

VILLE HAAKANA
ANTTI KALLIAINEN
PAULI KOLISOJA

Raskaista ajoneuvoista tierumpuihin kohdistuvat rasitukset



Ville Haakana, Antti Kalliainen, Pauli Kolisoja

Raskaista ajoneuvoista tierumpuihin kohdistuvat rasitukset

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2015

Liikennevirasto

Helsinki 2015

Kannen kuva: Ville Haakana

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-078-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Ville Haakana, Antti Kalliainen ja Pauli Kolisoja: Raskaista ajoneuvoista tierumpuihin kohdistuvat rasitukset. Liikennevirasto, infra ja ympäristö -osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2015. 72 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-078-0.

Avainsanat: uusi ajoneuvoasetus, teräsrumpu, muovirumpu, peitesyvyys, kuormituskäyttäytyminen

Tiivistelmä

Uusi raskaiden ajoneuvojen mittoja ja massoja säätelevä ajoneuvoasetus astui voimaan 1.10.2013. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää ajoneuvoasetuksessa säädettyjen akseli- ja telipainomuutosten vaikutuksia muovista ja teräksestä valmistettujen tierumpujen kohtaamiin rasituksiin. Tutkimus jakautui koekohteilla tehtäviin mittauksiin ja rumpun sekä sitä ympäröivän maan mekaanisen käyttäytymisen arviointiin elementtimenetelmään perustuvan mallinnusohjelmiston avulla.

Tutkimukseen pyrittiin valikoimaan halkaisijaltaan keskisuuria ja suuria (600–2000 mm) matalaan, noin 500 mm peitesyvyyteen asennettuja muovi- ja teräsrumpuja. Tehdyn kartoituksen perusteella todettiin, että varsinkaan suuria muovirumpuja ei ole yleensä asennettu näin mataliin peitesyvyyskohtiin. Lopullisiksi koekohteiksi valikoituneet muovirummut olivat halkaisijaltaan 600 - 800 mm peitesyvyyden ollessa 200 - 800 mm. Teräsrumppujen osalta vastaavasti tutkittujen rumppujen halkaisijat vaihtelivat välillä 800 - 1800 mm peitesyvyyden vaihdellessa 500 ja 900 mm välillä.

Koekohteilla mitattiin raskaan ajoneuvon ylityksen aiheuttamia rumpun pysty- ja vaaka-halkaisijan muutoksia sekä rumpun laen venymää kolmesta poikkileikkauksesta. Kuormituksissa käytettiin kuusiakselista ajoneuvoa, jonka paivamman kaksiakselisen telin kokonaisuudessa oli 21 tonnia ja kevyemmän 18 tonnia. Lisäksi perävaunun yksittäisakselin massa oli 10 tonnia ja vetoauton ohjausakselin massa noin 7,5 tonnia. Mittaustulosten perusteella rumpun peitesyvyyden vaikutus rumpun kuormituskäyttäytymiseen havaittiin merkittäväksi. Pelkkien mitausten avulla ei kuitenkaan saatu täyttä varmuutta peitesyvyyden vaikutuksesta, koska tien rakennekerrosten ja pohjamaan ominaisuudet vaihtelivat jonkin verran koekohteittain.

Koekohteista tehtyjen rakennemallien avulla voitiin verifioida käytetty mallinnustapa ja todeta mallintamisen olevan tehokas työkalu erilaisten olosuhteiden vaikutusten arvioimiseksi. Mallintamalla verrattiin myös ajoneuvon ylityksen aikaisia kuormitustilanteita ja todettiin, että rumpun kannalta haitallisin kuormitustilanne syntyy hetkellä, jolloin toinen kaksiakselisen telin akseleista on tismalleen rumpun laen kohdalla. Mallin avulla tehtiin koekohteita laajempaa analyysia herkkyytarkastelujen muodossa. Näissä simuloitavina tekijöinä olivat rumpumateriaali, rumpun halkaisija ja peitesyvyys sekä tien rakennekerrosten ja pohjamaan ominaisuudet. Lisäksi simuloitiin eri rengastusten ja dynaamisen kuormituksen aiheuttaman sysäysliikkeen vaikutuksia rumpun ja sitä ympäröivän maan rasituksiin.

Koekohteilla havaittiin muovista valmistetun rumpun olevan kriittisempi rasitusten siedon kannalta ja mallinnustulokset tukivat huomioita, joten herkkyytarkasteluissa painotettiin muovisia rumpuja. Tehtyjen herkkyytarkastelujen perusteella etenkin erittäin heikoissa pohjamaaolosuhteissa rumpun rasitukset kasvavat ja myös muiden tekijöiden vaikutus rumpun kohtaamiin rasituksiin korostuu. Paremminkin kantava pohjamaa näyttää jossain määrin kompensoivan ominaisuuksiltaan mahdollisesti puutteellisia tien rakennekerroksia. Nykyinen muovirumpua koskeva ohjeistus, jonka mukaan rumpun peitesyvyyden tulisi olla vähintään rumpun halkaisijan suuruinen, näyttää saatujen tulosten valossa olevan perusteltu. Pienempihalkaisijaisen muovirummun asentamista alla 500 mm peitesyvyyteen tulisi kuitenkin pyrkiä välttämään. Lisäksi varsinkin heikosti kantavissa pohjamaaolosuhteissa tulee kiinnittää erityistä huomiota riittävien ympärystäytö- ja siirtymäkiilarakenteiden tekemisen.

Ville Haakana, Antti Kalliainen och Pauli Kolisoja: Påkänningar av tunga fordon på kulvertar. Trafikverket, infrastruktur och miljö avdelningen. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 18/2015. 72 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-078-0.

Sammanfattning

Den nya fordonsförordningen som reglerar tunga fordonens mått och vikter trädde i kraft 1.10.2013. Syftet med denna undersökning var att utreda effekterna av de ändrade axel- och boggilaster som har fastställts i fordonsförordningen för påkänningar på kulvertar tillverkade av plast och stål. Undersökningen indelades i mätningar på testpunkter och bedömning av kulvertens och den omgivande markens mekaniska beteende, med hjälp av ett modelleringsprogram baserat på elementmetoden.

För undersökningen försökte man välja plast- och stålkulvertar med medelstora och stora diametrar (600–2000 mm), installerade på lågt, ca 500 mm täckdjup. Utgående från den gjorda kartläggningen konstaterades att i synnerhet stora plastkulvertar vanligtvis inte har installerats på så låga täckdjup. De plastkulvertar som slutligen valdes som testpunkter hade en diameter på 600–800 mm och ett täckdjup på 200–800 mm. Vad gäller stålkulvertarna varierade de undersökta kulvertarnas diametrar mellan 800 och 1800 mm och täckdjupet mellan 500 och 900 mm.

På testpunkterna mättes förändringarna i kulvertens vertikala och horisontala diameter orsakade av tunga fordon samt töjningen av kulvertens topp i tre tvärsnitt. Vid belastningen användes ett sexaxligt fordon, vars tyngre tvåaxliga boggi hade en totalvikt på 21 ton och den lättare en totalvikt på 18 ton. Dessutom hade släpvagnens enkla axel en vikt på 10 ton och dragfordonets styraxel en vikt på ca 7,5 ton. Utgående från mätresultaten konstaterades att kulvertens täckdjup hade en betydande inverkan på dess belastningsbeteende. Enbart mätningarna kunde ändå inte ge en absolut säkerhet i fråga om täckdjupets inverkan, eftersom vägens konstruktionsskikt och undergrundens egenskaper varierade något mellan testpunkterna.

Med hjälp av konstruktionsmodellerna från testpunkterna var det möjligt att verifiera det använda modellerings sättet och konstatera att modelleringen är ett effektivt verktyg för att bedöma effekterna av olika förhållanden. Genom modellering jämfördes även belastningssituationer då fordonet passerade och därvid konstaterades att den skadligaste situationen för kulverten är då den andra axeln av en tvåaxlig boggi är precis på kulvertens topp. Med modellen gjordes en bredare analys än testpunkterna i form av känslighetsanalyser. Simulerade faktorer i dessa var kulvertens material, diameter och täckdjup samt egenskaperna hos vägens konstruktionsskikt och undergrunden. Dessutom simulerades effekterna av hur olika däck och en dynamisk belastning ökade påkänningarna som kulverten och den omgivande marken utsattes för.

På testpunkterna märktes att en plastkulvert är mer kritisk i fråga om motstånd mot påkänningar och modelleringsresultaten stödde detta, så tyngdpunkten lades på kulvertar av plast i känslighetsanalyserna. Enligt känslighetsanalyser gjorda framför allt i mycket ogynnsamma undergrundförhållanden ökar påkänningarna på kulverten och även andra faktorer inverkar mer på de påkänningar som kulverten utsätts för. En undergrund med bättre bärförmåga förefaller att i en viss mån kompensera eventuellt bristfälliga konstruktionsskikt i en väg. De nuvarande bestämmelserna om plastkulvertar, enligt vilka kulvertens täckdjup borde vara minst lika stort som kulvertens diameter, förefaller i ljuset av resultaten vara motiverade. Installation av en plastkulvert med liten diameter på ett täckdjup under 500 mm borde emellertid om möjligt undvikas. I synnerhet i förhållanden där undergrunden har en svag bärförmåga är det speciellt viktigt att garantera en tillräcklig fyllning omkring samt utjämningskikt.

Ville Haakana, Antti Kalliainen and Pauli Kolisoja: Deformation behavior of steel and plastic culverts under heavy truck loads. Finnish Transport Agency, Infrastructure and Environment. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 18/2015. 72 pages and 1 appendix. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-078-0.

Summary

A new legislation concerning allowable truck masses came into force in Finland on October 1st 2013. The most important changes in comparison to the previous legislation included the increase in allowable maximum truck mass from 600 to 760 kN, the increase in maximum allowable tandem axle load from 190 to 210 kN, and the increase in maximum allowable load on a triple bogie from 240 to 270 kN. The purpose of this study was to evaluate the effects the new legislation has on the stresses of plastic and steel culverts. The study was divided into two phases of which the first phase consisted of response measurements at eight test sites. The second phase of this study was to analyze loading behavior of culverts with Finite Element-based mechanical model.

The test sites had two main selection criteria, firstly the culvert was supposed have a diameter from 600 to 2000 mm, and secondly the embedding depth of the culvert should be relatively low, approximately 500 mm at maximum. On the basis of the charting made it was observed that particularly the plastic culverts having large diameter have not been installed in such low embedding depths at the attainable road network. At the chosen test sites the diameter of steel culverts varied between 800 and 1800 mm while the embedding depth varied from 500 to 900 mm. Respectively, the plastic culverts were 600 to 800 mm in diameter having embedding depths from 200 to 800 mm.

The measurement setup at the test sites consisted of three instrumented cross sections inside the culvert. On each of them diameter changes were measured at both perpendicular and horizontal direction. In addition, the strains at the top of the culvert were measured. The measurements were performed during passages of the loading vehicle. The loading vehicle used to produce the desired truck loads consisted of a three-axle truck and a three-axle trailer. The loads the axles exposed to the road surface were approximately 75 kN at the front axle of the truck, 210 kN at the two-axle bogie of the truck, 100 kN at the front axle of the trailer and 180 kN at the two-axle bogie of the trailer. The achieved results indicated that embedding depth had a marked effect on the deformation behavior of the culvert. However, unambiguous critical embedding depth was not obtainable based on mere measurements due to variation in materials and thicknesses of road structural layers and subgrade properties between the test sites.

Mechanical models having the properties at each individual test sites were developed and the obtained results verified the approach used in this study. The results also indicated that the created approach is an efficient tool in evaluating the effects of varying subgrade and road structure conditions on the behavior of the culvert. In the last phase of the study a sensitivity analysis was performed using the created mechanical model. In sensitivity analysis material, diameter and embedding depth of the culvert, subgrade conditions, properties of road structural layer materials and different loading elements, i.e. dual and single wheel configurations and dynamic load factor, were varied.

The sensitivity analysis indicated that plastic culverts were more susceptible to greater stresses at similar conditions. Therefore the detailed sensitivity analysis was performed for plastic culverts. The achieved results indicated that at extremely weak subgrade conditions the deformations of the culvert pipe as well as in the surrounding soil increase notably. At extremely weak subgrade conditions inadequate road structural layers or material properties also increase the risk of permanent deformation of culvert and road structure while a more bearing subgrade can compensate the deficiencies of the road structure and thus resist excessive permanent deformations. Based on the achieved results the embedding depth of plastic culvert should at least equivalent to the diameter but 500 mm in minimum.

Esipuhe

Raskaiden ajoneuvojen mittoja ja massoja korottaneella ajoneuvoasetuksella on vaikutuksia tierakenteisiin ja siltoihin kohdistuviin rasituksiin. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää akseli- ja telipainomuutosten vaikutuksia muovisiin ja teräksisiin tierumpuihin. Tutkimus käsitti sekä koekohteilla tehdyt rumpujen venymä- ja muodonmuutosmittaukset että koekohteiden mallintamisen elementtimenetelmään perustuvaa PLAXIS 3D-ohjelmistoa käyttäen.

Tutkimuksesta ovat vastanneet tekn.yo Ville Haakana, DI Antti Kalliainen ja professori Pauli Kolisoja Tampereen teknillisestä yliopistosta. Ohjausryhmään ovat kuuluneet lisäksi Kari Lehtonen ja Sami Petäjä Liikennevirastosta.

Helsingissä maaliskuussa 2015

Liikennevirasto
Infra ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	MITTAUSKOHTEET	10
2.1	Mittauskohteiden valintaperiaatteet	10
2.2	Mittauskohteiden esittely	10
2.2.1	Teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm	11
2.2.2	Teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm	12
2.2.3	Teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm	13
2.2.4	Teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm	14
2.2.5	Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm	14
2.2.6	Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm	15
2.2.7	Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm	15
2.2.8	Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm	16
2.3	Koekohteiden rakenne- ja materiaalmääritykset	17
3	KUORMITUSKOKEIDEN TOTEUTUSTAPA	20
3.1	Mittaussuureet ja instrumentointi	20
3.1.1	Halkaisijan muutosten mittaaminen	20
3.1.2	Venymien mittaaminen	21
3.1.3	Ajoneuvon ajolinjan mittaaminen	22
3.2	Rumpujen kuormittaminen	23
3.2.1	Kuormitusajoneuvo	23
3.2.2	Kuormitusten toteutus	24
4	MITTAUSTULOKSET	25
4.1	Yleistä mittaustuloksista	25
4.2	Tyypilliset signaalit	26
4.2.1	Teräsrummut	26
4.2.2	Muovirummut	28
4.3	Mittaustulosten käsittely	29
4.4	Mittaustulokset teräksillä rumpuputkilla	35
4.4.1	Teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm	35
4.4.2	Teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm	36
4.4.3	Teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm	37
4.4.4	Teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm	39
4.5	Mittaustulokset muovisilla rumpuputkilla	40
4.5.1	Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm	40
4.5.2	Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm	41
4.5.3	Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm	42
4.5.4	Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm	43
4.6	Yhteenveto mittaustuloksista	44
4.6.1	Teräsrummut	44
4.6.2	Muovirummut	45
5	MITTAUSKOHTEIDEN MALLINTAMINEN	47
5.1	Mallinnusohjelmisto ja mallinnuksen periaate	47
5.1.1	Mallin perusrakenne	47
5.1.2	Rakenteiden mallintamisessa käytetyt materiaaliparametrit	49

5.2	Koekohteiden mallinnustulokset	51
5.2.1	Koekohteiden mittaustulosten ja mallinnetun rummun käyttäytymisen vertailu	51
5.2.2	Maan käyttäytyminen rummun ympärillä	53
5.3	Herkkyystarkastelut	59
6	PÄÄTELMÄT	70
6.1	Peitesyvyyden vaikutus	70
6.2	Pohjamaan vaikutus	70
6.3	Rumpumateriaalin vaikutus	71
6.4	Tutkimustulosten vaikutukset käytännön tilanteissa	71
	LÄHTEET	72

LIITTEET

Liite 1	Rumpukohteiden mitattujen ja mallinnettujen halkaisijamuutosten vertailu
---------	---

1 Johdanto

Uusi raskaiden ajoneuvojen massoja ja mittoja säätelevä ajoneuvoasetus astui voimaan 1.10.2013 alkaen. Asetuksen myötä raskaiden rekkojen sallitut kokonaismassat kasvoivat. Aikaisempaa raskaammista ajoneuvoista tiestölle aiheutuvien kuormitusvaikutusten rajoittamiseksi suurimpien kokonaismassojen käytön edellytyksenä on kuitenkin, että pääosa raskaan ajoneuvon massasta välitetään tien pintaan paripyörien välityksellä. Erilaisten rengastusvaihtoehtojen tierakenteelle aiheuttamia rasituksia on sittemmin myös vertailtu sekä paksupäällysteisen päätien että kevyemmin rakennetun ohutpäällysteisen tien olosuhteissa tehdyillä kenttämittauksilla ja näitä tukevilla mallinnustarkasteluilla.

Yksi raskaiden ajoneuvojen kuormitusvaikutukseen liittyvä erityiskysymys on tierumpuihin kohdistuvat rasitukset. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää muovista ja teräksestä valmistettuihin tierumpuihin kohdistuvia rasituksia kokeellisesti kaikkiaan kahdeksalla eri mittauskohteella. Lisäksi tutkimuksen yhteydessä mallinnetaan mittauskohteiden mekaanista käyttäytymistä elementtimenetelmään perustuvaa PLAXIS 3D -ohjelmistoa käyttäen.

Rumpumateriaalin lisäksi keskeisimmät muuttujat, joihin mittauskohteiden valinnassa tutkimustoimeksiannon mukaisesti sovittiin kiinnitettävän huomiota, ovat rumpun halkaisija ja sen asennussyvyys. Lisäksi osan mittauskohteista haluttiin sijoittuvan soratieverkolle ja osan päällystetyille teille. Tämän tutkimusraportin luvussa 2 on tarkempi esittely sekä mittauskohteiden valintaperiaatteista että mittauskohteiksi valikoituneiden rumpukohteiden ominaisuuksista.

Luvussa 3 esitellään mittauskohteilla tehtyjen kuormituskokeiden toteutustapa sekä tierumpuihin tehtyjen mittausinstrumentointien että kuormitusajoneuvona käytetyn täysperävaunullisen rekan osalta. Vetoauton etuakselia lukuun ottamatta kuormitusajoneuvo sovittiin varustettavaksi paripyörärengastuksella, jotta erilaisten rengastustyyppien jossain määrin toisistaan poikkeavat kuormitusvaikutukset eivät tarpeettomasti häiritse mittauksien tulosten tulkintaa.

Varsinaiset mittauksien tulokset esitellään luvussa 4 ja niiden laskennallinen mallinnus luvussa 5. Mallinnusosiossa mittauskohteiden olosuhteita pyritään yhtäältä kuvaamaan mahdollisimman todenmukaisina kohteilla tehtyjen rakennetutkimusten tuloksiin tukeutuen. Toisaalta mallinnuksen avulla tehdään myös herkkystarkastelua, joissa keskeisten muuttujien vaikutuksia pyritään arvioimaan mittauskohteiden kattamaa tierumpujen asennusolosuhteiden vaihtelualuetta laajemmissa rajoissa.

Tutkimuksen keskeisimmät tulokset esitetään tiivistetysti luvussa 6, jossa tehdään yhteenveto eri muuttujien vaikutuksesta tierumpuihin aiheutuviin rasituksiin. Lisäksi luvussa 6 arvioidaan tutkimuksen yhteydessä tehtyjen havaintojen käytännöllisiä vaikutuksia tierumpujen asentamista koskevan ohjeistuksen näkökulmasta.

2 Mittauskohteet

2.1 Mittauskohteiden valintaperiaatteet

Soveltuvien rumpukohteiden kartoittaminen aloitettiin etsimällä tutkimukseen soveltuvia tierumpuja tierekisteristä. Koekohteille asetettiin ensimmäisessä vaiheessa seuraavat vaatimukset:

- mitattaviin kohteisiin sisältyy sekä muovi- että teräsrumpuja
- rummun halkaisija vaihtelee välillä 600–2000 mm
- rummun peitesyvyys on noin 500 mm suurimmassa osassa mittauskohteita. Lisäksi mitataan kaksi rumpua, jotka on asennettu selkeästi syvemmälle
- rummut sijaitsevat kuormitusajoneuvosta aiheutuvien kustannusten kurissapitämisen kannalta järkeväksi arvioidulla etäisyydellä toisistaan
- valittavien koekohteiden joukossa on sekä päällystettyjä että päällystämättömiä teitä

Tierekisterin käyttö osoittautui varsin työlääksi, sillä rekisteristä pystyy hakemaan rumpuja ainoastaan tienumerokohtaisesti tulostamalla rumpuluettelon yhdeltä tieltä kerrallaan. Tiererekisterin rumpuluetteloista ei myöskään ole saatavissa tietoa rumpujen peitesyvyyksistä. Sopivien koekohteiden löytämiseksi haastateltiin myös Pirkanmaan ELY-keskuksen aluevastaavia sekä useamman suunnittelutoimiston edustajia. Käytettävissä olevien tietojen perusteella potentiaalisia rumpukohteita rajattiin käyttämällä verkossa olevia karttapalveluita. Tämän kartoituksen jälkeen potentiaalisiksi arvioituihin kohteisiin käytiin tutustumassa paikan päällä. Maastokäyntien yhteydessä jouduttiin rajaamaan osa potentiaalisista kohteista pois liian suuren veden virtaaman takia, koska mittausantureiden asentaminen ja mittausten onnistumisen varmistamiseksi rumpuja olisi pitänyt padota. Toisena merkittävänä haasteena oli löytää koekohteita, joissa rumpu on asennettu riittävän matalaan peitesyvyyteen.

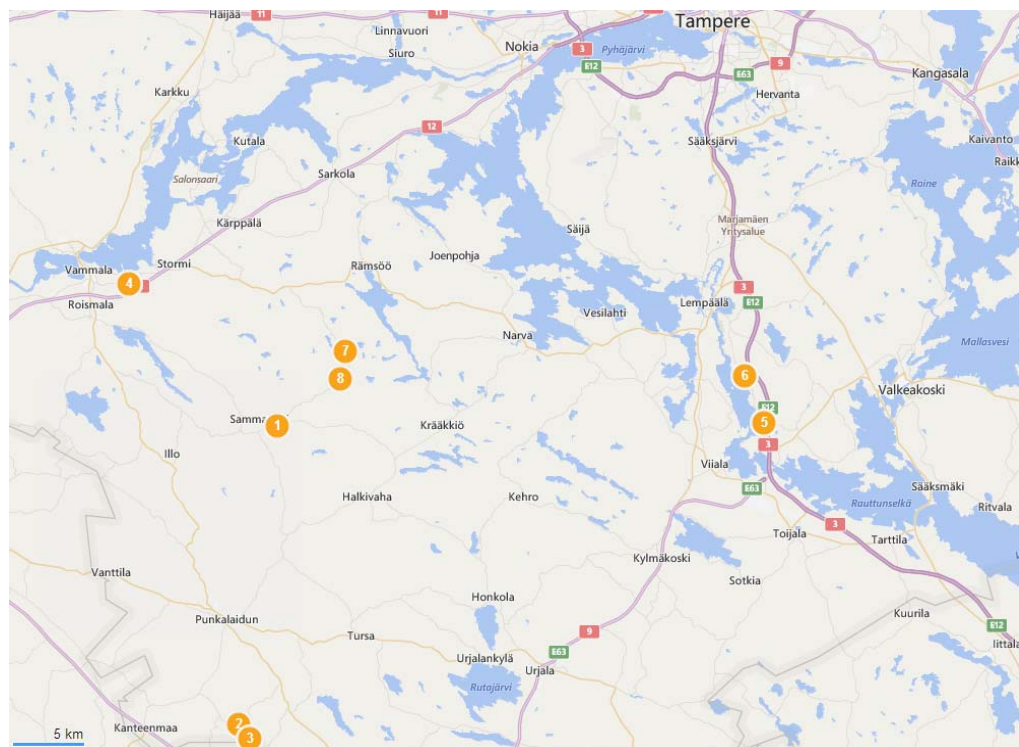
Koekohteiden etsinnässä kohdattujen haasteiden perusteella päädyttiin lieventämään alkuperäisiä kriteereitä jonkin verran peitesyvyyden ($z \leq 1000$ mm) sekä muovirumpujen osalta rummun halkaisijoiden suhteen, sillä kaikki halkaisijaltaan yli 1000 mm olevat, kartoitetut muovirummut oli asennettu yli 1500 mm syvyyteen. Myöskään päällystetyiltä teiltä ei löydetty kuin yksi tutkimukseen soveltuva koekohde. Tämän ei arveltu olevan ongelma, koska oli odotettavissa, että ongelmallisimmat kohteet sijaitsevat sorapintaisilla teillä. Lopulta koekohteiksi valikoituivat kappaleessa 2.2 esitellyt kohteet.

2.2 Mittauskohteiden esittely

Mittauksiin valittiin lopulta 4 teräsrumppua ja 4 muovirumpua. Rummut sijaitsevat pääosin päällystämättömillä teillä pois lukien halkaisijaltaan suurin teräsrumpu. Teräsrummut olivat nimellishalkaisijoiltaan 800, 1000, 1400 ja 1800 mm. Muovirumpujen halkaisijat olivat 600 ja 800 mm (ks. taulukko 2.1). Rumpujen sijainnit on esitetty kuvassa 2.1.

Taulukko 2.1 Mittauskohteiksi valittujen rumpujen tiedot.

Numero kartalla	Rummun materiaali	Halkaisija [mm]	Peitepaksuus [mm]	Tien pintamateriaali
1.	Teräs	800	750	sora
2.	Teräs	1000	500	sora
3.	Teräs	1400	500	sora
4.	Teräs	1800	900	PAB
5.	Muovi	600	500	sora
6.	Muovi	600	650	sora
7.	Muovi	800	200	sora
8.	Muovi	800	800	sora



Kuva 2.1 Mittauskohteiksi valittujen rumpujen sijainti kartalla (ks. taulukko 2.1).
(kuva ladattu 31.7.2014, bing maps)

2.2.1 Teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm

Kohde sijaitsee Sastamalassa Halkivahantiellä (tie numero 2521). Kohteen koordinaatit ovat: lat="61.236126" lon="23.174524". Rummun pituus on 14 m ja sen yläpinta on noin 750 mm syvyydellä tien pinnasta mitattuna. Rumpu oli suhteellisen hyvässä kunnossa. Rummun sisäpuolella oli havaittavissa teräsrummuille tyypillistä pientä ruostumista vesirajan alapuolella. Mittaushetkellä rummussa oli vettä vajaan 100 mm korkeudella.

Tie on rummun kohdalta noin 7 m levyinen eikä siinä ollut havaittavissa selkeitä uria. Tie on päällystämätön ja maatutkuksesta tehtyjen tulkintojen perusteella tierakenne on pääsääntöisesti 0,4–0,6 m paksuinen. Rummun kohdalta tien rakennekerrokset olivat kuitenkin lähes metrin paksuiset. Tämä viittaisi siihen, että tierakenne olisi painunut rummun kohdalta ja paikalle olisi ajan saatossa tuotu lisää kiviainesta.



Kuva 2.2 Teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm. Vasemmalla yleiskuva tiestä, jossa rumpu sijaitsee. Oikealla kuormitettava rumpu.

2.2.2 Teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm

Kohde sijaitsee Punkalaitumella Palojoentiellä (tie numero 12741). Kohteen koordinaatit ovat: lat="61.042975" lon="23.122047". Rummun pituus on 12 m ja rummun yläpinta on maatutkuksesta tehtyjen tulkintojen perusteella noin 500 mm syvyydellä tien pinnasta mitattuna. Rumpu oli hyvässä kunnossa. Rummun sisäpuolella oli havaittavissa teräsrummuille tyypillistä pientä ruostumista vesirajan alapuolella. Mittaushetkellä rummun pohjalla kulki hieman vettä.

Tie on rummun kohdalta 6,6 m levyinen ja siinä oli havaittavissa kaksi selkeää uraa. Tie on päällystämätön ja maatutkuksesta tehtyjen tulkintojen perusteella tierakenne on pääsääntöisesti 0,4–0,7 m paksuinen. Rummun kohdalta rakennekerrosten paksuus on noin 0,5 m. Maatutkauskartoista ei ollut havaittavissa, että tiehen olisi tehty rummun kohdalle varsinaisia siirtymärakenteita. Tien alhaisen luokan perusteellakin lienee syytä olettaa, että rumpu oli asennettu jyrkkäluiskaiseen kaivantoon, jonka jälkeen rummun ympärystyttö on tehty kaivannosta saadulla materiaalilla.



Kuva 2.3 Teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm. Vasemmalla yleiskuva tiestä, jossa rumpu sijaitsee. Oikealla kuormitettava rumpu.

2.2.3 Teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm

Kohde sijaitsee Punkalaitumella Vihalaidantiellä (tie numero 12745). Kohteen koordinaatit ovat: lat="61.033275" lon="23.136313". Rummun pituus on 12 m ja rummun yläpinta on maatutkauksen perusteella tehtyjen tulkintojen perusteella 500 mm syvyydellä tien pinnasta mitattuna. Rumpu oli hyvässä kunnossa. Rummun sisäpuolella oli havaittavissa teräsrummuille tyypillistä pientä ruostumista vesirajan alapuolella. Mittaushetkellä rummun pohjalla kulki hieman vettä.

Tie on rummun kohdalta 7,5 m levyinen ja siinä oli havaittavissa kaksi selkeää uraa. Tie on päällystämätön ja maatutkauksesta tehtyjen tulkintojen perusteella tierakenne on pääsääntöisesti 0,7–1,1 m paksuinen. Rummun kohdalta tien rakennekerrosten paksuus on 0,4–0,5 m. Maatutkausdatoista ei ole havaittavissa, että tienhen olisi tehty rummun kohdalle varsinaisia siirtymärakenteita.



Kuva 2.4 Teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm. Vasemmalla yleiskuva tiestä, jossa rumpu sijaitsee. Oikealla kuormitettava rumpu.

