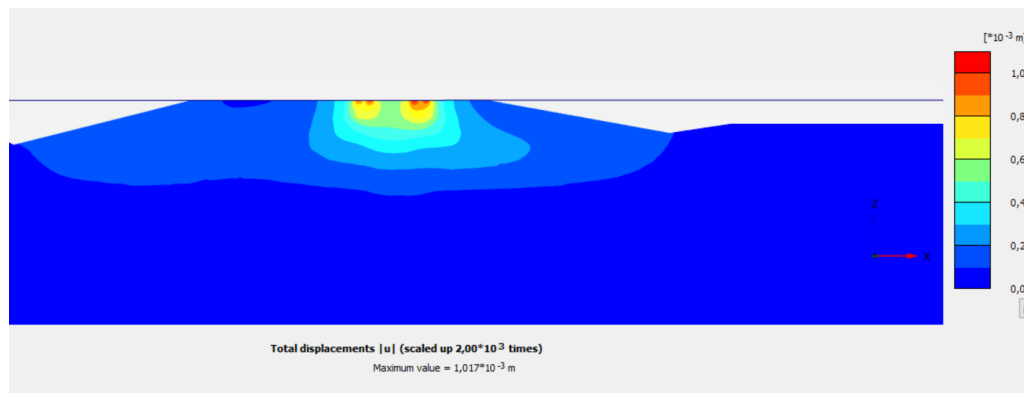
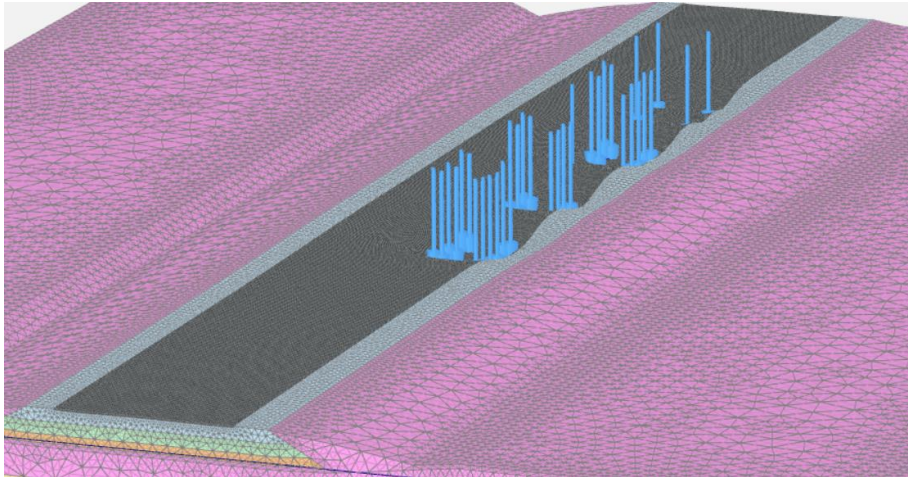


HCT- ja verrokkiyhdistelmien tierasitusmallinnukset



Jukka Isometsä, Pauli Kolisoja & Nuutti Vuorimies (Tampereen yliopisto)

23.12.2024

Sisällys

- Tutkimuksen tausta ja toteutustapa (dia 3)
- Kuormitusajoneuvot (diat 4-6)
- Mallinnetut tiepoikkileikkaukset (dia 7)
- Ajoneuvokohtaiset kuormitusvasteet (diat 8-25)
- Yhteenveto kuormitusvastetarkasteluista (dia 26)
- Kantavan kerroksen leikkausmuodonmuutosten tarkastelu (diat 27-38)
- Kuormitusekvivalenttikerrointen vertailu (diat 39-45)
- Yhteenveto elementtimallinnuksen tuloksista (dia 45)
- Mahdollisia jatkotutkimusnäkökulmia (dia 47)
- Lähteet (dia 48)

Tähän tutkimuksen toimeksiantajana on ollut Metsäteho Oy, jonka lisäksi tutkimuksen ohjausryhmätyöskentelyssä on ollut mukana myös Väylävirasto.

Tutkimuksen tausta ja toteutustapa

- Tampereen yliopisto toteutti vuonna 2022 Karstulassa (Mt 697 to 21) sarjan koekuormituksia, joissa vertailtiin 75-tonnisen 9-akselisen ja 92-tonnisen 12-akselisen ajoneuvoyhdistelmän kuormitusvaikutuksia ohutpäällysteisellä (päällystepaksuus 30 – 40 mm) tiellä (Vuorimies et al. 2023).
- Elementtimenetelmällä (FEM) tehdyt koekuormitusten mallinnukset raportoitiin Jukka Isometsän diplomityöopinnäytteenä vuonna 2024 (Isometsä 2024).
- Tässä tutkimuksessa mallinnustarkasteluja laajennettiin seuraavasti:
 - Mallinnettiin kahta uutta ajoneuvoyhdistelmää (84 tn/10 akselia ja 100 tn/12 akselia) sekä 76-tonnista 9-akselista verrokkiajoneuvoa sen tyypillisillä akselimassoilla
 - FEM-mallinnukset tehtiin kahdelle tiepoikkileikkaukselle: turvepohjamaalla sijaitseva MPL 1 (PL 765) sekä siltti/moreenipohjamaalla sijaitseva MPL 2 (PL 1410)
 - Staattisen kuormitusanalyysi tehtiin siis kaikkiaan viidelle eri ajoneuvoyhdistelmälle: 75 tn/9 aks., 76 tn/9 aks., 84 tn/10 aks., 92 tn/12 aks. ja 100 tn/12 aks. – näistä viimeisimmän 12. akselille mallinnettiin tarkoituksella kuormitusvaikutuksen kannalta epäedullisemmat yksikköpyörät, jotta voitiin arvioida rengaspaineen vaikutusta raskaan ajoneuvoakselin kuormitusvaikutukseen.
 - Tarkasteltavina kuormitusvasteina olivat asfaltin alapinnan vetomuodonmuutokset, kantavan kerroksen pystyjännitykset, pohjamaan puristusmuodonmuutos sekä kantavan kerroksen deviatoriset leikkausmuodonmuutokset
 - Näiden lisäksi vertailtiin eri ajoneuvotyyppien kuormitusvastaavuuskertoimia

Kuvia mallinnetuista ajoneuvoista

75 t (koekuormitusajoneuvo 2022)



Kuva: Kuljetus Villman Oy

76 t (mallinnus 2024)



Kuva: Jouko Peltoniemi Oy

92 t (koekuormitusajoneuvo 2022)



Kuva: Kari Malmstedt Oy

100 t (mallinnus 2024)

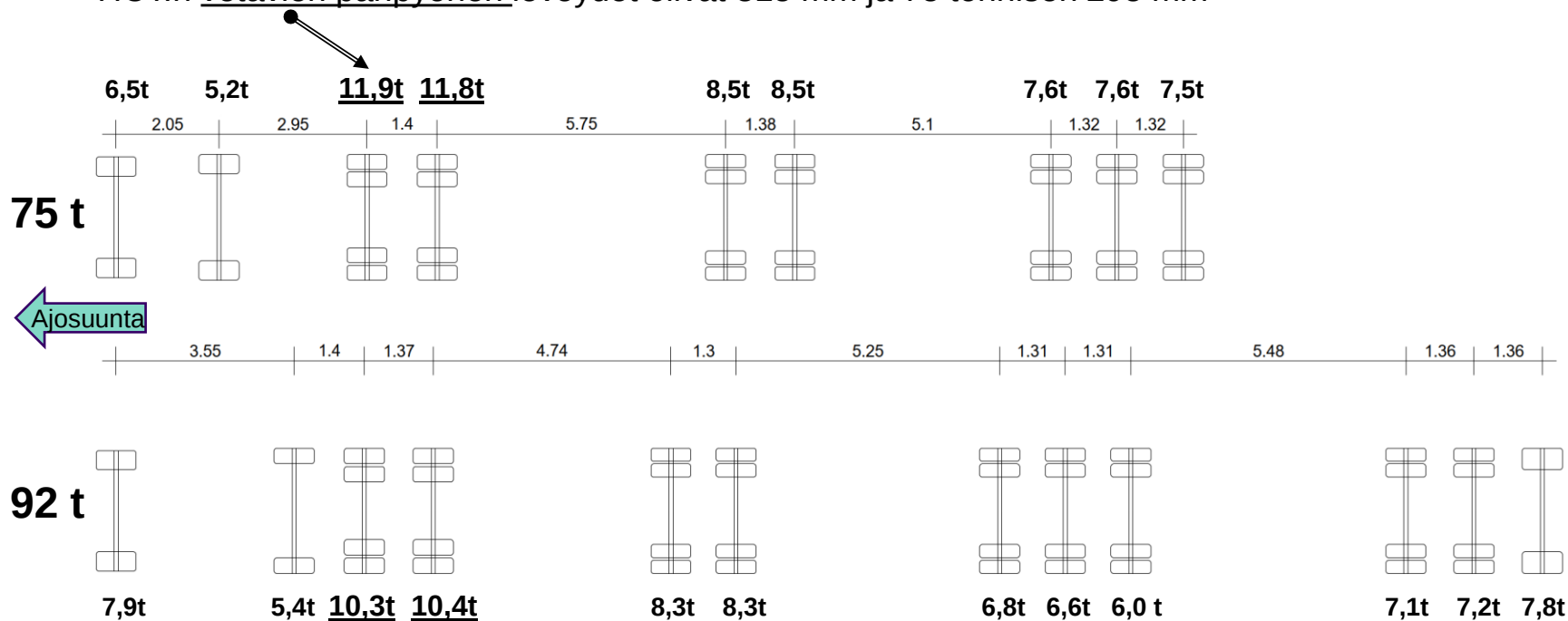


Kuva: Orpe Kuljetus Oy

Kuormitusajoneuvot 2022 – Mt 697 Karstula

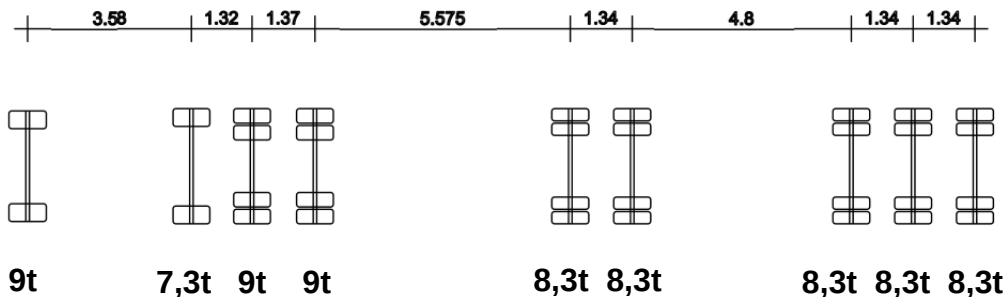
Vuorimies N, Varin P & Kolisoja P (2023) Ohutpäällysteisen tierakenteen rasittumisen vertailututkimus 2022 - Kuormituskokeet 92- ja 75-tonnisilla ajoneuvoyhdistelmillä, Väyläviraston julkaisu 59/2023

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

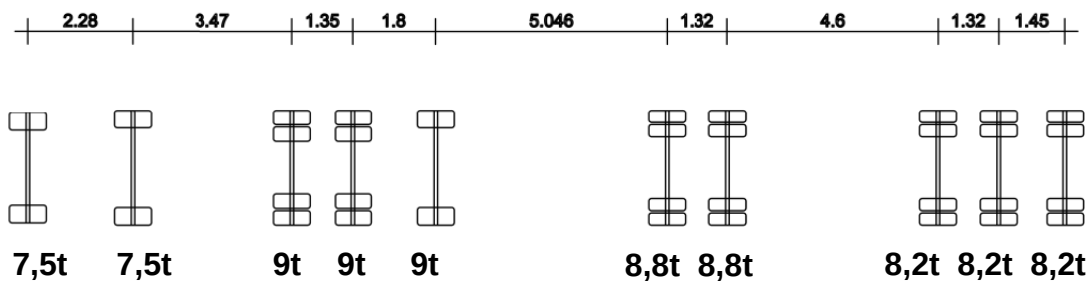


Vuonna 2024 mallinnetut ajoneuvot

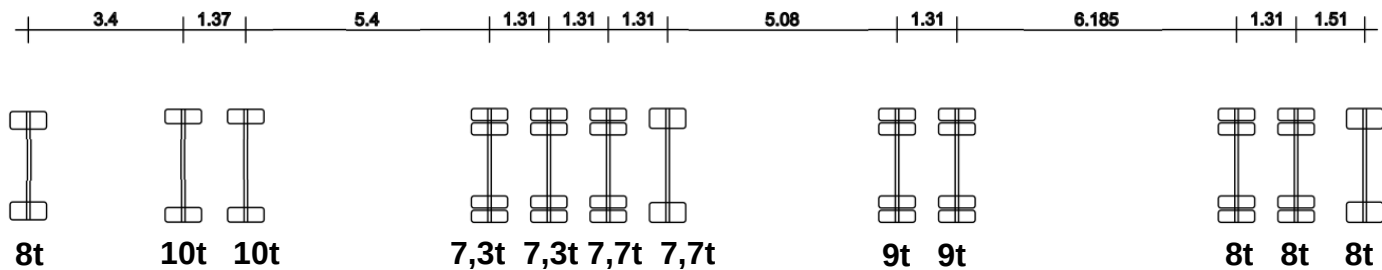
76 t



84 t

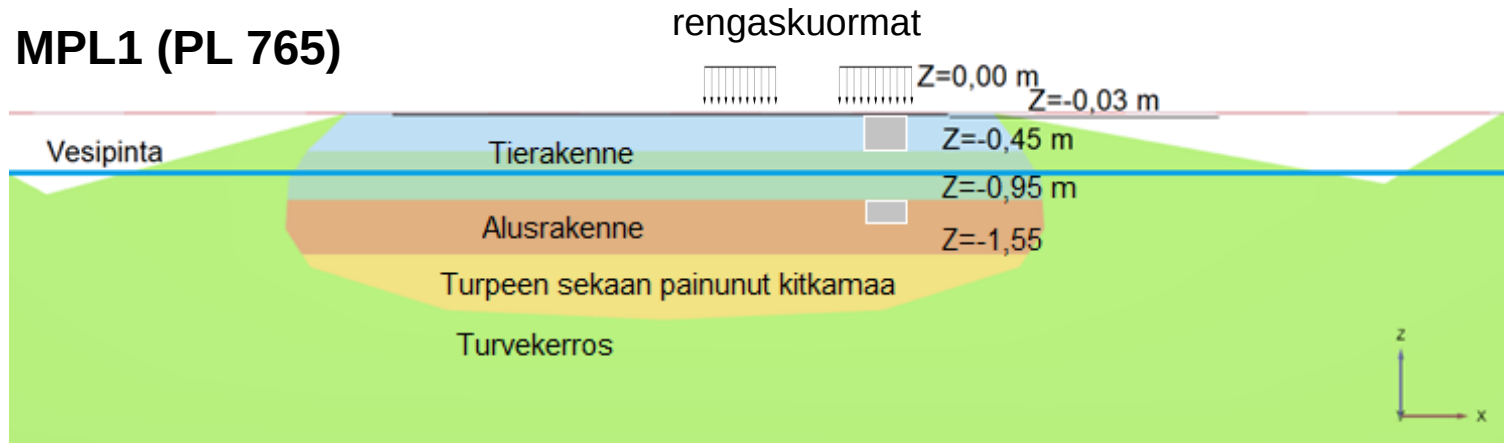


100 t



Mallinnetut tierakenteet – Mt 697 to 21

MPL1 (PL 765)



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

Tavalliset vasteet: asfaltin alapinta -0,03 m, kantava kerros -0,18 m ja pohjamaa -1,55 m

MPL2 (PL 1410)

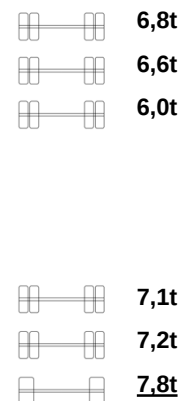
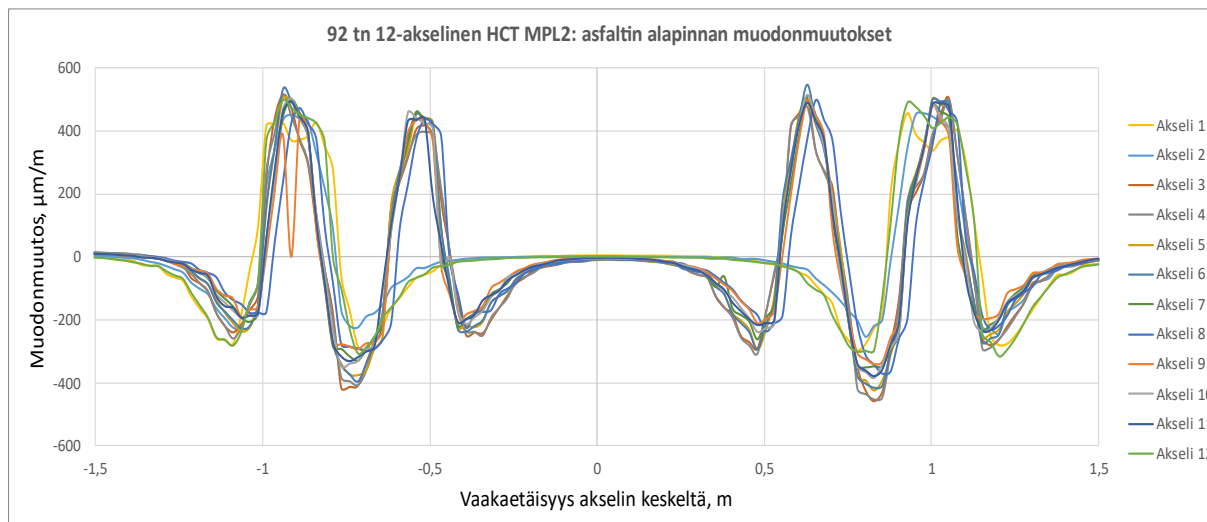
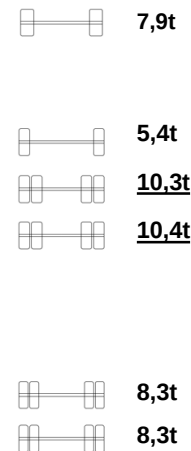
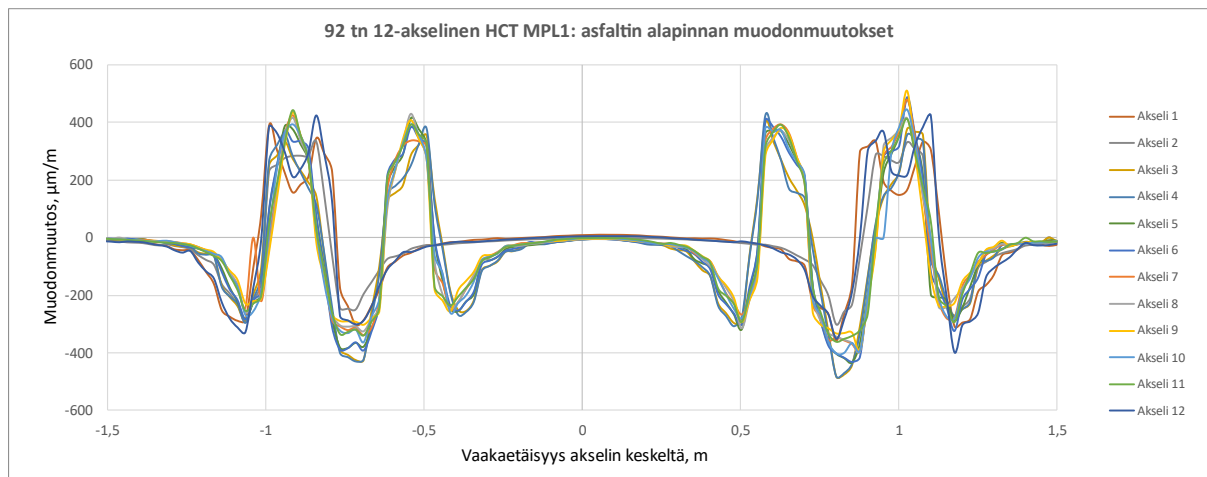


Deviatoriset vasteet (harmaat laatikot): kantava [-0,05; -0,43] & alusrakenne [-0,90; -1,12]

