

Antti Kalliainen  
Ville Haakana  
Matti Korhonen  
Jari Mäkinen  
Pauli Kolisoja

## Teräsrumpujen uudet korjausmenetelmät

### Halkaistu sisäputki, puolipohjaus ja pohjan betonointi





Antti Kalliainen, Ville Haakana, Matti Korhonen,  
Jari Mäkinen, Pauli Kollisoja

## Teräsrumpujen uudet korjausmenetelmät

Halkaistu sisäputki, puolipohjaus ja pohjan betonointi

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 26/2016

*Kannen kuvat: Ville Haakana ja Marko Huhtakallio*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-268-5

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

**Antti Kalliainen, Ville Haakana, Matti Korhonen, Jari Mäkinen ja Pauli Kolisoja: Teräsrumpujen uudet korjausmenetelmät - Halkaistu sisäputki, puolipohjaus ja pohjan betonointi.** Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2016. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 26/2016. 70 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-268-5.

**Avainsanat:** teräs, rummut, korjaus, putket, betonityöt

## Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa arvioitiin uudentyyppisten korjausmenetelmien soveltuvuutta teräksestä valmistettujen tierumpujen käyttöiän pidentämiseksi. Tutkimuksessa rajaututtiin tarkastelemaan sellaisia korjausmenetelmiä, joita käyttämällä rumpuputken aukon koko pienenee mahdollisimman vähän. Rumpujen korjaaminen on kannattavinta kohteissa, joissa rummun asennussyvyys on suuri tai tien aukikaivaminen aiheuttaa suuret liikenteenjärjestelykustannukset.

Tutkimuksessa on tarkasteltu kolmea uutta menetelmää: halkaistu sisäputki, puolipohjaus ja pohjan betonointi. Näistä kahta ensinnä mainittua kokeiltiin verraten matalalla peitesyvyydellä olevissa rummuissa, mistä johtuen niistä oli mielekästä mitata myös rumpurakenteen mekaanista toimintaa raskaan ajoneuvoyhdistelmän ajaessa mittauskohteen yli. Pohjan betonointimenetelmän koekohteena toimineella rummulla peitesyvyys on sitä vastoin niin suuri, että rumpuputkeen ylittävästä ajoneuvosta mobilisoituvat muodonmuutokset jäävät oletettavasti merkityksettömän pieniksi. Tästä johtuen kyseiseltä koekohteelta kerätyt havainnot rajoittuvat pelkästään korjausrakenteen periaatteen ja toteutuksen dokumentointiin. Niitä kahta koekohdetta, joilla tehtiin mittauksia, tarkasteltiin myös tarkemmin elementtimenetelmään perustuvien mallien avulla.

Kaikki tutkimukseen valikoituneet korjausmenetelmät osoittautuivat rakennettujen koekohteiden perusteella toteuttamiskelpoisiksi. Kahdessa kohteessa kuormituskokeiden perusteella saatujen mittaustulosten perusteella korjausmenetelmät arvioitiin myös rummun mekaanisen toiminnan kannalta toimiviksi ratkaisuuksi. Mittausten avulla todennetut jännitys- ja muodonmuutostasot jäivät verrattain maltillisiksi, vaikka rummun peitesyvyys oli koekohteissa melko pieni.

Aiemmissä rumpuputken mekaanisen toiminnan mallinuksissa käytetyn PLAXIS 3D-ohjelmiston rinnalla mallinnettiin tässä tutkimuksessa rumpuputken syntyviä rasituksia tarkemmin myös ANSYS-ohjelmistolla. Tämän osalta todettiin, että korjatun rumpuputken mekaanista käyttäytymistä ei saatu verifioitua uskottaviksi arvioiduilla materiaaliparametreilla. Suurin yksittäinen laskennallista virhettä aiheuttava tekijä oli ANSYS-ohjelmistossa käytössä ollut materiaalimalli, joka mahdollisti vetojännitysten syntyminen sitomattomiin tien rakennekerroksiin. Tällöin liikennekuormitus ei vaikuta etenkään tierakenteen syvyysuunnassa tarpeeksi suurena, ja myös rummun yläpintaa rasittava puristusjännitys jää laskentamalleissa liian pieneksi. Tulevia korjausratkaisuja ei siis tutkimuksen tulosten perusteella pystytä verifioimaan pelkästään laskennallisesti tässä tutkimuksessa käytetyllä lähestymistavalla, mikäli rajautaan uskottaviksi arvioituihin materiaaliparametreihin tien rakennekerrosten ja pohjamaan osalta. Näin ollen laskennallisten parametrien määrittämisen tueksi tarvitaan tarkempia tietoja joko rumpuputken käyttäytymisestä tai rumpua ympäröivistä maakerroksista.

**Antti Kalliainen, Ville Haakana, Matti Korhonen, Jari Mäkinen och Pauli Kolisoja: Nya reparationsmetoder för vägtrummor i stål – kluvet infodringsrör, halvsulning och betongering av botten.** Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2016. Trafikverkets undersökningar och utredningar 26/2016. 70 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-268-5.

## Sammanfattning

I denna undersökning bedömdes nya reparationsmetoders lämplighet för att förlänga livslängden för vägtrummor tillverkade i stål. I undersökningen avgränsade man sig till att granska sådana reparationsmetoder som bidrar till att minska trumrörets öppning så lite som möjligt. Reparation av vägtrummor är mest lönsamt på ställen där vägtrumman har monterats djupt eller där det skulle orsaka stora kostnader för trafikarrangemang att gräva upp vägen.

I undersökningen har tre nya metoder granskats: kluvet infodringsrör, halvsulning och betongering av botten. Av dessa testades de två förstnämnda på vägtrummor med förhållandevis låg överfyllnadshöjd och därför var det intressant att mäta även trumkonstruktionens mekaniska aktivitet när en tung fordonskombination körde över mätobjektet. Överfyllnadshöjden för den trumma som utgjorde testobjekt för betongering av botten var däremot så stor att deformationen som mobiliserades av fordon som kör över trumrören antagligen är obetydlig. Därför begränsar sig de iakttagelser som samlats in vid testobjektet i fråga till enbart dokumentering av principen för reparationskonstruktionen och genomförandet. De två testobjekt där mätningar gjordes granskades även noggrannare med hjälp av modeller som baserar sig på elementmetoden.

Alla de reparationsmetoder som valts ut till undersökningen visade sig vara genomförbara utgående från de byggda testobjekten. Utgående från mätresultaten som erhöles i belastningstest vid två objekt bedömdes reparationsmetoderna även vara fungerande lösningar med tanke på trummans mekaniska aktivitet. De spännings- och deformationsnivåer som konstaterades med hjälp av mätningarna var jämförelsevis rimliga, trots att trummans överfyllnadshöjd vid testobjekten var relativt liten.

Parallellt med programvaran PLAXIS 3D som använts i tidigare modelleringar av trumrörets mekaniska aktivitet modellerades i denna undersökning belastningar som uppstår i trumröret noggrannare även med programvaran ANSYS. När det gäller detta konstaterades att beteendet hos ett reparerat trumrör inte kunde verifieras trovärdigt med de bedömda materialparametrarna. Den faktor som orsakade det största enskilda kalkylmässiga felet var materialmodellen som användes i programvaran ANSYS och som möjliggjorde uppkomsten av dragbelastning i vägens obundna konstruktionslager. Då är trafikbelastningens inverkan framför allt inte i djupgående riktning i vägkonstruktionen tillräckligt stor och även den tryckspänning som belastar trummans ovansida är för liten i beräkningsmodellerna. På basis av undersökningens resultat kan framtida reparationslösningar inte verifieras enbart kalkylmässigt med den metod som användes i denna undersökning, om man begränsar sig till materialparametrar som bedömts vara tillförlitliga när det gäller vägens konstruktionslager och undre jordlager. Därför behövs noggrannare uppgifter antingen om trumrörets beteende eller om de jordskikt som omger trumman till stöd för att bestämma de kalkylmässiga parametrarna

**Antti Kalliainen, Ville Haakana, Matti Korhonen, Jari Mäkinen and Pauli Kolisoja: New steel culvert repair methods – Split liner, half-relining and paving the invert with concrete.** Finnish Transport Agency, Technology and Environment. Helsinki 2016. Research reports of the Finnish Transport Agency 26/2016. 70 pages and 1 appendix. ISSN-L ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-268-5.

## Summary

This study evaluated the suitability of new types of repair methods for extending the lifetime of steel culvert pipes. The research was limited to the examination of repair methods that decrease the size of the culvert pipe opening as little as possible when used. Repairing culverts is most cost-effective in locations where the culvert installation depth is large or open excavation of the road would result in major traffic management costs.

Three new methods were examined in the study: split liner, half-relining and paving the invert with concrete. Of these, the first two methods mentioned were tested with culverts with a relatively low cover depth. Due to this, it was also reasonable to test the mechanical behaviour of the culvert structures in question when a heavy vehicle combination drives over the measurement point. The cover depth of the test culvert for paving the invert with concrete, on the other hand, was so large that any pipe deformations mobilised by a vehicle running over it are likely to be insignificant. Consequently, the observations collected from the test site in question are limited to documenting the principle and implementation of the repair structure. The two test sites where measurements were carried out were also examined in greater detail with models based on the finite-element method.

All repair methods selected for the study proved to be viable on the basis of the test sites built. Based on the measurement results obtained from loading tests at two locations, the repair methods were also assessed to be working solutions in terms of the mechanical functioning of the culvert. The stress and deformation levels verified through measurements remained relatively modest even though culvert cover depth was fairly small at the test sites.

Alongside the PLAXIS 3D software previously used in modelling the mechanical behaviour of culverts, in this study the stresses generated in the culvert pipe were modelled in greater detail with ANSYS software as well. In this respect, it was established that the mechanical behaviour of the repaired culvert pipe could not be verified with material parameters estimated as credible. The single greatest factor causing computational error was the material model used in the ANSYS software which enabled the generation of tensile stresses in the unbound structural layers of the road. Consequently, traffic load does not have a sufficiently powerful impact, particularly in the depth direction of the road structure. The bearing stress to the upper surface of the culvert remains too small in the calculation models as well. Therefore, based on the results of the study, future repair solutions cannot be verified based on calculations alone with the approach used in this study if they are to be limited to material parameters estimated as credible with regard to the structural layers and bed of the road. Further information regarding either the behaviour of the culvert pipe or the surrounding strata is thus needed to support the determination of the computational parameters.

## Esipuhe

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää teräksestä valmistetuille tierummuille innovoitujen, uusien korjausmenetelmien käyttökelpoisuutta toteutettavuuden ja mekaanisen toiminnan kannalta.

Tutkimusraportin ovat laatineet Antti Kalliainen ja Ville Haakana TTY:n maa- ja pohjarakenteiden yksiköstä. Haakana on koonnut koekohteita ja mittauksia käsittelevän osuuden ja Kalliainen mallinnustarkasteluja käsittelevän osuuden. ANSYS-ohjelmistolla tehdyistä mallinuksista ovat vastanneet Matti Korhonen ja Jari Mäkinen TTY:n rakenteiden mekaniikan yksiköstä. Työtä ovat ohjanneet Pauli Kolisoja TTY:n maa- ja pohjarakenteiden yksiköstä sekä Kari Lehtonen ja Sami Petäjä Liikennevirastosta. Projektiryhmän toimintaan ovat lisäksi osallistuneet Antero Nousiainen Destia Oy:stä ja Jouko Selkämaa Oy ViaCon Ab:sta.

Helsingissä toukokuussa 2016

Liikennevirasto  
Tekniikka ja ympäristö -osasto



# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	9
2	TUTKIMUSKOHTEET JA KORJAUSMENETELMÄT .....	11
2.1	Kohde 1 - halkaistu sisäputki .....	12
2.1.1	Perustiedot .....	12
2.1.2	Korjausmenetelmä .....	14
2.2	Kohde 2 - puolipohjaus.....	14
2.2.1	Perustiedot .....	14
2.2.2	Korjausmenetelmä .....	16
2.3	Kohde 3 - pohjan betonointi.....	17
2.3.1	Perustiedot .....	17
2.3.2	Korjausmenetelmä .....	18
3	KUORMITUSKOKEET .....	20
3.1	Mitattavat suureet ja instrumentointi.....	20
3.1.1	Poikkileikkauksen muodonmuutosten mittaaminen .....	20
3.1.2	Venymien mittaaminen .....	21
3.1.3	Kuormitusajoneuvon renkaiden sijainnin mittaaminen.....	22
3.2	Rumpujen kuormittaminen.....	22
3.2.1	Kuormitusajoneuvo.....	22
3.2.2	Kuormitusten toteutus .....	23
4	MITTAUSTULOKSET.....	24
4.1	Yleistä mittaustuloksista .....	24
4.1.1	Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset.....	24
4.1.2	Rummun laen venymät.....	25
4.1.3	Muodonmuutosarvojen valitseminen .....	26
4.1.4	Ajolinjan yhdistäminen muodonmuutosten maksimiarvoihin.....	26
4.2	Esimerkki mittaustuloksista .....	27
4.3	Mittaustulokset kohteittain .....	29
4.3.1	Halkaistu sisäputki, betonitäyttö .....	29
4.3.2	Halkaistu sisäputki, uretaanitäyttö.....	33
4.3.3	Puolipohjaus .....	37
5	KORJAUSKOHTEIDEN MALLINTAMINEN .....	41
5.1	Korjauskohteiden alkutilanteen mallintaminen .....	41
5.1.1	Halkaistu sisäputki.....	43
5.1.2	Puolipohjaus .....	44
5.2	Maaparametrien muuntaminen .....	45
5.3	Rumpujen korjausmenetelmien mallintaminen.....	50
5.3.1	Halkaistu sisäputki.....	51
5.3.2	Puolipohjaus .....	59
5.4	Herkkyystarkastelut .....	64
5.4.1	Tartuntapalojen pitkäaikaiskestävyys.....	64
5.4.2	Vanhan ja uuden putken välisen raon pienentäminen polyuretaanitäytöllä .....	66

6 PÄÄTELMÄT .....68

LÄHTEET .....70

LIITTEET

Liite 1 Rumpujen korjausmenetelmien työmenetelmä-kuvaukset

# 1 Johdanto

Uusi raskaiden ajoneuvojen massoja ja mittoja säätelevä ajoneuvoasetus astui voimaan 1.10.2013 alkaen. Asetuksen myötä raskaiden rekkojen sallitut kokonais- ja telimassat kasvoivat. Raskaiden ajoneuvojen kuormitusvaikutuksia on sittemmin selvitetty sekä paksupäällysteisen päätien että kevyemmin rakennetun ohutpäällysteisen tien olosuhteissa tehdyillä kenttämittauksilla ja näitä tukevilla mallinnustarkasteluilla. Myöhemmässä tutkimuksessa keskityttiin tarkastelemaan raskaiden ajoneuvojen aiheuttamia rasituksia matalahkolla asennussyvyydellä sijaitseviin teräs- ja muovirumpuihin (Haakana et al. 2015).

Liikennekuormituksen muuttumisen lisäksi tienpitäjä joutuu tekemään rakenteiden käyttöajasta riippuvia korjauksia tien eri rakenneosiin, myös tierumpuihin. Yhtäältä tieverkolla on havaittu olevan korjauksen tarpeessa olevia rumpuputkia ja toisaalta ilmastonmuutos lisää erilaisten ääri-ilmiöiden, kuten rankkasateet ja tulvat, toistumistiheyttä. Perinteisesti viallisia rumpuja on korjattu sujuttamalla halkaisijaltaan pienempi rumpuputki vioittuneen putken sisään. Tämä kuitenkin pienentää rummun läpivirtauskapasiteettia, mikä ei ole järkevää, kun sademäärähuiput kasvavat. Toisena korjausmenetelmänä on käytetty rumpuputken vaihtamista tierakenne auki kaivamalla. Tämä puolestaan aiheuttaa liikenteellisen haitan, joka on sitä pidempi, mitä syvemmällä tierakenteessa vaihdettava rumpu on. Samalla myös vaihtamisen taloudellisuus heikkenee. Edellä kuvattujen seikkojen valossa olisi tarpeellista etsiä ratkaisuja, joissa vioittunut rumpu voitaisiin korjata ilman tierakenteen aukikaivua. Lopputuloksen tulisi myös pienentää rummun aukkokokoa mahdollisimman vähän. Tämän tutkimuksen tavoitteena on ollut tuottaa lisätietoa erilaisten teräksisille rumpuputkille soveltuvien korjausmenetelmien toteutuksesta ja mekaanisesta toiminnasta liikennekuormituksen alaisena.

Tutkimuskohteena tässä tutkimuksessa on ollut kolme erilaista teräksisten rumpuputkien korjausmenetelmää, joita kutakin on kokeiltu yhdellä kokekohteella. Kokeiltavina korjausmenetelminä ovat tutkimuksessa olleet rumpuputken sujutettava halkaistu sisäputki, putken nk. puolipohjaus sekä pohjan betonointi. Näistä kahta ensinnä mainittua kokeiltiin verraten matalalla peitesyvyydellä olevissa rummuissa, mistä johtuen niistä oli mielekäästä mitata myös rumpurakenteen mekaanista toimintaa raskaan ajoneuvoyhdistelmän ajaessa mittaushetken yli. Pohjan betonointimenetelmän kokekohteena toimineella rummulla peitesyvyys on sitä vastoin niin suuri, että rumpuputken ylittävistä ajoneuvosta mobilisoituvat muodonmuutokset jäävät oletettavasti merkityksettömän pieniksi. Tästä johtuen kyseiseltä kokekohteelta kerätyt havainnot rajoittuvat pelkästään korjausrakenteen periaatteen ja toteutuksen dokumentointiin.

Rumpukorjausten toteutustavan dokumentoinnin ja rumpuputkien mekaanisen toiminnan mittaamisen ohella tutkimuksen keskeisenä tavoitteena on ollut kehittää valmiuksia teräksisten rumpuputkien korjausrakenteiden mallintamiseen. Päättyökäkaluna rumpurakenteen mekaanisen toiminnan mallinnuksessa on tässä tutkimuksessa ollut elementtimenetelmään perustuva yleiskäyttöinen rakenteiden analysointiohjelmisto ANSYS. Tämän rinnalla mallinnuksissa on käytetty maamateriaalien mallintamiseen paremmin soveltuvaa PLAXIS 3D -ohjelmistoa, jota käytettiin myös aiemmassa, hyväkuntoisten teräs- ja muovirumpujen toimintaan keskittyneessä tutkimuksessa. Näin on pyritty varmistamaan ANSYS-ohjelmistolla tehtävien tarkempien korjausrakennemallinnusten yhteensopivuus aiemmassa tutkimuksessa toteutettujen

ja toimiviksi todettujen rummun ja tierakenteen yhteistoimintaa kuvaavien PLAXIS-mallinnusten kanssa.

Tämän raportin luvussa 2 esitellään tarkemmin tutkimuksen kohteina olleiden kolmen koerakennuskohteen ominaispiirteet ja koekohteilla toteutetut korjausrakenteet. Luvussa 3 esitellään vastaavasti mittauskohteilla tehtyjen kuormituskokeiden toteutustapa sekä tierumpuihin tehtyjen mittausinstrumentointien että kuormitusajoneuvona käytetyn täysperävaunullisen kuorma-auton osalta. Varsinaiset mittaus tulokset, joita käytetään tutkimuksen yhteydessä tehtävien mallinnusten verifiointiin, esitellään luvussa 4. Tutkimukseen sisältyvien laskennallisten mallinnusten keskeiset tulokset esitellään luvussa 5 ja tutkimuksen perusteella tehdyt päätelmät kootaan yhteen luvussa 6.

## 2 Tutkimuskohteet ja korjausmenetelmät

Tierakenteeseen asennetuissa rummuissa on havaittu kolme yleistä vauriotyyppiä:

- Roudan aiheuttamat muutokset rumpuputken asemaan. Rumpuputki voi nousta roudan vaikutuksesta joko osin tai kokonaan toiseen asemaan. Tämä aiheuttaa muutoksia rummun läpivirtaavaan vesimäärään. Ongelmaa esiintyy etenkin liittymärummuissa.
- Betoniputkien saumojen aukeaminen. Osassa betonirumpuja putkielementtien väliset saumat aukeavat muun muassa roudan aiheuttamien liikkeiden ja maapohjan painumien vaikutuksesta, joskus suhteellisen nopeastikin asennuksen jälkeen. Auenneesta saumasta pääsee valumaan maa-ainesta rumpuputken sisään. Tämä voi aiheuttaa rumpujen osittaista tukkeutumista rummun sisällä, mutta on ongelmallista myös tierakenteen toiminnan kannalta, sillä putken sisään valuva maa-aines jättää tierakenteen sisään tyhjätiloja, jotka voivat vaikuttaa oleellisesti tierakenteen kuormituskestävyyteen ja aiheuttaa tien pinnan reikiintymistä.
- Teräsrumpujen ruostuminen. Teräsrumpu syöpyy veden vaikutuksesta normaalissa virtaustilanteessa olevan vesirajan kohdalta. Riippuen rummun läpi keskimäärin virtaavan veden määrästä ja rummun koosta vesirajan korkeusasema voi vaihdella. Riippuen vesirajan sijainnista voitaisiin osassa tapauksista mahdollisesti tyytyä korjaamaan vain rummun syöpyneitä alaosaa.

Tässä tutkimuksessa keskitytään syöpyneiden teräsrumpujen korjausmenetelmiin. Valitut tutkimuskohteet olivat ajan saatossa vaurioituneita teräksiä tierumpuja Uudenmaan ELY-keskuksen alueella. Tutkittavia kohteita oli yhteensä kolme kappaletta ja ne poikkesivat toisistaan mm. vaurioitumisasteen, poikkileikkauskoon ja peitesyvyyden mukaan. Tutkimuksen aikana kohteet korjattiin käyttäen kolmea erilaista menetelmää. Kahdessa kohteessa tehtiin kuormituskokeet raskaalla ajoneuvolla ennen ja jälkeen korjausten. Näissä kohteissa pyrittiin valitsemaan korjattava rumpu nimenomaisesti siten, että rummun peitesyvyys on mahdollisimman pieni. Tällä pyrittiin varmistamaan mittausten onnistuminen sekä korjausratkaisujen mahdollisesti aiheuttamien rasitusmuutosten keskinäinen vertailtavuus. Normaalityapauksessa korjausratkaisut soveltuvat etenkin kohteisiin, joissa on suuri peitesyvyys, jolloin rakenteen aukikaivaminen ei ole taloudellista. Taulukossa 2.1 on esitetty tarkemmat tiedot tutkimuskohteista. Kaikissa tutkimuksen valikoituneissa koekohteissa rummut olivat todennäköisesti suhteellisen iäkkäitä, koska korjattavien rumpujen ainevahvuus oli poikkeuksellisen suuri verrattuna rumpuputken halkaisijaan. Kaikkien korjauskohteiden työmenetelmäkuvaukset havaintoineen on koottu liitteeseen 1.

Taulukko 2.1 Tutkimuskohteet. Kohteissa 1 ja 2 tehtiin kuormituskokeet ennen ja jälkeen korjausten.

Kohde- nume- ro	Rummun korjaus- menetel- mä	Rummun halkaisija [mm]	Rum- mun pituus [m]	Peitesyvyys [m]	Osoite	Tienumero/ tieosa/etäi- syys tieosan alusta
1.	Halkaistu sisäputki	1000	9,5	0,20... 0,35	Romsar- byntie 128, Raasepori	11071/1/4466
2.	Puoli- pohjaus	1200	11,5	0,30... 0,90	Rankilantie 306, Inkoo	11131/1/3044
3.	Pohjan betonointi	1200	22	3,0	Nitlaxintie 500, Raasepori	11023/1/4950

## 2.1 Kohde 1 - halkaistu sisäputki

### 2.1.1 Perustiedot

Kohde sijaitsee vähäliikenteisellä 5,8 m levyisellä soratiellä. Kohteen osoite on Romsarbyntie 128, Raasepori ja koordinaatit ovat: 60°09'30.2"N 23°47'05.3"E. Rummun pituus oli 9,5 m ja halkaisija 1000 mm. Rumpu oli varsin matalaan asennettu ja peitesyvyys vaihteli 0,20...0,35 m välillä. Rummun alaosassa oli pintaruostetta hieman yli poikkileikkauksen puolenvälin. Enemmän syöpynyttä osuutta oli noin klo 4-8 välisellä alueella rummun pohjalla. Rummun ainevahvuus oli 3 mm. Kohde on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Romsarbyntie 128, Raasepori. Vasemmalla on esitettyä yleiskuva koe-kohteen tiestä, joka oli sorapäälysteinen ja vähäliikenteinen. Oikealla on esitettyä kuva rummun sisältä mittauslaitteisto asennettuna. Rummun halkaisija oli 1000 mm ja peitesyvyys vaihteli 0,20...0,35 m välillä. Rummun alaosassa oli pintaruostetta hieman yli poikkileikkauksen puolenvälin.

Kohteella tehtiin rakennekerrospaksuuksien ja -moduulien määrittystä DCP-laitteella. 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 koekohteella tehtyjen DCP-määrittysten perusteella tulkitut rakennekerrosten paksuudet sekä mittauksista johdetut rakennekerrosten jäykkyyttä kuvaavat E-moduulit. Mittaukset on lopetettu, kun pohjamaakerroksen yläpinnan sijainti on saatu varmistettua, tai kun laite on tunkeutunut mittautangon määräsyyvyteen (noin 1100 mm), joten pohjamaakerrosten kokonaispaksuus ei ole tiedossa. Lisäksi osasta rakennekerroksista puuttuu määritetty E-moduuli, koska tierakenteen alemman kerroksen ja rummun ympärystäytön määritetyt moduulit olivat samaa suuruusluokkaa.

Taulukko 2.2. Romsarbyntien koekohteella DCP-laitteella määritetyt rakennekerrospaksuudet ja E-moduulit. (\*: Laitteen maksimitunkeuma saavutettu.

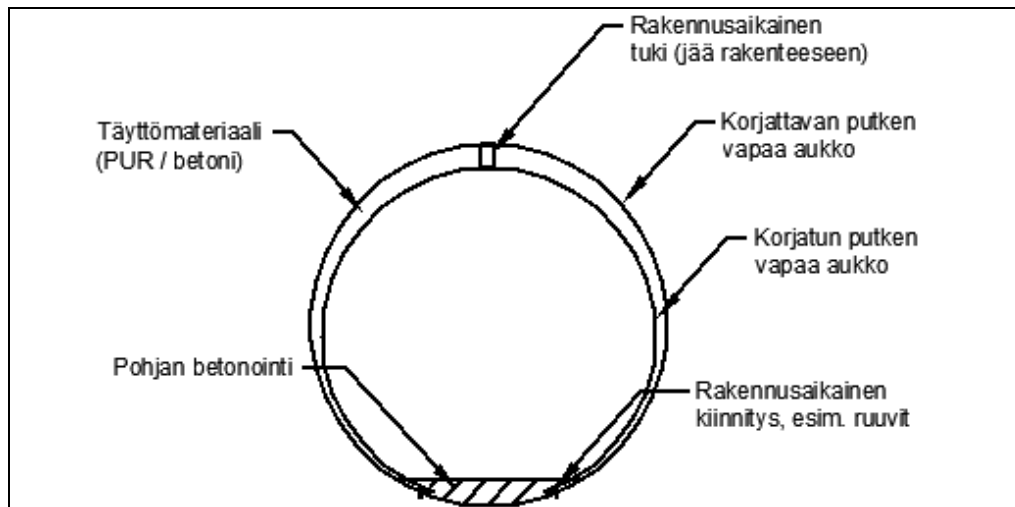
Halkaistu sisäputki			
	Etäisyys rummun keskilinjasta (m)	Kerrospaksuus (mm)	E (MPa)
Tierakenne, ylempi kerros	0,6	350	350
Tierakenne, alempi kerros		-	-
Rummun ympärystäyttö		750 (*)	150
Pohjamaa		-	-
Tierakenne, ylempi kerros	1	330	360
Tierakenne, alempi kerros		200	190
Rummun ympärystäyttö		150	130
Pohjamaa		-	64
Tierakenne, ylempi kerros	2,5	370	335
Tierakenne, alempi kerros		170	160
Rummun ympärystäyttö		-	-
Pohjamaa		-	61
Tierakenne, ylempi kerros	5	360	300
Tierakenne, alempi kerros		180	120
Rummun ympärystäyttö		-	-
Pohjamaa		-	62

### 2.1.2 Korjausmenetelmä

Vanhaan vaurioituneeseen rumpuun sujutetaan uusi, halkaisijaltaan pienempi, pohjasta halkaistu rumpuputki. Putki on halkaisun jälkeen sidottu esim. pannoilla. Kun putki on vanhan putken sisässä, sidonta avataan. Uusi sujutettu putki aukeaa omalla voimallaan kiinni korjattavaan putkeen asennettuihin ohjureihin, jolloin uuden ja vanhan putken väliin jää halutun paksuinen betonilla tai polyuretaanilla täytettävä rako. Tarvittaessa putken avautumista voidaan avustaa tunkkaamalla. Tunkattu putki tuettiin alaosaan muodostuvan hahlon reunoilta ruuveilla.

Sujutetun putken halkaistu pohja valetaan betonilla (ks. kuva 2.2). Betonivalun jälkeen putkien väliin jäävä rako täytetään. Raon on tarkoitus olla mahdollisimman pieni, mutta kuitenkin riittävän suuri, jotta valittu täyteaine saadaan luotettavasti asennettua koko rumpuputkien väliselle alueelle. Mikäli täyteaineena käytetään betonia, korjauksen tuloksena syntyvä liittorakenne on vanhaa olemassa olevaa rakennetta jäykempi. Toiseksi täyteaineeksi on tässä tutkimuksessa valittu polyuretaani. Polyuretaani aiheuttaa vähemmän liittovaikutusta, jolloin rakenteen kuormituskäyttäytyminen oletettavasti muuttuu vähemmän verrattuna tilanteeseen ennen korjausta.