2.2.4 Teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm

Kohde sijaitsee Sastamalassa Narvantiellä (tie numero 12965). Kohteen koordinaatit ovat: lat="61.328428" lon="22.973714". Rummun pituus on 13 m ja rummun yläpinta on maatumkauksen perusteella tehtyjen tulkintojen perusteella noin 900 mm syvyydellä tien pinnasta mitattuna. Rumpu oli hyvässä kunnossa. Rummun sisäpuolella oli havaittavissa teräsrummuille tyypillistä ruostumista vesirajan alapuolella. Mittaushetkellä rummun pohjalla kulki hieman vettä.

Tie on rummun kohdalta 5,5 m levyinen. Tie on päällystetty ja maatumkauksesta tehtyjen tulkintojen perusteella tierakenne on pääsääntöisesti 1,0–1,3 m paksuinen. Rummun kohdalta tien rakennekerrosten paksuus on 1,0 m. Maatumkausdatoista ei ollut havaittavissa, että tiehen olisi tehty rummun kohdalle varsinaisia siirtymärakenteita.



Kuva 2.5 Teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm. Vasemmalla yleiskuva tiestä, jossa rumpu sijaitsee. Oikealla kuormitettava rumpu.

2.2.5 Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm

Kohde sijaitsee Lempäälässä Lipontiellä (tie numero 13743). Kohteen koordinaatit ovat: lat="61.268677" lon="23.806177". Rummun pituus on 10 m ja rummun yläpinta on noin 650 mm syvyydellä tien pinnasta mitattuna. Rummissa on kaksiseinäinen rakenne, eli siinä on aaltoprofiloitu ulkopinta ja sileä sisäpinta. Rumpu oli hyvässä kunnossa.

Tie on rummun kohdalta 6,0 m levyinen, päällystämätön ja tiessä oli havaittavissa kolme uraa.



Kuva 2.6 Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm. Vasemmalla yleiskuva tiestä, jossa rumpu sijaitsee. Oikealla kuormitettava rumpu.

2.2.6 Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm

Kohde sijaitsee Lempäälässä Lipontiellä (tie numero 13743). Kohteen koordinaatit ovat: lat="61.238362" lon="23.831664". Rummun pituus on 10 m ja rummun yläpinta noin 500 mm syvyydellä tien pinnasta mitattuna. Rummussa on kaksiseinämarakenne, eli siinä on aaltoprofiloitu ulkopinta ja sileä sisäpinta. Rumpu oli hyvässä kunnossa.

Tie on rummun kohdalta 6,0 m levyinen. Tie on päällystämätön ja maatutkuksesta tehtyjen tulkintojen perusteella tierakenne on pääsääntöisesti 0,4–0,8 m paksuinen. Tiessä oli havaittavissa kaksi leveää uraa. Rummun kohdalta tien rakennekerrosten paksuus on 0,5 m.



Kuva 2.7 Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm. Vasemmalla yleiskuva tiestä, jossa rumpu sijaitsee. Oikealla kuormitettava rumpu.

2.2.7 Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm

Kohde sijaitsee Sastamalassa Rautaniementiellä (tie numero 12847). Kohteen koordinaatit ovat: lat="61.267121" lon="23.258845". Rummun pituus on 12 m ja rummun yläpinta noin 800 mm syvyydellä tien pinnasta mitattuna. Rummussa oli kaksiseinämarakenne, eli siinä oli aaltoprofiloitu ulkopinta ja sileä sisäpinta.

Tie on rummun kohdalta 5,0 m levyinen. Tie on päällystämätön ja maatutkausesta tehtyjen tulkintojen perusteella tierakenne on pääsääntöisesti 0,4–1,0 m paksuinen. Rummun kohdalla rakennekerrosten paksuus on metrin luokkaa. Tiessä oli havaittavissa kolme selkeää uraa.



Kuva 2.8 Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm. Vasemmalla yleiskuva tiestä, jossa rumpu sijaitsee. Oikealla kuormitettava rumpu.

2.2.8 Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm

Kohde sijaitsee Sastamalassa Kivijärventiellä (tie numero 12847, sama tie kuin kapaleessa 2.2.7). Kohteen koordinaatit ovat: lat="61.284816" lon="23.26551". Rummun pituus on 12 m ja rummun yläpinta noin 200 mm syvyydellä tien pinnasta mitattuna. Rummussa oli kaksiseinämä rakenne, eli siinä oli aaltoprofiloitu ulkopinta ja sileä sisäpinta.

Tie on rummun kohdalta 5,5 m levyinen. Tie on päällystämätön ja maatutkausesta tehtyjen tulkintojen perusteella tierakenne on pääsääntöisesti 0,4–0,6 m paksuinen.



Kuva 2.9 Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 0,2 m. Vasemmalla yleiskuva tiestä, jossa rumpu sijaitsee. Oikealla kuormitettava rumpu.

2.3 Koekohteiden rakenne- ja materiaalimääritykset

Koekohteilla tehtiin rumpujen kuormitusmittausten ja maatutkausten lisäksi rakenne- tutkimuksia. Rakennekerrosten paksuuksia määritettiin DCP-laitteen avulla. DCP:n (*dynamic cone penetrometer*) toimintaperiaate vastaa heijarikairaa. DCP-mittauksessa 8 kg punnus pudotetaan lyöntialasimelle 580 mm korkeudelta ja yhtä tai useampaa iskua vastaava, halkaisijaltaan 33 mm kärjen tunkeutuma (*DPI, DCP Penetration Index [mm/isku]*) kirjataan mittauspöytäkirjaan. DPI-arvon avulla voidaan arvioida materiaalin mekaanista käyttäytymistä kuvaava CRB-arvo (*California Bearing Ratio*) ja tästä edelleen kokemuseräisellä muunnoskaavalla materiaalin jäykkyys (Powell et. al. 1984). (Vuorimies et. al. 2009)

Lisäksi DCP-mittauksen tuloksista voidaan tulkita rakenteessa olevien rakennekerrosten ja pohjamaan rajapintoja. Taulukossa 2.2 on esitetty koekohteilla tehtyjen DCP-määritysten perusteella tulkitut rakennekerrosten paksuudet sekä mittauksista johdetut rakennekerrosten jäykkyyttä kuvaavat E-moduulit. Mittaukset on lopetettu, kun pohjamaakerroksen yläpinnan sijainti on saatu varmistettua, joten pohjamaakerrosten kokonaispaksuus ei ole tiedossa. Lisäksi osasta rakennekerroksista puuttuu määritetty E-moduuli. Tämä johtuu rakenteiden osittaisesta aukikaivusta. DCP-mittaus on tehty aina auki kaivetun rakenteen tasosta alkaen.

Taulukko 2.2. Koekohteilta DCP-laitteella määritetyt rakennekerrospaksuudet ja E-moduulit. (*: Moduuli epävarma, koska rakenteen osittaisen aukikaivun seurauksena jäljelle jäänyt osakerros oli hyvin ohut ja kaivun seurauksena löhkytynyt.

		Kerrospaksuus (mm)	E (MPa)
Teräsrummut			
ø 1800 z= -900 mm	Päällyste	35	-
	Kerros 1	550	120
	Kerros 2	300	96
	Pohjamaa		73
ø 1400 z= -500 mm	Kerros 1	450	83 (*)
	Kerros 2	150	119
	Pohjamaa		68
ø 1000 z= -500 mm	Kerros 1	400	-
	Kerros 2	300	53
	Pohjamaa		37
ø 800 z= -750 mm	Kerros 1	150	-
	Kerros 2	300	-
	Kerros 3	200	77
	Pohjamaa		50
Muovirummut			
ø 800 z= -800 mm	Kerros 1	150	-
	Kerros 2	200	148
	Pohjamaa		43
ø 800 z= -200 mm	Kerros 1	350	136
	Kerros 2	300	107
	Pohjamaa		58
ø 600 z= -650 mm	Kerros 1	150	-
	Kerros 2	500	105
	Pohjamaa		56
ø 600 z= -500 mm	Kerros 1	350	164
	Kerros 2	250	125
	Pohjamaa		82

Rakenteiden yläosasta tehtiin rakenteen tiivysmittauksia säteilymittauslaitteella (Troxler). Taulukkoon 2.3 on koottu rakenteen keskimääräinen tiivys 200–300 mm syvyydellä tien pinnasta lukien sekä rakenteen keskimääräinen vesipitoisuus 50 mm välein mitattuna 300 mm syvyydeltä tien pinnasta lukien. Materiaalien tiivysasteet perustuvat materiaalinäytteiden perusteella arvioituihin maksimikuivatilavuuspainoihin. Taulukossa 2.3 on esitetty lisäksi rakenteen aukikaivun yhteydessä otettujen materiaalinäytteiden rakeisuusmääritysten perusteella saadut hienoainepitoisuudet, maksimiraekoot ja raekokosuhteet. Taulukoiden 2.2 ja 2.3 tietoja on käytetty kappalessa 5 esitettyjen rakennemallien rakennekerrospaksuuksien ja laskentaparametrien määrittämiseen.

Taulukko 2.3. Koekohteilla tehtyjen tiiviysmittausten perusteella määritetyt rakenteen vesipitoisuudet ja tiiviysasteet sekä kohteilta otetuista materiaalinäytteistä määritetyt tien rakennekerrosmateriaalin hienoainespitoisuudet, maksimiraekoot ja raekokosuhteet. Materiaalinäytteet on otettu taulukossa 2.2 esitetyn mukaisesti kerroksesta 1.

	Troxler-mittaus		Materiaalinäyte		
	Tiiviysaste (%)	Vesipitoisuus (%)	Hienoainespitoisuus (%)	Maksimiraekoko (mm)	Raekokosuhte
Teräsrummut					
∅ 1800 z= -900 mm	93	4,2	4,5	32	39,4
∅ 1400 z= -500 mm	97	4,5	1,4	22	19,5
∅ 1000 z= -500 mm	96	5,0	2,0	32	25,3
∅ 800 z= -750 mm	93	5,5	1,4	32	17,9
Muovirummut					
∅ 800 z= -800 mm	96	5,3	2,9	16	20,8
∅ 800 z= -200 mm	95	4,9	2,3	16	17,5
∅ 600 z= -650 mm	96	4,3	1,5	22	18,7
∅ 600 z= -500 mm	97	4,7	1,1	22	16,3

3 Kuormituskokeiden toteutustapa

3.1 Mittaussuureet ja instrumentointi

Kuormitettavista rummuista haluttiin tarkastella rummun halkaisijan muutoksia. Rummuista mitattiin rummun halkaisijan muutosta pysty- ja vaakasuunnassa sekä rummun laen venymää. Kuormituksen aikana kyseiset suureet mitattiin kolmesta poikkileikkauksesta, jotka olivat noin 900 mm päässä toisistaan. Lisäksi jokaisesta kuormitusajoneuvon ylityksestä mitattiin renkaan sijainti tien poikkileikkauksen suunnassa. Esimerkki instrumentoidusta rummusta on esitetty kuvassa 3.1



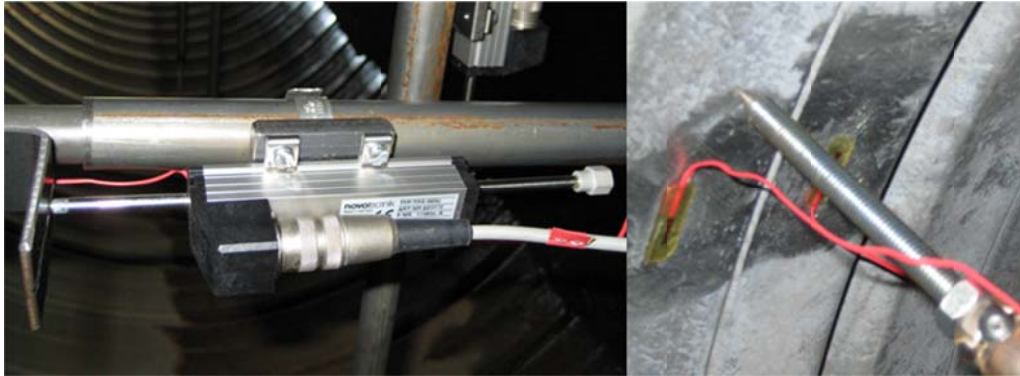
Kuva 3.1 Teräsrumpu ($\varnothing=1400$ mm) instrumentoituna. Anturit on asennettu kolmeen poikkileikkaukseen, jotka sijaitsevat noin 900 mm etäisyydellä toisistaan. Jokaisesta poikkileikkauksesta mitataan rummun halkaisijan muutosta pysty- ja vaakasuunnassa sekä rummun laen venymää.

3.1.1 Halkaisijan muutosten mittaaminen

Rummun halkaisijan pysty- ja vaakasuuntaisten muutosten mittaamisessa käytettiin 50 mm siirtymäantureita. Varsinainen mittausanturi koostui kahdesta halkaisijaltaan erikokoisesta sisäkkäisestä teräsputkesta, jotka pystyivät liikkumaan toistensa suhteen. Halkaisijaltaan suuremman putken sisällä oli 160 mm pituinen työntöjousi, jota vasten halkaisijaltaan pienemmän putken pää nojasi. Antureissa oli kartion malliset päät, jotka asetettiin rummun seinämää vasten. Paksumpaan putkeen kiinnitettiin varsinainen siirtymäanturi ja ohuempaan putkeen vastakappale (ks. kuva 3.2).

Anturien asennus aloitettiin poraamalla rummun seinämään 3 mm terällä reiän alut, joihin antureiden kartion malliset kärkiosat asetettaisiin. Anturin toinen pää asetet-

tiin sille varattuun koloon ja anturin sisällä oleva jousi puristettiin kasaan. Tämän jälkeen anturin toinenkin pää asetettiin sille varattuun koloon ja anturista päästettiin irti. Tällöin jousen aiheuttama voima piti anturin paikoillaan. Jousi reagoi kuormituksen aiheuttamiin halkaisijan muutoksiin joko pidentymällä tai puristumalla kasaan, riippuen kumpaan suuntaan muodonmuutos tapahtuu. Käytännössä siirtymäantureilla mitattiin kahden sisäkkäisen lievästi jännityksessä olevan putken välistä liikettä. Putken sisällä olevan jousen aiheuttaman voiman voidaan katsoa olevan merkityksellön saatujen mittaustulosten kannalta.



Kuva 3.2 Siirtymäanturi. Vasemmalla lähikuva 50 mm siirtymäanturista sekä anturin vastakappaleesta. Oikealla siirtymäanturin kartion mallinen kärki teräsrummun seinämää vasten.

3.1.2 Venymien mittaaminen

Rummun laen venymien mittaamisessa käytettiin rummun pintaan liimattavia venymäliuskoja (ks. kuva 3.3). Ennen liuskojen liimaamista rummun sisäpinta karhennettiin ja irtolika poistettiin hiomapaperilla, jonka jälkeen asennuskohta pyyhittiin puhtaaksi asetoniin kastetulla paperilla. Jokaiseen poikkileikkaukseen liimattiin kaksi venymäliuskaa vierekkäin kahdesta syystä. Venymäliuskojen kiinnitys, varsinkin halkaisijaltaan pienissä rummuissa, oli haasteellista, jolloin oli vaarana, ettei yksittäinen liuska kiinnity kunnolla rummun pintaan. Huonosti kiinnitettyä liuskaa ei välttämättä pysty silmämääräisesti havaitsemaan, jolloin kiinnityksen epäonnistuminen paljastuu vasta mittaustulosten tarkastelun yhteydessä. Kahden liuskan asentamisella pyrittiin siis varmistumaan, että kuormituksen aikana saataisiin luotettavia mittaustuloksia, vaikkei yksittäisen liuskan kiinnitys onnistuisikaan. Lisäksi teräsrumpujen tapauksessa rummun aaltoprofiili aiheuttaa erimerkkiset venymät riippuen siitä mitataanko muodonmuutoksia aaltoprofiilin pohjalta vai harjalta (kuormitus aiheuttaa harjalle puristusta ja pohjalle vetoa). Muovisten rumpujen sisäpinnassa ei ole aaltoprofiilia eli pinta on sileä, jolloin liuskojen avulla mitatut venymät ovat aina saman merkisiä.



Kuva 3.3 Venymäliuskat asennettuna rummun seinämään. Vasemmalla muovirumpu ja oikealla teräsrumpu. Teräsrummun venymäliuskoista vasemmanpuoleinen on asennettu aaltoprofiilin pohjalle ja oikeanpuoleinen harjalle. Muovirumpujen sisäpinnassa ei ole aaltoprofiilia, vaan pinta on sileä.

3.1.3 Ajoneuvon ajolinjan mittaaminen

Tulosten tarkastelun kannalta on hyvin oleellista, että kuormittavan ajoneuvon ja edelleen jokaisen kuormittavan renkaan sijainti tiedetään tien poikkileikkauksen suunnassa. Kun saadaan sidottua poikkileikkauksesta mitatut suuret renkaan sijaintiin, saadaan käsitys mm. haluttujen suureiden maksimiarvojen mittaamisesta. Rummunylityksen aikaisen ajolinjan merkitystä on käsitelty tarkemmin luvussa 4.

Ajoneuvon etäisyyden mittaaminen tehtiin asettamalla ruutulippukuvioitu muovimatto tielle ja ajoneuvon ylitykset tallennettiin videokameralle. Videokuvasta voidaan jälkikäteen määrittää jokaisen renkaan sijainti antureiden suhteen. Maton reuna pyrittiin asettamaan samalle kohdalle kuin ensimmäinen instrumentoitu poikkileikkaus (PL1, kuva 4.1) rummun sisällä oli. Ajolinjan mittaamisen periaate on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva 3.4 Ajoneuvon ajolinjan mittaamisen periaate. Tielle on asetettu kumimatto, jossa ruutulippukuviointi. Videokameralla tallennetaan jokainen ylitys, ja videokuvasta saadaan selville jokaisen renkaan sijainti antureiden suhteen.

3.2 Rumpujen kuormittaminen

3.2.1 Kuormitusajoneuvo

Kuormitusajoneuvona oli käytössä raskas kuorma-auto, joka koostui neliakselisesta vetoautosta ja kolmiakselisesta perävaunusta. (ks. kuva 3.5). Vetoauton teliakseleista viimeisin oli ylhäällä koko koekuormituksen ajan. Sekä vetoauto että perävaunu olivat ilmajousitetut. Ajoneuvon kokonaismassa oli 56,5 t, joka jakaantui akselleille seuraavasti: etuakseli 7,5 t, vetoauton teliakselit yhteensä 21 t, perävaunun ensimmäinen akseli 10 t ja perävaunun teliakselit yhteensä 18 t. Vetoauton teliakseleiden väli oli 1,3 m ja perävaunun teliakseleiden väli 2,0 m.



Kuva 3.5 Kuormituksissa käytetty ajoneuvo.

Sekä ajoneuvon että perävaunun akseleissa oli paripyörät pl. ajoneuvon etuakseli, jossa oli tyypin 385/55R22.5 leveä yksikkörenkas. Kuormitusajoneuvon renkaat ja rengaspaineet on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1 Kuormitusajoneuvon renkaat ja rengaspaineet.

Akseli	Renkas	Koko	Paine
Etuakseli	Michelin, XFA2 Energy	385/55R22.5	880
Vetoauton 1. teliakseli	Michelin, X Multiway	315/60R22.5	900
Vetoauton 2. teliakseli	Bridgestone, M729	315/60R22.5	850
Perävaunun yksittäisakseli	Michelin, XDN Grip	295/60R22.5	770
Perävaunun 1. teliakseli	Continental, HSR1	275/70R22.5	810
Perävaunun 2 teliakseli	Continental, HSR1	275/70R22.5	820

3.2.2 Kuormitusten toteutus

Kohteet kuormitettiin kolmen päivän aikana kesällä 2014. Ensimmäiset kuormitukset tehtiin 2.–3. kesäkuuta, jolloin kuormitettiin halkaisijaltaan 1000 mm ja 1400 mm teräsrumput sekä kaksi halkaisijaltaan 800 mm olevaa muovirumpua. Toisella kuormituskierroksella 17. heinäkuuta kuormitettiin halkaisijaltaan 1800 mm ja 800 mm teräsrumput sekä kaksi halkaisijaltaan 600 mm muovirumpua.

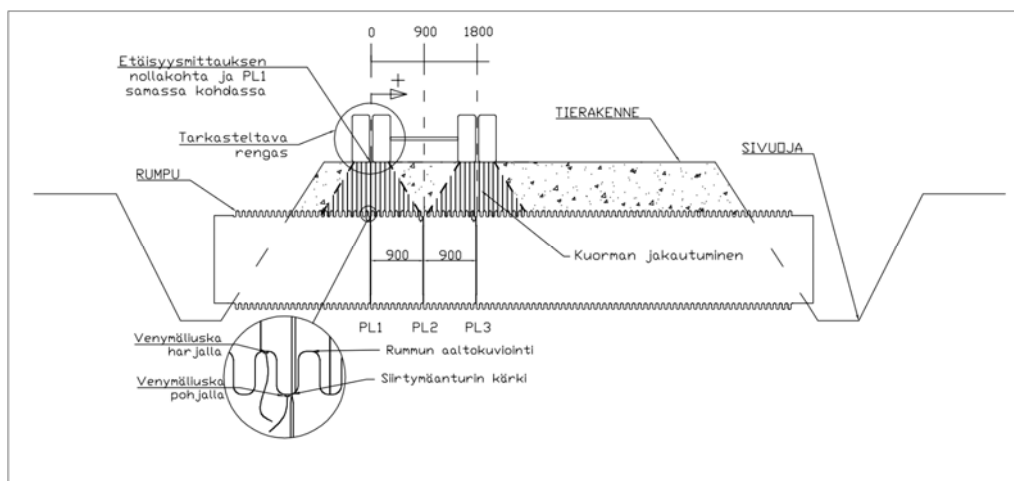
Käytännössä kuormitus tapahtui niin, että ajoneuvolla ajettiin rumpun yli alhaisella nopeudella (30 km/h), jonka jälkeen ajoneuvo pysäytettiin muutamien kymmenien metrien päähän rummusta. Tämän jälkeen ajoneuvo peruutettiin instrumentoidun rumpun yli takaisin lähtöpaikalle ja tehtiin uusi ylitys. Jokaisessa kohteessa ajoneuvon ajolinjaa vaihdeltiin noin 1,5 metrin matkalla tien poikkileikkauksen suunnassa. Rumpua kuormittavia ajoneuvon ylityskertoja tuli kohteesta riippuen 11–14 kpl.

4 Mittaustulokset

Mittaustuloksissa esitetään kuormituksesta seuranneet rummun halkaisijan muutokset pysty- ja vaakasuunnassa sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta. Laen venymät esitetään teräsrumpujen osalta sekä rummun profiilin harjaan asennetun että rummun profiilin pohjaan asennetun venymäliuskan mitatuista tuloksista. Vastaisuudessa rummun poikkileikkaukset lyhennetään seuraavasti: PL1, PL2 ja PL3 (kuva 4.1). Poikkileikkaukset sijaitsivat 900 mm etäisyydellä toisistaan.

4.1 Yleistä mittaustuloksista

Mittausten tavoitteena oli selvittää rummun poikkileikkauksen muodonmuutoksia kuormituksen alaisena. Erityisesti kiinnostuksen kohteena olivat kolmesta poikkileikkauksesta mitattujen vasteiden maksimiarvot. Mikäli oletettaisiin, että kuorman keskipiste muodostuisi aina renkaan keskilinjalle ja anturien sijainti suhteessa kuormitusajoneuvon ajolinjaan tiedettäisiin tarkalleen, ei periaatteessa tarvittaisi kuin yksi ajokerta maksimiarvojen selvittämiseksi. Todellisuudessa antureita ei kuitenkaan saatu asennettua täsmälleen halutulle kohtaa mm. rummun aaltokuvioinnin ja antureiden asentamisen hankaluuden vuoksi. Toisaalta renkailta välittyvän kuorman todellinen painopiste voi poiketa renkaiden keskilinjalla esimerkiksi renkaiden kallistuskulman, paripyörien mahdollisen ilmanpaine-eron, renkaiden epätasaisen kulumisen tai tien profiilin vuoksi. Jotta voitaisiin varmistua muodonmuutosten maksimiarvojen mittaamisesta, tarvitaankin useita ylityksiä eri kohdista tien poikkileikkausta. Lisäksi ajouran paikkaa varioimalla saadaan arvokasta tietoa siitä, kuinka pyöräkuorman vaikutus rumpuun jakautuu sivuttaissuunnassa. Periaatekuva mittauksesta on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1 Periaatekuva mittauksesta. Kuvassa on esitetty aaltoprofiilinen teräsrumpu.

Kuvan 4.1 mukaisesti etäisyydenmittauksen nollakohdaksi valittiin lähimpänä tien reunaa oleva instrumentoitu poikkileikkaus (PL1). Mittauksissa tarkasteltavana renkaana pidettiin lähimpänä tien reunaa olevaa rengasta. Kuvassa on esitetty myös suunnoksena venymäliuskojen sijoittuminen poikkileikkauksessa. Toinen liuska asennettiin rummun aaltokuvion harjalle ja toinen pohjalle.

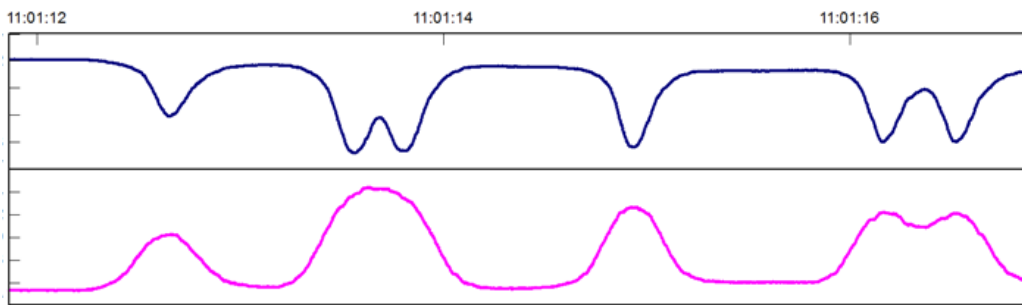
4.2 Tyypilliset signaalit

Seuraavaksi esitellään millaisia signaaleja tarkasteltavista vasteista saadaan, kun rumpun yli ajetaan kuormitusajoneuvolla. Koska signaalien muodot vaihtelevat rumpun materiaalista riippuen, esitellään tyypilliset signaalit erikseen sekä teräsettä muovirummusta. Mitatut vasteet olivat rumpun halkaisijan muutos pysty- ja vaakasuunnassa sekä rumpun laen venymä. Seuraavassa kappaleessa esitellyt signaalit ovat esimerkkejä yksittäisestä ylityksestä satunnaisesti valituista mittausajoista. Signaalien muoto ja suuruus riippuvat useista tekijöistä, kuten rumpun peitesyvyys, tierakenteen paksuus, tierakennemateriaalien ja pohjamaan ominaisuudet, kuormituksen (tai kuormituksen vaikutuksesta rumpuun kohdistuvan jännityksen) suuruus jne. Tarkoituksena onkin vain havainnollistaa, minkälaisia signaaleja tulosten analyysissä on käsitelty, ei ottaa kantaa niitten suuruusluokkiin tai keskinäiseen vertailukelpoisuuteen.

4.2.1 Teräsrummut

Rumpun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset

Teräsrumpuihin asennetuista siirtymäantureista saatavat signaalit olivat suhteellisen häiriöttömiä tarkasteltavan suureen suuruusluokkaan nähden. Esimerkki yksittäisestä ylityksestä saatavista siirtymäanturien signaaleista on esitetty kuvassa 4.2. Esimerkin signaalit on saatu pysty- ja vaakasuunnassa olevista siirtymäantureista yhdestä rumpun poikkileikkauksesta. Luonnollisesti kahdesta muustakin instrumentoidusta poikkileikkauksista saadaan samankaltaiset signaalit.



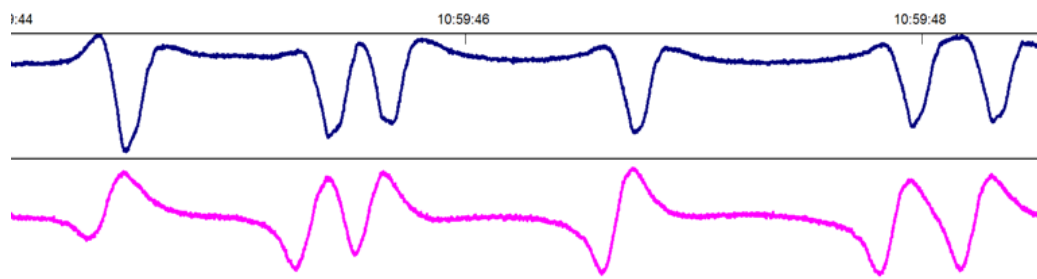
Kuva 4.2 Esimerkki teräsrumpun halkaisijamuutosten mittaussignaaleista, kun kuormitusajoneuvolla ajetaan rumpun yli alhaisella nopeudella (30 km/h). Ylempi (sininen) käyrä kuvaa rumpun halkaisijan muutosta pystysuunnassa ja alempi (pinkki) käyrä vaakasuunnassa. Signaalit eivät ole keskenään samassa mittakaavassa.

Rumpun pystyhalkaisijan muutoksen signaaleista on havaittavissa ajoneuvon jokaisen akselin ylitys erikseen - alkaen vasemmalta ajoneuvon etuakselista päättyen oikealla perävaunun kaksiakseliseen teliin. Pystyhalkaisijan muutoksen signaalissa huiput ovat alaspäin, eli rumpu puristuu kasaan, kun ajoneuvo ylittää sen. Vaakahalkaisijan muutoksen signaalista havaitaan edelleen eri akselit kohtalaisen selvästi. Kuitenkin signaalissa olevat huiput ovat lievästi loivempia verrattuna ylempään signaaliin ja ajoneuvon kaksiakselisen telin eri akselit eivät näy vaakahalkaisijan muutoksen signaalissa erikseen. Huiput ovat ylöspäin eli rumpun vaakahalkaisijan muutos on positiivista, jolloin rumpu leviää sivuille ajoneuvon ylittäessä sen. Maan tukemisvaikutus sivusuunnassa rajoittaa vaakasuunnassa tapahtuvaa halkaisijan

muutosta, jolloin se on tyypillisesti itseisarvoltaan pienempi kuin halkaisijan muutos pystysuunnassa.

