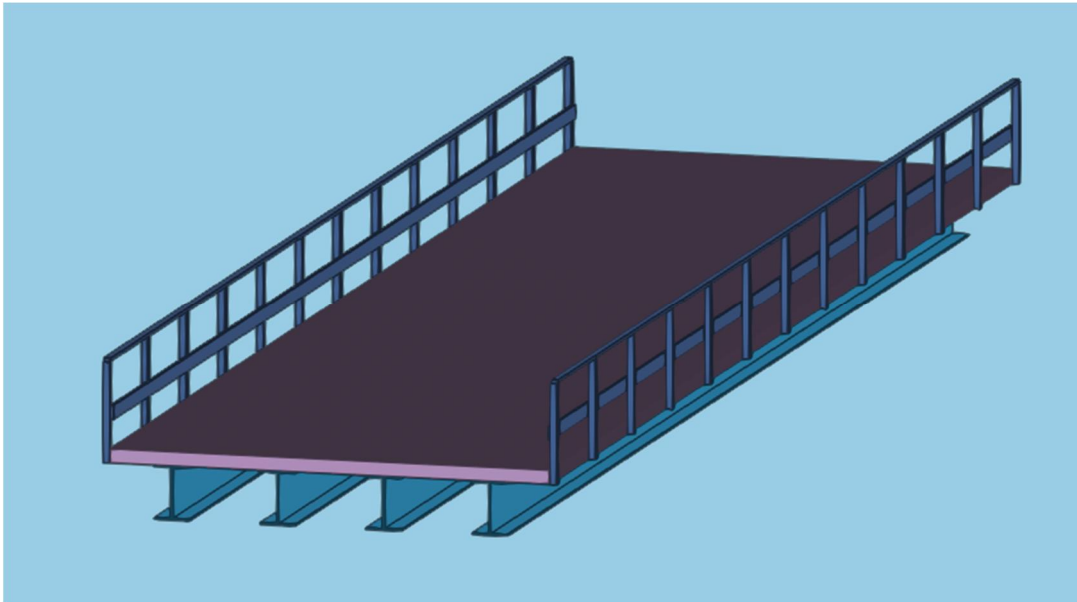


Juha Teräs KRY19S

Puukantisen teräspalkkisillan tietomallinnus- työkalu ja teräspalkiston staattinen mitoitus



Insinööri (AMK)

Rakennus- ja yhdyskunta-
tekniikka

Kevät 2023



**KAMK • University
of Applied Sciences**

Tiivistelmä

Tekijä: Teräs Juha

Työn nimi: Puukantisen teräspalkkisillan tietomallinnustyökalu ja teräspalkkien staattinen mitoitus

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Osana rakennesuunnittelua tietomallintaminen on silta- ja infrasuunnittelussa oleellinen osa sen tarkkuuden sekä käytännöllisyyden vuoksi. Tietomalleilla on mahdollista jo varhaisessa vaiheessa tarkastella esimerkiksi tulevaa siltapaikkaa ja siltaa, jolloin voidaan havainnoida mahdollisia ongelmia tai päällekkäisyyksiä muuhun ympäristöön, kuten risteävien väylien geometrioita jne.

Tietomallien luominen on usein työlästä, minkä vuoksi on pyritty käyttämään hyväksi automatisoituja työkaluja, kuten Rhinon Grasshopper-lisäosaa. Lisäosalla luodaan algoritmisia malleja ja algoritmiin pyritään saamaan mahdollisimman yksinkertainen ajattelutapa, jotta esimerkiksi lähtötietoja voidaan vapaasti sekä ongelmitta syöttää lisäosaan. Tässä työssä puhutaan jatkossa Grasshopper-työkalusta helpomman ajattelutavan vuoksi. Tämän työn tavoitteena oli luoda automatisoitu työkalu nopeuttamaan suunnittelua ja mallintamista tyypilliselle puukantiselle teräspalkkisillalle.

Grasshopper-työkaluun syötettyjen lähtötietojen perusteella (sillan väylän tasausviiva ja hyötyleveys) ohjataan määriteltyjen profiilien ja rakenneosien suuntaa sekä sijaintia. Tässä työssä käytettiin paljon säätämiseen tarkoitettuja työkaluja, jotta kaikki rakenneosat olisivat oikeassa sijainnissa ja paikallaan. Lisäksi työkalu on pyritty luomaan siten, että sitä osaisi käyttää kuka vain, joka on suunnittelemassa tai mallintamassa kyseisen mukaista kevyenliikenteensiltaa. Lähtötietoja voidaan muuttaa työkaluun rakennettujen automaattisten toimintojen avulla. Esim. Sillan pituus eli jännemitta on määritelty yhden metrin välein ja hyötylevydet vaihtelevat 3 m, 4 m, 4,5 m, 5 m ja 6 m. Tarvittavien tietojen syöttämisen jälkeen Rhinon Grasshopper-työkalulla luotu malli viedään Tekla Structures-ohjelmistoon oikeaan koordinaatistoon käyttämällä hyväksi TSV-linjaa.

Tässä työssä on määritelty tyypilliselle kevyenliikenteen teräspalkkisillalle listaus käytettävistä HEB-profiileista ja laskelmat on tehty Hannes Kummalan DI luomalla Excel-laskenta pohjalla, joka pohjautuu Eurokoodeihin sekä Väyläviraston ohjeisiin. Laskentapohjan käyttö vaatii, että sen käyttäjä tuntee rakenteiden staattisen mitoituksen hyvin. Laskentapohjalla määritellyille HEB-profiilille luotiin taulukko, johon on lueteloitu käyttöasteet kiepahduskestävyydelle, momenttikestävyydelle, leikkauslommahduskestävyydelle ja taipumalle.

Keskeisimpänä tuloksena syntyi toimiva automatisoitu työkalu, jolla voidaan nopeuttaa suunnittelutyötä ja työkalua tullaan kehittämään myös muille siltatyypeille tai vastaaville rakenteille.

Abstract

Author: Teräs Juha

Title of Publication: Information Modeling Tool for Wood-Decked Steel Beam Bridge and Dimensioning of Static Steel Beams

Degree title: Bachelor of Engineering, Construction Engineering

Considering structural design, information modeling is an essential part of bridge and infrastructure design for its accuracy and practicality. At an early stage, information models enable studying future bridge site and the bridge, whereby potential problems or overlaps can be observed in the surrounding environment, such as geometry of intersecting fairways.

Creating data models is often laborious, which has resulted utilization of automated tools such as Rhino Grasshopper add-on. The add-on creates algorithmic models. The aim is to create the simplest way algorithm thinking. In order that for example baseline information can be freely and effortlessly entered in the add-on. In the future, the word "tool" is used instead of add-on.

Based on the starting information entered in the Grasshopper tool, such as road alignment line and utility width, the direction and location of the defined profiles and components are controlled. In this work, a lot of tools for adjusting have been created so that all components are in the correct location and position.

