



Yksityistiesillan algoritmiavusteinen suunnittelu

Ruben Vikman

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2021

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talorakennustekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talonrakennustekniikka

VIKMAN, RUBEN:
Yksityistiesillan algoritmiavusteinen suunnittelu

Opinnäytetyö 60 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Huhtikuu 2021

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan algoritmiavusteisen suunnittelun mahdollisuuksia yksityistiesillan suunnittelussa. Opinnäytetyössä myös selvitetään mitä tarkoitetaan yksityistien sillalla ja erityisesti sitä, mitä vaaditaan sillalta, jolle haetaan valtion tukea. Ohjelmistoina tutkimuksessa käytettiin Rhinoceros 3D, Grasshopper, sekä Karamba3D -ohjelmia. Opinnäytetyön tilaajana toimi Ramboll Finland Oy. Opinnäytetyöhön sisältyy luottamuksellista tietoa, joten yksityiskohtainen tieto algoritmin rakenteesta on jätetty esittelemättä tässä työssä.

Suomen yksityisteillä on tuhansia siltoja. Näistä suuri osa on rakennettu 1900-luvulla ja ne alkavat olla suunnitellun käyttöikänsä päässä. Lisäksi tieliikenteen kuormat ovat kasvaneet useasti viimeisen 50 vuoden aikana ja esimerkiksi puutavara-autot usein joutuvat ylittämään näitä vanhoja pieniä tiesiltoja. Sillan uusiminen on kallis toimenpide varsinkin pienille tieosuuskunnille. Sillan uusimiseen tai korjaukseen voidaan myöntää monessa tapauksessa valtion avustusta. Kuitenkin vaatimattomankin sillan suunnitteluun kuluu aikaa laskentaan ja piirustusten tuottamiseen. Yksityistiesiltojen tilaajilla budjetti on usein hyvin rajallinen ja urakassa halutaan päästä mahdollisimman halvalla.

Opinnäytetyö koostuu kahdesta osiosta. Teoreettisesta kirjoitusosiosista ja toiminnallisesta tutkimusosiosista. Toiminnallisessa osiossa luotiin visuaalista ohjelmointia käyttäen suunnittelutyökalu, jolla voidaan mitoittaa yksiaukkoisen liimapuu- tai teräspalkkisillan päällysrakenne voimassa olevien euronormien ja Väyläviraston kansallisten ohjeiden mukaisesti ja tuottaa sillasta kolmiulotteinen NURBS-pintamalli. Teoreettisessa osiossa tehtiin kirjallisuusselvitystä yksityisteistä, yksityistien silloista ja valtionavustuksesta. Lisäksi tekstissä kuvataan ja analysoidaan opinnäytetyössä rakennetun algoritmin toimintaa.

Algoritmiavusteinen suunnittelu on yleistymässä rakennusalalla. Algoritmeissa on vielä valtavasti hyödyntämätöntä potentiaalia ja siksi on tärkeää, että yritykset teettävät opiskelijoilla tutkimuksia aiheesta. Toivon mukaan algoritmit ja niiden soveltaminen suunnittelussa saavat tulevaisuudessa oman paikkansa myös suunnittelijoiden koulutuksessa.

Asiasanat: algoritmiavusteinen suunnittelu, grasshopper, yksityistien silta, liimapuu, teräs

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Building Construction

VIKMAN RUBEN
Algorithm-Aided Design of a Private Road Bridge

Bachelor's thesis 60 pages, appendices 1 page
April 2021

In this thesis, the possibilities of algorithm-aided design in the design of a private road bridge were investigated. The thesis also explained what was meant by a private road bridge and especially what was required of a bridge for which the state support was sought. Rhinoceros 3D, Grasshopper, and Karamba3D were the softwares used in the study. The client of the thesis was Ramboll Finland Oy. The thesis contains confidential information, so any detailed information about the structure of the algorithm was not presented in this work.

There are thousands of bridges on the Finnish private roads. Many of these were built in the 20th century, and are at the end of their planned lifespan. In addition, the road traffic loads have increased frequently over the past 50 years and, for example, timber trucks must often cross these old small road bridges. Renovating the bridge is an expensive operation, especially for small road cooperatives. In many cases, a state grant can be awarded for the renewal or repair of a bridge. However, even for a modest bridge design, it takes time to calculate and produce drawings. Subscribers to private road bridges often have a very limited budget and want to get the contract as cheap as possible.

The thesis consisted of two parts. The theoretical writing part and the functional research part. In the functional part, a design tool was created using visual programming to dimension the superstructure of a single-span glulam or steel girder bridge in accordance with the current Euronorms and the national guidelines of the National Agency for Fairways and to produce a three-dimensional NURBS surface model of the bridge. In the theoretical part, a literature review of private roads, private road bridges and state subsidies was conducted. In addition, the text described and analyzed the operation of the algorithm built in the thesis.

Algorithm-aided design is becoming more common in the construction industry. There is still a huge untapped potential in algorithms, and it is therefore important that companies commission students to conduct research on the subject. I hope that the algorithms and their application in design will also have their place in the training of designers in the future.

Key words: algorithm-aided design, grasshopper, private road bridge, glulam, steel

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	TYÖN TAVOITTEET JA RAJAUKSET	6
3	YKSITYISTEIDEN SILLAT	7
	3.1 Yksityistiet ja valtionavustus	7
	3.2 Sillat yksityisteillä	12
	3.2.1 Palkkisiltojen historiaa	12
	3.3 Sillan rakenteet	18
	3.3.1 Pintarakenteet	19
	3.3.2 Pääkannattajat.....	22
	3.3.3 Alusrakenteet.....	26
	3.3.4 Varusteet.....	27
	3.4 Yksityistiesillan kuormat	29
	3.4.1 Pystykuormat.....	29
	3.4.2 Kuormien yhdistely	33
4	ALGORITMIAVUSTEINEN LASKENTA JA OPTIMOINTI.....	36
	4.1 Ohjelmat.....	36
	4.1.1 Rhinoceros 3D.....	36
	4.1.2 Grasshopper.....	37
	4.1.3 Karamba3D	38
	4.2 Algoritmi pohjaisen laskentamallin toimintaperiaate	39
	4.2.1 Lähtötiedot.....	39
	4.2.2 Perusgeometria	40
	4.2.3 Karamba 3D komponentit.....	42
	4.2.4 Palkkien mitoitus.....	49
	4.2.5 Palkkien Galapagos-optimointi	51
5	POHDINTA	54
	5.1 Algoritmin tekoprosessi	54
	5.2 Algoritmin toimivuus	55
	5.3 Haasteet.....	55
	5.4 Jatkokehitys	56
	5.5 Yhteenveto.....	56
	LÄHTEET	57
	LIITTEET	59
	Liite 1. Sillan yleispiirustus	59

1 JOHDANTO

Siltojen suunnittelijat kohtaavat työssään tehtäviä, jotka vievät paljon aikaa, mutta toistuvat samanlaisina projektista toiseen. Näitä toisteisia työtehtäviä voidaan antaa tietokoneiden ratkaistavaksi algoritmien avustuksella, jolloin suunnittelijoille jää enemmän aikaa muihin tehtäviin. Lisäksi algoritmit ovat tehokkaita optimointitehtävissä, kuten materiaalimenekin minimoinnissa. Kun annetaan tietokoneen toimittaa laskentatehtäviä, myös inhimilliset näppäilyvirheet jäävät pois, edellyttäen tietenkin, että algoritmit on rakennettu oikein.

Opinnäytetyön aihe on ”Yksityistiesillan algoritmiavusteinen suunnittelu”. Toimeksiantaja eli Ramboll Finland Oy on teettänyt monia algoritmiseen suunnitteluun liittyviä opinnäytetöitä. Aihe tuli heidän aloitteestaan.

Opinnäytetyössä tutkin algoritmeihin ja parametriseen suunnitteluun pohjautuvia menetelmiä, joiden avulla voisi nopeuttaa ja automatisoida pienten tiesiltojen suunnittelua. Vaatimattomankin sillan suunnitteluun kuluu aikaa laskentaan ja piirustusten tuottamiseen. Aika on rahaa ja suunnittelutyö kallista. Työkalun tavoite on parantaa yrityksen kilpailukykyä pienissä siltakohteissa. Työkalun lisäksi perehdyn tässä opinnäytetyössä yksityistiesiltojen mitoitukseen ja suunnitteluun ja valtion myöntämään yksityistietukeen.

Oma tähänastinen kokemukseni silloista on vähäistä, samoin kuin ohjelmista, joilla algoritmiavusteista suunnittelua tehdään. Tämän työn taustalla on myös henkilökohtainen tavoitteeni tutustua siltoihin ja väylärakenteisiin, sekä oppia käyttämään monia uusia sovelluksia, joita tulevaisuudessa tulen työelämässä tarvitsemaan.

2 TYÖN TAVOITTEET JA RAJAUKSET

Tässä opinnäytetyössä päätavoitteena on tutkia algoritmiavusteisen suunnittelun mahdollisuuksia yksityistiesillan suunnittelussa. Opinnäytetyössä myös selvitän mitä tarkoitetaan yksityistien sillalla ja erityisesti sitä, mitä vaaditaan sillalta, jolle haetaan valtion tukea.

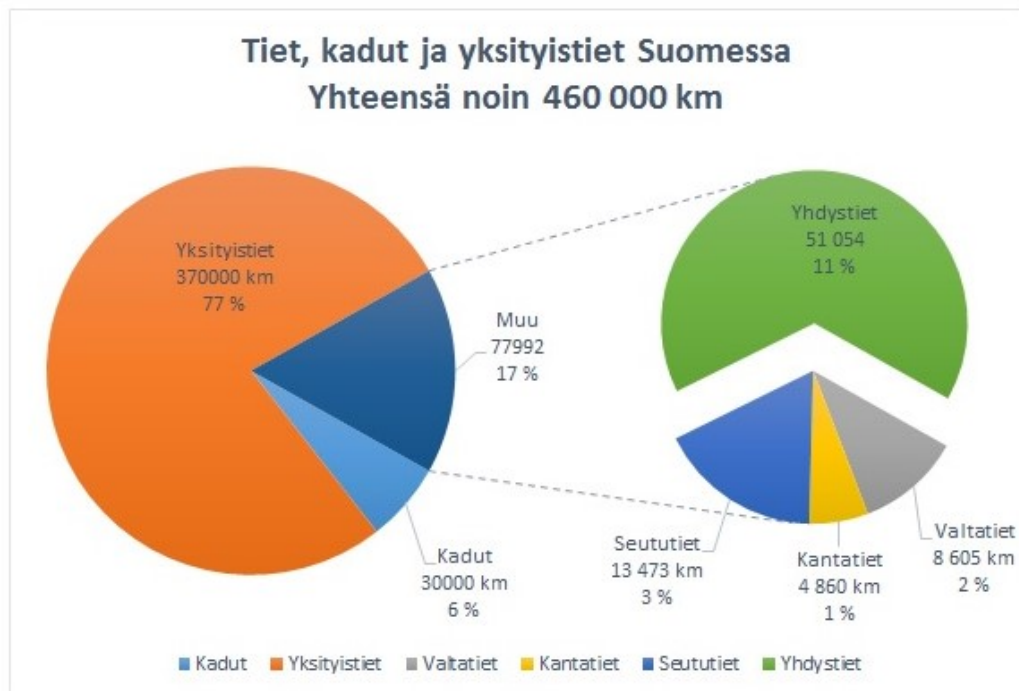
Opinnäytetyö koostuu kahdesta osiosta. Teoreettisesta kirjoitusosiosista ja toiminnallisesta tutkimusosiosista. Toiminnallisessa osiossa tavoitteena on luoda visuaalista ohjelmointia käyttäen suunnittelutyökalu, jolla voidaan mitoittaa yksiaukkoisen liimapuu- tai teräspalkkisillan päällysrakenne voimassa olevien euronormien ja Liikenne- ja viestintäviraston kansallisten ohjeiden mukaisesti. Tavoitteena olisi myös, että sillasta saisi tuotettua piirustuksia algoritmin avulla. Teoreettisessa osiossa teen kirjallisuusselvitystä yksityisteistä, yksityisteiden silloista ja valtionavustuksesta. Lisäksi kuvaan ja analysoin rakentamani algoritmin toimintaa.

Toiminnallisessa osiossa suunniteltavalle sillalle piti asettaa muutamia rajoituksia, jotta tutkimuksesta ei tulisi liian laaja. Sillan tyyppiä rajautui yksiaukkoisen palkkisilta. Palkkien materiaaliksi rajattiin teräs ja liimapuu. Poikkileikkausprofiileiksi rajattiin liimapuulle suorakaide ja teräkselle valssatut HEA- ja HEB-profiilit. Silta olisi myös tässä vaiheessa vielä yksikaistainen, jolloin sen hyötyleveys rajattiin 4,0 – 5,3 metriin. Tutkimuksessa käytettävät ohjelmat ovat: Rhinoceros 3D, Grasshopper ja Karamba3D.

3 YKSITYISTEIDEN SILLAT

3.1 Yksityistiet ja valtionavustus

Suomessa tiet jaetaan kolmeen luokkaan: kadut, maantiet ja yksityistiet. Kadut kuuluvat kuntien ja kaupunkien vastuulle. Maantiet ovat valtion omistuksessa olevia teitä, joista huolehtii tällä hetkellä ELY-keskukset. Kaikki muut tiet ovat yksityisteitä. Yksityisteiden yhteenlaskettua pituutta on vaikea mitata, mutta niitä on Suomessa arviolta noin 360-370 tuhatta kilometriä. (Maanmittauslaitos 2019, Suomen Tieyhdistys 2017)

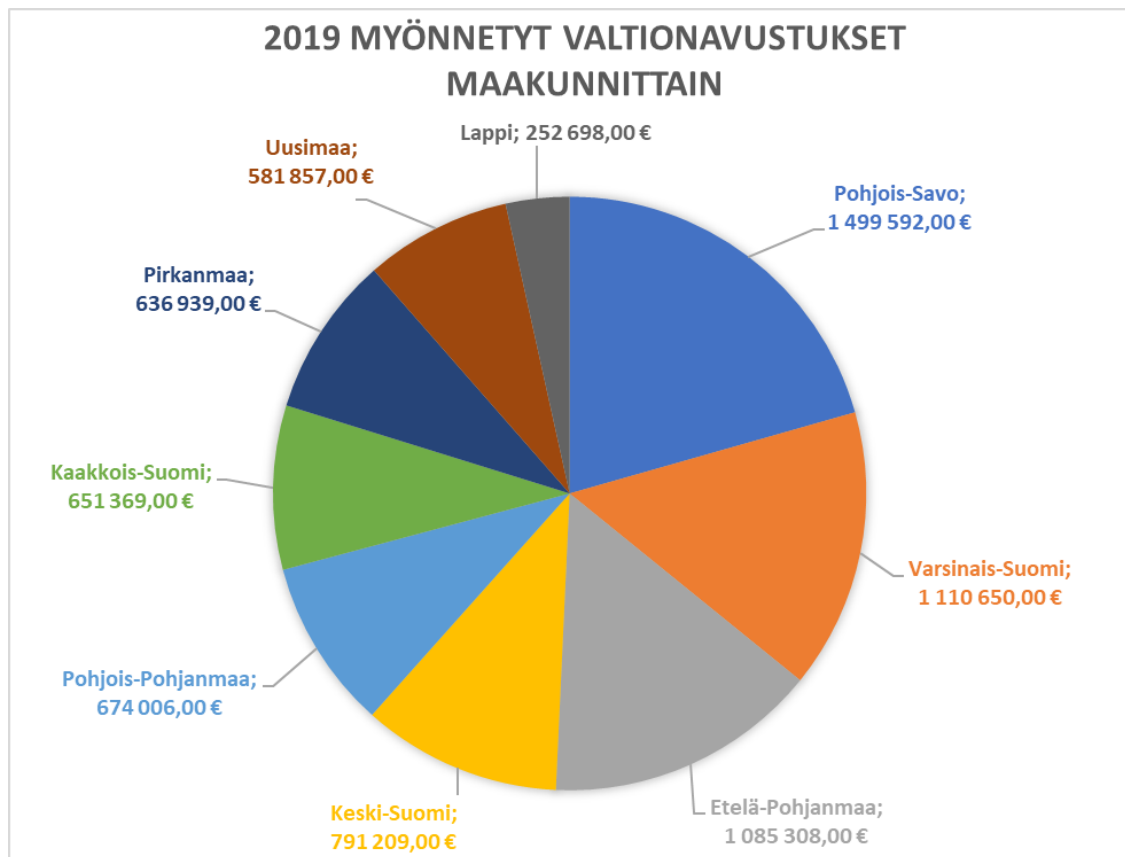


KUVIO 1. Suomen tieverkosto (Suomen tieyhdistys 2018)

Yksityisteiden rakentamisesta ja ylläpidosta vastaavat maanomistajat. Maanomistajat voivat perustaa tiekunnan, joka helpottaa yhteisen tien hoitamista. Tie-kunnalla on velvollisuus pitää tie tarkoitustaan vastaavassa kunnossa. (Traficom 2020) Suomessa tiekunnat koostuvat usein vain muutamista kiinteistöistä.

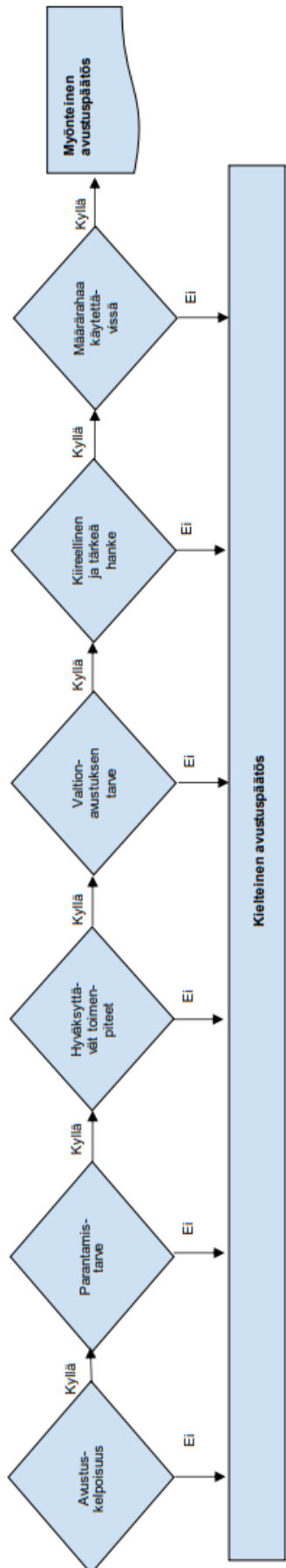
Valtion talousarviossa määritellään vuosittain määräraha yksityisteiden tienpi-ttoon, jonka puitteissa valtionavustusta myönnetään ensisijaisesti rakentamiseksi

luokiteltavaan yksityisteiden parantamiseen. Tiekunnat voivat hakea ELY-keskukselta valtionavustusta tien ylläpito- ja korjauskuluihin. Hakulomake täytetään ELY-keskuksen verkkosivuilla ja se voidaan lähettää sähköisesti tai postittamalla. Vuonna 2019 Suomessa myönnettiin valtionavustusta yksityistiehankkeisiin yhteensä 7 283 628,00 €, josta siltahankkeiden osuus on 4 427 855,00 €, eli yli 60%. Myönteisiä valtionavustuspäätöksiä vuonna 2019 oli yhteensä 161 kappaletta, joista siltoja koskevia oli 37 kappaletta. (ELY-keskus 2021)



KUVIO 2. Valtionavustusten jakautuminen maakunnittain 2019 (ELY-keskus 2021)

Yksityistielain mukainen valtionavustus on harkinnanvarainen ja siihen vaadittujen edellytysten on täytyttävä. Yksityistielain mukaisiin valtionavustuksiin sovelletaan valtionavustuslakia. Tarkat ehdot ja ohjeet valtionavustuksen hakemisesta löytyvät Liikenne- ja viestintäviraston, Traficom, julkaisusta: Yksityisteiden valtionavustukset. Hankkeen avustuskelpoisuus selvitetään avustushakemuksen käsittelyn yhteydessä. Tarvittaessa tehdään myös maastokäynti tai maastotarkastus ennen avustuspäätöksen tekemistä. Varsinainen avustuspäätös tehdään vasta, kun hanke on todettu avustuskelpoiseksi. (Väylä 2021)



Kaavio 1. Hankkeen avustamisen harkinnanvaraisuus. (Traficom 2020)

Siltahankkeet luokitellaan ensisijaisesti avustettaviin hankkeisiin, johtuen niiden kriittisestä roolista tiellä liikennöinnin kannalta. Tyypillisesti siltahankkeessa on kyse siltarakenteiden uusimisesta tai korjaamisesta, sillan korvaamisesta putki-sillalla tai -rummulla, tai koko sillan uusimisesta. Valtionavustus on yleensä 50 %, mutta voi olla jopa 75 % hankkeen hyväksytyistä ja tukikelpoisista arvonlisäverollisista kustannuksista. Merkittävässä ja yllättävässä luonnonolosuhteiden aiheuttamissa korjauskohteissa, sekä Siltoihin liittyvissä hankkeissa avustus on yleensä 75 %. Avustusta ei voida myöntää takautuvasti. (Traficom 2020)

Suunnitelmat avustushakemuksen liitteenä

Avustushakemuksen liitteeksi tarvitaan hankkeen koon mukaan eri määrä suunnitelma-asiakirjoja. Suuremmissa hankkeissa vaaditaan yksityistiesuunnitelma mutta pienemmissä hankkeissa riittää kevennetty suunnittelumenettely. Siltahankkeissa tiekunnan on tilattava suunnitelmat riittävän kokemuksen ja pätevyyden omaavalta suunnittelijalta.

Yksityistiesuunnitelmaan sisältyviä asiakirjoja ovat

- suunnitelmaselostus
- alustava kustannusarvio
- suunnitelmakartta
- pituus- ja poikkileikkaus.

