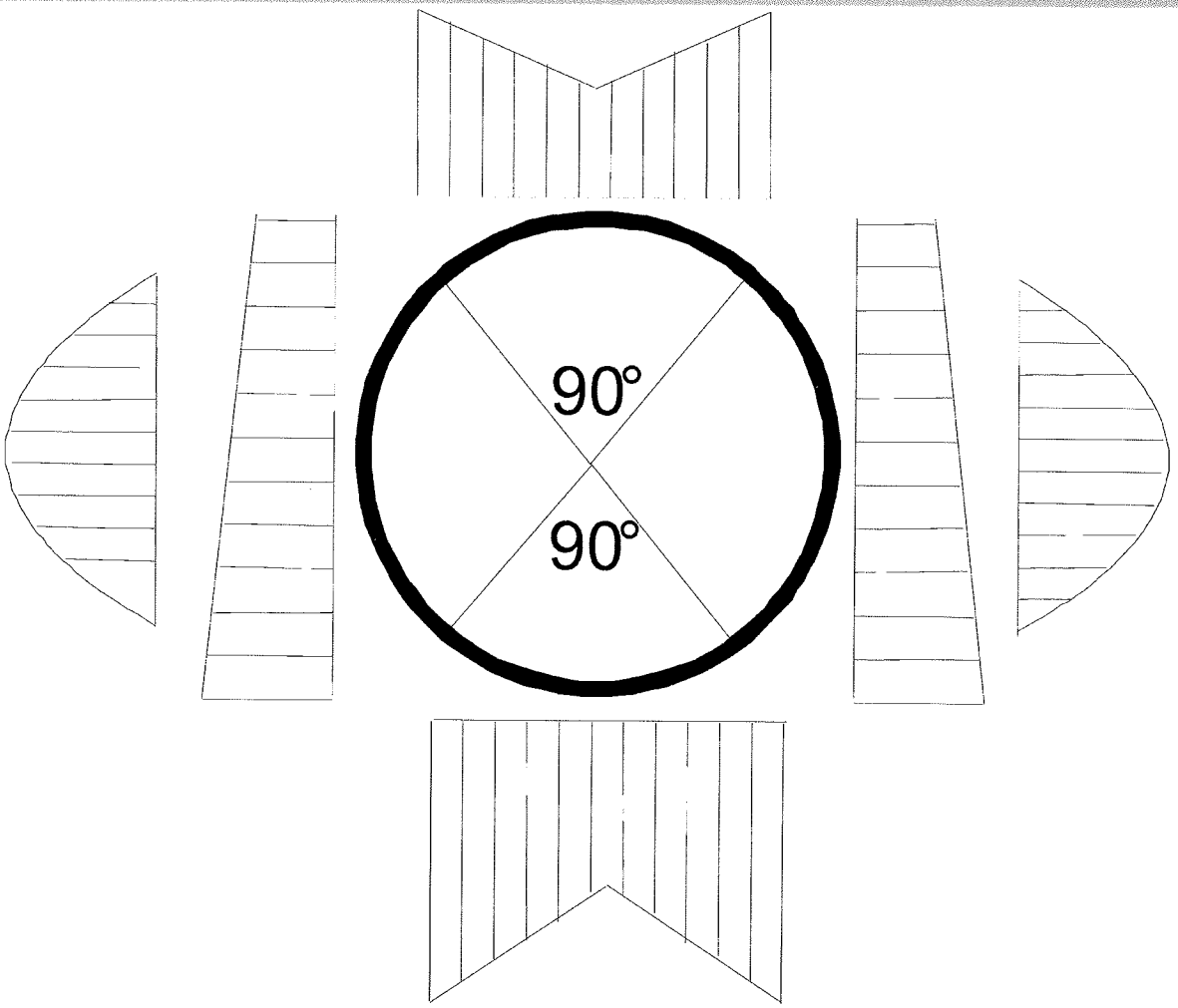
TIEHALLINTO

Erkki Mäkelä ja Pauli Kolisoja

FEM -selvitys tierumpuja ympäröivästä jännitysjakaumasta

Sisäisiä julkaisuja 39/2002



Erkki Mäkelä ja Pauli Kolisoja

FEM -selvitys tierumpuja ympäröivästä jännitysjakaumasta

Sisäisiä julkaisuja 39/2002

Tiehallinto
Helsinki 2002

ISSN 1457-991X
TIEH 4000350

ISSN 1458-1561 (www.tiehallinto.fi)
TIEH 4000350-v (www.tiehallinto.fi)

Multiprint Oy
Vaasa 2003

Julkaisua myy/saatavana:
Tiehallinto, julkaisumyynti
Telefaksi 0204 22 2652
E-mail: julkaisumyynti@tiehallinto.fi

TIEHALLINTO
Tekniset palvelut
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 22 150

Sisältö

1. JOHDANTO 5

2. MAAN MODUULEISTA 6

3. JÄNNITYSJAKAUMAN MÄÄRITTÄMINEN ELEMENTTI- JA KÄSINLASKENTA-MENETELMILLÄ RUMPUPUTKEN YMPÄRILLÄ 9

3.1 Elementtimenetelmä laskentamenetelmänä 9
3.2 Kaksiulotteinen geotekninen elementtiohjelma 9
3.3 Maan ja rummun materiaalimalleista 10
3.4 Laskentatapaukset ja maaparametrit 10
3.5 Jännitysten laskeminen maassa vaiheittaisessa rakentamisessa, kun rumpua kuormittaa maan omapaino 11
3.6 Elementtimenetelmällä lasketun maanpaineen jakautuminen rummun ympärillä maan omasta painosta 12
3.7 Maan painosta aiheutuvien jännitysten jakautuminen rummun ympärillä käsinlaskentamenetelmissä 14
3.8 Käsinlaskentamenetelmien parantaminen elementtimallinnuksen perusteella 15
3.9 Elementtimenetelmällä lasketun maanpaineen jakautuminen rummun ympärillä liikennekuormasta 16
3.10 Elementtimallinnuksesta liikennekuormalla saatujen maanpainejakautumien hyödyntäminen käsinlaskentamenetelmissä 18

4. ERI MATERIAALISTA VALMISTETTUJEN RUMPUTKIEN VERTAILULASKELMAT 20

4.1 Eri materiaalista valmistettujen rumpujen vertailu liikennekuormalla 20
4.2 Rumpuvalmistajien omilla laskentamenetelmillä ja TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion elementtimenetelmällä tehtyjen vertailulaskelmien periaate ja tulokset 20

5. YHTEENVETO 23

6. SUMMARY 24

KIRJALLISUUS 27

1. JOHDANTO

Nykyisin käytössä olevat eri rumpumateriaaleille tarkoitetut laskentamenetelmät olettavat maan rumpuun aiheuttamat kuormitukset erilaisiksi. Tämän vuoksi Tiehallinto tilasi tien kuivatusrakenteiden laatuvaatimuksia koskevaa julkaisua varten TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriolta elementtimenetelmään (FEM) perustuvan selvityksen maan rumpua kuormittavasta vaikutuksesta erilaisien jäykkyyden omaavilla rumpumateriaaleilla. Tutkimus suoritettiin kaksiulotteisella tasomuodonmuutostilaan perustuvalla PLAXIS -nimisellä FE -ohjelmistolla.

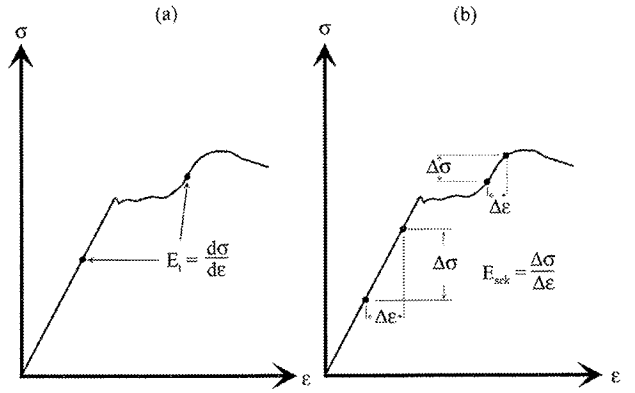
Tutkimuksessa käsitellyt rumpumateriaalit olivat betoni, teräs ja muovi. Putken sisähalkaisija oli elementtilaskennassa kaikilla rumpumateriaaleilla 1000 mm. Kuormitusotaksumina olivat pitkäaikainen maan omasta painosta aiheutuva kuormitus ja lyhytaikainen pelkästä liikennekuormasta aiheutuva kuormitus. Rumpua ympäröiväksi maamateriaaliksi valittiin tiivis sora ja huonosti tiivistetty keskitiivis hiekka, joiden maaparametrit valittiin betonisen rummun tapauksessa TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa aikaisemmin rakeisuudeltaan vastaavanlaisille materiaaleille tehtyjen määritysten tulosten perusteella. Teräksisille ja muovisille rummuille maamateriaalien parametrit lyhytaikaisessa kuormituksessa arvioitiin muodonmuutostason perusteella. Lyhytaikaisessa kuormituksessa maamateriaali otaksuttiin kimmoisaksi. Pitkäaikaisessa kuormituksessa maaparametrien valintaan vaikutti ainoastaan itse maamateriaali eikä rummun materiaali. Pitkäaikaisessa kuormituksessa maamateriaaliin pystyi syntymään myös plastisia muodonmuutoksia. Tutkitut peitesyvyydet olivat 0,5 m ja 1,5 m. Liikennekuormaksi valittiin Tielaitoksen julkaisun Siltojen kuormat (TIEL 2172072) mukainen yksiakselinen (260 kN) akselikuorma, jonka oletettiin jakautuvan tien pituussuunnassa 0,2 m ja tien poikkisuunnassa 3 m pituiselle alueelle.

Tässä tutkimuksessa esitetään laskettujen jännitysjakautumien lisäksi eri putkimateriaalien käytössä olevilla mitoitusmenetelmillä saatujen tulosten ja TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa elementtimenetelmällä laskettujen tulosten vertailu, kun tutkittavana putkikokona oli sisähalkaisijaltaan 1000 mm putki. Betonisen rumpuputken käsinlaskentamenetelmä perustui Betoniputkinormit 2001 mukaiseen laskentamenetelmään. Teräksestä valmistettu rumpuputki mitoitettiin Tiehallinnon julkaisun "Aallotetut teräsputket", TIEL 2172501 mukaan. Muovisella putkella vertailu tehtiin KWH-Pipen elementtimenetelmään perustuvan mitoitusohjelman ja TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden käyttämän PLAXIS elementtiohjelmiston välillä.

Tutkimuksen yhteydessä ilmeni myös tarvetta selittää lähinnä maalle käytettyjä eri moduulien määritelmiä. Tästä johtuen tutkimusraportin alkuun on kerätty lyhyt yhteenveto erilaisista moduuleista ja niiden määrittämistavoista.

2. MAAN MODUULEISTA

Moduulilla tarkoitetaan jännityksen ja muodonmuutoksen välistä suhdetta. Moduulin määritys voi tapahtua jännitys – muodonmuutoskuvaajan tietystä pisteestä, jolloin puhutaan tangenttimoduulista (kuva 2:1a) tai tiettyjen pisteiden väliltä, jolloin puhutaan sekanttimoduulista (kuva 2:1b).



Kuva 2:1 Teräksen moduulin määrittäminen (a) tangenttimenetelmällä ja (b) sekanttimenetelmällä kahdella eri jännitystasolla.

Tangenttimoduulina määritettyä moduulin arvoa merkitään yleensä alaindeksillä *t* esimerkiksi kuvassa 2:1a moduulia merkitään E_t. Vastaava merkintä sekanttimoduulina määritetyllä moduulilla on alaindeksi *s, sec* tai *sek.* Kuvassa 2:1b sekanttimoduulina määritettyä moduulia merkitään $E_{sek.}$ Alaindeksissä joskus esiintyvä pienellä merkitty numero tarkoittaa moduulin määrittämiskohtaa, jos moduuleja on määritetty useammassa kuin yhdessä kohtaa. Esimerkiksi kuvissa 2:1a ja b lähempänä origoa sijaitsevat moduulien määrittämiskohdat saavat numeron 1 ja kauempana origosta sijaitsevat moduuliarvot numeron 2. Moduulin jälkeen alan julkaisuissa ei yleensä esitetä määrittämismenetelmää, jos se otaksutaan tunnetuksi muusta yhteydestä. Teräksen kimmomoduuliksi ymmärretään yleisesti lineaarisesti kimmoisalla alueella mitattua/määritettyä jännityksen ja venymän suhdetta, joka voidaan ilmaista pelkkänä *E*:nä määrittämistavasta riippumatta. Tarkemmissa moduulien käsitteitä kuvaavissa teksteissä moduulin määrittämismenetelmä olisi sekaannuksen välttämiseksi ilmaistava. Maan käyttäytyminen on aina epälineaarista, toisin kuin teräksellä.

Maalle on olemassa useita eri moduuleita, jotka voidaan määrittää luvun 2 mukaisilla menetelmillä. Yleisesti maan moduuliarvot on määritetty sekanttimoduulimenetelmällä (kuva 2:1b) eli tietyltä jännitys- ja muodonmuutosväliltä mitattujen jännitysmuodonmuutosinkrementtien välisenä suhteena.

Sana kimmomoduuli sopii materiaaleille, joilla on havaittavissa selkeitä lineaarisesti kimmoisia jännityksen ja muodonmuutoksen välisiä suhteita (kuva 2:1a ja b). Tällaisia materiaaleja ovat muun muasssa monet metallit kuten teräs ja alumiini. Muista materiaaleista mainittakoon betoni ainakin alhaisilla venymillä ja puu. Maamateriaalit ovat kimmoisia hyvin alhaisilla venymätasoilla, mutta tällöinkin kimmoisuus on epälineaarista. Maamateriaalien fysikaalinen tila riippuu mm. maalajista, vesipitoisuudesta, tiiviydestä sekä konsolidaatiojännityksestä (RIL 157-1). Tämän takia maalla jännityksen ja muodonmuutoksen suhdetta ei yleensä kutsuta kimmomoduuliksi, vaan muodonmuutosmoduuliksi, joka tulee laskentoja varten määrittää sekanttimoduulimenetelmällä. Konsolidaatiopainuman laskentaa lukuun ottamatta tangenttimoduulimenetelmällä määritettyä maan muodonmuutosmoduulia ei yleensä käytetä laskennoissa.