In addition, the aim was to create the tool usable for anyone planning or modeling a light traffic bridge in accordance. The starting information can be transformed through automatic functions built in the tool. For example, the length of the bridge is determined every one meter and utility widths vary from 3, 4, 4.5, 5 to 6 meters. After entering the necessary information in the Grasshopper tool, the model will be moved to the Tekla Structures on the correct coordinates using the road alignment line.

The Thesis defines the typical light traffic steel beam bridge listing the HEB-steel profiles used. The calculations are made by Hannes Kummala's Excel calculation based on Eurocodes and the Finnish Transport instructions. Using the calculation base requires the user to understand the static dimensioning of the structures competently. The calculation base is listed for each defined profile of utilization rates for fluttering resistance, torque endurance for cutting and deflection.

As a result of this Thesis a functioning, the automatized tool was created to hasten the planning phase. The tool will be developed for other bridge types or comparable constructions.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tietomallintaminen infrasuunnittelussa	2
2.1	Tietomallipohjaisen siltsuunnitteluhankkeen kulku.....	2
2.2	Inframallintamisen vaatimukset sillan suunnitteluvaiheissa	3
2.2.1	Esisuunnitteluvaihe.....	4
2.2.2	Yleissuunnitteluvaihe.....	4
2.2.3	Siltsuunnitteluvaihe	5
2.2.4	Rakentamissuunnitteluvaihe.....	5
3	Mallinnusohjelmistot	6
3.1	Rhino ja Grasshopper	6
3.2	Tekla Structures	6
4	Puukantinen teräspalkkisilta.....	7
4.1	Mallintamisen aloitus	7
4.2	Puukansisto.....	9
4.3	Valssatut profiilit	11
4.4	Hitsatut profiilit.....	13
4.5	Kaiteet	17
4.6	Grasshopperyhteenvedo	20
5	Grasshopper-työkalun vieminen Tekla Structures-ohjelmistoon	21
6	Rakenteiden staattinen mitoitus	27
6.1	Käytettävät mitoitusohjeet.....	27
6.2	Suunnitteluormat NCCI 1 mukaan.....	27
6.2.1	Liikennekuormat.....	29
6.2.2	Tuulikuorma	30
6.3	Staattiset mallit	31
6.4	Pääpalkkien murtorajatilanmitoitus.....	32
6.4.1	Momenttikestävyys	32
6.4.2	Leikkauslommahduskestävyys.....	33
6.4.3	Leikkauskestävyys.....	33
6.4.4	Kiepahduskestävyys.....	35

6.5	Palkin käyttörajanmääritys.....	39
7	Yhteenveto ja pohdinta	40
	Lähteet	41
	Liitteet	

Erityissanasto

Rhino = Rhinoceros 7

3D-pintamallinnusohjelma

Grasshopper

Rhinon lisäosa, visuaalinen koodausohjelma

Tekla Structures

Tietomallinnusohjelma

Mallinnus

Prosessi, jossa luodaan kolmiulotteinen tietomalli

IFC

Industry Foundation Classes. Standardi tietomallien kuvaukseen sekä siirtoon eri ohjelmistojen välillä

TSV

Väylän tasausviiva

HL

Hyötyleveys, sillan kaiteiden välinen mitta

1 Johdanto

Opinnäytetyön aiheena ollut yksiaukkoinen puukantinen kevyen liikenteen tyyppisilta jakaantuu kahteen selkeään osaan: Grasshopper-tietomallinnustyökaluun ja rakenteiden staattiseen mitoitukseen. Toimeksiannon on antanut Ramboll Finland Oy ja työn pohjana toimii Hannes Kummalan (DI) laatima diplomityö Ramboll Finland Oy:lle. Toimeksiannon ohjaajana toimii Raimo Karhumaa (DI) sekä lisäksi mallinnuksen ohjaajana Insinööri Joni Mikkonen.

Grasshopper-ohjelmisto on monipuolinen Rhinon valmistama visuaalinen 3D-ohjelmointi alusta, jolla voidaan luoda erilaisia kokonaisuuksia tai rakenteiden osia joko pelkästään Rhinon sisällä tai tarvittaessa ohjelmistolla luodaan tietomalli tai rakenneosia muun muassa Tekla Structures-ohjelmaan. Työkalu toimii siten, että Grasshopperiin syötetään lähtötiedot eli sillan jännemitat ja hyödyllinen leveys. Tässä työssä on pyritty luomaan toimiva työkalu, jolla saadaan nopeutettua tyyppillisen puukantisen sillan mallintamista Tekla Structures-ohjelmistolla.

Rakenteiden staattinen mitoitus tehdään Väyläviraston laatimien eurokoodien sovellusohjeiden mukaisesti. Mitoituksessa tulee huomioida kantavien rakenteiden käyttörajatilassa sekä murto-rajatilassa tehtävä mitoitus. Murto-rajatilan mitoituksella tarkoitetaan sitä, etteivät sillan kantavat rakenteet menetä stabiiliteettiaan taikka murru sen elinkaaren aikana esiintyvien kuormitustilanteiden vuoksi. Käyttörajatilassa tehtävä mitoitus tehdään mm. rakenteen taipumalle sekä värähtelylle. Tässä työssä rakennetta mitoitetaan vain taipuman suhteen. Lisäksi on huomioitava käytettävät materiaalit, joka tässä tapauksessa on HEB-teräspalkisto. Usein siltarakenteissa käytetään myös hitsattavia profiileja, joka on huomioitu Grasshopper-työkalussa. Mitoitus tehdään yleisimmille jännemitoille ja leveyksille, jotka taulukoidaan, jolloin rakenteiden suunnittelutyö nopeutuu. Mitoituksissa käytetään Hannes Kummalan Diplomityönä luodulla Excel-laskentapohjalla. Tuloksena syntyy työkalu, jolla luodaan kustannustehokkaasti sillan tietomalli ja rakenteiden mitoitus yksinkertaistuu, kun pääasialliset mitoitukset ovat listattuna valmiiksi.

