



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Hans Palviainen

Putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalun kehittäminen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.11.2017

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaajat: Heikki Kangas (DI) ja Ville Mikander (DI)

Tekijä Hans Palviainen

Työn nimi Putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalun kehittäminen

Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka

Pää-/sivuaine Pohja- ja kalliorakentaminen

Koodi IA3028

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t) Heikki Kangas (DI) ja Ville Mikander (DI)

Päivämäärä 27.11.2017

Sivumäärä 48 + 20

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tässä työssä kehitettiin putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalu. Tarpeita suunnittelutyökalun kehittämiseksi olivat pääasiassa kustannukselliset syyt, suunnittelun nopeuttaminen, sekä suunnitteluresurssien rajallisuudesta johtuvat, perustustavan muutosten suunnittelusta syntyvien sekä työmaan seisahtumisesta tulevien ongelmien välttäminen.

Varsinainen rakentamistapa jää urakoitsijan valintaan, jos se on mahdollista ja sitä tässä ei ole tarkasteltu. Työselostuksen laatiminen on myös rajattu tästä työstä pois. Rakennustöiden tulisi olla käytännössä toteutettavissa tällä työkalulla tehtyjen suunnitelmien mukaisesti.

Suunnittelutyökalua voidaan käyttää myös suunnittelua sopeuttavana menetelmänä lähtökohtaisesti eikä vain normaalitapauksissa. Suunnittelutyökalusta on yritetty tehdä mahdollisimman helppo ja yksinkertainen käyttää. Työssä on perehdytty myös työturvallisuuteen, joka on tärkeää kapeissa ja syvissä kaivannoissa, joissa työskennellään. Suunnittelutyökalulla ei määritetä tarkkoja työtapoja, vaan toteuttamiselle tulee laatia tarvittaessa työmaakohtaisia lisäohjeita.

Teoriaa on pyritty käyttämään mahdollisimman tyhjentävästi, ydinasioihin on pyritty keskittymään ja työssä yritettiin myös olla johdonmukainen. Työssä hyödynnettiin aikaisempien putkijohtojen paalulaattojen suunnitelmia tulosten tarkistamiseen. Myös Aalto Yliopisto on suurella panoksellaan auttanut työssä.

Suunnittelutyökalu on Excel-pohjainen. Se on tehty kattamaan tyypilliset putkijohtorakenteiden perustapaukset. Suunnittelutyökalu on tehty hyödyntäen jo olemassa olevia laskentoja.

Työn ulkopuolelle rajattiin kuitubetonin mahdollinen käyttö paalulaattojen materiaalina. Kuitubetonin kautta saatavia hyötyjä tulen tarkastelemaan jatkossa.

Avainsanat putkijohto, paalulaatta, suunnittelutyökalu, putkipoikkileikkaukset, kaivanto, turvallisuus

Author Hans Palviainen		
Title of thesis The development of a tool to design pile plates of pipelines		
Degree programme Civil engineering		
Major/minor Geoengineering		Code IA3028
Thesis supervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu		
Thesis advisor(s) Heikki Kangas and Ville Mikander		
Date 27.11.2017	Number of pages 48 + 20	Language Finnish

Abstract

In this work, the design tool for piping pipes was developed. The need to develop a design tool was mainly the cost reasons, the speeding up of planning, and the avoidance of problems arising from the planning of fundamental changes and the problems of landing due to construction land due to the limitations of planning resources.

The actual construction is left to the contractor when it is possible and has not been considered here. Creating a report is also excluded from this work. Construction work should be practically feasible in accordance with plans made with this tool.

The design tool can also be used as a design-adaptive method in principle, and not just in normal cases. The design tool has been tried to make it as easy and simple to use. Work has also been studied in the field of occupational safety, which is important in narrow and deep wells where work. The design tool does not specify the exact working methods, but requires additional guidelines for the site to be implemented.

The aim is to use the theory as exhaustively as possible, to focus on the core issues and to try to be coherent in the work. The work on the use of the pipes of previous pipelines was used to check the results. Aalto University has also contributed greatly to the work.

The design tool is Excel-based. It is designed to cover the basic cases of typical pipeline structures. The design tool is made using existing calculations.

Outside the work, the possible use of fiber ethanol was used as a material for pallet tiles. The benefits of fiber implant can be explored in the future.

Keywords pipeline, pile plate, design tool, pipe cross-sections, trench, security

Alkusanat

Työn aiheeseen päädyttiin Vantaan kaupungin kadun rakennuttamisen puolelta, kun Vantaalla on havaittu tarvetta saada nopeasti putkijohtojen paalulaattojen suunnitelmat.

Työn ohjaajina toimivat Vantaan kaupungilta geotekniikkapäällikkö Heikki Kangas (DI) ja suunnitteluinsinööri Ville Mikander (DI). Valvojana toimi Aalto yliopiston professori Leena Korkiala-Tanttu. Työn tukemiseen osallistuivat myös Vantaan kaupungin kadunsuunnittelunpäällikkö Olli Lappalainen (DI) ja suunnitteluinsinööri Antti Auvinen (DI). Vantaan kaupunki on auttanut tärkeimmän teorian hankkimisessa.

Lopuksi haluan kiittää kaikkia työhön vaikuttaneita Aalto Yliopiston henkilökuntaa, opilaita, opettajia ja erityisesti Vantaan kaupungin kadun- ja vedensuunnittelunosastoa ja geotekniikan osastoa, työn rahoituksesta saan kiittää Vantaan kaupunkia sekä erityiskiitokset myös vanhemmilleni ja läheisilleni.

Espoo 27.11.2017

Hans Palviainen

Hans Palviainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä
Abstract
Alkusanat

Sisällys

Sisällysluettelo	5
Lyhenteet	10
1 Johdanto	11
2 Tyypillaattaratkaisut	12
2.1 Suunnittelu geoteknisessä luokassa GL2	12
2.2 Kaivannon suunnittelu ja perustamistavan valinta	13
Tyypillaatan suunnittelu	14
2.3 Mitoitusohjelma ja suunnittelun lähtökohdat	15
3 Yleinen geotekninen mitoitus	16
3.1 Suunnittelun perusteet	16
3.1.1 Suunnitteluvaatimukset	16
3.1.2 Mitoitustilanteet	16
3.1.3 Säilyvyys	17
3.1.4 Laskelmiin perustuva geotekninen mitoitus	18
3.1.5 Kuormat	18
3.1.6 Geotekniset tiedot	19
3.1.7 Geotekniset tutkimukset	19
3.2 Pystysuuntaiset kuormat	20
3.2.1 Pysyvät kuormat	20
3.2.2 Liikennekuorma	20
3.3 Vaakasuuntaiset kuormat	21
3.4 Kaivannon mitoitustarkastelu	22
3.5 Paalulaatan rakennetekninen mitoitus	23
3.5.1 Yleistä	23
3.5.2 Paalulaatan rakenteellinen mitoitus Liikenneviraston mukaan	23
3.5.3 Läpileikkautuminen	24
3.5.4 Taivutus	24
3.5.5 Halkeilu	25
3.5.6 Säilyvyys	25
3.6 Paaluperustukset	25
3.6.1 Rajatilat	25
3.6.2 Maapohjan siirtymistä aiheuttavat kuormitukset	26
3.6.3 Mitoitusmenetelmät ja -tarkastelut	26
4 Tyyppirakenne	28
4.1 Tyyppirakenneratkaisut	28
4.2 Mitoitusperusteet	32
4.2.1 Tyyppirakenteet	32
4.2.2 Luokitukset	32
4.3 Lähtötiedot	32
Kuvaus suunniteltavasta rakenteesta	33

4.4	Mitoituksen oletukset	33
	Mitoituksessa on käytetty seuraavia normeja ja ohjeita:	33
	Ohjelmistot.....	34
	Päärakennusaineiden materiaaliominaisuudet	34
	Betonin laskentalujuudet.....	34
	Betoniteräket	34
	Paalut	34
	Kuormat	35
4.5	Työn sisältö ja toiminta	35
	Rakennemallit	35
	Pysyvät kuormat	36
	Liikennekuorma	36
	Kuormien yhdistely.....	36
	Määräavimmät voimasuureet ja siirtymät.....	36
4.6	Rakenneosien mitoituksen tiivistelmä.....	37
5	Esimerkkilaskelmat.....	38
5.1	Yläpinnan momentti poikkisuuntaan	38
5.2	Yläpinnan momentti pituussuuntaan.....	40
5.3	Alapinnan momentti poikkisuuntaan	40
5.4	Alapinnan momentti pituussuuntaan esimerkkilaskelma.....	40
5.5	Lävistys	41
5.6	Työkalun arviointi.....	43
6	Johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset	44
	Lähdeluettelo	45
	Liiteluettelo.....	48

Liitteet

Merkinnot

A	[kN]	onnettomuuskuorma
A	[m]	viivakuorman tai keskitetyn kuormituksen vaakasuuntainen etäisyys tukiseinästä
A	[m ²]	poikkileikkauksen pinta-ala
A'	[m ²]	tehokas pohjan ala
A _d	[kN]	onnettomuuskuorman mitoitusarvo
A _p	[mm ²]	paalun pohjan ala
B	[mm]	perustuksen leveys
B	[m]	viivakuorman tai keskitetyn kuorman leveys
B	[cm]	kaivannon leveys
B'	[mm]	perustuksen tehokas leveys
D	[cm]	kaivutason ja tukiseinän alapään välinen etäisyys
E _d	[kN]	kuormien vaikutusten mitoitusarvo
E _{dst;d}	[kN]	kaatavien kuormien vaikutusten mitoitusarvo
E _{stb;d}	[kN]	vakauttavien kuormien vaikutusten mitoitusarvo
E	[MN/m ²]	suljetun tilan kimmomoduuli
F	[kN]	kuorma/kuormitus
F	[kN]	kokonaisvarmuusluku
F _{c;d}	[kN]	paaluun tai paaluryhmään kohdistuvan aksiaalisen puristuskuorman mitoitusarvo
F _d	[kN]	kuorman mitoitusarvo
F _k	[kN]	kuorman ominaisarvo
F _{rep}	[kN]	kuorman edustava arvo
G	[kN]	pysyvä kuorma
G _k	[kN]	pysyvän kuorman ominaisarvo
G _{k;j}	[kN]	pysyvän kuorman j ominaisarvo
G _{dst;d}	[kN]	kaatavien pysyvien kuormien mitoitusarvo nosteelle mitoitettaessa
G _{stb;d}	[kN]	vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo nosteelle mitoitettaessa
G' _{stb;d}	[kN]	vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo maan hydraulista nousua vastaan mitoitettaessa (paino vedessä)
H	[N]	vaakasuora kuorma tai kokonaiskuorman komponentti, joka vaikuttaa perustustason suunnassa
H	[m]	korkeus
H _a	[m]	seinän osan korkeus, johon aktiivinen maanpaine kohdistuu
H _w	[m]	tukiseinän taustalla olevan pohjaveden etäisyys tukiseinän alapäähän (h + D)
K	[-]	sysäysluku, jolla ilmaistaan dynaamisesta kuormituksesta aiheutuva lisä staattiseen kuormitukseen
K ₀	[kN/m ²]	maan lepopaine kerroin
K _{0;β}	[kN/m ²]	maan lepopaine kerroin, kun tuettu maanpinta on kaltevuuskulmassa β vaakatasoon nähden
K _a	[kN/m ²]	maanpaine kerroin aktiiviselle puolelle
L	[cm]	perustuksen pituus
L	[m]	viivakuorman tai keskitetyn kuorman pituus

L'	[cm]	tehokas perustuksen pituus
K_{FI}	[-]	kuormakerroin
M_d	[Nm]	momentin mitoitusarvo
M_{rd}	[Nm]	taivutuskestävyyden mitoitusarvo
M_{sd}	[Nm]	mitoitettava momentti
N	[-]	kantavuuskertoimet, alaindeksit c , q ja γ
N_d	[kN]	mitoituskuorma tukiseinän kärjen tasolla
P	[kN]	esijännitysvoiman kyseeseen tuleva edustava arvo
P_{AHd}	[kN/m ²]	aktiivisen maanpaineen vaakakomponentin mitoitusarvo
P_p	[kN/m ²]	täysin mobilisoitunut passiivipaine
P_{pmob}	[kN/m ²]	mobilisoitunut passiivipaine
P_{st}	[kN]	staattinen pyörä- tai akselipaino
Q	[kN]	muuttuva kuorma
Q_d	[kN]	muuttuvan kuorman mitoitusarvo
$Q_{dst;d}$	[kN]	kaatavien muuttuvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo nosteelle mitoitettaessa
Q_k	[kN]	yksittäisen muuttuvan kuorman ominaisarvo
$Q_{k;1}$	[kN]	määräävän muuttuvan kuorman 1 ominaisarvo
$Q_{k;i}$	[kN]	muun samanaikaisen muuttuvan kuorman i ominaisarvo
R_c	[kN]	paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilassa
$R_{c;m}$	[kN]	R_c :n mitattu arvo yhden tai usean paalun koekuormituksessa
R_d	[kN]	(paalun geoteknisen puristus-)kestävyyden mitoitusarvo
R_{tr}	[kN]	paalun geotekninen kestävyys poikittaisille kuormille
$S_{dst;d}$	[kN]	kaatavan suotovirtausvoiman mitoitusarvo maassa
T	[kN]	tukivoima
V	[kN]	pystysuora kuorma tai se kokonaiskuorman komponentti, joka vaikuttaa kohtisuoraan perustuksen pohjaa vastaan
V	[m ³]	kappaleen tilavuus
X_d	[-]	materiaaliominaisuuden mitoitusarvo
W	[m ³]	taivutusvastus
W_h	[kN]	järkäleen liikkuvan osan paino
c	[kPa]	koheesio
c'	[kPa]	tehokas koheesio
c_u	[kN/m ²]	suljettu leikkauslujuus
$c_{u;d}$	[kN/m ²]	suljetun leikkauslujuuden mitoitusarvo
d	[m]	perustamissyvyys
f_{yd}	[kN/mm ²]	teräksen lujuuden mitoitusarvo
$f_{yk0;1}$	[kN/mm ²]	teräksen myötöraja
h	[m]	seinän korkeus
h	[m]	vedenkorkeus hydraulista nousua tarkasteltaessa
h_k	[m]	syvyys, jossa tiivistyksen aiheuttama maanpaine on yhtä suuri kuin aktiivinen maanpaine tai lepopaine
h_w	[m]	hydrostaattisen vedenpaineen korkeus
i	[-]	kuorman kaltevuuskerroin, alaindeksit koheesio c , pinta-kuorma q ja tilavuuspaino γ
i_a	[-]	hydraulinen gradientti
k	[m/a]	maanpohjan vedenläpäisevyyskerroin
l	[m]	tukipisteiden välinen etäisyys palkkien mitoituksessa
m	[-]	eksponentti kaltevuuskertoimen i kaavassa

m	[-]	moduuliluku
n	[kpl]	esimerkiksi paalujen ja koeprofiilien lukumäärä
p_a	[kN/m ²]	aktiivinen maanpaine
p_α	[kN/m ²]	kaltevan seinän lepopaine
p_0	[kN/m ²]	pystysuoran seinän lepopaine
q	[kPa]	tasainen pintakuorma
q	[N/m]	viivakuorma
q	[kPa]	yläpuolisten maakerrosten tai lisäkuormien paine perustuksen pohjan tasolla
$q_{b;k}$	[kN/m ²]	(paalun) pohjapaineen ominaisarvo pintayksikköä kohden
q_u	[kN/m ²]	yksiaksiaalinen puristuslujuus
q'	[kPa]	yläpuolisten maakerrosten aiheuttama tehokas mitoituspaine perustuksen pohjan tasolla
r	[m]	pohjaveden alennuksen vaikutussäde
s	[mm]	painuma
s	[mm]	suunniteltu pohjaveden alennuksen korkeus
s_0	[mm]	välitön painuma
s_0	[mm]	paalun kokonaispainuma
s_1	[mm]	konsolidaatiopainuma
s_2	[mm]	viruman aiheuttama painuma (sekundäärinen painuma)
s	[-]	perustuksen pohjan muotokertoimet, alaindeksit c q ja γ
s_u	[kN/m ²]	suljettu leikkauslujuus
u	[mm]	rakenteen tai rakenneosan vaakasiirtymä
u	[kPa]	huokosvedenpaine
w	[mm]	taipuma
w	[%]	vesipitoisuus
z	[m]	pystysuora etäisyys
α	[°]	perustuksen pohjan kaltevuus vaakatasoon nähden
α	[-]	adheesiokerroin
β	[°]	maanpinnan kaltevuus
β	[-]	jännitysekspONENTTI
γ	[kN/m ³]	tilavuuspaino
γ_b	[-]	paalun kärkikestävyyyden osavarmuusluku
γ_f	[-]	kuormien osavarmuusluku
γ_m	[-]	maaparametrin (materiaaliominaisuuden) osavarmuusluku
$\gamma_{R,v}$	[-]	kantokestävyyyden osavarmuusluku
γ_s	[-]	paalun vaippakestävyyyden osavarmuusluku
γ_t	[-]	paalun kokonaiskestävyyden osavarmuusluku
δ	[°]	rakenteen ja maan välinen kitkakulma
δ_0	[mm]	paalun alkutaipuma
ρ	[%]	suhteellinen teräsmäärä betonissa
θ	[°]	H:n suuntakulma
ξ	[-]	koestettujen paalujen lukumäärästä riippuva korrelaatiokerroin
ψ_0	[-]	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (mm. ominaisyhdistelmässä)
ψ_1	[-]	muuttuvan kuorman tavallisen arvon yhdistelykerroin
ψ_2	[-]	muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin
$\sigma_{stb;d}$	[kN/m ²]	vakauttavan pystysuoran kokonaisjännityksen mitoitusarvo
ϕ'	[°]	leikkauskestävyysskulma tehokkaiden jännitysten perusteella

Lyhenteet

HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä
InfraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
LV	Liikennevirasto
NA-SFS-EN	Eurokoodin kansallinen liite
NCCI	Eurokoodin soveltamisohje
OCR	ylikonsolidoitumisaste
PO	Paalutusohje
PRO 2004	Pohjarakennusohjeet 2004
RATU	Rakentamisturvallisuus
RakMK	Rakentamismääräyskokoelma
RHK	Ratahallintokeskus
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto
TL	Tieliikennelaitos
by	Suomen Betoniyhdistys
- GL1, GL2, GL3	geotekninen luokka
- CC1, CC2, CC3	seuraamusluokka
- RC1, RC2, RC3	luotettavuusluokka

1 Johdanto

Paalulaattoja käytetään HSY:n putkikaivannoissa laajasti pk-seudulla, tyypillisesti katujen alla ja erillisten runkolinjojen perustamistapana. Laatan suunnittelu on osoittautunut konsulttityönä hitaaksi toteuttaa, muutossuunnitelmia ei saada työmaille tarvittavalla aikataululla, josta seuraa taloudellisia tappioita.

Työn tavoitteena oli kehittää putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalu. Työkalua voidaan hyödyntää kohteissa, jossa joudutaan vaihtamaan perustamistapaa, nopeuttamaan suunnittelua ja rakentamista tai tilanteessa, jossa työ uhkaa viivästyä vähäisten suunnitteluresursien takia.

Suunnittelutyökaluun ei sisällytetty erittäin vaativia kohteita, koska niihin tarvitaan yksityiskohtaisempaa suunnittelua. Suunnittelussa momenttien ja normaalivoimien määrittämiseen käytettiin LUSAS –laskentaohjelmistoa. Itse suunnittelutyökalu on Excel-pohjainen. Teräspaalujen mitoitusohjelmaksi on SSAB:n RRPileCalc-ohjelma. AutoCAD:ä on käytetty piirustusohjelmaksi.

Vaikka suunnittelutyökalu on kehitetty ensisijaisesti työmaavaiheessa tarvittavaan nopeaan muutossuunnitteluun, sitä voidaan käyttää myös tavanomaisten tyyppirakenteiden rakennesuunnitteluun. Työ on toteutettu Eurokoodien mukaisesti. Päätietolähteinä olivat RIL:n eurokoodiohjeet ja Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset.

Työn sisältö on suunnittelutyökalulla laadittu piirustussarja, jossa on esitetty: yleisimmät kaivantopoikkileikkaustyyppit ja putkijohdot, kuormien mukaan portaittain muuttuva teräsbetonilaatan paksuus ja/tai rauditus sekä poikkileikkaus. Piirustuksissa on esitetty myös paalutyypivaihtoehdot; teräsputki 140 - 220 mm ja teräsbetoni 300 x 300 mm sekä mahdollisesti paaluhattu 250 x 250 mm - 400 x 400 mm x 30 - 50 mm sekä putkijohtovaihtoehdot ja niiden sijoittuminen kaivannossa.

Suunnitteluohjeeksi on tavoitteena laatia putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalu selostuksineen. Edellytykset minkä puitteissa suunnittelutyökalua voidaan hyödyntää ovat: soveltuva maaperä, ei liian löyhää savea (nurjahdusmitoitus) tai aggressiivisiä kemikaaleja (korroosiovara). Ensisijaisesti tulee vesijohdot ja viemärit suunnitella siten, että niiden asennussyvyys on niin suuri, ettei lämmöneristystä tarvita (Lappalainen 2016).

2 Tyypilaattaratkaisut

2.1 Suunnittelu geoteknisessä luokassa GL2

Geoteknisessä luokassa 1 riski kokonaisvakavuuden tai maapohjan liikkeiden suhteen on merkityksetön ja siinä käytetään rutiinimenetelmiä suunnitteluun, joka puolestaan pohjautuu kvalitatiivisiin geoteknisiin tutkimuksiin. Geoteknisessä luokassa 2 suunnittelu pohjautuu kvantitatiivisiin geoteknisiin lähtötietoihin ja analyysiin. Kaivannon vaativuusluokitus GL1 on tavanomainen ja GL2 on vaativa. Työ käsittää luokan GL2. Suunnittelutehtävän vaatimusluokka on vaativa (RIL 263-2014 s.16).

Rajatila GEO/STR on usein kriittinen perustuksissa ja tukirakenteissa olevien rakenteellisten osien mittojen määrittämisessä ja joskus rakenteellisten osien lujuudessa. (RIL 207 s.46). Kuormituksen oletetaan yleensä olevan liikennekuorma LM1/LM3 sekä maan paino (putkien vähentävää vaikutusta ei huomioida). Poikkileikkaus vaihtoehtoina huomioidaan tonttikatu, kokoojakatu, pääkatu. Putkistoihin kuuluvat hulevesiviemärit, vesijohtot ja jätevesiviemärit. Maakaasuputket ja 600 mm runkovesiputket sekä edellä mainitsemattomat johdot eivät kuulu työn sisältöön.