Rummun laen venymä

Teräsrumpujen lakien venymää mitattiin sekä rummun aaltoprofiilin harjalta että pohjalta. Kun rumpua kuormitetaan liikkuvalla ajoneuvolla, saadaan venymäliuskoista kuvan 4.3 mukaisia signaaleja. Tässäkin tapauksessa signaalit olivat kohtalaisen häiriöttömiä suhteessa mitattujen venymien suuruusluokkaan. Signaalit ovat yhden instrumentoidun poikkileikkauksen venymäliuskoista. Luonnollisesti kahdesta muustakin instrumentoidusta poikkileikkauksesta saadaan samankaltaisia signaaleja.



Kuva 4.3 *Esimerkki teräsrummun laen venymäsignaaleista, kun kuormitusajoneuvolla ajetaan rumpun yli alhaisella nopeudella (30 km/h). Ylempi (sininen) käyrä kuvaa venymää aaltoprofiilin harjalla ja alempi (pinkki) aaltoprofiilin pohjalla. Venymäliuskojen sijoittuminen teräsrummun profiiliin on esitetty kuvissa 3.3. ja 4.1.*

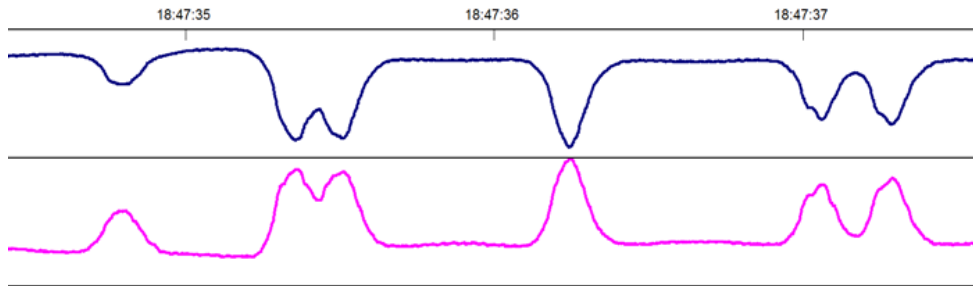
Molemmista signaaleista on havaittavissa ajoneuvon jokaisen akselin ylitys erikseen - alkaen vasemmalta ajoneuvon etuakselista päättyen oikealla perävaunun kaksiakseliseen teliin. Signaalit ovat kuitenkin toisistaan poikkeavat. Kun ajoneuvon akseli lähestyy rumpua, sen kuorma aiheuttaa rumpuun muodonmuutosta eli tässä tapauksessa painaa kasaan rummun sivuseinämää, jolloin rummun laki taipuu hieman kohti tien pintaa. Tällöin aaltoprofiilin harjalle tulee vetorasitus, joka havaitaan sinisestä käyrästä nollassa ylöspäin suuntautuvasta matalasta huipusta. Kun kuormittava akseli on kohtisuoraan rummun yläpuolella, aaltoprofiilin harjalle tulee puristusrasitus, jolloin signaaliin tulee alaspäin oleva huippu.

Alemmasta käyrästä eli aaltoprofiilin pohjalta mitatusta signaalista havaitaan sama ilmiö, mutta vastakkaismerkkisenä ja voimakkaampana. Kuormittavan akselin lähestyessä rumpua, aaltoprofiilin pohjalle tulee puristusrasitus ja akselin tullessa rummun kohdalle, rasitus muuttuu puristuksesta vedoksi. Rummun aaltoprofiilin pohjan venymässä puristuspuolen ja vetopuolen venymät ovat itseisarvoltaan lähes yhtä suuret nollassa verrattuna. Signaali on aaltomainen, kun taas aaltoprofiilin harjan venymän signaalissa (sininen käyrä) on havaittavissa yksittäisen akselin aiheuttamia kuormituspiikkejä.

4.2.2 Muovirummut

Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset

Muovirumpuihin asennetuista siirtymäantureista saatavat signaalit olivat nytkin suhteellisen häiriöttömiä tarkasteltavan suureen suuruusluokkaan nähden. Esimerkki yksittäisestä ylityksestä saatavista siirtymäanturien signaaleista on esitetty kuvassa 4.4. Esimerkin signaalit on saatu pysty- ja vaakasuunnassa olevista siirtymäantureista yhdestä rummun poikkileikkauksesta. Luonnollisesti kahdesta muustakin instrumentoidusta poikkileikkauksesta saadaan samankaltaisia signaaleja.

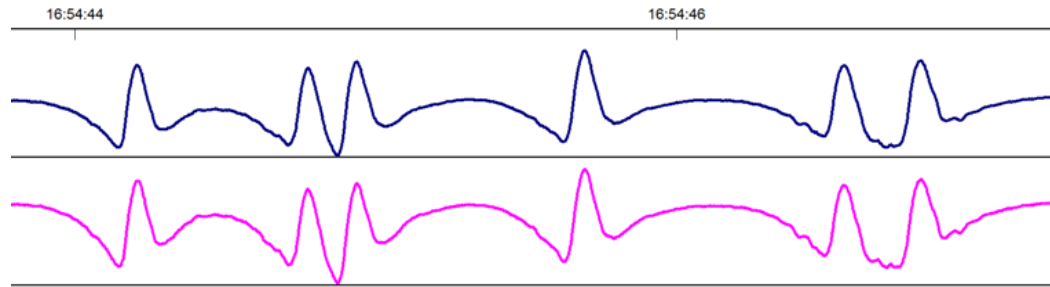


Kuva 4.4 Esimerkki muovirummun halkaisijamuutosten mittaussignaaleista, kun kuormitusajoneuvolla ajetaan rummun yli alhaisella nopeudella (30 km/h). Ylempi (sininen) käyrä kuvaa rummun halkaisijan muutosta pystysuunnassa ja alempi (pinkki) käyrä vaakasuunnassa. Signaalit eivät ole keskenään samassa mittakaavassa.

Pystyhalkaisijan muutoksen signaalista on havaittavissa ajoneuvon jokaisen akselin ylitys erikseen - alkaen vasemmalta ajoneuvon etuakselista päättyen oikealla perävaunun kaksiakseliseen teliin. Pystyhalkaisijan muutoksen signaalissa huiput ovat alaspäin, eli rumpu puristuu kasaan, kun ajoneuvo ylittää sen. Vaakahalkaisijan muutoksen signaalista havaitaan myös eri akselit selvästi. Huiput ovat ylöspäin eli rummun vaakahalkaisijan muutos on positiivista, jolloin rumpu leviää sivuille ajoneuvon ylittäessä sen.

Rummun laen venymä

Muovirumpujen lakien venymää mitattiin rummun sisäpinnalta, joka oli sileä toisin kuin teräsrummun tapauksessa (ks. kuva 3.3). Jokaiseen instrumentoituun poikkileikkaukseen asennettiin kaksi venymäliuskaa. Kun muovirumpua kuormitettiin liikkuvalla ajoneuvolla, saatiin venymäliuskoista kuvan 4.5 mukaisia signaaleja. Signaalit olivat kohtalaisen häiriöttömiä suhteessa mitattujen venymien suuruusluokkaan. Kuvassa 4.5 esitetyt esimerkkisignaalit ovat yhden instrumentoidun poikkileikkauksen venymäliuskoista. Luonnollisesti kahdesta muustakin instrumentoidusta poikkileikkauksesta saadaan samankaltaisia signaaleja.

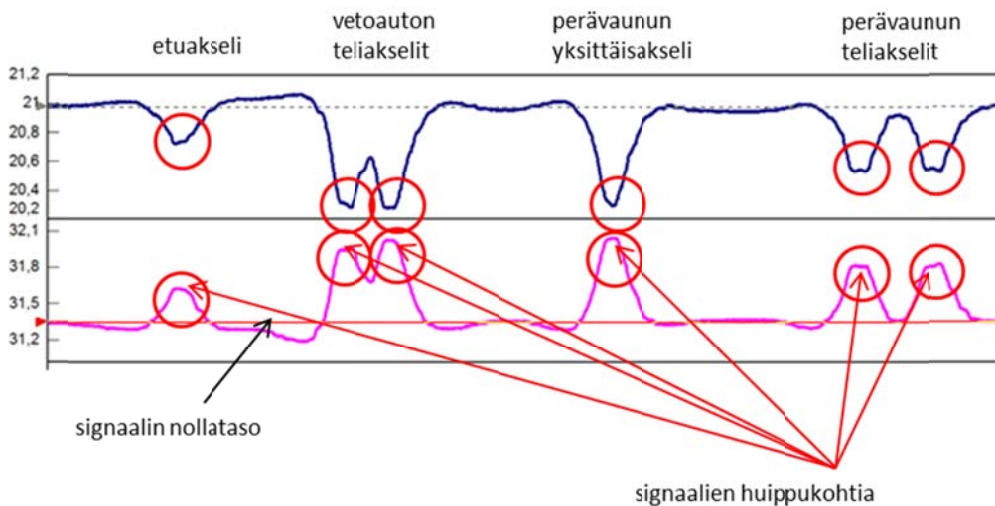


Kuva 4.5 Esimerkki muovirummun laen venymäsignaaleista, kun kuormitusajoneuvolla ajetaan rumpun yli alhaisella nopeudella (30 km/h). Signaalit ovat yhden instrumentoidun poikkileikkauksen venymäliuskoista. Esimerkki venymäliuskojen sijoittumisesta muovirummun sisäpintaan on esitetty kuvassa 3.3.

Koska muovirummun sisäpinnalla ei ollut aaltoprofiilia, poikkileikkauksen venymäliuskat asennettiin vierekkäin rumpun laelle, jolloin signaalit ovat toistensa suhteen hyvin samankaltaiset. Signaaleista on havaittavissa ajoneuvon jokaisen akselin ylitys erikseen - alkaen vasemmalta ajoneuvon etuakselista päättyen oikealla perävaunun kaksiakseliseen teliin. Kuormittavan akselin lähestyessä rumpua, rumpun laelle tulee puristusrasitus ja akselin tullessa rumpun kohdalle, rasitus muuttuu puristuksesta vedoksi.

4.3 Mittaustulosten käsittely

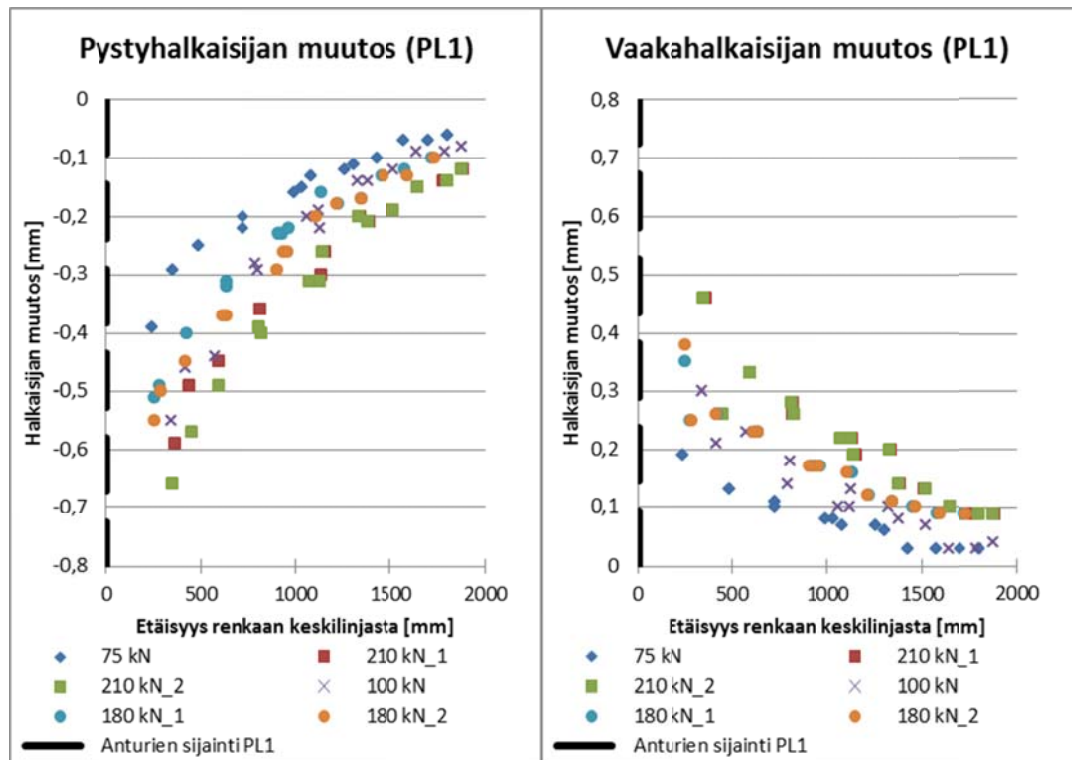
Edellisessä kappaleessa 4.2 esiteltiin mittausantureista saatavia signaaleja. Saaduista signaaleista tarkempaan tarkasteluun valittiin jokaisesta kuormitusajoneuvon ylityksestä saaduista signaaleista maksimi-arvot akseleittain (ks. kuva 4.6). Eli jokaisesta signaalista saadaan kuusi maksimi-arvoa. Ylityksestä mitatut rumpun halkaisijan muutossuureiden maksimi-arvot ja tarkasteltavan renkaan sijainti tien poikkileikkauksen suunnassa yhdistettiin, jolloin saadaan sidottua yksittäiset signaaleista määritetyt arvot renkaan sijaintiin tien poikkileikkauksessa. Luonnollisesti renkaan keskilinjan kulkiessa läheltä mittausanturia mitattiin yleensä suurimmat muodonmuutokset. Renkaan loitontuessa instrumentoidusta poikkileikkauksesta myös signaaleista määritetyt maksimi-arvot pienenevät.



Kuva 4.6 Tapa, jolla muodonmuutossignaaleista määritetään maksiarvot. Signaalien huippukohtia verrataan signaalin nollatasoon, jolloin saadaan määritettyä maksimi-arvot akselleittain.

Seuraavissa kuvissa (4.7–4.9) on esitetty rummun halkaisijan muutokset pysty- ja vaakasuunnassa poikkileikkauksittain. Kuvien pystyakselina on halkaisijan muutoksen arvo millimetreinä ja vaakakselina tarkasteltavan renkaan keskilinjan etäisyys etäisyysmittauksen nollakohdasta millimetreinä, mikä on valittu samaksi kuin PL1 (ks. kuva 4.1). Kuvissa olevien pisteiden lyhennetyt selitykset löytyvät kuvien alareunasta. Yksittäinen akseli on merkitty akselipainon suuruuden mukaisesti. Kaksiakselisen telin akselit on merkitty telin kokonaismassalla ja sen jälkeen numerolla, joka kertoo missä kohtaa teliä akseli sijaitsee. Eli merkintä 210 kN_1 tarkoittaa painoltaan 210 kN kaksiakselisen telin 1. akselia vetoauton etupäästä lukien. Anturien sijainti kussakin tapauksessa on osoitettu mustalla katkoviivalla.

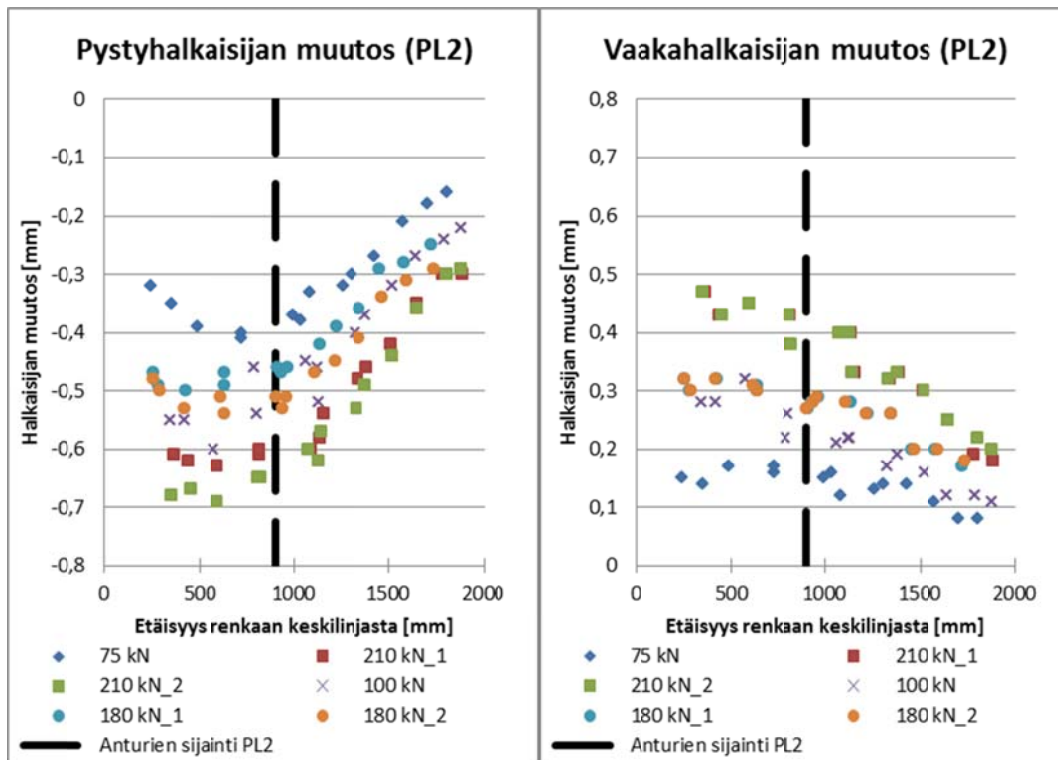
Kuvassa 4.7 esitellään lähimpänä tien reunaa olevan poikkileikkauksen (PL1) kohdalta mitatut halkaisijan muutokset pysty- ja vaakasuunnassa.



Kuva 4.7 Rummun halkaisijan muutos pysty- ja vaakasuunnassa. Kullekin akselille on oma symbolinsa. Symbolien selitys löytyy kuvan alareunasta. Anturien sijainti on esitetty mustalla katkoviivalla. Poikkileikkaus 1.

Kuvasta 4.7 havaitaan, että mitattujen rummun halkaisijan muutosten arvoista muodostuu kellokäärän puolikas vaaka-akselin nollakohtan oikealle puolelle. Muodonmuutokset ovat suurimmillaan, kun renkaan keskilinja on lähellä tarkasteltavaa poikkileikkausta. Muodonmuutokset pienevät voimakkaasti, kun siirytään vaaka-akselilla oikealle eli kun ajoneuvon ajolinja siirtyy keskeemmälle tietä. Rummun halkaisijan muutos pystysuunnassa on itseisarvoltaan selvästi suurempi kuin vaakasuuntainen.

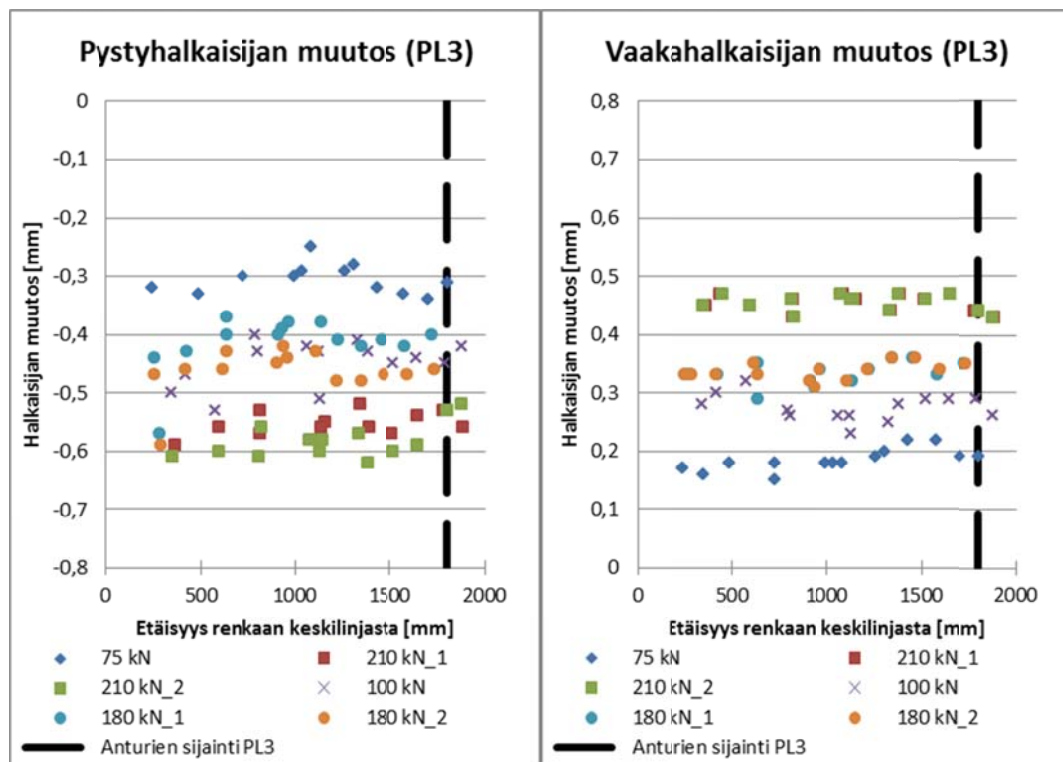
PL1:n kohdalla mitatut rummun halkaisijan muutokset tarkasteltavan renkaan sijainnin suhteen on helppo hahmottaa, sillä ajoneuvon ajolinja ei missään kohtaa kulje siten, että akselin toisen pään rengas olisi niin lähellä antureita, että siitä aiheutuisi vastetta. Seuraavissa tarkasteltavissa poikkileikkauksissa (PL2 ja PL3) kuitenkin ajoneuvon ajolinjat kulkevat siten, että myös akselin toisen puolen renkaista aiheutuu antureihin vastetta. Kuvassa 4.8 on esitetty PL2:n kohdalla mitatut rummun halkaisijan muutokset pysty- ja vaakasuunnassa.



Kuva 4.8 Rummun halkaisijan muutos pysty- ja vaakasuunnassa. Kullekin akselille on oma symbolinsa. Symbolien selitys löytyy kuvan alareunasta. Anturien sijainti on esitetty mustalla katkoviivalla. Poikkileikkaus 2.

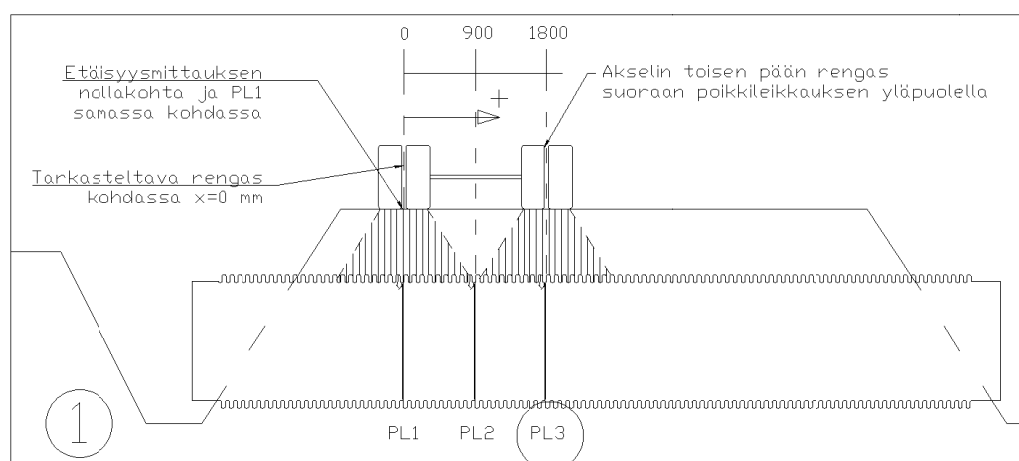
Kuvan 4.8 vasenta puolta tarkastelemalla havaitaan, että pystyhalkaisijan muutosten itseisarvojen maksimit sijoittuvat kohtaan, jossa tarkasteltavan renkaan keskilinja on kulkenut hieman antureiden vasemmalta puolelta. Pystyhalkaisijan muutoksen pistejoukosta on havaittavissa lievästi epäsymmetrisen kellokärän muotoa. Epäsymmetrisyys selittyy nimenomaan akselin toisessa päässä olevan renkaan kuormitusvaikutuksesta. Kun tarkasteltavan renkaan keskilinja on kulkenut esimerkiksi kohdasta $x=250$ mm, tällöin akselin toisen pään renkaan keskilinja on kulkenut kohdasta $x=250$ mm + 1800 mm = 2050 mm, jolloin myös osa sen kuormasta välittyy poikkileikkaukseen. Tällöin mitatun pystysuuntaisen siirtymän arvo on itse asiassa useamman renkaan kuormituksen yhteisvaikutusta. Tämän vuoksi kuvassa esitetyn katkoviivan vasemman puolen kellokärä on loivempi kuin oikea puoli. Kun tarkastellaan katkoviivan oikean puoleisia pisteitä, ne sijoittuvat hyvin samankaltaisesti kuin PL1:ssä, missä akselin toisessa päässä oleva rengas ei juurikaan vaikuta poikkileikkauksen muodonmuutokseen (ks. kuva 4.7). Vaakahalkaisijan muutokset ovat tässäkin poikkileikkauksessa itseisarvoltaan pienempiä kuin pystyhalkaisijan muutokset.

Kuvassa 4.9 on esitetty lähimpänä tien keskiosaa olevan instrumentoidun poikkileikkauksen (PL3) tyypillisiä mittaustuloksia.



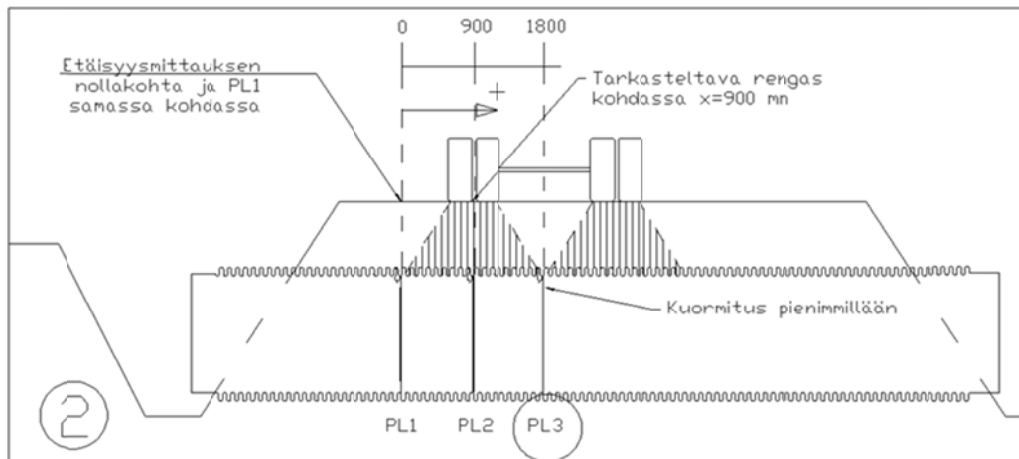
Kuva 4.9 Rummun halkaisijan muutos pysty- ja vaakasuunnassa. Kullekin akselille on oma symbolinsa. Symbolien selitys löytyy kuvan alareunasta. Anturien sijainti on esitetty mustalla katkoviivalla. Poikkileikkaus 3.

Kuvasta 4.9 havaitaan, että muodonmuutostasot pysyvät suhteellisen samoina riippumatta tarkasteltavan renkaan sijainnista. Tämä selittyy akselin toisessa päässä olevan renkaan kuormitusvaikutuksesta. Kun tarkasteltavan renkaan keskiliinja on lähellä kuvaajan nollakohtaa, tällöin akselin toisessa päässä oleva rengas on suoraan PL3:n yläpuolella (ks. kuva 4.10).



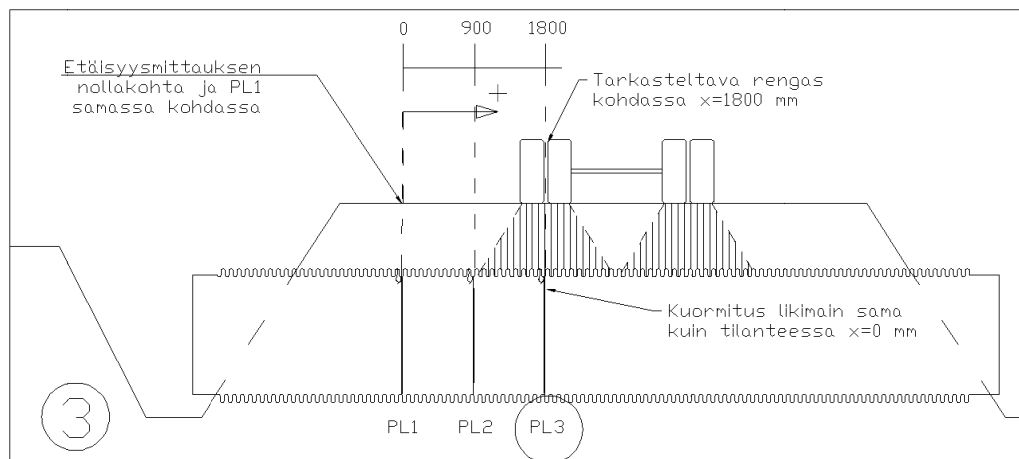
Kuva 4.10 Kuormitustilanne 1. Tarkasteltavan renkaan keskiliinja on kohdassa $x=0$ mm. Tällöin akselin toisen pään rengas on suoraan PL3:n anturien yläpuolella, jolloin myös poikkileikkaukseen tuleva rasitus on huomattavan suuri.