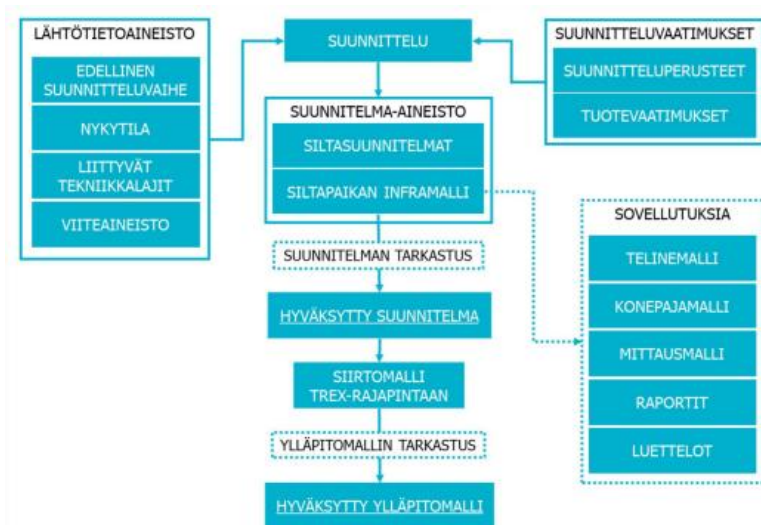
Opinnäytetyö ohella on suoritettu Poikkialainen työelämäprojekti -opintojakso, jossa on tutustuttu tyyppisiin puurakenteisiin siltoihin ja niiden määrään Suomessa. Lisäksi kyseisessä työssä on tutkittu puun pintakäsittelytekniikoita, joita voidaan käyttää taitorakenteissa. Kyseisellä työllä on saatu tietoa mm. yksityisteiden siltojen määrästä ja niissä käytetyistä materiaaleista ajatellen opinnäytetyön aiheena ollutta automatisoitua Rhinon Grasshopper-työkalua.

2 Tietomallintaminen infrasuunnittelussa

Tietomallintamista käytetään ja hyödynnetään yhä enemmän infrahankkeiden lähtötietojen esittämiseen, suunnitteluun ja toteutukseen. Tietomallintaminen luo muun muassa mahdollisuuden hyödyntää hankkeilla luotuja tietoja merkittävästi ylläpitoprosessissa. Tiedonhallinnan ja nimikkeistön yhtenäistymisen myötä suunnitelmatieto inframalleista on mahdollista muuntaa konekuvattavaksi versioiksi ja varastoida tietokantaisesti. Yhdenmukaisella lopputuloksella mahdollistetaan hankkeissa luotujen tietosisältöjen tehokkaampi hyödyntäminen rakenteiden myöhemmissä elinkaaren vaiheissa. Uudiskohteiden tietomallipohjainen suunnittelutapa on vakiintunut infrasuunnittelussa, ja mallikäytännöt mahdollistavat tietomallien tehokkaamman jatkokäytön. Infralalle ei ole vielä muodostunut vakiintuneita nimeämiskäytäntöjä, mikä on hidastanut tietomallien jatkokäytön kehittymistä. Siltojen inframalliohje yhtenäistää edellä mainittuja käytäntöjä ja pyrkii täten edistämään tietomallien hyödyntämistä. [1.]

2.1 Tietomallipohjaisen siltsuunnitteluhankkeen kulku

Sillan inframallilla tarkoitetaan sillan suunnittelussa tuotettua tietomallia, joka sisältää vaaditun suunnitelmatiedon kussakin suunnitteluvaiheessa. Siltaapaikan inframalli muodostuu lähtöaineistosta ja hankkeen vaatimusten mukaan tuotetuista, siltaapaikkaan liittyvistä inframalleista. Kuva 1 kuvataan tietomallipohjaisen siltsuunnitteluhankkeen kulkua.



Kuva 1 Tietomallipohjaisen siltsuunnitteluhankkeen kulku [1, kuva 2]

Siirtomallin laatiminen ja sen tallentaminen Väyläviraston Taitorakennerekisteriin koskee ainoastaan rakentamissuunnitteluvaihetta. Taitorakennerekisteriin kootaan kaikki rakenteet, jotka ovat taitorakenteita. [1.]

2.2 Inframallintamisen vaatimukset sillan suunnitteluvaiheissa

Eri suunnitteluvaiheille on annettu omat vaatimukset mallipohjaiseen suunnitteluun ja näitä vaatimuksia sovelletaan kaikkien taitorakenteiden mallintamiseen. Lähtökohtana on aina siltoja suunniteltaessa, että ne tehdään mallipohjaisesti.

Mallintaessa siltapaikkoja niistä tehdään aina yhdistelmämallit, jolla nähdään laajempi kokonaiskuva perusteista erilaisille suunnitteluratkaisuille. Yhdistelmämallin laajuuden minimivaatimuksena on aina siltapaikan laajuus. Yhdistelmämallissa siltapaikan laajuus määritellään siltapaikkaluokan mukaan. Sellaisissa hankkeissa, joissa silta on osa laajempaa kokonaisuutta, voidaan se esittää muiden mallien osana. Yhdistelmämallissa on eroja ja ne on eroteltu kuvassa 2.

YHDISTELMÄMALLIT		
<p>YHDISTELMÄMALLI</p> <p>Yhdistelmämalli sisältää hankkeen kaikki osamallit yhdistettynä.</p> <p>Yhdistelmämalli tehdään hankkeen laajuudelta.</p> <p>Yhdistelmämallia käytetään suuremmissa hankkeissa, joissa silta on osa laajempaa rakennettavaa kokonaisuutta. Näissä hankkeissa yhdistelmämallilla voidaan korvata sillan yhdistelmämalli.</p> <p>Formaatti: Useita eri formaatteja</p>	<p>SILLAN INFRAMALLI</p> <p>Sillan inframalli sisältää siltapaikan kaikki osamallit yhdistettynä.</p> <p>Sillan inframalli tehdään siltapaikan laajuudelta.</p> <p>Käytännössä sillan inframalli voi olla sama kuin sillan yhdistelmämalli.</p> <p>Formaatti: Useita eri formaatteja</p>	<p>SILLAN SIIRTOMALLI</p> <p>Sillan siirtomalli sisältää Taitorakennerekisterissä määritetyt siltapaikan rakenteet ja ympäristön yhdistettynä.</p> <p>Sillan siirtomalli tehdään siltapaikan laajuudelta.</p> <p>Käytännössä sillan siirtomalli voi olla sama kuin sillan inframalli.</p> <p>Formaatti: IFC</p>

Kuva 2 Yhdistelmämallien erot [1, kuva 10]

Eri rakenneosien, kuten vaikkapa kansiston tai päällysrakenteen nimeämien, tulee olla kaikissa suunnitteluvaiheissa mukana ja niiden tulee olla Taitorakennerekisterin mukaisia. Tiedot mallien sisältövaatimuksista löytyvät Väyläviraston Siltojen inframalliohjeen 41/2022 Liitteestä 1. Mallien

kaikki mahdolliset tietosisällöt tulee olla selkeästi eroteltu mallin sisällä omiksi kokonaisuuksikseen ja osilta tulee lisäksi löytyä IFC-formaatin mukaiset yksilöivät rakenneosatunnukset. [1.]

2.2.1 Esisuunnitteluvaihe

Tässä suunnitteluvaiheessa laaditaan vähintään maastomalli, väylän pintamalli, sillan pintamalli ja yhdistelmämalli. Mallien käyttötarkoituksena on sovittaa suunniteltava silta ympäristöön ja olemassa oleviin rakenteisiin. Esisuunnitteluvaiheen mallintamisen tarkkuus vastaa luonnostelua eikä mallissa olevien objektien tilavuustietoja ole vaadittu. Toisin sanoen riittävänä tarkkuutena pidetään näkyvien pintojen mallintamista, mutta mallista tulee löytyä hanke-, kohde- ja suunnittelijatiedot. Immateriaalitietoina mallinnetaan tukilinjat, hyödyllinen leveys ja aukko vaatimukset. [1.]

