



Tommi Räsänen

# Paalulaatan parametrinen malli

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

30.01.2025

## Tiivistelmä

Tekijä: Tommi Räsänen  
Otsikko: Paalulaatan parametrinen malli  
Sivumäärä: 26 sivua  
Aika: 30.01.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka  
Ammatillinen pääaine: Rakennetekniikka  
Ohjaajat: Lehtori Ahmad Shahgordi

---

Opinnäytetyössä luotiin parametrisesti säädettävä paalulaatta. Tavoitteena oli luoda ja kehittää uusia mallinnuspohjia ja -työkaluja yritykselle. Työssä harjoiteltiin SOFiSTiK- ja Grasshopper-ohjelman käyttöä, jotta ohjelmisto-osaaminen yrityksessä kasvaisi.

Työn tutkimuskohteena käytettiin paalulaattaa. Paalulaatta valittiin tutkimuskohteeksi, sillä osatavoitteena oli tutustua SOFiSTiK -ohjelman tarjoamiin laattarakenteiden suunnittelu- ja mitoitusmenetelmiin. Ohjelman laskentamenetelmien eroja haluttiin kartoittaa, sekä verrata saatuja laskentatuloksia jo käytössä oleviin ohjelmiin.

Ohjausta työn toteutukseen saatiin työn ohjaajalta sekä kollegoilta Destia Oy:stä. Teoriaosuuden lähdeaineistoina käytettiin mallinnusohjelmien kotisivuja ja manuaalia. Näiden lisäksi tietoa haettiin myös muista opinnäytetöistä, alan kirjallisuudesta sekä internetistä.

Työn lopputuloksena syntyi suunnikkaan muotoinen paalulaattapohja, jonka pienempiä osakokonaisuuksia yritys voi hyödyntää tulevaisuudessa paalulaattojen mitoitus ja mallinnusprosesseissa.

Avainsanat: paalulaatta, Grasshopper, elementtimenetelmä

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Tommi Räsänen  
Title: Parametric Model of Piled Slab  
Number of Pages: 26 pages  
Date: 30 January 2025

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Civil Engineering  
Professional Major: Structural Engineering  
Supervisors: Ahmad Shahgordi, Senior Lecturer

---

In this thesis, a parametrically adjustable pile slab was developed. The objective was to create and enhance new modeling templates and tools for the company. The project involved practicing the use of SOFiSTiK and Grasshopper software to improve the company's software expertise.

The research subject for this thesis was a piled slab. A piled slab was chosen as the focus because one of the sub-goals was to explore the design and calculation methods for slab structures offered by SOFiSTiK software. The aim was to chart the differences in the software's calculation methods and compare the results obtained with those from software already in use.

Guidance for the implementation of the project was provided by the thesis supervisor and colleagues at Destia Oy. The theoretical part of the thesis utilized source materials such as the official websites and manuals of the modeling software. Additional information was also collected from other theses, professional literature, and online resources.

The final outcome of the thesis was a rhomboid-shaped pile slab template, whose smaller components the company can utilize in the future in pile slab design and other modeling processes.

Keywords: pile slab, Grasshopper, finite element method

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ristiinkantava laattarakenne	1
2.1	Laattarakenteisiin syntyviä kuormia	1
2.2	Momentit ristiin kantavissa laatoissa	2
2.3	Wood-Armer-menetelmä pääpiirteittäin	5
3	Paalulaattarakenne	6
3.1	Tasapaksu laatta	7
3.2	Sienilaatta	8
3.3	Palkkilaatta	9
3.4	Paaluhatturakenne	10
4	Paalulaattarakenteelle suunniteltavat kuormat	12
4.1	Maantiiliikennekuorma pengerkorkeuden ollessa yli 1,4 metriä	15
4.2	Työnaikaiset kuormitukset	17
4.3	Muita paaluihin vaikuttavia voimia	18
5	Luotu paalulaatta	20
5.1	Grasshopperilla luotu geometria	20
5.2	SOFiSTiKin ohjauskeskus Teddy	22
6	Tulokset ja pohdinta	25
	Lähteet	26

## Lyhenteet

FEM: *Finite element method*. Numeerinen laskentamenetelmä erilaisten jatkuvien rakenteiden ja systeemien analysointiin. FEM-laskenta jakaa tarkasteltavan rakenteen pieniin osiin (elementteihin), joiden avulla voidaan arvioida suureiden, kuten jännitysten, muodonmuutosten, lämpötilojen ja virtausten jakautumista rakenteessa.

## 1 Johdanto

Tässä insinööriyössä luodaan paalulaattapohja yritykselle SOFiSTiK-nimisellä elementtimenetelmään (engl. Finite Element Method, FEM) perustuvalla lujuuslaskentaohjelmalla. Ohjelma on yrityksessä käyttöönottovaiheessa, joten yrityksellä on tarve tutkia ohjelman käytettävyyttä yrityksen tarpeisiin sekä kartoittaa eroavaisuuksia jo käytössä oleviin ohjelmistoihin. Opinnäytetyössä luodaan Grasshopper-ohjelmaa käyttäen paalulaattapohja, jonka geometriaa pystyy mielivaltaisesti muokkaamaan ennen kuin mallin siirtää SOFiSTiK-ohjelmaan jatkokäsiteltäväksi. Jatkokäsittelyssä tutkimuskohteena on saatavat voimasuureet momenttien osalta ja niiden laskentatavat tietokoneavusteisilla ohjelmilla.

Opinnäytetyössä keskitytään toimimaan Teddyn puolella, sillä tekstipohjaisen mallin osakokonaisuudet ovat hyvin joustavia ja siirrettävissä muihin rakenne-malleihin vaivattomasti. Osatavoitteena on tutustua SOFiSTiK-ohjelman laattarakenteen laskentamenetelmiin.

SOFiSTiK-ohjelman pääsuuntien momentit muunnetaan käsinlaskennalla raudoitteen suuntaisiksi. Käsinlaskentaarvoja verrataan toisen ohjelman antamiin momenttisuureisiin ja validoidaan SOFiSTiKin laskemat raudoitemäärät.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa perehdytään erilaisiin paalulaattarakenteisiin sekä tieliikennekuorman määrittelyyn ja kuormakaavion käyttöön paalulaattojen osalta, kun pengerkorkeus on yli 1,4 metriä.

## 2 Ristiinkantava laattarakenne

### 2.1 Laattarakenteisiin syntyviä kuormia

Betoniset laattarakenteet esimerkiksi siltojen kansissa joutuvat monimutkaisten kuormitusten alaisiksi. Kuormituksista aiheutuu taivutusta moniin eri suuntiin, mikä johtaa vääntömomenttien syntyyn rakenteessa. Vääntömomenttien

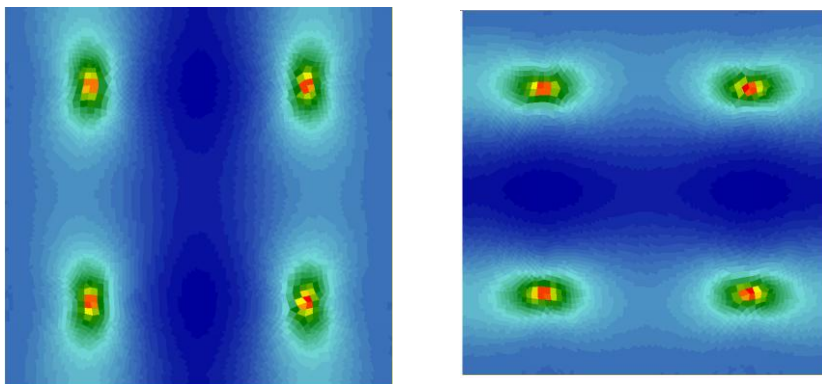
hahmottaminen ja siten myös niiden mitoittaminen laattarakenteessa on haastava tehtävä.

Siltoihin kuormitustilanteita syntyy liikennekuormista, tuulesta, rakenteen paikallisista lämpötilaeroista, omasta painosta ja tukirakenteiden epäsäännöllisyydestä. Liikennekuormista aiheutuu dynaamisia kuormitustilanteita ajoneuvojen painosta ja liikkeestä, jarrutuksista ja kiihdytyksistä. Tuuli sekä lämpötilaerot johtavat lisäjännityksiin, jotka vaikuttavat rakenteen eri osissa eri tavalla. Tukirakenteiden epäsäännöllisyys johtaa kuormien epäsäännölliseen jakautumiseen.

Jos laattarakenne raudoitetaan huomioiden ainoastaan laattarakenteen pääsuunnat, tulee rakenteesta alimitoitettu, joka on altis halkeilulle. Tästä syystä rakennesuunnittelussa tarvitaan menetelmiä, jotka huomioivat vääntömomentit muuntaen ne pääsuuntien momentteihin summattaviksi momenteiksi.

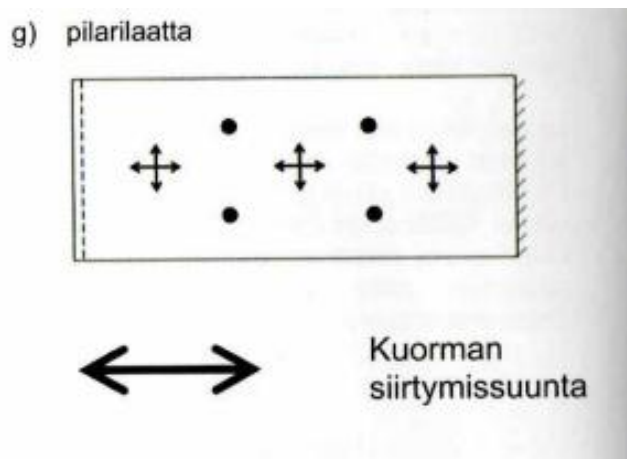
## 2.2 Momentit ristiin kantavissa laatoissa

Ristiin kantavat laatat jakavat kuormat ja taivutusmomentit eri suunnille laatan jännemittojen ja taivutusjäykkyyksien suhteessa. Ristiin kantavien laattojen ajatellaan toimivan kahdessa toisiaan kohtisuorassa olevissa suunnissa. Laatat voidaan tukea palkkien, seinien, paalujen tai pilarien avulla. Paalulaatta on rakenne, jossa laatta tukeutuu suoraan paaluihin [1, s. 3].