Romsarbyntien koekohteessa kokeiltiin molempia täyteainevaihtoehtoja. Korjattava rumpu täytettiin pituussuunnassa puoleen väliin asti betonilla (luoteen puoli) ja loppuosa polyuretaanivaahdolla (kaakon puoli).



Kuva 2.2 Periaatekuva halkaisusujutuksesta.

## 2.2 Kohde 2 - puolipohjaus

### 2.2.1 Perustiedot

Kohde sijaitsee vähäliikenteisten sorateiden risteyskohdassa. Kohteen koordinaatit ovat: 60°07'08.6"N 24°01'36.4"E. Rummun pituus oli 11,5 m ja halkaisija 1200 mm. Rummun peitesyvyys vaihteli 0,30...0,90 m välillä. Rumpu oli ruostunut puhki alaosastaan ja lisäksi reunoilla oli havaittavissa pintaruostetta, noin klo 4–8 välisellä vyöhykkeellä. Lisäksi rummun pohjalla oli maa-ainesta sekä irtonaisia kiviä. Rummun ainevahvuus oli 3 mm. Kohde on esitetty kuvassa 2.2





*Kuva 2.3 Rankilantie 306, Inkoo. Vasemmalla on esitettyä yleiskuva koekohteen tiestä, joka oli sorapäällysteinen ja vähäliikenteinen. Oikealla on esitettyä kuva rumpun sisältä mittauslaitteisto asennettuna. Rumpun halkaisija oli 1200 mm ja peitesyvyys vaihteli 0,30...0,90 m välillä. Rumpu oli ruostunut puhki alaosaan ja lisäksi reunoilla oli havaittavissa pintaruostetta.*

Rankilantien koekohteella tehtiin myös rakennekerrospaksuuksien ja -moduulien määritystä DCP-laitteella. Kohteen tierakenteessa oli jonkin verran kiviä, joihin kairaukset päättyivät. Tästä syystä moduuleja ja kerrospaksuuksia jouduttiin määrittämään myös kauempaa rumpua sekä tekemään erillisiä pohjamaan moduulimäärityksiä tien viereiseltä pellolta. Useamman kairauksen avulla saatiin kuitenkin suhteellisen hyvä kuva koekohteen rakennekerrospaksuuksista ja pohjamaan laadusta.

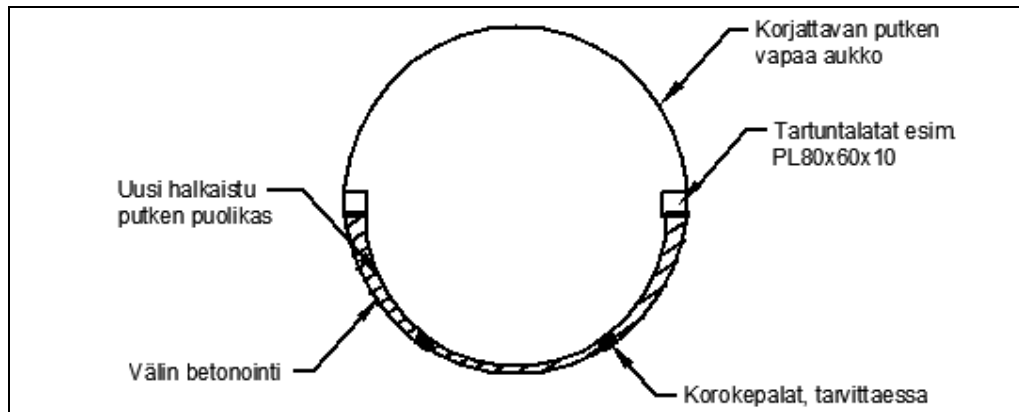
Taulukko 2.3 Rankilantien koekohteella DCP-laitteella määritetyt rakennekerrospaksuudet ja E-moduulit. (\*: Pohjamaan määritykset tehty erillisellä kokeella tien vierestä.

Puolipohjaus			
	Etäisyys rummun keskilinjasta (m)	Kerrospaksuus (mm)	E (MPa)
Tierakenne, ylempi kerros	1	170	230
Tierakenne, alempi kerros		300	160
Rummun ympärystäyttö		350	140
Pohjamaa		600 (*)	49
Tierakenne, ylempi kerros	2	200	350
Tierakenne, alempi kerros		-	-
Rummun ympärystäyttö		-	-
Pohjamaa		500 (*)	58
Tierakenne, ylempi kerros	5	130	175
Tierakenne, alempi kerros		280	105
Rummun ympärystäyttö		-	-
Pohjamaa		-	65
Tierakenne, ylempi kerros	8	150	300
Tierakenne, alempi kerros		300	160
Rummun ympärystäyttö		-	-
Pohjamaa		-	60

### 2.2.2 Korjausmenetelmä

Puolipohjauksessa korjattavaan putkeen sujutetaan uuden teräsrummun puolikas (kuva 2.4). Uuden ja vanhan putken väli täytetään betonilla. Uuden putken kiinnitys vanhaan tehdään hitsaamalla kiinnityspalat putken korjattavan osan yläreunaan. Kiinnityspala on lattateräs 80 x 60 x 10 mm ja se on esitetty kuvassa 2.5.

Kiinnityspalan tehtävänä on estää valumuottina toimivan putken puolikasta siirtymästä valunaikaisen paineen vaikutuksesta. Riittävä kiinnityspalan korroosion kestävyys saavutetaan asettamalla kiinnityspalalle riittävä paksuusvaatimus. Tartuntapalan käyttäytymistä on tarkasteltu laskennallisesti kappaleessa 5.4. Tartuntapalat asennettiin Rankilantien koekohteella rumpuun n. 550 mm jaolla.



Kuva 2.4 Periaatekuva puolipohjauksesta.



Kuva 2.5 Tartuntapala.

## 2.3 Kohde 3 - pohjan betonointi

### 2.3.1 Perustiedot

Kohde sijaitsee vähäliikenteisellä ohutpäällysteisellä tiellä. Kohteen osoite on Nitla-xintie 500, Raasepori ja koordinaatit ovat: 59°59'37.2"N 23°09'07.9"E Rummun pituus oli 22 m ja halkaisija 1200 mm. Rumpu on asennettu varsin syväälle, arvioilta 3 metriin. Rummun alaosa oli ruostunut vain pohjasta, noin klo 5–7 väliseltä vyöhykkeeltä. Rummun pohja ei ollut puhkiruostunut, mutta vesijuoksun tason yläpuolella oli myös muutamia puhki ruostuneita kohtia. Rummun ainevahvuus oli 3 mm. Kohde on esitetty kuvassa 2.6.

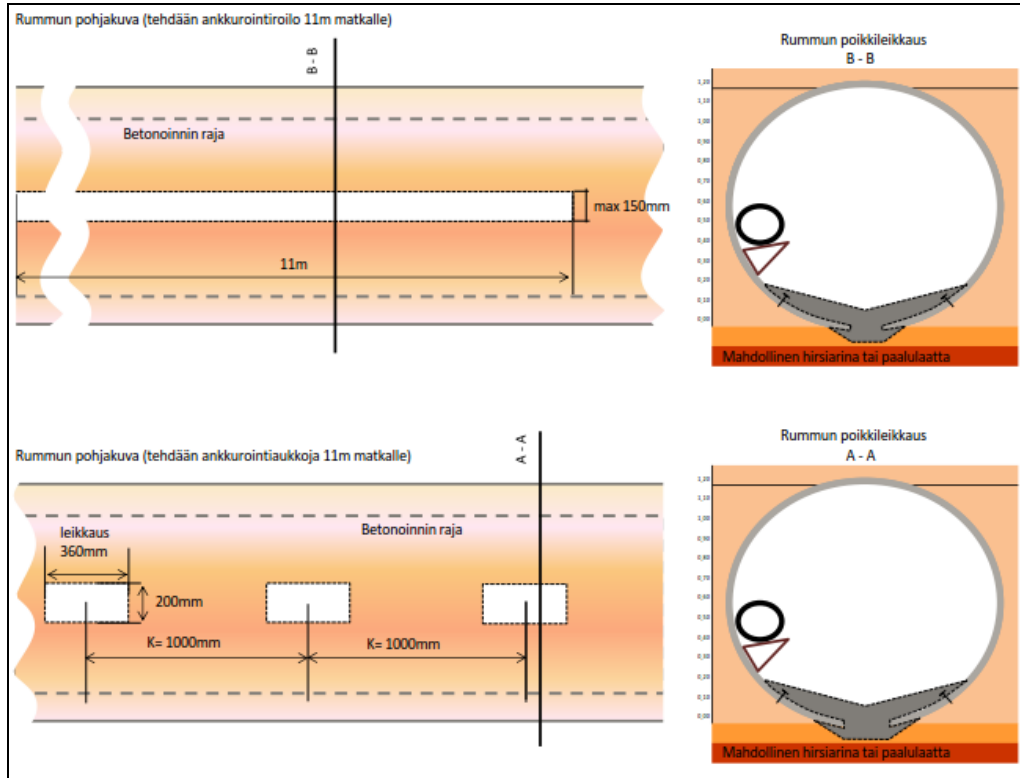


*Kuva 2.6. Nitlaxintie 500, Raasepori. Vasemmalla on esitettyä yleiskuva koekohteen tiestä, joka oli ohutpäällysteinen ja vähäliikenteinen. Oikealla on esitettyä kuva rummun sisältä. Rummun halkaisija oli 1200 mm ja peitesyvyys noin 3 metriä. Rumpu oli ruostunut alaosaan.*

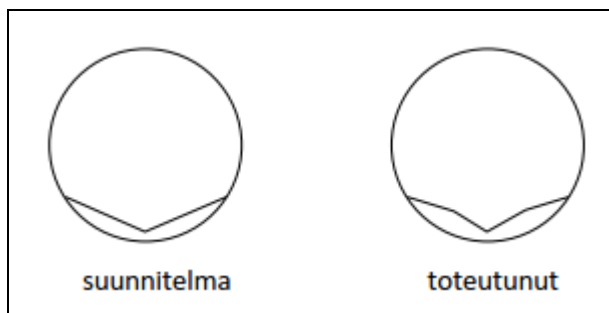
### 2.3.2 Korjausmenetelmä

Pohjan betonoinnissa leikataan ensin rummun pohjalle ankkurointiroilo. Tämän jälkeen roilon alueelta kaivetaan rummun arinatäyttömateriaalia pois, jotta valettava betoni pääsee levittäytymään rummun pohjan tason alapuolelle. Kohteessa on testattu kahta eri pohjan leikkaustapaa (kuva 2.7). Rummun toisessa päässä koko rummun pohja on leikattu auki 150 mm leveydeltä. Toisella puolella on tehty rummun pohjaan ankkurointireikiä kuvassa 2.7 esitetystä poiketen 900 mm välein. Ensimmäistä leikkaustapaa kannattaa käyttää vain kohteissa, joissa rummun pohja on kauttaaltaan ruostunut, sillä koko pohjan auki leikkaamisella aiheutetaan suurempi putken lommahtamisriski kuin ankkurointireikiä tekemällä.

Tämän jälkeen betonoinnin ulottamistason reuna-alueelle, noin 100 mm etäisyydelle teoreettisesta ulottumasta, on porattu ruuveja parantamaan teräksen ja betonin välistä ankkuroitumista. Ruuvien avulla pyritään estämään betonipohjauksen irtoaminen rummun pohjalta, mikäli betonoinnin ja rumpuputken väliin pääsee vettä, joka jäätyessään irrottaisi korjauksen putken reunoilta. Rumpuputken pumpattu kuitubetoni on muotoiltu käsin vastaamaan suunnitelmassa esitettyä riippuen betonin muokausmahdollisuuksista. Kuvassa 2.8 on esitetty arvio Nitlaxintien koekohteella toteutuneesta ratkaisusta.



Kuva 2.7 Pohjan betonoinnin periaate.



Kuva 2.8 Koekohteelle suunniteltu betonointi sekä arvio toteutuneesta betonointi-profiilista.

## 3 Kuormituskokeet

### 3.1 Mitattavat suureet ja instrumentointi

Kuormituskokeissa tarkoituksena oli selvittää rummun poikkileikkauksen muodonmuutoksia ja rasiuksia, kun sitä kuormitetaan raskaalla kuorma-autolla. Poikkileikkauksen muodonmuutoksia mitattiin siirtymäantureilla sekä pysty- että vaakasuunnassa. Rumpuun kohdistuvien rasiusten selvittämisessä hyödynnettiin rummun pintaan asennettuja venymäliuskoja. Anturit ja liuskat asennettiin kolmeen poikkileikkaukseen, jotka olivat noin 900 mm päässä toisistaan.

#### 3.1.1 Poikkileikkauksen muodonmuutosten mittaaminen

Rummun poikkileikkauksen pysty- ja vaakasuuntaisten muutosten mittaamiseen käytettiin siirtymäantureita, joissa oli 50 mm liikevara. Mittausanturin runko koostui kahdesta halkaisijaltaan erikokoisesta sisäkkäisestä teräsputkesta, jotka pystyivät liikkumaan toistensa suhteen. Halkaisijaltaan suuremman putken sisällä oli työntöjousi, jonka päälle halkaisijaltaan pienemmän putken pää asetettiin. Varsinainen siirtymäanturi ja sen vastakappale kiinnitettiin anturin runkoon letkukiristimillä.

Anturi asennettiin painamalla anturin rungon sisällä oleva jousi kasaan, jolloin anturi lyhenee. Kun anturi saatiin oikealle paikalleen rummun poikkileikkaukseen, jousi vapautettiin, jolloin anturi pitenee rummun poikkileikkauksen mittaiseksi. Rungon sisällä oleva jousi jätettiin kevyesti jännitykselle, jotta anturi palautuisi kuormituksissa tapahtuvista poikkileikkauksen muutoksista ja pysyisi paikallaan. Rungon sisällä olevan jousen aiheuttaman voiman voidaan katsoa olevan merkityksetön mittaustulosten kannalta. Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutosten mittaamiseen käytetyt anturit on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1 Vasemmalla: Siirtymäanturit asennettuna rummun sisälle. Mittausanturi koostui teräsputkista tehdystä rungosta sekä siirtymäanturista 50 mm liikevaralla. Oikealla: lähikuva mittausanturin runkoon kiinnitetystä siirtymäanturista ja sen vastakappaleesta.

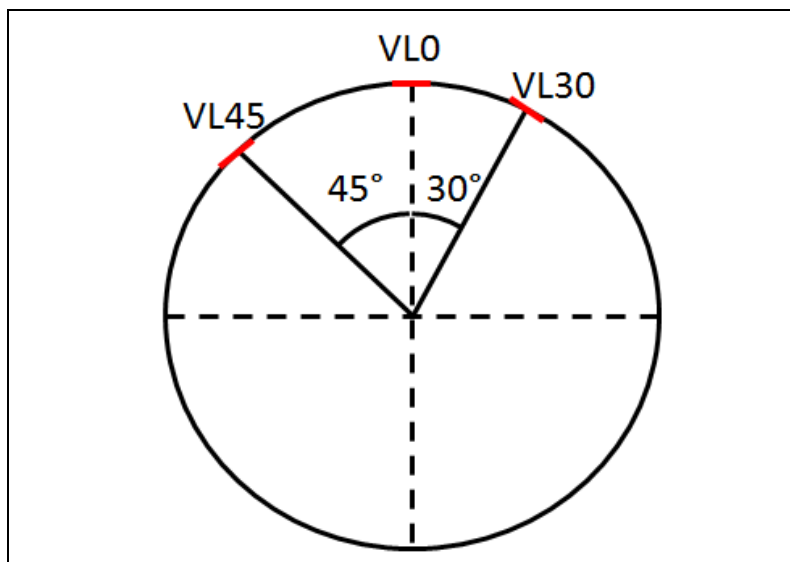
### 3.1.2 Venymien mittaaminen

Venymien mittaamisessa käytettiin rummun pintaan liimattavia yksiakiaalisia venymäliuskoja (ks. kuva 3.2). Liuskat asennettiin rummun sisäpuolelle. Ennen liuskojen asentamista rummun pinta puhdistettiin ja karhennettiin hiomapaperilla ja lopuksi asennuskohta pyyhittiin puhtaaksi asetoniin kastetulla paperilla



Kuva 3.2 Venymäliuska liimattuna rummun laelle. Ennen liimaamista rummun pinta hiottiin hiomapaperilla ja puhdistettiin asetoniin kastetulla paperilla.

Venymäliuskoja asennettiin rummun laelle kaikkiin poikkileikkaukseen. Lisäksi rumpujen korjaustöiden jälkeisiin kuormituskokeisiin venymäliuskoja asennettiin keskimmaiseen poikkileikkaukseen laen lisäksi sivuille 30 ja 45 asteen kulmaan rummun keskilinjasta (ks. kuva 3.3).



Kuva 3.3 Venymäliuskojen sijainnit rummun poikkileikkauksessa. Venymäliuskat VL0 asennettiin kaikkiin poikkileikkauksiin molemmissa kuormituskokeissa. VL30 ja VL45 asennettiin vain korjaustöiden jälkeisessä kuormituskokeessa ja ainoastaan keskimmaiseen poikkileikkaukseen.

### 3.1.3 Kuormitusajoneuvon renkaiden sijainnin mittaaminen

Mittaustulosten tarkastelua varten on hyvin oleellista tietää kuormitusajoneuvon ja edelleen rumpua kuormittavien renkaiden sijainti suhteessa rumpun muodonmuutoksia mittaaviin antureihin. Yhdistämällä renkaiden sijainti ja antureista saatu mitausdata pystytään paremmin arvioimaan, kuinka rumpu käyttäytyy kuormituksen alaisena.

Ajoneuvon renkaiden sijainnin mittaamista varten tielle asetettiin ruutulippukuviollinen muovimatto rumpun suuntaisesti. Ajoneuvon ylitykset tallennettiin videokuvalla. Tallenteista voidaan jälkikäteen selvittää rumpun ylittävän kuormitusajoneuvon renkaiden sijainnit tien poikittaissuunnassa. Kuvassa 3.3 on esitetty yksittäisen videotallenteen kuva, jossa ajoneuvo ylittää mittauskohdan.



*Kuva 3.4 Kuormitusajoneuvo ylittää mittauskohdan. Muovimattoon on maalattu ruutulippukuviota, joka koostuu 50\*50 mm alueista. Kun tiedetään maton reunan sijainti suhteessa mittaasantureihin, voidaan laskea jokaisen rumpua kuormittavan renkaan etäisyys suhteessa rummussa oleviin antureihin.*

## 3.2 Rumpujen kuormittaminen

### 3.2.1 Kuormitusajoneuvo

Kuormitusajoneuvo oli raskas kuorma-auto, joka koostui neliakselisesta vetoautosta ja kolmiakselisesta perävaunusta. (ks. kuva 3.4). Vetoauton teliakseleista ensimmäinen oli ylhäällä kuormituskokeiden ajan. Sekä vetoauto että perävaunu olivat ilmajousitetut. Ajoneuvon kokonaismassa oli 56,5 t, joka jakaantui akseleille 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 Kuormituskokeissa käytetty ajoneuvo. Ajoneuvon kokonaismassa oli 56,5 t, joka jakaantui akseleille seuraavasti: etuakseli 7,5 t, vetoauton teliakselit yhteensä 21 t, perävaunun ensimmäinen akseli 10 t ja perävaunun teliakselit yhteensä 18 t*

Sekä ajoneuvon että perävaunun akseleissa oli paripyörät pl. ajoneuvon etuakseli, jossa oli tyypin 385/65R22.5 leveä yksikkörenkas. Renkaiden ilmanpaineet olivat 800 kPa  $\pm$ 50 kPa. Kuormitusajoneuvon renkaat on esitetty taulukossa 3.1.

*Taulukko 3.1 Kuormitusajoneuvon renkaat.*

Akseli	Renkas	Koko
Etuakseli	Nokian, Hakka Truck 861	385/65R22.5
Vetoauton 1. teliakseli	Michelin, X	275/70R22.5
Vetoauton 2. teliakseli	Michelin, X	275/70R22.5
Perävaunun yksittäisakseli	Michelin, XDN Grip	295/60R22.5
Perävaunun 1. teliakseli	Continental, HSR1/Kuhmo	275/70R22.5
Perävaunun 2 teliakseli	Continental, HSR1/GT276	275/70R22.5

### 3.2.2 Kuormitusten toteutus

Kohteiden koekuormitukset tehtiin kahtena ajankohtana ennen ja jälkeen koekohteiden korjaamisen. Ensimmäiset kuormitukset tehtiin 10.–11.8.2015 ja toiset 22.–23.9.2015.

Koekuormituksessa kuormitusajoneuvolla ajettiin instrumentoidun rummun yli alhaisella nopeudella (30 km/h), jonka jälkeen ajoneuvo pysäytettiin muutamien kymmenien metrien päähän rummusta. Tämän jälkeen ajoneuvo peruutettiin 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 10–13 kpl.

## 4 Mittaustulokset

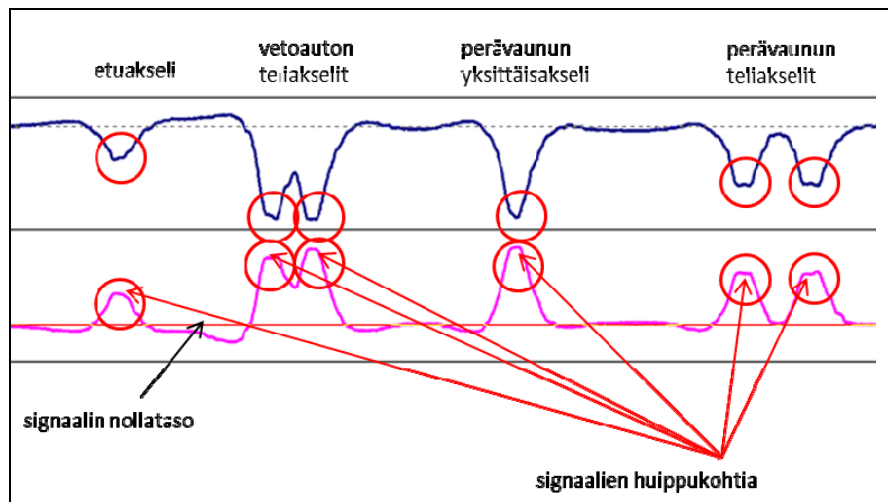
Tässä luvussa esitetään koekuormituksista mitattuja rummun halkaisijan muutoksia pysty- ja vaakasuunnassa sekä rummun laen venymiä. Rummun muodonmuutoksia mitattiin kolmesta mittaustilasta, jotka lyhennetään vastaisuudessa seuraavasti: ML1, ML2 ja ML3 (ks. kuva 4.3). ML1 sijaitsi keskellä tietä, ML2 uran kohdalla ja ML3 lähellä tien reunaa. Mittaustilat sijaitsivat 900 mm etäisyydellä toisistaan.

### 4.1 Yleistä mittaustuloksista

Koekuormitusten tavoitteena oli selvittää rummun poikkileikkauksen muodonmuutoksia kuormituksen alaisena. Erityisesti kiinnostuksen kohteena olivat kolmesta mittaustilasta mitattujen vasteiden maksimiarvot. Mikäli oletettaisiin, että renkaasta tulevan kuorman resultantti 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 kohtaan mm. rummun profiilin ja antureiden asentamisen hankaluuden vuoksi. Toisaalta renkailta välittyvän kuorman todellinen painopiste voi poiketa renkaiden keskilinjan kohdalta esimerkiksi renkaiden kallistuskulman, paripyörien mahdollisen ilmanpaine-eron, renkaiden epätaसान kulumisen tai tien profiilin vuoksi. Jotta voitaisiin varmistua muodonmuutosten maksimiarvojen mittaamisesta, tarvitaankin useita ylityksiä eri kohdista tien poikkileikkausta. Lisäksi ajouran paikkaa varioimalla saadaan tietoa siitä, kuinka pyöräkuorman vaikutus rumpuun jakautuu sivuttaissuunnassa.

#### 4.1.1 Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset

Koekuormituksen aikana mitatuista rummun pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutoksista tarkasteluun valittiin siirtymäantureista saaduista signaaleista itseisarvoltaan suurimmat arvot akselittain (ks. kuva 4.1). Näitä arvoja verrattiin signaalin nollassuureen ennen kuormitusta. Maksimiarvojen ja nollassuureen erotuksesta määritettiin akselin kuorman aiheuttama muodonmuutoksen maksimiarvo kullekin akselin ylitykselle erikseen. Yhdestä kuormitusajoneuvon ylityskerrasta määritettiin siis ajoneuvon akselien vastaava määrä muodonmuutosarvoja.



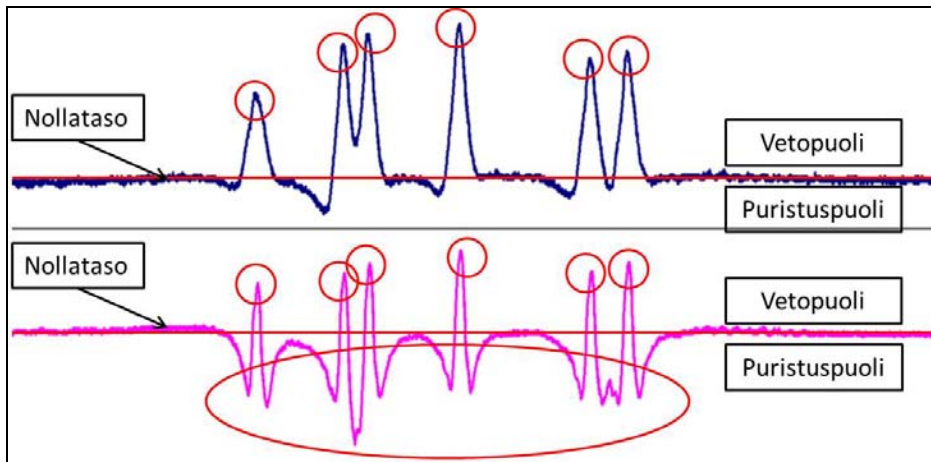
*Kuva 4.1 Tapa, jolla koekuormituksessa mitatuista muodonmuutossignaaleista määritettiin maksiarvot. Signaalien huippukohtia verrattiin signaalin nollatasoon, jolloin saatiin määritettyä muodonmuutosten maksimiarvot akseleittain. Kuvassa esitetyt signaalit ovat rumpun halkaisijan muutoksia pysty- ja vaakasuunnassa yhdestä kuormitusajoneuvon ylityskerrasta.*

Kuvassa 4.1 on esitetty kaksi siirtymäantureista saatua mittaussignaalia, joista sininen kuvaa rumpun pystyhalkaisijan muutosta ja vaaleanpunainen vaakahalkaisijan muutosta. Ennen jokaisen akselin huippukohtaa on havaittavissa pieni muutos signaalissa nollatason toiselle puolelle kuin mille huippuarvo tulee. Signaalien muodot johtuvat dynaamisesta kuormitustavasta (ks. luku 3.2.2). Kun kuormittava rengas lähestyy tien pituussuunnassa kohti rumpun lakikohtaa, kuorma painaa rumpua sen sivulta, jolloin rumpun poikkileikkauksen muodonmuutokset ovatkin toiseen suuntaan kuin renkaan ollessa aivan rumpun laen kohdalla. Tällöin esimerkiksi rumpun pystysuuntainen halkaisija kasvaa hieman. Kun rengas on aivan rumpun laella, rumpun poikkileikkaus luonnollisesti painuu pystysuunnassa kasaan, joka signaalissa näkyy selvänä huippuna alaspäin. Ennen huippuja näkyvät vastakkaissuuntaiset muodonmuutokset ovat itseisarvoltaan selvästi pienempiä kuin kuvassa 4.1 punaisella ympyrällä merkityt huiput.

#### 4.1.2 Rumpun laen venymät

Venymäliuskoista saatujen signaalien käsittelyssä käytettiin vastaavaa menetelmää kuin siirtymäantureissa, eli valittiin signaalin huiput akseleittain ja verrattiin arvoja signaalin nollatasoon ennen kuormitusta. Nollatason ja signaalin huipun erotuksesta saatiin määritettyä muodonmuutoksen maksimiarvo kullekin akselille erikseen. Venymäliuskojen signaaleissa oli havaittavissa vastaavanlainen ilmiö kuin siirtymäantureiden signaaleissa, eli ennen jokaista varsinaista huippua signaaliin muodostui vastakkaissuuntainen huippu. Toisin kuin siirtymäantureista saatavissa signaaleissa vastakkaissuuntaiset huiput saattoivat nyt olla itseisarvoltaan jopa suurempia kuin tarkasteluun valitut huiput (ks. kuva 4.2). Signaalin muoto johtuu jälleen kuormitustavasta. Rumpua kuormittavan renkaan lähestyessä rumpun lakea, laen pintaan muodostuu puristusrasitus, joka näkyy signaalissa nollatason alapuoleisena huippuna. Kun rengas on suoraan mittauskohdan yläpuolella, rasituksen suunta vaihtuu, jolloin laella on vetorasitus. Edelleen kun rengas ylittää lakipisteen, laen rasitus vaihtuu vedosta takaisin puristukselle ja lopulta palautuu lähelle nolaa kun kuormittava rengas on riittävän etäällä mittauskohdasta.

Vastakkaissuuntaisten huippujen keskinäiseen suuruuteen vaikutti oleellisesti kuormittavan renkaan sijainti tien poikkileikkauksen suunnassa verrattuna anturin sijaintiin. Kun rengas kulki tien poikittaissuunnassa kauempana anturista, puristuspuolen huiput olivat tavallisesti selvästi pienempiä kuin vetopuolen. Kun kuormittavan akselin rengas kulki samalla linjalla anturin sijainnin kanssa, puristuspuolelle saattoi tulla jopa kaksinkertaisia venymiä verrattuna vetopuoleen.