2.2.2 Yleissuunnitteluvaihe

Yleissuunnitteluvaiheessa sillasta tehdään mallipohjainen tarkastelu olemassa oleviin rakenteisiin, ympäristöön sekä muiden tekniikkalajien suunnitelmiin. Riittävä mallintamisen tarkkuus yleissuunnitteluvaiheessa on näkyvien pintojen esittäminen ja mallin objektien tilavuustietoja ei vaadita. Vastaavasti kuin esisuunnitteluvaiheessa tässäkin vaiheessa laaditaan vähintään maastomalli, väylän pintamalli, sillan pintamalli ja yhdistelmämalli. Mallien käyttötarkoitus on sovittaa erityyppiset siltaratkaisut ympäristöön ja olemassa oleviin rakenteisiin.

Yleissuunnittelussa tutkitaan esisuunnittelun tai alustavien siltasuunnittelun lähtötietojen pohjalta siltapaikalle sopivia vaihtoehtoja ja laaditaan vaihtoehtoiset luonnokset esittelyä varten. Tavoitteena on esimerkiksi laatia merkittävistä siltakohteista vaihtoehtoja ja selvittää sillan rakentamisen vaihtoehtojen vaikutusta ympäristöön. Immateriaalitietoina mallinnetaan liikennetekniset mitat, aukko vaatimukset, väylien mittalinjat, tukilinjat ja pääpisteet. [1.]

2.2.3 Siltasuunnitteluvaihe

Siltasuunnittelussa mallinnetaan kaikki hankkeen sillat vaatimusten mukaisesti. Näkyvien rakenteiden lisäksi myös alusrakenteet ja kaikilta mallin rakenneosilta tai objekteilta vaaditaan tilavuustiedot ja immateriaalitietoina mallinnetaan liikennetekniset mitat, aukkovaatimukset, väylien mittalinjat, tukilinjat ja pääpisteet. Lisäksi mallinnetaan merkittävimmät varusteet ja lisätään attribuuttitietona maalaus- ja suojaus tietoja rakenneosille. [1.]

Siltasuunnitelman laatiminen väylähankkeen tie-, rata- tai katusuunnitelman laatimiseen ja vesistösiltojen vesilain mukaiseen käsittelyyn liittyvä suunnitteluvaihe. Sillan rakentamiselle haetaan tässä vaiheessa tarvittavat luvat, jolloin suunnittelun tässä vaiheessa luodaan pääpiirustus, jossa esitetään sillan ulkonäkö, rakenteet ja päämitat sekä sovittaminen ympäristöön ja tie-, katu- tai ratasuunnitelmaan. Sillan tietomallin sisältövaatimukset noudattavat perinteisen pääpiirustuksen sisältövaatimuksia. [1.]

Tässä suunnitteluvaiheessa laaditaan vähintään nykytila-aineistomalli, edellisen suunnitteluvaiheen mallit, liittyvien tekniikkalajien mallit, sillan inframallit ja yhdistelmämalli. Mallien käyttötarkoituksena on sillan sovittaminen ympäristöön ja olemassa oleviin rakenteisiin, määrä- ja kustannuslaskenta, väylähankkeen lupaprosessin läpivienti. [1.]

2.2.4 Rakentamissuunnitteluvaihe

Rakentamissuunnitteluvaihe on kaikkein kattavin ja silta mallinnetaan mittatarkasti kokonaisuudessaan vaatimusten mukaisesti inframallina. Rakentamissuunnitteluvaiheessa tilaajalle laaditaan sillan inframalli ja siirtomalli. Hankkeesta ja hankkeenmuodosta riippuen voi näiden mallien lisäksi olla tarvetta toteutusta varten luoda myös muita malleja, kuten konepajamalli, raudoitemalli ja mittausmalli. [1.]

Rakentamissuunnitteluvaiheessa laaditaan vähintään nykytila-aineistomalli, edellisen suunnitteluvaiheen mallit, sillan inframalli, sillan siirtomalli ja yhdistelmämalli. Käyttötarkoituksena näillä malleilla on sillan sovittaminen ympäristöön ja olemassa oleviin rakenteisiin, määrä- ja kustannuslaskenta, ylläpitomallin perustaminen Taitorakennerekisteriin ja sillan toteutus vaatimusten mukaisesti. Jokaisesta mallinnetusta sillasta laaditaan Siltojen Inframalliohjeen liitteen 3 mukaiset tietomalliselostukset. Mikäli siltapaikalla on useampi kuin yksi silta, tulee sillat erotella selostukseen tai jokaisesta tehdään oma selostuksensa. [1.]

3 Mallinnusohjelmistot

3.1 Rhino ja Grasshopper

Rhino on amerikkalainen 3D-mallintamisen ja visualisoinnin ohjelma, jolla voidaan luoda sekä mallintaa hyvinkin monimutkaisia muotoja. Ohjelma on helppokäyttöinen ja se tukee useita eri ohjelmien tiedostomuotoja. esim. dwg. Rhinoon on sisään integroituna Grasshopper-niminen graafisesti toimiva ohjelmointialusta, johon voidaan luoda erilaisia algoritmeja ja näillä algoritmeilla saadaan luotua erilaisia malleja. Grasshopper-algoritmeissa on selkeitä etuja esimerkiksi, jos suunniteltava rakenne muuttuu kesken suunnittelun, niin saadaan algoritmia muuttamalla hyvin nopeasti päivitettyä suunnitelma ajan tasalle. [2] [3]

