



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MATTI KORHONEN
TIERUMPUJEN TUHOAMATTOMAN KORJAUSTAVAN LASKEN-
NALLINEN TARKASTELU ANSYS-OHJELMISTOLLA

Diplomityö

Tarkastajat:
Associate Professor (Tenure track)
Jari Mäkinen
Diplomi-insinööri Antti Kalliainen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa 4. mar-
raskuuta 2015

TIIVISTELMÄ

Tampereen teknillinen yliopisto

Rakennustekniikan koulutusohjelma

KORHONEN, MATTI: Tierumpujen tuhoamattoman korjaustavan laskennallinen tarkastelu Ansys-ohjelmistolla

Diplomityö, 72 sivua, 12 liitesivua

Joulukuu 2015

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: Associate Professor (Tenure track) Jari Mäkinen

Diplomi-insinööri Antti Kalliainen

Avainsanat: tierummun korjaus, puolipohjaus, halkaistu sisäputki, Ansys, elementtimenetelmä

Maanteiden alla kulkee lukuisia tierumpuja ja osassa niissä on tultu käyttöiän päähän. Edessä on väistämättä rummun korjaaminen. Rumpuja on niin paljon, että on syytä tutkia erilaisia korjaustoimenpiteitä. Tavallisesti vaurioitunut tierumpu saatetaan korjata katkaisemalta tieosuudelta liikenne ja yksinkertaisesti vaihdetaan koko putki kaivamalla tie auki. Aina tämä ei tietenkään ole kovinkaan kevyt toimenpide, sillä tierumpujen peitesyvyys voi olla useita metrejä. Tällaisen kohteen korjaaminen aukikaivamalla katkaisee liikenteen useaksi päiväksi ja on kohtalaisen työlästä ja kallista.

Tierumpujen vaihtoehtoisia korjaustapoja kehiteltiin ideatasolla ja tässä työssä tutkitaan kahta parhaaksi katsottua tapaa. Nämä korjaustavat saivat nimet halkaistu sisäputki ja puolipohjaus. Olennaisin asia näissä korjaustavoissa on niiden vähäinen vaikutus tienkäyttöön korjauksen aikana. Korjaus ei kestä montaa päivää ja tie on käyttökunnossa koko toimenpiteen ajan. Molemmissa korjaustavoissa vanhaan olemassa olevaan tierumpuun tehdään uutta, vahvistavaa rakennetta putken sisäpintaan. Usein mitään kaivutyötä ei tarvitse tehdä.

Korjaustoimenpiteet tehtiin kahdelle lähes käyttöikänsä päähän tulleelle rumpukohteelle. Korjattavia kohteita etsittiin hyvän aikaan, sillä kohteiden piti olla tutkimukseen sopivat. Erityisesti pienelle peitesyvyydelle asetettu vaatimus karsi mahdollisten kohteiden lukumäärää huomattavasti. Pieni peitesyvyys on olennainen asia, jotta putkeen saadaan aikaan mitattavia muodonmuutoksia, joilla päästään kiinni putkeen syntyviin todellisiin rasituksiin. Korjaustapa sen sijaan sopii erityisen hyvin kohteille, joissa peitesyvyys on suuri ja siten vältytään suurelta kaivutyöltä.

Todellisten korjaustoimenpiteiden ja mittausten lisäksi tehtiin laskennallinen tarkastelu Ansys- ja Plaxis-laskentaohjelmistolla. Aikaisempien tutkimusten perusteella Plaxis-ohjelmistolla saadaan hyvin todenmukaisesti mallinnettua maan ja rakenteen yhteiskäyttäytymistä. Tässä tutkimuksessa otettiin käyttöön myös Ansys, jolla saadaan mallinnettua alkutilanteen lisäksi korjatun putken ja maan yhteisvaikutus.

Esitetyt korjaustoimenpiteet ovat käyttökelpoisia ja niitä suositellaan käytettäväksi korjauskohteissa, joissa rummun aukon pienentynyt koko ei aiheuta merkittävää muutosta tulva-aikanakaan. Korjaustoimenpiteet eivät vaikuta heikentävästi rummun mekaanisiin ominaisuuksiin ja uuden pidentyneen käyttöikänsä aikana korjattu rakenne kestää sille tulevat rasitukset.

ABSTRACT

Tampere University of Technology

Master's Degree Programme in Civil Engineering

KORHONEN, MATTI: Computational analysis of non-destructive repair technique for corrugated steel pipes

Master of Science Thesis, 72 pages, 12 Appendix pages

June 2015

Major: Structural Design

Examiners: Associate Professor (Tenure track) Jari Mäkinen
M.Sc. Antti Kalliainen

Keywords: culvert repair, corrugated steel pipes, Ansys, finite element method

There are undetermined amount of culverts beneath the roadways and some of them have reached the end of their useful life. We face the inevitable need for repairs. Since the numbers of culverts are so great, there is a reason to study different repairing methods. The general method nowadays is simply to cut off the road and change the whole structure by excavating it. This can be very laborious, because the drums can be several meters underneath the surface of the road.

Alternative ways to repair the culverts were brainstormed and the two most suitable ones are studied more closely. The significance of these methods comes from their low impact on the usability of the road. The duration of the repairs is limited to a few days and the roadway will be usable the whole time. Both techniques include making of a new, reinforcing structure inside the existing drum. Excavations are rarely needed.

The selected methods were carried out in two separate sites, where the culverts had reached the end of their life. The search for suitable sites took some time, since the requirements to make successful measurements were limiting. Especially the need for a thin surface layer thickness above the drum made the search challenging. A thin surface layer is essential for the measurements, because it results in measurable deformations which are interdependent to the real stresses in the structure. The actual repair technique is instead most suitable to such cases where the surface layer is thick and therefore extensive excavations are avoided.

In addition to the repairs and measurements also computational analysis were done using Ansys and Plaxis software. Based on earlier studies the real interaction between soil and structure can be modeled accurately using Plaxis. In this study Ansys was introduced, because with it also the repaired structure can be modeled in interaction with the soil.

The presented repair techniques are usable and they are recommended to be used in cases, where the decreasing size of the culvert opening will not cause significant impact even during the flooding season. These techniques do not impair the mechanical properties of the culverts and they will withstand all the stresses during their prolonged lifespan.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Jari Mäkistä akateemisen urani ensiaskeleilla. Yhteistyön ansiosta sain tähän tutkimukseen aiheen lisäksi ohjausta sekä paljon luettavaa. Yliopiston sisäisestä yhteistyöstä maa- ja pohjarakentamisen osalta haluan kiittää Antti Kalliaista ja Pauli Kolisojaa. Teiltä olen saanut merkittäväsi pohjatietoa.

Ilman liikenneviraston rahoitusta tätä tutkimusta ei varmastikaan olisi tapahtunut. Suuri kiitos opiskelijan elintason ylläpidosta kuuluu siis opintotukien lisäksi myös liikenneviraston kautta valtiolle. Liikenneviraston ahkera työryhmä loi työlle edellytykset myös käytännön tasolla. Työryhmän ansiosta saimme tutkimukselle erittäin hyvät olosuhteet koekohteiden mittausten järjestämiselle.

Tapaan kuuluvasti kiitän myös työn ulkopuolisia tukijoita, tässä tapauksessa omaa puolisoani. Ilman rohkaisevaa ja eteenpäin pyrkivää asennetta tämän työn loppuun saattaminen olisi ollut paljon ankeampaa.

Tampereella, 25.11.2015

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized, cursive script that appears to be 'Matti Korhonen'.

Matti Korhonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	ONGELMAN LÄHTÖKOHTA	2
2.1	Tierumpujen osalta.....	2
2.2	Aiemmat tutkimukset TTY:llä	3
2.3	Muita merkittäviä tutkimuksia	4
2.3.1	Yksinkertainen rajapintaelementti kontaktikitalle	4
2.3.2	Suunnittelukuormat syvälle asennetuissa rummuissa.....	5
2.3.3	Joustavien rumpujen kuormituskäyttäytyminen kenttäkokeissa.....	6
2.3.4	Täyden mittakaavan kenttäkokeiden vertailu laskennallisiin menetelmiin.....	7
2.3.5	Kaarevan siltarummun kenttäkuormituskoe	8
3.	TEORIAA	9
3.1	Sitomattomien tierakennemateriaalien kuormituskäyttäytyminen.....	9
3.1.1	Sitomattomien tierakennemateriaalien kuormituskäyttäytymiseen vaikuttavat ominaisuudet	12
3.2	Maamateriaalin mallintaminen.....	14
3.3	Drucker-Prager -myötöpinnan parametrit	15
3.4	Laajennettu Drucker-Prager-materiaalimalli.....	19
3.5	Laajennettu Drucker-Prager-materiaalimalli rajoitusehdolla.....	20
4.	TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT LASKENTAOHJELMISTOT.....	22
4.1	Elementit	22
4.1.1	Solid186	22
4.1.2	Solid65	23
4.1.3	Shell181	24
4.2	Materiaalit	25
4.3	Yksikköjärjestelmä.....	26
4.4	Vertailulaskelmat	26
4.4.1	Kuutiotesti.....	26
4.4.2	Kuutiotestin tulokset	28
5.	RUMMUN KORJAUSMENETELMÄT JA KOEKOHTEET.....	32
5.1	Halkaistu sisäputki	32
5.2	Puolipohjaus	33
5.3	Kuormituskokeet	34
5.3.1	Mitattavat suureet ja mittauslaitteet	34
5.3.2	Halkaisijan muutos.....	35
5.3.3	Venymät	36
5.3.4	Ajoneuvon ajolinjan mittaaminen.....	36
6.	TUTKIMUSKOHTEIDEN MALLINTAMINEN.....	38
6.1	Halkaistu sisäputki mallinnettuna	38

6.2	Puolipohjaus mallinnettuna	43
6.3	Maan alkujännitykset	47
6.4	Puoliääretön reuna	47
6.5	Symmetriaehto	48
6.6	Verkkoriippumattomuus	49
6.7	Kontaktin mallintaminen	49
6.8	Kuormituskohta	50
6.9	Rakenteellinen ortotropia putkessa	50
7.	LASKENTA- JA MITTAUSTULOKSET	52
7.1	Halkaisusujutuksen tulokset	52
7.1.1	Halkaisijamuutokset ennen ja jälkeen	52
7.1.2	Jännitykset ja venymät	53
7.2	Puolipohjauksen tulokset	58
7.2.1	Halkaisijamuutokset ennen ja jälkeen	58
7.2.2	Jännitykset ja venymät	60
7.2.3	Tartuntapalojen pitkäaikaiskestävyys	63
7.2.4	Suurin vaakahalkaisijan muutos	65
8.	PÄÄTELMÄT	68
	LÄHTEET	70

LIITE A: VAAKA- JA PYSTYHALKAISIJOIDEN MUUTOKSET

LIITE B: ANSYS KOMENTOJONO

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials, Amerikassa toimiva tiestö- ja kuljetusviranomainen.
ASCE	American Society of Civil Engineering –yhdistys. Vapaasti käännettynä Amerikan rakennusinsinöörien seura.
Ansys	Elementtimenetelmään perustuva laskentaohjelmisto. Laskennassa käytettiin ohjelman versiota 16.1.
APDL	Ohjelmointikieli, jolla Ansys-ohjelmistoon syötetään komennot.
Deviatorinen	Jännitystensorin leikkausjännitystä kuvaava osa.
Dilataatio	Maan rakeisuudesta aiheutuva, normaalijännityksiä vastaan koh-tisuora tilavuuden suureneminen.
DP-malli	Drucker-Prager-materiaalimalli, materiaalin hydrostaattisesta paineesta riippuva myötöehto.
E	Kimmomoduuli.
E'	Tehollinen kimmomoduuli.
EDP-malli	Extended Drucker-Prager-materiaalimalli.
EFS	Elastic foundation stiffness. Jousivakiota kuvaava muuttuja.
FEM	Finite element method, elementtimenetelmä.
HDPE	Tiivis polyeteeni (high-density polyethylene).
HS-malli	Hardening Soil-materiaalimalli, Plaxis-ohjelmistossa käytetty kehittynyt maamateriaalimalli.
Hydrostaattinen	Jännitystensorin isotrooppista puristusjännitystä kuvaava osa.
Jännitystensori	Kontinuumikappaleen pisteessä vaikuttavan suunnasta riippuvainen jännitykset kuvaava 3x3-matriisi.
MC-malli	Mohr-Coulomb-materiaalimalli, materiaalin hydrostaattisesta paineesta riippuva myötöehto.
p	Hydrostaattinen jännitys.
Plaxis	Elementtimenetelmään perustuva, pohjarakentamiseen erikoistunut laskentaohjelmisto.
PUR	Polyuretaani.
PVC	Polyvinyylikloridi. Rakennusteollisuudessa yleisesti käytetty muovi.
Shell181	Kuori-elementti, jolla rumpuputket ovat mallinnettu.
Solidi	Kiinteään tilavuuteen viittaava termi, esim. solidi- eli tilavuuselementti.
Solid65	Betonin mallintamiseen käytetty solidi-elementti.
Solid186	Solidi-elementti, jolla mm. maamateriaalit ovat mallinnettu.
Surf154	Pintaelementti, jolla voidaan määrittää puoliääretön reunaehto.
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto.
ν	Poissonin luku.
ν'	Tehollinen Poissonin luku.
q	Deviatorinen jännitys.

1. JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan teräksestä valmistettujen tierumpujen erilaisten korjausvaihtoehtojen vaikutusta putken mekaanisten ominaisuuksien muutokseen. Työ on jatkoa tutkimukselle ”Raskaista ajoneuvoista tierumpuihin kohdistuvat rasitukset” [14], jossa on selvitetty uuden ajoneuvoasetuksen mukaisen raskaan ajoneuvon teli- ja akselimassojen vaikutusta olemassa oleviin tierumpuihin.

Työ jakaantuu kahteen osaan: teoriaosuuteen ja laskennalliseen osioon. Laskennallisen osion tueksi on tehty mittauksia todellisilla koekohteilla. Teoriaosiossa käsitellään laskennan ja maan ominaisuuksia, sekä niiden liittämistä toisiinsa. Lisäksi osiossa käydään läpi Ansys-laskentaohjelmistoon (Ansys) liittyviä asioita, esimerkiksi materiaalmallit ja ohjelman toimintaperiaatteen esittely. Laskennallisessa osiossa esitellään tutkimuksessa käytettävät rakenne- ja materiaalmallit, sekä korjaustoimenpiteiden vaikutus rumpuputken mekaaniseen käyttäytymiseen. Lopuksi tulosten paikkansapitävyys varmistetaan koekohteessa suoritettavilla mittauksilla ja tekemällä laskennallinen vertailu Ansys- ja Plaxis-ohjelmistojen (Plaxis) välillä. Aikaisempien tutkimusten perusteella Plaxis kuvaa hyvin maan ja rakenteen yhteisvaikutusta ja -käyttäytymistä.

Ansyksellä saadaan mallinnettua rumpuputki sen todellisten dimensioiden mukaan, sekä siihen tehtävät korjaustoimenpiteet. Näin saadaan selvitettyä korjatun rakenteen ja maan yhteisvaikutus. Korjatun rakenteen vaikutusta kokonaisuuteen on syytä tutkia, sillä putken jäykkyydestä riippuen, putkeen kohdistuvat ja sen välittämät rasitukset muuttuvat itseisarvoltaan ja jakaantuvat eri tavalla ympäröivään maahan [25].

Laskennan tuloksia verrataan aikaisempiin mittaus- ja laskentatuloksiin, jotta uuden laskentaohjelmiston tulosten paikkansapitävyydestä voidaan varmistua. Uuden laskentaohjelmiston käyttäminen on kuitenkin perusteltua, koska sen avulla pystytään tarkastelemaan yksityiskohtaisesti erityyppisten korjausratkaisujen mobilisoimia rasituksia sekä korjattavan rakenteen että korjausratkaisun kannalta. Ansyksen käytettävyyttä tällaisessa tutkimustilanteessa voitaneen kuvata viitteellisellä ilmaisulla: maan ominaisuuksien mallintaminen on heikommalla tasolla kuin Plaxiksessa, mutta erilaisten putkien ja niihin tehtävien korjausvaihtoehtojen variaatiot ovat huomattavasti moninaisemmat.

2. ONGELMAN LÄHTÖKOHTA

2.1 Tierumpujen osalta

Tutkimuksen keskiössä on siis tierumpujen korjaus. Tällä hetkellä rumpujen korjaustapoja on useita. Yksi normaali käytäntö rummun korjauksessa on kaivaa vanha rumpu kokonaan pois, joka korvataan uudella putkella. Joskus kaivutyö on kuitenkin ongelma, sillä tien katkaisemisesta työmaan ajaksi voi koitua tien käyttäjille haitalliseksi. Erityisen haitallista tien aukaiseminen voi olla varsinkin syrjäisellä alueella, jossa kiertotien järjestäminen voi tarkoittaa useiden kymmenien kilometrien lenkkiä. Tien leveyden sallissa, voidaan kaivaa puolet tiestä auki, jolloin tietä ei tarvitse kokonaan katkaista. Joskus myös itse kaivutyö voi olla kohtalaisen työlästä, sillä rummun peitesyvyys vaihtelee kymmenistä senttimetreistä useisiin metreihin. Lisäksi rummun peittäminen vaatii usean tiivistyskerran, sillä riittävän tiivistymisen takaamiseksi tiivistettävän kerroksen tulee olla riittävän ohut. Toinen korjaustapa on ns. suuntaporaus, jossa tiepenkereen läpi porataan uusi putki olemassa olevan rummun viereen. Tämä on kuitenkin suhteellisen kallis menetelmä, mutta varsin käytetty kohteissa, joissa suurien liikennemäärien takia tietä ei voida kaivaa auki. Kolmantena korjaustapana mainitaan sujutus, jossa vanhan rummun sisään sujutetaan pienempi putki ja väliin jäävä tila on perinteisesti sen jälkeen betonoitu. Tämän korjaustavan ongelma on aukkokoon merkittävä pieneneminen, jolloin riittävän virtauksen takaamiseksi voidaan joutua poraamaan rummun vierelle toinen putki. Jos kaikki putket sijaitsisivat vähän liikennöidyillä leveillä teillä ja peitesyvyys olisi alle metrin, niin uusille korjaustavoille tuskin olisi mitään tarvetta. Tutkimuksen varsinaisena tavoitteena on siis kehittää teräsputkien korjaamiseen menetelmä, joilla voidaan pienentää edellä kuvattujen menetelmien haittavaikutuksia.

Teräksiset rummut lähinnä syöpyvät ja ruostuvat virtaavan veden vaikutuksesta. Toisinaan putken keskikohta painuu tai päät nousevat, vähentäen tehollisen aukon suuruutta. Tutkimuksessa keskitytään tarkkailemaan tilannetta, jossa putki on vielä suora ja käyttöikä rajoittaa putken syöpymä.

Korjattavan putken alkuperäisellä tai tulevalla jäykkyydellä ei ole varsinaista merkitystä, jos putki on riittävän syväälle asennettu. Silloin putken tärkeimpänä tehtävänä voidaan ajatella olevan virtausaukon avoimena pitäminen. Liikennekuormituksesta ei aiheudu merkittäviä jännitystilän muutoksia rumpuputkeen ja ympäröivä maarakenne ottaa vastaan päällä olevan tierakenteen aiheuttamat staattiset rasitukset. Kokonaisen rakenteen kannalta ei siis ole käytännön eroa olipa putki sitten teräksinen, betoninen tai muovinen. Lähinnä peitesyvyys ja pohjamaan ominaisuudet tekevät oleelliset erot rakenteen kuormituskäyttäytymiseen [14]. Putken oman jäykkyyden suhde ympäröivän

maan jäykkyyteen vaikuttaa kuormien jakautumiseen. Jäykän ja vähemmän jäykän putken ero on siinä, kuinka paljon kuormat holvaantuvat ja jakautuvat putken ympäristöön ja kuinka paljon jäykän putken tapauksessa kuormat kulkevat suoraan putken päältä putken alle, luoden jännityskertymää pienemmälle alueelle [25].

Vaihtoehtoisiksi korjaustavoiksi teräsputkille esitetään tässä työssä, joko uuden aukileikatun putken sujutus korjattavaan putkeen, tai puolikkaan putken asentaminen korjattavan putken ruostuneen osan päälle. Korjaustavat eivät ole sinällään mitään uusia tekniikoita, mutta yksityiskohtainen korjausmenetelmäohje puuttuu eikä korjausmenetelmien aiheuttamia rasitusmuutoksia ole laskennallisesti määritetty. Näin ollen korjausratkaisuja ei ole myöskään suoranaisesti mitoitettu. Uuden korjaustavan käyttöönotto on kuitenkin perusteltua, sillä putken aukileikkaamisella tehdyssä korjauksessa virtausala pienenee vähemmän kuin tilanteessa, jossa sujutetaan kokonainen putki. Uuden sujutetun ja vanhan korjattavan putken väli voidaan betonoida tai täyttää polyuretaanilla (PUR).

Puolipohjauksen ja halkaisusujutuksen käytettävyyttä määrää eniten putken vaurioitumisaste ja vaurion sijainti. Pienen eron tekee myös puolipohjauksen vielä vähemmän pienentynyt aukkoko, joka tulva-alueilla voi olla merkittävin tekijä.

2.2 Aiemmat tutkimukset TTY:llä

Tampereen teknillinen yliopisto (TTY) on ollut mukana useassa aikaisemmassa tutkimuksessa liittyen tierumpuihin ja niiden analysointiin elementtimenetelmään (FEM) perustuvilla ohjelmistoilla. Yksi aikaisempi on Tiehallinnon (nykyisin Liikennevirasto) tilaama selvitys Tampereen teknillisen korkeakoulun (nykyisin Tampereen teknillinen yliopisto) Pohja- ja maarakenteiden laboratoriolta [25]. Selvityksen aiheena on rummun aiheuttama jännityskenttä sitä ympäröivään maahan, kun rummun materiaalia ja sitä ympäröivää täyttöä varioidaan eri tapauksiksi. Tutkittavina ovat teräs-, betoni- ja muovirummut, sekä kaksi erilaista ympäristäytettä, tiivis sora ja löysä hiekka.

Selvitys on tehty elementtimenetelmään perustuvalla Plaxis-ohjelmistolla. Kuormitustilanteita oli kaksi: pitkäaikainen maan omasta painosta aiheutuva kuormitus ja lyhytaikainen, pelkästä liikennekuormasta syntyvä rasitus. Laskenta suoritettiin kaksiulotteisessa tasomuodonmuutostilassa lineaarisena laskenta, kun käytettiin liikenteestä syntyvää kuormaa. Pitkäaikaiskuormilla laskettaessa laskennassa käytettiin elasto-plastista mallia, jolloin maahan pystyi syntymään pysyviä muodonmuutoksia. Ympäristäytön parametrit on valittu Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa aikaisemmin samanlaisten materiaalien tutkimustulosten perusteella.

Laskennasta saaduista tuloksista kiinnitettiin erityistä huomiota rummun pysty- ja vaakahalkaisijan muutoksiin, kun maan parametreja varioidiin. Laskettuja halkaisijan muutoksia verrattiin silloisten mitoitusohjeiden mukaiseen käsilaskentaan ja erään muovi-

putkia toimittavan yrityksen mitoitusohjelmistoon. Siksi myös nyt tehdyssä tutkimuksessa keskitytään vertailemaan halkaisijan muutoksia.

Toinen tähän aiheeseen liittyvä tutkimus on ”Raskaista ajoneuvoista tierumpuihin kohdistuvat räsitukset” [14]. Tämän tutkimuksen lähes ainoa ero nyt tutkittavaan aiheeseen on, että aikaisemman tutkimuksen rummut eivät vielä olleet käyttöikänsä päässä, eivätkä putket siitä syystä korjauksen tarpeessa.

Edellisen kappaleen tutkimuksessa oli koekohteet, joista mitattiin todelliset pysty- ja vaakahalkaisijan muutokset tierummussa kuorma-auton ylittäessä rummun. Lisäksi koekohteet mallinnettiin Plaxiksella, jolla tutkittiin samat asiat kuin kenttäkokeissa. Lisäksi laskentamallilla suoritettiin herkkyystarkastelua simuloimalla eri rumpumateriaaleja, rummun halkaisijoita ja peitesyvyyskäyviä, sekä tien rakennekerrosten ja pohjamaan ominaisuuksia.

Tästä tutkimuksesta saatu kokemus on nyt tehtävän tutkimuksen ja laskennallisten parametrien määrittämisen pohjana. Koska aikaisemmin on saatu luotettavia tuloksia Plaxiksella, voidaan sen avulla määrittää tämän tutkimuksen koekohteiden maaperäolosuhteet. Tätä laskentamallia verrataan Ansyksellä tehtyyn malliin, jolloin varmistutaan uudenkin mallin luotettavuudesta. Kun Ansyksellä tehdyn laskentamallin luotettavuus on varmistettu alkutilanteessa ennen korjaustoimenpiteitä, voidaan tarkastella korjaustoimenpiteiden vaikutuksia rakenteen mekaaniseen käyttäytymiseen.

Kolmantena tutkimuksena mainitaan vielä ”Raskaiden ajoneuvojen rengastuksen vaikutus tieräsitukseen” [13]. Se on myös TTY:llä tehty tähän aihepiiriin liittyvä tutkimus. Työssä on selvitetty kuorma-auton renkaan maahan aiheuttamaa räsitusta, jonka pohjalta nyt tehtävän tutkimuksen laskentamallin renkaan käyttäytyminen on tehty.

2.3 Muita merkittäviä tutkimuksia

Tierumpujen korjaaminen on nyt kasvavan mielenkiinnon kohde ja aiheesta on maailmalla tehty paljon uutta tutkimusta, vaikka vanhaakin tutkimusta on saatavilla. Rumpujen käyttäytymistä kuormituksen alaisena on tutkittu hyvin samanlaisilla menetelmillä kuin tässä tutkimuksessa.

2.3.1 Yksinkertainen rajapintaelementti kontaktikitalle

Maan ja rakenteen yhteiskäyttäytymisessä yksi olennainen ilmiö on liukuma, joka tapahtuu rakenteen ja maan rajapinnassa. Näiden kerrosten välille ei usein voida olettaa täydellistä liitosta, vaan pinnan tulee sallia liukuma ja uudelleenkiinnittyminen. Näin voidaan huomioida kerrosten välillä todellisuudessa vaikuttava kitka. Yksi ratkaisu tähän on Notre Damen yliopistossa kehitetty rajapinnan kontaktielementti [16]. Elementti on kehitetty erityisesti tierumpujen ja maan yhteiskäyttäytymisen mallintamiseen.

Tutkimuksessa on ollut kaksi maan ja rakenteen yhteisvaikutustilannetta, joista ensimmäisessä on pyöreä tierumpu merkittävästi idealisoidussa maasysteemissä. Tarkoituksena on todeta elementin validiteetti tunnetun suljetun ongelman ratkaisun avulla. Toinen ongelma on käytännönläheisempi, jossa pitkän jännevälän kaariputken muotoinen tierumpu on progressiivisesti peitetty pienillä maakerrosten lisäyksillä maan alle. Tavoitteena on osoittaa, että elementti todella helpottaa simulointia, jossa laskennan tuloksia verrataan todellisiin kenttäkokeen havaintoihin.

Joitakin laskennallisia ongelmia elementin käytössä voi esiintyä, joista seuraa laskennan epäonnistumisia (suppenevuusongelmia). Onnistuneissa simulaatioissa laskenta voidaan suorittaa helposti jopa yhdellä kuormitusaskeleella, mutta usein elementin onnistuneeseen käyttöön liittyy hienoa tasapainoilua kuormainkrementtien suuruuden ja laskentaajan suhteen. Joskus syntyy myös tilanteita, joissa laskennan suppenemista ei tapahdu ollenkaan ensimmäisellä kuormitusaskeleella, mutta tutkimustulosten perusteella asialla ei ole merkittävää vaikutusta simuloituun lopputulokseen.

Elementti tarjoaa helpon keinon simuloida kontaktitilaa kahden eri kerroksen välillä, niin kaksi- kuin kolmiulotteisissakin tilanteissa. Elementti on tutkimuksen mukaan helppo implementoida kaupallisiin elementtimenetelmään perustuviin ohjelmistoihin ja sen avulla voidaan havainnoida helposti suhteellisen liukuman mallintamisen tärkeyttä kun simuloidaan kokeellisia havaintoja.

2.3.2 Suunnittelukuormat syvälle asennetuissa rummuissa

Yksi mielenkiintoinen tutkimus tierumpuihin kohdistuvista rasituksista on esitelty American Society of Civil Engineering –yhdistyksen (ASCE) kuukausittain ilmestyvässä geoteknisen ja geoympäristön insinööritaidon lehdessä (Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering) vuonna 2005 [17]. Tutkimuksessa esitellään suorakaiteen muotoisille tierummuille voimassa olevaan standardiin verrattuna edistysellisempi laskentamenetelmä, jonka avulla voidaan määrittää suunnittelukuormat tarkemmin. Tämän kyseisen tutkimuksen havaintojen perusteella on tehty määritelmät viralliseen standardiin. Tätä standardia valvova viranomainen on American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Tutkimuksessa maarakenteille on käytetty Duncan Soil Modelia, jota voidaan kuvata hyperbolisilla jännitys-venymä-käyrillä. Tutkimuksessa simuloitujen suorakaiteen muotoisten tierumpujen peitesyvyydet vaihtelevat viidestätoista metristä jopa kuuteenkymmeneen metriin eli kyseessä on ns. syvälle asennetut tierummut. Simulointien tuloksena on pystytty kuvaamaan ja määrittämään useiden satojen hypoteettisten mallien data regressioanalyysin avulla. Tutkimuksessa on käytetty varsinaisesti Abaqusta ja ISBILD:iä analyyseihin ja tulokset on varmennettu CANDE-89:llä. Kaikki edellä mainitut ohjelmistot perustuvat elementtimenetelmään.

Maan ja rakenteen yhteisvaikutuksen osalta tutkimuksessa esitellään kaksi tapaa mallintaa maan ja rakenteen välistä liukumista. Ensimmäinen tapa on kuvata rajapinnan ilmiötä leikkauselementeillä ja toinen tapa on käyttää jouselementtejä. Liukuman suuruus todetaan kuitenkin tutkimustapauksessa olemattomaksi, joten rajapinnan käyttäytymistä kuvaavaa elementtiä ei tutkimuksessa varsinaisesti käytetä.

Tutkimustulosten perusteella maan ja rakenteen yhteisvaikutuksen kuvaamiseen suurilla peitesyvyyksillä vaikuttaa merkittävimmin perustusten ominaisuudet. Pystysuuntaisten liukumien suuruudet rakenteen ja maan välillä ovat mitättömän pienet. Tutkimuksen havaintojen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että rakenteen sivuseinien kallistuskulma vaikuttaa maan ja rakenteen yhteisvaikutuksen voimakkuuteen. Lisäksi tutkimuksessa on löydetty reunaehdot rakenteen päällä sijaitsevien kevyiden rakennekerrosten (lightweight material zone) hyödylliselle käytölle.

2.3.3 Joustavien rumpujen kuormituskäyttäytyminen kenttäkokeissa

Täyden mittakaavan kenttäkokeita on tehty maailmalla rumpuputkien muodonmuutosten ja jännitustasojen selvittämiseksi. Esimerkiksi Floridassa vuonna 2006 [7]. Tutkimuksessa tavoitteena oli määritellä tierummun lyhytaikainen käyttäytyminen matalilla peitesyvyyksillä vertailemalla kenttäkokeiden mittaustuloksia ja AASHTO:n mitoituskäytäntöä. Kenttäkokeissa mitattiin maahan mobilisoituvia jännitysjakautumia rumpua ympäröivässä maassa, sekä pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutoksia todellisen hyötykuorman alla. Tutkimuksessa rummuista on myös mitattu kehäsuuntaisia venymiä, mutta venymät on todettu pieneksi eikä niillä ole lopputulokseen suurta vaikutusta.

Tutkittavien rumpujen materiaaleja olivat tiivis polyeteeni (HDPE), polyvinyylikloridi (PVC), teräs ja alumiini. Rumpujen halkaisijat olivat samaa suuruusluokkaa kuin tämän nyt tehtävän tutkimuksen koekohteissa eli 900 – 1200mm. Peitesyvyydet vaihtelivat puolikkaasta rummun halkaisijasta kaksinkertaiseen halkaisijan suuruuteen. Tutkimuksessa rakennettiin koekohteet, jolloin mittaukset pystyttiin aloittamaan jo rakennusvaiheessa. Asennettavista rummuista mitattiin halkaisijanmuutoksia koko rakennusvaiheen aikana. Toisessa vaiheessa rumpuja kuormitettiin ja niiden halkaisijan muutoksen mitattiin todellisen liikennekuormituksen kaltaisella tilanteella, jossa kuorma-auto ajetaan rumpujen ylitse.

Artikkelin mukaan rummun rakennusaikaiset halkaisijan muodonmuutokset ovat yhden prosenttia luokkaa koko halkaisijan suuruudesta. Tulos on sallituissa rajoissa, sillä AASHTO määrittää suunnittelurajaksi 5 %. Kuormituksen aikana halkaisijan muutokset ovat suurimmillaan vain kuuden promillen luokkaa. Tutkimuksen havaintojen perusteella halkaisijanmuutokseen vaikuttaa kaikista eniten rummun päällä olevan kerroksen paksuus eli peitesyvyys. Myös rumpua ympäröivän maan liikennekuormituksesta aiheutuva lisäjännitys vähenee peitesyvyyden kasvaessa, koska rummun päällä oleva pak-

sumpi maarakenne jakaa jännityksiä laajemmalle alueelle. Laskennallisesti putken halkaisijoiden tulisi muuttua n. kolmesta jopa viisikymmenkertaisiksi. Tutkimuksessa käytettyä mitoitusastapaa voidaan siis pitää hyvinkin konservatiivisena.

Tutkimustulosten perusteella todelliset halkaisijan muutokset pysyvät suunnittelustandardin sallimissa rajoissa. Peitesyvyuden ollessa vähemmän kuin puolet rummun halkaisijasta saattaa liukumaa päästä syntymään rummun seinämän ja ympäröivän maarakenteen välillä. Peitesyvyyksillä, jotka ovat suurempia kuin rummun halkaisija, maan ja rakenteen välille voidaan kuitenkin olettaa täydellinen liitos. Rummun muodonmuutokset muistuttavat usein sydämen muotoista kappaletta, jossa pyöreän rummun laki painuu ja noin kolmannespisteet kaareutuvat entistä enemmän. Venymämittausten perusteella rummun laelle syntyy vetojännityksiä ja muuten piirillä esiintyy puristusta. Matalan peitesyvyuden tapauksessa putkiin ei hyötykuormasta syntynyt lommahdusta, seinämän murtumaa, halkeilua eikä repeilyä.