Kun tarkasteltava rengas siirtyy vaaka-akselilla kohtaan $x = 900$ mm, tällöin PL3 anturit ovat akselin välissä, jolloin myös kuormitus on pienimmillään (ks. kuva 4.11). Tämän vuoksi myös poikkileikkauksesta 3 mitattujen rummun halkaisijan muutosten itseisarvot ovat pienimmillään (ks. kuva 4.9). Tämän havaitsee parhaiten pystyhal-
kaisijan muutoksen arvoissa vaaka-akselin välillä $x = 500 - 1200$ mm, kun eri akseleista mitatut halkaisijan muutosten itseisarvot ovat tällä välillä pienimmillään ja alkavat jälleen kasvaa, kun vaaka-akselilla siirrytään oikealle.



Kuva 4.11 Kuormitustilanne 2. Tarkasteltavan renkaan keskilinja on kohdassa $x = 900$ mm. Tällöin PL3:een tuleva kuormitus on pienimmillään.

Kun tarkasteltavan renkaan keskilinja siirtyy PL3:n yläpuolelle, rasitus on jälleen suurimmillaan (ks. kuva 4.12.). Tämä havaitaan kuvan 4.9 mukaisten halkaisijamuutosten itseisarvojen kasvusta, kun vaaka-akselilla siirrytään lähelle kohtaa $x = 1800$ mm.



Kuva 4.12 Kuormitustilanne 3. Tarkasteltavan renkaan keskilinja on kohdassa $x = 1800$ mm. Tällöin PL3:een tuleva kuormitus on jälleen suurimmillaan.

4.4 Mittaustulokset teräksisillä rumpuputkilla

4.4.1 Teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm

Taulukoissa 4.1 ja 4.2 on esitetty halkaisijaltaan 800 mm teräsrummun kuormitukselta mitatut suurimmat pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Arvot on esitetty kullekin kuormitavalle akselille erikseen. Rummun peitesyvyys oli 750 mm. Taulukoihin 4.1–4.16 on korostettu kustakin mittaussuureesta saatu suurin yksittäinen tulos punaisella ja pienin tulos vihreällä värillä.

Taulukko 4.1 Suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset akselittain kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm.

Maksimi pystyhalkaisijan muutos [mm]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	-0,46	-0,63	-0,8	-0,67	-0,52	-0,6
PL2	-0,42	-0,75	-0,75	-0,64	-0,59	-0,62
PL3	-0,39	-0,75	-0,72	-0,58	-0,57	-0,63
Maksimi vaakahalkaisijan muutos [mm]						
PL1	0,44	0,55	0,71	0,6	0,48	0,55
PL2	0,38	0,67	0,69	0,59	0,53	0,56
PL3	0,42	0,75	0,75	0,6	0,6	0,65

Taulukosta 4.1 havaitaan, että suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset aiheutuivat joko vetoauton ensimmäisestä tai jälkimmäisestä teliakselista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos oli -0,80 mm (PL1) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla. Suurin mitattu vaakahalkaisijan muutos oli 0,75 mm (PL3) vetoauton ensimmäisellä ja jälkimmäisellä teliakselilla.

Taulukko 4.2 Suurimmat mitatut rummun laen venymät kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm.

Maksimi venymä aaltoprofiilin pohjalla [µm/m]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	19	25	31	28	20	21
PL2	30	45	43	43	35	39
PL3	15	19	19	19	17	20
Maksimi venymä aaltoprofiilin harjalla [µm/m]						
PL1	-70	-73	-87	-82	-65	-65
PL2	-49	-61	-54	-54	-47	-41
PL3	-51	-77	-69	-63	-65	-66

Taulukosta 4.2 havaitaan, että itseisarvoltaan suurimmat rummun laen venymät mitattiin rummun aaltoprofiilin harjalla olevista venymäliuskoista. Suurimmat venymät aiheutuivat pääsääntöisesti vetoauton teliakseleista ja pienimmät pääsääntöisesti vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu venymä oli $-87 \mu\text{m}/\text{m}$ (PL1) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla.

4.4.2 Teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm

Taulukoissa 4.3 ja 4.4 on esitetty halkaisijaltaan 1000 mm teräsrummun kuormituksesta mitatut suurimmat pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Arvot on esitetty kullekin kuormittavalle akselille erikseen. Rummun peitesyvyys oli 500 mm.

Taulukko 4.3 Suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset akseleittain kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm.

Maksimi pystyhalkaisijan muutos [mm]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	-0,91	-1,16	-1,22	-1,08	-0,96	-0,98
PL2	-0,93	-1,42	-1,46	-1,38	-1,23	-1,33
PL3	-0,72	-1,32	-1,4	-1,23	-1,09	-1,17
Maksimi vaakahalkaisijan muutos [mm]						
PL1	0,64	0,89	0,96	0,87	0,72	0,73
PL2	0,85	1,19	1,22	1,17	1,02	1,11
PL3	0,69	1,1	1,19	1,06	0,98	1,03

Taulukosta 4.3 havaitaan, että suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset aiheutuivat vetoauton jälkimmäisestä teliakselista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos oli $-1,46 \text{ mm}$ (PL2) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla. Suurin mitattu vaakahalkaisijan muutos oli $1,22 \text{ mm}$ (PL2) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla.

Taulukko 4.4 Suurimmat mitatut rummun laen venymät kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm.

Maksimi venymä aaltoprofiilin pohjalla [$\mu\text{m}/\text{m}$]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	14	19	20	21	17	21
PL2	50	60	54	62	56	58
PL3	37	60	62	60	51	59
Maksimi venymä aaltoprofiilin harjalla [$\mu\text{m}/\text{m}$]						
PL1	-121	-124	-122	-116	-110	-104
PL2	-40	-52	-47	-42	-45	-45
PL3	-51	-90	-81	-75	-71	-73

Taulukosta 4.4 havaitaan, että itseisarvoltaan suurimmat rummun laen venymät mitattiin rummun aaltoprofiilin harjalla olevista venymäliuskoista. Suurimmat venymät aiheutuivat pääsääntöisesti vetoauton ensimmäisestä teliakselista ja pienimmät pääsääntöisesti vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu venymä oli $-124 \mu\text{m/m}$ (PL1) vetoauton ensimmäisellä teliakselilla. Venymien arvoissa on merkittävästi suuruusvaihtelua poikkileikkauksittain. Rummun halkaisijan muutosten perusteella (ks. taulukko 4.3) näin suurta venymien suuruusvaihtelua ei pitäisi kuitenkaan olla. Tämä antaisi viitteitä siitä, että venymäliuskojen asennuksessa ei olisi onnistuttu täydellisesti.

4.4.3 Teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm

Taulukoissa 4.5 ja 4.6 on esitetty halkaisijaltaan 1400 mm teräsrummun kuormituksesta mitatut suurimmat pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Arvot on esitetty kullekin kuormittavalle akselille erikseen. Rummun peitesyvyys oli 500 mm.

Taulukko 4.5 Suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset akselleittäin kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm.

Maksimi pystyhalkaisijan muutos [mm]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	-1,03	-1,37	-1,23	-1,28	-1,19	-1,19
PL2	-0,94	-1,39	-1,34	-1,28	-1,17	-1,17
PL3	-0,92	-1,37	-1,34	-1,28	-1,2	-1,2
Maksimi vaakahalkaisijan muutos [mm]						
PL1	0,53	0,88	0,88	0,79	0,73	0,72
PL2	0,49	0,88	0,88	0,72	0,65	0,66
PL3	0,5	0,91	0,91	0,75	0,69	0,69

Taulukosta 4.5 havaitaan, että suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset aiheutuivat joko vetoauton ensimmäisestä tai jälkimmäisestä teliakselista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos oli -1,39 mm (PL2) vetoauton ensimmäisellä teliakselilla. Suurin mitattu vaakahalkaisijan muutos oli 0,91 mm (PL3) vetoauton molemmilla teliakseleilla.

Taulukko 4.6 Suurimmat mitatut rummun laen venymät kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm.

Maksimi venymä aaltoprofiilin pohjalla [$\mu\text{m}/\text{m}$]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	25	26	34	24	24	24
PL2	41	41	43	48	43	45
PL3	34	37	37	38	31	34
Maksimi venymä aaltoprofiilin harjalla [$\mu\text{m}/\text{m}$]						
PL1	-	-	-	-	-	-
PL2	-66	-80	-59	-81	-68	-63
PL3	-80	-95	-82	-89	-83	-79

Taulukosta 4.6 havaitaan, että itseisarvoltaan suurimmat rummun laen venymät mitattiin rummun aaltoprofiilin harjalla olevista venymäliuskoista. Suurimmat venymät aiheutuivat pääsääntöisesti vetoauton ensimmäisestä teliakselista ja pienimmät pääsääntöisesti vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu venymä oli -95 $\mu\text{m}/\text{m}$ (PL3) vetoauton ensimmäisellä teliakselilla. Venymien arvoissa on jonkin verran suuruusvaihtelua poikkileikkauksittain. Kuitenkin rummun halkaisijan muodonmuutokset (ks. taulukko 4.5) olivat keskenään hyvin samaa suuruusluokkaa, jolloin mitattujen rummun laen venymien tulisi myös olla keskenään samaa suuruusluokkaa. Tämä antaisi viitteitä siitä, että venymäliuskojen asennuksessa ei olisi onnistuttu täydellisesti. PL1:n venymäliuskan asennus aaltoprofiilin pohjalle oli epäonnistunut, joten siitä ei saatu mittaustuloksia.

4.4.4 Teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm

Taulukoissa 4.7 ja 4.8 on esitetty halkaisijaltaan 1800 mm teräsrummun kuormituksesta mitatut suurimmat pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Arvot on esitetty kullekin kuormittavalle akselille erikseen. Rummun peitesyvyys oli 900 mm.

Taulukko 4.7 Suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset akselittain kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm.

Maksimi pystyhalkaisijan muutos [mm]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	-0,39	-0,59	-0,66	-0,55	-0,51	-0,55
PL2	-0,41	-0,63	-0,69	-0,6	-0,5	-0,54
PL3	-0,34	-0,59	-0,62	-0,53	-0,57	-0,59
Maksimi vaakahalkaisijan muutos [mm]						
PL1	0,19	0,46	0,46	0,3	0,35	0,38
PL2	0,17	0,47	0,47	0,32	0,32	0,32
PL3	0,22	0,47	0,47	0,32	0,36	0,36

Taulukosta 4.7 havaitaan, että suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset aiheutuivat vetoauton jälkimmäisestä teliakselista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos oli -0,69 mm (PL2) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla. Suurin mitattu vaakahalkaisijan muutos oli 0,47 mm (PL2 ja PL3) vetoauton molemmilla teliakseleilla.

Taulukko 4.8 Suurimmat mitatut rummun laen venymät kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm.

Maksimi venymä aaltoprofiilin pohjalla [µm/m]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	17	22	15	24	18	14
PL2	18	20	17	22	15	17
PL3	27	28	25	34	23	26
Maksimi venymä aaltoprofiilin harjalla [µm/m]						
PL1	-39	-49	-43	-47	-49	-46
PL2	-55	-72	-67	-65	-60	-63
PL3	-36	-46	-45	-41	-41	-45

Taulukosta 4.8 havaitaan, että itseisarvoltaan suurimmat rummun laen venymät mitattiin rummun aaltoprofiilin harjalla olevista venymäliuskoista. Suurimmat venymät aiheutuivat pääsääntöisesti vetoauton ensimmäisestä teliakselista ja pienimmät pääsääntöisesti vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu venymä oli $-72 \mu\text{m}/\text{m}$ (PL2) vetoauton ensimmäisellä teliakselilla. Venymien arvoissa on jonkin verran suuruusvaihtelua poikkileikkauksittain. Esimerkiksi PL1:sta ja PL3:sta mitatut rummun laen venymät aaltoprofiilin pohjalla ovat samaa suuruusluokkaa keskenään, kun taas PL2:sta mitatut venymien arvot ovat selvästi suurempia. Kuitenkin rummun halkaisijan muodonmuutokset (ks. taulukko 4.8) olivat keskenään hyvin samaa suuruusluokkaa, jolloin mitattujen rummun laen venymien tulisi myös olla keskenään samaa suuruusluokkaa. Tämä antaisi viitteitä siitä, että venymäliuskojen asennuksessa ei olisi onnistuttu täydellisesti.

4.5 Mittaustulokset muovisilla rumpuputkilla

4.5.1 Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm

Taulukoissa 4.9 ja 4.10 on esitetty halkaisijaltaan 600 mm muovirummun kuormituksesta mitatut suurimmat pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Arvot on esitetty kullekin kuormittavalle akselille erikseen. Rummun peitesyvyys oli 650 mm.

Taulukko 4.9 Suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset akselleittäin kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm.

Maksimi pystyhalkaisijan muutos [mm]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	-1,18	-1,35	-1,55	-1,52	-1,27	-1,43
PL2	-0,81	-0,95	-0,94	-1,06	-0,83	-0,91
PL3	-0,65	-0,94	-0,95	-0,91	-0,73	-0,82
Maksimi vaakahalkaisijan muutos [mm]						
PL1	0,82	0,9	1,08	1,08	0,8	0,93
PL2	0,48	0,59	0,57	0,67	0,52	0,62
PL3	0,42	0,65	0,69	0,66	0,51	0,57

Taulukosta 4.9 havaitaan, että suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset aiheutuivat vetoauton jälkimmäisestä teliakselista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos oli $-1,55 \text{ mm}$ (PL1) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla. Suurin mitattu vaakahalkaisijan muutos oli $1,08 \text{ mm}$ (PL1) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla sekä perävaunun yksittäisakselilla. Tarkastelemalla tuloksia havaitaan, että PL1:ssä tapahtuneet halkaisijan muutokset ovat noin 1,5-kertaisia verrattuna kahdesta muusta poikkileikkauksesta mitattuihin. Tämä selittyy lähellä tien reunaa olevalla löyhemmällä rakenteella sekä luiskan läheisyydellä.

Taulukko 4.10 Suurimmat mitatut rummun laen venymät kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm.

Maksimi venymä rumpuputken laen sisäpinnalla [$\mu\text{m}/\text{m}$]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	291	334	372	491	407	445
PL2	161	184	141	218	165	176
PL3	124	146	125	184	121	142

Taulukosta 4.10 havaitaan, että rummun laen suurimmat venymät mitattiin poikkileikkauksesta 1. Tulos on hyvin linjassa mitattujen muodonmuutosten kanssa (ks. taulukko 4.9). Suurimmat venymät aiheutuivat perävaunun yksittäisakselista ja pienimmät pääsääntöisesti vetoauton etuakselista. Suurin mitattu venymä oli 491 $\mu\text{m}/\text{m}$ (PL1) perävaunun yksittäisakselilla.

4.5.2 Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm

Taulukoissa 4.11 ja 4.12 on esitetty halkaisijaltaan 600 mm muovirummun kuormituksesta mitatut suurimmat pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Arvot on esitetty kullekin kuormittavalle akselille erikseen. Rummun peitesyvyys oli 500 mm.

Taulukko 4.11 Suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset akselleittain kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm.

Maksimi pystyhalkaisijan muutos [mm]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	-0,79	-0,61	-0,83	-0,79	-0,66	-0,84
PL2	-1,57	-1,72	-2,16	-1,81	-1,59	-1,7
PL3	-1,06	-1,29	-1,41	-1,29	-1,04	-1,13
Maksimi vaakahalkaisijan muutos [mm]						
PL1	0,79	0,56	0,84	0,82	0,65	0,81
PL2	1,21	1,42	1,55	1,51	1,34	1,43
PL3	0,77	0,89	1,04	1,07	0,87	0,9

Taulukosta 4.11 havaitaan, että suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset aiheutuivat vetoauton jälkimmäisestä teliakselista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos oli -2,16 mm (PL2) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla. Suurin mitattu vaakahalkaisijan muutos oli 1,55 mm (PL2) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla. Tuloksia tarkastelemalla havaitaan, että PL2:sta mitatut halkaisijamuutokset olivat suurimpia.

Taulukko 4.12 Suurimmat mitatut rummun laen venymät kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etu-akseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm.

Maksimi venymä rumpuputken laen sisäpinnalla [$\mu\text{m}/\text{m}$]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	389	400	493	437	400	421
PL2	397	415	444	563	477	534
PL3	188	275	283	353	274	287

Taulukosta 4.12 havaitaan, että rummun laen suurimmat venymät mitattiin pääsääntöisesti poikkileikkauksesta 2. Tulos on hyvin linjassa suurimpien mitattujen muodonmuutosten kanssa, jotka mitattiin samasta poikkileikkauksesta (ks. taulukko 4.11). Suurimmat venymät aiheutuivat perävaunun yksittäisakselista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Suurin mitattu venymä oli 563 $\mu\text{m}/\text{m}$ (PL2) perävaunun yksittäisakselilla.

4.5.3 Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm

Taulukoissa 4.13 ja 4.14 on esitetty halkaisijaltaan 800 mm muovirummun kuormituksesta mitatut suurimmat pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Arvot on esitetty kullekin kuormittavalle akselille erikseen. Rummun peitesyvyys oli 800 mm.

Taulukko 4.13 Suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset akselleittäin kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm.

Maksimi pystyhalkaisijan muutos [mm]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	-0,8	-1,04	-0,95	-0,95	-0,95	-0,89
PL2	-0,58	-0,92	-0,95	-0,91	-0,82	-0,82
PL3	-0,42	-0,8	-0,83	-0,74	-0,67	-0,68
Maksimi vaakahalkaisijan muutos [mm]						
PL1	0,69	0,94	0,86	0,86	0,85	0,78
PL2	0,45	0,78	0,8	0,8	0,72	0,71
PL3	0,27	0,5	0,54	0,49	0,42	0,43

Taulukosta 4.13 havaitaan, että suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset aiheutuivat vetoauton teliakseleista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos oli -1,04 mm (PL1) vetoauton ensimmäisellä teliakselilla. Suurin mitattu vaakahalkaisijan muutos oli 0,94 mm (PL1) vetoauton ensimmäisellä teliakselilla.

Taulukko 4.14 Suurimmat mitatut rummun laen venymät kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm.

Maksimi venymä rumpuputken laen sisäpinnalla [$\mu\text{m}/\text{m}$]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	111	142	108	163	148	131
PL2	109	116	83	178	120	100
PL3	99	108	104	156	96	97

Taulukosta 4.14 havaitaan, että rummun laen suurimmat venymät mitattiin pääsääntöisesti poikkileikkauksesta 1. Tulos on hyvin linjassa suurimpien mitattujen muodonmuutosten kanssa, jotka mitattiin samasta poikkileikkauksesta (ks. taulukko 4.11). Suurimmat venymät aiheutuivat perävaunun yksittäisakselista ja pienimmät pääsääntöisesti vetoauton etuakselista. Suurin mitattu venymä oli 178 $\mu\text{m}/\text{m}$ (PL2) perävaunun yksittäisakselilla.

4.5.4 Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm

Taulukoissa 4.15 ja 4.16 on esitetty halkaisijaltaan 800 mm muovirummun kuormituksesta mitatut suurimmat pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset sekä rummun laen venymät kolmesta poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Arvot on esitetty kullekin kuormittavalle akselille erikseen. Rummun peitesyvyys oli 200 mm.

Taulukko 4.15 Suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset akselittain kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm.

Maksimi pystyhalkaisijan muutos [mm]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	-6,82	-7,2	-7,21	-7,21	-7,21	-7,22
PL2	-7,51	-9,76	-9,56	-8,87	-8,43	-8,51
PL3	-9,98	-11,42	-11,65	-10,9	-10,44	-11,03
Maksimi vaakahalkaisijan muutos [mm]						
PL1	4,89	5,81	6,05	5,87	5,33	5,39
PL2	5,75	7,23	7,17	6,66	6,47	6,56
PL3	8,04	9,38	9,36	8,7	8,29	8,69

Taulukosta 4.15 havaitaan, että suurimmat mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset aiheutuivat vetoauton teliakseleista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos oli -11,65 mm (PL3) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla. Suurin mitattu vaakahalkaisijan muutos oli 9,38 mm (PL3) vetoauton ensimmäisellä teliakselilla.

Taulukko 4.16 Suurimmat mitatut rummun laen venymät kolmesta rummun poikkileikkauksesta PL1, PL2 ja PL3. Akselit vasemmalta alkaen: vetoauton etuakseli, vetoauton 2-akselinen teli, perävaunun yksittäisakseli ja perävaunun 2-akselinen teli. Muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm.

Maksimi venymä rumpuputken laen sisäpinnalla [$\mu\text{m}/\text{m}$]						
Akseli	75 kN	210 kN_1	210 kN_2	100 kN	180 kN_1	180 kN_2
PL1	2019	2285	2370	2340	2099	2138
PL2	-	-	-	-	-	-
PL3	2180	2447	2489	2330	2255	2357

Taulukosta 4.16 havaitaan, että rummun laen suurimmat venymät mitattiin poikkileikkauksesta 3. PL2:n venymäliuskan asennus oli epäonnistunut, joten siitä ei saatu mittaustuloksia. Suurimmat venymät aiheutuivat perävaunun yksittäisakselista ja pienimmät vetoauton etuakselista. Suurin mitattu venymä oli 2489 $\mu\text{m}/\text{m}$ (PL3) vetoauton jälkimmäisellä teliakselilla.

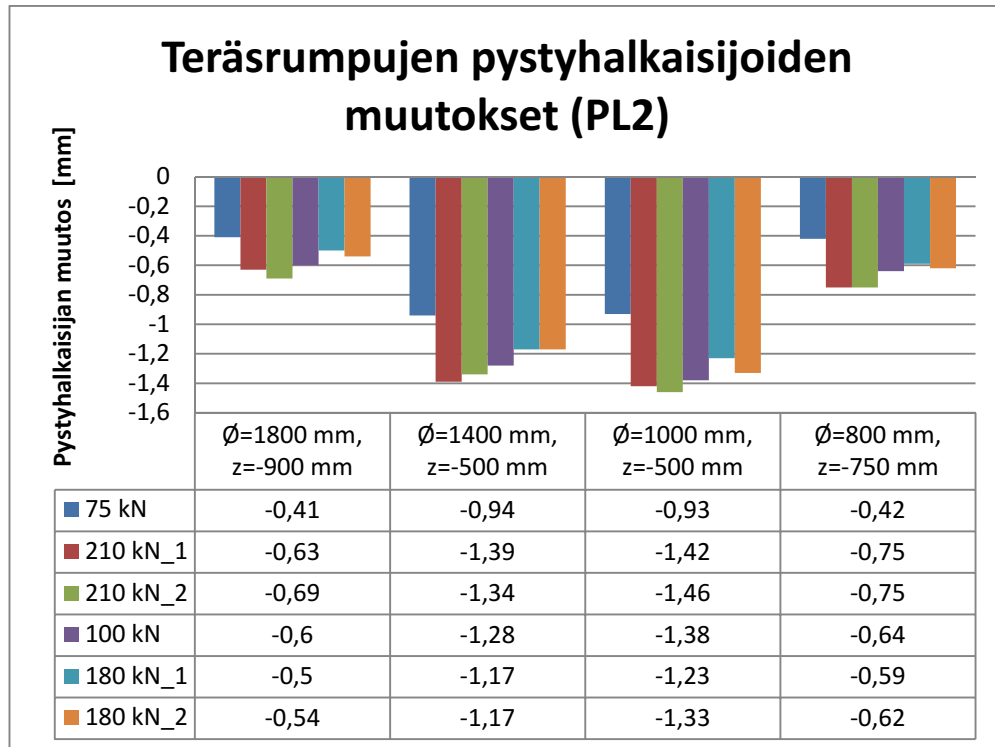
4.6 Yhteenveto mittaustuloksista

Kappaleessa 4.5 on esitetty suurimpia mitattuja rumpujen muodonmuutoksia kaikista instrumentoiduista poikkileikkauksista. Tällä tarkastelutavalla esitettyjen tulosten perusteella ei kuitenkaan saa vielä kovin hyvää kokonaiskuvaa eri rumpuihin muodostuvista rasituksista. Rumpujen keskinäiseen vertailuun valitaan seuraavassa rummun pystyhalkaisijan muutoksen arvot, sillä halkaisijan muutoksista saadut tulokset olivat johdonmukaisia ja mittaukset luotettavia. Rumpujen laesta mitattujen venymien vertailuun ei päädytty, sillä tulosten tulkintaan ja asennusten onnistumiseen liittyi liikaa epävarmuustekijöitä. Lisäksi pelkästään rumpujen erilaiset materiaalit ja sisäpuolen profiilit aiheuttavat eroja mitattuihin venymiin.

Rumpujen vertailuun valitaan PL2:sta saadut arvot, sillä kyseinen poikkileikkaus sijaitsee kaikissa kuormitustapauksissa tien reunassa olevan ajouran kohdalla, jolloin kyseiseen kohtaan tulee myös todellisuudessa eniten kuormitusta. Lisäksi kyseisestä kohdasta oli kaikissa tapauksissa mahdollista tehdä ylityksiä poikkileikkauksen molemmilta puolilta, jolloin voitiin varmistua, että todelliset maksimiarvot saatiin mitattua.

4.6.1 Teräsrummut

Kuormitettuja teräsrumpuja oli yhteensä neljä kappaletta. Rumpujen halkaisijat olivat 1800, 1400, 1000 ja 800 mm. Peitesyvyydet olivat vastaavasti 900, 500, 500 ja 750 mm. Halkaisijaltaan suurin teräsrumpu sijaitsi päällystetyllä tiellä, muut sorateillä. Teräsrummuista mitatut suurimmat pystyhalkaisijoiden muutokset poikkileikkauksesta 2 on esitetty kuvassa 4.13.



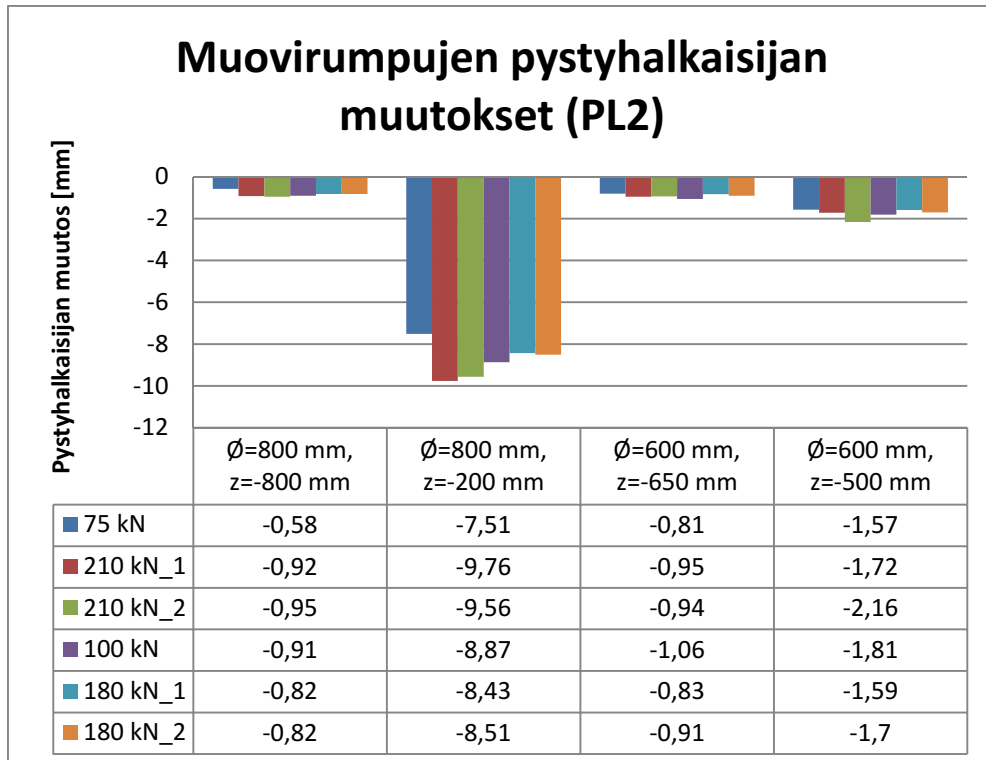
Kuva 4.13 Teräsrumpujen itseisarvoltaan suurimmat mitatut pystyhalkaisijan muutokset poikkileikkauksesta 2. Alareunassa olevan taulukon ylärivillä on esitetty rumpujen halkaisijat sekä peitesyvyydet millimetreissä. Taulukon vasemmalla puolella on esitetty kuormittavat akselit.

Kuvasta 4.13 havaitaan, että kuormittavan akselin massa korreloi selkeästi rummun pystyhalkaisijan muutosten suuruuteen eli mitä raskaampi akseli, sitä suurempi pystyhalkaisijan muutos. Vetoauton 210 kN painoisen telin akselit saavat aikaan eniten halkaisijan muutosta kaikissa kuormitetuissa teräsrummuissa ja vetoauton etuakseli vähiten.

Toinen selkeä havainto on, että rummun peitesyvyys näyttäisi vaikuttavan merkittävästi muodonmuutosten suuruuteen. Peitesyvyyden ollessa 500 mm suurimmat mitatut pystyhalkaisijan muutokset ovat 1,4 mm luokkaa (halkaisijaltaan 1400 mm ja 1000 mm), kun taas peitesyvyyden kasvaessa 750 mm:iin suurimmat mitatut halkaisijan muutokset lähes puolittuvat.

4.6.2 Muovirummut

Kuormitettuja muovirumpuja oli yhteensä neljä kappaletta. Rumpujen halkaisijat olivat 600 ja 800 mm. Halkaisijaltaan 800 mm rumpujen peitesyvyydet olivat 800 mm ja 200 mm. Halkaisijaltaan 600 mm rumpujen peitesyvyydet olivat 650 mm ja 500 mm. Kaikki kuormitetut muovirummut sijaitsivat sorateillä. Muovirummuista mitatut suurimmat pystyhalkaisijan muutokset poikkileikkauksesta 2 on esitetty kuvassa 4.14.



Kuva 4.14 Muovirumpujen itseisarvoltaan suurimmat mitatut pystyhalkaisijan muutokset poikkileikkauksesta 2. Alareunassa olevan taulukon ylärivillä on esitetty rumpujen halkaisijat sekä peitesyvyydet millimetreissä. Taulukon vasemmalla puolella on esitetty kuormittavat akselit.