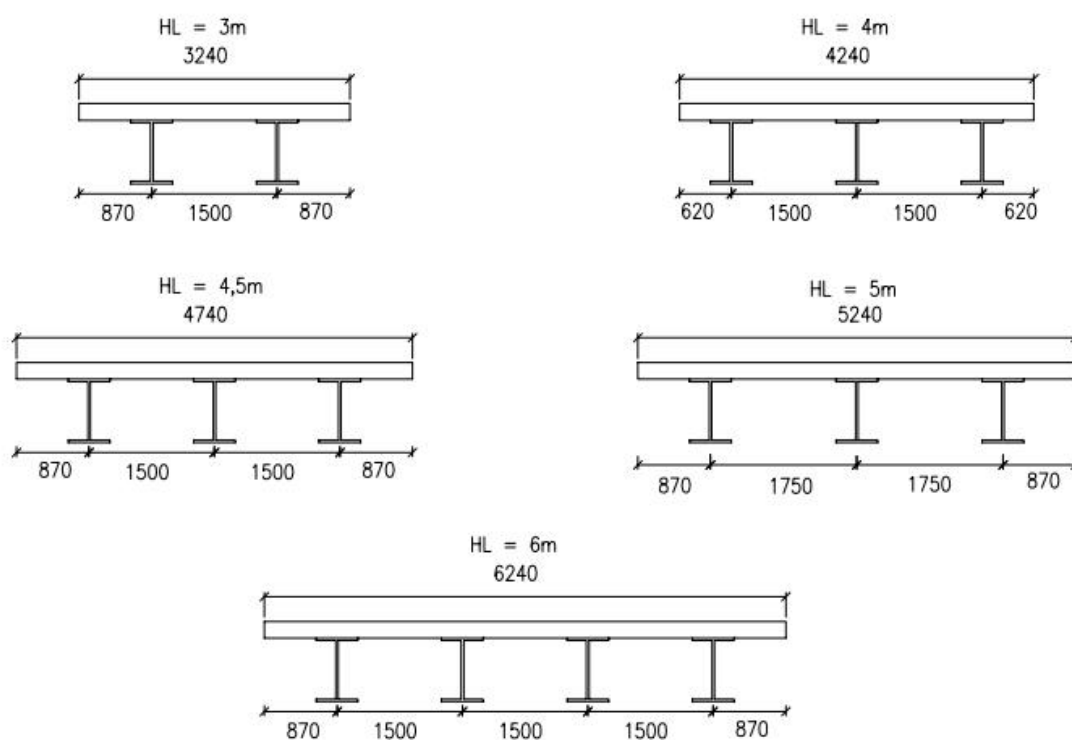
3.2 Tekla Structures

Tekla Structures on rakennesuunnitteluohjelmisto, jolla rakennetaan IFC-standardin mukaisia tietomalleja. Teklassa voidaan luoda, yhdistää, hallita ja jakaa kattaviakin tietomalleja ja tällä mahdollistetaan kaikkien materiaalien ja rakenneosien käyttö. Teklasta tallennetaan tietomallit IFC-formaattiin, jotta hankkeessa olevat kaikki projektin osapuolet pääsevät tietomalliin käsiksi. Tekla Structuresilla voidaan jakaa myös tiedot suoraan mallin mallintajien ja projektin osapuolten kesken Tekla model sharing-työkalulla. [4]

Teklasta voidaan tulostaa kaikki vaadittavat piirustukset ja suunnitelmat ja kun ne perustuvat tietomalliin on mahdollisuus virheisiin huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi 2D-maailman ohjelmistoissa. Esimerkiksi Autocad ohjelmistossa oikeaan koordinaatistoon viemisessä voi tulla helpposti virhe, kun taas Tekla Structures-ohjelmistossa koordinaatisto pysyy sille määritellyllä paikalla koko ajan. [4]

4 Puukantinen teräspalkkisilta

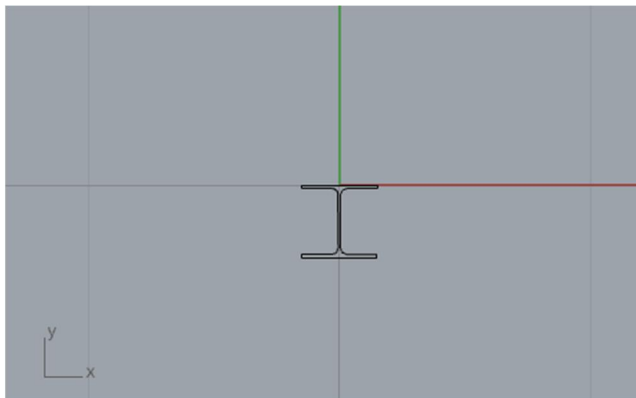
Palkkisillat yleisesti ottaen ovat Suomessa eniten käytetty siltarakenne kevyenliikenteen väylillä. Kantava rakenne muodostuu sillan pituussuunnan palkeista (teräs- tai liimapuu) joiden päälle sillan kansirakenne rakennetaan. Kevyenliikenteen silloissa jänneväli vaihtelee 3–30 m riippuen kantavasta rakenteesta. Tässä työssä sillan jännemitta vaihtelee 6,0–24,0 m ja sillan kokonaisleveys on huomioitu välillä 3,24–6,24 m. Tällöin sillan hyötyleveys eli kaiteiden välinen osuus vaihtelee välillä 3,0–6,0 m. Poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3 Sillan poikkileikkaukset

4.1 Mallintamisen aloitus

Rhino-ohjelmaan luotiin alussa oma kirjasto käytettäville HEB-profiileille. Profiilien määrittäminen luotiin Rhino-ohjelmiston koordinaatistoon XY-akselistossa antamalla yksitellen kunkin profiilin nurkkapisteet ja yhdistämällä pisteet luodaan profiilin muoto. Kuvassa 4 on esimerkki luodusta profiilista.



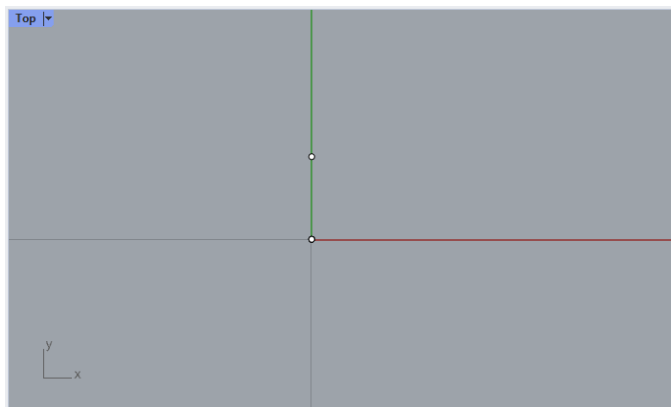
Kuva 4 Esimerkki Rhinoon luodusta profiilista XY tasossa. Kuvassa HEB300.

HEB-profiilit määräytyvät sillalle määriteltyjen kuormitusten perusteella, ja taulukko lasketuista HEB-profiileista löytyy liitteestä 1. Kuvassa 4 näkyy koko Rhino-ohjelmistoon luotu profiilikirjasto. HEA-profiilit on luotu työkalun mahdollista myöhempää käyttöä varten valmiiksi.

Layer	On	Material	Linetype	Print Width
HEA100			Continuous	Default
HEA120			Continuous	Default
HEA140			Continuous	Default
HEA160			Continuous	Default
HEA180			Continuous	Default
HEA200			Continuous	Default
HEA220			Continuous	Default
HEA240			Continuous	Default
HEA260			Continuous	Default
HEA280			Continuous	Default
HEB280			Continuous	Default
HEA320			Continuous	Default
HEA300			Continuous	Default
HEB300	✓		Continuous	Default
HEB320			Continuous	Default
HEB340			Continuous	Default
HEB360			Continuous	Default
HEB400			Continuous	Default
HEB450			Continuous	Default
HEB500			Continuous	Default
HEB550			Continuous	Default
HEB600			Continuous	Default
HEB650			Continuous	Default
HEB700			Continuous	Default
HEB800			Continuous	Default
HEB900			Continuous	Default
HEB1000			Continuous	Default

Kuva 5 Kaappaus Rhinoon luodusta profiilikirjastosta.