Maan muodonmuutosmoduulit voidaan jakaa karkeasti suljetun tilan, avoimen tilan ja resilient-moduuliksi. Suljetun tilan muodonmuutosmoduulia E_u sovelletaan mm. koheesiomaakerroksen varaan perustettavan rakenteen alkupainuman laskemiseen. Geomekaniikassa sanotaan suljetuksi sellaista muodonmuutostilaa, jossa ei tapahdu tilavuuden muutoksia (RIL 157-1). Suljetun tilan moduuleita merkitään alaindeksillä *u*, joka tulee sanasta undrained eli kuivattamaton. Muita suljetun tilan maaparametrejä ovat muun muassa leikkausmoduuli G_u (kaava 2:1a) ja tilavuudenmuutosmoduuli K_u (kaava 2:1b).

$$G_u = \frac{E_u}{2(1+\nu_u)} \qquad (2:1a)$$

$$K_u = \frac{E_u}{3(1-2\nu_u)} \qquad (2:1b)$$

Suljetussa tilassa Poissonin luku n saa arvon 0,5. Tämä johtaa siihen että yhtälö 2:1a supistuu muotoon 2:2a ja yhtälö 2:1b muotoon 2:2b.

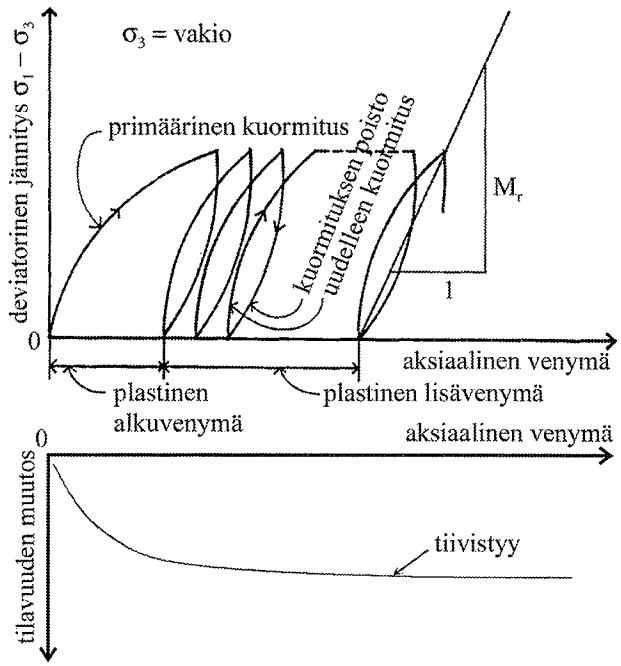
$$E_u = 3G_u \qquad (2:2a)$$

$$K_u \rightarrow \infty \qquad (2:2b)$$

Leikkausmoduuli *G* saadaan jakamalla leikkausjännitykset leikkausmuodonmuutoksilla. Tilavuudenmuutosmoduuli *K* saadaan jakamalla hydrostaattinen jännitys tilavuudenmuutoksella.

Avoimeksi sanotaan muodonmuutostilaa, jossa tapahtuu tilavuuden muutoksia. Avoimen tilan moduuleita merkitään alaindeksillä *d*, joka tulee sanasta drained eli kuivattuva. Avoimessa tilassa Poissonin luku *n* saa arvon < 0,5. Hooken lakia noudattavien aineiden tilavuudenmuutos riippuu hydrostaattisesta jännityksestä *p* ja avoimen tilan tilavuudenmuutosmoduulista K_d. Maassa tapahtuu tilavuudenmuutoksia kuitenkin myös leikkausjännitysten johdosta. Hydrostaattisen jännityksen ja leikkausjännityksen johdosta tapahtuvien tilavuuden muutosten erottaminen toisistaan on kuitenkin mahdollista laboratorio-olosuhteissakin vain tarkoitusta varten tehdyillä kokeilla.

Toistuvan kuorman muodonmuutosmoduuliksi eli resilient-moduuliksi E_r tai M_r kutsutaan kuvan 2:2 osoittamalla tavalla määritettyä moduulia.



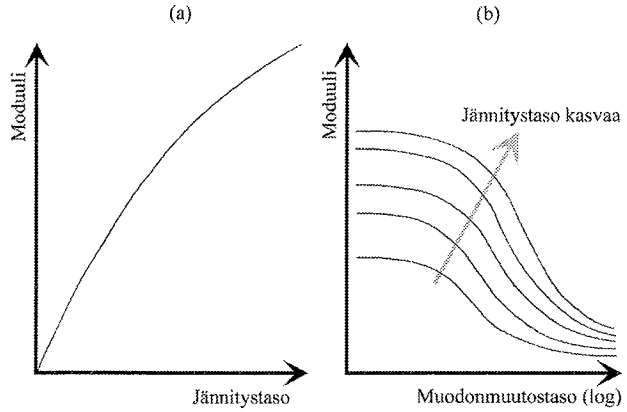
Kuva 2:2 Toistokuormitetun kolmiaksiaalikoenäytteen jännitys-venymä –käyttäytyminen (Chang et. al. 1980 ja Selig & Waters 1994).

Plastisen venymäinkrementin suuruus pienenee syklien lukumäärän kasvaessa. Huippukuorman maksimivenymän ja kuorman palautuksen jälkeistä pysyvän venymän erotusta voidaan kutsua resilient-venymäksi. Resilient-moduuli saadaan tällöin jakamalla toistokuormituksen deviatoorinen jännitys resilient-venymällä. Stabiloituneen syklin saavuttamiseen vaaditaan muutamia satoja toistokuormituskertoja, mutta vakio resilient-moduulin saavuttaminen vaatii muutamia tuhansia syklejä. (Selig & Waters 1994). Resilient-moduulin jännitystilariippuvuuden mallintamiseksi on kehitetty useita eri kaavoja kuten mm. Brown ja Pell 1967 ja Uzan 1985. Karkearakeisten materiaalien resilient-käyttäytymistä ja moduulien määrittämistä on enemmän tutkinut Kolisoja 1997 väitöskirjassaan "*Resilient Deformation Characreristics of Granular Material*".

Geoteknisessä suunnittelussa ei ole yleensä sovellettu tilavuudenmuutosmoduulia *K*. Konventionaalisissa rakenteiden painuman laskentamenetelmissä *K* on korvattu yksisuuntaisen muodonmuutostilan moduulilla *M*, jota sanotaan kokoonpuristuvuusmoduuliksi. Kokoonpuristuvuus- ja muista moduuleista on enemmän kerrottu muun muassa RIL 157-1 eli Geomekaniikka I kirjassa, sekä Geotekniikka (Rantamäki et al. 1979) oppikirjassa.

Tien kuivatusrakenteita koskevassa työryhmässä tuli esille myös sana 'passiivivastusmoduuli'. Passiivivastusmoduulilla tarkoitetaan maan muodonmuutosmoduulia, joka voi taasen olla niin suljetussa kuin avoimessakin tilassa. Passiivivastusmoduuliksi voidaan ymmärtää myös toistokuormitetun maarakenteen resilient-moduuli. Koska 'Passiivivastusmoduulilla' ei ole yksikäsitteistä määritelmää maamekaniikassa, tulisi sen käyttämistä asiateksteissä välttää.

Maan moduulit ovat riippuvaisia sekä jännitys- että muodonmuutostasosta, jonka kuormitus maamateriaaliin aiheuttaa. Riippuvuus on kummassakin tapauksessa epälineaarista kuten kuvista 2:3a ja b selviää.



Kuva 2:3 Maan moduulin periaatteellinen riippuvuus (a) jännitystasosta ja (b) muodonmuutostasosta.

Kuvassa 2:3a jännitystaso kasvaa lineaarisesti. Kuvassa 2:3b muodonmuutostaso kasvaa kuitenkin logaritmisesti.

3. JÄNNITYSJAKAUMAN MÄÄRITTÄMINEN ELEMENTTI- JA KÄSINLASKENTA-MENETELMILLÄ RUMPUPUTKEN YMPÄRILLÄ

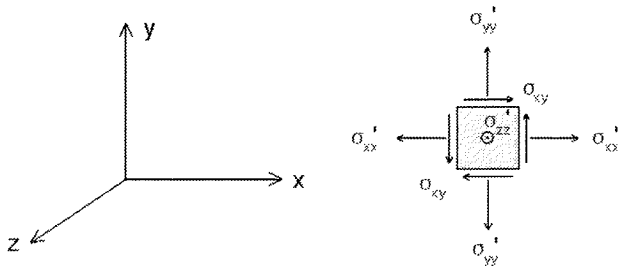
3.1 Elementtimenetelmä laskentamenetelmänä

Elementtimenetelmä on laskentamenetelmänä likimenetelmä, jolle löytyy sovellutuksia perinteisestä rakenteiden jännitys - muodonmuutosanalyysistä aina sähköteknisiin ja virtausopillisiin ongelmiin asti. Elementtimenetelmä perustuu potentiaalienergian minimiperiaatteeseen. Elementtimenetelmästä itsestään on kirjoitettu paljon ja alan perusteoksena voidaankin pitää Zienkiewicz & Taylorin alun alkajaan jo vuonna 1967 kirjoittamaa The Finite Element Method -kirjasarjaa.

Geotekniikassa elementtimenetelmää on käytetty elementtimenetelmän yleistyttyä. Geotekniset ongelmat eivät ole aina ratkaistavissa yleisluonteisilla elementtiohjelmistoilla. Tämän takia geoteknisiin ongelmiin on kehitetty erityisiä FE -ohjelmistoja, jotka pystyvät huomioimaan geoteknisiä erityispiirteitä, kuten pohjaveden, vaiheittaisen rakentamisen ja maamateriaalien jännitystilasta riippuvaan muodonmuutoskäyttäytymisen sekä plastisoitumisen. Tämän tutkimuksen yhteydessä käytetty elementtiohjelmisto on nimeltään PLAXIS, joka on tällä hetkellä geoteknisten kaksiulotteisten FE -ohjelmistojen parhaimmistoa, jollei jopa paras. Maan ja rakenteen yhteistoimintaa kuvaat elementtilaskennat ovat erittäin haastavia. Tampereen teknillisen korkeakoulun Pohja- ja maarakenteiden laboratoriolla on ollut tässä asiassa vakiintunut edelläkävijän asema Suomessa (Mäkelä 2001, 2000, 1998), (Koskinen 1997) ja (Rantala 2000, 1995).

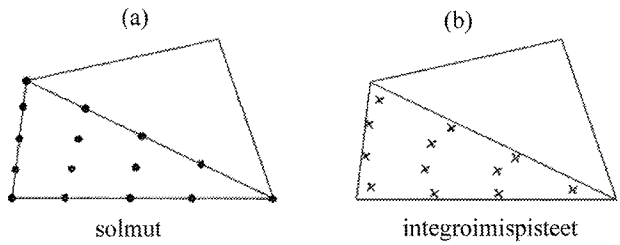
3.2 Kaksiulotteinen geotekninen elementtiohjelma

Kaksiulotteinen geotekninen elementtiohjelma käsittelee maata tasomuodonmuutostilassa ja/tai pyörähdyssymmetrisessä tilassa. Tässä tutkimuksessa rumpu ja maa mallinnettiin tasomuodonmuutostilassa. Tasomuodonmuutostilassa tutkitaan pituussuunnassa äärettömän pitkää maamassaa ja rakennetta poikkisuunnassa, kuten rumpua penkereessä. Malli näyttäytyy käyttäjälle kaksiulotteisena, mutta todellisuudessa ohjelmisto laskee tapausta, jossa mallin paksuus on 1 valittua yksikköä. Kuvassa 3.2:1 esitetään PLAXIS ohjelmiston koordinaatisto ja käytetty merkkikonventio. Mallin paksuus on nyt z –akselin suunnassa yksi.



Kuva 3.2:1 Karteesinen koordinaattisysteemi ja merkkikon-ventio (PLAXIS 7 käyttöohjekirja).

Elementtimalli koostuu nimensä mukaisesti elementeistä, jotka tässä tapauksessa olivat 15 -solmuisia kolmioelementtejä ja 5 -solmuisia sauvaelementtejä. Kolmioelementeillä mallinnettiin maata ja sauvaelementeillä rumpua. Kuvassa 3.2:2a esitetään 15 -solmuinen kolmioelementti solmuineen ja kuvassa 3.2:2b integroimispisteineen.



Kuva 3.2:2 15 –solmuisen kolmioelementin (a) solmut ja (b) integroimispisteet (PLAXIS 7 käyttöohjekirja).

Elementtimallissa siirtymät lasketaan tarkasti solmuissa ja jännitykset vastaavasti integroimispisteissä. Väliarvot interpoloidaan muotofunktioilla. Plastisoitumista kuvaavien elementtien täytyy olla asteluvultaan suurempia kuin 1. Sekä 15 -solmuinen kolmioelementti sekä 5 -solmuinen sauvaelementti ovat asteluvultaan 4, jolloin plastisoitumisen mallintaminen onnistui erinomaisesti.