(Tarvittaessa suunnittelun perusteina käytetään maaperätutkimuksia ja kantavuusmittauksia.)

Kevennettyyn suunnittelumenettelyyn sisältyviä asiakirjoja ovat

- kustannusarvio (sisältäen määräluettelon)
- työselitys
- kartta sopivassa mittakaavassa.

Lisäksi siltahankkeissa rakentamista ja valtionavustuksen hakemista varten laaditaan rakennussuunnitelma. (Traficom 2020) Rakennussuunnitelmaan sisältyviä asiakirjoja ovat

- yleispiirustus
- rakennepiirustukset
- suunnitelmaan liittyvät muut piirustukset
- kustannusarvio (sisältäen määräluettelon)
- siltakohtainen työselitys tai laatuvaatimukset tarvittaessa
- perustamistapalausunto.

Viranomaisluvut ja lausunnot

Suunnitteluun sisältyy aina viranomaislausuntojen ja -lupien hakeminen. Tarvitavien lupien ja lausuntojen määrä on selvitettävä hankekohtaisesti. (Traficom 2020) Tarvittavia lupia ja lausuntoja ovat

- aukkolausunto, kun siltarummun tai sillan aukon halkaisija on suurempi kuin 1000mm
- vesilupa. (Vesilain 3. luvun 2. ja 3. §)
- ELY-keskuksen ympäristövastuualueen lupa Natura-alueiden lähellä
- ELY-keskuksen ympäristövastuualueen ympäristölupa pohjavesialueella ja käytettäessä kierrätysmateriaaleja, kuten kumi- ja betonirouhe
- liittymälupa liityttäessä maantiehen, tai toiseen yksityistiehen
- maankäyttö- ja rakennuslain mukainen toimenpidelupa tai maisematyölupa.

3.2 Sillat yksityisteillä

Tämänhetkisen arvion mukaan Suomen yksityisteillä on kaikkia siltoja yhteensä lähes 12 000 kappaletta. (Pisto 2020) Yksityisteiden sillat ovat usein jännemitaltaan vaatimattomia, jolloin yksiaukkoinen palkkirakenne on niihin kustannustehokas ja toimiva ratkaisu. Tässä opinnäytetyössä keskitytään yksiaukkoiseen palkkisiltaan, jonka kansirakenteena toimii poikittainen parrukansi kulutuslankutuksella ja pääkannattajina liimapuu- tai teräspalkit. Puurakenteisissa silloissa liimapuupalkkisillat (KUVA 1. ja KUVIO 3.) ovat käytetyin siltarakenne. Niitä on Suomessa yli 300.

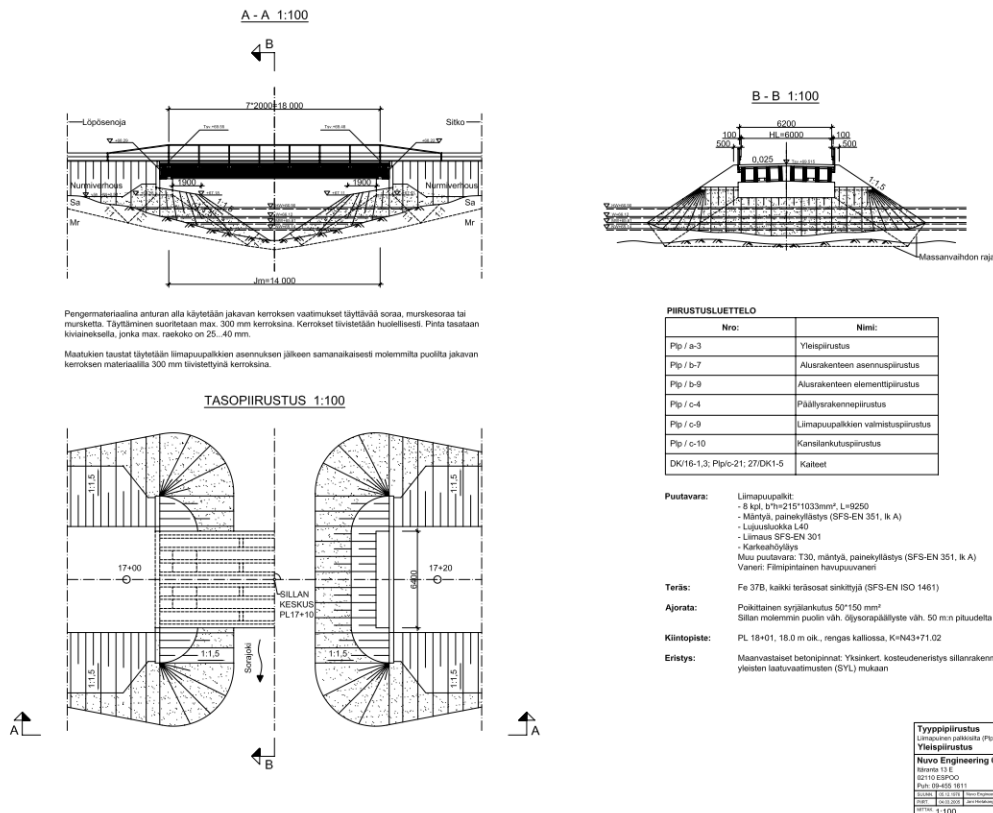


KUVA 1. Liimapuinen palkkisilta (Leskelä J. 2018)

3.2.1 Palkkisiltojen historiaa

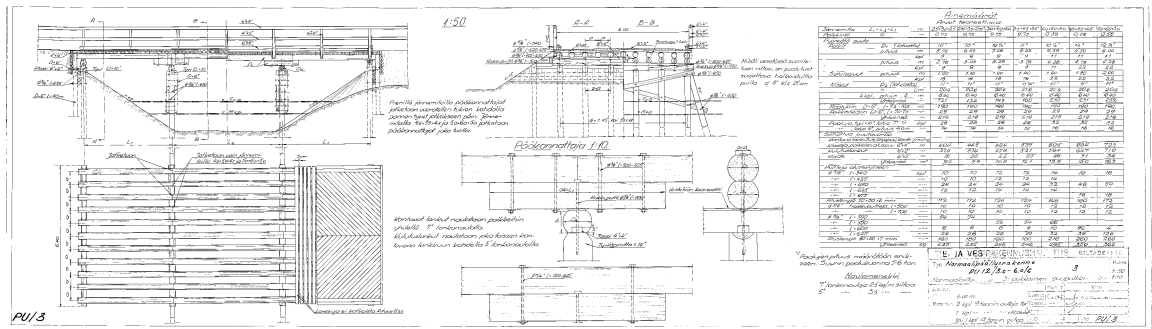
Tie- ja Vesirakennushallitus (TVH) julkaisi vuonna 1976 tyyppiirustukset liimapuupalkkisillalle. Piirustuksille julkaistiin päivitetty ohje Tiehallinnon toimesta vuonna 2009. Lähes kaikki Suomen liimapuupalkkisilloista on toteutettu

kyseisellä tyyppisarjalla. (KUVIO 3.) Mitoituskuormina silloissa käytettiin kuormia AkI ja EKII (Väylä 1999). Vuonna 2013 voimaan astunut raskaiden ajoneuvojen ajoneuvoasetus (AA13) kasvatti tiesiltojen mitoituskuormaa. Plp-tyyppisillan tyyppiirustuksia ei ole päivitetty uusille kuormille.



KUVIO 3. Yleispiirustus liimapuisesta tyyppisillasta (Tiehallinto 2005)

Ennen liimapuupalkkien yleistymistä palkkeina käytettiin paljon pyöröpaisia palkkeja, joita asennettiin kaksi tai kolme päällekkäin ja sidottiin toisiinsa teräsvaarnoilla. Tyyppillinen vaarnapalkkisilta oli kolmeaukkoinen (5+6+5 m) ja se oli perustettu puupaaluille. Välitukien kohdalla oli satulapuut (KUVA 2.). 1900-luvulla vähäliikenteisille teille tehtiin muutamia tyyppisarjoja joita myös sovellettiin tarvittaessa. Yhtenä esimerkkinä kolmiaukkoinen PU-tyyppi (KUVIO 4.) (Siltojemme historia 2004, 103) Eniten pyöröpaisia vaarnapalkkisilloja rakennettiin 1960- ja 70-luvuilla ja ne alkavat olla jo suunnitellun käyttöikänsä (50v) loppupäässä. Suuri osa näistä silloista on painorajoitettuja ja odottavat uusimista tai laajaa peruskorjausta (Väylä 2017).

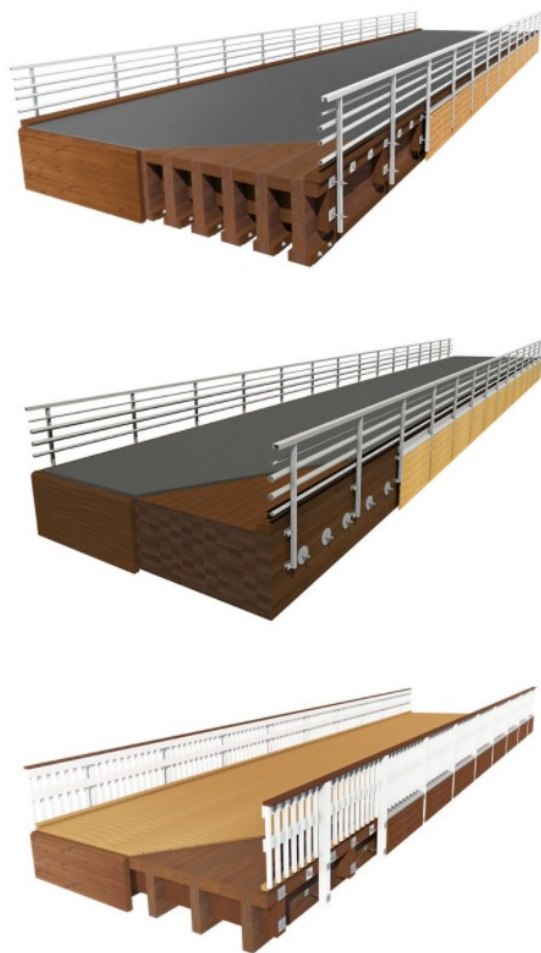


KUVIO 4. PU-tyyppisilta (Väylävirasto 2021)



KUVA 2. Mairioiden puupalkkisilta Rovaniemellä (Väylä 2017)

Vanhat puusiltojen tyyppisarjat eivät ole olleet käytössä enää vuosiin. Tällä hetkellä ainoat hyväksytyt puutyypisillat ovat Versowoodin poikittaisjännitetyt liimausillat, joita on kolmea tyyppiä: Ajoneuvoliikenteen palkkisilta, Ajoneuvoliikenteen laattasilta, sekä Kevyenliikenteen silta (KUVIO 5.).



KUVIO 5. Suomen ainoat tyyppihyväksytyt liimapuusillat (Versowood 2021)

Teräspalkkisillat ovat liimapuupalkkisiltojen lisäksi yleisiä yksityisteillä. Myös niistä on julkaistu aikanaan tyyppisarjoja. Vuonna 1981 TVH julkaisi ohjeen, Valsattujen teräspalkkien käyttö puukantisissa teräspalkkisilloissa, jonka mukaan rakennettuja siltoja on vielä käytössä (KUVA 3.). Kasvaneitten liikennekuormien takia kyseinen ohje ei ole myöskään enää voimassa.



KUVA 3. TVH 722069:n mukainen puukantinen teräspalkkisilta (Tiehallinto 2008)

Ainoa Suomessa tyyppihyväksytty teräspalkkisilta tällä hetkellä on Ruukin Easy Bridge (KUVA 4.). Ruukki Easy Bridge on pitkälle esivalmistettu liittorakenteinen siltakonsepti. Se koostuu esivalmistetusta teräspalkkirungosta, joka nostetaan valmiina paikalleen ja sen päälle ladotaan teräsbetoniset kansielementit, jotka juotetaan kiinni teräspalkkeihin. Liittovaikutus rakenteeseen on toteutettu teräspalkkirungon yläpinnassa olevilla kannen sisään uppoavilla metallisilla vaarnoilla. Kansi voidaan toteuttaa myös paikallavalettuna. Easy Bridgestä on saatavana kaksi versiota: Classic ja Premium. Classic on tarkoitettu pienempiin siltakohteisiin, kuten juuri yksityisteille. Sillan asentamiseen siltapaikalla kuluu kokonaisuudessaan vain muutama päivä, jolloin rakentamisen haitat liikenteelle jäävät todella lyhytaikaisiksi. Ruukki toimittaa aineistonluovutuspyyntöä vastaan valmiit suunnitelmapohjat suunnittelijalle, jotka pitää vain sovittaa siltapaikkasuunnitelmiin. Alusrakenteiden suunnittelu täytyy tehdä hankekohtaisesti, mutta Ruukki antaa siihenkin valmiita suunnitelmapohjia ja valmiiksi lasketut laakerikuormat. Vaikka asentaminen on todella nopea toimenpide ja suunnittelukin pitkälle tehty, ottaa viranomaisluvut ja lausunnot aina oman aikansa. Siksi myös Easy Bridge:n kohdalla on varattava siltahankkeelle aikaa vähintään 12 kuukautta.



KUVA 4. Korojoelle asennettiin Ruukin Easy Bridge (Ruukki 2018)

Suomen silloista on koottu Väyläviraston toimesta kattava digitaalinen tietokanta, Taitorakennerekisteri. Rekisteristä ei vielä kaikkea tietoa eikä kaikkia siltoja löydy, mutta sitä päivitetään kaiken aikaa. Yksityisteiden silloista kuitenkin vain murto-osa löytyy kyseisestä rekisteristä. Tähän tiedonpuutteeseen on tulossa näillä näkymin helpotusta. Metsäkeskuksen metsäbiotalouskoordinaattorin, Timo Piston mukaan käynnissä on hanke, jossa tuotetaan tietoa yksityistiesiltojen määrästä, rakennusmateriaalista, kunnosta ja investointitarpeista. (Pisto 2020)

3.3 Sillan rakenteet

Sillan pää rakenneosat voidaan luokitella päällysrakenteisiin, alusrakenteisiin, varusteisiin ja laitteisiin, sekä siltapaikan rakenteisiin. Päällysrakenne on sillan osista tärkein. Se mahdollistaa kuormien siirtymisen esteen tai alittavan väylän yli. Päällysrakenteisiin sisältyvät pääkannattajat sekä pintarakenteet. Alusrakenteet vastaanottavat kuormat päällysrakenteilta ja siirtävät ne kantavaan pohjaan, joka voi olla esimerkiksi kallio tai kantava maakerros. Alusrakenteisiin kuuluvat sillan tuet, kuten väli- ja päätytuot, jotka voivat olla esimerkiksi pilareita tai maatukia. Alusrakenteisiin lasketaan myös tukiseinät, muurit ja siirtymälaatat, sekä perustusrakenteet, kuten paalut ja anturat. Sillan varusteita ja laitteita ovat kaiheet, laakerit, liikuntasaumalaitteet, kosketussuojaseinät, valaisimet pylväineen ja hoitosillat yms. Siltapaikan rakenteiksi kutsutaan rakenteita, jotka eivät suoranaisesti kuulu siltaan, mutta ovat tärkeässä roolissa siltapaikan toimivuuden, ja pitkäaikaiskestävyyden kannalta. Siltapaikanrakenteita ovat esimerkiksi Pengerkaiheet, luiskat ja eroosiosuojaukset. (RIL 179-2018 Sillat, 44)



KUVIO 6. Sillan alusrakenteet ja siltapaikan rakenteet (Liikennevirasto 2013)

3.3.1 Pintarakenteet

Pintarakenteet ovat osa päällysrakenteita ja ne ovat tiesiltojen rakenneosista lyhytikäisin ja eniten kunnossapitoa vaativa osa. Pintarakenteet altistuvat kovalle kulutukselle sillalla liikennöinnin takia, sekä osaltaan suojelevat niiden alapuolisia rakenteita ottamalla kovat säärasitukset vastaan. Pintarakenteena voidaan tiesilloissa käyttää esimerkiksi asfalttia, puulankutusta, tai maata. Yksityistiet ovat pääsääntöisesti sorateitä, jolloin pintarakenteena toimii usein kaksi jälkimmäistä. Puusilloissa maatyte on kuitenkin ongelmallinen, koska maan kosteus lahottaa puukannen nopeasti.

Siltojen pintarakenteen alle tehdään yleensä vedeneristys suojaamaan kantavia rakenteita kastumiselta. Puukansissa ei vedeneristystä suositella käytettäväksi, vaan lankkujen oikeaoppisella asentamisella ja toimivalla vedenpoistolla pyritään vähentämään veden valumista kansirakenteen läpi niin, että primäärirakenteet pysyvät riittävän kuivina. (RIL 179-2018 Sillat, 226; Ruotsila 2016, 22) Jos puukantinen silta kuitenkin päällystetään, käytetään vedeneristeenä yleensä kumibitumimastiksia jonka päälle valetaan kumibitumivaluasfaltti.

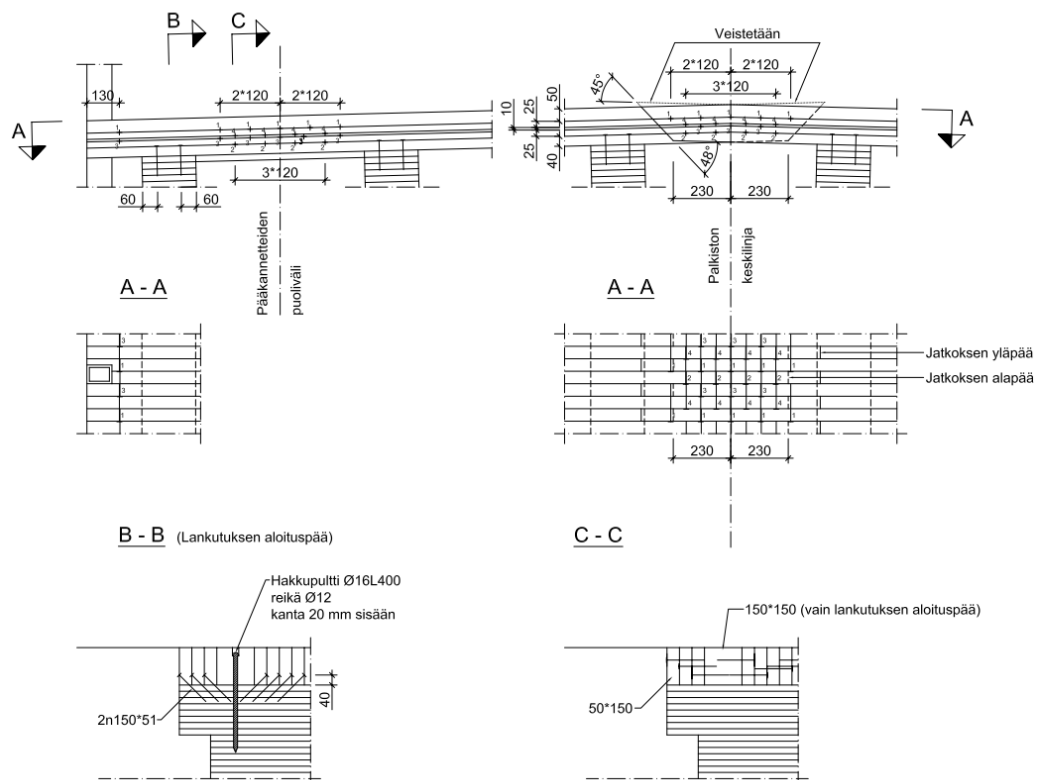


KUVA 5. Syrjälankkukannen rakoilun tai huonon vedenpoiston vuoksi pääkantajat voivat altistua kosteudelle (SILKO 1.401 2018)

Syrjälankkukansi

Syrjälankkukansi on pitkään käytössä ollut rakenneratkaisu puukansissa. Pyöräkuormien kasvun myötä 1960- ja 1970-luvuilla puulankkukansissa siirryttiin lappeellaan olleista lankuista syrjälankkuihin. Vuonna 1969 Suomen ensimmäinen liimapuusilta toteutettiin pitkittäissuuntaisella syrjälankkukannella. 1970-luvulla syrjälankkukansi alettiin asentaa pääosin poikittaisena. (Siltojemme historia 2004, 126).