Suunnitteluun vaikuttavia seikkoja:

- paalutuksen ja laatan suunnanmuutokset, paaluväli
- laatan paksuus ja leveys
- betonin lujuusluokat (C30/37-2), betonityyppi (sulfaatinkestävä tai rapid-sementti), tarkastukset
- terästyypit (A500HW), teräksen vetolujuus, teräksen mitat
- työtapaselostukset, vaatimukset
- rasitusluokka (Ro31, R2, XC2, XD1)
- paaluhatut esim. 300 x 300 x 30
- tyyppiirustukset joihin mitat AutoCAD:llä
- heijarikairauspisteiden väli n. 20 m (puristinheijarikairaus, kun maaperä kalliainen ja polveileva) ja lisäksi tarvittavat siipikairaukset
- routimissyvyys määritettävä
- alustaluvun määrittäminen
- painumien määrittäminen (2. ja 3. vaihe tärkeimmät)
- vaadittavat taivutusvastukset ponteille
- imukaivojen ja salaojien käyttö

Putki- ja johtokaivannot ovat työn aikana tuettuja kaivantoja, joiden on tarkoitus toimia tarkoituksenmukaisina ja oikean syvyyssinä putkijohtorakenteiden sijoituspaikkoina. (Infra Ryl s.58)

2.2 Kaivannon suunnittelu ja perustamistavan valinta

Pohjaolosuhteiden, ympäristön ja kaivantorakenteiden vaativuus voivat vaihdella oleellisesti putkilinjojen eri osissa. Tällöin putkilinja on syytä jakaa pohjaolosuhteiltaan ja vaativuudeltaan homogeenisiin osuuksiin maastokatselmusten, maaperäkartojen ja ympäristön pohjatutkimusten perusteella. Pohjatutkimusohjelma voidaan tällöin suunnitella vastaavasti osuuksittain. Tutkimuspisteet sijoitetaan yleensä putkikaivannon keskijalalle. Tutkimuspisteiden tarpeellisuus kaivannon sivualueilla tulee harkita erikseen. Esimerkiksi sivukaltevassa maastossa tutkimusalueen tulee kattaa kaivannon kokonaisvakavuuden kannalta merkityksellinen alue. Putkikaivannon pohjatutkimusohjelmasuositus on olemassa julkaisussa (RIL 263-2014 s.27).

Kaikki kaivannot tulee suunnitella ja rakentaa kunnolla esimerkiksi kuten kuvassa 1. Tämä on välttämätöntä jo pelkästään työturvallisuuden vuoksi. Kaivannon suunnittelu ja rakentaminen ovat aina geoteknistä osaamista ja insinööritaitoa vaativia tehtäviä. Vaativakin kaivantoprojekti voidaan oikein toimintatavoin toteuttaa hallitusti, tehokkaasti ja turvallisesti (RIL 263-2014 s.3).

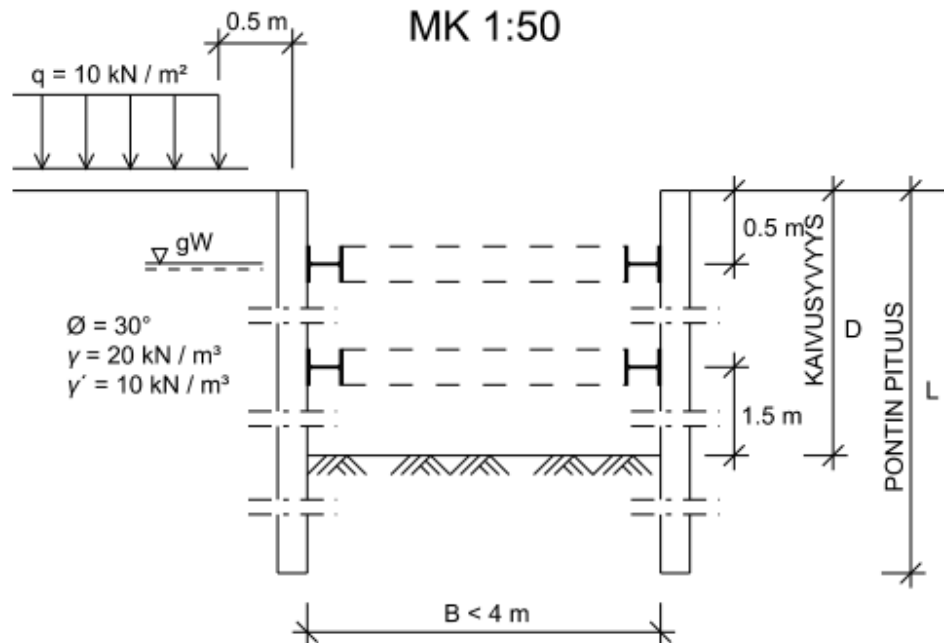
Ohjeena on että, mikäli erillistä kaivantosuunnitelmaa ei ole esitetty, noudatetaan kaivannon teossa työsuojeluhallituksen ohjetta ”kapeat kaivannot”. Kaivumaat on sijoitettava siten, etteivät ne aiheuta kaivannon seinämänsortumista eivätkä putoa kaivantoon tai vaaranna työturvallisuutta. Ne eivät myöskään saa estää putkiasennuksissa tarvittavien työkonien pääsyä kaivannon vierelle. Kaivutyössä on otettava huomioon sortumavaaraa aiheuttavat tekijät kuten: sade, kuivuminen, löyhä maaperä, pohjaveden korkeus tai kaivannon lähellä tärinää aiheuttavat työt. Kaivanto on pidettävä niin kuivana, että kaivannossa tehtävät työt voidaan asianmukaisesti suorittaa ja materiaalit tiivistää vaadittavaan tiiviyteen. Maa-aineksia sisältävää vettä ei työn aikana saa johtaa jo rakennettuihin putkistöihin. Tarvittavan pumppauksen kaivannosta järjestää kaivannon tekijä. Pohjaveden alennusta ei tarvita, kun kaivannon maapohja on riittävän paksulta vesitiivistä, homogeenista maalajia, jolloin pohjavesi ei pääse suotautumaan kaivantopohjalle ja kun mittauslaskelmin todetaan, että kaivannossa ei ole hydraulisen murtuman riskiä. Kysymykseen tulevia maalajeja ovat savi ja hyvin tiivis moreeni. (RIL-263-2014 Kaivanto-ohje s.70.)

Kaivannon mitoituksessa on otettava huomioon kaikki kaivantoon ja tukiseiniin vaikuttavat kuormitukset, joita ovat esim. maanpaine, vedenpaine, maanpinnalla tai kaivannossa olevat pintakuormat, tärinäkuormat, törmäyskuormat ja jäätyriskuormat. Kaivu –ja tuentavaiheessa voidaan kaivannon pintakuormaa rajoittaa mahdollisuuksien mukaan. Kaivutason alapuolella oleva tukiseinää tukevaa kuormaa kutsutaan passiivipaineeksi. Passiivipaine vaatii muodostuakseen tukiseinän siirtymän. (RIL 263-2014 s.79).

Kaivannon pohja ei saa missään työvaiheessa hydraulisesti murtua. Mitoituksessa on tarkasteltava:

- nosteen aiheuttama murtuma
- hydraulisen nousun aiheuttama murtuma
- sisäisen eroosion aiheuttama murtuma
- sisäisen putkieroosion aiheuttama murtuma (RIL 263-2014 s.119.)

KAHDELTA TASOLTA TUETTU KAIVANTO



Ponttipituus	Kaivussyvyys	Alempi tukitaso	
		Vaakapalkki	Poikkituki
L = 8 m	D = 5.5 m	HE 300 B	HE 240 B k 3 m
L = 12 m	D = 6.5 m	HE 300 B	HE 240 B k 3 m

Ylempi tukitaso vastaava kuin yhdeltä tasolta tuetussa kaivannossa.

Esitetyillä kaivussyvyyksillä hydraulisen murtuman vaara todennäköinen.

Pohjaveden alennuksen tarve selvítettävä.

Kuva 1. Tyypikkokuva suunnitellusta kaivannosta veden kyllästävässä löyhässä kittkamaassa. (Espoon kaupunki 2014).

Tyypillaatan suunnittelu

Tyypillaatta tukee kohdekohtaista suunnittelua, mutta ei toimi ilman kohdekohtaisia määrittäjiä, joita ovat: asemapiirustus, paaluluettelo, tarvittavat lähtötiedot, piirustusluettelo, piirustusmerkintöjen selostus, laadunvarmistukseen liittyvät asiakirjat, neliöhinnat eri laattavaihtoehdoille ja ratkaisuille sekä työaikakustannukset, työkustannukset että materiaalikustannukset. Tyypillaatta voi toimia yhtenä tuetun kaivannon tukitasona, jos se vain on tarkoituksenmukaista ja mahdollista aikataulullisesti. Alustavissa töissä maalajien routivuutta voidaan likimäärin arvioida rakeisuuskäyrän perusteella. Luotettavammin maakerroksen routivuutta voidaan arvioida laboratoriossa tehtävillä kapillaarisuus- ja routanousukokeilla sekä maastossa tehtävillä routanousuhavainnoilla (RIL 207-2009, s. 58.)

2.3 Mitoitusohjelma ja suunnittelun lähtökohdat

Mitoitusohjelmana oli FEM-laskentaohjelma, jolla voidaan suunnitella esim. siltoja, joten sillä pystyi hyvin suunnittelemaan paalulaattoja. LUSAS-ohjelmalla saatuja tuloksia verrattiin aikaisemmin toteutuneisiin suunnitelmiin. Samoin Excelillä saatuja arvoja verrataan aikaisemmin oikeiksi todettuihin tuloksiin. Suoritetaan virhearvioinnit ja todetaan virheiden lähteet. Vertailun tuloksista voidaan saada johtopäätöksiä lasketuista ja määritetyistä arvoista, eli toimiiko kehitetty suunnittelutyökalu suunnittelukäytössä.

Paalulaatan suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta, samoin kaikkien muiden suunniteltujen rakenteiden. Paalujen maksimipituus on tapauskohtainen. Putkien painoa ja vesimäärää ei erikseen huomioida laskelmissa, koska niiden merkitys on niin vähäinen laatan päällä olevaan maan painoon verrattuna koko laatalle tulevasta kuormasta. Putken kohdilla on käytetty tilavuuspainoa n. 20 kN/m^3 (sisältää putkessa olevan maksimivesimäärän, sekä putken painon). Asennussyvyyksille on käytetty tiettyä määriteltyä vaihteluväliä. Päällä olevan katurakenteen rakennekerrokset ml. kantava kerros paksuudet ja materiaalipainot määritetään.

Teräsbetonipaaluja käytettäessä on otettava huomioon betonin ja terästen vahingoittumisriski, jonka aiheuttaa esim. syövyttävä maa tai vesi. Sulfaattisuolat ja hapot ovat haitallisia betonille ja altistuminen kemialliselle syöpymiselle teräkselle, tätä ei ole huomioitu mitoituksessa, eikä Vantaalla ole todettu esim. hankalia sulfaattisavia. Siksi maaperätutkimus-tarve määritellään myös näiden haitallisten kemikaalien osalta. Seuraamusluokkina ovat lähinnä CC2 ja luotettavuusluokka on RC2.

Laatan painon kantava eikä valualustan painuma saa betonin sitoutumisaikana ylittää 5 mm (Infra Ryl). Paalun kapasiteetti on yleensä mitoittava. Kaivantoturvallisuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Suunniteltavan laatan leveyden määrittää kaivannossa olevat putket ja niiden sijainti.

3 Yleinen geotekninen mitoitus

3.1 Suunnittelun perusteet

3.1.1 Suunnitteluvaatimukset

Jokaisessa geoteknisessä mitoitusilanteessa tulee osoittaa, ettei mitään kyseeseen tulevaa EN 1990:2002:ssa määriteltyä rajatilaa ylitetä.

Seuraavat tekijät otetaan huomioon määrittäessä mitoitusilanteita ja rajatiloja (RIL 207-2009):

- alueen olosuhteet, jotka vaikuttavat kokonaisvakavuuteen ja maapohjan liikkeisiin
- rakenteen ja sen osien koko ja luonne mukaan lukien mahdolliset erityisvaatimukset kuten suunniteltu käyttöikä
- ympäristön asettamat ehdot (esimerkiksi: lähellä olevat rakenteet, liikenne, kunnallistekniset järjestelmät, kasvillisuus, vaaralliset kemikaalit jne.)
- pohjaolosuhteet
- pohjavesiolosuhteet
- alueellinen seismisyys
- ympäristön vaikutukset (hydrologia, pintavesi, maan painuminen, kosteuden ja lämpötilan vuodenaikaisvaihtelut).

Rajatilat voivat esiintyä joko maapohjassa tai rakenteessa tai yhdistettynä murtumana rakenteessa ja maapohjassa. Rajatilat tarkistetaan geoteknisillä laskelmilla. Suunnittelutulos tarkistetaan vertailukelpoisen kokemuksen perusteella, mikäli se on mahdollista. Määrittäessä vähimmäisvaatimuksia geoteknisten tutkimusten, laskelmien ja rakenteiden valvontatarkastusten laajuudelle ja sisällölle on tunnistettava kunkin geoteknisen suunnittelukohteen vaativuus ja siihen liittyvät riskit. (RIL 207-2009.)

Geotekniseen luokkaan 2 kuuluvat tavanomaiset rakenne- ja perustustyyppit, joihin ei liity tavanomaisesta poikkeavia riskejä tai epätavallisen tai erikoisen vaikeita pohja- tai kuormitusolosuhteita. Suunniteltaessa rakenteita geoteknisessä luokassa 2 vaaditaan tavallisesti kvantitatiivisia geoteknisiä lähtötietoja ja analyysyjä, jotta voidaan varmistua siitä, että suunnittelun perusvaatimukset täyttyvät. Geoteknisen luokan 2 suunnittelussa kenttä- ja laboratoriokokeissa sekä suunnittelussa ja toteutuksessa voidaan käyttää rutiinimenetelmiä. (RIL 207-2009.)

3.1.2 Mitoitusilanteet

Lyhytaikaiset ja pitkäaikaiset mitoitusilanteet on tarkasteltava. Geoteknisessä suunnittelussa mitoitusilanteiden yksityiskohtaisiin määrittelyihin sisältyvät soveltuvin osin:

- kuormat, niiden yhdistelmät ja kuormitustapaukset
- rakenteen sijoituspaikan maaperän yleinen sopivuus kokonaisvakavuuden ja maapohjan liikkeiden kannalta
- laskentamalliin sisältyvien erilaisten maa- ja kalliiovyöhykkeiden sekä rakennusosien sijainti ja luokitus
- kaltevat kerrosten tasot

- muut maanalaiset rakenteet
- tapauksissa, joissa rakenne ulottuu kallioon tai sen läheisyyteen:
 - o kerrosten välissä olevat kovat ja pehmeät kerrokset
 - o siirrokset, halkeamat ja raot
 - o kalliolohkareiden mahdollinen epävakavuus
 - o nesteonkalot, kuten pehmeän materiaalin täyttämät vajoamat ja raot sekä jatkuvat liukenemisprosessit
- ympäristön suunnittelulle asettamat reunaehdot sisältäen seuraavaa:
 - o syöpymisen, eroosion ja kaivun vaikutukset, jotka johtavat maanpinnan geometrian muutoksiin
 - o kemiallisen korroosion vaikutukset
 - o rapautumisen vaikutukset
 - o jäätymisen vaikutukset
 - o pitkäkestoisen kuivuuden vaikutukset
 - o pohjaveden pinnan vaihtelut mukaan luettuna esimerkiksi kuivatuksen, mahdollisen tulvimisen, kuivatusjärjestelmien vaurioitumisen ja vedenkäytön vaikutukset
 - o maapohjasta nousevien kaasujen vaikutus
 - o muut ajan ja ympäristön vaikutukset lujuuteen ja muihin materiaaliominaisuuksiin
- maanjäristykset
- kaivostoiminnan tai muun toiminnan aiheuttamasta maan vajoamisesta johtuvat maapohjan liikkeet
- rakenteen herkkyys muodonmuutoksille
- uuden rakenteen vaikutukset olemassa oleviin rakenteisiin, palveluihin ja paikalliseen ympäristöön. (RIL 207-2009.)

3.1.3 Säilyvyys

Geoteknisessä suunnitteluvaiheessa ympäristöolosuhteiden merkittävyys tulee arvioida säilyvyyden kannalta, jotta voidaan ryhtyä varotoimenpiteisiin materiaalien suojaamiseksi tai tarkoituksenmukaisen vastuskyvyn aikaansaamiseksi.

Maan sisällä käytettävien materiaalien säilyvyyttä suunniteltaessa seuraavat seikat otetaan huomioon:

a) betonille:

- aggressiiviset aineet, kuten hapot tai sulfaattisuolat, pohjavedessä, maassa tai täyttömateriaalissa

b) teräkselle:

- altistuminen kemialliselle syöpymiselle, jos perustuksen osat on upotettu maahan,

joka on riittävän läpäisevää, jotta pohjaveden ja hapen suotautuminen on mahdollista

- teräsponttiseinän vapaan veden kanssa kosketuksissa olevien pintojen korroosio, erityisesti keskivesivyohtyöhykkeessä

- halkeilleessa tai huokoisessa betonissa olevan teräksen pistekorroosio, erityisesti valssatulla teräksellä, jolla valssihilse voi toimia korroosioparin katodina puhtaan pinnan toimiessa anodina. (RIL 207-2009.)

3.1.4 Laskelmiin perustuva geotekninen mitoitus

Laskelmiin perustuvaan mitoitukseen sisältyvät (RIL 207-2009):

- kuormat, jotka voivat olla joko hyötykuormia tai pakkosiirtymiä, esimerkiksi maapohjan liikkeistä
- maalajien, kallion ja muiden materiaalien ominaisuudet
- mittatiedot
- raja-arvot muodonmuutoksille, raonleveydelle, tärinälle jne.
- laskentamallit

Laskentamallin tulee kuvata maapohjan oletettua käyttäytymistä tarkasteltavassa rajatilassa. Jos tiettyyn rajatilaan liittyvää laskentamallia ei ole käytettävissä tulee analyysi tehdä muissa rajatiloissa käyttäen kertoimia, jotta voidaan varmistua edellä mainitun rajatilan riittävästä epätodennäköisyydestä. (Vaihtoehtoisesti mitoitus tulee tehdä ohjeellisten sääntöjen, malli- ja koekuormitusten perusteella tai seurantamenetelmällä). (RIL 207-2009.)

Laskentamalli voi olla:

- analyttinen, puolikokeellinen tai numeerinen malli

Laskentamallin tulee olla tarkka tai ainakin varmallalla puolella.

Jos tulosten muuntamisessa käytetään mallikerrointa, otetaan huomioon seuraavat seikat:

- analyysimenetelmän tulosten epävarmuusalue
- tiedossa olevat analyysimenetelmään liittyvät systemaattiset virheet.

Mallikerrointa valittaessa sen tulee olla sellainen, että kansallinen kokonaisvarmuustaso säilyy.

Monet laskentamallit perustuvat oletukseen, että maa/rakennesysteemi toimii riittävän plastisesti. Plastisuuden puuttuminen voi kuitenkin johtaa murtorajatilaan, jolle on tunnusomaista äkillinen romahtaminen. (RIL 207-2009.)

3.1.5 Kuormat

Kuormien määritelmä tulee ottaa EN 1990:2002:sta. Kuormien arvot tulee ottaa EN 1991:sta, soveltuvin osin. Geoteknisten kuormien arvot voivat muuttua laskennan aikana. Sellaisissa tapauksissa ne esitetään ensimmäisenä arviona laskelmien aloittamiseksi alustavalla, tunnetulla arvolla. (RIL 207-2009.)

Geoteknisessä mitoituksessa otetaan huomioon seuraavat kuormiin sisällytettävät tekijät (RIL 207-2009):

- maan, kallion ja veden paino
- jännitykset maapohjassa
- maanpaineet
- vapaan veden paineet
- pohjavedenpaine
- suotovirtauksesta aiheutuvat voimat
- pysyvät ja hyötykuormat rakenteista
- pintakuormat

- kuorman poistuminen tai maan kaivu
- ilmaston tai kosteusvaihteluiden aiheuttama paisuminen ja kutistuminen
- maamassojen virumisen, liukumisen tai painumisen aiheuttamat siirtymät
- hajoamisesta, hajaantumisesta, itsetiivistymisestä ja liukenemisestä aiheutuvat siirtymät
- maanjäristyksistä, räjäytyksistä, tärinästä tai dynaamisista kuormituksista aiheutuvat siirtymät ja kiihtyvyydet
- lämpötilan vaikutukset
- (negatiivinen vaippahankaus)

Tulee tarkastella mahdollisuutta, että muuttuvat kuormat esiintyvät sekä yhdistettynä että erikseen. Kuormituksen keston vaikutus suhteessa maan materiaaliominaisuuksien, erityisesti hienorakeisen maan kuivatus- ja kokoonpuristumisominaisuuksien, muuttumiseen ajan mukana tulee ottaa huomioon. Toistuvat kuormat ja kuormat, joiden suuruus vaihtelee, on tunnistettava esimerkiksi jatkuvia liikkeitä, maan nesteytymistä, maapohjan jäykkyyden ja lujuuden muutoksia koskevia erityistarkastelua varten. Kuormat, jotka tuottavat dynaamisen vasteen rakenteessa ja maapohjassa, on tunnistettava erityistä tarkastelua varten. Kuormat, joissa pohjaveden ja vapaan veden voimat ovat vallitsevia, tulee tunnistaa muodonmuutoksia, halkeilua, muuttuvaa läpäisevyyttä ja eroosiota koskevia erityistarkasteluita varten. Epäedullisia (tai kaatavia) ja edullisia (tai vakauttavia) pysyviä kuormia voidaan joissakin tilanteissa tarkastella samasta syystä tulevana. Jos niitä tarkastellaan siten, voidaan käyttää yhtä osavarmuuslukua näiden kuormien summalle tai niiden vaikutusten summalle. (RIL 207-2009.)

3.1.6 Geotekniset tiedot

Geoteknisen tiedon huolellinen keräys, tallennus ja tulkinta tulee aina tehdä. Tämän tiedon tulee sisältää tiedot paikan geologiasta, morfologiasta, seismisyydestä, hydrologiasta ja historiasta. Osoitukset maapohjan vaihtelevuudesta tulee ottaa huomioon.

Rakennettavien alueiden maaperän laatu, tulva- ja sortumariski, kuivatusmahdollisuudet sekä rakentamisen vaikutus pohjavesisuhteisiin selvitetään maankäytön suunnittelun yhteydessä. Alueiden kelpoisuuden arvioinnissa otetaan huomioon myös tärinävaikutukset, radonriskit ja maan mahdollinen pilaantuneisuus. Rutiininomaiset kenttä- ja laboratoriotutkimukset tulee tehdä ja raportoida yleensä kansainvälisesti hyväksytyjen standardien ja suositusten mukaisesti. Poikkeamiset näistä standardeista ja muista koevaatimuksista tulee raportoida. (RIL 207-2009.)

3.1.7 Geotekniset tutkimukset

Geoteknisten tutkimusten tulee tuottaa riittävästi tietoja, jotka koskevat pohja- ja pohjavesiolosuhteita rakennuspaikalla ja sen ympäristössä ja joita tarvitaan oleellisten maapohjan ominaisuuksien asianmukaiseen kuvaamiseen ja mitoituslaskelmissa käytettävien maaparametrien ominaisarvojen luotettavaan arviointiin.

Jos rakennuspaikalta on käytävissä kaavoituksen tai muissa yhteyksissä tehtyjen pohjatutkimusten tuloksia tai muita tietoja laajuudeltaan ja laadultaan riittävinä siten, että niiden perusteella pohjarakenteiden suunnittelu ja pohjarakentaminen voidaan toteuttaa luotettavasti ja turvallisesti, pohjatutkimusta ei tarvitse tehdä rakennushankkeen yhteydessä vaativissa (GL2) pohjarakennuskohteissa. Jos tutkimusten luonne ja laajuus liittyvät rakenteen geotekniseen luokkaan niin pohjaolosuhteet, jotka vaikuttavat geoteknisen luokan valintaan, selvitetään tutkimuksissa niin aikaisin kuin mahdollista. (RIL 207-2009.)

Paalulaattarakenteen rakenteellisessa, että geoteknisessä mitoituksessa tulee ottaa huomioon kaikki rakenteeseen vaikuttavat kuormat ja kuormien yhdistelyt kuormitusohjeiden ja tässä luvussa esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

3.2 Pystysuuntaiset kuormat

3.2.1 Pysyvät kuormat

Pysyviä kuormia ovat: täytön ja laatan oman painon oletetaan siirtyvän paaluille. Paalulaatan tilavuuspainona käytetään 25 kN/m^3 . Pengerkuorma p (täyttökuorma) laskeaan penkereen muotoisena jakautuneena pystykuormana penkereen keskimääräisen tilavuuspainon γ ja pengerkorkeuden H avulla. Täytön korkeus H määritetään paalulaatan yläpinnasta täytön yläpintaan.

