

TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

TERASTORUSILDADE METOODILINE VÕRDLUS

DESIGN METHOD COMPARISON OF SOIL STEEL COMPOSITE BRIDGES

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Meelis Melnik

Üliõpilaskood 176574

Juhendaja: Juhan Idnum

Tallinn 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“ ” 2022 a

Autor: Meelis Melnik (digiallkiri)

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“ ” 2022 a

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Meelis Melnik

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Terastorusildade metoodiline võrdlus“,

mille juhendaja on

Juhan Idnurm

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

“05 ” Jaanuar 2022 a

Meelis Melnik (digiallkiri)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Meelis Melnik 176574

Õppekava, peeriala: EAXM15/15 - Hooned ja rajatised

Juhendaja(d):

Konsultant:(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) „*Terastorusildade metoodiline võrdlus*”

(inglise keeles) „*Design method comparision of soil steel composite bridges*”

Lõputöö põhieesmärgid:

- 1.Võrrelda SDM JA CHBDC meetodit FEM programmiga

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetiline osa ja tarkvarade valik	01.11.2021
2.	Töö teoreetilise osa parandused koos töö andmete töötamise ja analüüsi osa mustandiga sh peavad olema tulemused	01.12.2021
3.	Andmete ja info töötlemine	01.12.2021
4.	Tulemuste analüüs ja sidumine kirjandusega	01.12.2021
5.	Aruanne	01.12.2021

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "05."Jaanuar 2022.a

Üliõpilane: Meelis Melnik digiallkiri "05 " Jaanuar 2022 a
/allkiri/

Juhendaja: "05." Jaanuar 2022 a
/allkiri/

Konsultant: "05." Jaanuar 2022 a
/allkiri/

Programmijuht: "05." Jaanuar 2022 a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA.....	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
Sissejuhatus	11
1.Rootsi arvutusmeetod SDM	12
1.1 Tüüpkujud.....	12
1.2 Piirangud.....	16
1.3 Efektiivne tagasitäite kõrgus	16
1.4 Pinnase parameetrid.....	16
1.5 Liikluskoormus	18
1.6 Normaaljõud	20
1.6.1 Pinnasest tekkiv normaaljõud	20
1.6.2 Normaaljõu leidmine torusilla seinas.....	20
1.6.3 Arvutusliku normaaljõu arvutamine	20
1.7 Paindemomentide arvutused.....	21
1.7.1 Pinnasest tekkivad paindemomendid	21
1.7.2 Paindemoment liikuvast koormusest	21
1.7.3 Arvutuslikud paindemomendid.....	22
1.8 Kontrollid kasutuspiirseisundis	22
1.9 Kontrollid kandepiirseisundis.....	22
1.9.1 Varu toru alumises osas	24
2.Kanada arvutusmeetod CHBDC.....	25
2.1 Tüüpkujud CHBDC.....	25
2.2 Pinnase parameetrid.....	29
2.2.1 Minimaalne tagasitäite kõrgus	29
2.3 Kandepiirseisundi kontrollid	30
2.3.1 Kandepiirseisundi kontroll survele	30
2.3.2 Kandepiirseisundi kontroll paindemomendi ja normaaljõu koosmõjule	31
3 Arvutused ja analüüs.....	32
3.1 Toruprofiilide arvutuslikud parameetrid	32
3.2 Arvutusmudeli koormused ja koormuste paiknemised	35
3.3 Plaxis 3D arvutusmudel.....	37

3.3.1 Puuraugud ja materjalide valik	37
3.3.2 Torusilla 3D mudeli loomine	40
3.4 Analüüs	46
KOKKUVÕTE	49
SUMMARY	50
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	51

EESSÕNA

Teema algatajaks oli Eerik Peeker ja ka nõustajaks, kellega tegin koostööd ETAG uuringus " Raskete eriveoste ja mobiilsuse ning taristu seisukorradeadlikkuse parandamine". Uuringusse kuulusid kolm torusilda. Selle käigus sai tutvutud erinevate torusildade projekteerimise meetoditega, mida varajasemalt on uuritud Artjom Melnikov poolt Tallinna Tehnikakõrgkooli lõputöös 2016 aastal, kus Rootsi SDM ja Kanada CHBDC meetodit käsitsi kontrollimine osutus keerukaks kuna Kanada CHBDC meetod kasutab eurokoodeksis mitte käsitletavat liikluskoormust, mistõttu meetodi valemite kasutatavad tegurid liikluskoormusest tekitatud sisejõudude leidmiseks ei ühildu.

Töötõttu eesmärgiks: GNU Octave programmiga sisejõudude leidmine ning võrdlemine Plaxis 3D LEM programmi tulemustega.

Võtmesõnad: SDM ;CHBDC; PLAXIS 3D,GNU Octave, LEM

Lühendite ja tähiste loetelu

Lühendid:

LEM- lõplike elementide meetod(Ingl k Finite Element Method, FEM)

Swedish Design Method – SDM tähised:

Ladina väiketähed

C	Teraselemendi lainepikkus m
Cu	Lõimistegur
e	Arvutuse parameeter
e ₀	Poorsustegur
f ₁ ...f ₄	Arvutuse abifunktsioonid
f _{y,d}	Terase arvutuslik voolavuspiir MPa
f _{y,k}	Terase normatiivne voolavuspiir MPa
h	Terastorusilla kõrgus m
h _c	Pealiskihi paksus m
h _{c,red}	Efektivne pealiskihi paksus m
h _{corr}	Teraselemendi gofreeringu kõrgus m
k _v	Tangentsiaalmoduli arvutamisel kasutatav parameeter
k _{yy}	Stabiilsuskontrolli koosmõjutegur
m	Moodulitegur
mt	Teraprofiili sirge lõigu pikkus mm
p _{traffick}	Liiklusest tulenev joonkoormus kN/m
q	Liikluskoormuse hajukoormus kN/m
rd	Dünaamikamõju vähendav tegur
s	Kaugus m
t	Teraselemendi paksus mm
w _y	Parameeter

Ladina suurtähed

(EI) _{steel}	Terastorusilla seinä paindejäikus
A	Teraselemendi ristlõikepindala mm ² /mm
C _{my} = C _{my,0}	Parandustegur
C _{yy}	Arvutusparameeter
D	Terastorusilla laius m
E	Terase elastsusmoodul MPa
E _{soil,d}	Pinnase arvutuslik tangentsiaalmodul MPa

$E_{soil,k}$	Pinnase normatiivne tangentsiaalmodul MPa
H	Kõrgus toru kõige laiemast kohast toru ülemise punktini m
I	Inertsmoment mm^4/mm
$M_{Ed, Md}$	Summaarne arvutuslik paindemoment kNm/m
$M_{traffick}$	Liikluskoormusest tingitud paindemoment kNm/m
M_{soilk}	Pinnasest tingitud paindemoment kNm/m
$M_{Rd, Mu}$	Arvutuslik paindekandevõime kNm/m
$M_{y,Rk}$	Normatiivne paindekandevõime kNm/m
N_{cr}	Euleri kriitilise jõu korrigeeritud väärtus kN/m
$N_{cr,el}$	Euleri kriitiline jõud ideaalsetel tingimustel kN/m
$N_{Ed, Nd}$	Summaarne arvutuslik normaaljõud kN/m
N_{Rk}	Normatiivne survekandevõime kN/m
N_{soilk}	Pinnasest tekkiv normaaljõud kN/m
$N_{traffik}$	Liikluskoormusest tekkiv normaaljõud kN/m
$N_{Rd, Nu}$	Arvutuslik survekandevõime kN/m
P	Punktkoormus kN
Q	Teljekoormus kN
$R_{t,s,c}$	Gofreeringu raadius mm
RP	Tihendatuse aste standard Proctor-teimi järgi %
Sar	Võlvkaare efekti arvestav koormuse vähendustegur
Sv	Arvutusparameeter
Z, $W_{pl,y}$	Plastne vastupanumoment mm^3/mm
W, $W_{el,y}$	Elastne vastupanumoment mm^3/mm

Kreeka väiketähed

α	Teraselemendi gofreeringut iseloomustav nurk
δ_{crown}	Toru ümbritsevast pinnase toru kõrguse muut
η	tegur, Z/W suhe
η_s	Arvutusparameeter
λ_f	Jäikuse parameeter, mis väljendab toru ja pinnase jäikuse suhet
ξ	Arvutusparameeter
ρ_{cover}	Tagasitäite mahukaal, pealiskiht hc ulatuses kN/m^3
ρ_s	Pinnase eritihedus
ρ_{surr}	Tagasitäite mahukaal sügavuselt hc kuni maapinnani kN/m^3
σ	Normaalpinge MPa
σ_v	Vertikaalne pinge liikluskoormusest kN/m^2
$\varphi_{cover,d}$	Pinnase arvutuslik sisehõordenurk (hc ulatuses) °

$\varphi_{cover,k}$ Pinnase normatiivne sisehõõrdenurk (hc ulatuses) °
 χ_Y Varutegur

Canadian Highway Bridge Design Code- CHBDC tähised:

A Teraselemendi ristlõikepindala mm²/mm
Dh Terastorusilla laius m
Dv Terastorusilla kõrgus m
E Terase elastsusmoodul MPa
Em Pinnase modifitseeritud elastsusmoodul MPa
Es Pinnase elastsusmoodul MPa
fb Arvutuslik survekandevõime
Fy Terase voolavuspiir MPa
H Pealiskihi paksus m
H' Pool kõrgust toru kõige laiemast kohast kõige kõrgema punktini m
He Paindemomendi arvutamisel kasutatav väärtus
Hmin Vähim lubatud pealiskihi paksus toru peal m
M Normatiivne paindemoment kNm/m
Mf Arvutuslik summaarne paindemoment kNm/m
Mp Normatiivne paindekandevõime kNm/m
Mpf Arvutuslik paindekandevõime kNm/m
P Normatiivne survekandevõime kN/m
Ppf Arvutuslik survekandevõime kN/m
r Inertsiraadius
RB, RU Arvutusparameetrid
Rc Terastorusilla ülemine raadius mm
Re Ekvivalentne toru raadius
Tf Arvutuslik summaarne normaaljõud kN/m
 ρ Vähendustegur
 σ Normaalpinge MPa

Sissejuhatus

Terastorusild on terasest ja pinnasest koosnev komposiitkonstruktsioon (Ingl soil-steel composite bridge), mille kandevõime on tingitud terastoru ja selle ümbritseva pinnase koostoimest. Eestis on terastorusildasid rajatud valdavalt alla 10m avadega sildade asendamiseks ja maanteedel ökoduktidena.

Eessõnas mainitud Rootsi SDM ja Kanada CHBDC meetodite võrdluses selgub, et Kanada meetod piirneb kindla koormusmudeliga, mida eurokoodeks ei käsitle. Mõlemat meetodit on üle 30 aasta käsitletud torusildade projekteerimisel.

Antud töö eesmärgiks, on arvutada Rootsi SDM meetodil torusillas tekkivad sisejõud ja pinged ning võrrelda arvutatud tulemusi lõplike elementide meetodi arvutusprogrammi PLAXIS 3D-ga. Lisaks võrreldakse PLAXIS 3D saadud tulemusi Kanada meetodiga.

Selleks taotleti PLAXIS 3D programmile eraldi ligipääs firmalt CAD-süsteemide OÜ, kuna Eestis pole antud programmi kasutamine levinud.

PLAXIS 3D programmi selgeks õppimine toimus iseseisvalt.

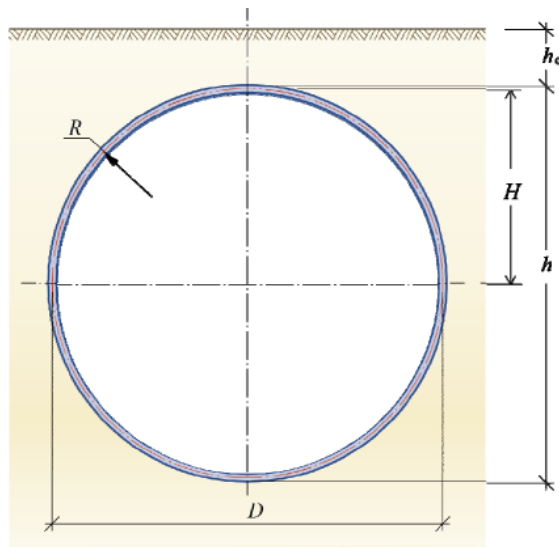
Rootsi SDM meetod ja Kanada meetodi juhendid on leitavad kasutatud kirjanduses [1] [2].

1. Rootsi arvutusmeetod SDM

1.1 Tüüpkujud

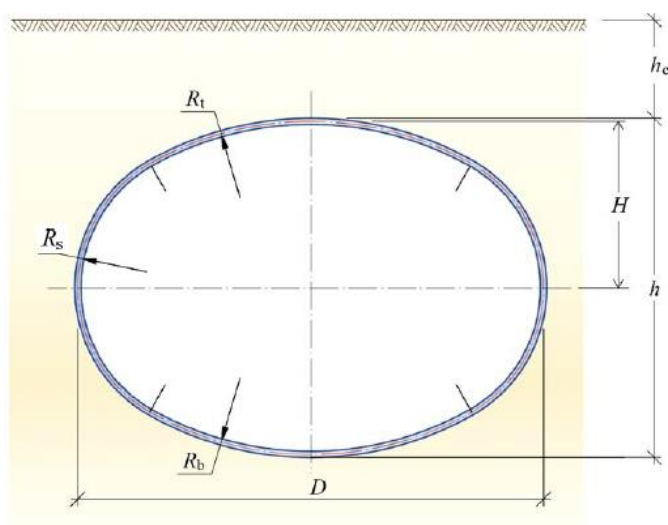
SDM juhend rakendatakse allolevatele profiilidele.

