isometsä (2024)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (80 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipääilysteen paksuus 40 mm (MPL 2)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	6.921	0.090	1.38	1.38	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	7.653	0.062	0.38	0.74	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	7.653	0.061	0.36	4.59	3-akseliteli (YP)
Akseli 4 (YP)	7.179	0.093	1.51		
Akseli 5 (YP)	7.179	0.093	1.55	3.44	2-akseliteli (YP)
Akseli 6 (YP)	7.179	0.093	1.53		
Akseli 7 (YP)	7.559	0.096	1.72	4.61	3-akseliteli (YP)
Akseli 8 (YP)	7.559	0.096	1.72		
Akseli 9 (YP)	7.127	0.092	1.49		
Akseli 10 (YP)	7.127	0.093	1.57	1.54	
Akseli 11 (YP)	7.127	0.093	1.54		
			ESAL	14.8	ΣESAL=14.8

 7,2t

 7,2t

 7,2t

 7,6t

 7,6t

Ekvivalenttikerroin 4. potenssin säännöllä (AASHTO-teoria) (80 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

	Akselimassa, tn	ESAL Toikka & Virtala	ESAL Ehrola	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	6.92	0.56	0.40	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	7.65	0.47	0.69	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	7.65			
Akseli 4 (YP)	7.18	4.25	1.39	3-akseliteli (YP)
Akseli 5 (YP)	7.18			
Akseli 6 (YP)	7.18			
Akseli 7 (YP)	7.56	1.09	1.14	2-akseliteli (YP)
Akseli 8 (YP)	7.56			
Akseli 9 (YP)	7.13	4.13	1.35	3-akseliteli (YP)
Akseli 10 (YP)	7.13			
Akseli 11 (YP)	7.13			
	ESAL	10.5	5.0	ΣESALkeskiarvo=7.7
	ESAL, keskiarvo	7.7		

 7,1t

 7,1t

 7,1t

"ESAL Ehrola" laskentatapa: Ehrola (1996)
"ESAL Toikka & Virtala" laskentatapa:
Toikka & Virtala (2015)

Ekvivalenttikertoimet (85 tn 11-akselinen HCT)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (85 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipäällysteen paksuus 30 mm (MPL 1)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7.750	0.102	2.11	2.11	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	8.775	0.072	0.63	1.27	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	8.775	0.072	0.64	4.98	3-akseliteli (YP)
Akseli 4 (YP)	7.080	0.096	1.71		
Akseli 5 (YP)	7.080	0.094	1.59	5.01	2-akseliteli (YP)
Akseli 6 (YP)	7.080	0.095	1.67		
Akseli 7 (YP)	8.475	0.106	2.45	4.83	3-akseliteli (YP)
Akseli 8 (YP)	8.475	0.108	2.56		
Akseli 9 (YP)	7.080	0.095	1.66		
Akseli 10 (YP)	7.080	0.093	1.53	18.2	
Akseli 11 (YP)	7.080	0.095	1.64		
			ESAL	18.2	ΣESAL=18.2

 7,8t

 8,8t

 8,8t

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (85 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipäällysteen paksuus 40 mm (MPL 2)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7.750	0.096	1.73	1.73	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	8.775	0.069	0.53	1.06	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	8.775	0.068	0.53	4.39	3-akseliteli (YP)
Akseli 4 (YP)	7.080	0.091	1.43		
Akseli 5 (YP)	7.080	0.092	1.47	4.31	2-akseliteli (YP)
Akseli 6 (YP)	7.080	0.092	1.49		
Akseli 7 (YP)	8.475	0.102	2.13	4.38	3-akseliteli (YP)
Akseli 8 (YP)	8.475	0.103	2.18		
Akseli 9 (YP)	7.080	0.091	1.45		
Akseli 10 (YP)	7.080	0.091	1.45	15.9	
Akseli 11 (YP)	7.080	0.092	1.48		
			ESAL	15.9	ΣESAL=15.9

 7,1t

 7,1t

 7,1t

 8,5t

 8,5t

Ekvivalenttikerroin 4. potenssin säännöllä (AASTHO-teoria) (85 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