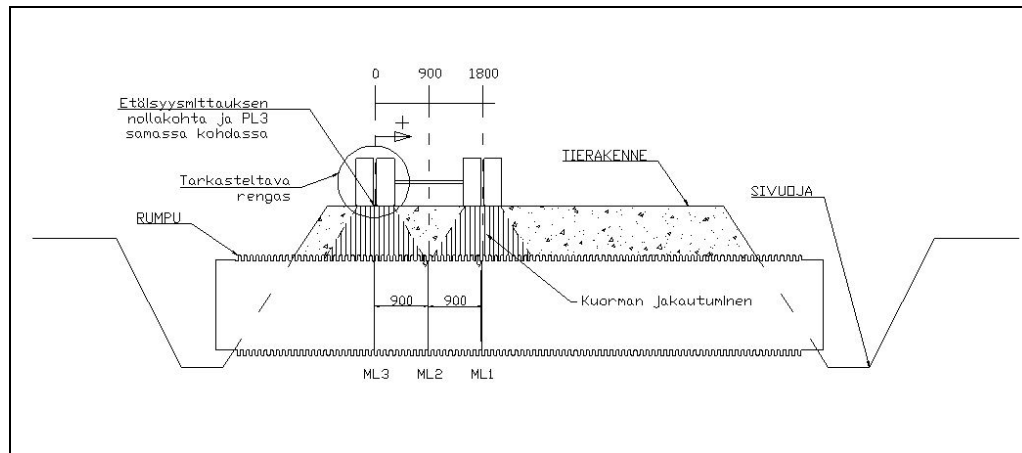
Kuva 4.2 Kuormituskokeissa mitattuja venymäliuskasignaaleja. Sininen käyrä on mittaussignaali rumpun laelle asetetusta venymäliuskasta, joka on noin 900 mm päässä tarkasteltavan pyörän tai paripyörän keskilinjasta. Vaaleanpunainen käyrä on taas mittaussignaali rumpun laelle asetetusta venymäliuskasta, joka oli suoraan tarkasteltavan pyörän tai paripyörän keskilinjalla.

#### 4.1.3 Muodonmuutosarvojen valitseminen

Kuormituskokeista saatuja mittaustuloksia hyödynnetään pääasiassa mallinnuksen verifiointiin. Kuormituskokeiden dynaaminen kuormitustapa, jossa ajoneuvolla ajetaan rumpun yli, aiheuttaa monimuotoisia muodonmuutoksia rumpun poikkileikkauksessa varsinkin venymien osalta. Mallinnuksessa taas kuorma simuloidaan tyhjästä rumpun yläpuolelle, jolloin rumpun muodonmuutuskäyttäytyminen on yksinkertaisempaa: rumpu puristuu pystysuunnassa kasaan, leviää sivuille ja rumpun laelle muodostuu vetorasitus. Näin ollen mitatuista muodonmuutossignaaleista valitaan mallinnukseen kuvaamaa tilannetta vastaavat arvot, joita voidaan edelleen käyttää mallinnuksen verifiointiin. Tämän vuoksi mittaustuloksissa ei huomioida halkaisijan muutosten vastakkaisia huippuja (ks. luku 4.1.1) tai venymämittausten puristuspuolen muodonmuutoksia (ks. luku 4.1.2).

#### 4.1.4 Ajolinjan yhdistäminen muodonmuutosten maksimiarvoihin

Kuormituskokeissa mitattiin tien poikkisuunnassa lähempänä tien reunaa kulkeneiden renkaiden ulkoreunojen sijainteja, joista laskettiin rumpua kuormittaneiden renkaiden keskilinjojen sijainnit renkaiden leveyksien perusteella. Etäisyydenmittauksen nollakohtaksi valittiin lähimpänä tien reunaa oleva instrumentoitu mittaussignaali ML3. Rumpun muodonmuutossignaaleista määritetyt maksimiarvot ja tarkasteltavien renkaiden sijainnit tien poikkileikkauksen suunnassa yhdistettiin, jolloin yksittäisen akselin kuormitus voidaan esittää pisteenä kuvaajassa, jonka vaakakoordinaattina on renkaan keskilinjan etäisyys reunimmaisesta instrumentoidusta mittaussignaalista (ML3) ja pystykoordinaattina mitatun vasteen huippuarvo. Rumpua kuormittavien renkaiden etäisyyksien määrittämisen periaate mittaussignaalien suhteen on esitetty kuvassa 4.3

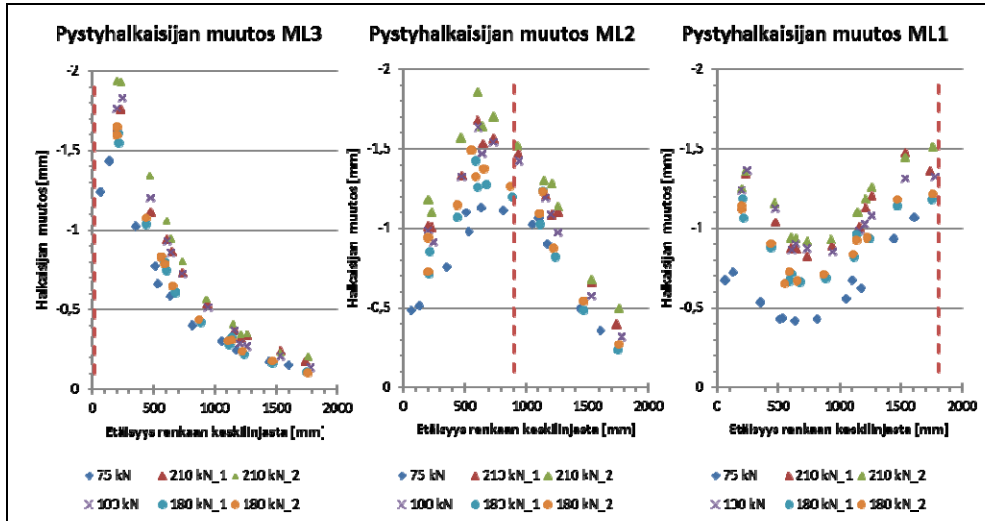


*Kuva 4.3 Rumpua kuormittaneiden renkaiden etäisyyksien määrittäminen suhteessa mittausantureihin. Kun tarkasteltavan renkaan keskilinja kulkee suoraan lähimpänä tien reunaa olevan mittauslinjan (ML3) yläpuolelta, renkaan sijainti saa arvon 0 mm ja kasvaa, kun ajolinja siirtyy tien poikileikkauksessa keskeemmälle.*

## 4.2 Esimerkki mittaustuloksista

Koekuormitettujen kohteiden mittaustulokset esitetään kuvaajina, jossa on yhdistetty rummun muodonmuutossignaalien maksimiarvot sekä tarkasteltavan renkaan keskilinjan sijainnit akseleittain jokaiselta ylitykseltä. Vaaka-akselilla on etäisyys renkaan keskilinjasta ja pysty-akselilla mitatun muodonmuutossignaalin maksimiarvo. Kuvaajissa mittausanturien sijainti on esitetty punaisella katkoviivalla. Lisäksi kuvaajissa esiintyvien symbolien merkitykset on esitetty kuvaajien alareunassa. Symboleissa tarkasteltava rengas (ks. kuva 4.3.) on merkitty kyseisen akselin massan mukaisesti. Kaksiakselisen telin akselit on merkitty telin kokonaismassalla ja sen jälkeen numerolla, joka kertoo missä kohtaa teliä akseli sijaitsee. Esimerkiksi symboli 210kN\_1 tarkoittaa rumpua kuormittavaa rengasta, joka on 21 t painoisen kaksiakselisen telin ensimmäisellä akselilla.

Mittaustulosten ymmärrettävyyden vuoksi käsitellään esimerkinomaisesti yhden koe-kohteen kuormitustiedoista muodostetut kuvaajat (ks. kuva 4.4). Kuvaajissa on esitetty rummun pystyhalkaisijan muodonmuutos kaikissa kolmessa mittauslinjassa.



Kuva 4.4 Rummun pystyhalkaisijan muutoksen maksimiarvot poikkileikkauksittain yksittäiseltä mittauskohteelta (vasemmalla ML3, keskellä ML2 ja oikealla ML1). Mittausanturien sijainti on esitetty punaisella katkoviivalla (ML1  $x=1800$  mm, ML2  $x=900$  mm, ML3  $x=0$  mm). Kuvaajien symbolit on eritelty kuormitusajoneuvon akselien mukaisesti.

Kuvasta 4.4 havaitaan, että reunimmaisen mittauslinjan ML3 (ks. kuva 4.3) antureista mitattujen rummun halkaisijan muutosten maksimiarvoista muodostuu kellokäyrän puolikas vaaka-akselin nollakohtan oikealle puolelle. Muodonmuutokset ovat suurimmillaan, kun renkaan keskiliinja on kulkenut läheltä tarkasteltavaa mittauslinjaa. Muodonmuutokset pienevät voimakkaasti, kun siirrytään vaaka-akselilla oikealle eli kun ajoneuvon ajolinja siirtyy keskeemmälle tietä.

ML3: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 (ks. kuva 4.3 ja 4.4). Tilanne on toinen mittauslinjoissa ML1 ja ML2, sillä ajoneuvon ajolinjat kulkevat siten, että myös akselin toisen puolen renkaan kuormasta aiheutuu antureihin vastetta.

Kuvan 4.4 keskimmäistä (ML2) kuvaajaa tarkastelemalla havaitaan, että pystyhalkaisijan muutosten maksimit sijoittuvat kohtaan, jossa tarkasteltavan renkaan keskiliinja on kulkenut hieman antureiden vasemmalta puolelta. Pystyhalkaisijan muutoksen pistejoukosta on havaittavissa lievästi epäsymmetrisen kellokäyrän muotoa. Epäsymmetrisyys selittyy akselin toisessa päässä olevan renkaan kuormitusvaikutuksesta. Tämän vuoksi kuvassa esitetyn katkoviivan vasemman puolen kellokäyrä on loivempi kuin oikea puoli. Kun tarkastellaan katkoviivan oikean puoleisia pisteitä, ne sijoittuvat hyvin samankaltaiseen muotoon kuin ML3:ssä (vasemmanpuoleinen kuvaaja), missä akselin toisessa päässä oleva rengas ei juuri vaikuta rummun poikkileikkauksen muodonmuutoksiin.

ML1:n tuloksista havaitaan parhaiten akselin toisen puolen renkaan kuormitusvaikutus. Suurimmat pystyhalkaisijan muutosten maksimiarvot on mitattu, kun tarkasteltavan renkaan keskiliinja on kulkenut joko lähellä vaaka-akselin arvoa 0 mm tai 1800 mm. Kun tarkasteltavan renkaan keskiliinja on lähellä kuvaajan nollakohtaa, akselin toisessa päässä oleva rengas on suoraan ML1:n yläpuolella. Kun tarkasteltava rengas siirtyy vaaka-akselilla kohtaan  $x=900$  mm, ML1:n anturit ovat akselin välissä,

jolloin myös kuormitus ja sitä kautta mitatut rummun muodonmuutokset ovat pienimmillään. Kun tarkasteltavan renkaan keskilinja siirtyy tien poikkileikkauksessa keskemälle, ML1:n yläpuolelle, rasitus on jälleen suurimmillaan ja samoin myös anturien vasteet.

## 4.3 Mittaustulokset kohteittain

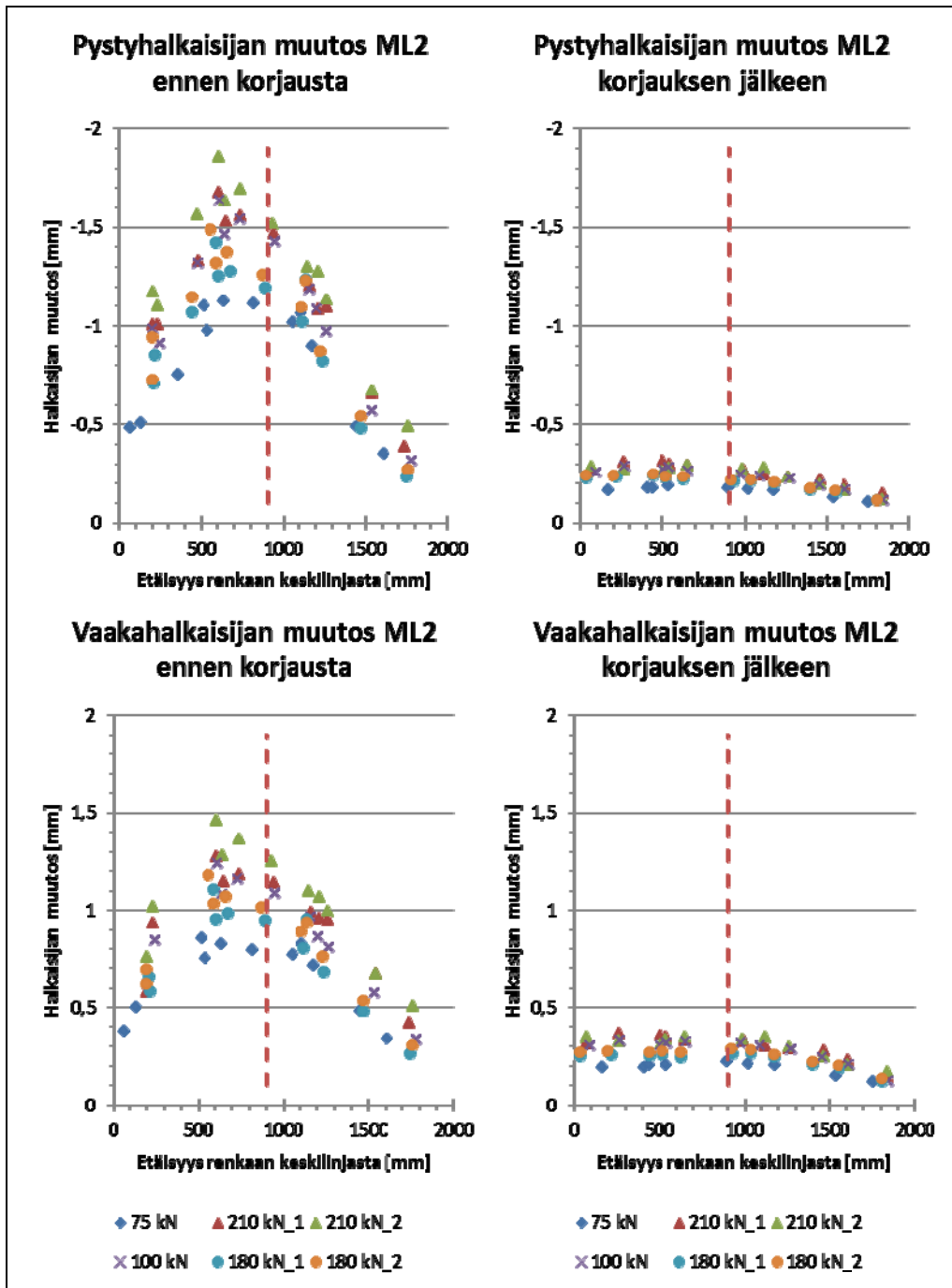
Mittaustulokset esitetään kuvaajina, jossa vaak akselilla on kuormitusajoneuvon tien reunan puoleisen renkaan keskilinjan sijainti ja pystyakselilla joko rummun halkaisijan muutos tai jännitys rummun laelta. Kuvaajissa esitetään mittaustulokset ennen kohteiden korjaustoimenpiteitä ja korjausten jälkeen.

Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutoksen tarkasteluun valitaan ML2:n siirtymäantureiden mittaussignaaleista määritetyt maksimiarvot. Kyseisen mittaustuloksen anturit sijaitsivat jokaisessa koekohteessa ajouran kohdalla, joka on myös todellisuudessa yksi rasitetuimmista kohdista tien poikkileikkauksessa. Tämän lisäksi tarkasteltavan renkaan (ks. kuva 4.3) ylityksiä oli mittaustuloksen molemmilla puolilla, joten voidaan varmistua, että todelliset maksimiarvot saatiin mitattua.

Rummun poikkileikkauksiin asennettujen venymäliuskojen mittaussignaaleista määritetyt venymien maksimiarvot kerrottiin Hooken lain mukaisesti teräksen kimmo kertoimella ( $E=210$  GPa), jolloin venymien sijaan voidaan tarkastella rummun pintaan muodostuvia jännityksiä. Rummun laen jännitykset esitetään kaikista kolmesta instrumentoidusta poikkileikkauksesta. Tämän lisäksi esitetään jännitykset rummun sivuilta, jotka ovat mitattu vain kohteiden korjausten jälkeisessä koekuormituksessa (ks. luku 3.1.2).

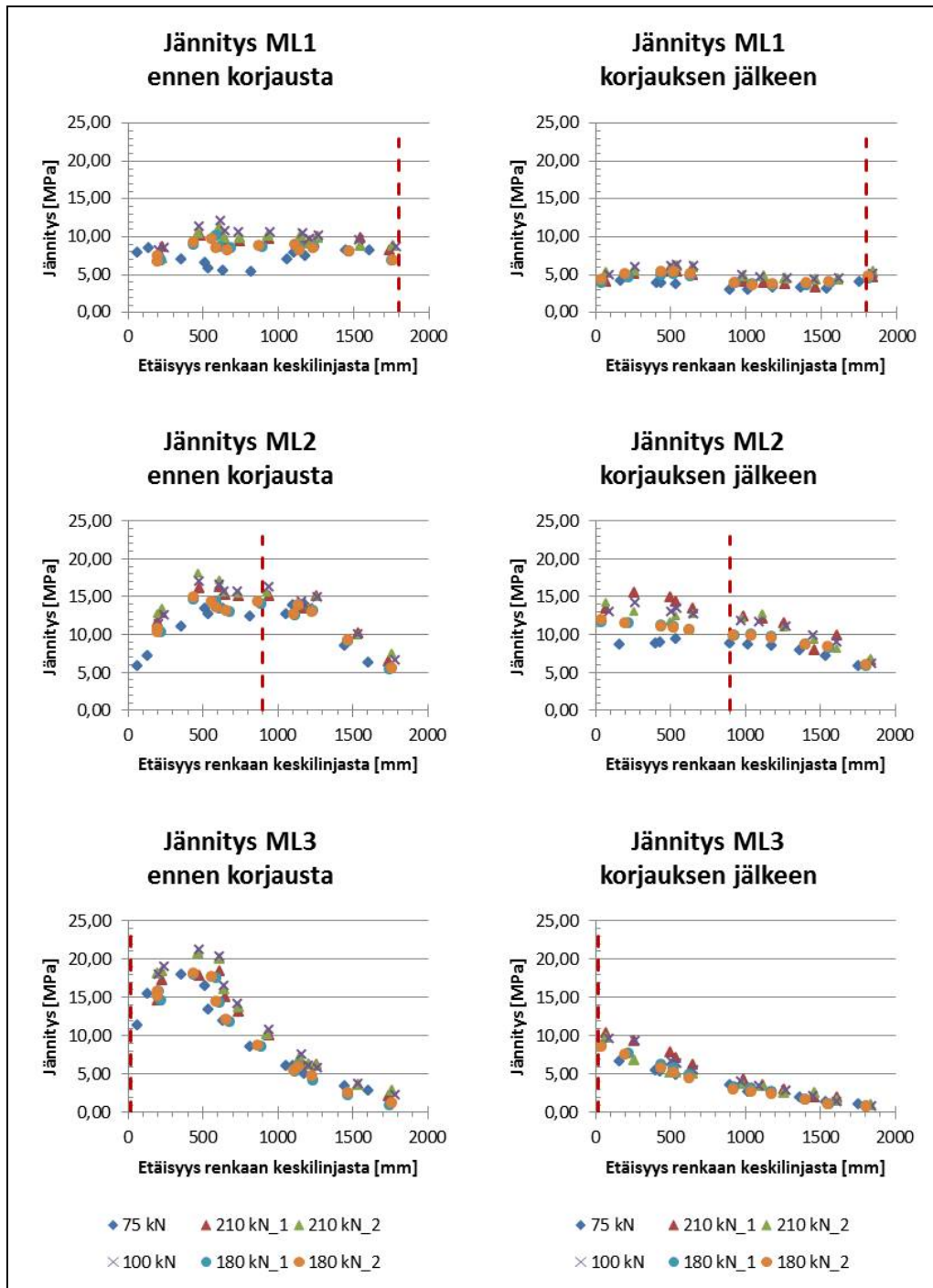
### 4.3.1 Halkaistu sisäputki, betonitäyttö

Kohteen instrumentoinnit ja koekuormitukset sujuivat hyvin. Kohde sijaitsi suoralla tiellä, mikä helpotti raskaalla kuorma-autolla tehtyä koekuormitusta. Rumpu oli ennen korjauksia riittävän hyvässä kunnossa, jotta anturit saatiin asennettua suunnitelmien mukaisesti (ks. luku 3.1). Korjausten jälkeiset instrumentoinnit onnistuivat myös hyvin. Rummun peitepaksuus oli melko vakio koko tien poikkileikkauksen matkalla, minkä vuoksi eri poikkileikkauksista ja molemmista kuormituskokeista saadut mittaustulokset ovat hyvin vertailtavissa ja johdonmukaisia. Kohteen kuormituskokeiden mittaustulokset on esitetty kuvissa 4.5–4.7.

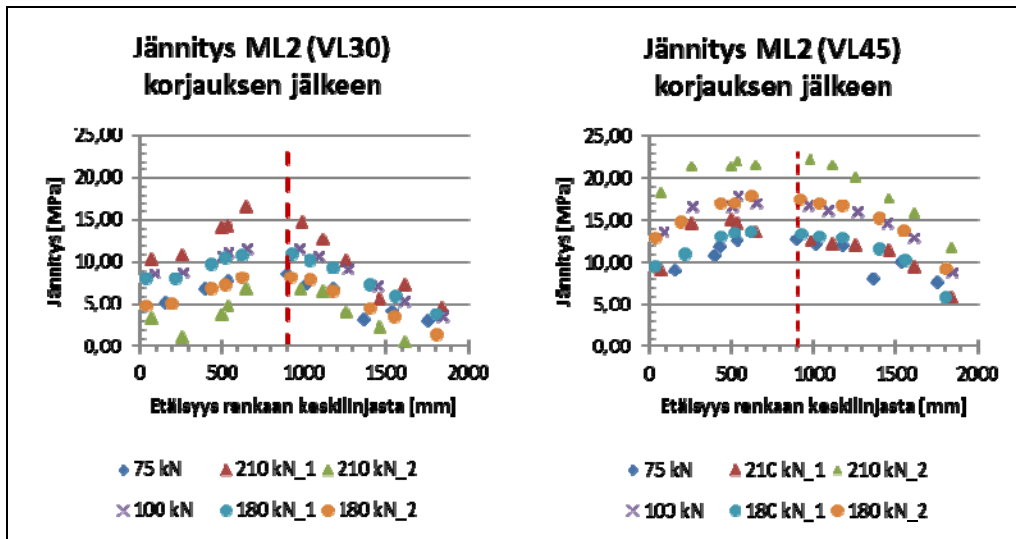


Kuva 4.5 Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutos koekuormituksessa ennen ja jälkeen korjaustoimenpiteiden. Mittausanturien sijainnit on esitetty punaisella katkoviivalla. Kuvaajien symbolit on eritelty kuormitusajoneuvon akselien mukaisesti.





Kuva 4.6 Mitatut rummun laen jännitykset koekuormituksessa ennen ja jälkeen korjaustoimenpiteiden. Mittausanturien sijainnit on esitetty punaisella katkoviivalla. Kuvaajien symbolit on eritelty kuormitusajoneuvon akselien mukaisesti.



Kuva 4.7 Mitatut jännitykset rummun sivuilla. Venymäliuskat sijaitsivat 30 ja 45 asteen kulmassa rummun keskiliinjasta (ks. kuva 3.3). Mittausanturien sijainnit tien poikkileikkauksen suunnassa on esitetty punaisella katkoviivalla.

Kohteen korjauksen jälkeisessä koekuormituksessa rummun sivuilta mitatut jännitykset (ks. kuva 4.7) olivat hieman suurempia verrattuna saman poikkileikkauksen laen jännityksiin (ks. kuva 4.6, keskimäinen kuvaaja oikealta). Suurin jännitys mitattiin venymäliuskaista, joka oli 45 asteen kulmassa rummun poikkileikkauksen pysty-akseliin nähden ja jännitys oli suuruudeltaan 22 MPa.

Kuvan 4.5 kuvaajista havaitaan, että itseisarvoltaan suurimmat muodonmuutokset aiheutuivat pääsääntöisesti kuormitusajoneuvon 21 t painoisesta telin jälkimmäisestä akselista, pienimmät taas 7,5 t painoisesta etuakselista. Tarkastelemalla kuvan 4.5 vasemmanpuoleisia kuvaajia havaitaan, että mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset ovat itseisarvoltaan suurimmat hieman anturien sijainnista vasemmalle. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos on -1,8 mm ja vaakahalkaisijan 1,4 mm. Mitatut halkaisijamuutokset pienenevät selvästi, kun kuormittava rengas siirtyi keskemmälle tietä eli kuvaajan vaaka-akselilla oikealle.

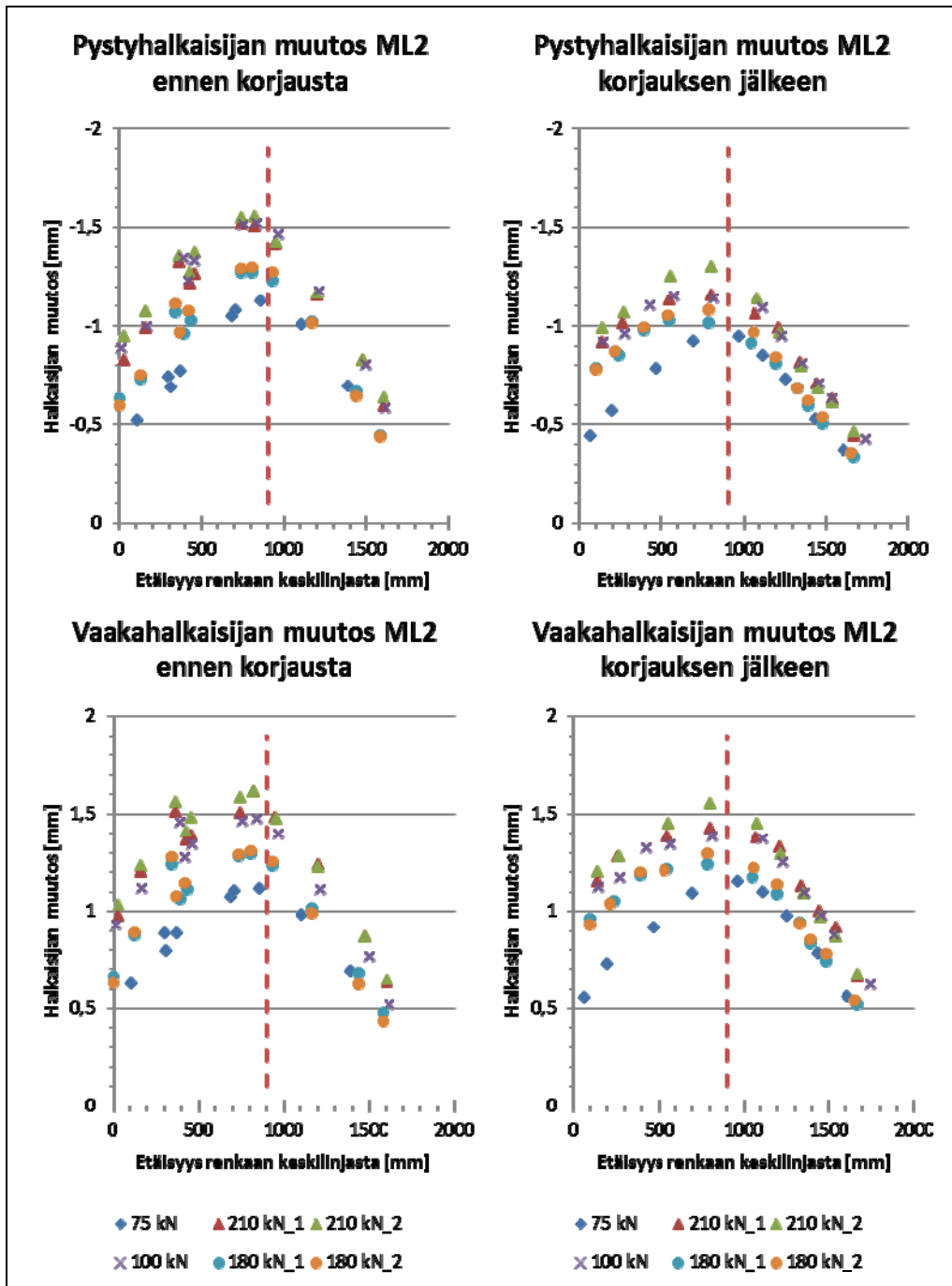
Kuvan 4.5 oikeanpuoleisia kuvaajia tarkastelemalla havaitaan, että korjaustoimenpiteet muuttivat merkittävästi rummun käyttäytymistä verrattuna alkuperäiseen tilanteeseen. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos on -0,3 mm ja vaakahalkaisijan 0,3 mm. Rummun halkaisijan muutokset pienenevät siirryttäessä vaaka-akselilla oikealle, mutta eivät niin jyrkästi verrattuna suurimpiin mitattuihin arvoihin kuin vasemmanpuoleisissa kuvaajissa. Mitattujen halkaisijamuutosten perusteella voidaan todeta, että rumpu on korjauksen jälkeen selvästi jäykempi kuin ennen korjausta.