A. Toruprofiil konstantse raadiusega.



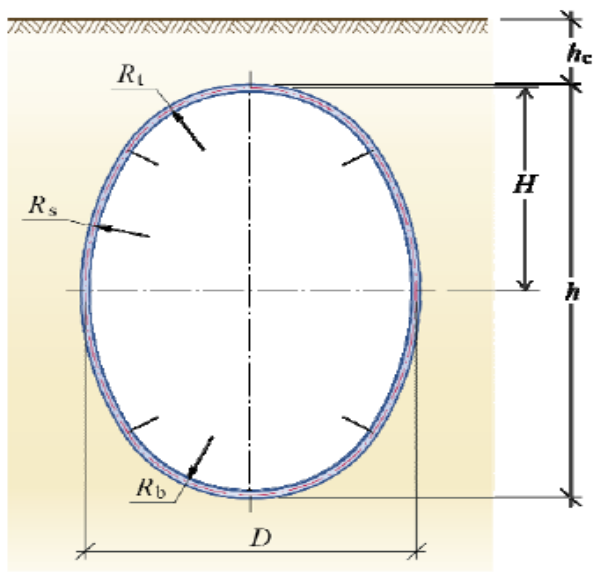
Joonis 1.1.1 [2, p. 5]

B. Horisontaalne ellips. $R_t/R_s \leq 4$ ja $R_b/R_s \leq 4$.



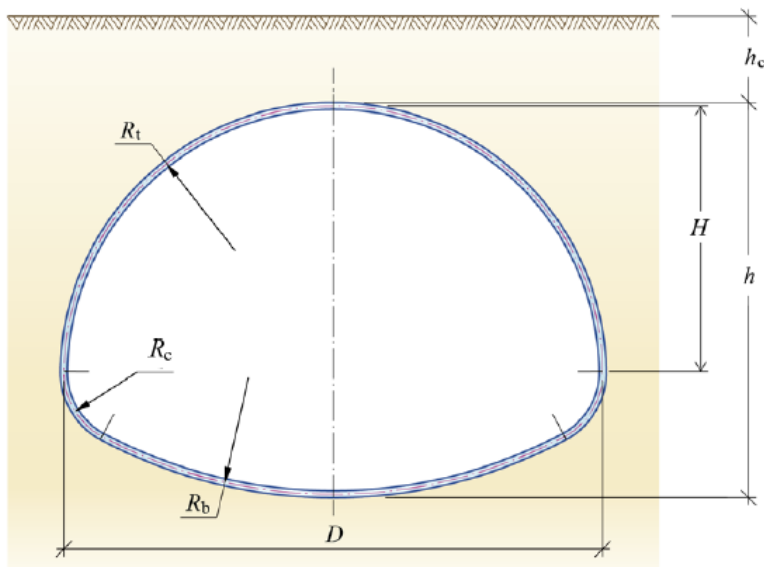
Joonis 1.1.2 [2, p. 5]

C. Vertikaalne ellips $R_t(R_b)/R_s = \sim 0,8$.



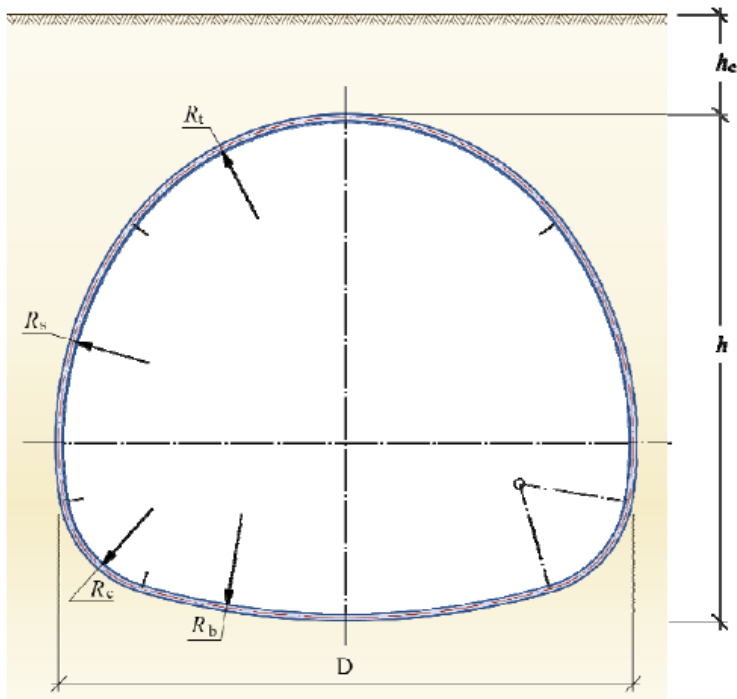
Joonis 1.1.3 [2, p. 6]

D. Torukaar(Lameprofiilne) $R_t/R_c \leq 5,5$, $R_b/R_c \leq 10$.



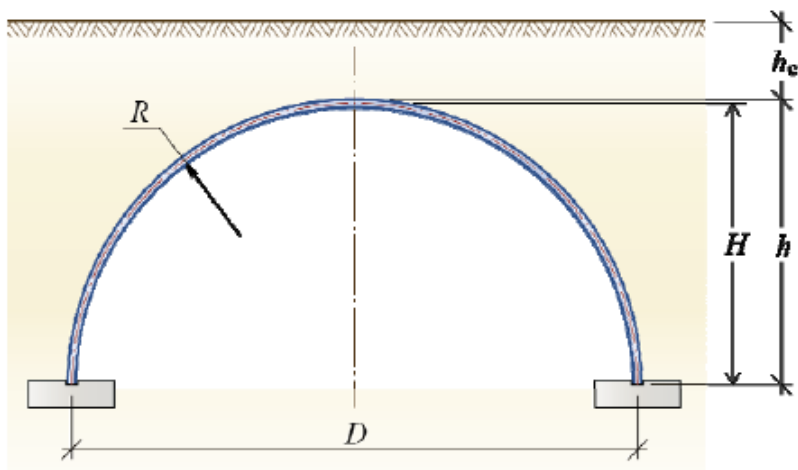
Joonis 1.1.4 [2, p. 6]

E. Torukaar(madalprofiilne) $R_t/R_c \leq 5,5$, $R_b/R_c \leq 10$ ja $R_s/R_t \leq 2,0$.



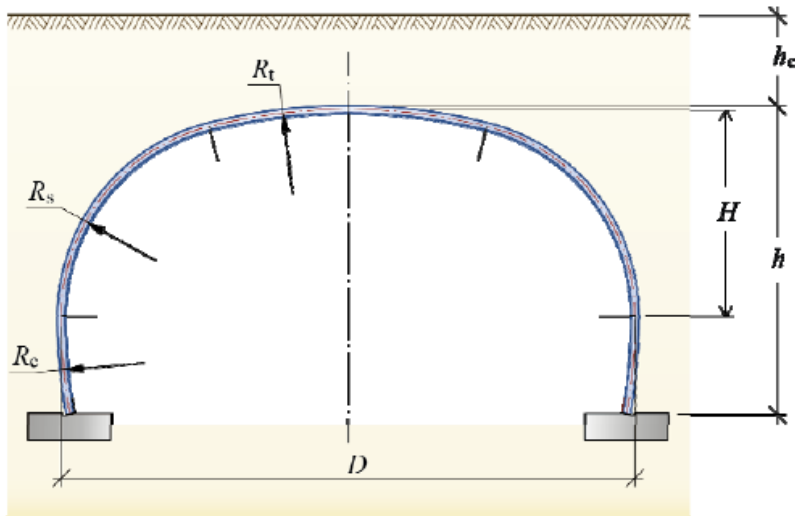
Joonis 1.1.5 [2, p. 7]

F. Kaar $R=R_t$



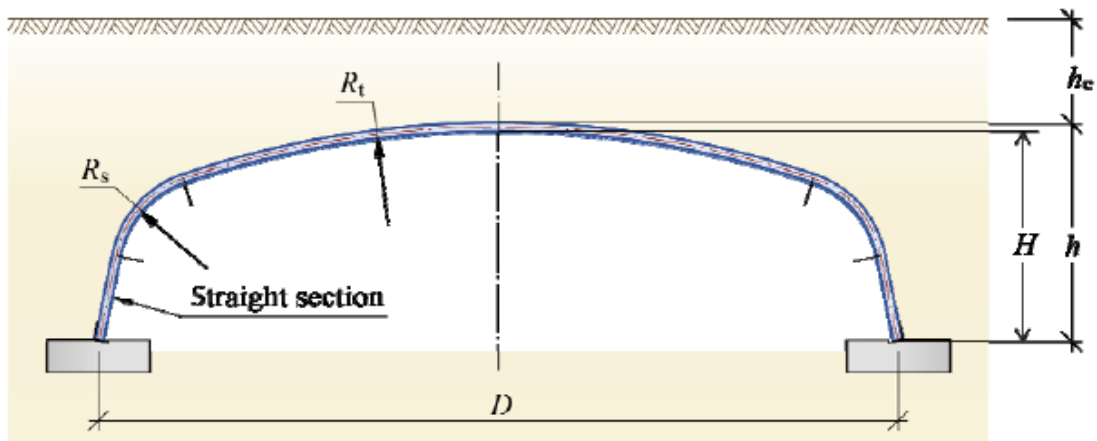
Joonis 1.1.6 [2, p. 7]

G. Kaar(võlvprofiil) $R_t/R_s \leq 4$, kus $1 \leq R_c/R_s \leq 4$.



Joonis 1.1.7 [2, p. 8]

H. Karpprofiil $R_t/R_s \leq 12$.



Joonis 1.1.8 [2, p. 8]

1.2 Piirangud

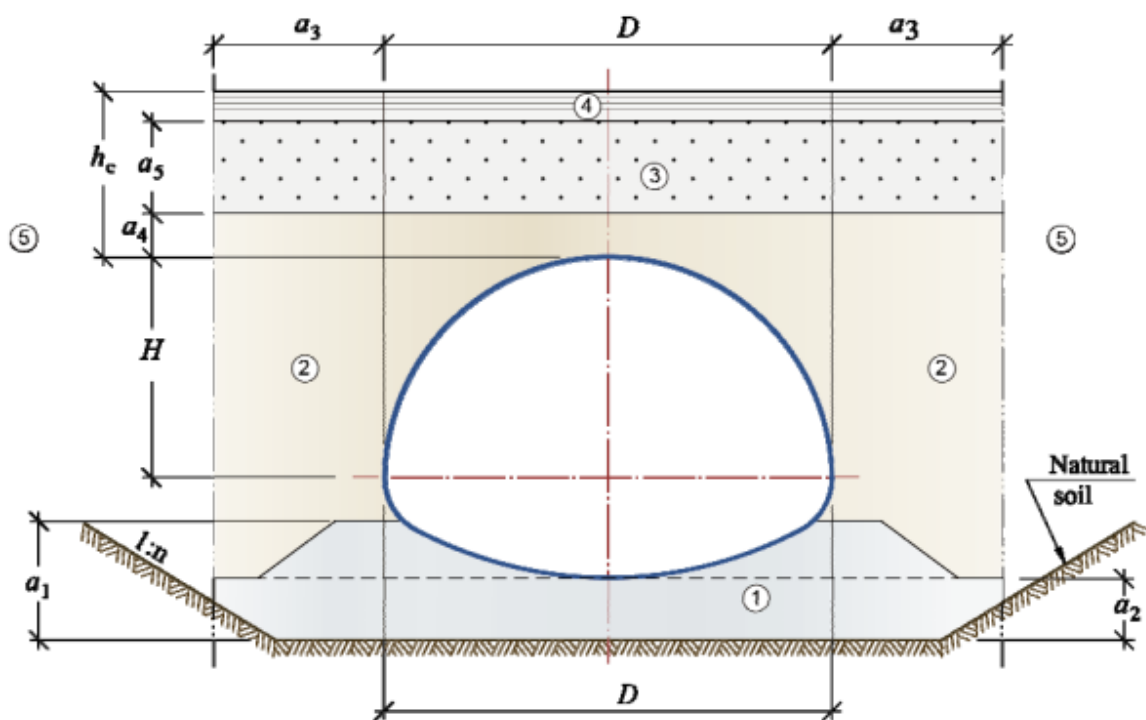
Juhend kehtib terastoru-dega, millel on jäikus $100 < \lambda f < 50000$, kus parameeter h_c peab alati olema minimaalselt 0,5m. [2, p. 17]

1.3 Efektiivne tagasitäite kõrgus

Efektiivne tagasitäite kõrgus leitakse valemiga [2, p. 20]:

$$H_{c,red} = h_c - \delta_{crown} , \quad (1.3.1)$$

kus
$$\delta_{crown} = 0,015 * D \quad (1.3.2)$$



Joonis 1.3.1 [2, p. 10]

1.4 Pinnase parameetrid

Juhend lubab kasutada A ja B meetodit pinnase tangentsiaalmoduli leidmiseks. Antud töös kasutan meetodit A. Meetod A pinnase tangentsiaalmodul arvutatakse valemiga [2, p. 57]:

$$E_{soil,k} = 1,3 * 1,17^{(RP - 95)} [1,25 \ln \left(h_c + \frac{H}{2} \right) + 5,6] , \quad (1.4.1)$$

kus RP- Proctor teimi tihendustegur.

SDM Juhendis on valem 1.4.1 rakendatav alljärgnevaltele pinnase tüüpidele. [2, p. 57]

Tabel 1.4.1

Pinnasegrupp	Terasuurus	Pinnase tüüp	Pinnase klassi sümbol
I	Suureteraline	Ühtlase koostisega kruus või liivkruus	GW
		Ebaühtlase koostisega kruus või liivkruus	GP
		ühtlase koostisega liiv või kruusliiv	SW
		Ebaühtlase koostisega liiv või kruusliiv	SP

Meetod B on detailsem pinnase tangentsiaalmoduli arvutamise meetod, mis on piiritletud järgnevate parameetritega [2, p. 58]:

1. Pinnase sõelkõverad: d_{10} , d_{50} ja d_{60} ; Piirang: $0,5 < d_{50} < 30$ ning $2 \leq C_u < 30$, kus C_u on lõimumistegur;
2. Tihendatuseaste $RP = 100 * (p_{surr} / p_{opt})$;
3. Koormamata olekus pinnasest tekkiv pinge toru ümber sügavusel $h_c + H/2$.