	Akselimassa, tn	ESAL Toikka & Virtala	ESAL Ehrola	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7.75	0.88	0.63	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	8.78	0.81	1.19	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	8.78			
Akseli 4 (YP)	7.08	4.02	1.32	3-akseliteli (YP)
Akseli 5 (YP)	7.08			
Akseli 6 (YP)	7.08	1.72	1.81	2-akseliteli (YP)
Akseli 7 (YP)	8.48			
Akseli 8 (YP)	8.48	4.02	1.32	3-akseliteli (YP)
Akseli 9 (YP)	7.08			
Akseli 10 (YP)	7.08	8.9	6.3	
Akseli 11 (YP)	7.08			
		ESAL	11.5	ΣESALkeskiarvo=8.9
		ESAL, keskiarvo	8.9	

 7,1t

 7,1t

 7,1t

Ekvivalenttikertoimet (86 tn 11-akselinen HCT)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (86 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipäällysteen paksuus 30 mm (MPL 1)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7.800	0.103	2.21	2.21	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	8.800	0.072	0.62	1.27	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	8.800	0.073	0.65	2.51	3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 4 (PP)	7.230	0.063	0.40	1.29	2-akseliteli (PP)
Akseli 5 (PP)	7.230	0.061	0.34	2.46	3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 6 (YP)	7.230	0.097	1.77	1.74	
Akseli 7 (PP)	8.625	0.072	0.64	9.7	
Akseli 8 (PP)	8.625	0.073	0.65		
Akseli 9 (PP)	7.233	0.062	0.37		
Akseli 10 (PP)	7.233	0.061	0.34		
Akseli 11 (YP)	7.233	0.096	1.74		
			ESAL	9.7	

Σ ESAL=9.7

 7,8t

 8,8t

 8,8t

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (86 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipäällysteen paksuus 40 mm (MPL 2)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7.800	0.097	1.78	1.78	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	8.800	0.069	0.54	1.07	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	8.800	0.069	0.53	2.23	3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 4 (PP)	7.230	0.059	0.32	1.04	2-akseliteli (PP)
Akseli 5 (PP)	7.230	0.059	0.32	2.21	3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 6 (YP)	7.230	0.094	1.60	8.3	
Akseli 7 (PP)	8.625	0.068	0.52		
Akseli 8 (PP)	8.625	0.068	0.52		
Akseli 9 (PP)	7.233	0.060	0.32		
Akseli 10 (PP)	7.233	0.059	0.31		
Akseli 11 (YP)	7.233	0.093	1.57		
			ESAL	8.3	

Σ ESAL=8.3

 7,2t

 7,2t

 7,2t

 8,6t

 8,6t

Ekvivalenttikerroin 4. potenssin säännöllä (AASHTO-teoria) (86 tn 11-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

	Akselimassa, tn	ESAL Toikka & Virtala	ESAL Ehrola	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7.80	0.90	0.65	1-akseli (YP)
Akseli 2 (PP)	8.80	0.82	1.20	2-akseliteli (PP)
Akseli 3 (PP)	8.80	1.04	1.02	3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 4 (PP)	7.23	0.76	1.94	2-akseliteli (PP)
Akseli 5 (PP)	7.23	1.04	1.03	3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 6 (YP)	7.23	1.04	5.8	
Akseli 7 (PP)	8.63	0.76		
Akseli 8 (PP)	8.63	1.04		
Akseli 9 (PP)	7.23	1.04		
Akseli 10 (PP)	7.23	1.04		
Akseli 11 (YP)	7.23	1.04		
	ESAL	4.6	5.8	
	ESAL, keskiarvo	5.2		

Σ ESALkeskiarvo=5.2

 7,2t

 7,2t

 7,2t

Ekvivalenttikertoimien vertailua (mallinnus 2025)