Syrjälankkukansi rakennetaan nimensä mukaisesti naulaamalla lankkuja vierekkäin syrjälleen. Lankut ovat tyypillisesti mitoiltaan 50mm x 125...200mm. Oikein rakennettuna kansilankut eivät pääse merkittävästi rakoilemaan, vaan pysyvät tiukkana yhtenäisenä pakettina. Puun on oltava *paineekyllästettyä mäntyä* ja lujuusluokaltaan vähintään C24. Mikäli kansi toimii jäykisteenä, on lujuus oltava C30. (SILKO 1.401 2018) Syrjälankkukansi kuuluu käyttöluokkaan 3, koska se on sään ja veden välittömille vaikutuksille altis rakenneosa. Puumateriaalin ja ympäristöolosuhteiden tulee kuitenkin täyttää vielä rakentamisvaiheessa käyttöluokan 2 vaatimukset. (NCCI 5 2013, 14)



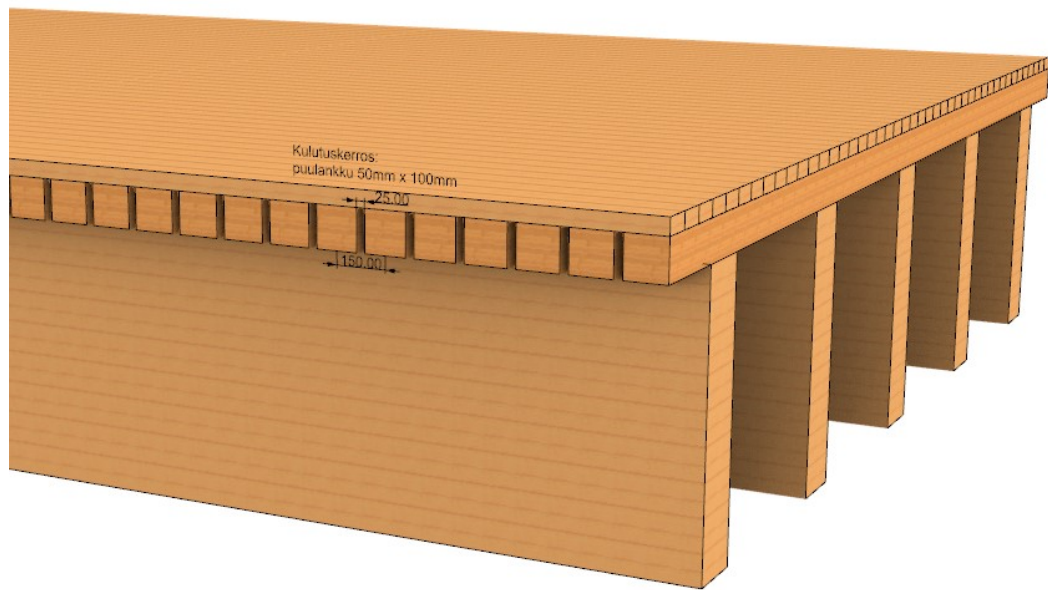
KUVIO 7. Syrjälankkukannen naulausperiaate (Liikennevirasto 2005)

Syrjälankkukannen etuja ovat sen edullisuus ja keveys. Lankutuksen heikkous on sen hidas asennus verrattuna esimerkiksi liimapuuelementtikanteen. Suurin ongelma rakenteessa on kuitenkin sen kulutuskestävyydessä. Nastarenkaat ja lumiaurat kuluttavat puuta nopeasti. Tämän takia lankutus tulee käytännössä kyseeseen vain vähäliikenteisillä teillä. Lisäksi lankkukannesta on vaikea saada täysin tiivistä, jolloin alapuoliset rakenteet kärsivät kosteudesta. Usein syryälankkukansien päälle asennetaan erikseen vielä kulutuslankutus, joka nimensä mukaan suojelee alla olevia syryälankkuja kulutukselta pidentäen niiden käyttöikä. Kulutuslankut asennetaan lappeelleen ja tyypillisesti kalanruotomaisesti viistoon kannen suuntaan nähden ja limittyen sillan keskilinjalla. (SILKO 1.401 2018; RIL 179-2018 Sillat, 226)

Puusiltojen suunniteltu käyttöikä on yleensä 50 vuotta, mutta mikäli puurakenne suunnitellaan helposti vaihdettavaksi, kuten syryälankkukansi suunnitellaan, sen suunnittelukäyttöikäksi voidaan laskea 25 vuotta. (NCCI 5 2013, 11)

Kyllästetyt puuparrut kansirakenteena

Tässä opinnäytetyössä suunniteltavan sillan kansirakenteeksi valikoitui harvalankutus (KUVIO 8.). Se on edullinen ja helppo asentaa ja tarvittaessa myös vaihtaa. Kansi koostuu sillan suuntaan nähden poikittain asennettavista lujuusluokitelluista kyllästetyistä mäntyparruista, joiden päälle naulataan kulutuskerrokseksi kyllästettyä 50 mm x 100 mm lankkua lappeelleen sillan suuntaisesti. Parrujen lujuusluokaksi valikoitui C30 ja poikkileikkauksen dimensioiksi 125 mm x 125 mm. Parrut asennetaan 150 millimetrin jaolla, jolloin parrujen väleihin jää 25 millimetrin raot. Parrujen kestävyys tarkastettiin eurokoodin mukaisesti ja Väyläviraston ohjeiden mukaisilla tieliikennekuormilla, joista määrääväksi tuli LM2:n akselikuorma. Akselikuormiin palataan luvussa 3.4. Parrujen taivutuskestävyys määrittä pääkannattajien maksimi jaon. Maksimijaoksi tuli 0,9 metriä. Tässä opinnäytetyössä ei tehdä kannelle tarkempaa liitosdetaljiikkasuunnittelua.



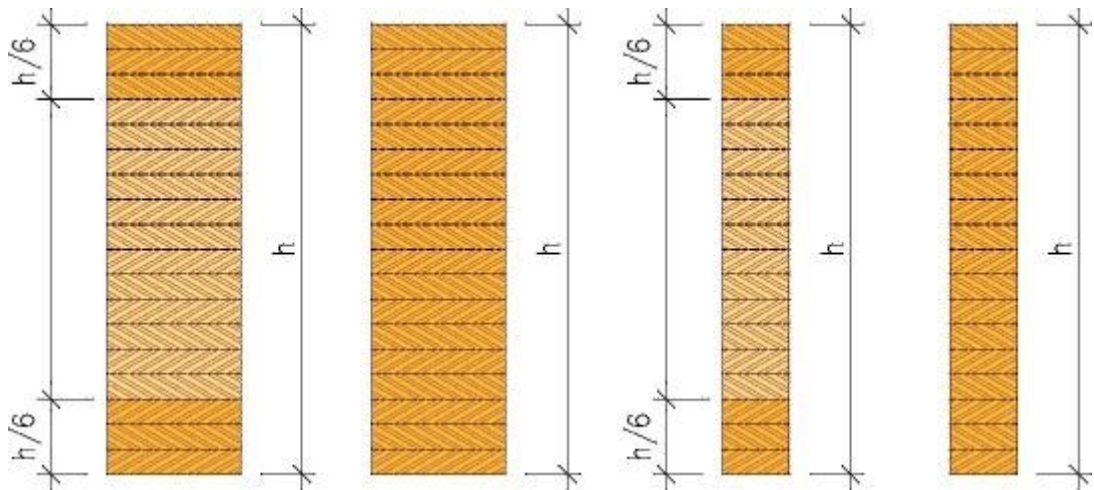
KUVIO 8. Harvalankkukansi ja kulutuslankut mallinnettuna Rhinolla

3.3.2 Pääkannattajat

Palkkisillassa merkittävin rakenneosia on pääkannattajat eli palkit. Tässä tutkimuksessa palkkien materiaalit on rajattu vain liimapuuhun ja teräkseen. Palkkien profiilit on rajattu puulla suorakaiteeseen ja teräksellä valssattuihin H-profiileihin.

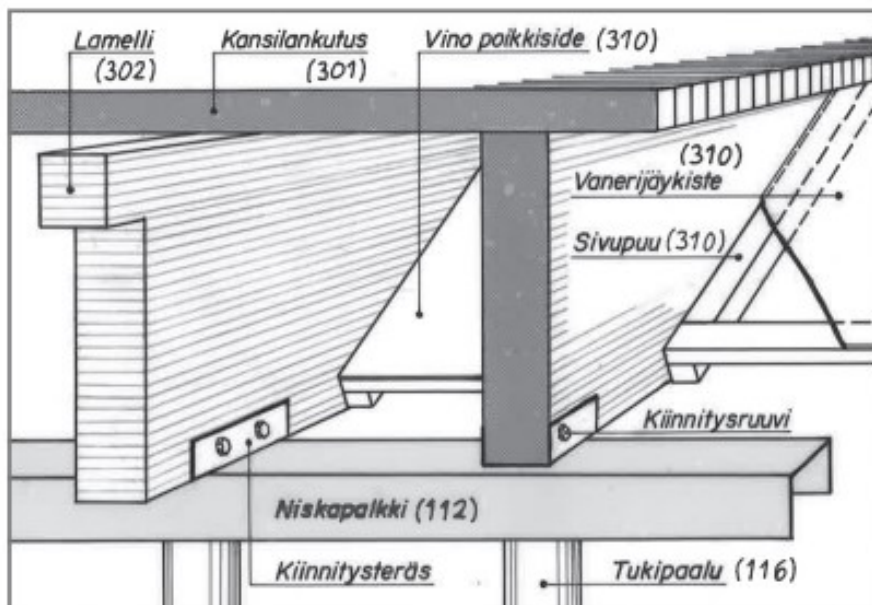
Liimapuupalkit

Liimapuupalkit valmistetaan liimaamalla 33, tai 45 millimetrin korkuisia sormijatkettuja puulamelleja päällekkäin (KUVIO 10.). Suorissa liimapuupalkeissa lamellien korkeus on 45 mm. Lujuusluokitetulle liimapuulle on määritetty tarkat ominaisuudet standardissa SFS-EN 1408. Liimapuu voi olla lujuudeltaan homogeenista liimapuuta, tai sitten eri lujuusluokkaisista puulamelleista koostuvaa liimapuuta. Suuremman lujuusluokan puulamellit sijoitetaan uloimmaksi, (KUVIO 9.) koska uloimmille lamelleille kohdistuu yleensä suurimmat jännitykset.



KUVIO 9. Yhdistetyn ja homogeenisen liimapuun poikkileikkauksia (Puuinfo 2021)

Yleisin liimapuun lujuusluokka on GL30c. Kirjain c tarkoittaa combined, mikä kertoo, että liimapuu on valmistettu kahdenlaisista lamelleista. Sisemmät lamellit ovat lujuusluokaltaan T14 tai T15 ja uloimmat taas T21 tai T22. Mikäli liimapuu on homogeenista, lujuusluokkatunnuksen perässä on kirjain h. Tällöin lujuusluokka on GL30h. (Puuinfo 2021)

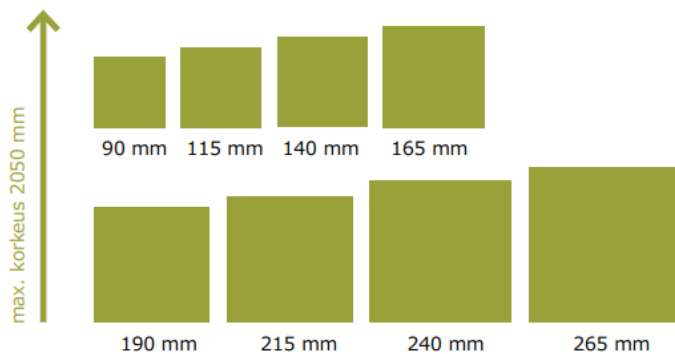


KUVIO 10. Puisen liimatun palkkisillan pääty puupaaluille perustettuna (Liikennevirasto 2013)

Liimapuuta saadaan valmistettua hyvin erilaisilla mitoilla, mutta kuten sahatavallakin, myös liimapuulla on omat halvemmat varastokokonsa. Sillan palkkien

dimensiot ovat niin suuret, että ne valmistetaan projektiliimapuusta. Projektiliimapuulle on olemassa omat mittavaihtoehdot. Liimapuun korkeus määräytyy lamellien lukumäärän mukaan. Suomalainen liimapuuvalmistaja Versowood ilmoittaa projektiliimapuun maksimikorkeudeksi 3400 mm. Mittavaihtoehdot on esitetty kuviossa 10. Sillan palkeissa leveysvaihtoehdoista käytössä on yleisimmin 190, 215, ja 240 millimetriä.

PROJEKTILIIMAPUU Mitat



Leveydet: 90, 115, 140, 165, 190, 215, 240, 265 mm

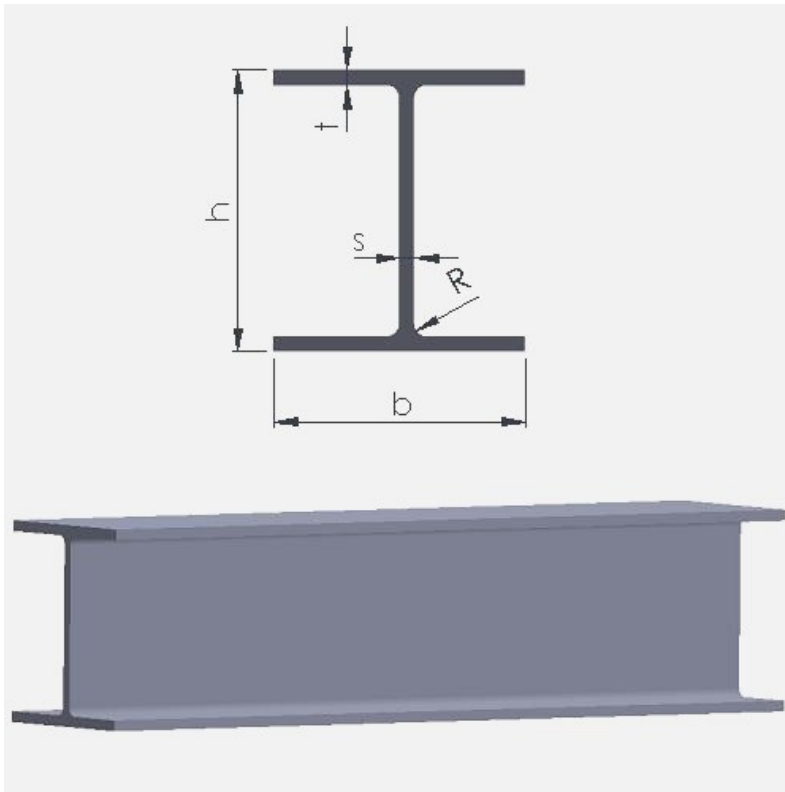
Korkeudet: max. korkeus 3400 mm

Pituus: max. 40 m

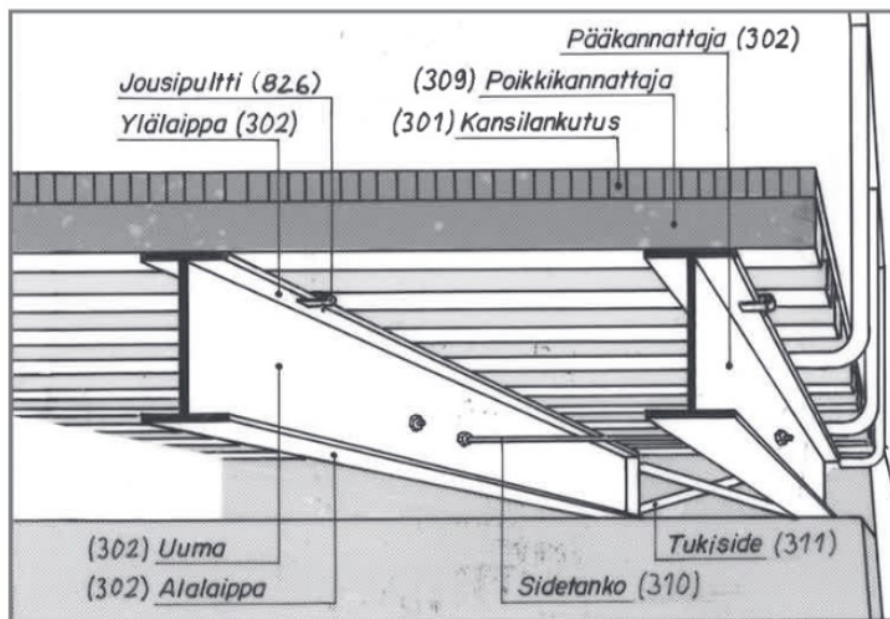
KUVIO 11. Versowoodin projektiliimapuun mittavaihtoehdot

Teräspalkit

Teräspalkeiksi valikoitui tässä tutkimuksessa standardoidut valssatut HEA- ja HEB-profiilipalkit, koska niille löytyy valmiiksi eurokoodimitoitus Karambasta, sekä ne ovat yleisiä profiileja ja täten halvempia, kuin hitsatut profiilit. (KUVIO 12. ja 13.). Laskenta-algoritmiin voi myöhemmässä vaiheessa lisätä helposti muitakin profiileja halutessaan. HEA- ja HEB-palkit ovat muuten likipitään sama tuote, mutta HEB-palkin ainevahvuus on vahvempi, jolloin palkki on myös raskaampi. Teräksen lujuusluokkana toimii S355.



KUVIO 12. HEA-profiliteräs (HUS ltd 2021)



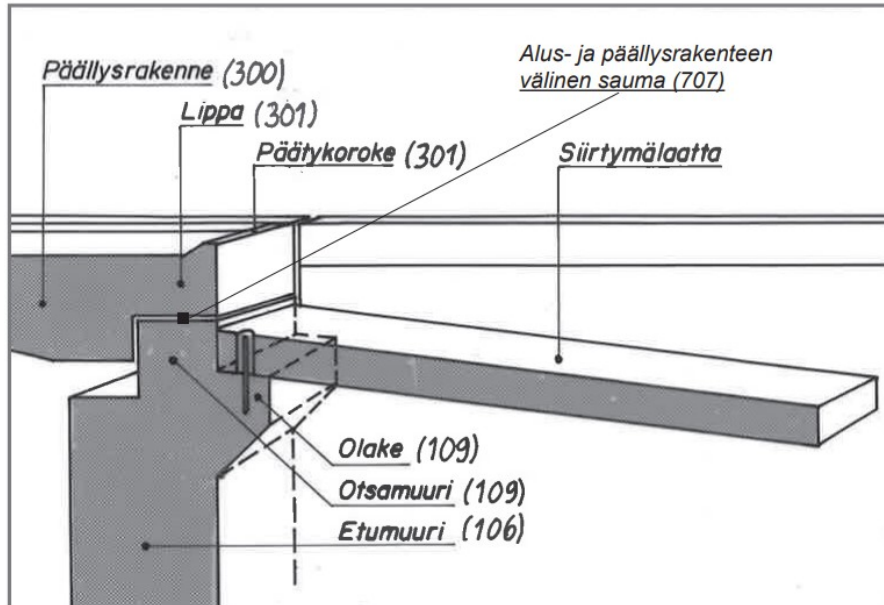
KUVIO 13. Teräksinen palkkisilta, puukantinen (Liikennevirasto 2013)

Jäykisteet

Sillan palkkien väliin on rakennettava poikittaisjäykisteitä. Sillan kannen liitos palkkien yläpintaan ei ole jäykkä, jolloin palkkien väleihin tarvitaan jäykistäviä rakenteita. Kuvioissa 10 ja 12 näkyy kahdenlaisia jäykistysratkaisuja. Jäykistys voidaan hoitaa levyjäykisteillä, tai tukisiteillä. Sillan suunnittelija määrittää tarvittavat jäykisteet. Usein reunimmaisissa palkkiväleissä jäykisteet asennetaan jokaisen kaidetolpan kohdalle, jolloin ne toimivat myös sillankaiteiden tukirakenteena. Muuten jäykisteet sijoitetaan usein jännevälin kolmannespisteisiin, joka toiseen palkkiväliin. Tukien lähelle asennetaan lisäksi viistot jäykisteet (KUVIO 10.).

3.3.3 Alusrakenteet

Alusrakenteisiin ei tässä työssä oteta kantaa sen syvällisemmin. Alusrakenteista voisi tehdä oman jatkotutkimuksensa. Tässä kappaleessa kuitenkin esitellään pintapuolisesti yksityistiesillan alusrakenteet. Alusrakenteeseen kuuluu yksiaukkoisessa palkkisillassa päätytuet eli maatuet. Maatuet voivat olla paaluperusteiset tai maanvaraisella anturalla perustetut. Molemmissa perustustavoissa sillan pääkannattajille on laakeritaso, johon palkit välittävät laakereiden välityksellä kuormat. Tuet mitoitetaan aina myös vaakakuormille. Mikäli sillan tukia ei perusteta kallioon, on aina otettava huomioon tukien painuminen. Yksiaukkoisessa sillassa ei tarvitse ottaa tukipainumia huomioon, koska se ei aiheuta rakenteille ylimääräisiä kuormia. Sillan alusrakenteisiin kuuluu myös siirtymälaatta, joka toimii siirtymärakenteena sillalta maapohjaiselle väylälle. Sillan pään rakenteita on esitelty kuviossa 14.

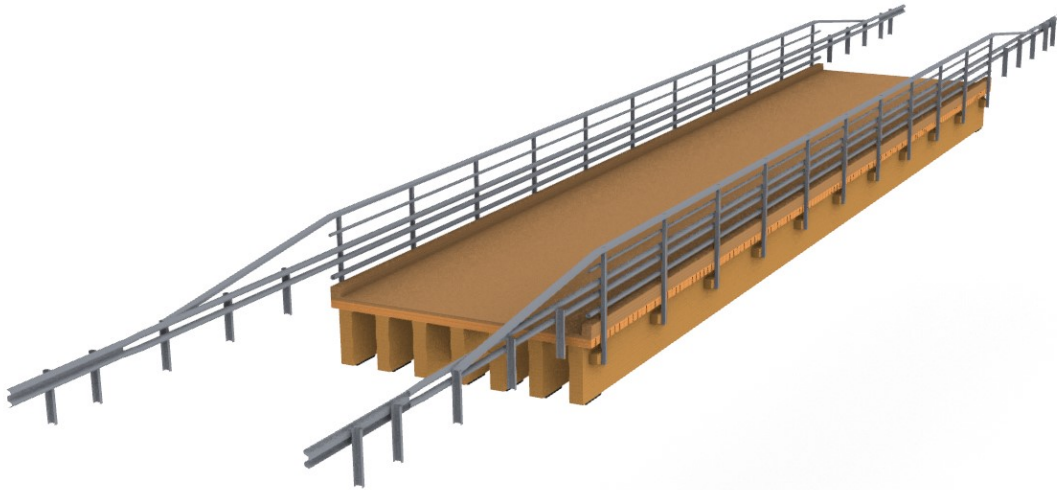


KUVIO 14. Alus- ja päällysrakenteen osia sillan päässä. (Liikennevirasto 2013)

3.3.4 Varusteet

Kaiteet

Sillan kaiteet ovat olennainen rakenneosia turvallisen liikennöinnin kannalta silloilla. Kaiteet on suunniteltava siltakohtaisesti niin, että ne täyttävät tarkat törmäyskestävyysvaatimukset. Sillan kaiteille, kuten tiekaiteille yleensäkin, on olemassa tarkat mitat, materiaalit ja ohjeet, joiden mukaan ne tulisi suunnitella ja rakentaa. Tiesilloille kaiteiksi kelpaavat vain tietyt standardoidut tuotteet.