Kuvaa 4.14 tarkastelemalla voidaan tehdä samat havainnot kuin teräsrumpujen tapauksessa luvussa 4.6.1, eli akselikuorma ja rumpun peitesyvyys korreloivat vahvasti rummussa tapahtuvaan muodonmuutokseen. Peitesyvyyden merkitys on hyvin havaittavissa samalta tieosuudelta mitatuissa halkaisijaltaan 800 mm muovirumpujen tuloksissa. Peitesyvyyden ollessa rumpun halkaisijan verran, pystysuuntaiset halkaisijan muutokset ovat millimetrin luokkaa. Kun peitesyvyys pienenee halkaisijan neljäsosaan, pystyhalkaisijan muutokset kymmenkertaistuvat ja ovat kymmenen millimetrin luokkaa.

Sama ilmiö on havaittavissa halkaisijaltaan 600 mm muovirummuissa, jotka myös sijaitsivat samalla tieosuudella muutaman kilometrin päässä toisistaan. Syvemmällä olevan rumpun peitesyvyys on noin 650 mm ja suurimmat mitatut pystyhalkaisijan muutokset millimetrin luokkaa. Peitesyvyyden pienentyessä 500 mm:iin rumpun pystyhalkaisijan muutokset kaksinkertaistuvat yli kahteen millimetriin.

Teräs- ja muovirumpujen pystyhalkaisijoiden muutoksia vertailemalla näyttäisi siltä, että peitesyvyys vaikuttaa ratkaisevasti rumpuun kohdistuvien rasiusten suuruuteen. Rumpun halkaisijalla tai materiaalilla ei sitä vastoin näyttäisi olevan niin suurta merkitystä. Toisaalta pitää ottaa huomioon, että peitesyvyyden määrittely ei onnistunut aivan millimetrin tarkkuudella vaan lähinnä 10 cm tarkkuudella. Lisäksi teiden rakenteet poikkesivat toisistaan selvästi, joten pelkästään näiden mittausten perusteella ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä peitesyvyyden vaikutuksesta.

5 Mittauskohteiden mallintaminen

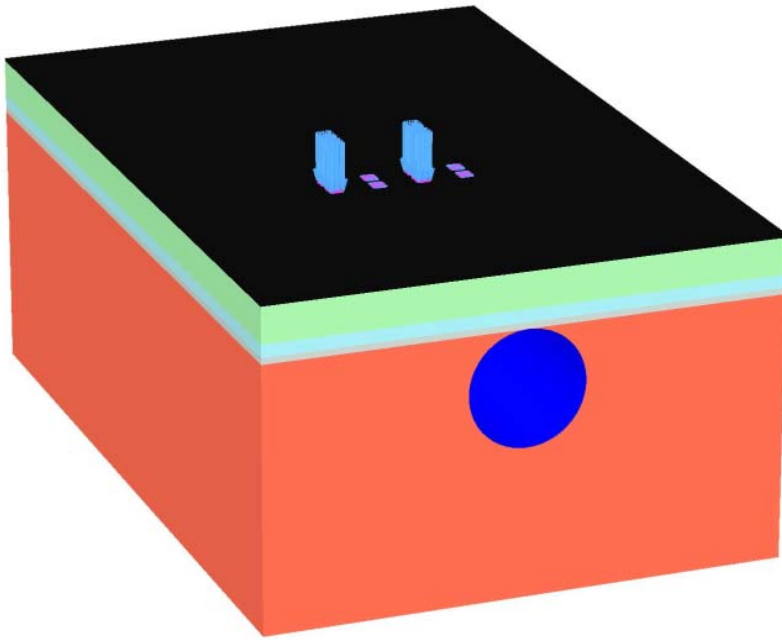
5.1 Mallinnusohjelmisto ja mallinnuksen periaate

5.1.1 Mallin perusrakenne

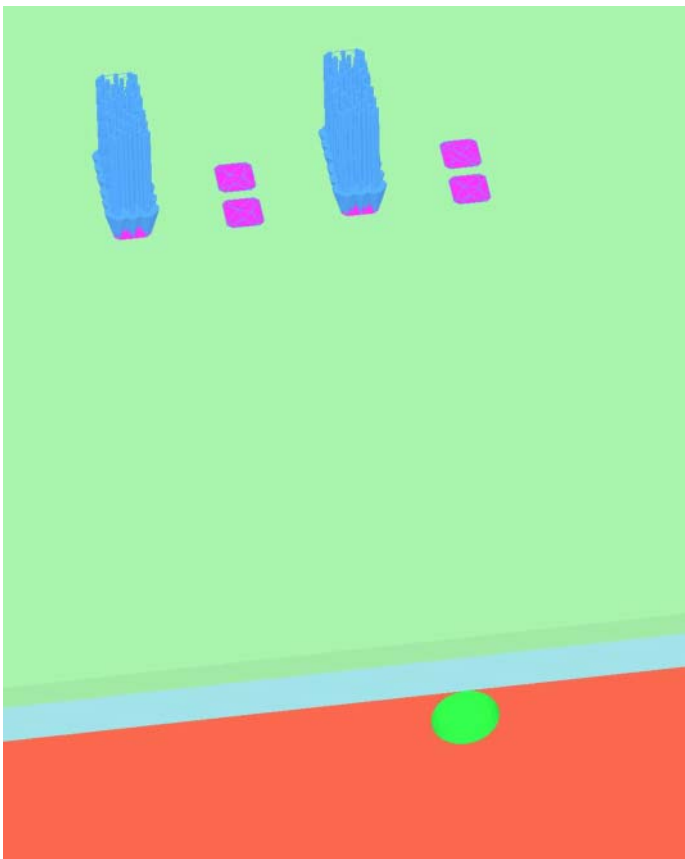
Tässä tutkimuksessa käytetty rakennemalli on tehty hollantilaisella PLAXIS 3D 2012-ohjelmistolla. PLAXIS on elementtimenetelmään perustuva, ensisijaisesti geoteknisten ongelmien (painumat, stabiliteetti, deformaatiot jne.) ratkaisemiseen kehitetty ohjelmisto.

Tämän tutkimuksen painopiste oli tierummun käyttäytymisen kuvaamisessa, joten tierakenne mallinnettiin kolmiulotteisena, kuutiomaisena elementtinä eikä tien luisia tai kaltevuuksia huomioitu (kuva 5.1). Tierummun mallintamiseen tutkittiin eri vaihtoehtoja ja lopulta päädyttiin käyttämään päistään avointa sylinterigeometriaa. Tälle geometriaelementille määritettiin parametrisointi lopulta laattaelementin (Plate) avulla. Näin materiaalille voitiin antaa lineaarielastisesti käyttäytyvä materiaali-malli sekä haluttu materiaalin ainepaksuus.

Kuormituksen mallinnuksen lähtökohtana on käytetty kaksiakselista teliä, jonka kokonaisuudessa on 21 tonnia telivälin ollessa 1,3 m. Telistä on mallinnettu telin toisen päädyn renkaiden kosketuspinnat. Rengastuksena on käytetty paripyörää ja kosketuspaineena taulukossa 3.1 esitettyjä mitattuja renkaiden ilmanpaineita vastaavaa painetta 900 kPa. Kuorman on oletettu jakautuvan tasan telin molemmille akseleille ja edelleen kuorman on oletettu olevan tasaisesti jakautunut koko renkaan kosketuspinnan alueella. Mallissa kuormittavana elementtinä toimii laattaelementti (Plate). Renkaan kosketuspintaa simuloinut laattaelementti luotiin siten, että kosketuspinnasta muodostui kahdeksankulmainen elementti kuvan 5.2 mukaisesti. Neliskulmaista elementtiä ei käytetty, koska teräviin kulmiin saattaa muodostua jännityskeskittymiä, jotka vääristävät mallinnustuloksia. Kuormituksina tarkasteltiin kahta kuormitustilannetta: ensimmäisessä vaiheessa toinen telin akseleista on tismalleen rummun laen kohdalla ja toisessa vaiheessa rummun laen kohta oli tismalleen kuormittavien akseleiden välissä. Kuormitustilanteista ensimmäinen todettiin rummun käyttäytymisen kannalta määräävämmäksi, joten mallinnustulokset on esitetty ensimmäisen kuormitustilanteen mukaisina.



Kuva 15. Tutkimuksessa käytetty rakennemalli; rummun pituudeksi oli vakioitu 12 m ja mallin mitta tien pituussuunnassa oli 8 m.



Kuva 5.2. Paripyörillä varustetun kaksiakselisen telin mallintaminen. Kuvassa näkyvät myös molemmat tarkastellut kuormitustilanteet renkaan kosketuspintojen osalta.

5.1.2 Rakenteiden mallintamisessa käytetyt materiaaliparametrit

Rummut mallinnettiin sylinterinmuotoisina lineaarielastisina laattaelementteinä. Myös renkaan kosketuspintaa simuloiva laattaelementti sekä yhdessä koekohteessa ollut päällystekerros mallinnettiin lineaarielastisen materiaalmallin avulla, joten näiden materiaalien jäykkyys määräytyy kimmomoduulin E ja Poissonin luvun ν avulla. Kaikkien edellä mainittujen rakenneosien käyttäytyminen kuvattiin isotrooppisena. Taulukossa 5.1 on esitetty lineaarielastisen materiaalmallin avulla kuvattujen mallin komponenttien materiaaliparametrit. Materiaaliparametrien arvot on valittu aikaisemmissa tutkimuksissa saadun kokemuksen perusteella.

Taulukko 5.1. Lineaarielastisen materiaalmallin avulla mallinnettujen rakenneosien materiaaliparametrit.

Materiaali	E' (MPa)	ν (-)	d (mm)
Renkaan kosketuspinta (laattaelementti)	1000	0,495	10
Päällystekerros	800	0,3	-
Muovirumpu	850	0,45	15
Teräsrumpu	210 000	0,3	1,5

Tien rakennekerroksille käytettiin Hardening Soil -materiaalmallia (HS). HS-malli kuvaa materiaalia isotrooppisen myötölujittumisen avulla. Toisin sanottuna materiaalin myötöpinta ei ole kiinteä, kuten esim. MC-mallissa, vaan myötöpinta voi laajeta joko deviatorisen kuormituksen (leikkausmyötölujeneminen) vaikutuksesta tai/ja hydrostaattisen akselin suunnassa (kokoonpuristuvuusmyötölujeneminen). Varsinaisen deviatorinen myötöpinta kuitenkin perustuu lähtökohdaltaan Mohr-Coulombin myötöpintaan, joten maan lujuutta kuvataan samoilla parametreilla kuin MC-mallissa. Sen sijaan materiaalin jäykkyttä kuvataan kolmen moduulin, ensikuormituksen sekanttimoduulin E_{50} , ödometrimoduulin E_{oed} ja kuorman palautuksen tai toistokuormituksen sekanttimoduulin E_{ur} , sekä materiaalin jännitystilariippuvuutta kuvaavan jännitysekspONENTIN m avulla. (Brinkre et. al. 2012) Rakennekerroksille käytetyt materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. Tien rakennekerroksille käytetyt materiaaliparametrit.

Parametri		c'	ϕ'	ψ	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	K_0^{nc}
Yksikkö		kPa	°	°	MPa	MPa	MPa	-
Teräsrummut								
Ø 1800, z= -900 mm	Kerros 1	10	45	15	275	265	550	0,32
	Kerros 2	10	45	15	225	210	450	0,33
Ø 1400, z= -500 mm	Kerros 1	20	50	20	275	265	550	0,3
	Kerros 2	10	45	15	225	210	450	0,32
Ø 1000, z= -500 mm	Kerros 1	20	50	20	275	265	550	0,3
	Kerros 2	10	45	15	200	180	400	0,31
Ø 800, z= -750 mm	Kerros 1	20	50	20	225	210	450	0,3
	Kerros 2	10	45	15	200	180	400	0,31
	Kerros 3	8	40	10	100	85	200	0,36
Muovirummut								
Ø 800, z= -800 mm	Kerros 1	15	45	15	150	150	300	0,33
	Kerros 2	8	40	10	150	150	300	0,37
Ø 800, z= -200 mm	Kerros 1	20	50	20	275	265	550	0,32
	Kerros 2	10	45	15	200	200	400	0,36
Ø 600, z= -650 mm	Kerros 1	10	45	15	200	185	400	0,32
	Kerros 2	10	45	15	175	160	350	0,33
Ø 600, z= -500 mm	Kerros 1	10	45	15	250	230	500	0,32
	Kerros 2	10	45	15	200	185	400	0,32

Pohjamaalle käytettiin Mohr-Coulomb-materiaalimallia (MC). MC-malli on joko lineaarielastinen tai ideaaliplastinen materiaalimalli riippuen siitä, kummalla puolella myötöpintaa jännityspolku on. Myötöpinnan sisäpuolella materiaali käyttäytyy lineaarielastisesti. Myötöpinnan ulkopuolella materiaali käyttäytyy ideaaliplastisesti, eli kaikki muodonmuutokset ovat pysyviä eikä materiaaliin mobilisoituva jännitys kasva. Tällöin materiaalia kuvataan yleensä leikkauskestävyyskulman ϕ , koheesion c ja dilataatiokulman ψ avulla. Materiaalin ollessa suljetussa tilassa PLAXIS kuitenkin mahdollistaa sen, että edellä mainittujen lujuusparametrien asemesta voidaan käyttää suljettua leikkauslujuutta s_u . (Brinkrewe et. al. 2012) Tässä tutkimuksessa käytettiin jälkimmäistä vaihtoehtoa. Koekohteiden pohjamaakerrosten materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 5.3.

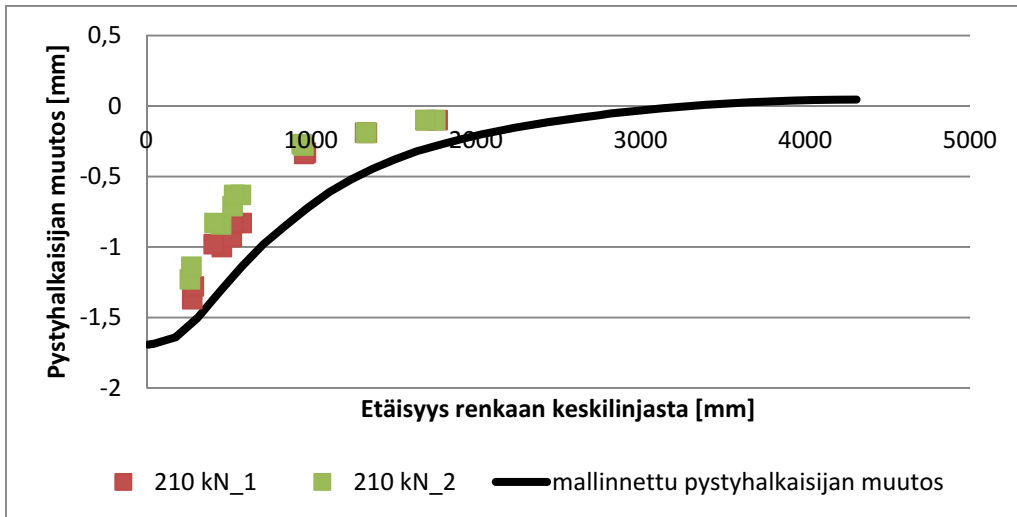
Taulukko 5.3. Mallinnettujen rumpukohteiden pohjamaakerrosten materiaali-parametrit.

Parametri	E'	ν	s_u	s_u increment
Yksikkö	MPa	-	kPa	kPa/m
Teräsrummut				
∅ 1800, z= -900 mm	70	0,4	50	1,5
∅ 1400, z= -500 mm	70	0,4	50	1,5
∅ 1000, z= -500 mm	35	0,4	35	1,5
∅ 800, z= -750 mm	50	0,4	35	1,5
Muovirummut				
∅ 800, z= -800 mm	45	0,4	35	1,5
∅ 800, z= -200 mm	60	0,4	40	1,5
∅ 600, z= -650 mm	60	0,4	40	1,5
∅ 600, z= -500 mm	80	0,4	50	1,5

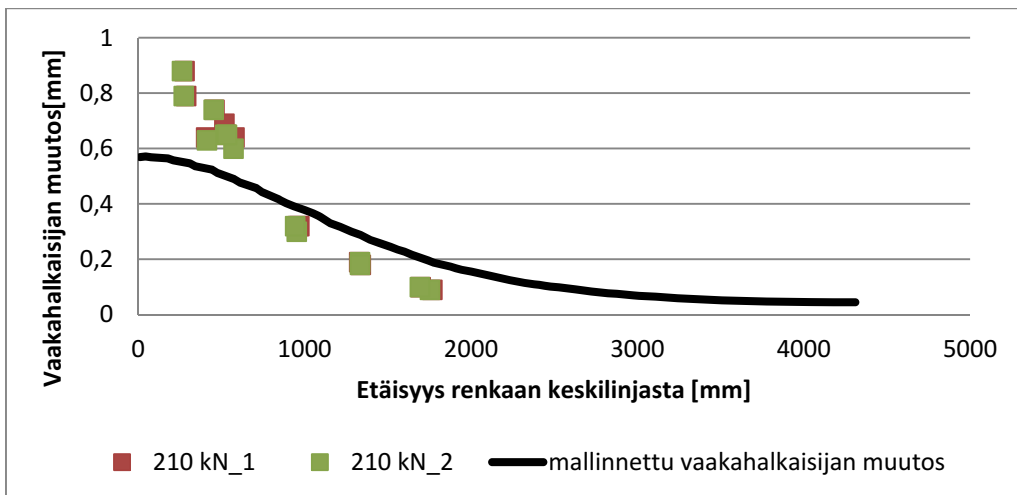
5.2 Koekohteiden mallinnustulokset

5.2.1 Koekohteiden mittaustulosten ja mallinnetun rummun käyttäytymisen vertailu

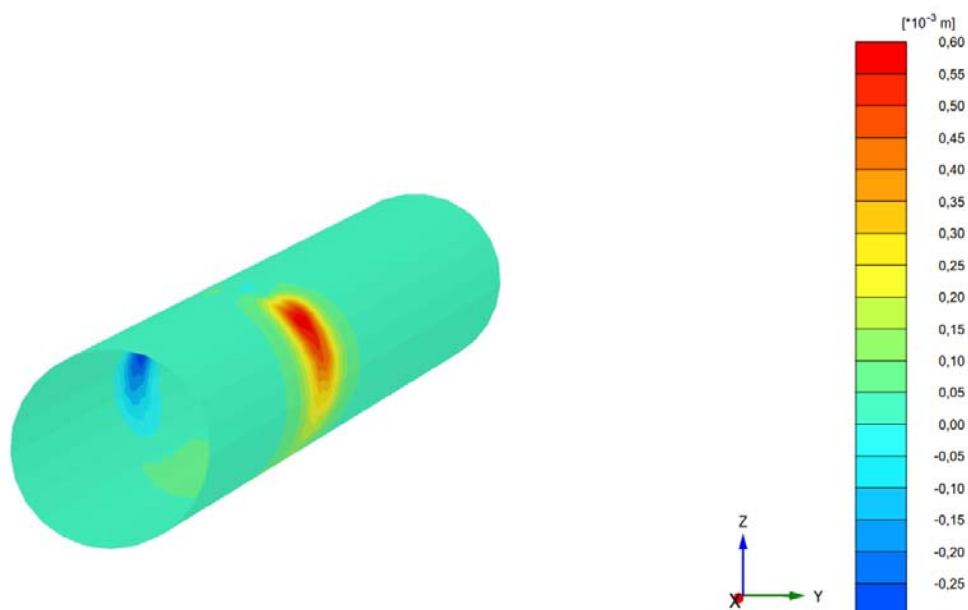
Mallinnuksen ensimmäisessä vaiheessa pyrittiin mallintamaan tierummun käyttäytymistä kohteissa, joissa rummun muodonmuutuskäyttäytyminen ajoneuvon ylityksen aikana tunnetaan. Kaikki 8 mitattua koekohteita mallinnettiin. Mallinnustulosten tarkastelussa keskityttiin ensivaiheessa rummun pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutoksiin. Kuvassa 5.3 on esitetty esimerkki mallinnetusta pystyhalkaisijan muutoksesta verrattuna vastaavaan mitattuun tulokseen. Tulokset vastaavat toisiaan verrattain hyvin. Kuvassa 5.4 on esitetty kuvaa 5.3 vastaavat vaakahalkaisijan muutokset. Vaakahalkaisijoiden muutoksissa oli keskimäärin enemmän vaihtelua. Tämä johtunee ainakin osin siitä, että laskentamalli on luonteeltaan staattinen. Mallinnetuissa tapauksissa rumpuputki on myös käytännössä kokonaan pohjamaassa, kun taas todellisuudessa rumpujen lähiympäristössä on todennäköisesti käytetty myös karkeampaa, ja paremmin jännitysmuutoksia kestävää, materiaalia. Tällöin vaakahalkaisijan maksimuutos ei mallinnetussa tuloksessa tapahdu tismalleen rummun puolivälin kohdassa, mistä vaakahalkaisijan muutokset on mallinnustuloksista määritetty, vaan siirtyy jonkin verran ylöspäin (kuva 5.5). Kuvia 5.3 ja 5.4 vastaavat kuvat on esitetty kaikkien rumpukohteiden osalta liitteessä 1. Yhteenveto mallinnettujen ja mitattujen pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutosten vertailusta on esitetty taulukossa 5.4.



Kuva5.3. Esimerkki rummun mitatusta ja mallinnetusta pystyhalkaisijan muutoksesta, teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm.



Kuva5.4. Esimerkki rummun mitatusta ja mallinnetusta vaakahalkaisijan muutoksesta, teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm.



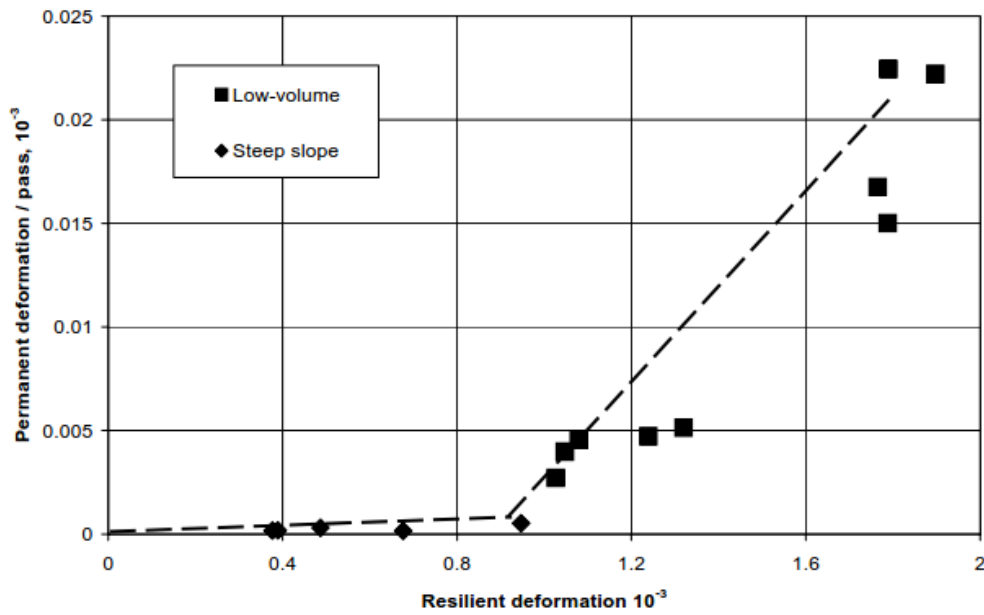
Kuva 5.5. Esimerkki mallinnetusta rummun vaakahalkaisijan muutoksesta, muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm.

Taulukko 5.4. Yhteenveto mitatuista ja mallinnetuista rummun pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutoksista.

	Pystyhalkaisijan muutos (mm)		Vaakahalkaisijan muutos (mm)	
	Mitattu	Mallinnettu	Mitattu	Mallinnettu
Teräsrummut				
∅ 1800, z= -900 mm	-0,66	-0,70	0,46	0,33
∅ 1400, z= -500 mm	-1,37	-1,69	0,88	0,57
∅ 1000, z= -500 mm	-1,46	-1,75	1,22	1,09
∅ 800, z= -750 mm	-0,80	-0,62	0,71	0,72
Muovirummut				
∅ 800, z= -800 mm	-1,04	-1,56	0,94	0,74
∅ 800, z= -200 mm	-7,21	-6,81	6,05	1,40
∅ 600, z= -650 mm	-1,55	-1,90	1,08	0,76
∅ 600, z= -500 mm	-2,16	-2,33	1,51	0,68

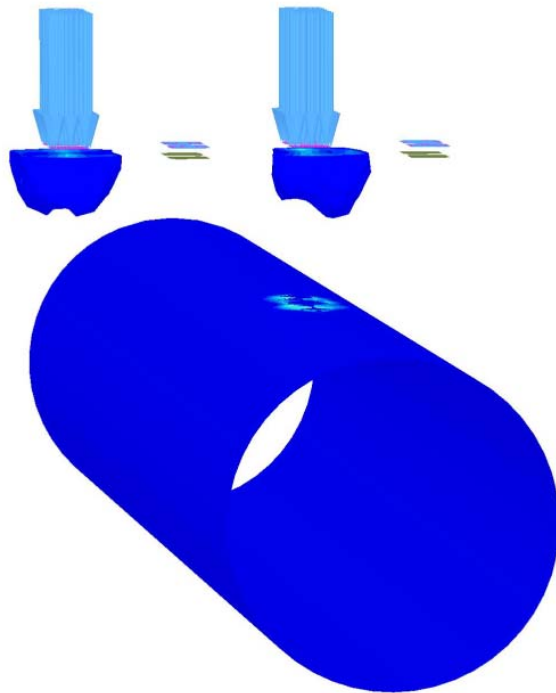
5.2.2 Maan käyttäytyminen rummun ympärillä

Kun mallinnetun ajoneuvon ylityksen aikana tapahtuvan rummun käyttäytymisen todettiin vastaavan melko hyvin koekohteilta mitattua käyttäytymistä, tutkittiin rummun ympärillä olevan maan käyttäytymistä rakennekerroksiin ja pohjamaahan mobilisoiduvien leikkausmuodonmuutosten avulla. Tarkastelun tarkoituksena oli arvioida, syntykö maakerroksiin rummun ympärillä alueita, joihin toistokuormitustilanteessa alkaisi todennäköisesti kertyä pysyviä muodonmuutoksia. Leikkausmuodonmuutoksen kriittisenä tasona on käytetty arvoa 0,2 %. Arvo perustuu Korkiala-Tantun (2008) väitöskirjassaan saamaan tulokseen (kuva 5.6), jonka mukaisesti pysyvän muodonmuutoksen kertymisnopeus HVS-kokeissa alkaa kasvaa, kun palautuvan muodonmuutoksen arvo ylittää arvon 0,001. Hardening Soil-materiaalimallissa puolestaan leikkausmuodonmuutos γ_s puolestaan vastaa suurinta päävenymää suhteessa $\gamma_s \approx -2 \epsilon_1$.

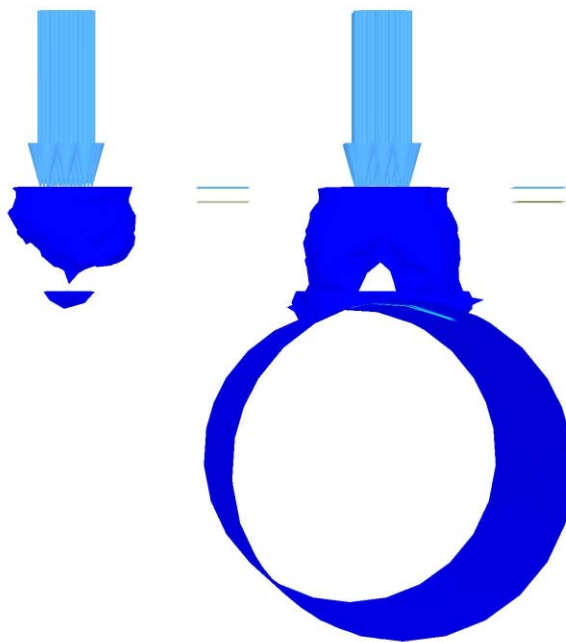


Kuva 5.6. HVS-kokeissa saatu yhteys palautuvan muodonmuutoksen tason ja pysyvien muodonmuutosten kertymisnopeuden välillä. (Korkiala-Tanttu 2008)

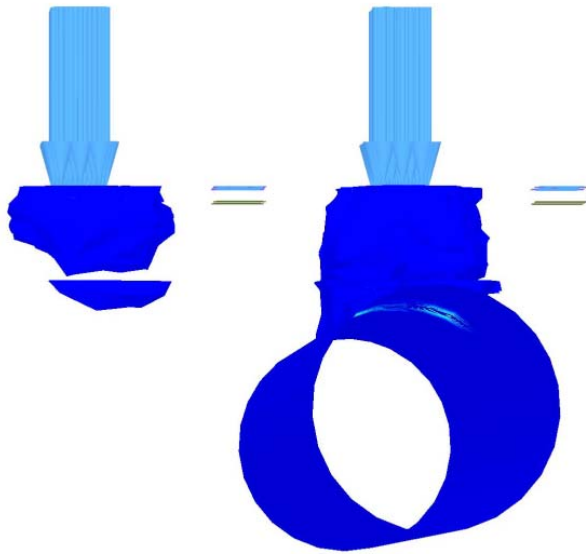
Kuvissa 5.7–5.14 on esitetty mallinnettujen rumpukohteiden leikkausmuodonmuutostasot. Kuvissa sinisellä merkitty pinta kuvaa arvoa 0,2 %, joten sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason. Kuvassa 5.7. on esitetty rumpukohteista ainoa, joka sijaitsee päällystetyllä tiellä. Tästä syystä leikkausmuodonmuutosten syvyysvaikutus on tässä kohteessa pieni verrattuna muihin koekohteisiin, jotka sijaisivat sorateillä. Muutoinkin teräsrumpukohteilla kriittiset leikkausmuodonmuutostasot näyttäisivät jäävän rummun yläosan tasolle.