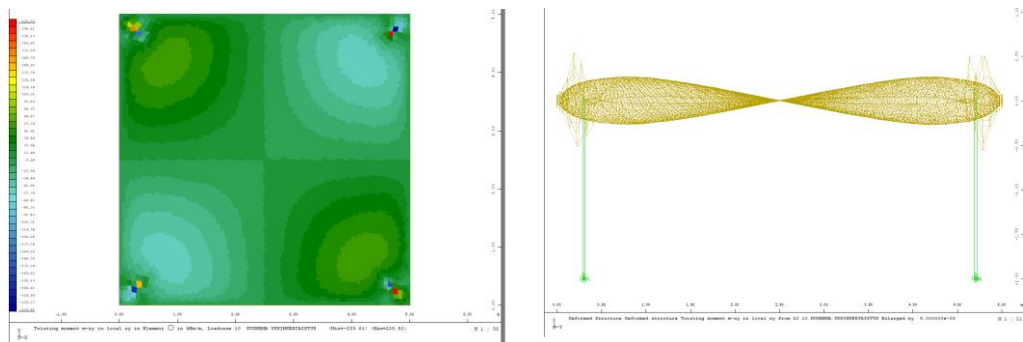
Kuva 1. Neliön muotoisen paalulaatan  $M_{xx}$ - ja  $M_{yy}$ -suuntaiset momenttikentät [Räsänen 2024].

Paalulaatoissa laatta jaetaan yhteen suuntaan kantaviin paalukaistoihin ja paalukaistojen välisiin ristiin kantaviin laattakenttiin. Kuormien jakautuminen riippuu laatan jännemitoista, raudoituksen määrästä ja halkeilusta. Paalulaattojen kantavuudessa tulee myös huomioida laatan lävistyskestävyys, sillä rakenteen kantavuus määräytyy usein paalun päätä ympäröivän laatan lävistyskestävyyden perusteella.



Kuva 2. Pilarilaatan kuormien siirtymäsuunnat [1, s. 4].

Suomen kansallinen eurokoodin soveltamisohje määrää, että taitorakennesuunnittelussa, kuten silloissa ja paalulaatoissa, laattarakenteen mitoitusmomentteihin tulee huomioida myös vääntömomentti  $M_{xy}$  [2, s. 50]. Käytettävää menetelmää ei ole määritetty, mutta sen tulee olla yleisesti hyväksytty.



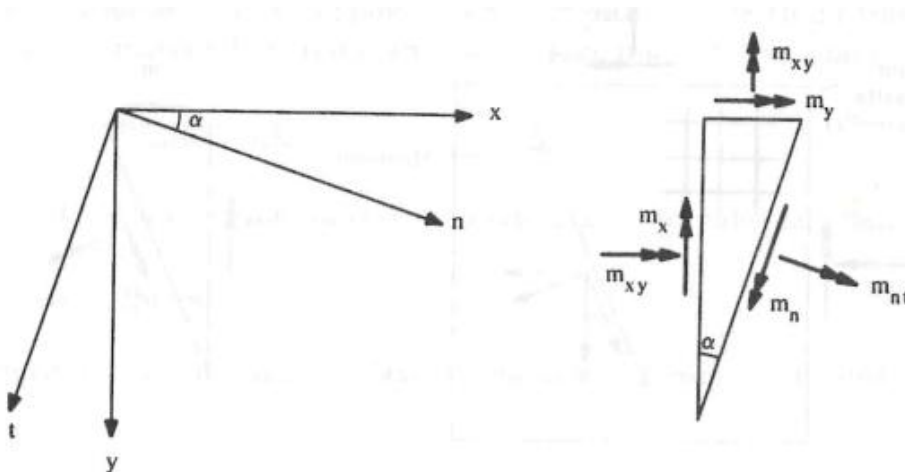
Kuva 3. Neljästä nurkasta tuettuun paalulaattaan syntyvät vääntöjännitykset tasisaisella pintakuormalla ylhäältä ja sivulta tarkasteltuna [Räsänen 2024].

Tietokoneavusteiset laskentaohjelmat ottavat vääntömomentit huomioon, mutta laskentatyyleissä voi olla eroavaisuuksia. Yksi hyvin tunnettu menetelmä on 1960-luvulla kehitetty Wood-Armer-menetelmä, joka on kehitetty tietokoneavusteisen rakennesuunnittelun yleistyessä. Se on laajalti tunnettu ja kansainvälisesti käytetty vääntömomenttien summausmenetelmä. SOFiSTiK ei kuitenkaan omassa laskennassaan käytä tätä menetelmää, vaikka ohjelma antaa nämä tulokset erillisellä komennolla [3, s.13].

Opinnäytetyössä kuitenkin muunnetaan SOFiSTiKin laskemia pääsuuntien momentteja käsin Wood-Armer-menetelmää hyödyntäen, sillä halutaan verrata sen laskemia momenttisuureita toisen ohjelman laskemiin momenttisuureisiin samanlaisessa rakenteessa.

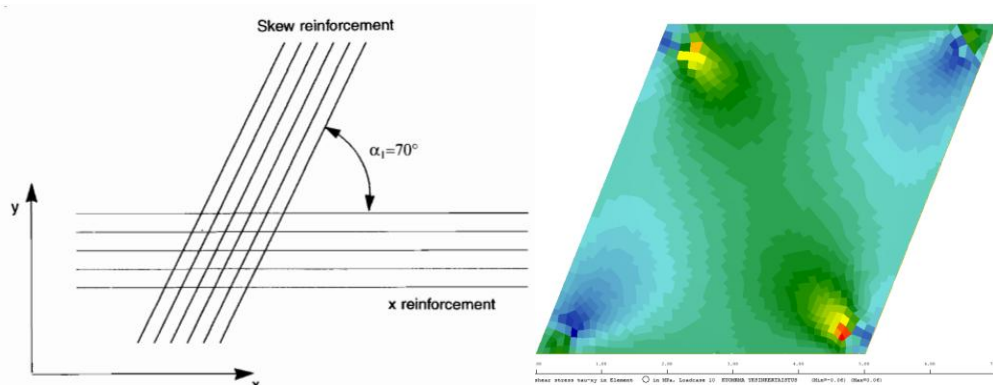
Laattarakenteisiin kohdistuvissa kuormituslaskuissa ollaan monesti täysin tietokoneavusteisen laskennan varassa ja laskentamenetelmistä, kuten koordinaatistojen kierrosta ja momenttien summauksista on rajallisesti kirjallisuutta. Kirjallisuuden puute asettaa myös rajoitteita sille, kuinka laajasti asioita esitetään tässä opinnäytetyössä laskennan osalta.

Monissa tapauksissa edullinen tapa sijoittaa raudoite on päämomenttien suunnissa. Suorakaiteen muotoisissa rakenteissa voi kuitenkin olla käytännöllistä sijoittaa raudoitus sivujen suuntaisiksi [4, s. 291].



Kuva 4. Koordinaatiston kierto suorakaiteen muotoiselle laattarakenteelle [4, s. 289].

Kun raudoite sijoitetaan suunnikkaan muotoisessa laattarakenteessa sivujen suuntaisiksi, tulee laskentamenetelmillä huomioida sekä koordinaatiston kierto, että vääntömomentin summaus pääsuuntien momentteihin.



Kuva 5. Koordinaatiston kierto suorakulmisen laattarakenteen sivujen suuntaisiksi [5, s. 147]. Oikeanpuoleinen kuva SOFiSTiKin FEM-tuloste laattarakenteesta [Räsänen 2024].

### 2.3 Wood-Armer-menetelmä pääpiirteittäin

Wood-Armer-menetelmä on kehitetty insinöörien Randal Herbert Woodin ja Graham S. T. Armerin toimesta. Sen tarkoituksena oli ratkaista käytännön ongelma betonisten laattarakenteiden mitoittamisessa ja erityisesti monisuuntaisten taivutusten aiheuttamien jännitysten analysoimisessa.

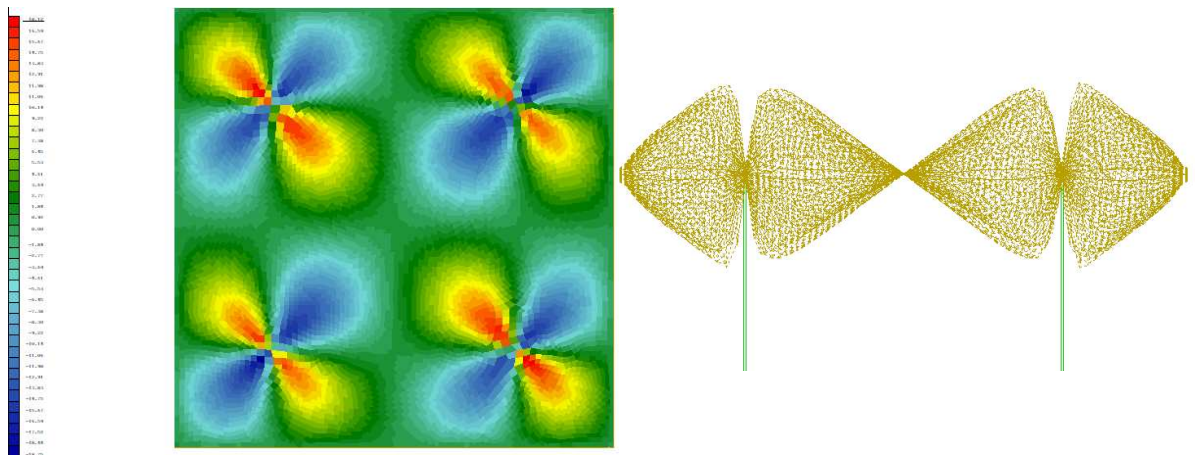
Wood-Armer-menetelmässä summataan laattaan syntyvät väännöt ja laattarakenteen pääsuuntaiset momentit yksinkertaisiksi efektiivisiksi momenteiksi (kaava 1).

$$\begin{aligned} m_{rx} &= m_x + k \times m_{xy} \\ m_{ry} &= m_y + k \times m_{xy} \end{aligned} \quad (1)$$

Oheisessa kaavassa  $m_x$  ja  $m_y$  vastaavat pääsuuntaisia momenteja ja  $m_{xy}$  vääntömomenttia.  $k$ -vakio on erikseen laskettava kerroin vääntömomentille. Wood-Armer -menetelmän etuna on sen kyky parantaa rakenteiden turvallisuutta, sillä raudoituksen mitoituksessa huomioidaan sekä pää- että vääntömomentit, mikä johtaa luotettavampiin ja kestävämpiin rakenteisiin. Lisäksi

menetelmä tehostaa suunnitteluprosessia yksinkertaistamalla monimutkaisten laattarakenteiden mitoitus, koska kuormitukset otetaan huomioon vain pääsuunnissa.