KUVIO 15. Algoritmisesti Grasshopperilla Rhinoon mallinnetut ja renderöidyt sil-lankaiteet ja sillan päällysrakenne.

Laakerit

Laakerit ovat sillan päällysrakenteen, ja alusrakenteen väliin asennettava raken-neosa. Laakerin tehtävänä on sallia rakenteille pieni liikkumavara, jotta rakenteet kestävät kuormien aiheuttamia muodonmuutoksia. Pienille tiesilloille tyypillinen laakeriratkaisu on kumilevy-laakeri. Silloille tehdään aina laakerointisuunnitelma. Laakereiden valinta ja mitoitus on laaja aihe ja siitä voisi tehdä oman opinnäyte-työnsä. Tässä työssä ei perehdytä siihen sen tarkemmin. Laakeri sijoitetaan palk-kisilloissa pääkannattajien päiden alle, jossa ne lepäivät laakeritason päällä.



KUVIO 16. Lasto Block -kumilevy-laakeri (Mageba 2021)

3.4 Yksityistiesillan kuormat

Valtionavustuslaki edellyttää, että avustuksen kohteena oleva silta on suunniteltava NCCI 1:n mukaisesti. Kyseisestä Väyläviraston laatimaa kansallista täydentävää suunnitteluohjetta on käytettävä rinnakkain Eurokoodin standardin SFS-EN 1991-2 kanssa. Näissä ohjeissa tiesilloille on määritelty kuormakaaviot, jotka kuvaavat siltaan kohdistuvia ajoneuvokuormia. Kuormakaavioita on neljä: LM1, LM2, LM3 ja LM4. Kuormakaavioiden oletetaan kuormittavan sillan pituussuuntaista pintaa. Kuormakaaviot koostuvat kuormakaistoista ja erilaisista teli- / akselikuormista. Kuormakaistojen sijoittelu kannen poikkisuunnassa valitaan siten, että saadaan määräävä vaikutus. Yhden kuormakaistan leveys on 3 metriä, paitsi jos sillan hyödyllinen leveys on 5,4...6,0 metriä. Tällöin sillalle asetetaan kaksi yhtä leveää kuormakaistaa. Kun leveys on vähemmän kuin 5,4 metriä kannelle asetetaan vain yksi kolmen metrin levyinen kuormakaista. Näiden kuormakaavioiden lisäksi silloille on muitakin kuormia, kuten jarrutuskuormat, mutta päällysrakennetta mitoitettaessa ei tarvitse ottaa kantaa muihin kuormiin.

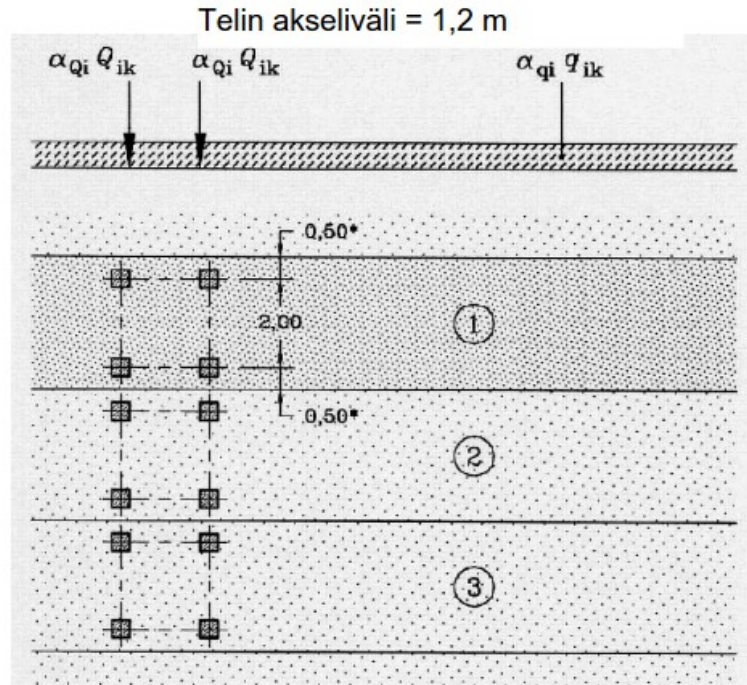
Valtionavustuskelpoisen sillan hyödyllinen leveys yksikaistaisena on oltava vähintään 4 metriä ja kaksi kaistaisena vähintään 6 metriä. Tässä opinnäytetyössä rajataan silta yksikaistaiseksi laskennan yksinkertaistamiseksi. Tutkittavan sillan hyötyleveydeksi tulee siis 4,0...5,4 metriä, jotta sillalle riittää tarkastelu yhdellä kuormakaistalla, mutta on silti valtionavustuskelpoinen.

3.4.1 Pystykuormat

Kuormakaavio LM1

Kuormakaavio LM1 koostuu kahden akselikuorman muodostamista telikuormista $\alpha_{Qi} \times Q_{ik}$, sekä tasaisesti kuormakaistoille jakautuneista kuormista $\alpha_{qi} \times q_{ik}$. Teli-kuormat sijoitetaan leveyssuunnassa kuormakaistan keskelle. Pituussuunnassa telikuormat sijoitetaan sillalle niin, että saadaan määräävä vaikutus. Telikuorma

koostuu neljästä 0,4m x 0,4m kokoisesta kuormitusalueesta, joihin yhteenlasketuna kohdistuu kuormakaistasta riippuen 200, 400, tai 600 kN. Kuormien sijoittelu on esitetty kuviossa 17.



Selite

- (1) Kuormakaista nro 1: $Q_{1k} = 300$ kN; $q_{1k} = 9$ kN/m²
 (2) Kuormakaista nro 2: $Q_{2k} = 200$ kN; $q_{2k} = 2,5$ kN/m²
 (3) Kuormakaista nro 3: $Q_{3k} = 100$ kN; $q_{3k} = 2,5$ kN/m²
 (*) Kun $w_1 = 3,00$ m

KUVIO 17. Kuormakaistat ja telikuormien mitat (SFS-EN 1991-2, 32)

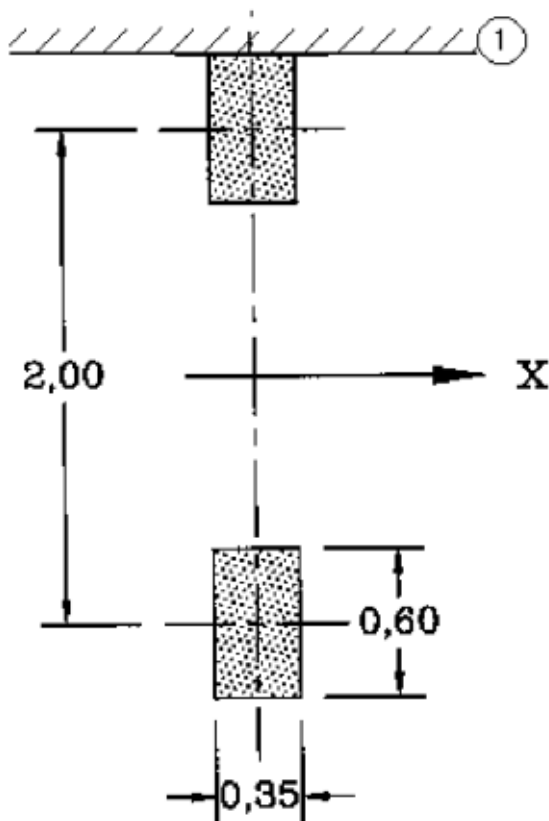
TAULUKKO 1. Kuormakaavion LM1 kuormien ominaisarvot α -kertoimilla kerrottuna. (NCCI1, 11)

Sijainti	Yleiset tied			
	Telikuorma		UDL	
	α_{Qi}	$2 \times \alpha_{Qi} \times Q_{ik}$ (kN)	α_{qi}	$\alpha_{qi} \times q_{ik}/q_{rk}$ (kN/m ²)
Kaista nro 1	1,0	2×300	1,0	9
Kaista nro 2	1,5	2×300	2,4	6
Kaista nro 3	0	-	1,2	3
Muut kaistat	-	-	1,2	3
Kaistojen ulkopuolinen alue (q_{rk})	-	-	1,2	3

Tutkittavan sillan tapauksessa tällä kuormakaaviolla saatiin määrävin vaikutus pääkannattajia mitoittaessa. Suurin taivutusmomentti saatiin, kun telikuorma sijoitettiin sillan jännevälän keskipisteeseen ja suurin leikkausvoima, kun telikuorma sijoitettiin lähelle tukipistettä. Kaistalle nro 1 asetettiin yhdeksän kN:n neliökuorma ja kaistan ulkopuoliselle alueelle kolmen kN:n neliökuorma. (TAULUKKO 1.)

Kuormakaavio LM2

Ortotrooppikansissa tämä kuormakaavio on usein määräävä. Kuormakaaviossa LM2 kuormakaistoille sijoitetaan akselikuorma $\beta_Q \times Q_{ak}$. Suomessa β_Q :n arvona käytetään 1,0 ja Q_{ak} on 400kN. Akselikuorman kosketuspinta koostuu kahdesta 0,35m x 0,6m suorakulmiosta. (KUVIO 18.)



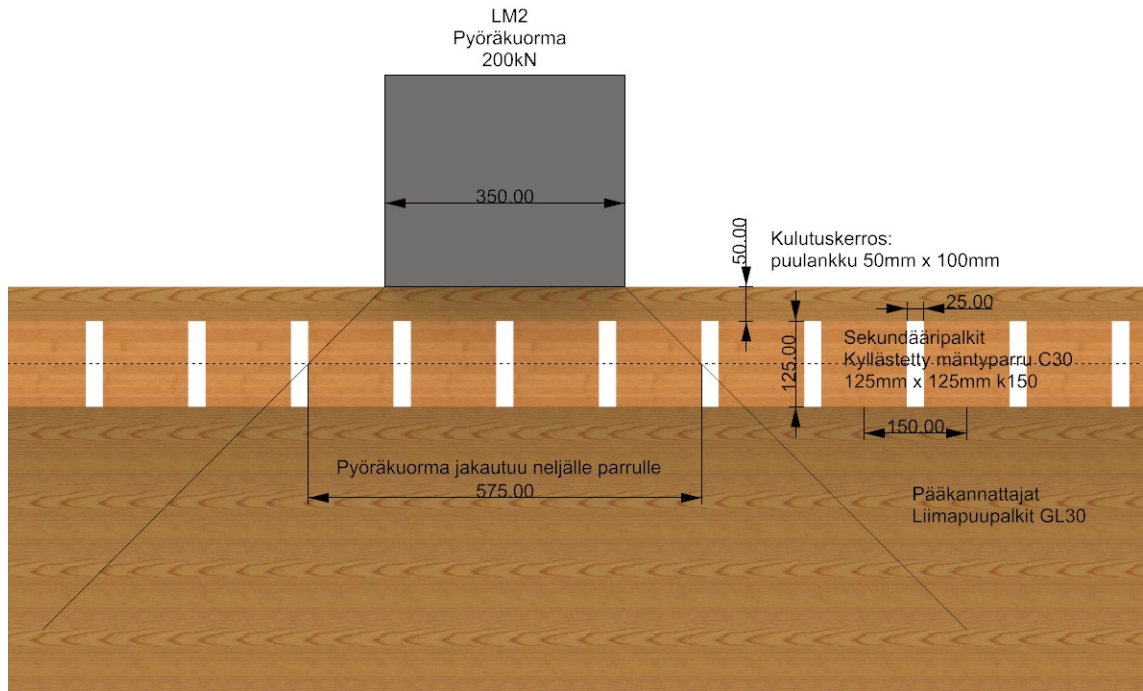
Selite

X sillan pituussuuntainen akseli

1 reunakiveys

KUVIO 18. LM2 akselikuorman kosketuspinta (SFS-EN 1991-2, 34)

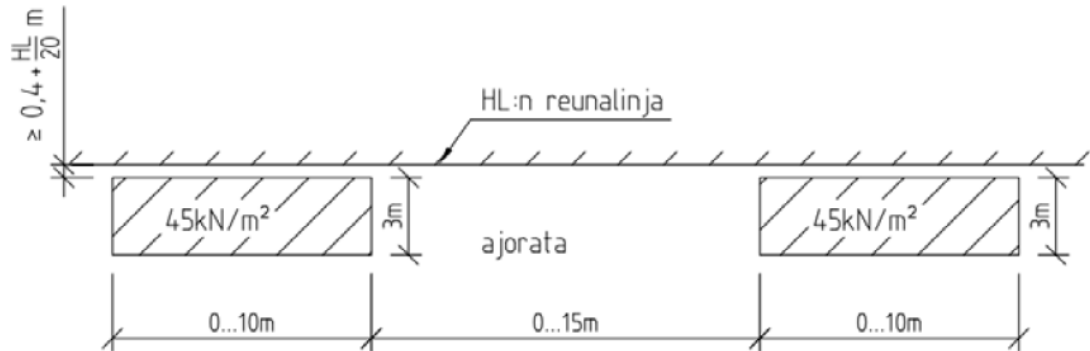
Kansiparrut mitoitettiin käsin ja niiden osalta määrääväksi kuormakaavioksi osoitettiin LM2. LM1:n kosketuspinta jakautuu useammalle parrulle, kuin LM2:n. Lisäksi kosketuspintaan kohdistuu isompi kuorma. NCCI 1:n mukaan kuormat voivat jakautua kannessa 1:1. LM2 pyöräkuorman jakautuminen parruille havainnollistettu kuvassa 19.



KUVIO 19. LM2 pyöräkuorman jakautuminen parruille

Kuormakaavio LM3

LM3 kuvaa ylläskasta erikoiskuormaa. Sillä mitoitetaan rakenteet murtorajatilassa ja käyttörajatilassa, sekä tarkastetaan alusrakenteiden kantavuus. Kuormakaaviota LM3 ei tarvitse ottaa huomioon valtionapua saavan yksityistien sillan suunnittelussa. Yleisten teiden silloilla käytetään aina LM3 kuormakaaviota, jollei toisin hankekohtaisesti määrätä. Lisäksi asianomainen viranomainen voi päättää hankekohtaisesti standardin SFS-EN 1991-2 liitteessä A olevien vakiokaavioiden käytöstä.



KUVIO 20. Kuormakaavio LM3

Kuormakaavio LM4

Kuormakaavion LM4 tarkoitus on edustaa tungoskuormaa. Sen käytöstä määrätään hankekohtaisesti. Kuormana on tasaisesti jakautunut 5 kN:n neliökuorma, joka jaetaan sillan hyötyleveydelle määräävintä vaikutusta hakien. Tutkittavan sillan tapauksessa kuormakaaviota LM4 ei tarvitse tarkastella.

3.4.2 Kuormien yhdistely

Kuormien yhdistelyyn on tehty avuksi taulukko, joka löytyy NCCI 1:n liitteistä. Taulukon avulla haetaan määrävimmät kuormitustapaukset eri mitoitustilanteisiin. Yksinkertaistettuna käyttörajatilassa kuormien osavarmuuskerroin on 1, eli käytetään kuormien ominaisarvoja. Tutkittavan sillan tapauksessa määrävimmät murtorajatilien kuormat saadaan, kun rakenteiden oma paino kerrotaan 1,25:llä ja liikennekuormia 1,35:llä.

TAULUKKO 2. Tiesillat, murtorajatila (NCCI1, LIITE 1A)

TIESILLAT - MURTORAJATILA - Set A: A2.4 (A), Set B: A2.4 (B)											
KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVA KUORMA (6.10b)											
YHDISTELYKAAVAT MRT_1 - MRT_11											
MRT_0	MRT_1	MRT_2	MRT_3	MRT_4	MRT_5	MRT_6	MRT_7	MRT_8	MRT_9	MRT_10	MRT_11
6.10a	gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	F _{vs}	T _k	BF	IL	TLEP
LM1	LM2	LM2	LM1+vaaka	kevyt	ruuhka	LM3	Tuuli	Lämpötila	Laakerikitka	Jääkuorma	Lk-maanp.
							STR/GEO: 1,25 / 0,9	EQU: 1,15 / 0,9			
							STR/GEO: 1,1 / 0,9 ⁴⁾	EQU: 1,1 / 0,9 ³⁾			
SET A (EQU) & SET B (STR/GEO)	Omapaino	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Esijännitys	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Telit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	UDL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kevyt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	gr1a (LM1)	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	gr1b (LM2)	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-
	gr2 (LM1+Vaaka)	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-
	gr3 (Kevyt)	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-
	gr4 (Ruuhka)	-	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-
	gr5 (LM3)	-	-	-	-	-	1,35	-	-	-	-
	F _{vs} ¹⁾	1,5 x 0,6	-	-	-	-	-	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	T _k ²⁾	1,5 x 0,6	-	-	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	BF	1,5 x 0,6	-	-	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	IL	1,5 x 0,7	-	-	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7
	S 2)	1,2	-	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	TLEP	-	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35

1) Tuulikuormasta huomio: Tuulikuorma lasketaan erikseen tyhjän sillan tapaukselle ja tapaukselle jossa se esiintyy yhtä aikaa liikennekuorman kanssa.

2) Lämpötilakuorma/tukipainuma voidaan jättää pois murtorajatilayhdistelystä mikäli rakenteella on riittävästi muodonmuutoskykyä (ks. materiaaliakohtaiset sovellusohjeet)

3) Stabiiliteettia tarkastettaessa (EQU) 1,30 / 0,9 [EN 1992-1-1: 2.4.2.2 (2) Huom)]

4) Paikalliset vaikutukset 1,20 / 0,9 (STR/GEO) [EN 1992-1-1: 2.4.2.2 (3) Huom)]

- Passiivipaineen yhdistelykerroin aiheuttavan kuorman mukaan ja varmuusluku pysyvän kuorman mukaan

- Vedenpinnan aseman vaikutukset yhdistellään pysyvän kuorman kanssa siten että saavutetaan määräävä yhdistely

■ = Määräävä muuttuva kuorma

TAULUKKO 3. Tiesillat, käyttörajatilat ja onnettomuusyhdistelmä (NCCI1, LIITE 1A)

Tiesillat		Onnettomuusyhdistelmä	
Ad	1	1	1
Omapaino	1	1	1
Esijännitys	1	1	1
Telit	0.75	-	-
UDL	0.4	-	-
Kevyt	-	-	-
gr1b	-	-	0.75
gr2	-	-	-
gr3	-	-	-
gr4	-	-	-
gr5	-	-	-
F _{ok} ¹⁾	-	-	-
T _k	0.5	-	-
BF	0.4	-	-
IL	0.2	-	-
S ²⁾	-	-	-
TLEP	-	-	-

	(6.14)														(6.15)							(6.16)		Pysyvät	
	KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVA KUORMA														KRT_1b - KRT_11b							KRT_1c			KRT_1d
	KRT_1a - KRT_11a				KRT_1b - KRT_11b				KRT_1c						KRT_1d										
1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a	9a	10a	11a	1b	2b	5b	7b	8b	9b	10b	11b	1c	1d					
gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	F _{wk}	T _k	BF	IL	TLEP	gr1a	gr1b	gr4	Fwk	T	BF	IL	TLEP	-	-					
Omapaino	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Esijännitys	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Telit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
UDL	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
gr1a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Kevyt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
gr1b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
gr2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
gr3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
gr4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
gr5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
F _{ok} ¹⁾	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
T _k	0.6	-	0.6	0.6	0.6	-	0.6	1	0.6	0.6	0.5	-	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	-	-				
BF	0.6	-	0.6	0.6	0.6	-	0.6	1	0.6	0.6	0.4	-	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	-	-				
IL	0.7	-	0.7	0.7	0.7	-	0.7	0.7	1	0.7	0.2	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	-	-				
S ²⁾	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	-	0.75	0.75	0.75	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
TLEP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

1) Tuulikuormasta huomio: Tuulikuorma lasketaan erikseen tyhjän sillan tapaukselle ja tapaukselle jossa se esiintyy yhtä aikaa liikennekuorman kanssa.

2) Tukipainuma ja vedenpinnan asema yhdistetään pysyvän kuorman kanssa siten että saavutetaan määräävä yhdistely

3) Onnettomuusyhdistelmässä liikennekuormakaavio LM1 otetaan huomioon (tavallisella arvoillaan) vain yhdellä kaistalla.

4) Liikenteen aiheuttaman vaakasuuntaisen maanpaineen tapauksessa voidaan käyttää arvoa 0.4

- Passiivipaineen yhdistelykerroin aiheuttavan kuorman mukaan

■ = Määräävä muuttuva kuorma

4 ALGORITMIAVUSTEINEN LASKENTA JA OPTIMOINTI

4.1 Ohjelmat

4.1.1 Rhinoceros 3D

Rhinoceros 3D (Puhkielessä Rhino) on nykyaikainen ja joustava 3D NURBS -pintamallinnusohjelma, jonka avulla voidaan luoda hankaliakin kolmiulotteisia muotoja helposti ja tarkasti. kolmiulotteisten mallien lisäksi ohjelmalla voidaan tuottaa tavallisia kaksiulotteisia piirustuksia. NURBS on lyhenne sanoista Non-Uniform Rational B-Splines. Se tarkoittaa 3D geometrian matemaattista esitystä, joka voi kuvata minkä tahansa muodon 2D-viivasta monimutkaisimpaan 3D-muotoon tai -pintaan. (rhino3d.com) Rhinon parhaita puolia suunnittelun kannalta on siihen saatava lisäosa Grasshopper.