2.3.4 Täyden mittakaavan kenttäkokeiden vertailu laskennallisiin menetelmiin

Edellisen luvun 2.3.3 mittauksiin liittyen on myös tehty laskennallinen analyysi kaksi- ja kolmiulotteisissa tilanteissa käyttäen FEM-ohjelmistoja Ansys ja CANDE-89 [3]. Kuorma-auton akselien sijainti suhteessa rummun lakipisteeseen on artikkelin mukaan yksi kriittisistä parametreista, kun arvioidaan rumpujen käyttäytymistä laskennallisesti. Mitoitettava tilanne on sellainen, jossa painavimman kaksiakselisen telin toinen akseli on suoraan rummun laen yläpuolella.

Kaksiulotteisessa tutkimuksessa joudutaan tekemään paljon oletuksia ja yksinkertaistuksia, joten varsinainen yleisen tapauksen analysointi tehtiin kolmiulotteisesti. Mallin oletuksena käytettiin pienten siirtymien teoriaa ja maan oletettiin käyttäytyvän aikariippumattomasti. Lisäksi maalle oletettiin lineaarisesti isotrooppiset ominaisuudet. Laskenta-ajan lyhentämiseksi malleissa käytettiin symmetriaehtoa tien pituuden suunnassa.

Maakerrosten laskentaparametreina käytettiin Poissonin lukua 0,38 ja kimmomoduulin arvoina käytettiin n. 20 – 43 N/mm². Maan jäykkyysparametrit ovat siis hyvin samaa luokkaa kuin tässä nyt tehtävässä tutkimuksessa. Elementtimenetelmään perustuneiden analyysien lisäksi tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista puoliempiiristä laskentamenetelmää, joiden tuloksia vertailtiin tietokonelaskelmien tuloksiin. Yksi tärkeä tekijä voimassa olevan standardin mukaisen mitoituskäytännön mukaan on rummun laella maahan vaikuttava pystysuuntainen jännitys. Tutkimuksen tulosten perusteella peitesyvyuden paksuudella on merkittävä vaikutus jännityksen suuruuteen. Toinen mitoittamiseen vaikuttava tekijä on rummun pystysuuntaiset muodonmuutokset asennuksen ja liikennekuormituksen aikana.

2.3.5 Kaarevan siltarummun kenttäkuormituskoee

Eräässä tutkimuksessa on tarkasteltu neljän eri kaariputkirummun (pipe-arch culverts) käyttäytymistä, kun niitä kuormitetaan staattisesti ja dynaamisesti [28]. Staattisia kuormitustapauksia on kymmenen, joissa raskasta kuorma-autoa siirretään eri pisteisiin rumpuun nähden. Dynaamiset testit tehtiin eri ylitysnopeuksilla, jotka vaihtelivat välillä 10 - 60 km/h.

Kuormitusten aikana putkista mitattiin säteen suuntaisia halkaisijan muutoksia viidestä eri kriittisestä kohdasta. Lisäksi rummuista mitattiin venymiä neljällätoista venymäanturilla. Tutkimuksen havaintojen perusteella peitesyvyys vaikuttaa kaikista tutkituista muuttujista eniten rummusta mitattuihin muodonmuutoksiin ja venymiin. Lisäksi tehtiin havainto, että staattisen tilanteen siirtymät olivat suuremmat kuin vastaavat dynaamisten tapausten siirtymät. Staattisessa kuormitustapauksessa muodonmuutokset olivat vastaavaan dynaamiseen kuormitustapaukseen verrattuna jopa 10 - 20 % suuremmat. Kuorma-auton ylitysnopeuden ja dynaamisen kuorman rumpuun aiheuttaman rasiuksen suhteen huomattiin olevan epälineaarinen. Alhaisilla nopeuksilla rasiustasot muuttuvat enemmän suhteessa nopeudenmuutokseen kuin suurilla ajonopeuksilla. Ajonopeuden vaikutus ei muutu käytännössä enää yli 30 km/h nopeuksilla.

Mitattujen venymien pitämistä jännitysten indikaattoreina voidaan tutkimuksen havaintojen perusteella pitää luotettavina ja jännitykset näyttäisivät olevan suhteellisia rummun muodonmuutoksiin. Lisäksi venymien todetaan kasvavan kun muodonmuutokset kasvavat. Havaintojen perusteella suurimmat muodonmuutokset tapahtuvat rummun laella. Rummun pohjalla on vain mitättömiä muodonmuutoksia. Muodonmuutokset jakautuvat symmetrisesti rummussa, kun rumpua kuormitetaan rummun laen kohdalta. Muodonmuutokset vähenevät epälineaarisesti peitesyvyyden kasvaessa ja sekä staattisessa että dynaamisessa kuormitustapauksessa putken muodonmuutokset ja venymät kasvavat huomattavasti peitesyvyyden ollessa pieni. Tutkimuksessa neljän rummun tapauksessa huomattava muutos siirtymissä ja venymissä syntyy kun peitesyvyys oli vähemmän kuin 900 mm.

3. TEORIAA

Tässä osiossa käydään läpi hieman teoriaa, jotta saadaan parempi kuva tutkimuksesta ja siinä käytettävistä menetelmistä. Erityisesti on selvitettävä laskennallista tarkastelua varten olennaisimpia ilmiöitä ja niihin liittyviä tekijöitä. Lähdetään liikkeelle yleisestä teoriasta maahan liittyen, josta edetään maamateriaalien mallintamiseen. Lopuksi käydään läpi tässä tutkimuksessa käytettävien materiaalimallien ominaisuuksia ja parametrejä. Tärkeää on myös käydä läpi valitun Drucker-Prager -materiaalin [11] parametrien johtaminen yleisesti maasta käytettävistä parametreista.

3.1 Sitomattomien tierakennemateriaalien kuormituskäyttäytyminen

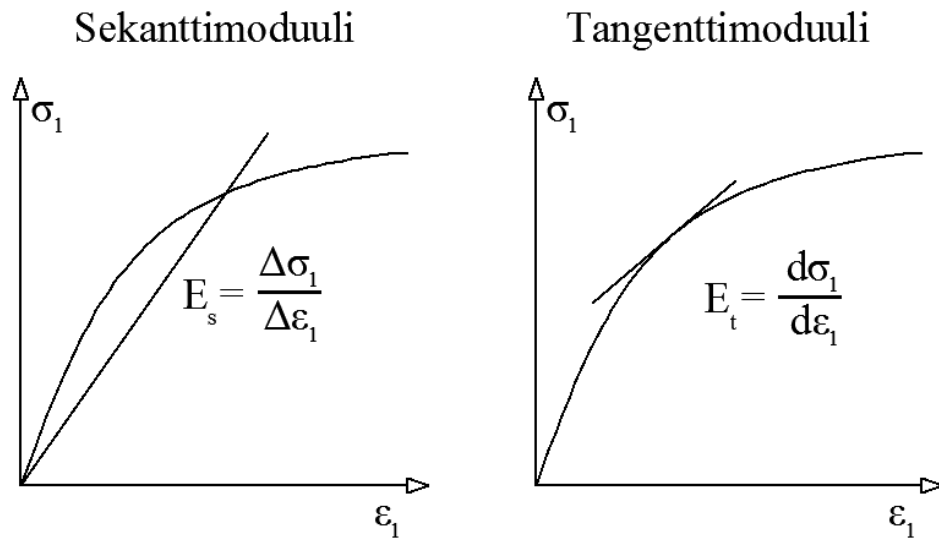
Suurin osa liikennekuormituksen tierakenteeseen aiheuttamasta muodonmuutoksesta palautuu kun kuormitus poistetaan. Osa rakenteeseen syntyvästä muodonmuutoksesta on aina kuitenkin pysyvää, mutta sen osuus voi olla todella pieni. Liikennekuormituksen tierakenteeseen aikaansaamien pysyvien ja palautuvien muodonmuutosten määrittäminen perustuu yleensä staattisen pyöräkuorman aiheuttaman jännitys- ja muodonmuutos-tilan tarkasteluun [1].

Tierakenteeseen syntyy liikkuvan pyöräkuorman vaikutuksesta jännityksiä ja tierakenteen taipuu. Sorateiden, eli sitomattomien rakennekerrosten tapauksessa materiaalit eivät pysty vastaanottamaan lainkaan vetojännityksiä. Pysty- ja vaakasuorat puristusjännitykset ovat suurimmillaan renkaan kuormituskohdan alapuolella. Leikkausjännityksen maksimiarvo esiintyy, kun liikkuva pyöräkuorma on vielä jonkin matkan päässä tarkastelupisteestä [12].

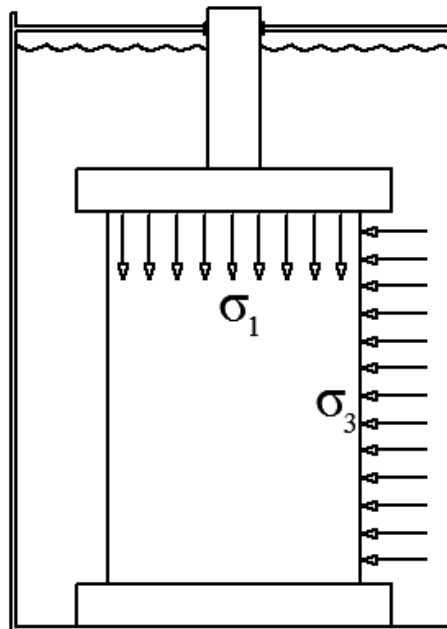
Tierakenteeseen syntyviä jännityksiä voidaan yksinkertaisimmillaan mallintaa isotrooppisessa, homogeenisessa ja lineaarisesti kimmoisessa puoliavuudessa [1]. Lineaarisesti kimmoisessa materiaalissa muodonmuutokset tapahtuvat välittömästi ja pysyvät vakiona ajasta riippumatta. Kuormituksen poistuessa muodonmuutokset palautuvat välittömästi ja kokonaan. Paikoillaan olevasta pyöräkuormasta kimmoiseen materiaaliin muodostuva jännitysjakautuma voidaan kuvata Boussinesqin esittämien ympyrän muotoisten kuormituksen homogeenisessa puoliavuudessa aiheuttamien jännitysten avulla [19].

Boussinesqin tapaa ei voida sellaisenaan soveltaa epähomogeenisen tierakenteen osalta. Periaatteessa ongelma on mahdollista palauttaa analyttiseen muotoon käyttämällä Odemarkin esittämää monikerroslaskentaa perustuvaa menettelyä. Edellytyksenä kui-

tenkin on, että materiaalien muodonmuutosominaisuudet ovat kerroksittain lineaarisesti kimmoisia. Sitomattomien rakennekerrosten tapauksessa tämä edellytys ei täyty, sillä niiden muodonmuutosominaisuudet muuttuvat jännitystason suhteen epälineaarisesti. Näin ollen materiaalin kimmomoduulinkaan arvo ei ole vakio. Maan kimmomoduuli voidaan kuitenkin kuvata sekanttimoduulina tietyltä jännitysväliltä tai tangenttimoduulina tietyn pisteen sivuamiskohdalta (ks. kuva 1).

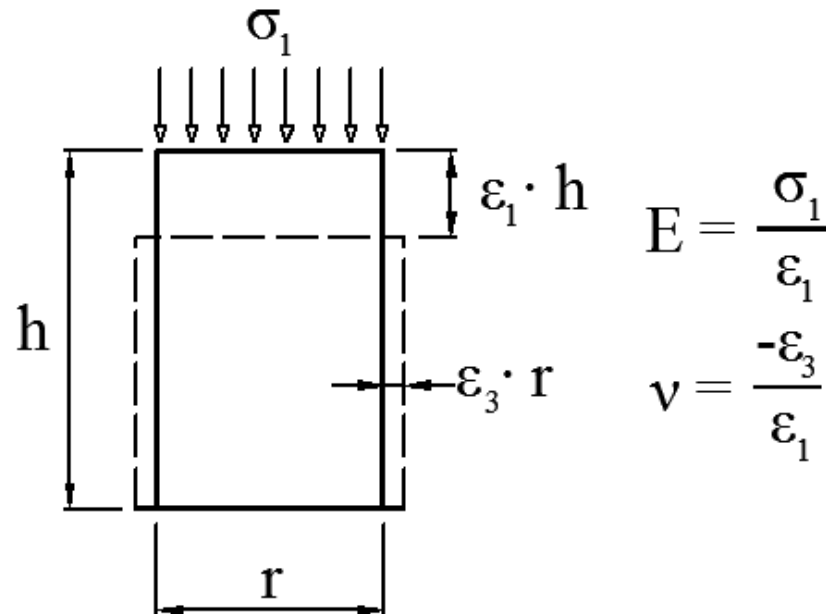


Kuva 1. Materiaalin sekantti- ja tangenttimoduuli.



Kuva 2. Periaatekuva kolmiakselikokeesta. Tässä tehokkaaksi jännitykseksi voidaan määrittää esim. pääjännitysten erotus.

Maakerroksen kimmomoduulin mittaamiseksi voidaan tehdä yksinkertainen koejärjestely, jossa maa-ainesta puristetaan joka puolelta. Esimerkkinä tällaisesta koejärjestelystä on kolmiakσιαalikoe, jossa maan muodonmuutoksille ja tehokkaille jännityksille saadaan yhteys. Tässä tapauksessa tehokkailla jännityksillä tarkoitetaan pääjännitysten erotusta (ks. kuva 2).



Kuva 3. Yksinkertainen puristuskoe kimmomoduulin ja Poissonin luvun määrittämiseksi.

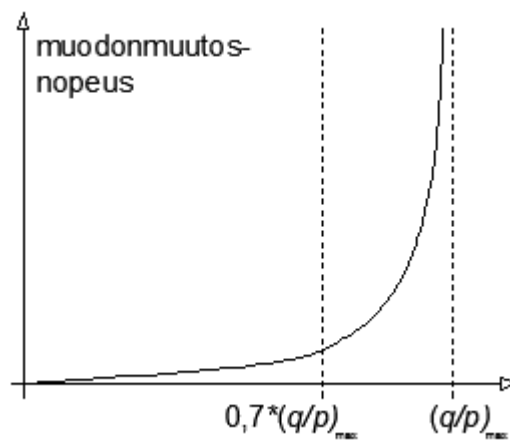
Kimmomoduulilla E saadaan yhdistettyä aksiaalisen muodonmuutos ja aksiaalisen jännitys yksinkertaisessa puristus- tai vetokokeessa (ks. kuva 3). Poissonin luvulla ν vuorostaan saadaan yhteys aksiaalisen muodonmuutoksen ϵ_1 sekä poikittaisten muodonmuutosten ϵ_2 ja ϵ_3 välille. Materiaalin ollessa isotrooppista ja lineaarisesti kimmoista, kolmiakσιαalikokeen tilanteessa toteutuu $\epsilon_2 = \epsilon_3$.

Tierakenteen kerroksellisuus vaikuttaa oleellisesti siihen syntyvään jännitys jakaumaan. Kimmoteorian mukaisesti taipuvan tierakenteen alapintaan pitäisi syntyä vetojännityksiä, mikäli sen alapuolella olevan kerroksen jäykkyys on huomattavasti pienempi kuin päälle olevan kerroksen jäykkyys. Sitomattomat rakennekerrokset eivät kuitenkaan voi ottaa vastaan vetojännityksiä, joten yläpuolinen rakenne voi tehollisesti toimia vain sellaisella jäykkyydellä, joka on tietyssä suhteessa, korkeintaan 2-4 -kertainen, alapuolisen kerroksen jäykkyyteen [12].

Maakerrokseen liikennekuormituksen vaikutuksesta mobilisoituvien jännitysten suuruus vaikuttaa oleellisesti materiaalien pysyvien muodonmuutosten syntymiseen. Pysyvien muodonmuutosten suuruus kasvaa nopeasti, kun materiaalissa vaikuttava deviatorinen jännitys (q) lähestyy materiaalin murtokuormitusta. Pysyvien muodonmuutosten nope-

aan kasvuun johtavaksi kriittiseksi arvoksi on varsin usein arvioitu suuruusluokaltaan 70 % näytteen murtotilanteen deviatorisen jännityksen ja hydrostaattisen paineen (p) suhteesta. Joidenkin kokeiden tulosten perusteella myös muodonmuutoksista löytyy vastaava kriittinen taso, jonka ylittämisen jälkeen pysyviä muodonmuutoksia syntyy nopeasti, vaikka jännitystaso olisikin suhteellisen matala murtotilanteeseen verrattuna [19].

Edellisen kappaleen pysyvien muodonmuutosten muodostumisnopeus voidaan esittää periaatteellisesti jännityssuhteen q/p avulla kuvan 4 mukaisesti. Pysyvien muodonmuutosten muodostumisnopeus on alhainen jännityssuhteen ollessa alle kriittisen rajan (esimerkiksi 70 % murtotilanteen jännityssuhteesta). Raja ylitettäessä muodostumisnopeus kasvaa nopeasti, seurauksena lopulta murtuminen [21].



Kuva 4. Periaatekuva jännityssuhteen q/p vaikutuksesta pysyvien muodonmuutosten kertymisnopeuteen.

Sitomattomiin materiaaleihin syntyvien pysyvien muodonmuutosten suuruuteen vaikuttaa myös niihin kohdistuvien kuormitusten lukumäärä. Mikäli materiaalin kuormitustaso on riittävän paljon murtokuormitustason alapuolella, rakenteen jännitys-muodonmuutossykli stabiloituu tietyn kuormituskertamäärän jälkeen. Tämän jälkeen kuormituksesta syntyvät muodonmuutokset ovat lähes kokonaan palautuvia. Mikäli kuormitusta edelleen jatketaan, saattaa pysyvien muodonmuutosten määrä jatkaa kasvuun siitäkään huolimatta, että rakenteen käyttäytyminen olisikin aluksi näyttänyt stabiloituvan [20].

3.1.1 Sitomattomien tierakennemateriaalien kuormituskäyttämiseen vaikuttavat ominaisuudet

Jännitystaso on yksi tärkeimmistä tekijöistä sitomattomien tierakennemateriaalien muodonmuutuskäyttämiseen [30][31]. Materiaalin jäykkyys kasvaa selkeästi, kun pääjännitysten summa kasvaa. Käytetty jännitystaso vaikuttaa myös Poissonin lukuun. Karkearakeisten materiaalien Poissonin luku kasvaa pääjännityseron kasvaessa ja hyd-

rostaattisen jännityksen pienentyessä. Yhteys ei kuitenkaan ole yhtä yksinkertainen kuin jäykkyyden tapauksessa. Pysyvien muodonmuutosten osuus riippuu suuresti jännitystasosta ja se kasvaa pääjännityseron kohotessa sekä hydrostaattisen jännityksen pienentyessä.

Jännityshistoria, kuormitustaajuus ja kuormituksen kesto vaikuttavat vain vähän tyypillisesti käytettyjen karkearakeisten materiaalien palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen. Kuormituskertojen määrä on kuitenkin yksi tärkeimmistä tekijöistä analysoitaessa karkearakeisten materiaalien pitkäaikaista muodonmuutoskäyttäytymistä kolmiak-siaalilla toistokuormituskokeilla [6]. Useimmat elasto-plastiset materiaalmallit oletta-vat, että kaikki pysyvät muodonmuutokset kehittyvät ensimmäisen kuormituskerran aikana ja myöhemmät alhaisemman tason lisäkuormitukset ovat elastisia [29].

Kirjallisuudessa esitetyt lähteet ovat epäyhtenäisiä, kun tarkastellaan tiheyden vaikutus-ta karkearakeisten materiaalien palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen toistuvan kuormituksen alaisuudessa. Useimmat tutkijat ovat kuitenkin tulleet sinällään loogiselta tuntuvaan johtopäätökseen, että materiaalin jäykkyys yleensä kasvaa tiheyden kasvaes-sa. Tiheys on kuitenkin yksi tärkeimmistä karkearakeisten materiaalien pitkäaikaiseen muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä ja siten myös keskeinen tekijä pysyvien muodonmuutosten kehittämisessä. Löyhässä materiaalissa maapartikkelit pää-sevät järjestymään kuormituksen vaikutuksesta uudelleen ja siten pysyviä muodonmuu-toksia syntyy herkemmin. Rakeisuudeltaan tiiviit materiaalit kestävät pysyviä muodon-muutoksia paremmin kuin rakeisuudeltaan avoimet tai paljon hienoainesta sisältävät materiaalit [1].

Materiaalin jäykkyys pienenee vesipitoisuuden kasvaessa erityisesti korkeilla kylläs-tysasteilla [10][15]. Tämä selittyy veden voitelevalla vaikutuksella ja sillä, että paikalli-set huokosveden alipaineet pienenevät korkeammilla vesipitoisuuksilla, joka johtaa pie-nempiin maapartikkelien välisiin kosketusvoimiin. Karkearakeisten materiaalien kylläs-tyessä kokonaan vedellä, niihin voi kehittyä huokosveden ylipainetta toistuvan kuorman alaisuudessa. Huokosvedenpaineen kehittyessä, materiaalissa vaikuttavat tehokas jänni-tys alenee aiheuttaen materiaalin lujuuden ja jäykkyyden pienenemistä.

Karkearakeisten materiaalien rakeisuus näyttää vaikuttavan jossakin määrin materiaalin jäykkyyteen. Kun vettä on saatavilla suhteistuneisiin materiaaleihin, rakeisuuden merki-tys kasvaa, sillä tällaiset materiaalit voivat pidättää vettä huokosissaan. Ne voivat myös saavuttaa korkeampia tiheyksiä kuin tasarakeiset materiaalit, koska pienemmät rakeet voivat limittyä paremmin isojen huokosten välisiin rakoihin. Tästä seuraa rakeisuuden epäsuora vaikutus materiaalien muodonmuutoskäyttäytymiseen, koska se vaikuttaa sys-teemin vesipitoisuuteen ja tiheyteen [4].

Rakeiden muoto vaikuttaa ilmeisesti karkearakeisten materiaalien muodonmuutoskäyt-täytymiseen epäsuorasti tiivistämisen kautta, koska rakeiden muoto vaikuttaa selvästi

maa-aineksien tiivistämiseen. Maa-ainekset, joilla on hyvin liuskeinen tai pitkänomainen rakeiden muoto, ovat luonnollisesti herkempiä hienontumiselle. Tästä seuraa hienoinenepitoisuuden kasvu ja pysyvien muodonmuutosten lisääntyminen, kun hienontuvat rakeet pääsevät järjestymään uudelleen [4].

Maan kimmoparametreinä usein käytetään homogeenisen, istrooppisesti kimmoisen materiaalin tapaan kahta materiaaliarvoa, jotka ovat kimmomoduuli (E) ja Poissonin luku (ν). Näin tekemällä maalle oletetaan täysi isotropia. Jotta pysty- ja vaakasuuntaiselle käyttäytymiselle saataisiin tehtyä laskennassa eroja, kimmoparametrejä tarvittaisiin viisi [23].

3.2 Maamateriaalin mallintaminen

Tässä tutkimuksessa maan materiaalimalliksi Ansyksessä on valittu Drucker-Prager-materiaali (DP). Tähän on päädytty yksinkertaisesta syystä – käytettävissä olevista vaihtoehdoista se kuvaa maan käyttäytymistä kaikista parhaiten. Malli on tietokonelaskentaan hyvin sopiva, sillä se muistuttaa läheisesti Mohr-Coulomb-mallia (MC). DP-materiaalissa myötöpinta on jatkuva, eikä siis puristus- ja vetomeridiaaneilla tapahdu äkillistä muutosta myötöpinnan suunnassa. Myötöpinnan jatkuvuus on hyödyllinen ominaisuus tietokonelaskentaan, sillä siitä seuraa vähentynyt määrä suppenemiongelmia, joissa laskenta ei mene läpi eli tulosta ei saada [23].

Maan materiaalimalleja verrataan usein MC-malliin, koska se on yksi ensimmäisiä maamalleja ja siten hyvin vakiintunut. Myös siinä käytetyt materiaali-parametrit: leikkauslujuus, koheesio ja kitkakulma, ovat hyvin vakiintuneita ominaisuuksia, jotka ilmoitetaan usein maaperätutkimuksissa.

TTY:n aikaisemmassa tutkimuksessa [14] oli käytetty kantaville rakenteille Hardening Soil -materiaalimallia (HS) [5]. Samaan materiaalivalintaan päädyttiin myös tässä tutkimuksessa, kun vertailuksi tehtiin Plaxiksella laskentamalli koekohteiden alkutilanteista. HS-materiaalimalli muistuttaa hieman MC-materiaalimallia, ainakin syötettävien parametrien kannalta. Kuitenkaan materiaalin myötöpinta ei ole kiinteä, kuten MC-mallissa, vaan myötöpinta voi laajeta deviatorisen kuormituksen sekä hydrostaattisen paineen vaikutuksesta.

Aikaisemmassa tutkimuksessa pohjamaa oli mallinnettu käyttäen MC-mallia. Tutkimuksissa käytetty laskentaohjelmisto Plaxis mahdollistaa suljetussa tilassa maaparametrien syöttämisen yhdellä termillä, suljetulla leikkauslujuudella.

Nyt tehtävässä tutkimuksessa Ansyksessä käytetyt DP-mallin materiaali-parametrit ovat osittain johdettu laskennallisesti aikaisempien tutkimusten parametrien pohjalta. Parametrien valinnassa on kuitenkin otettava huomioon korjattavien rumpujen paikalliset olosuhteet. Käytettävien parametrien johtaminen käsitellään luvussa 3.3.

3.3 Drucker-Prager -myötöpinnan parametrit

DP-materiaalin myötöehto on yksinkertaisin von Mises -myötöehdon yleistys hydraulisesta paineesta riippuvalle materiaalille. Myötöpinta on äärettömyyteen asti jatkuva kartio, jonka keskilinja kulkee hydrostaattista painetta kuvaavaa suoraa pitkin. Mallille löytyy myös useita hieman muokattuja versioita, joissa esimerkiksi myötöpinta ei ole tiukasti kartio, vaan kartion terävin kärki on hieman pyöristetty [2] (ks. kuva 7). Tämä myötöpinnan pyöristäminen voi joskus auttaa, jos mallissa esiintyy vetoa ja laskenta ei suppene eli onnistu. Ansys-ohjelmistossa myötöpinta valitaan yhtenä materiaalin ominaisuutena. Tässä tutkimuksessa on käytetty teräväkärkistä kartiota.

Äärettömyyteen asti jatkuva kartio mahdollistaa siis äärettömän suuren leikkauskestävyyden, kunhan hydraulista puristusta esiintyy lineaarisesti tietyssä suhteessa. Reaali maailmassa lienee harvinaista, että materiaali kestää tasaista painetta äärettömyyteen asti. Pelkästään materiaalin tiheyden epätasainen jakautuminen aiheuttaa paineen komponenttien epätasaisen jakautumisen, joten tilanne on lähinnä teoreettinen. Tämä äärettömyysongelma voidaan ratkaista käytettävissä olevalla Cap Model -mallilla [2], jossa DP-myötöpintaa rajataan puolipallonmuotoisella pinnalla jollakin hydraulisen paineen arvolla. Ääretön kartio siis katkaistaan ja lopputulos muistuttaa jäätelötötteröä. Lisää aiheesta luvussa 3.5.

DP-myötöehto on kirjallisuudessa esitetty monessa eri muodossa, mutta nyt lähdetään liikkeelle Ansys-ohjelmiston teorialähteen [2] muodosta

$$F = 3\beta\sigma_m + \sqrt{\frac{1}{2}\{s\}^T [M] \{s\}} - \sigma_y = 0, \quad (3.1)$$

jossa β on materiaalivakio, σ_m on keskimääräinen jännitys, $\{s\}$ on deviatorinen jännitys, kerroinmatriisi $[M]$ on määritelty muodossa ja σ_y on materiaalin myötölujuus.

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3.2)$$

$$\{s\} = \{\sigma\} - \sigma_m [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (3.3)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Yhtälön (3.1) termiä $\frac{1}{2}\{s\}^T [M]\{s\}^{\frac{1}{2}}$ sieventämällä päästään muotoon

$$\left[\frac{1}{2}\{s\}^T [M]\{s\}\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2), \quad (3.5)$$

joka voidaan kirjoittaa [27] muotoon

$$\frac{1}{2}(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2) = \left[\frac{1}{6}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.6)$$

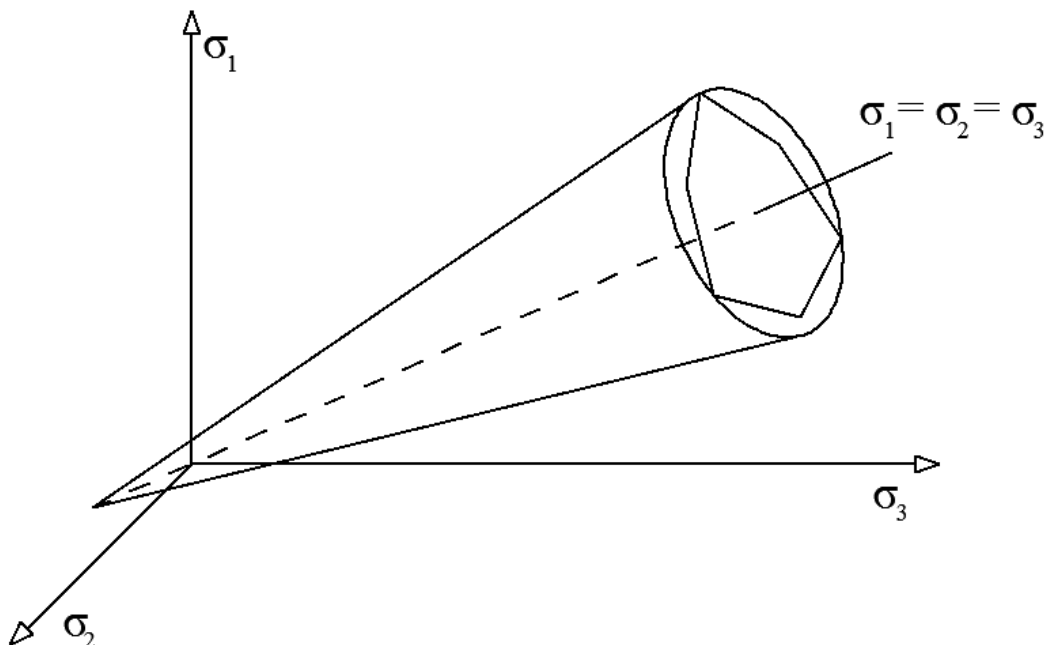
Sijoittamalla kaavat (3.2), (3.3), (3.4) ja (3.6) kaavaan (3.1) päästään muotoon

$$\beta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \left[\frac{1}{6}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)\right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0. \quad (3.7)$$

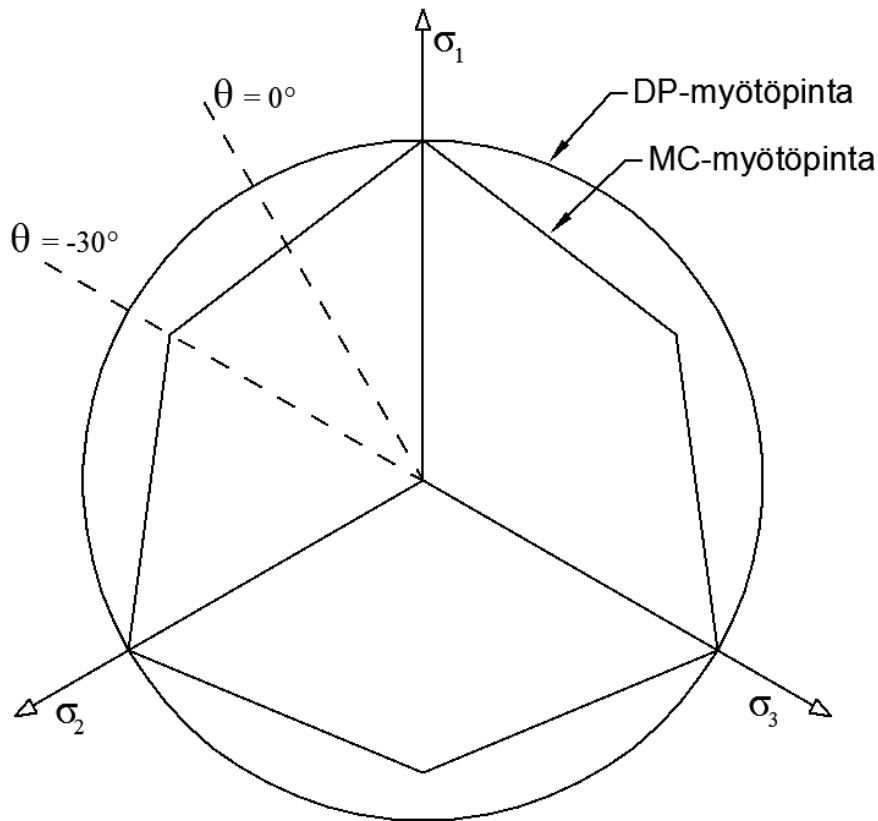
Puristusmeridiaanilla, eli tilanteessa jossa hydrostaattiseen jännitystilaan lisätään yksiakiaalista puristusjännitystä, pätee yhteys

$$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3. \quad (3.8)$$

Sovittamalla Drucker-Prager- ja Mohr-Coulomb-myötöpinta yhteen puristusmeridiaanilla, syntyy tilanne, jossa DP-pinta ympäröi MC-pinnan (ks. kuva 5 ja kuva 6).



Kuva 5. Drucker-Prager ja Mohr-Coulomb-myötöpinnat pääjännitysava-ruudessa.



Kuva 6. Drucker-Prager ja Mohr-Coulomb-myötöpinnat π -tasossa.