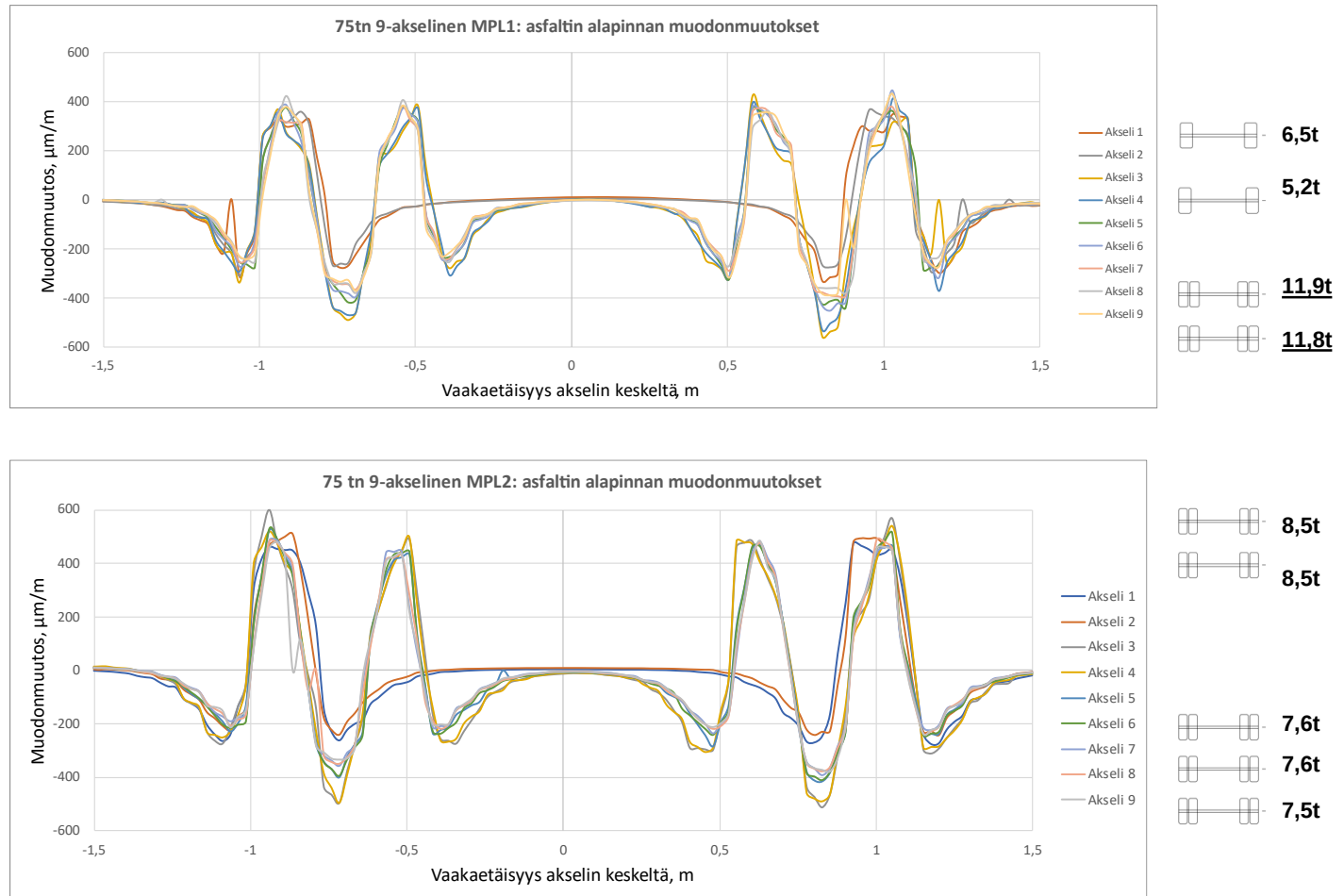
Tavalliset vasteet: asfaltin alapinta -0,04 m, kantava kerros -0,18 m ja pohjamaa -1,22 m

MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (-0,03; -0,04 m) (92 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)

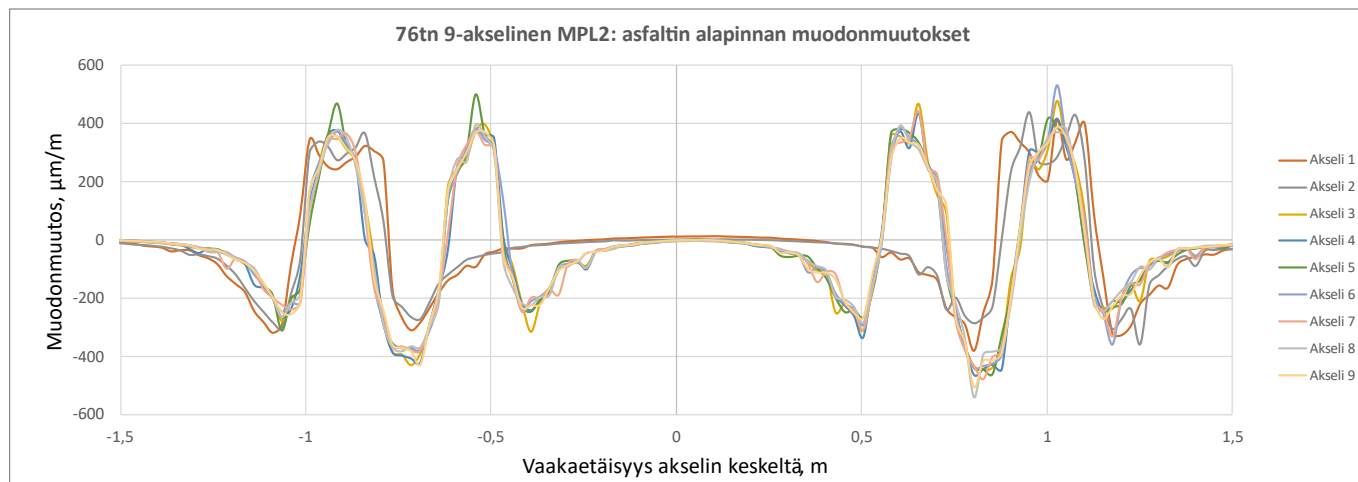
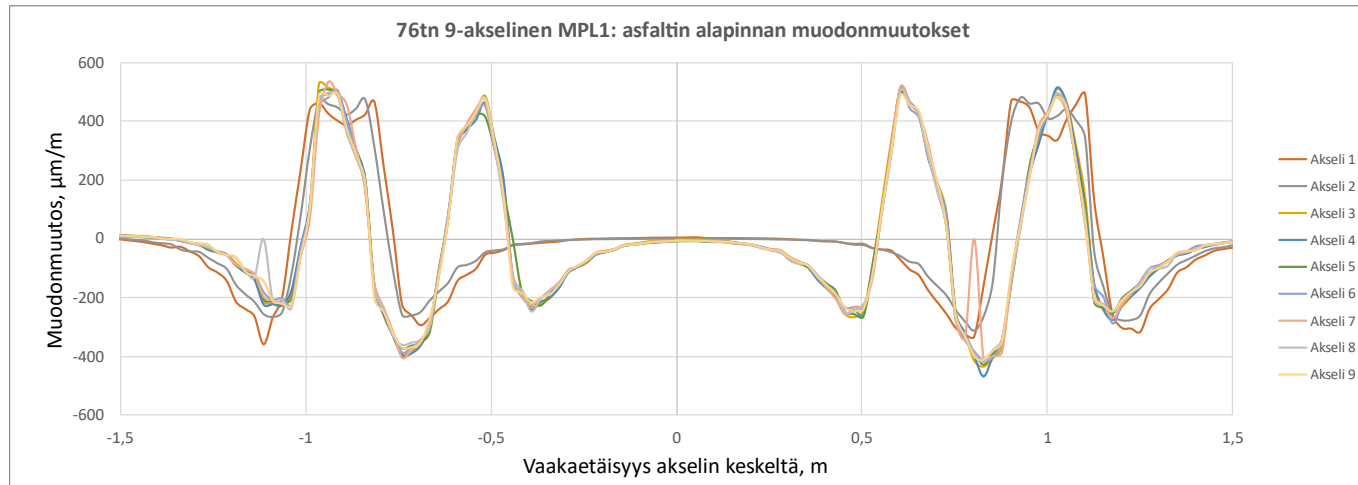
Vetomuodonmuutos:
positiivinen



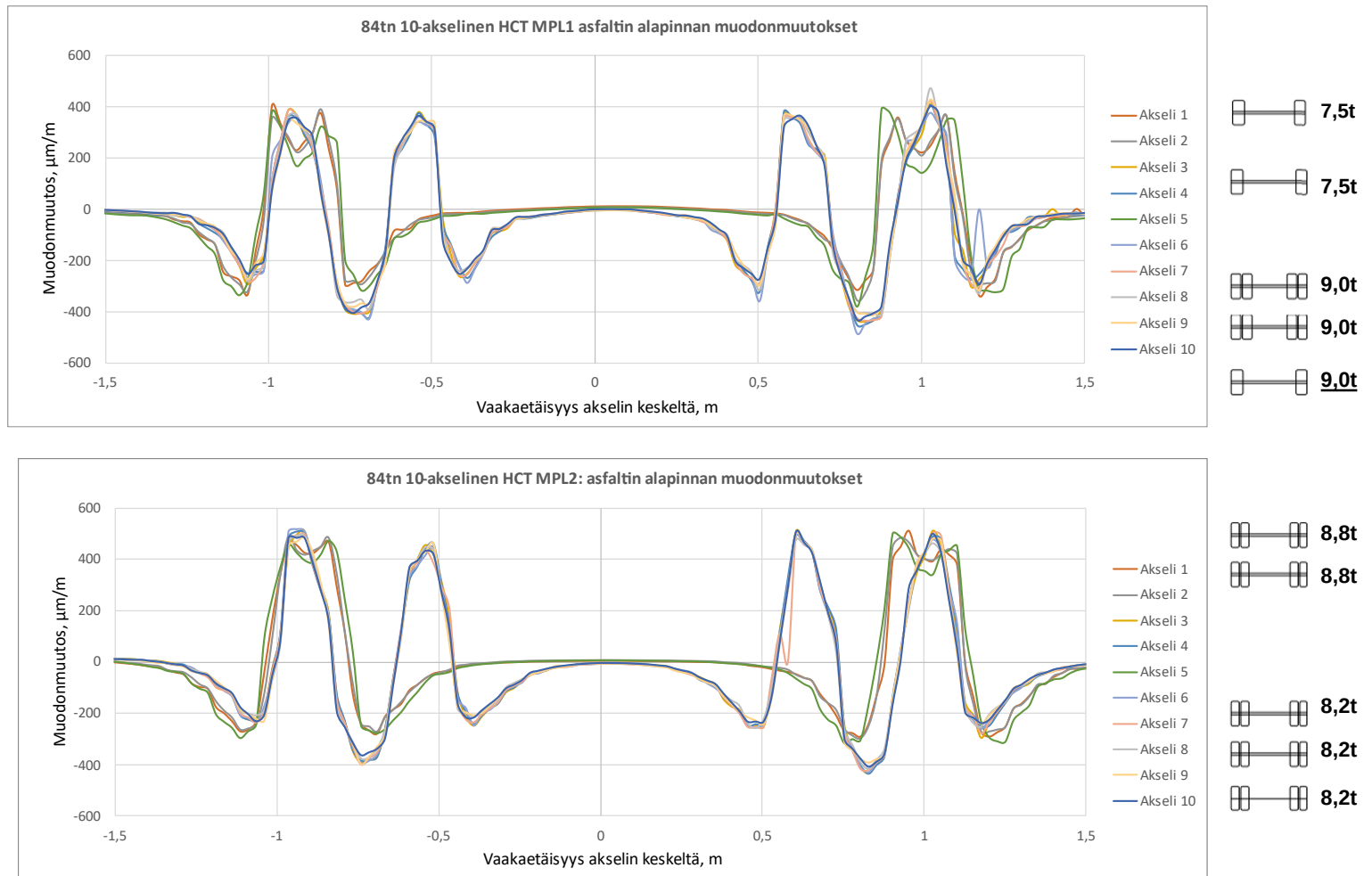
MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (-0,03; -0,04 m) (75 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)



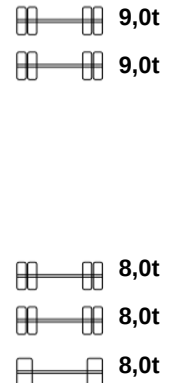
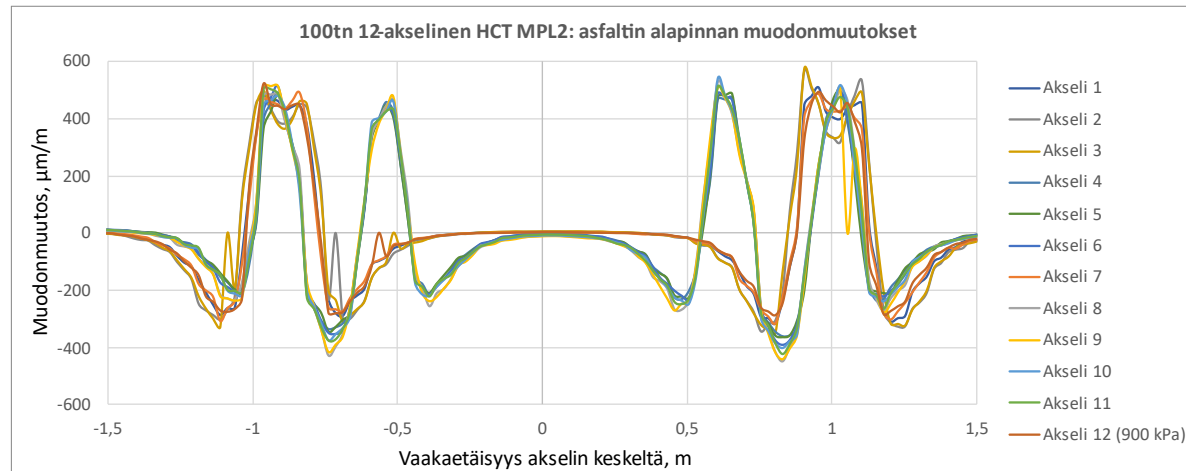
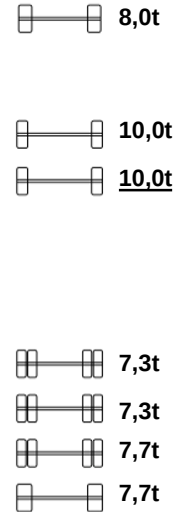
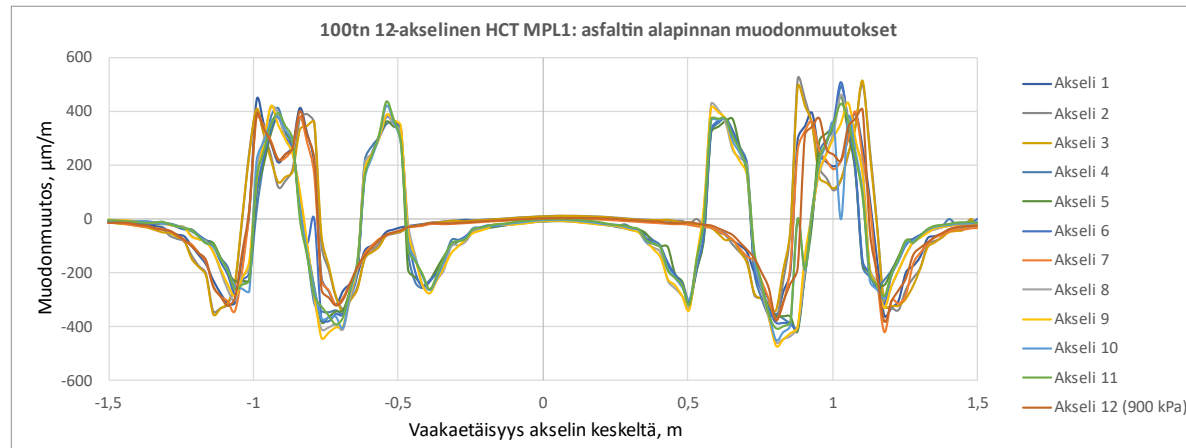
MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (-0,03; -0,04 m) (76 tn, mallinnus 2024)



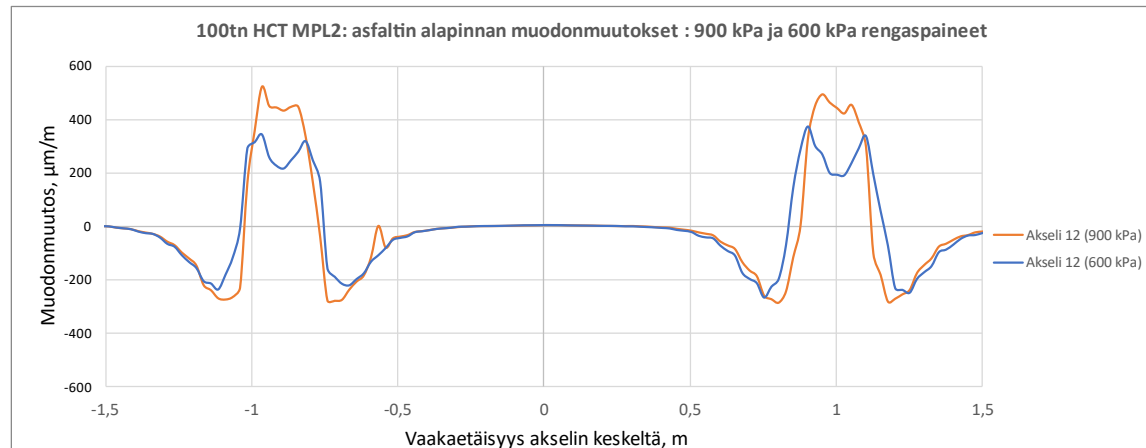
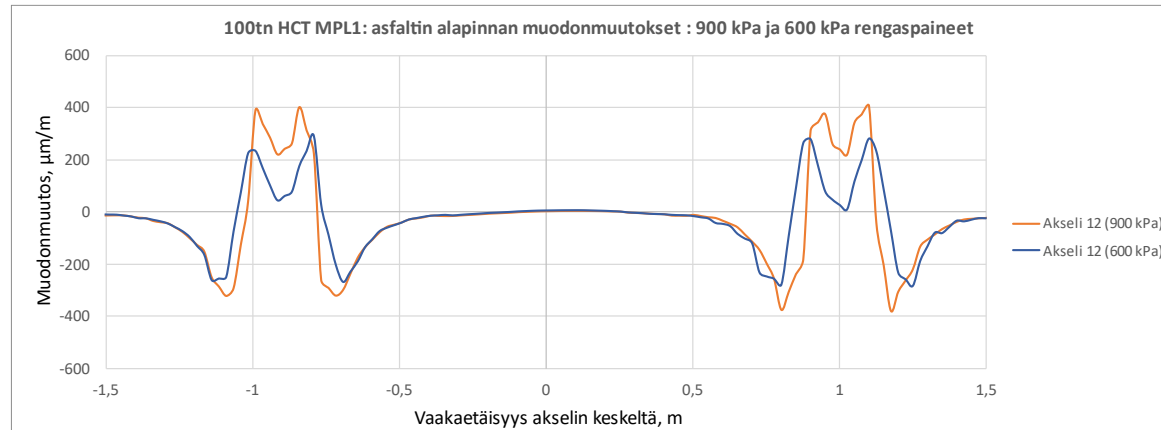
MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (-0,03; -0,04 m) (84 tn, mallinnus 2024)