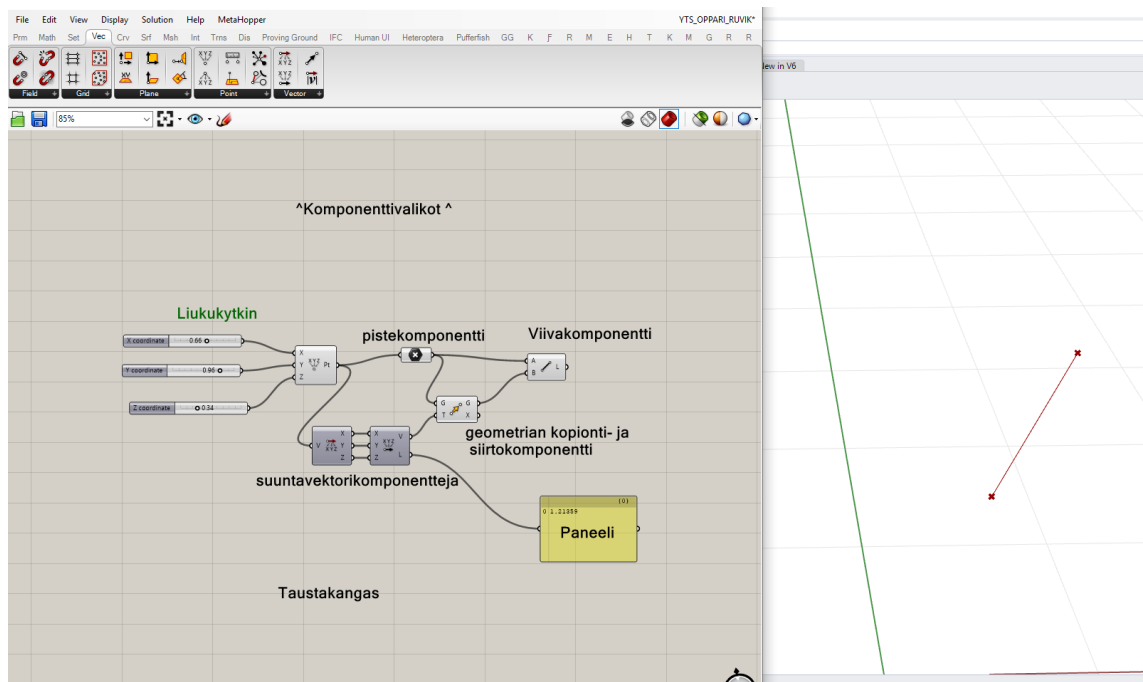


KUVIO 21. Rhinolla mallinnettu ja renderöity Volkswagen Beetle (Holo 2020)

4.1.2 Grasshopper

Grasshopper on visuaaliseen ohjelmointiin tarkoitettu ohjelma, joka toimii Rhinon yhteydessä. Visuaalinen ohjelmointi on helposti ymmärrettävää ja sitä pystyy tekemään ilman kokemusta tekstimuotoisesta ohjelmoinnista. Toki Grasshopperissa voi harrastaa myös tekstimuotoista ohjelmointia esimerkiksi Python- tai C#-ohjelmointikielillä ja kokeneet käyttäjät usein ohjelmoivatkin Grasshopperissa joitain asioita tekstimuotoisesti. Tässä opinnäytetyössä pysytään kuitenkin pelkästään visuaalisessa ohjelmoinnissa.

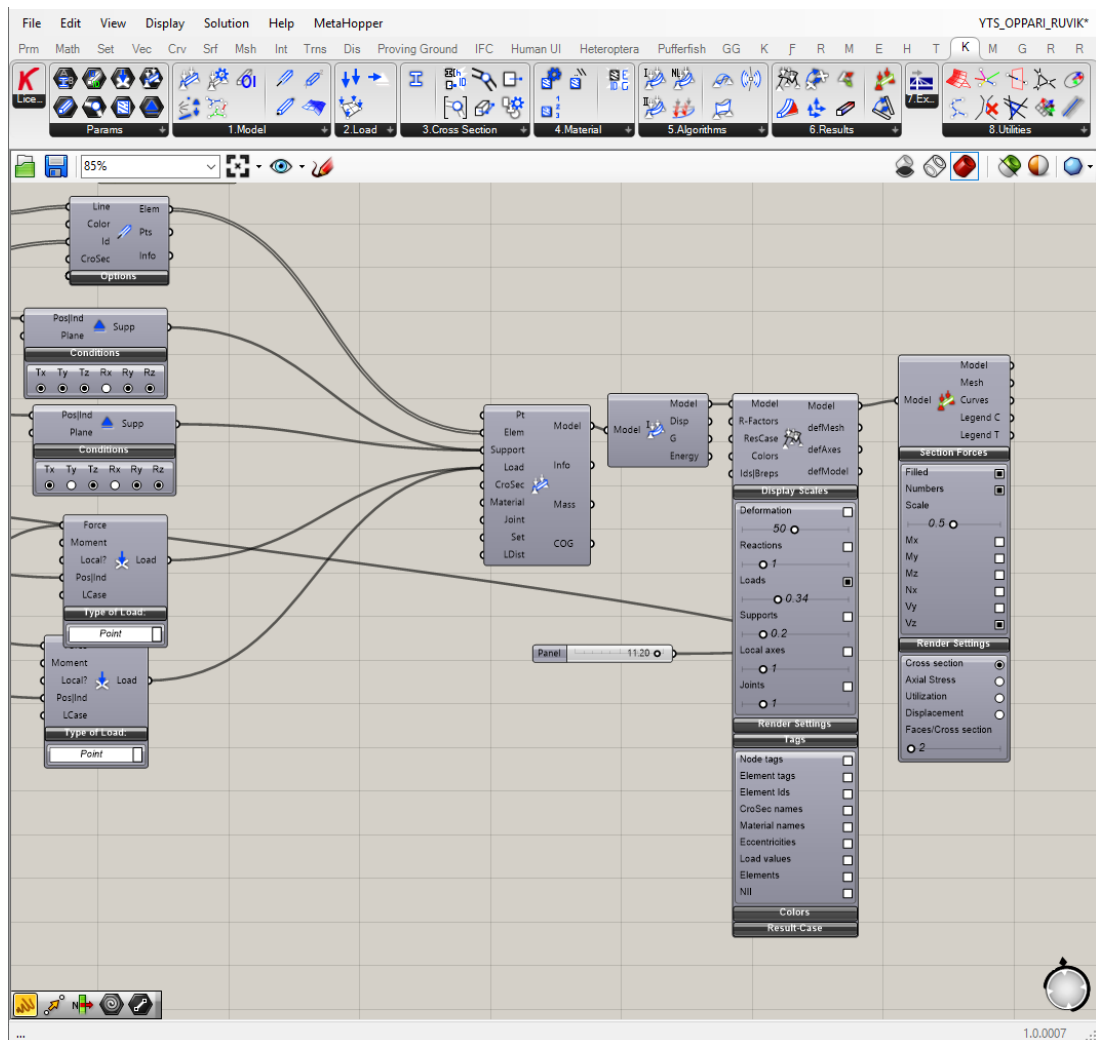
Grasshopperissa on oma käyttöliittymä, johon visuaalista koodia luodaan taustakankaalle (*Canvas*). Grasshopperilla luotu geometria saadaan näkyviin Rhinon käyttöliittymään. Kuviossa 22 olen luonut pisteen, jonka Z- X-, ja Y-koordinaatteja säädetään liukukytkimillä. Piste on kopioitu xyz-vektorin avulla ja pisteiden väliin on luotu viiva. Paneeli kertoo suuntavektorin pituuden Rhinon yksiköissä.



KUVIO 22. Grasshopperin käyttöliittymä

4.1.3 Karamba3D

Karamba3D (Puhekielessä Karamba) on aika perinteinen FEM-laskentaan pohjautuva laskentaohjelma. FEM on lyhenne sanoista Finite Element Method. FEM-laskennalla tarkoitetaan suomeksi elementtimenetelmää. Elementtimenetelmä on matemaattinen lujuusoppiin pohjautuva materiaalien kestävyysien ja muodonmuutoksien laskentaan tarkoitettu likimääräinen laskentatapa. FEM-ohjelmat ovat jokaisen rakennesuunnittelijan perustyökaluja. Karamba eroaa muista FEM-ohjelmista siinä, että se on integroitu Grasshopperin sisään. Karambaa on helppo käyttää, jos osaa käyttää Grasshopperia. Karambaa käyttäessä pitää kuitenkin ymmärtää FEM-laskennan periaatteet.



KUVIO 23. Karamban komponentit löytyvät Grasshopperin muiden komponenttien lomasta

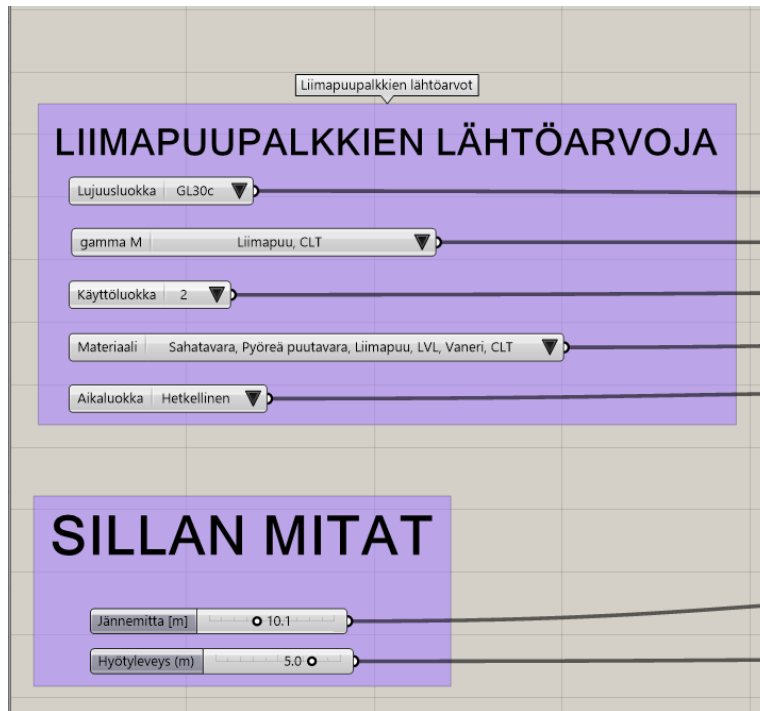
Karamba mahdollistaa parametrisesti mallinnettujen geometrioiden rakenteellisen kestävyystarkastelun helposti, mikä nopeuttaa suunnittelutyötä merkittävästi verrattuna tavallisiin FEM-ohjelmiin, joissa geometria luodaan manuaalisesti piste ja viiva kerrallaan. Lisäksi Karamba on helposti yhdistettävissä optimointialgoritmeihin, kuten Galapagos tai Octopus.

4.2 Algoritmipohjaisen laskentamallin toimintaperiaate

Tässä kappaleessa esittelen luomani algoritmin toimintaperiaatetta, ja sitä miten se rakentui. Algoritmi koostuu monesta eri osiosta. Ensimmäisenä on lähtöarvot eli muuttujaparametrit, joita on esimerkiksi sillan leveys ja pituus. Toisena on perusgeometria, jonka päälle kaikki rakentuu. Lisäksi algoritmi sisältää Karamban komponentteja, mitoitusta, optimointia, käyttöasteiden tarkastelua, tarkastusalgoritmin, sekä mallinnukseen ja piirustuksiin omat algoritminsä.

4.2.1 Lähtötiedot

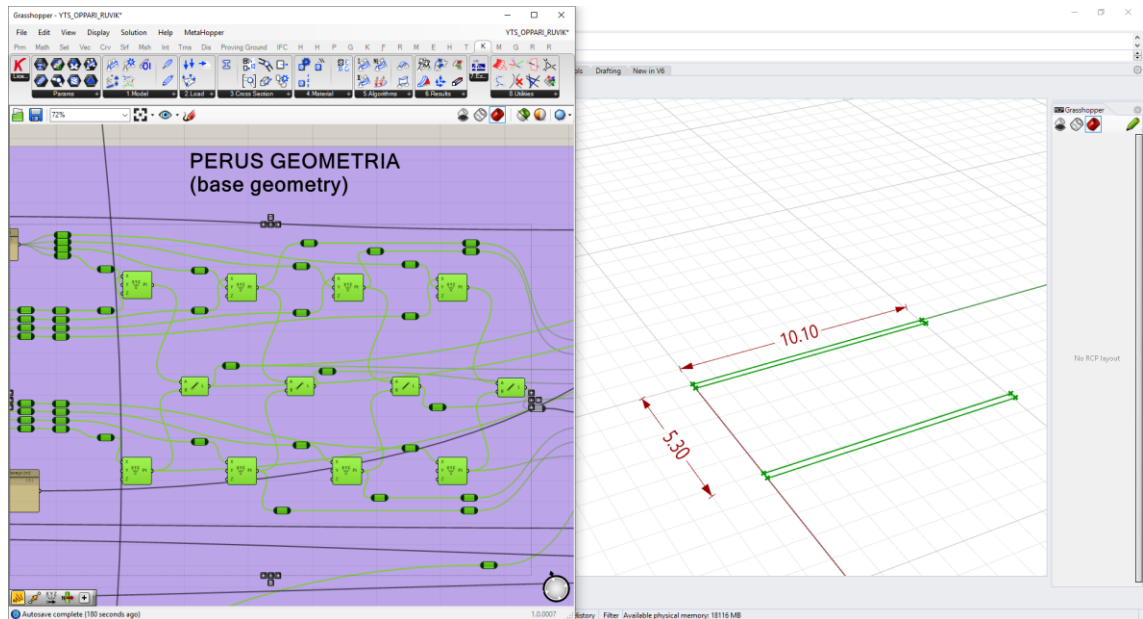
Työn tavoitteena oli saada muutaman lähtöarvon perusteella automatisoitu suunnittelu sillan päällysrakenteelle. Lähtötiedot ovat parametreja, joita muuttamalla koko muu malli muuttuu niiden mukaiseksi. Esimerkiksi kun sillan pituutta muuttaa lähtötiedoissa, laskentamalli muuttuu mukana ja laskee automaattisesti kuormitukset uudestaan ja piirustukset päivittyvät. Lähtötiedot ovat luonnollisesti ensimmäisenä vasemmassa laidassa (KUVIO 24.). Sillan mitoista voi valita hyödylliseksi leveydeksi 4,0 - 5,3 metriä ja jännemitaksi 4 – 20 metriä. Liimapuupalkille valitaan lujuusluokka, ja loput valinnat ovatkin liimapuupalkin mitoitusta varten, ja niitä ei tarvitse käytännössä vaihtaa tässä algoritmossa.



KUVIO 24. Kuvakaappaus lähtöparametreista

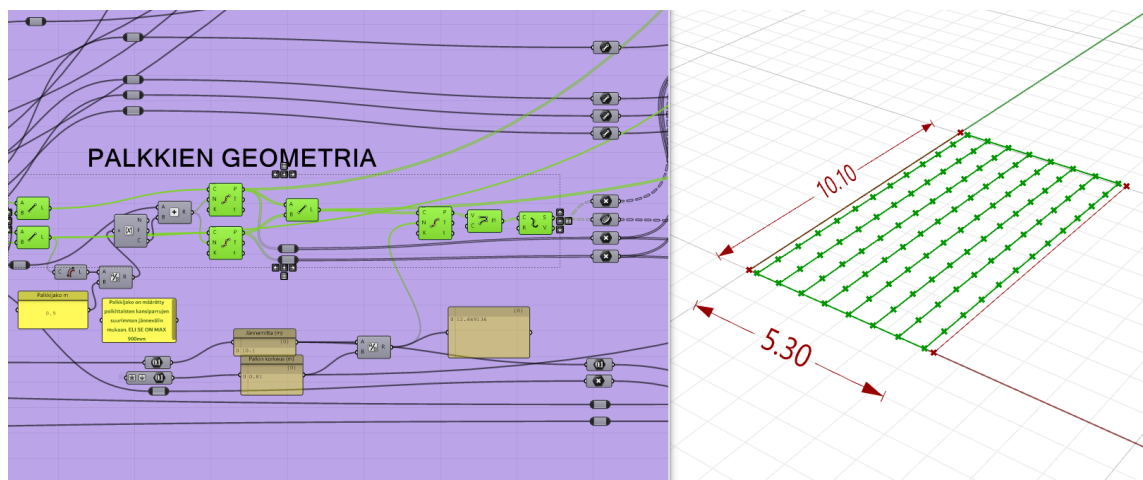
4.2.2 Perusgeometria

Kaikista pohjimmaisena perusgeometriana tässä algoritmossa toimii kahdeksan koordinaattipistettä. Pistekomponentille voidaan syöttää etäisyys origosta x-, y-, ja z-suunnassa numeroarvoina. Tässä tapauksessa yksikkönä toimii metrit. Grasshopperin Pistekomponentit luovat Rhinon koordinaatistoon pisteet annetuilla koordinaateilla. (KUVIO 25.) Ensimmäinen piste on sijoitettu origoon ja lopuille koordinaatit määräytyvät lähtötiedoissa olevien sillan leveys- ja pituusparametrien mukaan (KUVIO 24.) tarvittavien lisäys- tai vähennyskomponenttien avittamana.



KUVIO 25. Kuvakaappauksessa vasemmalla puolella näkyvät Grasshopperin piste- ja viivakomponentit ja oikealla Rhinoon piirtyvä geometria

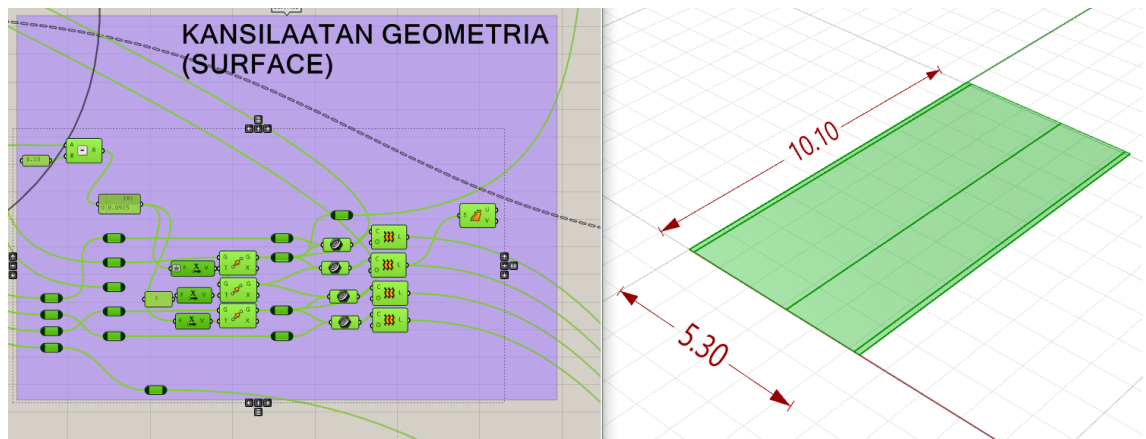
Perusgeometrian päälle rakentuu tarkempi geometria palkeille ja kansilaatalle. Ne ovat siten riippuvaisia peruspisteistä ja muuttuvat mukana, kun lähtöarvoja muutetaan. Laskentamallia varten pääkannattajien viivat on jaettava lyhyiksi pätkiksi, elementeiksi. Viivojen keskinäinen jako sillan leveyssuunnassa on matemaattisesti määritetty niin, että se ei ylitä 0,9 metriä, vaikka sillan leveyttä muutettaisiin. Viivat toimivat pääkannattajien keskilinjoina.



KUVIO 26. Palkkien geometriaa

Kansilaatalle on luotava oma geometriansa, surface, eli pinta. Pinta rakentuu kuormakaistojen mukaan. Sillalle tulee pinta neljässä osassa (KUVIO 27.). Molempiin reunoihin tulee kapeat kaistat, joille ei määritetä kuormaa ollenkaan ja

sillan keskialue jakautuu kolmen metrin levyiseen kuormakaistaan ja siitä yli jäävään alueeseen. Kuormakaista sijoitetaan reunaan, koska tällöin reunimmiselle palkille tulee eniten kuormaa ja saadaan määräävin kuormitustapaus.



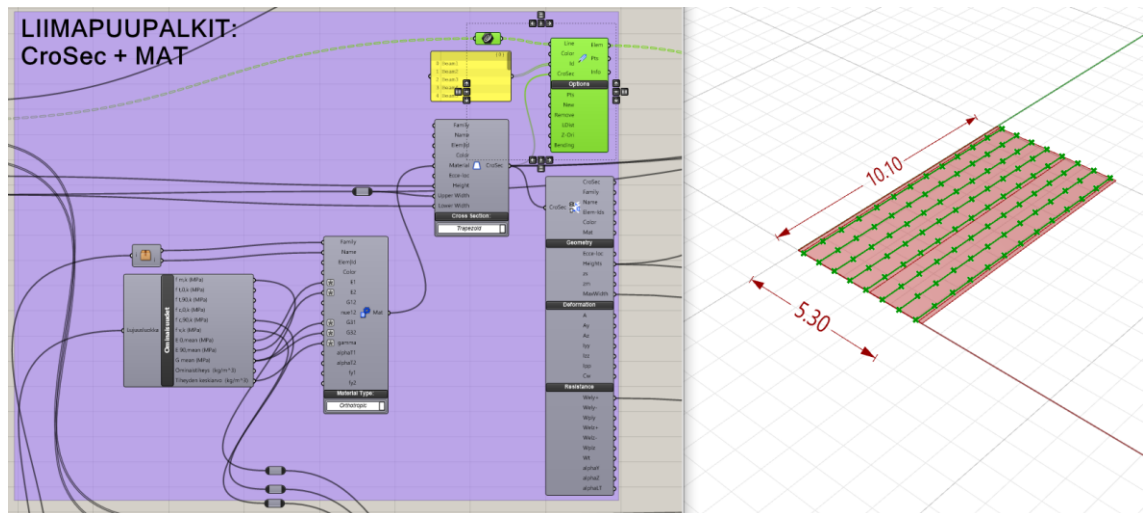
KUVIO 27. Sillan kannen geometria

4.2.3 Karamba 3D komponentit

Karamballa luodaan laskentamalli käyttämällä erilaisia komponentteja. Komponentteja on tukien, kuormien ja elementtien luomiseen ja lisäksi paljon erilaisia analysointiin tarkoitettuja komponentteja.