Wood-Armerin yhtälöt takaavat, että laatan kapasiteetti ei ylitä taivutuksessa kuormituksen vaikutuksesta, samalla minimoiden tarvittavan raudituksen määrän. Kuitenkin yhtälöt olettavat, että raudotteet on sijoitettu optimaalisesti, mikä voi johtaa arviointitilanteissa liian varovaisiin kapasiteettiarvioihin, jos todellinen rauditus ei vastaa tätä oletusta [5, s.147].



Kuva 6. Neliönmuotoinen paalulaatta, jonka paalujen reunaetäisyyttä on kasvatettu  $M_{xy}$ -momentin vaikutusten tarkastelua varten [Räsänen 2024].

### 3 Paalulaattarakenne

Paalulaatta on rakenteeltaan yhtenäinen teräsbetoninen laattarakenne, joka on perustettu paaluilla. Sen päällä pysyvänä kuormana on penger. Rakenteen käyttö soveltuu vaikeisiin pohjasuhteisiin, joissa vaihtoehtoiset perustamismenetelmät ovat teknisesti toteuttamiskelvottomia tai taloudellisesti kannattamattomia. Perustamistavan valinta tehdään aina teknistaloudellisten vaihtoehtojen vertailulla, jossa tulee huomioida rakentamispaikan olosuhteet ja ympäristötekijät. Erityisesti taajama-alueilla tulee huomioida tie- ja rautatiealueen käytettävissä oleva leveys.

Tyypilliset paalulaattakohteet sijoittuvat:

- Siltojen tulopenkereisiin ja keiloihin, joissa penkereen ja sillan välinen jäykkyysero tulee pienentää.
- Syviin ja pehmeisiin pehmeikköihin, joihin ei voida toteuttaa massanvaihtoa ympärillä olevien rakenteiden tai ympäristölle aiheutuvien seurausten vuoksi.
- Korkeisiin, pehmeällä maaperällä sijaitseviin penkereisiin, joiden stabiiliteetti ja tavoitepainuma on muutoin vaikea saavuttaa.
- Tie- ja rataympäristöihin, joiden läheisyydessä sijaitsee tärinälle alttiita rakenteita.

Paalulaattatyypeistä tavallisimmat ovat tasapaksulaatta, sienilaatta ja palkkilaatta, mutta myös elementtirakenteisia paalulaattoja toteutetaan. Paalulaatat tulee suunnitella yhtenä valuna. Jos valu toteutetaan vaiheittain, on rakenne suunniteltava siten, että eri aikaan valettujen osien yhteistoiminta on varmistettu. [6, s.12]

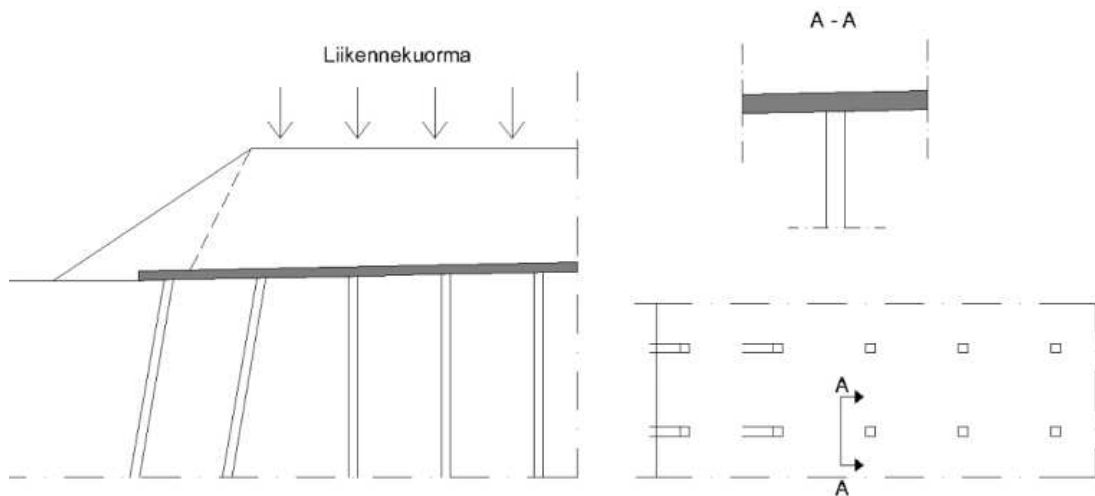
Laattatyypin valikoitumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa:

- Laatan muotoilu ja sen muotituksen tarve.
- Raudoitus- ja alustatyön vaikeusaste.
- Laatan massoihin liittyvät kustannukset.
- Mahdolliset paalujen epätasaiset painumat.

### 3.1 Tasapaksu laatta

Laattatyypeistä yksinkertaisin on tasapaksu laatta, joka sallii paalujen sijainti-  
poikkeamia joustavammin kuin muut laattatyypit. Se on poikkileikkaukseltaan

paksumpi kuin sieni- tai palkkilaatta ja se voidaan toteuttaa jopa leikkausraudoittamattomana, jolloin tyypillisesti laatan paksuus määräytyy paalun lävistymisen mukaan. Lävistyskapasiteettia voidaan parantaa suunnittelemalla lävistysraudoitteet. Tasapaksun laatan etuihin lukeutuu nopea rakennettavuus.



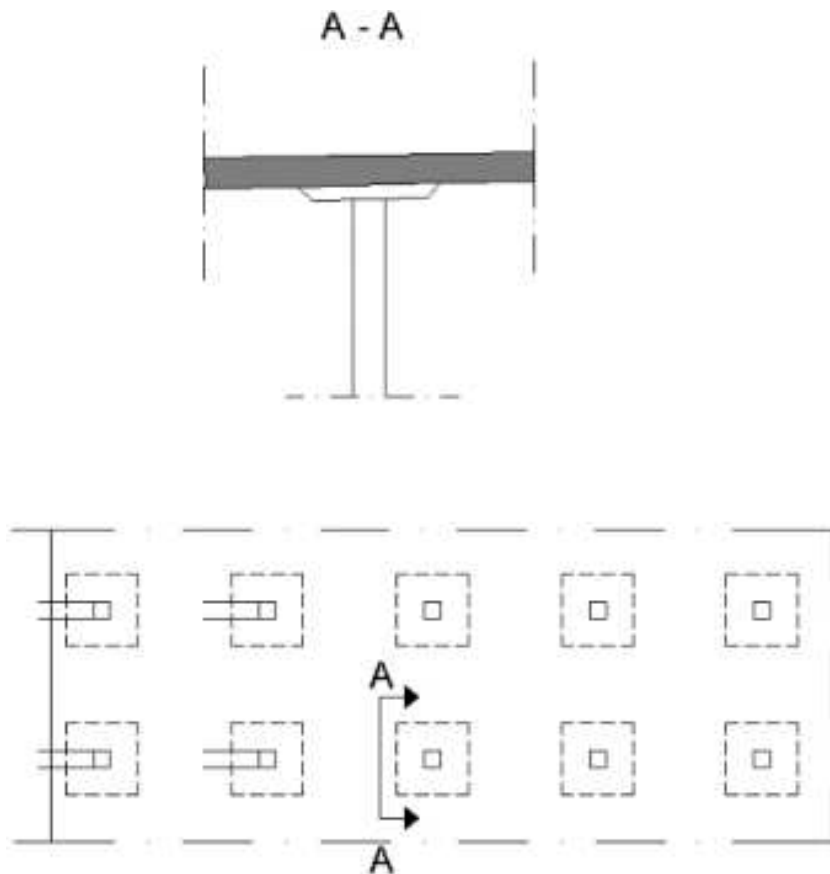
Kuva 7. Tasapaksu laatta [6, s. 13].

### 3.2 Sienilaatta

Sienilaattarakenteessa on tasapaksuun laattaan verrattuna parempi lävistyskestävyys paalujen alueella, sillä sienilaatan paalujen kohdalle suunnitellaan paksunnokset. Sieniosan valmistaminen lisää merkittävästi työtunteja ja rakentaminen eroaa muista laattatyypeistä muotoiltavan sieniosan vuoksi.

Paalulaatan alustäyttöön muodostetaan muodoiltaan katkaistuja neliskulmaisia kartioita. Rakenteellisesti sienilaatta on tasapaksua laattaa taloudellisempi vaihtoehto ja suunnitteluvaiheessa tulee puntaroida lisääntyvien työtuntien vaikutus rakenteellisten kustannusten kompensoituessa.

Sienilaatat ovat herkempiä sijainti- ja mittapoikkeamille paalujen täten rakentamisvaihe vaatii enemmän tarkkuutta. Sieni- ja laattaosan vaiheittainen toteutus tulee huomioida suunnittelussa. Niiden rakenteellinen kapasiteetti on kuitenkin optimaalisempi verrattuna tasapaksuun laattaan [6, s. 13].



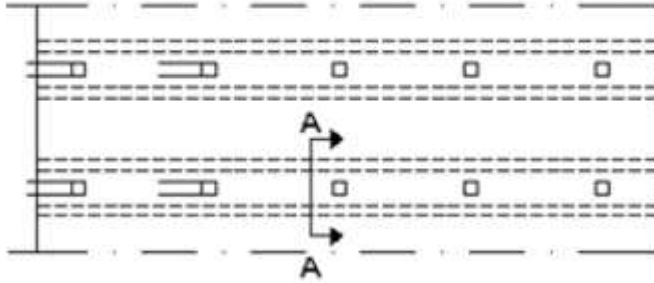
Kuva 8. Sienilaatan poikkileikkaus profiili laatan ja paalun yhtymästä, jossa erikseen suunniteltu paksunnos antaa sienilaatalle paremman lävistyskestävyyden tasapaksuun laattaan verrattuna [6, s.13].

### 3.3 Palkkilaatta

Palkkilaatat koostuvat palkkikaistoista joihin paalurivit sijoittuvat. Laattatyyppin rakenteellinen toiminta perustuu toisiaan kohtisuorassa oleviin pääraudoitteisiin. Raudoitesuunnat kulkevat palkkiosan palkkien suuntaisesti ja kohtisuorassa palkkeja vastaan.