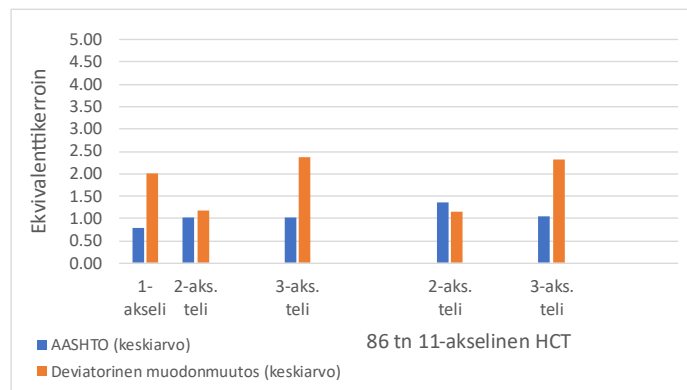
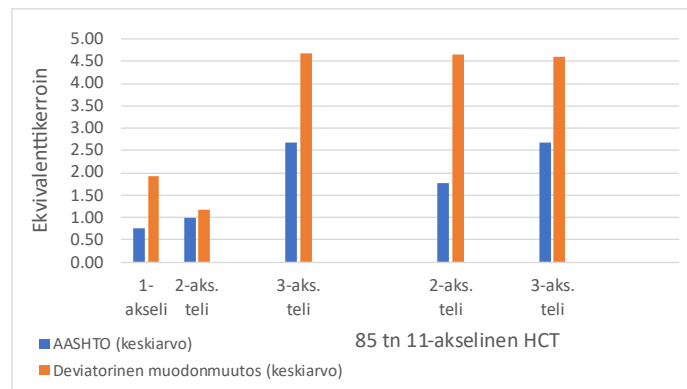
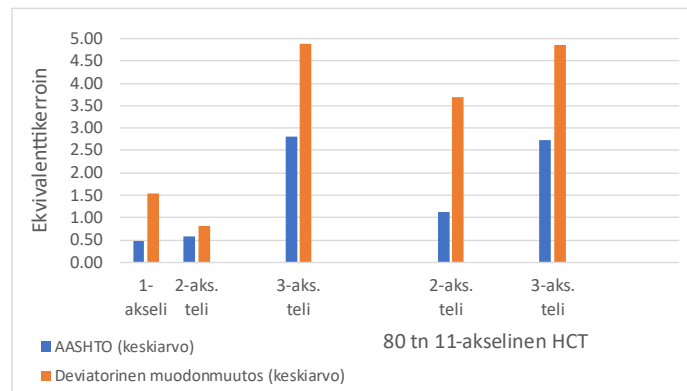
• Keskiarvoistettujen ekvivalenttikertoimien vertailua

- Deviatoriset muodonmuutokset: MPL 1 ja MPL 2 keskimääräisellä muodonmuutostasolla.
- AASHTO menetelmä: Toikka & Virtala ja Ehrola.
- Ekvivalenttikerroin $1 \approx 10$ tn paripyöräakseli.

• Erityisesti paripyörillä varustetuilla 2-akselisilla teleillä AASHTO- ja deviatorisilla muodonmuutoksilla lasketut ekvivalenttikertoimet ovat keskenään samankaltaisia suuruusluokaltaan.

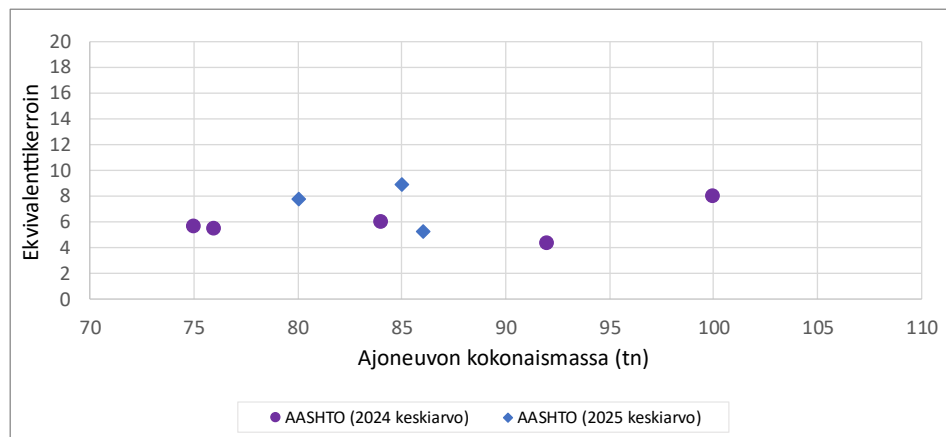
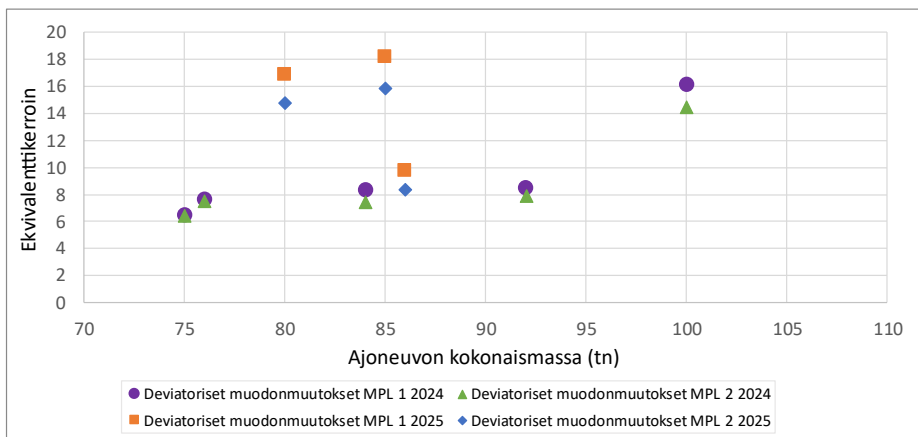
- Näillä akseleilla kuorma jakautuu tasaisesti, eikä kantavan kerroksen leikkausmuodonmuutos (mekanistinen vaste) poikkea merkittävästi siitä, mitä AASHTO-teorialla saadaan.
- Erot ekvivalenttikertoimissa korostuvat muilla rengastuksilla (esim. 3-akselinen teli yksikköpyörärenkailla).
- Deviatorisiin leikkausmuodonmuutoksiin perustuvat ekvivalenttikertoimet olivat systemaattisesti suurempia yksikköpyörillä varustetuilla akseleilla kuin AASHTO-teorialla lasketut.