Line to Beam

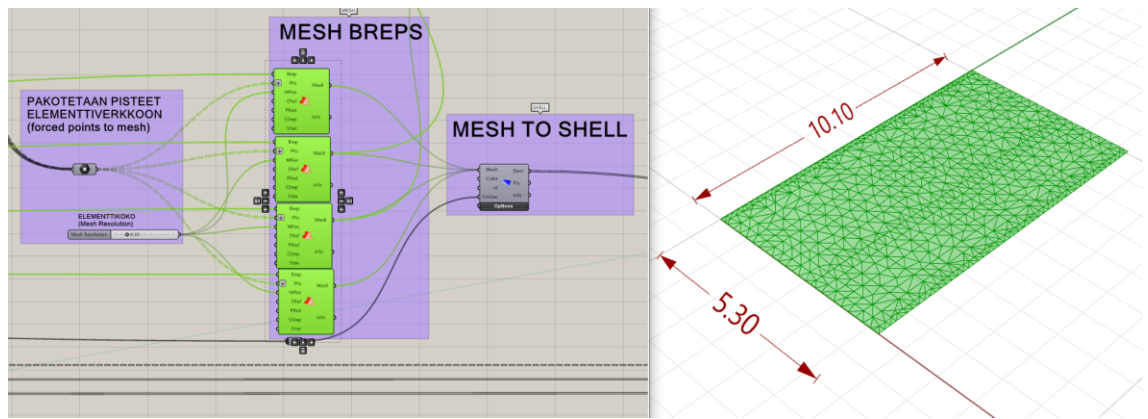
Pääkannattajat tehdään laskentamalliin Line to beam komponentilla aikaisemmin luotujen viivojen (ks. KUVIO 26.) avulla. CroSec- ja Mat -komponenteilla annetaan elementeille poikkileikkaus ja materiaaliarvot. Rakensin itse komponentin, joka antaa puun lujuusluokkaa vastaan ulos EC5:n mukaisia materiaaliominaisuuksia, kuten ominaistaivutuslujuuden ja kimmokertoimen. Puun lujuusluokka valitaan lähtötiedoissa.



KUVIO 28. Line-to-beam- ja CroSec-komponentit

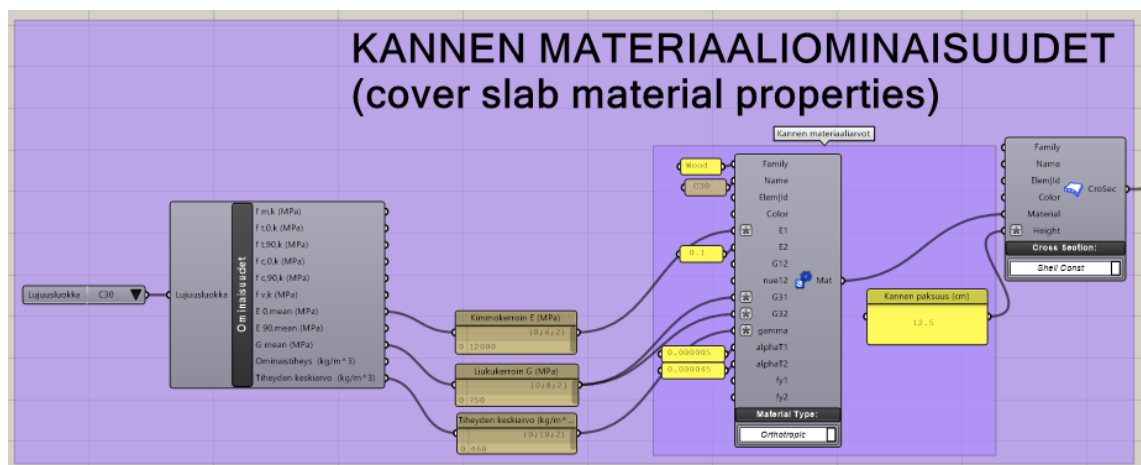
Mesh to Shell ja ortotrooppinen laatta

Sillan kannen osuus laskentamallissa tehdään Mesh Breps- ja Mesh to Shell-komponenteilla (KUVIO 29.). Breps on lyhenne sanoista Boundary Representations. Mesh Breps luo valituille pinnoille elementtiverkon, jonka elementtikokoa voi muuttaa. elementtikoko tarkoittaa siis verkon solmujen etäisyyttä toisistaan. Tässä tapauksessa hyväksi elementtikooksi valikoitui 0,3 m. Mesh to Shell muuttaa luodun verkon elementtikeruiksi. Samalla kuorelle syötetään poikkileikkausominaisuudet CroSec -komponentilla. Kuori saa tarvittavat laskentaparametrit, kuten laatan paksuuden, materiaalin, kimmokertoimen ym. Elementtiverkkoon on myös pakotettava solmupisteiksi palkkien pisteet, tukien pisteet ja kuormien pisteet, jotta kaikki laskentamallin palaset liittyisivät toisiinsa. Mikäli näin ei tee, laskentamalli ei toimi oikein.



KUVIO 29. Elementtiverkon luominen

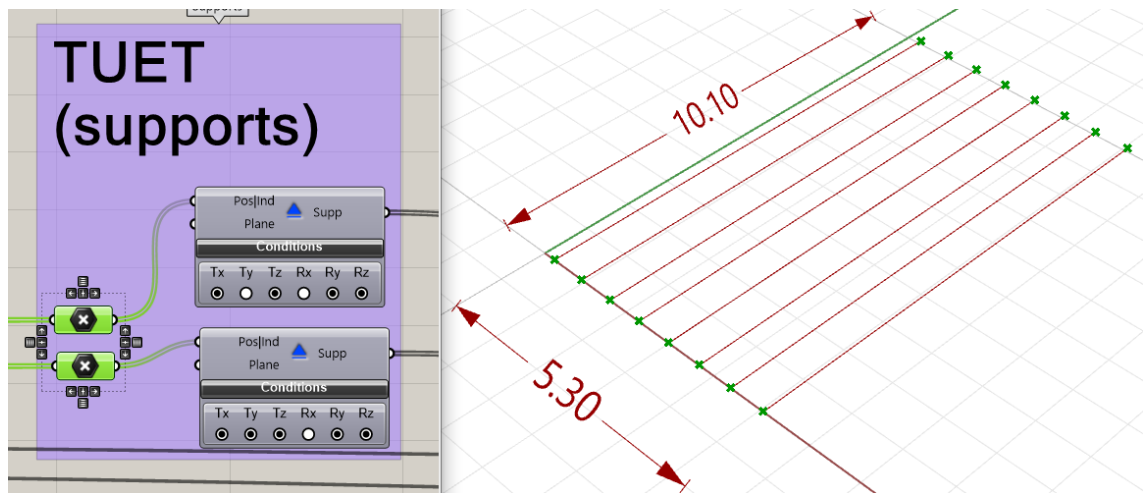
Kansi ei todellisuudessa ole yhtenäinen laatta, vaan se koostuu erillisistä parruista. Yksittäisten parrujen mallintaminen laskentamalliin ei kuitenkaan ole järkevää, koska siihen kuluisi paljon aikaa, ja mallista tulisi kovin raskas ja se olisi vaikea toteuttaa. Parrukantta voidaan kuitenkin ajatella ortotrooppisena laattana, joka välittää voimia pääasiassa parrujen suuntaisesti, eli sillan sivuttaissuunnassa. Ortotropia tarkoittaa, että materiaalin lujuusominaisuudet ovat erilaiset eri kuormitussuunnista katsottuna. CroSec -komponentilla voidaan tehdä palkkien lisäksi poikkileikkauksia laatoille. MatProps -komponentilla saadaan valittua rakenteen jokaiseen suuntaan oikeat materiaaliparametrit, kun valitaan materiaalin tyyppiksi Orthotropic. (KUVIO 30.) Kansilaatta on sijoitettava laskentamallissa pääkannattajien neutraaliakselille, jotta se ei aiheuta liittovaikutusta malliin. Parrujen väliset raot eivät välitä puristusvoimia.



KUVIO 30. Parrukannen materiaaliparametrit

Tuet

Laskentamallin tuet tehdään Support -komponenteilla. (KUVIO 31.) Tuille määritellään vapaat liikkumis- ja kiertymissuunnat. Toisen pään liikkuminen estetään kaikissa suunnissa, ja toisessa sallitaan sillan pituussuuntainen liike eli tässä tapauksessa y-suuntainen. Tuet eivät ole momenttijäykkiä, joten molemmista päistä on vapautettava kiertyminen x-akselin suhteen. Tuille syötetään sijainniksi palkkien pääty pisteet, jotka luotiin aikaisemmin geometriassa.

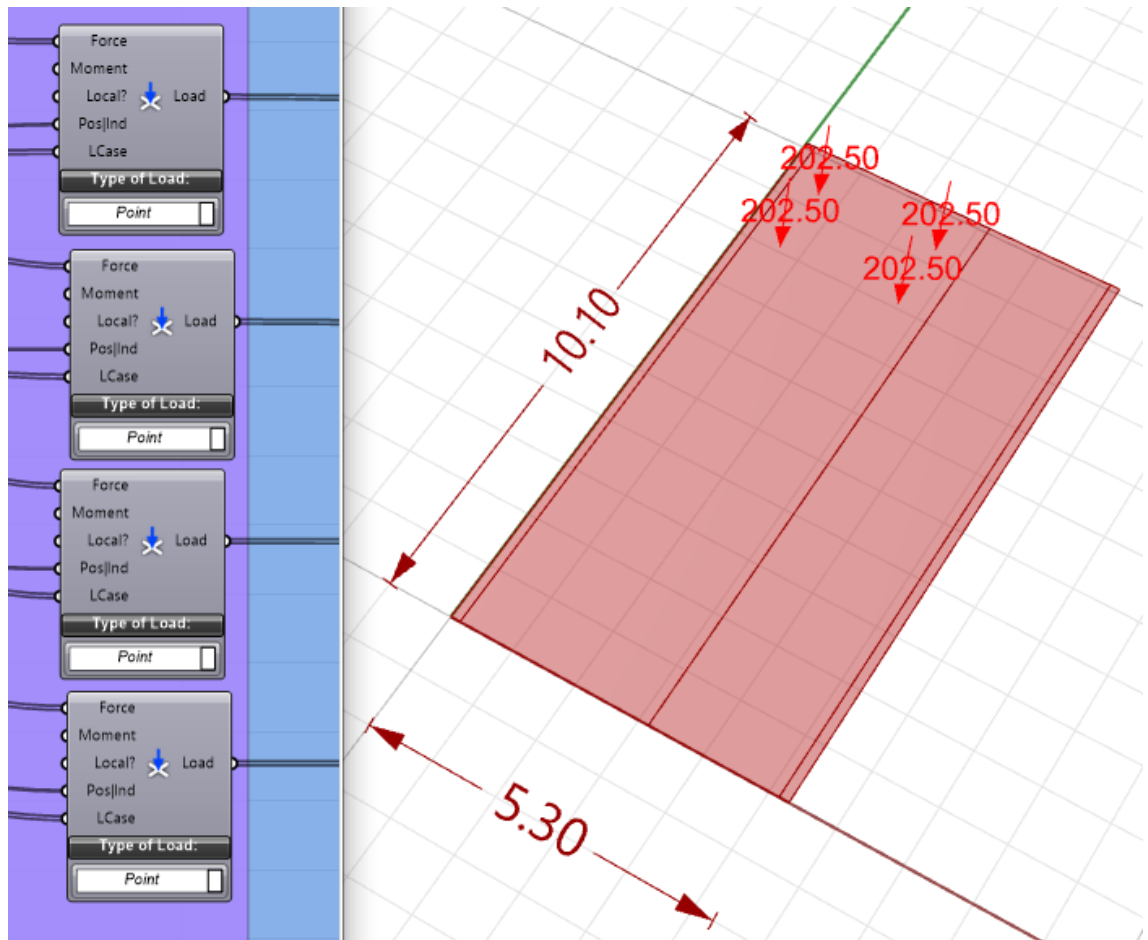


KUVIO 31. Tuet ja palkkien pääty pisteet

Kuormat

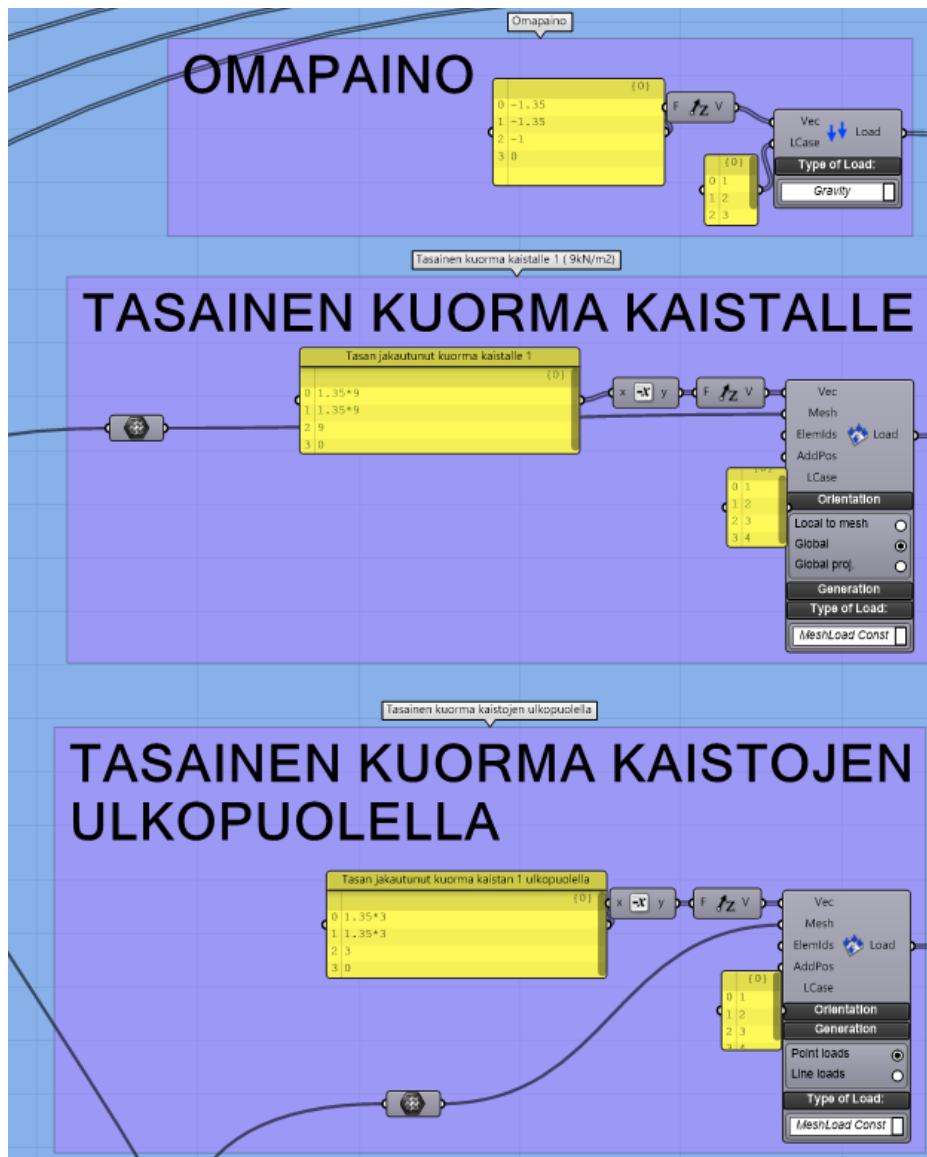
Kuormat syötetään Load -komponentilla. Komponentilla voi luoda piste- viiva- sekä pintakuormia. Omapaino syötetään mallille Gravity asetuksella. Eurokoodin SFS-EN 1991-2 ja kansallisen ohjeen NCCI 1:n mukaiset LM1:n telikuormat on mallinnettu neljänä pistekuormana. Kun tarkastellaan pääkannattajia eikä sekundäärirakennetta eli kansirakennetta, voidaan yksinkertaistaa mallia ja jättää kuormitusalat huomioimatta. Pistekuormat ovat kuitenkin kuormitusalojen keskipisteissä. Pistekuormat tarvitsevat sijaintipisteet, jotka rakensin perusgeometrian päälle. Kuormat ovat siten oikeassa paikassa, vaikka sillan pituutta tai leveyttä muutettaisiin. Eri mitoitus tilanteita varten on omat kuormitustapauksensa. Leikkausmitoitusta varten telikuorma sijaitsee tukien lähellä (KUVIO 32.), jossa se aiheuttaa palkkeihin suurimman leikkausvoiman. Taivutus-, sekä taipumamitoitusta varten telikuorma on asetettu sillan keskikohtaan. Silloin palkeille saadaan

suurin taivutusmomentti ja taipuma. Leikkauksen ja taivutuksen kuormitustapauksissa kuormat on kerrottu osavarmuuskertoimella 1,35. Taipumamitoitus tehdään käyttörajatilassa, joten siinä kuormat ovat ominaisarvoja.



KUVIO 32. LM1 telikuorma tukien lähellä

LM1:n tasaiset kuormat saadaan malliin käyttämällä Load -komponentin MeshLoad -asetusta. Load -komponentit kytketään aikaisemmin luotuihin elementtiverkkoihin. Kaikille kuormakomponenteille kuormat syötetään suuntavektorin avulla (KUVIO 33.)

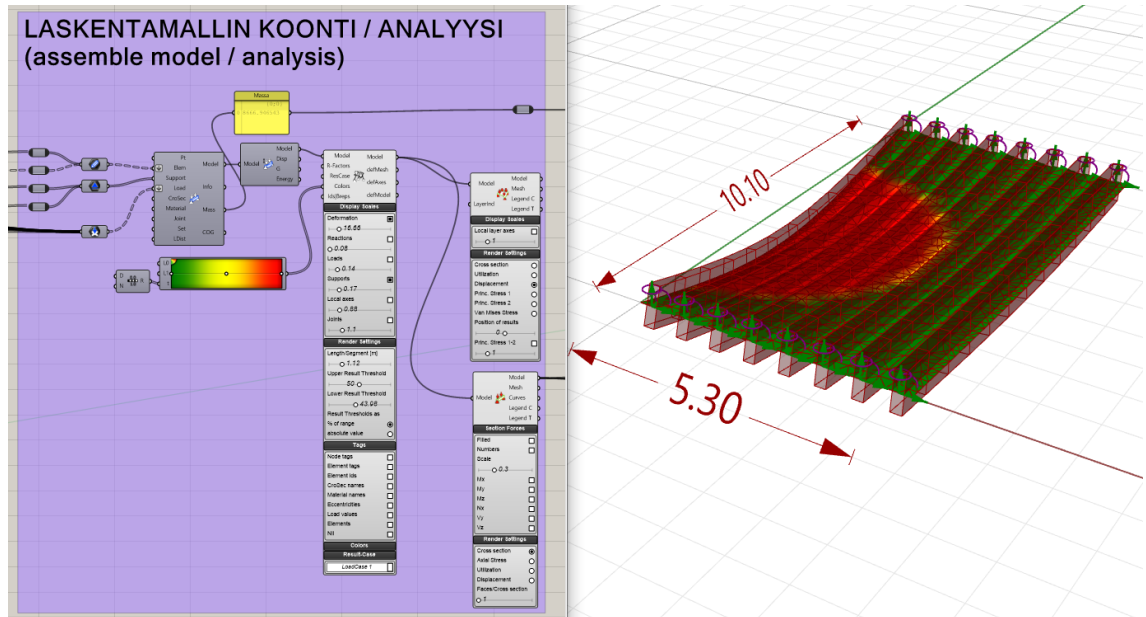


KUVIO 33. Tasaiset kuormat ja omapaino

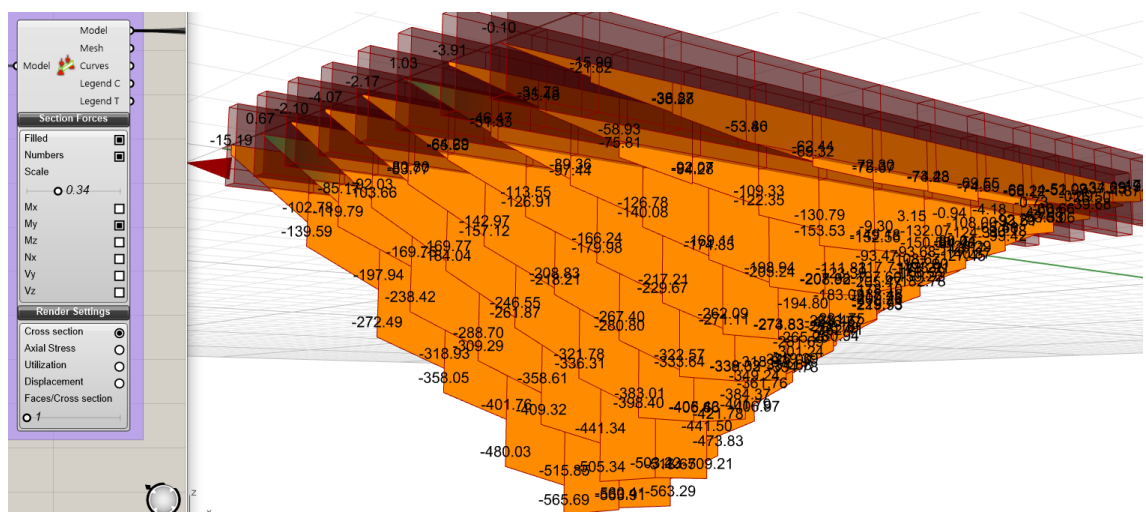
Assemble Model ja mallin analysointi

Kun kuormat, tuet ja elementit on luotu, ne yhdistetään kokonaisuudeksi Assemble Model -komponentilla, joka rakentaa saamastaan datasta laskentamallin. Laskentamallia analysoidaan Analyze -komponentilla, joka tekee mallille ensimmäisen kertaluokan mukaisen analyysin. Tuloksia tarkastellaan Model View- ja Beam View -komponenteilla. Laskentamallin tuloksia voi monipuolisesti visualisoida näitä komponentteja käyttämällä. Beam View luo palkeista kolmiulotteisen geometrian annetuilla poikkileikkausmitoilla tai -tunnuksella. Kuviossa 34. näkyy liimapuupalkkien taipuminen yliskaalattuna, kun telikuorma sijaitsee jännävälän keskellä ajoradan reunassa. Värit laatassa visualisoivat siirtymää. Beam

View näyttää myös tarvittaessa voimakuvaa ja numeroarvoja voimista (KUVIO 35.).