Palkkilaatat mahdollistavat suuremmat jännevälit, jotka voivat olla tarpeen muun muassa ylityskohdissa. Palkkilaatoilla voidaan hyödyntää myös suurempia paalukokoja kuin muilla laattatyypeillä, joskin teräsbetonisenpaalun tavallisin paalukoko paalulaatoilla on  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  [6, s. 34]. Palkkikaistat toteutetaan muotteilla tai muotoilemalla työalustalle jatkuva palkkiosa.

Palkkilaatan betonimenekki on suurempi kuin sienilaatan ja palkkikaistojen muotitus johtaa suurempiin työkustannuksiin verrattuna tasapaksuun laattaan. Lisäksi palkkilaatta on herkkä paalujen sijaintipoikkeamille kohtisuoraa palkkikaistaa vastaan [6, s.14].



Kuva 9. Palkkilaatan pilari- ja palkkirivit [6, s. 14].

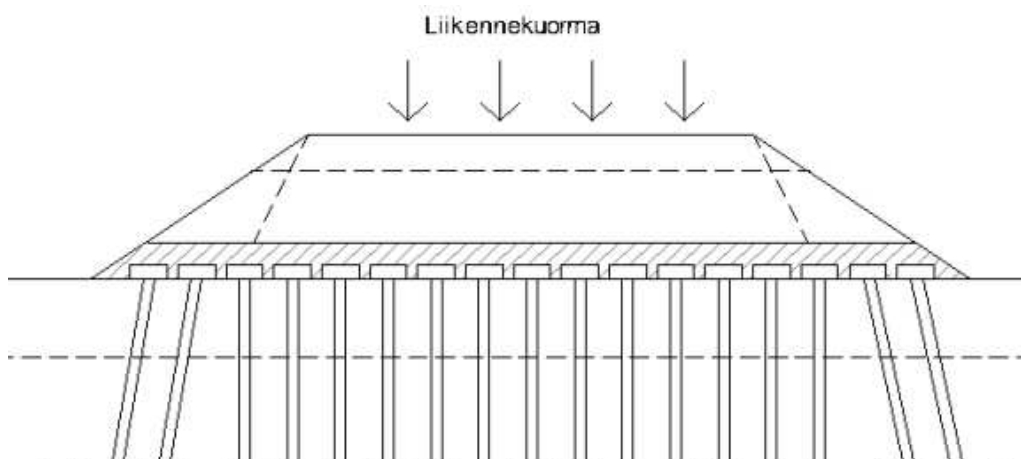
### 3.4 Paaluhatturakenne

Paaluhatturakenne koostuu rakenteeltaan paaluista, paaluhatuista sekä kuormaa jakavasta kerroksesta, joka sijoittuu paaluhattujen päälle ja väliin. Kuormaa jakava alaosa toimii myös paaluhattujen suojakerroksena. Paaluhatturakenteessa ei ole erillistä laattaa, vaan rakenne koostuu paaluilla perustettujen paaluhattujen muodostamasta rakenteesta, jossa paaluhattujen rakoväli on tiekohteissa 0,3–0,7 metriä. Suurin sallittu hattukoko on 2,0 x 2,0 m<sup>2</sup> eikä alle viiden metrin paaluja sallita.

Erilaiset lujitteet kuten synteettiset tai teräksiset lujiteverkot ja -kankaat kuuluvat rakenteeseen. Lujitteilla on määrä tehostaa kuormien holvautumista paaluhatuille sekä kannatella paaluhattujen välissä olevaa penkereen osaa ylhäältä päin. Paaluhattujen päälle tulevan penkereen vähimmäiskorkeudeksi on määritetty 2,1 metriä.

Paaluhatturakennetta ei lähtökohtaisesti käytetä uudisrakenteissa, joihin kohdistuu liikennekuormia. Se soveltuu ainoastaan jo olemassa olevien

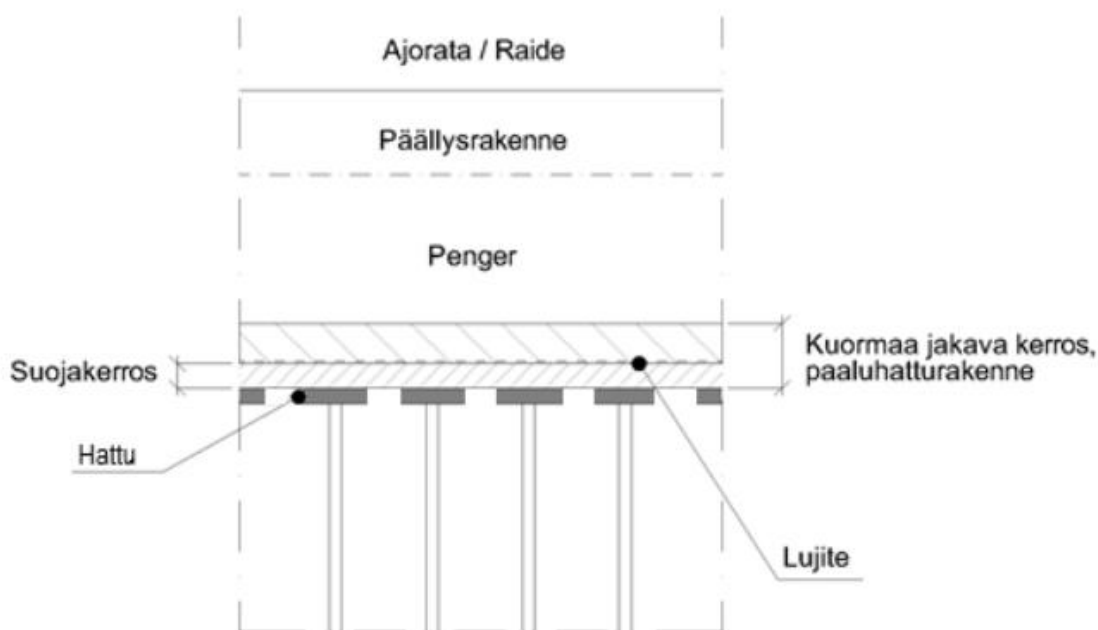
paaluhatturakenteiden vähäisiin laajennuksiin sekä yksittäisten paaluhattujen tai paalujen korjaamiseen [6, Liite 3 / 1 (7)].



Kuva 10. Paaluhatturakenteen minimi pengerkorkeudeksi on määritelty 2,1 metriä [6, Liite 3 / 1 (7)].

Savikot, joissa pehmeän kerroksen leikkauslujuus on riittävä estämään hattujen välisen materiaalin valumista ovat tyypillisiä paaluhattukohteita. Suojakerros sijoitetaan hattujen päälle ja väliin ja sen paksuuden on oltava 300 mm. Kerroksen paksuus mitataan hatun yläpinnasta ja se tehdään murskeesta tai sorasta, jonka maksimiraekooksi on määritelty 50–150 mm. Suojakerroksen päälle asennetaan kuormaa jakava kerros, johon valitaan hyvän kitkakulman omaava materiaali, kalliomurske, jonka maksimiraekoko on 150–200 mm [6, Liite 3 / 3 (7)].

Paaluhatturakenne edellyttää poikkileikkaukseltaan symmetristä pengertä ja yleispiirteiltään tasaista sekä vaakasuoraa maapintaa. Rakenne ei sovellu kohteisiin, joissa tulee varautua penkereen leventämiseen myöhemmin. Rakenteella ei voida siirtää merkittäviä vaakakuormia. Tämän vuoksi merkittäviä vaakakuormia käsittelevät rakenteet suunnitellaan paalulaatalle [Liite 6 / 2 (7)].



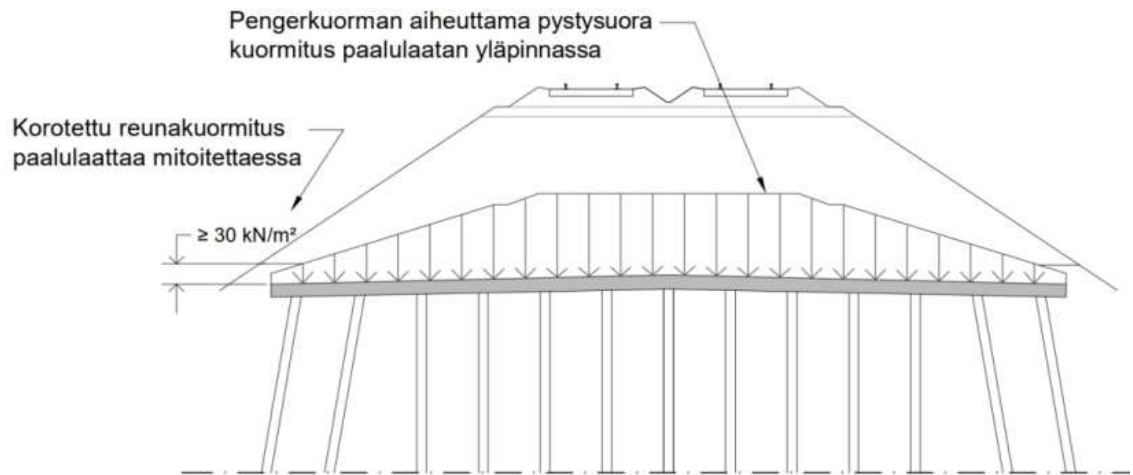
Kuva 11. Paaluhatturakenteen penkereen osat [6, Liite 3 / 4 (7)].

Kuormaa jakavan kerroksen paksuus voidaan suunnitella rakoväli kerrottuna kahdella, huomioiden että jakavan kerroksen paksuus tulee aina olla vähintään yksi metri.

#### 4 Paalulaattarakenteelle suunniteltavat kuormat

Paalulaatan rakenteellisessa sekä geoteknisessä mitoituksessa huomioidaan kaikki rakenteeseen vaikuttavat kuormat. Penkereen ja rakenteen oma paino oletetaan siirtyvän paaluille. Pengerkorkeus on matka paalulaatan yläpinnasta tierakenteen yläpintaan tai radan korkeusviivaan.

Reuna-alueelle suoritetaan kuorman korotus, jolla huomioidaan enintään 1,0 metriä laatan yläpuolelle ulottuva huoltotie, sekä  $10 \text{ kN/m}^2$  suuruiset tavanomaiset ja tasaiset työkonekuormat huoltotiellä ja penkereellä. Sivulta tehtävät ajorampit ja työmaatiet penkeren päälle on suunniteltava erikseen. Reuna-alueilla kuormituksen miniarvo on  $30 \text{ kN/m}^2$  [6, s. 16].



Kuva 12. Penkereen pystysuoran kuorman jakautuminen paalulaatalle sekä reuna-alueen korotettu kuormitus [6, s.16].