3.3 Maan ja rummun materiaalimalleista

Rummun materiaalimallina oli molemmissa kuormitustapauksissa kimmoinen eli Hooken lain mukainen materiaalimalli (kaava 3.3:1).

$$E\varepsilon = \sigma \Leftrightarrow E = \sigma / \varepsilon \qquad (3.3:1)$$

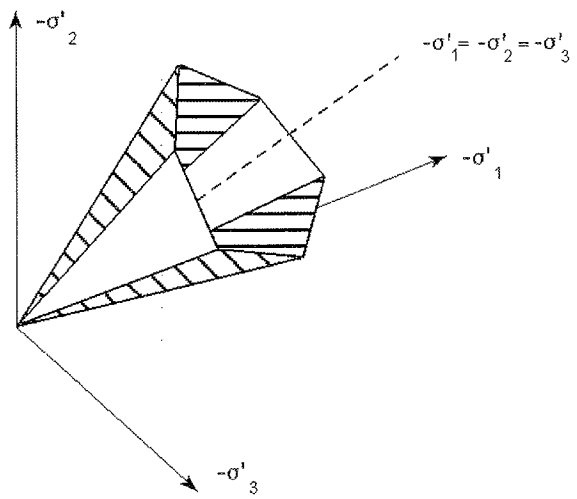
Maamateriaalin otaksuttiin käyttäytyvän Hooken lain mukaisesti kuormituksen ollessa pelkästään liikennekuormasta aiheutuva akselikuorma. Maan omanpainon kuormittaessa rumpua maan otaksuttiin myös plastisoituvan. Maan plastisoitumista kuvaavaksi materiaalimalliksi valittiin Mohr-Coulombin myötöehto, joka voidaan lausua yhtälöiden 3.3:2a-c avulla:

$$f_1 = \tfrac{1}{2}|\sigma_2' - \sigma_3'| + \tfrac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3')\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \qquad (3.3:2a)$$

$$f_2 = \tfrac{1}{2}|\sigma_3' - \sigma_1'| + \tfrac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_1')\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \qquad (3.3:2b)$$

$$f_3 = \tfrac{1}{2}|\sigma_1' - \sigma_2'| + \tfrac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2')\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \qquad (3.3:2c)$$

missä σ merkitsee kyseisen pääjännityssuunnan mukaista tehokasta jännitystä, φ = kitkakulma ja c vastaa koheesiota. Mohr-Coulombin myötöehto voidaan esittää pääjännitysavaruudessa (kuva 3.3:1).



Kuva 3.3:1 Mohr-Coulombin myötöehto pääjännitysavaruudessa (c=0) (PLAXIS 7 käyttöohjekirja).

3.4 Laskentatapaukset ja maaparametrit

Tässä tutkimuksessa tutkittiin sisähalkaisijaltaan 1000 mm rumpuputkea, joka oli valmistettu betonista, teräksestä ja muovista. Rumpuputket olivat sijoitettu 0,5 m ja 1,5 m syvyyteen maan pinnasta. Rumpua kuormitti ensimmäisessä kuormitustapauksessa maan omapaino ja toisessa tapauksessa ainoastaan 260 kN liikennekuorma, joka välittyi yhdestä ajoneuvon akselista. Liikennekuorma jaettiin maan päälle 433 kPa paineena, joka syntyy, kun kaksi 130 kN painavaa pyöräkuormaa jaetaan 0,2*3,0 m^2 suuruiselle alueelle. Rumpua ympäröivänä maamateriaalina oli tiivis sora ja keskitiivis hiekka. Ensimmäisessä kuormitustapauksessa eli maan oman painon vaikutuksesta tapahtuneessa kuormituksessa maan avoimen tilan muodonmuutosmoduulit sekä muut maaparametrit on esitetty taulukossa. 3.4:1. Ensimmäisessä kuormitustilanteessa rummun materiaalilla ei ollut vaikutusta maaparametreihin.

Muodonmuutosmoduulit ja tilavuuspainot on arvioitu TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa aikaisemmin rakeisuudeltaan vastaavanlaisille materiaaleille tehtyjen määritysten tulosten perusteella. Dilataatiokulmaksi Ψ oletettiin kitkakulma φ - 30°. Koheesioksi c valittiin mahdollisimman pieni arvo, jolla laskenta meni läpi.

Toisessa kuormitustapauksessa eli pelkän liikennekuorman tapauksessa maa mallinnettiin pelkästään kimmoisella mallilla. Maan muodonmuutosmoduulit sekä muut maaparametrit on esitetty taulukossa. 3.4:2. Maaparametreihin vaikutti nyt rummun materiaali muodonmuutostason kautta. Maan resilient-moduulia päätettiin pienentää muutaman iteraatiokierroksen jälkeen siten, että teräksestä valmistetulla rummulla maan resilient-moduuli oli 75 % betonista valmistettua rumpua ympäröivän maan resilient-moduulista. Muovista valmistettua rumpua ympäröivälle maalle päädyttiin

Taulukko 3.4:1 Tärkeimmät maaparametrit maan omasta painosta aiheutuneessa kuormitustilanteessa.

Maamateriaali	Tyyppi	γ [kN/m^3]	γ_{sat} [kN/m^3]	k [m/s]	ν'	E_d [MPa]	φ [°]	c' [kPa]	Ψ [°]
Sora	avoin	21,0	21,5	0	0,3	150	40	0,1	10
Hiekka	avoin	18,0	19,0	0	0,3	75	35	0,1	5

käyttämään resilient-moduulin arvoa, joka oli 70 % betonista valmistettua rumpua ympäröivän maan resilient-moduulin arvosta.

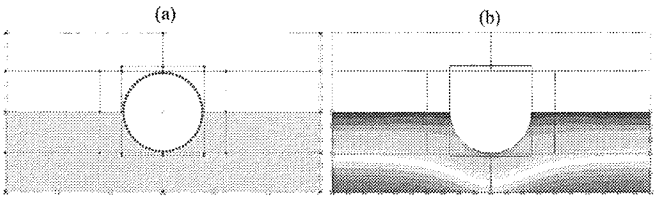
Taulukko 3.4:2 Tärkeimmät maaparametrit liikennekuormasta aiheutuneessa kuormitustilanteessa.

Maamateriaali/ rumpumateriaali	Tyyppi	γ [kN/m³]	γ_{sat} [kN/m³]	k [m/s]	ν'	E_r [MPa]
Sora/betoni	avoin	0	0	0	0,3	250,00
Hiekka/betoni	avoin	0	0	0	0,3	125,00
Sora/teräs	avoin	0	0	0	0,3	187,50
Hiekka/teräs	avoin	0	0	0	0,3	93,75
Sora/muovi	avoin	0	0	0	0,3	175,00
Hiekka/muovi	avoin	0	0	0	0,3	87,50

Rumpua kuvaaville palkkielementeille annettiin kimmomoduulin ja Poissonin luvun lisäksi rummun profiilia kuvaava pinta-ala ja neliömomentti rummun pituusyksikköä kohti. Eri materiaalista valmistettujen rumpujen kimmomoduuleja ja profiilin muotoa kuvaavia suureita ei esitetä lukuarvoilla tässä raportissa, sillä ne ovat luottamuksellisia.

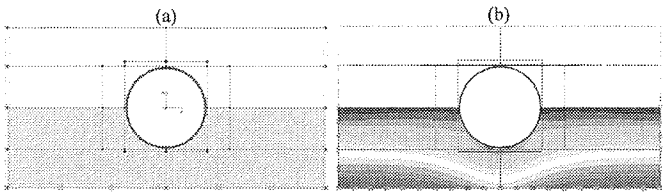
3.5 Jännitysten laskeminen maassa vaiheittaisessa rakentamisessa, kun rumpua kuormittaa maan omapaino

Maan omasta painosta aiheutuneet jännitykset laskettiin vaiheittaisen rakentamisen aikana. Rakentaminen mallinnettiin hieman reaalimaailmasta poikkeavalla tavalla. Ensimmäisessä vaiheessa rumpua ympäröivä täyttömateriaali oli rakennettu rummun puolivälin tasolle asti (kuva 3.5:1a). Tästä aiheutuva pystysuoran jännityksen jakauma esitetään kuvassa 3.5:1b.



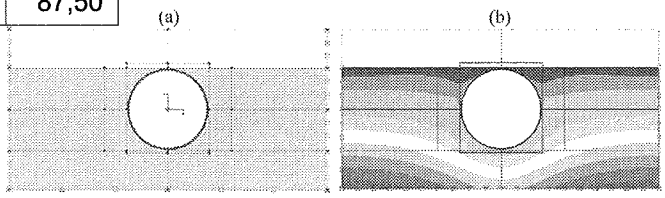
Kuva 3.5:1 (a) Ensimmäinen rakennusvaihe ja (b) siitä aiheutuneet jännitykset.

Toisessa rakennusvaiheessa lisättiin malliin mukaan itse rumpu (kuva 3.5:2a). Rummun lisääminen ei aiheuttanut muutosta jännitysjakaumaan, sillä rummun tilavuuspainoksi oletettiin kaikissa tapauksissa 0 kN/m³ (kuva 3.5:2b).



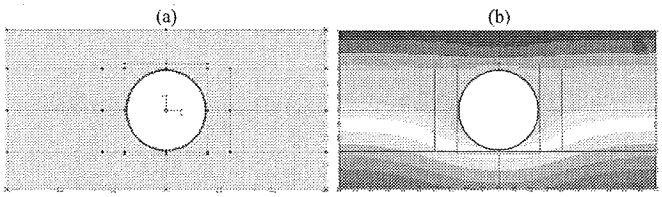
Kuva 3.5:2 (a) Toinen rakennusvaihe ja (b) siitä aiheutuneet jännitykset.

Kolmannessa rakennusvaiheessa maamateriaali ulotettiin rummun laen tasolle (kuva 3.5:3a). Rummun ympärillä olevan maan pystysuorat jännitykset on esitetty tässä tapauksessa kuvassa 3.5:3b.



Kuva 3.5:3 (a) Kolmas rakennusvaihe ja (b) siitä aiheutuneet jännitykset.

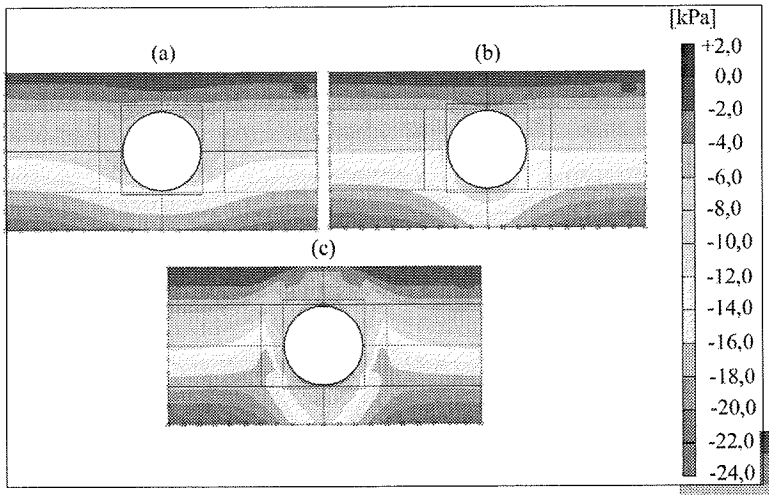
Neljännessä rakennusvaiheessa rakennettiin rumpua eniten kuormittava osa eli rummun laen yläpuolella oleva maakerros (kuva 3.5:4a). Rumpua ympäröivä pystysuora jännitysjakauma esitetään nyt kuvassa 3.5:4b.



Kuva 3.5:4 (a) Neljäs rakennusvaihe ja (b) siitä aiheutuneet jännitykset.

Kuvassa 3.5:4b oikealla yläkulmassa esiintyvä epäjatkuvuuskohta johtuu elementtiohjelmiston jälkikäsittelijästä, eikä sillä ole merkitystä laskennan tuloksiin. Kuvissa 3.5:1a - 3.5:4b on esitetty betonisen rummun vaiheittainen rakentaminen sorassa esimerkinomaisesti, eikä niissä tämän takia ole esitetty värien selitteitä. Kuvissa 3.5:1a - 3.5:4b on myös esitetty elementtimallin reunaehdot. Mallin pohja on jäykästi kiinnitetty. Sivuilla malli voi liikkua pystysuunnassa, mutta ei vaakasuunnassa. Kaikissa laskentatapauksissa pohjaveden pinnan oletetaan olevan syvemmällä kuin itse malli, joten taulukossa 3.3:1 esiintyvällä kyllästetyn

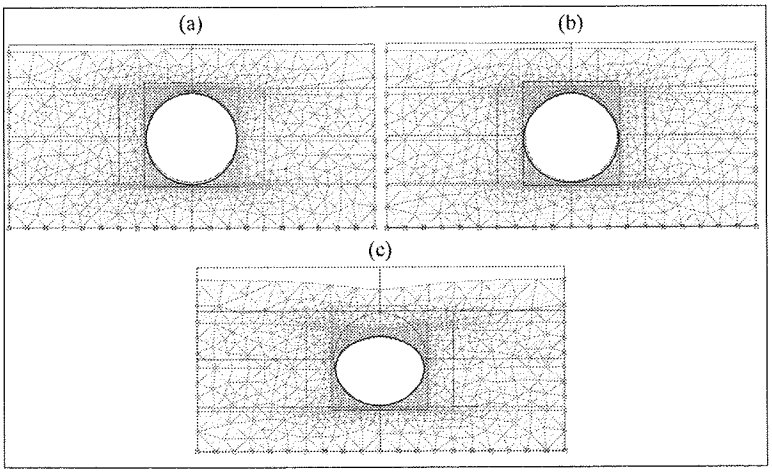
maan omalla painolla γ_{sat} ei ole merkitystä. Kuvissa 3.5:5a - c esitetään vielä esimerkinomaisesti maan pystysuorat jännitykset maan omasta painosta kaikilla rumpumateriaaleilla, kun ympäröivä maa on keskitiivistä hiekkaa ja peitesyvyytenä on 0,5 m.



Kuva 3.5:5 Rumpua ympäröivän maan pystysuorat jännitykset maan omasta painosta 0,5 m peitesyvyydellä, kun rumpumateriaalina on (a) betoni, (b) teräs ja (c) muovi.

Kuvista 3.5:5a - c havaitaan hyvin, kuinka jäykkyydeltään pienempiä rumpuja ympäröivä maa saa suurempia jännityksiä, koska rumpua ympäröivän maan täytyy kannatella rummun yläpuolista maamassan painoa enemmän.

Kuvia 3.5:5a - c vastaavat siirtymäkuvat esitetään kuvissa 3.5:6a - c.