• Suurin ekvivalenttikerroin saatiin 85 tn ajoneuvoyhdistelmälle ja pienin 86 tn ajoneuvoyhdistelmälle



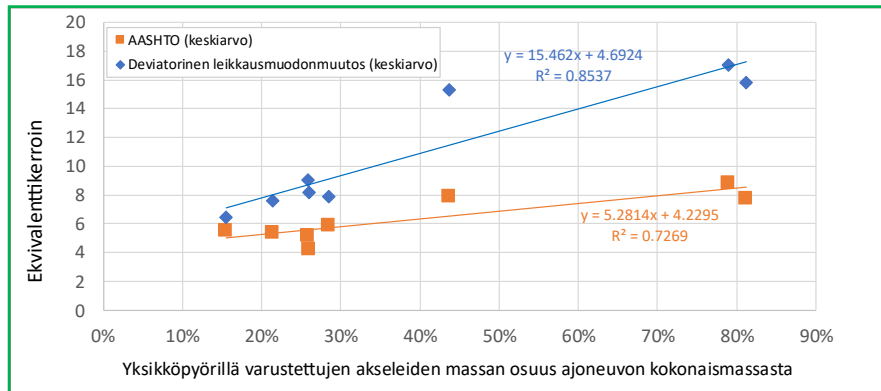
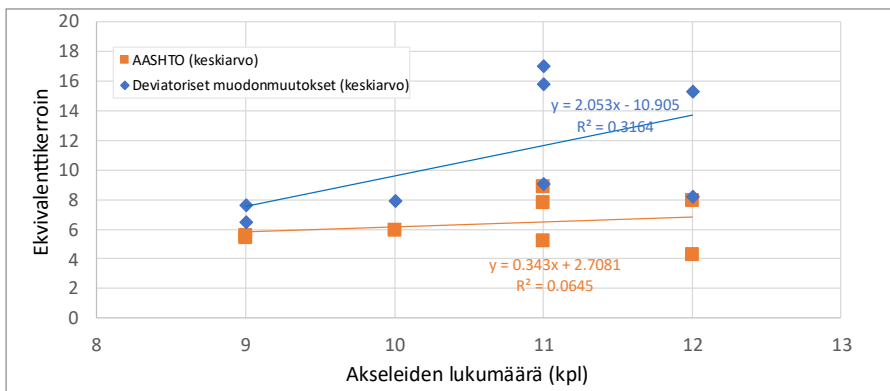
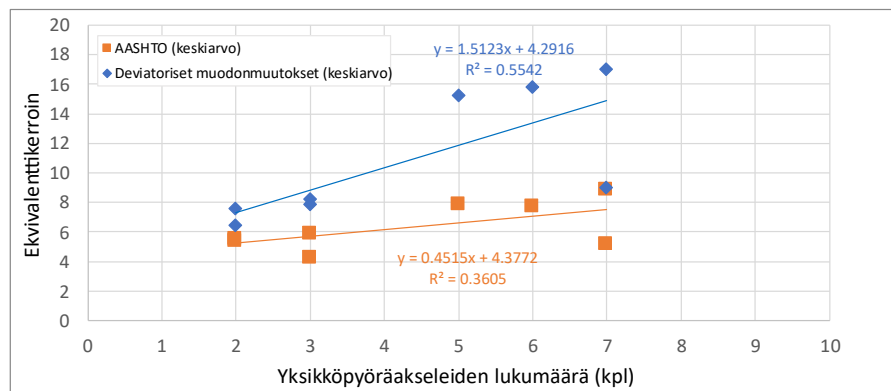
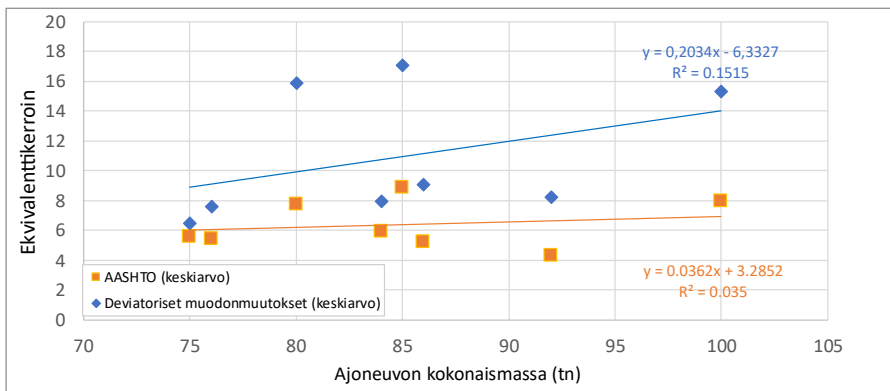
Ekvivalenttikertoimien vertailua (mallinnukset 2024 sekä 2025)