Tangentsiaalmodul arvutus koosneb järgnevatest etappidest [2, p. 58]:

Poorsustegur arvutakse valemiga [2, p. 58]:

$$e = \frac{ps}{p} - 1; e_0 = \frac{p}{psurr} - 1 \quad (1.4.2)$$

Moodulitegur arvutatakse valemiga [2, p. 58]:

$$m = 282 * C_u^{-0,77} * e_0^{-2,83}, \quad (1.4.3)$$

kus lõimumistegur C_u arvutatakse valemiga [2, p. 58]:

$$C_u = d_{60} / d_{10} \quad (1.4.4)$$

Pinge eksponent arvutakse valemiga [2, p. 58]:

$$B = 0,29 * \log\left(\frac{d_{50}}{0,01}\right) - 0,065 * \log(C_u) \quad (1.4.5)$$

Pinnase sisehõrdenurk piirkonnas 2 (joonis 1.3.1) arvutakse valemiga [2, p. 59]:

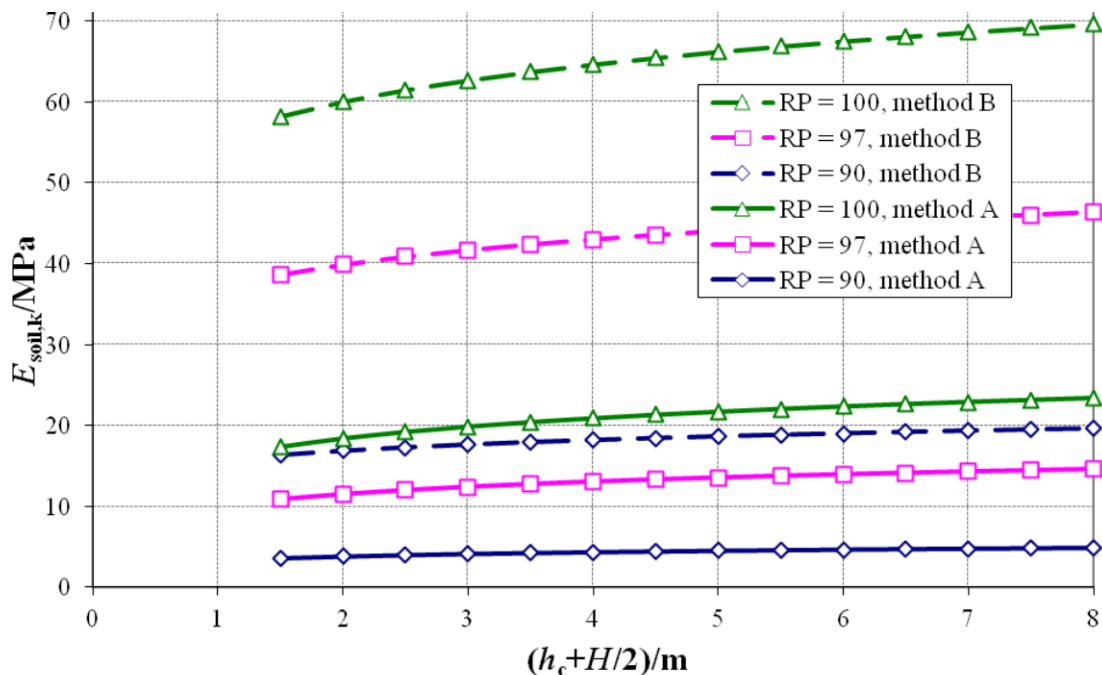
$$\varphi_k = 26^\circ + 10 * \frac{(RP-75)}{25} + 0,4 * C_u + 1,6 * \log(d_{50}) \quad (1.4.6)$$

Meetod B pinnase tangentsiaalmodul arvutatakse valemiga [2, p. 59]:

$$E_{soil,k} = 0,42 * m * 100kPa * k_v \left[\frac{(1 - \sin \varphi_k) * S_{ar(h_c + \frac{H}{2})} * \rho_{h_c + \frac{H}{2}}}{100kPa} \right]^{1-\beta}, \quad (1.4.7)$$

kus parameeter k_v arvutatakse valemiga [2, p. 59]:

$$k_v = \frac{1-v-2v^2}{1-v} = \frac{\sin \varphi_k(3-2 \sin \varphi_k)}{2-\sin \varphi_k} \quad (1.4.8)$$



Joonis 1.4.1 Meetodite A ja B võrdlus [2, p. 60]

1.5 Liikluskoormus

Liikluskoormus arvutakse Boussinesqi valemi järgi, kus tandemi rattast tulenev koormus teisendatakse punkt koormuseks ja leitakse asukoht, kus tekib kõige suurem pinge sügavusel (h_{cred}) [2, p. 24]

$$\sigma_v = \frac{3 P h_{cred}^3}{2\pi s^5} \quad (1.5.1)$$

Valemist saadud vertikaalne pinge teisendatakse ekvivalentseks joonkoormuseks $p_{traffic}$ [2, p. 24]:

$$P_{traffic} = \frac{\pi h_{cred}}{2} * \sigma_v \quad (1.5.2)$$

Antud töös väliskonsultandi ja ka teema soovitaja juhendamisel on kasutatud konvulatsiooni maatriksit, et leida ebasoodsamat tandemi paiknemist truubil: Kus A mõjupinna maatriks (sõidutee truubi kohal), antud töös valem 1.5.2 $P_{traffic}$ on A maatriks.

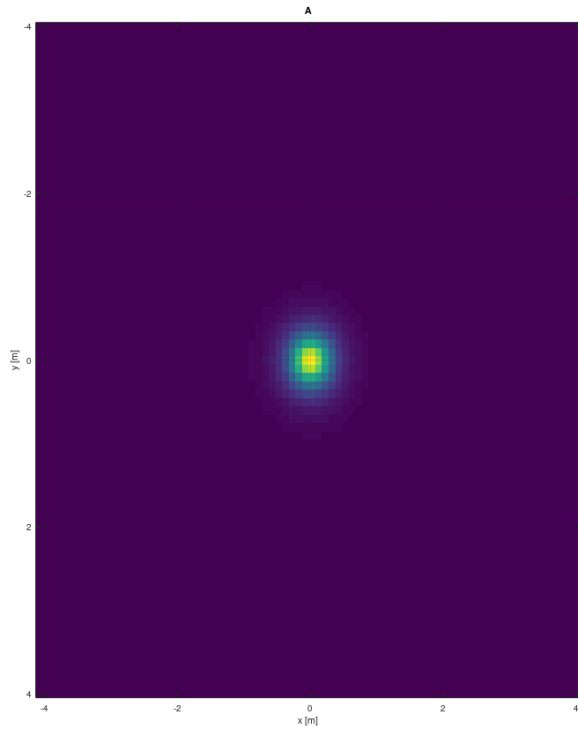
$$A = m * n \quad (1.5.3)$$

B- liikuva koormuse maatriks(tandem ratta koordinaadid ja ratta koormused)

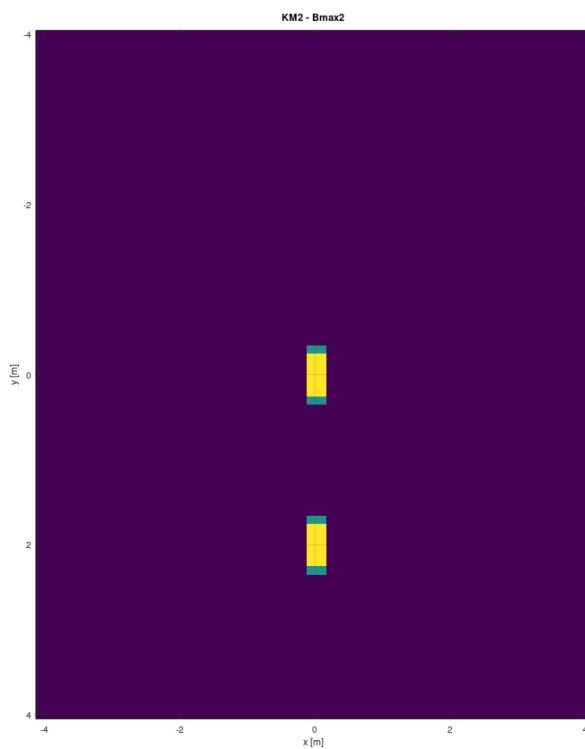
$$B = k * 1 \quad (1.5.4)$$

C - 2D konvulatsiooni maatriks A ja B maatriksitest.

$$C = m-k+1 * n+1-1 \quad (1.5.5)$$



Joonis 1.5.1 koormuse KM2 A maatriks mõjupind



1.6 Normaaljõud

1.6.1 Pinnasest tekkiv normaaljõud

Antud töös on $\rho_{sur} = \rho_{cover}$ pinnaste keskmised mahukaalud on võrdsed. Normaaljõud N_{soilk} leitakse juhendis toodud valemiga [2, p. 21]:

$$N_{soilk} = 0.2 * \frac{H}{D} * \rho_{sur} * D^2 + Sar \left[0.9 * \frac{h_{c,red}}{D} - 0.5 * \frac{\frac{h_{c,red}}{D} * H}{D} \right] \rho_{cover} D^2, \quad (1.6.1)$$

kus Sar on tegur, mis võtab torusilla võlvkaare efekti ning leitakse järgnevalt [2, p. 22]:

$$Sar = \frac{1 - e^{-k_1}}{k_1} \quad (1.6.2)$$

$$\tan \varphi_{cover,d} = \frac{\tan \varphi_{cover,k}}{Y_{m,soil}} \quad (1.6.3)$$

$$Sv = \frac{0.8 \tan \varphi_{cover,d}}{(\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_{cover,d}} + 0.45 \tan \varphi_{cover,d})^2} \quad (1.6.4)$$

$$k_1 = 2Sv h_c, \frac{h_{c,red}}{D} \quad (1.6.5)$$

1.6.2 Normaaljõu leidmine torusilla seinas

Liikluskoormusest $p_{traffic,k}$ tekkivat normaaljõudu arvutakse järgnevalt [2, pp. 24-25]:

$$\text{Kui } h_{c,red}/D \leq 0,25; N_{traffic,k} = p_{traffic,k} + (D/2) * q_k \quad (1.6.6)$$

$$\text{Kui } 0,25 < h_{c,red}/D; \leq 0,75; N_{traffic,k} = (1,25 - h_{c,red}/D) * p_{traffic,k} + (D/2) * q_k \quad (1.6.7)$$

$$\text{Kui } 0,75 \leq h_{c,red}/D; N_{traffic,k} = 0,5 p_{traffic,k} + (D/2) * q_k \quad (1.6.8)$$

1.6.3 Arvutusliku normaaljõu arvutamine

Normaaljõud kasutuspiir seisundis arvutatakse järgnevalt [2, p. 25]:

$$N_{d,SLS} = Y_{soil,SLS} * N_{soil,k} + Y_{traffic,sls} * N_{traffic,k} * [if R_t/R_s > 1; (R_t/R_s)^{0,25}, \text{ muuljuhul } 1] \quad (1.6.9)$$

Normaaljõud kandepiir seisundis arvutatakse järgnevalt [2, p. 25]

$$N_{d,ULS} = Y_d \{ Y_{soil,ULS} * N_s + Y_{traffic,ULS} * N_{traffic,k} \} \quad (1.6.10)$$

1.7 Paindemomentide arvutused

Pinnasest tekkiv paindemoment toruseinas oleneb pinnase ja toruseina jäikuse suhtest λf , mida arvutatakse valemiga [2, p. 26]:

$$\lambda f = E_{soil, k} * D^3 / (EI)_{steel / \gamma_{M, soil}} \quad (1.7.1)$$

1.7.1 Pinnasest tekkivad paindemomendid

Profiilidel kus $R_t/R_s \geq 1$, seinaplaatide moment on 2/3 võrrandist [2, pp. 28-29]:

$$M_{soil, k} / D^3 = M_{soil, surrk} / D^3 + M_{soil, cover, k} / D^3 = -p_{surr} f_1 f_3 f_2, surr + S_{ar} \rho_{cover} \frac{h_{c, red}}{D} \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0,75} f_1 f_2, cover \quad (1.7.2)$$

kus f_1 arvutamise tingimused:

$$0,2 < H/D \leq 0,35: f_1 = [0,67 + 0,87 * (H/D - 0,2)] \quad (1.7.3)$$

$$0,35 < H/D \leq 0,5: f_1 = [0,8 + 1,33 * (H/D - 0,35)] \quad (1.7.4)$$

$$0,5 < H/D \leq 0,6: f_1 = 2 * (H/D) \quad (1.7.5)$$

f_2 arvutamine:

$$\lambda f \leq 5000: f_2, surr = 0,0046 - 0,0010 * \log_{10}(\lambda f) \quad (1.7.6)$$

$$\lambda f > 5000: f_2, surr = 0,0009 \quad (1.7.8)$$

f_3 arvutamine:

$$f_3 = 6,67 * H/D - 1,33 \quad (1.7.9)$$

Tagasitäiteks Torusilla peal:

$$\lambda f \leq 5000: f_2, cover = 0,018 - 0,004 * \log_{10}(\lambda f) \quad (1.7.10)$$

$$\lambda f > 5000: f_2, cover = 0,0032 \quad (1.7.11)$$

1.7.2 Paindemoment liikuvast koormusest

Paindemoment liikuvast koormusest leitakse valemiga [2, p. 30]:

$$M_{traffic, k} = f_4' * f_4'' * f_4''' * f_4'''' * D * p_{traffic} + S_{ar} (R_t/R_s)^{0,75} * f_1 * f_2, cover * q_k * D^2 \quad (1.7.12)$$

$$f_4' = 0,65 * (1 - 0,2 * \log_{10}(\lambda f)) \quad (1.7.13)$$

$$f_4'' = 0,120 * (1 - 0,15 * \log_{10}(\lambda f)) \quad (1.7.14)$$

$$f_4''' = 4 * 0,001^{(h_{c, red}/D)} + 0,4 \quad (1.7.15)$$

$$f_4'''' = (R_t/R_s)^{0,25} \quad (1.7.16)$$

$$\text{Kehtib reegel } f_4' * f_4''' < 1 \quad [2, p. 30] \quad (1.7.17)$$

Profiilidel, kus $R_t/R_s \geq 1$ seinaplaatide moment võetakse $1/3 M_{\text{traffic,k}}$. [2, p. 30]

1.7.3 Arvutuslikud paindemomendid

Kasutuspiirseisundi pinnasest ja liikuvast koormusest tekkiv paindemoment leitakse valemiga [2, p. 35] :

$$M_{d,SLS} = Y_{\text{soil,surr,SLS}} M_{\text{soil,surr,k}} + Y_{\text{soil,cover,SLS}} M_{\text{soil,cover,k}} + Y_{\text{traffic,SLS}} M_{\text{traffic,k}} \quad (1.7.18)$$

kus kasutuspiirseisundi liiklusest tulenev arvutuslik paindemoment tuleneb [2, p. 35]:

$$M_{\text{max traffic, SLS}} = Y_{\text{traffic,SLS}} * M_{\text{traffic,k}} \quad (1.7.19)$$

$$M_{\text{min traffic, SLS}} = Y_{\text{traffic,SLS}} * (-M_{\text{traffic,k}}/2) \quad (1.7.20)$$

Kandepiirseisundi arvutuslik paindemoment [2, p. 35]:

$$M_{d,ULS} = Y_d [Y_{\text{soil,surr,ULS}} * M_{\text{soil,surr,k}} + Y_{\text{soil,cover,ULS}} * M_{\text{soil,cover,k}} + Y_{\text{traffic,ULS}} * M_{\text{traffic,k}}] \quad (1.7.21)$$

Kandepiirseisundi liiklusest tulenev arvutuslik paindemoment leitakse [2, p. 35]:

$$M_{\text{max traffic,ULS}} = Y_{\text{traffic,ULS}} * M_{\text{traffic,k}} \quad (1.7.22)$$

$$M_{\text{min traffic,ULS}} = Y_{\text{traffic,ULS}} * (-M_{\text{traffic,k}}/2) \quad (1.7.23)$$

1.8 Kontrollid kasutuspiirseisundis

Suurima pinge toru seinas arvutakse Navieri võrrandiga [2, p. 37]:

$$\sigma = \frac{N_{dSLS}}{A} + \frac{M_{d,SLS}}{W} < f_{yd} \quad (1.8.1)$$

1.9 Kontrollid kandepiirseisundis

Kandepiirseisundi kontroll tehakse juhendis EVS-EN 1993-1-1(6.61) lihtsustatud kujul [2, p. 38]:

$$\frac{N_{ed}}{\frac{X_{yNrk}}{Y_{M1steel}}} + k_{yy} \frac{M_{ed}}{(M_{y,Rk})/Y_{M1steel}} \leq 1,0 \quad (1.9.1)$$

kus N_{ed}/N_{duls} - arvutuslik normaaljõud;

M_{ed}/M_{duls} - arvutuslik paindemoment;

Nrk- normatiive survekandevõime arvutusvalem [2, p. 38]:

$$N_{rk} = f_y * A \quad (1.9.2)$$

My,rk- normatiive paindekandevõime arvutusvalem [2, p. 38]:

$$M_{yrk} = f_y * W \quad (1.9.3)$$

Xy - Nõtkes vähendustegur arvutusvalem [2, p. 38]:

$$X_y = N_{cr} / N_u \quad (1.9.4)$$

Ühildustegur (Ingl Interaction factor) K_{yy} arvutakse valemiga [2, p. 38]:

$$K_{yy} = \frac{C_{my}}{\left(1 - X_y \frac{N_{ed}}{N_{cry}}\right)_{CY}} \quad (1.9.5)$$

kus C_{my}=1 – parandus tegur ja on juhendis eeldatud [2, p. 38] ;