Sijoittamalla yhteys (3.8) kaavaan (3.7) päästään muotoon

$$\beta(2\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_y = 0, \quad (3.9)$$

josta uudelleen järjestelemällä muotoon

$$\sigma_1 \left(2\beta + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = \sigma_3 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \beta \right) + \sigma_y. \quad (3.10)$$

Seuraavaksi johdetaan Mohr-Coulomb-myötöpinnan lauseke puristusmeridianilla. Lähdetään liikkeelle muodosta, joka tunnetaan nimellä Coulombin yhtälö ja se on vuodelta 1773 [9]. Yhtälö on

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi, \quad (3.11)$$

missä c on materiaalin koheesio ja ϕ on materiaalin kitkakulma. Nämä termit ovat materiaalivakioita, joilla usein kuvataan maan tutkittua lujuutta. Yleisesti, kun $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, voidaan ehto (3.11) kirjoittaa muotoon [8]

$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} = 1, \quad (3.12)$$

josta nimittäjällä puolittain kertomalla ja toinen jännitystermi lisäämällä puolittain päästään yhtälöä (3.10) muistuttavaan muotoon

$$\sigma_1 (1 + \sin \phi) = \sigma_3 (1 - \sin \phi) + 2c \cos \phi. \quad (3.13)$$

Yhtälöjä (3.13) ja (3.10) vertailemalla, saamme yhteyden DP- ja MC-myötöpinnoille. Havaitaan, että puristusmeridiaanilla pätee

$$\frac{2\beta + \frac{1}{\sqrt{3}}}{1 + \sin \phi} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} - \beta}{1 - \sin \phi}. \quad (3.14)$$

Kaavasta (3.14) voidaan ratkaista materiaalivakio

$$\beta = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}. \quad (3.15)$$

DP-myötöehdon parametri σ_y :n ilmoittaminen termien c ja ϕ avulla voidaan johtaa samaan tapaan, kun merkitään $\sigma_3 = 0$. Siis yhtälö (3.10) sievenee muotoon

$$\sigma_1 \left(2\beta + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = \sigma_y. \quad (3.16)$$

Samalla tavalla yhtälö (3.13) sievenee muotoon

$$\sigma_1 (1 + \sin f) = 2c \cos f. \quad (3.17)$$

Yhtälöstä (3.17) voidaan ratkaista σ_1 . Sijoittamalla tämä ratkaisu ja materiaalivakio β (3.15) yhtälöön (3.16) saadaan ratkaistua

$$\sigma_y = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}. \quad (3.18)$$

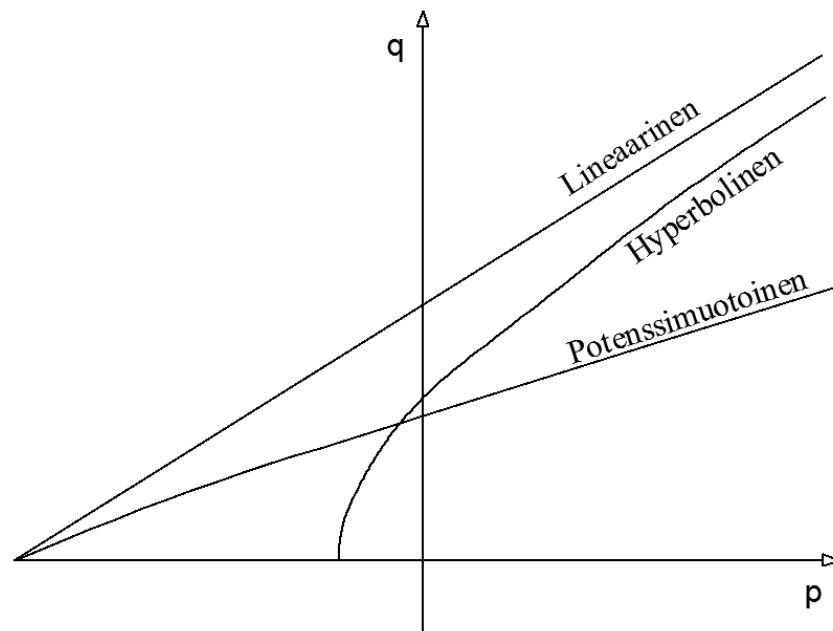
Kun yhteydet (3.15) ja (3.18) on johdettu, voidaan määrittää materiaalmalli Ansys-ohjelmistoon käyttämällä tunnettuja materiaalivakioita c ja ϕ . Ansys-ohjelmistossa käytetyt materiaaliparametrit on esitetty taulukoissa korjauskohteesta riippuen (ks. taulukko 8 ja taulukko 12).

Deviatoristen jännitysten maassa aiheuttaman dilataation vaikutus voidaan huomioidaan Drucker-Prager-materiaalissa ns. flow-parametrilla [8]. Ansyksellä sen käyttäminen edellyttää jatkettua DP-materiaalimallia, josta lisää seuraavassa kappaleessa.

3.4 Laajennettu Drucker-Prager-materiaalimalli

Ansys-ohjelmistosta löytyy myös paranneltu versio DP-myötöehdosta, Extended Drucker-Prager (EDP). Parannetussa materiaalimallissa voidaan sekä myötöpinta, että plastinen potentiaali (flow potential) asettaa lineaariseksi, hyperboliseksi tai potenssimuotoon. Myötöpinnan ja plastisen potentiaalin muodot voivat olla toisistaan riippumattomat.

Jos plastiseksi potentiaaliksi valitaan myötöfunktio, kutsutaan myötösääntöä assosiatiiviseksi (associated flow rule). Kun plastinen potentiaali poikkeaa myötöfunktioista, myötösääntö on epäassosiatiivinen (non-associated flow rule).



Kuva 7. Erimuotoiset myötöpinnat Extended Drucker-Prager -myötöfunktioille.

Kuvan 7 erilaisia myötöfunktioita ei ole yritetty sovittaa yhteen, vaan myötöehtojen parametrit ovat valittu kuvan kannalta havainnollisiksi. Tarvittaessa eri myötöfunktioille voidaan löytää hyvin yhtenevät sovitukset.

Joissakin tapauksissa assosiatiivinen myötösääntö johtaa dilataation vaikutuksen yliarvioimiseen [8]. Virhettä voidaan vähentää käyttämällä ei-assosiatiivista plastista poten-

tiaalia. Tässä tutkimuksessa kyseinen asia ei ole merkittävässä roolissa, sillä materiaalien myötääminen mallissa on vähäistä tai olematonta.

Yksi huomioitava seikka Ansys-ohjelmistoa ajatellen on DP- ja EDP-myötöehtojen erilaiset määrittelymuodot. EDP-myötöehto on annettu muodossa

$$F = q + \alpha \sigma_m - \sigma_y(\hat{\epsilon}_{pl}) = 0 \quad (3.19)$$

ja DP-myötöehto vastaavasti muodossa

$$F = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2}\{s\}^T [M] \{s\}\right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0. \quad (3.20)$$

Molemmissa yhtälöissä esiintyy myötölujuutta kuvaava termi, joka voidaan halutessa myös syöttää funktiona. Jos yhtälöissä toisiaan vastaavat myötölujuuden termit σ_y ja $\sigma_y(\hat{\epsilon}_{pl})$ halutaan syöttää vakioina muuttujien c ja ϕ avulla, lopputuloksena saadaan DP-myötöehdon osalta

$$\sigma_y = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (3.21)$$

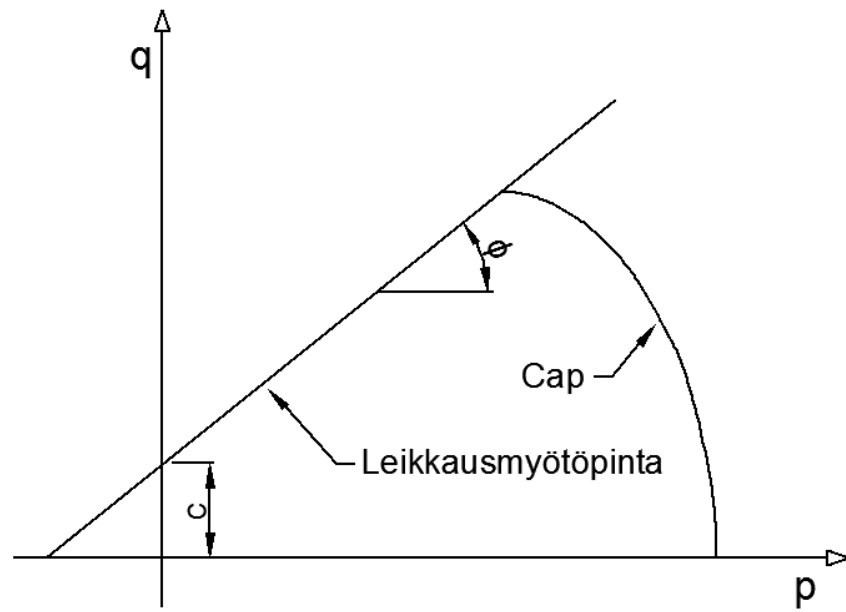
ja vastaavasti EDP-myötöehdon osalta

$$\sigma_y(\hat{\epsilon}_{pl}) = \frac{6c \cos \phi}{(3 - \sin \phi)}. \quad (3.22)$$

Kaavoja (3.21) ja (3.22) vertailemalla voidaan todeta sekaantumisen vaaran olevan olemassa. Samoin termit α ja β saavat hyvin samannäköiset muodot.

3.5 Laajennettu Drucker-Prager-materiaalimalli rajoitusehdolla

Jos hydraulista painetta syntyy mallissa kohtuuttomia määriä, tulisi huomioida myös DP-myötöpinnan ominaisuus, jossa myötöpinta voi kasvaa äärettömyyteen asti tietyssä tilanteessa. Materiaali kestää äärettömästi, jos sitä vain puristetaan joka puolelta tietyssä suhteessa tasaisella paineella. Tähän ratkaisuna toimii ns. Cap model [2]. Materiaalimalli on sama kuin aikaisemmin, mutta nyt kartionmuotoinen myötöpinta (jäätelövohveli) saa kaarevan pinnan sulkemaan kartion ”pohjan” (jäätelötötterö). Cap Model -myötöpinta esitetään usein (p,q) -tasossa (ks. kuva 8). Tätä ongelmaa ei kyseisessä tutkimuksessa tullut, sillä kuormat ja siten myös hydrauliset paineet ovat maltilliset.



Kuva 8. Cap model 2D-tasokuva, akselit hydrostaattinen paine p ja deviatorinen jännitys q .

4. TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT LASKENTA-OHJELMISTOT

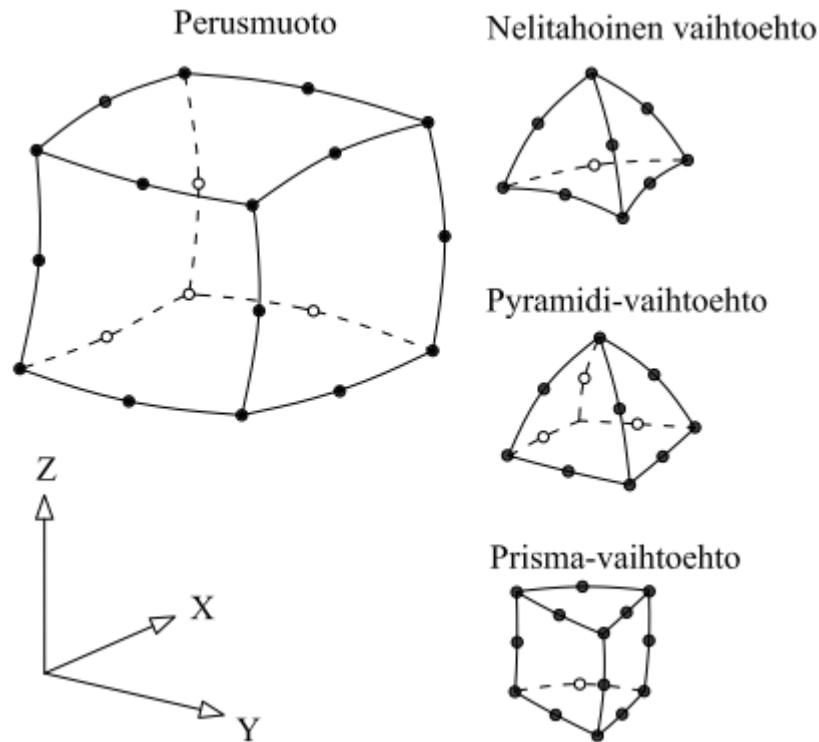
Tässä luvussa käydään läpi Ansyksen teknisiä asioita, kuten elementit, materiaalit ja yksikköjärjestelmä. Materiaalien osalta esitellään laskentamallissa käytetyt materiaalit parametreineen, joskin maamateriaalien osalta tiedot löytyvät luvuista 6.1 ja 6.2.

4.1 Elementit

Elementtimenetelmään perustuvissa FEM-ohjelmistoissa on käytettävissä monia erilaisia elementtityyppejä, jotka perustuvat kaikki tiettyyn lujuusopin teoriaan. Ansykessä erilaisia elementtityyppejä on lähes kaksisataa. Valtaosa laskennasta kuitenkin tapahtuu vakiintuneilla peruselementtityypeillä ja mukana on myös vanhoja, uudemmilla elementtityypeillä korvattuja ”legacy elementtejä”. Myös tässä tutkimuksessa käytetään hyvin tavallisia elementtityyppejä. Jokainen elementtityyppi sisältää kuitenkin oletuksia ja rajoituksia, jotka täytyy ottaa huomioon laskentamallissa ja sen tuloksia tulkittaessa.

4.1.1 Solid186

Solid186-elementti valittiin tilavuuskappaleiden peruselementiksi, koska se sopii hyvin kimmoisen kolmiulotteisen materiaalin (tilavuuden) mallintamiseen [2]. Tässä tutkimuksessa tilavuuskappaleita ovat maakerrokset ja korjatun rumpurakenteen väliin jäävä täyttöaine, polyuretaani tai betoni. Betoni on kuitenkin mallinnettu eri elementillä, joten siitä lisää luvussa 4.1.2.



Kuva 9. Solid186-elementin geometriset vaihtoehdot.

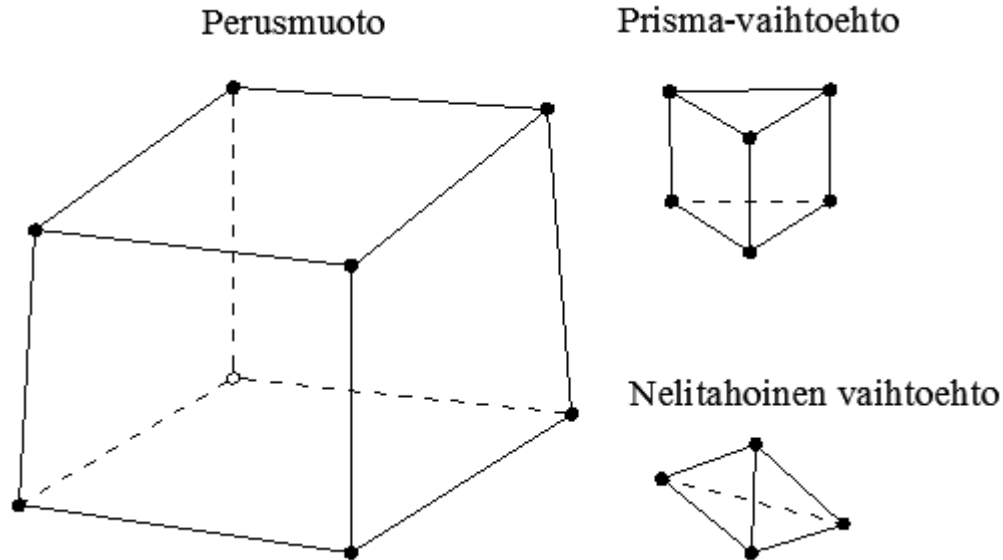
Solid186-elementti on 20-solmuinen kolmiulotteinen tilavuus- eli solidielementti, ks. kuva 9. Tämän elementin jokaisella solmulla on kolme vapausastetta, jotka ovat x-, y- ja z-suuntainen siirtymävapausaste. Elementille voidaan määrittää mm. plastiset tai hyperelastiset materiaaliominaisuudet, viruma ja jännityslujittuva käyttäytyminen. Lisäksi elementti tukee suurten siirtymien tai suurten venymien tehtäviä. Mahdollisia geometrisia muotoja varsinaisen perusmuodon lisäksi on nelitahoinen, pyramidinen ja prismaattinen muoto. Ansys-ohjelmistossa on myös erillinen tetraedielementti, Solid187 [2].

4.1.2 Solid65

Solid65 on 8-solmuinen erityisesti betonin mallintamiseen suunniteltu elementti [2]. Tällä elementillä voidaan kuvata ja mallintaa betonin halkeilua. Koska elementillä suositellaan geometrisista muodoista vain perusmuotoa, elementti soveltuu usein huonosti monimutkaisten tilavuuskappaleiden mallintamiseen. Tietysti monimutkaisen kappaleen voi jakaa pienemmiksi osiksi, mutta siitä on seurauksena vaikeutunut mallintaminen ja verkottaminen. Tässä tutkimuksessa kuitenkin betoni on mallinnettu Solid65-elementillä.

Työssä valmistauduttiin mallintamaan myös putkeen kohdistuvien mekaanisten rasitusten aiheuttamaa betonin halkeilua [22]. Koska osoittautui että rumpuun kohdistuvat rasitukset ovat niin pieniä, että betoni ei halkeile, ei elementin halkeiluominaisuus tullut

ikinä käyttöön. Betonin mallintaminen olisi tässä tapauksessa onnistunut siis yhtä hyvin käyttämällä Solid186-elementtiä. Todennäköisesti halkeilua tulee kuitenkin esiintymään, mutta siihen syynä voitaneen pitää pitkäaikaisolosuhteita ja ympäristönrasituksia, kuten lämpölaajenemista lämpötilan vaihtumisien mukaan tai sulamis-jäätymis-ilmiötä.



Kuva 10. Solid65-elementin geometriset vaihtoehdot.

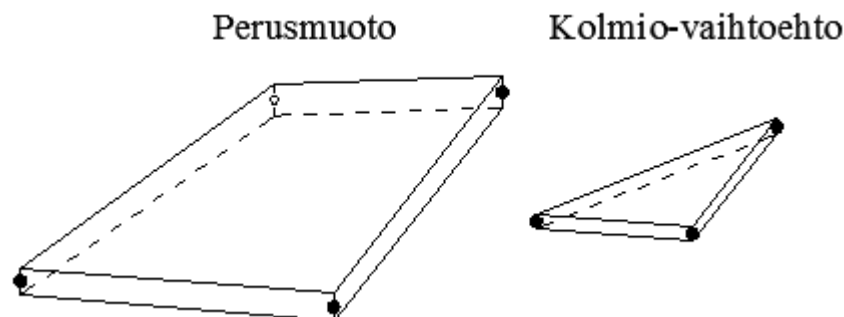
Geometrisia vaihtoehtoja Solid65-elementille on kolme, ks. kuva 10. Perusmuoto on 8-solmuinen tiilimuoto (brick-shape). Lisäksi vaihtoehtoina on prisman muotoinen kappale, sekä nelitahoinen vaihtoehto, jota ei kuitenkaan suositella käytettäväksi yli 10 % mallinnettavan kappaleen tilavuudesta [2].

4.1.3 Shell181

Kuorielementtiä, Shell181 [2], käytetään tässä työssä teräsputken ja kuormitusalueen mallintamiseen. Elementti sopii hyvin putkeen, koska sen paksuus suhteessa muuhun geometriaan on mitätön. Lisäksi, käyttämällä pintoja tilavuuksien sijaan, on nopeampi mallintaa (vrt. solidi-elementti) ja laskentakin on kevyempää, kun vapausasteiden lukumäärä vähenee. Elementtien vapausasteiden lukumäärä on vähintäänkin puolet pienempi putken osalta, useimmiten vain murto-osa.

Usein suomenkielisessä kirjallisuudessa erotetaan kuori-, laatta-, levy- ja kalvoelementti [24]. Näistä kuorielementti on yleisin tapaus eli se voi ottaa vastaan taivutusta ja kalvo-voimia. Kuorielementtiä voidaan hieman yksinkertaistaa jättämällä kalvo-voimat huomiotta, jolloin kyseessä on laattaelementti. Levy vuorostaan toimii vain kaksiulotteisesti eli se ei ota vastaan kuin tason suuntaisia voimia. Kalvoelementillä taas tarkoitetaan kaareutuvaa pintaa, joka kuljettaa kalvon suunnassa voimia, mutta ei vastusta taivutusta. Tällaisessa jaottelussa Shell181-elementti kuuluu kuorielementtikategoriaan, sillä se vastustaa taivutusta tason normaalin suunnassa ja kuljettaa kalvo-voimia.

Geometriset vaihtoehdot Shell181-elementille ovat suppeat. Perusmuoto on 4-solmuinen pinta-alakappale, jolle annetaan laskennallinen paksuus. Toisena vaihtoehtona on vastaavanlainen kolmisolmuinen kappale. Sitä suositellaan käytettäväksi vain täyte-elementteinä verkkoa luotaessa [2].



Kuva 11. Shell181-elementin geometria.

Lisäksi tässä työssä on käytetty pintaelementtiä Surf154 [2], joka tarkalleen ottaen on elementti, vaikkakin sitä käytetään reunaehdon mallintamiseen. Pinnalle voidaan määrittää ns. jousivakio - elastic foundation stiffness (EFS), jolla pinta saadaan joustavaksi oman normaalinsa suunnassa. Tässä tapauksessa jousivakion suuruus ei kuvaa yksittäisen pisteen siirtymää suhteessa voimaan, vaan pinta-ala-alkion siirtymää suhteessa paineeseen. Lisää asiasta luvussa 6.4.

4.2 Materiaalit

Maamateriaalien (luku 3.2) lisäksi laskentamallissa on käytetty mm. teräkselle lineaarista materiaalmallia, joka ei sisällä myötörajaa. Vaikka myötörajan sisältävän tai esimerkiksi myötölujittuvan materiaalin käyttäminen on teknisesti helppoa ja laskennallisesti kohtalaisen kevyttä, käytetään laskentamalleissa lineaarista materiaalmallia. Se on tässä tarkoituksessa riittävä, sillä teräksen jännitykset eivät tutkimuksen tilanteessa ole läheläkään myötörajaa. Samaa materiaalmallia käytetään myös tutkimuksen täyteaineille betoni ja polyuretaani. Kuten teräksellä, myös täyteaineilla rasitukset ovat pieniä, joten merkittävin ominaisuus on kimmomoduuli. Mainitaan vielä tässä kohtaa, että betonille saadaan kuitenkin ominaisuuksia, kuten halkeilu, käyttämällä eri elementtityyppejä kuin esimerkiksi polyuretaanille. Laskennassa käytettyjen eri materiaalien ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eri materiaalien ominaisuuksia.

Materiaali	$E \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	$\nu [-]$	$\rho \left[\frac{\text{tonni}}{\text{mm}^3} \right]$
Teräs	210 000	0.3	$7,85 \cdot 10^{-9}$
Betoni	31 000	0.2	$2,55 \cdot 10^{-9}$
Polyuretaani	50	0.48	$9,17 \cdot 10^{-11}$
Kuorma-alusta	1 000	0.495	$1,0 \cdot 10^{-10}$

4.3 Yksikköjärjestelmä

Ansyes tukee useita eri yksikköjärjestelmiä [2]. Oletuksena siinä on SI-järjestelmä. Käytännössä Ansyes ei kuitenkaan laske yksiköillä, eikä siten myöskään näytä vastauksissa yksiköitä. Asiayhteydestä voidaan päätellä tuloksen yksikkö. Laskennassa on käytetty kuitenkin yksikköjärjestelmää tonni (tn), mm, s, N, K, A, V. Olennaista on tiheyden ja putoamiskiihtyvyyden muutos voimaksi, joka menee myös näitä yksiköitä käyttämällä oikein. Voiman yksikkö

$$N = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \frac{1}{1000} \cdot \text{tn} \cdot 1000 \text{ mm} = \frac{\text{tn} \cdot \text{mm}}{\text{s}^2} . \quad (4.1)$$

4.4 Vertailulaskelmat

Mallinnuksessa käytettävien maaparametrien määrittämiseksi on suoritettu yksinkertainen laskennallinen testi, jossa verrataan eri materiaalimalleilla puristetun kuution muodonmuutoksia. Vertailussa käytetään ohjelmistoja Plaxis ja Ansyes. Plaxis-ohjelmiston maamallit ja parametrit on osoitettu luotettaviksi aikaisemmassa tutkimuksessa [14], joten ohjelman laskelmia voidaan tässä tapauksessa käyttää kuten mittaustuloksia.

4.4.1 Kuutiotesti

Kun kahden ohjelmiston välisiä parametreja halutaan verrata, on syytä tutkia mahdollisimman rajattua ongelmaa, jossa voidaan varmistua yhden asian vaikutuksesta muihin tekijöihin. Tätä periaatetta on sovellettu tässä tutkimuksessa, kun on määritetty eri maakerrosten kimmoisia parametreja. Jotta saadaan selville Ansyksessä käytettävien parametrien arvot, on sekä Ansyksellä että Plaxiksella luotu kuutiot, joiden sivujen pituus on yksi metri. Kuutiot muodostuvat vain yhdestä tutkittavasta materiaalista. Kuutioille asetetaan normaalinsuuntaiset tuennat joka puolelta, pois lukien yläpinta. Yläpinnoille ase-

tetaan kuormat ja kuutioiden muodonmuutokset, eli pystysuuntaiset piteuden muutokset lasketaan. Seuraavaksi verrataan eri ohjelmien laskemia tuloksia. Jos painumat ovat yhtä suuret, voidaan sanoa että tässä suljetussa ongelmassa materiaalit vastaavat toisinaan. Nimitetään tämä yksinkertainen ohjelmallinen vertailu kuutiotestiksi. Tässä tutkimuksessa tehdyn kuutiotestin tulokset rakennekerroksen osalta olivat hyvät, kun tehtävä suoritettiin laskennallisesti muutetuilla parametreilla. Testin parametrien arvot ja tulokset on esitetty taulukossa 2.

Yksittäisen maamateriaalin osalta päästiin halutulla laskentatarkkuudella käytännössä identtisiin tuloksiin eri laskentaohjelmistoilla. Tulokset ovat tosin päteviä vain rajatussa tilanteessa, eivät kuitenkaan isossa, kokonaisessa mallissa. Palataan seuraavan johtamisen jälkeen syyhyn, miksi tulosten paikkansapitävyys rajoittuu suljettuun ympäristöön.

Johdetaan Ansysksessä käytettävän kimmomoduulin ja Plaxiksessa käytettävän efektiivisen kimmomoduulin suhde suljetussa tilassa olevalle maamateriaalille. Lähtötilanteena on kimmoisen materiaalin jännityksen ja venymän suhteelle, joka on nimeltään Hooken laki. Se tunnetaan lujuusopissa [26] muodossa

$$\sigma = \varepsilon E . \quad (4.2)$$

Plaxis-ohjelmiston käyttämä kaava jännityksen ja venymän yhteydelle [5] on esitetty muodossa

$$\underline{\sigma}' = \underline{M} \underline{\varepsilon} , \quad (4.3)$$

joka tarkemmin sanottuna kuvaa infinitesimaalinen tehollisen jännitysinkrementin ja infinitesimaalisen venymäinkrementin suhdetta. Aukikirjoitettuna kaava saa muodon

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} \\ \dot{\varepsilon}_{yy} \\ \dot{\varepsilon}_{zz} \\ \dot{\varepsilon}_{xy} \\ \dot{\varepsilon}_{yz} \\ \dot{\varepsilon}_{zx} \end{bmatrix} . \quad (4.4)$$

Kuutiotestissä $\dot{\sigma}'_{yy} = \dot{\sigma}'_{zz}$ ja $\dot{\varepsilon}_{xy} = \dot{\varepsilon}_{yz} = \dot{\varepsilon}_{zx} = 0$. Kun käytetään merkintää $\dot{\sigma}'_{xx} = \sigma_1$, $\dot{\sigma}'_{yy} = \sigma_2$ ja $\dot{\sigma}'_{zz} = \sigma_3$, nähdään että

$$\sigma_1 = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \left((1-\nu') \dot{\varepsilon}_{xx} + \nu' \dot{\varepsilon}_{yy} + \nu' \dot{\varepsilon}_{zz} \right) , \quad (4.5)$$

$$\sigma_2 = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \left(\nu' \dot{\varepsilon}_{xx} + (1-\nu') \dot{\varepsilon}_{yy} + \nu' \dot{\varepsilon}_{zz} \right), \quad (4.6)$$

$$\sigma_3 = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \left(\nu' \dot{\varepsilon}_{xx} + \nu' \dot{\varepsilon}_{yy} + (1-\nu') \dot{\varepsilon}_{zz} \right). \quad (4.7)$$

Suljetussa tilanteessa maa-aines on kokoonpuristumatonta, mistä seuraa [25] että

$$\nu' = 0,5. \quad (4.8)$$

Kolmiaksisiaalisessa puristuskokeessa ollaan kiinnostuttu pääjännitysten σ_1 ja $\sigma_2 = \sigma_3$ erotuksesta

$$\sigma_1 - \sigma_3, \quad (4.9)$$

joka kuvaa kaavan (4.3) tehollista jännitystä $\underline{\sigma}'$. Erotuksen (4.9) tiedetään yhteyksien (4.5), (4.7) ja (4.8) perusteella olevan

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{3}{2(1+\nu')} E' \varepsilon. \quad (4.10)$$

Kaava (4.10) on nyt esitetty samassa muodossa kuin Plaxiksen jännitys-venymä-yhteys (4.3).

Kun kaavaa (4.10) verrataan Hooken lakiin (4.2), nähdään, että

$$E = \frac{3}{2(1+\nu')} E', \quad (4.11)$$

jossa E on Ansykseen syötettävä kimmomoduuli ja E' on Plaxiksen käyttämä tehollinen kimmomoduuli. Yhteys (4.11) löytyy myös Plaxiksen käyttöohjekirjasta [5]. Johdettu tulos on pätevä suljetussa ongelmassa. Kuitenkin osoittautuu, että sovellettaessa tulosta varsinaisen tutkimusongelman malliin, jossa on useita materiaalikerroksia ja jatkuvasti muuttuva jännityskenttä, tulos on korkeintaan suuntaa antava. Jos siis pääjännitysten σ_1 ja σ_3 suhde ei pysy samana jokaisessa laskentamallin pisteessä, kuten tutkittavan ongelman tapauksessa, niin myös jokaisessa toisistaan tässä suhteessa eroavassa pisteessä tulisi laskea uusi kimmomoduuli. Näin ei kuitenkaan ole toimittu, vaan Ansyksen laskentamalliin on haettu iteratiivisesti yksi sopiva kimmomoduuli.

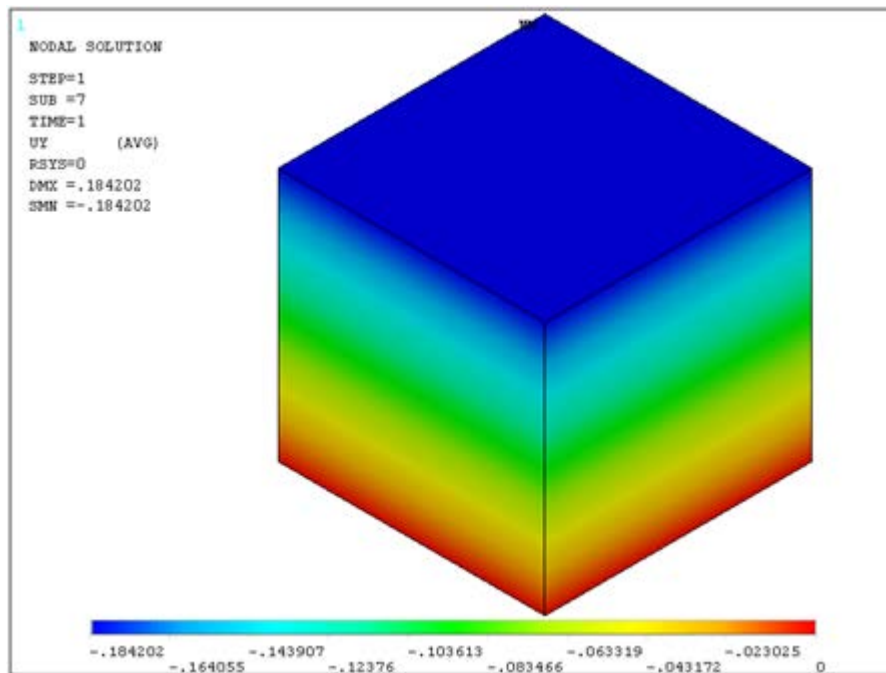
4.4.2 Kuutiotestin tulokset

Kuutiotestissä siis vertaillaan Plaxiksessa käytettyä MC-materiaalia ja Ansyksessä käytettyä DP-materiaalia. Materiaalien arvot on esitetty taulukossa 2.

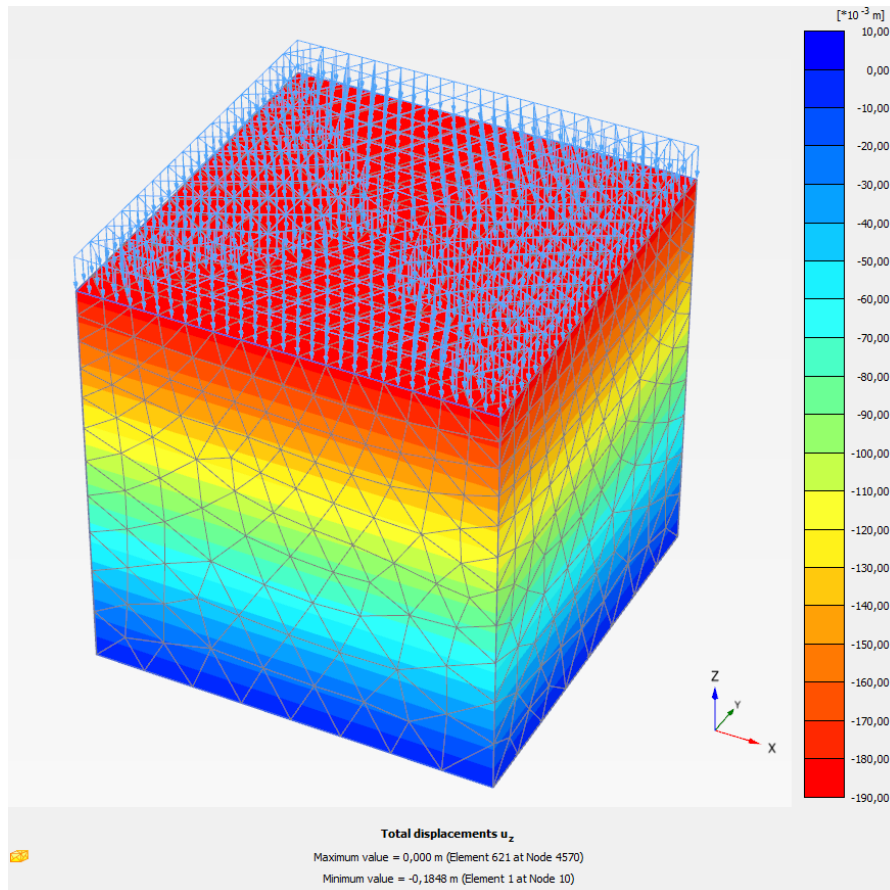
Taulukko 2. Kuutiotestissä käytetyt materiaaliparametrit ja painuma.

Ohjelmisto	E' [N/mm ²]	ν' [-]	E [N/mm ²]	ν [-]	Painuma [mm]
Plaxis	30	0,4	-	-	0,185
Ansys	-	-	32,143	0,495	0,184

Kuution yläpintaa kuormitetaan tasaisella kuormalla, jonka suuruus $q = 0,2 \text{ N/mm}^2 = 200 \text{ kPa}$ on valittu niin pieneksi, ettei materiaali myötää. Kuorman vaikutuksesta kuutio painuu kasaan 0,184 mm Ansyksen mukaan, kuten kuvassa 12. Plaxiksella painuma saa arvon 0,185 mm, joka on myös esitetty kuvassa 13. Ero syntyy Ansyksessä käytetystä Poissonin luvusta $\nu = 0,495$, kun yhteyden (4.8) mukaan sen tulisi olla tasan 0,5. Laskentaohjelmistoissa ei kuitenkaan suositella tai sallita Poissonin luvun arvoa 0,5, koska se aiheuttaa usein singulariteetin ja siten laskennan epäonnistumisen [2][5].