Rakennesien painoja laskettaessa voidaan käyttää NCCI 1 Eurokoodin soveltamisohjeen taulukon A.1 sillanrakennusmateriaaleille määritellyjä tilavuuspainoja, ellei hankekohtaisesti ole muuta määritelty [7, s. 8].

Paalulaattarakenteen pystykuormat siirtyvät pystypaaluille ja vaakakuormat vinoapaaluille tai paalujen sivuvastuksen kautta maaperään, mikäli pohjamaan siirtymät pysyvät sallituissa rajoissa. Tyypillisesti vaakasiirtymän laskennallisena arvona on käytetty 10 mm. Pysyvät vaakakuormat siirretään aina vinoaalujen kautta pohjamaahan. Jos vaakakuormia ei siirretä vinoaalujen kautta pohjamaahan, on kyseessä eritystoiminta, joka kuuluu suunnitella erikseen hankekohtaisesti. Opinnäytetyössä luotu paalulaatta sisälsi ainoastaan suorja paaluja, joten vaakakuormien määrittästä ei käsitellä opinnäytetyössä.

Paalut sijoitellaan tyypillisesti tasavälein huomioiden pengerkuormien vaikutusalueet. Vaikeilla alueilla, esim. vinoilla kallionpinnoilla, voidaan suorittaa yksittäisiä paalujen kohdentamisia [6, s. 35].

Taulukko A.1 Sillanrakennusmateriaalien tilavuuspainoja

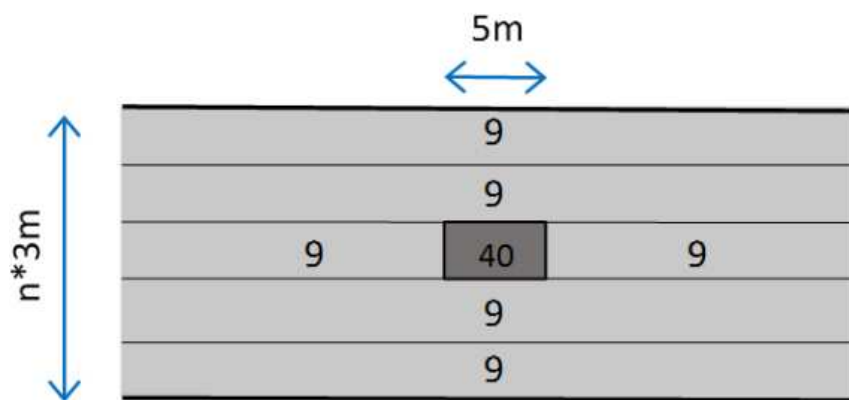
Materiaali	Tilavuuspaino
Betoni	24 kN/m <sup>3</sup>
- kovettumaton betoni	25 kN/m <sup>3</sup>
- raudoitettu betoni	25 kN/m <sup>3</sup>
Sementtillaasti	19...23 kN/m <sup>3</sup>
Rakenneteräs	77..78,5 kN/m <sup>3</sup>
Valurauta	71...72,5 kN/m <sup>3</sup>
Alumiini	27 kN/m <sup>3</sup>
Puu (EN338)	
- C14 / C30 / D50 / D70	3,5 / 4,6 / 7,8 / 10,8 kN/m <sup>3</sup>
Liimapuu (EN 1194)	
- GL24h / GL36h / GL24c / GL36c	3,7 / 4,4 / 3,5 / 4,2 kN/m <sup>3</sup>
Kreosoottikyllästetty puu	6 kN/m <sup>3</sup>
Puiset muotit ja telineet	6 kN/m <sup>3</sup>
Valuasfaltti ja asfalttibetoni	24..25 kN/m <sup>3</sup>
Asfalttimastiksi	18..22 kN/m <sup>3</sup>
Jyräasfaltti	23 kN/m <sup>3</sup>
Hiekka, kuiva	15..16 kN/m <sup>3</sup>
Sepeli ja sora, irtonainen	15..16 kN/m <sup>3</sup>
Maabetoni	18,5..19,5 kN/m <sup>3</sup>
Murskattu masuunikuona	13,5..14,5 kN/m <sup>3</sup>
Sullottu kivimurske	20,5..21,5 kN/m <sup>3</sup>
Tiivistyssavi	18,5..19,5 kN/m <sup>3</sup>
Rautatiesiltojen päällyskerros:	
- Betoninen suojakerros	25 kN/m <sup>3</sup>
- Normaali sepelikerros	18 kN/m <sup>3</sup>
- Basalttisepelikerros	26 kN/m <sup>3</sup>
- Pengertäyte	20 kN/m <sup>3</sup>
- Suojakiskot	1,5 kN/m
- Yhden raiteen betonipölkkyt ja kiskot	6,2 kN/m

Kuva 13. NCCI 1 Taulukko A.1 Sillanrakennusmateriaalien tilavuuspainoja [7, s.8].

#### 4.1 Maantiiliikennekuorma pengerkorkeuden ollessa yli 1,4 metriä

Yli 1,4 metrin syvyydelle maan peittoon rakennettavien jäykästi toimivien paalulaattojen pystysuoria maantiiliikenteen vaikutuksia laattarakenteen pinnassa tarkastellaan soveltaen seuraavaa kuormakaaviota käyttäen. Kuorma kattaa yleiset erikoiskuljetukset ja siihen on sisällytetty dynaaminen lisä. Kuormakaavio asetetaan penkereen päälle. Kun rakenne on alle 1,4 metrin syvyydessä maan peitossa, se mitoitetetaan käyttäen siltojen liikennekuormakaavioita [7, s.18]. Siltojen liikennekuormakaavioita ei tässä opinnäytetyössä käsitellä.

Tienpinta jaetaan kuormakaaviossa 3 metrin levyisiin kaistoihin ja kaistalle asetetaan suuruudeltaan  $3,0 \times 5,0$  m rajattu alue  $40 \text{ kN/m}^2$  kuormalla. Kuormitusalue sijoitetaan rakenteen kannalta epäedullisimpaan kohtaan.

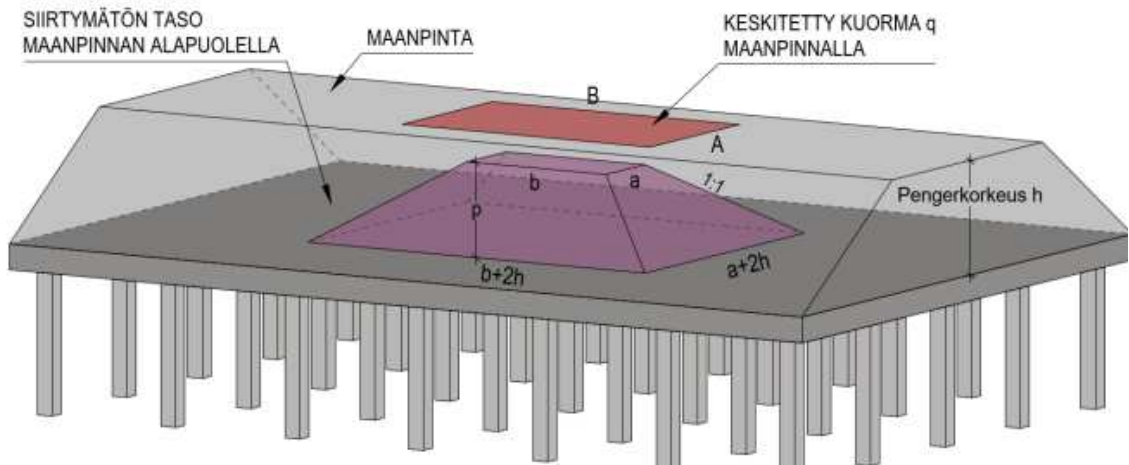


Kuva 14. Penkereen päälle asetettava kuormakaavio, jolla tienpinta mitoitetetaan. Kuormat ovat ominaisarvoja [6, s. 18].

Mitoituksessa on tarkasteltavalle alueelle sijoitettuna ainoastaan yksi  $40 \text{ kN/m}^2$  alue. Kuormitustapauksissa voi esiintyä  $40 \text{ kN/m}^2$  ja  $9 \text{ kN/m}^2$  kuormat samanaikaisesti tai erikseen. Samanaikaisessa kuormitustarkastelussa, jossa  $9 \text{ kN/m}^2$  on asetettu koko alueelle, voidaan  $3,0 \times 5,0$  m alueella käyttää  $31 \text{ kN/m}^2$  kuormitusta [6, s.17].

Kuormakaavion pintakuorman vaikutukset siirretään siirtymättömälle rakenteelle, paalulaatalle, kitkamaalajien kautta. Kun kuormitettava rakenne on

vähintään 1,4 metrin syvyydessä, pintakuorman vaikutukset rajatulla 3,0 x 5,0 m rajatulla alueella voidaan approksimoida suhteellisin tarkoin tuloksin paalulaatalle.



Kuva 15. Kuormakaavion rajatulla alueella vaikuttavan pintakuorman siirtymä approksimaatio paalulaatalle [6, Liite 1 / 1(2)]

Paalulaatalle siirtyvä kuorma lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$a = \frac{A}{1 + \frac{2h}{A}} \quad (2)$$

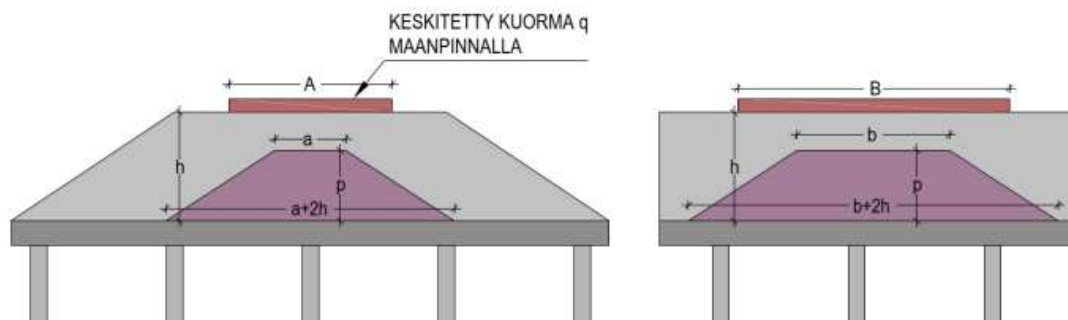
$$b = \frac{B}{1 + \frac{2h}{B}} \quad (3)$$

$$p = \frac{3 \cdot q \cdot AB}{A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}} \quad (4)$$

$$A_1 = ab \quad (5)$$

$$A_2 = (a + 2h)(b + 2h) \quad (6)$$

Kaavoissa (2) ja (3) A ja B ovat rajatun alueen pintakuorman sivumitat. Pystysuora etäisyys pintakuorman vaikutustasosta paalulaatan pintaan on  $h$ . Pintakuorman arvo tienpinnalla on  $q$ . Tasaisen pintakuorman approksimoitu pintakuorma paalulaatalle on  $p$  [8, Liite 8 / 1 (3)].