N_{cry}= N_{cr,el} vastvalt juhendile [2, p. 38];

N_{cr,el} on nõtkekoormus toru jooksvale meetrile (Ingl.k buckling load per unit length of pipe) ühik kN/m [2, p. 68].

$$N_{cr,el} = \frac{3\xi}{\mu} \sqrt{E_{soild} * (EI)_{steel} / R_t} \quad (1.9.6)$$

kus μ leitakse valemiga [2, p. 68]:

$$\mu = \left(1.22 + 1.95 \left(\frac{(EI)s}{\eta_s * E_{soild} * R_t^3}\right)^{0.25}\right)^2 * 1 / \sqrt{\eta_s} \quad (1.9.7)$$

Tegur ξ leitakse valemiga [2, p. 68]:

$$\xi = \sqrt{k_2} \leq 1,0 \quad (1.9.8)$$

Tegur η_s arvutakse valemiga [2, p. 68] :

$$\eta_s = 1 - \left(\frac{1}{1+k_2}\right)^2 \quad (1.9.9)$$

Tegur k₂ leitakse valemiga [2, p. 69]

$$k_2 = h_c / R_t \quad (1.9.10)$$

Tegur N_{cr} on lubatud arvutada N_{crel} valemiga kui on tagatud tingimused [2, p. 69]:

$$\left(\frac{R_{cr}}{R_t}\right)^2 = \frac{N_{crel}}{N_u} \leq 0,5 \quad (1.9.11)$$

kus

$$N_u = F_{yd} * A$$

Kui $\left(\frac{R_{cr}}{R_t}\right)^2 = \frac{N_{crel}}{N_u} > 0,5$ siis N_{cr} vähendatakse valemiga [2, p. 69]:

$$\frac{N_{cr}}{N_u} = \omega = \left(1 - \frac{1}{4} * \frac{N_u}{N_{crel}}\right) \quad (1.9.12)$$

Rislõike klasside 1. ja 2. korral parandustegur C_{yy} lisatakse ning arvutakse valemiga [2, p. 38]:

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) * \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} * C_{my}^2 * \lambda_y * (1 + \lambda_y) \right) * \eta_{pl} \right] \quad (1.9.13)$$

kus

$$C_{yy} \geq \frac{W_{ely}}{W_{ply}} \quad (1.9.14)$$

W_y on plastse ja elastse vastupanumomentide suhe [2, p. 39]

$$W_y = W_{ply} / W_{ely} \leq 1,5 \quad (1.9.15)$$

Relatiivne saledus Δy leitakse valemiga [2, p. 39]

$$\Delta y = \sqrt{\frac{N_u}{N_{cr}}} \quad (1.9.16)$$

1.9.1 Varu toru alumises osas

Varu alumise osas kontrollitakse valemiga [2, p. 39]

$$N_{d,ULS} \leq N_{cr} \quad (1.9.17)$$

kus N_{cr} leitakse vastavalt juhendile Lisas 5 järgmiste muudatustega [2, p. 39]

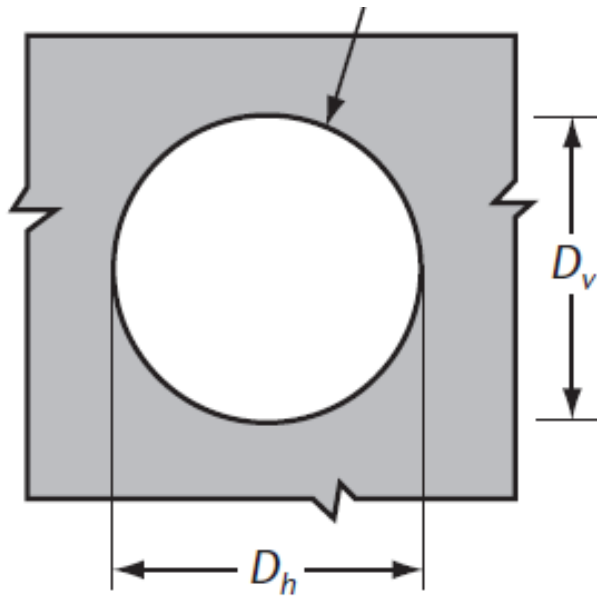
$$\eta_s = \xi = 1, \quad (1.9.18)$$

$$\mu = 1,22. \quad (1.9.19)$$

2.Kanada arvutusmeetod CHBDC

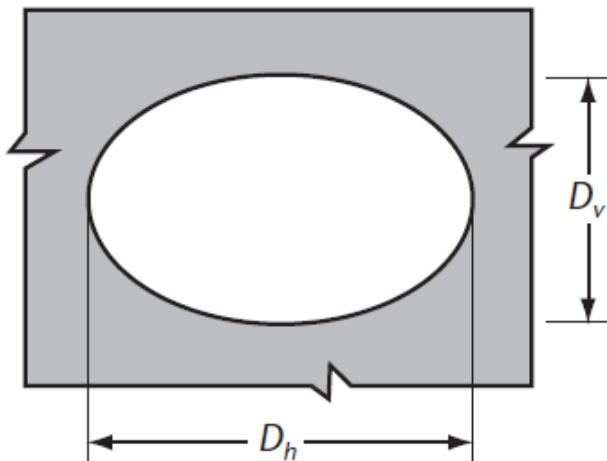
2.1 Tüüpkujud CHBDC

A.Toruprofiil konstantse raadiusega



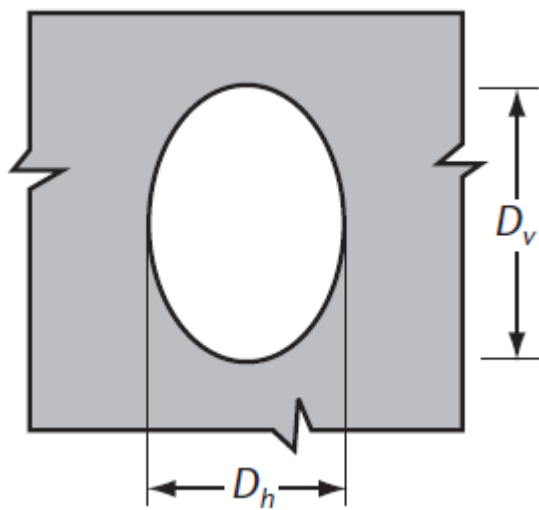
Joonis 2.1.1 [1, p. 265]

B. Horisontaalne ellips



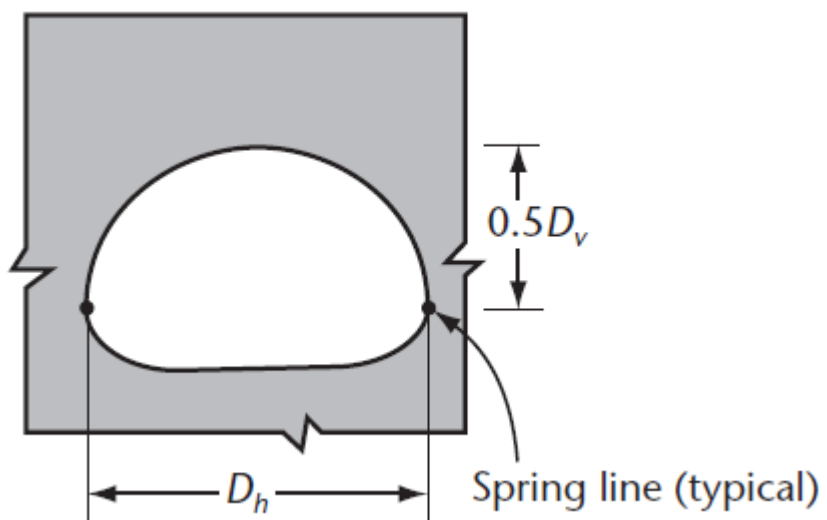
Joonis 2.1.2 [1, p. 265]

C. Vertikaalne ellips



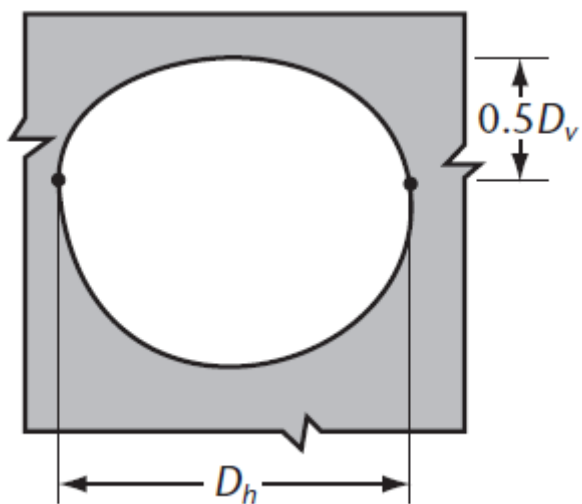
Joonis 2.1.3 [1, p. 265]

D. Torukaar



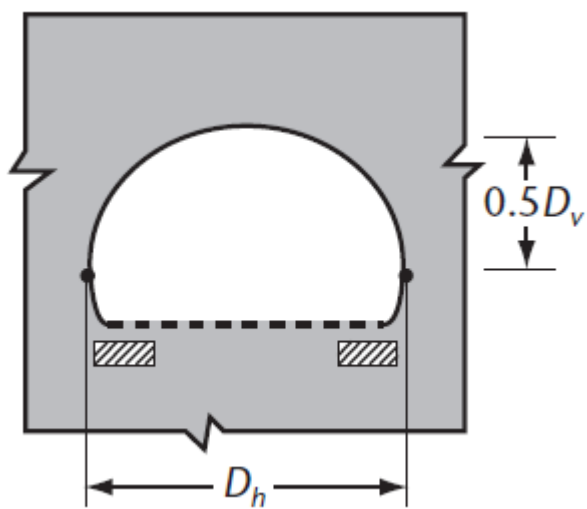
Joonis 2.1.4 [1, p. 265]

E. Pirnikujuline proffil(Inglise keeles Pear-shaped)



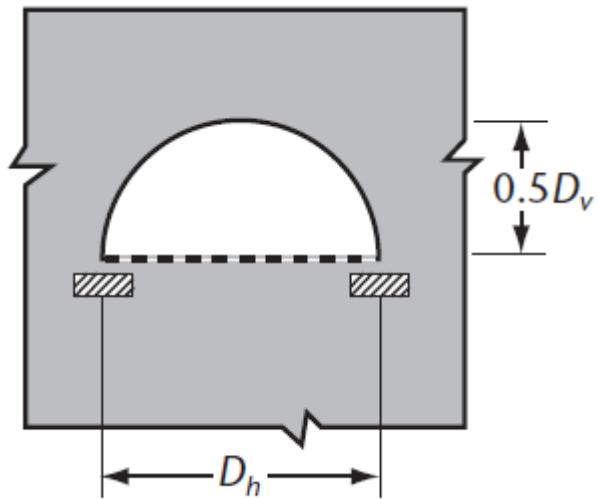
Joonis 2.1.5 [1, p. 265]

F. Jätukvkaar(Inglise keeles re-entrant arch)



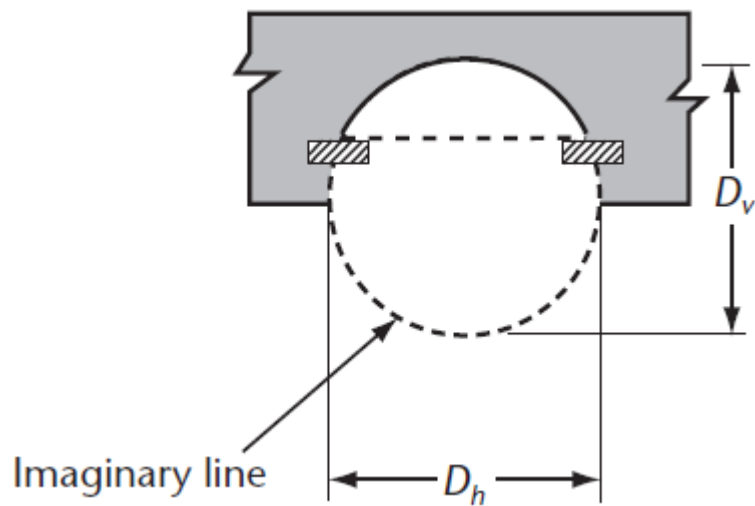
Joonis 2.1.6 [1, p. 265]

G. Kaar(Inglise keeles Semi-circular arch)



Joonis 2.1.7[1, p. 265]

H. Osaline kaar(Inglisekeeles part-arch)



Joonis 2.1.8[1, p. 265]

2.2 Pinnase parameetrid

2.2.1 Minimaalne tagasitäite kõrgus

Lamedate/madala harjadega plaatide Hmin leitakse järgnevalt, kus Hmin(m) on suurim [1, p. 272]:

- 1) 0,6
- 2) $(D_h/6) \cdot [D_h/D_v]^{0,5}$
- 3) $0,4 \cdot [D_h/D_v]^2$

Kõrgemate harjastega plaatide puhul on väikseim 1m ja Hmin leitud madalate harjadega plaatide puhul, kus rajatise suurus on sama.

Tagasitäide tehakse grupp1 ja grupp2 materjalidest. Tihendamiskihi maksimaalne kõrgus on 200mm [1, p. 276].

Tabel 2.2.1 [1, p. 266]

Pinnasegrupp	Terasuurus	Pinnase t�up	Pinnase klassi sümbol *
I	Suureteraline	ühtlase koostisega kruus või liivkruus	GW
		Ebaühtlase koostisega kruus või liivkruus	GP
		ühtlase koostisega liiv või kruusliiv	SW
		Ebaühtlase koostisega liiv või kruusliiv	SP
II	Keskmine	Savikruus või savine kruusliiv	GC
		Savine liiv või savine kruusliiv	SC
		Saviliiv või savine kruusliiv	SM

*ASTM D2487

Tabel 2.2.2 [1, p. 267]

Pinnaste elastsusmoodul(Secant modulus of soil)		
Pinnase grupp	Tihedus Proctor-teimi järgi %	Es,Mpa
I	85	6
	90	12
	95	24
	100	30
II	85	3
	90	6
	95	12
	100	15

2.3 Kandepiiriseisundi kontrollid

Kandepiiriseisundi kontrollid on tehtud Plaxis 3D paindemomendi - M_f ja normaaljõu- T_f saadud väärtustega.