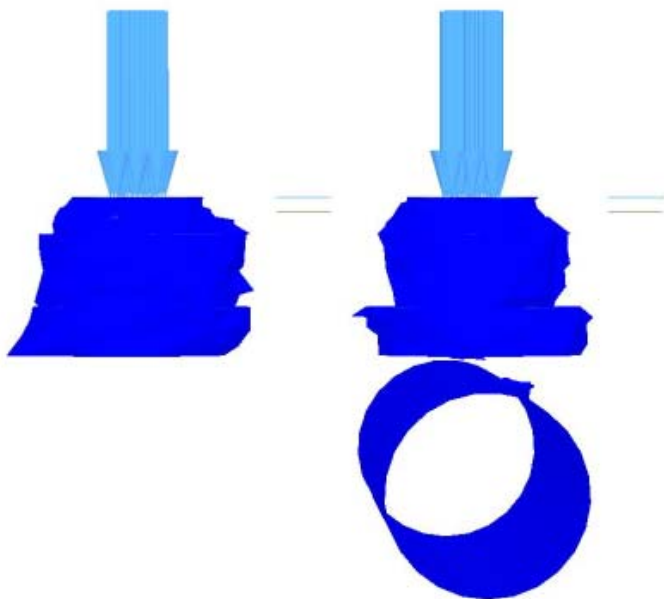
Kuva 5.7. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostasotaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.



Kuva 5.8. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostasotaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.

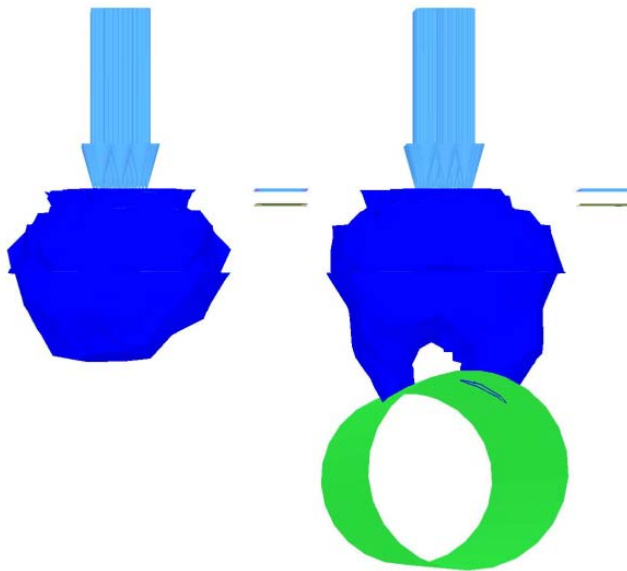


Kuva 5.9. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.

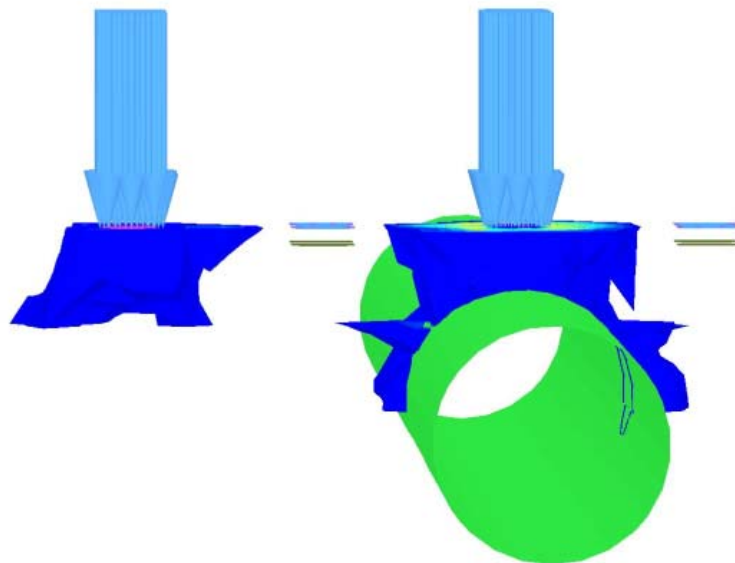


Kuva 5.10. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.

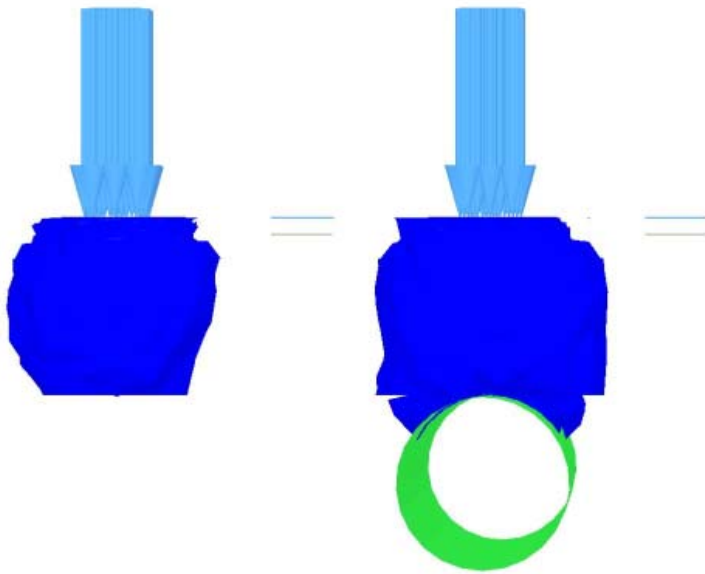
Muovirumpukohteissa kriittiseksi otaksuttu leikkausmuodonmuutostaso näyttää myös jäävän rummun yläosan tasolle, kun rummun peitesyvyys on samaa suuruusluokkaa rummun halkaisijan kanssa. Toisaalta taas erittäin alhaisella peitesyvyydellä kriittisten leikkausmuodonmuutosten alue näyttäisi ulottuvan rummun lähiympäristössä sen puolivälin tasolle (kuva 5.12). Ilmiö indikoi materiaalin löyhtymistä rummun ympärillä, jonka seurauksena rummun poikkileikkaus voi muuttua pyöreästä ovaaliksi, eli rumpu painuu kasaan.



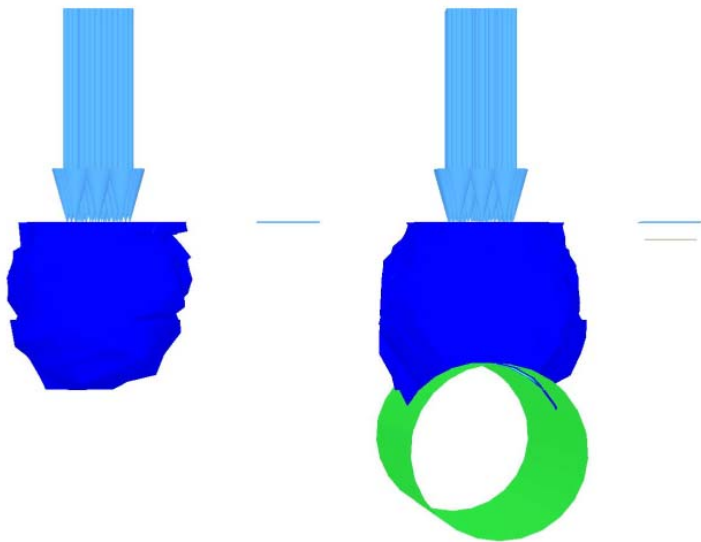
Kuva 5.11. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.



Kuva 5.12. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.



Kuva 5.13. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.



Kuva 5.14. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.

Mallinnettujen leikkausmuodonmuutosten perusteella voidaan todeta, että valtaosassa rumpuja kriittinen alue ei ulotu rummun yläosan tasoa syvemmälle. On kuitenkin huomioitava, että koekohteita simuloivissa malleissa osa rummun ja ympäröivän maan käyttäytymisen kannalta kriittisistä tekijöistä jäi huomioimatta. Tällaisia tekijöitä ovat mm. erittäin heikko pohjamaa sekä rummun peitesyvyyden vaikutuksen simulointi vakioituissa maaperäolosuhteissa. Eri tekijöiden vaikutuksia on simuloitu kappaleessa 5.3 esitetyn mukaisesti.

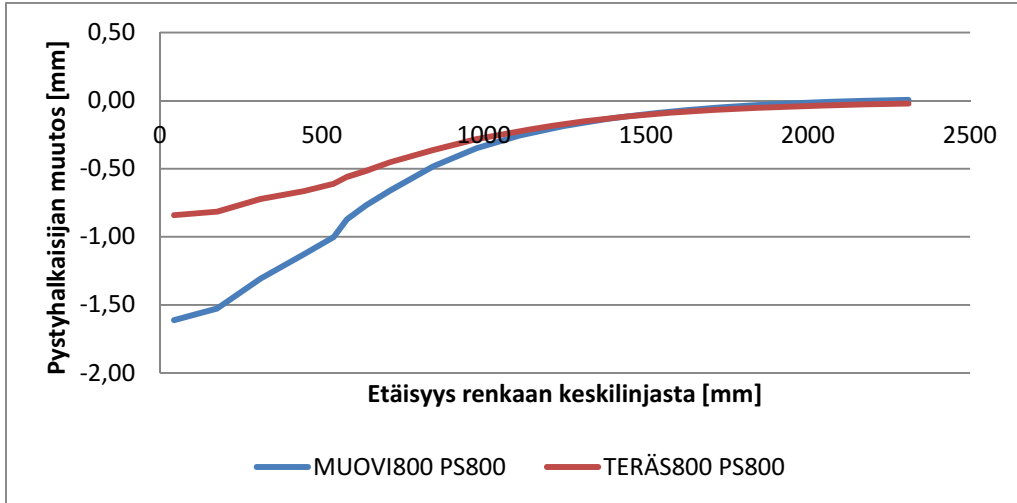
5.3 Herkkyystarkastelut

Jotta tierumpujen käyttäytymisestä saataisiin koekohteita laajempi käsitys, varioitiin eri muuttujia valituilla rumpu-tyypeillä. Ensimmäisessä vaiheessa luotiin tyypillinen sorapäälysteisen tien rakenne. Rakenteeksi valittiin kokonaisuudessaan 400 mm paksuinen rakenne, joka koostui 150 mm paksuisesta kulutuskerroksesta ja 250 mm paksuisesta muusta tierakenteesta. Tien rakennekerroksille ja pohjamaalle herkkyystarkastelun perustapauksessa käytetyt materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 5.5.

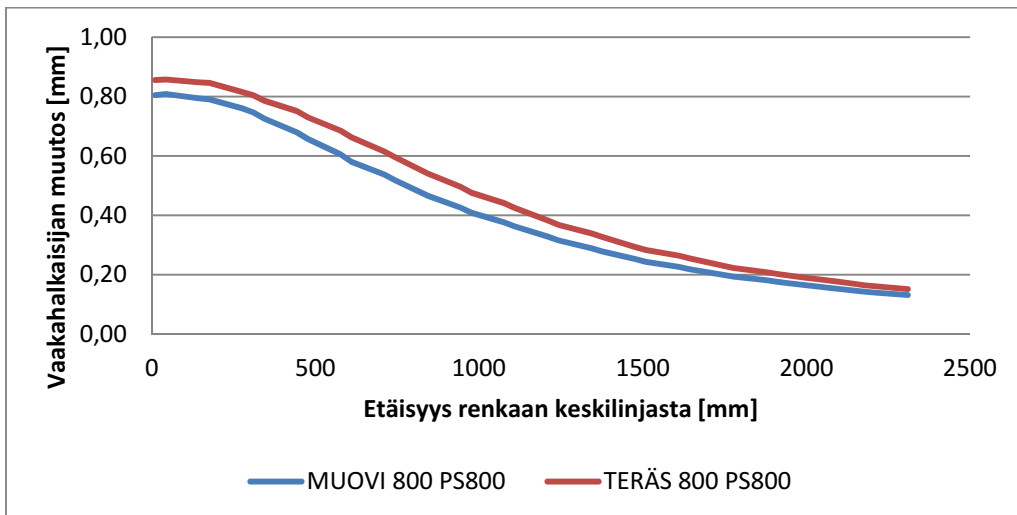
Taulukko 5.5. Rumpumallien herkkyystarkastelun perustapauksessa tien rakennekerroksille ja pohjamaalle käytetyt materiaaliparametrit.

Tien rakennekerrokset							
Parametri	c'	ϕ'	ψ	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	K_0^{nc}
Yksikkö	kPa	°	°	MPa	MPa	MPa	-
Kerros 1	20	50	20	225	225	450	0,31
Kerros 2	10	45	15	175	175	350	0,33
Pohjamaa							
Parametri	E'	ν	s_u	$s_u^{increment}$			
Yksikkö	MPa	-	kPa	kPa/m			
Pohjamaa	40	0,4	35	1,5			

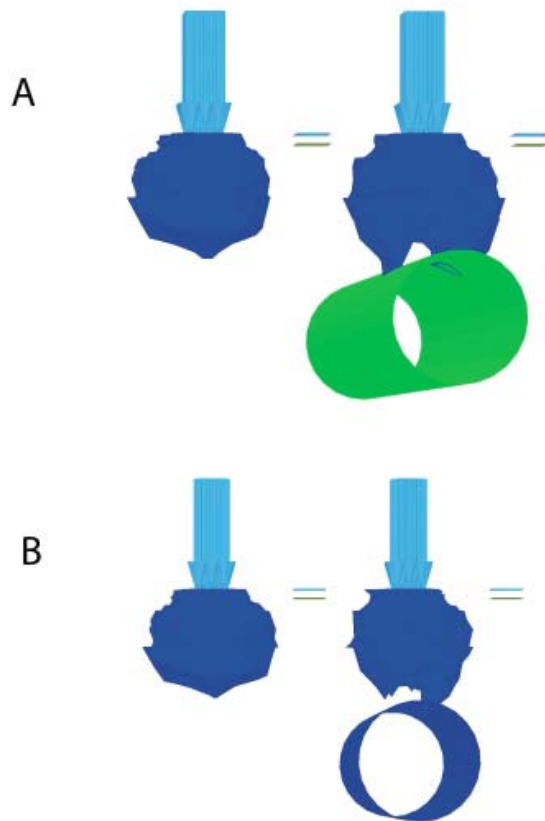
Ensimmäisen vaiheen herkkyystarkastelussa testattiin rumpumateriaalin vaikutusta. Kahden simulaation avulla tarkasteltiin muovista ja teräksistä rumpuputkea, joiden halkaisija oli 800 mm ja peitesyvyys 800 mm. Simulaatioista määritetyt rumpujen pystyhalkaisijan muutokset on esitetty kuvassa 5.15. Vastaavat vaakahalkaisijan muutokset on esitetty kuvassa 5.16. Kuvista voidaan havaita, että suuremmat pystyhalkaisijan muutokset syntyvät muovirummussa, joten jatkotarkasteluissa rajauduttiin muovista valmistettuihin rumpuputkiin. Teräsputkessa vastaavasti vaakahalkaisijan muutokset ovat hieman suurempia. Tämä kuitenkin indikoi jo edellä kuvattua muovirummun käyttäytymistä, eli suurin vaakahalkaisijan muutos ei niissä synny mallissa rummun puolivälin kohtaan, vaan sen yläpuolelle. Teräsrummussa käyttäytyminen on kuitenkin ainakin riittäväksi oletetuilla peitepaksuuksilla lähempänä mitattua käyttäytymistä. Kuvassa 5.17 esitettyjen leikkausmuodonmuutosten perusteella ero rumpua ympäröivän maan käyttäytymisessä on suhteellisen pieni.



Kuva 5.15. Teräs- ja muovirummun pystyhalkaisijan muutoksen vertailu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm.



Kuva 5.16. Teräs- ja muovirummun vaakahalkaisijan muutoksen vertailu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm.



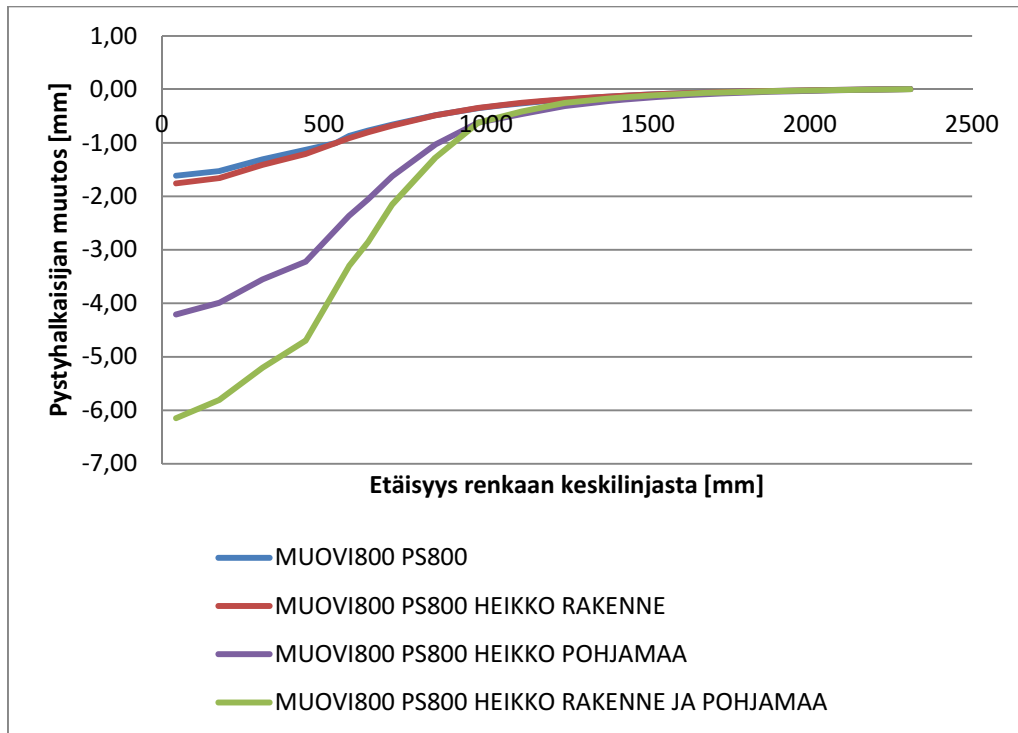
Kuva 5.17. Mallinnetut leikkausmuodonmuutostasot, ylhäällä teräsrumpu, alhaalla muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.

Herkkyystarkastelun toisessa vaiheessa tarkasteltiin pohjamaan sekä tien rakennekerrosten laadun vaikutusta rummun ja sitä ympäröivän maan käyttäytymiseen. Pohjamaan osalta tehtiin simulaatio, jossa pohjamaa oletettiin erittäin heikkolaatuiseksi. Tien rakennekerrosten laadun vaikutusta simuloitiin heikentämällä materiaalien lujuutta. Simuloinneissa käytetyt materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 5.6.

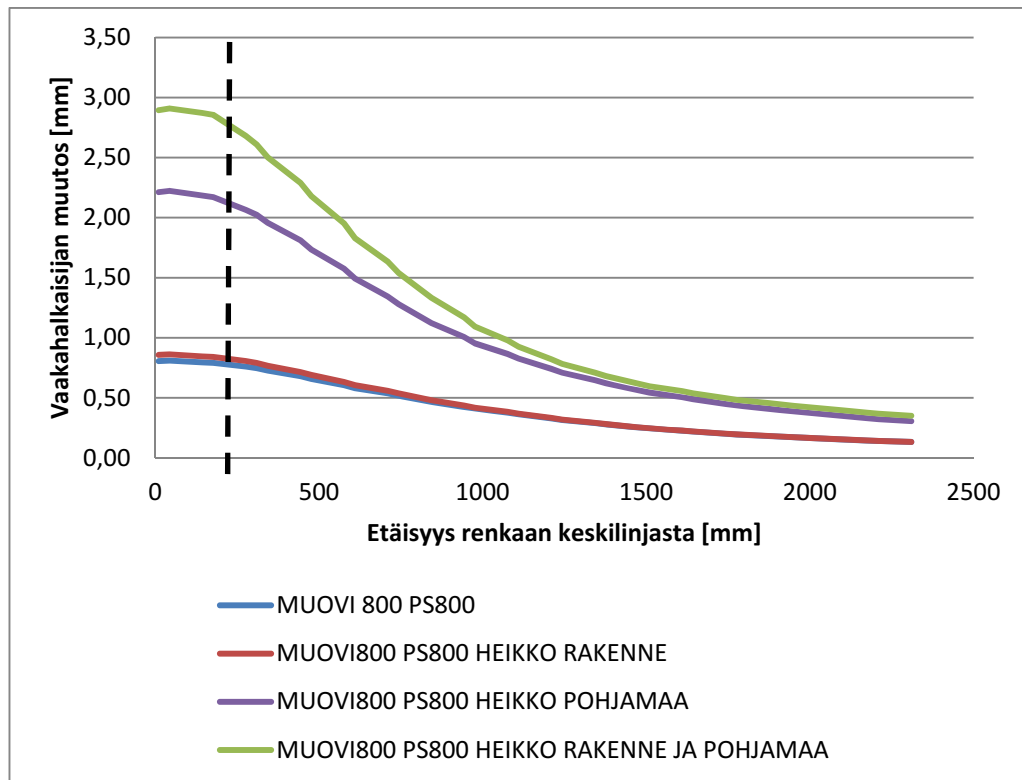
Taulukko 5.6. Maakerrosten materiaaliparametrit heikkolaatuisemman ja huonolaatuisen pohjamaan laskentasimulaatioissa.

Tien rakennekerrokset							
Parametri	c'	ϕ'	ψ	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	K_0^{nc}
Yksikkö	kPa	°	°	MPa	MPa	MPa	-
Heikennetty Kerros 1	10	45	15	225	225	450	0,33
Heikennetty Kerros 2	8	40	10	175	175	350	0,37
Pohjamaa							
Parametri	E'	ν	s_u	$s_u^{increment}$			
Yksikkö	MPa	-	kPa	kPa/m			
Heikko Pohjamaa	20	0,4	20	1,5			

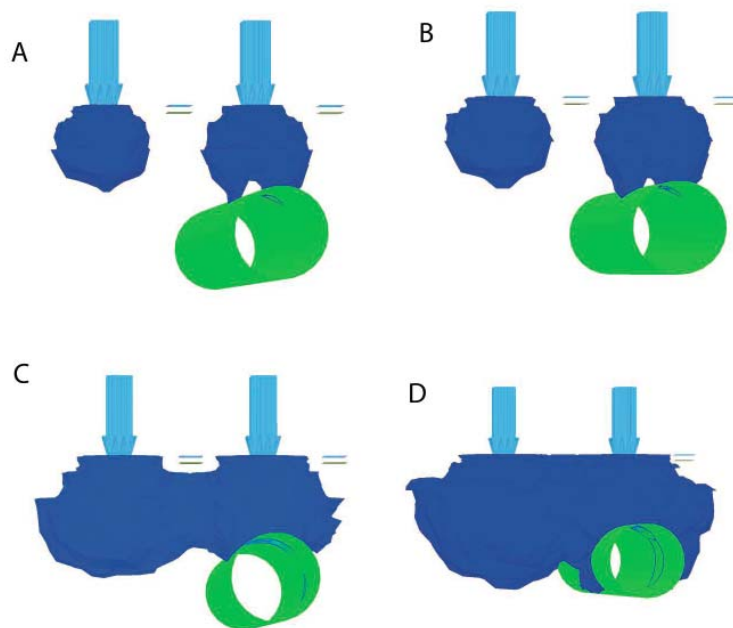
Toisen vaiheen simulaatioista määritetyt rummun pystyhalkaisijan muutokset on esitetty kuvassa 5.18. Vastaavat vaakahalkaisijan muutokset on esitetty kuvassa 5.19. Rummun halkaisijan muutoskuvaajissa varsinkin pohjamaan laatu näyttää olevan suuressa roolissa. Sen sijaan pelkästään huonolaatuisemmat rakennekerrosten materiaalit eivät näytä vaikuttavan merkittävässä määrin rummun käyttäytymiseen ajoneuvon ylityksen aikana. Toisaalta taas heikkolaatuisten rakennekerrosten rooli kasvaa, kun pohjamaa muuttuu samanaikaisesti heikkolaatuiseksi. Ero näkyy erittäin selvästi myös mobilisoituvissa leikkausmuodonmuutostasoissa (kuva 5.20). Pelkästään tien rakennekerrosten heikentäminen kasvattaa kriittiseksi oletettua aluetta rakenteessa hieman, mutta vaikutus ulottuu vain rummun yläpinnan tasolle. Pohjamaan laadun muuttuminen epäedulliseksi laajentaa kriittistä aluetta eritoten tien rakennekerroksissa, mutta myös hieman rummun yläosan alueella (kuva 5.20 C). Heikon rakenteen ja pohjamaan yhteisvaikutus on puolestaan todella merkittävä (kuva 5.20 D). Ajoneuvon ylityksen aikana näyttää mobilisoituvan kriittiseksi otaksuttuja leikkausmuodonmuutoksia lähestulkoon koko rummun alueelle. Lisäksi telin yhteisvaikutus alkaa kertautua ääritilanteissa, joten liikkuvan pyöräkuorman alla koko rummun ympärys on jatkuvasti suuren rasituksen alaisena.



Kuva 5.18. Vertailu tien rakennekerrosten ja pohjamaan laadun vaikutuksesta rummun pystyhalkaisijan muutoksiin, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm.

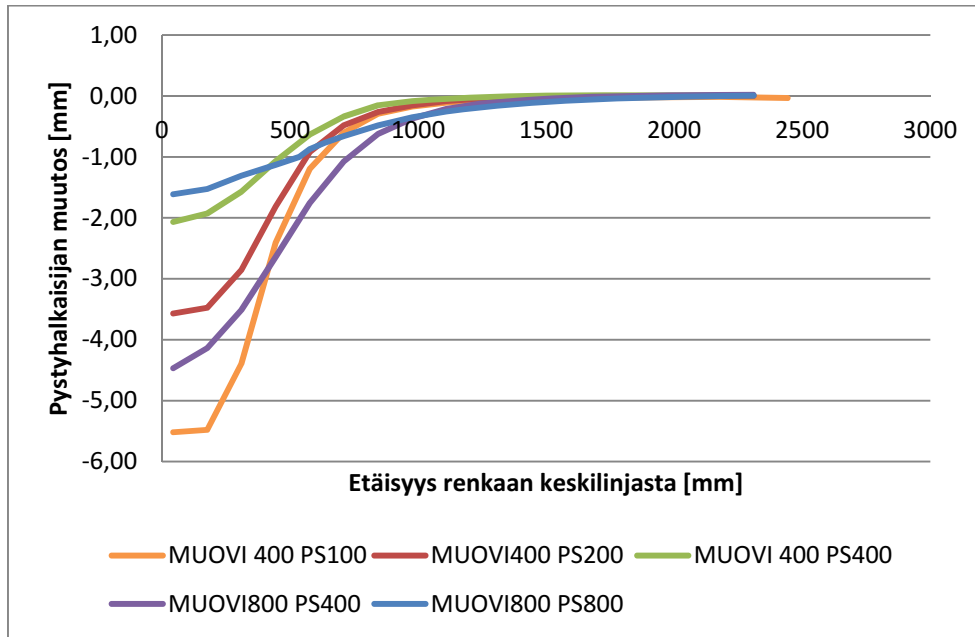


Kuva 5.19. Vertailu tien rakennekerrosten ja pohjamaan laadun vaikutuksesta rummun vaakahalkaisijan muutoksiin, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm. Katkoviivan vasemmalla puolella tulokset voivat poiketa todellisesta käyttäytymisestä, koska vaakahalkaisijan muutokset on määritetty tismalleen rummun keskikohdasta (vertaa kuva 5.5).

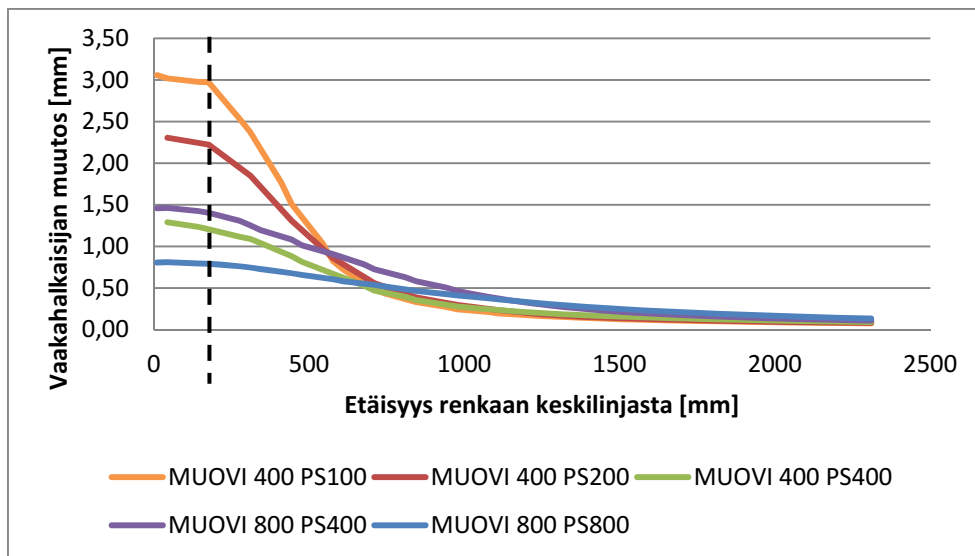


Kuva 5.20. Mallinnetut leikkausmuodonmuutokset, muovirummun halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm. A: Perustapaus, B: heikkolaatuinen tierakenne, C: heikkolaatuinen pohjamaa ja D: heikkolaatuisen tierakenteen ja pohjamaan yhteisvaikutus. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.

Herkkyystarkastelun kolmannessa vaiheessa simuloitiin rummun peitesyvyyden vaikutusta rummun ja ympäröivän maan käyttäytymiseen. Samalla tehtiin tarkasteluja rummun halkaisijan vaikutuksista. Tien rakennekerrosten ja pohjamaan materiaali-parametreina käytettiin taulukossa 5.5 esitettyjä arvoja. Kuvassa 5.21 on esitetty pystyhalkaisijan muutokset kahdella erikokoisella muovirummulla valituilla peitesyvyyksillä. Kuvasta voidaan havaita, että halkaisijaltaan suurempi rumpu kohtaa varsin odotetusti suurempia muodonmuutoksia samalla 400 mm peitesyvyydellä. Myös peitesyvyyden vaikutus käy simulointituloksista varsin selvästi ilmi. Kuvassa 5.22 on esitetty kuvaa 5.21 vastaavat vaakahalkaisijan muutokset.