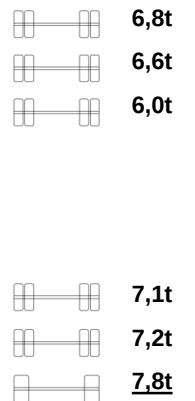
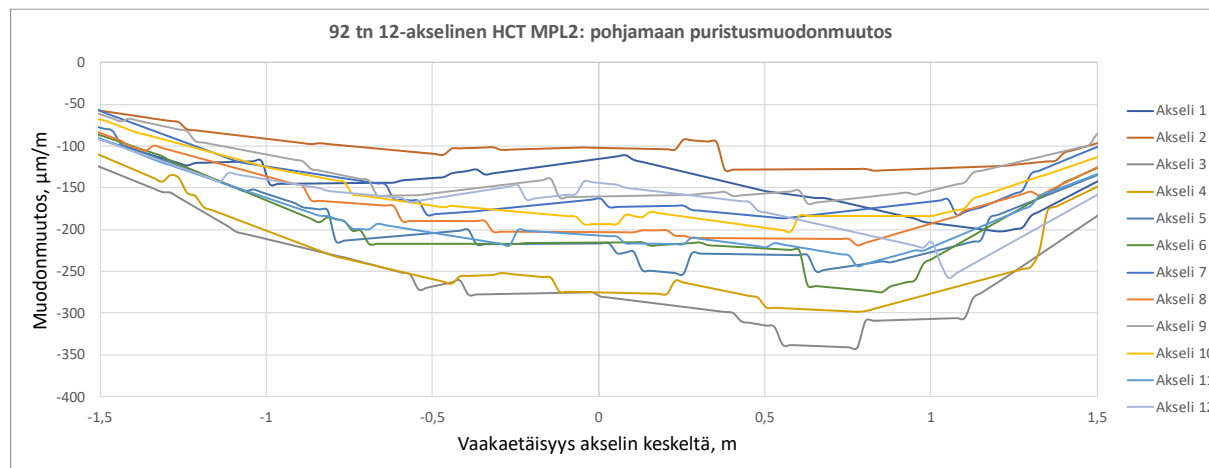
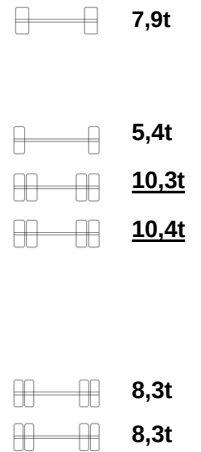
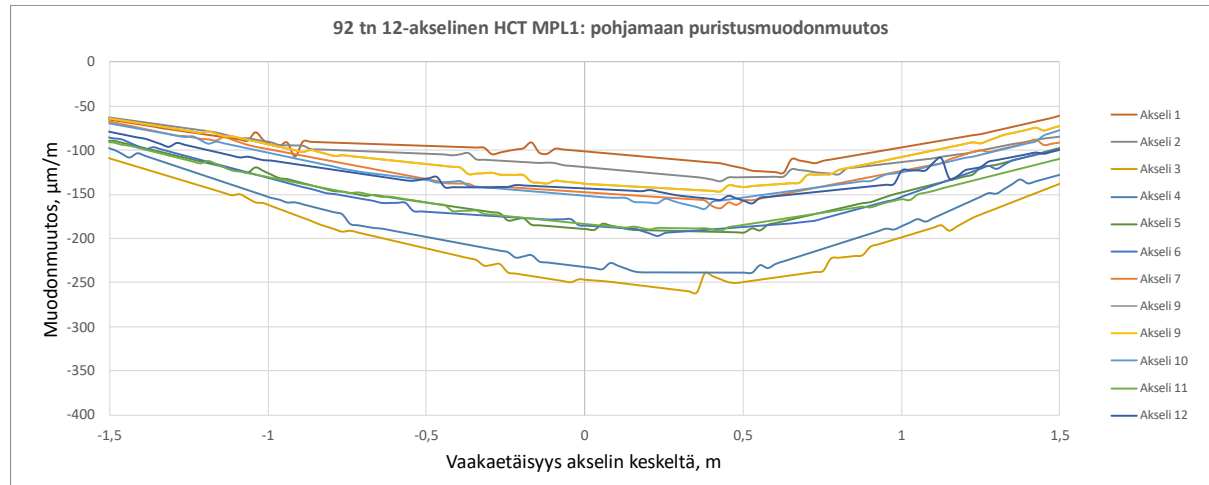
MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (-0,03; -0,04 m) (100 tn, mallinnus 2024)



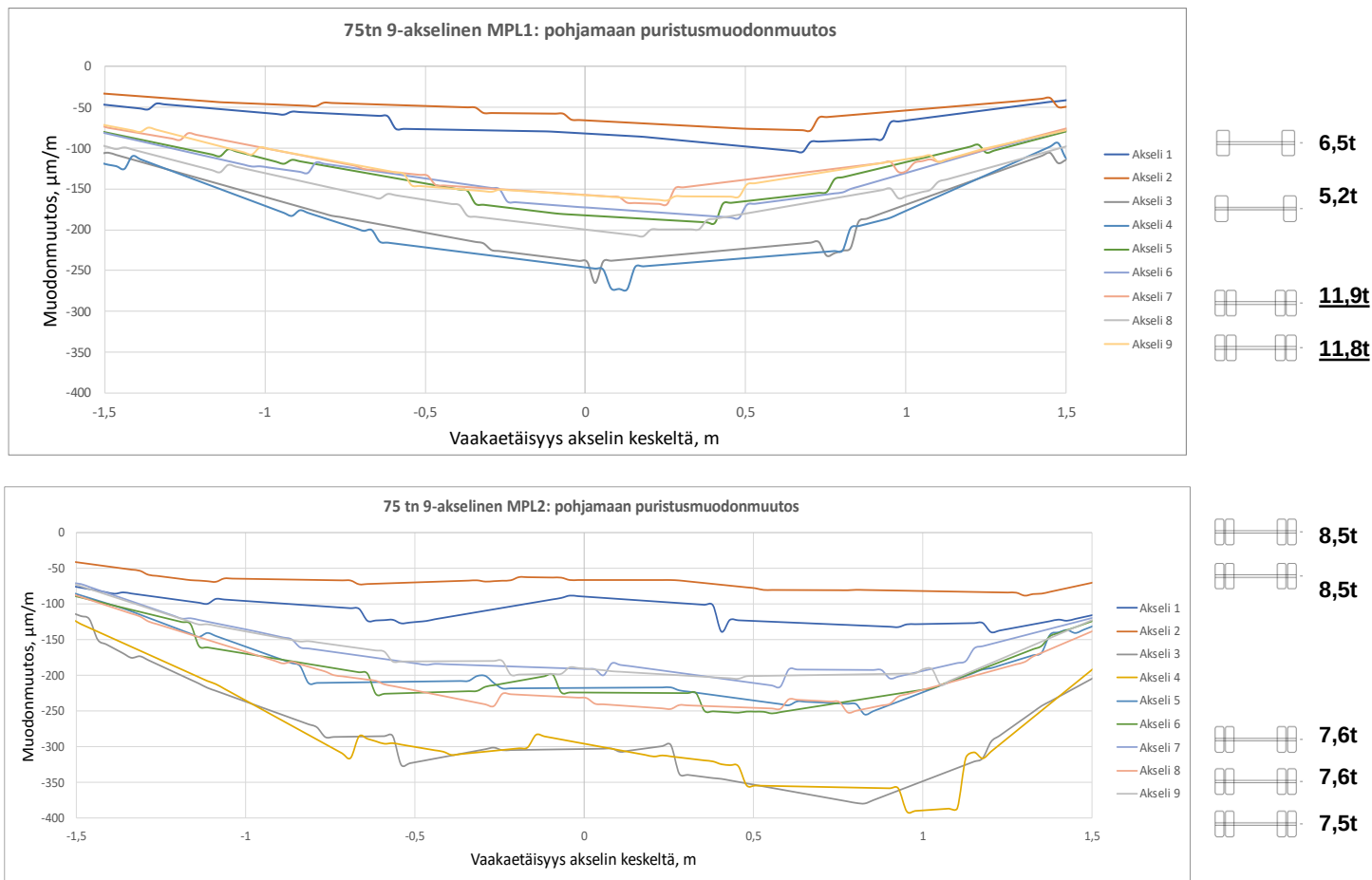
MPL 1 & 2: Asfaltin alapinnan venymät (-0,03; -0,04 m) (100 tn, 600 ja 900 kPa vertailu 12. akseli, mallinnus 2024)



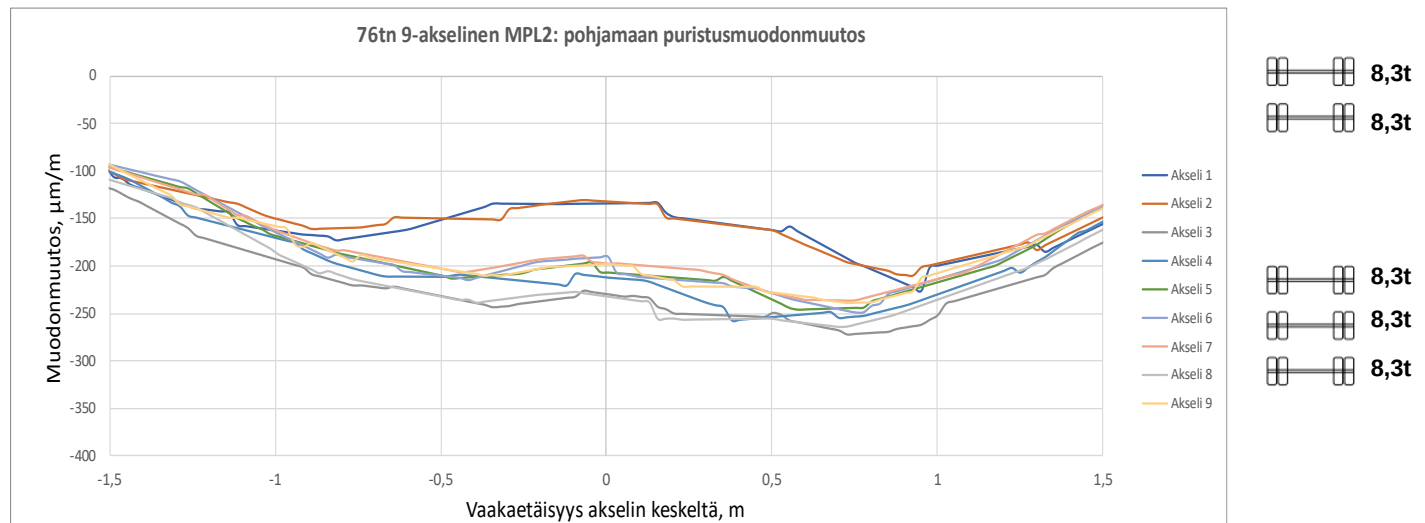
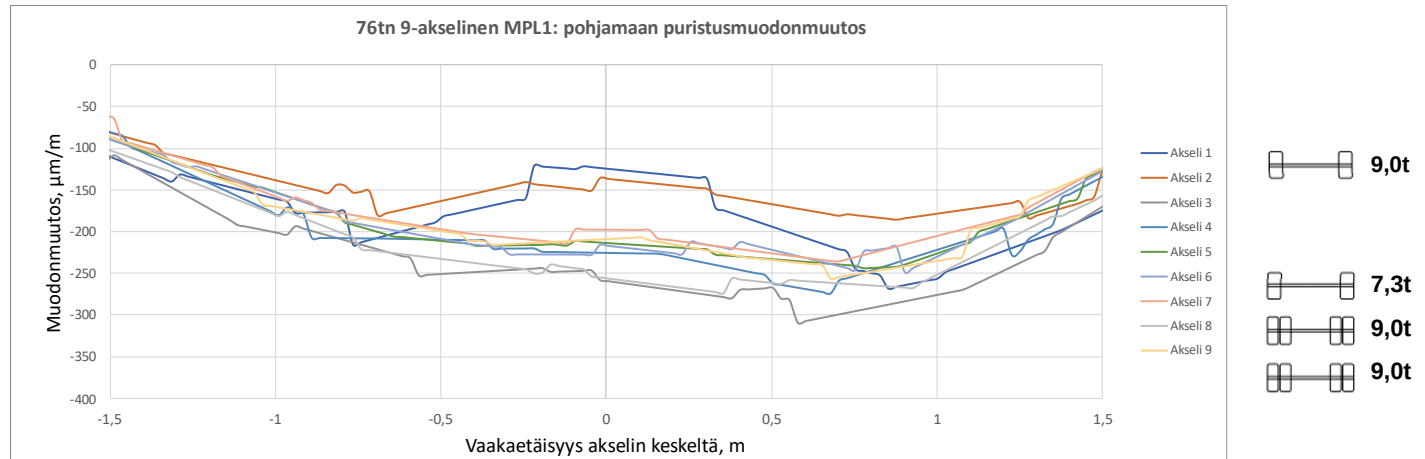
Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (92 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)



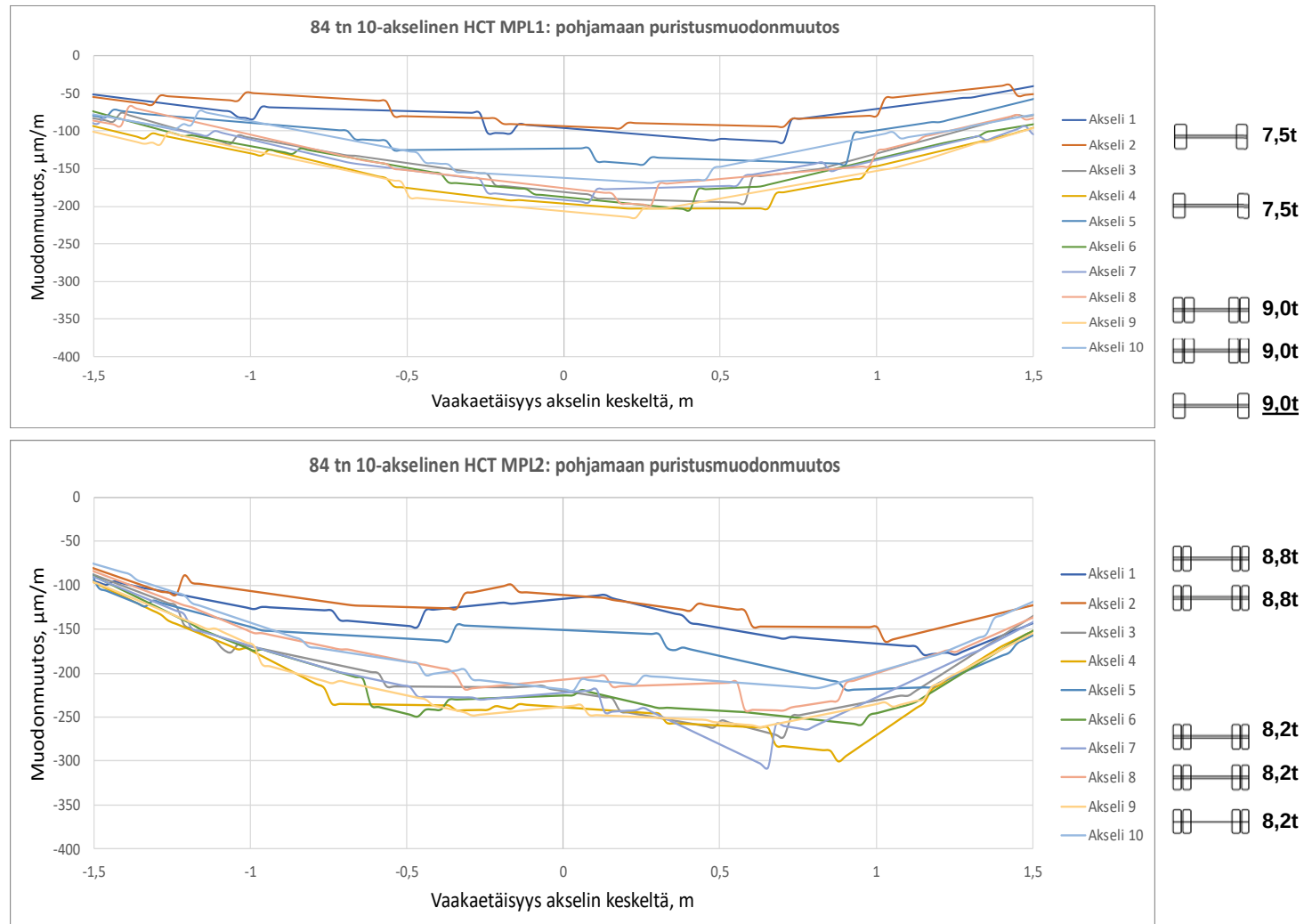
Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (75 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)



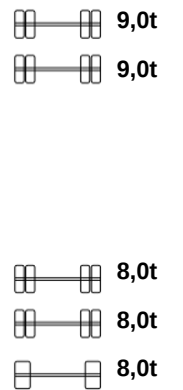
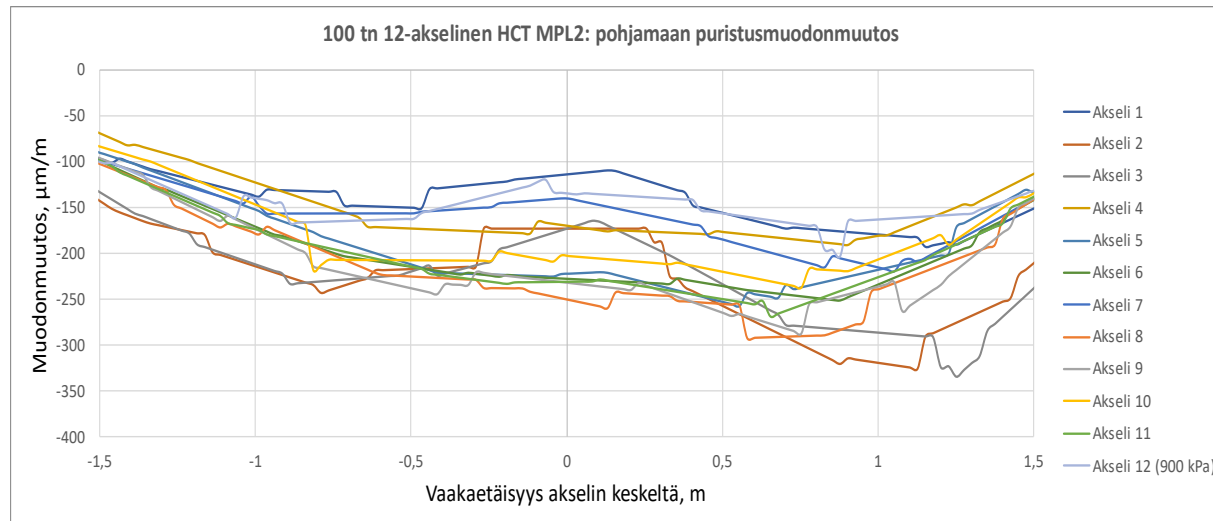
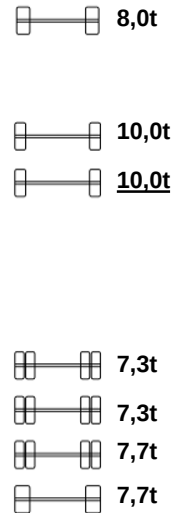
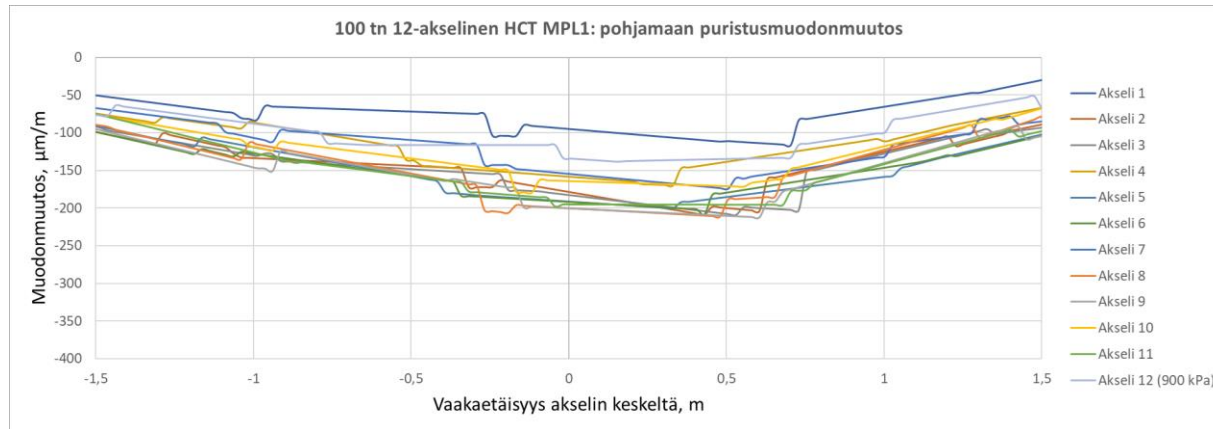
Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (76 tn, mallinnus 2024)