2.3.1 Kandepiiriseisundi kontroll survele

Kandepiiriseisundi kontroll survele tehakse normaaljõust tekkinud pingega toru ülemises, alumises ja külgsেকtsioonides valemiga [1, p. 269]:

$$\sigma = T_f / A \leq f_b \quad (2.3.1)$$

kus f_b leitakse järgmiste tingimustega [1, p. 269]:

Kui $R \leq R_e$ siis,

$$f_b = \phi_t F_m \left[F_y - \frac{(F_y K R)^2}{12 E r^2 p} \right] \quad (2.3.2)$$

Kui $R \geq R_e$ siis,

$$f_b = \frac{3 \phi_t p F_m E}{\left[\frac{K R}{r} \right]^2} \quad (2.3.3)$$

kus

$\phi_t = 0.8$ surve tugevuse varutegur [1, p. 262]

$F_m = 1$ [1, p. 269]

R_e leitakse valemiga [1, p. 269]:

$$R_e = \frac{r}{K} * \left[6E * \frac{p}{F_y} \right]^{0.5} \quad (2.3.4)$$

P leitakse valemiga [1, p. 269]:

$$\rho = \left[1000 * \frac{H+H'}{R_c} \right]^{0.5} \leq 1 \quad (2.3.5)$$

K leitakse valemiga [1, p. 269]:

$$K = \lambda \left[\frac{EI}{EmR^3} \right]^{0.25} \quad (2.3.6)$$

E_m on toru küljeplaatides ja alumises osas võrdne E_s väärtusega, Toru ülemises osas arvutakse E_m vastavalt valemile [1, p. 269]:

$$E_m = E_s [1 - [R_c/R_c + 1000 * [H + H']]^2] \quad (2.3.7)$$

Tegur λ , kui suhe $D_h/D_v \leq 0.4$, siis λ leitakse valemiga [1, p. 270]:

$$\lambda = 1,22 \left[1 + 1,6 \left[\frac{EI}{EmRc^3} \right]^{0.25} \right] \quad (2.3.8)$$

Kõigil teistel juhtudel tegur $\lambda = 1,22$ [1, p. 270].

2.3.2 Kandepiirseisundi kontroll paindemomendi ja normaaljõu koosmõjule

Paindemomendi ja normaaljõu koosmõjul kandepiirseisundis ei tohi ületada arvutusliku survekandevõimet ja paindekandevõimet. [1, p. 271]

$$\left[\frac{T_f}{P_{pf}} \right]^2 + \left| \frac{M_f}{M_{pf}} \right| \leq 1 \quad (2.3.9)$$

Arvutuslik paindekandevõime leitakse valemiga [1, p. 272]

$$M_{pf} = \phi_{hc} M_p \quad (2.3.10)$$

Arvutuslik survekandevõime arvutakse valemiga [1, p. 271]

$$P_{pf} = \phi_{hc} A F_y \quad (2.3.11)$$

kus $\phi_{hc} = 0.9$ [1, p. 262].

3 Arvutused ja analüüs

Arvutused on tehtud SDM meetodiga esmaselt käsitsi ja üle kontrollitud eraldi PLAXIS 3D programmiga. Kanada meetod on arvatud ja kontrollitud programmi PLAXIS 3D tulemusi kasutades. Arvutusmudelites on pealmise kihi kõrgus võetud ja arvatud vastavalt meetodites minimaalse kõrguse piirtingimusi arvestades. SDM pinnaseomadused on arvatud vastavalt meetodile A. Mõlema meetodi puhul on arvutused tehtud samade pinnastega. Arvutustes kasutatud profiil 200X55. Pealmise katte laius on 8m kõigi arvutusmudelite puhul.

3.1 Toruprofiilide arvutuslikud parameetrid

Mõlema meetodi puhul on kasutatud SDM juhendis antud valemeid toruprofiilide omaduste arvutuseks. Mõlema meetodi puhul on võetud võrdlemiseks t - teraslehe paksuseks 7mm. Profiili kõrgus h_{corr} ja profiili laine pikkus leitakse leetakse valemitega [2, p. 51]:

$$h_{corr} = 2r(1 - \cos\alpha) + m_t \sin\alpha \quad (3.1.1)$$

$$c = 4r \sin\alpha + 2m_t \cos\alpha \quad (3.1.2)$$

kus α ja m_t väärtused võetakse tabelist 3.1.1 vastavalt valitud profiilile.

Tabel 3.1.1 [2, p. 51]

Profile type	α	m_t
125×26	$0,595 + 0,015t$	$21,0 - 1,62t, t \leq 5,0$
150×50	$0,856 + 0,015t$	$34,2 - 1,88t, t \leq 7,0$
200×55	$0,759 + 0,010t$	$37,5 - 1,83t, t \leq 7,0$
381×140	$0,859 + 0,003t$	$115,1 - 1,273t, t \leq 7,0$

Profiili pindala A (mm²/mm) leitakse järgneva valemiga [2, p. 52]:

$$A = (4art + 2mt * t)/c \quad (3.1.3)$$

$$r = R + t/2 \quad (3.1.4)$$

Profiiili inertsimoment I (mm^4/mm) arvutatakse valemiga [2, p. 52]:

$$I = \left[r^3 * t \left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{2\sin^2 \alpha}{\alpha} \right) + 4\alpha r t \left(\frac{h_{\text{corr}}}{2} - e \right)^2 + \frac{2}{12} * \frac{t}{\sin \alpha} * (m t \sin \alpha)^2 \right] / c \quad (3.1.5)$$

,kus
$$e = r \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) \quad (3.1.6)$$

Profiiili plastne vastupanumoment Z (mm^3/mm) arvutatakse valemiga [2, p. 52]:

$$Z = \left[4\alpha r t * \left(\frac{h_{\text{corr}}}{2} - e \right) + \frac{1}{2} * \frac{t}{\sin \alpha} * (m t * \sin \alpha)^2 \right] / c \quad (3.1.7)$$

Profiiili elastne vastupanumoment W ja inertsiraadius i leitakse valemitega [2, p. 52]

$$W = \frac{2I}{h_{\text{corr}} + t} \quad (3.1.8)$$

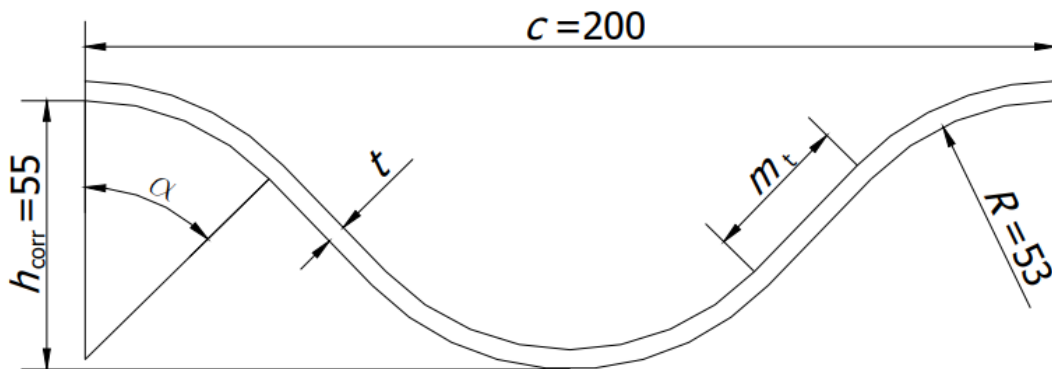
$$i = \sqrt{I/A} \quad (3.1.9)$$

Valitud profiili tehakse stabiilsuskontroll, kus $M_{\text{ucr}} \leq M_u$ [2, p. 52]

$$M_{\text{ucr}} = \left(1.429 - 0.156 * \ln \left(\left(\frac{m t}{t} \right) * \left(\frac{f_{yk}}{227} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right) * M_u \quad (3.1.10)$$

,kus

$$M_u = Z * f_{yd} \quad (3.1.11)$$

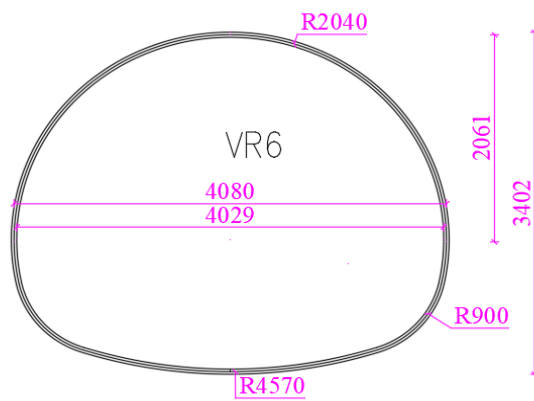


Joonis 3.1.1 [2, p. 55]

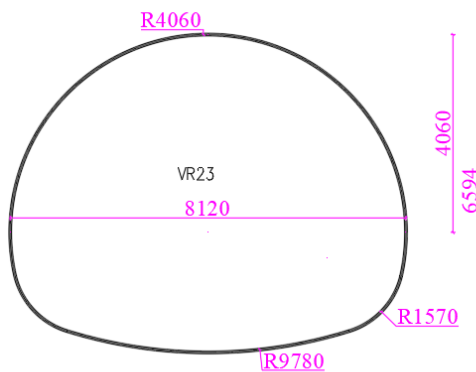
Tabelis 3.1.2 on toodud SDM juhendi autorite poolt arvutatud profiili 200x55 parameetrid vastavalt teraslehe paksusele.

Tabel 3.1.2 [2, p. 55]

t	A	I	W	Z	Z/W
mm	mm ² /mm	mm ⁴ /mm	mm ³ /mm	mm ³ /mm	-
2,00	2,36	898	31,5	41,4	1,31
3,00	3,54	1 353	46,7	62,3	1,34
4,00	4,73	1 811	61,4	83,3	1,36
5,00	5,92	2 273	75,8	104,5	1,38
6,00	7,10	2 739	89,8	125,8	1,40
7,00	8,29	3 208	103,5	147,3	1,42

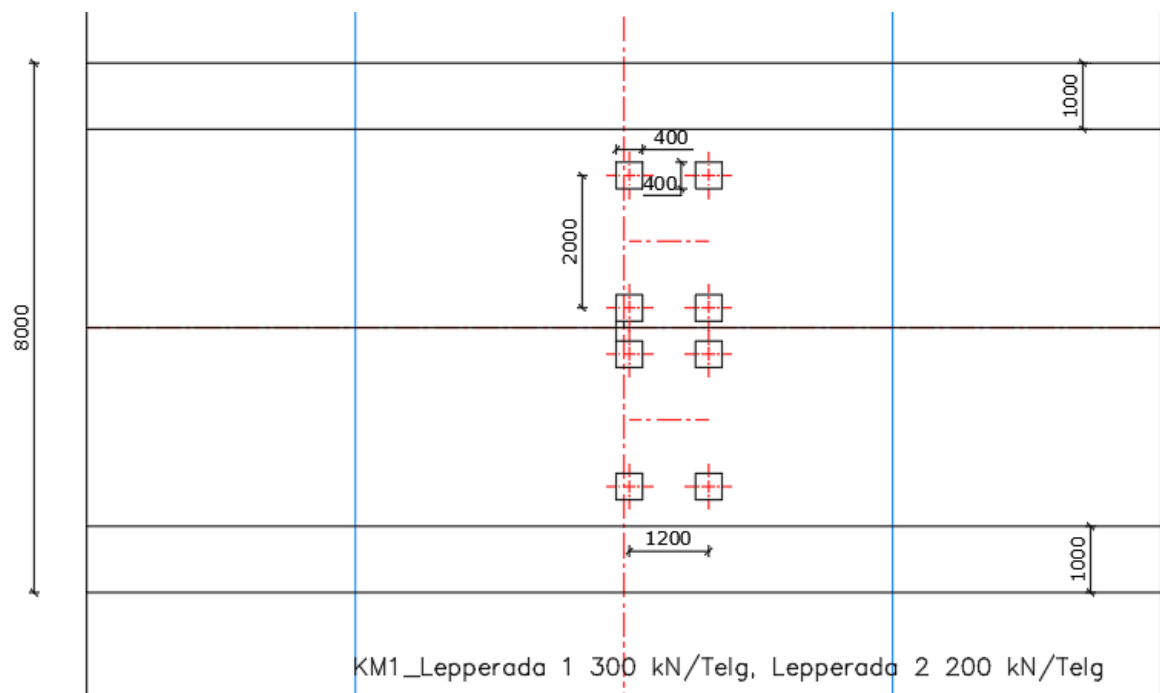


Joonis 3.1.1 4m truup [3, p. 17]

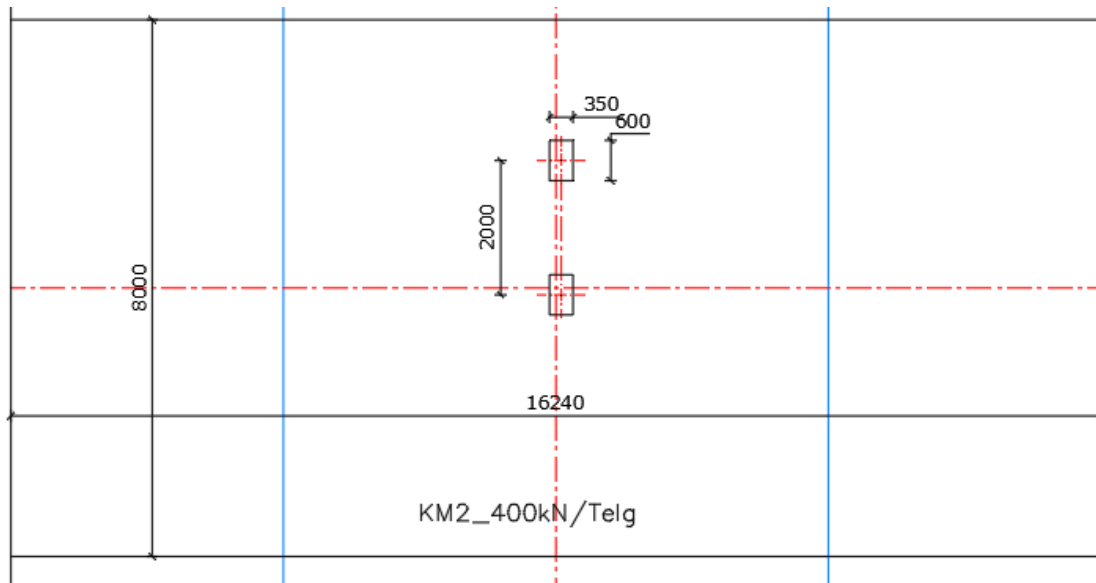


Joonis 3.1.2 8m truup [3, p. 17]

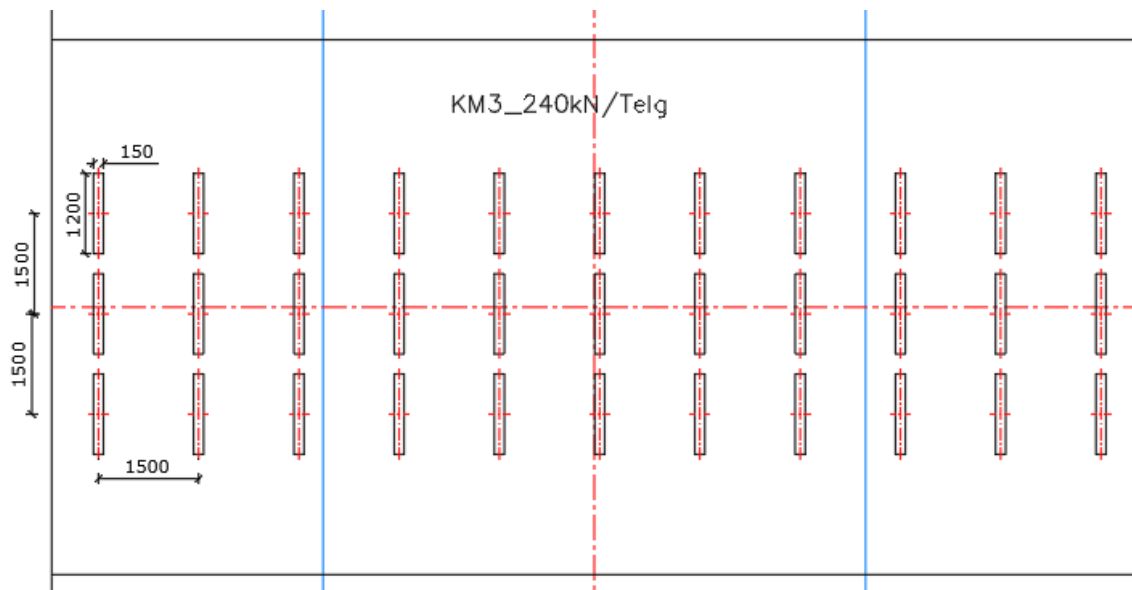
3.2 Arvutusmudeli koormused ja koormuste paiknemised



Joonis 3.2.1 Koormusmudeli 1 paiknemine truubi peal.