Kuva 16. Keskitetyn kuorman siirtymä approksimaatio paalulaatalle [6, Liite 1 / 1(2)].

## 4.2 Työnaikaiset kuormitukset

Työnaikaisille kuormituksille tulee tehdä murto- sekä käyttörajatilatarkastelut. Työnaikaiset tilanteet arvioidaan aina tapauskohtaisesti. Arviointi suoritetaan käytettävien konetyyppien, työnaikaisen pengerkorkeuden ja reunanylityspaikkojen suhteen. Murtorajatilatarkastelussa käytettävä osavarmuusluku työkonekuormien osalta on 1,50.

Tavanomaisille kaivinkoneille, jonka paino on alle 250 kN, ja kuorma-autoille käytetään tasaista pintakuormaa, joka on suuruudeltaan 20 kN/m<sup>2</sup>. Raskaampien työkoneiden painot ja kuormitusalat tulee selvittää tapauskohtaisesti. Kuormia valittaessa tulee pyrkiä todellisiin kuormien arvoihin. Kuormien arvot tulee esittää suunnitelmien piirustuksissa.

Raskaiden, tavanomaisesta poikkeavien, työkoneiden akseli-/telikuormien syysäys vaikutus huomioidaan kertomalla työkonekuormitukset kertoimella 1,25. Paikallisten kuormitusten voidaan olettaa jakautuvan 30° kulmassa. Suunnitelmissa ja laskelmissa tulee esittää kyseisen työvaiheiden yhteydessä

työnaikaiset laattoihin kohdistuneet kuormitustilanteet ja työnaikaisten liikennöintialueiden tarkastelut.

Väyläviraston paalulaattarakenteita koskevan ohjeistuksen mukaan tavanomaisiksi raskaiksi työkoneiksi luokitellaan raskaat autonosturit, dumpperit, pora- tai kaivinpaalutuskoneet ja muut raskaat paalutuskoneet. Näille voidaan tehdä alustavia mitoitustarkasteluita määrittelemällä porapaalutuskoneen paino 500-800 kN, joka jakautuu liikkumisen aikana noin 3...4 x 5 m<sup>2</sup> alueelle. Paalutustöissä huomioidaan lisäkuormana paalun paino. Suuriläpimittaisten porapaalujen asentamiseen käytettävä kaluston on yleensä edellä mainittua raskaampaa.

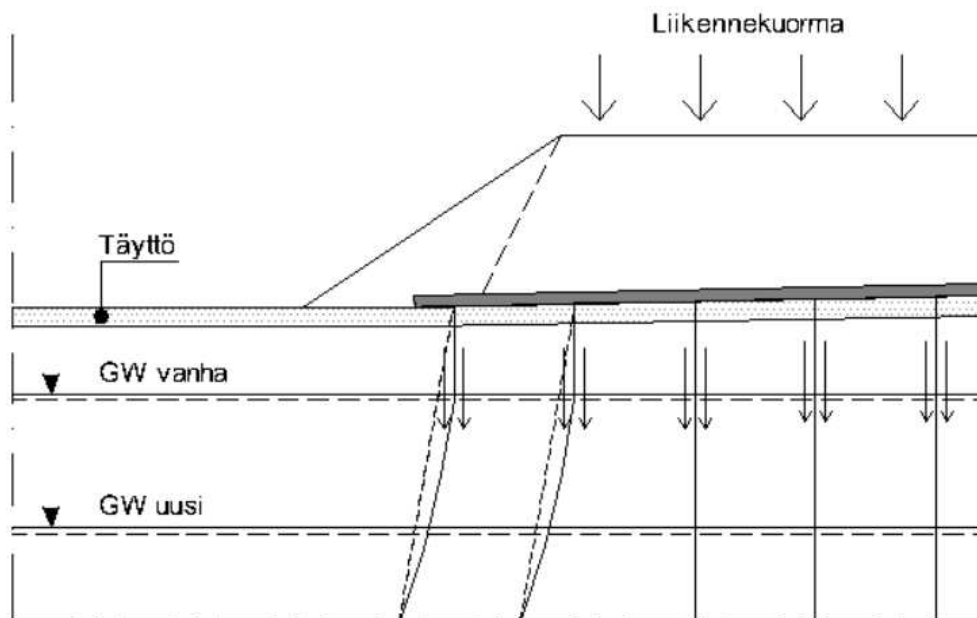
Tavanomaisen lyöntipaalutuskoneen paino voidaan olettaa jakautuvan 5 x 5 m<sup>2</sup> kokoiselle alueelle koneen liikkuesssa. Tällöin pintakuorma on tasaisesti jakautuneena noin 25 kN/m<sup>2</sup>. Työnaikana kuormitukseen vaikuttaa paalutuskoneen kokonaispaino, ylävaunun asento suhteessa teloihin, telojen leveys, keilin vaakasijainti ja keilin kallistuksen sekä järkäleen ja paalun painot. Tavanomaisesti telaketjun pohjapaine on välillä 70...310 kN/m<sup>2</sup> niin teräsbetonipaaluilla kuin pienläpimittaisilla teräspaaluilla. Teräksisiä suurpaaluja käytettäessä telaketjun pohjapaine on tyypillisesti 80...380 kN/m<sup>2</sup>. Ylärajan pohjapaine on määritelty sillä oletuksella, että paalutustyön aikana paino voi kohdistua neljäsosalle telojen kokonaisalasta. Dumpperien suurimman kokonaispainon voidaan alustavissa tarkasteluissa olettaa suurimmillaan olevan 700 kN. Kuormasta tyypillisesti 70% jakautuu taka-akselille, jolloin suurimmaksi alustavaksi akselikuormaksi tulee noin 430 kN pyöräkuorman ollessa 215 kN. Suunnitelmissa olisi syytä esittää suojatäytön vähimmäispaksuus, joka tulisi olla tehtynä ennen kuin laattaa kuormitetaan työkoneilla [6, s.23].

### 4.3 Muita paaluihin vaikuttavia voimia

Muut paaluille tulevat kuormat voivat olla luonteeltaan puristus-, taivutus- ja leikkausrasituksia, joita voi syntyä niin pysty- kuin vinopaaluille. Edellä mainittuja rasituksia voi syntyä työalustasta ja pohjaveden alentamisesta.

Maarakenteet ja muut rakenteet paalutusalueella ja sen ympäristössä tulee suunnitella niin, että pyritään eliminoidaan paaluihin kohdistuvat voimat, jotka aiheutuvat pohjamaan siirtymistä. Mikäli pohjamaan siirtymät vaikuttavat paalulaattarakenteeseen, rakenne mitoitetaan siirtymistä aiheutuville kuormille, niin murto- kuin käyttörajatilassa.

Negatiivisella vaippahankauksella tarkoitetaan puristusrasituksia, joita syntyy, kun paalun ympärillä oleva maa painuu enemmän kuin paalu. Negatiivisen vaippahankauksen vaikutus paalun painumaan huomioidaan pysyvänä kuormana. Painumat saattavat aiheutua muun muassa täyttemaan ja työalustan painosta, pohjaveden alenemisesta tai itse paalutustyön vaikutuksesta. Paalutus pehmeään konsolidoituneeseen saveen aiheuttaa tyypillisesti ensin maanpinnan nousua ja sen jälkeen painumaa. Tällainen maapohjan painuma aiheuttaa vinoille paaluille puristusrasitusten lisäksi taivutus- ja leikkausrasituksia, joita voidaan arvioida sivuvastusten ääriarvojen perusteella. Pystysuoriin paaluihin, jotka on asennettu asennustoleranssien sisälle, ei yleensä aiheudu vähäistä suurempia taivutus- tai leikkausrasituksia.



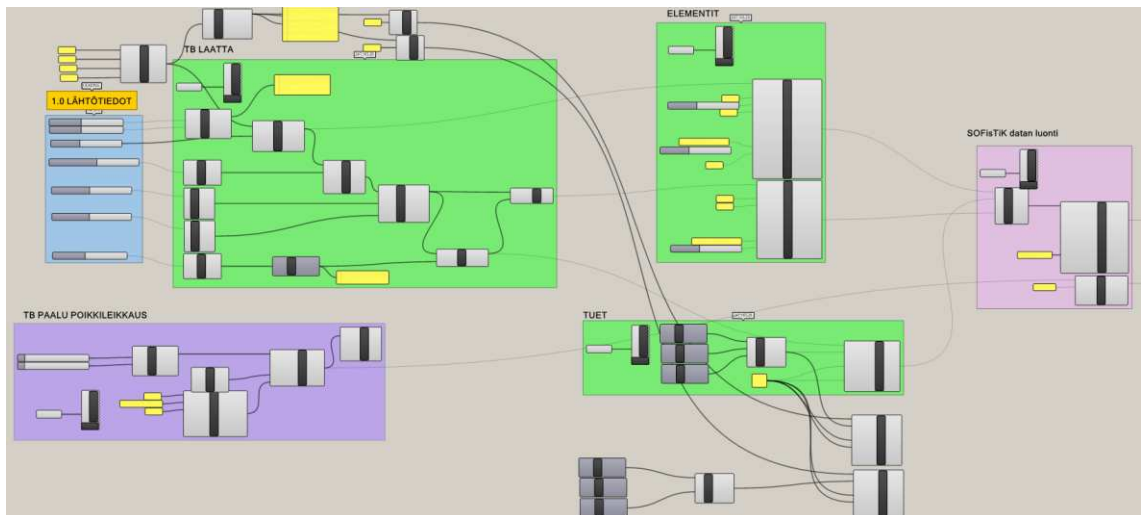
Kuva 17. Vaippahankaus vino- ja pystypaaluissa paalulaatan alla olevan maapohjan painuman vuoksi. Maapohjan painumaa aiheuttaa täyttö tai pohjaveden aleneminen. Vinopaaluihin kohdistuu lisäksi merkittäviä taivutus- ja leikkausrasituksia [6, s.24].