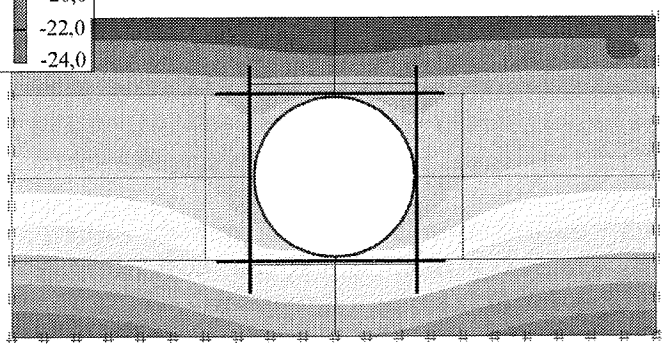


Kuva 3.5:6 Rummun ja maan deformoituneet muodot 0,5 m peitesyvyydellä, kun rumpumateriaalina on (a) betoni, (b) teräs ja (c) muovi. Skaalauskerroin on kaikissa kuvissa 300.

Kuvasta 3.5:6a havaitaan kuinka betoninen rumpu painuu alaspäin säilyttäen lähes ympyrämuotoisen muotonsa. Teräksinen rumpu deformoituu betonista rumpua enemmän (kuva 3.6:5b). Tällöin rumpu alkaa muistuttaa yhä enenemissä määrin ellipsiä. Muovinen rumpuputki painuu kuvassa 3.5:6c kasaan eniten.

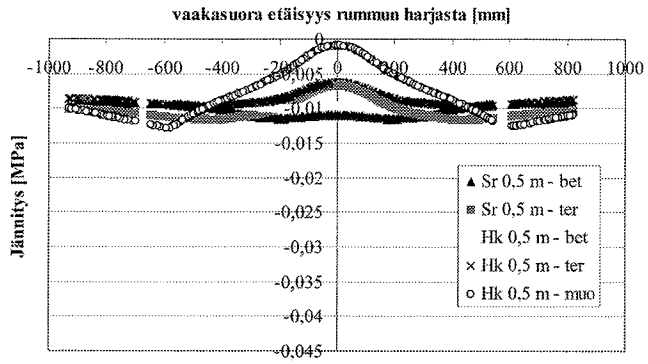
3.6 Elementtimenetelmällä lasketun maanpaineen jakautuminen rummun ympärillä maan omasta painosta

Rummun ympärillä tutkittiin maanpaineen jakautumista rummun yläpuolella, sivulla ja alapuolella. Maanpaineen määrittäminen tapahtui noin 20 mm rummun katosta, sivusta ja pohjasta maahan päin olevilla suorilla tasoilla (kuva 3.6:1).



Kuva 3.6:1 Maanpaineen määrittämiskohdat laskentamallissa.

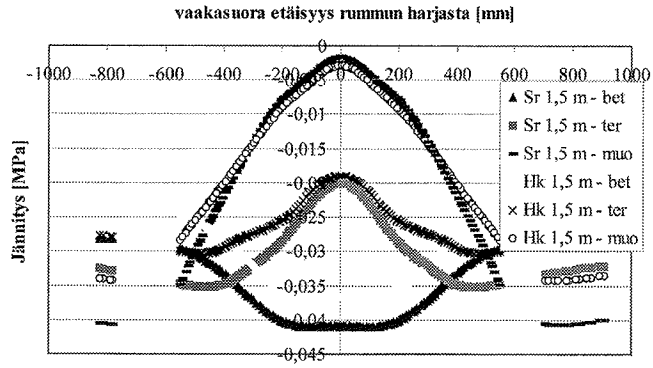
Kuvassa 3.6:1 vaakasuora maanpaine on symmetrinen molemmilla puolilla mallia, joten vaakasuora maanpaine esitetään vertailukuvissa vain toiselta puolelta. Kuvassa 3.6:2 esitetään rummun yläpuolinen maanpaine, kun peitesyvyytenä on 0,5 m.



Kuva 3.6:2 Rummun yläpuolinen jännitysjakauma 0,5 m peitesyvyydellä.

Kuvassa 3.6:2 ei ole esitetty sorassa olevan muovisen putken yläpuolisia jännityksiä, koska rumpu ei laskentamallissa kestänyt kyseistä kuormaa eli laskenta hajaantui. Muovisen rummun kestämättömyys sorassa on selitettävissä sillä, että soran suuri kitkakulma 40° johtaa kuormitusten keskittymiseen rummun päälle. Hiekan pienemmällä 35° kitkakulmalla kuormitukset eivät samalla tavoin keskity rummun yläpuolelle. Toisaalta soralla on myös suurempi tilavuuspaino kuin hiekalla. Rummuttoman penkereen jännitysjakauma vastaa arvoa, joka on lähellä kuvan 3.6:2 kauempana sivuilla olevaa arvoa. Tämä asia toistuu kaikissa pystysuuntaisia jännityksiä esittävissä kuvissa.

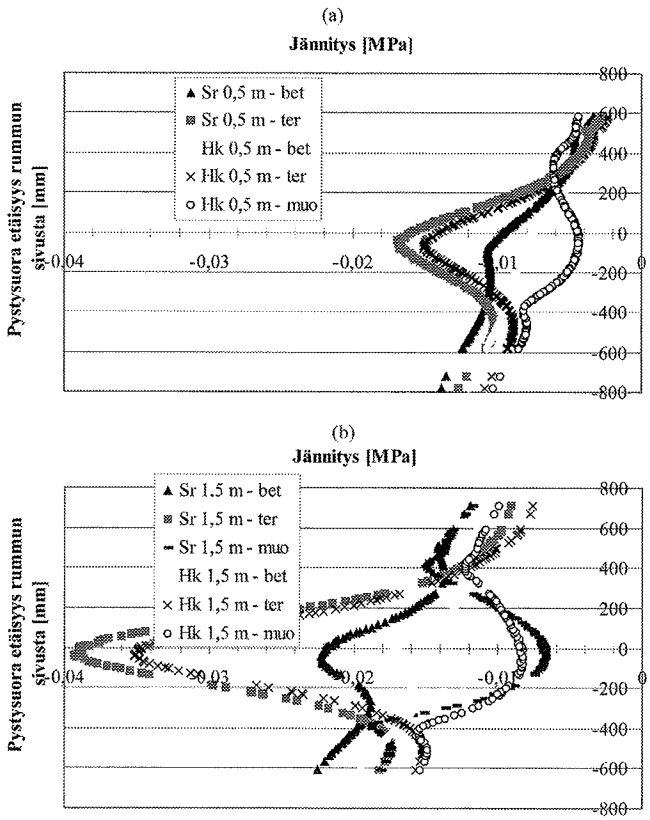
Jotta peitesyvyyden vaikutusta rummun yläpuolisiin jännityksiin voitaisiin verrata, esitetään kuvassa 3.6:3 rummun yläpuoliset jännitykset, kun peitesyvyytenä on 1,5 m.



Kuva 3.6:3 Rummun yläpuolinen jännitysjakauma 1,5 m peitesyvyydellä.

Kuvasta 3.6:3 havaitaan rummun yläpuolisen jännityksen jakaantuvan muodoltaan samalla tavalla kuin kuvassa 3.6:2. Betonisella rumpuputkella maan pystysuoran jännityksen itseisarvo kasvaa verrattuna rummun sivuilla olevaan jännityksen. Teräksisellä ja muovisella rumpuputkella rummun yläpuolisen maan jännitykset pienenevät itseisarvoltaan, lähestyen muovisella putkella rummun harjan kohdalla nollaa, kuitenkaan sitä aivan saavuttamatta. Kuvista 3.6:2 ja 3.6:3 havaitaan kuinka jännitykset ovat itseisarvoltaan suuremmat sorassa kuin hiekassa sekä betonisella että teräksisellä rumpuputkella. Yläpuolisen maan jännitykset ovat muovisen rumpuputken tapauksessa itseisarvoltaan lievästi suuremmat hiekassa kuin sorassa. Kuvasta 3.6:3 havaitaan myös se, että muovinen rumpu kestää nyt soran painon. Tämä selittynee sillä, että riittävän paksu maakerros pystyy holvaantumaan ohuempaa maakerrosta paremmin.

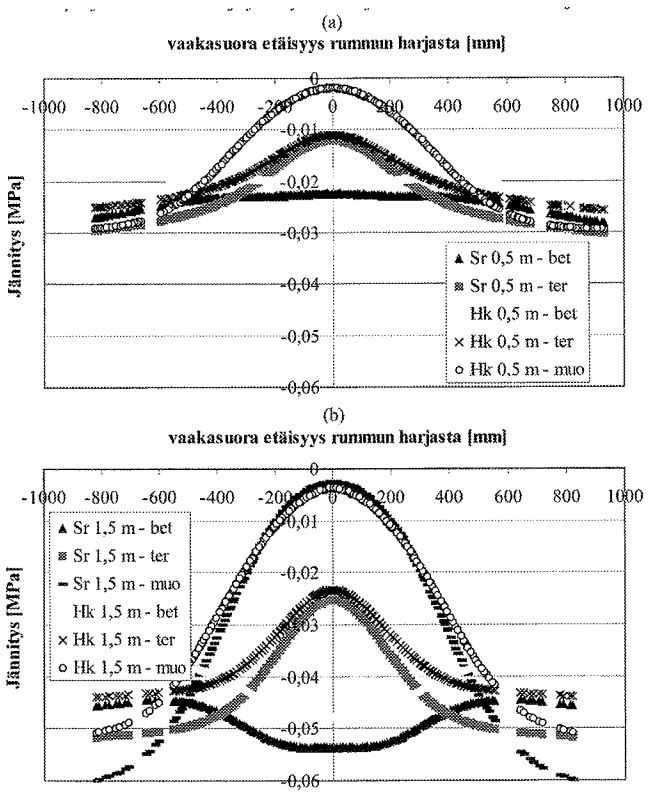
Rummun sivulla olevat maanpaineet jakautuvat myös eri tavalla riippuen rummun materiaalista. Kuvassa 3.6:4a esitetään rummun sivulla olevan maan vaakasuuntainen jännitysjakauma, kun peitesyvyys on 0,5 m. Peitesyvyyden ollessa 1,5 m vastaava jännitysjakauma maassa on kuvan 3.6:4b mukainen.



Kuva 3.6:4 Rummun sivulla oleva jännitysjakauma (a) 0,5 m ja (b) 1,5 m peitesyvyydellä.

Kuvista 3.6:4a ja b havaitaan kuinka itseisarvoltaan suurimmat jännitykset syntyvät teräksisen putken viereiseen maahan. Betonisella putkella maan vaakasuuntainen jännitysjakauma on ainakin pienillä peitesyvyyksillä lähes rummuttoman maan maanpaineen eli niin kutsutun lepopaineen mukainen. Muovisella putkella putki painuu sivuilta kasaan vaakasuuntaisesta maanpaineesta, jolloin putkea ympäröivän maan vaakasuuntaiset jännityksetkin ovat itseisarvoltaan pienemmät kuin betonisen ja teräksisen rummun tapauksissa. Siinä missä betonisella ja teräksisellä rummulla maata kuormittava vaakasuora paine poikkeaa lepopaineesta passiivipainetta kohti, niin muovin tapauksessa paine on muuttunut aktiivipainetta kohti. Jännityksen itseisarvon suuruudessa on havaittavissa soralla ja hiekalla sama asia kuin rummun päällä olevassa jännityksessä. Betonisen ja teräksisen rumpuputken tapauksessa maan jännitykset ovat sorassa itseisarvoltaan suurempia kuin hiekassa. Muovisella putkella asia on toisinpäin ainakin jännitysten huippujen osalta.

Rummun pohjan tasolta laskettuja jännitysten arvoja esitetään kuvissa 3.6:5a ja b.

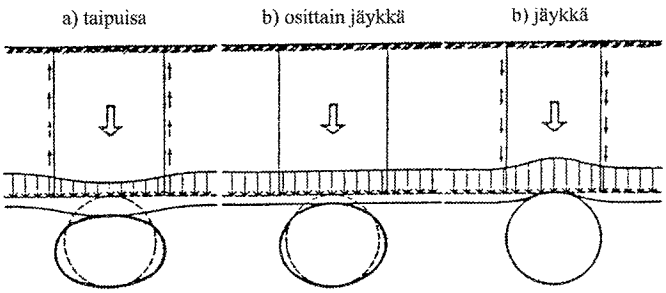


Kuva 3.6:5 Rummun alapuolelta oleva jännitysjakauma peitesyvyydellä (a) 0,5 m ja (b) 1,5 m.

Kuvista 3.6:5a ja b havaitaan kuinka betonisella rumpuputkella rummun alla jännityksen itseisarvo pienenee rummun ulkopuoliseen jännitykseen verrattuna 0,5 m peitesyvyydellä. 1,5 m peitesyvyydellä rummun alapuolella jännityksen itseisarvo suurenee. Tämä asia ei näyttäisi olevan ympäröivästä maasta riippuva, vaan pelkästään peitesyvyydestä. Teräksisellä ja muovisella rumpuputkella rummun alla jännityksen itseisarvot pienevät ympäröivään maahan nähden molemmilla peitesyvyyksillä. Sorassa vallitsevat jännitykset ovat itseisarvoltaan suurempia kuin hiekassa sekä betonisen että teräksisen rumpuputken tapauksessa. Muovisella rumpuputkella asia on toisinpäin.

3.7 Maan painosta aiheutuvien jännitysten jakautuminen rummun ympärillä käsinlaskentamenetelmissä

Rummut voidaan jakaa karkeasti taipuisiin, osittain jäykkiin ja jäykkiin putkiin. Kuvassa 3.7:1 esitetään taipuisan, osittain jäykän ja jäykän putken vaikutus rummun kattoon kohdistuviin pystysuoriin jännityksiin.