Joonis 3.2.2 Koormusmudeli 2 paiknemine truubi peal.

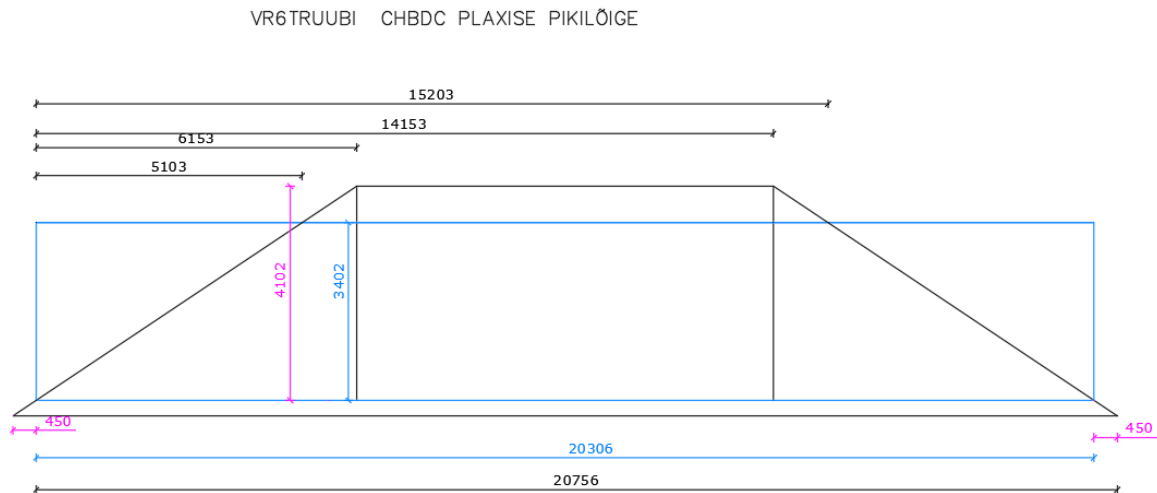


Joonis 3.2.3 Koormusmudeli 3 paiknemine truubi peal.

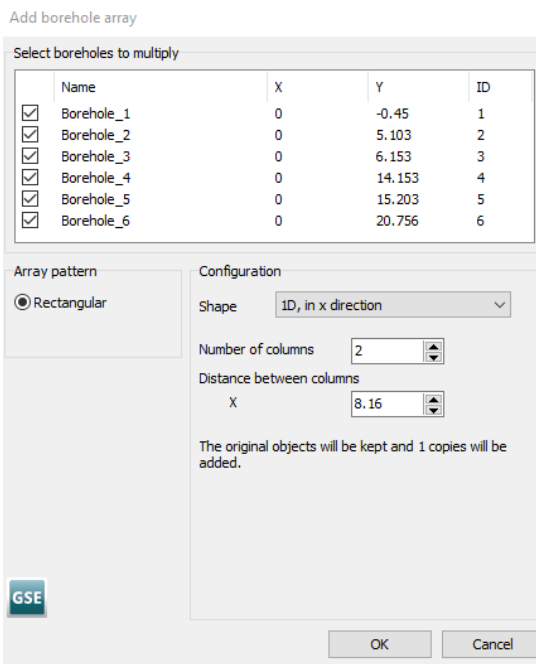
3.3 Plaxis 3D arvutusmudel

3.3.1 Puuraugud ja materjalide valik

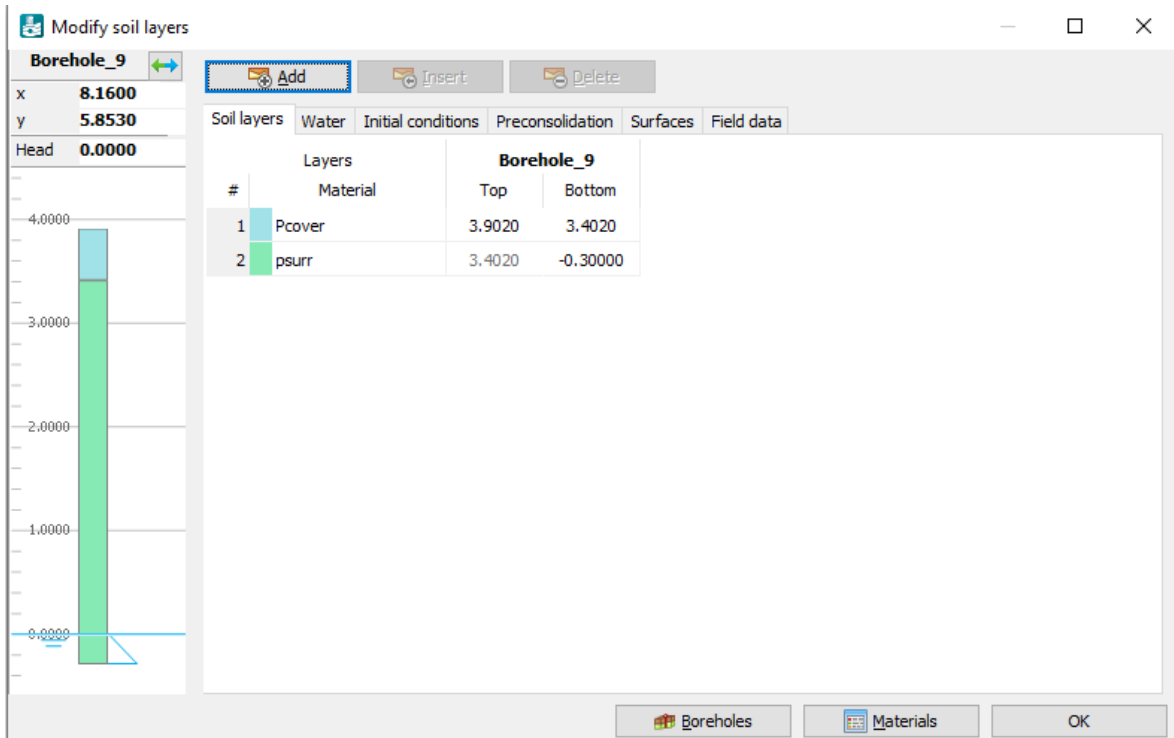
Arvutusmudeli esmaseks etapiks on puuraukude asukohtade määramine. Koordinaadid pärinevad Autocadis tehtud arvutusmudelist.



Joonis 3.3.1 Arvutusmudeli pikilõige
Array käsuga kopeerisin 2*D x suunas.

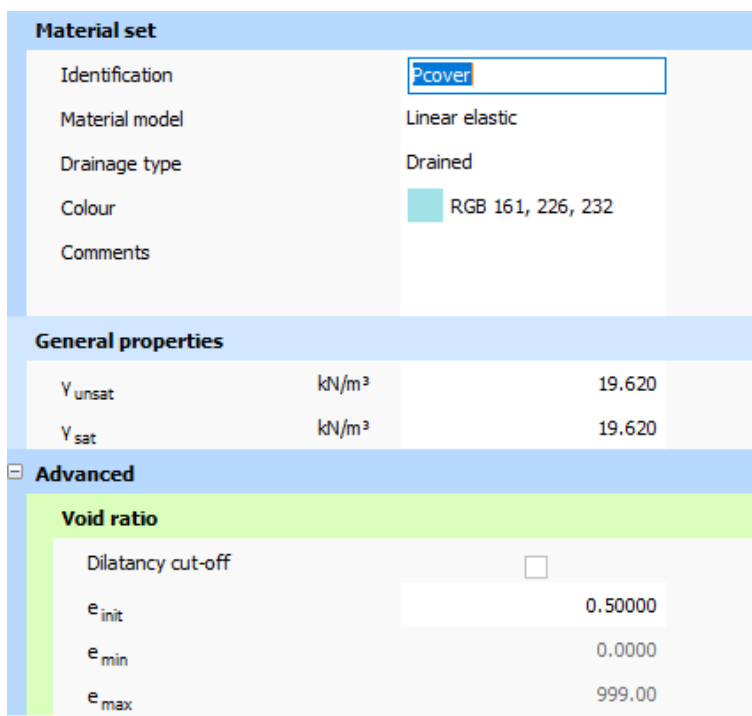


Joonis 3.3.2 4m truubi puuraukude asukohate sisestamine



Joonis 3.3.2 Puuraukude materjali valik ja kõrguste sisestamine

Antud töös pinnase arvutusemudeli valisin linear elastic.



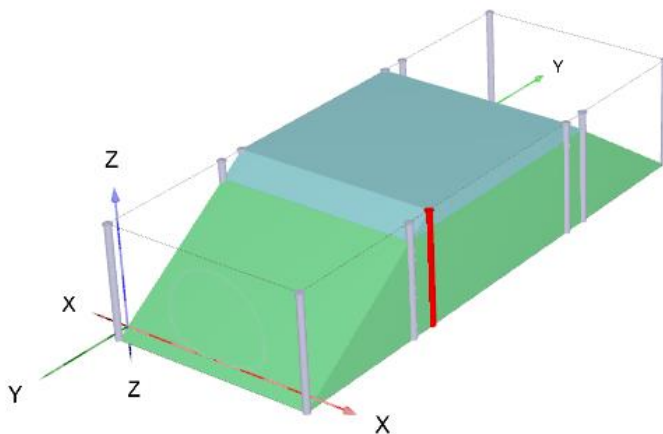
Joonis 3.3.3 Materjali omaduste määramine 1

Soil - Linear elastic - Pcover

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m^2	12767.4
ν' (nu)		0.300000
Alternatives		
G	kN/m^2	4910.54
E_{oed}	kN/m^2	17186.9
Advanced		
Set to default values		<input checked="" type="checkbox"/>
Stiffness		
E'_{inc}	$\text{kN/m}^2/\text{m}$	0.00000
z_{ref}	m	0.00000
Undrained behaviour		
Undrained behaviour	Standard	
Skempton-B		0.978261
ν_u		0.495000
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m^2	478777

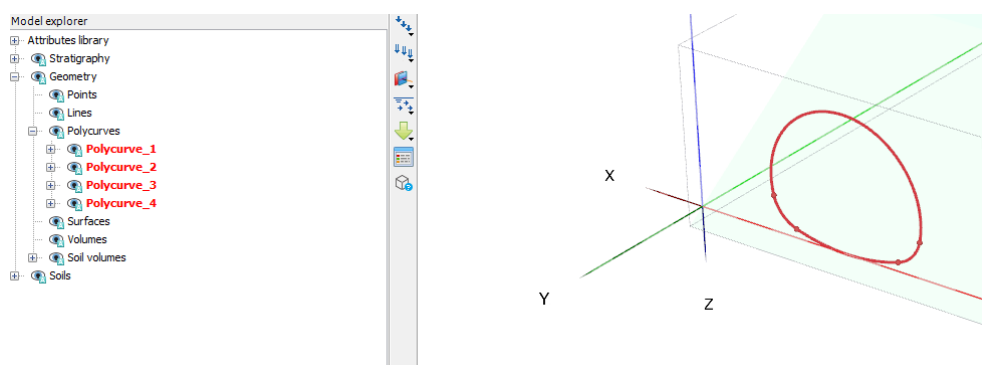
Joonis 3.3.4 Materjali omaduste määramine 2



Joonis 3.3.5 etapi lõpp tulemus

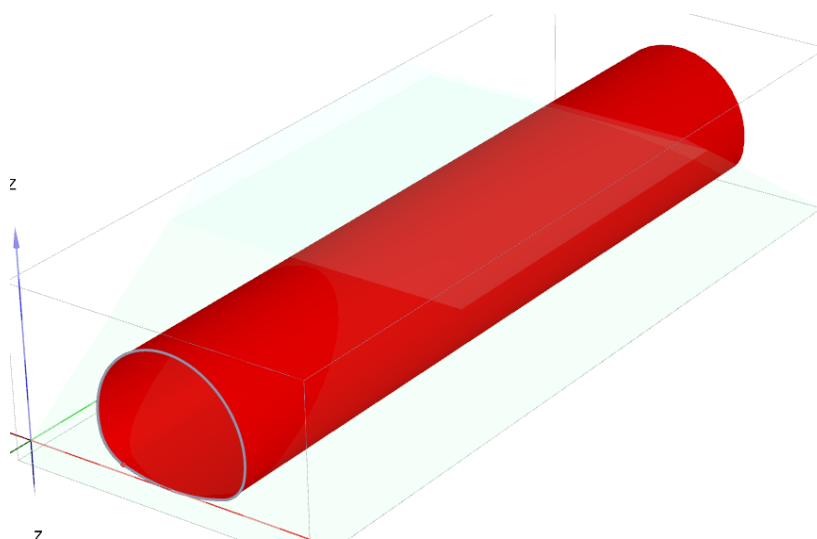
3.3.2 Torusilla 3D mudeli loomine

Truubi ristlõige tuuakse sisse dxf faili laienduse abil. Faili sisse importimisel peab vaatama ühikuid. Kui ristlõige on sisse toodud, vigade vältimiseks mesh tegemisel valida Model explorer menüüst ristlõike jooned ning need ühendada combine käsuga.



Joonis 3.3.6 imporditud ristlõige ja seksioonide valimine.

Ühendatud seksioonidest tekitakse pind Loft käsu abil.



Joonis 3.3.7 Loft käsuga tehtud torupind.