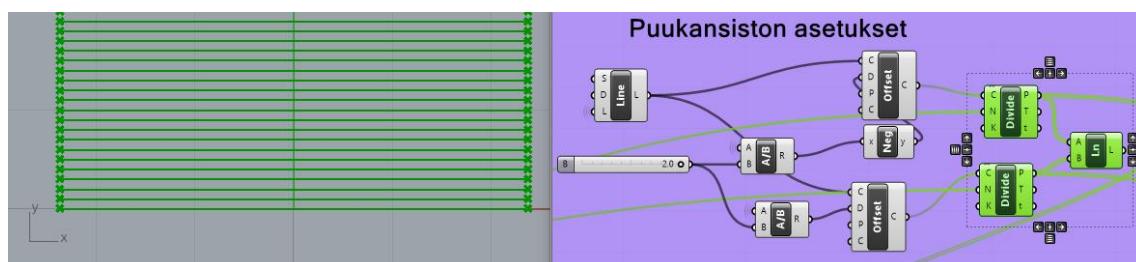
Mallintaminen aloitettiin luomalla Rhinon omaan koordinaatistoon pisteet, joiden mukaan tarvittavat jännemitat, hyötyleveys ja kokonaisleveys määritellään Grasshopper-työkalussa. Tässä tapauksessa järkevimmäksi katsottiin aloittaa nolla pisteestä eli origosta ks. kuva 6. Koordinaatisto saadaan myöhemmässä vaiheessa käännettyä sillan todellisiin koordinaatteihin Tekla Structures ohjelmaan vietäessä.



Kuva 6 Luodut pisteet sijaitsevat ns. nolla tasossa. Huomaa koordinaatiston asento. Pisteillä ohjataan suuntaa tulevan sillan TSV-linjalle ja jännemitalle.

4.2 Puukansisto

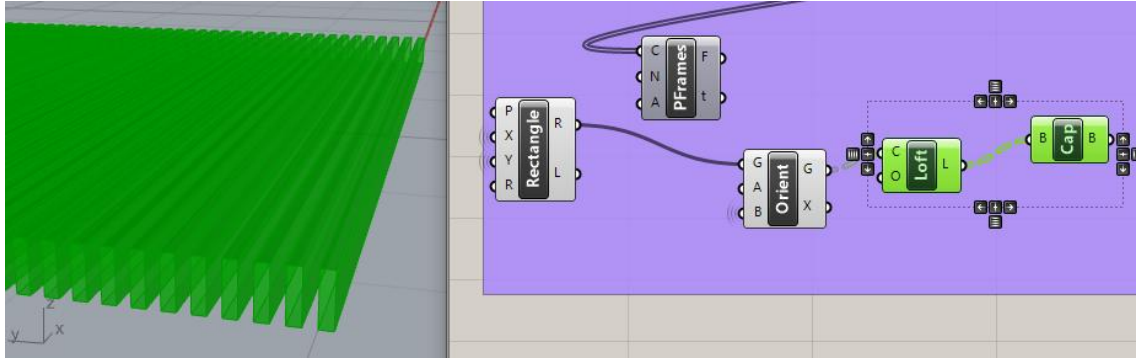
Grasshopper-työkalulla alettiin työstää puukannelle tarkoitettua työkalua aiemmin mainittujen pisteiden avulla ja LineSDL-komponentilla. Kuvassa 7 LineSDL-komponenttiin annetaan haluttu suunta vektorina tässä tapauksessa y-akselia pitkin. TSV-linjaa siirretään sekä kopioidaan sillan molemmin puolin Offset-komponenteilla ja tätä toimintoa ohjataan sillan hyötyleveydeksi (HL) määritellyillä arvoilla yhdessä matemaattisten komponenttien avulla. Kopioidut linjat jaetaan Divide-komponenteilla pisteisiin ja pisteiden määrä on suoraan riippuvainen kansilankkujen määrästä. Pisteet yhdistetään yksinkertaisemmalla Line-komponentilla, jolloin kullekin kansilankulle on oma linjansa.



Kuva 7 Kuvassa vasemmalla Rhino-ohjelmistossa esikatselukuva yhdistetyistä pisteistä.

Line-komponentilta tuodaan tieto PFrames-komponentille (ks. kuva 8), joka luo kullekin kansilankun linjalle oman framen eli verkon kansilankun profiilia varten. Kansilankuille määritellään oma profiili yksinkertaisella Rectangle-komponentilla antamalla profiilin korkeus- ja leveys tiedot ja ne piirtyvät Rhinoon tässä vaiheessa XY-koordinaatistoon eli tasoon. Näiden komponenttien luomat

tiedot kootaan Orient-komponentilla yhdeksi. Orient-komponentti kääntää määritellyn kansilankun profiilin oikeaan asentoon. Orient-komponentista saatu geometriatieto viedään Loft- ja Cap-komponenttiin. Loft-komponentti kokoaa tiedosta ns. ulkokuoren lankulle ja Cap-komponentti sulkee geometrian päät. Näillä saadaan luotua esikatselu Rhinoon.



Kuva 8 Kuvassa vasemmalla Rhinon 3D-näkymässä esikatselu Loft- ja Cap-komponenteilla.

Kannen lähtötiedot syötetään kuvan 9 mukaisiin paneeleihin. Sillan jännemitta eli pituus toimii Slider eli liukukomponentilla 6 ja 24 m välillä ja HL eli hyötyleveys vetovalikkoon on koottu kaikki hyötyleveydet 3 ja 6 metrin välillä. Paneelit (nimi, materiaali, class ja phase) on liitetty Teklan Attributes-komponenttiin, joka vie tiedot Tekla Structures-ohjelmistoon (ks. kohta 7 Teklaan vieminen).

SILLAN PITUUS [m] (MYÖS TUELLA OLEVA OSUUS)

JÄNNE ON/OFF

HL
4.5

Kansilankun paksuus [m]

Kansilankun leveys [m]

Kansilankujen määrä [kpl]