- **Keskiarvoistettujen ekvivalenttikertoimien vertailua**
 - Kuvaajissa mukana myös vuoden 2024 tutkimuksen tuloksia (Isometsä et al. 2024).
 - Ekvivalenttikerroin $1 \approx 10$ tn paripyöräakseli.
- **Poikkileikkausten (MPL 1 & MPL 2) väliset suhteelliset erot olivat suurempia vuoden 2025 mallinnoissa verrattuna vuoden 2024 mallinnuksiin.**
 - 80 tn sekä 85 tn tulokset poikkeavat selkeästi enemmän aiemmin lasketuista ekvivalenttikertoimista, sillä em. ajoneuvoyhdistelmissä suurempi osuus kokonaismassasta oli kohdistunut yksikköpyörillä varustetuilla akseleille.
 - AASHTO-menetelmällä lasketuissa ekvivalenttikertoimissa havaitaan samanlaista eroavaisuutta 80 tn sekä 85 tn tuloksissa, mutta tulokset eivät poikkea yhtä merkittävästi muista tuloksista kuin deviatorisilla muodonmuutoksilla lasketut ekvivalenttikertoimet.



Ekvivalenttikertoimien vertailua (mallinnukset 2024 sekä 2025)

- Keskiarvoistettujen ekvivalenttikertoimien vertailua**
 - Kuvaajissa mukana myös vuoden 2024 tutkimuksen tuloksia (Isometsä et al. 2024).
 - Ekvivalenttikerroin $1 \approx 10$ tn paripyöräakseli.
- Alla tarkasteltu siitä, mitkä muuttujat selittävät ajoneuvoyhdistelmän kuormittavuuden (ekvivalenttikertoimen) suuruutta**
- Tarkastelut lineaarisilla soviteilla ekvivalenttikertoimien keskiarvoilla**
 - Deviatoriset muodonmuutokset: MPL 1 ja MPL 2, keskimääräisellä muodonmuutostasolla.
 - AASHTO-teoria: Toikka & Virtala ja Ehrola.