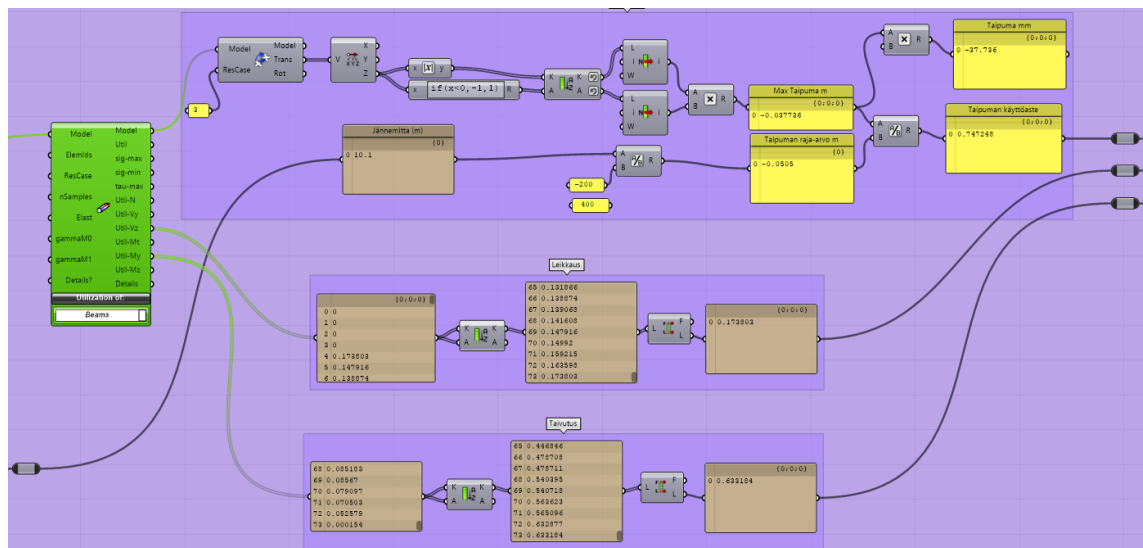
KUVIO 34. Laskentamallin koonti ja tulosten analysointiin tarkoitettuja komponentteja



KUVIO 35. Palkkien taivutusmomenttikuvaaaja samalla kuormitustapauksella, kuin kuviossa 22

4.2.4 Palkkien mitoitus

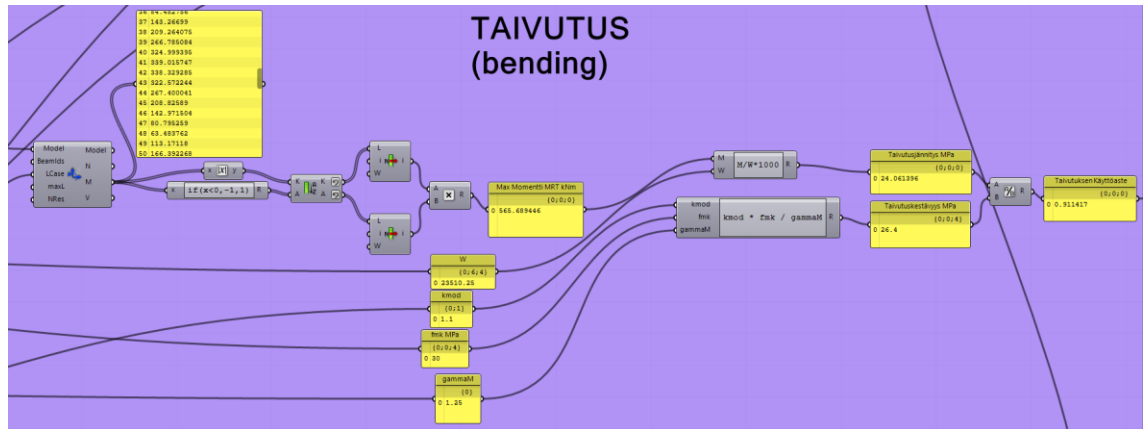
Standardoitujen teräspalkkien eurokoodin mukainen mitoitus on rakennettu sisään Karambaan. Tässä tutkimuksessa olevat HEA- ja HEB-profiilit saavat siis käyttöasteensa suoraan ohjelmasta. Käyttöasteet saa ulos Utilizations of Elements -komponentista (KUVIO 36.). Palkeista on tarkasteltu leikkaus- ja taiputuskestävyyttä, sekä taipumaa. Taipuman raja-arvona toimii jännemitta jaettuna kahdella sadalla, eli $L/200$. Tämä taipuman raja-arvo pätee vain vähäisen liikenteen teillä, ja sen käytöstä päättää paikallinen viranomainen. Tavallisesti tiesilloilla taipuman raja-arvona toimii $L/400$.



KUVIO 36. Teräspalkkien käyttöasteiden tarkastelu

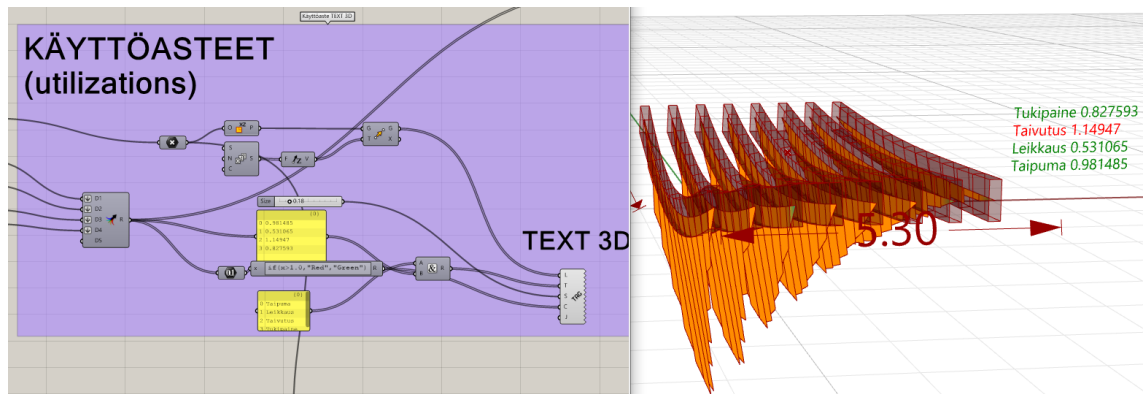
Liimapuulle ei ole Karambassa valmiita käyttöasteen tarkastelua, joten se piti rakentaa itse laskemalla liimapuupalkkien kapasiteetit leikkaukselle, taiputukselle ja tukipaineelle. Grasshopperissa on matemaattisia yhtälöitä varten Expressions-komponentti, johon voi tuoda halutut parametrit, joista muodostetaan yhtälö. Esimerkiksi taiputusjännityksen laskemiseen saadaan laskentamallista haettua suurin taiputusmomentti ja Karamban CroSec -komponentista saadaan taiputusvastus W . Nämä kun syötetään Expressions -komponenttiin, ja kirjoitetaan yhtälö, saadaan tulokseksi taiputusjännitys. (KUVIO 37.) Karambassa pitää olla tarkkana yksiköiden kanssa, sillä Grasshopperissa liikkuvat ainoastaan numerot, ja monissa komponenteissa yksiköt ovat eri yksiköitä, kuin mihin suomessa on totuttu.

Esimerkiksi taivutusvastus on Karambassa kuutiosenttimetreinä, kun taas Suomessa on totuttu käyttämään kuutiomillimetriä. Numeroarvot on kuitenkin helppo muuttaa tuttuihin yksiköihin lisäkertoimilla tai -jakajilla.



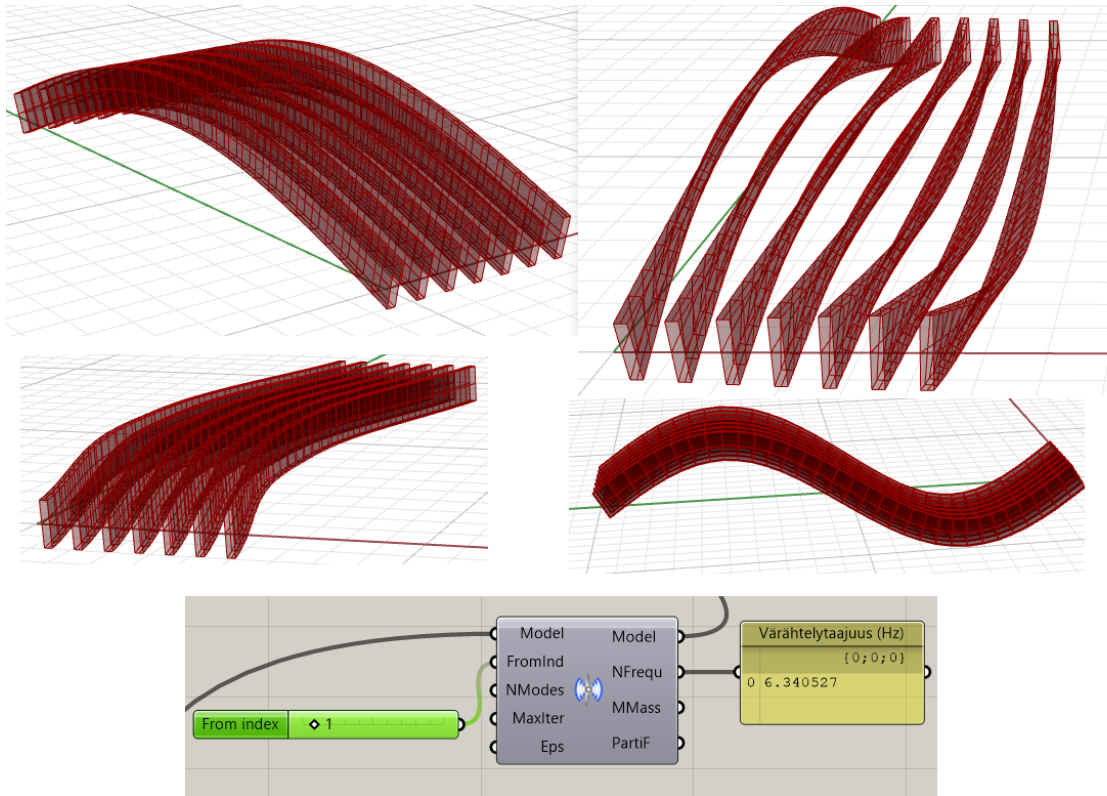
KUVIO 37. Taivutusjännityksen ja taivutuskestävyyden laskenta Expressions-komponentilla

Käyttöasteet voidaan helposti koota ja visualisoida Grasshopperin monipuolisilla tekstityökaluilla. Teksti on ohjelmoitu niin, että se muuttuu punaiseksi, jos käyttöaste ylittyy, eli numeroarvo kasvaa yli yhden. (KUVIO 38.)



KUVIO 38. Käyttöasteiden visualisointi

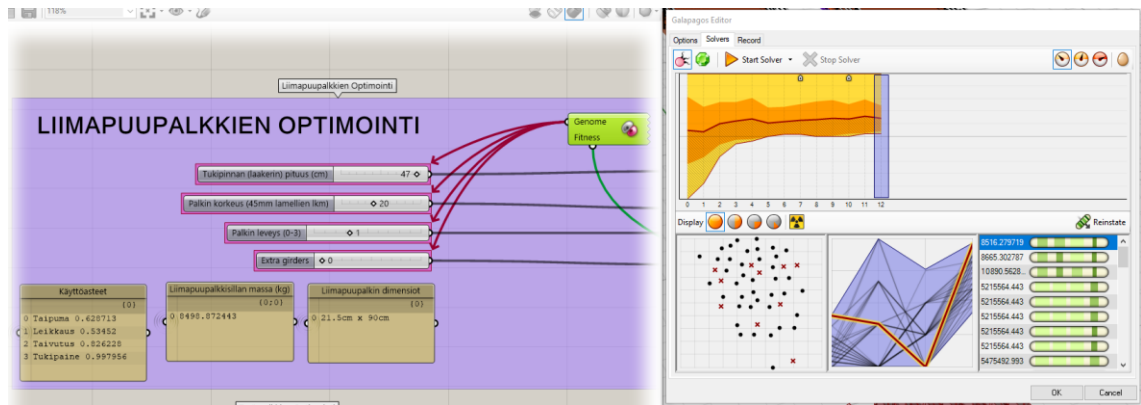
Rakennemallilta voidaan myös tarkastaa esimerkiksi värähtelytaajuus. Jos taajuus on yli 5 Hz, voidaan puusilloilla jättää tarkempi värähtelymitoitus tekemättä (NCCI 5 2013, 49). Karambasta saa helposti näkyviin taajuuden ja erilaiset värähtelymuodot. Tieliikenteen silloissa ei värähtelyä yleensä ole tarpeen huomioida. Karamban värähtely-komponentti on kuitenkin hyödyllinen esimerkiksi kevyen liikenteen silloissa.



KUVIO 39. Sillan palkkien värähtelymuotoja ja Natural Vibrations -komponentti

4.2.5 Palkkien Galapagos-optimointi

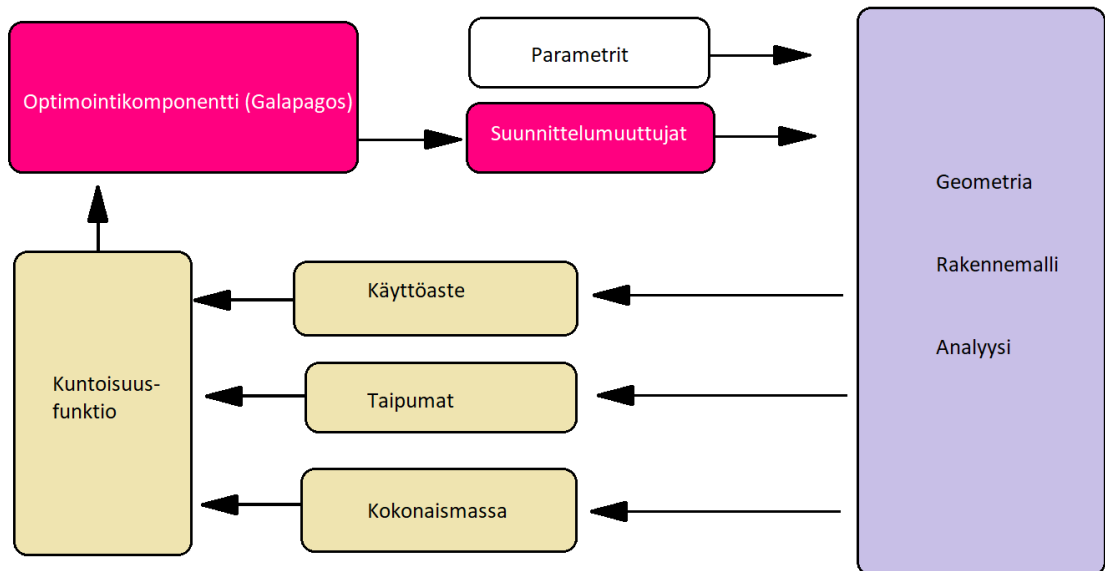
Palkkien optimointitehtävän tavoitteena on rakenteen massan optimointi, joka käytännössä tarkoittaa materiaalisäästön tavoittelua. Liimapuulla on oma kuutiohintansa ja teräksellä kilohintansa. Kun rakenteiden massa kevenee, myös materiaalikustannukset pienenevät. Optimointia varten on määritelty rajatut muuttujat, joista optimoinnilla pyritään saamaan mahdollisimman edullinen variaatio aikaan käyttöastetta ylittämättä. Muuttujia ovat liimapuupalkkien optimoinnissa palkkien leveys- ja korkeusmitat, sekä tukipinnan pituus (KUVIO 40.). Lisäksi palkkijakoa voi tihentää lisäpalkeilla. Teräspalkkien optimoinnissa valittavana on palkin profiili, sekä lisäpalkkien määrä. Number Slider valitsee Profiilit listatyökallulla listasta, johon on lajiteltu HEA- ja HEB profiilit matalimmasta korkeimpaan.



KUVIO 40. Galapagos Editor ja muuttujat

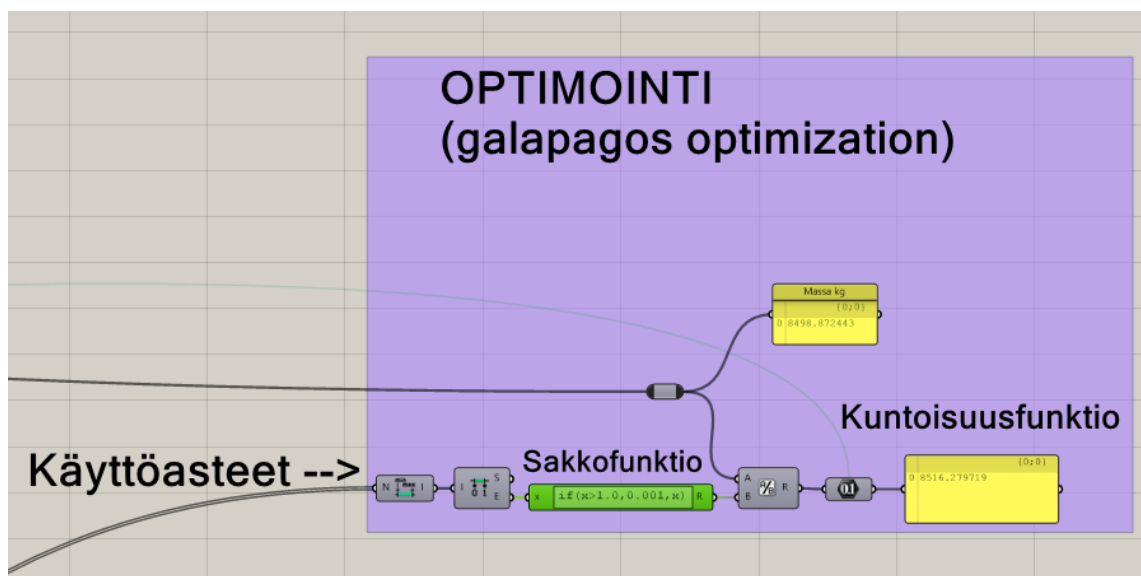
Grasshopperissa optimointia voi tehdä Galapagos -komponentilla. Galapagos-optimointi perustuu metaheuristiseen optimointimenetelmään, geneettiseen algoritmiin. Geneettinen algoritmi on John Hollandin 1960-luvulla kehittämä evoluutioalgoritmi, joka on evoluutioteoriaa jäljittelevä menetelmä. Siinä asetetulle ongelmalle pyritään löytämään paras ratkaisu määrittämällä ensin ongelman suunnittelumuuttujista alkupopulaatio, laskemalla jokaisen muuttujan kuntoisuus, valitsemalla tämän jälkeen populaation parhaat yksilöt. Niistä luodaan jälkeläisiä tiettyjä säännönmukaisuuksia noudattaen. Tätä prosessia toistetaan, kunnes asetetulle ongelmalle on löydetty riittävän hyvä ratkaisu. (Vastapuu 2018, 10)

Galapagos -komponenttiin syötetään suunnittelumuuttujat (*genome*) sekä kuntoisuusfunktio (*fitness*). Kuntoisuusfunktiona toimii rakennemallista saatava rakenteen omapaino. Omapaino saadaan Assemble Model-komponentin Mass-ulostulosta. Galapagos pyrkii hakemaan suunnittelumuuttujia varioimalla mahdollisimman pienen arvon kuntoisuusfunktiolle. Galapagoksen voi myös käskä hakemaan mahdollisimman suurta arvoa. Optimointiasetukset valitaan ennen optimoinnin aloittamista. Optimoinnille voi asettaa tavoitteen, jonka ylittyessä optimointi pysähtyy. Tavoitteeksi voidaan asettaa esimerkiksi aika, jonka täytyessä optimointi päättyy. Optimointia voidaan nopeuttaa tietokoneen suorituskykyä kasvattamalla.



KUVIO 41. Galapagos-optimoinnin toimintaperiaate

Jotta algoritmi saadaan tavoittelemaan mahdollisimman kevyen rakenteen lisäksi mahdollisimman korkeaa käyttöastetta, kuitenkin ylittämättä sitä, joudutaan algoritmiin lisäämään rajoitusehdot. Yksi tavallisimpia tapoja sisällyttää rajoitusehdot kuntoisuusfunktioon on sakkomenetelmä (*penalty method*). Sakkofunktio rangaistaa kuntoisuusfunktiota, mikäli käyttöaste ylittyy. Käytännössä käyttöasteen ylittyessä kuntoisuusfunktion arvo, eli sillan massa kasvaa tuhatkertaiseksi sakkofunktion kertoimen takia. (KUVIO 42.)



KUVIO 42. Sakko- ja kuntoisuusfunktiot

5 POHDINTA

5.1 Algoritmin tekoprosessi

Algoritmin tekoprosessi oli monivaiheinen ja pitkä urakka. Työllä oli kunnianhimoiset tavoitteet omaan kokemukseen nähden, ja joitain tavoitteita piti matkan varrella hillitä, jotta työ valmistui ajallaan. Mielestäni voin kuitenkin olla ylpeä saavutuksestani ja tyytyväinen omaan työhöni.

Aluksi, kun ei ollut vielä kokemusta grasshopperin käytöstä, tuntui työhön tarttuminen vaikealta. Ei tiennyt mistä aloittaisi. Lisäksi oma tietämättömyys turhautti ja olisin halunnut oppia ja tietää kaiken heti. Opinnäytetyötäni ohjaava esimies osasi hyvin ohjailla ja paloitella urakkaa niin, että pääsin työssäni hyvin alkuun ja eteenpäin.