Kuvaa 4.6 tarkastelemalla havaitaan, että rummun laen jännitykset olivat suurimmillaan, kun rumpua kuormitti 21t painoinen teli tai 10 t yksittäisakseli ja pienimmillään kun rumpua kuormitti kuormitusajoneuvon 7,5 t painoinen etuakseli. Suurimmat jännitykset ennen kohteen korjausta mitattiin mittauslinjasta lähellä tien reunaa (ML3), ja suurin mitattu jännitys oli 21 MPa.

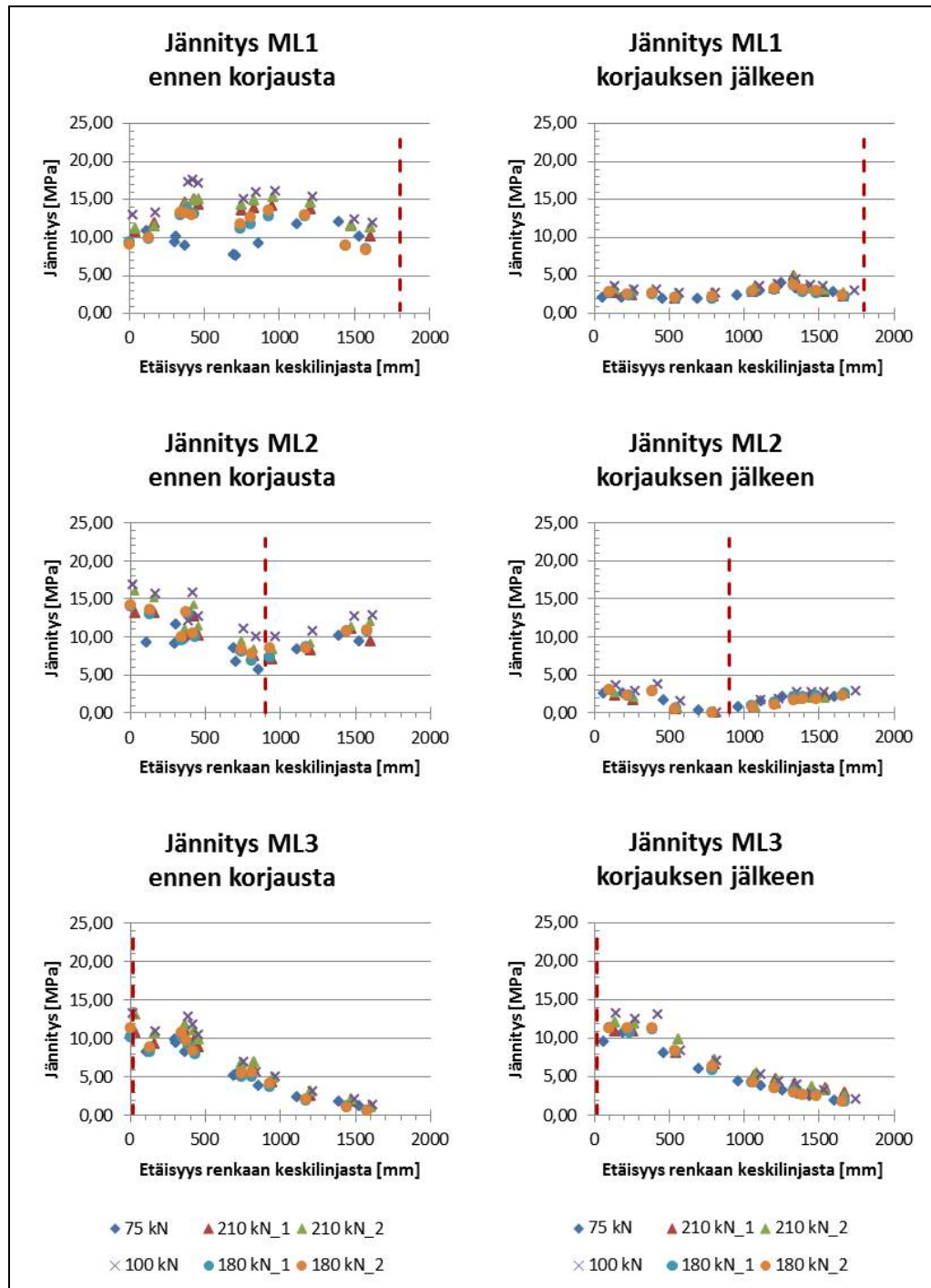
Kohteen korjausten jälkeisessä koekuormituksessa suurimmat jännitykset mitattiin ajouran alapuoleisesta poikkileikkauksesta (ML2), ja suurin mitattu jännitys oli 15 MPa.

#### **4.3.2 Halkaistu sisäputki, uretaanitäyttö**

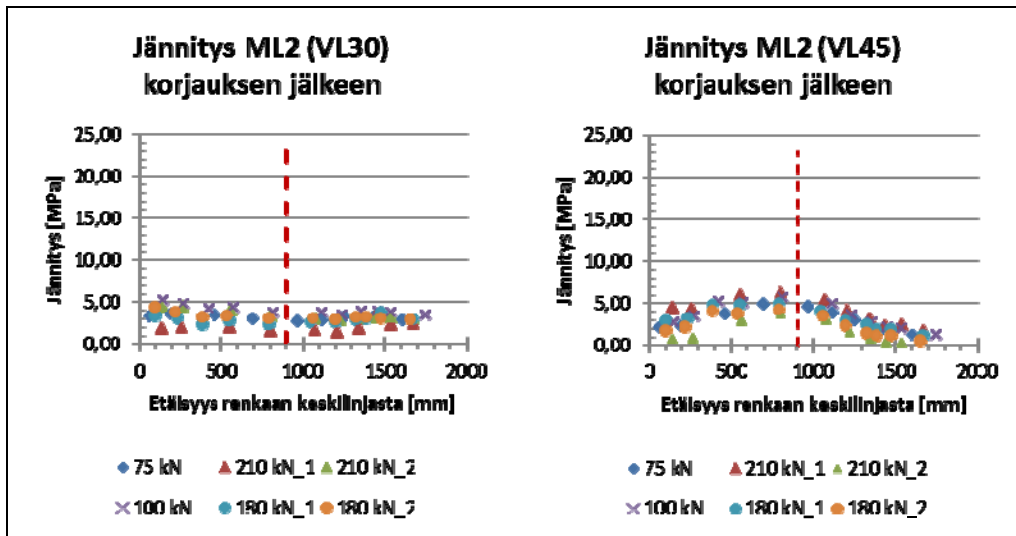
Kohteen instrumentoinnit ja koekuormitukset sujuivat hyvin. Kohde sijaitsee suoralla tiellä, mikä helpotti raskaalla kuorma-autolla tehtyä koekuormitusta. Rumpu oli ennen korjauksia riittävän hyvässä kunnossa, jotta anturit saatiin asennettua suunnitelmien mukaisesti (ks. luku 3.1). Korjausten jälkeiset instrumentoinnit onnistuivat myös hyvin. Rummun peitepaksuus oli melko vakio koko tien poikkileikkauksen matkalla, minkä vuoksi eri poikkileikkauksista ja molemmista kuormituskokeista saadut mittaustulokset ovat hyvin vertailtavissa ja johdonmukaisia. Kohteen kuormituskokeiden mittaustulokset on esitetty kuvissa 4.8–4.10.



Kuva 4.8 Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutos koekuormituksessa ennen ja jälkeen korjaustoimenpiteiden. Mittausanturien sijainnit on esitetty punaisella katkoviivalla. Kuvaajien symbolit on eritelty kuormitusajoneuvon akselien mukaisesti.



Kuva 4.9 Mitatut rummun laen jännitykset koekuormituksessa ennen ja jälkeen korjaustoimenpiteiden. Mittausanturien sijainnit on esitetty punaisella katkoviivalla. Kuvaajien symbolit on eritelty kuormitusajoneuvon akselien mukaisesti.



Kuva 4.10 Mitatut jännitykset rummun sivuilla. Venymäliuskat sijaitsivat 30 ja 45 asteen kulmassa rummun keskiliinjasta (ks. kuva 3.3). Mittausanturien sijainnit tien poikkileikkauksen suunnassa on esitetty punaisella katkoviivalla.

Kuvan 4.8 kuvaajista havaitaan, että itseisarvoltaan suurimmat muodonmuutokset aiheutuivat pääsääntöisesti kuormitusajoneuvon 21 t painoisesta telin ensimmäisestä akselista, pienimmät taas 7,5 t painoisesta etuakselista. Tarkastelemalla kuvan 4.8 vasemmanpuoleisia kuvaajia havaitaan, että mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset ovat itseisarvoltaan suurimmat hieman anturien sijainnista vasemmalle. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos on  $-1,6$  mm ja vaakahalkaisijan  $1,6$  mm.

Oikeanpuoleisten kuvaajien perusteella havaitaan, että korjausten jälkeisessä koekuormituksessa suurimmat muodonmuutokset aiheutuivat 21 t painoisen telin ensimmäisestä akselista. Itseisarvoltaan suurin mitattu rummun pystyhalkaisijan muutos on  $-1,3$  mm ja vaakahalkaisijan  $1,5$  mm. Mitattujen halkaisijamuutosten perusteella voidaan todeta, että korjaustoimenpiteet eivät juurikaan vaikuttaneet rummun toimintatapaan.

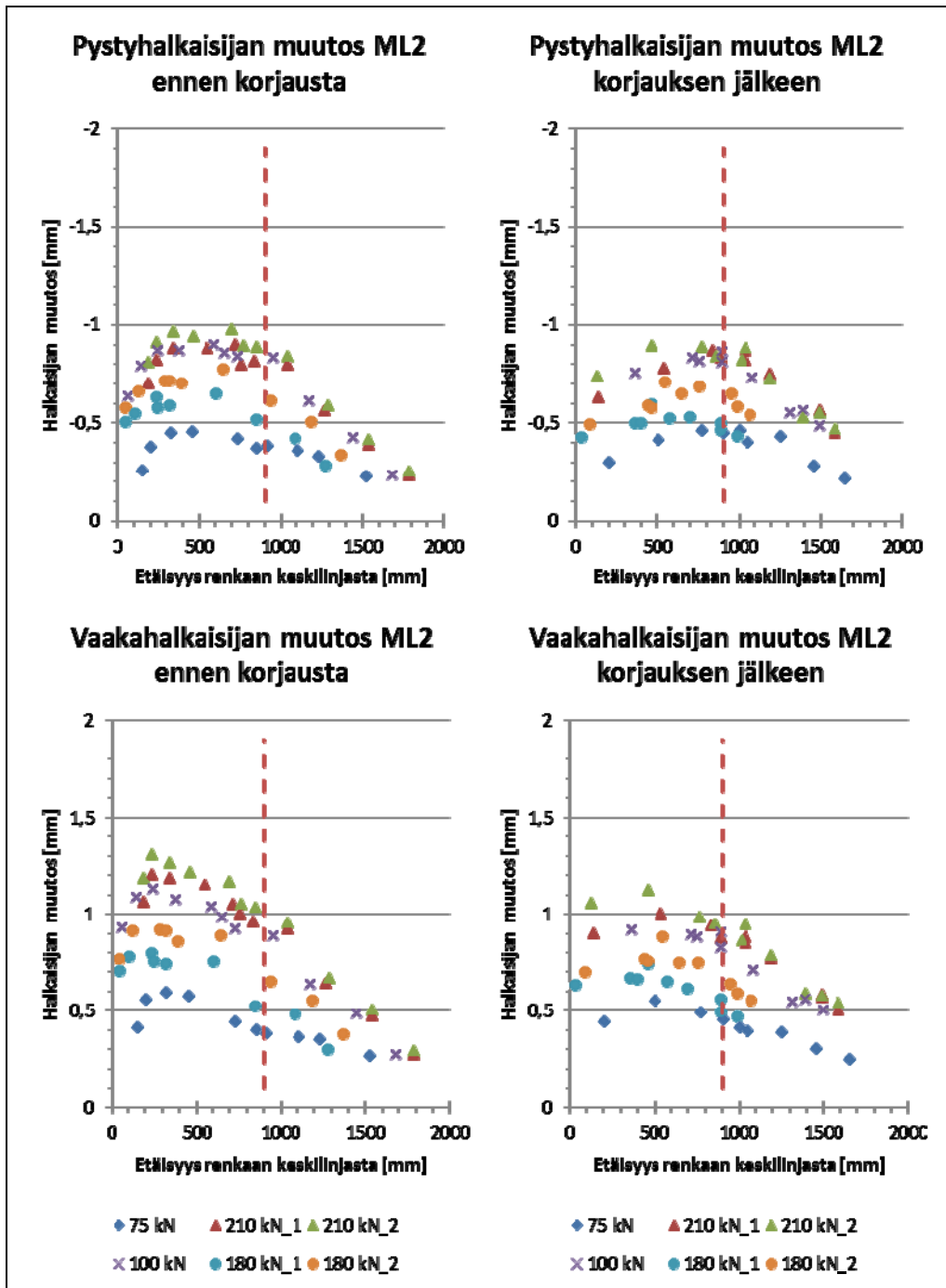
Kuvaa 4.9 tarkastelemalla havaitaan, että rummun laen jännitykset olivat suurimmillaan, kun rumpua kuormitti 21 t painoinen teli tai 10 t yksittäisakseli ja pienimmillään kun rumpua kuormitti kuormitusajoneuvon 7,5 t painoinen etuakseli. Suurimmat jännitykset ennen kohteen korjausta mitattiin mittauslinjasta keskellä tietä (ML1), ja suurin mitattu jännitys oli 17 MPa.

Kohteen korjausten jälkeisessä koekuormituksessa suurimmat jännitykset mitattiin mittauslinjasta lähellä tien reunaa (ML3), ja suurin mitattu jännitys oli 13 MPa. Mittauslinjoista ML1 ja ML2 mitatut jännitystasot olivat rummun korjauksen jälkeen selvästi pienempiä kuin ennen korjaustoimenpiteitä mitatut.

Kohteen korjauksen jälkeisessä koekuormituksessa rummun sivuilta mitatut jännitykset (ks. kuva 4.10) olivat hieman suurempia verrattuna saman poikkileikkauksen laen jännityksiin (ks. kuva 4.9, keskimäinen kuvaaja oikealta). Suurin jännitys mitattiin venymäliuskaista, joka oli 45 asteen kulmassa poikkileikkauksen pystyakseliin nähden ja jännitys oli suuruudeltaan 6 MPa.

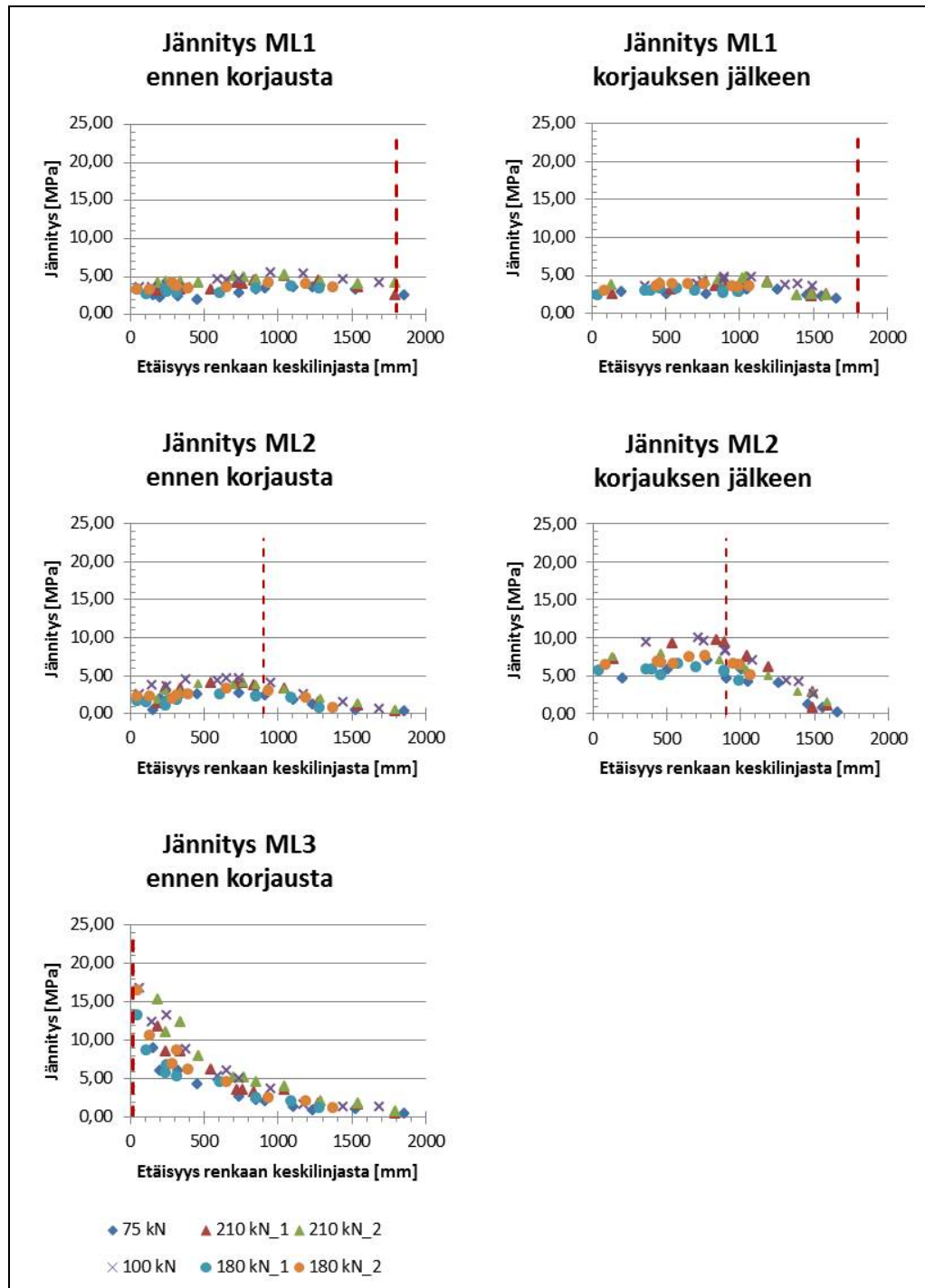
### 4.3.3 Puolipohjaus

Kohteen instrumentointi ja koekuormittaminen oli selvästi haasteellisempaa kuin edellä kuvatuissa halkaistun sisäputken koerakenteissa. Ennen korjausta rummun pohja oli paikoitellen kokonaan syöpynyt, minkä vuoksi pystyhalkaisijan muutoksen mittaamisessa käytettyjen siirtymäantureiden toinen pää jouduttiin asentamaan rummun pinnan sijasta rummun pohjalla olevaan maa-ainekseen. Loput instrumentoinnit sekä ennen että jälkeen kohteen korjaustoimenpiteiden pystyttiin kuitenkin tekemään suunnitellusti. Koekuormittamisen teki haasteelliseksi se, että kohde oli tien mutkassa, jolloin kuormitusajoneuvolla oli vaikeaa pitää haluttua ajolinjaa. Tämän lisäksi rumpu ei ollut kohtisuorassa ajoneuvon kulkusuuntaan nähden, mikä vaikeutti kuormittavien renkaiden etäisyyden määrittämistä tien poikkileikkauksen suunnassa. Lisäksi tien kallistuksen vuoksi rummun peitepaksuus vaihteli voimakkaasti, mikä aiheuttaa omat hankaluutensa tulosten tulkinnalle ja vertailulle. Kohteen kuormituskokeiden mittaustulokset on esitetty kuvissa 4.11–4.13.

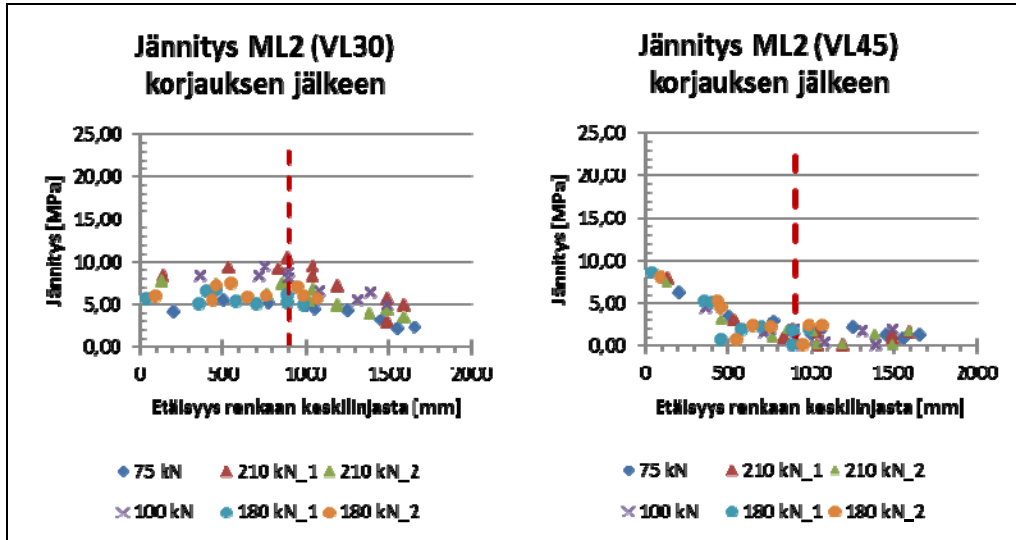


Kuva 4.11 Rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutos koekuormituksessa ennen ja jälkeen korjaustoimenpiteiden. Mittausanturien sijainnit on esitetty punaisella katkoviivalla. Kuvaajien symbolit on eritelty kuormitusajoneuvon akselien mukaisesti.





Kuva 4.12 Mitatut rummun laen jännitykset koekuormituksessa ennen ja jälkeen korjaustoimenpiteiden. Mittausanturien sijainnit on esitetty punaisella katkoviivalla. Kuvaajien symbolit on eritelty kuormitusajoneuvon akselien mukaisesti.



Kuva 4.13 Mitatut jännitykset rummun sivuilla. Venymäliuskat sijaitsivat 30 ja 45 asteen kulmassa rummun keskiliinjasta (ks. kuva 3.3). Mittausanturien sijainnit tien poikkileikkauksen suunnassa on esitetty punaisella katkoiviivalla.

Kuvan 4.11 kuvaajista havaitaan, että itseisarvoltaan suurimmat muodonmuutokset aiheutuivat pääsääntöisesti kuormitusajoneuvon 21 t painoisesta telin ensimmäisestä akselistä, pienimmät taas 7,5 t painoisesta etuakselista. Tarkastelemalla kuvan 4.11 vasemmanpuoleisia kuvaajia havaitaan, että mitatut rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset ovat itseisarvoltaan suurimmat anturien sijainnista vasemmalle. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että rummun peitepaksuus pieneni tien kallistuksesta johtuen kohti tien reunaa. Itseisarvoltaan suurin mitattu pystyhalkaisijan muutos on  $-1,0$  mm ja vaakahalkaisijan  $1,7$  mm.

Oikeanpuoleisten kuvaajien perusteella havaitaan, että korjausten jälkeisessä koe-kuormituksessa suurimmat muodonmuutokset aiheutuivat 21 t painoisen telin ensimmäisestä akselistä. Itseisarvoltaan suurin mitattu rummun pystyhalkaisijan muutos on  $-0,9$  mm ja vaakahalkaisijan  $1,1$  mm. Mitattujen rummun halkaisijanmuutosten perusteella voidaan todeta, etteivät korjaustoimenpiteet vaikuttaneet juurikaan rummun käyttäytymiseen.

Kuvaa 4.12 tarkastelemalla havaitaan, että rummun laen jännitykset olivat suurimmillaan, kun rumpua kuormitti 21 t painoinen teli tai 10 t yksittäisakseli ja pienimmillään kun rumpua kuormitti kuormitusajoneuvon 7,5 t painoinen etuakseli. Suurimmat jännitykset ennen kohteen korjausta mitattiin rummun poikkileikkauksesta lähellä tien reunaa (ML3), ja suurin mitattu jännitys oli 17 MPa.

Kohteen korjausten jälkeisessä koekuormituksessa suurimmat jännitykset mitattiin ajouran alapuoleisesta mittauslinjasta (ML2), ja suurin mitattu jännitys oli 10 MPa. Korjausten jälkeisissä mittauksissa ML3 anturi ei toiminut, minkä vuoksi sen mittaus tulokset puuttuvat kuvasta 4.12.

Kohteen korjauksen jälkeisessä koekuormituksessa rummun sivuilta mitatut jännitykset (ks. kuva 4.13) olivat samansuuruisia verrattuna saman poikkileikkauksen laen jännityksiin (ks. kuva 4.9, keskimäinen kuvaaja oikealta). Suurin jännitys mitattiin venymäliuska, joka oli 30 asteen kulmassa rummun poikkileikkauksen pystyakseliin nähden ja jännitys oli suuruudeltaan 10 MPa.

## 5 Korjauskohteiden mallintaminen

Tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään kahta eri mallinnusohjelmistoa, koska tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli tuottaa lisätietoa rumpuputkien mekaanisesta käyttäytymisestä eri korjausmenetelmien yhteydessä. Aiemmassa tutkimuksessa (Haakana et. al. 2015) rumpukohteiden mallintamiseen on käytetty PLAXIS 3D-ohjelmistoa. Tutkimuksessa havaittiin, että rumpuputken mallintaminen onnistuu ohjelmistolla suhteellisen hyvin, mutta analyyseissä voidaan käyttää vain lieriön muotoista sileäpintaista elementtiä, joten mallinnuksen tarkkuustaso on liian karkea tärkeisen rumpuputken mekaanisen toiminnan analysoinnin kannalta. Tästä syystä varsinainen korjausmenetelmien vaikutusten arviointi on tehty ANSYS-ohjelmistolla, jonka ominaisuudet soveltuvat rumpuputkessa tapahtuvien jännitys- ja muodonmuutosinkrementtien analysointiin verrattain hyvin. Vastavuoroisesti ANSYS-ohjelmiston materiaalimallit ovat jonkin verran kehittymättömämpiä tien rakennekerrosten, rummun ympärystytön ja pohjamaan osalta, kun taas PLAXIS 3D-ohjelmisto on kehitetty nimenomaisesti geoteknisten ongelmien ratkaisuun. Edellä kuvatuista syistä johtuen tutkimuksessa päädyttiin käyttämään seuraavaa etenemispolkua:

1. Rumpukohteet on mallinnettu ilman korjausrakenteita PLAXIS 3D-ohjelmistolla. Tehdyllä mallilla pyritään yhteensovittamaan luvussa 4 esitetyt mittaustulokset sekä luvussa 2 DCP-laitteella tehdyt rakennetutkimukset. Mallinnuksen tuloksena saadaan luotettavat laskentaparametrit tien rakennekerroksille, rummun ympärystytölle sekä pohjamaalle.
2. Eri maakerroksille saadut laskentaparametrit muunnetaan ANSYS-ohjelmistossa käytettävään muotoon kappaleessa 5.2 kuvatulla tavalla.
3. ANSYS-ohjelmistolla mallinnetaan korjaamattoman rumpuputken käyttäytymisen muunnetuilla parametreilla. Mallinnuksen tuloksia verrataan ennen rummun korjaamista saatuihin mittaustuloksiin.
4. ANSYS-ohjelmistolla tehdään varsinaiset rumpujen korjausrakenteita simuloivat mallit, joita verrataan rumpujen korjaamisen jälkeen tehtyjen mittausten tuloksiin. Tämän jälkeen ANSYS-ohjelmistolla on mahdollista tehdä herkkyytarkasteluja niiden korjausmenetelmiin liittyvien osien suhteen, jotka koetaan kriittisiksi tai tarpeelliseksi.

### 5.1 Korjauskohteiden alkutilanteen mallintaminen

PLAXIS-ohjelmistolla tehdyissä malleissa on käytetty lähtökohtana edellisessä tutkimuksessa (Haakana et. al. 2015) käytettyä mallinnustapaa. Tierakenne mallinnettiin kolmiulotteisena, kuutiomaisena elementtinä eikä tien luiskia tai kaltevuuksia huomioidu (kuva 5.1). Tierumpu on mallinnettu käyttäen päistään avointa sylinterigeometriaa. Mallinnetun rummun pituutena käytettiin 12 m ja malli oli tien pituussuunnassa 8 m pituinen. (Haakana et. al. 2015)

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 800 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). Ren-

kaan kosketuspintaa simuloitua laattaelementti luotiin siten, että kosketuspinnasta muodostui kahdeksankulmainen elementti, jotta elementin kulmiin mahdollisesti muodostuvia jännityspiikkejä pystyttiin välttämään. (Haakana et. al. 2015)

Rummut mallinnettiin sylinterinmuotoisina lineaarielastisina laattaelementteinä. Myös renkaan kosketuspintaa simuloiva laattaelementti mallinnettiin lineaarielastisen materiaalmallin avulla, joten näiden materiaalien jäykkyys määräytyy kimmo-moduulin  $E$  ja Poissonin luvun  $\nu$  avulla. Kaikkien edellä mainittujen rakenneosien käyttäytyminen kuvattiin isotrooppisena. Taulukossa 5.1 on esitetty lineaarielastisen materiaalmallin avulla kuvattujen mallin komponenttien materiaaliparametrit.

Taulukko 5.1 Lineaarielastisen materiaalmallin avulla mallinnettujen rakenneosien materiaaliparametrit.