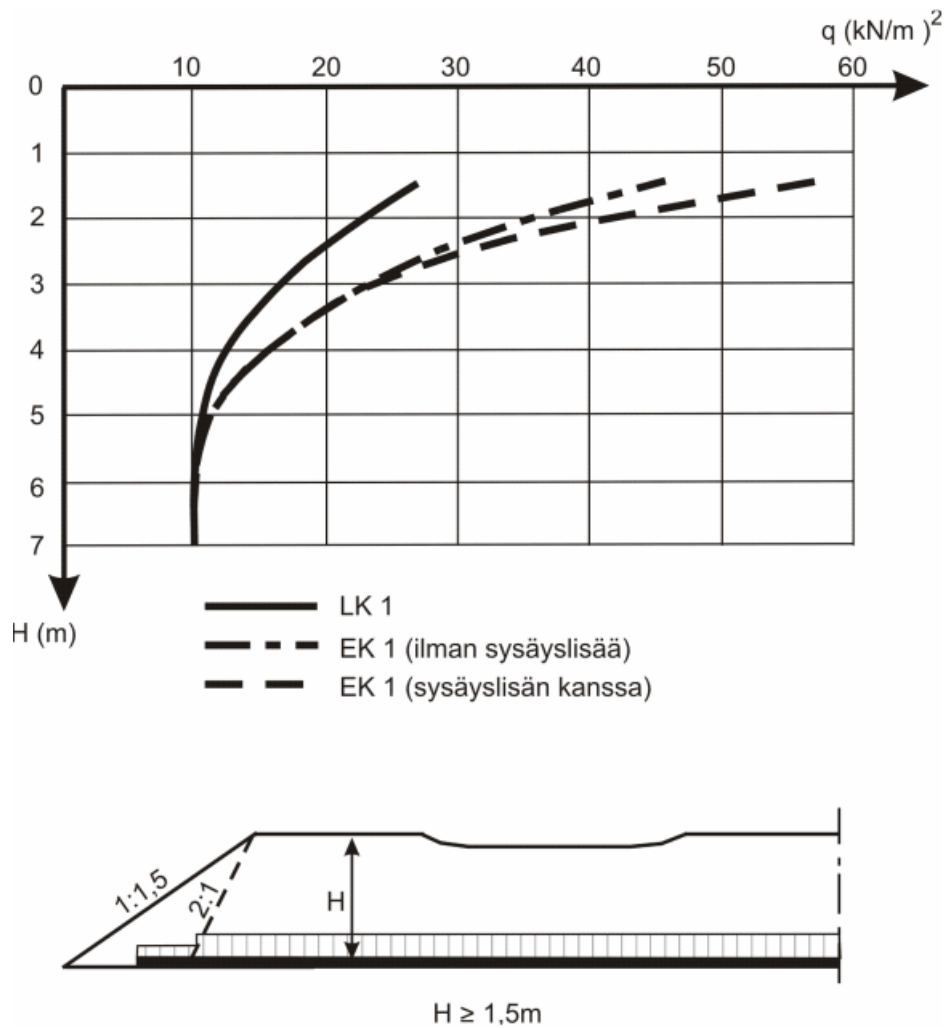
$$p = \gamma \cdot H \quad (1)$$

Täytön keskimääräisenä tilavuuspainona voidaan mitoituksista varten käyttää julkaisun ”Liikenneviraston ohjeita 11/2012” liitteen 4 taulukoissa 1-3 esitettyjä arvoja. Tavanomaisen soratäytön tilavuuspainona voidaan käyttää 20 kN/m^3 . (Liikennevirasto 2014.)

3.2.2 Liikennekuorma

Laatan rakenne mitoitetaan liikennekuormalle LM1. Paalun rakenteellisen ja geoteknisen kantavuuden mitoituksen tulee perustua samalle kuormalle. Paalun nurjahdus on tarvittaessa tarkistettava em. liikennekuormille. (Liikennevirasto 2014.)

Liikennekuormat LM1 ja LM3 vaikuttavat tien pinnalla ja ne koostuvat kaistoille sijoitettavista akselikuormista, nauhakuormasta ja sysäyslisästä. Liikennekuormien vaikutus laatan pinnalla saadaan kuvasta 1. Kuvan diagrammista saatava kuormitusintensiteetti vaikuttaa laatan pinnalla ajoradan ja keskikaistan kohdalla sekä osittain luiskassa. Täyden kuormitusintensiteetin vaikutusalue rajautuu luiskassa ajoradan reunasta kaltevuudessa 2:1 piirretyn suoran avulla. Mikäli keskialue on yli 15 m leveä, laatan tarve ja kuormitusintensiteetti keskialueella määritellään hankekohtaisissa tuotevaatimuksissa. Laatan reuna-alueen mitoituskuorma määritetään tapauskohtaisesti mutta se on kuitenkin vähintään 10 kPa ottaen huomioon lisäksi työnaikaisen liikenteen ja työmaa-ajoneuvojen vaikutukset. Kun paalun geotekninen kantavuus mitoitetaan kokonaisvarmuuskerrointa tai sallittujen jännitysten menetelmää käyttäen, käytetään mitoituskuormina liikennekuormien ominaiskuormia ilman sysäyslisää LM3. (Liikennevirasto 2014.)



Kuva 2. Liikennekuorman syvyydessä H aiheuttama tasainen kuorma. Vanha mitoitus (LkI/EkI), uusi on LM1/LM3 ja toimii samalla periaatteella, mutta kuormat ovat suurempia. (Liikennevirasto 2014.)

Liikennekuormitusta on vastikään muutettu. Tämä työkalu on kuitenkin suunniteltu tässä esitetyille LM1 kuormille. Paaluvälin ollessa suuri voidaan kuvasta 1. saatavaa liikennekuorman intensiteettiä vähentää tutkimalla liikennekuorman jakautumista tarkemmin. Liikennekuormien LM1 ja LM3 vaikutusalue ja suuruus on määritelty ohjeessa Siltojen kuormat. (Liikennevirasto 2014.)

Työnaikaiset tilanteet tutkitaan aina tapauskohtaisesti kulloinkin käytettävien konetyyppien, työnaikaisen pengerkorkeuden ja reunan ylityspaikkojen suhteen. Mitoitustarkastelu tehdään murtorajatilassa käyttäen työkoneiden pyöräkuormille osavarmuuslukua 1,8, joka sisältää tavanomaisen sysäyslisän. Työnaikaisten, laattoihin kohdistuvien kuormitustilanteiden ja työnaikaisten liikennöintialueiden tarkastelut esitetään suunnitelmissa ja laskelmissa työvaiheen suunnittelun yhteydessä. (Liikennevirasto 2014.)

3.3 Vaakasuuntaiset kuormat

Vaakasuoria ulkoisia kuormia ovat mm maanpaine, toisen ajoradan penkereestä aiheutuva

kuorma ja laatan tulopenkereeseen pituussuunnassa vaikuttava pengerkuorma, vaakasuorat liikennekuormat (jarrukuorma). Pystykuorma aiheuttaa aina vaakasuoran sisäisen kuorma-vaikutuksen rakenteen sisällä. Paalulaatan päällä olevaan penkereeseen maanpaineesta kohdistuva ulkoinen vaakavoima lasketaan lepopaineen avulla. Lepopaineen aiheuttama vaakakuorma F_H lasketaan keskimääräisenä arvona kaavalla:

$$F_H = K_0 \left(\gamma_m \frac{H^2}{2} + q \cdot H \right) \quad (2)$$

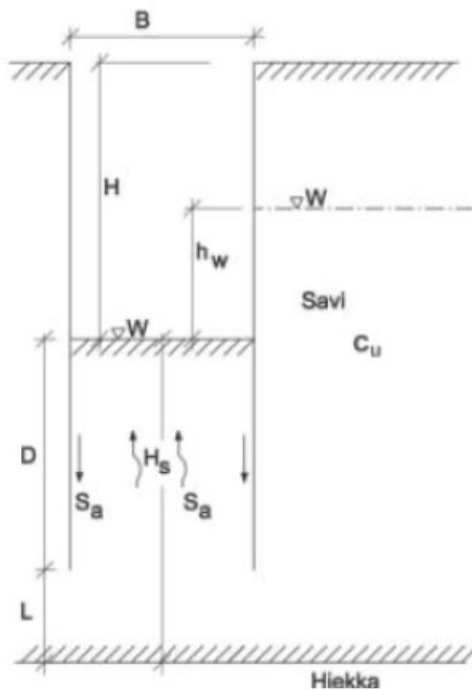
$$K_0 = 1 - \sin \gamma$$

F_H	on vaakakuorma
H	penkereen korkeus laatan yläpinnasta rakenteen ulkoreunassa
γ_m	penkereen keskimääräinen tilavuuspaino
ϕ	penkereen keskimääräinen kitkakulma
q	tien pinnassa vaikuttava pintakuorma 20 kN/m^2
K_0	lepopaine kerroin

(Liikennevirasto 2014.)

3.4 Kaivannon mitoitustarkastelu

Kaivannon mitoituksessa on tarkasteltava sortumavaaraa aiheuttavat riskit kuten: sade, kuumuminen, löyhä maaperä, kaivannon lähellä tärinää aiheuttavat työt, vedenpaine, maanpinnalla tai kaivannossa olevat pintakuormat, törmäyskuormat ja jäätymskuormat. Nämä kaikki vaikuttavat mitoitukseen, joissa tarkastellaan varmuus hydraulista murtumista ja nosteen aiheuttamaa murtumista vastaan kuva 3.



Kuva 3. Tuetussa kaivannossa nosteen aiheuttama murtuma hienorakeisessa maassa, kun hienorakeisen maan alla on vettäjohtava maakerros, tarkasteltuna eurokoodin mukaisesti. (Tyytelä 2015.)

$$\frac{\gamma_{G;stb} \cdot \gamma \cdot H_s + \frac{2 \cdot \left(\frac{c_u \cdot L + s_a \cdot D}{\gamma_{cu}} \right)}{B}}{\gamma_{G;dst} \cdot \gamma_w \cdot (h_w + H_s)} \geq 1 \quad (3)$$

γ	maan tilavuuspaino, [kN/m ³]
γ_w	veden tilavuuspaino, [kN/m ³]
$\gamma_{G;stb}$	pysyvän edullisen kuorman osavarmuusluku, ks. kappale 7.4.2
$\gamma_{G;dst}$	pysyvän epäedullisen kuorman osavarmuusluku, ks. kappale 7.
γ_{cu}	suljetun leikkauslujuuden osavarmuusluku, ks. taulukko 7.5
c_u	saven suljettu leikkauslujuus, [kPa]
L	tukiseinän alapään etäisyys vettä johtavasta kerroksesta, [m]
s_a	tukiseinän ja maan välissä vaikuttava adheesio, [kPa]
D	pontin lyöntisyvyys kaivannon pohjan alapuolelle, [m]
B	kaivannon leveys, [m]
H_s	etäisyys kaivannon pohjalta vettä läpäisevään kerrokseen, [m]

Mikäli hienorakeiseen tai eloperäiseen maahan rakennettavan kaivannon pohjan läheisyydessä on vettä johtava maakerros tai vettä johtava kallio, on kaivannon varmuus kaivannon pohjan hydraulista murtumista vastaan tarkistettava laskelmin. (Tyynelä 2015)

3.5 Paalulaatan rakennetekninen mitoitus

3.5.1 Yleistä

Paalulaatta mitoitetaan InfraRYL - Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset mukaan ottaen huomioon niitä täydentävät Liikenneviraston sillansuunnittelua koskevat lisäohjeet sekä seuraavissa kappaleissa esitetyt täsmennykset ja vaatimukset.

Pystysuoran kuorman aiheuttama vaakasuora kuormavaikutus aiheuttaa paalulaattaan vetoa, joka otetaan täysimääräisesti huomioon laatan raudoituksessa.

Paalun upotussyvyyden laattaan tulee olla vähintään 50 mm. (Liikennevirasto 2014.)

3.5.2 Paalulaatan rakenteellinen mitoitus Liikenneviraston mukaan

Liikennevirasto (2014) on laatinut paalulaattojen suunnitteluohjeen. Ohje on laadittu noudatettavaksi suunniteltaessa ja tehtäessä paaluhattu- tai paalulaattarakenteita. Suunnitteluohje käsittää sekä rakenteellisen että geoteknisen suunnittelun. Ohjetta sovelletaan, kun pengerkorkeus on vähintään 1,5 m. Ohjeen mukaan paalulaattojen rakenteellinen suunnittelu käsittää läpileikkautumisen, taivutus- halkeilu ja säilyvyydentarkastelut. Käytin ohjetta läpileikkautumisen-, taivutuksen-, halkeilun -ja säilyvyydentarkasteluissa. (Liikennevirasto 2014.)

3.5.3 Lämpileikkautuminen

Lävistysvoimana käytetään paalun tukireaktiota vähennettynä lävistyskartion alueelle jäävällä osuudella kuormasta eli (Liikennevirasto 2014)

$$V_d = R_d - \Delta V_d \quad (4)$$

$$\Delta V_d = q_d \cdot (a + 2 \cdot d)^2 \quad (5)$$

R_d on tukireaktio
 a paalun sivumitta
 d laatan tehollinen paksuus lävistyksessä

Laatan lävistyskapasiteetti tarkistetaan murtotilassa kaavalla

$$V_c = k \cdot \beta \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot u \cdot d \cdot f_{ctd} \quad (6)$$

$$k = 1,6 - d(m) \geq 0,8$$

$$\rho = \rho_x \cdot \rho_y \leq 8 \text{ ‰}$$

$$\beta = 0,40$$

$$u = 4 \cdot (a + d)$$

Leikkausraudoitetun laatan lävistyskapasiteetti lasketaan vastaavasti kaavoista

$$(0,25 \cdot V_c + V_s) \leq 2 \cdot V_c \quad (7)$$

$$V_s = A_{sv} \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha$$

$$f_{yd} \leq 300 \text{ N/mm}^2$$

Laatan paksuudeksi oletetaan paalun pään yläpuolelle jäävä paksuus. (Liikennevirasto 2014.)

3.5.4 Taivutus

Laatan taivutustarkastelu suoritetaan murtorajatilamitoituksena, jossa mitoituskuormana on (Liikennevirasto 2014)

$$\begin{aligned} & q_d = 1,20 \cdot \Sigma g_i + 1,80 \cdot q_{Lk1} \quad (8) \\ \text{tai} & q_d = 1,20 \cdot \Sigma g_i + 1,40 \cdot q_{Ek1} \\ \text{tai} & q_d = 1,35 \cdot \Sigma g_i \end{aligned}$$

Σg_i on pysyvien kuormien summa
 q_{Lk1} on liikennekuorma Lk1
 q_{Ek1} on liikennekuorma Ek1

Tämä on vanhasta ohjeesta, uudessa ohjeessa tätä ei ole, mutta periaate on samankaltainen, suunnittelukuormat ovat vain nykyisin suurempia. Laatan voimasuureita laskettaessa käytetään laatan todellisten paksuuksien mukaisia jäykkyyksiä olettaen betoni halkeilemattomaksi. (Liikennevirasto 2014.)

3.5.5 Halkeilu

Halkeilu otetaan mitoituksessa huomioon ohjeen Eurokoodin soveltamisohje Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1” ja ” Eurokoodin soveltamisohje Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2 mukaisesti. Halkeamatarkastelussa on käytetty korotettuja halkeamaleveysrajoja vastaamaan paalulaatan todellisia peitepaksuuksia. (Liikennevirasto 2014.)

3.5.6 Säilyvyys

Paalulaatan ja paaluhattujen sekä teräsbetonipaalujen ja teräspaalujen kemiallinen rasitus otetaan huomioon Liikenneviraston ohjeen Sillan geotekniset suunnitteluperusteet, joka on korvattu ohjeen Geotekninen suunnittelu – NCCI 7, mukaisesti. Betonin osalta käytetään lisäksi erilaisiin ympäristöolosuhteisiin soveltuvia rasitusluokkia Liikenneviraston ohjeen Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet NCC1 mukaisesti. Myöhemmin ohjeet siirrettiin Liikenneviraston Betonirakenteiden suunnittelu NCC2:seen.

Ohjeiden vaatimukset on kirjoitettu vain paalulaattaa varten, mutta niitä sovelletaan myös paaluhatuille.

Tiesuolarasitetut paalulaatat suunnitellaan em. ohjeiden mukaan rasitusluokkaryhmän R4 mukaisesti, kun ajorataosalla rakenteen päällä oleva suojakerros on vähintään 1,5 m. Paalulaatta suunnitellaan koko leveydeltään samaan rasitusluokkaryhmään.

Paalut suunnitellaan rasitusluokkaryhmään R4. Rasitusluokka karbonatisoitumista vastaan on XC2, jonka mukaan RT:n julkaiseman tuotelehden "Teräsbetoninen lyöntipaalu" tyyppipaalut on suunniteltu. Ankarammissa olosuhteissa mm sulfidisavialueilla rasitusluokka valitaan em. ohjeiden mukaisesti. (Liikennevirasto 2014.)

3.6 Paaluperustukset

3.6.1 Rajatilat

Seuraavat rajatilat tulee tarkistaa ja niistä tulee laatia tarkoituksenmukainen luettelo:

- kokonaisvakavuuden menetys
- paaluperustuksen kantokestävyyden ylittyminen
- paaluperustuksen nousu tai riittämätön vetokestävyys
- paaluperustuksen poikittaisen kuormituksen aiheuttama maapohjan murtuminen
- paalun rakenteellinen murtuminen puristuksesta, vedosta, taivutuksesta, nurjahduksesta tai leikkausrasituksesta

- paaluperustuksen ja maapohjan yhdistetty murtuminen
- rakenteen ja maapohjan yhdistetty murtuminen
- liian suuret painumat
- liian suuri nousu liian suuri vaakasuuntainen liike
- tärinät, joita ei voida hyväksyä (RIL 207-2009.)

3.6.2 Maapohjan siirtymistä aiheuttavat kuormitukset

Paaluja ympäröivässä maapohjassa voi tapahtua siirtymiä, jotka ovat seurausta konsolidatiosta, paisumisesta, viereisistä kuormituksista, hiipuvasta maasta, maan liukusortumista tai maanjäristyksistä. Nämä ilmiöt vaikuttavat paaluihin aiheuttaen negatiivista vaippahan-kausta, nousua, venymiä, poikittaisia kuormia ja siirtymiä, joten niihin tulee kiinnittää huomiota.

Näissä tilanteissa siirtyvän maapohjan lujuuden ja jäykkyyden mitoitusarvona tulee tavallisesti käyttää yläarvoa.

Suunnittelussa tulee käyttää jompaakumpaa seuraavista lähestymistavoista:

- maapohjan siirtymää käsitellään kuormana. Vuorovaikutusanalyysi tehdään voimien, siirtymien ja muodonmuutosten määrittämiseksi paalussa
- maapohjasta paaluun välittyvän voiman yläraja-arvoa tulee käyttää mitoituskuormana. Tätä voimaa arvioitaessa tulee ottaa huomioon maan lujuus ja kuormituksen aiheuttaja, joka voi olla siirtyvän maamassan paino tai puristus tai häiritsevien kuormien suuruus. (RIL 207-2009.)

3.6.3 Mitoitusmenetelmät ja -tarkastelut

Mitoituksen tulee perustua johonkin seuraavista menettelyistä: staattisten koekuormitusten tuloksiin, kokemusperäisiin tai analyyttisiin laskentamenetelmiin, dynaamisten koekuormitusten tuloksiin tai vastaavanlaisen paaluperustuksen havaittuun käyttäytymiseen, jos pohjatutkimukset ja muut kokeiden tulokset tukevat tätä menetelmää.

Yksittäisten paalujen ja paaluryhmien käyttäytyminen sekä paaluja yhdistävän rakenteen jäykkyys ja lujuus tulee ottaa huomioon.

Paalutyypin, paalumateriaalin ja asennusmenetelmän valinnassa tulee ottaa huomioon:

- pohjaolosuhteet ja pohjavesiolosuhteet rakennuspaikalla, mukaan lukien maapohjassa olevat esteet tai niiden mahdollisuus
- paaluihin asennuksen aikana syntyvät jännitykset
- mahdollisuus ylläpitää ja tarkistaa asennetun paalun ehjyys
- paalujen asennusmenetelmän ja asennusjärjestyksen vaikutus jo asennettuihin paaluihin, viereisiin rakenteisiin tai toimintoihin
- toleranssit, joiden sisällä paalut voidaan turvallisesti asentaa
- maapohjassa olevien kemikaalien vahingollinen vaikutus
- erilaisten pohjavesijärjestelmien yhdistymisen mahdollisuus
- (paalurakenteen vaikutukset lähellä oleviin rakennuksiin)

Tarkasteltaessa edellä esitettyjä näkökohtia seuraavat kohdat vaativat huomiota:

- paalujen välimatkat paaluryhmissä
- paalun asennuksesta aiheutuvat siirtymät ja tärinä viereisissä rakenteissa

- käytettävän järkäleen ja täryttimen tyyppi
- dynaamiset jännitykset paalussa lyönnin aikana
- maassa olevien kemikaalien hidastava vaikutus
- syrjäyttävien paalujen lyönnin aiheuttama maan tiivistyminen

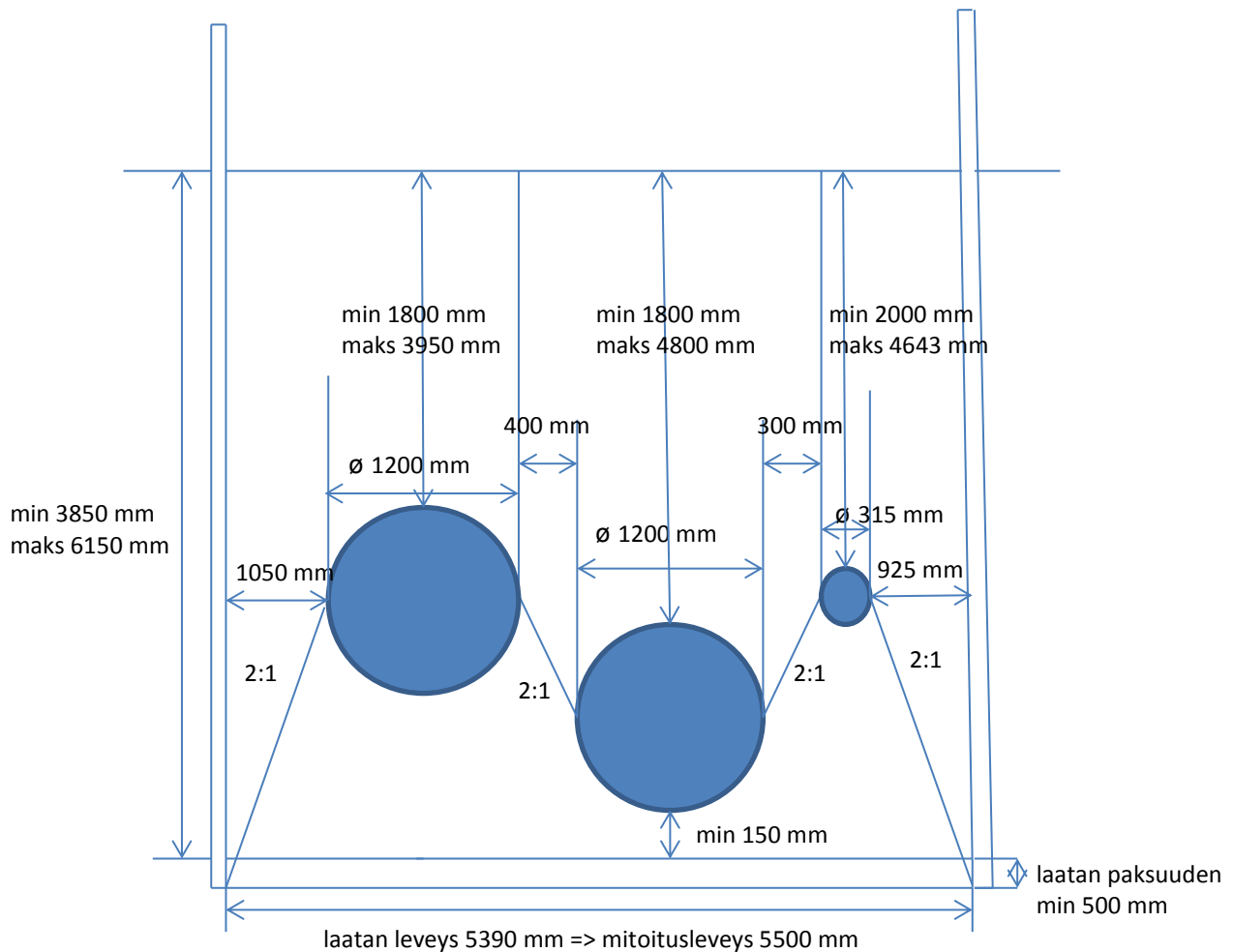
Paalujen koekuormituksia voidaan käyttää:

- rakentamismenetelmän sopivuuden arvioimiseen
- määrittämään edustavan paalun ja ympäröivän maapohjan kuormitusvastetta sekä painuman ja rajakuorman suhteen
- mahdollistamaan koko paaluperustuksen arviointia

Kaikista koekuormituksista tulee tehdä tosiasioihin perustuva raportti. Raportin tulee sisältää soveltuvin osin seuraavat tiedot:

- kuvaus rakennuspaikasta
- pohjaolosuhteet pohjatutkimusten perusteella
- paalutyyppi
- kuvaus paalun asennuksesta ja töiden aikana havaituista ongelmista
- kuvaus kuormitus- ja mittauslaitteistosta sekä vastapainojärjestelmästä
- kuormitussellien, tunkkien ja antureiden kalibrointiasiakirjat
- koepaalujen paalutuspöytäkirjat
- valokuvatallenteet paalusta ja koealueesta
- koetulokset numeerisessa muodossa
- aika-siirtymäkuvaajat kullekin käytetylle kuormitusportaalille, jos käytetään portaitaista kuormitusta
- mitattu kuormitus-siirtymäkäyttäytyminen
- perustelut sille, joiden takia on poikettu edellä esitetyistä vaatimuksista. (RIL 207-2009.)