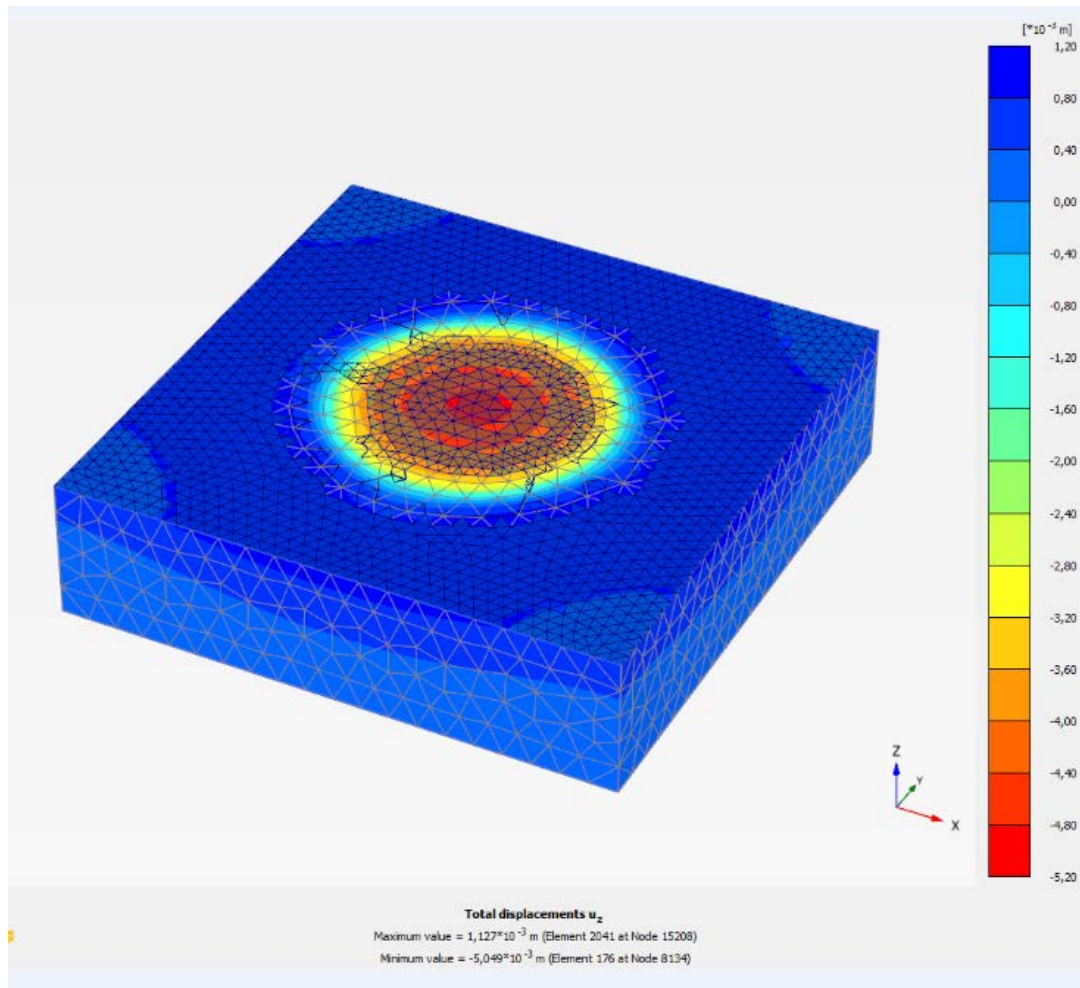


Kuva 12. Pohjamaan kuutiotesti Ansys-ohjelmistossa. Suurin siirtymä 0,184mm. Kuvan asteikon yksikkö on millimetri.



Kuva 13. Kuutiotestin tulos Plaxis-ohjelmistosta. Suurin siirtymä 0,185mm.

Kun testin tilannetta hieman monimutkaistetaan, esimerkiksi kuormittamalla vain osaa yläpinnasta (ks. kuva 14), testipalikkassa vaikuttava jännityskenttä ei olekaan enää vakio. Tästä johtuen kaavan (4.11) yhteys ei enää päde. On kuitenkin mahdollista löytää sellaiset parametrit, joilla laskentatulokset ovat riittävän lähellä toisiaan. Kuvan 14 tilanteeseen sopivat parametrit on esitetty taulukossa 3.



Kuva 14. Kuutiotesti, jossa kuormitettu vain osaa yläpinnasta. Kuvan asteikon yksikkö on millimetri.

Taulukoita 3 ja 2 vertailemalla huomataan, että kimmomoduulin lisäksi oleellisesti muuttuu painumien suuruus. Osittaisen kuorman tilanteessa painumat kasvavat lähes 30-kertaisiksi, joka selittyy reunojen kohoamisella. Tehtävässä oleellisinta on tilavuuden lähes täydellinen muuttumattomuus.

Taulukko 3. Osittaisen kuorman kuutiotestissä käytetyt materiaaliparametrit.

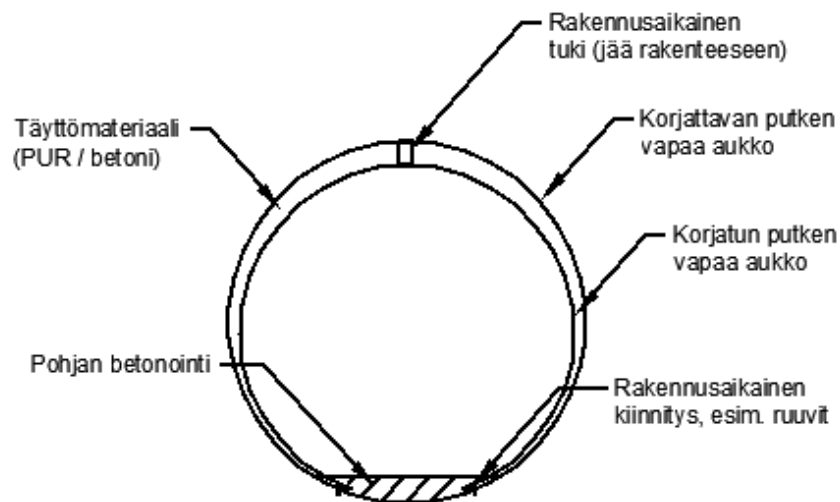
Ohjelmisto	E' [N/mm ²]	ν' [-]	E [N/mm ²]	ν [-]	Painuma [mm]	Kohouma [mm]
Plaxis	30	0,4	-	-	-5,05	1,13
Ansys	-	-	24	0,495	-5,07	1,28

5. RUMMUN KORJAUSMENETELMÄT JA KOEKOHTEET

Tutkimuksen alkuvaiheessa ideoitiin eri korjausvaihtoehtoja käyttöikänsä päähän tulleille tierummuille. Ideoista eteenpäin jalostettaviksi valikoituivat ns. halkaistu sisäputki ja puolipohjaus, joissa molemmissa korjattavan putken sisään viedään uusi putki tai sen osa. Vanha ja uusi putki kiinnitetään toisiinsa ja väliin jäävä tila täytetään betonilla tai polyuretaanilla.

5.1 Halkaistu sisäputki

Halkaistun sisäputken tapauksessa vanhaan vaurioituneeseen putkeen sujutetaan uusi, halkaisijaltaan pienempi, pohjasta halkaistu rumpuputki. Putki on halkaisun jälkeen sidottu kiinni halkaisukohdasta. 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 betonoitava tai polyuretaanilla täytettävä rako.



Kuva 15. Periaatekuva halkaisusujutuksesta.

Sujutetun putken pohja valetaan betonilla (ks. kuva 15), jotta halkaistu putki ei pääse painumaan kasaan myöhemmin sen ottaessa vastaan kuormituksia ympärystäytöstä ja/tai yläpuolisen rakenteen ja liikenteen kuormista. Betonivalun jälkeen putkien väliin jäävä rako täytetään. Raon on tarkoitus olla mahdollisimman pieni, mutta sen on kuitenkin oltava riittävän suuri, jotta se saadaan täytettyä luotettavasti valitulla täyteaineella. Näin syntynyt liittorakenne on vanhaa olemassa olevaa rakennetta jäykempi. Tästä

syystä täyteaineeksi on tutkimuksessa valittu betoni ja polyuretaani. Polyuretaani aiheuttaa vähemmän liittävaikutusta, jolloin rakenteen kokonaistoiminta ei muutu niin voimakkaasti. Samassa koekohteessa tutkitaan molemmat täyteainevaihtoehdot. Korjattava rumpu täytetään pituussuunnassa puoleen väliin asti betonilla ja loppuosa polyuretaanivaahdolla.

Halkaisusujutuksen koekorjauskohde sijaitsee paikallistiellä Raaseporissa, hyvin viettävällä savisella peltoalueella. Tie on sorapintainen ja sen leveys on lähes kuusi metriä. Itse rumpu on halkaisijaltaan tasan metrin ja se on n. kymmenen metriä pitkä. Rummun peitesyvyys vaihtelee välillä 0,2 ... 0,35 m. Rumpu ei ole vielä korrodoitunut kauttaaltaan puhki, sillä putken ainevahvuus on kaksi ja puoli millimetriä. Rumpu on keskikohdastaan tien alla hieman painunut. Rummun korjaamisesta huolimatta tavoitteena on säilyttää rummun virtaustilavuus mahdollisimman suurelta osalta, sekä pitää vesijuoksun taso mahdollisimman lähellä alkuperäistä.

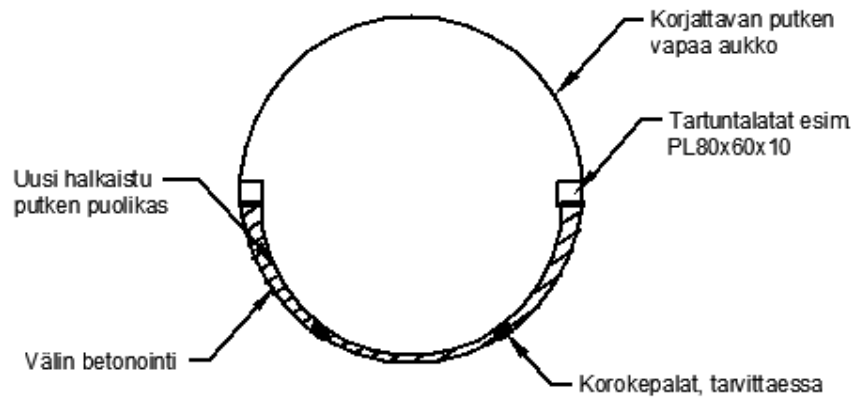
5.2 Puolipohjaus

Puolipohjauksessa korjattavaan putkeen sujutetaan uusi, puolikas teräsrumpu (ks. kuva 17). Uuden ja vanhan putken väli täytetään betonilla. Uuden putken kiinnitys vanhaan tehdään hitsaamalla kiinnityspalat putken korjattavan osan yläreunaan. Kiinnityspala on lattateräs 80×60×10 mm ja se on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Puolipohjauksen tartuntapala.

Kiinnityspalan tehtävä on estää valunaikainen paine ja pitää valumuottina toimiva putken puolikas paikallaan. Riittävä korroosion kestävyys kiinnityspalassa saavutetaan asettamalla kiinnityspalalle riittävä paksuusvaatimus (ks. luku 7.2.3). Tartuntapalat ovat työmaalla asennettu rumpuun n. 550 mm jaolla.



Kuva 17. Periaatekuva puolipohjauksesta.

Korjattava kohde sijaitsee Inkoossa. Teräsrummun halkaisija on 1200 mm ja sen pituus on n. kaksitoista metriä. Peitesyvyys muuttuu rummun pituussuunnassa voimakkaasti, sillä yläpäässä on 0,8 m ja alapäässä 0,3 m. Putken pohja on ajan saatossa syöpynyt puhki vesirajasta pitkältä matkalta. Todennäköisesti vuodenaikojen vaihtelujen takia rumpu on hieman vääristynyt muodoiltaan.

5.3 Kuormituskokeet

Tutkimukseen liittyen koekohteilla suoritettiin todellisen tilanteen kaltaiset mittaukset, joissa suurella kuormalla lastattu kuorma-auto ajettiin hieman normaalia ajonopeutta hitaammin rummun yli. Ylityksen aikana rummusta mitattiin pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutoksia, sekä teräksen venymiä rummun eri kohdista. Työn myöhemmässä osassa näitä tuloksia verrataan laskennassa saataviin tuloksiin.

5.3.1 Mitattavat suureet ja mittauslaitteet

Koekohteiden rummuista haluttiin mitata halkaisijan muutokset pysty- ja vaakasuunnassa. Suureet mitattiin koekohteilla tien molemmilta kaistoilta kolmesta kohdasta 900mm välein. Kuorma-autolla ajettiin rummun yli useasta eri kohdasta ja renkaan sijainti mittauslaitteisiin mitattiin. Lisäksi mitattiin venymät rummusta sen laelta sekä kolmannes-pisteistä. Mittaukset tehtiin sekä ennen korjaustoimenpiteitä että niiden jälkeen. Esimerkki mittauslaitteiden asennuksista on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Puolipohjauskohde instrumentoituna korjauksen jälkeen.

5.3.2 Halkaisijan muutos

Rummun halkaisijan muutoksia mitattaessa käytettiin 50mm siirtymäantureita. Siirtymäanturi oli kiinnitetty kahdesta halkaisijaltaan erikokoisesta teräsputkesta tehtyyn laitteeseen. Laitteessa putket pystyivät liikkumaan toistensa suhteen ja suuremman putken sisällä oli työntöjousi, jota vasten pienempi putki lepäsi. Putkissa oli kartionmuotoiset päät, jotka olivat kiinnitetty rummun seinämää vasten. Siirtymäanturi kiinnitettiin suurempaan putkeen ja pienemmässä putkessa oli vastakappale. Siirtymäanturi on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Halkaisijan muutoksen mittaamiseen käytetty siirtymäanturi.

Rummun halkaisijan muuttuessa teräsputket liukuvat enemmän sisäkkäin rummun puristuessa kasaan. Sama siirtymäanturi mittaa myös halkaisijan kasvua. Halkaisijan kasvuaessa jousi työntää pienempää putkea ulospäin, jolloin instrumentin pituus kasvaa.

Jousen aiheuttama voima voidaan katsoa olevan merkityksetön saatujen mittaustulosten kannalta.

5.3.3 Venymät

Venymien mittaamiseen käytettiin teräsputken pintaan liimattavia venymäliuskoja. Ennen liuskojen asentamista putken sisäpinta karhennettiin hiomapaperilla ja irtolika puhdistettiin. Tämän jälkeen kohta puhdistettiin vielä asetoniin kastetulla paperilla. Venymäliuskat asennettiin aina pareittain, sillä liuskan kunnollinen kiinnittyminen rumpuun selvisi vasta mittaustuloksia tarkastelemalla. Venymäliuskan kiinnitys on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Venymäliuska asennettuna. Vieressä toiselle liuskalle valmisteltu kohta.

5.3.4 Ajoneuvon ajolinjan mittaaminen

Tulosten tarkastelun kannalta olennainen tieto on ajoneuvon renkaiden sijainti suhteessa mittauslaitteisiin. Kun renkaan sijainnin ja mitatun halkaisijan muutoksen mittauspisteen sijainnit suhteessa toisiinsa tunnetaan, saadaan käsitys halkaisijan muutoksen muutosnopeudesta rumpun pituuden suunnassa. Ajolinjan etäisyyden mittaamiseen käytettiin laseretäisyysmittaria. Mittaustulosten varmistamiseksi tielle asetettiin myös shakki-lautakuvioitu muovimatto ja ylityshetki kuvattiin videokameralla (ks. kuva 21). Videolta pystytään jälkeenpäin katsomaan ajoneuvon ylityskohta tarkasti.



Kuva 21. Ajoneuvon ajolinjan mittaaminen.

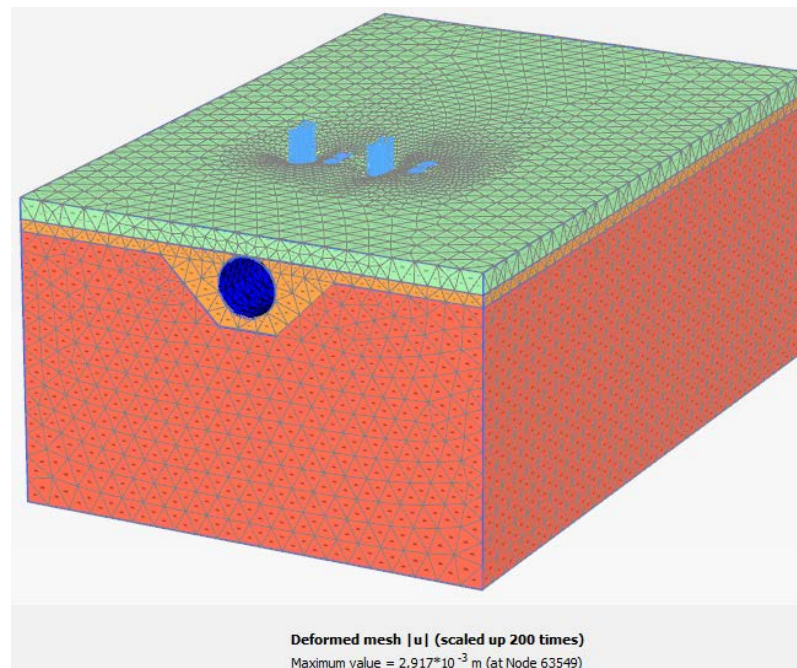
6. TUTKIMUSKOHTEIDEN MALLINTAMINEN

Tähän osioon on koottu loput tiedot laskentamalleista, joita ei aikaisemmissa osioissa ole ollut mielekästä selventää. Lisäksi osa materiaaliominaisuuksista on erilaiset riippuen korjauskohteesta, joten nekin on esitetty vasta tässä osiossa.

6.1 Halkaistu sisäputki mallinnettuna

Tutkimuksen lähtökohtana oli koekohteilla tehdyt mittaukset ja niiden perusteella kalibroivat laskentamallit Plaxis-ohjelmistolla, jonka tiedetään aikaisempien tutkimusten perusteella [14][25] kuvaavan tutkittavaa ilmiötä riittäväällä tarkkuudella. Laskentamallissa maa on mallinnettu kerroksittain kenttätutkimuksien mukaisesti. Usein tien rakenteet muodostuvat pohjamaasta, jakavasta ja kantavasta kerroksesta, sekä kulutuskerroksesta. Koekohteet sijaitsevat vähemmän liikennöidyillä teillä, joten päällimmäinen kerros on sorakulutuskerros.

Näitä Plaxiksella tehtyjä laskentamalleja käytettiin tutkimuksessa vertailukohtina Ansyskellä tehtyihin laskentamalleihin. Vertailun pääpainopisteenä ovat deformaatiot, sillä ne ovat myös koekohteilta mitattuja todellisia fysikaalisia suureita.



Kuva 22. Halkaisusujutuksen alkutilanne mallinnettuna Plaxis-ohjelmistoon.

Plaxis-ohjelmistossa geometriaksi on valittu suorakulmion muotoinen kappale, jonka reunojen vaakasuuntainen liike yläpintaa lukuun ottamatta on estetty. Luonnollisesti alalaidan pystysuuntainen liike on myös estetty. Rummun pituus on kaksitoista metriä ja mallin leveys on kahdeksan metriä. Rumpu on mallinnettu lieriönmuotoisella kappaleella ja sen peitesyvyys on 350 mm.

Tierakenteen kantavat kerrokset (rakennekerros 1 ja 2) ovat kuvassa 22 esitetty vihreällä ja keltaisella. Ylemmän kerroksen vahvuus on 350 mm ja alemman 200 mm. Mallin kokonaiskorkeus on viisi metriä. Rumpua pohjamaasta erottava ympärystäyttö ulottuu rummun alalaidasta 200 mm syvyyteen ja sen alalaidan leveys on sama kuin putken leveys. Täytön luiskakaltevuus on 1:1.

Seuraavaksi on taulukoitu kaikki Plaxis-ohjelmistossa käytetyt materiaaliparametrit ja niiden selitykset (ks. taulukko 4). Varsinaiset rakennekerrokset on mallinnettu käyttäen HS-materiaalimallia, jonka parametrit on esitetty taulukossa 5. Lisäksi mallissa on pohjamaan osalta käytetty MC-mallia, sekä kuormitusalueen ja teräsrummun osalta lineaarista materiaalimallia, jotka on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 4. *Materiaaliparametrien selitykset, Plaxis-ohjelmisto.*

Termi	Selitys
E_{50}^{ref}	Ensikuormituksen sekanttimoduuli
E_{oed}^{ref}	Ödometrimoduuli
E_{ur}^{ref}	Kuorman palautuksen tai toistokuormituksen sekanttimoduuli
c'	Koheesio
ϕ'	Leikkauskestävyyskulma
ψ	Dilataatiokulma
E'	Tehollinen kimmomoduuli
ν	Poissonin luku
t	Ainevahvuus
ν'	Tehollinen Poissonin luku
$S_{u,ref}$	Suljettu leikkauslujuus

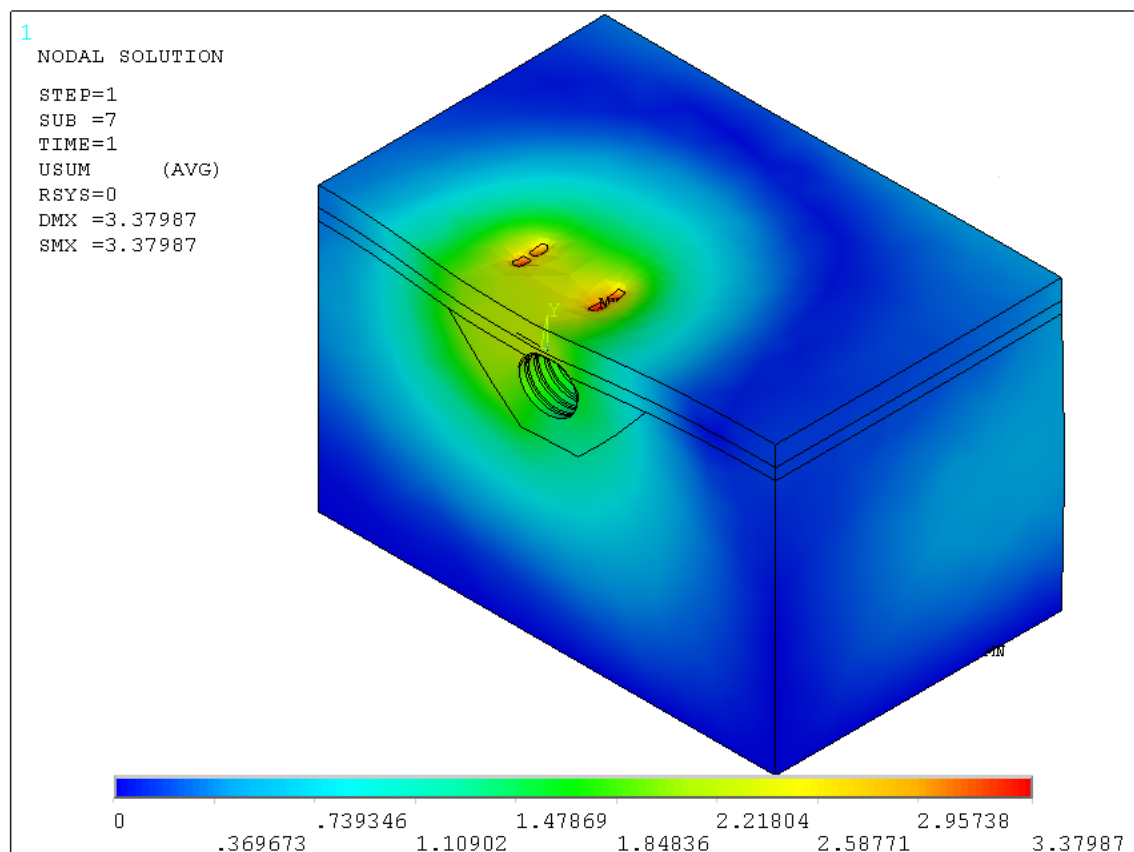
Taulukko 5. *Hardening soil -materiaaliparametrit Plaxiksessa, halkaistu sisäputki.*

Materiaali	E_{50}^{ref} [N/mm ²]	E_{oed}^{ref} [N/mm ²]	E_{ur}^{ref} [N/mm ²]	c'_{ref} [kN/m ²]	ϕ' [°]	ψ [°]
Rakennekerros 1	300	205	600	20	50	20
Rakennekerros 2	150	120	300	10	45	15
Ympärystäyttö	150	150	300	5	38	8

Taulukko 6. Lineaarielastisten materiaalien parametrit Plaxiksessa, halkaistu sisäputki.

Materiaali	E' [N/mm ²]	ν [-]	t [mm]	ν' [-]	$S_{u,ref}$ [kN/m ²]
Kuormitusaluusta	1000	0,495	10	-	-
Teräsrumpu	210 000	0,3	2,5	-	-
Pohjamaa	65	-	-	0,4	45

Ansysto-ohjelmistossa geometria on valittu samoin kuin Plaxis-ohjelmistossa. Pieni ero syntyy symmetriaehdon käyttämisestä, sillä näin mallin pituus (putken suunnassa) näyttyy vain puolena. Todellisessa laskennassa malli kuitenkin käyttäytyy, kuin putken pituus olisi kaksitoista metriä. Symmetriaehdosta kerrotaan lisää luvussa 6.5. Laskentamallissa käytetyt materiaaliparametrit on esitetty taulukoissa 7, 8 ja 9. Kuvassa 23 symmetriaehtoa on käytetty lounaaseen osoittavalla sivulla.



Kuva 23. Halkaisusujituksen alkutilanteen ratkaisu Ansys-ohjelmistossa. Kuvan suurena kokonaissiirtymä. Lounaaseen osoittavalla reunalla on määritetty symmetriaehto.

Taulukko 7. *Materiaaliparametrien selitykset, Ansys-ohjelmisto.*

Numeroviittaus	Nimi-vuosiviittaus
E	Kimmomoduuli
ν	Poissonin luku
β	Paineherkkyys-parametri, ks. kaava (3.15)
σ_y	Myötölujuus, ks. kaava (3.18)
$\bar{\alpha}$	Paineherkkyys-parametri (plastic flow)
t	Ainevahvuus

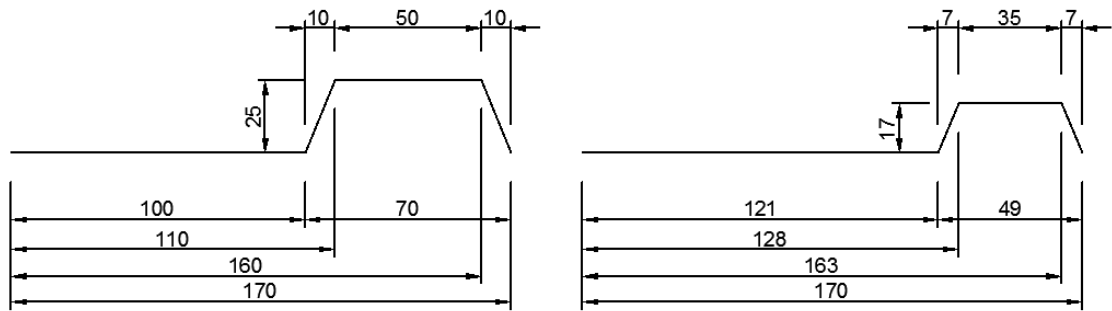
Taulukko 8. *Drucker-Prager –materiaaliparametrit Ansyskessä, halkaistu sisäputki.*

Materiaali	E [N/mm ²]	ν [-]	β [-]	σ_y [-]	$\bar{\alpha}$ [-]
Rakennekerros 1	150	0,3	0,686	34,5	0,617
Rakennekerros 2	75	0,3	0,617	18,5	0,555
Ympäristäyttö	40	0,3	0,516	9,91	0,465
Pohjamaa	10	0,495	0	40	0

Taulukko 9. *Lineaarielastisten materiaalien parametrit Ansyskessä, halkaistu sisäputki.*

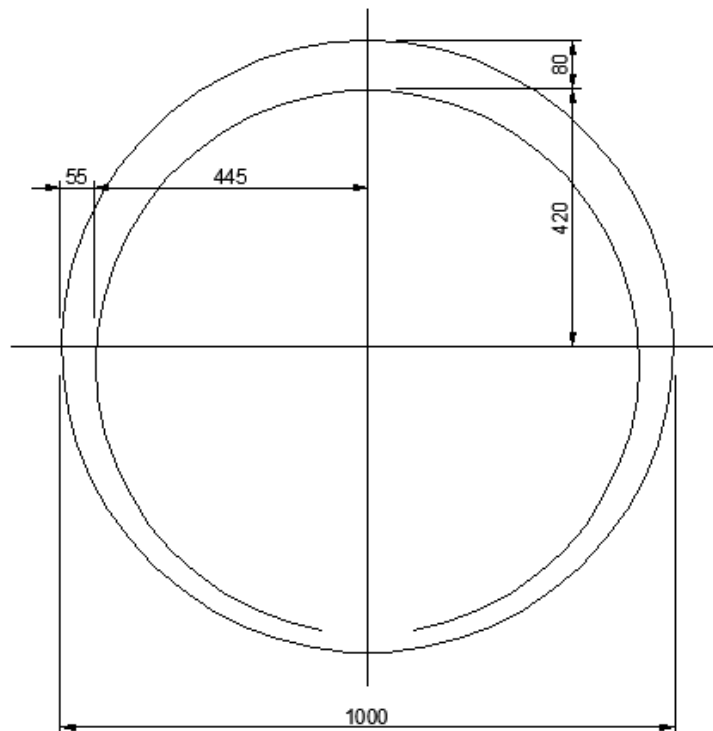
Materiaali	E [N/mm ²]	ν [-]	t [mm]
Kuormitusaluusta	1000	0,495	10
Teräsrumpu	210 000	0,3	2,5
Betoni	31 000	0,2	-
Polyuretaani	250	0,3	-

Korjauskohteiden rumpujen profiileista löytyi tietoa arkistoista ja työmaalla tehtiin tarkistusmittaus tiedon paikkansapitävyydestä. Uuden halkaistun putken todellista profiilia ei yrityssalaisuuden nimissä voida paljastaa. Profiili on kuitenkin mallinnettu valmistajan antamien lähtötietojen perusteella, siten että sen taivutusvastus ja ainevahvuus vastaavat alkuperäistä. Vanhan profiilin ainevahvuus 2,5 mm on ja uuden 1,5 mm. Laskennassa käytettyjen profiilien muut dimensiot on esitetty kuvassa 24. Rumpuprofiilit on mallinnettu pyörähdyssymmetrisesti, vaikka todellisuudessa profiili kulkee ruuville kiertyen putken keskilinjaan nähden.



Kuva 24. Laskennassa käytetyt rumpujen profiilit. Vasemmalla olemassa oleva ja oikealla uusi.

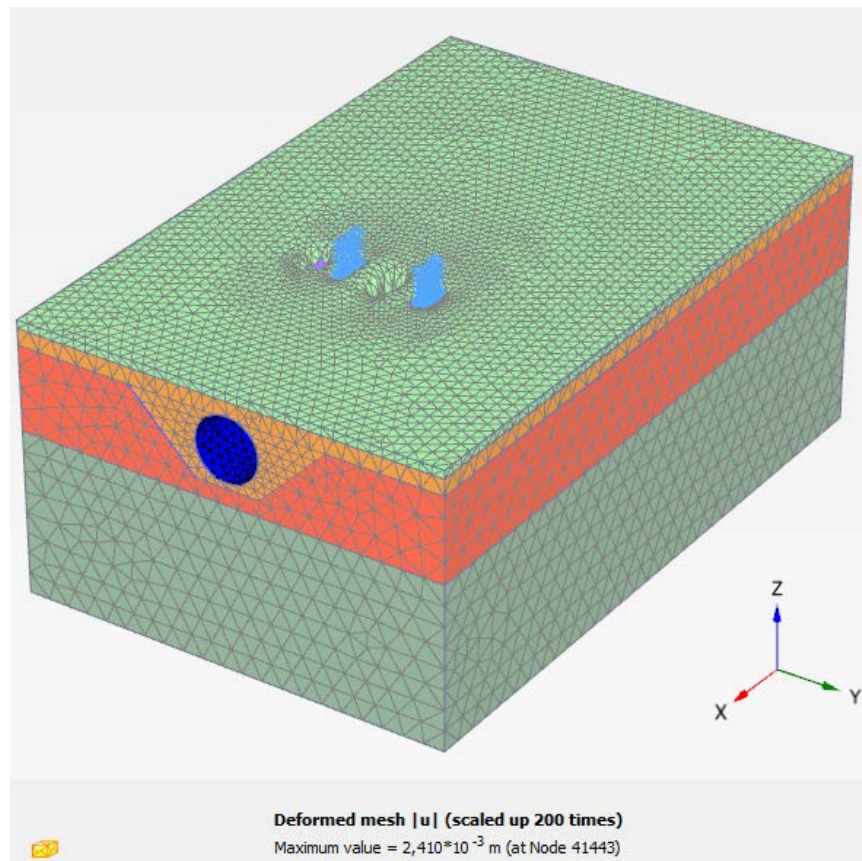
Uuden ja vanhan putken väliin jäävä tila yritettiin toisaalta minimoida rumpun virtaus-tilavuuden säilyttämiseksi mahdollisimman lähellä entistä, toisaalta taas onnistuneen betonoinnin kannalta on tärkeää, että rako on riittävän suuri. Polyuretaani-vaahdolla tehtävä täyttö ei vaadi aivan niin suurta väliä. Työmaalla tehtyjen mittausten perusteella malliin valittiin kuvan 25 mukaiset etäisyydet.



Kuva 25. Uuden ja vanhan putken asemoituminen. Mitat on esitetty rumpujen sisähalkaisijoista.

6.2 Puolipohjaus mallinnettuna

Myös puolipohjauskohteen mallintamisen lähtökohtana oli Plaxiksella tehty vertailumalli. Koekohde ja siitä tehty laskentamalli muistuttaa hyvin paljon halkaisusujutuksen kohdetta (ks. luku 6.1). Vanhan putken profiilin, rakennekerrosten paksuuksien ja materiaalien jäykkyysparametrien lisäksi eroavaisuutena on lähellä maanpintaa sijaitseva kallio, joka näkyy alimmaisena kerroksena kuvassa 26.



Kuva 26. Halkaistu sisäputki mallinnettuna Plaxikseen.