Materiaali	$E'$ (MPa)	$\nu$ (-)	$d$ (mm)
Renkaan kosketuspinta (laattaelementti)	1000	0,495	10
Teräsrumpu	210 000	0,3	2,5

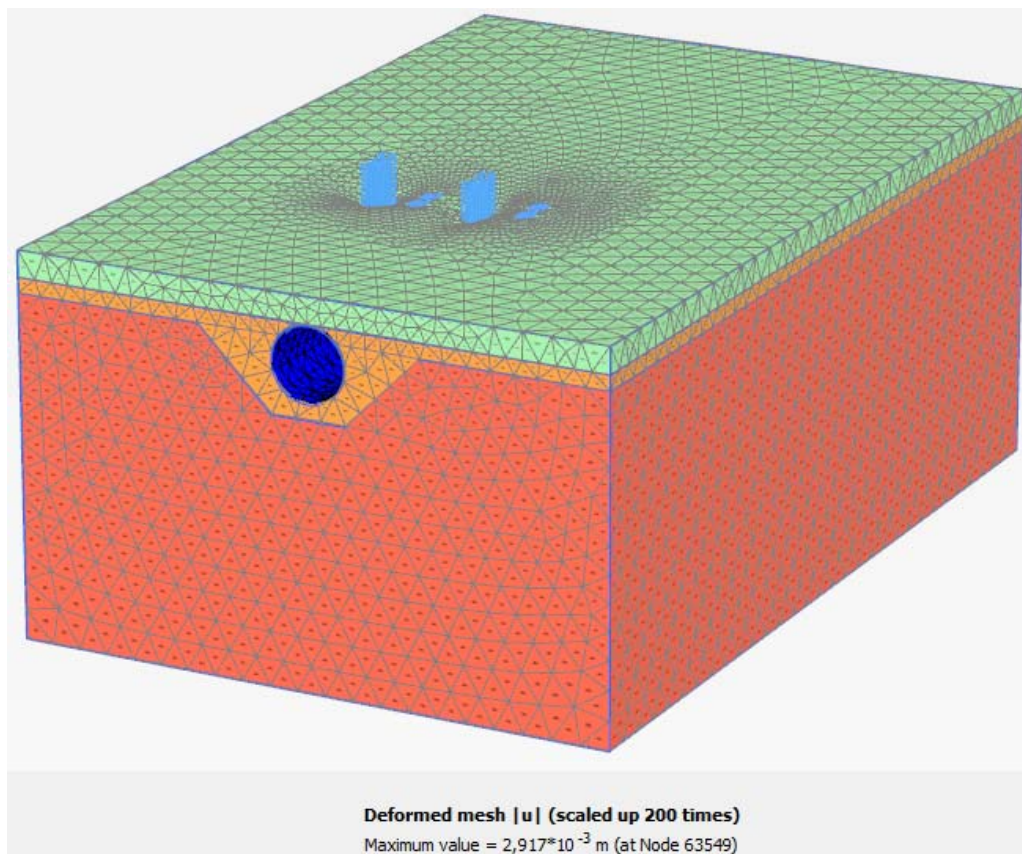
Tien rakennekerroksille käytettiin Hardening Soil- materiaalmallia (HS). HS-malli kuvaa materiaalia isotrooppisen myötölujittumisen avulla. Toisin sanottuna materiaalin myötöpinta ei ole kiinteä, kuten esim. MC-mallissa, vaan myötöpinta voi laajeta joko deviatorisen kuormituksen (leikkausmyötölujeneminen)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

Taulukko 5.2 Tien rakennekerroksille käytetyt laskentaparametrit PLAXIS-simulaatioissa.

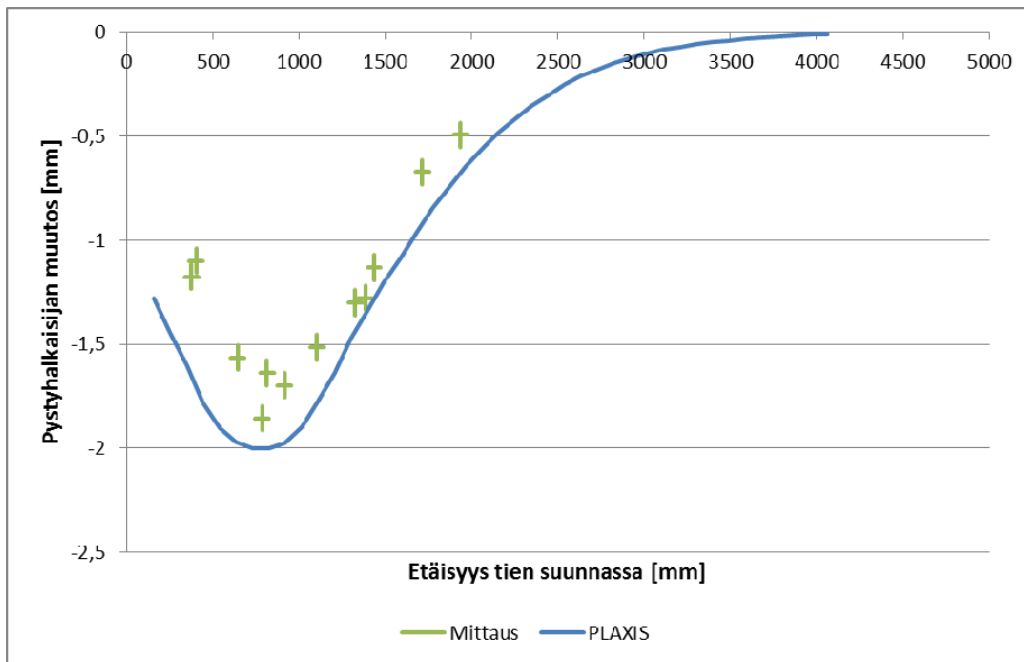
Parametri	$c'$	$\phi'$	$\psi$	$E_{50}^{ref}$	$E_{oed}^{ref}$	$E_{ur}^{ref}$	$m$	$\nu_{ur}$	$p^{ref}$	$K_0^{nc}$
Yksikkö	kPa	°	°	MPa	MPa	MPa	-	-	kPa	-
<b>Halkaistu sisäputki</b>										
Tierakenne, ylempi kerros	20	50	20	300	205	600	0,5	0,2	100	0,234
Tierakenne, alempi kerros	10	45	15	150	120	300	0,5	0,2	100	0,2929
Rummun ympärystäyttö	5	40	10	150	120	300	0,5	0,2	100	0,2929
<b>Puolipohjaus</b>										
Tierakenne, ylempi kerros	20	50	20	300	205	300	0,5	0,2	100	0,234
Tierakenne, alempi kerros	10	45	15	150	120	300	0,5	0,2	100	0,2929
Rummun ympärystäyttö	5	40	10	150	120	300	0,5	0,2	100	0,2929

### 5.1.1 Halkaistu sisäputki

Rummun peitesyvyys mallissa on 350 mm. DCP-mittausten perusteella tien rakennekerros koostuu kahdesta kerroksesta ja rummun ympärillä on havaittavissa ympärystäyttö. Ylemmän rakennekerroksen paksuus on 350 mm ja alemman 200 mm. Ympäristäyttö on oletettu ulottuvaksi 200 mm rummun alapinnan tason alapuolelle ja täytön luiskakaltevuus on mittausten perusteella noin 1:1. Maakerrosten parametrien katsottiin olevan riittävän tarkasti määritettyjä, mikäli mallintamalla saatu rummun pystyhalkaisijan muutos vastasi mitattua noin  $\pm 10\%$  tarkkuudella. Kuvassa 5.2 on esitetty ennen korjausta mitatut ja mallinnetut rummun pystyhalkaisijan muutokset.



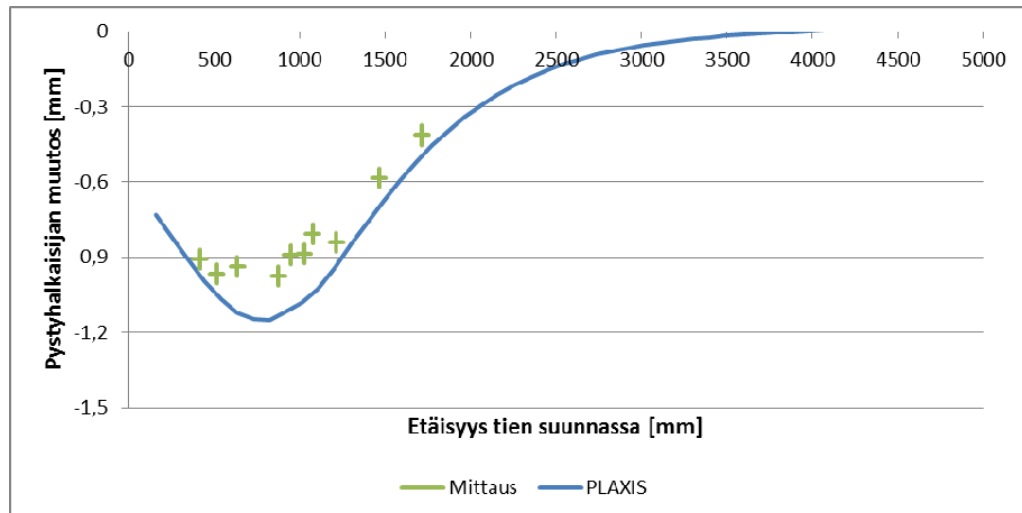
Kuva 5.1 Halkaistun sisäputken koekohteesta tehty PLAXIS-malli.



Kuva 5.2 Ennen korjausta mitattujen ja mallinnetun rummun pystyhalkaisijan muutoksen vertailu, halkaistun sisäputken koekohteelle.

### 5.1.2 Puolipohjaus

Koekohteen mallinnuksessa jouduttiin tekemään jonkin verran herkkyytarkasteluja, koska koekohte sijaitsee kaarteessa. Koekohteen sijainti aiheuttaa epävarmuuksia mitaustuloksiin, koska pelkästään mittausajolinjaa vertaamalla ei välttämättä saada täysin luotettavaa mittausdataa rummun peitesyvyyden muuttuessa ajolinjan mukana. Kaarreajo saattaa aiheuttaa lisäksi vaihtelua ajonopeudessa eri kuormitusajojen välillä, jolloin dynaaminen kuormituslisä ja ajoneuvokaluston käyttäytyminen voivat muuttua kuormitusajojen välillä. Rummun peitesyvyys mallissa on 550 mm. DCP-mittausten perusteella tierakenne koostuu kahdesta kerroksesta ja rummun ympärillä on ympärystäyttö. Ylemmän rakennekerroksen paksuus on 150 mm ja alemman 300 mm. Ympärystäyttö on oletettu ulottuvaksi rummun alapinnan tasolle ja täytön luiskakaltevuus on mittausten perusteella noin 1:1. Maakerrosten parametrien katsottiin olevan riittävän tarkasti määritettyjä, mikäli mallintamalla saatu rummun pystyhalkaisijan muutos vastasi mitattua noin  $\pm 10\%$  tarkkuudella. Kuvassa 5.3 on esitetty ennen korjausta mitatut ja mallinnetut pystyhalkaisijan muutokset. Kohteen mittaus- ja mallinnustulosten vertailussa tulee huomioida, että kohde sijaitsee kaarteessa, mikä johdosta eri mittausajojen välillä on eroja rummun peitesyvyydessä. Tämä vaikuttaa myös väistämättä mitattujen rummun halkaisijanmuutosten suuruuteen.

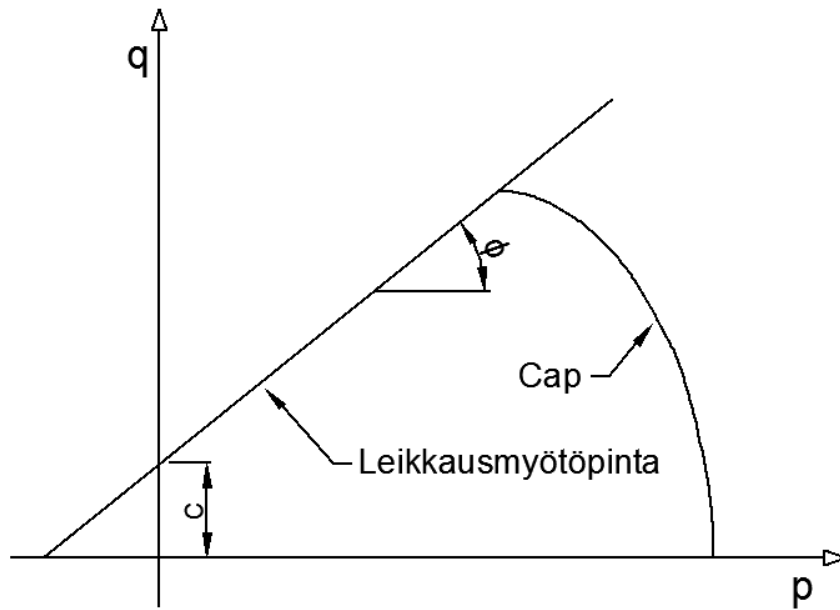


Kuva 5.3 Ennen korjausta mitattujen ja mallinnetun rummun pystyhalkaisijan muutoksen vertailu, puolipohjauksen koekohteelle.

## 5.2 Maaparametrien muuntaminen

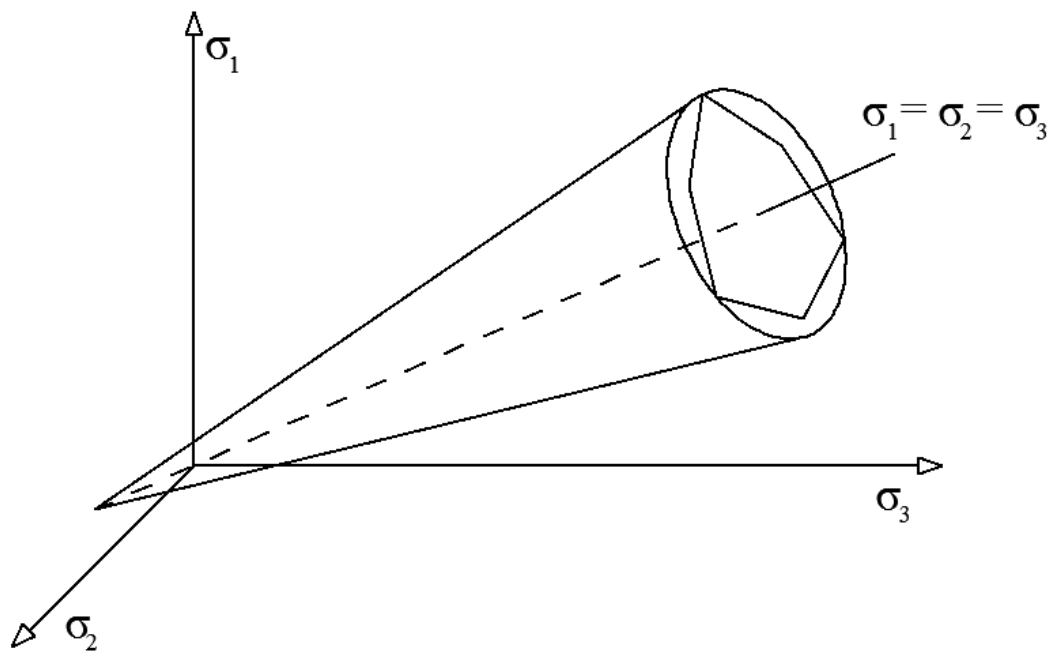
PLAXIS-ohjelmistossa maamateriaalien lujuus määritetään koheesion  $c$ , leikkauskestävyyskulman  $\phi$  ja dilataatiokulman  $\psi$  avulla. Lujuusparametrit perustuvat Mohr-Coulombin (MC) myötöehtoon. ANSYS-ohjelmistossa ei ollut käytössä MC-myötöpintaa, joten käytössä olleista myötöehdoista valittiin Drucker-Prager (DP). DP-myötöehtoa käytetään yleisesti myös maamateriaalien käyttäytymisen kuvaamiseen, joten valinta on soveltavuuden kannalta perusteltu.

DP-materiaalin myötöehto on yksinkertaisin von Mises -myötöehdon yleistys hydrostaattisesta jännityksestä riippuvalle materiaalille. Myötöpinta on äärettömyyteen asti jatkuva kartio, jonka keskilinja kulkee hydrostaattista jännitystä kuvaavaa suoraa pitkin. Periaatteessa siis äärettömyyteen asti jatkuva kartio mahdollistaa äärettömän suuren leikkauskestävyyden. Maamateriaaleilla on kuitenkin jokin materiaalikohtainen lujuus. Tämä äärettömyysongelma voidaan ratkaista käytettävissä olevalla Cap Model -mallilla, jossa DP-myötöpintaa rajataan puolipallonmuotoisella pinnalla jollakin hydrostaattisen jännityksen arvolla. Cap Model -myötöpinta esitetään usein  $(p,q)$ -tasossa (ks. kuva 5.4). (Korhonen 2015)



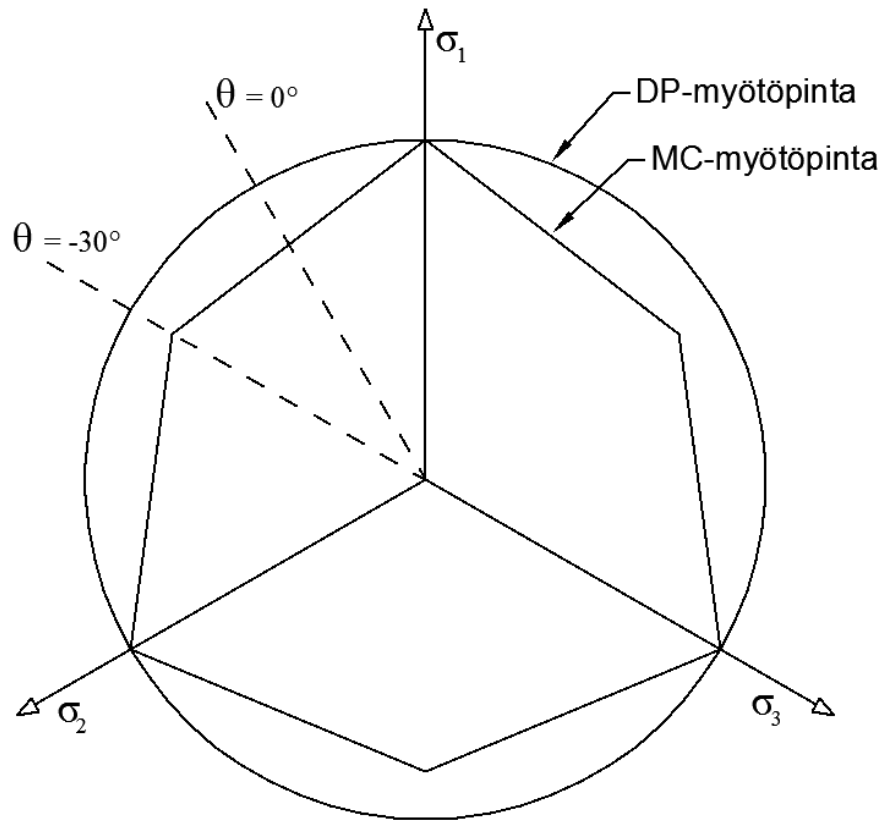
Kuva 5.4 Cap model 2D-tasokuva, akselit hydrostaattinen jännitys  $p$  ja deviatorinen jännitys  $q$ .

Sovittamalla Drucker-Prager- ja Mohr-Coulomb-myötöpinta yhteen kolmiaksaalisen puristuksen tapauksessa päädytään tilanteeseen, jossa DP-pinta ympäröi MC-pinnan (ks. kuva 5.5 ja kuva 5.6).



Kuva 5.5 Drucker-Prager ja Mohr-Coulomb-myötöpinnat pääjännitysavaruuksessa.





Kuva 5.6 Drucker-Prager ja Mohr-Coulomb-myötöpinnat  $\pi$ -tasossa.

DP-myötöehto voidaan kirjoittaa yhtälön 5.1 muotoon:

$$\beta(2\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_y = 0, \quad (5.1)$$

josta uudelleen järjestelemällä päädytään muotoon

$$\sigma_1 \left( 2\beta + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = \sigma_3 \left( \frac{1}{\sqrt{3}} - \beta \right) + \sigma_y. \quad (5.2)$$

Kun johdetaan lisäksi Mohr-Coulombin myötöpinnan lauseke kolmiakiaalisen puristuksen tilanteessa, voidaan tehdä parametrimuunnos eri mallinnusohjelmistojen välillä. Coulombin yhtälö (5.3) on yleisesti muotoa:

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi, \quad (5.3)$$

missä  $c$  on materiaalin koheesio ja  $\phi$  on materiaalin leikkauskestävyysskulma. Nämä termit ovat materiaalivakioita, joilla kuvataan maan tutkittua lujuutta. Kun  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , voidaan yhtälö 5.3 kirjoittaa yhtälön 5.4 muotoon:

$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} = 1, \quad (5.4)$$

josta saadaan johdettua yhtälöä 5.2 vastaava yhtälö 5.5:

$$\sigma_1 (1 + \sin \phi) = \sigma_3 (1 - \sin \phi) + 2c \cos \phi. \quad (5.5)$$

Yhtälöjä 5.2 ja 5.5 vertailemalla saadaan yhteys DP- ja MC-myötöpinnoille. Kolmiak-siaalisen puristuksen tilanteessa toteutuu yhtälö 5.6:

$$\frac{2\beta + \frac{1}{\sqrt{3}}}{1 + \sin \phi} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} - \beta}{1 - \sin \phi}. \quad (5.6)$$

Yhtälöstä 5.6 voidaan ratkaista materiaalivakio  $\beta$  (yhtälö 5.7):

$$\beta = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}. \quad (5.7)$$

DP-myötöehdon parametri  $\sigma_y$ :n ilmoittaminen termien  $c$  ja  $\phi$  avulla voidaan johtaa samaan tapaan, kun merkitään  $\sigma_3 = 0$ . Yhtälö 5.2 sievenee muotoon (yhtälö 5.8):

$$\sigma_1 \left( 2\beta + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = \sigma_y. \quad (5.8)$$

Vastaavasti yhtälö (5.5) sievenee muotoon (yhtälö 5.9):

$$\sigma_1 (1 + \sin \phi) = 2c \cos \phi. \quad (5.9)$$

Yhtälöstä 5.9 voidaan ratkaista  $\sigma_1$ . Sijoittamalla tämä ratkaisu ja materiaalivakio  $\beta$  (yhtälö 5.7) yhtälöön (5.8) saadaan ratkaistua:

$$\sigma_y = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}. \quad (5.10)$$

Kun yhteydet (5.7) ja (5.10) on johdettu, voidaan määrittää materiaalimalli ANSYS-ohjelmistoon käyttämällä tunnettuja materiaalivakioita  $c$  ja  $\phi$ .

Myös materiaalien jäykkyyden kuvaamisen kannalta PLAXIS-mallinnuksissa käytetty materiaalimalli eroaa ANSYS-malleissa käytetyistä. Ensimmäisen vaiheen ANSYS-laskelmissa käytettiin rakennekerrosten jäykkyydsmoduuleina PLAXIS-mallien  $E_{50}$ -jäykkyyksiä (taulukko 5.2), mutta tällöin malli käyttäytyi liian jäykästi. Muunnelluissa ANSYS-laskennoissa käytetyt jäykkyydsparametrit on valittu kussakin rakennekerrok-sessa keskimäärin vallitsevan pienimmän pääjännityksen ja PLAXIS-ohjelmistossa käytetyn sekanttimoduulin ( $E_{50}$ ) avulla (yhtälö 5.11).

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cos \phi - \sigma_3' \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (5.11)$$

missä

$m$  on jännitystilariippuvuutta kuvaava eksponentti; 0,5  
 $p^{ref}$  on vertailujännitys; 100 kPa

ANSYS-laskelmissa käytetty rakennekerroksen jäykkäysmoduuli määräytyy yhtälön 5.12 perusteella.

$$E = \frac{2E_{50}}{2 - R_f} \quad (5.12)$$

missä

$R_f$  on murtorajatilan kerroin; 0,9.

ANSYS-laskennoissa käytettyjen laskentaparametrien selitykset on esitetty taulukossa 5.3 ja materiaaliparametrit taulukossa 5.4.

Taulukko 5.3 Ansys-mallien parametrien selitykset.

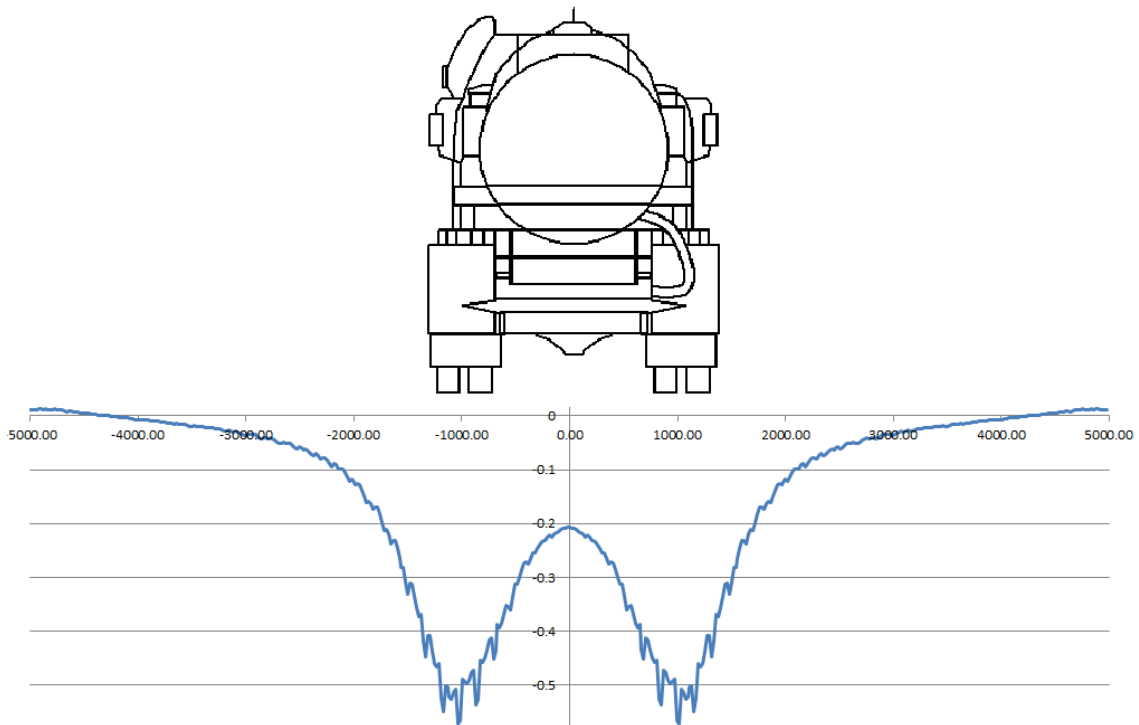
Parametri	Selitys
$E$	Kimmomoduuli
$\nu$	Poissonin luku
$R_c$	Compaction cap parameter
$R_t$	Expansion cap parameter
$X_i$	Compaction cap yield pressure
$\sigma_y$	Cohesion yield parameter
$B$	Shear envelope exponent
$A$	Shear envelope exponential coefficient
$\alpha$	Shear envelope linear coefficient
$\psi$	Ratio of extension to compression strength

Taulukko 5.4 Muunnetuissa ANSYS-laskennoissa käytetyt materiaaliparametrit.

Parametri	$E$	$\nu$	$R_c$	$R_t$	$X_i$	$\sigma_y$	$B$	$A$	$\alpha$	$\psi$
<b>Yksikkö</b>	<b>MPa</b>	-	-	-	-					
<b>Halkaistu sisäputki</b>										
Tierakenne, ylempi kerros	190	0,3	0,5	0,01	10000	34,6	0,00001	0	0,686	1
Tierakenne, alempi kerros	50	0,3	0,5	0,01	10000	18,5	0,00001	0	0,617	1
Rummun ympäristäyttö	30	0,3	0,5	0,01	10000	9,75	0,00001	0	0,545	1
Pohjamaa	40	0,4	0,5	0,01	10000	20	0,00001	0	0	1
<b>Puolipohjaus</b>										
Tierakenne, ylempi kerros	185	0,3	0,5	0,01	10000	34,6	0,00001	0	0,686	1
Tierakenne, alempi kerros	70	0,3	0,5	0,01	10000	18,5	0,00001	0	0,617	1
Rummun ympäristäyttö	30	0,3	0,5	0,01	10000	9,75	0,00001	0	0,545	1
Pohjamaa	55	0,4	0,5	0,01	10000	20	0,00001	0	0	1

## 5.3 Rumpujen korjausmenetelmien mallintaminen

ANSYS-ohjelmistossa geometria on valittu samoin kuin Plaxis-ohjelmistossa lukuun ottamatta symmetriaehtoa. Symmetriaehtoa on käytetty laskenta-ajan pienentämiseksi. Symmetria-akseli, tai tässä tapauksessa tarkemmin sanottuna symmetriataso, voidaan määrittää yhdelle tai useammalle pinnalle niiden sijainnista tai asennosta riippumatta. Symmetriatasoa käyttämällä mallin vapausasteiden lukumäärä puolittuu ja laskenta-aika lyhenee, koska myös ratkaistavien jäykkyysohjelmien alkioden määrä vähenee kahdessa ulottuvuudessa. Valittu symmetriaehto tuottaa laskennallisesti tilanteen, jossa laskentamalli huomioi kuormitusajoneuvon yhden akselin kuvan 5.7 mukaisesti, vaikka visuaalisesti mallituloksissa esiintyy vain yksi rengaspari.