Torupinnale rakendatav ekvivalente plaat on arvutatud järgnevate valemitega [4, pp. 22;107-109]:

Ekvivalentse ortotroopse plaadi paksuse leidmine [4, pp. 22;107-109]:

$$deq = \left(\left(12 * \frac{I}{A} \right)^{0.5} \right) \quad (3.3.1)$$

Ekvivalentse Youngi moodul jäigemas suunas [4, pp. 22;107-109]:

$$E1 = \frac{12 * E * I}{deq^3} \quad (3.3.2)$$

Inertsmoment nõrgemas suunas [4, pp. 22;107-109]:

$$I2 = \frac{(t)^3}{12} \quad (3.3.3)$$

Ekvivalente Youngi moodul pikemas suunas [4, pp. 22;107-109]:

$$E2 = \frac{12 * Ems * I2}{deq^3} \quad (3.3.4)$$

Terastoru mahukaal kN/m³ [4, pp. 22;107-109]:

$$Q_{pipe} = \left(\frac{A}{deq} \right) * p_{steel} * \frac{g}{1000} \quad (3.3.5)$$

kus

p_{steel}= 7850 Terasse mahumass kg/m³

v_{steel}= 0.3 Poissoni tegur

Nihkemoodul (Ingl Inplane shear modulus) [4, pp. 22;107-109]:


$$G12 = \frac{\sqrt{(E1 * E2)}}{2 * (1 + v_{steel})} \quad (3.3.6)$$

Nihkemoodul jäigemas suunas [4, pp. 22;107-109]:

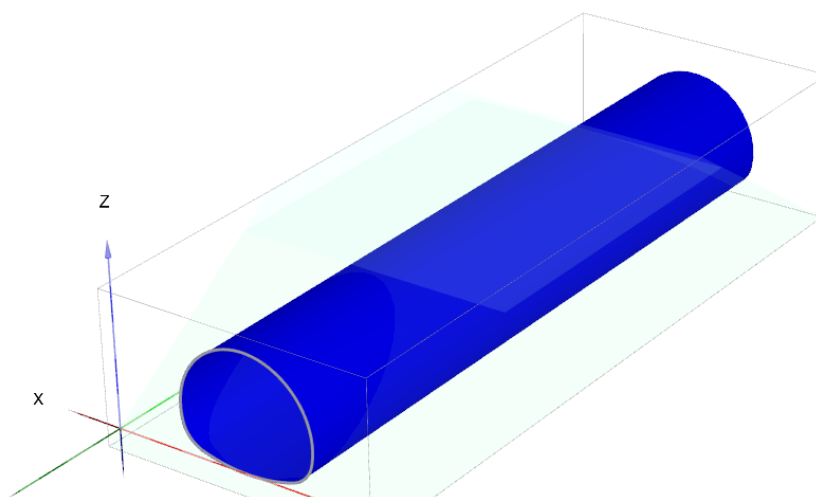
$$G13 = \frac{E1}{2 * (1 + v_{steel})} \quad (3.3.7)$$

Nihkemoodul nõrgemas suunas [4, pp. 22;107-109] :

$$G23 = \frac{E2}{2 * (1 + v_{steel})} \quad (3.3.8)$$

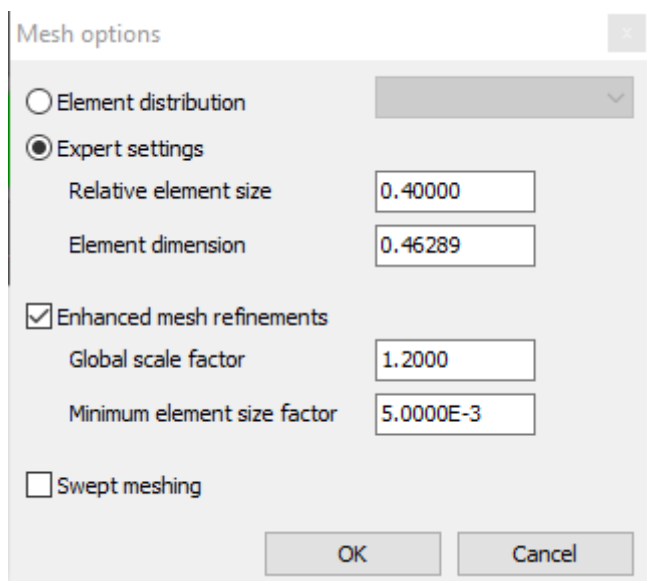
Material set		
Identification	Profil 200x55	
Comments		
Colour	 RGB 0, 0, 255	
Material type	Elastic	
Properties		
d	m	0.066874
γ	kN/m ³	9.5422
Isotropic		<input type="checkbox"/>
E_1	kN/m ²	26.021E6
E_2	kN/m ²	240.85E3
ν_{12}		0.30000
G_{12}	kN/m ²	962.86E3
G_{13}	kN/m ²	10.008E6
G_{23}	kN/m ²	92633
Rayleigh α		0.0000
Rayleigh β		0.0000
Prevent punching		<input type="checkbox"/>

Joonis 3.3.8 Sisestatud plaadi andmed

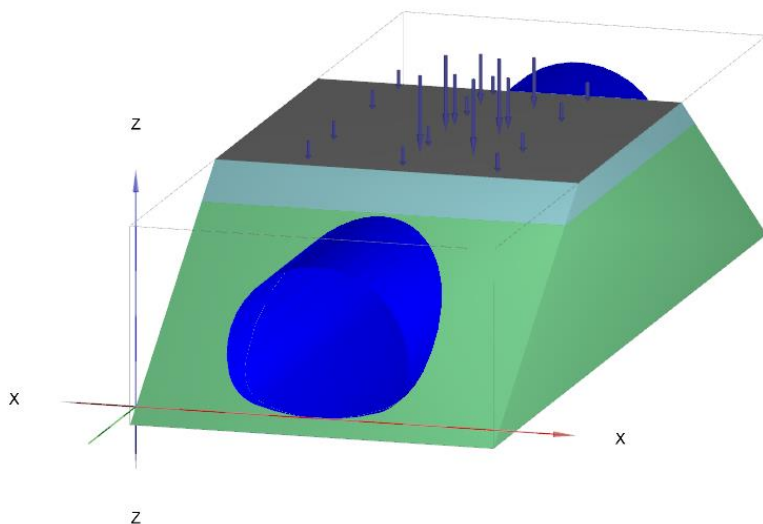


Joonis 3.3.9 Torulepinnale lisatud ekivalentne plaat

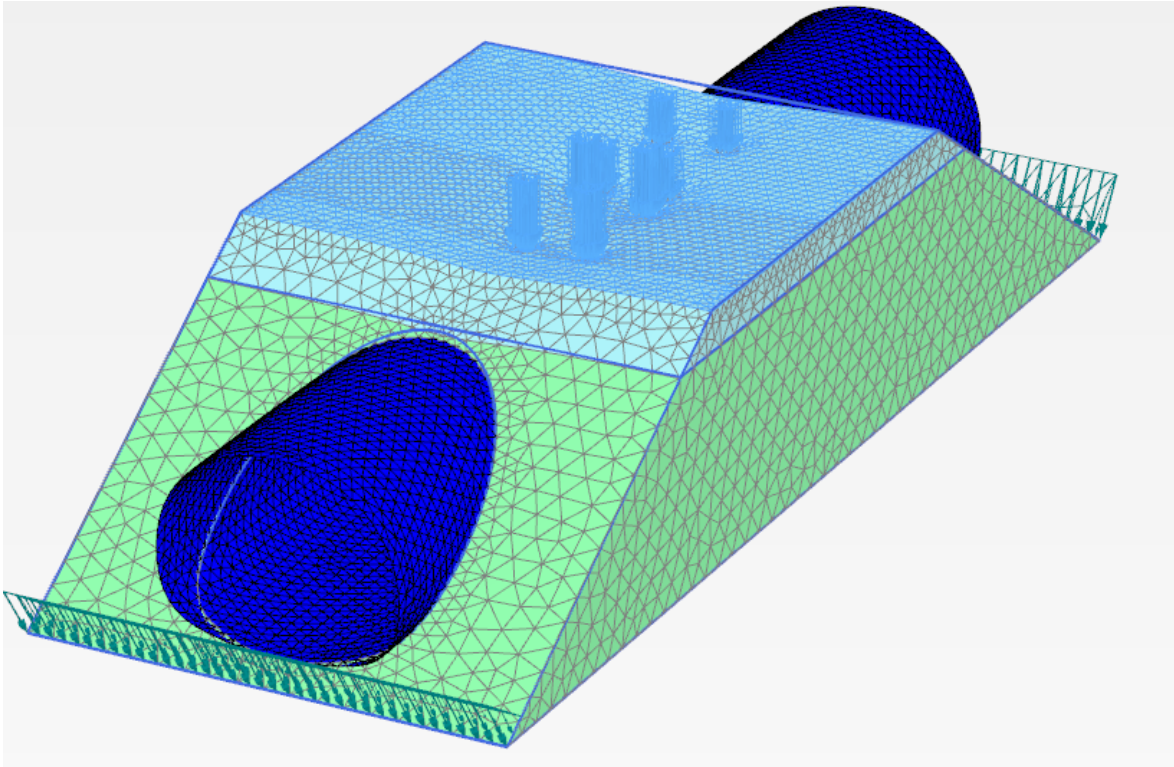
Plaxis 3D lubab vaikumisi viis erinevat mesh võrgustiku suurust ning ekspert valik võimaldab määrata relatiivse elemendi suuruse käsitsi (minimalne 0.4), mille juhul Plaxis 3D automaatselt arvutab välja elemendi dimensioonid.



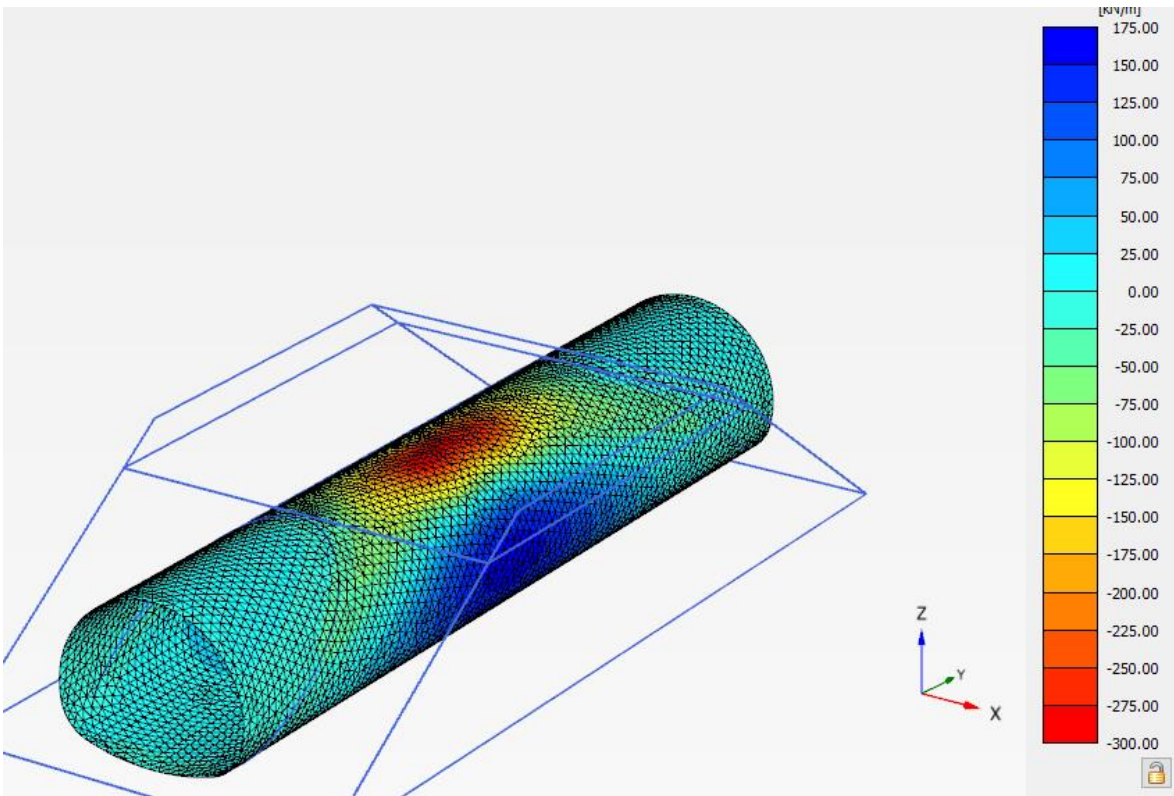
Joonis 3.3.10



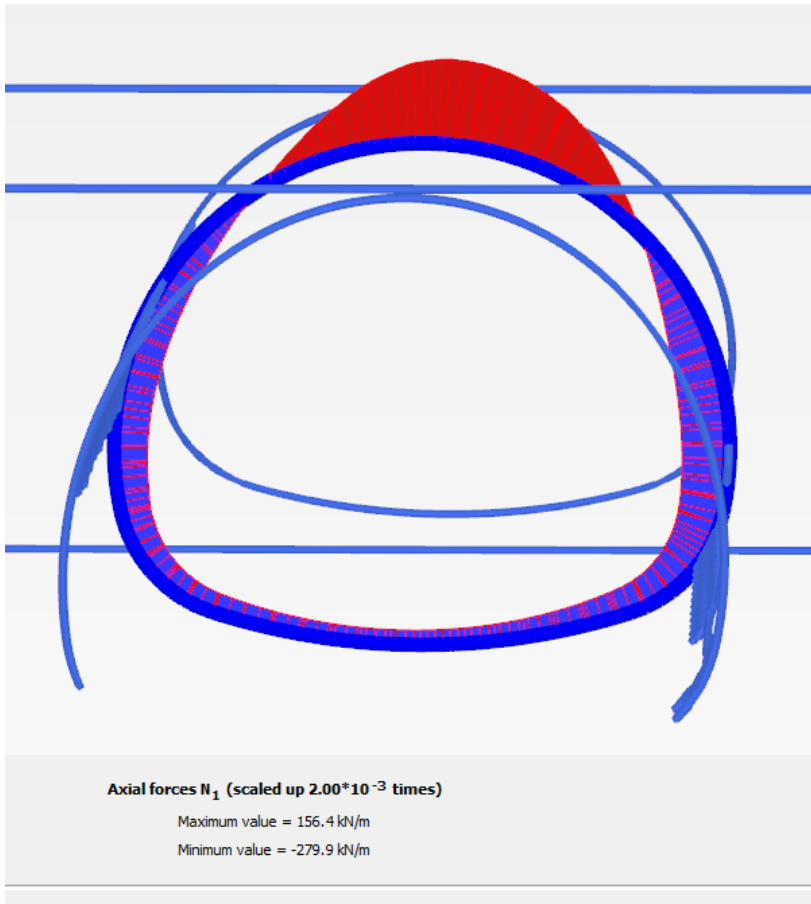
Joonis 3.3.11 Arvutusmudel enne arvutust