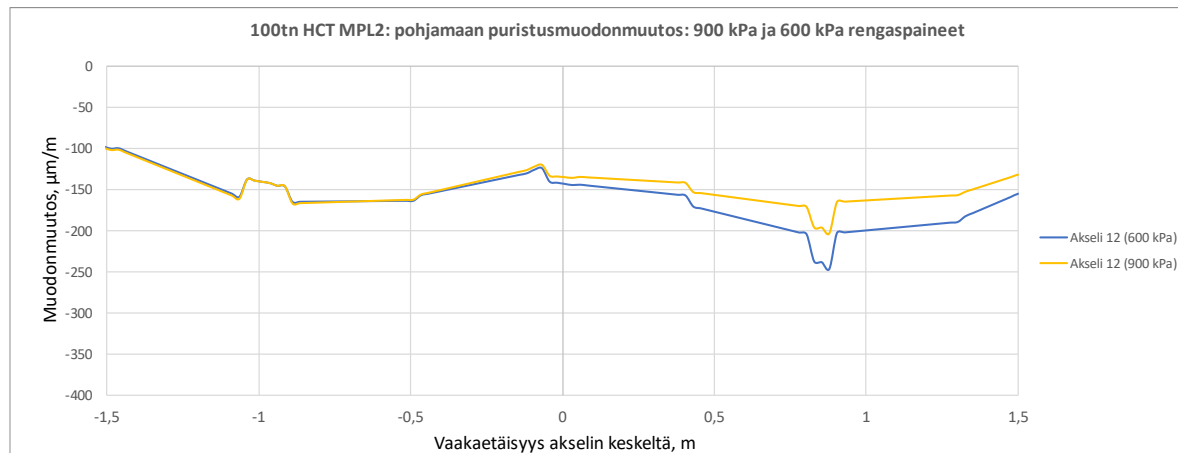
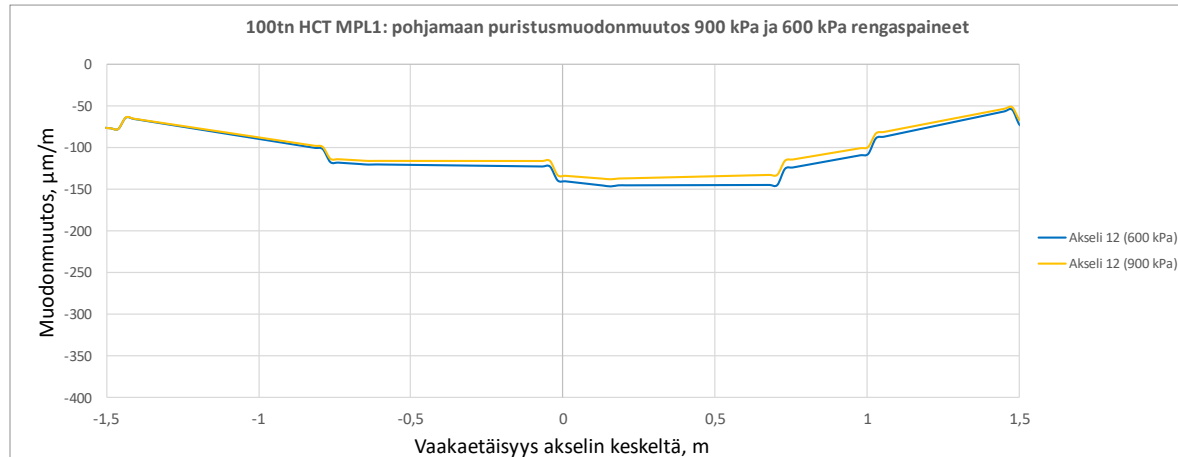
Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (84 tn, mallinnus 2024)



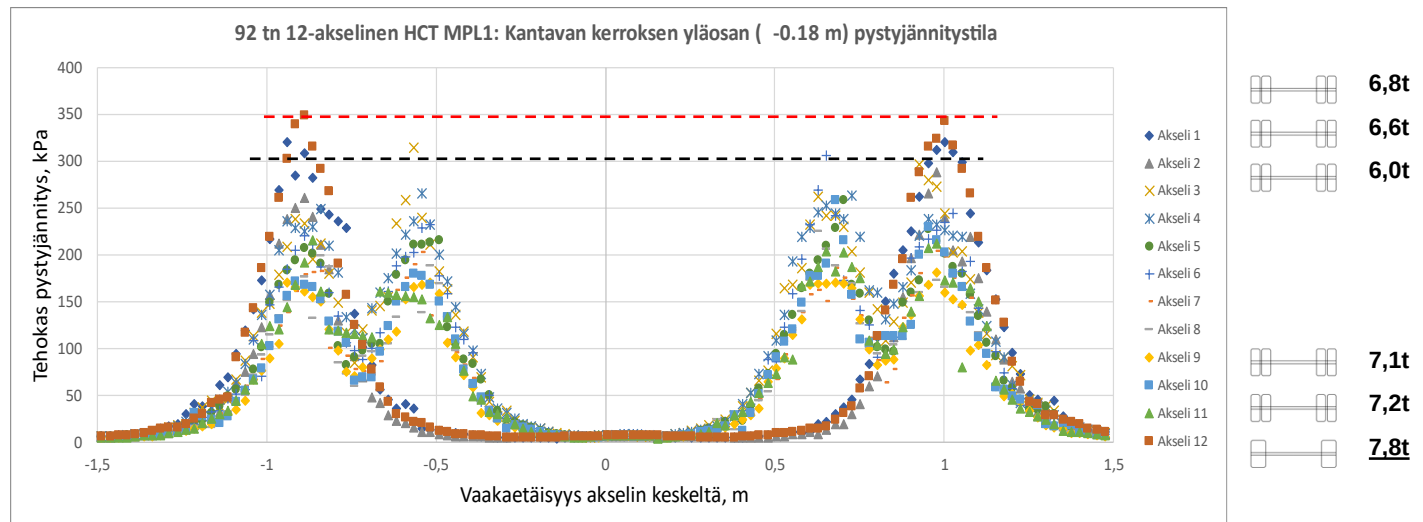
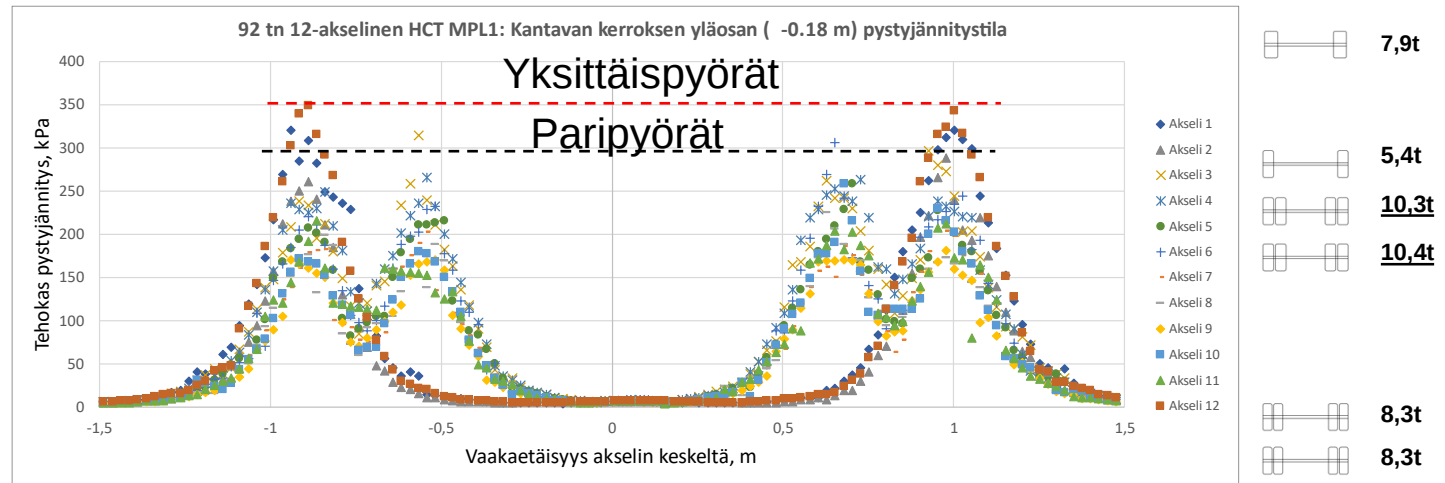
Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (100 tn, mallinnus 2024)



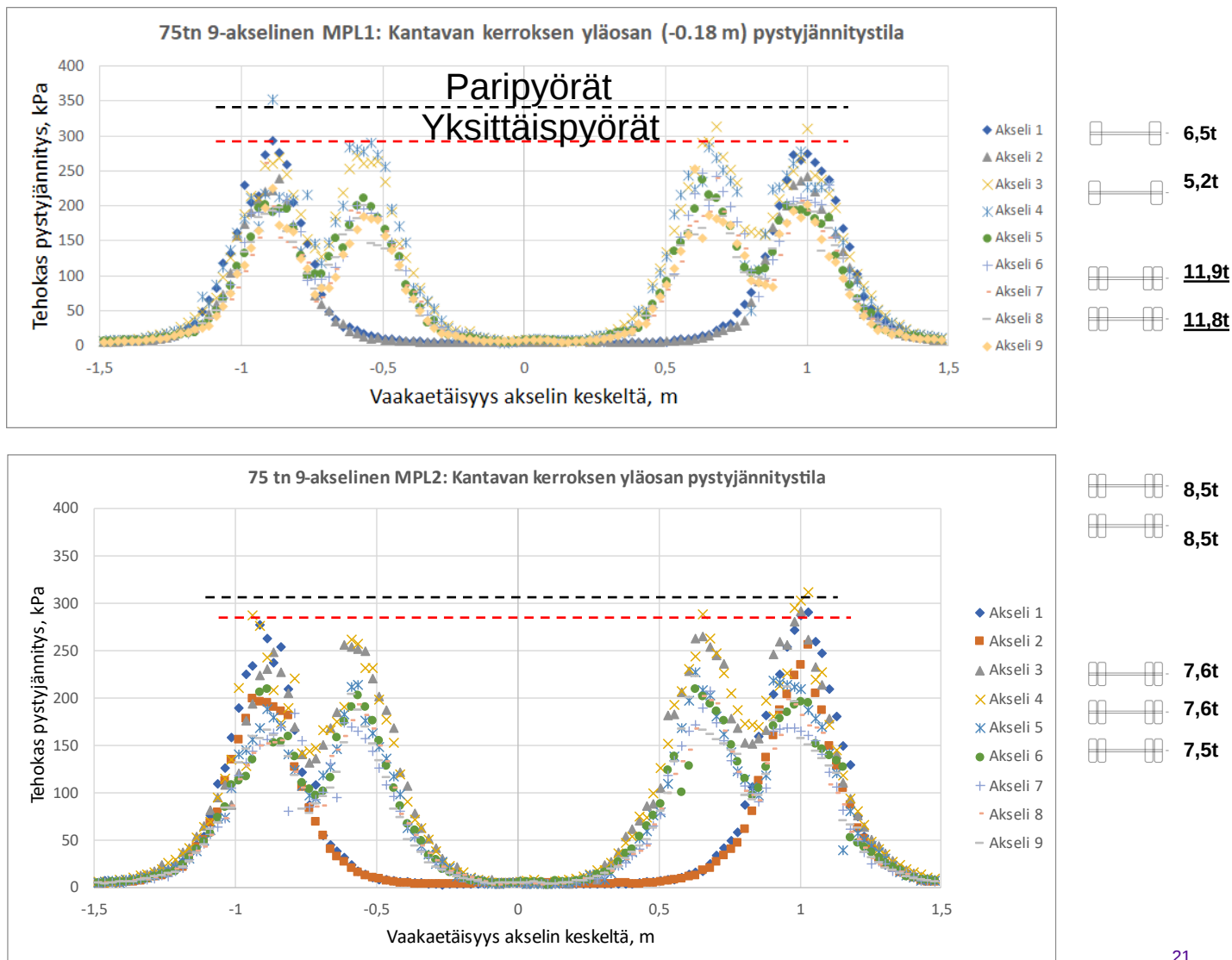
Pohjamaan puristusmuodonmuutos (-1,55; -1,22 m) (100tn, 600 ja 900 kPa vertailu 12. akseli, mallinnus 2024)



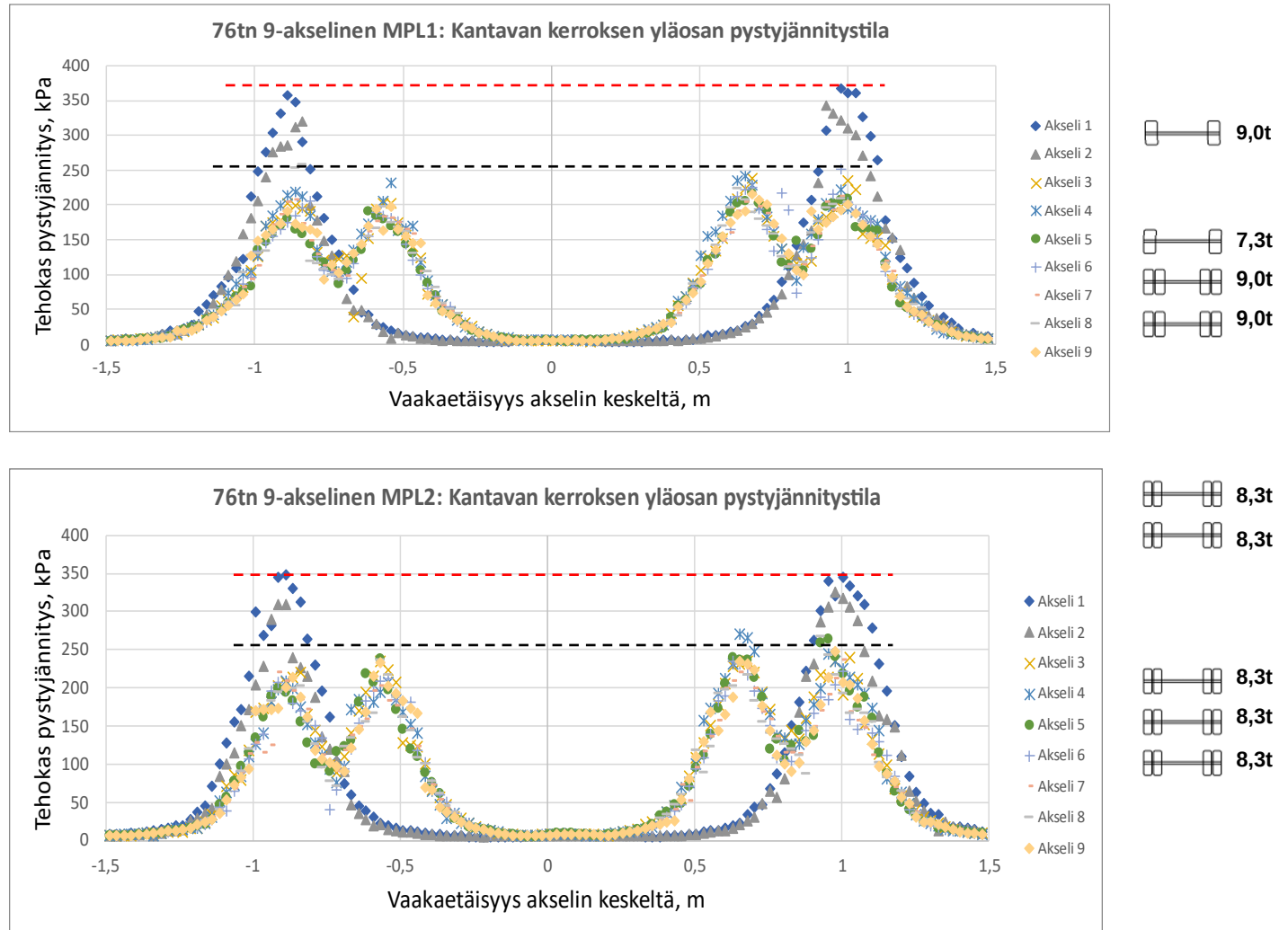
Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (92 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)



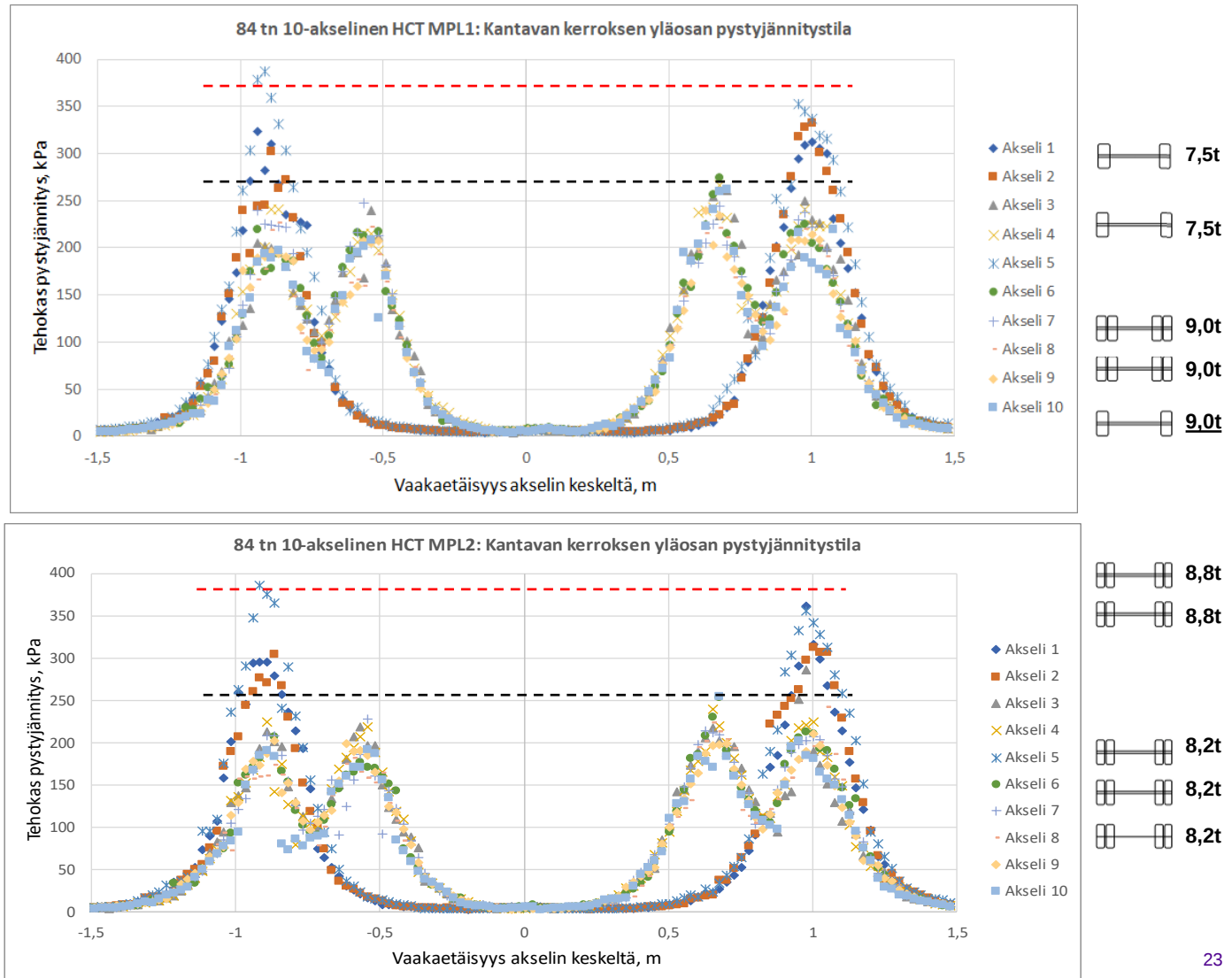
Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (75 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)



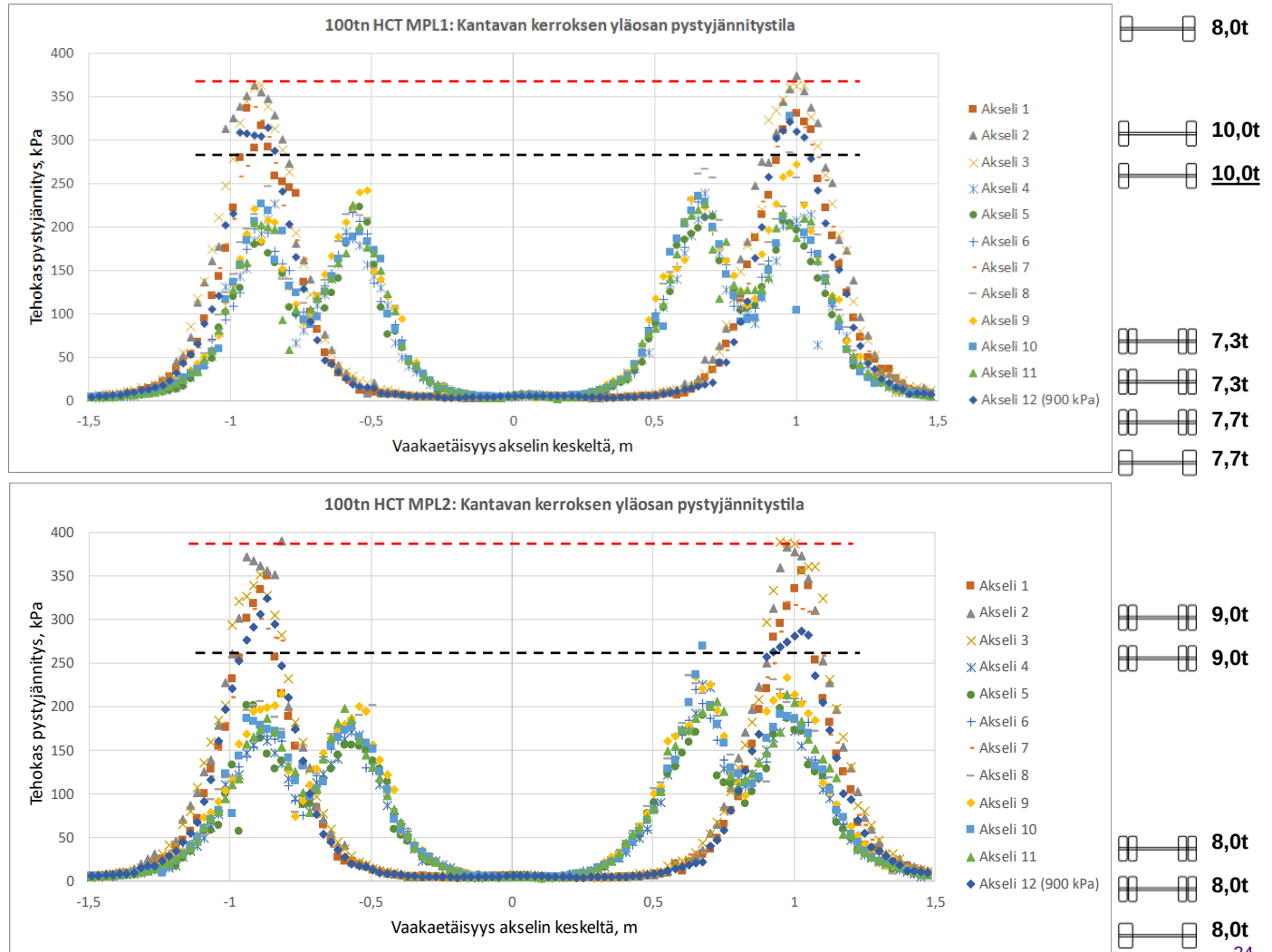
Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (76 tn, mallinnus 2024)