Yhteenveto ekvivalenttikerrointarkasteluista (diat 32-37)

- **Ekvivalenttikertoimet laskettiin AASHTO-teoriaan pohjautuvilla kaavoilla sekä keskimääräisillä deviatorisilla leikkausmuodonmuutoksilla**
 - Tuloksia arvioitaessa on syytä huomata, että eri lähestymistavoilla tarkastellaan erilaisia tierakenteen vaurioitumismekanismeja (kantavan kerroksen vaurioituminen vs. asfaltin väsyminen/urautuminen). Tästä johtuen oli ennakoitavissa, että lasketut kuormituksen ekvivalenttikertoimet poikkeavat toisistaan.
- **Deviatorisilla leikkausmuodonmuutoksilla lasketut kuormituksen ekvivalenttikertoimet olivat suurempia kuin AASHTO-teorialla lasketut**
 - Deviatorisiin leikkausmuodonmuutoksiin perustuva tarkastelutapa tunnistaa yksikköpyöräakseleitten suuremman kuormitusvaikutuksen huomattavasti AASHTO-teoriaa herkemmin. Yksikköpyöräakselit lisäävät ajoneuvoyhdistelmän kuormittavuutta selkeästi.
 - MPL 1:ssä ekvivalenttikertoimet olivat lievästi suurempia kuin MPL 2:ssa suuremmista deviatorisista leikkausmuodonmuutoksista johtuen.
 - Suurin ekvivalenttikerroin saatiin 85 tn ajoneuvoyhdistelmälle ja pienin 86 tn ajoneuvoyhdistelmälle.
- **Mitkä muuttujat selittävät ajoneuvoyhdistelmän kuormittavuuden (ekvivalenttikertoimen) suuruutta?**
 - Ajoneuvon kokonaismassa yksinään korreloi heikosti ajoneuvon kuormittavuuden kanssa ($0.0 \leq |R^2| \leq 0.2$).
 - Yksikköpyöräakseleilla varustettujen akselien lukumäärä korreloi kuormittavuuden kanssa AASHTO-tarkastelussa vain rajallisesti ($0.3 \leq |R^2| \leq 0.4$), mutta deviatorisiin muodonmuutoksiin perustuvassa tarkastelussa selvästi vahvemmin ($0.5 \leq |R^2| \leq 0.6$).
 - Yksikköpyörillä varustettujen akselien massan osuus ajoneuvon kokonaismassasta osoittautui keskeiseksi ajoneuvon kuormittavuutta selittäväksi tekijäksi sekä AASHTO-teorialla että deviatorisiin leikkausmuodonmuutoksiin perustuvassa tarkastelussa ($0.7 \leq |R^2| \leq 0.9$).
- **Jos kuormitusvastaavuuskertoimet olisi laskettu enemmän kantavan kerroksen yläosan leikkausmuodonmuutostilaa painottaen, ekvivalenttikertoimien arvot täten olisivat olleet merkittävästi suurempia verrattuna AASHTO-menetelmällä laskettuihin ekvivalenttikertoimiin**

Elementtimallinnusmenetelmän rajoituksista

- **Staattinen FEM-malli ei huomioi liikkuvan ajoneuvokuormituksen kaikkia piirteitä**
 - Liikkuvan kuorman aiheuttama pääjännitysten kiertyminen.
 - Tien epätasaisuudesta johtuvat sysäyskuormat.
 - Toistuvien kuormien ja ajouran vaihtelun yhteisvaikutus urautumiseen.
 - Peräkkäisten akseleiden kuormituksen kumuloituminen.
 - Yksinkertaistettu renkaan kontakti sekä pintapaine tien pinnassa.
 - Kumuloituva vaikutus korostuu päällysteen venymissä ja märän pohjamaan päälle rakennetuissa teissä (veden pumppautuminen päällysrakenteeseen).

Mahdollisia jatkotutkimusnäkökulmia

- **Tierakenteen ominaisuuksien variointi**
 - Miten päällysteen paksuuden kasvattaminen vähentää kantavan kerroksen deformaatoriskiä, ja kuinka päällystepaksuuden lisäyksellä voidaan kompensoida heikkolaatuista kantavaa kerrosta?
- **Ajoneuvokohtaiset urautumismallit ja –ennusteet**
- **Erilaisten akselistoyhdistelmien ja rengastyypin laajemmat mallinnukset**
 - Telimassan erilaiset jakautumat paripyörä- ja yksikköpyöräakseleille: miten esimerkiksi 10% sallittua suurempi akselimassa vaikuttaa kuormittavuuteen?
 - Akselivälien variointi ja sen vaikutukset alusrakenteen vasteisiin.
 - Erilaisten rengastyypin, renkaan halkaisijan sekä rengaspaineiden vaikutusten tarkempi tarkastelu kuormitusvasteisiin.
- **Liikkuvan ajoneuvokuormituksen vaikutusta kuvaavien dynaamisten mallien tutkiminen**
- **Märän turvepohjamaan käyttäytymistä todennukaisemmin kuvaavien materiaalimallien kehittäminen/hyödyntäminen**