Kuvassa 6 on puolestaan esitetty keskimääräisillä putkikoolla ja vierustäytöllä mitoitettu kolmen putkijohdon mittapiirustus minimileveydellä ja minimisyvydellä sekä vastaavat suunnittelukuormat.



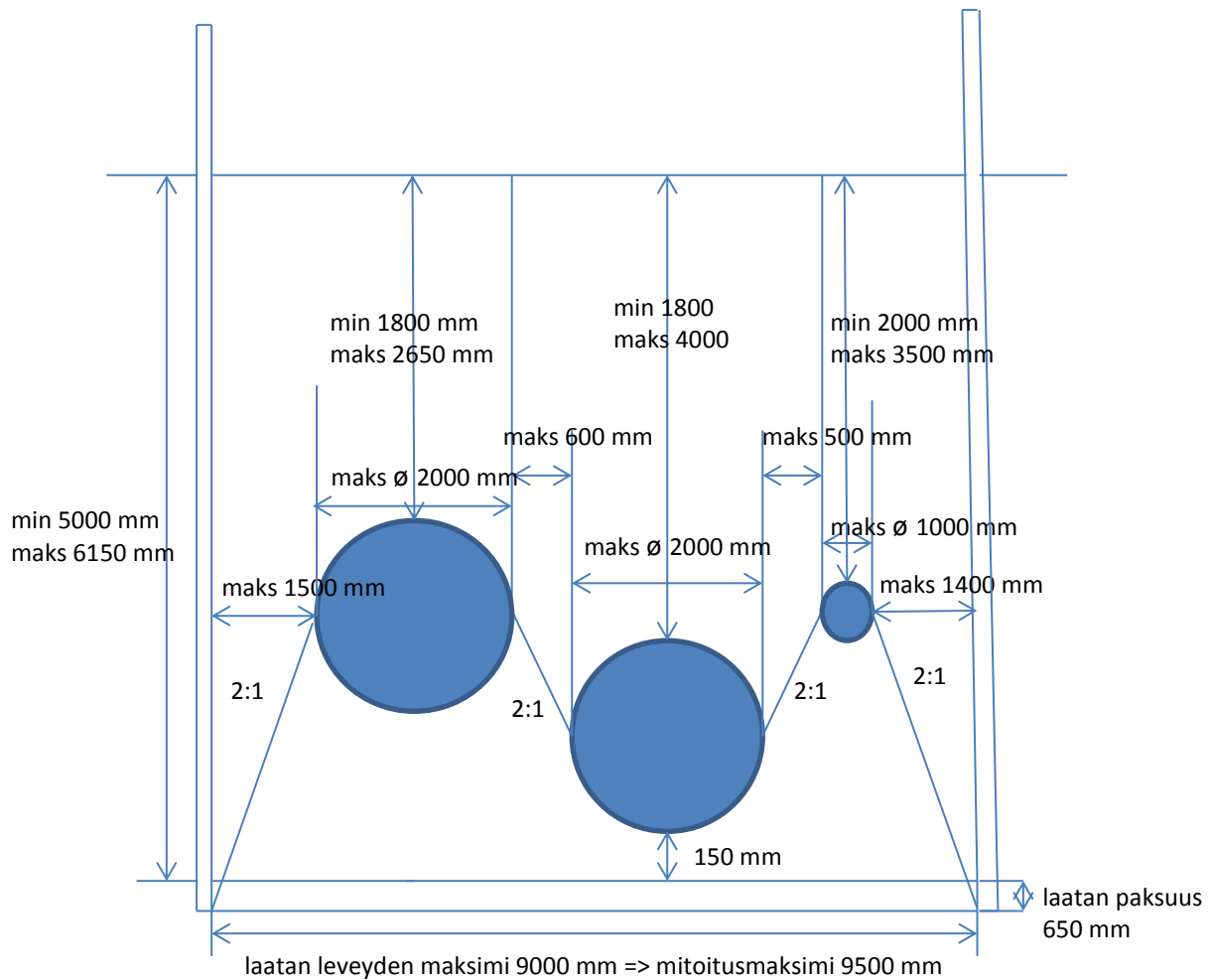
Kuva 6.

Laatan paino/m = $1,15 \cdot 0,50 \cdot 5,5 \cdot 25 \text{ kN/m} = \underline{79,1 \text{ kN/m}}$

Pengerkuorma maksimissaan = $1,15 \cdot 6,15 \cdot 5,5 \cdot 20 \text{ kN/m} = \underline{778,0 \text{ kN/m}}$ ja
minimissään = $1,15 \cdot 3,85 \cdot 5,5 \cdot 20 \text{ kN/m} = \underline{487,1 \text{ kN/m}}$

Liikennekuorma maksimissaan = $1,35 \cdot 5,5 \cdot 23,4 \text{ kN/m} = \underline{173,8 \text{ kN/m}}$ ja
minimissään = $1,15 \cdot 5,5 \cdot 15,7 \text{ kN/m} = \underline{99,4 \text{ kN/m}}$

Kuvassa 7 on esitetty maksimiputkikokoilla ja vierustäytöllä mitoitettu kolmen putkijohdon mittapiirustus minimileveydellä ja minimisyvyydellä sekä vastaavat suunnittelukuormat. Kuvien 5 – 8 lähtötietoina on käytetty HSY:n vesihuollon (HSY 2016) tietoja sekä haastateltutietoja Auvinen (2017).



Kuva 7.

Laatan paino/m= $1,15 \cdot 0,65 \cdot 9,5 \cdot 25 \text{ kN/m} = \underline{177,6 \text{ kN/m}}$

Pengerkuorma maksimissaan = $1,15 \cdot 6,15 \cdot 9,5 \cdot 20 \text{ kN/m} = \underline{1343,8 \text{ kN/m}}$ ja
minimissään = $1,15 \cdot 5,0 \cdot 9,5 \cdot 20 \text{ kN/m} = \underline{1092,5 \text{ kN/m}}$

Liikennekuorma maksimissaan = $1,35 \cdot 9,5 \cdot 19 \text{ kN/m} = \underline{243,7 \text{ kN/m}}$ ja
minimissään = $1,35 \cdot 9,5 \cdot 15,7 \text{ kN/m} = \underline{201,4 \text{ kN/m}}$

4.2 Mitoitusperusteet

4.2.1 Tyyppirakenteet

Paalulaatoiksi mitoitetaan tyyppirakenteet, eivätkä ne liity erityisesti johonkin tiettyyn kohteeseen. Paalulaatta tulee putkikaivannon pohjalle. Tarkasteltavan vesihuoltolinjan pituus on mitoituksen takia 4 paaluväliä pitkä. Näin saadaan tarpeeksi tarkasti määritettyä momentit ja normaalivoimat. Paalulaatan yläpinta vaihtelee tasolla $-2,1$ - $-6,2$ m maan pinnan tasosta. Saven on oltava sen verran jäykkää, ettei tarvita stabilointia kuin ääritapauksissa ja tarvittava paalutuskalusto voi työskennellä kaivantotalueella. Kaivantotuentaa pitää erikseen mitoittaa, myös paalutuskaluston aiheuttama kuormitus on otettava huomioon sen suunnittelussa. Paalut lyödään ennen kaivamista, jos maaperä on liian pehmeää, muussa tapauksessa paalut lyödään, kunnes kaivanto on kaivettu, näin hukkapaaaluja tulee vähemmän. Kaivannon syvyys on määritetty maanpinnan tasosta eli suunnitelmiin ei sisälly pengertä. Kaivannon maksimi-levyys on määritetty 9500 mm:ksi.

4.2.2 Luokitukset

Mitoituksen seuraamusluokkana on CC2, joka tarkoittaa, että on keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.

Betonin toteutusluokka on 2. Sitä voidaan käyttää seuraamusluokkien 1 ja 2 rakenteille, ei kuitenkaan korkealujuusbetonille, joiden luokka on suurempi kuin C57/70.

Raudoituksen toleranssiluokka on 2 tarkoittaen mitoitusta pienemmillä osavarmuusluvuilla. Pienennetyt osavarmuuslukujen arvot ovat: betonille $\gamma_c = 1,35$ ja raudoitukselle $\gamma_s = 1,10$. Rasitusluokkaryhmä on R4 kuten paalulaatoille yleensä. Geotekninen luokka on GL2 eli rakenne se on tavanomainen, eikä pohjamaahan liity tavallisuudesta poikkeavia riskejä. Paalutusluokka on PTL2, koska rakenteen luokat ovat CC2 ja GL2, paalutyöluokalla luokitetaan paalutustyön toteutuksen tapa.

4.3 Lähtötiedot

Lähtötietoina olivat betonin ja terästen ominaisuudet esitetty liitteessä 9. Betonin osavarmuusluku on 1,35 ja teräksen osavarmuusluku on 1,1. Betonille on annettu puristus- ja vetolujuudet ja teräkselle vetolujuudet. Laatan paksuus on asetettu välille 400 - 650 mm. Kaivoihin sijoitettava laatan laskennallinen leveys pituus -ja leveyssuuntaan on 1000 mm.

Pituussuuntainen raudoituspaksuus on 16 – 30 mm, samoin poikkisuuntainen raudoituspaksuus on 16 – 30 mm. Rautaväli on 100 – 350 mm. Laskennassa lasketaan rautojen kappalemäärä 1000 mm matkalla pituussuunnassa ja poikkisuunnassa. Laskennassa tarvitaan myös raudoituksen poikkipinta-ala 1000 mm matkalla sekä pituus- että poikkisuunnassa. Raudoituksen peitepaksuudeksi on asetettu 50 – 100 mm sekä pituus- että poikkisuuntaan. Hakatankojen paksuus on määritetty.

Lävistys varten on määritetty paalun teräshatun leveys, joka on 250 – 400 mm ja hyötyleveys on määritetty 300 – 550 mm. Laatan suurin jänneväli tulee kaavasta $h=L/30\dots L/27$, missä L on jänneväli ja h laatan paksuus.

Seuraavia tietoja tarvittiin myös laskennassa:

k_t on kuorman vaikutusajan kerroin = 0,6 lyhytaikaisille kuormitusyhdistelmille ja = 0,4 pitkäaikaisille kuormitusyhdistelmille

k_1 on tankojen tartuntaominaisuuden huomioiva kerroin = 0,8 betoniteräkselle (esim. A500HW tai B500B)

k_2 on venymäjakauman huomioiva kerroin = 0,5 taivutukselle ja = 1,0 pelkälle vedolle

Au on tuen reunasta etäisyydellä d/2 olevan leikkauksen rajoittaman kuvion pinta-ala
u on tuen reunasta etäisyydellä d/2 olevan leikkauksen rajoittaman kuvion piiri

ρ on vetorausoitussuhde = $\sqrt{\frac{A_{sx} * A_{sy}}{b^2 * d^2}}$
 β on tehollisen puristuspuunnan suhteellinen korkeus

Kuvaus suunniteltavasta rakenteesta

Rakenne on tasapaksu yhtenäinen teräsbetoninen paalulaatta, jonka paksuus on 400 - 650 mm. Paalut ovat teräksisiä lyötäviä pienpaaluja. Porapaaluja ei tässä ole mitoitettu. Paalujen päihin käytetään paaluhattuja. Teräsbetonipaalujen mitoitusta tässä työssä ei ole myöskään tehty, mutta 300 mm x 300 mm teräsbetonipaalu olisi ollut myös käyttökelpoinen saadussa rakenteessa. Laatan leveys vaihtelee 1000 mm – 9500 mm, ja se kattaa suunnitellut tapaukset, joita arvellaan tulevan mahdollisesti vastaan. Laatan yläpinnan pystyetäisyys maanpinnasta on 2,1-6,2 metriä.

4.4 Mitoituksen oletukset

Mitoituksessa on käytetty seuraavia normeja ja ohjeita:

- Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, Liikennevirasto 2014
- NA-SFS-EN 1991-2 - Siltojen liikennekuormat
- NA-SFS-EN 1992-2 - Betonirakenteiden suunnittelu (Sillat)
- Eurokoodin sovellusohje – Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet
 - NCCI 1 (5.9.2014)
- Eurokoodin sovellusohje – Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2 (16.9.2014)
- Eurokoodin sovellusohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 (7.11.2013)
- Sillan geotekninen suunnittelu- Sillat ja muut taitorakenteet (11/2012)
- Siltojen rakennelaskelmat, Liikennevirasto, Helsinki 2011
- InfraRYL – Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset
- Paalutusohje PO-2011 (RIL 254-2011)

Ohjelmistot

Paalulaatta mallinnettiin LUSAS-ohjelmistolla, josta saadaan laattaan ja paaluille tulevat kuormitukset. Paalujen mitoitukseen käytetään ilmaista netistä saatavaa SSAB:n paalujen mitoitusohjelmaa. Paalulaattojen poikkileikkauksien suunnitelmat on tehty Excel-laskentapohjia käyttäen.

Päärakennusaineiden materiaaliominaisuudet

Betonin laskentalujuudet

Betonin puristuslujuusluokaksi valitaan yleensä C30,0/37,0, kuitenkin tarvittaessa voidaan betonin suunnittelulujuutta kasvattaa, aina C50,0/60,0 asti kun halutaan vähentää raudoitusta tai pienentää laattapaksuutta.

Päällysrakenne: rakennusosan tunnus eli paalulaatta Ro30, rasitusluokkaryhmä R4 paalulaatta ei kuulu mihinkään muuhun ryhmään, peitepaksuus $c_{nom}=50/ap$ 100

Esimerkiksi: Betoni C30/37, lieriölujuus $f_{ck}=30,0$ [MPa], kuutiolujuus $f_{ck,cube}=37,0$ [MPa], mitoituslieriölujuus $f_{cd}=20$ [MPa], vetolujuus $f_{ctk,0,05}=2,0$ [MPa], mitoitusvetolujuus $f_{ctd,0,05}=1,33$ [MPa]

Betoniteräksset

Teräksiksi valitaan tyyppitapauksissa A500HW, jota vastaa tässä tapauksessa myös B500B. Teräksien lujuutta voidaan kasvattaa aina luokkaan A700HW tai B700B asti, samalla kun betonin lujuusluokka kasvaa vastaavasti. Teräksset valitaan myös halkeamaleveystarkastelun vaatimuksia vastaavaksi, jotka ovat 0,15 mm tavallisella kuormayhdistelmällä ja 0,20 mm pitkäaikaisella kuormayhdistelmällä.

Teräksset A500HW-A700HW = B500B-B700B

Esimerkiksi: Teräs B500B, teräksen lujuus $f_{yk} = 500$ [MPa,] teräksen lujuuden mitoitusarvo $f_{yd} = 454$ [MPa] ja teräs A500HW teräksen lujuuden mitoitusarvo $f_{yd} = 434$ [MPa]

Paalut

Paaluina työssä käytetään teräksisiä RR140–RR220 paaluja taulukko 1. Paalun seinämäpaksuus on 10 – 12,5 mm. Paalu valitaan siten, että sen kestävyys riittää paaluihin kohdistuvat rasitukset.

Paalujen mitoitukseen käytetään ilmaista netistä saatavaa SSAB:n paalujen mitoitusohjelmaa: (<http://www.ssab.fi/tuotteet/teräsluokat/infrastrukturi/infrastructure-design-tools>).

Taulukko 1. esimerkki ominaisuuksista

Paalu	D (mm)	t (mm)	M (kg/m)	A (mm ²)	A _i (mm ²)	A _b (mm ²)	W _{el} (cm ³)	EI (kNm ²)	A _{1,2} (mm ²)	EI _{1,2} (kNm ²)	A _{2,0} (mm ²)	EI _{2,0} (kNm ²)
RR140/8	139,7	8	26	3310	0,44	15328	103,1	1513	2788	1250	2445	1082
RR140/10	139,7	10	32	4075	0,44	15328	123,4	1810	3553	1547	3209	1379

Paalun puristuskapasiteetti riippuu paalun materiaalista sekä poikkileikkaussuureista ja mitoista.

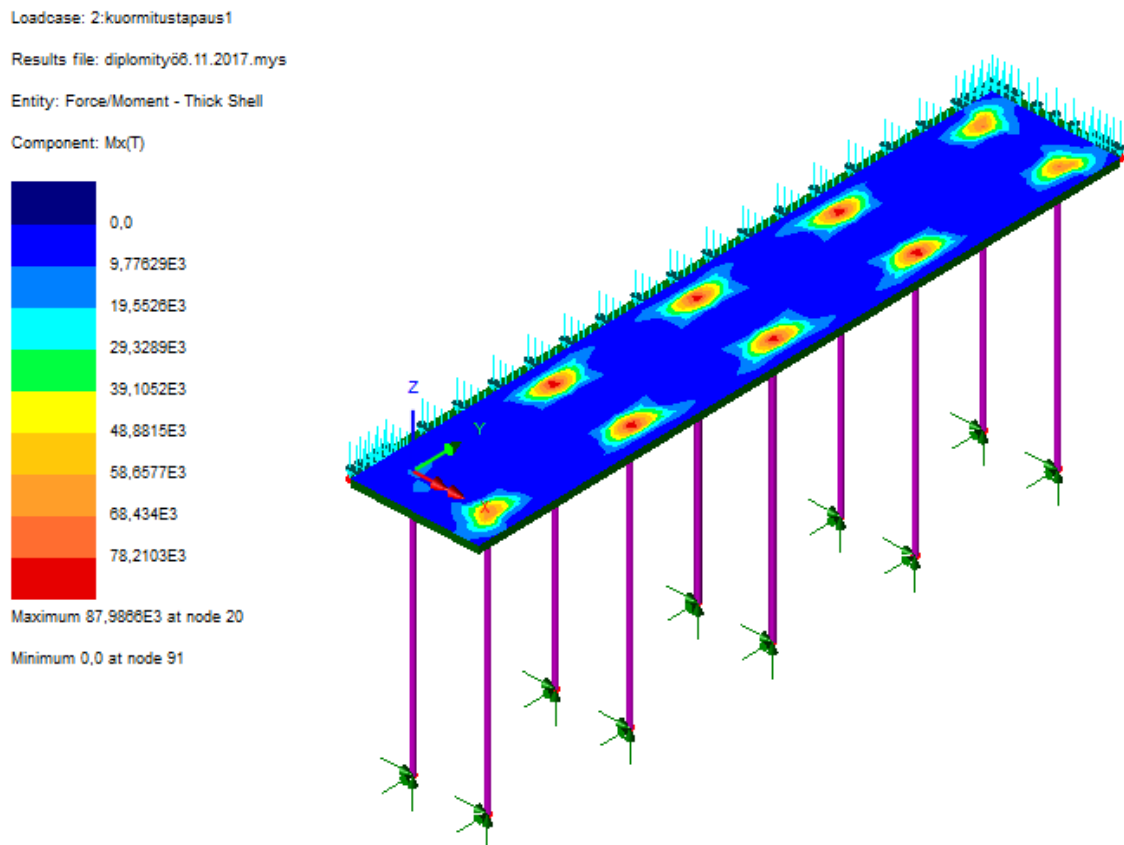
Kuormat

Pysyviä kuormia ovat penkereiden ja rakenteiden omapaino. Muuttuvia kuormia ovat liikennekuorman (LM1) aiheuttama tasainen kuorma $16,4 - 40,6 \text{ kN/m}^2$, mikä riippuu päällä olevan täytön paksuudesta.

4.5 Työn sisältö ja toiminta

Rakennemallit

Rakenteesta on tehty kokonaismalli LUSAS-ohjelmalla, jossa rakenne on pyritty kuvaamaan todellisine mittoineen. Paalulaatta on kuvattu laattaelementteinä ja paalut sauvaelementteinä. Alla kuvassa 9. LUSAS-ohjelmalla tehty mitoitus suunnitelma.



Kuva 8. Pituussuuntaisten tukimomenttien suuruudet esitetty. Tarvittaessa LUSAS-ohjelmasta saadaan tarkat arvot joka kohdalle. Tässä on ilmoitettu maksimiarvo ja värinä on punainen.

LUSAS-rakennemallin vahvuus on sen nopeus yksittäisissä tapauksissa, mutta sen muunneltavuus ei ole aivan samaa luokkaa. LUSAS:n toinen vahvuus on mitoitus suureiden kattava saaminen sekä kattavat lähtötietokirjastot.