NIMI

KANSISTON MATERIAALI ESIM. C30

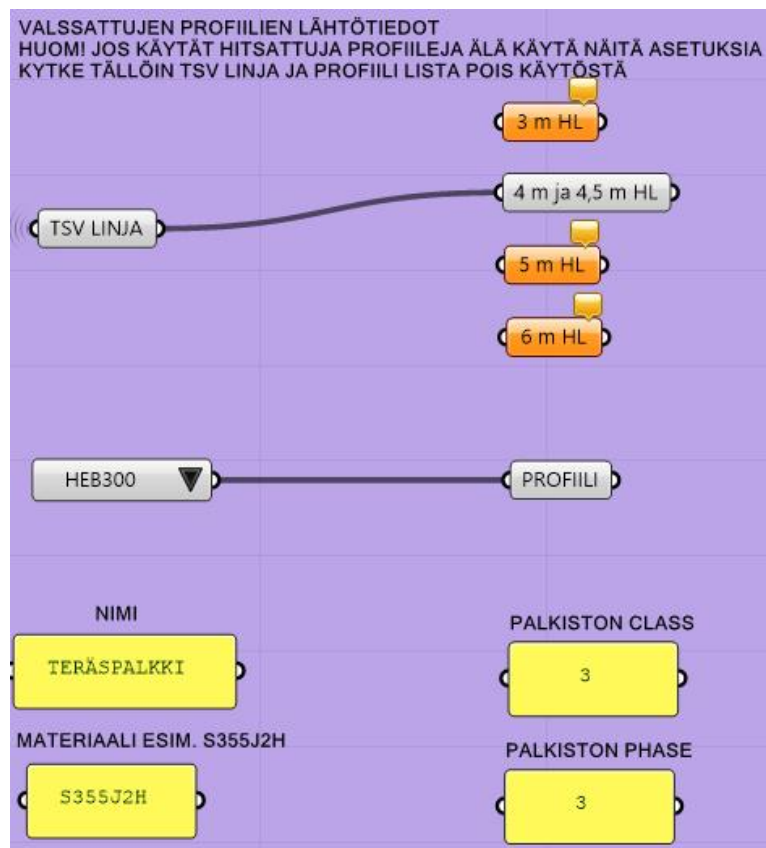
KANSISTON CLASS

KANSISTON PHASE

Kuva 9 Sillan kokonaispituuden, hyötyleveyden ja puukannen lähtötiedot

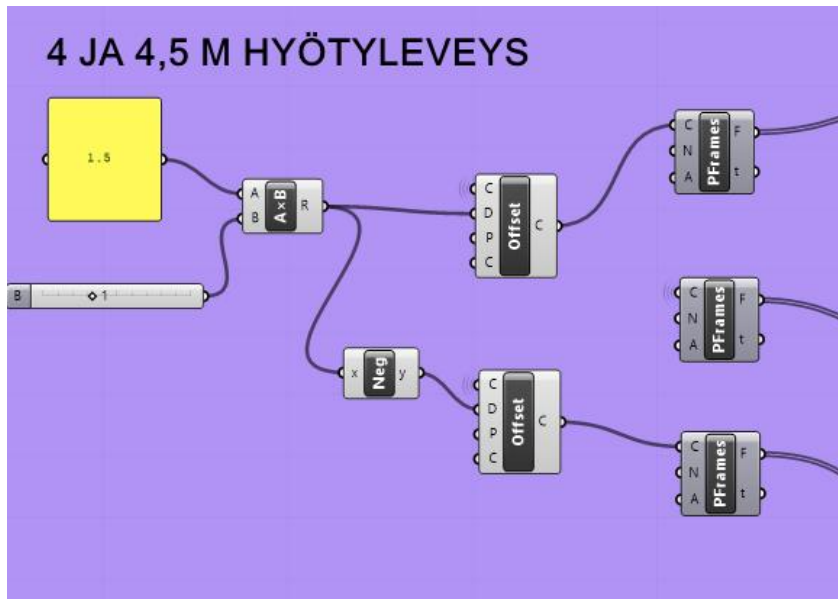
4.3 Valssatut profiilit

Valssatuille profiileille työkalu määritellään kuvassa 10 samoin kuin puukannella seuraamalla TSV-linjaa eli y-akselia ja TSV-linjan tieto tulee samasta LineSDL-komponentista kuin puukannelle on määritetty, jolloin palkkien pituus määräytyy suoraan puukannen lähtötiedoista (ks. kuva 7). Sillan eri poikkileikkaukset vaativat luomaan erilaisia ja mutkikkaampia työkalukokonaisuuksia, koska kantavien palkkien määrä ja niiden toisiensa välinen etäisyys muuttuvat. Tästä syystä työkalukokonaisuuksia on luotu 5 kpl ja ne valitaan alla olevan kuvan mukaisella tavalla hyötyleveyden perusteella Grasshopper-työkalussa.



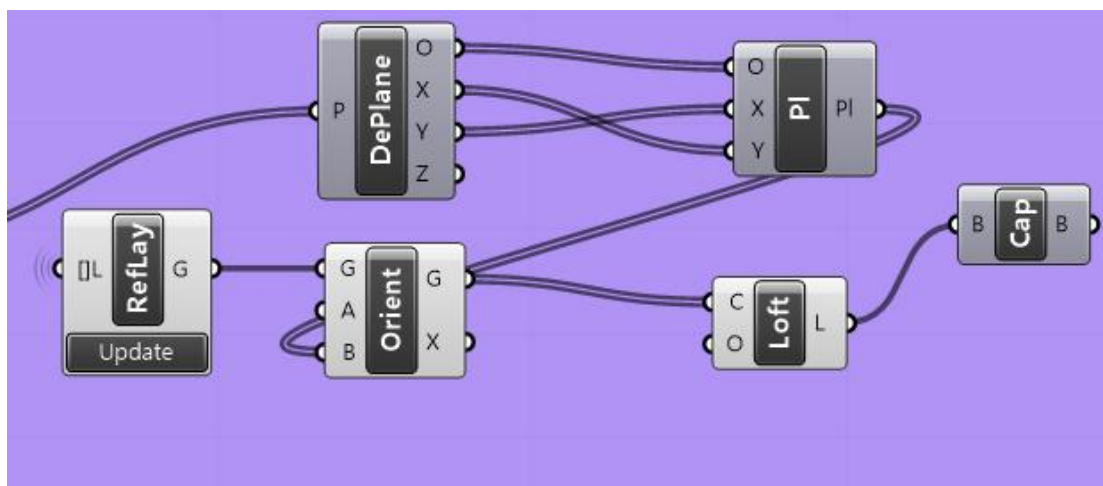
Kuva 10 Valssattujen teräspalkkiprofiilien lähtötiedot.

Kyseisen hyötyleveyden (4 ja 4,5 m) poikkileikkauksessa, yksi teräspalkki on keskellä siltaa ja molemmin puolin siltaa 1,5 metrin päässä TSV:stä on kaksi muuta palkkia. TSV-linjaa kopioidaan vastaavalla tavalla kuin puukannen työkalussa Offset-komponenteilla kuvan 11 mukaisella tavalla.