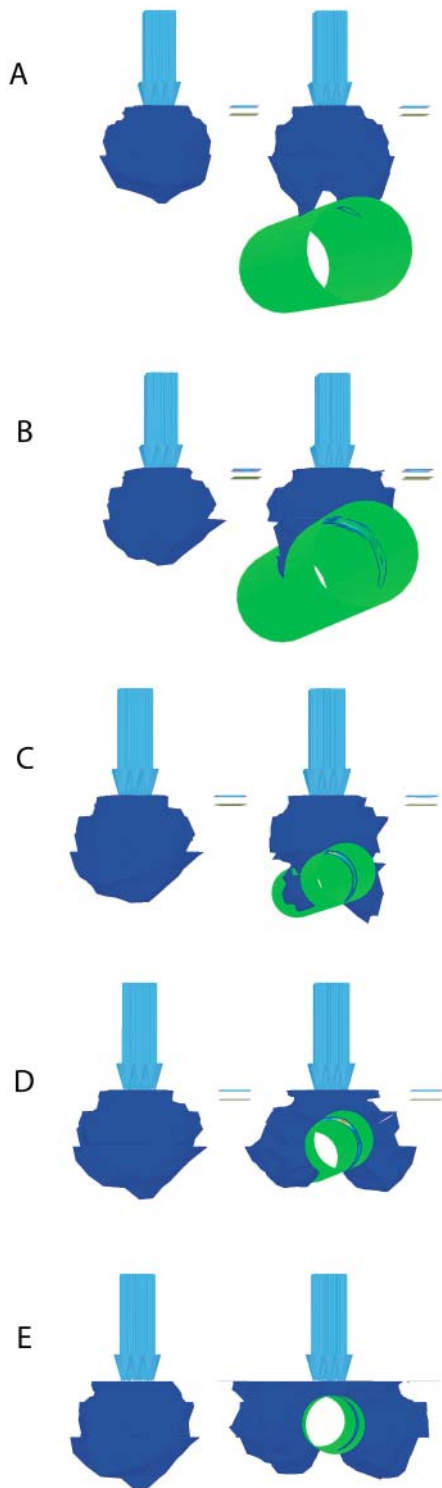


Kuva 5.21. Rummun halkaisijan ja peitesyvyyden vaikutus rummun pystyhalkaisijan muutoksiin.



Kuva 5.22. Rummun halkaisijan ja peitesyvyyden vaikutus rummun vaakahalkaisijan muutoksiin. Katkoviivan vasemmalla puolella tulokset voivat poiketa todellisesta käyttäytymisestä, koska vaakahalkaisijan muutokset on määritetty tismalleen rummun keskikohdasta (vertaa kuva 5.5).

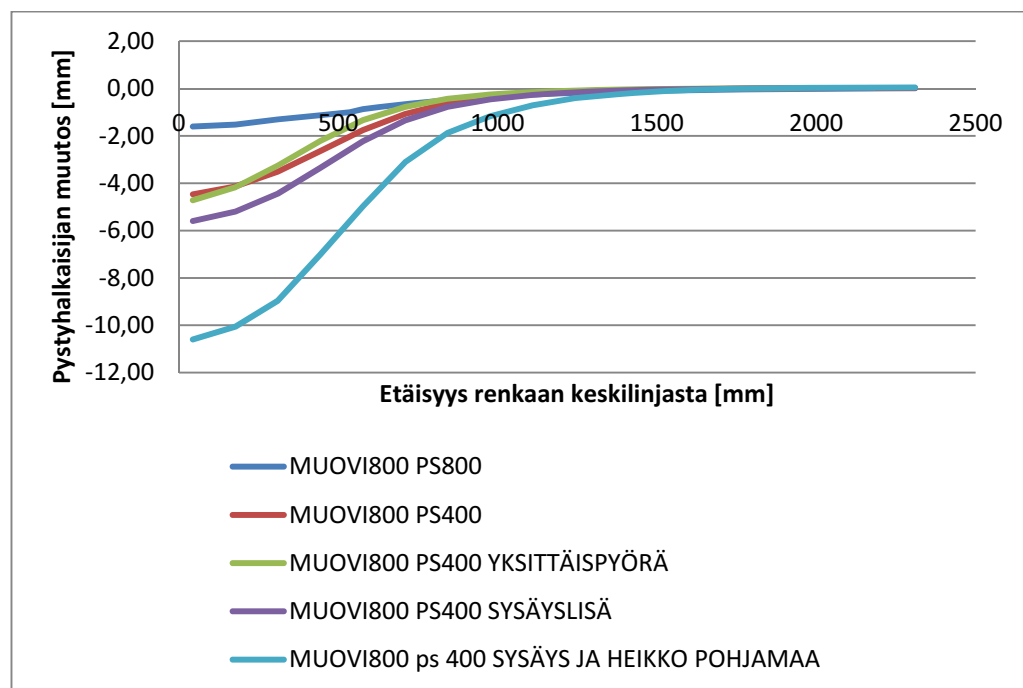
Kuvassa 5.23 on esitetty rummun peitesyvyyden ja halkaisijan muutoksen vaikutus rumpua ympäröivään maahan mobilisoituvien leikkausmuodonmuutoksiin. Rummun koolla näyttää olevan ainakin nyt simuloituissa tapauksissa jonkinlainen vaikutus rummun ympärillä olevan maan käyttäytymiseen (kuva 5.23 B ja C). Toisaalta tämä ero voi selittyä rummun fyysisillä mitoilla. Halkaisijaltaan pienemmän (400 mm) rummun ympärille mobilisoituu enemmän leikkausmuodonmuutoksia, koska paripyörän kuormitus leviää tierakenteessa fyysisesti rummun halkaisijaa laajemmalle alueelle, jolloin myös leikkausmuodonmuutokset etenevät rummun ympärillä jonkin verran syvemmälle. Halkaisijaltaan suuremmalla (800 mm) rummulla taas paripyörän kuormitus kohdistuu pääosin suoraan rumpuun, johon syntyy vastaavasti huomattavasti pienempää rumpua suuremmat muodonmuutokset (kuvat 5.21 ja 5.22). Rummun peitesyvyydellä, kuten koekohteiden mallienkin perusteella voitiin otaksua, on suuri merkitys varsinkin erittäin alhaisilla peitesyvyyksillä. Kuvan 5.23 kohtien D ja E osoittamalla tavalla kriittiseksi otaksuttu leikkausmuodonmuutostaso lähtee leviämään rummun ympärillä huomattavasti laajemmalle alueelle, kun rummun peitesyvyys pienenee.



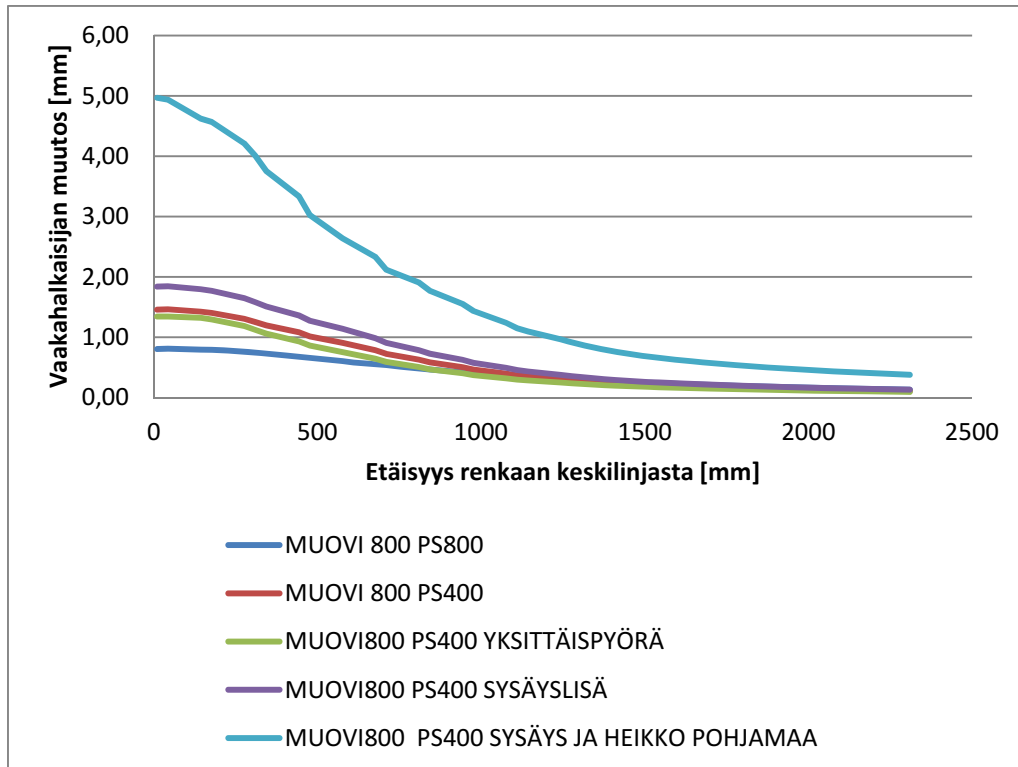
Kuva 5.23. Muovirummun halkaisijan ja peitesyvyyden vaikutus mobilisoituvien leikkausmuodonmuutostasoihin. A: halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm, B: halkaisija 800 mm, peitesyvyys 400 mm, C: halkaisija 400 mm, peitesyvyys 400 mm, D halkaisija 400 mm, peitesyvyys 200 mm ja E: halkaisija 400 mm, peitesyvyys 100 mm. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.

Herkkyystarkastelujen viimeisessä vaiheessa simuloitiin vielä kuormitusten vaikutusta rumpun käyttäytymiseen. Simulaatiot tehtiin paripyörä- ja yksittäispyöräkuormitusta kuvaavilla malleilla. Yksittäispyöränä käytettiin Super Single-rengasta, jonka nimellinen leveys on 385 mm. Koska paripyörätapauksessakin käytetty renkaan kosketuspaine (=mitattu renkaan ilmanpaine) oli verrattain suuri, 900 kPa, päädyttiin myös yksittäispyörälle käyttämään suurta kosketuspainetta, 1050 kPa. Tarkasteltavaksi rumpun peitesyvyydeksi valittiin 400 mm, koska syvemmällä olevan rumpun tapauksessa renkaan kosketuspinnan vaikutus häviää kuormituksen jakautuessa rakenteeseen. Kuvassa 5.24 on esitetty eri kuormitustilanteita vastaavat rumpun pystyhalkaisijan muutokset. 400 mm peitesyvyydellä rengastyypin vaikutus on suhteellisen pieni, mutta vielä havaittavissa. Yksittäispyörä aiheuttaa jonkin verran suuremman maksimiaron, mutta paripyörä kuormittaa rumpua laajemmalla alueella.

Simulaatioissa tutkittiin myös dynaamisen sysäyksen vaikutusta rumpun käyttäytymiseen. Koska lähtökohtaisesti käytetty renkaan kosketuspaine oli jo suhteellisen korkea, käytettiin sysäyksen arvona yhtä kolmasosaa alkuperäisestä kuormituksesta. Näin ollen sysäysohjeellinen kuormitus oli 1200 kPa. Kuvassa 5.24 esitetyn mukaisesti pelkällä sysäysohjeella näyttää olevan selvä vaikutus rumpun pystyhalkaisijan muutokseen. Koska edellä todettiin pohjamaan olevan merkittävässä roolissa ja sysäysohjeen todettiin vaikuttavan jonkin verran, simuloitiin myös näiden yhteisvaikutusta. Vaikutus kuitenkin moninkertaistuu erittäin heikoissa pohjamaaolosuhteissa. Samankaltaiset trendit kaikkien simuloitujen muuttujien osalta on havaittavissa myös rumpun vaakahalkaisijan muutoksia esittävissä kuvassa 5.25.

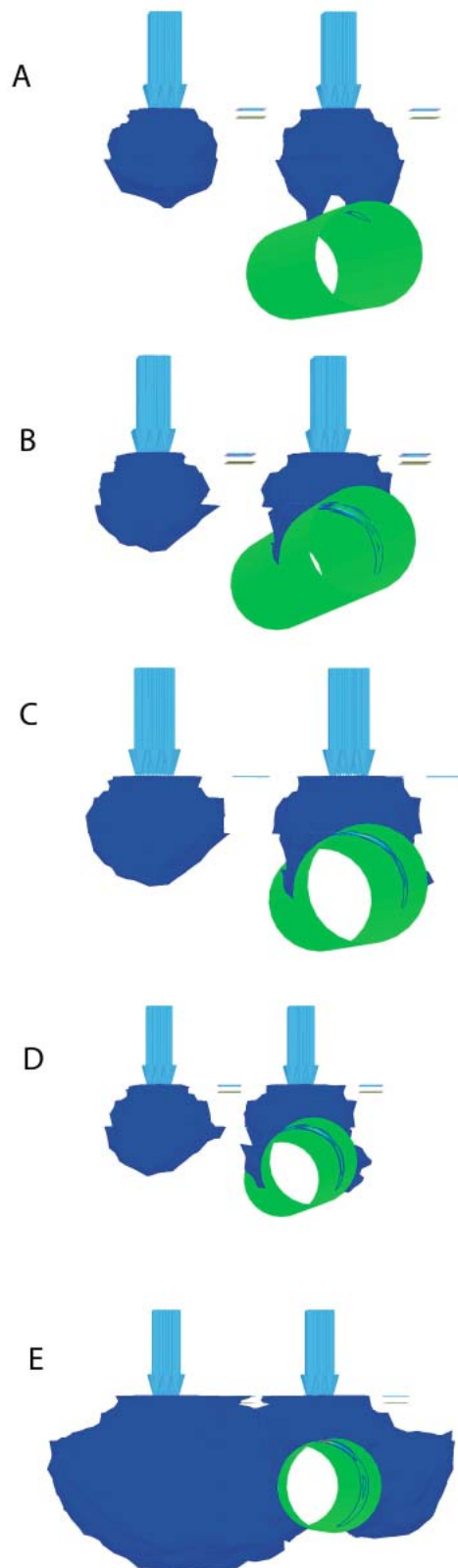


Kuva 5.24. Eriolaisia kuormitustilanteita verranneista simulaatioista määritetyt rumpun pystyhalkaisijan muutokset.



Kuva 5.25. Erilaisia kuormitustilanteita verranneista simulaatioista määritetyt rumpun vaakahalkaisijan muutokset.

Kuvassa 5.26 on esitetty erilaisten kuormitustilanteiden vaikutusta maahan mobilisoi-
tuviin leikkausmuodonmuutoksiin. Kuvasta voidaan havaita, että yksit-
täispyörän ja paripyörän ero on hyvin pieni (kuva 5.26 B ja C). Sysäys-
lisä kasvattaa rumpun ympärillä tapahtuvien leikkausmuodonmuutok-
sia myös varsin maltillisesti (kuva 5.26 D). Heikoissa pohjaolosuhteissa
sysäysohje näyttää olevan varsin kriittinen myös rumpun vieressä olevan
akselin alapuolella ja kriittiseksi otaksuttu leikkausmuodonmuutostaso
näyttää etenevän huomattavasti syvemmälle kuten aiemmissakin heik-
koa pohjamaata kuvanneissa simulaatioissa, eli kriittinen taso lähtee
etenemään rumpun sivuilta tien pituussuunnassa.



Kuva 5.26. Eri kuormitustilanteiden vaikutukset maahan mobilisoituvii leikkausmuodonmuutoksiin. A: perustapaus, peitesyvyys 800 mm, B: peitesyvyys 400 mm, C: peitesyvyys 400 mm, yksittäispyörä, D: peitesyvyys 400 mm, sysäyslisä ja E: peitesyvyys 400 mm, sysäyslisä ja heikkolaatuinen pohjamaa. Sinisellä merkityn pinnan sisäpuolella oleva leikkausmuodonmuutostaso ylittää pysyvien muodonmuutosten kertymisen kannalta kriittiseksi otaksutun tason.

6 Päätelmät

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää uuden ajoneuvoasetuksen vaikutuksia muovista ja teräksestä valmistettujen tierumpujen kohtaamiin rasituksiin. Tutkimus jakautui kahteen osaan; koekohteilla tehtäviin mittauksiin ja rumpun mekaanisen käyttäytymisen arviointiin mallintamalla. Mittaamalla rumpujen halkaisijan muutoksia koekohteilla saatiin arvokasta tietoa rumpun todellisesta käyttäytymisestä liikkuvien pyöräkuormien alaisena. Tehtyjen mittausten perusteella näyttää myös siltä, että käytännössä ongelmalliset rumpukohteet sijaitsevat soratieverkolla.

Koekohteista tehtyjen rakennemallien avulla voitiin verifioida käytetty mallinnustapa ja todeta mallintamisen olevan tehokas työkalu erilaisten olosuhteiden vaikutusten arvioimiseksi. Mallintamalla verrattiin myös ajoneuvon ylityksen aikaisia kuormitus-tilanteita ja todettiin, että rumpun kannalta haitallisin kuormitus-tilanne syntyy hetkellä, toinen kaksiakselisen telin akseleista on tismalleen rumpun laen kohdalla. Tehtyjen herkkyytarkastelujen perusteella saatiin tarkempaa ja kattavampaa informaatiota rumpun kuormituskäyttäytymisestä.

6.1 Peitesyvyyden vaikutus

Koekohteilta mitattujen rumpun halkaisijan muutosten perusteella peitesyvyydellä oli merkittävä vaikutus niin teräksisen kuin muovisen rumpun käyttäytymiseen ajoneuvon ylityksen aikana. Yksi muovirummuista oli asennettu erittäin matalaan (200 mm) peitesyvyyteen ja siitä tilanteesta mitattujen halkaisijan muutosten perusteella rumpun muodonmuutokset liikkuvan pyöräkuorman alla alkavat kasvaa lähes hallitsemattomasti. Muissa koekohteissa havaitut rumpuputken muodonmuutokset olivat huomattavasti maltillisempia, mutta riippuivat selkeästi rumpun peitesyvyydestä.

Mallintamalla rumpukohteita saatiin etenkin rumpun pystyhalkaisijan muutosten osalta mittaustulosten kanssa hyvin samankaltaisia tuloksia. Mallinnuksen avulla tehdyissä herkkyytarkasteluissa havaittiin rumpun peitesyvyyden ja rumpun halkaisijan muutosten välillä vieläkin selkeämpi yhteys johtuen vakioiduista tien rakenerroksista ja pohjamaaolosuhteista. Rumpun peitesyvyyden lisäksi myös rumpun halkaisijalla näytti olevan selkeä yhteys rumpun muodonmuutoksiin. Samalla peitesyvyydellä rumpun halkaisijan kaksinkertaistaminen yli kaksinkertaisti rumpun halkaisijan muutokset. Näin ollen voidaan todeta nykyisen InfraRYL-ohjeistuksen, jossa vaadittu muovirumpun peitesyvyys riippuu käytettävän rumpun halkaisijasta olevan tarpeellinen.

6.2 Pohjamaan vaikutus

Tutkimukseen valikoituneissa koekohteissa ei tehtyjen tutkimusten perusteella ollut edustettuna tapauksia, joissa pohjamaaolosuhteet olisivat olleet erittäin heikot. Koe-kohteissa oli kuitenkin jonkin verran vaihtelua pohjaolosuhteissa, joten pohjamaan vaikutusta arvioitiin tarkemmin mallintamalla. Tehdyissä herkkyytarkasteluissa havaittiin heikkojen pohjaolosuhteiden vaikuttavan merkittävästi rumpun käyttäytymiseen. Tehtyjen herkkyytarkastelujen perusteella pohjamaan ollessa erittäin heikko rumpun halkaisijan muutokset yli kaksinkertaistuivat verrattuna hieman paremmissa

pohjaolosuhteissa olevaan rumpuun. Pohjamaan vaikutus tuli selvästi ilmi myös tie-rakennemateriaalien laadun vaikutusta arvioineissa simulaatioissa. Hieman paremmissa pohjaolosuhteissa tierakenteen materiaalin laadun heikentämisellä ei ollut käytännössä vaikutusta rummun halkaisijan muutokseen, kun taas heikoissa pohjaolosuhteissa tierakennemateriaalien laadun heikentäminen kasvatti rummun halkaisijan muutoksia noin 40–50 %. Tehtyjen simulaatioiden perusteella voidaan siis todeta myös tien rakennekerrosmateriaaleilla olevan merkittävä vaikutus rummun kokemiin rasituksiin heikoissa pohjaolosuhteissa.

6.3 Rumpumateriaalin vaikutus

Koekohteilla tehdyissä mittauksissa havaittiin muovirumpuun muodostuvan jonkin verran suurempia halkaisijan muutoksia kuin vastaavankokoiseen ja lähes samaan peitesyvytyteen asennettuun teräsrumpuun. Vastaavankaltainen trendi havaittiin myös mallinnussimulaatioissa, jonka vuoksi mallinnuksen herkkyytarkasteluihin valikoitiin rumpuputken materiaaliksi muovi. Seuraavassa kappaleessa annettavat suositukset perustuvat siis muovirumpua simuloiviin laskentatuloksiin. Teräs- ja muoviputken ero niin koekohteiden mittauksissa kuin lasketuissa mallinnussimulaatioissa oli kuitenkin suhteellisen pieni, joten voitaneen todeta, että teräsputkelle ei ole syytä asettaa muoviputkesta poikkeavia kriteerejä.

6.4 Tutkimustulosten vaikutukset käytännön tilanteissa

Nykyinen ohjeistus määrää muovirumpuputken asennussyvyudeksi vähintään rummun halkaisijan (Rakennustieto 2012). Tehtyjen mittausten ja simulointien perusteella nykyinen ohjeistus näyttää varsin hyvin toimivalta rummuille, joiden halkaisija on vähintään 500 mm. Tätä pienemmillä rummuilla tehdyissä simulaatioissa havaittiin kuitenkin verrattain suuria rummun halkaisijan muutoksia, joten näiden tulosten perusteella halkaisijaltaan alle 500 mm rumpuputkillä asennussyvyden tulisi olla vähintään 500 mm.

Mikäli pohjamaa on luokiteltu Tierakenteen suunnitteluohjeen (Tiehallinto 2004) mukaisesti luokkiin S1,S2,H1 tai H2, näyttää pelkkä asennussyvyysvaatimus olevan riittävä. Muiden pohjamaaluokkien (S3,S4,H3,H4 ja U1-4) osalta näyttää kuitenkin siltä, että myös rummun ympäristäytölle ja siirtymärakenteille on asetettava vaadittavat mitat ja laatuksiteerit etenkin, mikäli heikoissa pohjaolosuhteissa oleva rumpu joudutaan asentamaan suhteellisen matalaan peitesyvytyteen.

Tehdyn tutkimuksen perusteella näyttää siltä, että ongelmallisiksi luokiteltavat kohteet sijaitsevat pääosin soratieverkolla. Mikäli verkolla on asennettu rumpuja alle 500 mm peitesyvytyteen ja pohjaolosuhteet ovat heikot, tulisi tällaisten rumpujen kunnon kehittymistä seurata. Erityisesti näin, mikäli tieosuudella, jolla rumpu sijaitsee, on toistuvaa uuden ajoneuvoasetuksen mukaista raskasta liikennettä.

Lähteet

Brinkrevel, R.B.J., Engin, E. & Swolfs, W.M. 2012. PLAXIS 3D 2012. User´s manuals. ISBN-13: 978-90-76016-12-2. Hollanti.

Powell, W.D., Potter, J.F., Mayhew, H.C. & Nunn, M.E. 1984. The Structural Design of Bituminous Roads. Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, Laboratory Report 1132.

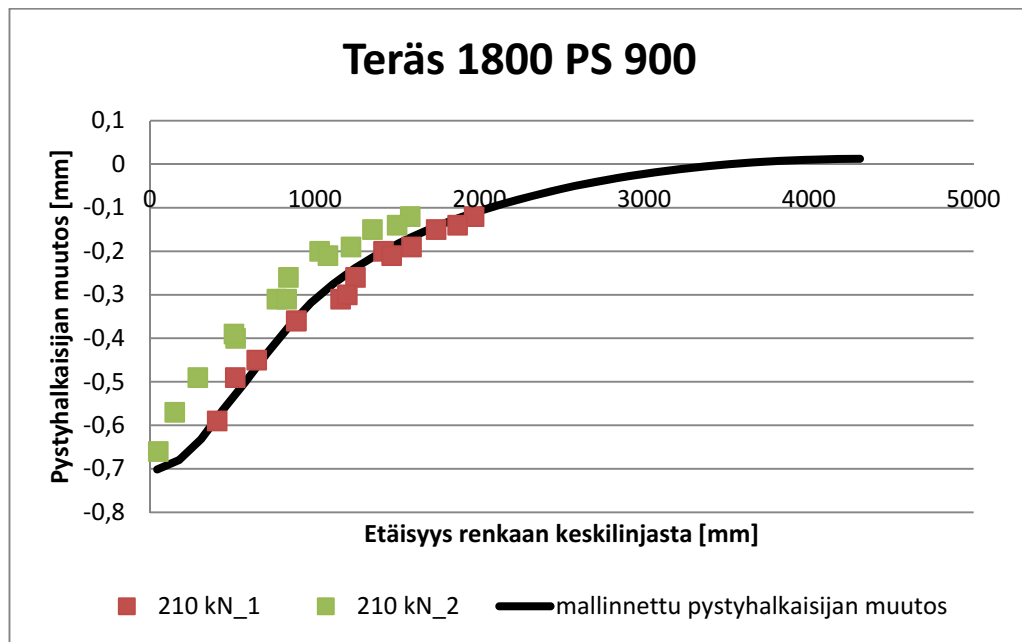
Rakennustieto. 2012. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset InfraRYL. Helsinki 2012.

Tiehallinto. 2004. Tierakenteen suunnittelu, suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki. Tiehallinto, tekniset palvelut. 62 s.

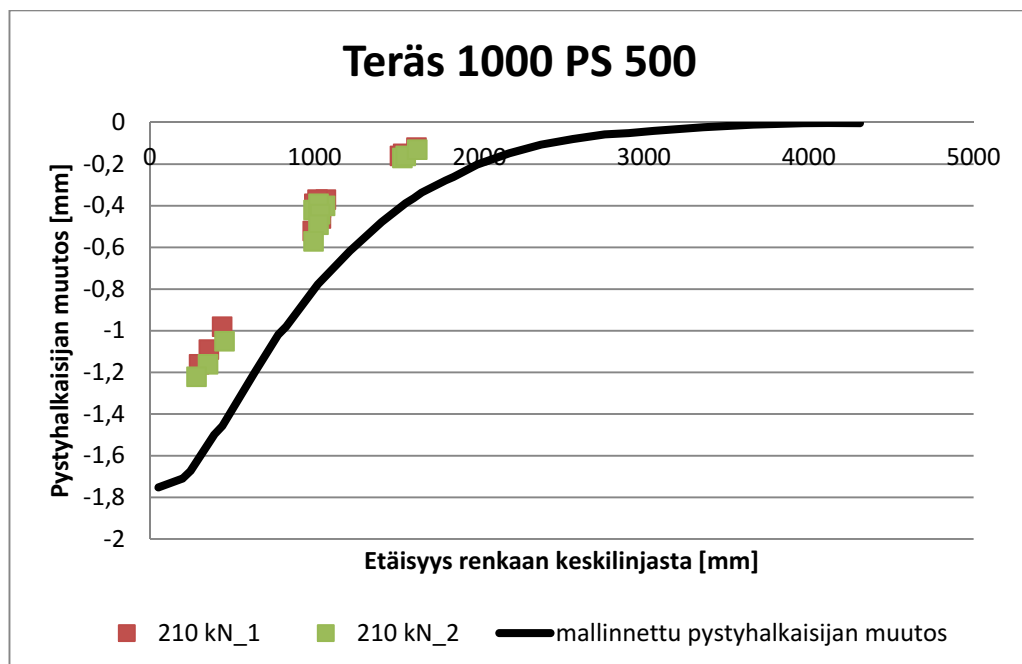
Vuorimies, N., Matintupa, A. & Luomala, H. 2009. CTI puutavara-autossa. Metsätehon raportti 207, Helsinki 2009.

Rumpukohteiden mitattujen ja mallinnettujen halkaisijamuutosten vertailu

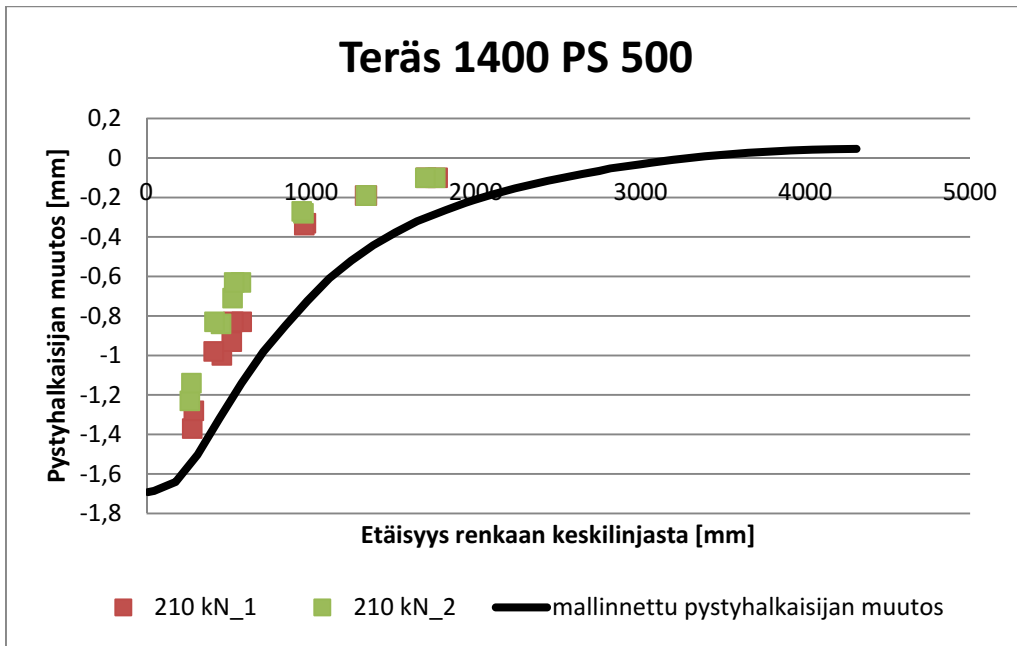
Kuvissa 1-8 on esitetty rumpujen mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset verrattuna mitattuihin 21 tonnin telin aiheuttamiin pystyhalkaisijan muutoksiin. Kuvissa 9-16 on esitetty vastaavat vaakahalkaisijan muutokset.