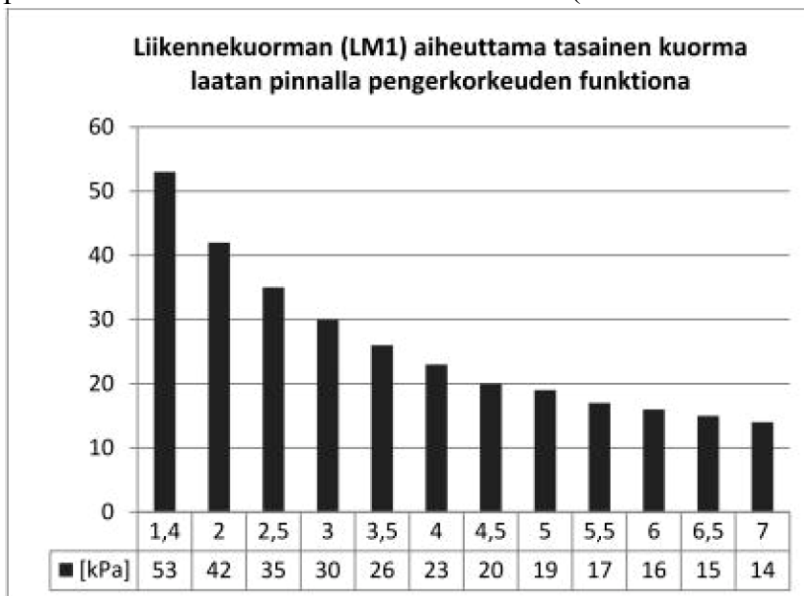
Pysyvät kuormat

Penkereen ja rakenteiden oman painon oletetaan siirtyvän paaluille. Maassa olevan paalun painoa ei tarvitse ottaa huomioon. Paalulaatan tilavuuspainona käytetään 25 kN/m^3 . Pengerkuorma p lasketaan laatan yläpuolisen maakerroksen DŽ vahvuisena pystykuormana. Penger-täytteen tilavuuspainona käytetään 20 kN/m^3 . Putkien painoa ei ole huomioitu, koska merkitys on erittäin vähäinen.

Pengerkuorma	$p \text{ (kN/m}^2\text{)}$
täyttöjen kokonaiskorkeus 2,1m	42,0
täyttöjen kokonaiskorkeus 6,2m	124,0

Liikennekuorma

Liikennekuorman LM1 aiheuttama tasainen pystykuorma on valittu ohjeen Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelun mukaan (Liikennevirasto 2014).



Kuva 9. Liikennekuorman LM1 aiheuttama tasainen pystykuorma pengerkorkeuden funktiona. (Liikennevirasto 2014 s. 19)

Kuormien yhdistely

Kuormat on yhdistelty Eurokoodin soveltamisohjeen Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet- NCCI 1 mukaan.

Määrävimmit voimasuureet ja siirtymät

Kannen mitoittavat momenttien arvot ja maksimipaalukuormat on saatu LUSAS-ohjelman rakennemallista. Taipumamitoitus on tehty murtorajatilatarkasteluna, koska paaluväli on riittävän lyhyt eli jännevälit laatussa ovat pienet sekä pituus- että poikkisuunnassa ja kuormitukset ovat riittävän pienet.

4.6 Rakenneosien mitoituksen tiivistelmä

Seuraavilla sivuilla on esitetty laatan taivutus- ja lävistysmitoitus. Laatan mitoituksessa LU-SAS-mallista saatuja tukialueen momenteja on tasattu ohjeen NCCI 2 Betonirakenteiden suunnittelu kohdan 5.11.2 mukaan. Rakennemallissa laatta on mallinnettu laattaelementein ja paalut kiinnittyvät laattaelementtien solmuihin. Lisäksi elementtijako laatasta on 100 mm, mikä täyttää ohjeen ehdon, jossa elementtijako saa tuen lähellä olla enintään $d/3$.

Ohjeen mukaan tukimomentti voidaan otaksua keskimääräiseksi leveydelle b . Käyttörajatilassa $b_{sls} = D + d \cdot 1,6$ ja murtorajatilassa $b_{uls} = D + d \cdot 2,0$. Kun D on paaluhatus sivumitta, d on kansilaatan tehollinen korkeus pituussuunnassa.

5 Esimerkkilaskelmat

5.1 Yläpinnan momentti poikkisuuntaan

Rasituksista tarvittiin taivutusmomentin ominaisarvo poikkisuuntaan laatan yläpinnassa tavallisessa ja pitkäaikaisessa tapauksessa sekä niiden avulla saatavat käyttöasteet, joiden pitää olla alle 100 %. Tarvittiin myös taivutusmomentin suunnitteluarvo poikkisuuntaan laatan yläpinnassa.

Excel-ohjelma antoi valitut laatan paksuuden ja leveyden arvot. Excel-ohjelma antoi myös todellisen peitepaksuuden raudoitukselle. Raudoituksen pinta-ala suureet ovat seuraavina tuloksina ja niissä on myös poikkipinta-alaminimi ilmoitettu. Näiden lisäksi tarvittiin veto-raudoitussuhde ja tehollinen korkeus, joita tarvitaan myöhemmissä laskennoissa.

Kun laatan paksuus on 400 – 600 mm, leveys on 3350 m, paaluväli pituussuuntaan 4 m ja poikkisuuntaan 1,95 m ja täyttö 3,7 - 6,2 m => niin $M_{ed} = 88 - 127$ kNm. M_{Ed} on toisen asteen vaikutukset huomioon ottava mitoitusmomentti, jonka suuruus voidaan arvioida.

Seuraavana suoritettiin murtorajatilatarkastelu (by 211 2013):

Tehollisen puristuspinnan suhteellinen korkeus

$$\beta = \omega = A_s \cdot f_{yd} / (b \cdot d \cdot f_{cd}) \quad (9)$$

Poikkileikkauksen sisäisten voimien momenttivarsi

$$z = d \cdot (1 - \beta / 2) \quad (10)$$

Momenttikapasiteetti

$$M_u = A_s \cdot f_{yd} \cdot z \quad (11)$$

Käyttörajatilatarkasteluun kuuluivat:

määritetyt arvot:

betonipeitteen vähimmäisarvo $C_{\min,du r} = 25$ mm

sijaintipoikkeama $\Delta C_{dev} = 10$ mm

halkeamaleveystarkastelussa käytettävä betonipeite $C = 35$ mm

laskennalliset arvot:

Neutraaliakselin etäisyys poikkileikkauksen puristetusta reunasta

$$x = d \cdot (\alpha \cdot \rho \cdot ((2 / (\alpha \cdot \rho) + 1)^{0,5} - 1)) \quad (12)$$

Poikkileikkauksen sisäisten voimien momenttivarsi

$$z = d - x / 3 \quad (13)$$

Betonipoikkileikkauksen tehokas korkeus

$$h_{c,eff} = \min(2,5 \cdot (h-d); (h-x)/3; h/2) \quad (14)$$

Betonipoikkileikkauksen tehokas pinta-ala

$$A_{c,eff} = b \cdot h_{c,eff} \quad (15)$$

Tehokas vetorausoitussuhde

$$\rho_{p,eff} = A_s / A_{c,eff} \quad (16)$$

Halkeamaleveystarkastelu tavallisella kuormayhdistelmällä:

määritetty arvo:

Halkeamaleveysraja tavallisella kuormitusyhdistelmällä

$$W_{kmax} = 0,2 \text{ mm}$$

Teräsännitys

$$\sigma_s = M_{ek,tav} / (z \cdot A_s) \quad (17)$$

Teräksen ja betonin venymien erotus

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = (\alpha_s \cdot k_t \cdot (f_{ctm} / \rho_{p,eff}) \cdot (1 + (E_s / E_{cm}) \cdot \rho_{p,eff})) / E_s \geq 0,6 \cdot (\sigma_s / E_s) \quad (18)$$

ϵ_{sm} on keskimääräinen raudoituksessa vaikuttava venymä
 ϵ_{cm} on keskimääräinen betonin venymä halkeamien välillä

Suurin halkeamaväli

$$S_{r,max} = 3,4 \cdot c + (k_1 \cdot k_2 \cdot 0,425 \cdot \phi_{sq}) / \rho_{p,eff} \quad (19)$$

Halkemaleveys $W_k = S_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (20)$

määritetty arvo:

Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax} = 0,28 \text{ mm}$

Halkeamaleveystarkastelu pitkäaikaisella kuormayhdistelmällä: (eroavaisuudet tavalliseen kuormayhdistelmään)

määritetty arvo:

Halkeamaleveysraja pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä

$$W_{kmax} = 0,15 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = (\alpha_s \cdot k_t \cdot (f_{ctm} / \rho_{p,eff}) \cdot (1 + (E_s / E_{cm}) \cdot \rho_{p,eff})) / E_s \quad (21)$$

 Muuten sama kuin tavallisessa kuormayhdistelmässä mutta $k_t = 0,4$

määritetty arvo:

Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax} = 0,21 \text{ mm}$

Taipumatarkastelu on tarpeeton. Katso liitteet 10-11.

5.2 Yläpinnan momentti pituussuuntaan

Tarkastellut momentit ovat pituussuuntaan laatan yläpinnassa. Muuten samat kaavat kuin yläpinnan momentissa poikkisuuntaan, mutta lasketaan poikkisuuntaisen raudoituksen mukaan. Suoritettiin murtorajatilatarkastelu, käyttörajatilatarkastelu, halkeamaleveystarkastelu tavalliselle kuormayhdistelmällä ja pitkäaikaisella kuormayhdistelmällä. Taipumatarkastelua ei tehty (jännevälit tarpeeksi pienet). Katso liite 14.

5.3 Alapinnan momentti poikkisuuntaan

Tarkastellut momentit ovat pituussuuntaan laatan alapinnassa. Muuten samat kaavat kuin yläpinnan momentissa poikkisuuntaan, eli lasketaan pituussuuntaisen raudoituksen mukaan. Lähtöarvot peitepaksuuksilla ja teräksien paksuuksilla ja väleille vaihtelee. Suoritettiin murtorajatilatarkastelu, käyttörajatilatarkastelu, halkeamaleveystarkastelu tavalliselle kuormayhdistelmällä ja pitkäaikaisella kuormayhdistelmällä. Taipumatarkastelua on tehty murtorajatilatarkasteluna.

5.4 Alapinnan momentti pituussuuntaan esimerkkilaskelma

Tuloste Excel-suunnittelutyökalusta. Momentit ovat laatan alapinnassa pituussuuntaan. Kaavat ovat vastaavia kuin edellä mainitut kohdissa 5.1 – 5.3.

Kun laatan paksuus on 400 – 600 mm, leveys on 3350 mm ja täyttö 3,7 - 6,2 m niin MEd = 131 - 197 kNm.

			käyttöaste		
Rasitukset	MEk,tav=	66 kNm	70,8 %		
	MEk,pit=	60 kNm	85,8 %		
	MEd=	88 kNm	54,7 %		
laatan paksuus	h=	400 mm			
laatan leveys	b=	1000 mm			
			cnom	työteräs	teräs
betonipeite	ctrue=	112 mm	100	12	0
raudoitus	d16,0	k150	d16 k300		d16 k300
pinta-ala	As=	1340 mm ²			
	As,min=	593 mm ²			
vetoraudoitusuhde	ρ=	0,004135			
tehollinen korkeus	d=	281 mm			

MURTORAJATILATARKASTELU

$$\beta = \omega = A_s \cdot f_{yd} / (b \cdot d \cdot f_{cd}) =$$

0,1149

	$z=d*(1-\beta/2)=$	265 mm
Momenttikapasiteetti	$Mu=As*fyd*z=$	161 kNm

KÄYTTÖRAJATILATARKASTELU

Betonipeitteen vähimmäisarvo $C_{min,dur}=$	25 mm
sijaintipoikkeama $\Delta c_{dev}=$	25 mm
halkeamaleveys tarkastelussa käytettävä betonipeite $C=$	35 mm

$x=d*(\alpha*\rho*((2/(\alpha*\rho)+1)^{0,5})-1)=$	56 mm
$z=d-x/3=$	262 mm
$h_{c,eff}=\min(2,5*(h-d);(h-x)/3;h/2)=$	115 mm
$A_{c,eff}=b*h_{c,eff}=$	114598 mm ²
$\rho_{p,eff}=A_s/A_{c,eff}=$	0,0117

Tavallinen kuormayhdistelmä

Halkeamaleveysraja tavallisella kuormitusyhdistelmällä $W_{kmax}=$	0,2 mm		
Teräsännitys $\sigma_s=ME_{k,tav}/(z*As)=$	188 MN/m ²		
$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}=(\alpha_s-kt*(f_{ctm}/\rho_{p,eff})*(1+(E_s/E_{cm})*\rho_{p,eff}))/E_s=$	0,000143	$0,6*(\sigma_s/E_s)=$	0,000564
$S_{r,max}=3,4*c+(k_1*k_2*0,425*\phi_{sq})/\rho_{p,eff}=$	352 mm		
Halkemaleveys $W_k = S_{r,max}*(\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm})=$	0,198 mm		
Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax}=$	0,28 mm		

Pitkäaikainen kuormayhdistelmä

Halkeamaleveysraja pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä $W_{kmax}=$	0,15 mm		
Teräsännitys $\sigma_s=ME_{k,pit}/(z*As)=$	169 MN/m ²		
$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}=(\alpha_s-kt*(f_{ctm}/\rho_{p,eff})*(1+(E_s/E_{cm})*\rho_{p,eff}))/E_s=$	0,000315	$0,6*(\sigma_s/E_s)=$	0,000507
$S_{r,max}=3,4*c+(k_1*k_2*0,425*\phi_{sq})/\rho_{p,eff}=$	352 mm		
Halkemaleveys $W_k = S_{r,max}*(\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm})=$	0,178 mm		
Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax}=$	0,21 mm		

5.5 Lävistys

Kun laatan paksuus on 400 – 600 mm, leveys on 3350 m ja täyttö 3,7 - 6,2 m => niin

$N_{dmax} = 907 - 1267$ kN

N_{dmax} kun lävistyskartion kohdalle jäävä kuorma vähennetty on 736 - 1028 kN

			($N_{dmax}=625$ kN)
	N_{dmax}	507 kN	(lävistyskartion kohdalle jäävä
	M_d	kNm	kuorma vähennetty N_{dmax} :sta)
Paalun teräshatun leveys	$b=$	0,25 m	
laatan paksuus	$h=$	0,35 m	
suojabetoni	$c_{nom}=$	0,05 m	
raudoitus \emptyset	$\emptyset=$	0,016 m	
tehollinen korkeus	$d=$	0,292 m	

vedetyn puolen raudoitus	x-suunta=	0,001005	m ²	
	y-suunta=	0,00134	m ²	
	A _u =	0,157	m ²	
	u=	2,168	m	
	k=1,6-d=	1,308		>1
	e=	0,000	mm	
vetoraudoitussuhde	ρ=	0,0029		<0,008
β=(0,4)/(1+(1,5*e)/√A _u)=	β=	0,4		koska epäkeskisyyys e = 0
V _c = k*β*(1+50*ρ)*u*d*f _{ctd} =		0,562	MN	90 %

A_u on tuen reunasta etäisyydellä d/2 olevan leikkauksen rajoittaman kuvion pinta-ala

u on tuen reunasta etäisyydellä d/2 olevan leikkauksen rajoittaman kuvion piiri

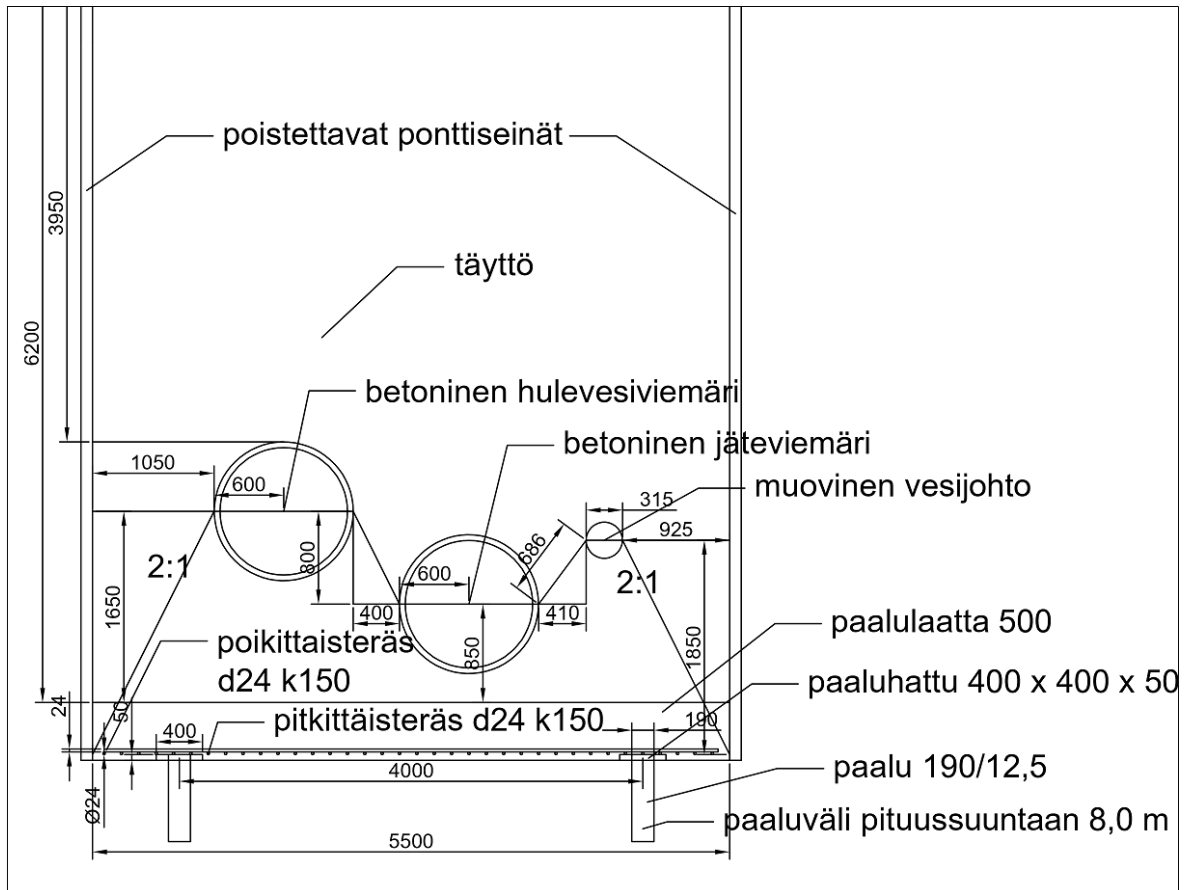
k on kerroin

e on epäkeskisyyys

Laatan lävistyskapasiteetti tarkistetaan murtotilassa kaavalla:

$$V_c = k \cdot \beta \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot u \cdot d \cdot f_{ctd}$$

Mitoituksen perusteella voidaan piirtää suunniteltu poikkileikkaus (kuva 10), jossa on esitetty paalutus. Paaluväli pituussuuntaan on 8 metriä. Tässä on 5500 mm leveän kaivannon ja 500 mm paksun paalulaatan tyypiratkaisu. Suojaetäisyydet ovat raudoituksilla 50 – 100 mm reunoista ja sivuista. Kaivantto on syvä 6,2 metriä, koska se on mitoituksellinen maksimi työssä, toki muitakin syvyyksiä on mitoitettu esimerkiksi 3,7 metriä.



Kuva 10. Tyypiratkaisu

5.6 Työkalun arviointi

Työkalu on yksinkertainen käyttää. Siitä saatavia tuloksia voi tarkentaa esimerkiksi raudoituksen suunnittelun osalta tapauksissa, joissa on tarkoituksenmukaista suunnitella yksityiskohtainen ja muuttuva raudoitus laatalle. Teräsbetonipaaluille tätä ohjelmaa ei ole suoraan suunniteltu, mutta tätä hyödyntämällä voidaan paalutuksena käyttää myös esimerkiksi 300 x 300 mm teräsbetonipaaluja. Laskennassa ja aloitusmäärityksissä käytetään kertoimia, jotka on saatu LUSAS-ohjelman tuloksista laskemalla. Kertoimilla laskeminen vaatii vähän käsi-työtä, mutta on silti nopeaa ja kätevää.

6 Johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset

Työn tavoite oli putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalun kehittäminen. Suunnittelutyökalu saatiin aikaiseksi, joten työn päämäärä saavutettiin. Toki työssä on vielä parannettavaa, kuten mitoitus- ja suunnittelukaavojen kehittäminen niin, ettei tarvittaisi FEM-laskentaohjelmaa ollenkaan, mutta mielestäni lopputulos oli kuitenkin lupauksia antava. Toisena tavoitteena oli putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalun kehittämiseen liittyvä geotekninen tarkastelu, suunnittelu ja mitoitus. Geotekninen tarkastelu oli pitkälti yleisellä tasolla, eikä menty juurikaan yksittäisiin tapauksiin. Geotekninen ympäristö putkijohtojen paalulaattojen suunnittelussa on kokonaisuudessaan haastava, kun eteen voi tulla monia rajoittavia tekijöitä kuten tilan puute eli rakennetaan kaupungin keskustassa tai katualueella. Pohjaveden sijainnin vaikutus suunnittelussa on otettava aina huomioon eli tarvitaanko pumppausta vedenpinnan alentamiseksi kaivannossa tai onko hydraulisen nousun tai nosteen aiheuttavan murtumisen riskiä. Eteen saattaa tulla myös hyvin löyhää savea ja pitää arvioida tarvitaanko maaperän stabilointia vai voidaanko laatta perustaa paaluille ja voidaanko työt suorittaa tarvittavilla koneilla, ettei ole liiallisen painuman riskiä. Työturvallisuuden huomiointi, kun työskennellään kaivannossa, on erityisen tärkeää, tämä edellyttää sen, että kaivanto on tarpeellisesti tuettu, eikä kaivannon reunoja rasiteta tarpeettomasti koneilla tai maaineksien kasaamisilla mitkä ovat perusasioita. Suunnitteluratkaisun pitäisi olla taloudellisin mahdollinen. Aikatauluttaminen on myös tärkeää, kun haetaan kustannustehokasta rakentamista.

Suunnittelutyökalun tekemisessä oli haasteellista yhdistää geotekninen ja rakennustekninen suunnittelu yhdeksi kokonaisuudeksi, ja sen takia geotekninen puoli vaati yksinkertaistuksia. Geoteknisissä parametreissa on oletettu, että täytön aiheuttaman kuorman huomiointi riittää tietyllä tarkkuudella. Rakennusteknisessä suunnittelussa huomioitiin muuttuvana kuormana liikennekuorma LM1. Laatan omapaino huomioitiin ja teräsputkipaaluihin käytetään aina paaluhattuja. Itse suunnittelutyökalusta voisi kertoa että, momenttien määrittäminen paalulaatoille LUSAS-ohjelmalla osoittautui vaikeaksi osaksi diplomityötä, johtuen siitä, koska siitä ei ollut aikaisempaa kokemusta. Aluksi määritettävät momentit riippuvat kaivannon syvyydestä eli putkien asennussyvyydestä ja kaivannon leveydestä sekä paaluvälistä. Nämä määrittävät paalulaatan paksuuden. Leikkausmitoituksen ja taivutusmitoituksen tarkastelun liittäminen suunnittelutyökaluun on varmasti tarpeen, että suunnittelutyökalusta tulee kattavampi.

Työssä käytettiin paljon lähdeteksteinä ja lähdemateriaaleina saatuja toteutuneita paalulaattasuunnitelmia ja laskentoja. Lähdemateriaaleja oli tarpeeksi saatavilla. Työn keskeisten ja tarpeellisten asioiden määrittäminen, sekä rajaaminen oli haasteellista. Työssä käytettyjen kaavojen valinta oli myös mielenkiintoista, kun työkalun toteutuksen voi tehdä monella tavalla. Käytetyt kaavat valittiin tilanteeseen sopivalla tavalla, sen mukaan mikä oli omasta mielestäni mahdollista työkalun toteutuksen kannalta. Suunnittelutyökalun riippumattomuus FEM-laskenta ohjelmasta olisi mielestäni tärkeää, mutta siihen ei tässä pystytty. Geoteknisen osan jääminen toteutuneen laajuiseksi, johtui varmaan työn monipuolisuudesta.