Kuva 5.7. Havainnekuva putken pystyhalkaisijan muutoksesta tien poikkisuunnassa. Symmetria-akseli sijaitsee kuvan tilanteessa tien keskilinjalla, x-akselin nollakohdassa. (Korhonen, 2015)

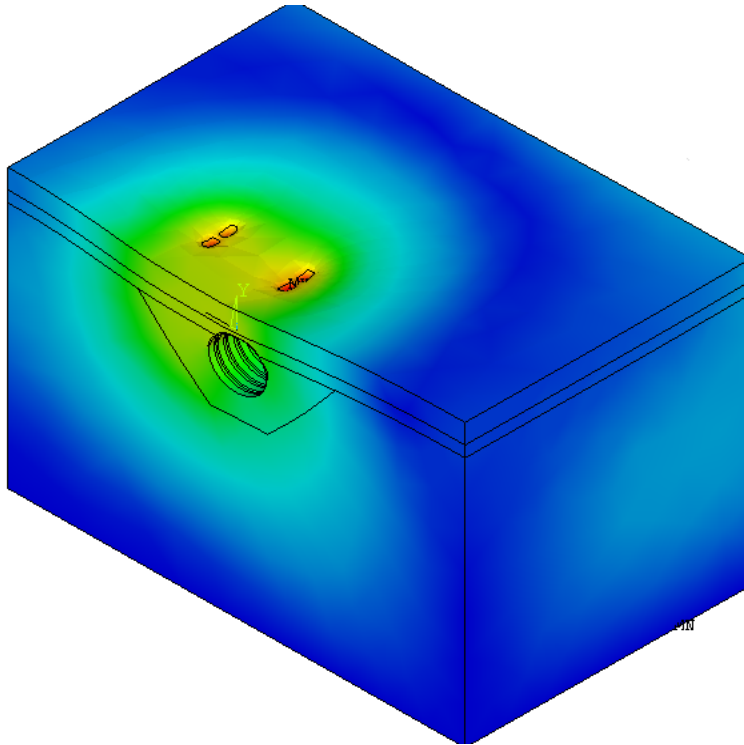
Taulukkoon 5.5 on koottu ANSYS-malleissa käytetyt rakenteellisten osien ja kuormituselementtien parametrit. Renkaan kosketuspintaa simuloiva kuormitusalue ja rummuissa käytetty teräs sekä uuden ja vanhan rumpuputken välissä käytetyt betoni ja polyuretaani on mallinnettu lineaarielastisina materiaaleina, ts. niille ei ole asetettu myötöehtoa. Ratkaisuun päädyttiin, koska oli oletettavissa, että malleissa toteutuvat jännitystasot ovat kaikkien materiaalien kohdalla niin pieniä, ettei materiaalien äärettömästä lujuudesta muodostu laskentavirhettä.

Taulukko 5.5 Lineaarielastisten materiaalien parametrit ANSYS-malleissa.

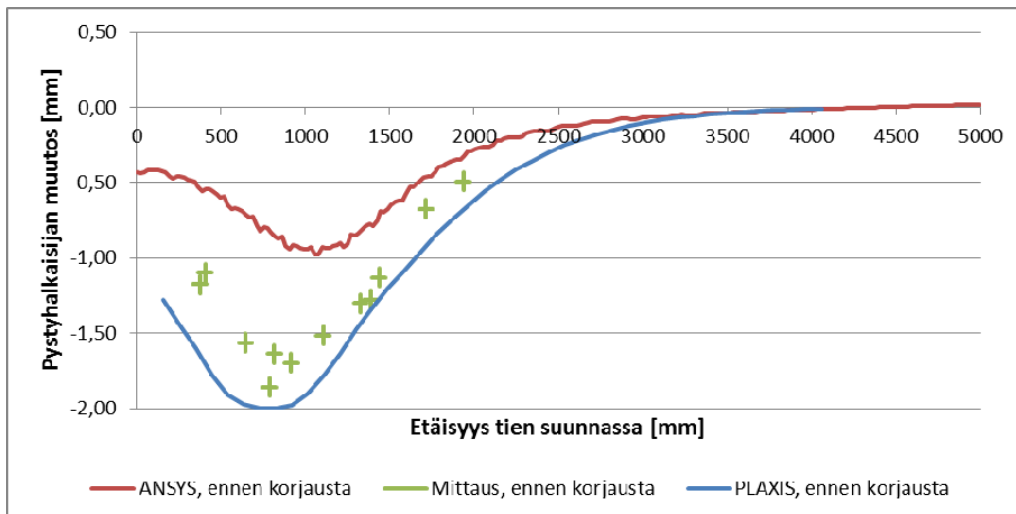
Materiaali	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\nu$ [-]	$t$ [mm]
Kuormitusaluista	1000	0,495	10
Teräsrumpu	210 000	0,3	2,5
Betoni	31 000	0,2	-
Polyuretaani	250	0,3	-

### 5.3.1 Halkaistu sisäputki

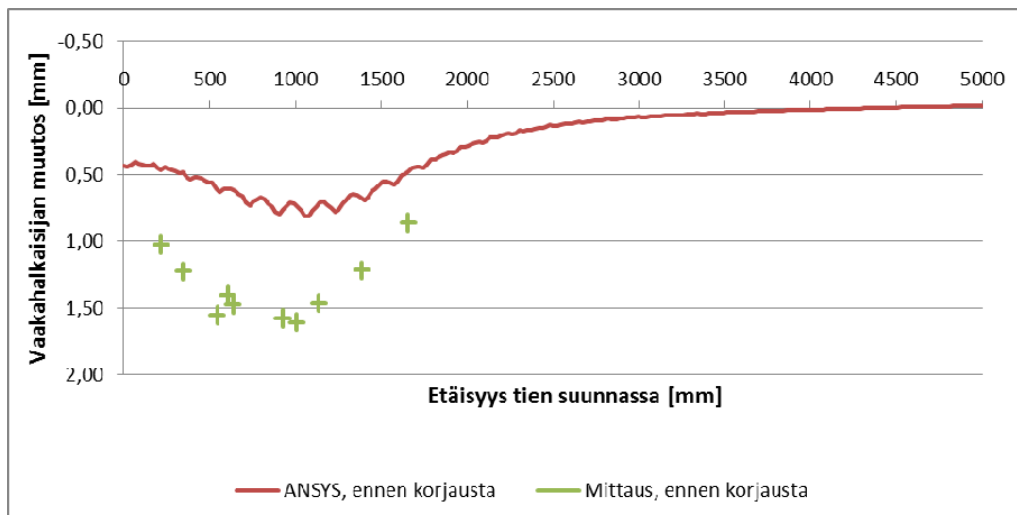
ANSYS-mallinnuksen ensimmäisessä vaiheessa tarkasteltiin tilannetta ennen korjaustoimenpiteitä ja laskentatuloksista tarkasteltiin ensisijaisesti rummun halkaisijanmuutoksia. Kuvassa 5.8 on mallissa toteutuvat suhteelliset pystysiirtymätasot. Kuvan 5.8 malli alkaa kuormitusajoneuvon keskilinjasta, jolloin rengaslinja sijoittuu noin yhden metrin päähän nolapistestä. Mitattujen ja mallinnettujen pystyhalkaisijan muutosten vertailu on esitetty kuvassa 5.9. Kuvasta voidaan havaita, että ANSYS-malli aliarvioi toteutuvia siirtymätasojä, vaikka maamateriaalien jäykkyys- ja lujuusominaisuudet on pyritty määrittämään mahdollisimman analyttisesti. Pohjimmiltaan ongelma johtuu siitä, että ANSYS-mallissa materiaalit käyttäytyvät elastisesti sekä veto- että puristusjännitystilassa. Tämä puolestaan johtaa siihen, että maakerrokseen syntyy laskennan aikana vetojännityksiä, joita sitomaton maarakenne ei todellisuudessa kestä. Vetojännitysten vaikutuksesta rengaskuormasta aiheutuva puristusjännitys ei myöskään vaikuta rakenteessa, etenkin syvyysuunnassa, kuten aidossa kuormitustilanteessa. Kuvassa 5.10 on esitetty kuvaa 5.9 vastaavat vaakahalkaisijoiden muutokset.



Kuva 5.8 ANSYS-mallin periaate, halkaistu sisäputki ennen korjausta. Kuvassa on esitetty suhteellinen pystysiirtymätaso.



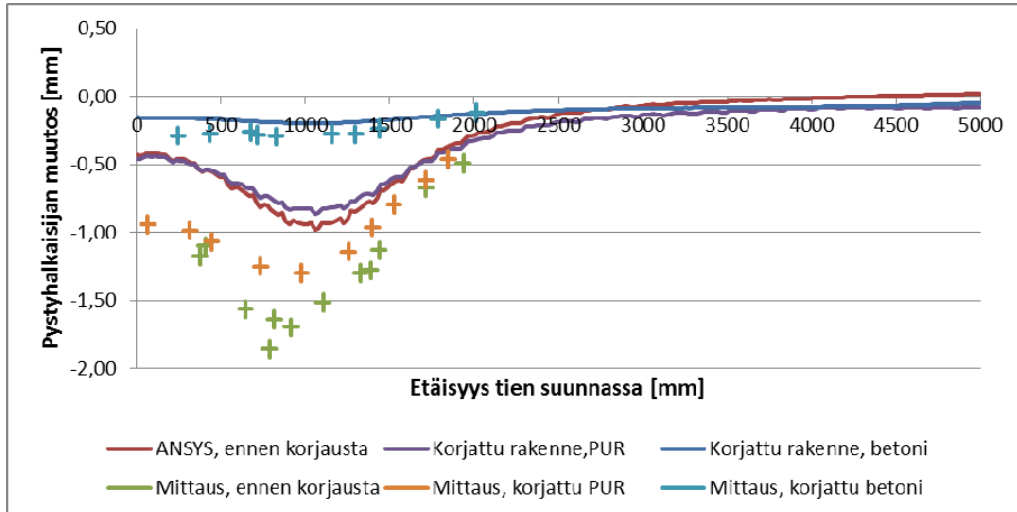
Kuva 5.9 Mitattujen ja mallinnettujen rummun pystyhalkaisijan muutosten vertailu.



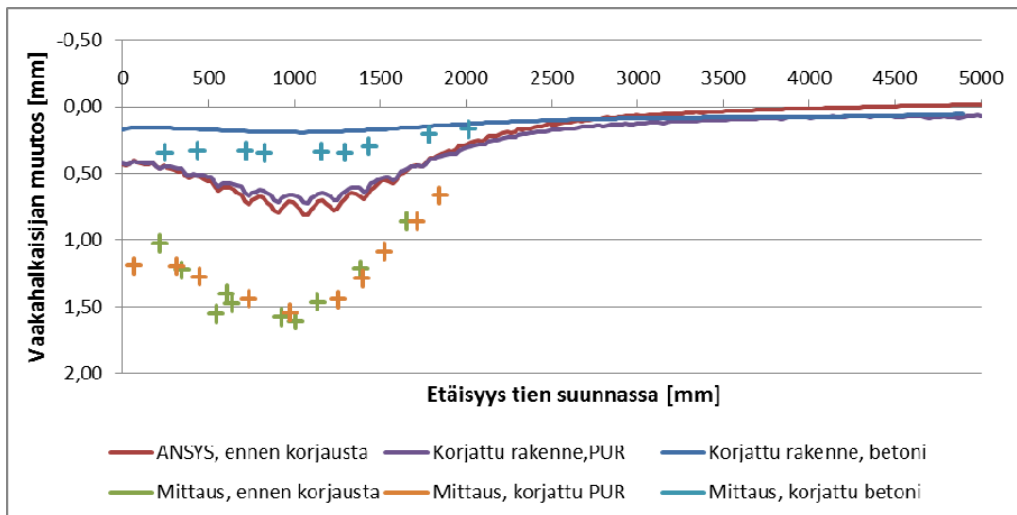
Kuva 5.10 Mitattujen ja mallinnettujen rummun vaakahalkaisijoiden muutosten vertailu.

ANSYS-mallinnuksen seuraavassa vaiheessa tarkasteltiin korjaustoimenpiteiden vaikutusta rummun muodonmuutuskäyttäytymisen kannalta. Korjausmenetelmän mallintamisen toimivuutta arvioitiin ensimmäisessä vaiheessa vertaamalla rummun mitattuihin halkaisijanmuutoksiin. Kuvassa 5.11 on esitetty halkaistun sisäputken koe-kohteen mittausten ja mallinnusten vertailu pystyhalkaisijan muutoksien osalta. Kuvassa 5.12 on esitetty vastaavat vaakahalkaisijan muutokset. Vaakahalkaisijan muutosten osalta on myös huomioitava, että mallinnus- ja mittaustuloksista on otettu tarkasteluun suurin vaakahalkaisijan muutos. Staattista tilannetta vastaavaa mittaustulosta ei tässä yhteydessä saada mittaustulosta, joten on tyydyttävä hetkeen, jolloin kuorma-auton painavin akseli on rummun yläpuolella, vaikka todellisuudessa kuorma on liikkuva.

Korjaustoimenpiteet sisältävä malli vaikuttaa käyttäytyvän samankaltaisesti ennen korjauksia vallinnutta tilannetta kuvaavan mallin kanssa. Rummun halkaisijanmuutosten absoluuttiarvot poikkeavat mitatuista arvoista, mutta korjausten vaikutus näkyy mallinnustuloksissa likimain samassa suhteessa kuin mittaustuloksissa. Korjaustoimenpiteiden aiheuttamat muutokset rummun käyttäytymisessä olivat jokseenkin ennakkoidun kaltaisia. Kun uuden ja vanhan rummun väliin jäävä tila täytetään betonilla, rakenne jäykistyy merkittävästi ja kuormituksen aiheuttama muodonmuutostaso pienenee oleellisesti. Polyuretaanitäyttö ei vastaavasti jäykistä rakennetta merkittävästi. Polyuretaani näyttää kuitenkin olevan täyteaineena riittävän jäykkä, jotta jännitykset siirtyvät kahden teräsputken välillä. Mikäli polyuretaanitäyttö ei siirtäisi jännityksiä rumpuputkien välillä, lähenisi myös mitattu tai mallinnettu pystyhalkaisijan muutos nolaa, koska lähes kaikki muodonmuutokset tapahtuisivat kahden putken välissä olevassa PUR-täytössä.



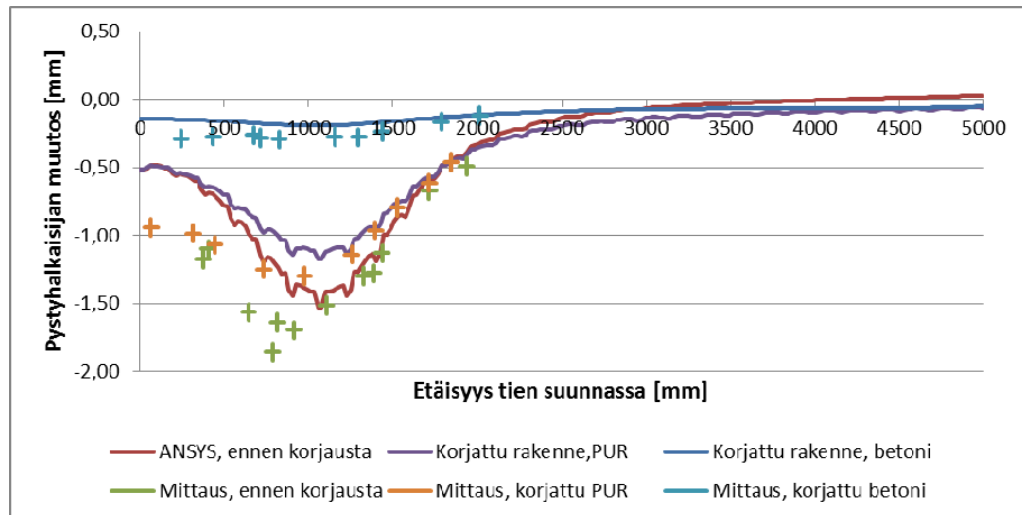
Kuva 5.11 Mitattujen ja mallinnettujen rummun pystyhalkaisijan muutosten vertailu.



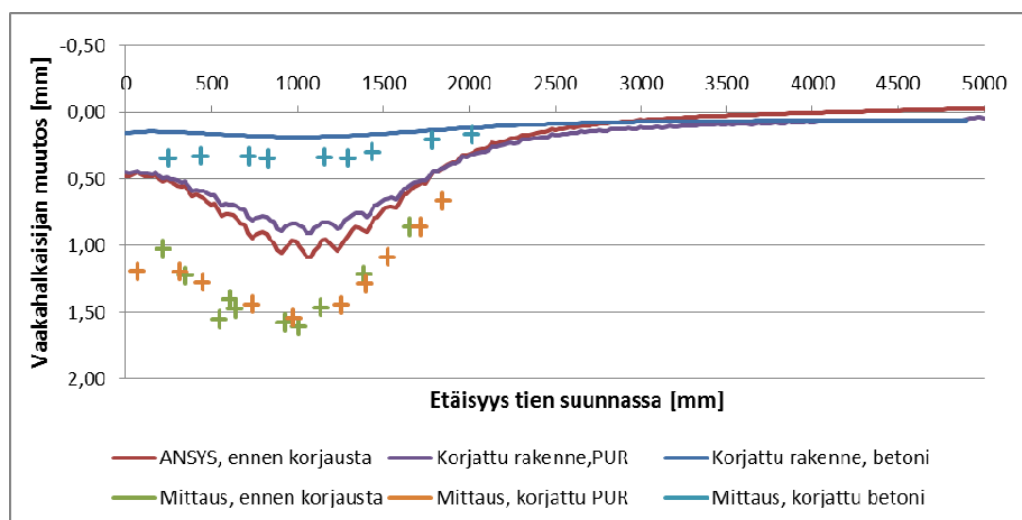
Kuva 5.12 Mitattujen ja mallinnettujen rummun vaakahalkaisijoiden muutosten vertailu.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että maakerroksille ei ANSYS-mallinnuksessa voida käyttää realistisia parametriarvoja, koska jännitykset eivät välity maarakenteesta johtuen malliin muodostuvista vetojännityksistä. Seuraavassa vaiheessa pyrittiin mallintamaan rumpuputken käyttäytyminen mittausta vastaavaksi muuttamalla maakerrosten laskentaparametreja. Halkaistun sisäputken kohteessa ongelmia tuotti etenkin DCP-laitteella todennettu jäykkä ja paksu tien pintakerros. Simulaatioissa jouduttiin ohentamaan pintakerroksen paksuus 300 millimetristä 100 millimetriin ja käyttämään loppurakenteessa alemman rakennekerroksen alhaisempia laskentaparametreja. Lisäksi kuormituksen jouduttiin kasvattamaan 20 % sysäyslisan verran. Näillä muutoksilla määritetyt pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset on esitetty kuvissa 5.13 ja 5.14. Muutosten avulla mittaustulokset ja malli vastaavat toisiaan paremmin, mutta näiden tulosten perusteella pelkästään mallintamalla ei voida arvioida korjausratkaisuiden toimivuutta.



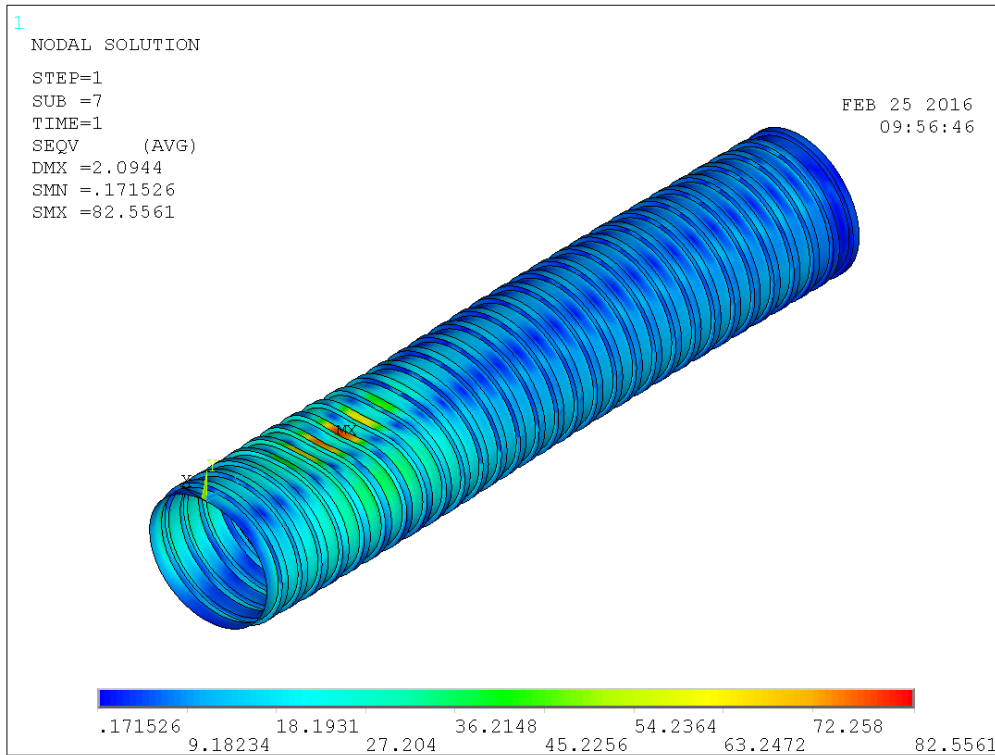


Kuva 5.13 Mitattujen ja mallinnettujen rummun pystyhalkaisijoiden muutosten vertailu, muunneltu ANSYS-malli.

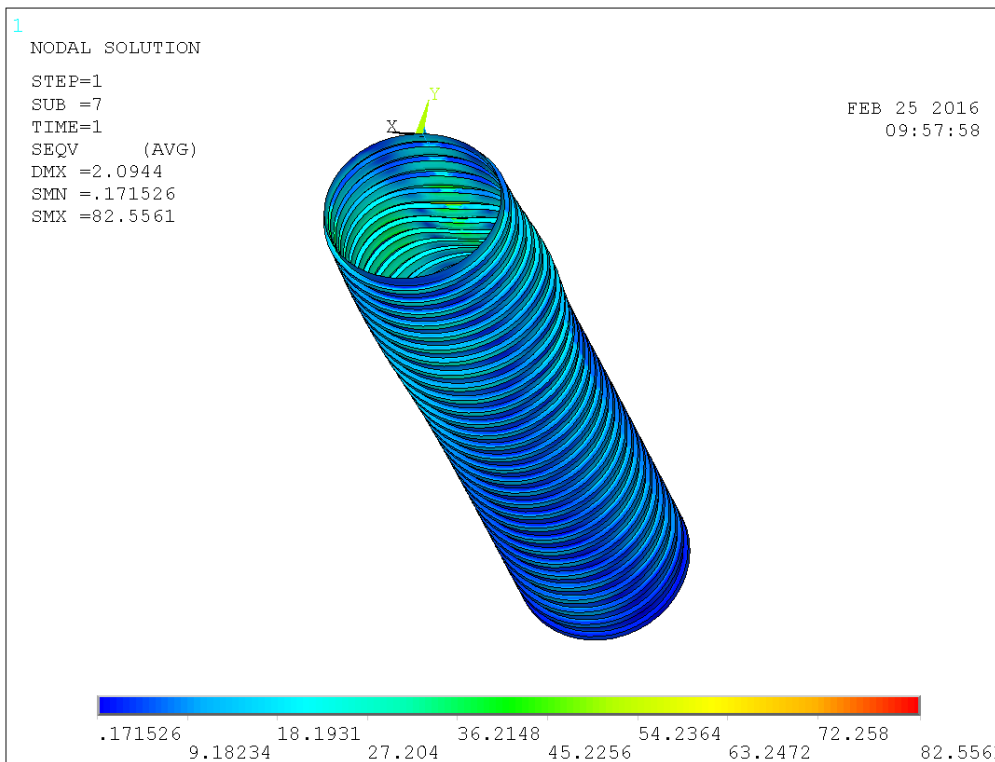


Kuva 5.14 Mitattujen ja mallinnettujen rummun pystyhalkaisijoiden muutosten vertailu, muunneltu ANSYS-malli.

Kun rummun muodonmuutoskäyttäytyminen saatiin mallinnettua melko tarkasti, voitiin lisäksi tarkastella rumpuputkeen mobilisoituvia jännitystasoja. Kuvassa 5.15 on esitetty ennen korjaustoimenpiteitä mallinnetun rummun Von Mises-jännitykset. Rummun ulkopintaan muodostuu enemmillään noin 80 MPa:n suuruinen puristusjännitys. Kun tarkastellaan tilannetta rummun sisäpinnalla (kuva 5.16), on vetojännitys rumpua kuormittavan renkaan alla noin 30–40 MPa suuruinen. Rumpuputkelle mobilisoituvat jännitykset ovat siis jonkin verran suurempia verrattuna mitatuista venymistä määritettyihin jännityksiin, mutta teräksen myötörajaan verrattuna hyvin pieniä.

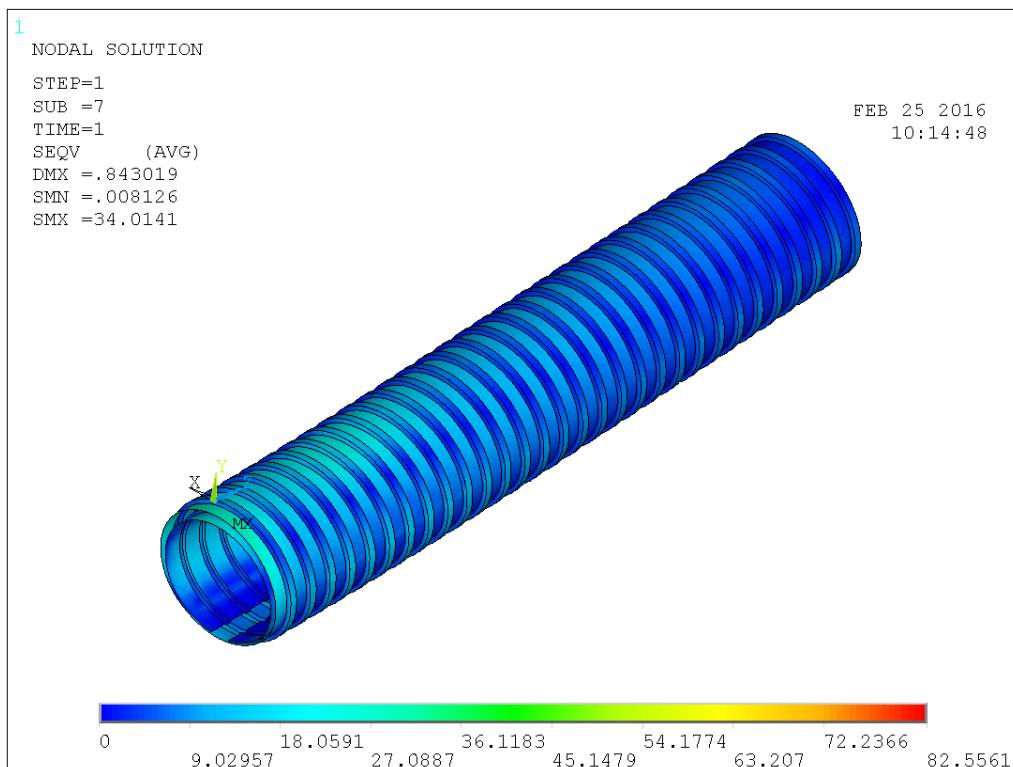


Kuva 5.15 Teräksen laskennalliset jännitykset rummun ulkopinnassa, halkaistu sisäputki ennen korjausta.

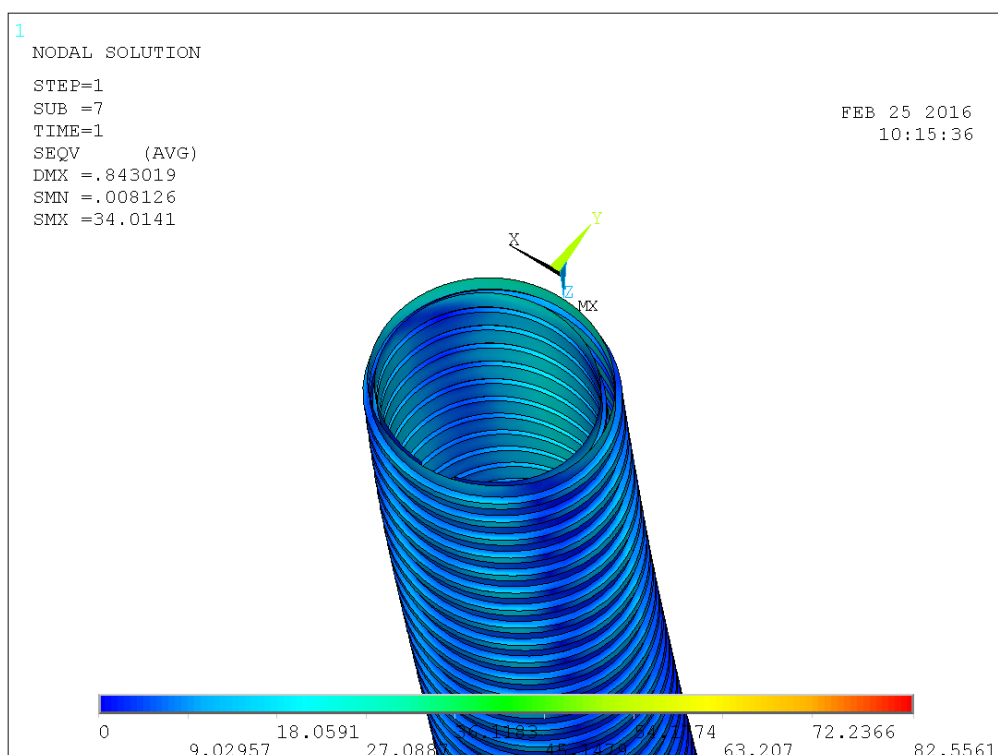


Kuva 5.16 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken sisäpinnassa, halkaistu sisäputki ennen korjausta.

Kun putkien välissä käytetään täyteaineena betonia, jäykistyy koko rakenne merkittävästi. Tämä voidaan huomata myös kuvissa 5.17 ja 5.18 esitetyistä jännitystasoista. Jännitystasot pienenevät merkittävästi, noin 20 MPa suuruusluokkaan sekä ulko- että sisäpinnalla.