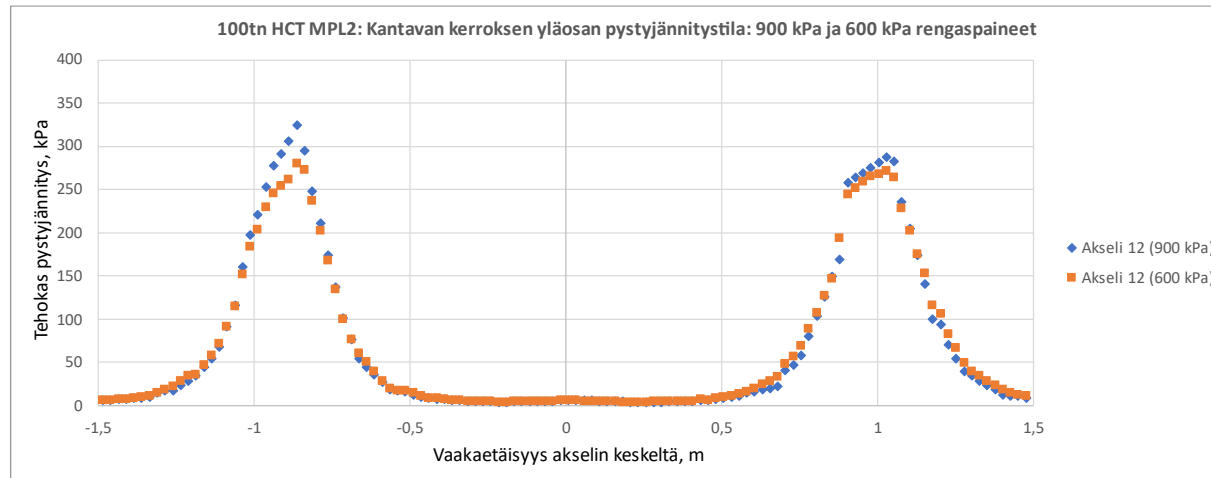
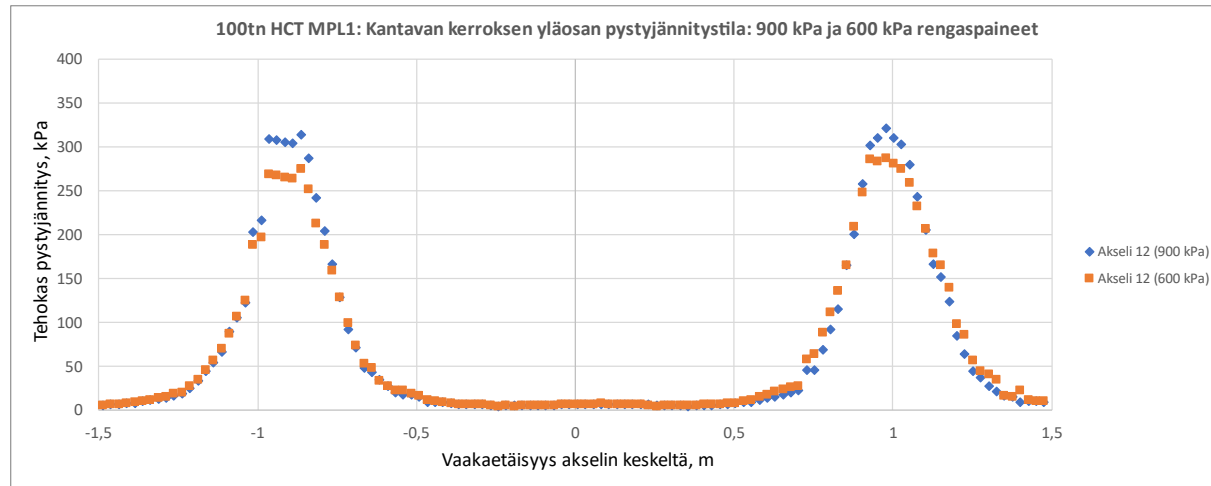
Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (84 tn, mallinnus 2024)



Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (100tn, mallinnus 2024)



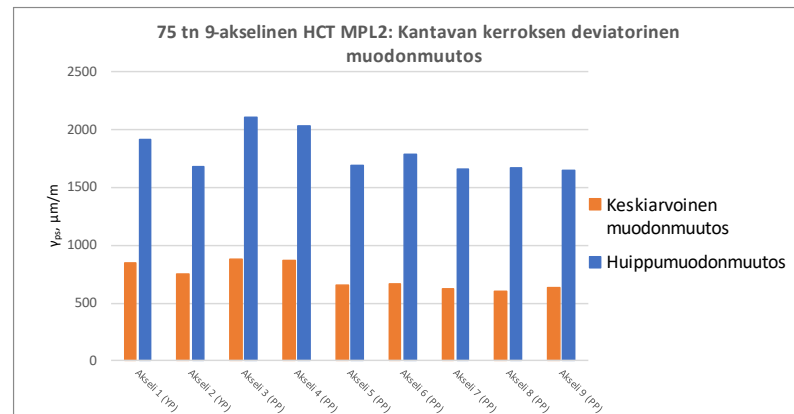
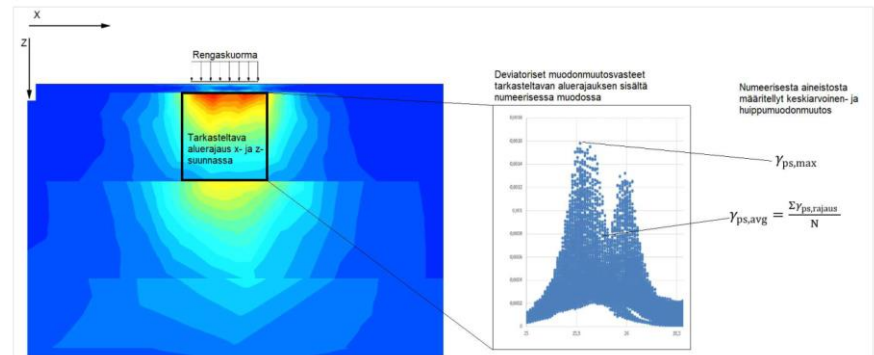
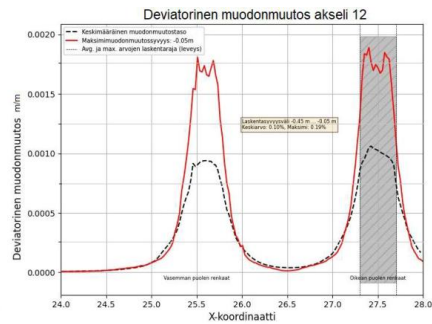
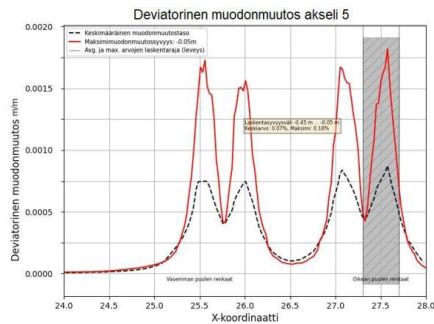
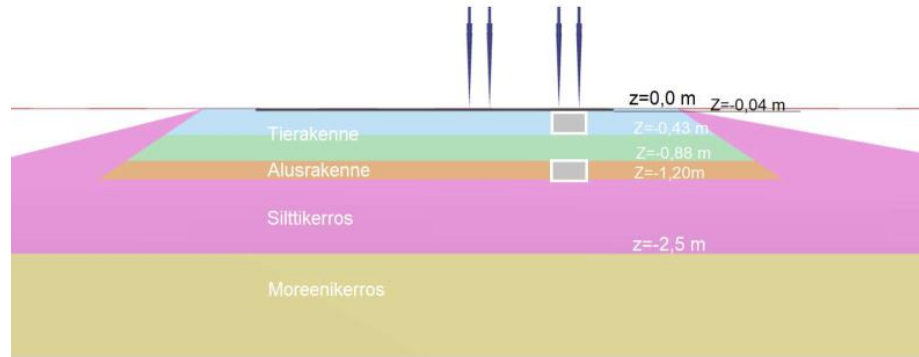
Kantavan kerroksen pystyjännitys (-0,18 m) (100 tn, mallinnus 2024)



Yhteenvedo vastetarkasteluista (diat 8-25)

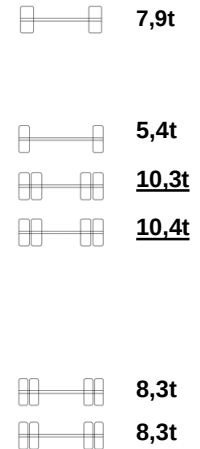
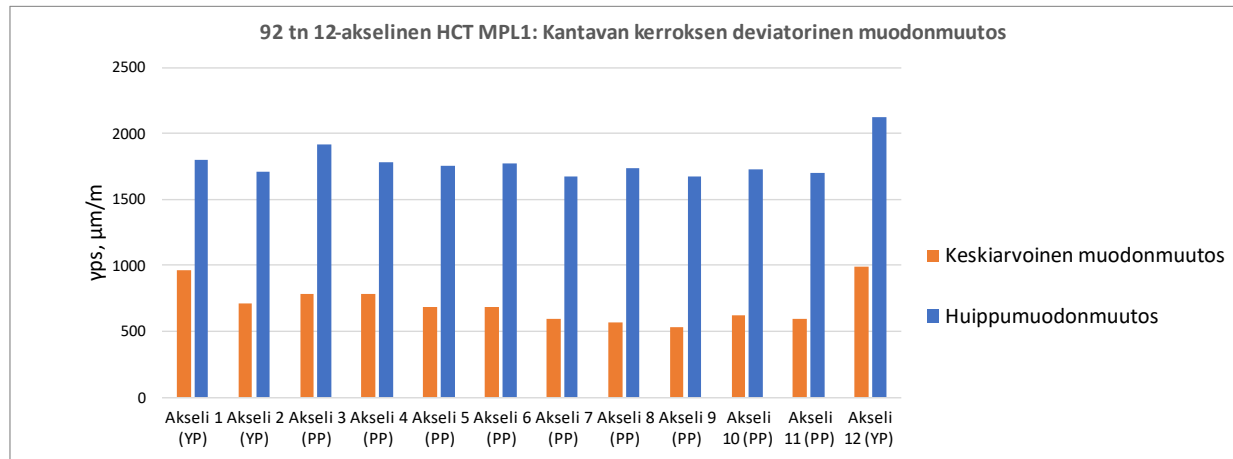
- **Asfaltin alapinnan vetomuodonmuutokset**
 - MPL 1:ssä asfaltin alapinnan vetomuodonmuutokset lievästi pienempiä kuin MPL 2:ssa. Vetomuodonmuutosten huippuarvot vaihtelivat 400-600 $\mu\text{m}/\text{m}$ välillä, eli huomattavan suuria.
- **Pohjamaan puristusmuodonmuutokset**
 - Rakenteiden paksuudesta johtuen pohjamaan muodonmuutokset olivat varsin maltillisia. Suurimmat arvot havaittiin painavimpien akseleitten ja telien kohdalla, mutta akselikohtaisella rengastuksella ei näyttänyt olevan juurikaan vaikutusta pohjamaan muodonmuutoksiin.
 - Pohjamaan muodonmuutokset olivat MPL 1:ssä selkeästi pienempiä kuin MPL 2:ssa; syinä tähän suurempi tarkastelusyvyys tarkastelusyvyiden alapuolelle oli mallinnettu turpeen sisään painunut kitkamaakerros.
 - Pohjamaan muodonmuutos oli turvepohjamaalla MPL 1:ssä suurimmillaan akseleiden keskikohdalla, siltti-/moreenipohjamaalla MPL 2:ssa ajourien kohdalla
- **Kantavan kerroksen pystyjännitystila 180 mm syvyydessä tien pinnasta**
 - Päällystekerrosten ohuudesta johtuen kantavan kerroksen pystyjännitykset olivat varsin suuria erityisesti yksikkörenkaitten alapuolella; paripyöräakseleilla pystyjännitysmaksimi oli noin 250 kPa ja yksikköpyöräakseleilla ≥ 350 kPa - poikkeuksena tästä olivat 75 tn koekuormitusajoneuvon ylikuormitetut paripyöräakselit 3 ja 4
 - Pystyjännitykset olivat hieman suurempia MPL 1:ssä, koska siinä oli ohuempi päällyste.
- **Rengaspaineen alentaminen (leveiden yksikkörenkaiden käyttäminen) vaikuttaa alentavasti päällysrakenteen yläosan kuormitusvasteisiin**
 - Suurimmat erot oli havaittavissa asfaltin alapinnan vetomuodonmuutoksissa ja kantavan kerroksen pystyjännityksissä; pohjamaan tasolla vaikutusta ei ollut juurikaan havaittavissa.

Deviatoristen leikkausmuodonmuutosten käsittely

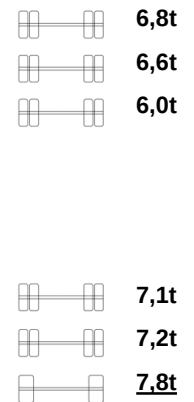
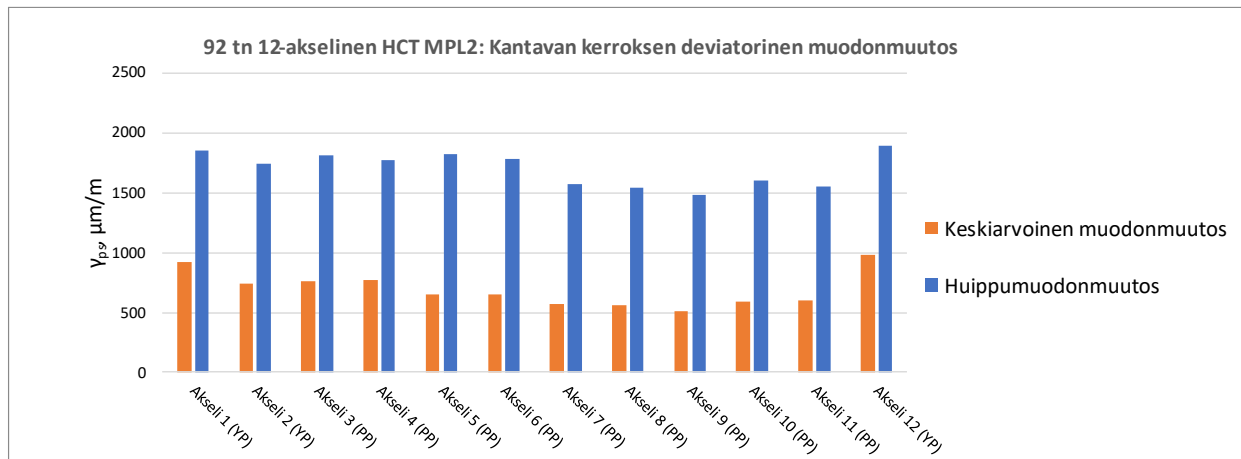


Kantavan kerroksen deviatoriset muodonmuutokset (92 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)

Päällysteen
paksuus 30 mm

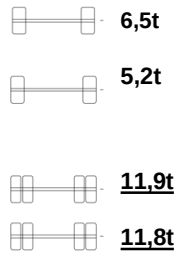
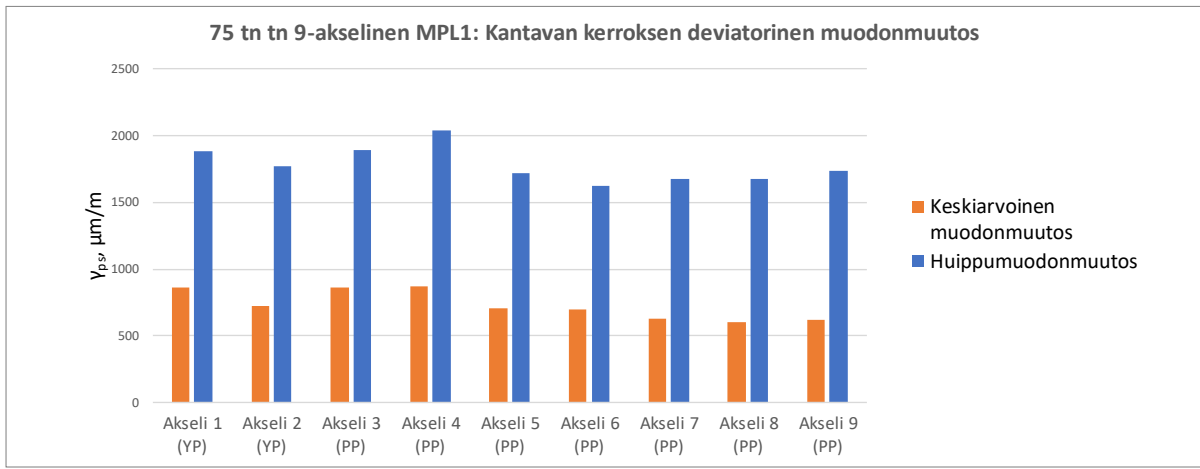


Päällysteen
paksuus 40 mm

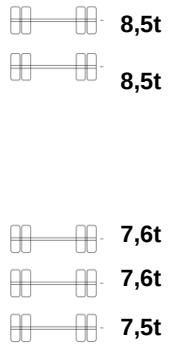
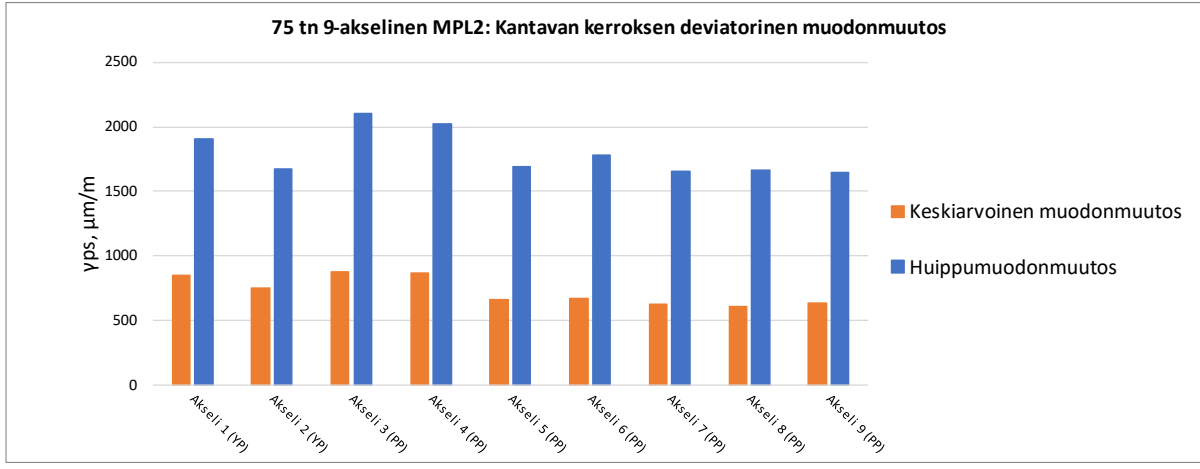


Kantavan kerroksen deviatoriset muodonmuutokset (75 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)