Seuraavaksi tavoitteena on, tehdä momenttilaskentaan jonkinlainen ohjelma, jonka avulla saisin tehtyä putkijohtojen paalulaattojen suunnitteluoppaan tai tyyppikortiston. Sitten, kun putkijohtojen paalulaattojen suunnittelutyökalulla tyyppikortistot on tehty, tutkitaan paalulaattojen tekemistä kuitubetonista. Siinä voisinkin yrittää tehdä perusteellisemmin myös geoteknistä suunnittelua.

Lähdeluettelo

Antti Auvinen, 2017, (DI) suunnitteluinsinööri, Vantaan kaupunki, haastattelu

Destia 2014 Koivuhaan kadut Mesikukantien paalulaatat suunnitelma

Espoon tekninen keskus 2014 PKTO-14, Putkikaivantojen tuentaohje, <http://www.es-poo.fi/download/noname/%7B5E4C1F97-D4A8-47CC-B9D8-C8EDCA516B79%7D/55896>, 12 s.

FINNMAP Infra Oy 2016 Neilikkatien suunnitelmat

FINNMAP Infra Oy, v.2016 Neilikkatien tukiseinälaskelmat

HSY:n vesihuolto, Verkostosuunnittelukäytännöt, vol.3, 10.6.2016, <https://www.hsy.fi>, 36 s.

InfraRYL 2017 – Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, <https://www.rakennus-tieto.fi/infraryl>

LIIKENNE- JA VIESTINTÄMINISTERIÖ 2010 NA-SFS-EN 1992-2 - Betonirakenteiden suunnittelu (Sillat), KANSALLINEN LIITE (LVM) SFS-EN 1992-2, <http://www.eurocodes.fi/1992/1992-2/NA%20SFS-EN1992-2-LVM.pdf>, 8 s.

LIIKENNE- JA VIESTINTÄMINISTERIÖ 2015 NA-SFS-EN 1991-2 - Siltojen liikennekuormat, KANSALLINEN LIITE (LVM) SFS-EN 1991-2, <http://www.eurocodes.fi/1991/1991-2/NA%20SFS-EN1991-2-LVM.pdf>, 16 s.

Liikennevirasto 2011 Siltojen rakennelaskelmat, https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2012-12_siltojen_rakennelaskelmat_web.pdf, 36 s.

Liikennevirasto 2012 Sillan geotekninen suunnittelu- Sillat ja muut taitorakenteet, https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2012-11_sillan_geotekninen_web.pdf, 96 s.

Liikennevirasto 2014 Eurokoodin sovellusohje – Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2 (16.9.2014), https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2014-25_ncci2_web.pdf, 114 s.

Liikennevirasto 2014 Eurokoodin sovellusohje – Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet
- NCCI 1, https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2014-24_ncci1_web.pdf, 128 s.

Liikennevirasto 2014 Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu, Pohjarakenteiden suunnitteluohjeet, verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi) ISSN-L 1798-663X ISSN 1798-6648 ISBN 978-952-255-407-9

Liikennevirasto 2017 Eurokoodin sovellusohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 (21.4.2017) https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf, 165 s.

Liikenneviraston ohjeisto, <https://julkaisut.liikennevirasto.fi>

Olli Lappalainen, 2017, (DI) kadunsuunnittelupäällikkö, Vantaan kaupunki, haastattelu, putkikaivannon pohjatutkimusohjelmasuositus on saatavilla julkaisussa (RIL 263-2014 s.27).

Rakennustieto 2016 RATU –menetelmäkortit, Rakentamisturvallisuusmenetelmäkortit, <https://www.rakennustieto.fi/kortistot/ratu>

Ramboll 2014 Loiskekujan paalulaatta 4 suunnitelma

Ramboll 2016 Loiskekuja / Raappavuorentien suunnitelmat

Ramboll 2016 Nokkos- ja Poppelitien vesijohtojen saneeraussuunnitelmat

Ramboll 2016 Peltolantien paalulaataston rakennesuunnitelmat

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry RIL 201-1-2011 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3 ja EN 1991-1-4, 190 s., ISBN 978-951-758-533-0.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry RIL 207-2009 Geotekninen suunnittelu, eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje v. 2009, 244 s., ISBN 978-951-758-505-7.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry ja Suomen Betoniyhdistys ry, RIL 202-2011/by 61 Betonirakenteiden suunnitteluohje v.2011, Eurokoodit EN 1992-1-1 ja EN 1992-1-2, 152 s., ISBN 978-951-758-536-1.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry ja Suomen Geoteknillinen Yhdistys SGY ry RIL 254-2011 Paalutusohje v. 2011, osa 1: suunnittelun perusteet ja osa 2: paalutusohje, 261 s., ISBN 978-951-758-528-6.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry ja Suomen Geoteknillinen Yhdistys SGY ry RIL 263-2014 Kaivanto-ohje v. 2014, 208 s., ISBN 978-951-758-572-9.

Sahlstedt S., Koskenvesa A., Lindberg R., Kivimäki C., Palolahti T., Lahtinen M., Talvibetonointi (Betoniteollisuus ry, Mittaviiva Oy 2013), www.rudus.fi/Download/23829/Talvibetonointi-kirja%202013.pdf, 88 s., julkaisija Betoniteollisuus ry, kustantaja: Suomen Rakennusmedia Oy Unioninkatu 14 00130 Helsinki www.rakennusmedia.fi ISBN 978-952-269-083-8 ISBN 978-952-269-084-5 (pdf) © Betoniteollisuus ry, Mittaviiva Oy

Suomen Betoniyhdistys by 65 – Betoninormit 2016, 2. painos, 130 s., ISBN 978-952-68068-4-6

Suomen Betoniyhdistys by 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, s.711, ISBN 978-952-5075-96-0

Suomen Betoniyhdistys by 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 - osa 1, 2. painos, s. 250, ISBN 978-952-67169-9-2

Suomen Betoniyhdistys by 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2014 - osa 2, 2. painos, s. 211, ISBN 978-952-68068-2-2

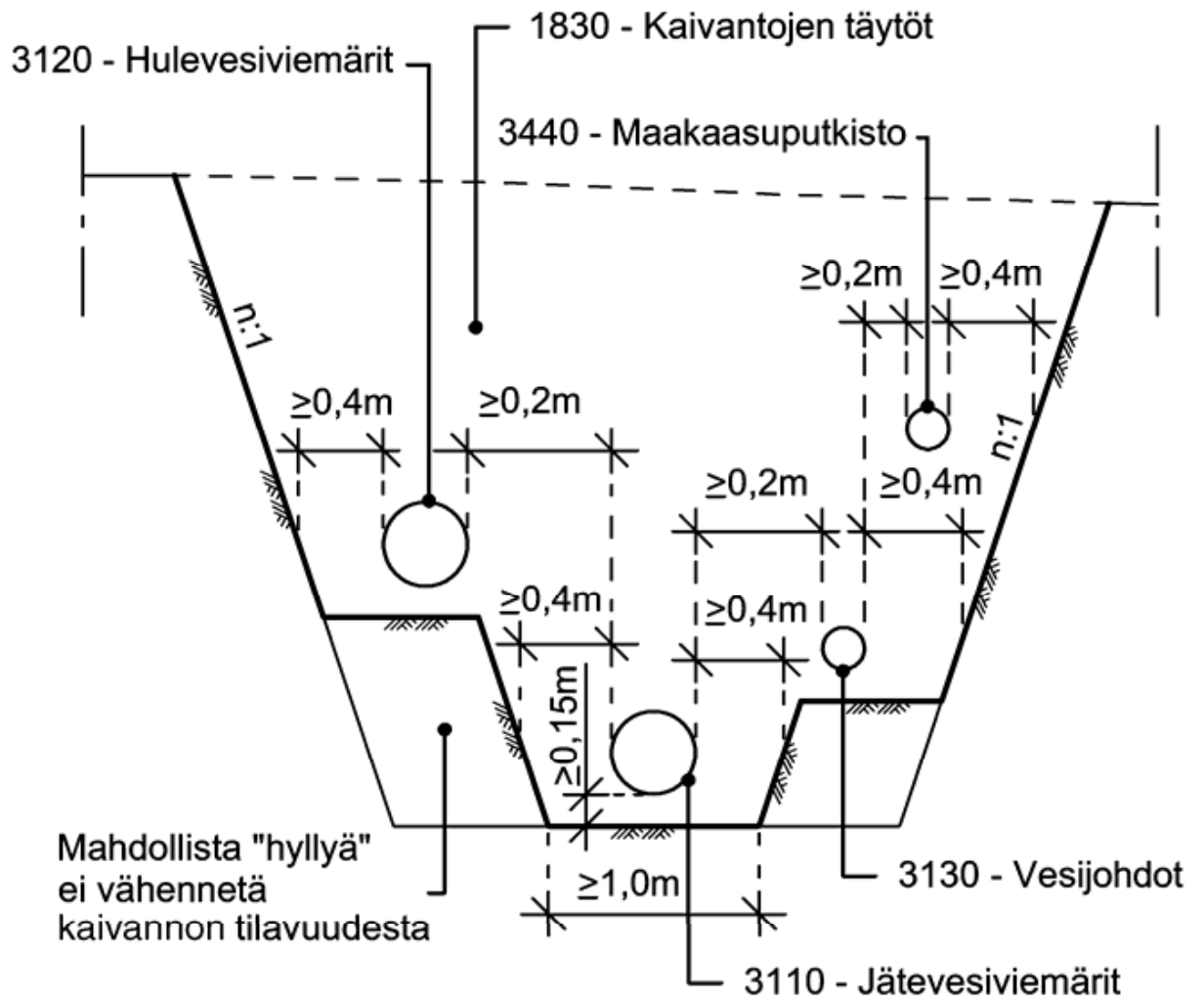
Tyynelä 2015 Kaivanto-ohje 2014-koulutus, <http://docplayer.fi/18098779-Ril263-kaivanto-ohje-tuetun-kaivannon-mitoitus-petri-tyynela-ramboll-finland-oy.html>, 27 s.

WSP 2014 Ruusumäenraitin suunnitelmat tarkastettavaksi

Liiteluettelo

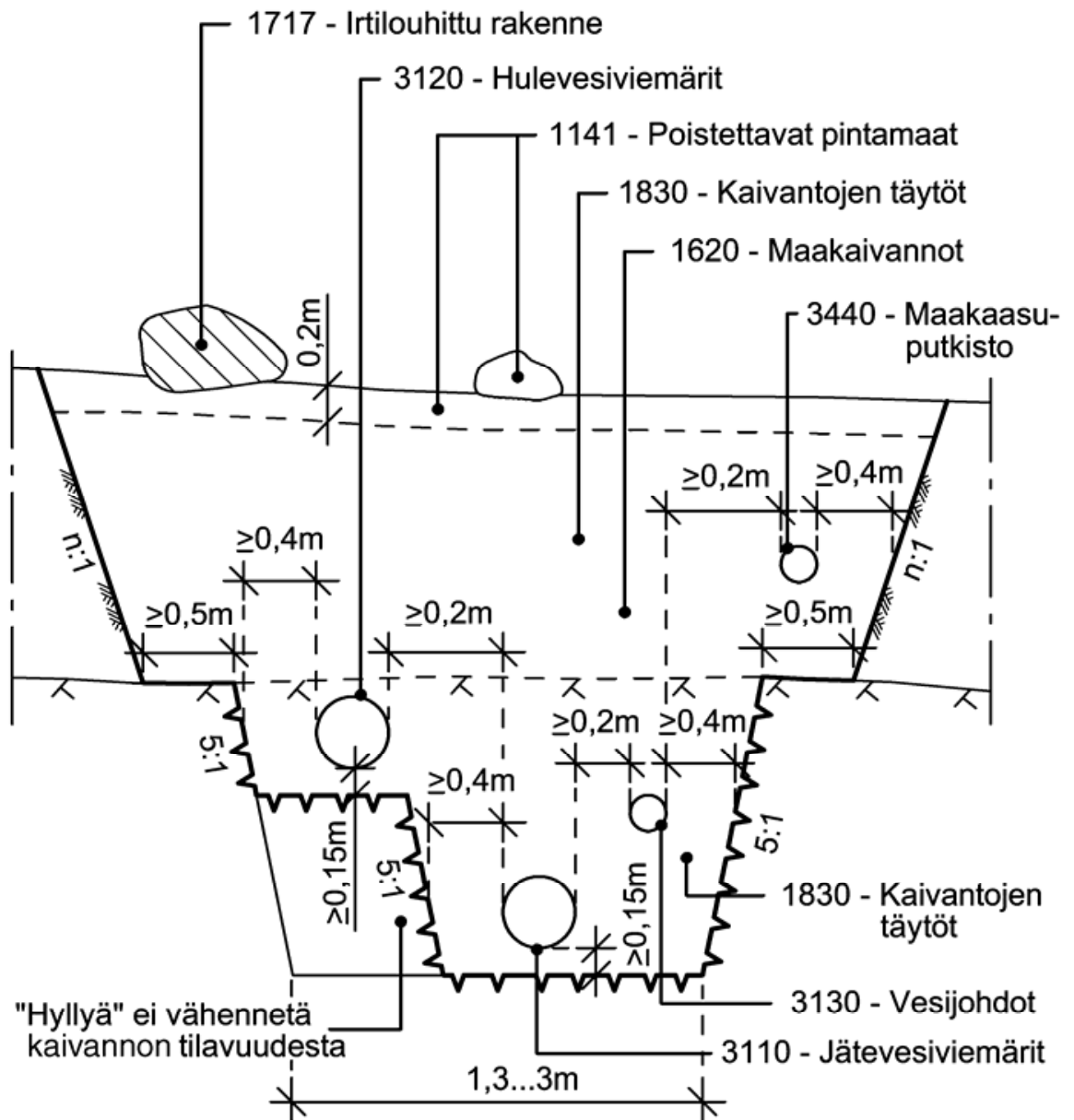
1. Maahan kaivettujen putki- ja johtokaivannon määrämittaus ja työvarat.
(INFRA-RYL)
2. Kallioon louhittujen putkikaivantojen mittoja ja työmittoja. (INFRA-RYL)
3. Saven leikkauslujuus 5 kN/m^2 , yksi tukitaso
4. Saven leikkauslujuus 10 kN/m^2 , yksi tukitaso
5. Saven leikkauslujuus 10 kN/m^2 , kaksi tukitasoa
6. Saven leikkauslujuus 15 kN/m^2 , kaksi tukitasoa
7. Veden kyllästävä löyhä kitkamaa
8. Tuentaelementtien käyttö
9. Lähtötiedot Excel-suunnittelutyökalusta
10. Excel-suunnittelutyökalun tulosteet
11. LUSAS-laskentatulosteet

Liite 1.



Maahan kaivettujen putki- ja johtokaivannon määrämittaust ja työvarat. (InfraRYL 2010 - Infarakentamisen yleiset laatuvaatimukset)

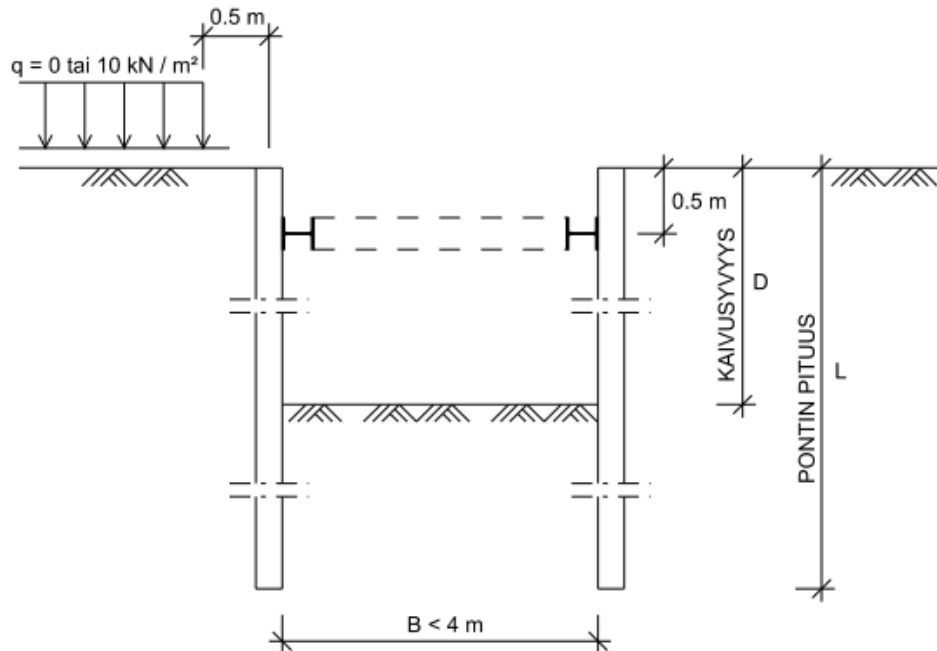
Liite 2.



Kallioon louhittujen putkikaivantojen mittoja ja työmittoja. (InfraRYL 2010 - Infra-
rakentamisen yleiset laatuvaatimukset)

Liite 3.

POHJAMAAN LEIKKAUSLUJUUS $5 \text{ kN} / \text{m}^2$
 YHDELTÄ TASOLTA TUETTU KAIVANTO
 MK 1:50



TYÖOHJE:

- Tukikehikkojen asennus.
- Pontit asennetaan käyttäen tukikehikkoja ohjureina.
- Tukikehikot ripustetaan pontteihin ketjuilla.
- Kun pintakuormaa ei sallita ($q=0$) kaivannon kaivu tapahtuu kaivannon päästä poikittain lyödyn ponttiseinän takaa.
Kaivannon sivuilla ei saa liikkua työkoneilla eikä maita saa läjittää kaivannon sivuille.
- Kun sallitaan 10 kN/m^2 pintakuormaa kaivannon sivuilla saa olla enintään 21 tonnin työkone tai 0.5 m kaivumaita yli puolen metrin etäisyydellä.
- Tukikehikot poistetaan ja pontit vedetään ylös.

SUURIN KAIVUSYVYYS JA VASTAAVAT TUKIRAKENTEET

Ponttipituus	Kaivussyvyys	Vaakapalkki	Poikkituki
$L = 8 \text{ m}$ ($q=10 \text{ kN/m}^2$)	$D = 1.6 \text{ m}$	HE 240 B	HE 240 B k 6 m
$L = 8 \text{ m}$ ($q=0$) *	$D = 2.2 \text{ m}$	HE 240 B	HE 240 B k 6 m
$L = 12 \text{ m}$ ($q=10 \text{ kN/m}^2$)	$D = 2.0 \text{ m}$	HE 300 B	HE 240 B k 6 m
$L = 12 \text{ m}$ ($q=0$) *	$D = 2.6 \text{ m}$	HE 300 B	HE 240 B k 6 m

* EDELLYTTÄÄ POIKITTAISTA PONTTISEINÄÄ KAIVANNON PÄÄTTYYN

Kun ponttien alapäävät ovat vähintään 1 metrin silttikerroksessa:

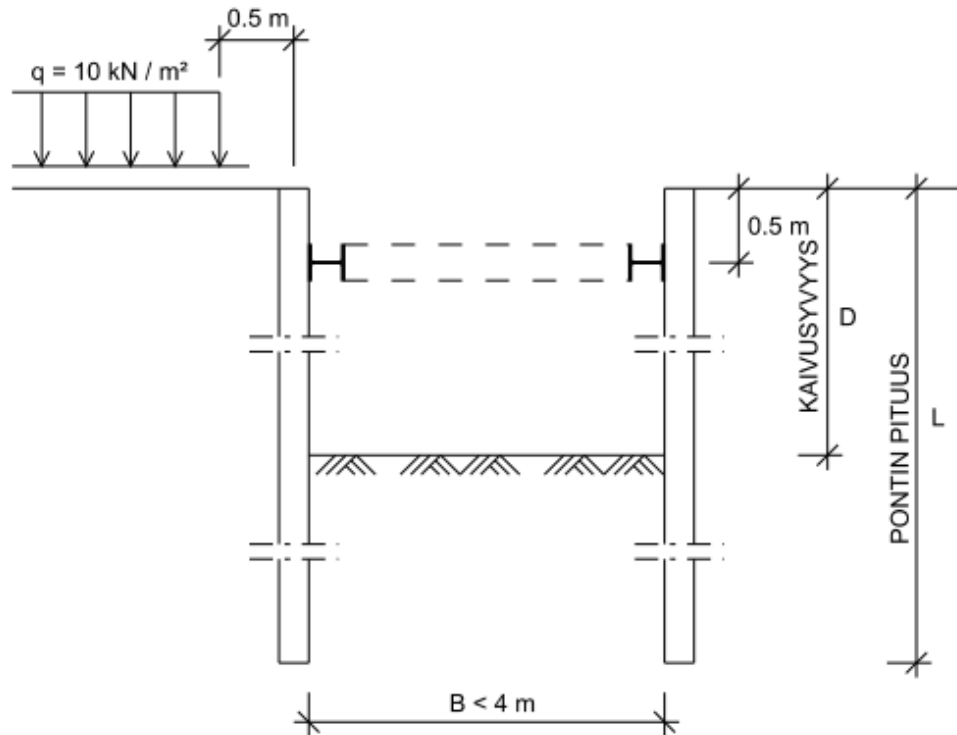
Ponttipituus	Kaivussyvyys	Vaakapalkki	Poikkituki
$L = 8 \text{ m}$ ($q=10 \text{ kN/m}^2$)	$D = 2.8 \text{ m}$	HE 300 B	HE 300 B k 6 m

Tällöin tulee hydraulisen murtuman vaara tarkistaa.

(PKTO-14 PUTKIKAIVANTOJEN TUENTAOHJE 30.9.2014
 Espoon kaupunki, Tekninen keskus / Geotekniikkayksikkö)

Liite 4.

POHJAMAAN LEIKKAUSLUJUUS 10 kN / m^2 YHDELTÄ TASOLTA TUETTU KAIVANTO MK 1:50



TYÖOHJE:

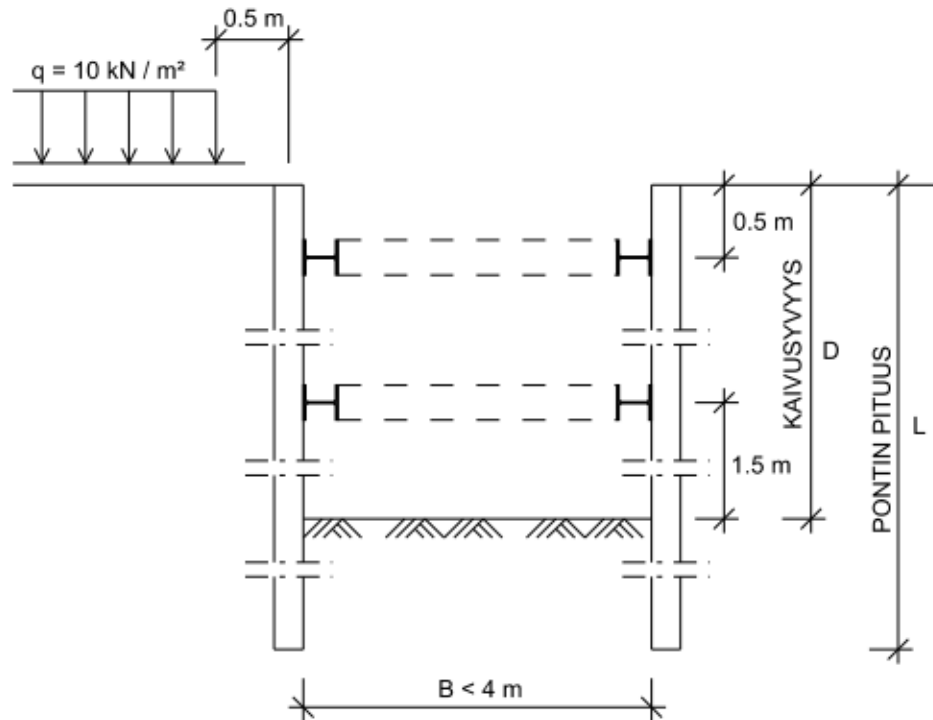
- Tukikehikkojen asennus.
- Pontit asennetaan käyttäen tukikehikkoja ohjureina.
- Tukikehikot ripustetaan pontteihin ketjuilla.
- Kaivun tapahtuessa kaivannon päästä, kaivuluiskan tulee olla loivempi kuin 1:2.
- Kaivannon sivuilla saa olla enintään 21 tn työkone tai 0.5 m kaivumaita yli puolen metrin etäisyydellä.
- Tukikehikot poistetaan ja pontit vedetään ylös.