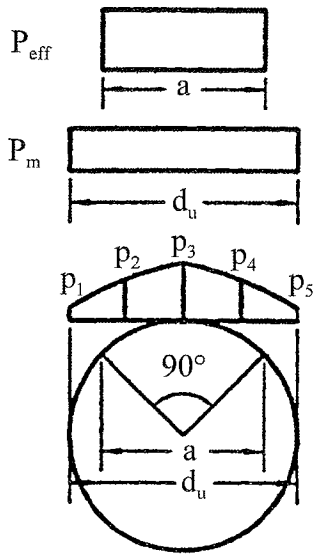


Kuva 3.7:1 Putken jäykkyyden vaikutus maan pystysuoraan jännitykseen rummun katon kohdalla (Halme 1994).

Kuvasta 3.7:1 havaitaan kuinka taipuisalla putkella osa maanpainosta siirtyy putken litistyessä kitkan kautta ympäröivälle maalle. Jäykällä putkella maa painuu rumpua enemmän, jolloin rummun kattoon vaikuttaa suurempi pystysuora jännitys kuin mitä suoraan maan päällä olevan maan tilavuuspainosta tulisi. Osittain jäykällä putkella maa ja putki painuvat yhtä paljon, jolloin rummun kattoon vaikuttava pystysuora jännitys on sama kuin ympäröivässä maassa.

Käsinlaskentamenetelmissä rummun jäykkyys huomioidaan maasta aiheutuneiden jännitysten laskemisessa monella eri tavalla. Betoniputkinormit 2001 olettaa pystysuoran maanpaineen jakau-

tuneen tasaisesti rummun kattoon ylimmän neljänneskaaren leveydelle (kuva 3.7:2). Betoniputkinormien mukaan sivustojen huolellinen tiivistäminen noin 300 mm putken laen yläpuolelle saa peitemaakuorman kohdistumaan myös putken sivupintoihin. Sivupintojen huolellinen tiivistäminen otetaan huomioon peitemaakuorman vähennyksenä, eikä erillisenä vaakasuorana maanpaineena.



Kuva 3.7:2 Jännityksen laskentapisteet betonisen rummun katon korkeudella. Simpsonin kaavalla laskettu keskimääräinen jännitys P_m ja efektiivinen jännitys P_{eff} (Betoniputkinormit 2001).

Kuvassa 3.7:2 esiintyvät merkinnät P_m ja P_{eff} liittyvät liikennekuorman laskemiseen ja ne lasketaan yhtälöiden 3.7:1 ja 3.7:2 tavalla pisteissä p_i vallitsevista jännityksistä

$$P_m = (p_1 + 4p_2 + 2p_3 + 4p_4 + p_5)/12 \qquad (3.7:1)$$

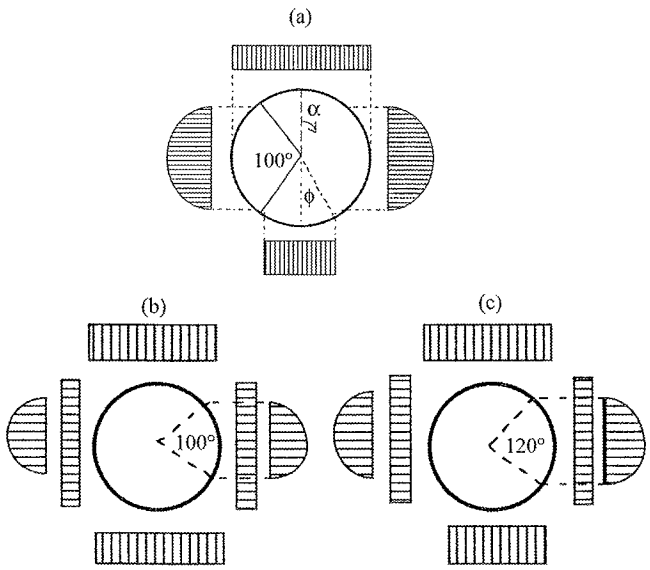
$$P_{eff} = P_m * d_u / a \qquad (3.7:2)$$

Yhtälöissä 3.7:1 ja 3.7:2 esiintyvät merkinnät ovat:

P_m = Simpsonin kaavalla laskettu keskimääräinen jännitys
p_i = Boussinesqin jännitysjakautumakaavan mukainen jännitys pisteessä i
P_{eff} = efektiivinen jännitys
d_u = putken vaakasuora ulkohalkaisija
a = vaakasuora etäisyys kuvassa 3.7:2, joka on mitattu rummun ulkohalkaisijasta

Maan omasta painosta tuleva jännitys lasketaan Betoniputkinormeissa joko tavanomaisella hautateorialla, keskimääräinen maapatsas-, pengertarkistus- tai pengertapausmenetelmällä.

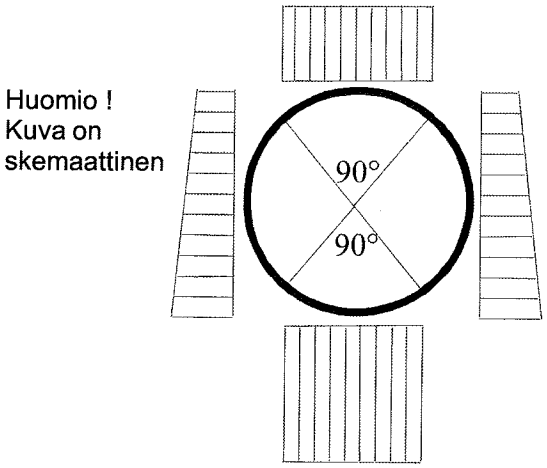
Taipuisille putkille, kuten teräs ja muovi, on kehitetty laskentamenetelmiä, joissa rumpuun kohdistuvaa kuormitusta on pyritty mallintamaan niin pystykuin sivusuunnassakin. Spanglerin 1941 esittämässä maanpainemallissa rumpua ympäröivän maanpaineen oletetaan jakautuvan kuvan 3.7:3a mukaisesti. Spanglerin maanpainemallista on johdettu Ruotsalainen Molinin malli (kuva 3.7:3b) ja Saksalainen ATV-malli (kuva 3.7:3c).



Kuva 3.7:3 (a) Spanglerin, (b) Molinin ja (c) ATV maanpainemalli.

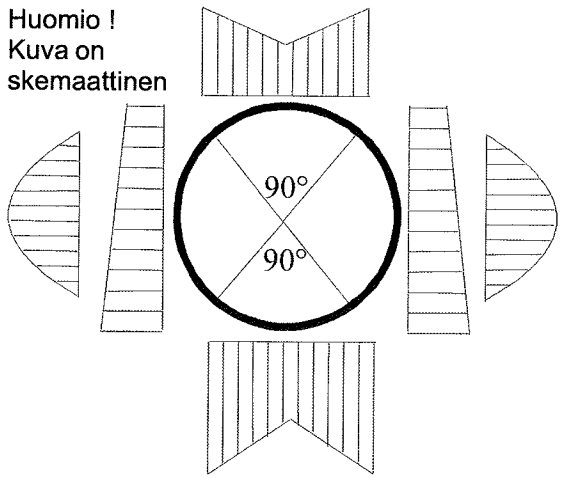
3.8 Käsinlaskentamenetelmien parantaminen elementtimallinnuksen perusteella

Betonisella putkella voidaan olettaa rumpuun yläpuolisesta maasta kohdistuvan jännityksen lisääntyvän. Nykyistä käytäntöä, jossa rummun yläpuolisen maan paino jaetaan neljänneskaaren pituudelle rummun yläpuolelle tasaisena kuormana, voidaan pitää elementtilaskentoihin perustuen perusteltuna. Rummun sivuilla pitäisi ottaa huomioon maanpaine, joka vaikuttaa kuten rumpua ei olisikaan maassa. Rummun alla maassa vaikuttava maanpaine voidaan olettaa tasan jakautuneeksi saman suuruiselle alueelle kuin rummun yläpuolellakin. Kuvassa 3.8:1 esitetään ehdotus mahdolliseksi maanpaineen jakautumamalliksi betonisella rumpuputkella.



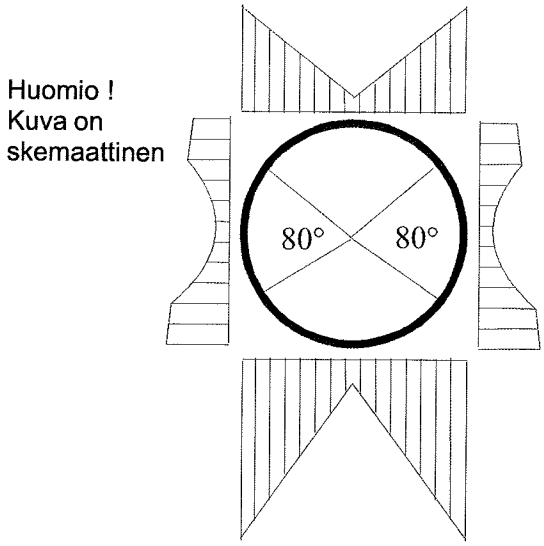
Kuva 3.8:1 Elementtimallinnuksen tuloksia vastaava maanpaineen periaatteellinen jakautuma betonisella rumpuputkella.

Teräksisellä rumpuputkella rummun päällä oleva maanpaine näyttäisi pienenevän rummun yläpuolella verrattuna ympäröivään maahan. Rummun sivuilla maanpaineen suuruus lisääntyy huomattavasti rummun siirtäessä maata sivulle. Rummun alapuolella oleva maanpaine näyttäisi yläpuolisen maanpaineen tavoin pienenevän rummun keskikohdan kohdalla. Teräksestä valmistetun rumpuputken ympärillä vallitsevan maanpaineen jakautumamalliksi ehdotetaan elementtilaskelmien perusteella seuraavalaista kuvaa (kuva 3.8:2).



Kuva 3.8:2 Elementtimallinnuksen tuloksia vastaava maanpaineen periaatteellinen jakautuma teräksisellä rumpuputkella.

Muovisella 1000 mm rumpuputkella rummun päällä ja alla rummun keskikohdalla rumpua kuormittava maanpaine oli lähellä nollaa. Rummun sivuilla maanpaineen vaikutus pieneni noin puoleen siitä mitä se olisi ollut jollei rumpua olisi maassa laisinkaan. Kuvassa 3.8:3 esitetään muovista valmistetun rumpuputken ympärillä vallitseva maanpaineen periaatteellinen jakautumamalli elementtilaskelmien perusteella.

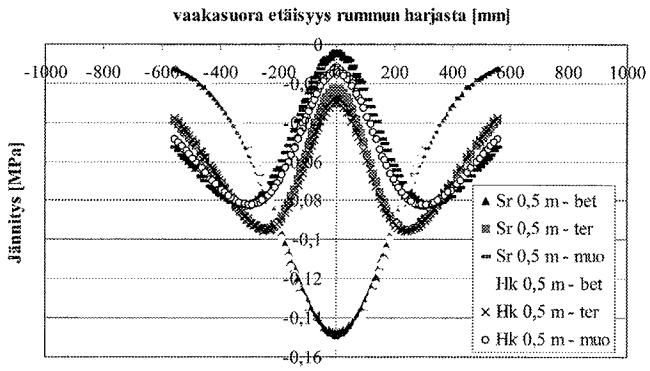


Kuva 3.8:3 Elementtimallinnuksen tuloksia vastaava maanpaineen periaatteellinen jakautuma muovisella rumpuputkella.

Kuvat 3.8:1 - 3.8:3 ovat skemaattisia ja täten vain suuntaa antavia ehdotuksia. Kuvat perustuvat vain tässä tutkimuksessa lasketuille laskentavaihtoehdoille, eivätkä täten ole sellaisenaan mitään yleispäteviä ratkaisumalleja edellä mainituille putkimateriaaleille eri putkihalkaisijoilla ja asennussyvyyksillä.

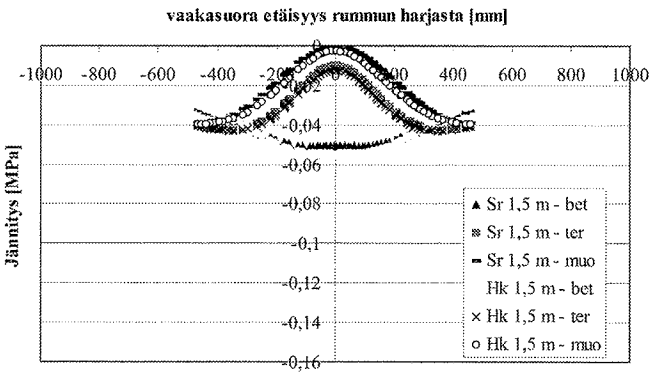
3.9 Elementtimenetelmällä lasketun maanpaineen jakautuminen rummun ympärillä liikennekuormasta

Liikennekuorman mallintamisessa ei tarvittu vaiheittaista rakentamista, vaan kuorma päästiin antamaan suoraan mallin päälle. Kuormituksena oli liikennekuorma, joka jakaantui 433 kPa paineeksi 0,2 m leveydelle rummun keskikohdan yläpuolelle maan yläpintaan. Jännitykset tarkasteltiin kuvan 3.6:1 mukaisissa kohdissa. Kuvassa 3.9:1 esitetään rummun yläpuolisessa maassa vallitsevat pystysuuntaiset jännitykset, kun peitesyvyytenä on 0,5 m.



Kuva 3.9:1 Rummun yläpuolinen jännitysjakauma 0,5 m peitesyvyydellä.