Rakenteen kantavakerros on 150 mm ja jakava kerros 300 mm paksu. Rummun yläpinta sijaitsee alemman rakennekerroksen alapinnassa, joten yhteenlasketuksi peitesyvyydeksi tulee lähes puoli metriä. Kallion pinta on kahdessa metrissä maanpinnasta nähden ja sen paksuudeksi mallissa on valittu kolme metriä. Kokonaiskorkeudeksi tulee siis sama viisi metriä. Kallio on mallinnettu lineaarielastisena materiaalina. Mallin leveys ja pituus ovat samat kuin halkaisusujutuksessa. Plaxis-mallissa käytettyjen materiaalien parametrien arvot ovat esitetty taulukoissa 10 ja 11. Taulukoissa on esitetty vain materiaalit, joiden arvot muuttuvat halkaisusujutuksen tilanteesta.

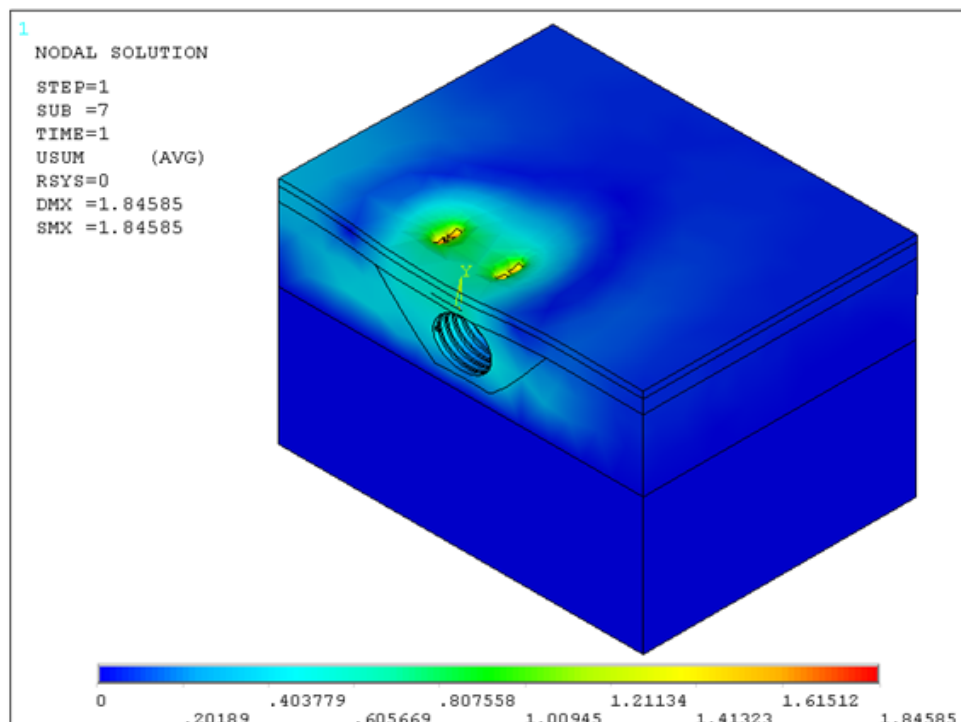
Taulukko 10. *Hardening soil -materiaaliparametrit Plaxiksessa, puolipohjaus.*

Materiaali	E_{50}^{ref} [N/mm ²]	E_{oed}^{ref} [N/mm ²]	E_{ur}^{ref} [N/mm ²]	c'_{ref} [kN/m ²]	ϕ' [°]	ψ [°]
Rakennekerros 1	325	225	650	20	50	20
Rakennekerros 2	200	165	400	10	45	15
Ympäristäyttö	150	150	300	5	28	8

Taulukko 11. *Linearielastisten materiaalien parametrit Plaxiksessa, puolipohjaus.*

Materiaali	E' [N/mm ²]	ν [-]	t [mm]	ν' [-]	$S_{u,ref}$ [kN/m ²]
Pohjamaa	50	-	-	0,4	35
Kallio	2500	0	-	-	-

Ansysissä tehdyn mallin geometria on tehty vastaavalla tavalla kuin halkaisusujutuksen tapauksessa. Geometria on sama kuin Plaxis-ohjelmistossa ja mallissa on käytetty symmetriaehtoa (ks. luku 6.5). Laskentamallissa käytetyt materiaaliparametrit ovat esitetty halkaisusujutuksesta muuttuneilta osin taulukoissa 12 ja 13.

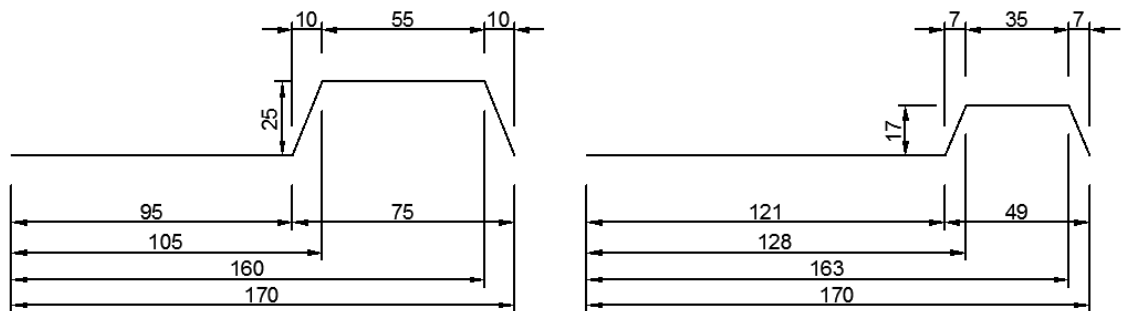
**Kuva 27.** *Puolipohjauksen alkutilanteen ratkaisu Ansys-ohjelmistossa. Kuvan suurena kokonaissiirtymä.*

Taulukko 12. Drucker-Prager -materiaaliparametrit Ansyksessä, puolipohjaus.

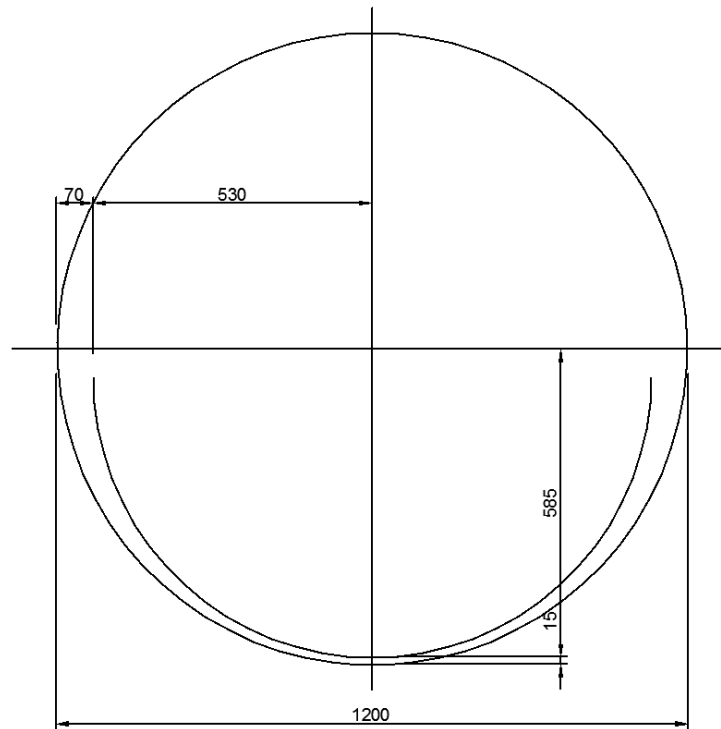
Materiaali	E [N/mm ²]	ν [-]	β [-]	σ_y [-]	$\bar{\alpha}$ [-]
Rakennekerros 1	100	0,3	0,686	34,5	0,617
Rakennekerros 2	165	0,3	0,617	18,5	0,555
Ympäristäyttö	40	0,3	0,686	34,5	0,617
Pohjamaa	10	0,495	0	70	0

Taulukko 13. Linearielastisten materiaalien parametrit Ansyksessä, puolipohjaus.

Materiaali	E [N/mm ²]	ν [-]	t [mm]
Betoni	31 000	0,2	-
Kallio	2500	0	-

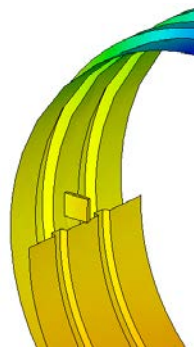
**Kuva 28.** Puolipohjauskohteen vanha (vas.) ja uusi (oik.) profiilit.

Vanhan rumpuputken profiili mitattiin työmaalla ja se on esitetty kuvassa 28. Vanhan profiilin ainevahvuus on kolme ja uuden puolitoista millimetriä. Uuden putken sijainti vanhaan putkeen on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Uuden ja vanhan putken asemoituminen. Mitat on esitetty rumpujen sisähalkaisijoista.

Vanha rumpu on liitetty hitsatuilla teräslatoilla uuteen rummun puolikkaaseen. Tartuntapalat on mallinnettu solidi-elementeillä (ks. kuva 30), joilla on yksi yhteinen pinta vanhan rummun kanssa ja uuteen rumpuun liitos on viivamainen. Tartuntapaloissa ei ole mallinnettu todellista kiinnityslovea, vaan uusi rumpu kiinnittyy palan alalaitaan. Tartuntapalat oli työmaalla asennettu n. 55cm välein, joskin välit vaihtelivat hieman rummun profiilin mukaan. Mallinnuksessa tartuntapalojen jako on 51cm profiilin jaksollisuuden vuoksi. Koska vallitsevat jännitykset teräksessä ovat kaikkialla hyvin pienet, ei erolla ole huomattavaa merkitystä. Lisäksi tartuntapaloilla on riittävä kapasiteetti myös huomattavasti syöpyneinä (ks. luku 7.2.3), joten voidaan todeta valitun mallinnustarkkuuden olevan riittävä.



Kuva 30. Solidielementeillä mallinnetulla tartuntapalalla on yksi yhteinen pinta vanhan rummun kanssa ja viivamainen kosketuspinta uuteen rumpuun.

6.3 Maan alkujännitykset

Maata mallinnettaessa on tärkeää huomioida painovoimasta ja tiivistämisestä aiheutunut alkujännitystilä. Maan massalla on yleensä huomattava vaikutus kaikissa maahan liittyvissä tutkittavissa ilmiöissä, kuten myös tässä. Maan paino aiheuttaa jännityksiä maahan ja jännitykset taas vaikuttavat myötöpintaan sekä siihen milloin ja missä se kohdataan. Esimerkiksi halkaisusujutuksen korjatussa tilanteessa, jossa täyteaineena on betoni, alkujännitykset rummun pohjan tasossa ovat luokkaa 70 kPa ja rengaskuorman aiheuttama jännityslisäys n. 18 kPa, joten alkujännitysten vaikutus on verrattain suuri.

Painovoiman huomioiminen on kuitenkin konstikas asia Ansys-ohjelmistossa. Malli on aluksi kuormittamaton ja siten jännityksetön. Painovoiman ei ole mielekäs aiheuttaa deformaatioita, sillä todellisuudessa tutkitaan halkaisijan muutoksia vasta painovoiman tehtyä rumpuun omat muodonmuutoksensa. Laskentaohjelmassa siis ensin kuormitetaan lopullinen geometria painovoimalla, jolloin malliin syntyy siirtymiä ja siten jännityksiä. Tämän jälkeen siirtymät nollataan, mutta jännitykset säilytetään. Toisessa vaiheessa mallissa huomioidaan myös muut kuormat.

6.4 Puoliääretön reuna

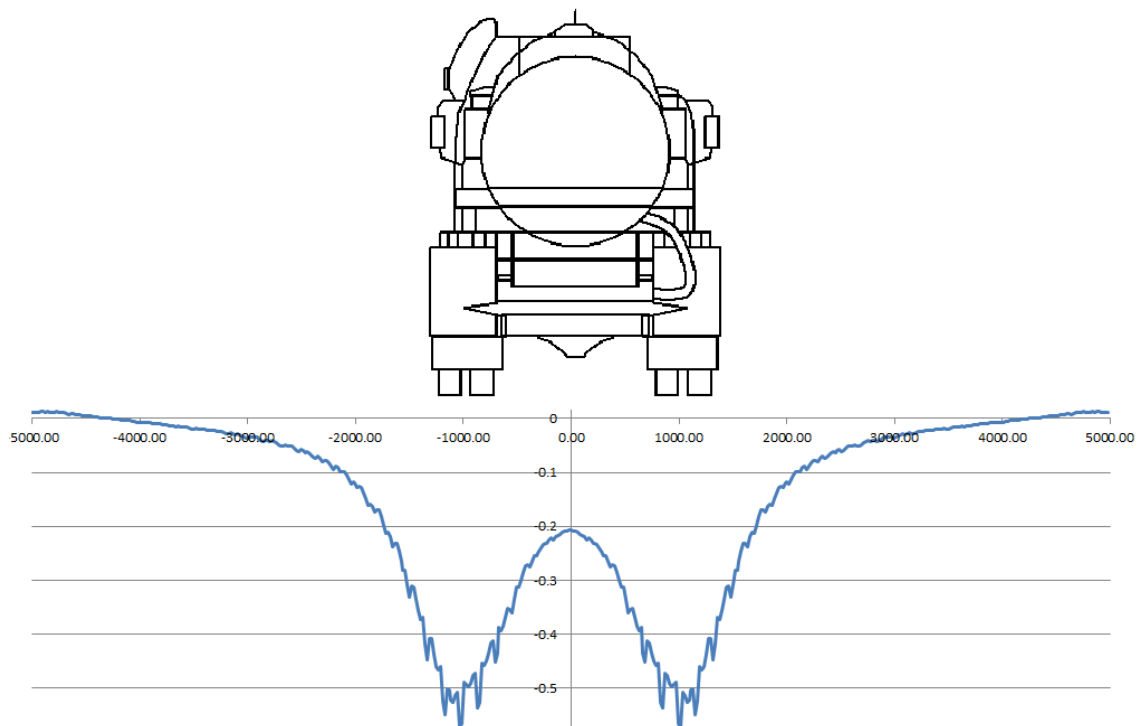
Mallintaessa on tutkittu myös vaihtoehtoa, jossa jäykän reunan sijaan mallinnetaan joustava reuna. Reunaan luodaan puoliäärettömät jousielementit (Surf154 [2]), joille määritetään ns. jousivakio – elastic foundation stiffness, jolla pinta saadaan joustavaksi oman normaalinsa suunnassa. Yleensä jousivakion yksikkö on voima per pituus (N/mm), mutta tätä elementtiä käytettäessä määritetäänkin voima per pinta-ala per pituus (N/mm²). Tässä tapauksessa jousivakion suuruus ei siis kuvaa yksittäisen pisteen siirtymää suhteessa voimaan, vaan pinta-ala-alkion siirtymää suhteessa paineeseen.

Jousielementtejä käyttämällä reuna kuvaa paremmin maan jatkuvuutta, vaikka tarkasteltavalla tasolla tästä tarkkuuden lisääntymisestä ei ole kuitenkaan merkittävää hyötyä. Tässä tavassa on kuitenkin etunsa. Jos alustavassa vaiheessa tarvitaan useita laskentakertoja, esimerkiksi parametrien määrittämiseen tai niiden oikeellisuuden testaamiseen, voidaan mallin fyysisiä dimensioita huomattavasti pienentää. Tästä seuraa pienentynyt elementtien ja vapausasteiden määrä, joten laskenta-aika vähenee vähintäänkin samassa suhteessa.

Useita erilaisia yhdistelmiä mallin eri dimensioita ja niitä vastaavia jousivakiota käyttämällä yritettiin etsiä hyvää tasapainoa laskennan keveyden ja riittävän tarkan tuloksen välille. Yhteenvetona voitaneen kuitenkin todeta tässä yhteydessä työn menneen haastukseen, sillä merkittävää hyötyä puoliäärettömästä reunaehdosta ei sen määrittämisen työläyden takia saavutettu.

6.5 Symmetriaehto

Laskenta-ajan vähentämiseksi mallia on pienennetty kuvaamalla mallista vain puolet ja määrittämällä yhdelle reunalle symmetria-akseli. Ansyksessä 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 tippuu vähintäänkin saman verran. Käyttäjän kokemukseen perustuen, laskenta-aika näyttäisi pikemminkin putoavan vapausasteiden lukumäärän vähenemän toiseen potenssiin. Tätä puoltaa myös ajatus, että ratkaistavien jäykkyyssmatriisien alkioiden lukumäärä vähenee kahdessa ulottuvuudessa, jolloin ratkaistavia yhtälöitä on vähemmän toiseen potenssiin. Symmetriaehto luo nyt tilanteen, jossa kuorma-autosta on otettu huomioon kaksiakselisen telin kaikki neljä rengasparia. Kuvan 31 mukaan näyttäisi siltä, että renkaiden kohdalla oleva kuorma aiheuttaa rummun halkaisijan muutosta noin neljän metrin etäisyydelle molempiin suuntiin, joten on perusteltua mallintaa molemman reunan renkaat. Kuvassa pystyakselina on rummun pystyhalkaisijan muutos ja vaaka-akselilla on etäisyys tien poikkileikkauksen suunnasta. Nollakohta on tien keskikohdalla ja siinä sijaitsee myös symmetria-akseli. Rengaslinjan painopiste on n. yhden metrin etäisyydellä tien keskipisteestä.



Kuva 31. Havainnekuva putken pystyhalkaisijan muutoksesta tien poikkisuunnassa. Symmetria-akseli sijaitsee kuvan tilanteessa tien keskilinjalla, x -akselin nollakohdassa.

Kuva 31 antaa ymmärtää, että halkaisijan muutoksen kannalta merkittävin tilanne olisi sellainen, jossa kuorma-auto kulkee keskellä tietä. Todellisuudessa kuitenkin määräävä tilanne oli usein renkaiden kulkiessa tiehen syntyneissä ajourissa.

6.6 Verkkiippumattomuus

Elementtimenetelmällä voidaan joissain tilanteissa saada tarkka tulos riippumatta verkon tiheydestä. Siihen vaikuttavat kuormitustilanne ja elementin ominaisuudet. Usein tarkkaa tulosta ei kuitenkaan saada, vaan ratkaisun tarkkuus riippuu verkon tiheydestä.

Esimerkiksi jännitykset lasketaan siirtymien derivaatoista, joten saadut jännitysten arvot elementin reuna-alueilla voivat poiketa verkon tiheydestä riippuen [18]. Käytännössä yksi helppo tapa tutkia tuloksen virheen suuruutta on tihentää ja harventaa verkkoa testinomaisesti. Jos verkkoa tihentämällä tulos ei muutu prosentuaalisesti jotain sovittua arvoa enemmän, voidaan verkon todeta olevan riittävän tiheä. Toisaalta verkkoa harventamalla saadaan myös tärkeää tietoa. Jos laskenta-ajat ovat merkittävän pitkät, verkkoa harventamalla kannattaa tutkia onko verkko tarpeettoman tiheä ja siten laskennalle turhan työläs.

6.7 Kontaktin mallintaminen

Tässä tutkimuksessa kokeiltiin myös kontaktipinnan käyttämistä rumpujen ja niiden välissä olevan betonin yhteisvaikutuksen mallintamiseen [32]. On hyvin todennäköistä että ajan kuluessa rumpuputkeen valettu betoni halkeilee ja irtoaa teräksestä. Tästä johtuen ainoastaan rummun säteen suuntaiset normaalivoimat välittyvät uudesta rakenteesta vanhaan. Rummun tangentin suuntaisten kalvovoimien tulee siirtyä jotenkin muuten kuin betonin leikkausvoimien kautta. Ilmiö on merkittävä erityisesti puolipohjauskohdeissa, jossa päädyttiin käyttämään kiinnityspaloja kalvovoimien välittämiseen. Kaikkien kalvovoimien on siirryttävä vanhalta rakenteelta korjatulle osalle tartuntapalojen kautta. Halkaistun sisäputken kohteessa tilanne on hieman erilainen, koska siellä korjattu rakenne on yhtenäinen koko piirin ympäri. Yhtenäisyyden ansiosta liukumaa betonin ja rummun väliin ei pääse syntymään.

Kontakti voidaan määrittää sellaiseksi, että se välittää vain puristusta. Puristuksesta syntyvää kitkaa ei laskenta-asetuksesta riippuen huomioida. Koska putken välin täyttöaineen ja teräsputken pinnan välistä kitkakerrointa ei tunneta, tehtiin myös malli kokonaan ilman kitkaa.

Kontaktit luomalla laskenta-aika kasvaa huomattavasti, sillä laskennasta tulee hyvin epälineaarista. Lisäksi kontaktiparien määrittäminen on kohtalaisen työlästä, sillä profiloitu putki on mallinnettu hyvin pieninä pinta-alapaloina. Jokaiselle palalle täytyy osoittaa vastapari. Näistä syistä johtuen keskityttiin tutkimaan kontaktin vaikutusta ns. siivumallissa, joka on vain kapea osa kokonaista laskentamallia. Siivun leveys määräytyi putken profiilin jakson mukaan, joka on noin kaksisataa millimetriä. Lisäksi mallin muuta geometriaa pienennettiin, jotta ratkaisuun tarvittava aika pienenesi. Tietenkin tämä aiheuttaa myös jonkinlaista virhettä ratkaisuun, erityisesti verrattaessa johonkin todelliseen suureeseen, kuten pystyhalkaisijan muutokseen. Kontaktimallissa ollaan

kuitenkin kiinnostuneita enemmänkin kontaktin aiheuttamasta suhteellisesta muutoksesta tilanteeseen, jossa putken pinnan ja täyttöaineen välille oletetaan täydellinen liitos.

Kontaktilla mallinnetun putken ja täydellisen liitoksen tilanteen välillä ei tässä laskennassa synny merkittävää eroa. Pystyhalkaisijan muutoksia verrattaessa muutos oli kahden prosentin luokkaa, ks. taulukko 14. Koska kontaktin mallintamisessa tehtiin paljon yksinkertaistuksia, tulos on korkeintaan suuntaa-antava. Muu laskenta suoritettiin pääsääntöisesti olettamalla täydellinen liitos.

Taulukko 14. *Pintojen välisen kontaktin mallintamisen vaikutuksia.*

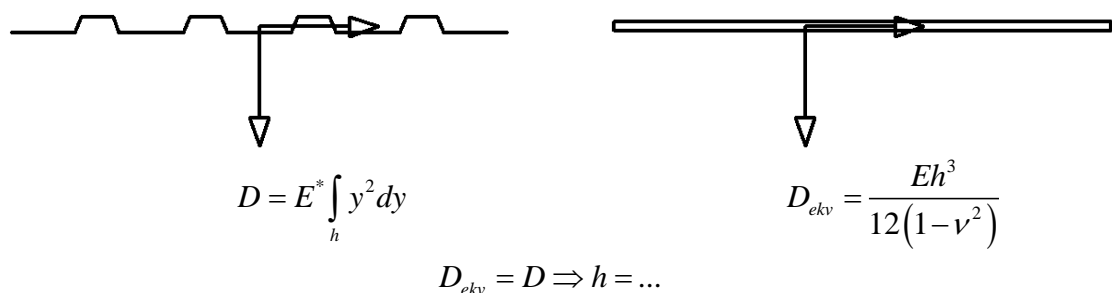
	Kontaktilla	Täydellinen liitos
Pystyhalkaisijan muutos	1,53 mm	1,56 mm
Vaakahalkaisijan muutos	1,02 mm	1,17 mm
Laskenta-aika	n. 4 h	n. 30 min

6.8 Kuormituskohta

Renkaiden maahan välittämän voiman mallintamiseen on käytetty kahdeksankulmaista laattaelementtiä [13]. Laatta-elementti on siis suorakulmio, josta on leikattu kulmat pois. Kulmasta leikattavan tasakylkisen kolmion sivun mitta on kolmekymmentä millimetriä. Elementin yläpinnalle on asetettu 800 kPa painekuorma, joka vastaa koekohteissa käytetyn kuorma-auton rengaspainetta. Laatan koko määräytyy tien leveyden suunnassa renkaan leveyden mukaan ja toisessa siten, että telin kokonaispainoksi tulee 210 kN. Kuormitusalueella on käytetty lineaarielastista materiaalmallia, jonka ominaisuudet on esitetty taulukossa 9.

6.9 Rakenteellinen ortotropia putkessa

Putken mallintamisessa tutkittiin myös rakenteellisen ortotropian käyttämistä. Käytännössä se tarkoittaa putken aineominaisuuksien määrittämistä kahteen eri suuntaan erilaisiksi siten, että kuori saadaan mallinnettua lieriönä ja kuitenkin sen pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutos ja taipuma palkkina vastaavat aaltogeometrialla mallinnetun putken vastaavia arvoja. Aaltogeometrian muutos lieriögeometriaan on esitetty kuvassa 32.



$$D = E^* \int_h y^2 dy$$

$$D_{ekv} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$D_{ekv} = D \Rightarrow h = \dots$$

Kuva 32. *Putken mallintaminen ortotrooppisena materiaalina.*

Poimujen suunnassa profiilin neliömomentti syntyy pääosin Steinerin termistä. Voidaan kuitenkin tehdä muutos lieriögeometriaan, jolloin jollakin ainevahvuudella neliömomentit kohtaavat. Ilman eri materiaaliominaisuuksia aiheutuisi huomattava virhe putken suunnassa eli poimuja vastaan kohtisuorassa. Se johtuu yksinkertaisesti siitä, että aaltopellin taivutusominaisuudet putken suunnassa eivät juuri poikkea aaltopellin todellisen ainevahvuuden omaavasta lieriöputkesta. Jos siis pelkkää materiaalin vahvuutta muutettaisiin ja rakenne mallinnettisiin lieriöputkena, olisi putken jäykkyyso ominaisuudet putken suunnassa liian suuret.

Ansyksessä ortotropiaa voidaan käyttää syöttämällä rakenteelle poikkipintasuureet manuaalisesti, jolloin rakenne voidaan määritellä käyttäytymään eri tavoilla suunnasta riippuen. Ominaisuuden käyttö on muuttunut vähemmän hyödylliseksi laskentatehojen kasvettua, sillä nykyään rakenne voidaan mallintaa sellaisenaan ilman suurempaa muutosta laskenta-ajoissa.

7. LASKENTA- JA MITTAUSTULOKSET

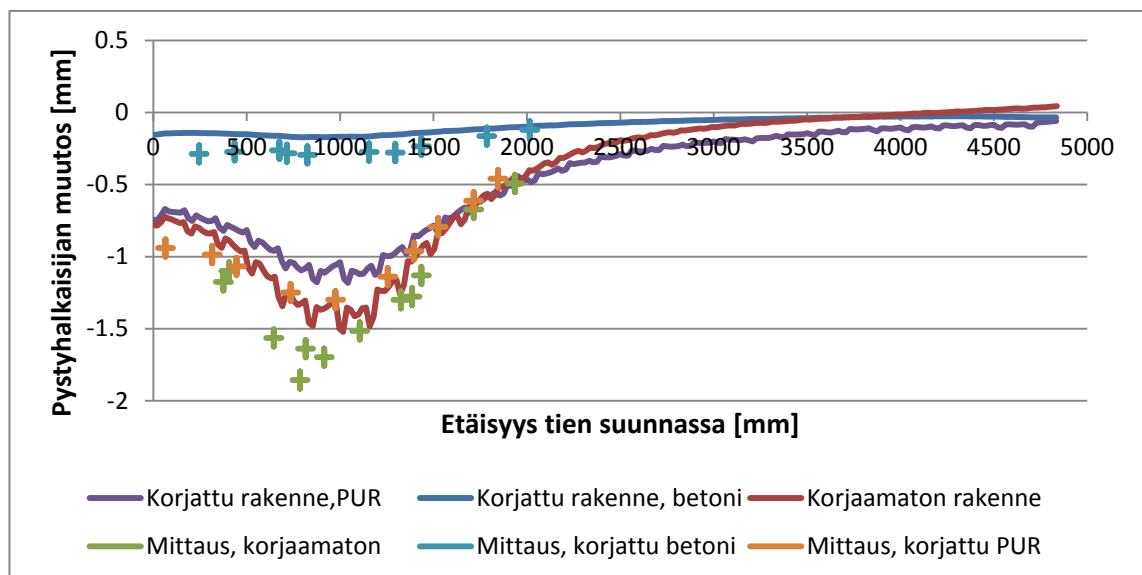
Tässä luvussa verrataan Ansyksen ja Plaxiksen laskentatuloksia toisiinsa. Lisäksi laskentatuloksille tehdään myös vertailu koekohteilla tehtyihin mittauksiin, jotta käytetty mallinnusmenetelmä saadaan verifioitua.

7.1 Halkaisusujutuksen tulokset

7.1.1 Halkaisijamuutokset ennen ja jälkeen

Tutkittavaksi suureeksi valittiin halkaisijan muutokset niiden todellisen mitattavuuden helppouden vuoksi. Kuvassa 33 on esitetty putken pystyhalkaisijan muutos tien poikki-leikkauksen suunnassa. Kuvaaja alkaa kuormitusajoneuvon keskilinjasta, jolloin rengaslinja sijoittuu noin yhden metrin päähän nollapisteestä. Todelliset mittaukset ja laskennan antamat tulokset vastaavat toisiaan verrattain hyvin. Liitteessä A on esitetty halkaisijamuutokset eri painoisten akselien tapauksessa.

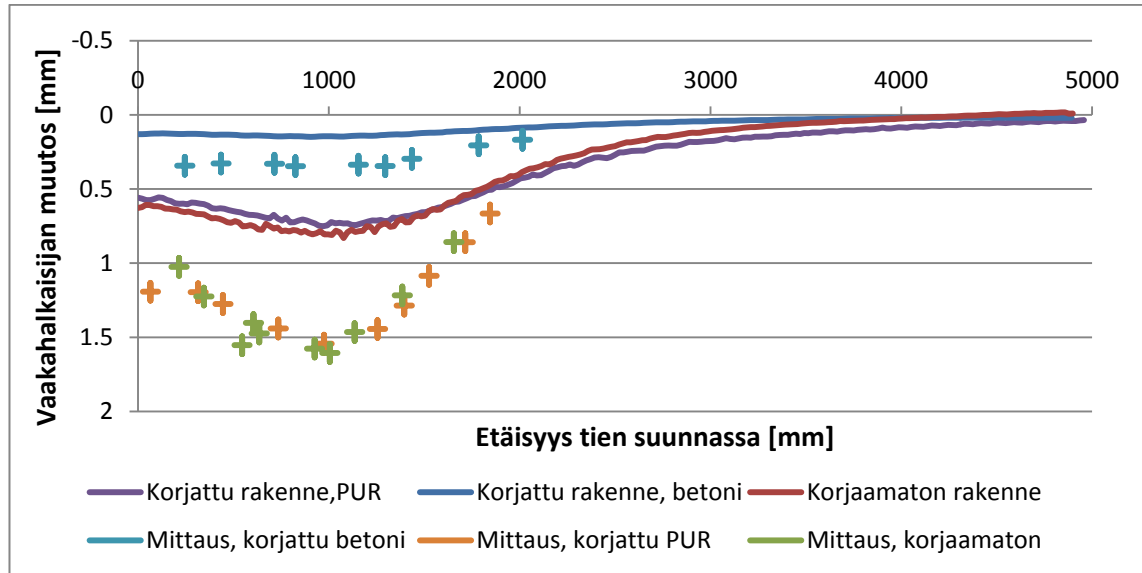
Täyttöaineen materiaalilla on tässä korjaustavassa huomattava vaikutus esimerkiksi halkaisijamuutoksiin. Kun uuden ja vanhan rummun väli täytetään betonilla, putken mekaaniset ominaisuudet muuttuvat huomattavasti.



Kuva 33. Pystyhalkaisijan muutos etäisyyteen nähden auton keskilinjasta.

Kuvassa 34 on esitetty kuvaa 33 vastaavat vaakahalkaisijan muutokset. Niiden osalta laskennallinen ja todellinen mittaustulos poikkeavat enemmän. Tulos selittyy osittain

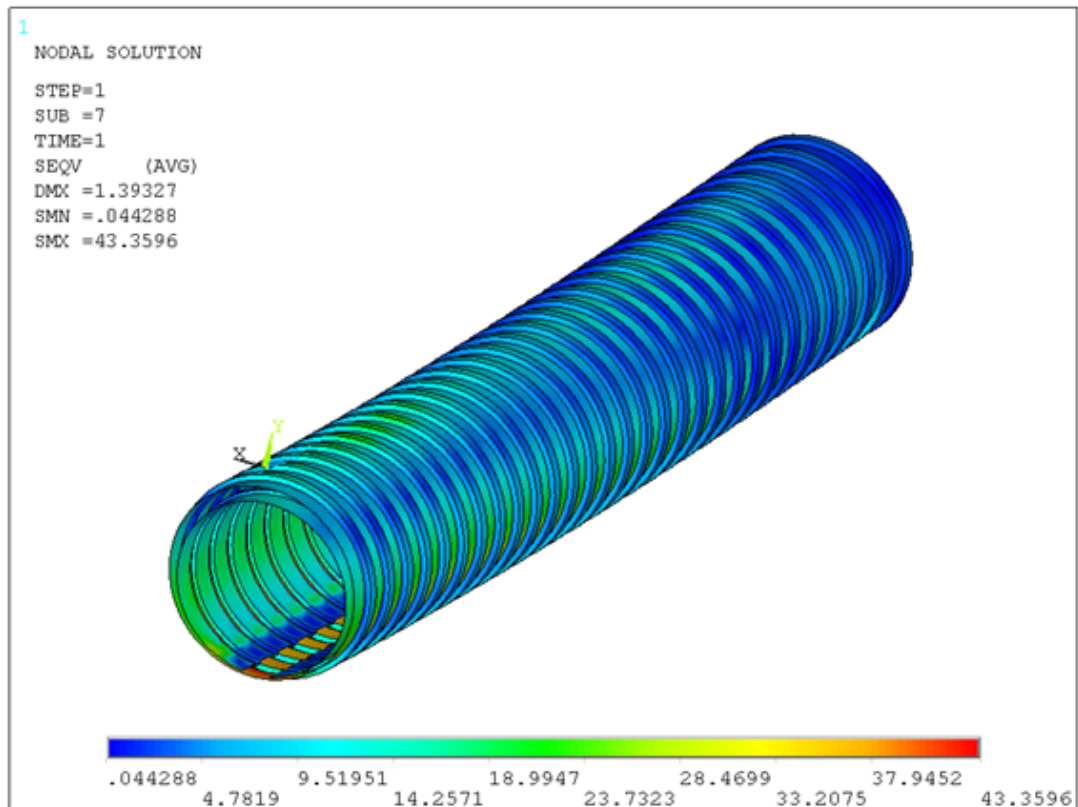
laskentamallin staattisuudella. Todellisessa mittauksessa kuorma on liikkuva. Mallinus- ja mittaustuloksista on otettu tarkasteluun suurin vaakahalkaisijan muutos. Staattista tilannetta vastaavaa mittaustulosta ei tässä yhteydessä saada mittaustulosta, joten on tyydyttävä hetkeen, jolloin kuorma-auton painavin akseli on rummun yläpuolella.