SUURIN KAIVUSYVYYS JA VASTAAVAT TUKIRAKENTEET

Ponttipituus	Kaivussyvyys	Vaakapalkki	Poikkituki
$L = 8 \text{ m}$	$D = 2.7 \text{ m}$	HE 240 B	HE 240 B k 6 m
$L = 12 \text{ m}$	$D = 3.2 \text{ m}$	HE 240 B	HE 240 B k 6 m

Liite 5.

POHJAMAAN LEIKKAUSLUJUUS $10 \text{ kN} / \text{m}^2$ KAHDELTA TASOLTA TUETTU KAIVANTO MK 1:50



TYÖOHJE:

- Asennetaan kahdet tukikehikot päällekkäin.
- Pontit asennetaan käyttäen tukikehikkoja ohjureina.
- Ylempi kehikko ripustetaan pontteihin, alempi ripustetaan ylempään kehikkoon ketjuilla.
- Kaivun tapahtuessa kaivannon päästä, kaivuluiskan tulee olla loivempi kuin 1:2
- Kaivannon sivuilla saa olla enintään 21 tn työkone tai 0.5 m kaivumaita yli puolen metrin etäisyydellä.
- Tukikehikot poistetaan ja pontit vedetään ylös.

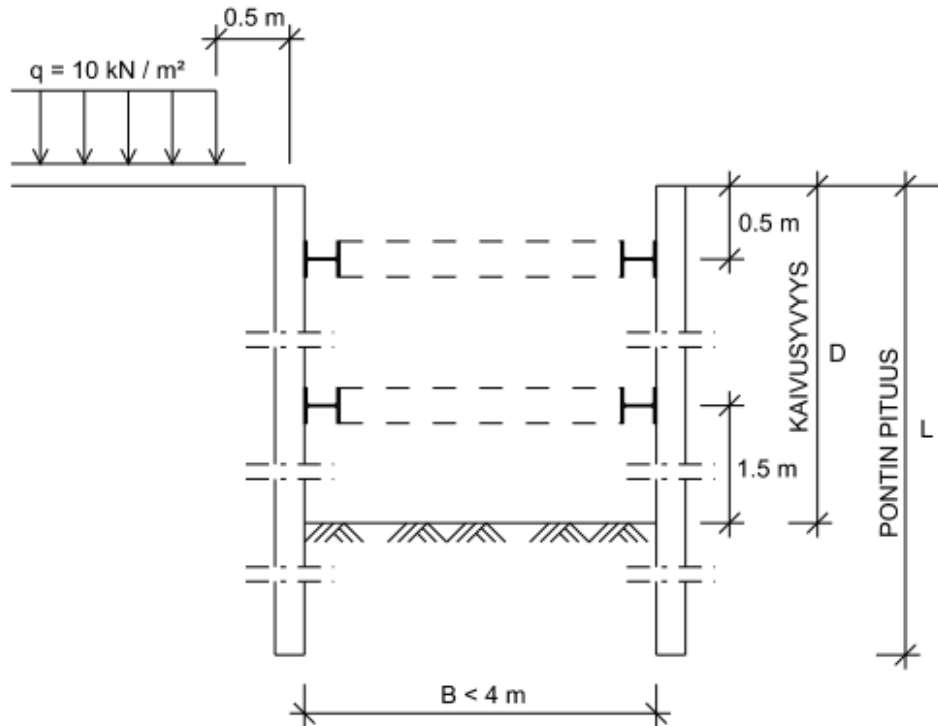
SUURIN KAIVUSYVYYS JA VASTAAVAT TUKIRAKENTEET

Ponttipituus	Kaivussyvyys	Alempi tukitaso	
		Vaakapalkki	Poikkituki
L = 8 m	D = 3.3 m	HE 300 B	HE 240 B k 3 m
L = 12 m	D = 4.0 m	HE 300 B	HE 240 B k 3 m

Ylempi tukitaso vastaava kuin yhdeltä tasolta tuetussa kaivannossa.

Liite 6.

POHJAMAAN LEIKKAUSLUJUUS $15 \text{ kN} / \text{m}^2$ KAHDELTA TASOLTA TUETTU KAIVANTO MK 1:50



TYÖOHJE:

- Asennetaan kahdet tukikehikot päällekkäin.
- Pontit asennetaan käyttäen tukikehikkoja ohjureina.
- Ylempi kehikko ripustetaan pontteihin, alempi ripustetaan ylempään kehikkoon ketjuilla.
- Kaivun tapahtuessa kaivannon päästä, kaivuluiskan tulee olla loivempi kuin 1:1
- Kaivannon sivuilla saa olla enintään 21 tn työkone tai 0.5 m kaivumaita yli puolen metrin etäisyydellä.
- Tukikehikot poistetaan ja pontit vedetään ylös.

SUURIN KAIVUSYVYYS JA VASTAAVAT TUKIRAKENTEET

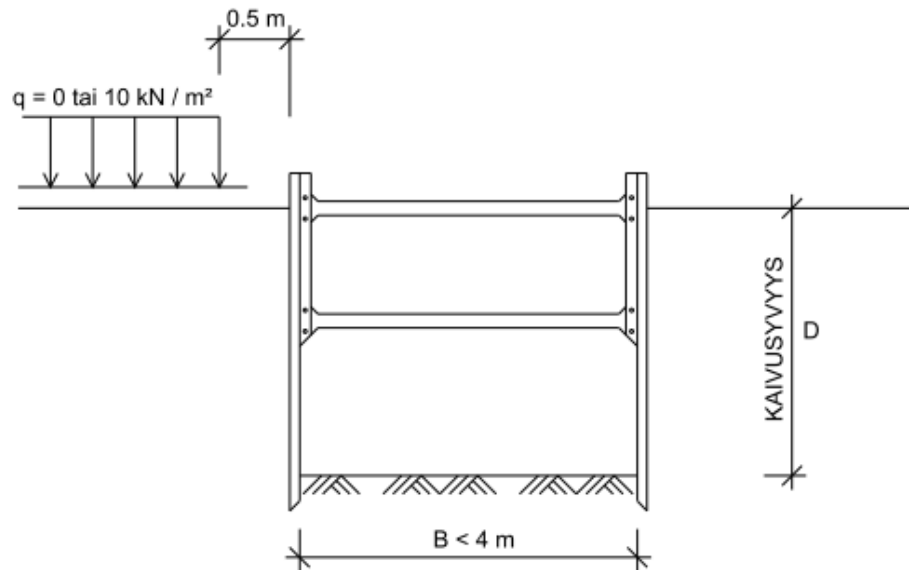
Ponttipituus	Kaivussyvyys	Alempi tukitaso	
		Vaakapalkki	Poikkituki
L = 8 m	D = 4.7 m	HE 300 B	HE 240 B k 3 m
L = 12 m	D = 5.0 m	HE 300 B	HE 240 B k 3 m

Ylempi tukitaso vastaava kuin yhdeltä tasolta tuetussa kaivannossa.

(PKTO-14 PUTKIKAIVANTOJEN TUENTAOHJE 30.9.2014
Espoon kaupunki, Tekninen keskus / Geotekniikkayksikkö)

Liite 8.

TUENTAELEMENTTIEN KÄYTTÖ EURO VERBAU -ELEMENTIT TAI VASTAAVAT MK 1:50



TUENTAELEMENTTIEN SUURIN KÄYTTÖSYVYYS SAVEN LEIKKAUSLUJUUDEN JA PINTAKUORMAN MUKAAN

Su (kN/m ²)	D max (m)	q (kN/m ²)
5	1.5	0
7	2.0	0
10	2.2	10
10	2.8	0
15	3.5	10
15	4.1	0

Kitkamaassa ja tätä syvemmissä kaivannoissa tulee mitoitus tehdä tapauskohtaisesti.
Hydraulisen murtuman vaara tulee aina tarkistaa.

(PKTO-14 PUTKIKAIVANTOJEN TUENTAOHJE 30.9.2014
Espoon kaupunki, Tekninen keskus / Geotekniikkayksikkö)

Liite 9.

Lähtötiedot Excel-suunnittelutyökalusta (keltainen ruutu).

alasetoalikko=

Betoni	C30/37		Teräs	A500HW	
toteutusluokka	3		toteutusluokka	3	
osavarmuusluku	$\gamma_c =$	1,35	osavarmuusluku	$\gamma_s =$	1,1
fck=	30	MN/m ²	fyk=	500	MN/m ²
fcd=	18,9	MN/m ²	fyd=	455	MN/m ²
fctm=	2,9	MN/m ²	Es=	200000	MN/m ²
Ecm=	33000	MN/m ²	$\alpha =$	6,06	

laatan paksuus	h=	400	mm
laatan leveys	b=	1000	mm

raudoitus pituussuuntaan	d16,0	k200
d=	16	mm
k=	200	mm
kpl=	5,00	
As=	1005,31	mm ²

raudoitus poikkisuuntaan	d16,0	k150	pituussuuntaan	
d=	16	mm	hakatangon	$\emptyset h = d =$ 0 mm
k=	150	mm	h =	400 mm
kpl=	6,67		c nom =	50 mm
As=	1340,41	mm ²		

poikkileikkauksen tehollinen leveys	bt=	1,00	m	poikkisuuntaan	
				hakatangon	$\emptyset h = d =$ 12 mm
				h =	400 mm
				c nom =	100 mm

Lävistys

Paalun teräshatun leveys	b=	250	mm	Laatan paksuus h=	400	mm
	hl = h - cnom	350	mm	Laatan jänneväli L=	10,8	m
h on laatan paksuus	h=	160 mm + n*20 mm				

L on laatan suurin jänneväli	h=L/30...L/27	fck=	30	MN/m ²
		fctd=	1,5	MN/m ²

kt on kuorman vaikutusajan kerroin = 0,6 lyhytaikaisille kuormitusyhdistelmille ja = 0,4 pitkäaikaisille kuormitusyhdistelmille

k1 on tankojen tartuntaominaisuuden huomioiva kerroin = 0,8 betoniteräkselle (esim. A500HW tai B500B)

k2 on venymäjakauman huomioiva kerroin = 0,5 taivutukselle ja = 1,0 pelkälle vedolle

A_u on tuen reunasta etäisyydellä $d/2$ olevan leikkauksen rajoittaman kuvion pinta-ala

u on tuen reunasta etäisyydellä $d/2$ olevan leikkauksen rajoittaman kuvion piiri

ρ on vetoraudoitussuhde = $\sqrt{\frac{A_{sx} * A_{sy}}{b^2 * d^2}}$

β on tehollisen puristuspinnan suhteellinen korkeus

Liite 10.

Excel-suunnittelutyökalun tulosteet

Yläpinnan momentti poikkisuuntaan

Kun laatan paksuus on 400 – 600 mm, leveys on 3350 m ja täyttö 3,7 - 6,2 m niin MEd = 88 - 127 kNm.

		käyttöaste					
Rasitukset	MEk,tav=	51	kNm	71,9	%		
	MEk,pit=	49	kNm	92,2	%		
	MEd=	66	kNm	43,8	%		
laatan paksuus	h=	400	mm				
laatan leveys	b=	1000	mm				
betonipeite	ctrue=	50	mm	cnom	työteräs	teräs	
				50	0	0	
raudoitus	d16,0	k200		d16	k400	d16	k400
pinta-ala	As=	1005,31	mm ²				
	As,min	722	mm ²				
vetoraudoitussuhde	ρ=	0,003395					
tehollinen korkeus	d=	342	mm				

MURTORAJATILATARKASTELU

	$\beta = \omega = A_s \cdot f_{yd} / (b \cdot d \cdot f_{cd}) =$	0,0708
	$z = d \cdot (1 - \beta / 2) =$	330 mm
Momenttikapasiteetti	$M_u = A_s \cdot f_{yd} \cdot z =$	151 kNm

KÄYTTÖRAJATILATARKASTELU

Betonipeitteen vähimmäisarvo C _{min,dur} =	25	mm
sijaintipoikkeama Δ _{cdev} =	10	mm
halkeamaleveys tarkastelussa käytettävä betonipeite C=	35	mm

$x = d \cdot (\alpha \cdot \rho \cdot ((2 / (\alpha \cdot \rho) + 1)^{0,5} - 1)) =$	63	mm
$z = d - x / 3 =$	321	mm
$h_{c,eff} = \min(2,5 \cdot (h - d); (h - x) / 3; h / 2) =$	112	mm
$A_{c,eff} = b \cdot h_{c,eff} =$	112440	mm ²
$\rho_{p,eff} = A_s / A_{c,eff} =$	0,0089	

Tavallinen kuormayhdistelmä

Halkeamaleveysraja tavallisella kuormitusyhdistelmällä W _{kmax} =	0,2	mm
Teräsjännitys σ _s =ME _{k,tav} /(z·A _s)=	158	MN/m ²
ε _{sm} -ε _{cm} =(α _s -k _t ·(f _{ctm} /ρ _{p,eff})·(1+(E _s /E _{cm})·ρ _{p,eff}))/E _s =	-0,0002357	0,6·(σ _s /E _s)= 0,000474
S _{r,max} =3,4·c+(k ₁ ·k ₂ ·0,425·φ _{sq})/ρ _{p,eff} =	423	mm
Halkemaleveys W _k = S _{r,max} ·(ε _{sm} -ε _{cm})=	0,201	mm
Korotettu halkeamaleveysraja W _{kmax} =	0,28	mm

Pitkäaikainen kuormayhdistelmäHalkeamaleveysraja pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä $W_{kmax} =$

0,15 mm

Teräsjäännitys $\sigma_s = M_{Ek,pit} / (z * A_s) =$ 148 MN/m² $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = (\alpha_s - k_t * (f_{ctm} / \rho_p, eff) * (1 + (E_s / E_{cm}) * \rho_p, eff)) / E_s =$ 5,5048E-05 0,6 * (σ_s / E_s) = 0,000296 $S_{r,max} = 3,4 * c + (k_1 * k_2 * 0,425 * \phi_{sq}) / \rho_p, eff =$

423 mm

Halkemaleveys $W_k = S_{r,max} * (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) =$

0,125 mm

Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax} =$

0,21 mm

Yläpinnan momentti pituussuuntaanKun laatan paksuus on 400 – 600 mm, leveys on 3350 m ja täyttö 3,7 - 6,2 m niin $M_{Ed} = 93 - 117$ kNm

käyttöaste

Rasitukset	$M_{Ek,tav} =$	87 kNm	74,9 %		
	$M_{Ek,pit} =$	78 kNm	89,5 %		
	$M_{Ed} =$	104 kNm	52,4 %		
laatan paksuus	$h =$	400 mm			
laatan leveys	$b =$	1000 mm			
betonipeite	$c_{true} =$	50 mm	50	0	0
raudoitus	$d_{16,0}$	k150	d16	k300	d16
pinta-ala	$A_s =$	1340 mm ²			k300
	$A_{s,min} =$	722 mm ²			
vetorausoitussuhde	$\rho =$	0,003395			
tehollinen korkeus	$d =$	342 mm			

MURTORAJATILATARKASTELU $\beta = \omega = A_s * f_{yd} / (b * d * f_{cd}) =$

0,0944

 $z = d * (1 - \beta / 2) =$

326 mm

Momenttikapasiteetti $M_u = A_s * f_{yd} * z =$

199 kNm

KÄYTTÖRAJATILATARKASTELUBetonipeitteen vähimmäisarvo $C_{min,dur} =$

25 mm

sijaintipoikkeama $\Delta c_{dev} =$

10 mm

halkeamaleveystarkastelussa käytettävä betonipeite $C =$

35 mm

 $x = d * (\alpha * \rho * (((2 / (\alpha * \rho)) + 1)^{0,5}) - 1) =$

63 mm

 $z = d - x / 3 =$

321 mm

 $h_{c,eff} = \min(2,5 * (h - d); (h - x) / 3; h / 2) =$

112 mm

 $A_{c,eff} = b * h_{c,eff} =$ 112440 mm² $\rho_p, eff = A_s / A_{c,eff} =$

0,0119

Tavallinen kuormayhdistelmäHalkeamaleveysraja tavallisella kuormitusyhdistelmällä $W_{kmax} =$

0,2 mm

Teräsännitys $\sigma_s = M_{Ek,tav} / (z * A_s) =$	202	MN/m ²	
$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = (\alpha_s - k_t * (f_{ctm} / \rho_p, eff) * (1 + (E_s / E_{cm}) * \rho_p, eff)) / E_s =$	0,000228		$0,6 * (\sigma_s / E_s) = 0,000607$
$S_{r,max} = 3,4 * c + (k_1 * k_2 * 0,425 * \phi_{sq}) / \rho_p, eff =$	347	mm	
Halkemaleveys $W_k = S_{r,max} * (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) =$	0,211	mm	
Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax} =$	0,28	mm	

Pitkäaikainen kuormayhdistelmä

Halkeamaleveysraja pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä $W_{kmax} =$	0,15	mm	
Teräsännitys $\sigma_s = M_{Ek,pit} / (z * A_s) =$	179	MN/m ²	
$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = (\alpha_s - k_t * (f_{ctm} / \rho_p, eff) * (1 + (E_s / E_{cm}) * \rho_p, eff)) / E_s =$	0,000371		$0,6 * (\sigma_s / E_s) = 0,000357$
$S_{r,max} = 3,4 * c + (k_1 * k_2 * 0,425 * \phi_{sq}) / \rho_p, eff =$	347	mm	
Halkemaleveys $W_k = S_{r,max} * (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) =$	0,124	mm	
Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax} =$	0,21	mm	

Alapinnan momentti poikkisuuntaan

Kun laatan paksuus on 400 – 600 mm, leveys on 3350 m ja täyttö 3,7 - 6,2 m niin $M_{Ed} = 65 - 92$ kNm

			käyttöaste		
Rasitukset	$M_{Ek,tav} =$	23 kNm			40,4 %
	$M_{Ek,pit} =$	22 kNm			51,5 %
	$M_{Ed} =$	30 kNm			24,5 %
laatan paksuus	$h =$	400 mm			
laatan leveys	$b =$	1000 mm			
betonipeite	$c_{true} =$	112 mm	c_{nom}	työteräs	teräs
			100	12	0
raudoitus	$d_{16,0}$	k200	d16	k400	d16
pinta-ala	$A_s =$	1005 mm ²			k400
	$A_{s,min} =$	593 mm ²			
vetorauoitussuhde	$\rho =$	0,004135			
tehollinen korkeus	$d =$	281 mm			

MURTORAJATILATARKASTELU

	$\beta = \omega = A_s * f_{yd} / (b * d * f_{cd}) =$	0,0862
	$z = d * (1 - \beta / 2) =$	269 mm
Momenttikapasiteetti	$M_u = A_s * f_{yd} * z =$	123 KNm

KÄYTTÖRAJATILATARKASTELU

Betonipeitteen vähimmäisarvo $C_{min,dur} =$	25	mm
sijaintipoiikkeama $\Delta c_{dev} =$	25	mm
halkeamaleveystarkastelussa käytettävä betonipeite $C =$	35	mm
$x = d * (\alpha * \rho * (((2 / (\alpha * \rho) + 1) ^ 0,5) - 1)) =$	56	mm
$z = d - x / 3 =$	262	mm

$$h_{c,eff} = \min(2,5 \cdot (h-d); (h-x)/3; h/2) =$$

$$A_{c,eff} = b \cdot h_{c,eff} =$$

$$\rho_{p,eff} = A_s / A_{c,eff} =$$

115 mm

114598 mm²

0,0088

Tavallinen kuormayhdistelmä

Halkeamaleveysraja tavallisella kuormitusyhdistelmällä $W_{kmax} =$

Teräsjännitys $\sigma_s = M_{Ek,tav} / (z \cdot A_s) =$

$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = (\alpha_s \cdot k_t \cdot (f_{ctm} / \rho_{p,eff}) \cdot (1 + (E_s / E_{cm}) \cdot \rho_{p,eff})) / E_s =$

$S_{r,max} = 3,4 \cdot c + (k_1 \cdot k_2 \cdot 0,425 \cdot \phi_{sq}) / \rho_{p,eff} =$

Halkemaleveys $W_k = S_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) =$

Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax} =$

0,2 mm

87 MN/m²-0,00061 0,6 * (σ_s / E_s) = 0,000262

429 mm

0,112 mm**0,28 mm**

Pitkäaikainen kuormayhdistelmä

Halkeamaleveysraja pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä $W_{kmax} =$

Teräsjännitys $\sigma_s = M_{Ek,pit} / (z \cdot A_s) =$

$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = (\alpha_s \cdot k_t \cdot (f_{ctm} / \rho_{p,eff}) \cdot (1 + (E_s / E_{cm}) \cdot \rho_{p,eff})) / E_s =$

$S_{r,max} = 3,4 \cdot c + (k_1 \cdot k_2 \cdot 0,425 \cdot \phi_{sq}) / \rho_{p,eff} =$

Halkemaleveys $W_k = S_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) =$

Korotettu halkeamaleveysraja $W_{kmax} =$

0,15 mm

81 MN/m²-0,00029 0,6 * (σ_s / E_s) = 0,000163

429 mm

0,070 mm**0,21 mm**

Liite 11.

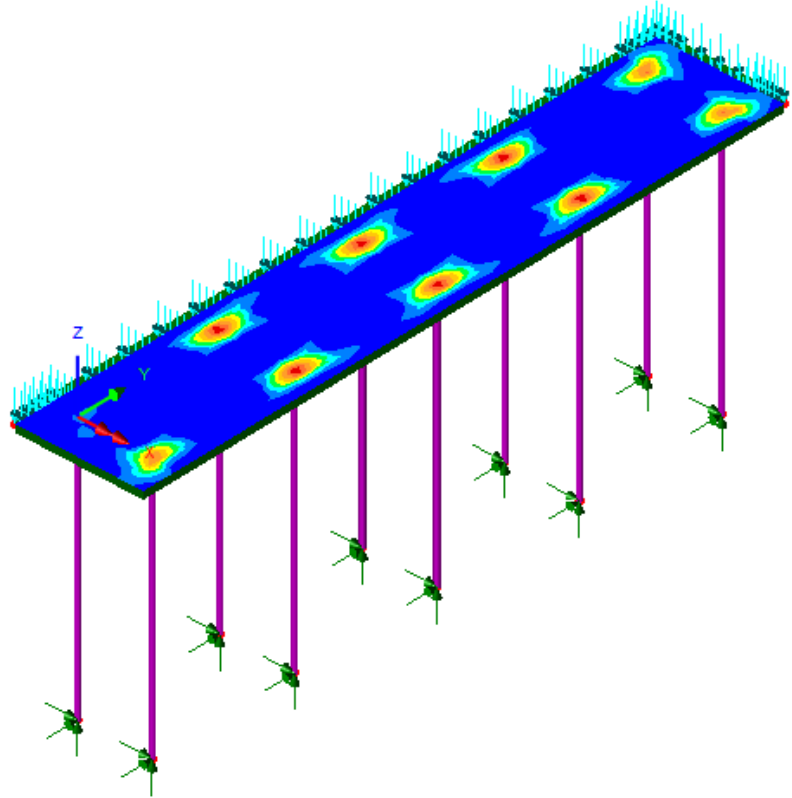
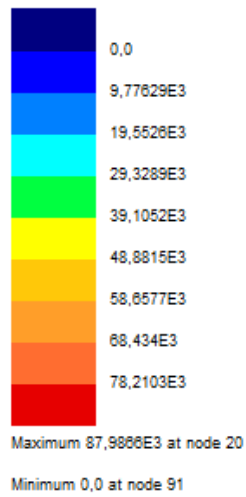
LUSAS-laskentatulosteet: Laatan paksuus on 400 mm, täyttö on 3,7 m, liikennekuorma on LM1, teräsputkipaalu on pyöreä 140/10 mm.