Päällysteen
paksuus 30 mm

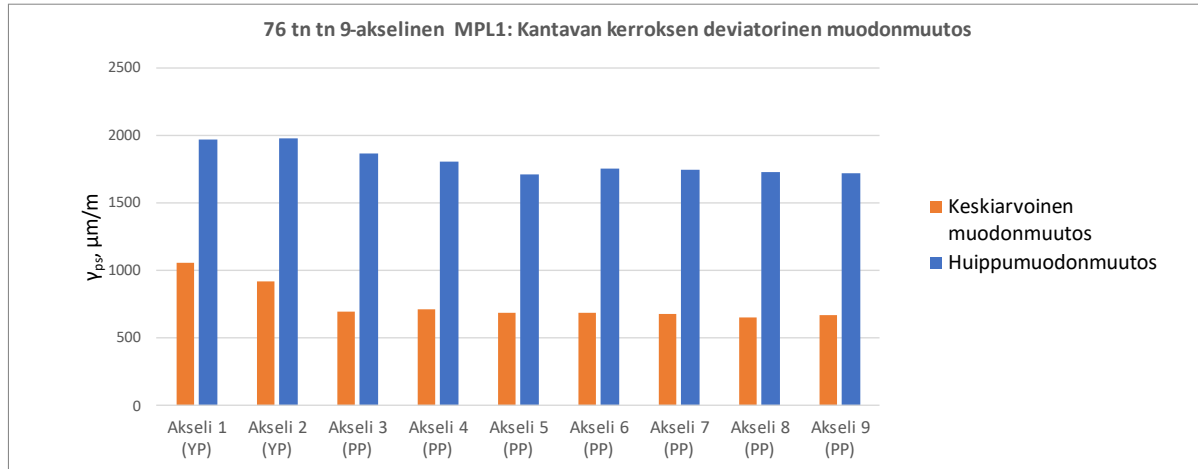


Päällysteen
paksuus 40 mm



Kantavan kerroksen deviatoriset muodonmuutokset (76 tn, mallinnus 2024)

Päällysteen
paksuus 30 mm



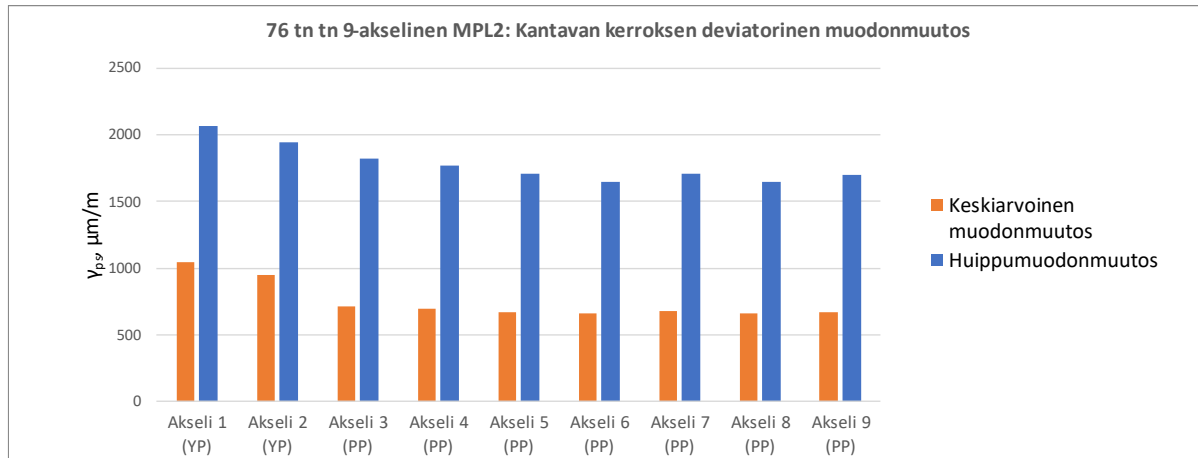
9,0t

7,3t

9,0t

9,0t

Päällysteen
paksuus 40 mm



8,3t

8,3t

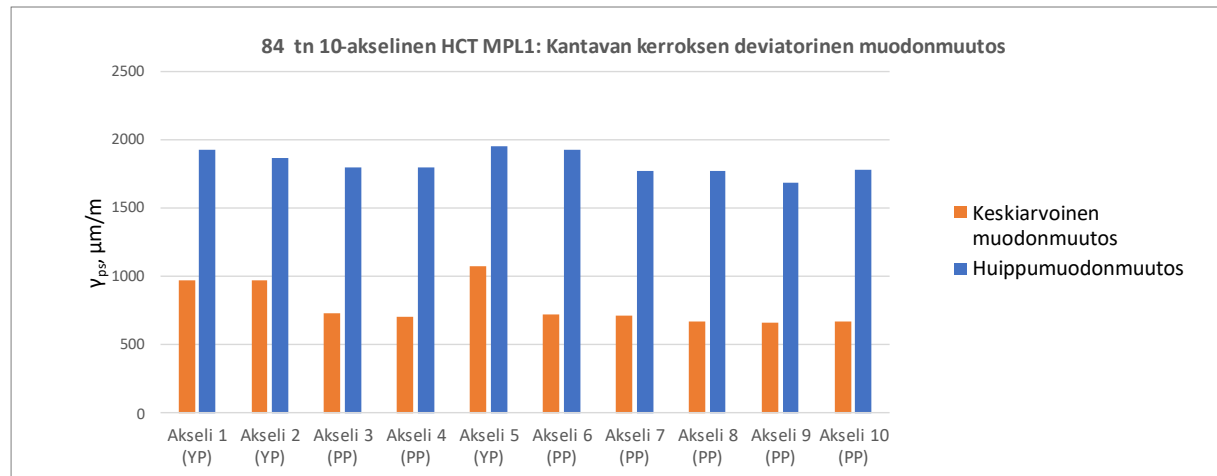
8,3t

8,3t

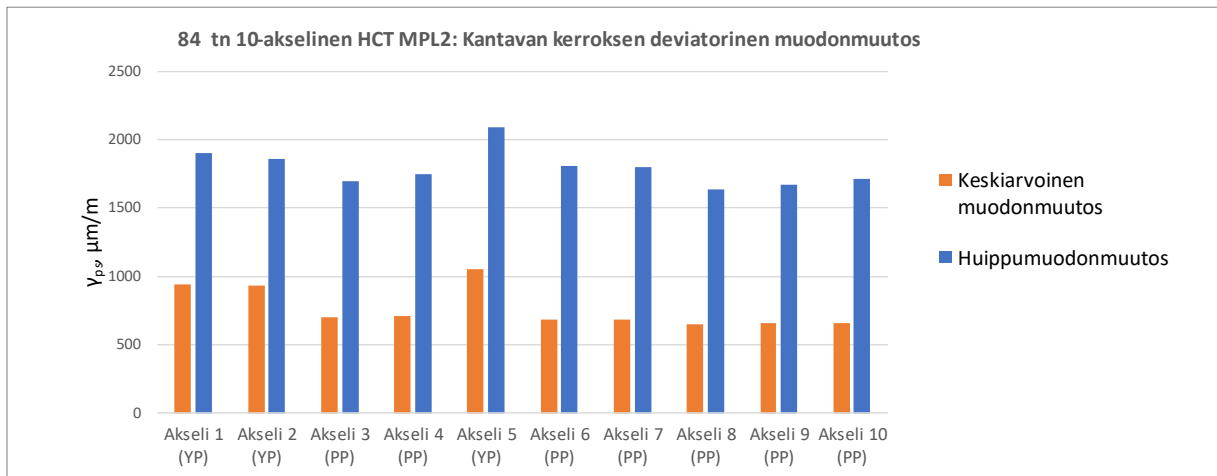
8,3t

Kantavan kerroksen deviatoriset muodonmuutokset (84 tn, mallinnus 2024)

Päällysteen
paksuus 30 mm



Päällysteen
paksuus 40 mm



Kantavan kerroksen deviatoriset muodonmuutokset (100 tn, mallinnus 2024)

8,0t

10,0t

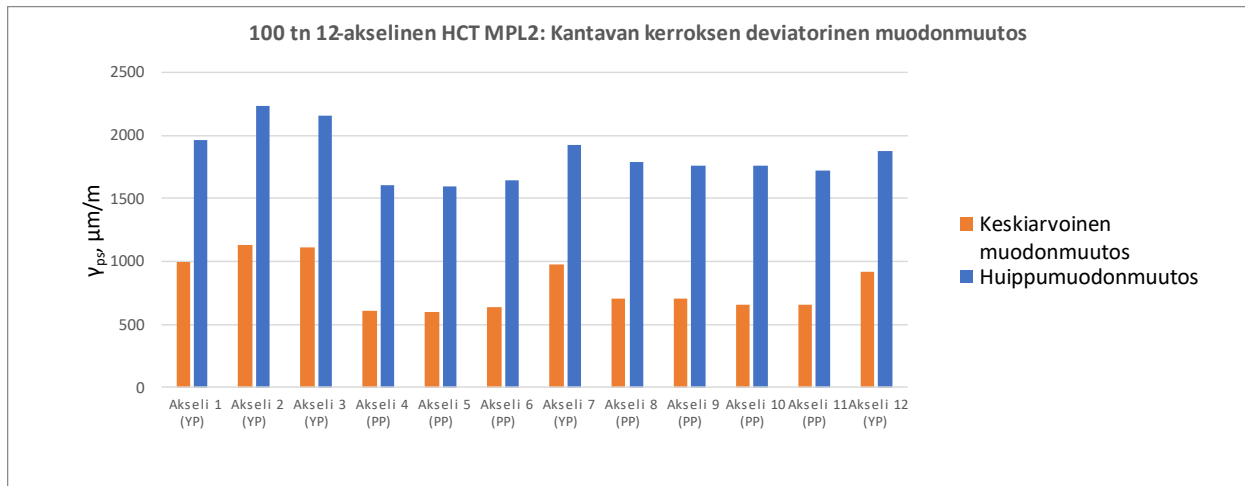
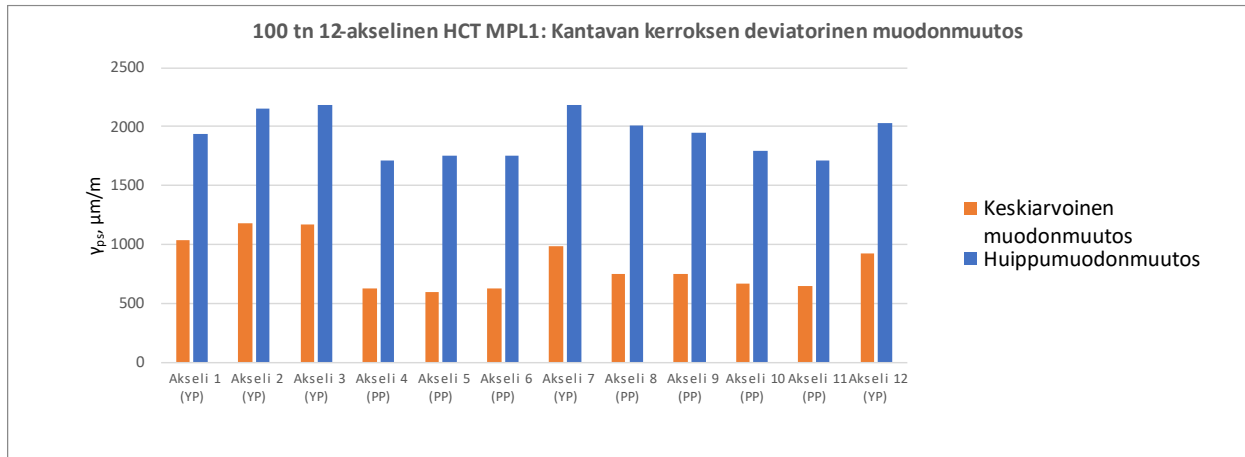
10,0t

7,3t

7,3t

7,7t

7,7t



9,0t

9,0t

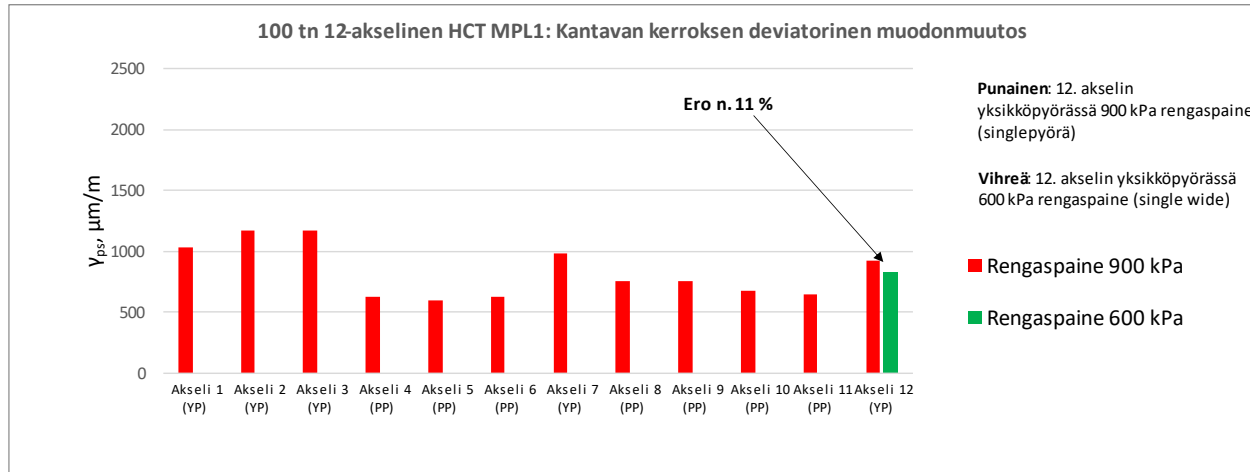
8,0t

8,0t

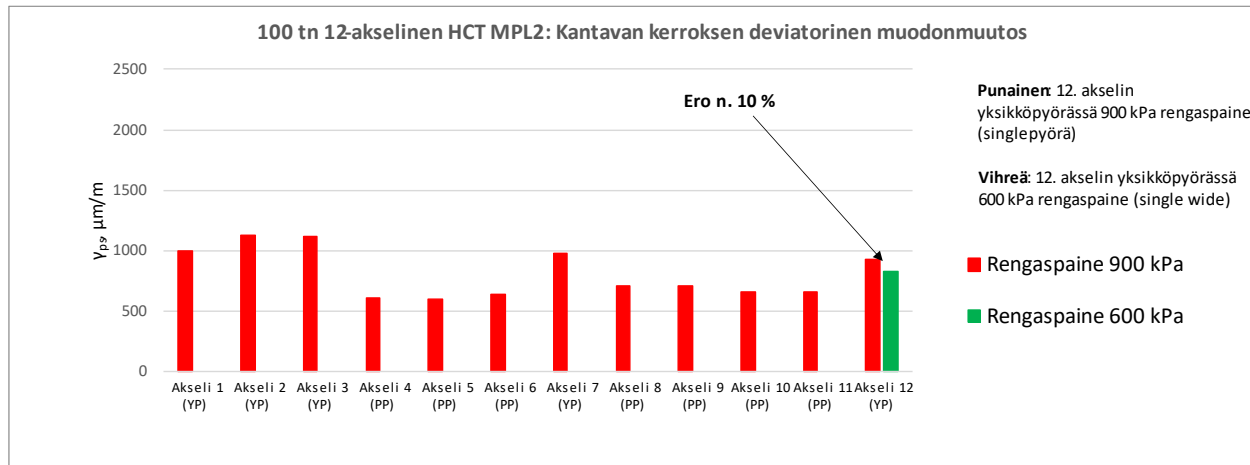
8,0t

Kantavan kerroksen keskimäär. deviatoriset muodonnm. (100 tn, 600 ja 900 kPa rengaspaineet, mallinnus 2024)

Päällysteen
paksuus 30 mm

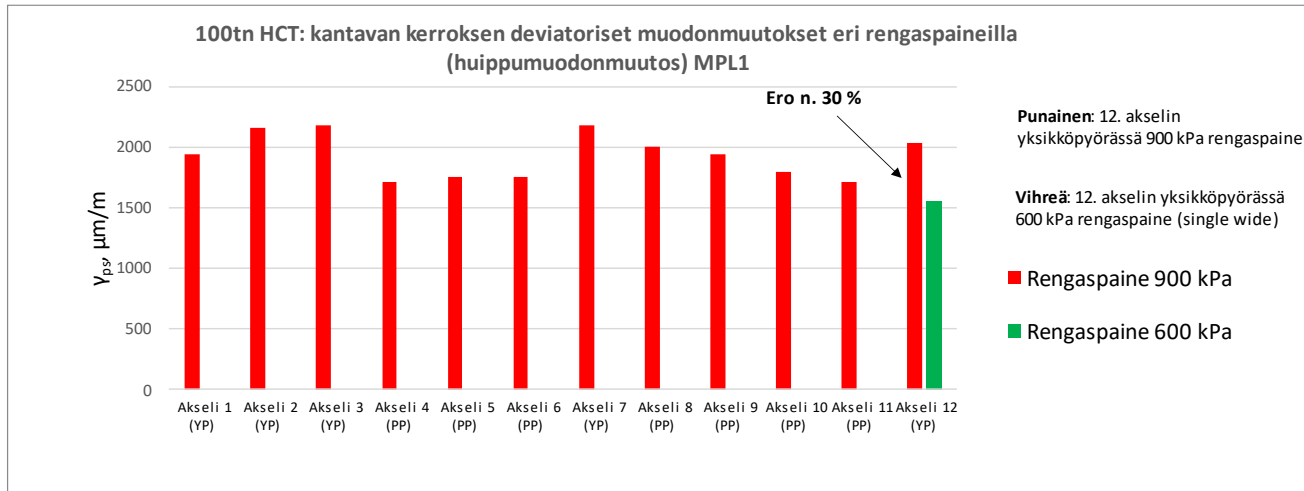


Päällysteen
paksuus 40 mm

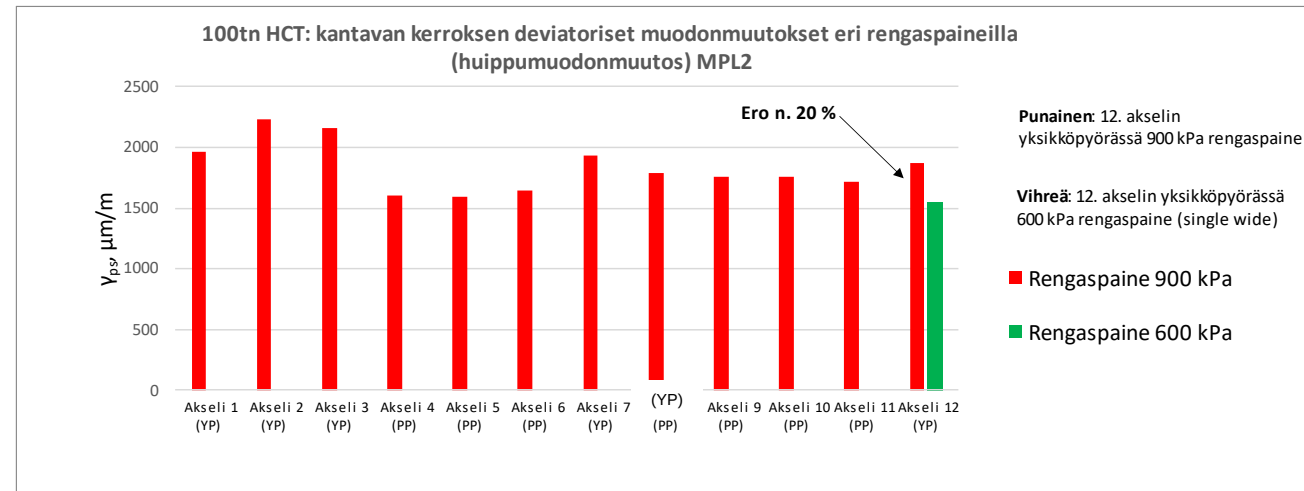


Kantavan kerroksen deviatoriset huippumuodonmuutokset (100 tn, 600 ja 900 kPa rengaspaineet, mallinnus 2024)