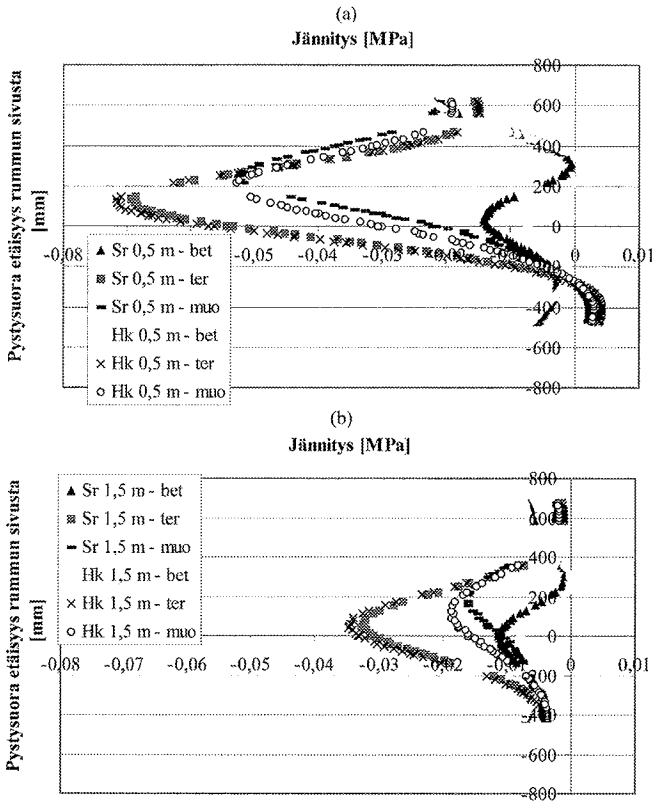
Suuremmalla peitesyvyydellä liikennekuorman vaikutus on tasoittunut. Kuvassa 3.9:2 esitetään rummun yläpuolisessa maassa vallitsevat pystysuuntaiset jännitykset, kun peitesyvyytenä on 1,5 m.



Kuva 3.9:2 Rummun yläpuolinen jännitysjakauma 1,5 m peitesyvyydellä.

Kuvista 3.9:1 ja 3.9:2 voidaan havaita, kuinka liikennekuormakin keskittyy betonista valmistettujen rumpujen päälle verrattuna teräksisiin ja muovisiin rumpuihin. Teräksisillä ja muovisilla rummuilla rumpujen yläpuolisessa maassa keskilinjan kohdalla olevien jännitysten itseisarvot pienenevät verrattuna sivuilla oleviin jännityksiin ja ovat laskelman mukaan muovisella rummulla lähes nollia. Tämä tarkoittaa sitä, että maan suurin pääjännityssuunta on vaakatason suuntainen rummun laen kohdalla. Itseisarvoltaan suurimmat jännitykset mitataan nyt hiekasta. Syy tähän löytyy siitä, että maa on mallinnettu lineaarisesti kimmoisalla materiaalimallilla ilman plastisoitumismahdollisuutta. Tällöin heikomman resilient-moduulin omaava hiekka ei jaa jännitystä yhtä hyvin kuin suuremman resilent-moduulin omaava sora. Maan pystysuuntaiset jännityskuvaajat ovat kuvissa 3.9:1 ja 3.9:2 pitkälti saman muotoisia vaikkakin eri suuruisia. Kuvissa 3.9:1 ja 3.9:2 kaukana rummun harjasta oleva jännitys lähestyy nollaa. Integraali vaakasuoran etäisyyden yli antaa aina kuormitusresultantin arvon eli kuorman arvo rummun pituusyksikköä kohti.

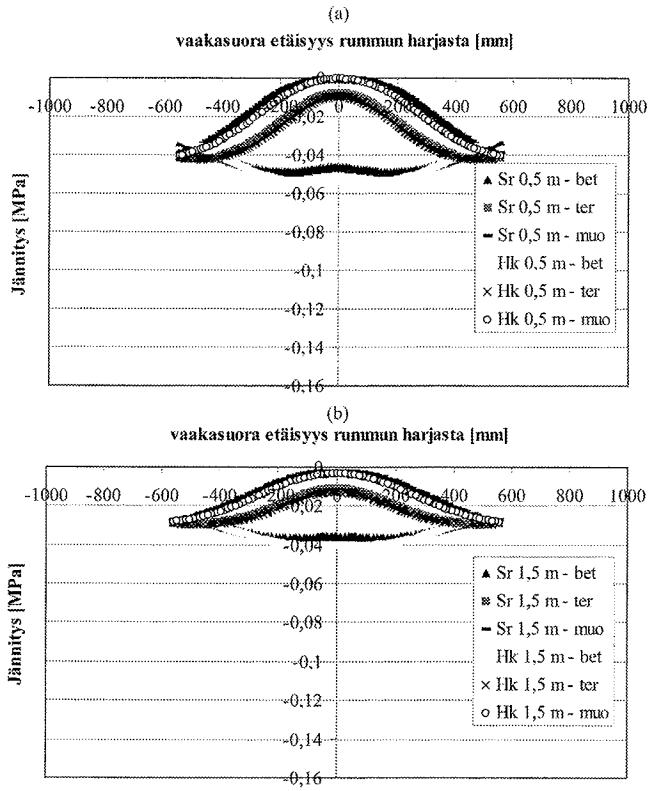
Liikennekuormasta aiheutuneiden maan sivuttaissuuntaisten jännitysten jakautumista kuvan 3.6:1 mukaisessa pystyleikkauksessa esitetään kuvissa 3.9:3a ja b.



Kuva 3.9:3 Rummun sivulla oleva jännitysjakauma (a) 0,5 m ja (b) 1,5 m peitesyvyydellä.

Kuvista 3.9:3a ja b havaitaan, kuinka itseisarvoltaan suurimmat jännitykset syntyvät teräksisen rummun sivuilla olevaan maahan. Itseisarvoltaan toiseksi suurimmat jännitykset syntyvät muovisen putken sivuilla olevaan maahan. Itseisarvoltaan pienimmät vaakasuuntaiset jännityshuiput on havaittavissa betonisen putken sivuilla olevassa maassa. Teräksisen ja muovisen putken tapauksissa itseisarvoltaan suurimmat jännitykset syntyvät hiekalla. Betonista valmistetulla putkella maassa olevat jännitykset ovat itseisarvoltaan suurempia soralla kuin hiekalla. Kaikilla rumpumateriaaleilla on havaittavissa se, että vaakasuuntaiset jännityshuiput syntyvät pystysuunnassa jonkin verran eri kohdille.

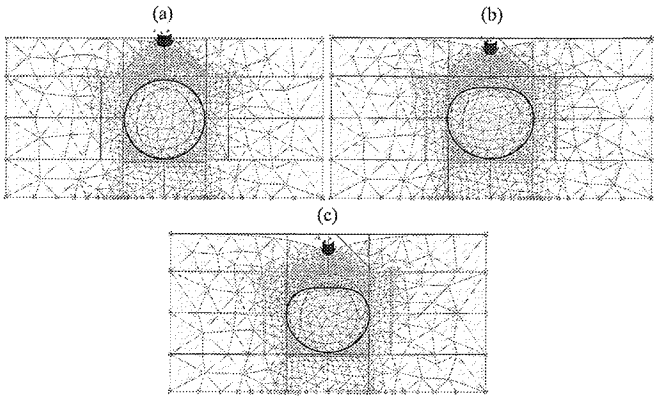
Rummun alla vallitsevia jännitysjakaumia esitetään kuvissa 3.9:4a ja b.



Kuva 3.9:4 Rummun alapuolelta vallitseva jännitysjakauma peitesyvyydellä (a) 0,5 m ja (b) 1,5 m.

Kuvista 3.9:4a ja b havaitaan kuvien 3.9:1 ja 3.9:2 samankaltaisuus. Betonisen rummun alapuolella olevassa maassa jännitysten itseisarvot kasvavat, mutta teräksisen ja muovisen rummun alla pienenevät verrattuna rummun sivuilla vallitsevaan jännitysten itseisarvoon. Itseisarvoltaan suurimmat jännitykset saadaan rummun yläpuolisen maan jännitysten tapaan kaikissa tapauksissa hiekoilla.

Esimerkinomaisesti esitetään eri rumpuputkien deformoituneet muodot liikennekuormasta kuvissa 3.9:5a - c, kun peitesyvyys on 0,5 m ja ympäröivä maamateriaali on hiekkaa.

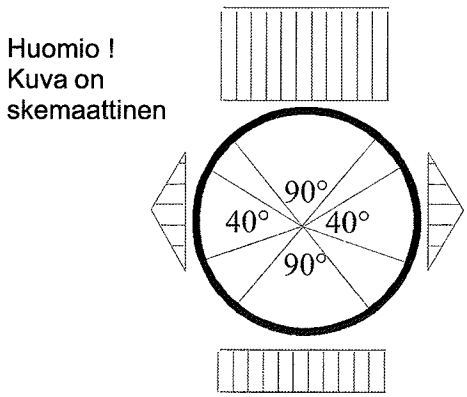


Kuva 3.9:5 Rummun ja maan deformoituneet muodot liikennekuormasta 0,5 m peitesyvyydellä, kun rumpumateriaalina on (a) betoni, (b) teräs ja (c) muovi. Skaalauskerroin on kaikissa kuvissa 100.

Kuvasta 3.9:5a havaitaan sama asia kuin kuvasta 3.5:6a eli rumpu painuu alapuoliseen maahaan säilyttäen käytännössä ympyrämuotoisen muotonsa. Teräs- ja muoviputki litistyvät sitä vastoin katostaan (kuvat 3.9:5b ja c).

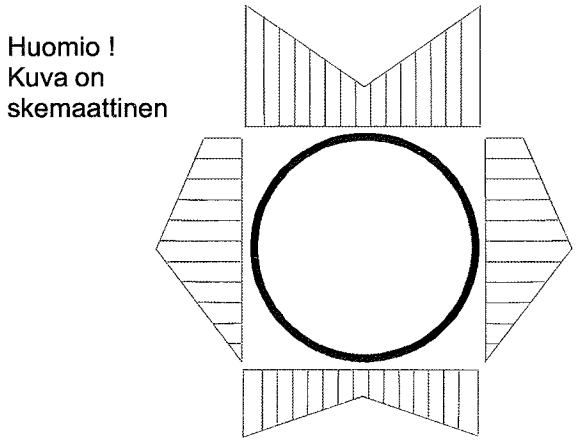
3.10 Elementtimallinnuksesta liikennekuormalla saatujen maanpainejakautumien hyödyntäminen käsinlaskentamenetelmissä

Betonisen rummun yläpuolinen kuormituksen jakautuminen lasketaan Betoniputkinormeissa Bousinesqin mukaisella jännityskaavalla ja jännitykset tasoitetaan Simpsonin kaavalla (kaava 3.7:1). Rummun alapuoliselle maanpaineelle voitaisiin käyttää samanlaista laskentamenetelmää. Rummun sivuilla oleva liikennekuormasta syntyvä maanpaine voisi olla kuvan 3.10:1 mukainen.



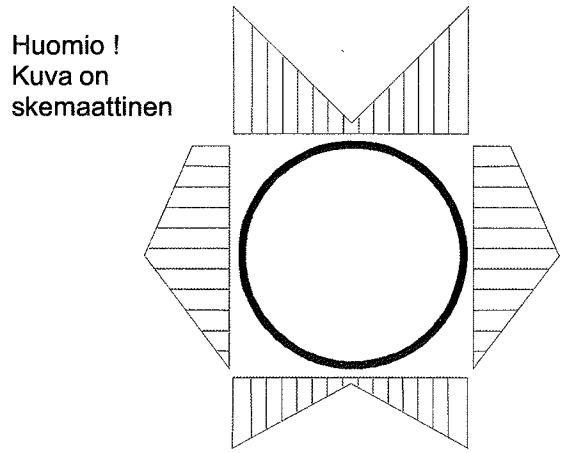
Kuva 3.10:1 Elementtimallinnuksen tuloksia vastaava liikennekuorman periaatteellinen jakautuma betonisella rumpuputkella.

Teräksisellä rumpuputkella liikennekuormasta syntyvä arvioitu maanpaine voisi näyttä kuvan 3.10:2 mukaiselta.



Kuva 3.10:2 Elementtimallinnuksen tuloksia vastaava liikennekuorman periaatteellinen jakautuma teräksisellä rumpuputkella.

Muovisen rumpuputken tapauksessa liikennekuormasta syntyvät maanpaineet ovat teräksisen putken kaltaisia, mutta niiden muutokset ovat hieman jyrkempiä merkitsevissä kohdissa. Muovisella rumpuputkella liikennekuormasta syntyvä arvioitu maanpaine voisi näyttää kuvan 3.10:3 mukaiselta.



Kuva 3.10:3 Elementtimallinnuksen tuloksia vastaava maanpaineen periaatteellinen jakautuma muovisella rumpuputkella.

Kuvat 3.10:1 – 3.10:3 ovat skemaattisia jännitysjakaumaehdotuksia, jotka perustuvat vain tässä tutkimuksessa käsitellyille laskentatapauksille. Edellä esitetyt maanpaineen jakaumakuvat eivät tämän takia todennäköisesti ole sellaisenaan soveliaita kaikille betonisten, teräksisten ja muovisten putkien halkaisijoille ja asennussyvyyksille.

4. ERI MATERIAALISTA VALMISTETTUJEN RUMPUTKIEN VERTAILULASKELMAT

4.1 Eri materiaalista valmistettujen rumpujen vertailu liikennekuormalla

Aluksi vertaillaan eri materiaalista valmistettujen rumpujen liikennekuormasta aiheutuneita kattoon syntyneitä momentteja ja normaalivoimia sekä rumpujen pysty- ja vaakasuuntaisten halkaisijoiden muutosta, kun rumpua ympäröivän maan moduuliarvot ovat taulukon 3.4:2 mukaiset. Taulukossa 4.1:1 esitetään rummun katon keskikohdan momentit ja taulukossa 4.1:2 katon keskikohdan normaalivoimat.

Taulukosta 4.1:1 nähdään eri materiaalista valmistettujen rumpujen momentit. Erilaisilla rummuilla saadaan hyvinkin erilaisia momentin arvoja. Momenttien suuruuteen vaikuttaa sekä maan että rummun materiaaliominaisuudet. Momenttien ja normaalivoimien (taulukko 4.1:2) lukuarvojen vertailemisella sellaisenaan ei ole käytännön merkitystä. Eri materiaaleista valmistettuja rumpuja onkin mielekkäämpää vertailla siirtymien eli taulukoiden 4.1:3 ja 4.1:4 avulla.

Taulukko 4.1:1 Eri materiaalista valmistettujen rumpujen kattoon liikennekuormasta aiheutuneet momentit.