## 5 Luotu paalulaatta

Opinnäytetyön paalulaatta pohjan luonnissa käytettiin kahta eri ohjelmaa. Paalulaatan geometria luotiin Grasshopperilla, joka on lisäosa Rhinoceros-mallin-  
 nusohjelmaan. Grasshopper mahdollistaa graafisen algoritmi muokkaamisen, joka ei vaadi kokemusta ohjelmoinnista, mutta antaa silti mahdollisuuden luoda erilaisia haastavia malleja, joita voi muokata algoritmisesti. Voimasaure lasken-  
 nassa käytettiin SOFiSTiKin sisäistä ohjelmointityökalua Teddyä, joka mahdol-  
 listaa rakennemallin muokkaamisen koodikomennoilla tekstimuodossa. Teddy on tekstimuotoinen muokkaustyökalu, joka mahdollistaa mitoittamisen ja lujuus-  
 laskentaan annettavien komentojen ja toimintojen liittämisen rakennemalliin tekstimuodossa hyödyntäen ohjelmiston omaa CADiNP-kieltä.

### 5.1 Grasshopperilla luotu geometria

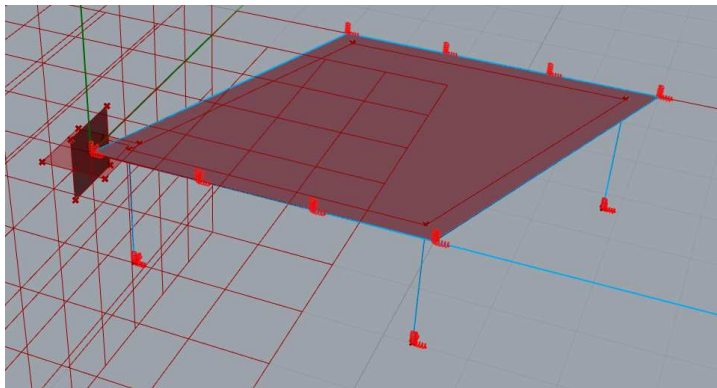
Grasshopperilla luotu geometria koostuu erilaisista komponenteista, jotka yhdis-  
 tetään toisiinsa johdoilla. Jokainen komponentti sisältää käskyn. Yhdistelemällä  
 erilaisia komponentteja saatiin luotua algoritminen koodi, joka voitiin tulostaa  
 tekstimuotoisena tiedostona SOFiSTiK:lle.



Kuva 18. Grasshopperilla luotu koodi [Räsänen 2024].

Komponentit ovat luonteeltaan erilaisia. Toisilla komponenteilla luodaan geometriaan viivaa, kun toisella komponentilla annetaan viivalle mittatietoja. Yhdistelemällä komponentteja luotiin algoritmisesti muokattava paalulaatta, jonka säädettäviin ominaisuuksiin kuuluu:

- laatan leveys
- laatan pituus
- laatan paksuus
- paalujen reunaetäisyys
- paalujen lukumäärä pituussuunnassa
- paalujen lukumäärä leveyssuunnassa
- paalujen pituus
- laatan nurkkapisteet suunnikkaan muotoisissa laatoissa
- elementtiverkon tiheys
- laatan tuentaehdot
- tuentojen jäykkyys (jousituennoilla).



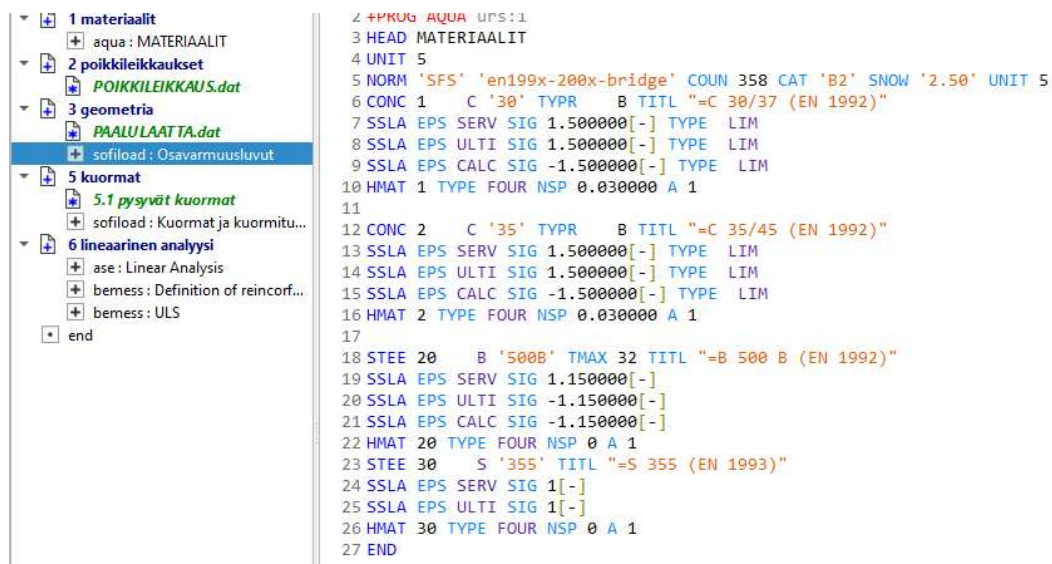
Kuva 19. Rhinoceros-ohjelmassa luodun Grasshopper-koodin esikatselu [Räsänen 2024].

Kun haluttu ja tarkasteltavaksi luotu geometria oli luotu Grasshopperilla, koodi muutettiin SOFiSTiK-ohjelmaa varten DAT-tekstimuotoiseksi tiedostoksi, joka voitiin syöttää SOFiSTiKin tekstimuokkaustyökaluun Teddyyn jatkokäsittelyä varten.

## 5.2 SOFiSTiKin ohjauskeskus Teddy

SOFiSTiK-ohjelmassa voidaan toimia usealla eri vaihtoehdoisella tyylillä, mutta tässä opinnäytetyössä pysytellään ainoastaan ohjelman tekstimuotoisessa ohjauskeskuksessa Teddyssä. Teddyssä luotu rakennemalli sisältää SOFiSTiKin aliohjelmat, joilla kullakin on oma erityistehtävänsä. Rakennemalliin käytettyjä aliohjelmia ovat:

- AQUA, jolla määriteltiin rakennemallin materiaalit.
- SOFILOAD, jolla määriteltiin kuormien kertoimet sekä kuormat.
- MAXIMA, rakenteen kuormitusyhdistelmät sekä rajatilatarkasteluiden kuormat.
- ASEn kautta analysoitiin rakennemallille aiheutuvat kuormitukset.
- BEMESSIIä määriteltiin rakenteenraudoite.



```

1 materiaalit
+ aqua : MATERIAALIT
2 poikkileikkaukset
+ POIKKILEIKKAUS.dat
3 geometria
+ PAAULLAATTA.dat
+ sofiload : Osavarmuusluvut
5 kuormat
+ 5.1 pysyvät kuormat
+ sofiload : Kuormat ja kuormitu...
6 lineaarinen analyysi
+ ase : Linear Analysis
+ bemess : Definition of reinf...
+ bemess : ULS
end

4 +PKUG AQUA UN5:1
3 HEAD MATERIAALIT
4 UNIT 5
5 NORM 'SFS' 'en199x-200x-bridge' COUN 358 CAT 'B2' SNOW '2.50' UNIT 5
6 CONC 1 C '30' TYPR B TITL "=C 30/37 (EN 1992)"
7 SSLA EPS SERV SIG 1.500000[-] TYPE LIM
8 SSLA EPS ULTI SIG 1.500000[-] TYPE LIM
9 SSLA EPS CALC SIG -1.500000[-] TYPE LIM
10 HMAT 1 TYPE FOUR NSP 0.030000 A 1
11
12 CONC 2 C '35' TYPR B TITL "=C 35/45 (EN 1992)"
13 SSLA EPS SERV SIG 1.500000[-] TYPE LIM
14 SSLA EPS ULTI SIG 1.500000[-] TYPE LIM
15 SSLA EPS CALC SIG -1.500000[-] TYPE LIM
16 HMAT 2 TYPE FOUR NSP 0.030000 A 1
17
18 STEE 20 B '500B' TMAX 32 TITL "=B 500 B (EN 1992)"
19 SSLA EPS SERV SIG 1.150000[-]
20 SSLA EPS ULTI SIG -1.150000[-]
21 SSLA EPS CALC SIG -1.150000[-]
22 HMAT 20 TYPE FOUR NSP 0 A 1
23 STEE 30 S '355' TITL "=S 355 (EN 1993)"
24 SSLA EPS SERV SIG 1[-]
25 SSLA EPS ULTI SIG 1[-]
26 HMAT 30 TYPE FOUR NSP 0 A 1
27 END
  
```

Kuva 20. Teddy tekstin muokkaus näkymä [Räsänen 2024].

Lisäksi Grasshopperilla luotiin SOFIMSHC-aliohjelma, jolla luotiin geometrian ääriviivat. Teddyssä annettiin siis Grasshopper -ohjelman tekstitiedoston sisältämille viivoille materiaalitiedot ja osavarmuusluvut. Lisäksi Teddyssä on käytännön syistä mielekästä antaa kohteille kuormat ja kuormitusyhdistelmät sekä suunnitella raudoite. Esimerkkikoodi raudoitteen luomisesta tekstimuotoisena tiedostona:

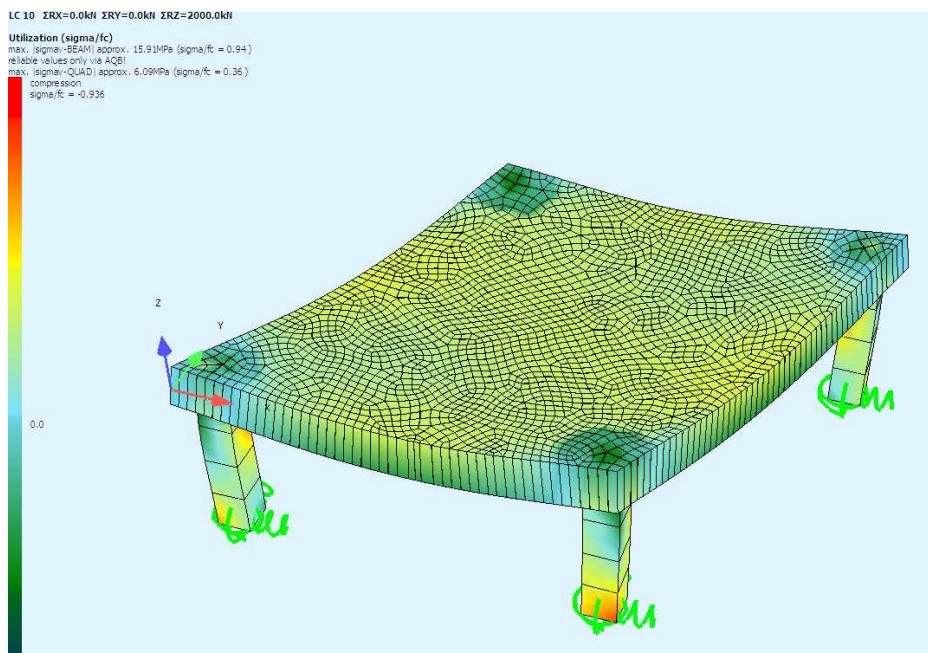
```

+prog bemess urs:7 $ Definition of reinforcement
head Definon of reinforcement
GEOM H - HA 32.5 DHA 15 HB 32.5 DHB 15 DDHA - DDHB -
THRE abex 67.5 abmi 0 abin - beex 67.5 bemi 0 bein -
PARA - DU 20 DU2 20 DU3 - DL 20 DL2 20 DL3 -
end

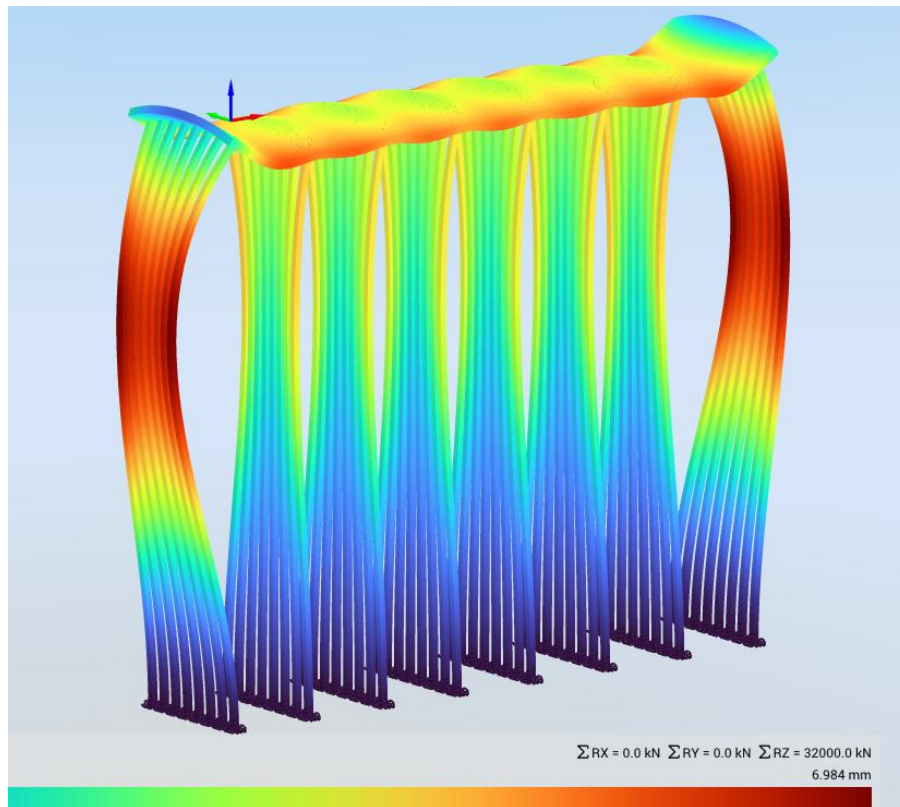
```

Esimerkkikoodi 1. Bemess-aliohjelmassa luotu tekstimuotoinen alitehtävä laatan ylä- ja alapintaan sijoitettavan raudoitteen etäisyydestä betonipintaan, raudoitteen kulmat suhteessa xy-koordinaatistoon sekä käytettävien raudoitetankojen halkaisijat.

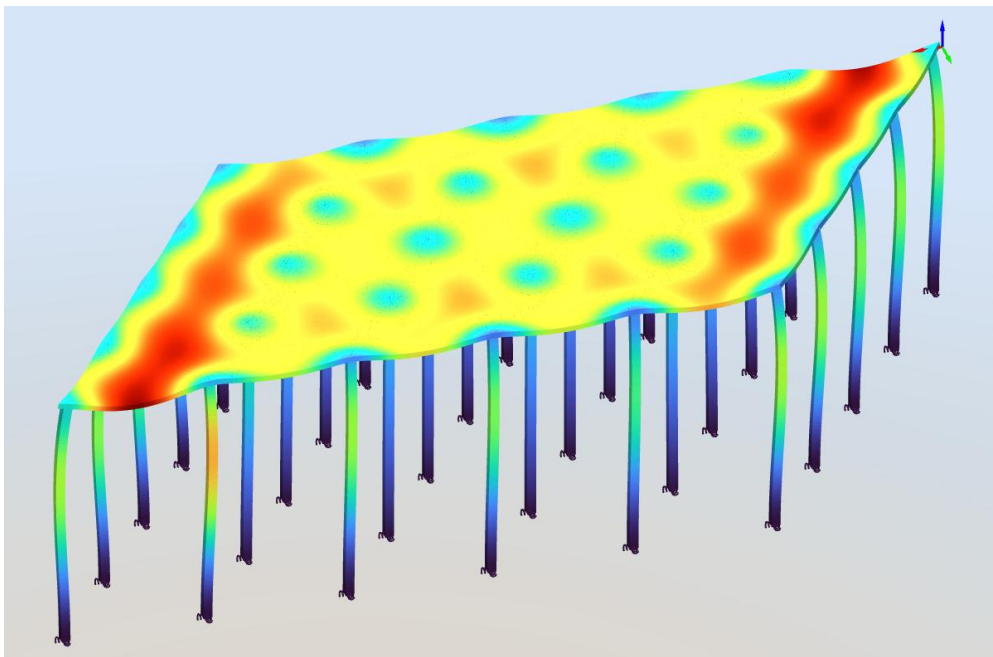
Aliohjelmat lisätään Teddysssä kirjoittamalla ”+ PROG aliohjelman nimi” omille riveilleen. Aliohjelmalle alistetaan sillä suoritettavia alitehtäviä. Aliohjelman tunnistaa komentoketjusta siitä, että se esiintyy tekstiriveissä punaisella tekstillä. Alitehtävät esiintyvät sinisenä. Heittomerkkien sisällä olevan tekstin Teddy tulkitsee tekstiksi ja harmaalla oleva teksti tulkitaan alitehtävän arvoksi.



Kuva 21. SOFiSTiKin System Visualization -näkyvä valmiista mallista [Räsänen 2024].



Kuva 22. SOFiSTiKin Viewer-näkymä. Mallipohjalla luotu suorakulman muotoinen paalulaatta [Räsänen 2024].



Kuva 23. SOFiSTiKin Viever-näkymä. Suunnikkaan muotoinen paalulaatta [Räsänen 2024].

## 6 Tulokset ja pohdinta

Työn tavoitteena oli luoda suorakulmainen paalulaatta pohja Grasshopper-ohjelmalla, joka voidaan syöttää tekstimuotoisena tiedostona SOFiSTiK:lle ja jatkaa mallin työstämistä SOFiSTiK:lla. Opinnäytetyön ajatuksena oli opettaa ja harjaannuttaa minua siltasuunnittelussa käytettäviin ohjelmiin, sekä tuoda uutta tietoa yritykselle SOFiSTiK:in käytettävyydestä yrityksen tarpeisiin.

Työn edetessä nousi kysymyksiä ohjelman laskentaprosesseista, jotka haluttiin selvittää riittävällä varmuudella, jotta tulevaisuudessa yrityksellä olisi enemmän tietoa laskennassa syntyvistä eroista muihin yrityksessä käytössä oleviin laskentaohjelmiin. Vaikka tulokset saatiin ohjelmien välillä vastaamaan toisiaan ja käsinlaskenta antoi saman suuruusluokan tuloksia, niin kriittisyys tietokoneavusteisiin laskentaohjelmiin on syytä säilyttää ja arvioida aina tapauskohtaisesti tulosten luotettavuus.

Varsinaista raudoitteen mitoittamista ei tässä opinnäytetyössä tehty. Voimasuureiden tarkastelussa keskityttiin ainoastaan taivutusmomenteihin ja niihin summattavaan vääntömomenttiin.

Opinnäytetyön haasteina oli täysin uusien ohjelmien opettelu lisäksi laskentatulosten validointi, sekä laskenta tulosten varmentaminen. Aiheesta oli vaikea löytää kirjallisuutta ja ohjelman laskelmien tulosten osoittaminen todeksi vaihtoehtoisilla laskentamenetelmillä oli haastavaa.

Opinnäytetyön ansiosta opin kuitenkin lukemaan ja analysoimaan FEM-laskenta ohjelmien antamia tuloksia. Koen, että tämän työn pohjalta minulla on paremmat mahdollisuudet analysoida FEM-laskennan tuloksia ja arvioida niiden paikansa pitävyyttä.

## Lähteet

- 1 Suomen Betoniyhdistys ry. 2022. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – Osa 2 2014 2. korjattu painos. Helsinki: BY-Koulutus Oy
- 2 Väylävirasto, Väyläviraston ohjeita. 5/2022. Eurokoodin soveltamisohje. Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. [www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)
- 3 SOFiSTiK AG, 2025. Bemess. Design of plates and shells. Bemess Manual, Service Pack 2025-0 Build 36.
- 4 Paasikallio, Kari. Kanerva, Pekka. Suomen Betoniyhdistys ry. Betonirakenteiden mitoitusohjeita ratkaisuihin. Otakustantamo 452.
- 5 Denton SR, Burgoyne CJ. The assessment of reinforced concrete slabs. Struct Eng. 1996 May;74(9):147–152.
- 6 Väylävirasto, Väyläviraston ohjeita 40/2023. Paalulaattarakenteiden suunnittelu, väylä/5342/06/04.01/2023
- 7 Väylävirasto, Eurokoodin soveltamisohje. Siltojen kuormat ja suunnittelu-  
perusteet – NCCI 1, Liikenneviraston ohjeita 24/2017
- 8 Väylävirasto, Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu – NCCI 7, Liikenneviraston ohjeita 14/2023