Loadcase: 2:kuormitustapaus1

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: Mx(T)

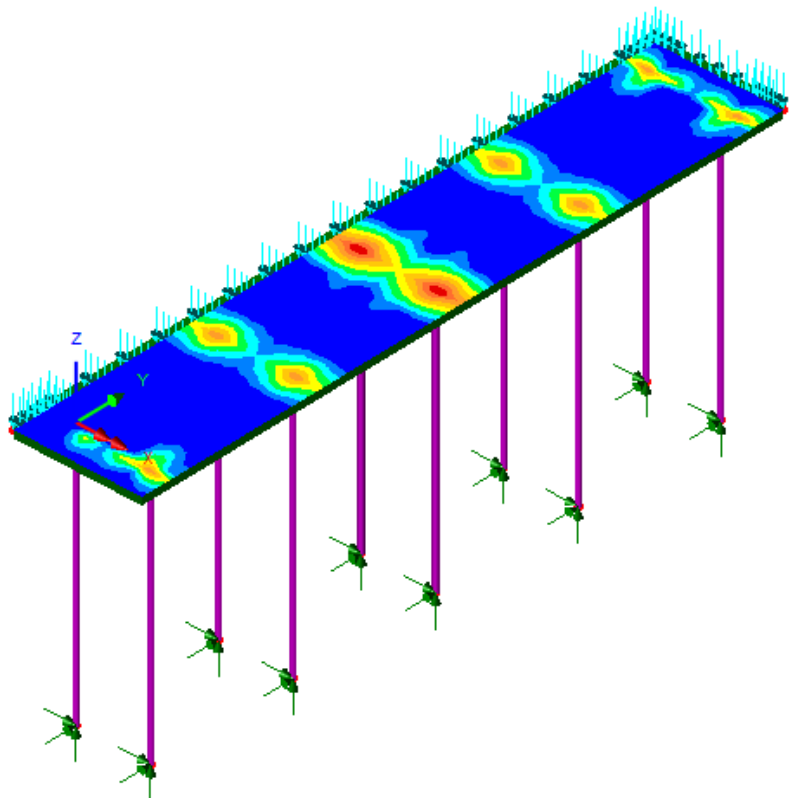
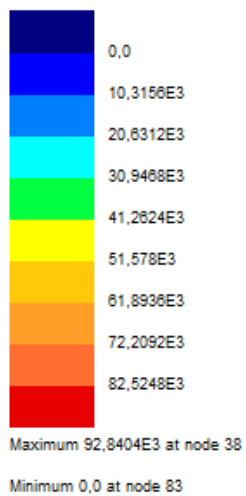


Loadcase: 2:kuormitustapaus1

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: My(T)

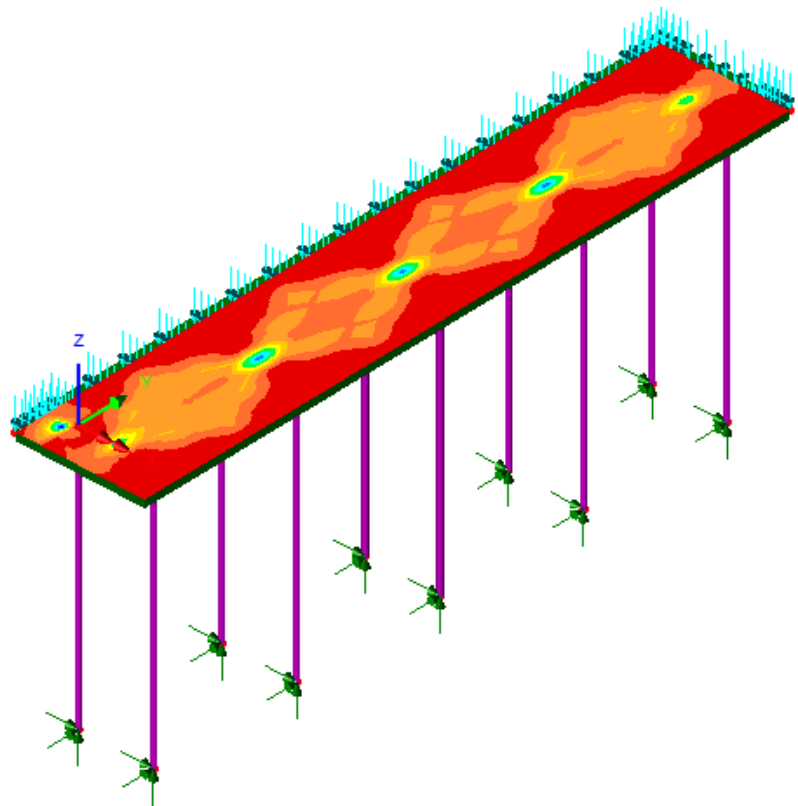
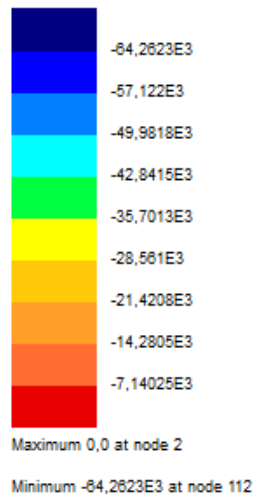


Loadcase: 2:kuormitustapaus1

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: Mx(B)

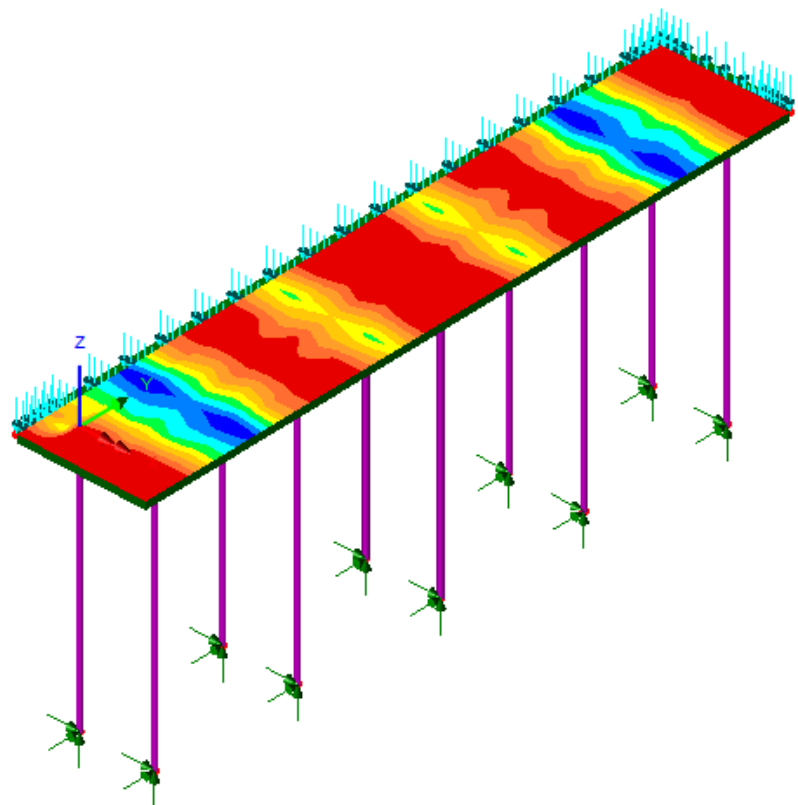
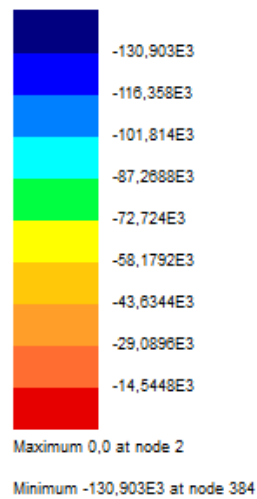


Loadcase: 2:kuormitustapaus1

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: My(B)

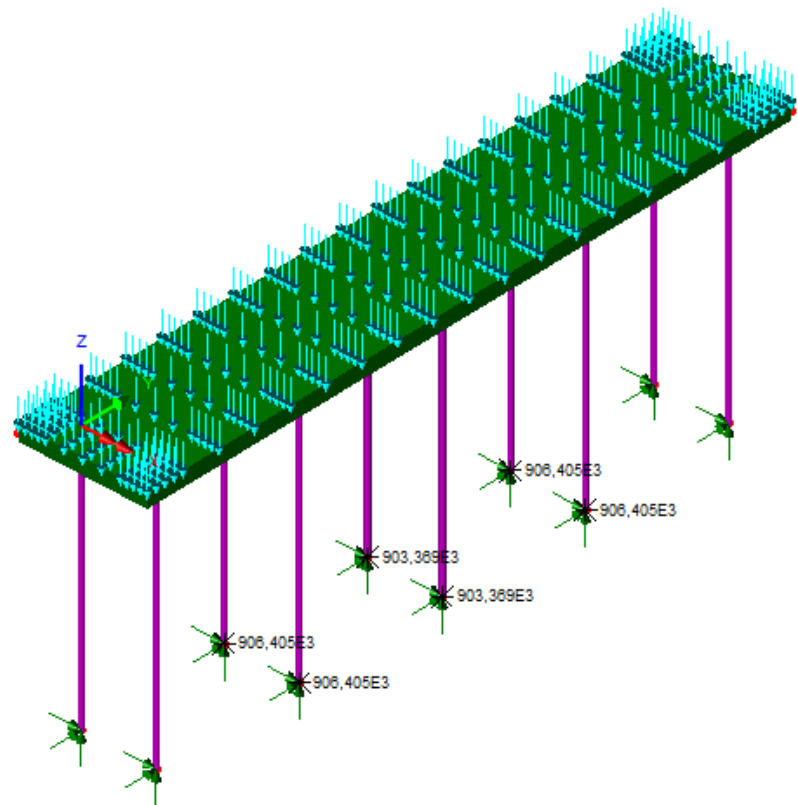


Loadcase: 2:kuormitustapaus1

Results file: diplomityö8.11.2017.mys

Entity: Reaction

Component: RSLT



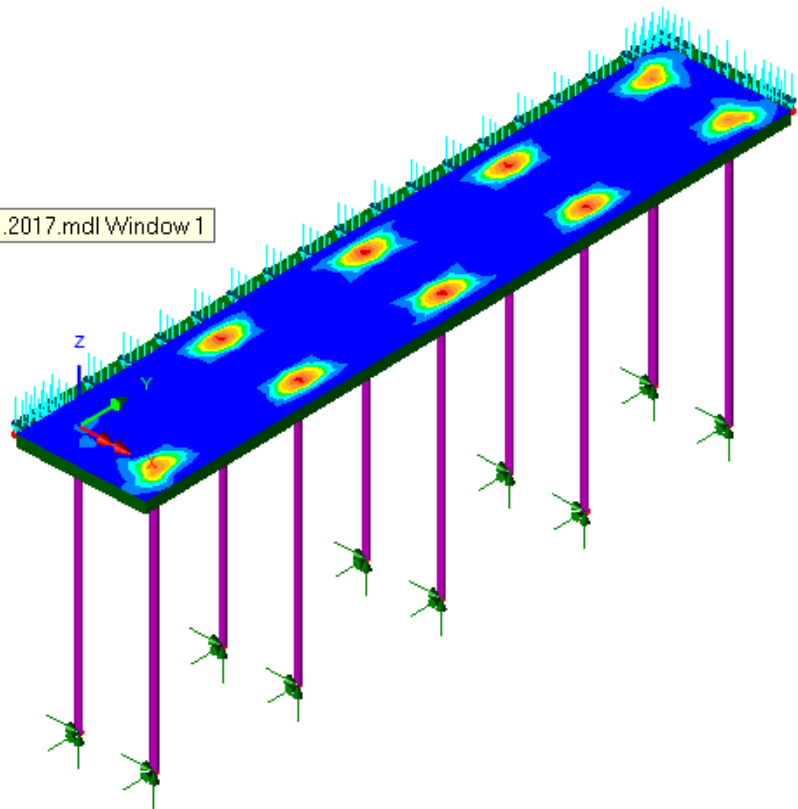
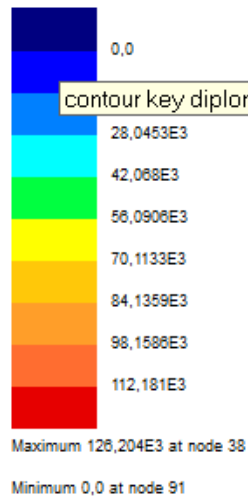
Laatan paksuus on 600 mm, täyttö on 6,2 m, liikennekuorma on LM1, teräsputki-paalu on pyöreä 170/12,5 mm.

Loadcase: 2:kuormitustapaus2

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: Mx(T)

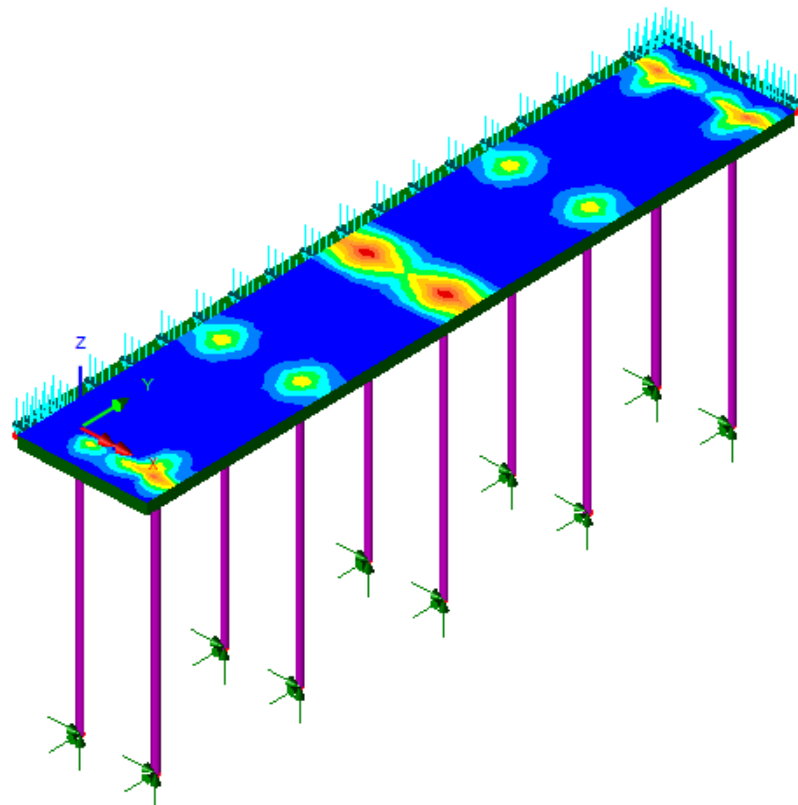
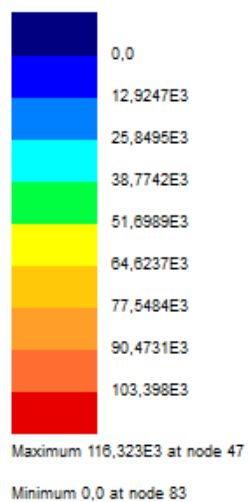


Loadcase: 2:kuormitustapaus2

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: My(T)

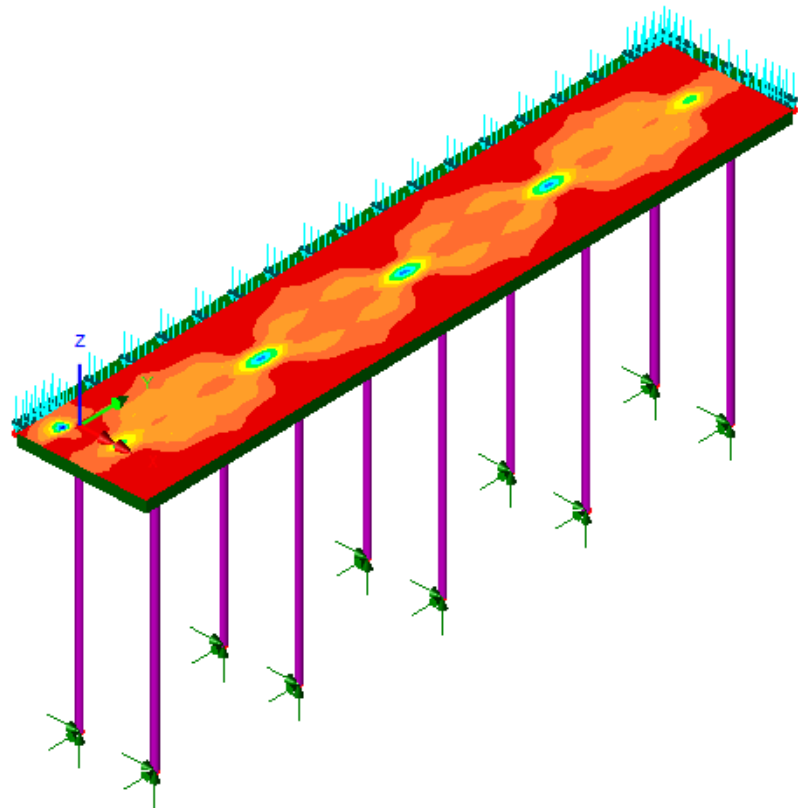
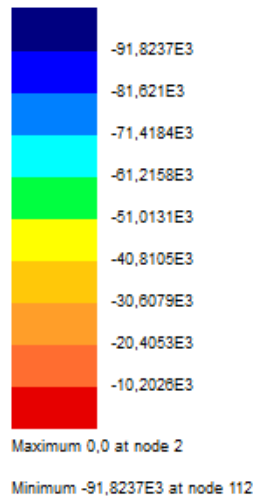


Loadcase: 2:kuormitustapaus2

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: Mx(B)

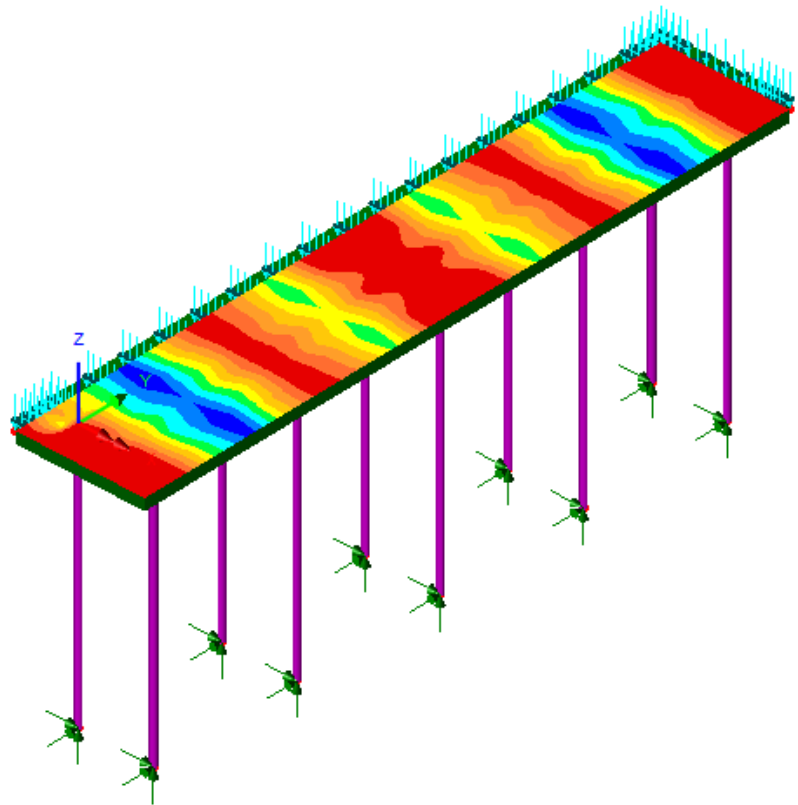
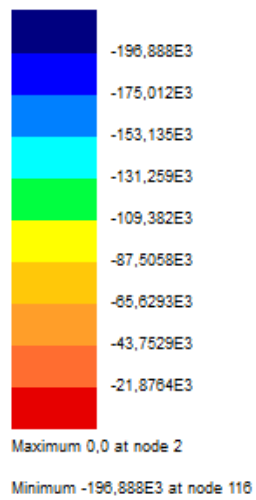


Loadcase: 2:kuormitustapaus2

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: My(B)

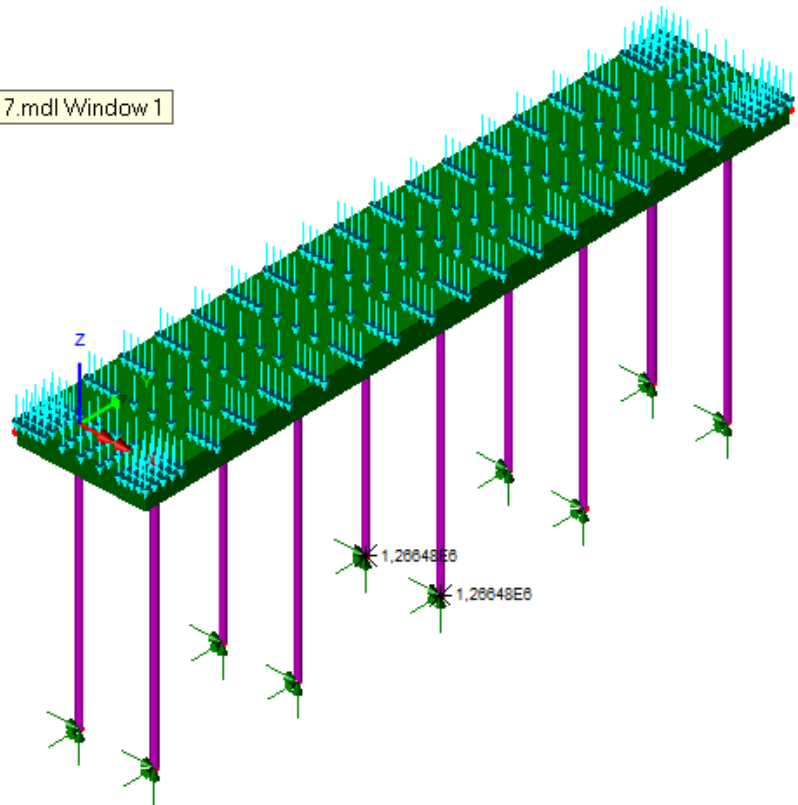
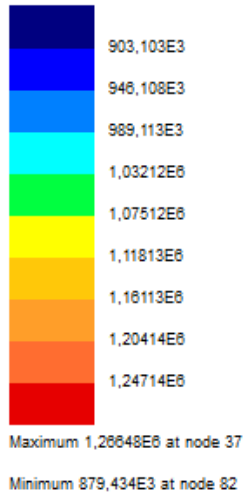


Loadcase: 2:kuormitustapaus2

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Reaction

contour key diplomityö6.11.2017.mdl Window 1



Loadcase: 2:kuormitustapaus2

Results file: diplomityö6.11.2017.mys

Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam

Component: Fx