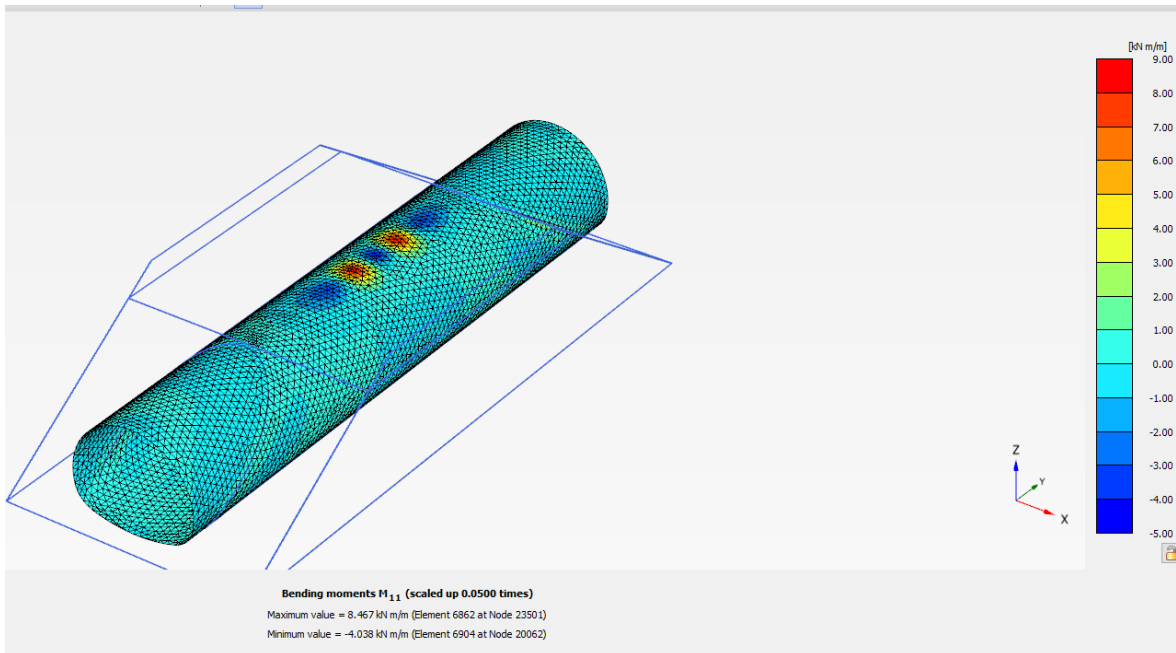
Joonis 3.3.12 Mudel peale arvutust



Joonis 3.3.13 Liikluskoormusest tekkinud normaaljõud



Joonis 3.3.14 Lõige torusilla keskelt



Joonis 3.3.15 KM2 paindemoment

3.4 Analüüs

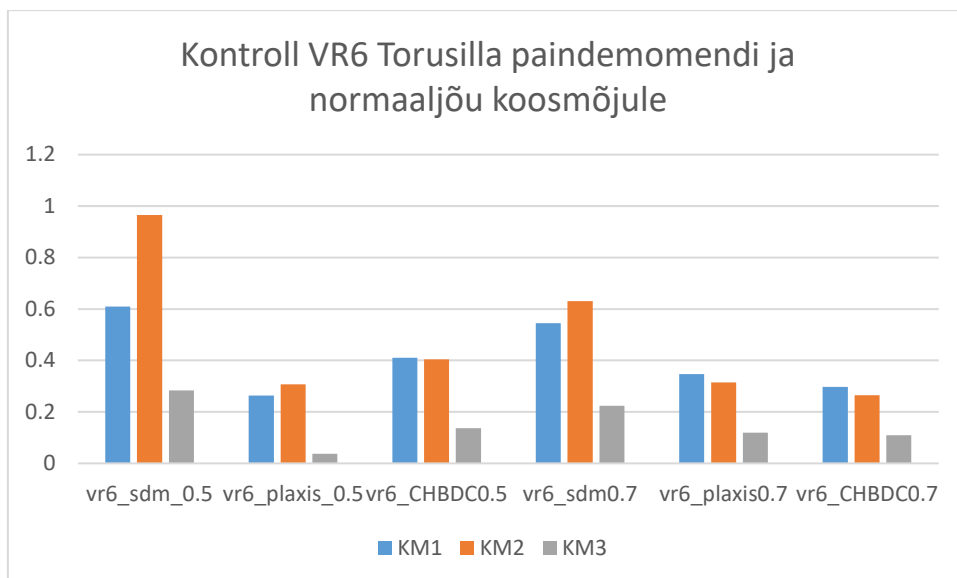
Tabel 3.4.1

VR6 TORUSILLA SISEJÕUD						
SLS	vr6_sdm_0.5	vr6_plaxis_0.5	%	vr6_sdm0.7	vr6_plaxis0.7	%
km1 M_max kNm/m	19.1645	13.39	30.1%	16.5087	8.73	47.1%
km2 M_max kNm/m	30.74	14.16	53.9%	19.2257	8.467	56.0%
km3 M_max kNm/m	8.5871	3.392	60.5%	6.3683	2.297	63.9%
km1 N_max kN/m	201.49	-334.5	-66.0%	231.36	-294.9	-27.5%
km2 N_max kN/m	288.8	-270.8	6.2%	258.48	-223.8	13.4%
km3 N_max kN/m	218.09	-170.9	21.6%	130.15	-159.5	-22.6%

Tabel 3.4.2

VR23 TORUSILLA SISEJÕUD						
SLS	vr23_sdm_0.5	vr23_plaxis_0.5	%	vr23_sdm_1.4	vr23__plaxis_1.4	%
km1 M_max kNm/m	23.312	16.76	28.1%	11.109	4.38	60.6%
km2 M_max kNm/m	30.925	15.61	49.5%	7.4553	3.469	53.5%
km3 M_max kNm/m	8.1739	4.937	39.6%	4.6312	3.893	15.9%
km1 N_max kN/m	303.54	-329.2	-8.5%	433.62	-224.4	48.2%
km2 N_max kN/m	414.87	-245.0	40.9%	377.61	161.5	57.2%
km3 N_max kN/m	237.14	-153.9	35.1%	334.32	223.8	33.1%

Ülalolevates tabeli andmetest on selgub, et SDM käsitsi arvutamisel saadud sisejõudude tulemused on suuremad ehk konservatiivsemad. SDM käsitsi arvutamisel tulemina tekitab VR6 Torusillal korral kõige suuremad sisejõud KM2. VR23 korral pealiskihi paksuse suurenedes 0.5- 1.4 m põhjustab suurimad jõude KM1.

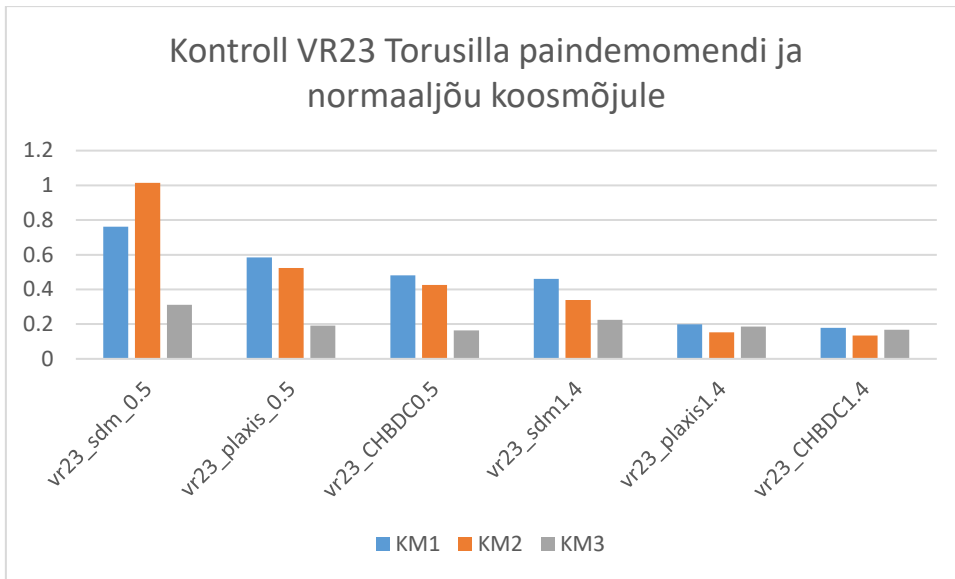


Joonis 3.4.1

Tabel 3.4.3

Pinge kontroll paindemomendi ja normaaljõu koosmõjust						
SLS	vr6_sdm_0.5	vr6_plaxis_0.5	vr6_CHBDC0.5	vr6_sdm0.7	vr6_plaxis0.7	vr6_CHBDC0.7
KM1	0.60917	0.26405	0.411	0.5444	0.34654	0.29759
KM2	0.96542	0.30743	0.40431	0.63027	0.31495	0.26513
KM3	0.28364	0.0376	0.1369	0.22391	0.11902	0.10924

Sellel tabelil on näha, et Plaxisega saadud VR6 torusilla arvutustulemused on madalama pealiskihi korral Rootsi SDM meetodiga arvutatuna väikseimad, kuid pealiskihi kasvades saime väiksemad tulemused Kanada meetodil. Samuti Rootsi meetodil käsitsi arvutades pinged kahanesid pealiskihi paksuse suurendades 0,2 m võrra.



Joonis 3.4.2

Tabel 3.4.4

Kontroll paindemomendi ja normaaljõu koosmõjule						
SLS	vr23_sdm_0.5	vr23_plaxis_0.5	vr23_CHBDC0.5	vr23_sdm1.4	vr23_plaxis1.4	vr23_CHBDC1.4
KM1	0.76086	0.58475	0.48182	0.46082	0.19985	0.17818
KM2	1.0135	0.52368	0.42549	0.3387	0.15277	0.13499
KM3	0.31122	0.1916	0.16343	0.22431	0.18591	0.16757

VR23 torusilla korral käsitsi arvutuse tulemused kõige konservatiivsemad, suurimaid pingeid põhjustab KM2 0.5 m katte korral ja KM1 1.4 m katte korral. Plaxisega arvutatud pinged ühtlustuvad katte paksuse suurenemisel 0.5meetritl 1.4 meetrile.

KOKKUVÕTE

Antud töö eesmärgiks oli võrrelda Rootsi SDM ja Kanada CHBDC meetodit LEM programmiga Plaxis 3D. Lisaks võrreldi Rootsi SDM meetodi käsitsi arvutamisel ja LEM programmiga tulemusi.

Alustuseks valisin kaks erineva läbimõõduga avaga torusilla profiili. Tulemuste ühtlustamiseks kasutasin arvutusmodelites samu pinnaseparameetreid ja terasplaadi paksust tugevusklassiga S355.

Konvulatsioonimatriksiga arvutasin eurokoormustest tekitatud jõud ning nende paiknemise sillal ning arvutasin tandemi rataste koordinaadid, et luua CAD arvutusmodelid, mida hiljem kasutasin koormuste paigutamiseks ja Plaxis 3D arvutusmodelite loomiseks.

Selleks taotlesin PLAXIS 3D programmile eraldi ligipääsu firmalt CAD-süsteemide OÜ(CADSYS), kuna Eestis pole antud programmi kasutamine levinud. PLAXIS 3D programmi õppimine toimus iseseisvalt.

Arvutusmodelites kasutasin minimaalselt vajaliku kattekihi paksust nagu nõutud meetodite juhendites. Kuna nõutud kattekihi paksused olid erinevad, siis arvutasin sisejõud nõutud erineva kattekihi paksusega kahe erinevale torusilla profiilile: Rootsi SDM käsitsi, Rootsi SDM Plaxisega ja Kanada CHBDC Plaxisega.

Tulemused olid järgmised: SDM käsitsi arvutamisel saadud sisejõudude tulemused on suuremad ehk konservatiivsemad. SDM käsitsi arvutamisel tulemina tekitab VR6 Torusillal korral kõige suuremad sisejõud KM2. VR23 korral pealiskihi paksuse suurenedes 0.5- 1.4 m põhjustab suurimad jõude KM1

Plaxisega saadud VR6 arvutustulemused on madalama pealiskihi korral Rootsi SDM meetodiga arvutatuna väikseimad, kuid pealiskihi kasvades saime väiksemad tulemused Kanada meetodil. Samuti Rootsi meetodil käsitsi arvutades pinged kahanesid pealiskihi paksuse suurendades 0,2 m võrra.

VR23 torusilla korral suurimaid pingeid põhjustab KM2 0.5 m katte korral ja KM1 1.4 m katte korral. Plaxisega arvutatud pinged ühtlustuvad katte paksuse suurenemisel 0.5meetritilt 1.4 meetrile.

Plaxis 3D arvutusprogramm nõuab kasutajalt sügavamaid teadmisi programmist ning programmist saadud tulemuste tõlgendamisega tuleb olla ettevaatlik. Antud töö tulemusena ei saa Plaxis 3D programmi eelistada Rootsi SDM käsitsi arvutamise meetodile ilma praktiliste katse tulemusteta.

SUMMARY

The aim of this work was to compare the Swedish SDM and the Canadian CHBDC method with the FEM program Plaxis 3D. In addition, the results of the Swedish SDM method for hand calculation and the FEM program were compared.

To start with, two pipe bridge profiles with different diameters were selected. To harmonize the results, I used the same soil parameters and steel plate thickness with strength class S355 for all calculation models.

A convolution matrix was used to calculate the forces generated by the Euro-loads and their location on the bridge and calculated the coordinates of the tandem wheels to create CAD calculation models, which were later used to place the loads and create 3D calculation models in Plaxis.

For this purpose, a separate access to the PLAXIS 3D program was requested from the company CAD-systems OÜ(CADSYS), as the use of this program is not common in Estonia. The learning of the PLAXIS 3D program was done independently.

In the calculation models, I used the minimum required road cover thickness as required in the methods manuals. Since the required road cover thicknesses were different, I calculated the internal forces with the required different road cover thicknesses for two different pipe-arch bridge profiles using the Swedish SDM manual calculations, the Swedish SDM with Plaxis and the Canadian CHBDC with Plaxis.

The results were as follows: the internal forces obtained from the SDM manual calculation were higher, i.e. more conservative. The SDM manual calculation results in the highest internal forces from KM2 for the VR6 pipe-arch bridge case. For the VR23 case, increasing the top layer thickness from 0.5 to 1.4 m results in the highest forces KM1

The VR6 calculation results obtained with Plaxis are the smallest for a shallower cover when calculated with the Swedish SDM method, but as the cover thickness increases, we obtained smaller results with the Canadian method. Similarly, when calculated manually using the Swedish method, the stresses decreased as the cover thickness was increased by 0.2m.

For the VR23 pipe bridge, the highest stresses are caused by KM2 for 0.5 m cover and KM1 for 1.4 m cover. The stresses calculated with the Plaxis method converge as the cover thickness increases from 0.5 m to 1.4 m.

Plaxis 3D FEM program requires greater understanding of the model behaviour from the user. Results obtained from the program should be used with caution. As a result of this thesis, the PLaxis 3D should not be preferred to Swedish SDM without field test results.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] CSA Group, Canadian Highway Bridge Design Code, 5060 Spectrum Way, Suite 100, Mississauga, Ontario, Canada L4W 5N6: CSA Group, 2014;(Update — July 2017).
- [2] L. P. H. Sundquist, Design of soil steel composite bridges, KTH, SE 100 44 Stockholm: TRITA-BKN. Report 112, 5th, 2014.
- [3] Viacon, „www.viacon.ee,“ March 2015. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.viacon.ee/wp-content/uploads/2014/06/Multiplate_20161114.pdf.
- [4] O. A. & S. Aryannejad, Dynamic analysis of soil-steel composite railway bridges FE-MODELING IN PLAXIS, KTH School of ABE Stockholm: TRITA-BKN. Master Thesis 436, 2014, 2014.