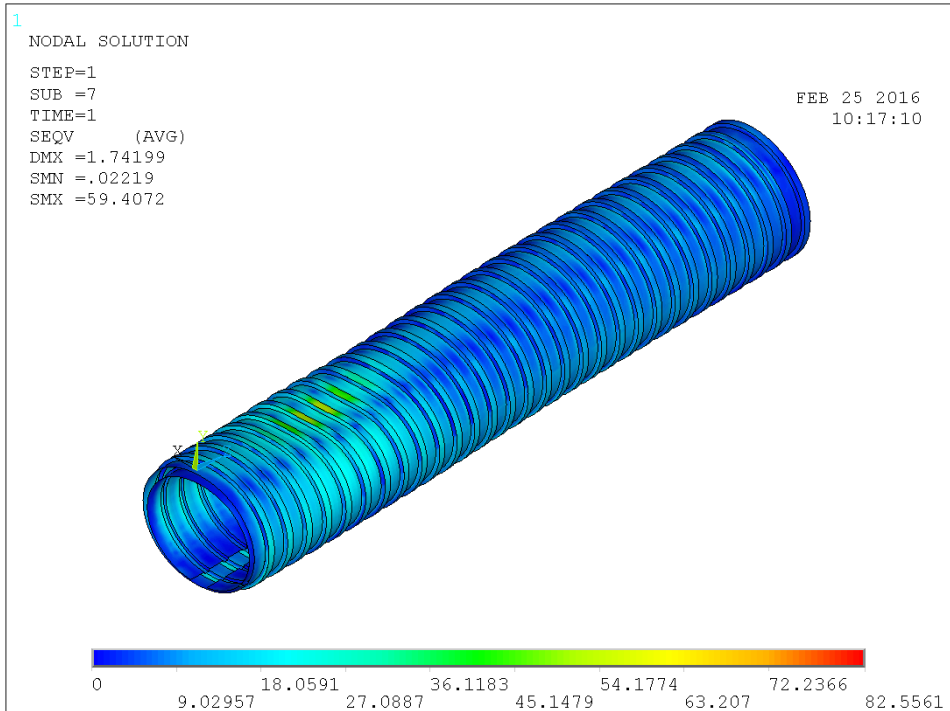


Kuva 5.17 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken ulkopinnassa, halkaistu sisäputki korjauksen jälkeen, täyteaineena betoni.

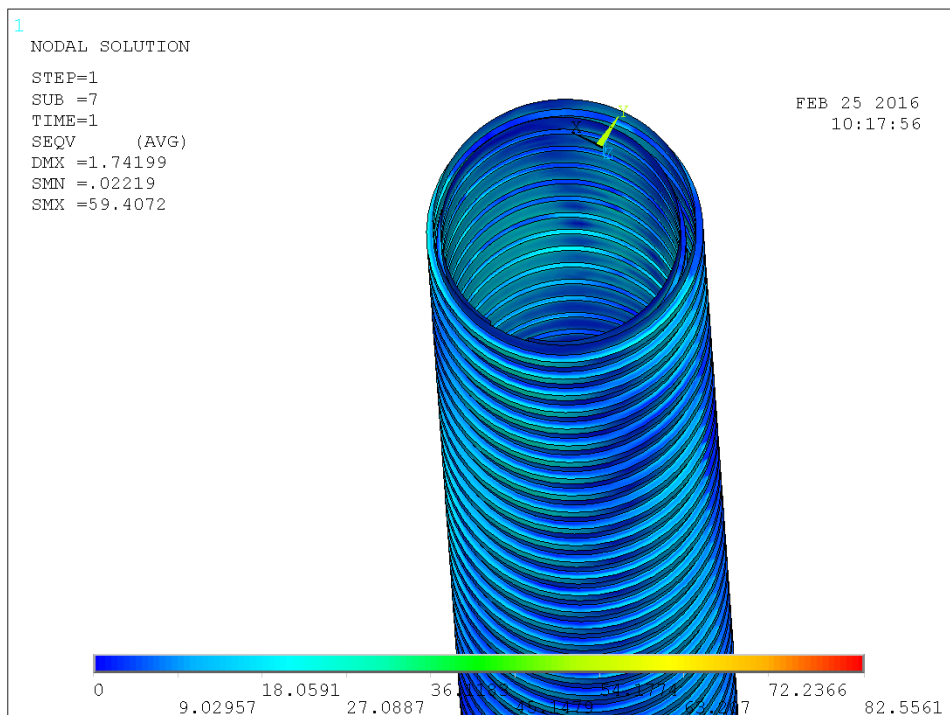


Kuva 5.18 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken sisäpinnassa, halkaistu sisäputki korjauksen jälkeen, täyteaineena betoni.

Kun täyteaineena käytetään polyuretaania, pienenevät jännitykset jonkin verran. Rummun ulkopinnalla (kuva 5.19) suurimmat jännitykset ovat noin 50–60 MPa suuruisia. Kun verrataan tilanteeseen ennen korjausta, merkittävin ero syntyy ymmärrettävästi rumpuputken sisäpinnalle. Putken sisäpinnalla suurimmat jännitykset ovat samaa suuruusluokkaa kuin betonikorjauksessa, noin 20 MPa (kuva 5.20).



Kuva 5.19 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken ulkopinnassa, halkaistu sisäputki korjauksen jälkeen, täyteaineena uretaani.

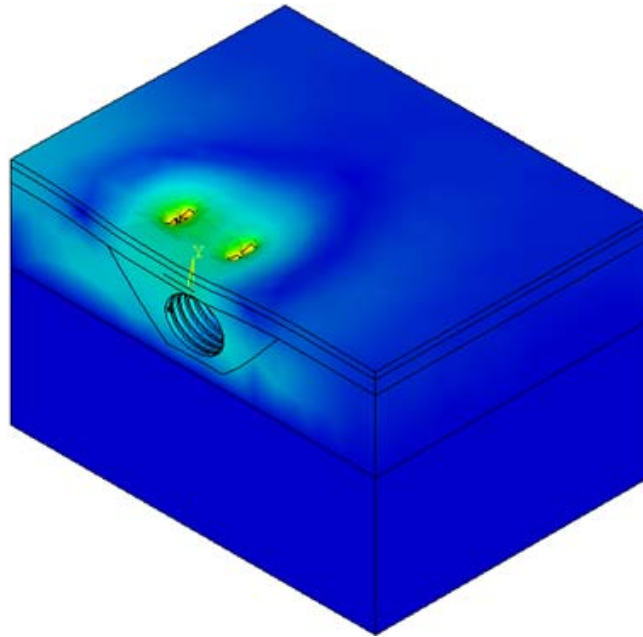


Kuva 5.20 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken sisäpinnassa, halkaistu sisäputki korjauksen jälkeen, täyteaineena uretaani.

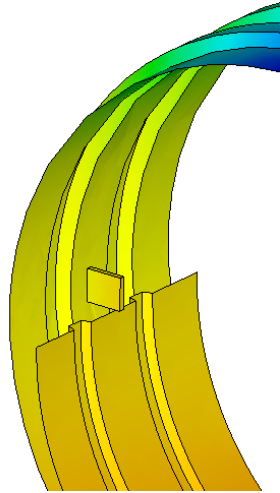
Yhteenvedona jännitystasojen tarkastelusta voidaan todeta, että molemmat korjausmenetelmät pienentävät rumpuputken jännitystasoja, ja koska rasiutilanne ei ennen korjaustakaan ollut merkittävä huolimatta rummun alhaisesta peitesyvyydestä, voidaan todeta, että käytetty korjausratkaisu on käyttökelpoinen. Toki jännitystasoja tarkasteltaessa täytyy muistaa, että mallin parametreja ja geometriaa muokkaamalla saavutettiin tilanne, jossa rummun muodonmuutostaso vastasi mittaustilannetta. On siis mahdollista, että rumpua kuormittava jännitystila poikkeaa jossain määrin todellisesta tilanteesta.

### 5.3.2 Puolipohjaus

Puolipohjauskohteen ANSYS-malleissa on käytetty samaa logikkaa kuin halkaistun sisäputken tapauksessa. Kuvassa 5.21 on esitetty puolipohjauskohteen ANSYS-malli ennen korjaustoimenpiteitä. Vanha rumpu on liitetty hitsatuilla teräslatoilla uuteen rummun puolikkaaseen. Tartuntapalat on mallinnettu solid-elementeillä (kuva 5.22), joilla on yksi yhteinen pinta vanhan rummun kanssa ja liitos uuteen rumpuun on viivamainen. Tartuntapaloissa ei ole mallinnettu todellista kiinnityslovea, vaan uusi rumpu kiinnittyy palan alalaitaan. Tartuntapalat oli työmaalla asennettu n. 550 mm välein, joskin välit vaihtelivat hieman rummun profiilin mukaan. Mallinnuksessa tartuntapalojen jako on 510 mm noudatellen profiilin jaksollisuutta.

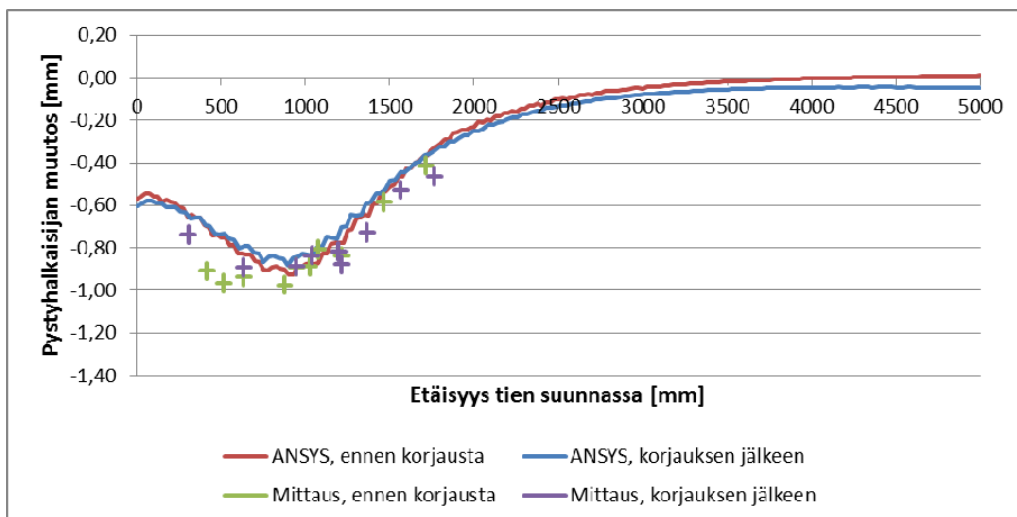


Kuva 5.21 ANSYS-mallin periaate, puolipohjaus ennen korjausta. Kuvassa on esitetty suhteellinen pystysiirtymätaso.

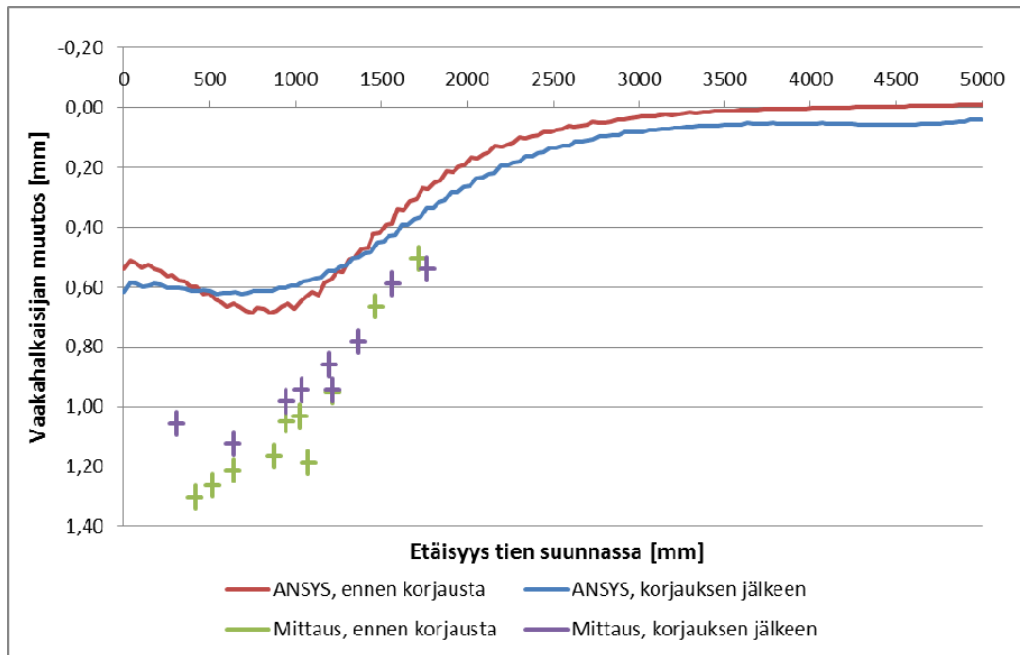


Kuva 5.22 Solid-elementeillä mallinnetulla tartuntapalalla on yksi yhteinen pinta vanhan rummun kanssa ja viivamainen kosketuspinta uuteen rumpuun.

Koska realististen laskentaparametrien avulla ei saatu ANSYS-ohjelmalla mallinnettua rakenteen käyttäytymistä realistisesti, mallinnettiin puolipohjauskohde vain muunnellun mallin avulla. Tässä tapauksessa tien pintakerros oli DCP-mittausten perusteella valmiiksi ohut (noin 100 mm), joten rakennekerrosten paksuuksia ei muutettu, vaan käytettiin ainoastaan alempia jäykkyyssmoduuleja. Lisäksi kuormitustasoa korotettiin saman verran kuin halkaistun sisäputken tapauksessa, 20 %. Kuvissa 5.23 ja 5.24 on esitetty rummun halkaisijanmuutokset pysty- ja vaakasuunnassa. Vaikka maakerrosten paksuuden ja ominaisuuksien määrittäminen oli jonkin verran epävarmempaa kuin halkaistun sisäputken kohteessa ja rummun peitesyvyys oli vaihteleva eri mittausajojen välillä, vastaa rummun laskennallinen käyttäytyminen mitattua käyttäytymistä pystyhalkaisijanmuutosten osalta varsin hyvin. Vaakahalkaisijanmuutoksissa ongelma liittyy todennäköisesti staattiseen laskentamalliin, kuten kappaleessa 5.3.1 kuvattiin.

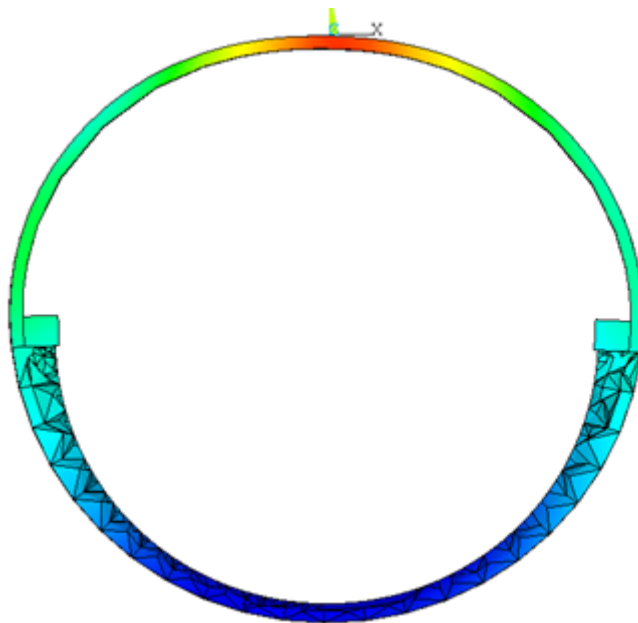


Kuva 5.23 Mitattujen ja mallinnettujen rummun pystyhalkaisijoiden muutosten vertailu, muunneltu ANSYS-malli.



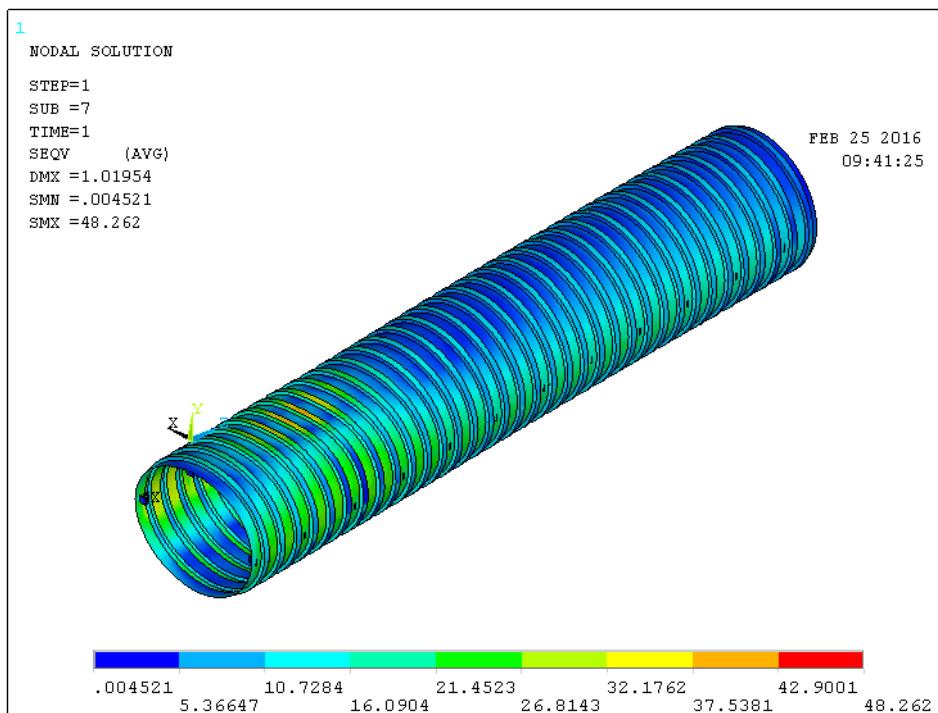
Kuva 5.24 Mitattujen ja mallinnettujen rummun vaakahalkaisijoiden muutosten vertailu, muunneltu ANSYS-malli.

Korjattu rakenne jäykistyy vain alaosastaan. Vastaavasti suurimmat rasitukset kohdistuvat, ja myös suurimmat muodonmuutokset (kuva 5.25) tapahtuvat rummun ylemmässä puolikkaassa. Näin ollen rummun halkaisijanmuutoksissa (kuvat 5.23 ja 5.24) ei ole merkittävää eroa verrattuna tilanteeseen ennen korjausta. Tosin rummun alaosa jakaa kuormituksia laajemmalle alalle, koska korjauksen jälkeen rakenteen alaosa tulee jäykempi.



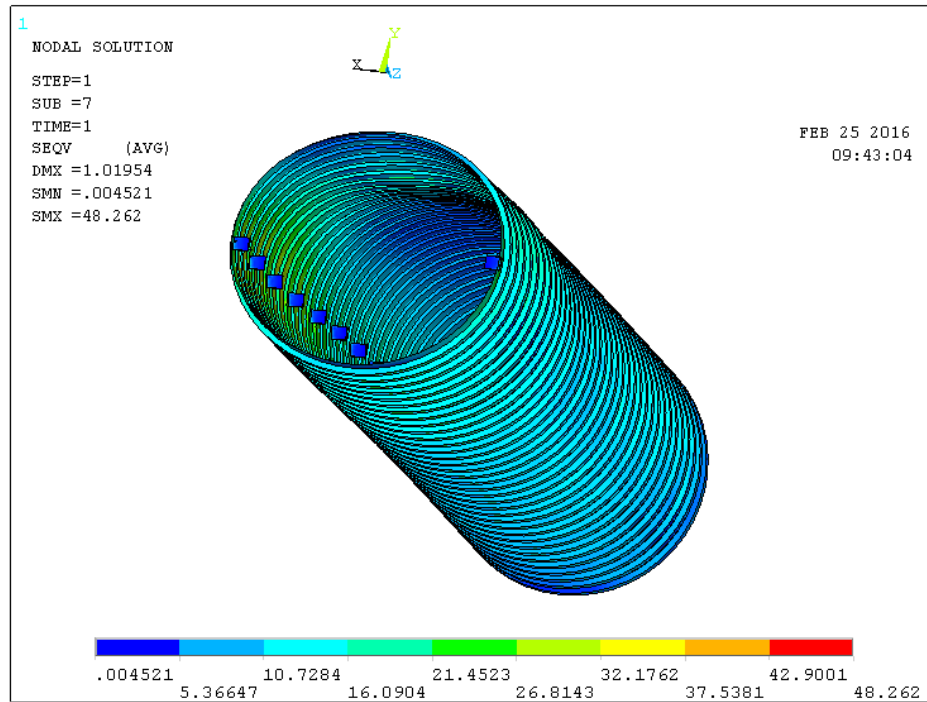
Kuva 5.25 Puolipohjauskohteen korjatun tilanteen suhteellinen kokonaissiirtymä.

Puolipohjauksen tapauksessa jännitykset eivät olennaisesti muutu korjauksen yhteydessä, koska korjaus ei vaikuta rumpun yläosan jäykkyyteen, joka näkyy myös halkaisijan muutoksissa (kuvat 5.23 ja 5.24). Alkutilanteessa rumpun ulkopintaan syntyy suurimmillaan laskennallisesti noin 30–40 MPa puristusjännitys (kuva 5.26). Jännityksen suuruus ei merkittävästi muutu korjauksen jälkeen (kuva 5.28). Laskennallisesti suurimmat jännitykset muodostuvat korjauksen jälkeen vanhaan rumpuputkeen välittömästi korjauksen yläpuolelle. Ennen korjausta jännitys on sisäpinnalla noin 25 MPa (kuva 5.27), kun taas korjauksen jälkeen jännitykset tällä alueella ovat noin 40–50 MPa (kuva 5.29). Rumpun laen jännitys ei siis käytännössä muutu korjauksen vaikutuksesta. Korjaustoimenpiteen aiheuttama jännityksen kasvaminen voi olla todellinen ilmiö, sillä paikallisesti kiinnityspalan lähistöllä rumpun jäykkyys kasvaa verrattain paljon. Jännityksen muutos on kuitenkin niin pieni suhteessa teräksen lujuuteen, ettei sillä ole vaikutusta korjaustavan käytettävyyteen.

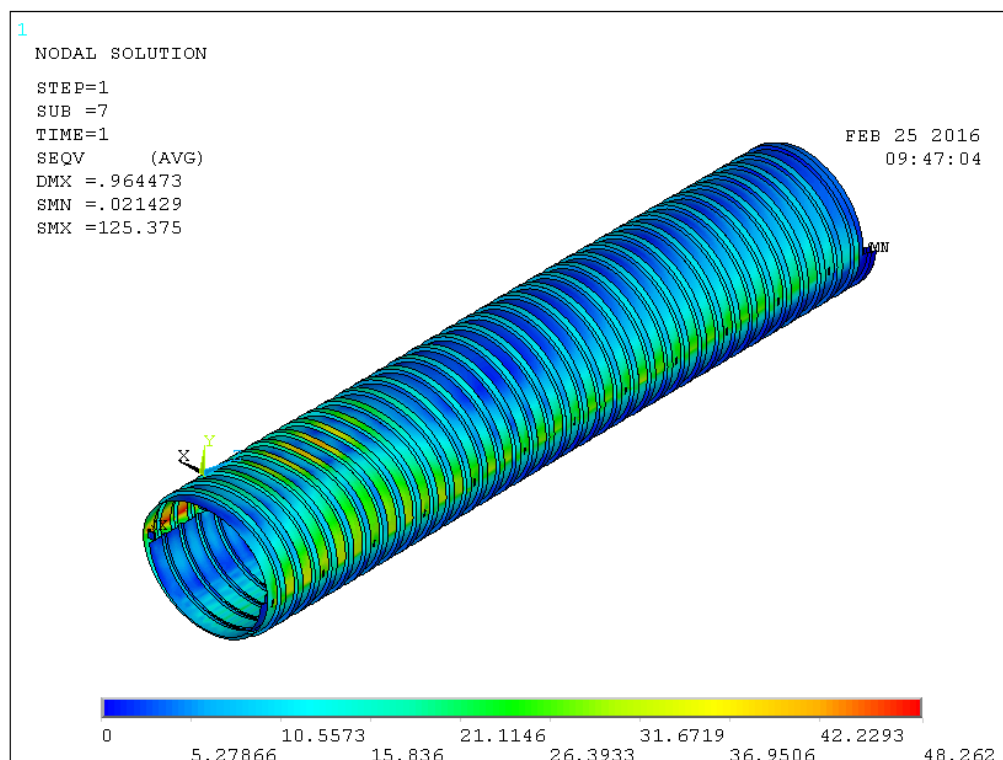


Kuva 5.26 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken ulkopinnassa, puolipohjaus ennen korjausta.

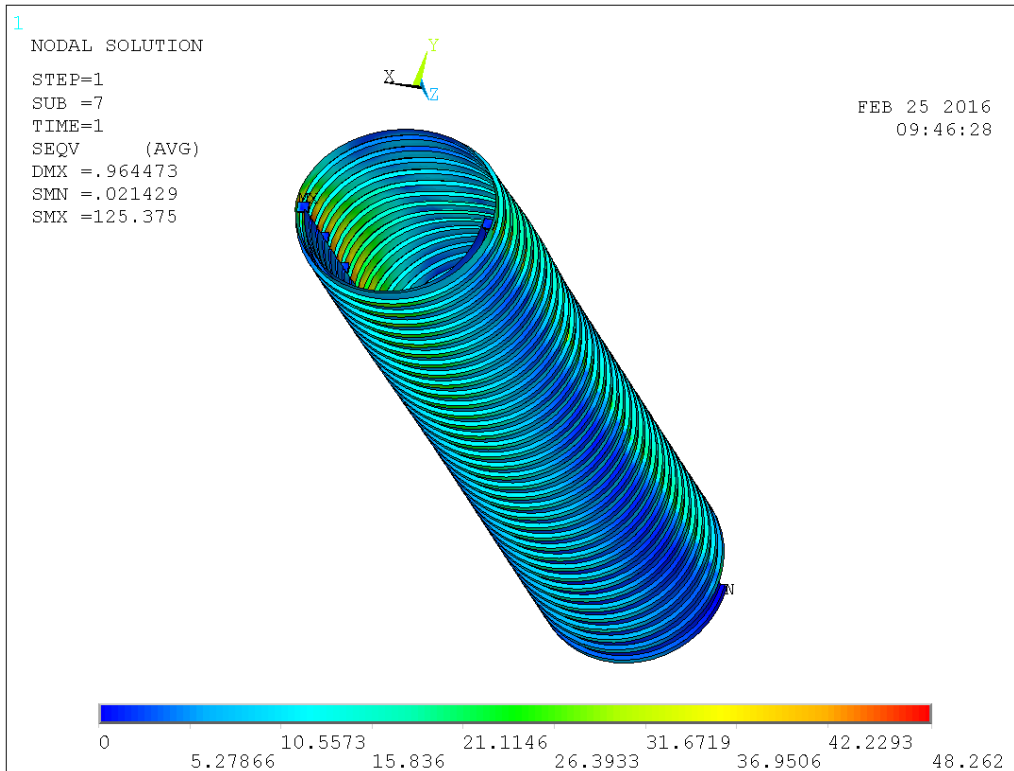




Kuva 5.27 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken sisäpinnassa, puolipohjaus ennen korjausta.



Kuva 5.28 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken ulkopinnassa, puolipohjaus korjauksen jälkeen.

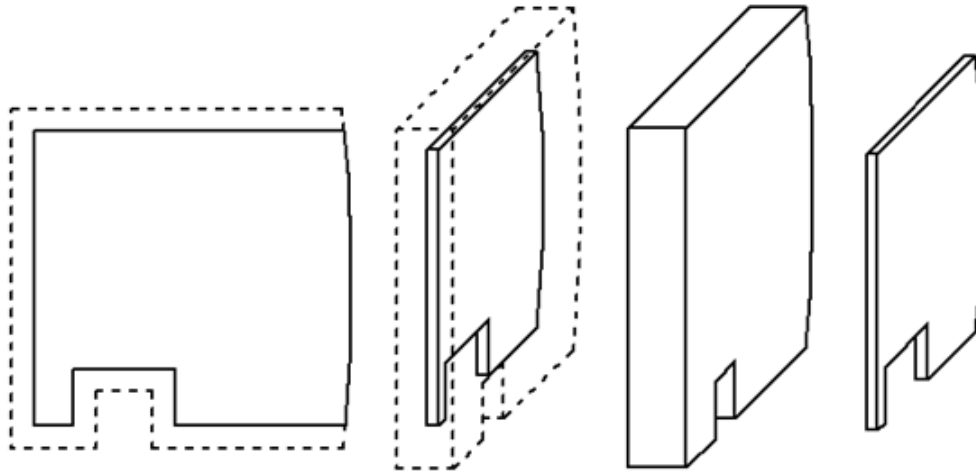


Kuva 5.29 Teräksen laskennalliset jännitykset rumpuputken sisäpinnassa, puolipohjaus korjauksen jälkeen.