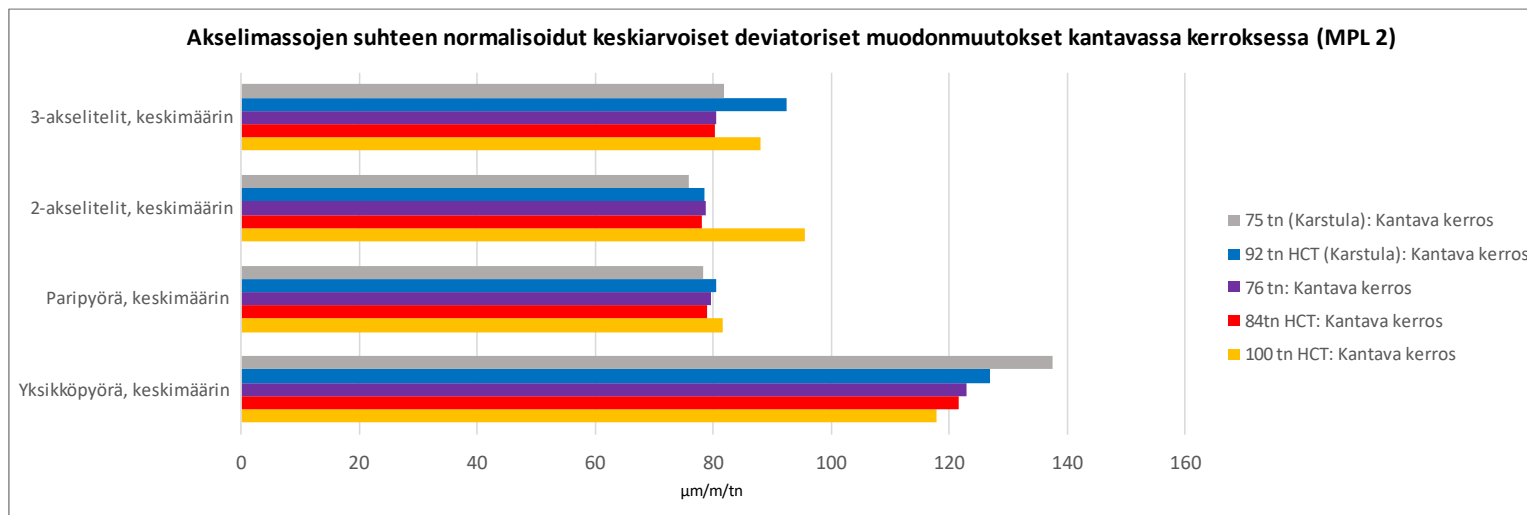
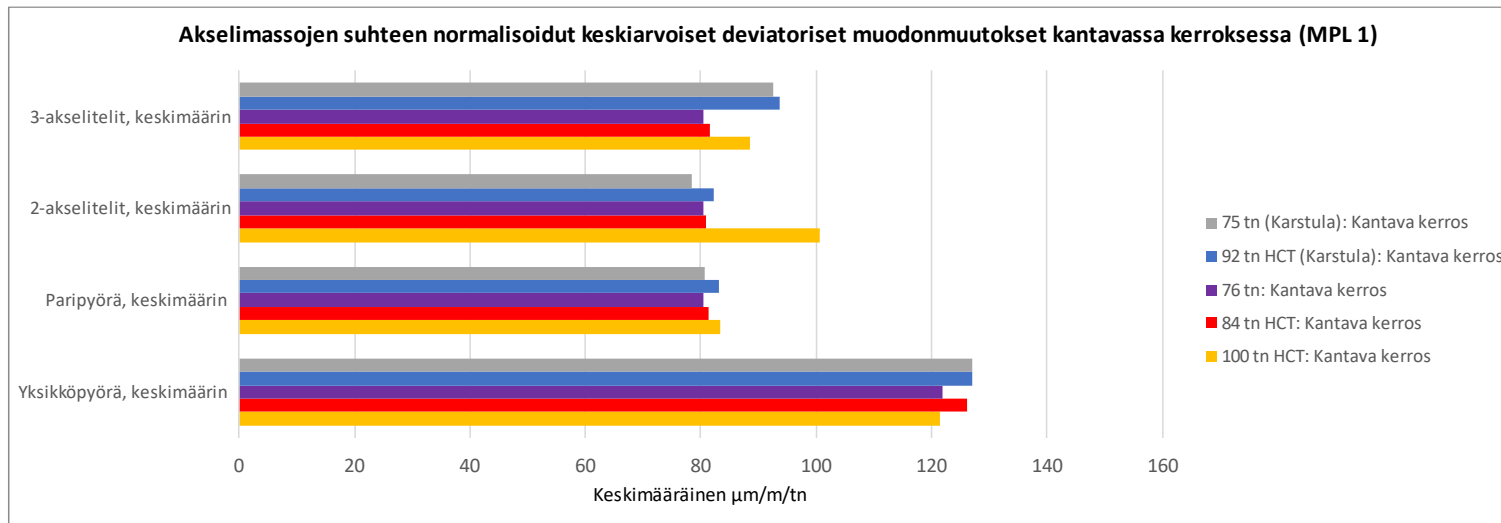
Päällysteen paksuus 30 mm



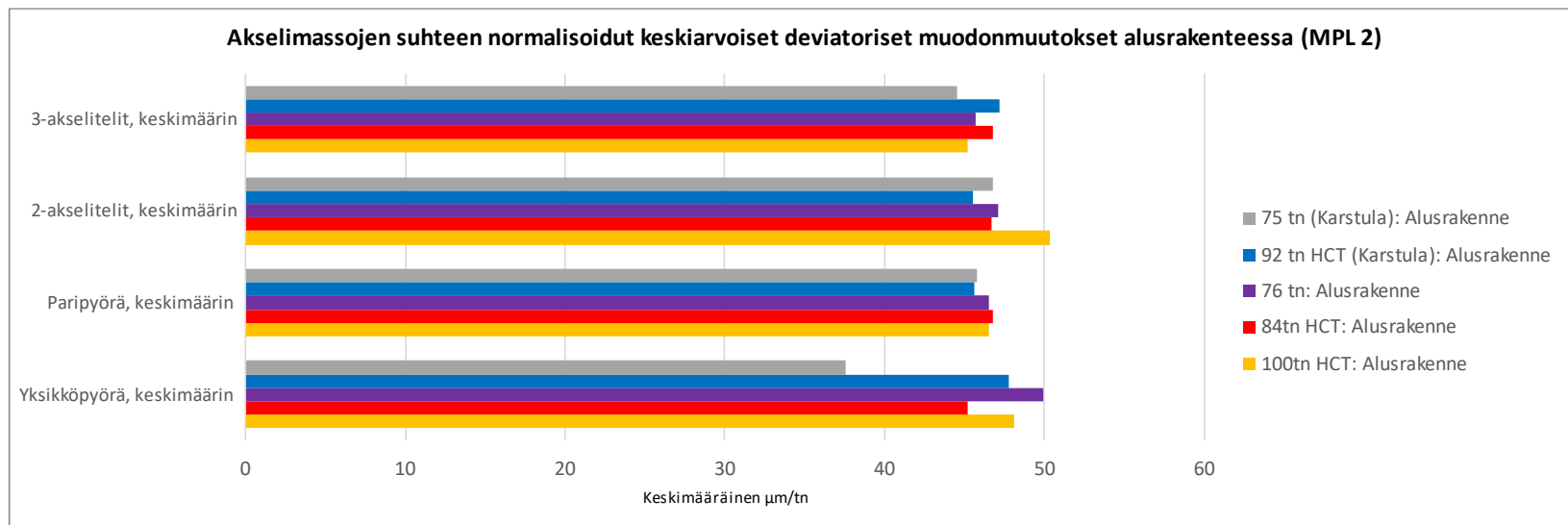
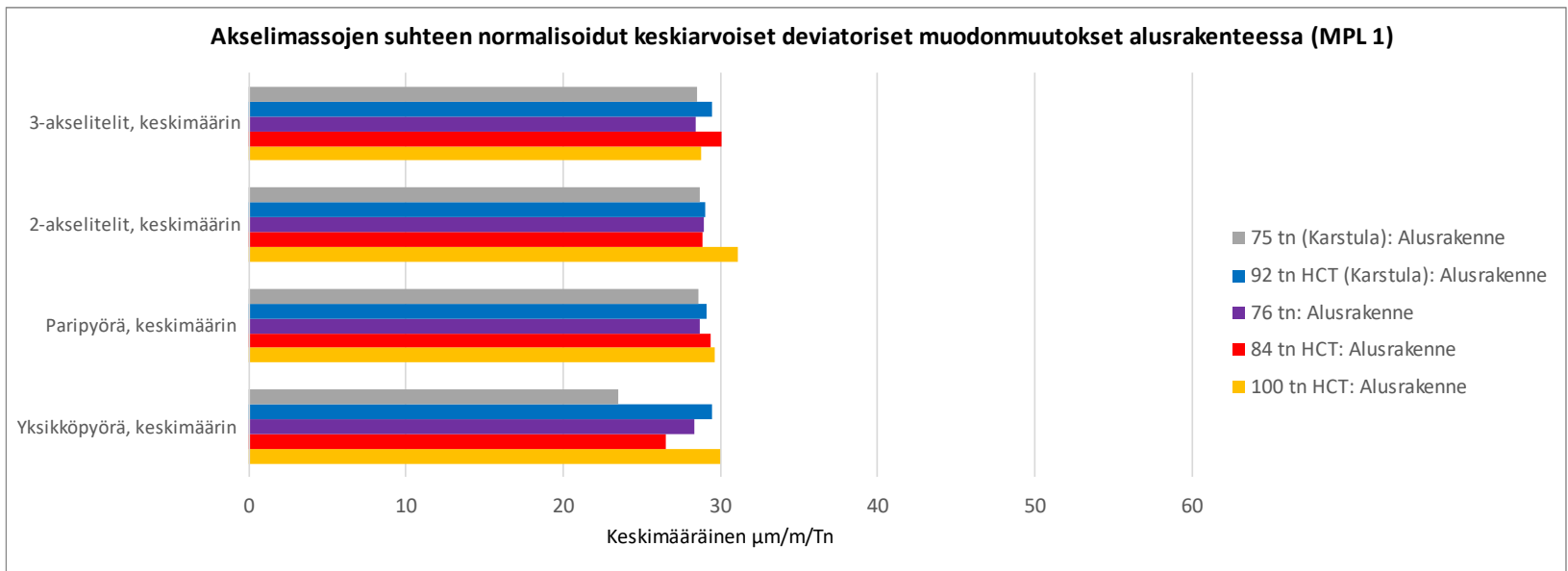
Päällysteen paksuus 40 mm



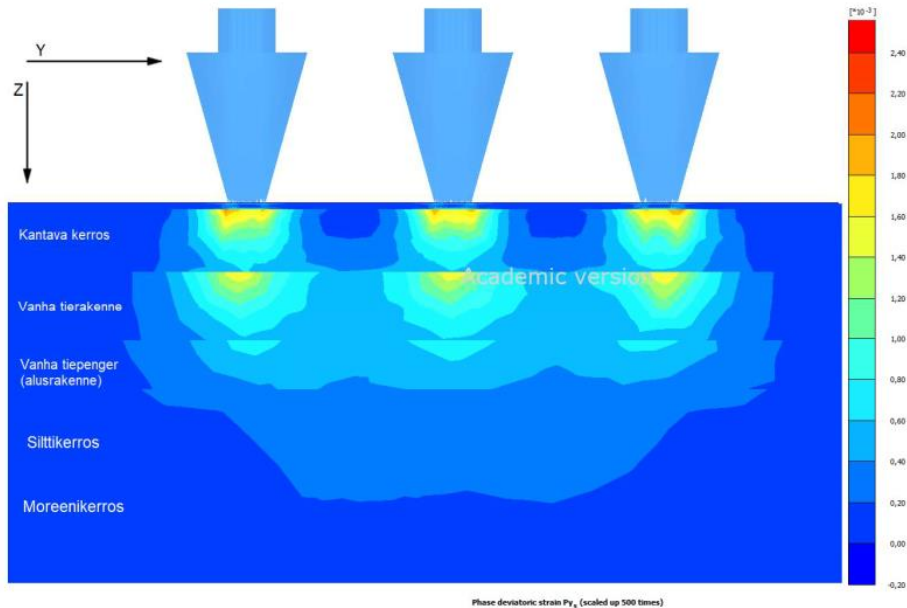
Normalisoidut deviatoriset muodonmuutokset kantavassa kerroksessa



Normalisoidut deviatoriset muodonmuutokset alusrakenteessa



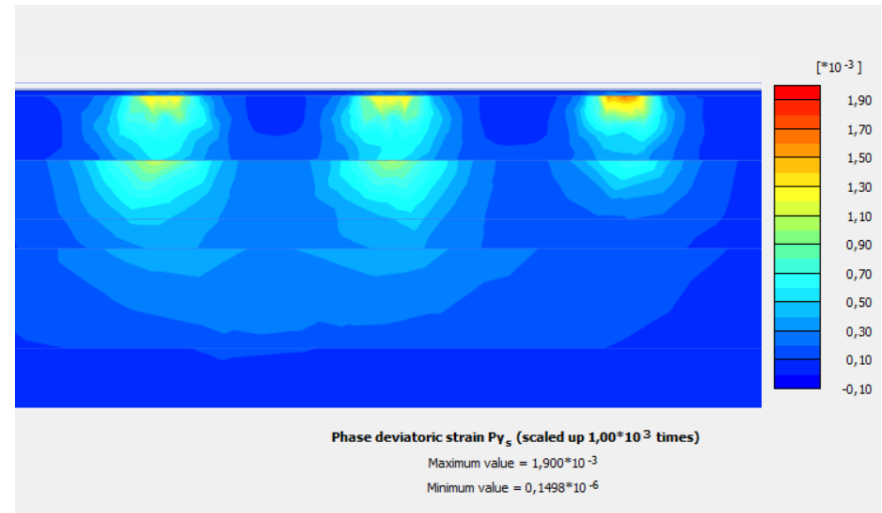
Telien vaikutus staattisessa mallissa



MPL 2

- Kuvat havainnollistavat deviatorisen muodonmuutoskentän muutoksia eri syvyyksillä tierakenteessa ja pohjamaassa.
- Telin keskimmäisen akselin kohdalla tien alemmissa rakennekerroksissa ja pohjamaassa näkyy vierekkäisten akselien kuormitusvaikutusten kumuloitumista; myös kantavassa kerroksessa sitä esiintyy hieman.

MPL 1



Yhteenvedo muodonmuutostarkasteluista (diat 27-37)

- **Deviatoriset muodonmuutokset (keskiarvoiset ja huippumuodonmuutokset)**
 - Huippumuodonmuutokset edustavat riskiä kantavan kerroksen yläosassa tapahtuvalle deformatumiselle/urautumiselle, keskiarvoinen muodonmuutos vastaavasti urautumisriskiä tien päällysrakenteen yläosassa noin 400 mm syvyyteen saakka.
 - Keskiarvoiset muodonmuutokset pysyivät pääsääntöisesti alle 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ rajan painavimpia yksittäispyöräakseleita lukuun ottamatta.
 - Huippumuodonmuutokset ylittivät jopa 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$; yli 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ arvojen otaksutaan aiheuttavan nopeasti kehittyviä pysyviä muodonmuutoksia
- **Akselimassan suhteen normalisoidut keskiarvoiset muodonmuutokset**
 - MPL 1:n ja MPL 2:n väliset pienet erot deviatorisissa muodonmuutoksissa johtuvat lähinnä erilaisesta päällystepaksuudesta ja tarkastelusyvyyden erosta.
 - Yksikköpyörät aiheuttavat keskimäärin noin 50% suuremman deviatorisen muodonmuutoksen kantavaan kerrokseen kuin paripyörärenkaat.
 - Alusrakenteen kannalta ei ole merkitystä sillä kuormittavatko rakennetta yksikkö- vai paripyörät
 - Staattisessa kuormitustarkastelussa peräkkäisten akseleitten yhteisvaikutus on havaittavissa vaikutusten summautumisena syvemmälle rakenteeseen mentäessä; vaikutukset ovat tällä tarkastelutavalla kuitenkin vähäiset.

Ekvivalenttikertoimet (92 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (92 tn 12-akselinen HCT)					
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla					
Asfalttipäällysteen paksuus 30 mm (MPL 1)					
	Akselimassa, tn	Avg. γ_{ps} %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1	7,9	0,096	1,7	1,7	1-akseli (YP)
Akseli 2	5,4	0,072	0,6	2,3	2-akseli (PP) & YP 1-akseli (YP)
Akseli 3	10,3	0,078	0,8		
Akseli 4	10,4	0,078	0,8		
Akseli 5	8,3	0,068	0,5	1,1	2-akseli (PP)
Akseli 6	8,3	0,068	0,5	0,8	3-akseli (PP)
Akseli 7	6,8	0,060	0,3		
Akseli 8	6,6	0,057	0,3		
Akseli 9	6,0	0,054	0,2	2,6	2-akseli (PP) & 1-akseli (YP)
Akseli 10	7,1	0,062	0,4		
Akseli 11	7,2	0,060	0,3		
Akseli 12	7,8	0,099	1,9	8,5	
			ESAL	8,5	

 7,9t

 5,4t

 10,3t

 10,4t

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (92 tn 12-akselinen HCT)					
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla					
Asfalttipäällysteen paksuus 40 mm (MPL 2)					
	Akselimassa, tn	Avg. γ_{ps} %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1	7,9	0,092	1,5	1,5	1-akseli (YP)
Akseli 2	5,4	0,074	0,7	2,3	2-akseli (PP) & YP 1-akseli (YP)
Akseli 3	10,3	0,076	0,8		
Akseli 4	10,4	0,077	0,8		
Akseli 5	8,3	0,065	0,4	0,9	2-akseli (PP)
Akseli 6	8,3	0,065	0,4	0,7	3-akseli (PP)
Akseli 7	6,8	0,057	0,3		
Akseli 8	6,6	0,056	0,3		
Akseli 9	6,0	0,051	0,2	2,5	2-akseli (PP) & 1-akseli (YP)
Akseli 10	7,1	0,059	0,3		
Akseli 11	7,2	0,060	0,3		
Akseli 12	7,8	0,098	1,9	7,9	
			ESAL	7,9	

 8,3t

 8,3t

 6,8t

 6,6t

 6,0t

Ekvivalenttikerroin 4. potenssin säännöllä (AASHTO-teoria) (92 tn 12-akselinen HCT)				
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla				
	Akselimassa, tn	ESAL Toikka & Virtala	ESAL Ehrola	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1	7,9	1,0	0,7	1-akseli (YP)
Akseli 2	5,4	1,4	1,7	2-akseli (PP) & YP 1-akseli (YP)
Akseli 3	10,3			
Akseli 4	10,4			
Akseli 5	8,3	0,8	0,9	2-akseli (PP)
Akseli 6	8,3	0,4	0,5	3-akseli (PP)
Akseli 7	6,8			
Akseli 8	6,6			
Akseli 9	6,0	0,7	0,9	2-akseli (PP) & 1-akseli (YP)
Akseli 10	7,1			
Akseli 11	7,2			
Akseli 12	7,8	4,3	4,8	
ESAL		4,3	4,8	
ESAL, keskiarvo		4,5		

 7,1t

 7,2t

 7,8t

Ekvivalenttikertoimet (75 tn, koekuormitusajoneuvo 2022)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (75 tn 9-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipäällysteen paksuus 30 mm (MPL 1)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1	6,5	0,086	1,2	1,2	1-akseli (YP)
Akseli 2	5,2	0,072	0,6	0,6	1-akseli (YP)
Akseli 3	11,9	0,086	1,2	2,4	2-akseli (PP)
Akseli 4	11,8	0,087	1,2		2-akseli (PP)
Akseli 5	8,5	0,071	0,6	1,2	2-akseli (PP)
Akseli 6	8,5	0,070	0,6		2-akseli (PP)
Akseli 7	7,6	0,063	0,4	1,1	3-akseli (PP)
Akseli 8	7,6	0,060	0,3		3-akseli (PP)
Akseli 9	7,5	0,062	0,4		3-akseli (PP)
			ESAL	6,5	

 6,5t

 5,2t

 11,9t

 11,8t

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (75 tn 9-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipäällysteen paksuus 40 mm (MPL 2)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1	6,5	0,085	1,1	1,1	1-akseli (YP)
Akseli 2	5,2	0,075	0,7	0,7	1-akseli (YP)
Akseli 3	11,9	0,088	1,3	2,5	2-akseli (PP)
Akseli 4	11,8	0,087	1,2		2-akseli (PP)
Akseli 5	8,5	0,066	0,5	0,9	2-akseli (PP)
Akseli 6	8,5	0,067	0,5		2-akseli (PP)
Akseli 7	7,6	0,062	0,4	1,1	3-akseli (PP)
Akseli 8	7,6	0,060	0,3		3-akseli (PP)
Akseli 9	7,5	0,063	0,4		3-akseli (PP)
			ESAL	6,4	

 8,5t

 8,5t

 7,6t

 7,6t

 7,5t

Ekvivalenttikerroin 4. potenssin säännöllä (AASHTO-teoria) (75 tn 9-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

	Akselimassa, tn	ESAL Toikka & Virtala	ESAL Ehrola	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1	6,5	0,4	0,3	1-akseli (YP)
Akseli 2	5,2	0,2	0,1	1-akseli (YP)
Akseli 3	11,9	3,4	3,9	2-akseli (PP)
Akseli 4	11,8			2-akseli (PP)
Akseli 5	8,5	0,9	1,0	2-akseli (PP)
Akseli 6	8,5			2-akseli (PP)
Akseli 7	7,6	0,8	1,0	3-akseli (PP)
Akseli 8	7,6			3-akseli (PP)
Akseli 9	7,5			3-akseli (PP)
	ESAL	5,7	6,4	
	ESAL, keskiarvo	6,0		