Yhteenvedo kaikista tarkasteluista

- **Yksikköpyörät aiheuttivat kantavaan kerrokseen noin 50-60 % suuremman rasituksen kuin paripyörärenkaat, kun tarkasteltavana vasteena käytettiin kantavan kerroksen keskimääräistä deviatorista muodonmuutosta maantien 697, to 21 mittauspoikkileikkausten olosuhteissa**
 - Alusrakenteen muodonmuutosten kannalta rengastuksella ei ollut merkittävää vaikutusta. Sen sijaan akselistorakenteella havaittiin olevan suhteellisesti merkittävä vaikutus alusrakenteen deviatoriseen leikkausmuodonmuutostasoon.
- **AASHTO-teorialla sekä deviatorisilla muodonmuutoksilla lasketut ekvivalenttikertoimet poikkesivat merkittävästi toisistaan**
 - Deviatoristen muodonmuutosten perusteella lasketut ekvivalenttikertoimet kasvavat ajoneuvon kokonaismassan suhteen. Kokonaismassan korrelaatio yksinään ei kuitenkaan ole merkittävä kuormittavuuden suhteen.
 - Yksikköpyörillä varustettujen akseleiden massan osuus ajoneuvon kokonaismassasta osoittautui keskeiseksi ajoneuvon kuormittavuutta selittäväksi tekijäksi.
 - Teliakseleitten yhteisvaikutus jää vähäiseksi, koska kyseessä on staattinen laskentamalli, joka ei huomioi liikkuvan kuorman dynaamisia vaikutuksia.
 - AASHTO-laskentatavalla ajoneuvon kuormitusvaikutus pienenee/ei kasva merkittävästi, kun ajoneuvossa on paljon telejä.
 - AASHTO-laskentatapa on kehitetty uudelle tierakenteelle sekä paksummalle päällysteelle; ohuemmilla päällysteillä kantavan kerroksen deformatuminen on merkitsevämmässä asemassa oleva vaurioitumismekanismi.
 - Molemmilla laskentatavoilla **85 tn 11-akselinen ajoneuvo, jolla oli yhdeksän yksikköpyöräakselia**, sai suurimmat ekvivalenttikertoimet. Vähiten kuormittavin tarkasteltu ajoneuvoyhdistelmä oli 86 tn 11-akselinen ajoneuvoyhdistelmä, jolla oli kolme yksikköpyöräakselia.
- **FEM-mallit ovat verifioituja kenttämittausdatalla. FEM-mallinnukseen liittyy kuitenkin rajoituksia sekä yksinkertaistuksia:**
 - Ajoneuvon huojuntaa, tien geometriaa tai muita dynaamisia vaikutuksia ei voida mallintaa staattisella mallilla.
 - Valituilla materiaalimalleilla ei voida mallintaa esim. turpeen aikariippuvaista käyttäytymistä tai huokosveden ylipaineen kertymää.
- **Ajoneuvoyhdistelmästä riippumatta paripyörät, massan tasainen jakautuminen akseleille sekä riittävät akselivälit 3-akselisilla teleillä ovat tavoiteltavia ominaisuuksia tierakenteen kestävyysnäkökulmasta**

Lähteet

1. Isometsä, J., Kolisoja, P., Vuorimies, N. (2024). HCT- ja verrokkiyhdistelmien tierasitusmallinnukset. Saatavissa: https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/HCT-tierasitusmallinnus_raportti_20241223.pdf
2. Isometsä, J. (2024). Raskaan liikenteen kuormitusvasteiden mallintaminen. Diplomityö, Tampereen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/155139>
3. Vuorimies, N., Varin, P. & Kolisoja, P. (2023). Ohutpäällysteisen tierakenteen rasittumisen vertailututkimus 2022 - Kuormituskokeet 92- ja 75-tonnisilla ajoneuvoyhdistelmillä. Väyläviraston julkaisu 59/2023. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/187847/vj_2023-59_978-952-405-102-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y
4. Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Tammer-Paino Oy.
5. Toikka, J., Virtala, P. (2015). Akselimassatutkimus 2013–2014. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120897/lts_2015-67_978-952-317-179-4.pdf?sequence=3&isAllowed=y