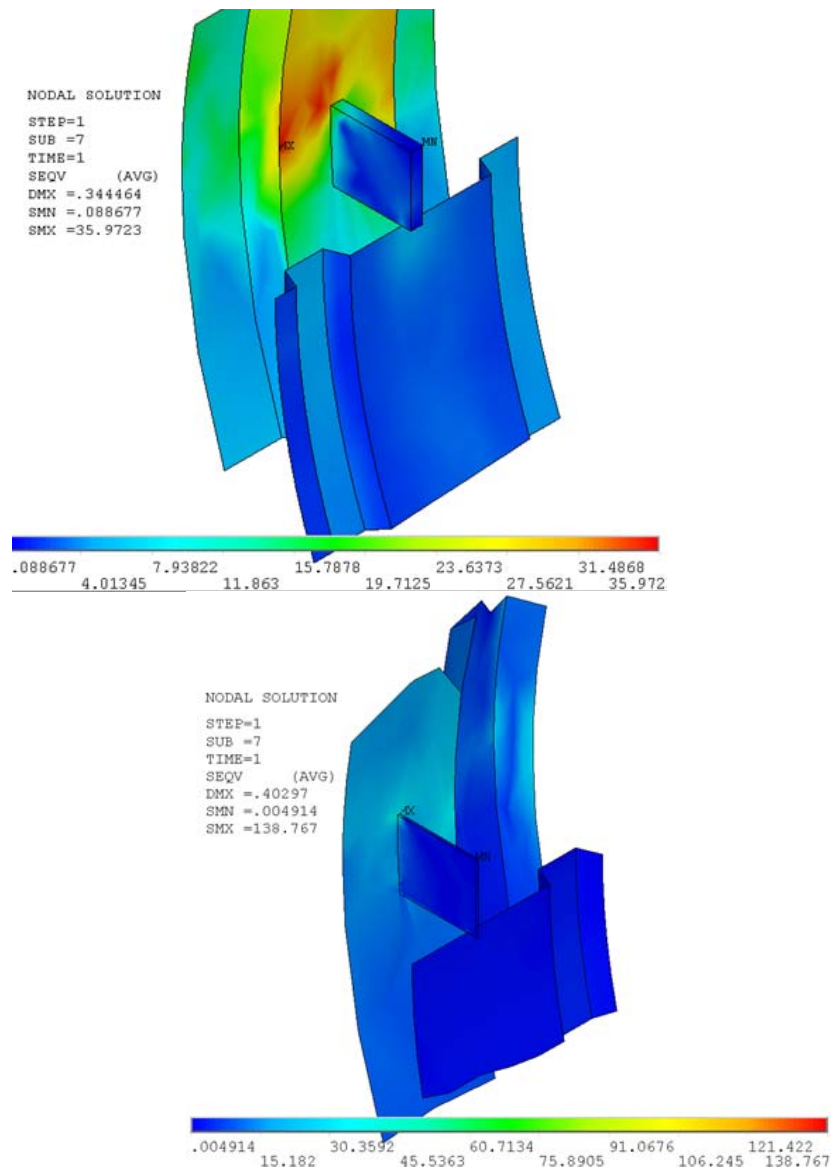
## 5.4 Herkkyystarkastelut

### 5.4.1 Tartuntapalojen pitkäaikaiskestävyys

Tutkimuksessa haluttiin selvittää puolipohjauskohteessa käytettyjen tartuntapalojen kykyä siirtää voimia myös pitkällä aikavälillä. Tartuntapalat ovat alttiita ympäristökuormituksille ja saattavat kärsiä merkittävästäkin korroosiosta pitkällä aikavälillä. ANSYS-mallissa simuloitiin tilanne, jossa syöpyä on joka suunnasta 4 mm eli palan dimensiot pienenevät merkittävästi. Kiinnityspalan alkuperäinen koko on 80 x 60 x 10 mm ja syöpyneen tilanteen koko on 72 x 52 x 2 mm (kuva 5.30). Laskentamallin syöpymät vähennetään siis joka puolelta paitsi vanhan putken puoleiselta sivulta. Alapinnan syöpyä vähennetään yläpinnasta, jotta kosketus puolikkaaseen putkeen säilyy, mutta samalla ulokkeen taivutusjäykkyys pienenee oikeassa suhteessa. Tartuntapalojen ympäristön jännitykset on esitetty kuvassa 5.31.

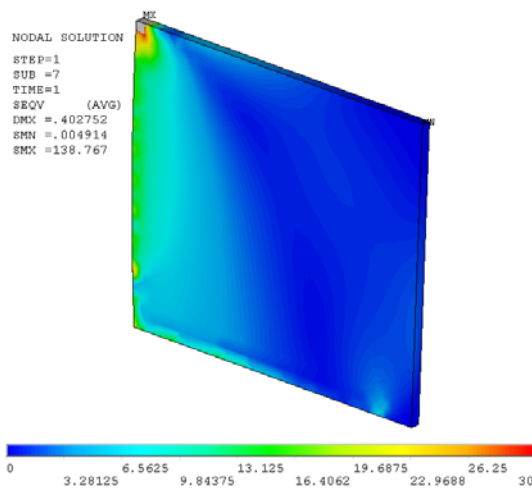


Kuva 5.30 Syöpynyt tukipala puolipohjauskohteessa.



Kuva 5.31 Kuvassa jännitykset eniten rasitetuimman kiinnityspalan ympäristöstä. Ylhäällä syöpymätön asennuspala ja alhaalla syöpynyt asennuspala. Yläkuvassa väriskaala 0.08–35.97 MPa ja alakuvassa 0.0049–138.8 MPa.

Syöpyneen palan tapauksessa suurimmat jännitykset kasvavat merkittävästi. Alkutilanteessa kiinnityspalan ympäristön suurin jännitys on n. 36 MPa ja se sijaitsee vanhan rummun seinämässä. Jännitys jakaantuu hieman epätasaisesti, mikä johtune liian harvasta elementtiverkosta. Asialla ei katsottu olevan merkittävää vaikutusta, sillä tulokset ovat riittävän lähellä teoreettista jakaumaa. Syöpyneen tilanteen suurin jännitys on yli nelinkertainen. Lähemmässä tarkastelussa kuitenkin osoittautuu, että kyseessä on tartuntapalan liitoskohdan reuna. Tämä jännityshuippu on lähinnä laskennallinen ja usein suositellaankin mallintamaan liitosten reuna-alueille kuvitteelliset pyöritykset. Heti jännityshuipun viereisessä pisteessä jännitys on laskenut alle 30 MPa:n tasolle. Syöpyneen tartuntapalan jännitykset on esitetty skaalattuna kuvassa 5.32.

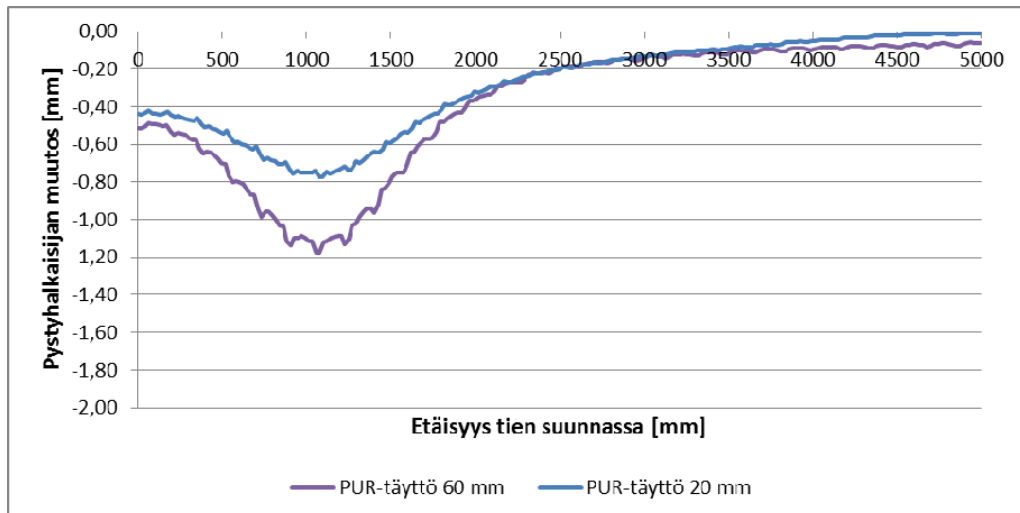


*Kuva 5.32 Syöpyneen tartuntapalan jännitykset skaalattuna välille 0–30 MPa. Kaikki väriskaalan ulkopuolella olevat jännitykset on kuvattu harmaalla (ks. kiinnityspalan ylänurkka)*

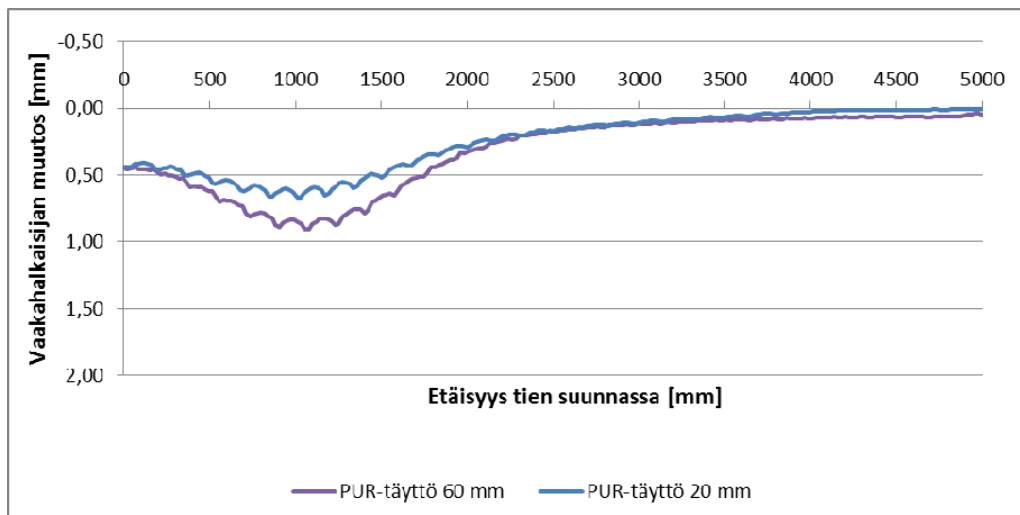
Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että kiinnityspalalle tulevat pienet voimat välittyvät uusille rakenneosille mainiosti. Mielenkiintoisin kohta kiinnityspalan syöpymää tarkasteltaessa on puolikkaan putken ja tartuntapalan lovi. Jos tartuntapala pääsee syöpymään alapinnastaan, uuden ja vanhan putken välinen liitos ei toimi enää suunnitellulla tavalla. Se, miten pala todellisuudessa syöpyy pitkän ajanjakson aikana loven ympäristössä, on epävarmaa.

#### **5.4.2 Vanhan ja uuden putken välisen raon pienentäminen polyuretaanitäytöllä**

Simulaatiossa pienennettiin vanhan rummun laelle kiinnitettävän asennuspalan paksuutta 60 millimetristä 20 millimetriin. Muutoin mallin periaate on sama kuin halkaisijan sisäputken koekohteen mallissa. Kuvassa 5.33 on esitetty rummun pystyhalkaisijan muutosten vertailu eri paksuisilla polyuretaanitäytöillä. Kuvan perusteella polyuretaanitäytön ohentaminen jäykistää putken merkittävästi, mutta ei kuitenkaan vielä muuta putken käyttäytymistä, kuten esim. betonitäytön tapauksessa. Kuvassa 5.34 on esitetty kuvaa 5.33 vastaavat vaakahalkaisijan muutokset.



Kuva 5.33 PUR-täytön paksuuden vaikutus rummun pystyhalkaisijan muutoksiin.



Kuva 5.34 PUR-täytön paksuuden vaikutus rummun vaakahalkaisijan muutoksiin.

Uretaanitäytön ohentaminen jäykistää siis rumpuputkea entisestään, mutta näyttää kuitenkin siltä, että uretaani toimii edelleen väliaineena eikä merkittäviä jännityspiikkejä synny korjausrakenteen sisään. Nyt kuitenkin mallinnettiin ainakin lähestulkoon ääritilanne, koska korjausten yhteydessä uretaanin levittämisestä vastannut urakoitsija suositteli, että uretaanitäytön paksuuden tulisi olla noin 40 mm, jotta uretaanin leviäminen koko täyttöalueelle voidaan varmistaa. Näiden seikkojen perusteella voidaan todeta, että uretaanitäyttö voidaan ohentaa optimaaliseksi siten, että täyttö levittyy koko putkeen ja korjausratkaisu on rumpuputken käyttäytymisen kannalta toimiva.

## 6 Päätelmät

Tutkimuksessa kokeiltiin kolmea erilaista teräsrummun korjausmenetelmää, jotka kaikki osoittautuivat teknisesti toimiviksi ratkaisuuksi. Kaikki korjausmenetelmät olivat työtekniisesti toteuttamiskelpoisia, eikä mittausten ja mallinnustarkastelujen perusteella ilmennyt sellaisia seikkoja, jotka johtaisivat rumpuputken kuormituskäyttämisen radikaaliin muutokseen korjaamisen jälkeen.

Mittaukset ja koejärjestelyt onnistuivat teknisesti suunnitellulla tavalla. Halkaistun sisäputken kohteella sekä koekuormitukset että rakennemittaukset onnistuivat moitteettomasti. Puolipohjauskohteella molemmissa oli puolestaan haasteita. Puhki ruostunut rummun pohja aiheutti ennen korjauksia tehtyihin mittauksiin epävarmuutta. Lisäksi koekohde sijaitsi kaarteessa ja risteysalueella, mikä aiheutti vaihtelua kuormitusajoneuvon ajolinjaan. Kaarreaajossa ajolinjan muutos vaikutti rummun peitesyvyyteen, koska kaarre oli kallistettu. Tällaisissa olosuhteissa ajonopeus vaihtelee jonkin verran, joten myös dynaamisissa kuormituslisissä saattaa olla eroja eri mittausten välillä. Myöskään rakennemittaukset eivät onnistuneet kaikilta osin yhtä hyvin kuin halkaistun sisäputken kohteella, koska rakenne oli kivinen. Tällöin DCP-mittalaitteella ei pystytty läpäisemään tierakennetta halutuista kohdista. Tekemällä mittaukset suuremmasta määrästä pisteitä ja mittaamalla pohjamaan ominaisuuksia tien vierestä saatiin kuitenkin suhteellisen tarkka käsitys koekohteella vallinneista pohjaolosuhteista ja rakennekerrospaksuuksista eli olosuhteet vain kasvattavat jonkin verran tarvittavaa työmäärää.

Rummun käyttäytymistä ja toteutuvia rasiustasoja ei saatu kuvattua molemmilla käytetyillä laskentaohjelmistoilla samantyyppisesti. ANSYS-malleissa käytössä ollut materiaalmalli mahdollistaa vetojännitykset sitomattomille tien rakennekerroksille, jota ne eivät todellisuudessa kestä. Tällöin mallinnettu liikennekuormitus ei vaikuta rakenteen syvyysuunnassa oikealla intensiteetillä ja malli on laskennallisesti liian jäykkä. Tämä johtaa ongelman ratkaisemisen kannalta tilanteeseen, jossa ratkaisu ei ole analyttinen. Tulevia korjausratkaisuja ei siis tämän tutkimuksen tulosten perusteella pystytä verifioimaan pelkästään laskennallisesti.

Kaikkiaan mitatut ja mallinnetut rumpujen rasitukset olivat pieniä, joten korjaustoimenpiteet ovat turvallisia ja toteuttamiskelpoisia. Täytyy kuitenkin muistaa, että korjausmenetelmien rasitusten tarkastelu perustui malliin, jonka ratkaisu oli iteratiivinen.

Korjausmenetelmät eivät myöskään näytä merkittävästi vaikuttavan rumpuputken käyttäytymiseen lukuun ottamatta tilannetta, kun halkaistun sisäputken tapauksessa käytetään putkien välissä täyteaineena betonia. Tällöin putki jäykistyy merkittävästi ja alkaa käyttäytyä betonirummun tavoin.

Puolipohjausmenetelmässä käytettävän tartuntapalan korroosio ei näyttänyt tehdyn simulaation perusteella muodostuvan ongelmaksi, vaan toteutuva jännitystaso on niin pieni, että 80 % ohuempi asennuspala kesti laskennallisesti korjatussa rakenteessa moitteettomasti. Tässäkin tapauksessa mallinnettu jännitys jakauma ei kuitenkaan täysin vastaa todellista kuormitustilannetta.

Pohjan betonointi oli menetelmänä haastavin, ja sen toteuttamiskelpoisuuden arviointia täytyy tarkastella vielä kriittisesti. Erityisesti työmaalla tehtävät putken alaosan leikkaustoimenpiteet sekä kohteeseen toimitettavan betonimassan laatu vaikuttavat menetelmän laajempaan käytettävyyteen.

Tämän tutkimuksen yhteydessä tarkasteltiin myös tierumpujen mitoittamista etenkin standardin CEN/TR 1295-3 menetelmä B osalta. Menetelmä ei tämän tutkimuksen yhteydessä tehtyjen tarkastelujen perusteella näytä suoraan soveltuvan rumpuputkien mitoittamiseen. Menetelmän Scope-osuudessa rajataan soveltuvuus sileisiin putkiin. Lisäksi materiaaliparametrien määrittäminen tapahtuu siten, että erilaisissa olosuhteissa parametrisoinnin vaikutus alkaa tilanteesta, jossa putken peitesyvyys on yli kaksi kertaa putken halkaisijan suuruinen. Näin ollen esimerkiksi halkaisijaltaan 1000 mm rumpu voitaisiin mitoittaa, jos rummun asennussyvyys on yli kaksi metriä. Tässäkin tapauksessa rumpuputken jäykkyys tulisi kuitenkin skaalata vastaamaan sileäpintaista putkea, jolloin mitoittamisen epävarmuus kasvaa.

## 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.

Haakana, V., Kalliainen, A. & Kolisoja, P. 2015. Raskaista ajoneuvoista tierumpuihin kohdistuvat rasitukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2015. Liikennevirasto, Helsinki 2015.

Korhonen, M. 2015. Tierumpujen tuhoamattoman korjaustavan laskennallinen tarkastelu ANSYS-ohjelmistolla. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 72 s. + 12 liites.

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.

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



# Rumpujen korjausmenetelmien työmenetelmä- kuvaukset

## Halkaistu sisäputki

### Mustion leikatun sujutusputken tapahtumat ja havainnot viikolla 35



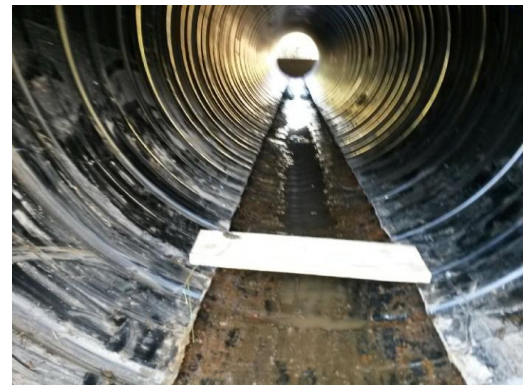
Ojan padotettiin jonka jälkeen Lokapalvelu Eerola pesi rummusta vähäiset maa-ainekset.



Ennen sujutusta putkessa oli nähtävissä ruostetta mutta ei vielä läpiruostuneita kohtia.



ViaCon TR 1,2 800mm avattiin tunkilla kokoon d= 900mm.



Kuvassa putki on avattuna. Putki ankkuroitiin tähän asentoon (6,3x38) poraruuveilla.



Pohjalle valettiin keskeltä 5-6cm vahvuinen laatta. (Rudus C30/37 P20 #8 S3) massalla



Seuraavassa vaiheessa Uretaanipojat Oy porasi täyttöreikiä putken sisäpuolelle.



Uretaanitäyttö käynnissä. Täyttö tehtiin noin 5,4m osuudelle.



Uretaanitäyttö jätettiin päädyistä vajaaksi myöhempää betonointia varten.



Välitilan betonointi toteutettiin avaamalla vanhan rummun selkä luiskan kohdalta.



Betoni oli (C30/37 P20 #8 S4) jota notkistettiin työmaalla.



Kun välitila oli betonoitu, jätettiin valaukon päälle ns. "paineastia".



Työ valmiina kun muotit on purettu. Kuvassa alajuoksun ja uretaanin puoleinen pääty.

**Yhteenveto:**

- 1) Sää oli Mustiossa viikolla 35 aurinkoinen ja virtaavaa vesi oli hallittavissa patoamalla.
- 2) Tämä d1000mm rumpu korjattiin leikatulla rumpuputkella d800mm joka avattiin putkessa kokoon 900mm. Tämä on maksimikoko silloin kun välitila betonoidaan koska putken yläpuolelle tulee jäädä vähintään 10cm valuputken ripustuksia varten.
- 3) Putken sisältä tehtävä uretaanitäyttö olisi sallinut sujuttaa myös leikatun d900mm rumpun joka avataan esim. kokoon d950mm. Uretaaniasentajan mukaan pienikin välitäyttö on mahdollista tehdä kun tihennetään poraus-/asennusreikiä ja valitaan tarpeeksi hidas massa.

*”Ohuessa eristeessä täytyy huomioida ettei rumpujen pontit ota toisiinsa kiinni koska siinä tapauksessa uretaani nouseekin ylöspäin vaakaliikkeen sijaan ja tulee väärä mielikuva rumpun täyttöasteesta. Eli välitilan tulisi olla mieluummin 4cm kun 2cm.” –Petri Alanko, Uretaanipojat Oy*

Marko Huhtakallio 2.9.2015

# Puolipohjaus

## Inkoon Rankilantien puolipohjauksen tapahtumat ja havainnot viikolla 34



Oja padotettiin ma 17.8. Rumpuun oli kertynyt jonkin verran kiviainesta.



Lokapalvelu Eerola pesee putken tähän tarkoitukseen sopivalla suuttimella.



Suutinta liikutellaan putkessa edestakaisin kunnes putki on tyhjä. Kuva alajuoksun suuntaan.



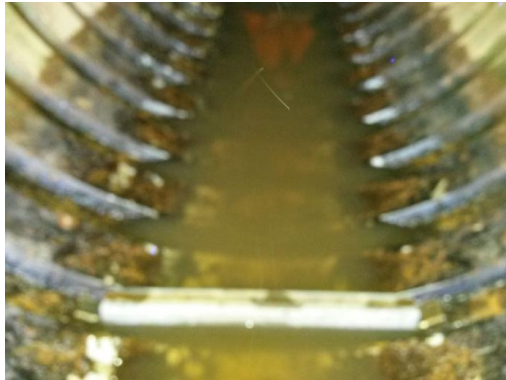
Kuva alajuoksulta kun rumpu on pesty. Putken alaosa on ruostunut ja peltiä puuttuu.



Kuva yläjuoksun suuntaan. Täällä korrosio on nakertanut putkea siististi molemmilta puolin.



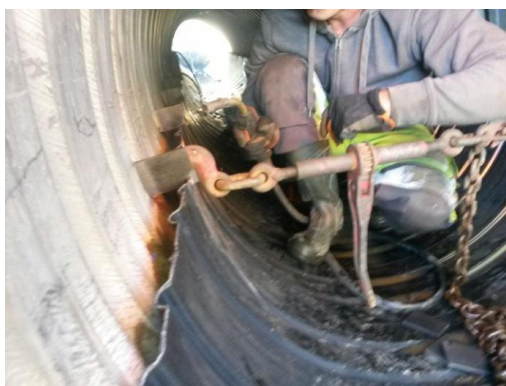
Läpiruostuneet kohdat ovat veden vaihtelualan puolella välissä.



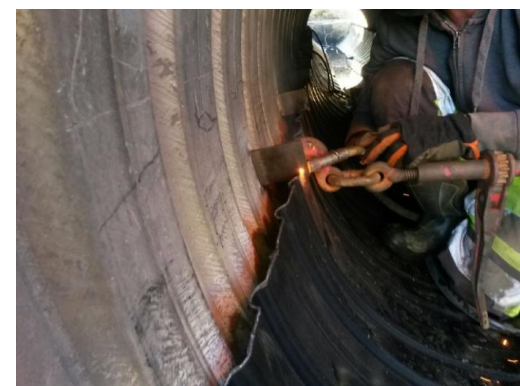
Korjausosan asennustasoa oikaistiin notkon kohdalta 40x40mm teräsputkella.



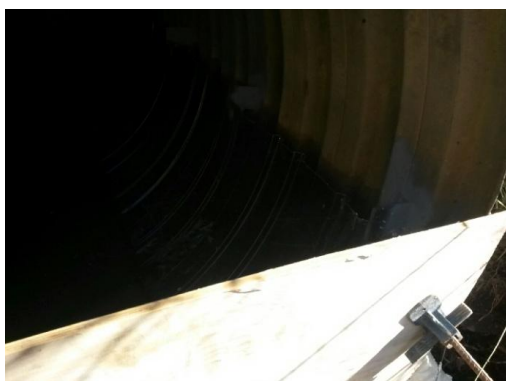
(ViaCon TR-1000 PE300/300 1,5mm) sujutettiin kirstysliinoja apuna käyttäen



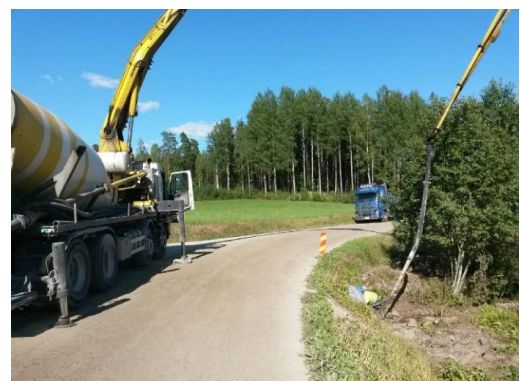
Kiinnikkeen(8x60x80) asennusta. Sopivaksi jaoksi määriteltiin työmaalla noin 55cm.



Kiinnikkeen hahloon tehtiin pistehitsi minkä avulla putki pysyi paikallaan asennuksen ajan.



Rummun päätyihin laitettiin valun ajaksi tulppalevy



Betonin (C30/37 #8 P20 S4) toimitti Rudus. Pumppaus tehtiin kahden tuuman letkulla.



S4 vaikutti aluksi liian jäykältä ahtaaseen väliin, joten työmaalla massaan lisättiin notkistinta.



Notkistuksen jälkeen massa valui helposti välitilaan.



Valuroiskeet huuhdeltiin harjalla ja pinta tasattiin.



Päätyjen kolot ja epätasaisuudet tasoitettiin (Arsalin Oy:n Jeti-S) pikabetonilla.

## Yhteenveto

- 1) Sää oli asennusviikolla aurinkoinen +22 ja virtaavaa vettä niukasti
- 2) Tämän kokoisessa putkessa mahtuu työskentelemään joten sen puolesta korjaustapa on ok
- 3) Kiinnikkeen muotoa on vielä jalostettava jos halutaan välttyä hahloon tehdyiltä hitsaukselta

Marko Huhtakallio  
23.8.2015

# Pohjan betonointi

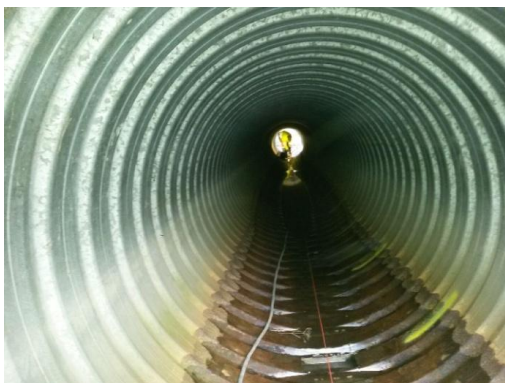
## Raaseporin betonipohjauksen tapahtumat ja havainnot viikolla 43



Pyörivällä suuttimella pestiin irtoaines pois rummun seinämistä.



Putki d1200 pestynä ja pohja oli leikkausalueelta kuvan mukainen, ei läpivuotumista.



Ruostumisalue oli alhaalla "klo 5 – 7" välisellä alueella, putkessa oli hieman muodonmuutoksia.



Korkeudella vesijuoksu + 5...+ 15cm oli huonompia ja läpivuotuneita kohtia.



Leikkaukset tehtiin katkaisulaikalla. Paalusaha olisi soveltunut tähän paremmin.



Alajuoksulta etäisyydelle 0-11m leikattiin 15cm leveä ja 8-10cm syvyinen ankkurointiroilo.



Yläjuoksulta etäisyydelle 0-11 m tehtiin ankkurointikoloja 360 x 200mm k 900



Valun yläreuna merkattiin linjalangalla niin että se peittää kaikki ruostekohdat.



Yläjuoksulta etäisyydelle 0-5,5m ja 11-16,5m asennettiin tartunnaksi poraruuvit.



Pitkän roilon liikettä seurattiin leikkauksen aikana ja supistumista oli korkeintaan 10mm.



Pohjalle pumpattiin betoni joka muotoiltiin käsin niin että vesijuoksu säilyy reunoja alempana.

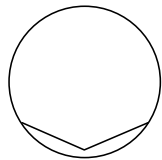


Betoni oli C30/37 P25 #16 S2 + teräskuitu 1/50 ja menekki n. 2,5m<sup>3</sup>. Työ valmis yläjuoksulla.

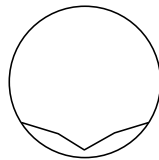


**Yhteenveto:**

- 1) Sää oli ollut sateetonta useita viikkoja ennen työtä ja virtaavaa vesi oli hallittavissa patoamalla.
- 2) Rumpu korjattiin tekemällä ruosteiselle alueelle v-muotoinen teräskuituja sisältävä betonilaatta joka muodostaa yhdessä pellin kanssa liittorakenteen. Vesijuoksu on nyt putken tulopäässä 8cm entistä ylempänä ja lähtöpäässä 12cm. Betonin reuna on nostettu tulopäässä korkeudelle +25 ja lähtöpäässä +27cm.
- 3) Arinassa oli soramurske lukuun ottamatta aivan päätyjä parin metrin matkalla joissa oli heti putken alla savi. Murske mukaan lukien koko arina oli vettä läpäisemätön. Rummun pohjalle leikatun roilon etuna oli veden valuminen pois itsestään kun ankkurointikoloista vesi oli äyskäröitävä ämpäriin.
- 4) Valmisbetonin resepti vaatii hienosäätöä tällaiselle kohteelle ja haasteena tässä olikin odotettua löysempi S2-massa mikä vaikeutti pohjan muotoilua seuraavasti:



suunnitelma



toteutunut





ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6664  
ISBN 978-952-317-268-5  
[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)

Liik  
enne  
vira  
sto