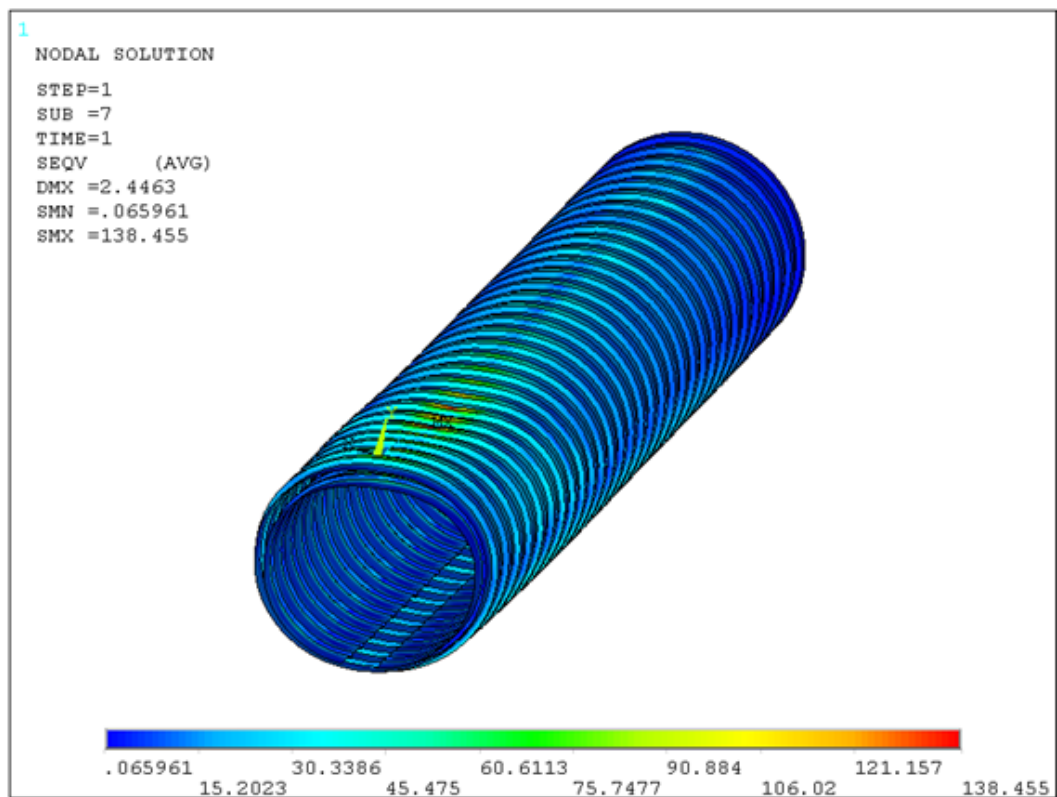
Kuva 34. Vaakahalkaisijan muutos etäisyyteen nähden auton keskilinjasta.

7.1.2 Jännitykset ja venymät

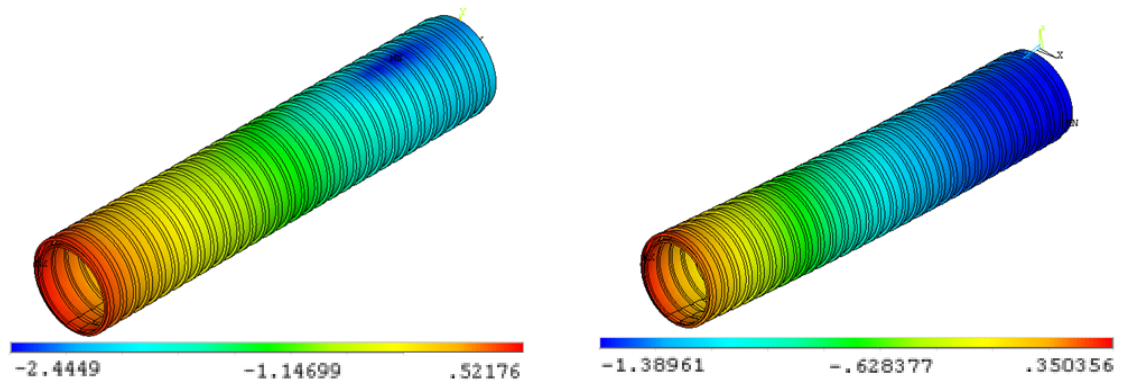
Teräsputken jännitykset muuttuvat olennaisesti, kun korjaustoimenpiteessä käytetään rakennetta huomattavasti jäykistävää betonia. Jäykässä rakenteessa jännitykset jakaantuvat suuremmalle alueelle, jolloin myös jännityshuiput pienenevät. Betonitäytteen tapauksessa jännitykset ovat suurimmillaan 43 MPa ja polyuretaanitäytön tapauksessa noin kolme kertaa suuremmat, jopa 138 MPa. Jännitykset ovat kuitenkin molemmissa tapauksissa hyvin maltilliset ja kuormituksen tulisi olla moninkertainen, että myötäämistä tapahtuisi. Teräsputken jännityksiä on esitetty kuvissa 35 ja 36. Kun rumpuputki korjauksen seurauksena jäykistyy, muuttuu rumpua ympäröivän maan jännityskenttä rakenteen välittäessä enemmän ulkoisia rasituksia tilavuutensa yli. Vähemmän jäykkä rakenne antaa enemmän periksi, jolloin rasitukset siirtyvät nopeammin muille ympärillä oleville rakenteille. Tämä näkyy selvästi vertailemalla kuvia 38 ja 39.



Kuva 35. Teräksen jännitykset, kun korjauksessa on käytetty betonitäytettä. Kuvan asteikon yksikkö on MPa.

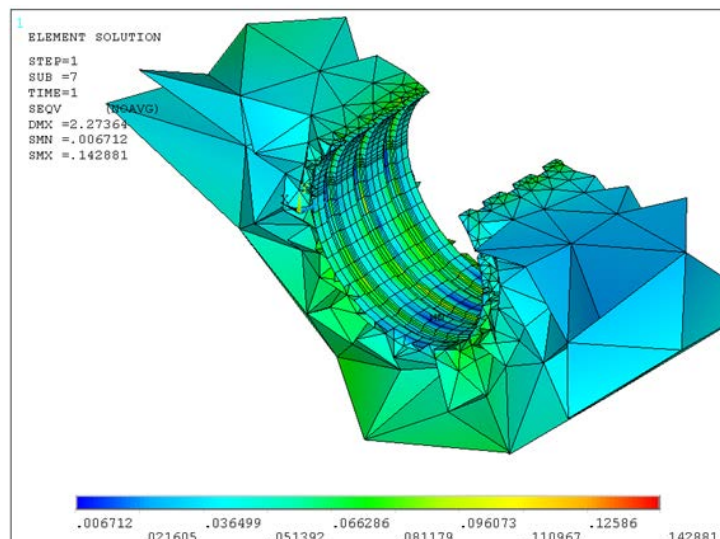


Kuva 36. Teräksen jännitykset, kun korjauksessa on täytetty polyuretaanitäytettä. Kuvan asteikon yksikkö on MPa.

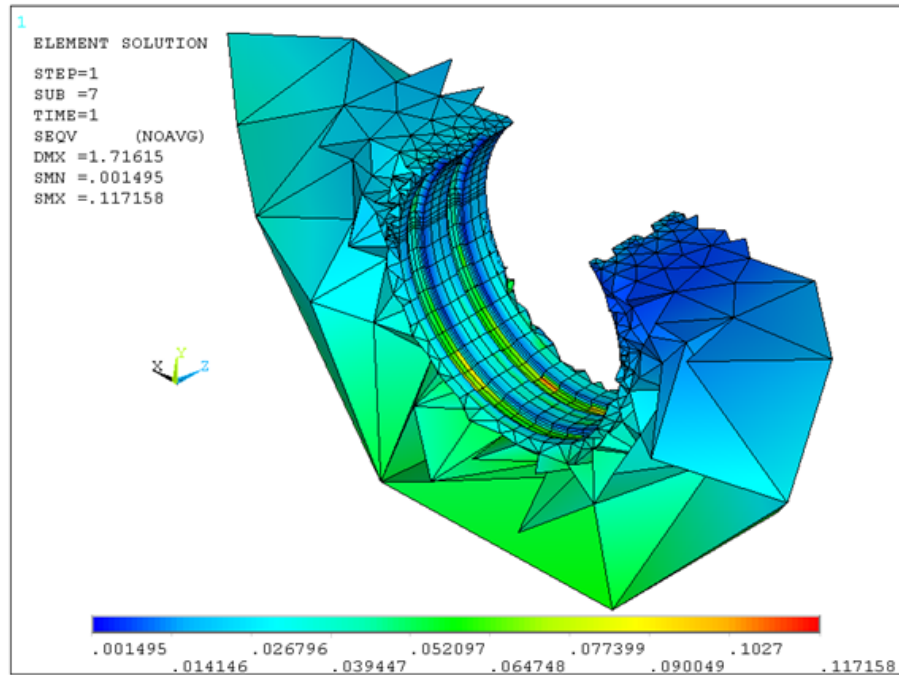


Kuva 37. Y-suuntaiset siirtymät, vasemmalla vaahdotettu ja oikealla betonoitu. Kuvan asteikon yksikkö on millimetri.

Täyteaineen jäykistävän vaikutuksen näkee havainnollisesti myös katsomalla kuvaa 37. Täyteaineen ollessa polyuretaanivaahtoa, putken pystysuuntaiset siirtymät vaihtuvat voimakkaasti putken pituuden suunnassa. Putkeen siis syntyy paikallisesti suurempia muodonmuutoksia ja siten myös jännityksiä. Betonoidulla putkella siirtymä jakautuu paljon tasaisemmin. Putken suurin siirtymä on laskentamallissa kuormitusajoneuvon keskilinjän kohdalla, eikä renkaiden alla kuten kaikissa aikaisemmissa tapauksissa. Tämä selittyy rakenteen kasvaneella jäykkyydellä, sillä nyt putki säilyttää muotonsa paremmin ja painuu kokonaisuudessaan vähemmän. Huomattava ero on suurimpien siirtymien välillä, sillä betonoitu putki siirtyy maksimissaan n. 1,4 mm ja vaahdotettu putki n. 2,4 mm. Tehdyissä mittauksissa tutkittiin vain halkaisijan muutosta, ei kokonaissiirtymää, joten tuloksen tarkkuudesta ei ole varmuutta. Tulokset ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa kuin Plaxis-ohjelmistolla mallinnetuissa alkutilanteissa.



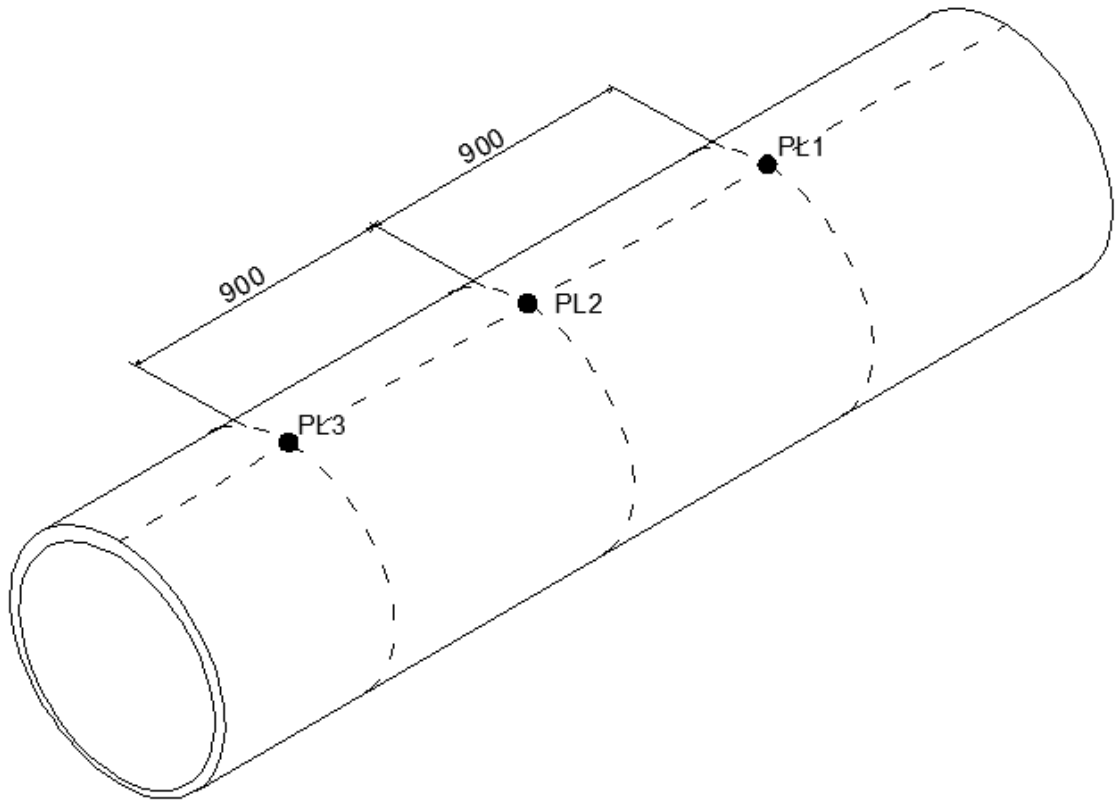
Kuva 38. Putkea ympäröivän maan von Mises -jännitykset, kun välin täyteaineena on käytetty polyuretaanivaahtoa. Suurimmat ympärystätön jännitykset 143 kPa. Kuvan asteikon yksikkö on MPa.



Kuva 39. Putkea ympäröivän maan von Mises –jännitykset, kun välin täyteaineena on käytetty betonia. Suurimmat ympärystäytön jännitykset 117 kPa. Kuvan asteikon yksikkö on MPa.

Kuvista 38 ja 39 on esitetty ympärystäyttöön kohdistuvia jännityksiä putken rasiteuimmalta kohdalta. Kuvista nähdään, että betonilla korjattu rakenne käyttäytyy betonirummun tavoin. Jännitys on vaahdotetun putken tilanteessa enemmän keskittynyt putken viereiselle maalle, kun betonoidun putken tapauksessa kuormat siirtyvät voimakkaammin putken alapuolelle. Tulokset vastaavat siis aikaisempaa käsitystä [25]. Paikallisesti jännitykset ovat kuitenkin vaahdotetun putken tapauksessa suuremmat, sillä jäykempi betonoitu putki kuljettaa rasituksia putken suunnassa etäämmälle.

Työmaalla mitattiin myös rummun alapinnan venymiä. Alkutilanteessa mitattiin vanhan rummun laen alapinnan venymät. Korjauksen jälkeisissä kuormituskokeissa mitattiin uuden rummun alapinnan venymä ja mittauspisteiden määrää lisättiin. Tuloksissa on kuitenkin esitetty vain rummun laen venymiä. Venymien mittauskohdat on esitetty kuvassa 40. Mittauspiste PL3 sijaitsee lähellä tien reunaa ja PL1 on vastaavasti lähimpänä tien keskilinjaa.



Kuva 40. Venymien mittauspisteet.

Mitatut ja laskennalliset jännitykset alkutilanteissa on esitetty taulukossa 15. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että jännitykset rummussa ovat hyvin maltillisella tasolla. Mitatut ja laskennalliset venymät ovat samaa suuruusluokkaa. Venymän mittaamiseen ja laskentaan liittyy jonkin verran epävarmuutta, sillä venymäliuska mittaa venymät yhteen suuntaan tietyltä matkalta. Laskennallisesti venymä vaihtuu voimakkaasti suunnan funktiona, joten tuloksia vertailtaessa tyydytään keskittymään suuruusluokkaan. On myös huomattava, että mittausten venymät kuvaavat ajon itseisarvoltaan suurinta hetkellistä venymää, sillä kaikkien mittauspisteiden kohdalla venymä kävi myös puristuspuolella. Mitatut venymät voivat olla myös eri ajanhetkiltä kuin laskennalliset, sillä renkaan sijaintia suhteessa rumpuun ei venymän mittaushetkellä täysin tarkasti tunneta.

Taulukko 15. Suurimmat mitatut ja laskennalliset jännitykset alkutilanteessa kun rengaslinja kulkee PL2 päältä.

Mittauspiste	Mitattu venymä [-]	Mittauksen jännitys [MPa]	Laskennallinen venymä säteen suunnassa [MPa]
PL1	$4,80 \cdot 10^{-5}$	10,1	$3,3 \cdot 10^{-5}$
PL2	$7,90 \cdot 10^{-5}$	16,6	$3,8 \cdot 10^{-5}$
PL3	$4,90 \cdot 10^{-5}$	10,3	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Mitatut ja laskennalliset jännitykset korjaustoimenpiteiden jälkeen on esitetty taulukossa 16. Tulokset ovat betonilla korjatun rummunosan kohdalta. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että korjaustoimenpiteellä ei ole suurta vaikutusta jännitysten suurusluokkaan ja laskennallinen tarkastelu kuvaa todenmukaisesti rummun käyttäytymistä.

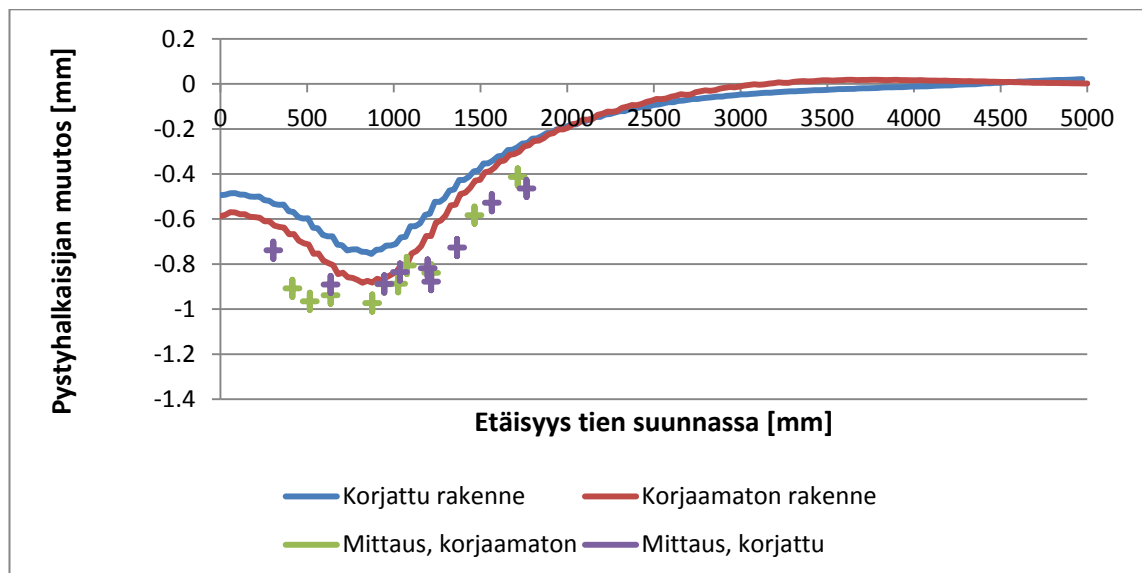
Taulukko 16. Mitatut ja laskennalliset jännitykset korjatussa rakenteessa kun rengaslinja kulkee PL2 päältä.

Mittauspiste	Mitattu venymä [-]	Mittauksen jännitys [MPa]	Laskennallinen venymä säteen suunnassa [MPa]
PL1	$2,4 \cdot 10^{-5}$	5,0	$2,0 \cdot 10^{-5}$
PL2	$5,9 \cdot 10^{-5}$	12,4	$5,3 \cdot 10^{-5}$
PL3	$1,8 \cdot 10^{-5}$	3,8	$1,0 \cdot 10^{-5}$

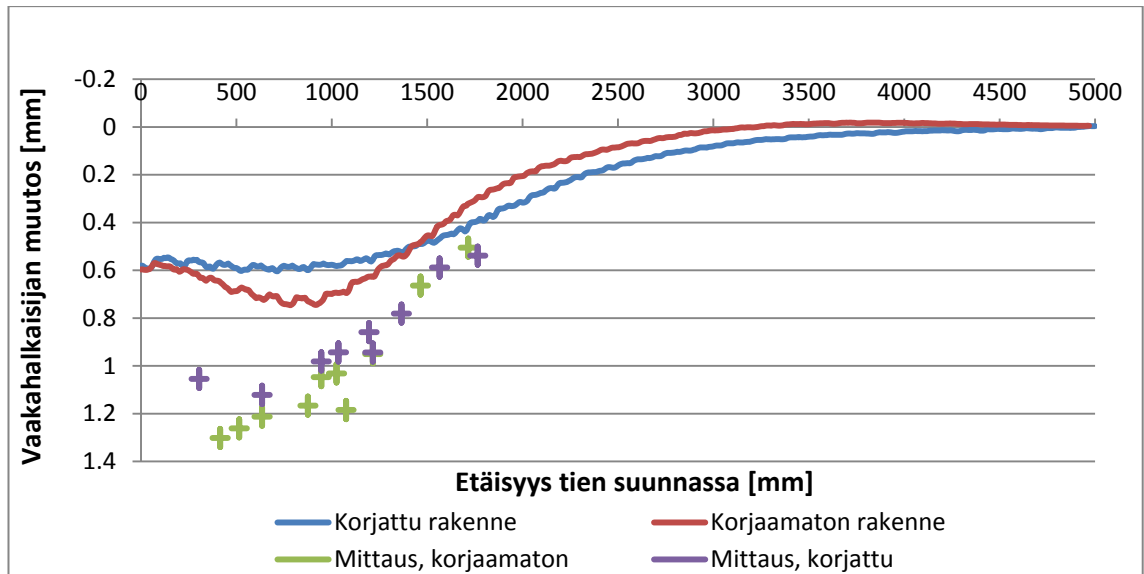
7.2 Puolipohjauksen tulokset

7.2.1 Halkaisijamuutokset ennen ja jälkeen

Puolipohjauksen koekohteella rummun peitesyvyys on toista kohdetta suurempi, kuten myös rakennekerrosten jäykkyydet. Tämä näkyy vastaavasti myös halkaisijanmuutoksissa, jotka ovat vastaavasti pienemmät. Halkaisijan pystymuutokset puolipohjauksen koekohteella on esitetty kuvassa 41 ja vaakahalkaisijan muutokset kuvassa 42.

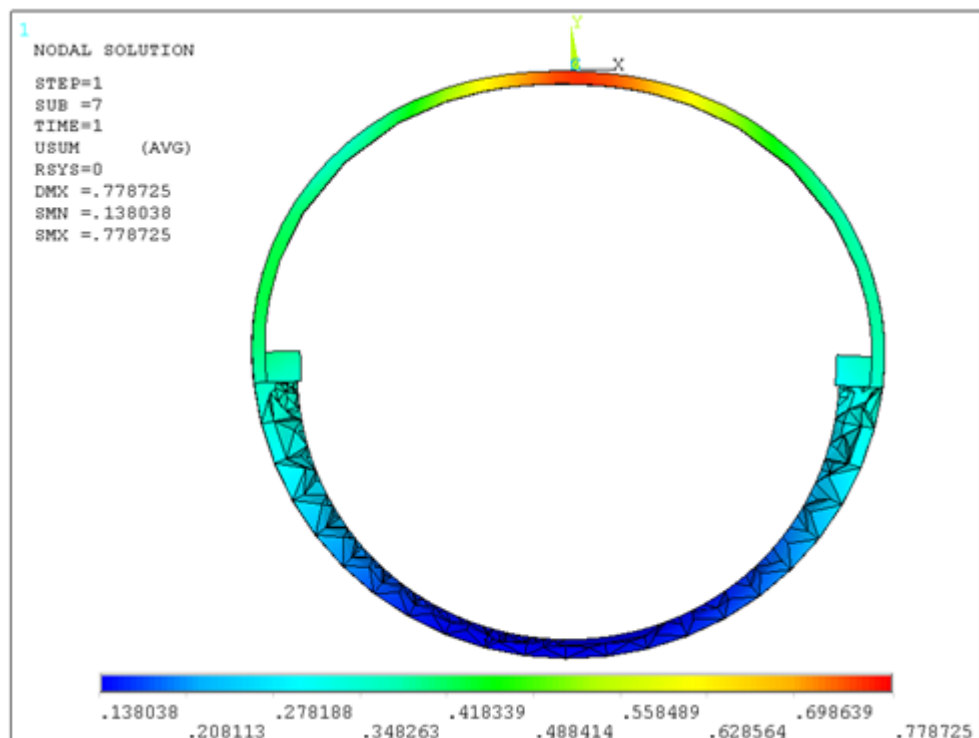


Kuva 41. Pystyhalkaisijan muutos etäisyyteen nähden auton keskilinjasta.



Kuva 42. Vaakahalkaisijan muutos etäisyyteen nähden auton keskilinjasta.

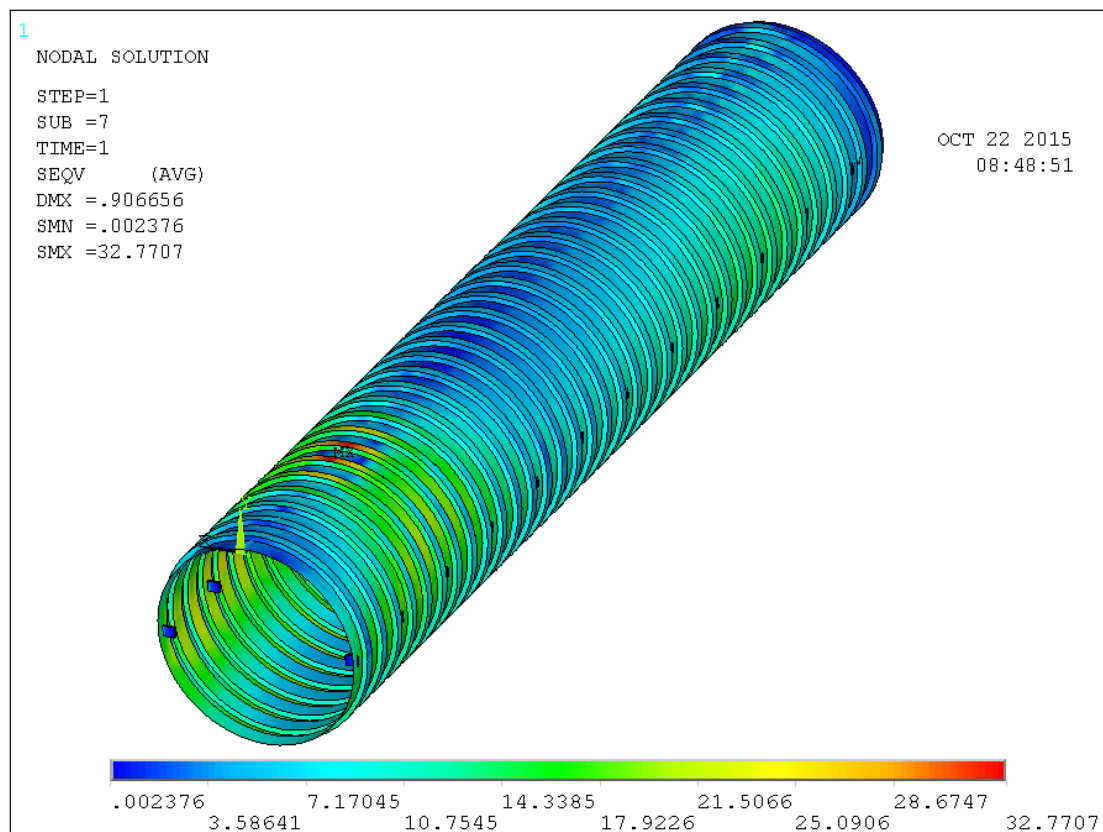
Rakenteen jäykistyminen on huomattavasti vähäisempää kuin halkaisusujutuksen tapauksessa. Suurin osa siirtymistä tapahtuu ylemmän puolikkaan alueella (ks. kuva 43), joka selittää osaltaan pienempää jäykistymistä.



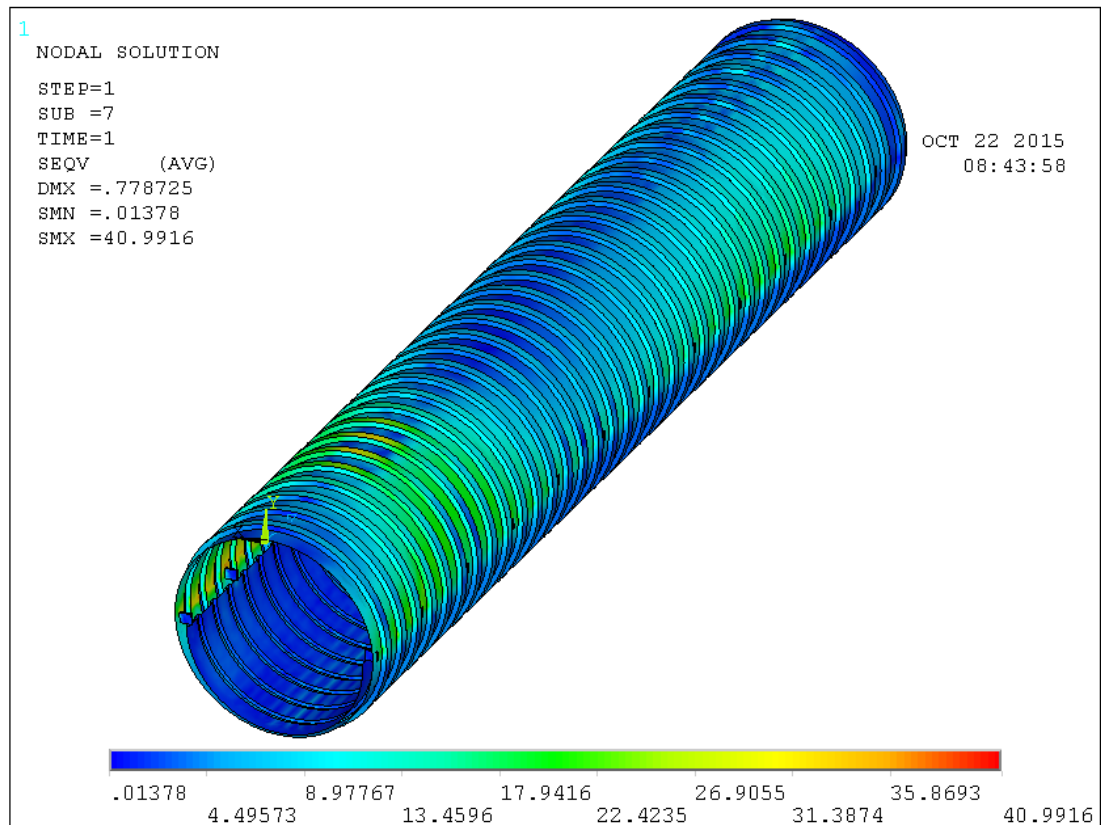
Kuva 43. Puolipohjauskohteen korjatuntilanteen kokonaissiirtymä skaalattuna yli 70-kertaiseksi (displacement vector sum). Kuvan asteikon yksikkö on millimetri.

7.2.2 Jännitykset ja venymät

Puolipohjauksen tapauksessa jännitykset eivät olennaisesti muutu korjauksen yhteydessä. Syynä on korjaustavan vähäinen vaikutus putken jäykkyyteen, joka näkyy myös halkaisijan muutoksissa (ks. kuva 41 ja kuva 42). Alkutilanteessa rumpuun kohdistuu laskenallisesti n. 33 MPa:n jännitys, kun korjaustoimenpiteiden jälkeen suurin jännitys on n. 41 MPa. Teräsosien jännitykset on esitetty kuvissa 44 ja 45. Jännityshuipun sijainti muuttuu merkittävästi. Alkutilanteessa jännityshuippu on putken laella rengaslinjan kohdalta, kun taas korjatussa tilanteessa maksimijännitys on saman poikkileikkauksen kiinnityspalan lähistöllä. Laen jännitys ei käytännössä muutu korjauksen vaikutuksesta. Korjaustoimenpiteen aiheuttama jännityksen kasvaminen voi olla todellinen ilmiö, sillä paikallisesti kiinnityspalan lähistöllä rumpun jäykkyys kasvaa verrattain paljon. Kuitenkin jännityksen muutos on niin pieni, ettei sillä ole vaikutusta korjaustavan käytettävyyteen.

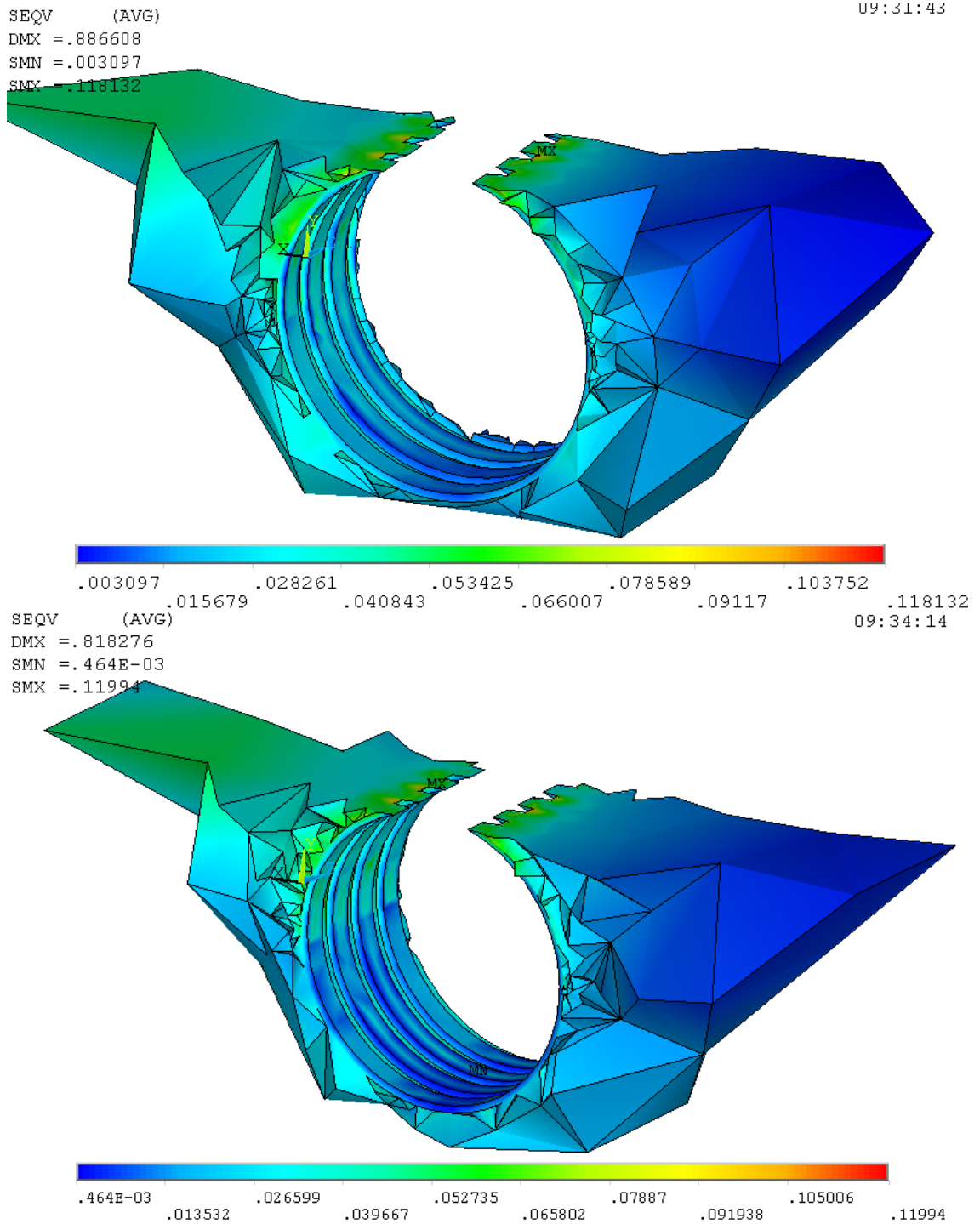


Kuva 44. Teräksen jännitykset korjatussa putkessa. Kuvan asteikon yksikkö on MPa.