	Momentti [Nmm/mm]					
	Betoni		Teräs		Muovi	
Peitesyvyys [m]	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka
0,5	5597	6056	42	81	104	191
1,5	2451	2684	7	16	19	38

Taulukko 4.1:2 Eri materiaalista valmistettujen rumpujen kattoon liikennekuormasta aiheutuneet normaalivoimat.

	Normaalivoima [N/mm]					
	Betoni		Teräs		Muovi	
Peitesyvyys [m]	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka
0,5	4	4	-1	-2	6	6
1,5	-1	-1	-3	-4	1	1

Taulukko 4.1:3 Eri materiaalista valmistettujen rumpujen pystyhalkaisijan muutokset liikennekuormasta.

	Pystyhalkaisijan muutos [mm]					
	Betoni		Teräs		Muovi	
Peitesyvyys [m]	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka
0,5	-0,07	-0,08	-0,60	-1,13	-1,01	-1,80
1,5	-0,04	-0,04	-0,29	-0,43	-0,38	-0,70

Taulukko 4.1:4 Eri materiaalista valmistettujen rumpujen vaakahalkaisijan muutokset liikennekuormasta.

	Vaakahalkaisijan muutos [mm]					
	Betoni		Teräs		Muovi	
Peitesyvyys [m]	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka	Tiivis sora	Keskitiivis hiekka
0,5	0,06	0,07	0,38	0,74	0,47	0,93
1,5	0,03	0,04	0,23	0,45	0,29	0,57

Taulukoista 4.1:3 ja 4.1:4 havaitaan selvästi betonisen rummun huomattavasti pienemmät siirtymät verrattuna teräksiseen ja muoviseen rumpuputkeen. Suurin ero pystyhalkaisijan muutosta kuvaavassa taulukossa (taulukko 4.1:3) on 0,5 m peitesyvyydellä keskitiiviissä hiekassa olevilla muovisella ja betonisella rumpuputkella. Pystyhalkaisijoiden muutoksen ero on tällöin -1,72 mm. Suhteellisesti muovisen putken pystyhalkaisijan muutos on yli 22 -kertainen. Vaakahalkaisijoiden ero vastaavilla putkilla on 0,86 mm. Muoviputken ja betonisen putken suhteellinen vaakahalkaisijan ero on yli 13 -kertainen. Ympärystäyttö näyttäisi vaikuttavan kuvissa 4.1:3 - 4.1:4 rummun halkaisijan muutokseen sitä enemmän mitä taipuisampi putki on.

4.2 Rumpuvalmistajien omilla laskentame netelmillä ja TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion elementtimenetelmällä tehtyjen vertailulaskelmien periaate ja tulokset

Voitaneen olettaa, että TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion tässä tutkimuksessa tekemät elementtilaskelmat ovat aikaisemmin esitetyllä maaparametreilla ja kuormitusotaksumilla lähellä todellisuudessa luonnossa esiintyviä arvoja.

Jotta eri rumpuvalmistajien käyttämiä mitoitusmenetelmiä voitaisiin arvioida, suoritettiin vertailu val-mistajien käyttämien laskentamenetelmien ja ele-menttimallinnuksen välillä. Vertailun kohteeksi otettiin sisähalkaisijaltaan 1000 mm putki, jonka peitesyvyytenä oli 0,5 m ja 1,5 m. Kuormaksi oletettiin ainoastaan liikennekuorma. Mitoitus tehtiin yhdelle akselille, jonka paino oli 260 kN. Kuorman jakautumisala riippui mitoitusmenetelmästä.

Betoninen rumpuputki mitoitettiin julkaisun Betoniputkinormit 2001 mukaisesti. Kuorman jakautumisalana käytettiin nyt kahta 0,2*0,6 m^2 suuruista pinta-alaa, joita kuormitti 130 kN akselipaino. Taulukossa 4.2:1 esitetään käsin lasketut ja elementtimenetelmällä saadut tulokset. Momentit ja normaalivoimat on laskettu molemmissa tapauksissa rummun katossa. Elementtimenetelmän mukaisessa laskentamallissa rumpua ympäröi tiivis sora ja keskitiivis hiekka.

Taulukko 4.2:1 Betonisen rummun vertailulaskelmat, kun käsinlaskentamenetelmä on Betoniputkinormit 2001 -ohjeen mukainen.

	Momentti [Nmm/mm]			Normaalivoima [N/mm]		
	Käsin laskettu *)	FEM		Käsin laskettu	FEM	
Peitesyvyys [m]	Tulos täyttö-materiaalista riippumaton	Tiivis sora	Keski-tiivis hiekka	Tulos täyttö-materiaalista riippumaton	Tiivis sora	Keski-tiivis hiekka
0,5	16670	5597	6056	0	4	4
1,5	3980	2451	2684	0	-1	-1

*) Laskennassa on otettu huomioon Betoniputkinormit 2001 -ohjeen mukaisessa momentin ja normaalivoiman laskentakaavassa esiintyvä virhe.

Taulukosta 4.2:1 havaitaan hyvin kuinka Betoniputkinormit 2001 -julkaisun mukainen käsinlaskentamenetelmä antaa elementtimenetelmällä saatuihin tuloksiin nähden varmalla puolella olevia tuloksia, kun momentin ja normaalivoiman laskenta tehdään muissa kirjallisuuslähteissä (esimerkiksi Eisenmann 1979 ja Roark 1989) oikeassa muodossa esiintyviä laskentakaavoja käyttäen. Esimerkiksi 0,5 m syvyydellä tiiviin soran tapauksessa käsinlaskentamenetelmä antaa 3,0 -kertaa ja keskitiiviin hiekan tapauksessa 2,8 -kertaa suurempia tuloksia kuin elementtimenetelmä. 1,5 m peitesyvyydellä vastaavat suhdeluvut ovat 1,6 ja 1,5.

Teräksinen rumpuputki mitoitettiin Tiehallinnon julkaisun "Aallotetut teräsputket" TIEL 2172501 mukaisesti. Kuormitus jaettiin maahan Tielaitoksen julkaisun "Siltojen kuormat" TIEL 2172072 mukaisesti. Taulukossa 4.2:2 esitetään käsin lasketut ja elementtimenetelmällä saadut tulokset. Momentit ja normaalivoimat ovat laskennan suurimmat normaalivoiman ja momentin arvot. Käsinlaskentamenetelmässä ja elementtilaskennassa maan resilient-moduulin arvona käytettiin tässä tapauksessa 30 MPa.

Taulukko 4.2:2 Teräksisen rummun vertailulaskelmat.

	Momentti [Nmm/mm]		Normaalivoima [N/mm]	
Peitesyvyys [m]	Käsin laskettu	FEM	Käsin laskettu	FEM
0,5	597	230	43	38
1,5	193	51	25	19

Taulukosta 4.2:2 havaitaan kuinka käsinlaskentamenetelmän antamat momentin arvot ovat suurempia kuin elementtimenetelmällä lasketut momentin arvot. 0,5 m peitesyvyydellä käsin laskettu momentin arvo on noin 2,6 kertaa suurempi kuin elementtimenetelmällä laskettu tulos. 1,5 m peitesyvyydellä käsin laskettu momentin arvo on vastaavasti 3,8 kertaa suurempi kuin elementtimenetelmällä saatu tulos. Normaalivoiman osalta 0,5 m peitesyvyydellä käsin laskettu tulos on vain 1,1 kertaa suurempi kuin elementtilaskennasta saatu tulos. 1,5 m peitesyvyydellä vastaava suhdeluku on 1,3. Käsin lasketut tulokset ovat kaikissa tapauksissa varmalla puolella.

Muovisten rumpuputkien tapauksessa vertailtiin rumpuvalmistajan koerakenteesta mitattuja arvoja rumpuputkien valmistajan laskentaohjelman antamiin arvoihin. Vertailuna käytettiin rummun katon pystysuuntaista siirtymää. Toisaalta vertailtiin rumpuputken valmistajan omalla elementtimenetelmään perustuvalla ohjelmalla saatuja tuloksia TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden elementtiohjelmalla saatuihin tuloksiin. Rumpuvalmistajan itsensä toimesta koekuormitetun rummun ja rumpuvalmistajan ohjelmalla lasketun rummun siirtymien ero oli rumpuvalmistajalta saatujen tietojen mukaan yli kaksikertainen. Rummun valmistajan ohjelmalla saadut tulokset olivat mitattuja arvoja suurempia. Vertailulaskelma rummun valmistajan ja TTKK:n ohjelman välillä suoritettiin halkaisijaltaan 1000 mm muoviputkelle, joiden peitesyvyydet oli-

vat 500 mm ja 800 mm. Kuormituksena käytettiin 0,2*3,0m^2 suuruiselle pinta-alalle jaettua 260 kN suuruista kuormaa. Maan resilient-moduulin arvona käytettiin 20 MPa molemmissa ohjelmistoissa. Putken valmistajan ohjelmalla ja TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion PLAXIS -ohjelmalla saadut tulokset esitetään taulukossa 4.2:3.

Taulukko 4.2:3 Muovisen rummun vertailulaskelmat.

	Katon pystysuuntainen siirtymä [mm]	
Peitesyvyys [m]	Rummun valmistaja	TTKK
0,5	12,10	5,99
0,8	7,49	4,28

Taulukon 4.2:3 tuloksista nähdään kuinka rummun valmistajan ohjelma yliarvio rummun katon siirtymiä. Rummun valmistajan ohjelma antaa 0,5 m peitesyvyydellä 2,0 kertaa suurempia tuloksia ja 0,8 m peitesyvyydellä 1,75 kertaa suurempia tuloksia kuin TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion PLAXIS -ohjelmisto. Rummun valmistajan ohjelmisto näyttäisi antavan ainakin tutkituilla peitesyvyyksillä varmalla puolella olevia tuloksia. Lopuksi voidaan kuitenkin todeta, että maan siirtymien ollessa useita millimetrejä, ***kasvava osa siirtymistä on palautumattomia!***

5. YHTEENVETO

Tässä raportissa on esitetty kaksiulotteisella elementtimenetelmään perustuvalla PLAX-IS -ohjelmistolla lasketut kolmesta eri materiaalista valmistetun rummun ympärillä maassa vaikuttavien ympäröivien jännitysten jakautumat rummun ylä- ja alapuolella sekä sivulla keskitiiviissä hiekassa ja tiiviissä sorassa. Rumpumateriaalin lisäksi jännitysten jakautumiseen vaikuttaa mm. maalle käytettävän moduulin arvo. Rumpumateriaalin jäykkyyden kasvaessa pienenevät rummun ympärillä olevan maan muodonmuutokset ja tätä kautta suurenee myös maan moduuliarvo. Maalle käytettävien moduuliarvojen kannalta merkityksellinen hydrostaattisen jännityksen taso oletettiin rumpumateriaalista riippumattomaksi, joten sen vaikutus rummun moduuliarvoon voitiin välttää. Betonista valmistettua rumpua ympäröivä maa toimi tällöin moduuliarvojen perustasona. Teräksestä valmistettua rumpua ympäröivä maa sai moduuliarvoksi arvon, joka oli 75 % betoniputkea ympäröivän maan moduuliarvosta. Muoviputkella sama moduuliarvo oli 70 % betoniputkea ympäröivän maan moduuliarvosta. Näitä moduuliarvoja käytettiin, kun rumpua kuormitti liikennekuorma. Maan oman painon kuormittaessa rumpua maan moduuliarvo oli rumpumateriaalista riippumaton. Tällöin maan moduuliarvoon vaikutti ainoastaan maamateriaali. Maan omasta painosta aiheutuneiden jännitysten laskennassa maan materiaalimallina oli lineaarisesti kimmoinen ideaaliplastinen Mohr-Coulombin materiaalimalli. Liikennekuorman kuormittaessa elementtimallia maan materiaalimalli oli plastisoitumaton lineaarisesti kimmoinen materiaalimalli.

Elementtimenetelmällä laskettujen jännitysjakautumien perusteella hahmoteltiin maanpaineen jakaumamuodoiksi uusia jännitysjakaumamalleja. Periaatteelliset jännitysjakaumamallit esitettiin niin maan omalle painolle kuin liikennekuormallekin. Yhdelle rumpuhalkaisijalle ja kahdelle asennussyvyydelle tehtyjen laskelmien perusteella tulosten yleistäminen kaikilla kysymykseen tulevilla rumpuhalkaisijoilla ja asennussyvyyksillä päteviksi lukuarvoiksi ei kuitenkaan ole mahdollista. Koska putken ympärillä toteutuva jännitysjakautuma aina riippuu putken ja ympärillä olevan maan jäykkyyksien keskinäisestä suhteesta, voi esimerkiksi pehmeään täyttömaahan asennetun pienihalkaisijaisen muoviputken ympärillä vallitseva jännitysjakautuma todellisuudessa olla lähempänä kuvien 3.7:3 ja 3.8:2 mukaisia jakautumia kuin kuvassa 3.8:3 halkaisijaltaan 1000 mm olevalle muoviputkelle esitetty periaatteellinen jakautumamuoto. Edellä sanottuun viitaten ja tähänastisten laskelmien tulosten perusteella on kuitenkin selvää, että ilmeinen vastaus tutkimuksen lähtökohtana olleeseen peruskysymykseen siitä, onko eri materiaaleista valmistetuille rumpuputkille kaikissa kysymykseen tulevissa asennusolosuhteissa perusteltua käyttää samoja kuormitusotaksumia, on kielteinen.

Vertailtaessa rumpujen halkaisijanmuutoseroja taulukoissa 4.1:3 ja 4.1:4 havaittiin teräksisen ja muovisen rummun halkaisijan muutokset huomattavasti suuremmiksi kuin betonisen putken vastaavat. Rummun ympärystäytöllä näyttäisi olevan sitä suurempi merkitys mitä taipuisampi rumpuputki on. Tässä yhteydessä on myös syytä huomata, että siirtymien ollessa millimetrien suuruusluokkaa, merkittävä osa rummun ympärillä olevaan täyttömateriaaliin kehittyvistä muodonmuutoksista on palautumattomia, vaikka kimmoinen laskentamalli otaksuu ne täysin palautuviksi. Näin ollen laskentamallista saatavien siirtymien voidaan ajatella edustavan tilannetta, jossa laskentakuormaa vastaava rasitus kohdistuu rummun yläpuolelle ensimmäisen kerran. Kuormituksen toistuessa useita kertoja sekä kuormitusmuodonmuutosten että varsinkin kuormitussykliä kohti syntyvän palautumattomien muodonmuutosten voidaan kuitenkin otaksua pienenevän (vertaa kuva 2:2). Muussa tapauksessa rumpu litistyisi kokonaan umpeen varsin nopeasti.