Työn edetessä algoritmin muoto muuttui moneen otteeseen, ja monia virheellisiä rakennelmia piti hylätä. Esimerkiksi laskentamallilla oli aluksi kaksi päällekkäistä kansilaattaa. Erehdyksistä sai kuitenkin tärkeää oppia ja välillä niistä syntyi uusia ideoita. Lopullinenkaan tuotos ei ole välttämä tehty kaikista järkevimmällä tavalla, mutta tulevaisuudessa sitä tullaan vielä kehittämään lisää. Yksi iso haaste grasshopperilla työskentelyssä on algoritmin saaminen selkeän näköiseksi. Omasta mielestäni onnistuin kohtuullisen hyvin siinä asiassa. Komponentit ovat selkeästi jäsennellyissä ryhmissä omina asiakokonaisuuksinaan.

Algoritmeihin liittyviä opinnäytteitä on alettu tekemään ihan viime vuosina enemmän, mikä helpotti omaa työtä hieman. Pääosin grasshopperin käyttöön liittyvä tieto piti hakea kuitenkin englanninkielisiltä palstoilta ja videoilta. Oma sanavarasto tuli samalla kasvatettua ja oppi hyödyllisiä alaan liittyviä termejä englanniksi.

5.2 Algoritmin toimivuus

Algoritmistä tuli toimiva. Komponentteja on paljon ja dataa liikkuu runsaasti, joten lähtötietoja muutettaessa algoritmi ottaa muutaman sekuntin päivittyäkseen kokonaan. Laskennan osalta karamballe tehtiin vertailun vuoksi rfem-ohjelmalla identtinen laskentamalli, jotta voitiin arvioida laskentatulosten luotettavuutta paremmin. Lisäksi vertailin mallista saatavaa rakenteen painoa käsin laskettuun painoon ja luvut täsmäsivät.

Algoritmin toimivuuden varmistamiseksi sitä testataan yrityksen sisällä vielä muiden suunnittelijoiden toimesta. Mikäli nähdään tarpeelliseksi, testien jälkeen algoritmile tehdään vielä tarvittavia korjauksia ja muutoksia saadun palautteen perusteella.

5.3 Haasteet

Isoimman haasteen opinnäytetyön tekemiseen aiheutti oma kokemattomuus siltojen suunnittelussa. Opinnäytetyön tekeminen oli äärimmäisen opettavainen kokemus. Työtä tehdessä piti kahlata valtava määrä kirjallisuutta läpi, ja matkaan tarttui varmasti paljon hyödyllistä oppia opinnäytetyöaiheen ulkopuoleltakin. Tullevaisuudessa tiedon hakeminen suunnittelutyössä on varmasti helpompaa, kun tietää mistä hakea. Samalla kun tietoa imi lähteistä kaksin käsin, oli vaikeaa rajata, kuinka syvälle mihinkäkin asiaan pureutuu ja kuinka laajasti asioita käsittelee tässä opinnäytetyössä. Paljon mielenkiintoisia asioita piti jättää raportin ulkopuolelle.

Toinen iso haaste oli kokemattomuus algoritmeista ja parametrisesta suunnittelusta. Grasshopperilla työskenteleminen oli kuitenkin todella mukaansa tempaavaa, ja mielenkiintoista, joten oppiminen oli pääosin helppoa. Lisäksi sain työn aikana paljon tukea ja hyviä neuvoja ohjaajaltani ja työkavereilta. Itse tekeminen ja oma yrittäminen, sekä erehtyminen osoittautuivat jälleen tehokkaiksi oppimismetodeiksi. Toisaalta itsenäinen tekeminen aiheutti myös oman haasteensa. Etätyösuosituksen ollessa voimassa koko opinnäytetyöprosessin aikana, jäi keskustelu kokeneempien työkaverien kanssa vähäiselle. Normaalissa tilanteessa

mieltä askarruttavasta asiasta pystyisi välittömästi kysymään vieruskaverilta, ja asiasta voisi syntyä hedelmällistä keskustelua.

5.4 Jatkokehitys

Tämän opinnäytetyön aikana suunnittelutyökalu ei kerennyt tulla vielä täysin valmiiksi. Sitä tullaan vielä kehittämään tulevaisuudessa monipuolisemmaksi ja käyttäjäystävällisemmäksi. Tällä hetkellä työkalulla voi suunnitella vain yksikaiseräisen sillan, mutta jatkossa kaistoja tulee olemaan enemmän. Lisäksi algoritmiin lisätään kustannusten laskenta. Silloin työkalusta tulee hyödyllinen apuväline tarjousten tekemiseen.

Työkalun yksi tavoitteista oli luoda piirustuksia algoritmin avulla. Voidaan todeta, että tavoite saavutettiin. Algoritmi luo 3D-mallin ja poikkileikkauksen sillasta. Enempää tutkimusta piirustusten tuottamisesta ei tässä opinnäytetyössä ehditty tekemään, mutta siitäkin voisi tehdä oman jatkotutkimuksensa.

Suunnittelutyökalun jatkokehityksessä näen myös mahdolliseksi sillan alusrakenteiden suunnittelun algoritmeilla. Vaihtoehtoina voisi olla esimerkiksi maatuiki teräspaalu- tai anturaperustuksella paikallavalettuna tai esivalmistettuna. Lisäksi sillan kannen voisi toteuttaa esimerkiksi teräsbetonisena, tai vaihtoehtoisesti teräksisillä sekundäärirakenteilla ja puisella pintarakenteella. Vaihtoehtoja on paljon ja kaikkiin voisi soveltaa algoritmeja.

5.5 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tekeminen oli hieno mahdollisuus tutustua siltojen suunnitteluun, sekä visuaaliseen ohjelmointiin. Työstä sain paljon hyvää kokemusta työelämää varten. Valmistuessaan täysin algoritmiavusteinen suunnittelutyökaluni avaa varmasti uusia mahdollisuuksia tuleviin yksityistiesiltahankkeisiin. Toivon mukaan työkalua päästään kokeilemaan oikeassa hankkeessa mahdollisimman pian.

LÄHTEET

Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus. n.d. Verkkosivu. Luettu 15.1.2021. <https://www.ely-keskus.fi/tehdyt-avustuspaatokset-ely-keskuksittain>

karamba3d. 2021. Verkkosivu. Luettu 07.01.2021. <https://www.karamba3d.com/examples/>

Maanmittauslaitos. 2021. Verkkosivu. Luettu 07.01.2021. <https://www.maanmittauslaitos.fi/asioi-verkossa/palveluiden-kayttoohjeet/kiinteistotietopalvelu/yksityistiet>

NCCI 1. Väylä. 2017. Eurokoodin soveltamisohje: Siltojen kuormat ja suunniteluperusteet. Verkkojulkaisu pdf. Julkaistu 6.12.2017. Luettu 26.01.2021. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-24_ncci1_web.pdf

NCCI 5. Väylä. 2013. Eurokoodin soveltamisohje: puurakenteiden suunnittelu. Verkkojulkaisu pdf. Julkaistu 17.6.2013. Luettu 26.01.2021. https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2013-25_ncci5_web.pdf

Pisto, T. Yksityisteiden sillat tutkimuksen kohteena. Tie & Liikenne 3/2020, 21-22.

Puuinfo. Puuinfo Oy. 2021. n.d. Verkkosivu. Luettu 14.4.2021. <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööriutuotteet/liimapuu-glt/>

RIL 179-2018. SILLAT -suunnittelu, toteutus ja ylläpito. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2018. Jyväskylä. Kirjakaari Oy

Ruotsila, T. 2016. Puusillan syrjälankkukannen pitkäaikaiskestävyys säärasituksessa. Rakennustekniikka. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

SILKO 1.401. Väylä. 2018. Puurakenteet. rakenteelliset korjaukset. Verkkojulkaisu pdf. Julkaistu 2018. Luettu 07.01.2021. https://julkaisut.vayla.fi/sillat/silko/kansio1/s1401_web.pdf

Siltojemme historia. 2004. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

Suomen Tieyhdistys. Mikä on yksityistie? YouTube 2017. Katsottu 7.1.2021. <https://www.youtube.com/watch?v=MQVyh9t1LcM>

Traficom. Julkaistu 1.4.2020. Verkkojulkaisu pdf. Päivitetty 18.2.2021. Luettu 15.1.2021. <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Yksityisten%20valtionavustukset%20ohje%20p%C3%A4ivitetty%2018.2.2021.pdf>

Vastapuu, J. 2018 Teräshallin kattojäykistyksen massa- ja kustannusoptimointi, Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, Tampereen teknillinen yliopisto, Diplomityö

Versowood. 2021. Tyyppihyväksytyt sillat. n.d. Luettu 29.1.2021. <https://www.versowood.fi/fi/tuotteet/maa-ja-tierakentamisen-tuotteet/tyyppi-hyvaksytyt-sillat>

Väylä. n.d. Verkkosivu. Luettu 15.1.2021. <https://vayla.fi/palveluntuottajat/sillat/yksityisteiden-sillat>

Väylä. n.d. Arkisto – Tyyppiirustukset: korvattu tai poistettu käytöstä. Verkkosivu. n.d. Luettu 25.01.2021. https://julkaisut.vayla.fi/pdf7/arkisto_tyyppiirustukset_web.pdf

Väylä. 1999. Siltojen kuormat. verkkojulkaisu pdf. Julkaistu 16.12.1999. Luettu 07.01.2021. <https://julkaisut.vayla.fi/sillat/julkaisut/skuoro00.pdf>

Väylä. 2017. Puusillan laajennetun yleistarkastuksen ohje – Pienet pyöröpuiset sillat. Verkkojulkaisu pdf. Julkaistu 17.8.2017. Luettu 29.1.2021. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-36_puusillan_laajennetun_web.pdf

Väylä. 2020. Väyläviraston sillat 1.1.2020. Verkkojulkaisu pdf. Julkaistu 8/2020. Luettu 7.01.2021. https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj_2020-46_vaylaviraston_sillat_web.pdf

LIITTEET

Liite 1. Sillan yleispiirustus

KORKEUSJÄRJESTELMÄ: N60
 KOORDINAATTIJÄRJESTELMÄ: KKJ

PUUTAVARA:
 LIIMAPUUPALKIT:
 - 10KPL, b_{xh} = 245x1033mm, L=15250mm
 - MÄNTYÄ, PAINEKYLLÄSTYS (SFS-EN 351)
 - LUJUUSLUOKKA L40
 - LIIMAUS SFS-EN 301
 - KARKEAHÖYLÄYS
 - PAINEKYLLÄSTYS (SFS-EN 351, lk A)

MUU PUUTAVARA:
 T30, MÄNTYÄ, PAINEKYLLÄSTYS (SFS-EN 351)

VANERI: FILMIPINTAINEN HAVUPUUVANERI

BETONI:
 MAATUET Ro10, R4, K35-1, P30 c=45mm
 SIIPIMUURIT Ro12, R1, K35-1, P30 c=45mm

TERÄS: Fe 37 B

SILLAN LAAKERIT:
 KUMILEVYLAAKERI t=10mm 400x245
 AINE 1,0/1,5/60° IRH

ERISTYS: MAANVASTAISET BETONIPINNAT ERISTETÄÄN YKSINKERTAISELLA KOSTEUSERISTYKSELLÄ InfraRYL:n MUKAAN

AJORATA: POIKITTAINEN SYRJÄLANKUTUS 50x150mm.

YMPÄRISTÖKESKUKSEN LAUSUNTO, Dnro:

ETULUISKIIN MOLSKOTTIVERHOUS JA SIVULUISKIIN NURMIVERHOUS

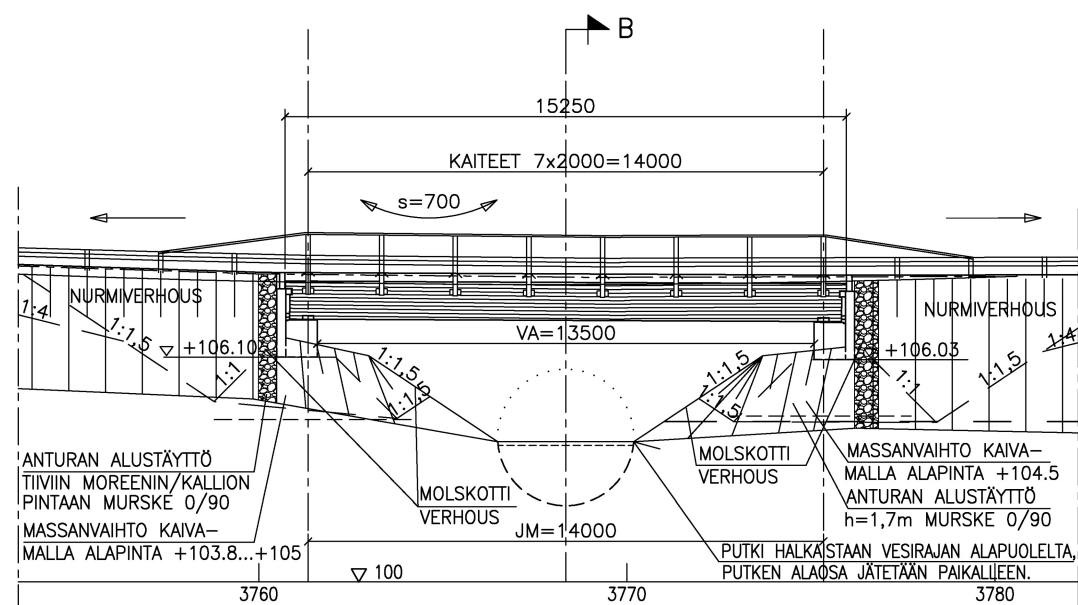
TULOPEKEREET ASFALTOIDAAN 50m ENNEN JA JÄLKEEN SILLAN.

KAITEET:
 KORKEA HARVA SILLANKAIDE, KORKEA SUOJAVERKKO
 KUORMA: YLÄJOHDE 1,5 kN/m

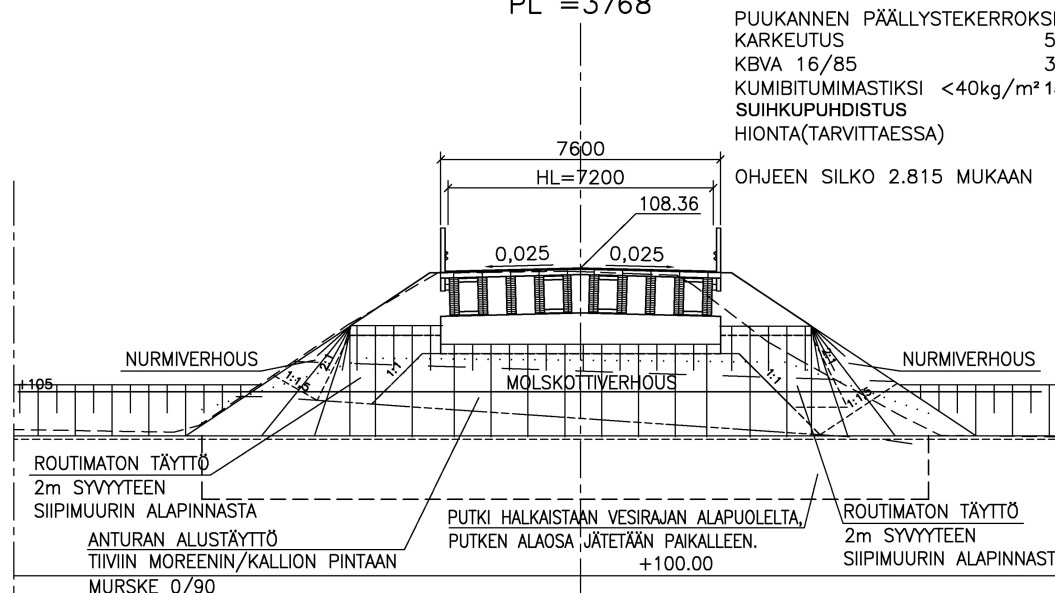
SILLAN KEILOJEN MOLSKOTTIVERHOUS ULOTETAAN UOMAN RAJAAN ASTI

KARTTA 1:10000

A - A, 1:100



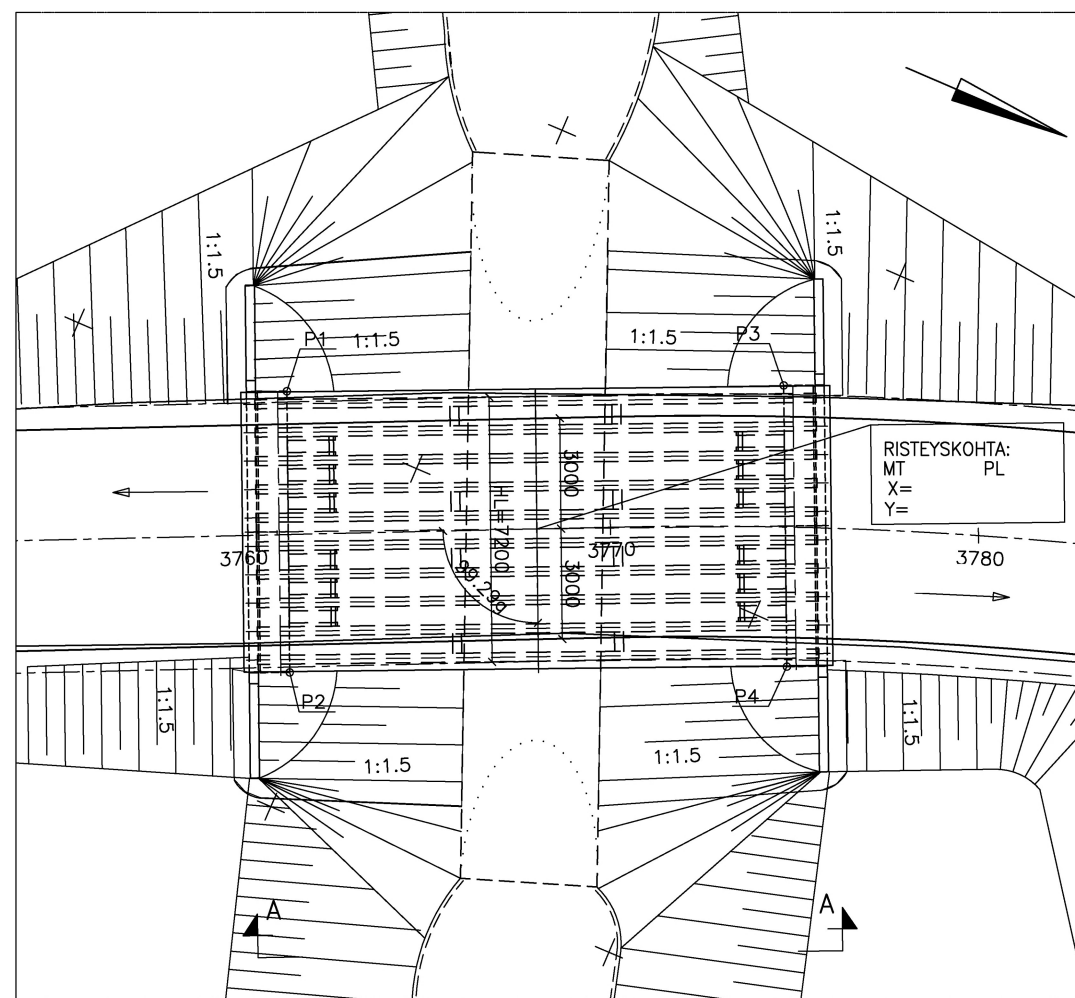
B - B, 1:100
 PL = 3768



PUUKANNEN PÄÄLLYSTEKERROKSET:
 KARKEUTUS 5 mm
 KBVA 16/85 35 mr
 KUMIBITUMIMASTIKSI <40kg/m² 15 mm
 SUIHKUPUHDISTUS
 HIONTA(TARVITTAESSA)

OHJEEN SILKO 2.815 MUKAAN

TASOPIIRROS 1:100



PÄÄPISTEET P1...P4 SIJAITSEVAT MAATUKIEN ETUNURKISSA.

Pisteen nimi	X	Y
P1		
P2		
P3		
P4		

PIIRUSTUSLUETTELO

R15/	YLEISPIIRUSTUS
R15/	ALUSRAKENTEEN ASENNUS
R15/	ALUSRAKENTEEN ELEMENTTIPIIRUSTUS
R15/	PÄÄLLYSRAKENNEPIIRUSTUS
R15/	LIIMAPUUPALKKIEN VALMISTUSPIIRUSTUS
R15/	KANSILANKUTUS
R15/	KORKEAN KAITEEN KIINNITYS
TIEH:n TYYPPIPIIRUSTUKSET	
R15/DK 1-1	KORKEA SILLANKAIDE, HARVA KAIDE
R15/DK 4-2	KORKEA SUOJAVERKKO
GEOTEKNISET PIIRUSTUKSET	
R15/	TUTKIMUSKARTTA
R15/	LEIKKAUS A-A JA B-B
R15/	LEIKKAUS C-C

MERKKI	PVM	MUUTOS	TEHNYT	TARKASTANUT
HANKE	MAANTIEN	-	PARANTAMINEN	
SILTA				
SILLAN NIMI JA KUNTA	LIIMAPUUNEN PALKKISILTA (Pip)			
TYYPPI	YLEISPIIRUSTUS			
PIIRUSTUS	13,5m	HL	7,2m	
KUORMA	Lk I, Ek 1/TIEL 99	VINDUS	0 gon	
SUUNNITTELU	RAMBOLL		TILAAJA	
Sillansuunnittelu	TARK./HYV.			
PIIRT.			Siltateknikka, Suunnittelu	
SUUNN.			TARK.	
TARK./HYV.			HYV./TARK.	
Geotekninen suunnittelu			PIR.NRO	
MITTAK.	1:100			