Kuva 45. Teräksen jännitykset korjatussa putkessa. Kuvan asteikon yksikkö on MPa.

Korjaustapa ei aiheuta merkittäviä muutoksia myöskään ympärystäytön syntyviin jännityksiin. Alkutilanteessa ympärystäytön suurin laskennallinen jännitys on 118 kPa, kun korjauksen jälkeen jännitys on 120 kPa. Suurin jännitys sijaitsee ympärystäytön yläpinnassa, lähellä rumpua. Ympärystäytön jännitykset on esitetty kuvassa 46.



Kuva 46. Ympäristäyttyön syntyvät jännitykset. Ylemmässä kuvassa lähtötilanne, alemmassa tilanne korjauksen jälkeen. Kuvan asteikon yksikkö on MPa.

Kuvasta 46 voidaan myös nähdä korjaustoimenpiteen aiheuttama jännityskentän muutos rummun alemmassa puoliskossa. Alemman puolikkaan kohdalla jännitys jakaantuu paljon tasaisemmin kuin alkutilanteessa, minkä voidaan olettaa johtuvan jäykän rakenteen kyvystä jakaa jännityksiä suuremmalle alueelle. Jännityksen suuruudet rummun alapuo-

lolla ovat molemmissa tapauksissa kuitenkin hyvin pienet, joten jännitysten uudelleenjakautuminen on pikemminkin kosmeettinen asia.

Työmaalla mitattiin rummun venymät kahdessa vaiheessa, kuten halkaistun sisäputken tapauksessa. Venymät mitattiin nyt kuitenkin molemmilla kerroilla vanhasta rakenteesta. Mittauspisteet ovat kuten halkaistun sisäputken tapauksessa. Mitatut ja laskennalliset jännitykset alkutilanteissa on esitetty taulukossa 17. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että myös tämän rummun tapauksessa jännitykset ovat todella maltilliset. Lisäksi voidaan todeta maakerrosten tiivistyneen paikallisesti poikkileikkauksen PL2 kohdalla, sillä kaikilla mittauskerroilla halkaisijanmuutokset ja venymät olivat poikkeuksellisen pienet tällä kohdalla. Poikkileikkaus sijaitsee tiellä renkaan ajouran kohdalla.

Taulukko 17. Mitatut ja laskennalliset jännitykset alkutilanteessa kun rengaslinja kulkee PL2 päältä.

Mittauspiste	Mitattu venymä [-]	Mittauksen jännitys [MPa]	Laskennallinen venymä säteen suunnassa [MPa]
PL1	$2,2 \cdot 10^{-5}$	4,6	$3,7 \cdot 10^{-5}$
PL2	$1,9 \cdot 10^{-5}$	4,0	$5,7 \cdot 10^{-5}$
PL3	$2,2 \cdot 10^{-5}$	4,6	$2,3 \cdot 10^{-5}$

Korjaustoimenpiteiden jälkeiset mitatut ja laskennalliset jännitykset on esitetty taulukossa 18. Mittauksissa mittauspisteen PL3 anturi ei antanut luotettavan oloista mittausdataa, joten tulokset on jätetty tarkastelematta. Tulosten perusteella voidaan sanoa, etteivät jännitykset juuri muutu korjaustoimenpiteiden ansiosta.

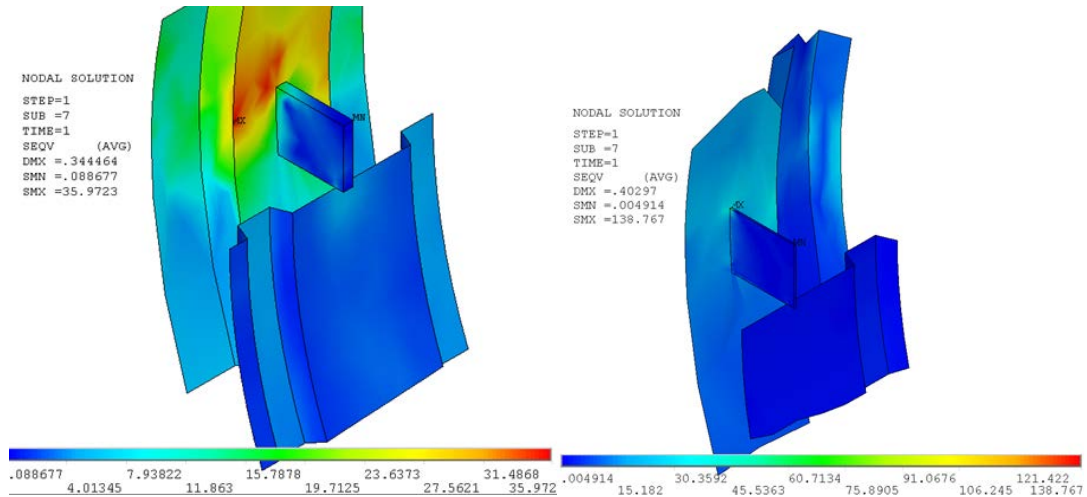
Taulukko 18. Mitatut ja laskennalliset jännitykset korjatussa rakenteessa kun rengaslinja kulkee PL2 päältä ajanhetkellä renkaan ollessa PL2-2 yläpuolella.

Mittauspiste	Mitattu venymä [-]	Mittauksen jännitys [MPa]	Laskennallinen venymä säteen suunnassa [MPa]
PL1	$2,0 \cdot 10^{-5}$	4,2	$4,2 \cdot 10^{-5}$
PL2	$3,4 \cdot 10^{-5}$	7,1	$5,2 \cdot 10^{-5}$
PL3	-	-	$4,0 \cdot 10^{-5}$

7.2.3 Tartuntapalojen pitkäaikaiskestävyys

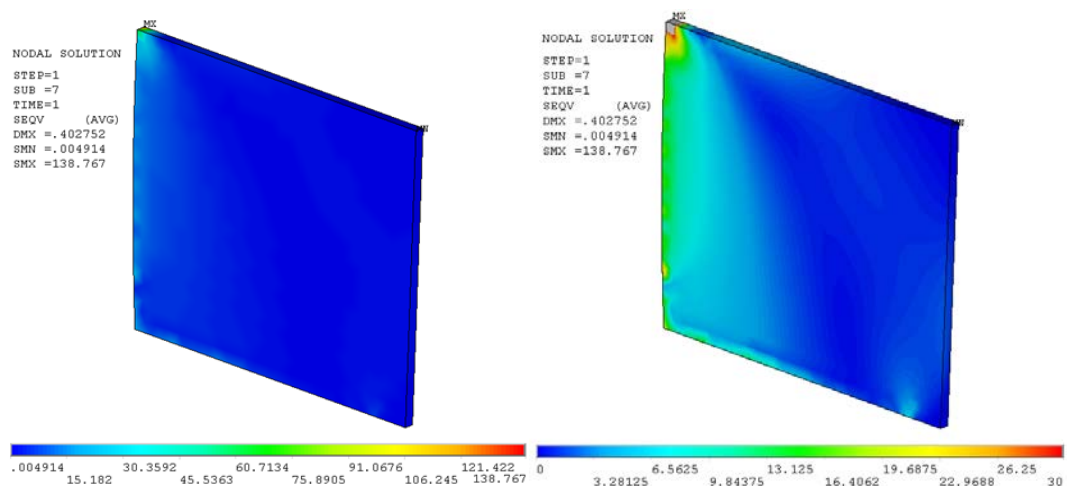
Tutkimuksessa haluttiin myös selvittää tartuntapalojen kykyä siirtää voimia myös pitkällä aikavälillä. Ajan kuluessa tartuntapalat syöpyvät ympäristökuormitusten vaikutuksesta. Tutkimuksessa simuloitiin tilanne, jossa syöpymä on joka suunnasta 4 mm eli palan dimensiot pienenevät merkittävästi. Kiinnityspalan alkuperäinen koko on

80×60×10 mm ja syöpyneen tilanteen koko on 72×52×2 mm. Laskentamallin syöpymät vähennetään siis joka puolelta paitsi vanhan putken puoleiselta sivulta. Alapinnan syöpymä vähennetään yläpinnasta, jotta kosketus puolikkaaseen putkeen säilyy. Näin ulokkeen taivutusjäykkyys pienenee oikeassa suhteessa. Tartuntapalojen ympäristön jännitykset on esitetty kuvassa 47.

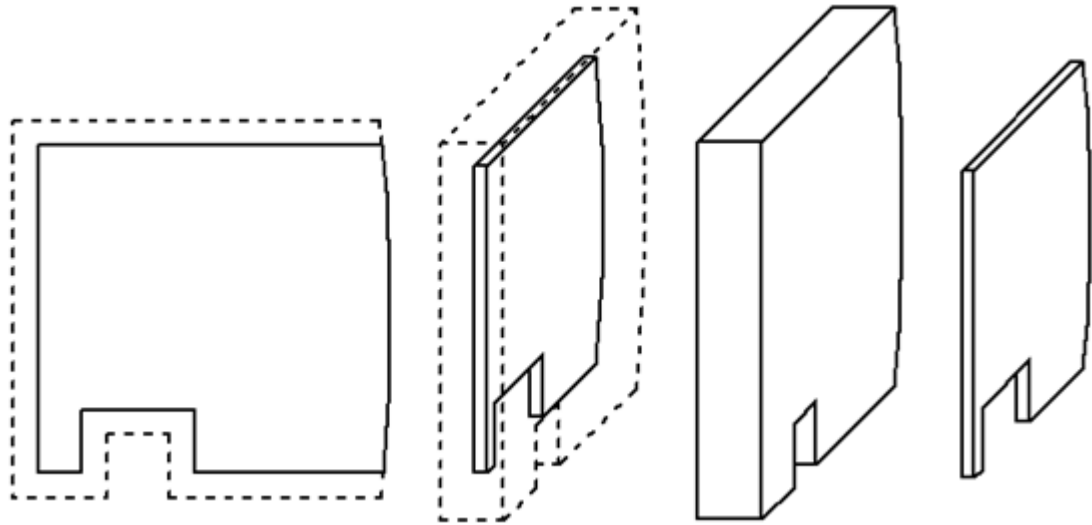


Kuva 47. Kuvassa jännitykset eniten rasietuimman kiinnityspalan ympäristöstä. Vasemmalla syöpymätön ja oikealla syöpynyt tukipala. Vasemmalla puolella väriskaala 0.08 – 35.97 MPa ja oikealla 0.0049 – 138.8 MPa.

Suurimmat jännitykset syöpyneen palan tapauksessa kasvavat merkittävästi. Alkutilanteessa kiinnityspalan ympäristön suurin jännitys on n. 36 MPa ja se sijaitsee vanhan rummun seinämässä. Jännitys jakaantuu hieman epätasaisesti ja se johtune liian harvasta elementtiverkosta. Tällä ei ole kuitenkaan käytännössä merkitystä, sillä tulokset ovat riittävän lähellä oletettua 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 kuvassa 48.



Kuva 48. Syöpyneen tartuntapalan jännitykset. Vasemman puoleisessa kuvassa jännitysten väriskaala 0 – 139 MPa. Oikealla sama kuva, mutta nyt väriskaala 0 – 30 MPa. Kaikki väriskaalan ulkopuolella olevat jännitykset on kuvattu harmaalla (ks. kiinnityspalan ylänurkka)

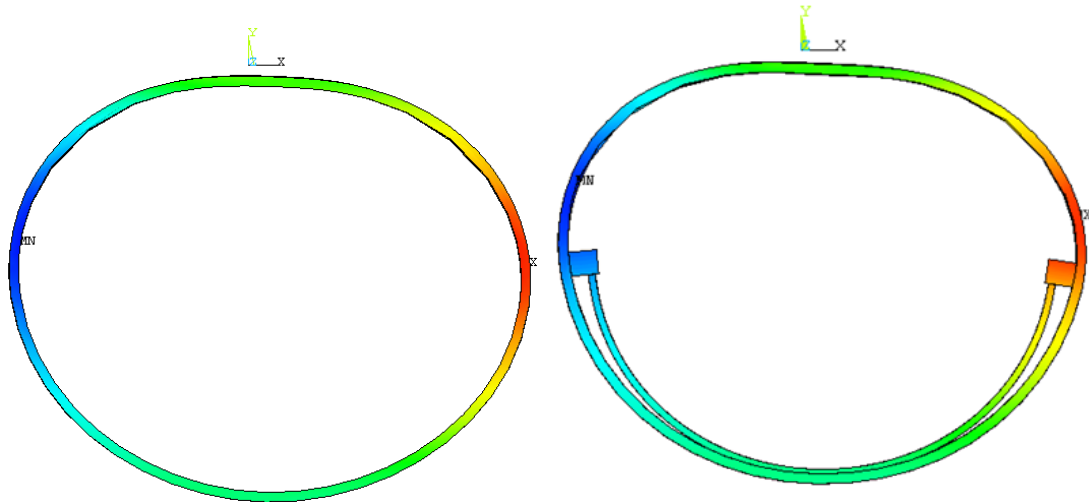


Kuva 49. Syöpynyt tukipala puolipohjauskohteessa.

Laskennan tulos on, 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 epäselvää. Kuvassa 49 on hahmoteltu tilannetta, jossa syöpymä on samansuuruinen palan kaikilta sivuilta.

7.2.4 Suurin vaakahalkaisijan muutos

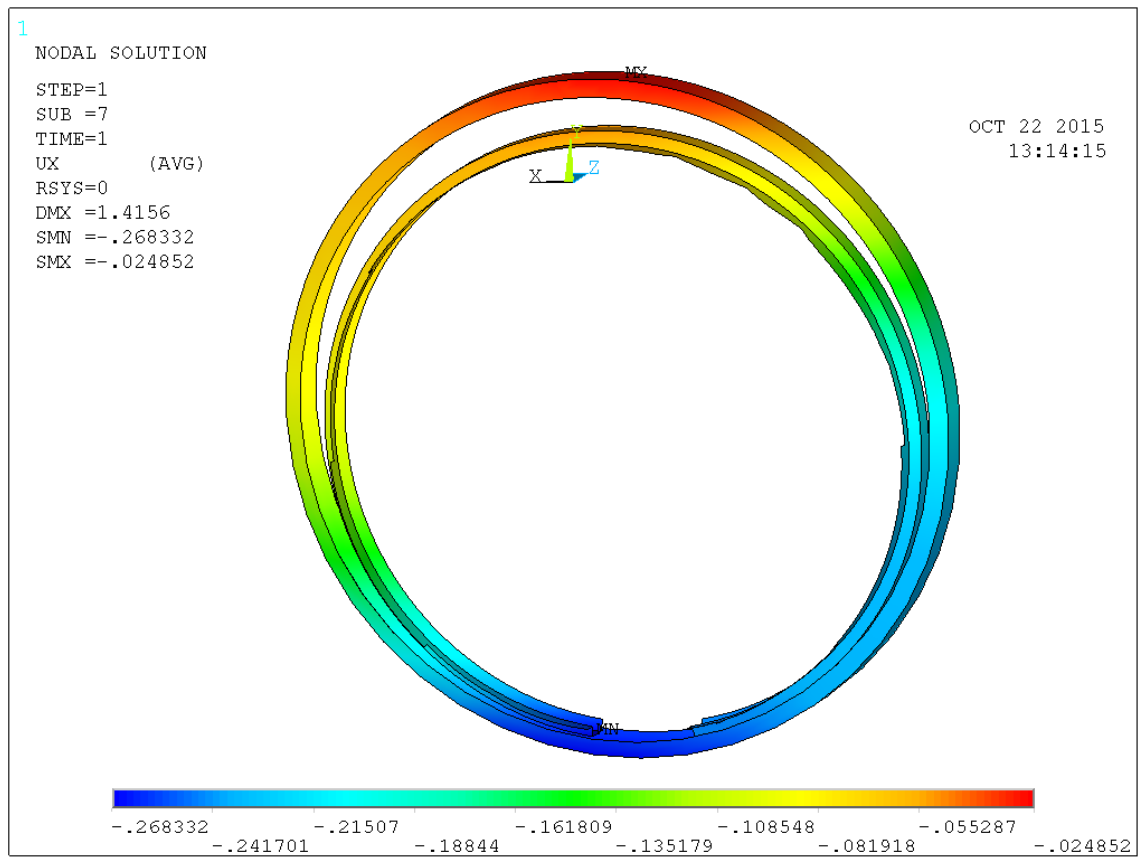
Laskennallisesti voidaan tutkia todellisia mittauksia tarkemminkin muodonmuutoksia, joskin tarvitaan pieni uskon hyppy, että malli kuvaa todellisuutta. Molemmissa korjaustavoissa suurin vaakahalkaisijan muutos näyttäisi olevan hieman putken keskikohtaa ylempänä. Kuvassa 50 on esitetty putken vaakasuuntainen muutos. Pienin arvo on kuvassa sinisellä (siirtymä kuvassa vasemmalle päin) ja suurin arvo punaisella (siirtymä oikealle). Suurin ja pienin x-suuntainen siirtymä on myös merkitty kuviin symbolein MN ja MX.



Kuva 50. Puolipohjauskohteen vaakasuuntainen siirtymä. Sininen väri kuvaa pienintä negatiivista siirtymää ja punainen suurinta positiivista siirtymää x -suunnassa.

Kuvasta myös nähdään, että putken muodonmuutos ei ole symmetrinen, vaan kuvassa oikea puoli vääristyy enemmän. Ensimmäinen teli onkin putken laen kohdalla ja toinen kuvan suunnassa oikeammalla.

Halkaisusujutuksen tapauksessa ilmiötä ei synny. Rakenteen jäykkyydestä johtuen putken poikkileikkaus pikemminkin kiertyy ja siirtyy, kuin muuttaa muotoaan. Suurimmat vaakasuuntaiset siirtymät löytyvätkin samalta halkaisijalta. Lakiaste siirtyy eniten sivusuunnassa ja putken lähes alin piste siirtyy vastaavasti päinvastaiseen suuntaan (ks. kuva 51).



Kuva 51. Halkaisusujutuksen vaakahalkaisijan muutos. Kuvan asteikon yksikkö on millimetri.

8. PÄÄTELMÄT

Laskentamallien ja koekohteilla tehtyjen mittausten yhdenmukaisuuteen nojaten voidaan katsoa, että kuormitetun tierummun tilanne korjausratkaisuineen pystytään mallintamaan riittävällä tarkkuudella. Paikan päällä tehtäviä mittauksia kuitenkin tarvitaan laskentaparametrien määrittämiseen. Todennäköisesti pienen jalostuksen myötä pelkät pohjatutkimukset riittäisivät, jolloin varsinaista koekuormitusta ei tarvitsisi järjestää. Silloin tässä työssä esitetty menettely olisi jo huomattavasti kevyempi, lähes käyttökelpoinen. Pienellä jatkotutkimuksella tämän työn lähtökohdista voitaisiin luoda mitoituskäytäntö rumpujen korjaustavoille standardin CEN/TR 1295-3 liitteen B mukaiseen mitoitusmenetelmään.

Työssä käytetyn tarkastelutavan avulla voidaan ottaa ympäröivän maan ominaisuudet riittävällä tarkkuudella huomioon, mutta ominaisuuksia kuvaavien parametrien määrittäminen vaatii toistaiseksi pohjatutkimuksia ja kuormituskokeita. Putken eri materiaalit ja seinämärakenteen muodot voidaan huomioida tarpeeksi tarkasti.

Vaikka tässä työssä keskityttiin vain staattisen kuormituksen tapaukseen, jatkotutkimuksen avulla voisi olla mahdollista ottaa huomioon myös liikkuvat kuormat ja kuorman dynaamiset vaikutukset. Myös rakennusaikaiset kuormitukset olisi ehkä mahdollista ottaa huomioon laskentamallia muokkaamalla. Erilaisten kuormitustapausten huomiointi on erittäin tärkeää kehitettäessä rummuille yhtenäistä mitoituskäytäntöä.

Tässä työssä tutkitut korjaustavat aiheuttavat vain hallittavissa olevia lähes kosmeettisia muutoksia rumpujen oletettuun kuormituskäyttäytymiseen. Lisäksi korjaustapoja simuloivat mallit kuvaavat kelpollisesti maan ja rakenteen yhteisvaikutusta. Tutkimuksen tapauksessa korjatuille rakenteille syntyvät rasitukset välittyvät moitteettomasti ympäröiville maarakenteille.

Puolipohjauksessa tutkittiin myös korjatun rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä tartuntapalan syöpymää simuloimalla. Korjattu rakenne toimii tehdyillä oletuksilla koko käyttöikänsä. Tutkimuksen fokuksessa oli muilta osin kuitenkin vain staattisen tilanteen rasitukset, eikä siten pitkän aikavälin kestävydestä ole tartuntapalan syöpymää lukuun ottamatta riittävää varmuutta. Dynaamisen kuormitustapauksen lisäksi myös kuormien pitkäaikaisia vaikutuksia tulisi tutkia.

Staattisessa tilanteessa rakenteita ei laskennallisesti, eikä todellisissa testeissä kuormitettu murtoon. Murtotilanteessa rakenteen deformaatiot ovat suuria ja materiaaleissa

tapahtuu pysyviä muodonmuutoksia ennen lopullista rakenteellisen katokyvyn ylittämistä. Murtorajan mitoittaminen edellyttää näiltä osin jatkotutkimusta.

Kaiken kaikkiaan maan ja rakenteen yhteisvaikutus on vaikeasti mallinnettava asia, muttei missään nimessä mahdoton. Varmentavia mittauksia varmasti kuitenkin tarvitaan myös jatkossa, vaikkakin nimenomaan siitä tulisi päästä eroon.

LÄHTEET

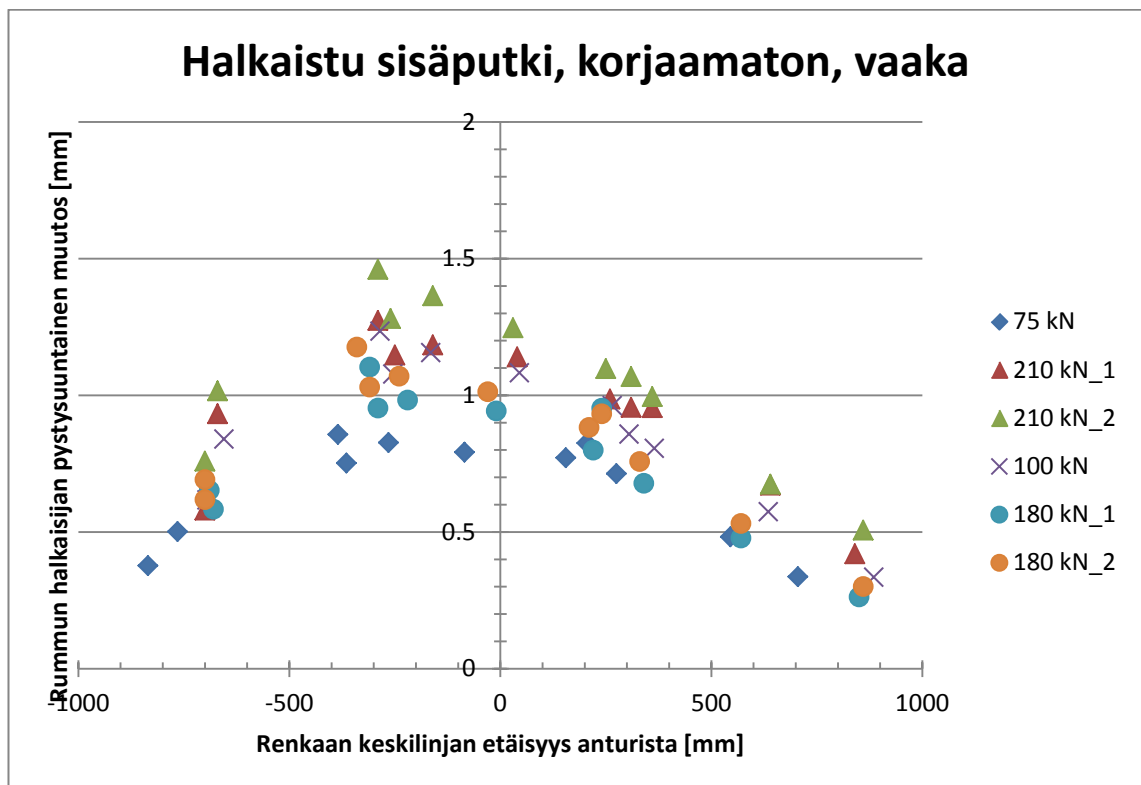
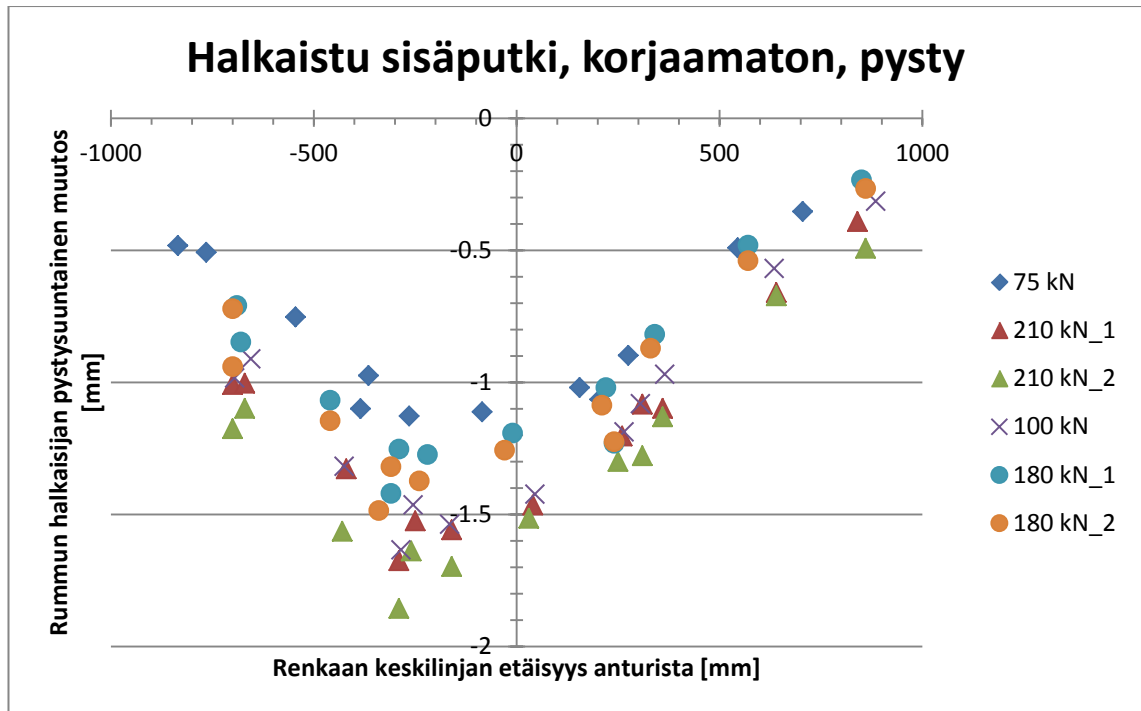
- [1] Aho, S. (2004). Sorateiden kelirikkokorjausten toimivuus ja elinkaarikustannukset. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [2] ANSYS Help. Documentation for Release 16.1.
- [3] Arockiasamy, M., Chaallal, O., Limpeteepakarn, T. (2006). Full-Scale Field Tests on Flexible Pipes under Live Load Application. *Journal of Performance of Performance and Constructed Facilities*, vol. 20, no. 1, pp. 21–27.
- [4] Brecciaroli, F., Kolisoja, P. (2006). Deformation behavior of railway embankment materials under repeated loading: Literature review. *Publications of Finnish Rail Administration A 5/2006*.
- [5] Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M., (2015). *PLAXIS Material models Manual*.
- [6] Boyce, J.R (1976). The behavior of Granular Material under Repeated Loading. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham.
- [7] Chaallal, O., Arockiasamy, M., Godat, A. (2014). Field Test Performance of Buried Flexible Pipes under Live Truck Loads. *Journal of Performance of Performance and Constructed Facilities*, vol. 29, Issue 5. 04014124.
- [8] Chen, W.F., Han, D.J., (1988). *Plasticity for Structural Engineers*. (Chapters 2.3.3 The Mohr-Coulomb Criterion and 5.4.3. Nonassociated Flow Rule). Springer-Verlag New York Inc.
- [9] Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, vol. 7, pp. 343-387.
- [10] Dawson, A.R., Thorn, N.H., Paute, J.L (1996). Mechanical Characteristics of Unbound Granular Materials as a Function of Condition. *Flexible Pavements*. Edited by A.G. Correia. Proceedings, European Symposium on Flexible Pavements, Euroflex. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal. pp. 35-44.
- [11] Drucker, D.C., Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 10, no. 2, pp. 157-165.
- [12] Ehrola, E. (1996). *Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet*. Rakennustieto Oy. Helsinki.

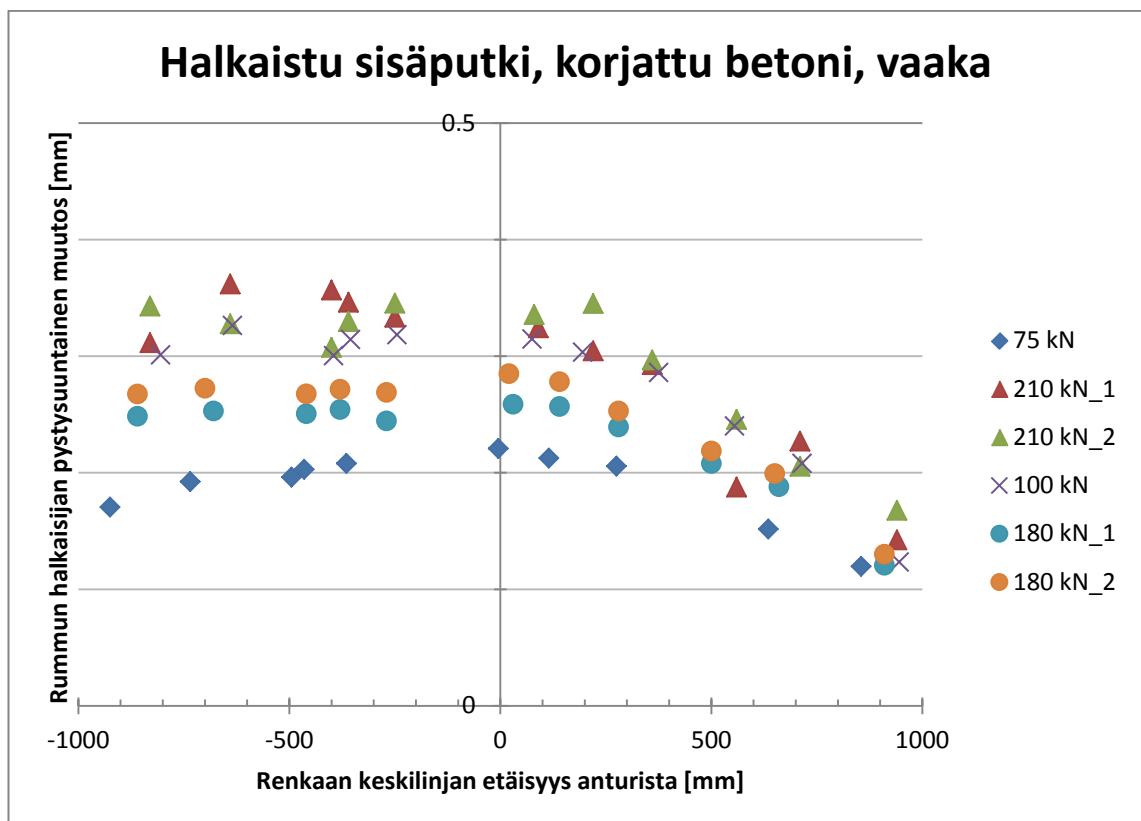
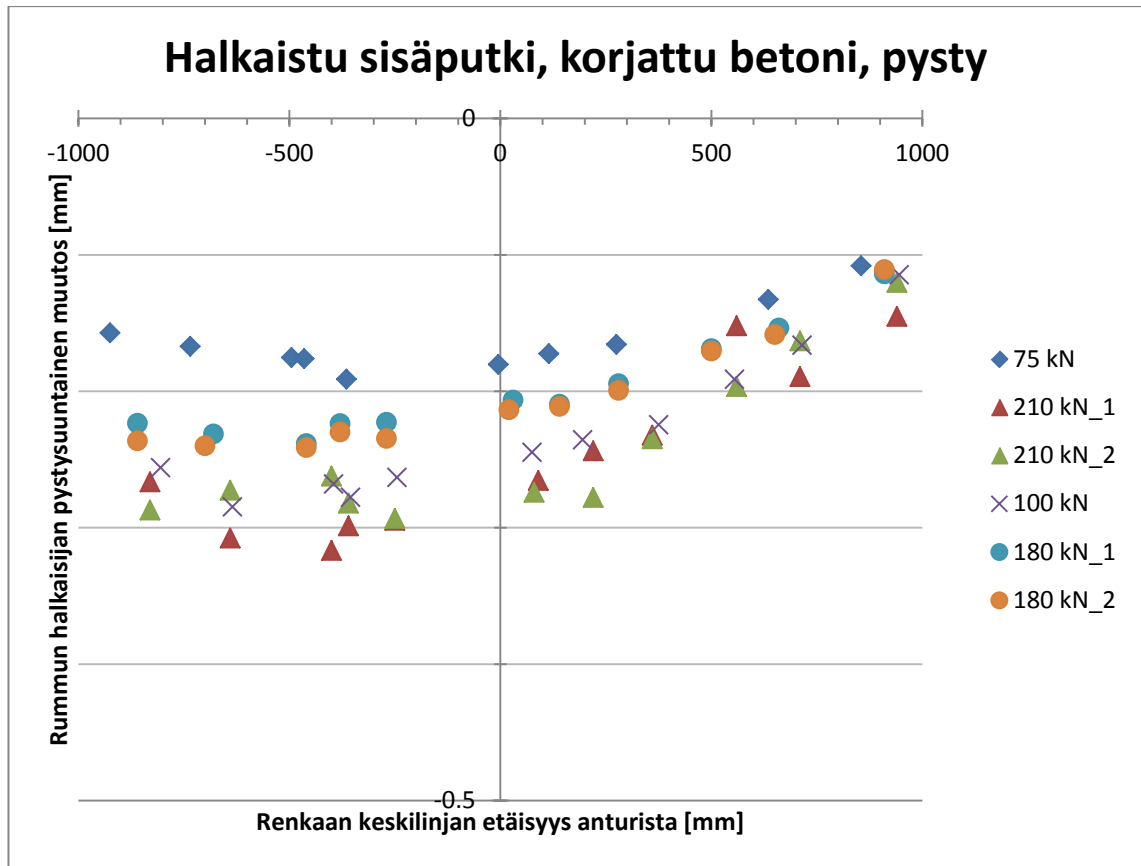
- [13] Haakana, V. (2014). Raskaiden ajoneuvojen rengastuksen vaikutus tierasitukseen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.
- [14] Haakana, V., Kalliainen, A., Kolisoja, P. (2015). Raskaista ajoneuvoista tien kohdistuvat rasitukset. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2015.
- [15] Heydinger, A.G. (2003). Evaluation of Seasonal Effects on Subgrade Soils. Transportation Research Record, 1821. pp. 47-55.
- [16] Katona, M.G. (1983). A Simple Contact-Friction Interface Element with Application to Buried Culverts. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. vol. 7, issue 3, pp. 371-384.
- [17] Kim, K., Yoo, C.H. (2005). Design Loading on Deeply Buried Box Culverts. Highway Research Center. Auburn University, Alabama.
- [18] Klaus-Jürgen, B., (1996). Finite Element Procedures. (Chapter 4.3.6. Calculation of Stresses and the Assessment of Error). Prentice hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- [19] Kolisoja, P. (1993). Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Kirjallisuusselvitys. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laitos. Tampere.
- [20] Kolisoja, P. (1998). Large scale dynamic triaxial tests, III. Delprosjektrapport KPG 20. Tampere University of Technology.
- [21] Kolisoja, P., Vuorimies, N., Saarenketo, T. (2004). Assessment of the effect of seasonal variations on the unbound materials of low volume roads by laboratory testing. Proceeding of the 6th International Symposium on Pavements Unbound (Unbar 6), 6 – 8 July 2004, Nottingham, England. Edited by Andrew R. Dawson.
- [22] Kouhia, R. (2013). Betonin ajasta riippumattomat materiaalimallit. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 38/2013.
- [23] Länsivaara, T., (1996). Maan mekaanisen käyttäytymisen mallintaminen. Lisensiaatintutkimus. Geotekniikan laboratorio, julkaisu 34. TTKK.
- [24] Mikkola, M., (1986). Levyjen, laattojen ja kuorien teoriaa. Otakustantamo moniste no. 275, 4.painos, Espoo.
- [25] Mäkelä, E., Kolisoja, P. (2002). FEM-selvitys tierumpuja ympäröivästä jännitysjakaumasta. Sisäisiä julkaisuja 39/2002. Tiehallinto. Helsinki.
- [26] Salmi, T., Pajunen, J. (2010). Lujuusoppi. Pressus Oy. Tampere.