Lopuksi vertailtiin betoni- ja teräsputken osalta nykyisin käytössä olevien käsinlaskentamenetelmien antamia tuloksia TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion elementtiohjelmalla saatuihin tuloksiin. Muoviputken osalta vertailu tehtiin rummun valmistajan ja TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratorion elementtiohjelmalla saatujen tulosten perusteella. Ainoastaan betoniputken käsinlaskentamenetelmällä lasketut momentin arvot poikkesivat olennaisesti elementtimenetelmällä lasketuista momentin arvoista. Betoniputkinormeissa 2001 esitetyllä käsinlaskentamenetelmällä lasketut momentit poikkeavat epävarmalle puolelle ja muualla kirjallisuudessa (Eisenmann 1979 ja Roark 1989) esiintyvillä käsinlaskentamenetelmillä lasketut momentit poikkeavat vastaavasti varmalle puolelle. Betoniputkinormien 2001 mukaista käsinlaskentamenetelmää voidaan käyttää betoniputkien mitoittamiseen vain siinä tapauksessa, että Betoniputkinormien 2001 liitteen 8 sivulla 13 esiintyvät momentin ja normaalivoiman laskentakaavojen antamat tulokset kerrotaan luvulla 10.

1. SUMMARY

This report deals with an investigation on the stresses transmitted to culvert structures from the surrounding fill material. The stress distributions around three different types of culvert structures having a diameter of 1000 mm and installed at two different depths, 0,5 m and 1,5 m, were studied in two different types of fill materials under two different types of loading conditions. The study was accomplished using a 2D Finite Element program PLAXIS. The first loading case included only the weight the fill material itself, while the second loading case included only the traffic load which was modeled by one 260 kN axle. One of the studied fill material was dense gravel and the other was poorly compacted medium dense sand. The three studied culvert materials were concrete, steel and plastic. Materials properties of the fill materials during the loading case consisting only of the weight of the fill are given in table 3.4:1. Respectively, the properties of the fill materials under the traffic load are given in table 3.4:2.

It is generally known that stiffness of granular materials like the fill materials of this study depend both on the state of stresses and the state of strains. In the first loading case of the study the modulus values of the fill materials were assumed to be independent on the culvert material. Meantime, in the second loading case hydrostatic stress in the fill were also assumed to be independent on the culvert material, but the modulus values of the fill were affected by the strain level. The modulus values of the fill materials around the concrete culvert were assumed to represent a sort of base levels for the modules. Meantime, the modulus value of the fill material around the steel culvert was estimated to be approximately 75 % and the modulus value of the fill material around the plastic culvert 70 % of the respective modulus value around the concrete culvert (table 3.4:2).

Modeling of the culvert construction was done in four steps (Fig. 3.5:1 - 3.5:4). Material model for the fill was chosen as linear elastic perfectly plastic Mohr-Coulomb material, while the material model for the culverts was linear elastic. The calculated values of vertical and horizontal stresses in the fill above, below and beside the culvert after completion of the construction are shown in figures 3.6:2 - 3.6:5.

Modeling of the traffic load was more straightforward since it could be done within one step (Fig. 3.9:5a - c). The material model used for the fill was this time linear elastic likewise the material model used for the culvert. The 260 kN axle load was assumed to be distributed on an area of 0,2*3,0 m^2. Consequently, in the 2D FE-model the load was represented by a 0,2 m wide line load with a magnitude of 433 kPa/m^2. The calculated distributions of vertical and horizontal stresses in the fill above, below and beside the culvert are shown in figures 3.9:1 - 3.9:4.

An important goal of the study was to try to sketch the principal distributions of stresses in the fill material above, below and beside typical road culverts based on the completed calculations. In figure 6:1a a sketch of the distribution of stresses around the concrete culvert induced by the weight of the fill itself is presented. Respectively, in figure 6:1b the stresses induced by the traffic load around the same culvert are sketched.

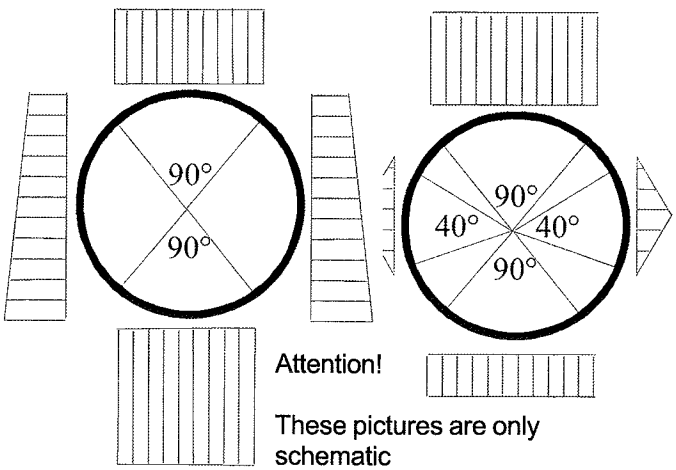


Figure 6:1 Schematic distribution of stresses in the fill around a concrete culvert induced (a) by the weight of the fill and (b) by the traffic load. Note! Result of the summation of the stress distributions depends enormously on the fill thickness above the culvert.

In figure 6:2a and b the corresponding stress distributions around a steel culvert are sketched.

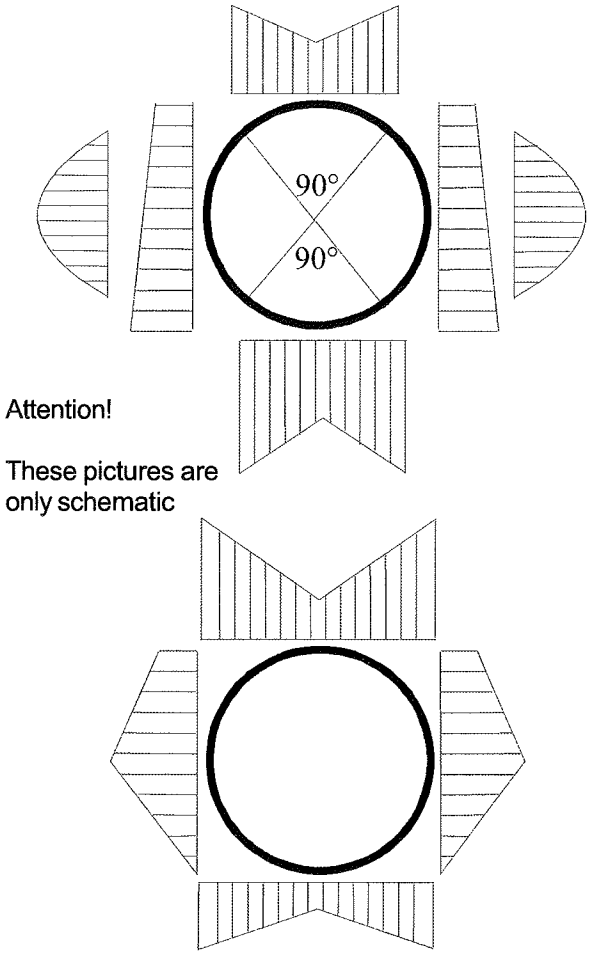
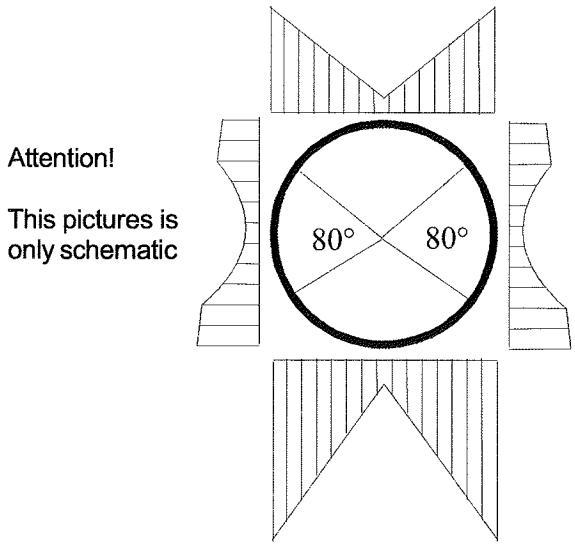


Figure 6:2 Schematic distribution of stresses in the fill around a steel culvert induced (a) by the weight of the fill and (b) by the traffic load. Note! Result of the summation of the stress distributions depends enormously on the fill thickness above the culvert.

Further, in figure 6:3a and b the corresponding stress distributions around a plastic culvert are sketched.



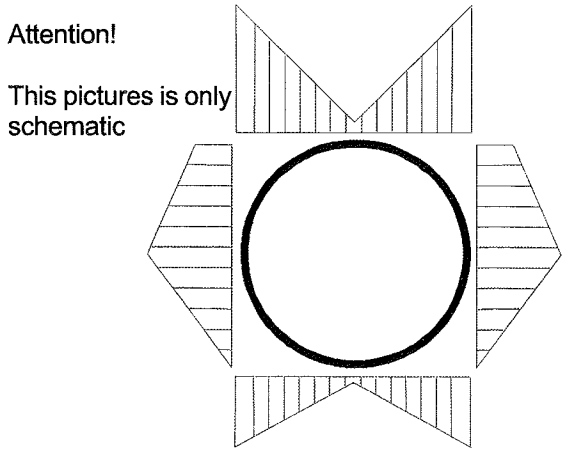


Figure 6:3 Schematic distribution of stresses in the fill around a plastic culvert induced (a) by the weight of the fill and (b) by the traffic load. Note! Result of the summation of the stress distributions depends enormously on the fill thickness above the culvert.

It should be noted that the above pictures (Fig. 6:1 - 6:3) are just schematic and appropriate only for the studied types of fill, installation depth, diameter of the culvert and type of culvert. Therefore, **they can not be expected to remain constant for all diameters and types of culverts, installation depths and loading conditions.**

One of the main questions set for the study was to find out whether the distribution of stresses above, below and beside culverts having the same diameter but being manufactured using different materials were the same when the loading, type of fill material and fill layer thickness above the culvert are the same. The figures 6:1 to 6:3 indicate clearly that answer to this basic question is negative.

When the changes in the diameters of the different types of culverts were compared, they were observed to be significant, of the order of a few millimeters, in the case of steel and plastic culverts, but almost negligible in the case of concrete culvert. The numerical values of the diameter changes have been shown in tables 4.1:3 – 4.1:4. Based on the presented results it is evident that the more flexible the culvert is, the greater effect the fill has on the diameter changes. At the end of the study a comparison was made between the results of the Finite Element calculations made at the Laboratory of Foundation and Earth Structures of the Tampere University

of Technology and the calculation results provided by the different material suppliers. The available hand calculation methods for both concrete and steel culverts gave bending moment values on the conservative side in comparison to the FE calculations provided that in the calculation of the moment value an obvious error in the Finnish concrete culvert code 2001 is taken into account. Meantime, in the case of plastic culvert the comparison was made between the results of manufacturer's own FE program and PLAXIS program used by the Laboratory of Foundation and Earth Structures at TUT due to the lack of a publicly available and generally accepted calculation method for plastic culverts.

KIRJALLISUUS

BETONIPUTKINORMIT 2001 (2001). Suomen kuntatekniikan yhdistys. Julkaisu 1, Helsinki. 59 s.

Chang, C. S., Adegoke, C. W. ja Selig, E. T. (1980). Geotrack model for railroad track Performance. Journal of the geotechnical engineering division. GT11. ss. 1201 – 1218.

Eisenmann, J. (1979). Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau: Entwurf, Berechnung, Ausführung. Betonfahrbahnen. Berlin : Ernst. 305 s.

Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisu nro 223. 214 s.
Kolisoja, P., Järvenpää, I., Mäkelä, E. & Levomäki, M. (2000). Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 5/2000. Ratahallintokeskus, Helsinki. 137 s.

Koskinen, M. (1997). Soil-Structure Interaction of Jointless Bridges on Piles. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisu nro 200. 184 s.

Mäkelä, E. (1998). Tiepenkereiden vetolujitteiden toiminta käyttötilassa. Tielaitoksen selvityksiä 47/ 1998. Tiehallinto/Tie- ja liikennetekniikka, Helsinki 233 s.

Mäkelä, E. ja Kolisoja, P. (2001). RATARUMPUTUTKIMUS Instrumentointi ja mittaukset. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 8/2001. Ratahallintokeskus, Helsinki. 72 s.

Pitkänen, J., Kulman, M. ja Rantala, J. (2000). Talojen tuulettuva pohjarakennusjärjestelmä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laboratorio. Tampere 150 s.

PLAXIS. (1998). User's Manual. Version 7. Balkema, Rotterdam.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. ja Tammirinne M. (1979). Geotekniikka. Otatieto Oy. Karisto Oy Hämeenlinna 1992. 295 s.

RIL 157-I Geomekaniikka I (1985). Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki. 479 s.

Roark, R. J. (1989). Roark's formulas for stress and strain. McGraw-Hill 1989. 763 s.

Selig, E. T. ja Waters, J. M. 1994. Track geotechnology and substructure management. London. Thomas Telford. ss. 1.1 - 16.11.

Zienkiewicz, O. C. ja Taylor R. L. (1989) The Finite Element Method. Volume 1 Basic Formulation and Linear Problems. 4th edition. McGraw-Hill Book Company, Singapore. 648 s.

Zienkiewicz, O. C. ja Taylor R. L. (1991) The Finite Element Method. Volume 2 Solid and Fluid Mechanics Dynamics and Non-linearity. 4th edition. McGraw-Hill Book Company, Singapore. 807 s.

ISSN 1457-991X
TIEH 4000350