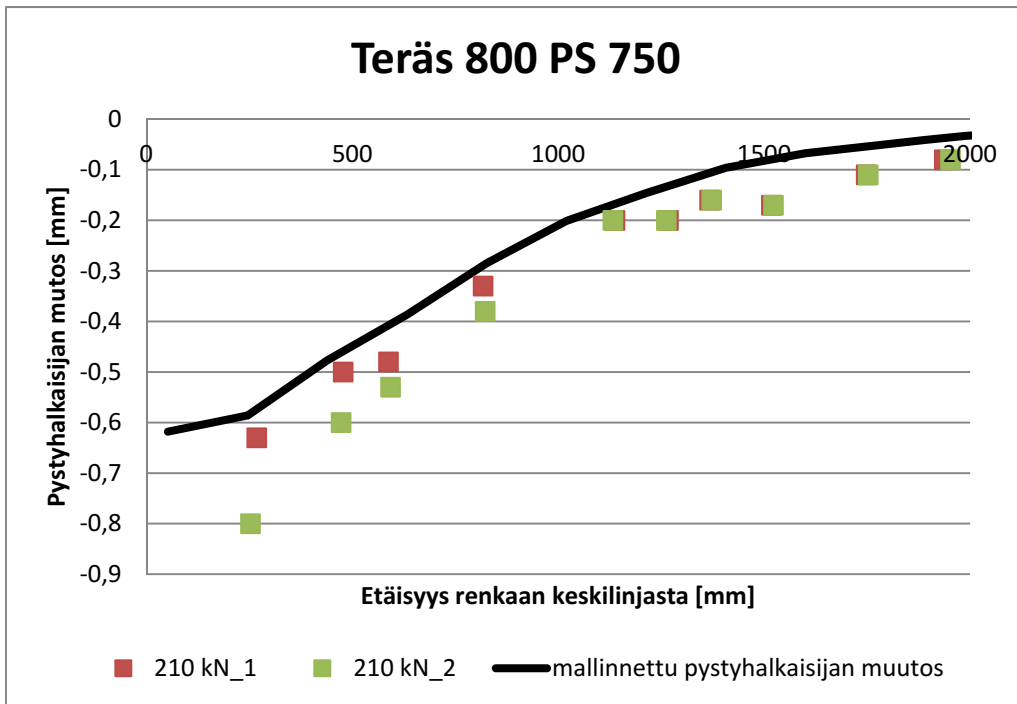
Kuva 1. Rummun mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset, teräsrumpu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm.



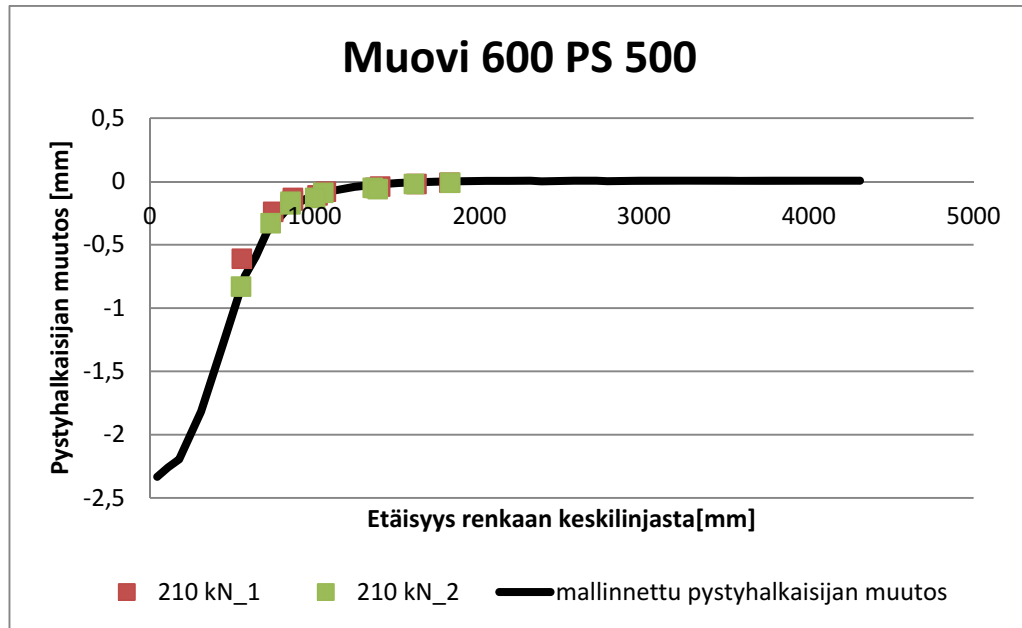
Kuva 2. Rummun mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset, teräsrumpu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm.



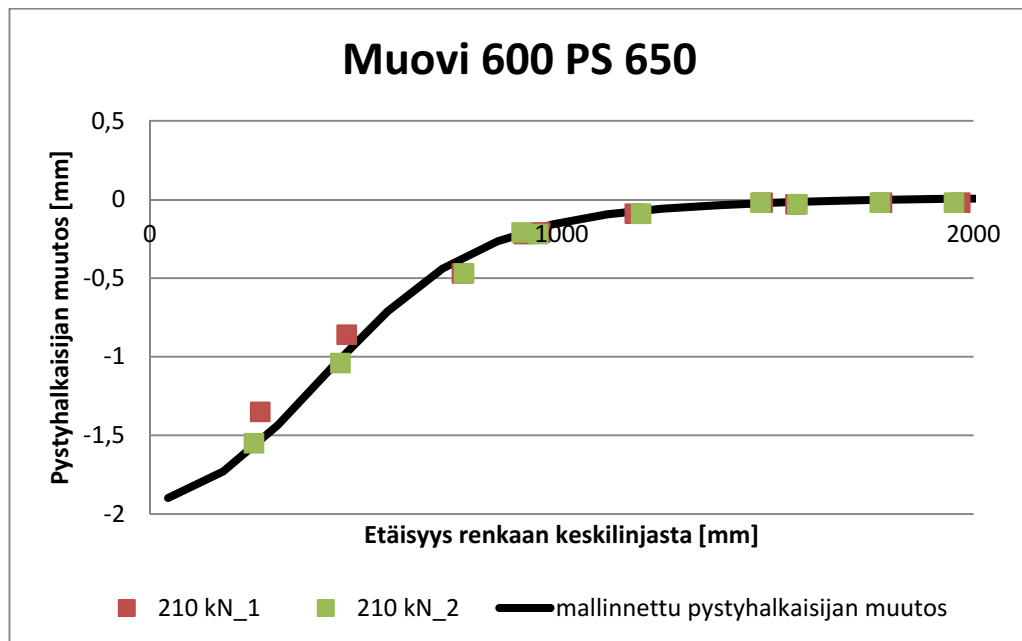
Kuva 3. Rummun mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset, teräsrumpu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm.



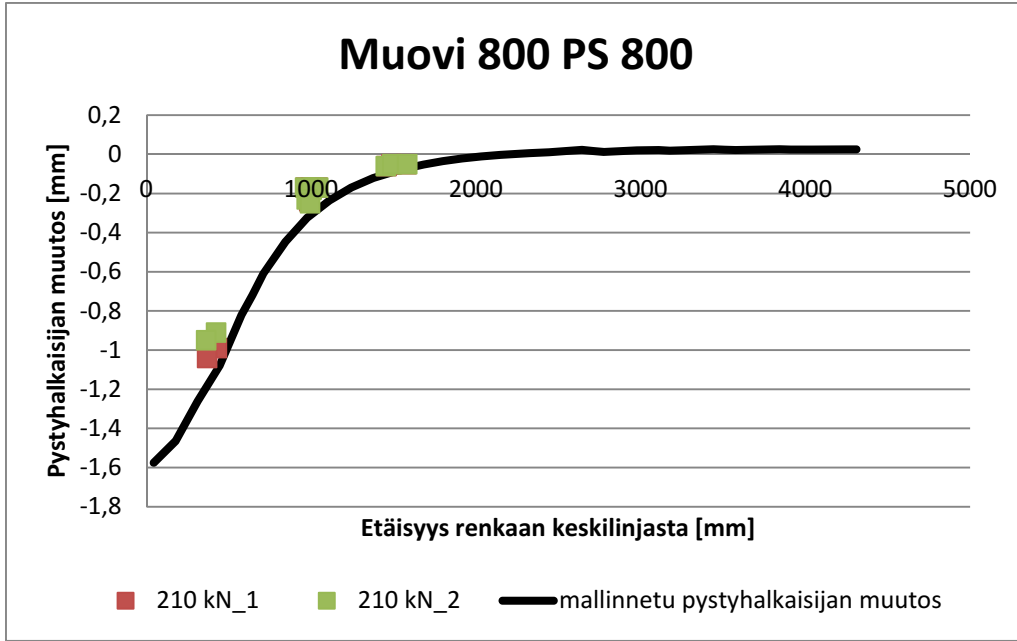
Kuva 4. Rummun mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset, teräsrumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm.



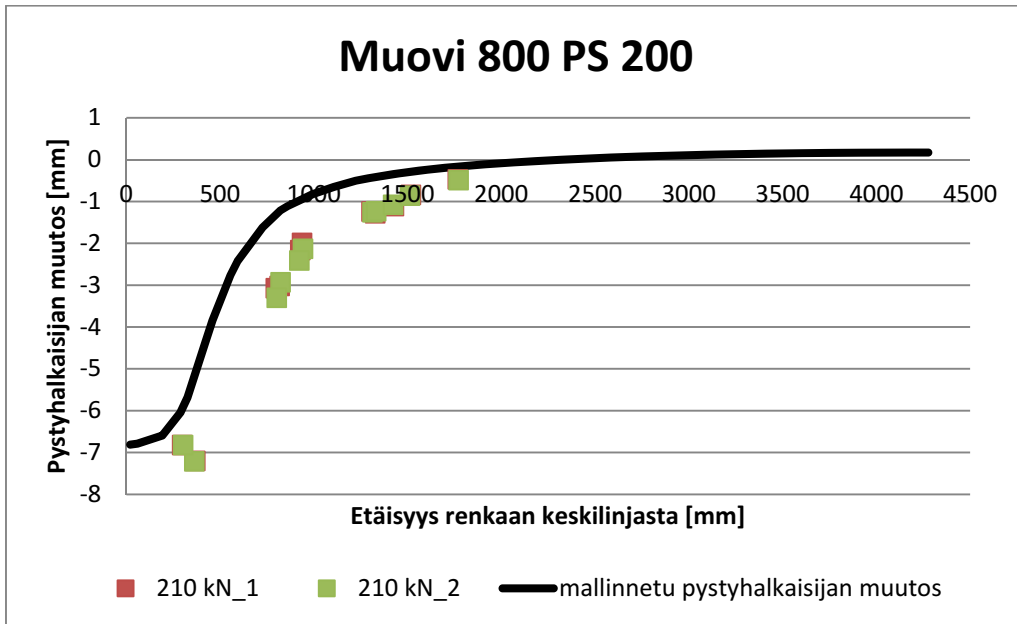
Kuva 5. Rummun mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset, muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm.



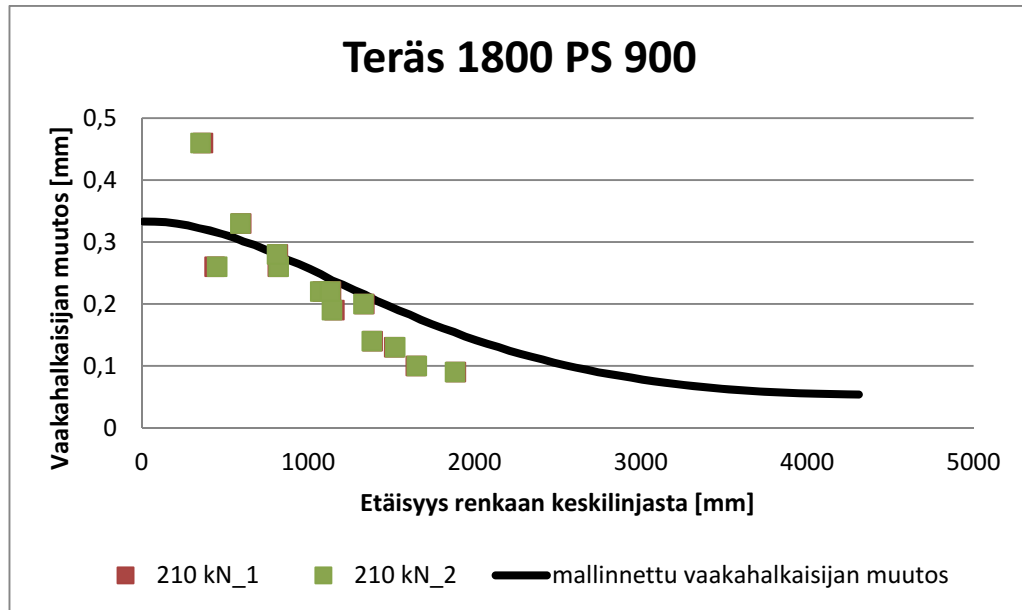
Kuva 6. Rummun mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset, muovirumpu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm.



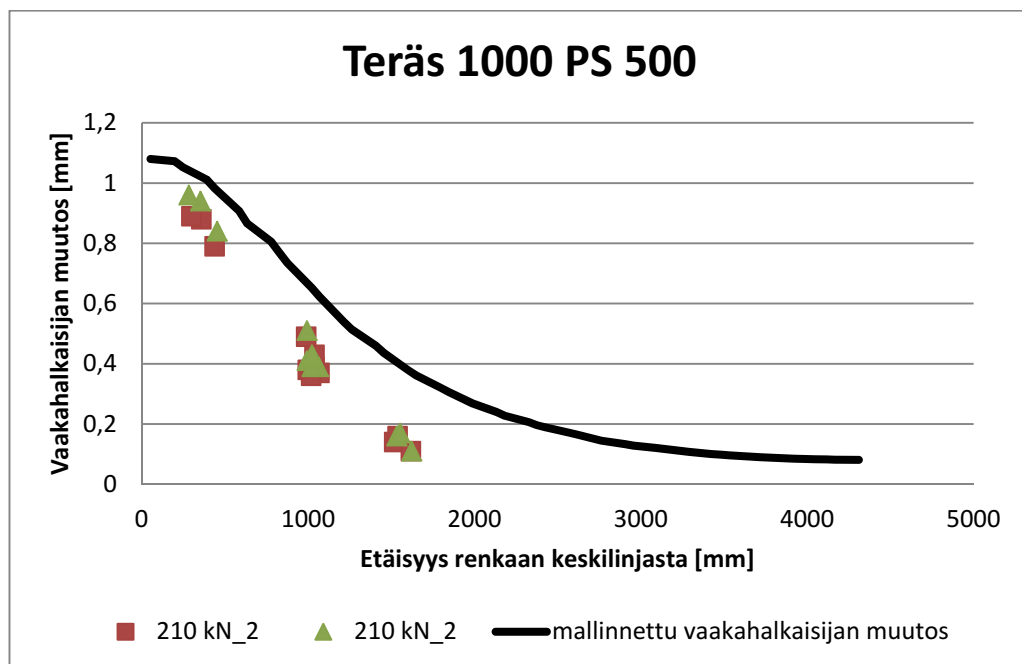
Kuva 7. Rummun mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset, muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm.



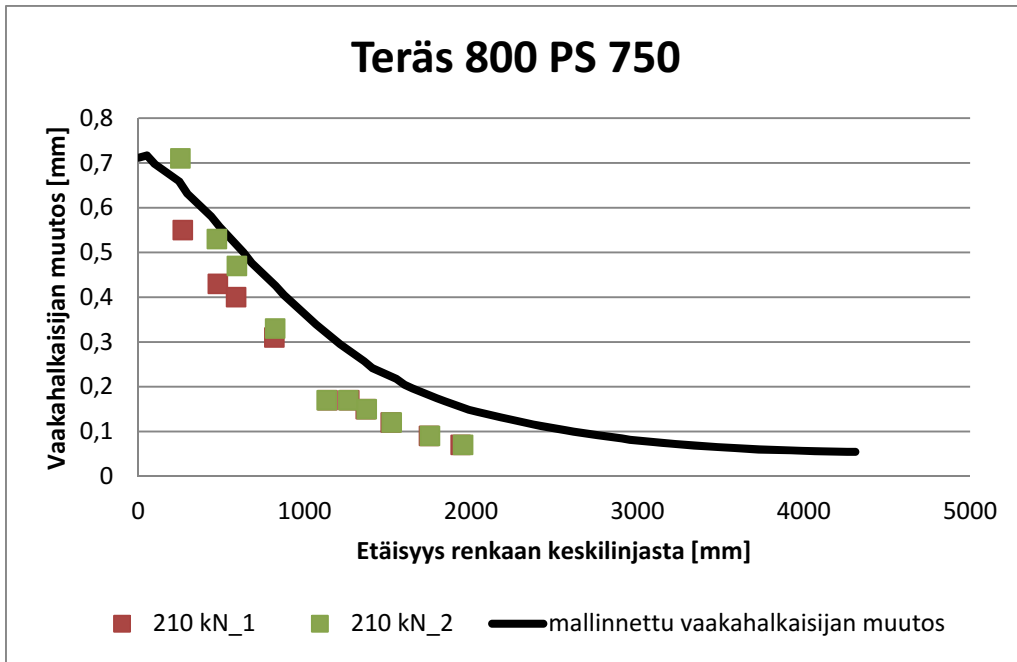
Kuva 8. Rummun mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset, muovirumpu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm.



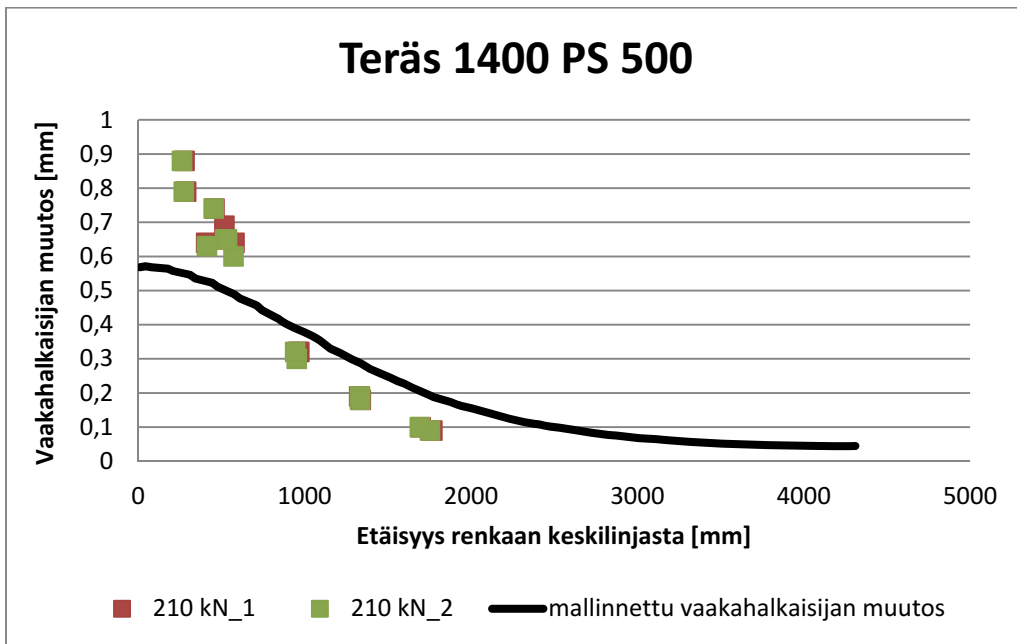
Kuva 9. Rummun mitatut ja mallinnetut vaakahalkaisijan muutokset, teräsrum-
pu, halkaisija 1800 mm, peitesyvyys 900 mm.



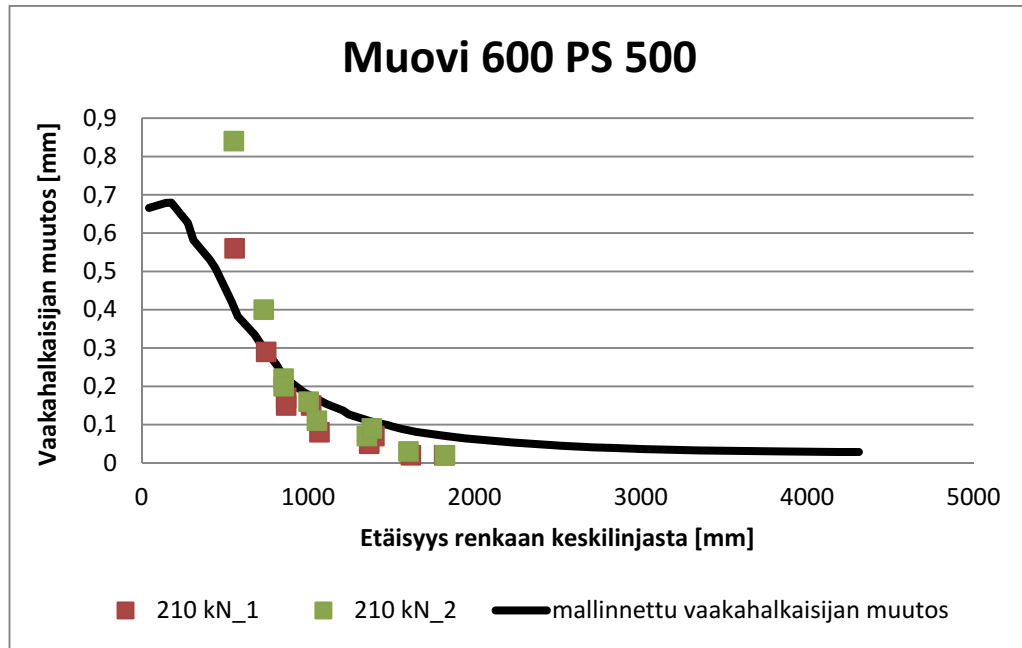
Kuva 10. Rummun mitatut ja mallinnetut vaakahalkaisijan muutokset, teräsrum-
pu, halkaisija 1000 mm, peitesyvyys 500 mm.



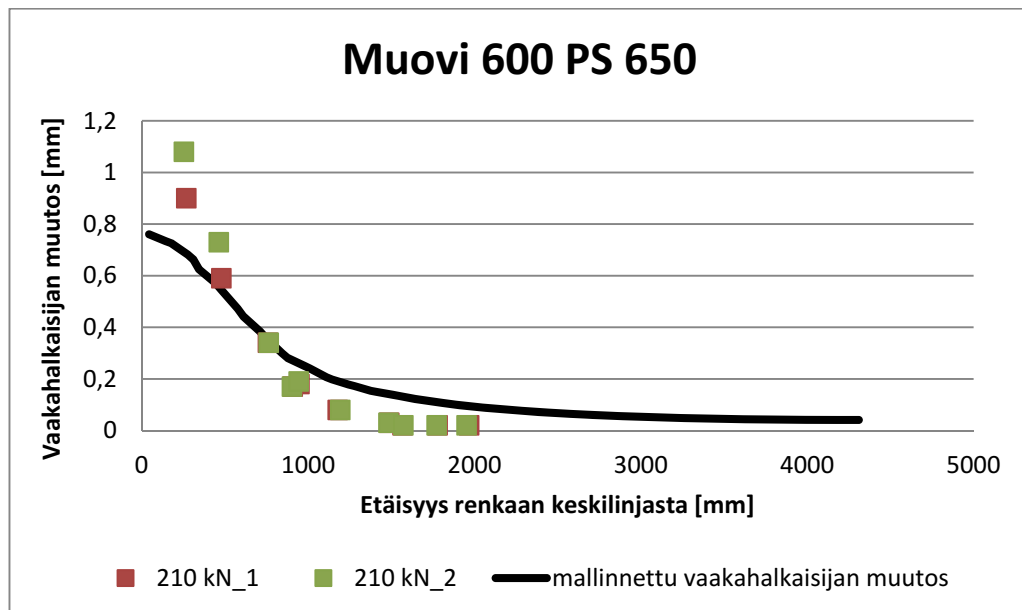
Kuva 11. Rummun mitatut ja mallinnetut vaakahalkaisijan muutokset, teräsrummu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 750 mm.



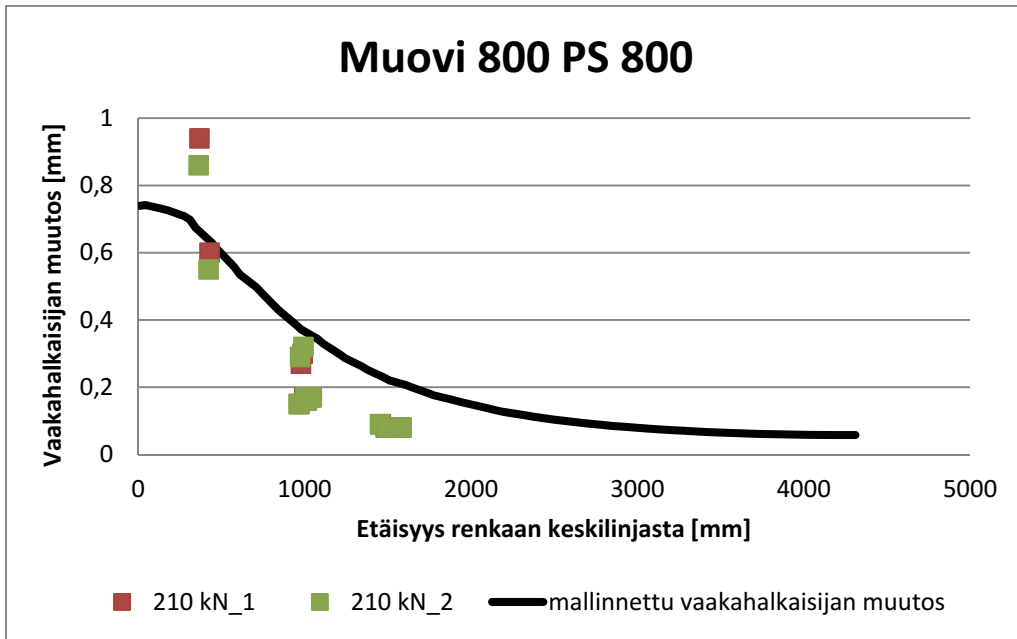
Kuva 12. Rummun mitatut ja mallinnetut vaakahalkaisijan muutokset, teräsrummu, halkaisija 1400 mm, peitesyvyys 500 mm.



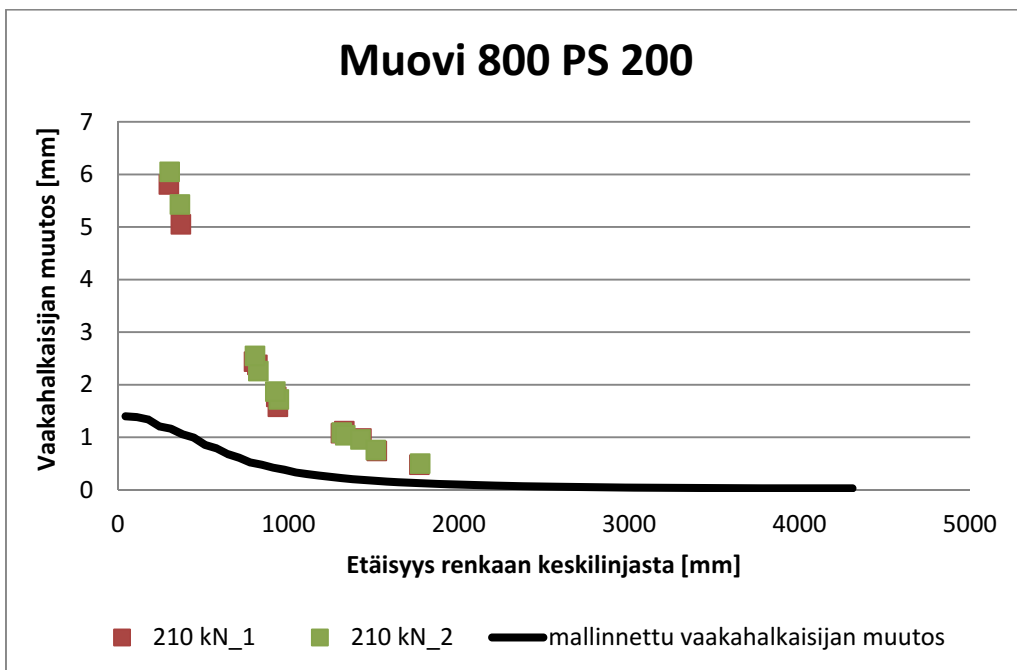
Kuva 13. Rummun mitatut ja mallinnetut vaakahalkaisijan muutokset, muovirum-
pu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 500 mm.



Kuva 14. Rummun mitatut ja mallinnetut vaakahalkaisijan muutokset, muovirum-
pu, halkaisija 600 mm, peitesyvyys 650 mm.



Kuva 15. Rummun mitatut ja mallinnetut vaakahalkaisijan muutokset, muovirum- pu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 800 mm.



Kuva 16. Rummun mitatut ja mallinnetut vaakahalkaisijan muutokset, muovirum- pu, halkaisija 800 mm, peitesyvyys 200 mm.