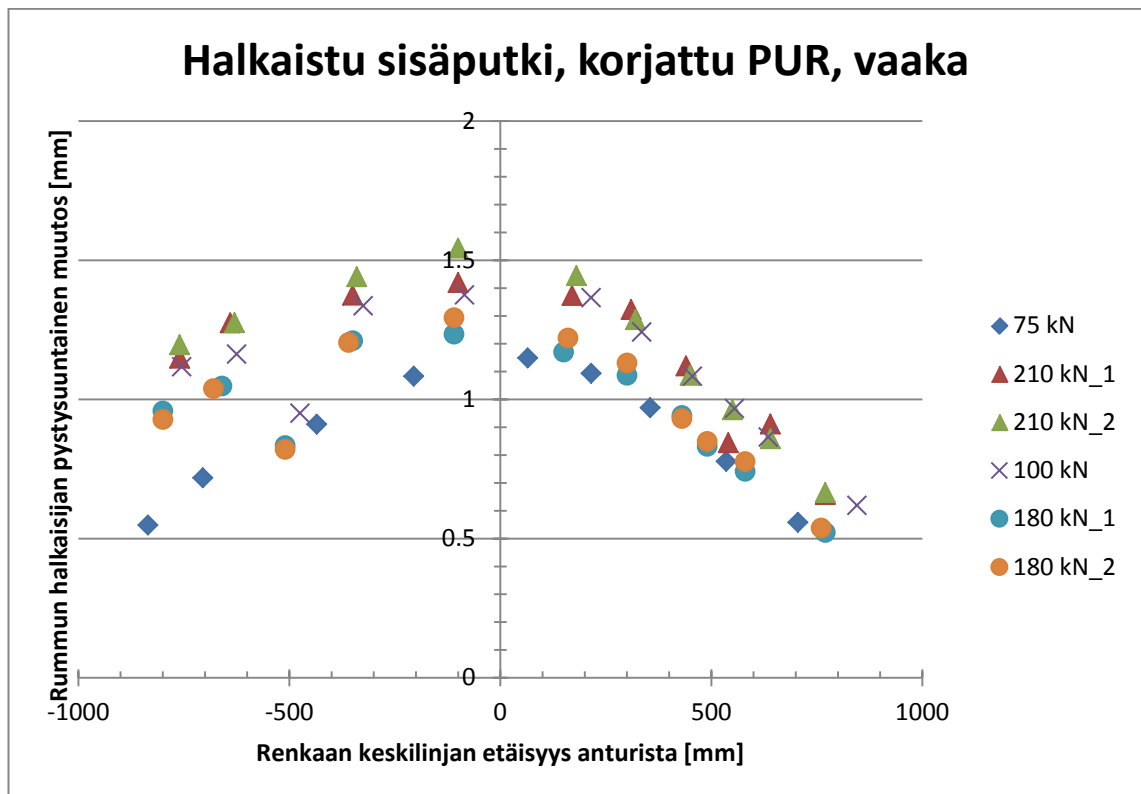
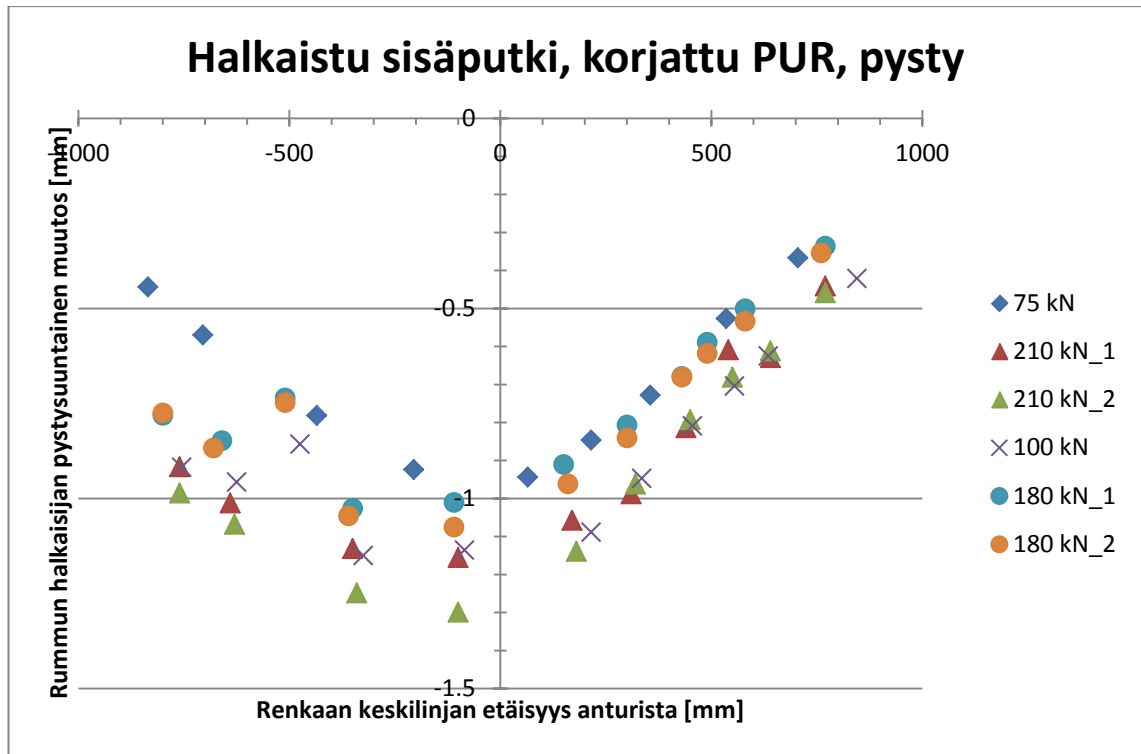
- [27] Salmi, T., Virtanen, S. (2008). *Materiaalien mekaniikka*. Pressus Oy. Tampere.
- [28] Sezen, H., Yeau, Y., Fox, P.J. (2008). In-Situ Load Testing of Corrugated Steel Pipe-Arch Culverts. *Journal of Performance of Performance and Constructed Facilities*, vol. 22, no. 4, pp. 245–252.
- [29] Simo, J.C., Hughes, T.J.R. (1998). *Computational Inelasticity*. Springer-Verlag New York, Inc.
- [30] Sweere, G.T.H. (1990). *Unbound Granular Bases for Roads*. Ph.D. Thesis, University of Delft.
- [31] Uzan, J. (1985). *Characterization of Granular Materials*. *Transportation Research Record*, No. 1022, pp. 52-59.
- [32] Wriggers, P. (2003). *Computational Contact Mechanics*. J. Wiley, Chichester.

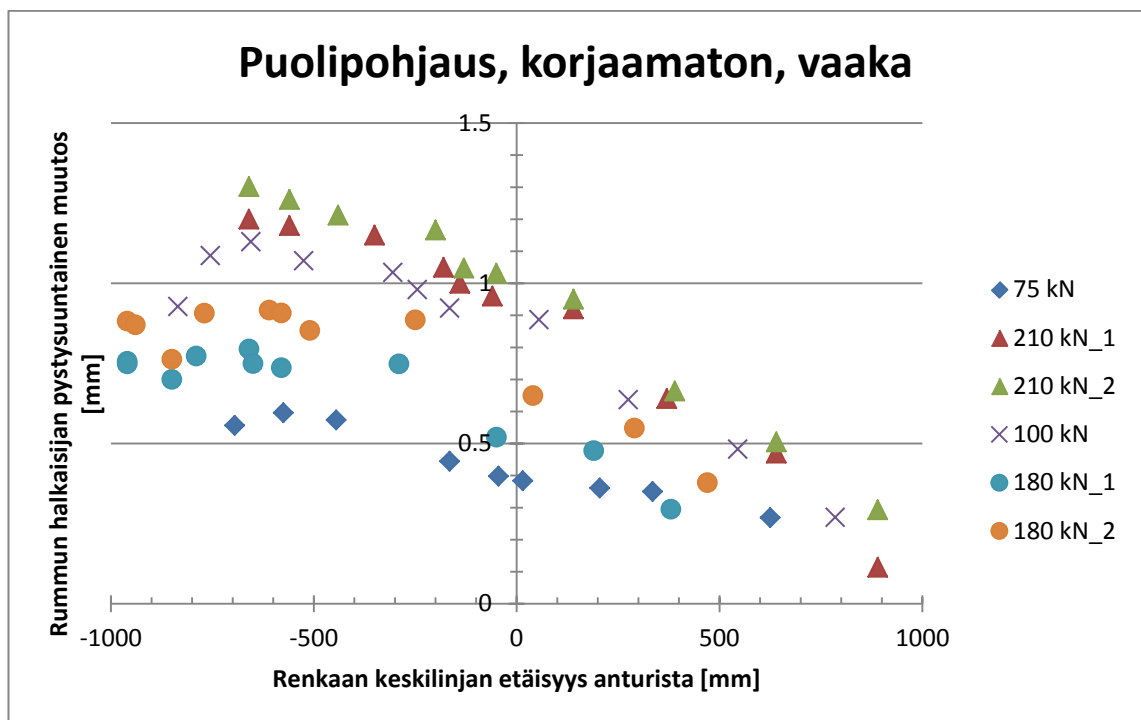
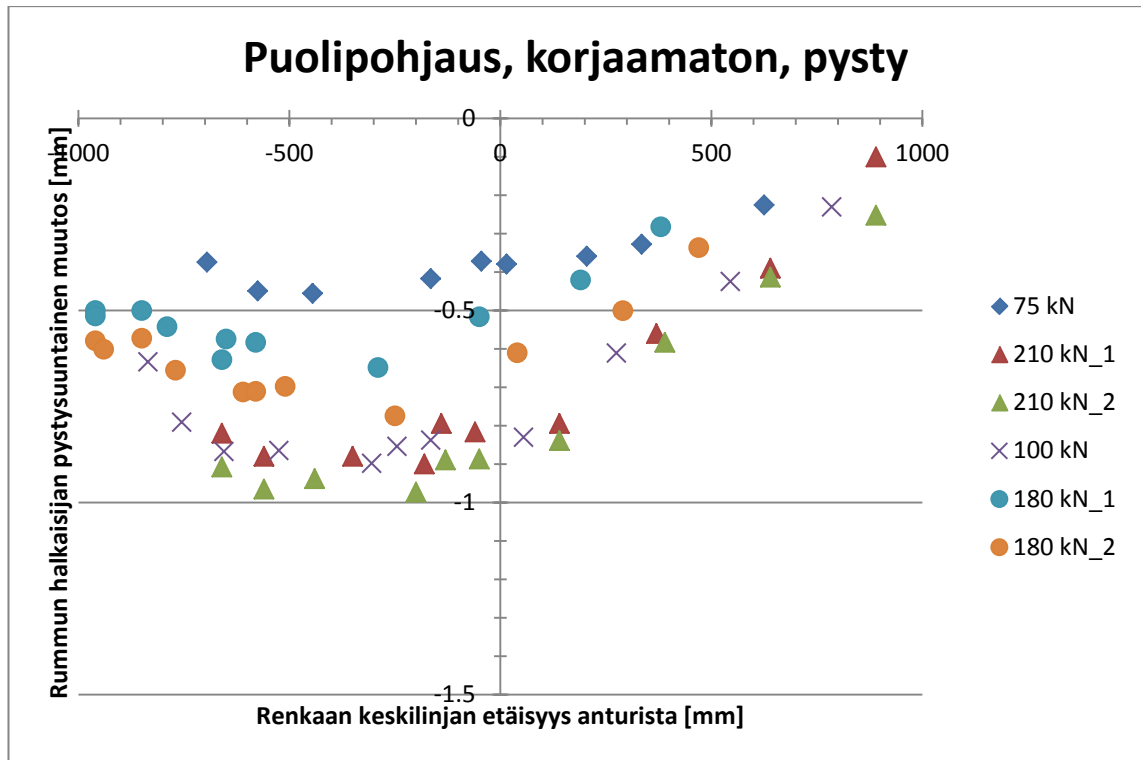
LIITE A: VAAKA- JA PYSTYHALKAISIJOIDEN MUUTOKSET

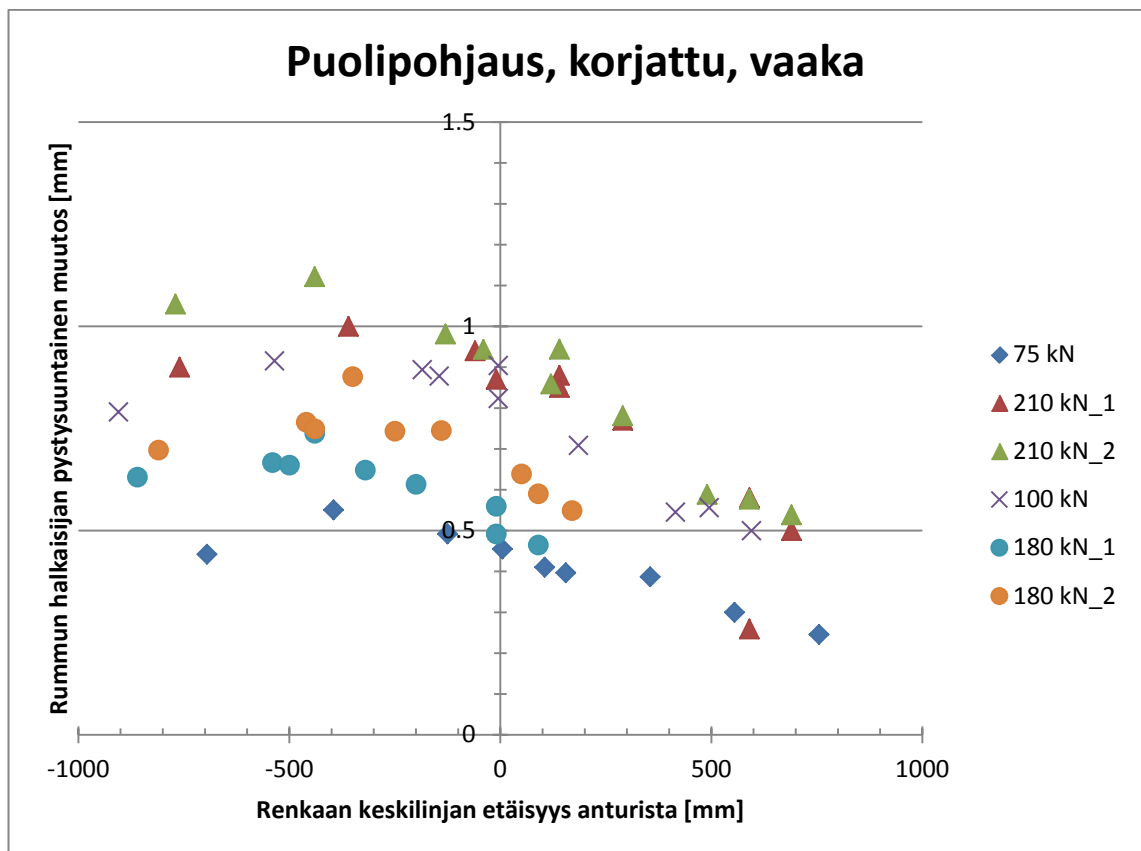
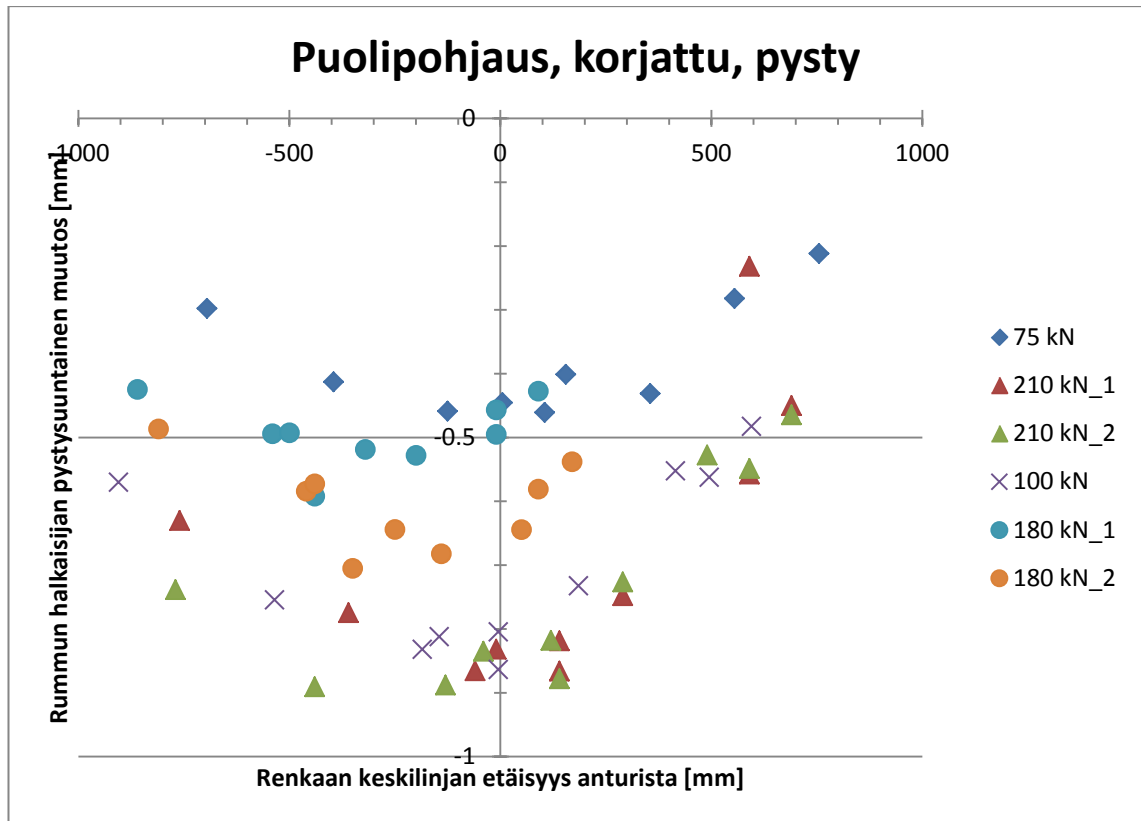
Tässä liitteessä on esitetty halkaistun sisäputken ja puolipohjauskohteen kaikki pysty- ja vaakahalkaisijoiden muutokset eripainoisten akselien tapauksissa.











LIITE B: ANSYS KOMENTOJONO

Tässä liitteessä on esitetty Ansyskässä käytettävän ohjelmointikielen, Ansys Parametric Design Language (APDL), komentojono, jolla halkaisusujutuksen laskentamalli on luotu. Komentoiono muodostuu mallin luomiseen ja ratkaisemiseen käytettävistä käskyistä, joista voidaan tulkita mallintamistapa ja materiaaliarvot. Koko komentosarja vie aikaa tietokoneen laskentakapasiteetista riippuen n. tunnin. Komentoiono ratkaisee tehtävän kahdesti, ensin maan alkujännitysten selvittämiseksi ja toisessa vaiheessa hyötykuormittuna.

```

!HALKAISTU SISÄPUTKI
FINISH
/CLEAR
/FILNAME,ANSYSCMD_VER5_SUJUTUS,1
/PREP7
!TERÄS
MP,EX,1,210000
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,0.00000000785
!KUORMA-ALUSTA
MP,EX,2,1000
MP,PRXY,2,0.495
MP,DENS,2,1.01936799184506E-10
!BETONI
MP,EX,3,31000
MP,PRXY,3,0.2
MP,DENS,3,2.54841997961264E-09
!MAAT,POHJA
MP,EX,4,10
MP,PRXY,4,0.495
MP,DENS,4,1.8348623853211E-09
TB,EDP,4,,LYFUN
TB,EDP,4,,LFPOT
TBDATA,1,0,40
TBDATA,1,0
!MAAT,KERROS2
MP,EX,5,75
MP,PRXY,5,0.3
MP,DENS,5,2.24260958205912E-09
TB,EDP,5,,LYFUN
TBDATA,1,0.616781257308151,18.5034377192445
TB,EDP,5,,LFPOT
TBDATA,1,0.555103131577336
!MAAT,KERROS1
MP,EX,6,150
MP,PRXY,6,0.3
MP,DENS,6,2.24260958205912E-09
TB,EDP,6,,LYFUN
TBDATA,1,0.685818874739393,34.5282218908945
TB,EDP,6,,LFPOT
TBDATA,1,0.617236987265454
!MAAT,YMPARYSTAYTTO
MP,EX,7,40
MP,PRXY,7,0.3
MP,DENS,7,2.24260958205912E-09

```

```

TB,EDP,7,, ,LYFUN
TBDATA,1,0.5164211951906,9.91483481207036
TB,EDP,7,, ,LFPOT
TBDATA,1,0.46477907567154
!ELEMENTIT,MAA
ET,1,SOLID186
!KUORIELEMENTTI, ALUSTA JA PUTKI
ET,2,SHELL181
SECTYPE,1,SHELL,,ALUSTA
SECDATA,10,2
SECTYPE,2,SHELL,,PUTKI
SECDATA,1.5,1
!ELEMENTTI,BETONI
ET,3,SOLID65
!KESKILINJA
K,1,0,-325,0
K,2,0,-325,500
!PROFIILI
K,NPT,0,150,0
K,NPT,0,150,100
K,NPT,0,175,110
K,NPT,0,175,160
K,NPT,0,150,170
!LINET
L,3,4
L,4,5
L,5,6
L,6,7
!ROTATE
AROTAT,1,2,3,4,, ,1,2
!PÄÄTYOSAT VOLUMEA VARTEN
AL,17,22,27,32
AL,18,23,28,33
AL,19,24,29,34
AL,20,25,30,35
AL,21,26,31,36
!VOLUMET
VA,1,5,9,13,17,18
VA,2,6,10,14,18,19
VA,3,7,11,15,19,20
VA,4,8,12,16,20,21
!VOLUMEN KOPIOIMINEN
VSEL,S,VOLU,, ,1,4
VGEN,30,ALL,, ,0,0,170
ALLSEL
!NURKKAPISTEET
K,NPT,-4000,-4450,0
K,NPT,-4000,-4450,5000
K,NPT,4000,-4450,5000
K,NPT,4000,-4450,0
K,NPT,-4000,0,0
K,NPT,-4000,0,5000
K,NPT,4000,0,5000
K,NPT,4000,0,0
K,NPT,-4000,200,0
K,NPT,-4000,200,5000
K,NPT,4000,200,5000
K,NPT,4000,200,0
K,NPT,-4000,550,0

```

K,NPT,-4000,550,5000
 K,NPT,4000,550,5000
 K,NPT,4000,550,0
 !YMPÄRYSTÄYTÖN NURKAT
 K,35001,-500,-1200,0
 K,35002,500,-1200,0
 K,35003,-500,-1200,5000
 K,35004,500,-1200,5000
 K,35005,-1700,0,0
 K,35006,1700,0,0
 K,35007,-1700,0,5000
 K,35008,1700,0,5000
 !MAAVOLUMET
 V,603,604,605,606,607,608,609,610
 V,607,608,609,610,611,612,613,614
 V,611,612,613,614,615,616,617,618
 !YMPÄRYSTÄYTÖN VOLUME
 V,35001,35003,35004,35002,35005,35007,35008,35006
 VSBV,121,124,,DELETE,KEEP
 !KUORMITUSKOHDAT
 K,10001,-40.635,550,1030
 K,10002,-70.635,550,1000
 K,10003,-70.635,550,815
 K,10004,-40.635,550,785
 K,10005,40.635,550,785
 K,10006,70.635,550,815
 K,10007,70.635,550,1000
 K,10008,40.635,550,1030
 A,10001,10002,10003,10004,10005,10006,10007,10008
 K,10009,-40.635,550,1365
 K,10010,-70.635,550,1335
 K,10011,-70.635,550,1150
 K,10012,-40.635,550,1120
 K,10013,40.635,550,1120
 K,10014,70.635,550,1150
 K,10015,70.635,550,1335
 K,10016,40.635,550,1365
 A,10009,10010,10011,10012,10013,10014,10015,10016
 K,10017,1329.365,550,1030
 K,10018,1299.365,550,1000
 K,10019,1299.365,550,815
 K,10020,1329.365,550,785
 K,10021,1410.635,550,785
 K,10022,1440.635,550,815
 K,10023,1440.635,550,1000
 K,10024,1410.635,550,1030
 A,10017,10018,10019,10020,10021,10022,10023,10024
 K,10025,1329.365,550,1365
 K,10026,1299.365,550,1335
 K,10027,1299.365,550,1150
 K,10028,1329.365,550,1120
 K,10029,1410.635,550,1120
 K,10030,1440.635,550,1150
 K,10031,1440.635,550,1335
 K,10032,1410.635,550,1365
 A,10025,10026,10027,10028,10029,10030,10031,10032
 VDELE,123
 ASBA,646,633,,DELETE,KEEP
 ASBA,659,635,,DELETE,KEEP

```

ASBA,646,657,,DELETE,KEEP
ASBA,659,658,,DELETE,KEEP
ASEL,S,AREA,,641,646,,0
ASEL,A,AREA,,633,,0
ASEL,A,AREA,,635,,0
ASEL,A,AREA,,657,658,,0
VA,ALL
ALLSEL
MAT,2
TYPE,2
SECNUM,1
SMRTSIZE,1
ASEL,S,AREA,,633,0,,1
ASEL,A,AREA,,635,,0
ASEL,A,AREA,,657,658,,0
LSEL,R,LENGTH,,90,500
LESIZE,ALL,,5
MSHAPE,0
AMESH,ALL
ALLSEL
!POISTETAAN PUTKI MAASTA
VSEL,S,VOLU,,1,120
VADD,ALL
ALLSEL
VSBV,124,123,,DELETE,KEEP
VSBV,122,123,,DELETE,KEEP
!KORJAUSTOIMENPITEET
!AUKAISTUN PUTKEN KESKILINJA
K,1500,0,-355,0
K,1501,0,-355,500
!PROFIILI
K,1502,0,78,0
K,1503,0,78,123
K,1504,0,95,130
K,1505,0,95,163
K,1506,0,78,170
!LINET
L,1502,1503
L,1503,1504
L,1504,1505
L,1505,1506
!ROTATE
AROTAT,1088,1092,1993,1994,,1500,1501,150
AROTAT,1088,1092,1993,1994,,1500,1501,-150
AROTAT,1999,2000,2001,2002,,1500,1501,20
AROTAT,2031,2032,2033,2034,,1500,1501,20
AROTAT,2040,2041,2042,2043,,1500,1501,20
!YHDISTETÄÄN NODET JA KPT
NUMMRG,NODE
NUMMRG,KP
!BETONIOSAN VOLUME
A,984,985,995,994
A,985,988,998,995
A,985,988,987,986
A,995,998,997,996
AL,1523,2053,2044,2035
AL,1527,2039,2048,2057
ASEL,S,AREA,,999,1016
!ASEL,A,AREA,,68,69

```



```

!ASEL,A,AREA,,74
!ASEL,A,AREA,,79
!ASEL,A,AREA,,84,87
!ASEL,A,AREA,,88,89
!ASEL,A,AREA,,90
!ASEL,A,AREA,,95
!ASEL,A,AREA,,100
!ASEL,A,AREA,,105
VA,ALL
ALLSEL
!PÄÄTYOSAT VOLUMEA VARTEN
AL,2008,2003,2021,2026,2053,2044,2035
AL,2009,2004,2022,2027,2054,2045,2036
AL,2010,2005,2023,2028,2055,2046,2037
AL,2011,2006,2024,2029,2056,2047,2038
AL,2012,2007,2025,2030,2057,2048,2039
!VOLUMET
VA,636,987,999,1003,1007,995,991,1017,1018
VA,638,988,1000,1004,1008,996,992,1018,1019
VA,640,989,1001,1005,1009,997,993,1019,1020
VA,986,990,1002,1006,1010,998,994,1020,1021
!VOLUMEN KOPIOIMINEN
VSEL,S,VOLU,,4,7
VGEN,30,ALL,,0,0,170
ALLSEL
!POISTETAAN PUTKI ISOMMASTA PUTKESTA
VSEL,S,VOLU,,4,120
VSEL,A,VOLU,,122
VSEL,A,VOLU,,124
VSEL,A,VOLU,,126
VADD,ALL
ALLSEL
VSBV,123,127,,DELETE,KEEP
!KOPIOIDAAN POHJAN BETONI
VSEL,S,VOLU,,3,
VGEN,30,ALL,,0,0,170
VADD,ALL
ALLSEL
NUMMRG,NODE
NUMMRG,KP
!LUODAAN TERÄSPUTKEN KUORIELEMENTTI
LSEL,S,LENGTH,,700,800
LESIZE,ALL,,11
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Y,-830,-790
LSEL,U,LENGTH,,150,500
LESIZE,ALL,,3
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Y,145,175
LESIZE,ALL,,3
LSEL,S,LOC,Y,-325
LESIZE,ALL,,3
VSEL,S,VOLU,,4
ASEL,S,EXT,
ASEL,U,AREA,,1018
ASEL,U,AREA,,1019
ASEL,U,LOC,Y,-890,-780
SMRTSIZE,1
MAT,1

```

```

TYPE,2
SECNUM,2
MSHAPE,0
AMESH,ALL
ALLSEL
!VGLUE POHJA,YMPARYSTAYTTO JA KERROS2
VGLUE,1,2,125
!VERKOTUS,KERROS2
MAT,5
TYPE,1
SMRTSIZE,1
MSHAPE,1
VMESH,3,3
!VERKOTUS,KERROS1
MAT,6
TYPE,1
SMRTSIZE,1
MSHAPE,1
VMESH,121,121
!VERKOTUS,BETONI
VADD,4,34
MAT,3
TYPE,3
SMRTSIZE,1
MSHAPE,1
VMESH,2
!VERKOTUS,YMPARYSTAYTTO
MAT,7
TYPE,1
SMRTSIZE,1
MSHAPE,1
VMESH,1
!VERKOTUS,POHJAMAA
MAT,4
TYPE,1
SMRTSIZE,1
MSHAPE,1
VMESH,125
!REUNAHDOT
ASEL,S,AREA,,631
DA,ALL,UY,0
DA,ALL,UZ,0
ASEL,A,AREA,,632
ASEL,A,AREA,,637
ASEL,A,AREA,,642
ASEL,A,AREA,,634
ASEL,A,AREA,,639
ASEL,A,AREA,,644
DA,ALL,UX,0
ALLSEL
!SYMMETRIA BC
ASEL,S,AREA,,656
ASEL,A,AREA,,1016
ASEL,A,AREA,,645
ASEL,A,AREA,,562
ASEL,A,AREA,,1018
DA,ALL,SYMM
ALLSEL
!GRAVITY

```

```
ACEL,0,9810,0
!INISTATE WRITE/READ
*DO,LASK,1,2
/PREP7
*IF,LASK,EQ,1,THEN
INISTATE,WRITE,1,,S
ESEL,S,MAT,,1
ESEL,A,MAT,,4,6
INISTATE,DEFI,,,,0.1,0.1,0.1
ALLSEL
*ELSE
ASEL,S,AREA,,633,,1
ASEL,A,AREA,,635,
ASEL,A,AREA,,657,658
SFA,ALL,,PRES,0.8
ALLSEL
INISTATE,READ,ANSYSCMD_VER5_SUJUTUS,IST
*ENDIF
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,0
NSUBST,20,500,1
AUTOTS,1
SOLVE
FINISH
*ENDDO
SAVE,,,ALL
FINISH
/POST1
/CONTOUR,ALL,128,
/DSCALE,ALL,AUTO
/EFACET,2
ESEL,S,MAT,,1
PLNSOL,U,Y,0,1.0
```