Ekvivalenttikertoimet (76 tn, mallinnus 2024)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (76 tn 9-akselinen)					
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla					
Asfalttipäällysteen paksuus 30 mm (MPL 1)					
	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	9	0,106	2,4	2,4	1-akseli (YP)
Akseli 2 (YP)	7,3	0,092	1,5	1,5	1-akseli (YP)
Akseli 3 (PP)	9	0,069	0,6	1,2	2-akseli (PP)
Akseli 4 (PP)	9	0,071	0,6		2-akseli (PP)
Akseli 5 (PP)	8,339	0,069	0,5	1,1	2-akseli (PP)
Akseli 6 (PP)	8,339	0,069	0,5		2-akseli (PP)
Akseli 7 (PP)	8,339	0,068	0,5	1,5	3-akseli (PP)
Akseli 8 (PP)	8,339	0,066	0,5		3-akseli (PP)
Akseli 9 (PP)	8,339	0,067	0,5		3-akseli (PP)
			ESAL	7,6	

 9,0t

 7,3t

 9,0t

 9,0t

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (76 tn 9-akselinen)					
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla					
Asfalttipäällysteen paksuus 40 mm (MPL 2)					
	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	9	0,105	2,3	2,3	1-akseli (YP)
Akseli 2 (YP)	7,3	0,095	1,6	1,6	1-akseli (YP)
Akseli 3 (PP)	9	0,071	0,6	1,2	2-akseli (PP)
Akseli 4 (PP)	9	0,070	0,6		2-akseli (PP)
Akseli 5 (PP)	8,339	0,067	0,5	0,9	2-akseli (PP)
Akseli 6 (PP)	8,339	0,066	0,5		2-akseli (PP)
Akseli 7 (PP)	8,339	0,068	0,5	1,5	3-akseli (PP)
Akseli 8 (PP)	8,339	0,066	0,5		3-akseli (PP)
Akseli 9 (PP)	8,339	0,067	0,5		3-akseli (PP)
			ESAL	7,5	

 8,3t

 8,3t

 8,3t

 8,3t

 8,3t

Ekvivalenttikerroin 4. potenssin säännöllä (AASTHO-teoria) (76 tn 9-akselinen)				
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla				
	Akselimassa, tn	ESAL Toikka & Virtala	ESAL Ehrola	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1	9,0	1,6	1,1	1-akseli (YP)
Akseli 2	7,3	0,7	0,5	1-akseli (YP)
Akseli 3	9,0	1,1	1,3	2-akseli (PP)
Akseli 4	9,0			2-akseli (PP)
Akseli 5	8,3	0,8	1,0	2-akseli (PP)
Akseli 6	8,3			2-akseli (PP)
Akseli 7	8,3	1,2	1,5	3-akseli (PP)
Akseli 8	8,3			3-akseli (PP)
Akseli 9	8,3			3-akseli (PP)
ESAL		5,4	5,4	
ESAL, keskiarvo		5,4		

Ekvivalenttikertoimet (84 tn, mallinnus 2024)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (84 tn 10-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipäällysteen paksuus 30 mm (MPL 1)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7,5	0,097	1,8	1,8	1-akseliteli (YP)
Akseli 2 (YP)	7,5	0,097	1,8	1,8	1-akseliteli (YP)
Akseli 3 (PP)	9,0	0,073	0,7		2-akseliteli (PP)
Akseli 4 (PP)	9,0	0,071	0,6	1,3	
Akseli 5 (YP)	9,0	0,108	2,6	2,6	1-akseliteli (YP)
Akseli 6 (PP)	8,8	0,072	0,6		2-akseliteli (PP)
Akseli 7 (PP)	8,8	0,071	0,6	1,2	
Akseli 8 (PP)	8,2	0,067	0,5		3-akseliteli (PP)
Akseli 9 (PP)	8,2	0,066	0,5		
Akseli 10 (PP)	8,2	0,067	0,5	1,4	
			ESAL	8,3	

 7,5t

 7,5t

 9,0t

 9,0t

 9,0t

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (84 tn 10-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

Asfalttipäällysteen paksuus 40 mm (MPL 2)

	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7,5	0,094	1,6	1,6	1-akseliteli (YP)
Akseli 2 (YP)	7,5	0,093	1,5	1,5	1-akseliteli (YP)
Akseli 3 (PP)	9,0	0,070	0,6		2-akseliteli (PP)
Akseli 4 (PP)	9,0	0,071	0,6	1,2	
Akseli 5 (YP)	9,0	0,105	2,3	2,3	1-akseliteli (YP)
Akseli 6 (PP)	8,8	0,068	0,5		2-akseliteli (PP)
Akseli 7 (PP)	8,8	0,068	0,5	1,1	
Akseli 8 (PP)	8,2	0,065	0,4		3-akseliteli (PP)
Akseli 9 (PP)	8,2	0,066	0,5		
Akseli 10 (PP)	8,2	0,066	0,5	1,4	
			ESAL	7,4	

 8,8t

 8,8t

Ekvivalenttikerroin 4. potenssin säännöllä (AASTHO-teoria) (84 tn 10-akselinen)

Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla

	Akselimassa, tn	ESAL Toikka & Virtala	ESAL Ehrola	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	7,5	0,8	0,6	1-akseliteli (YP)
Akseli 2 (YP)	7,5	0,8	0,6	1-akseliteli (YP)
Akseli 3 (PP)	9,0			2-akseliteli (PP)
Akseli 4 (PP)	9,0	1,1	1,3	
Akseli 5 (YP)	9,0	1,6	1,1	1-akseliteli (YP)
Akseli 6 (PP)	8,8			2-akseliteli (PP)
Akseli 7 (PP)	8,8	1,0	1,2	
Akseli 8 (PP)	8,2			3-akseliteli (PP)
Akseli 9 (PP)	8,2			
Akseli 10 (PP)	8,2	1,1	1,3	
	ESAL	6,3	6,1	
	ESAL, keskiarvo	6,2		

 8,2t

 8,2t

 8,2t

Ekvivalenttikertoimet (100 tn, mallinnus 2024)

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (100 tn 12-akselinen; 900/600 kPa)					
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla					
Asfalttipäällysteen paksuus 30 mm (MPL 1)					
	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	8	0,104	2,2	2,2	1-akseliteli (YP)
Akseli 2 (YP)	10	0,118	3,5		2-akseliteli (YP)
Akseli 3 (YP)	10	0,117	3,4	6,9	
Akseli 4 (PP)	7,25	0,063	0,4		4-akseliteli (PP, PP, PP, YP)
Akseli 5 (PP)	7,25	0,060	0,3		
Akseli 6 (PP)	7,75	0,063	0,4	1,1	
Akseli 7 (YP)	7,75	0,099	1,9	1,9	
Akseli 8 (PP)	9	0,075	0,7		2-akseliteli (PP)
Akseli 9 (PP)	9	0,076	0,7	1,5	
Akseli 10 (PP)	8	0,067	0,5		3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 11 (PP)	8	0,065	0,4		
Akseli 12 (YP) (900 kPa)	8	0,092	1,5	2,4	
			ESAL (900 kPa)	16,1	
			ESAL (600 kPa)	15,7	*) Jos 600 kpa, niin E=
					1,04

 8,0t

 10,0t

 10,0t

Ekvivalenttikerroin keskimääräisen deviatorisen muodonmuutostason perusteella (100 tn 12-akselinen; 900/600 kPa)					
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla					
Asfalttipäällysteen paksuus 40 mm (MPL 2)					
	Akselimassa, tn	Avg. yps %	ESAL, akseli	ESAL, teli	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	8	0,100	2,0	2,0	1-akseliteli (YP)
Akseli 2 (YP)	10	0,113	3,0		2-akseliteli (YP)
Akseli 3 (YP)	10	0,112	2,9	6,0	
Akseli 4 (PP)	7,25	0,061	0,3		4-akseliteli (PP, PP, PP, YP)
Akseli 5 (PP)	7,25	0,060	0,3		
Akseli 6 (PP)	7,75	0,064	0,4	1,1	
Akseli 7 (YP)	7,75	0,097	1,8	1,8	
Akseli 8 (PP)	9	0,071	0,6		2-akseliteli (PP)
Akseli 9 (PP)	9	0,071	0,6	1,2	
Akseli 10 (PP)	8	0,066	0,5		3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 11 (PP)	8	0,066	0,5		
Akseli 12 (YP) (900 kPa)	8	0,092	1,5	2,4	
			ESAL (900 kPa)	14,4	
			ESAL (600 kPa)	14,0	*) Jos 600 kpa, niin E=
					1,04

 7,3t

 7,3t

 7,7t

 7,7t

 9,0t

 9,0t

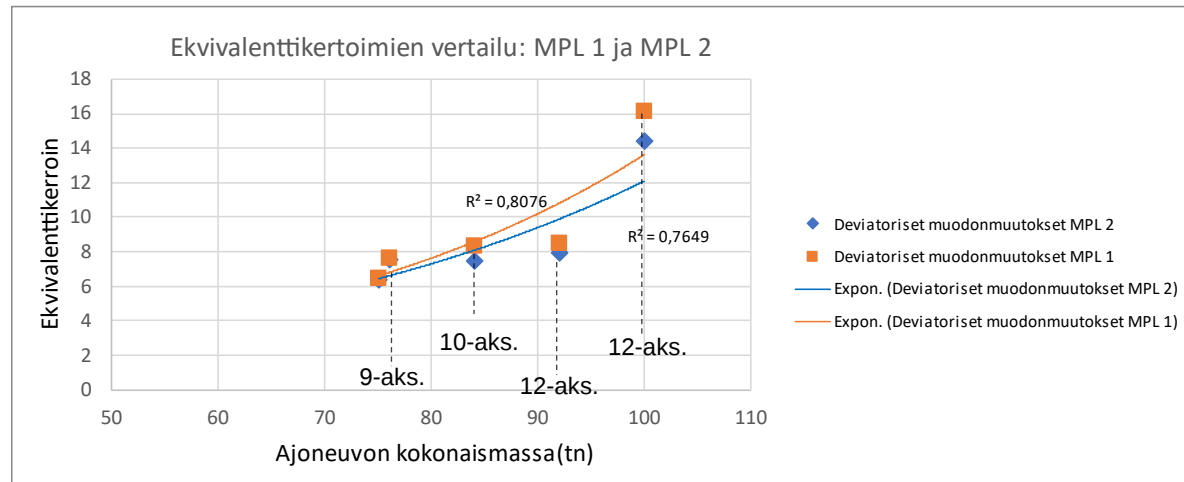
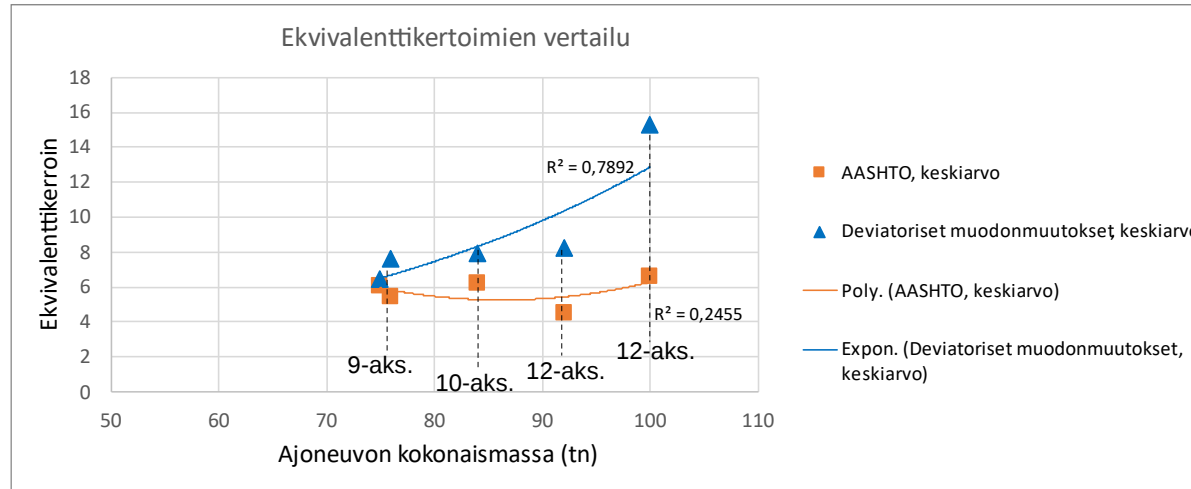
Ekvivalenttikerroin 4. potenssin säännöllä (AASHTO-teoria) (100 tn 12-akselinen)				
Ekvivalenttikerroin laskettu kokonaismassalla				
	Akselimassa, tn	ESAL Toikka & Virtala	ESAL Ehrola	Teli- ja rengaskonfiguraatio
Akseli 1 (YP)	8,0	1,0	0,9	1-akseliteli (YP)
Akseli 2 (YP)	10,0			2-akseliteli (YP)
Akseli 3 (YP)	10,0	1,7	2,0	
Akseli 4 (PP)	7,3			4-akseliteli (PP, PP, PP, YP)
Akseli 5 (PP)	7,3			
Akseli 6 (PP)	7,8	0,7	1,3	
Akseli 7 (YP)	7,8	0,9		
Akseli 8 (PP)	9,0			2-akseliteli (PP)
Akseli 9 (PP)	9,0	1,1	1,3	
Akseli 10 (PP)	8,0			3-akseliteli (PP, PP, YP)
Akseli 11 (PP)	8,0			
Akseli 12 (YP)	8,0	1,0	1,2	
	ESAL	6,4	6,7	
	ESAL, keskiarvo	6,6		

 8,0t

 8,0t

 8,0t

Ekvivalenttikertoimien vertailua



Yhteenvedo ekvivalenttikerrointarkasteluista (diat 39-44)

- **Ekvivalenttikertoimet laskettiin AASHTO-teoriaan pohjautuvilla kaavoilla sekä keskimääräisillä deviatorisilla leikkausmuodonmuutoksilla**
 - Tuloksia arvioitaessa on syytä huomata, että eri lähestymistavoilla tarkastellaan erilaisia tierakenteen vaurioitumismekanismeja.
 - Tästä johtuen oli ennakoitavissa, että lasketut kuormituksen ekvivalenttikertoimet poikkeavat toisistaan.
- **Deviatorisilla leikkausmuodonmuutoksilla lasketut kuormituksen ekvivalenttikertoimet olivat suurempia kuin AASTHO-teorialla lasketut**
 - Ajoneuvokohtainen ekvivalenttikerroin kasvoi ajoneuvon kokonaismassan mukana.
 - Deviatorisiin leikkausmuodonmuutoksiin perustuva tarkastelutapa tunnistaa yksikköpyöräakseleitten suuremman kuormitusvaikutuksen huomattavasti AASHTO-teoriaa herkemmin.
 - MPL 1:ssä ekvivalenttikertoimet olivat lievästi suurempia kuin MPL 2:ssa suuremmista deviatorisista leikkausmuodonmuutoksista johtuen.
- **Jos kuormitusvastaavuuskertoimet olisi laskettu enemmän kantavan kerroksen yläosan leikkausmuodonmuutostilaa painottaen, ekvivalenttikertoimien arvot olisivat olleet merkittävästi suurempia**

Mahdollisia jatkotutkimusnäkökulmia

- **Asfalttipäällysteen paksuuden muuttaminen**
 - Kuinka päällysteen paksuntaminen pienentää kantavan kerroksen deformaatoriskiä, tai kuinka päällystepaksuuden lisäyksellä voidaan kompensoida heikkolaatuista kantavaa kerrosta?
- **Päällysrakennekerrosten ominaisuuksien muuttaminen**
 - Laadultaan heikompien päällysrakennekerrosten mallintaminen ja vuodenaikaisvaihteluiden huomioiminen tierakenteen lujuus- ja muodonmuutospaarametreissa; rakennemalli oli nyt kalibroitu alkukesällä tehtyjen koekuormitusten tuloksia vastaavaksi
 - Ohuemman päällysrakenteen mallintaminen heikosti kantavalla pohjamaalla
- **Erilaisten akselistoyhdistelmien ja rengastyypin laajemmat mallinnukset**
 - Telimassan erilaiset jakautumat paripyörä- ja yksittäispyöräakseleille
 - Akselivälien variointi
 - Erilaiset rengaspaineet erilaisten rengastyypin mukaan jne.
- **Liikkuvan ajoneuvokuormituksen vaikutusta kuvaavien dynaamisten mallien sekä märän turvopohjaan käyttäytymistä todenmukaisemmin kuvaavien materiaalimalien kehittäminen/hyödyntäminen**

Yhteenveto kaikista tarkasteluista

- Yksikköpyörät aiheuttivat kantavaan kerrokseen noin 50% suuremman rasituksen kuin paripyörärenkaat, kun tarkasteltavana vasteena käytettiin kantavan kerroksen keskimääräistä deviatorista muodonmuutosta maantien 697 mittauspoikkileikkausten olosuhteissa; alusrakenteen muodonmuutosten kannalta rengastuksella ei ollut merkittävää vaikutusta
- Rengaspaineen alentamisella (*ja käyttämällä leveää single-rengasta*) voidaan pienentää päällysteeseen ja kantavaan kerrokseen mobilisoituvia vasteita
 - Asfaltin alapinnan venymät pienenivät jopa 40% 100 tn HCT-rekan 12. akselilla, kun rengaspaine aleni 900 → 600 kPa:iin.
 - Kantavan kerroksen deviatorisilla muodonmuutoksilla laskettu ekvivalenttikerroin pieneni noin 45 % 100 tn HCT-rekan 12. akselilla, kun rengaspaine aleni 900 → 600 kPa:iin
- AASHTO-teorialla sekä deviatorisilla muodonmuutoksilla lasketut ekvivalenttikertoimet poikkesivat merkittävästi toisistaan
 - Akselistojen ekvivalenttikertoimet summattiin molemmissa tapauksissa yhteen (superpositioperiaate), jolloin saatiin ajoneuvon kokonaiskuormittavuus tarkastelupisteen kohdalla
 - Deviatoristen muodonmuutosten perusteella lasketut ekvivalenttikertoimet kasvavat ajoneuvon kokonaismassan suhteen
 - **Suurin merkitys on sillä, onko akselilla yksikkö- vai paripyörät sekä akselimassalla**
 - Teliakseleitten yhteisvaikutus jää vastaavasti vähäiseksi, koska kyseessä on staattinen laskentamalli
 - AASHTO-laskentatavalla ajoneuvon kuormitusvaikutus pienenee, kun ajoneuvossa on paljon telejä
 - AASHTO-laskentatapa on kehitetty paksummille päällysteille; ohuemmilla päällysteillä kantavan kerroksen deformaatio on merkitsevämmässä asemassa oleva vaurioitumismekanismi
 - Molemmilla laskentatavoilla 100 tn 12-akselinen ajoneuvo, jolla oli viisi yksikköpyöräakselia, sai suurimmat ekvivalenttikertoimet
- FEM-mallinnetut vasteet eivät täysin vastanneet turvepohjamaan käyttäytymistä realistisesti
 - Turvepoikkileikkauksessa mallinnetut vasteet poikkesivat jossain määrin ennako-odotuksesta: vasteet olivat MPL 1:ssä pienempiä/yhtä suuria kuin MPL 2:ssa.
 - Syynä voivat olla laskentamallin rajoitukset mm. turpeen aikariippuvaisessa käyttäytymisessä, huokosveden ylipaineen kertymisessä sekä pumppautumisilmiössä, joita ei voida mallintaa staattisella mallilla ja/tai valituilla materiaalimalleilla
 - Ajoneuvon huojuntaa, tien geometriaa tai muita dynaamisia vaikutuksia ei myöskään voida mallintaa staattisella mallilla
- Ajoneuvoyhdistelmästä riippumatta paripyörät ja massan tasainen jakautuminen akseleille ovat tavoiteltavia ominaisuuksia tierakenteen kestävyysnäkökulmasta

Lähteet

1. Isometsä, J. (2024) Raskaan liikenteen kuormitusvasteiden mallintaminen. Diplomityö, Tampereen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta. Saatavissa:
<https://trepo.tuni.fi/handle/10024/155139>
2. Vuorimies, N., Varin, P. & Kolisoja, P. (2023) Ohutpäällysteisen tierakenteen rasittumisen vertailututkimus 2022 - Kuormituskokeet 92- ja 75-tonnisilla ajoneuvoyhdistelmillä. Väyläviraston julkaisuja 59/2023. Saatavissa:
https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/187847/vj_2023-59_978-952-405-102-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y

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