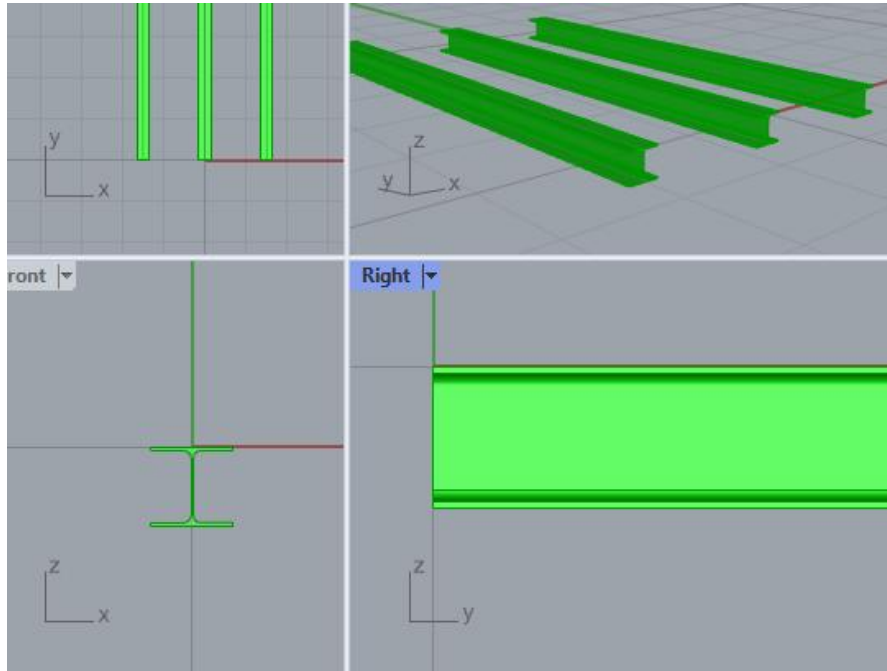
Kuva 11 TSV-linjan kopiointi 1,5 m molemmin puolin. Keskimmäistä palkkia ei siirretä, jolloin TSV-tieto voidaan tuoda suoraan PFrame-komponentille.

PFrame-komponentilta tuodaan koottu data DePlane-komponentille (ks. kuva 12). Tällä komponentilla hajoitetaan työstettävä taso x-, y- ja z-vektoreihin. Pl-komponentilla DePlanen tieto kootaan yhtenäiseksi määriteltyjen x- ja y-vektoreiden perusteella. Näillä kahdella komponentilla voidaan tason xyz-suunnat määrittellä uudelleen tai vaihtaa koordinaatiston akseleiden suuntaa keskenään ennen Orient-komponentille vientiä. Aiemmin mainittu Rhinoon luotu profiilikirjasto toimii geometria tietona ja tieto tuodaan RefLay-komponentilla referenssinä. RefLay-komponentti muuntaa referenssin geometria tiedoksi Grasshopper-työkalussa.



Kuva 12 Yhden teräspalkin komponentteja 4 ja 4,5 metrin hyötyleveydellä.

Vastaavasti kuin puukannen työkalussa, saadaan Orient-, Loft- ja Cap-komponenteilla luotua esikatselu jokaiseen näkymään. Rhinossa voidaan esimerkiksi tarkistaa palkkien välisen etäisyyden olevan oikein ennen Tekla Structures-ohjelmistoon vientiä. Kuvassa 13 esikatselu esimerkki.



Kuva 13 Esikatselu eri koordinaatti akseleilla ja 3D-näkymässä

Työkalukokonaisuudet on luotu jokaiselle poikkileikkaukselle tässä luvussa mainitulla tavalla.

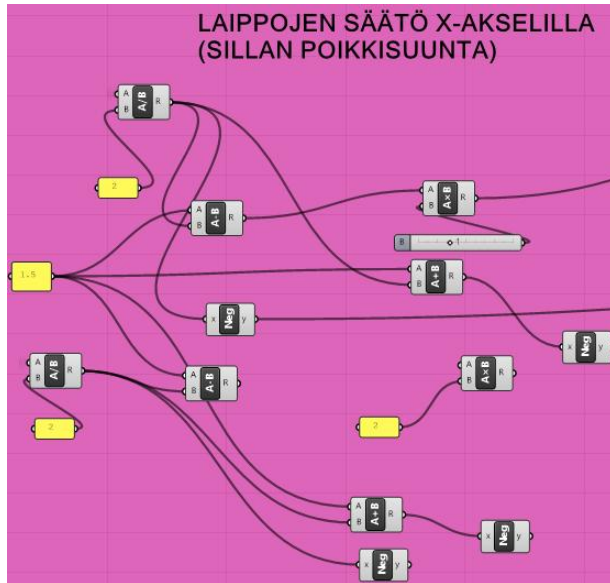
4.4 Hitsatut profiilit

Samoin kuin puukansiston ja valssattujen teräspalkkien työkaluissa on hyödynnetty samaa TSV-linjaa hitsattujen profiilien työkaluissa. Lisäksi hitsatuilla profiileilla on hyödynnetty samoja hyötyleveyksiä kuin valssattujen profiilien työkaluissa. Hitsatuissa profiileissa on kuitenkin huomiotava, että laippojen ja uuman on oltava erillään (ks. kuva 14), jotta esimerkiksi määrälaskenta onnistuu luontevasti myöhemmässä vaiheessa. Tällöin ylä- ja alalaipalle sekä uumalle on luotava omat työkalukokonaisuudet ja profiilit on luotava vastaavalla tavalla kuin puukansiston työkalussa.



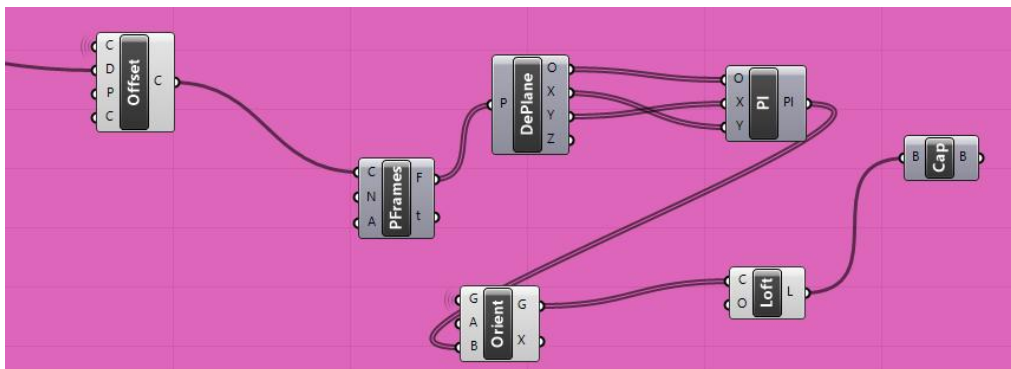
Kuva 14 Hitsattujen profiilien lähtötiedot. Lähtötietoihin syötetään laippojen ja uuman profiilit sekä Teklaan vietävät materiaalitiedot

Laippoja ja uuma täytyy säätää X-akselilla eli sillan poikkisuunnassa, jotta oikeat väliset etäisyydet toteutuvat teräspalkkien välillä. Tässä on hyödynnetty Grasshopper-työkalun matemaattisia komponentteja ennen Offset-komponentille vientiä (ks. kuva 15 ja 16). Säädöissä on täytynyt huomioida profiilien ainevahvuudet, jolloin etäisyydet on määriteltävä hieman tarkemmin kuin on esimerkiksi puukannen työkalu osiossa.



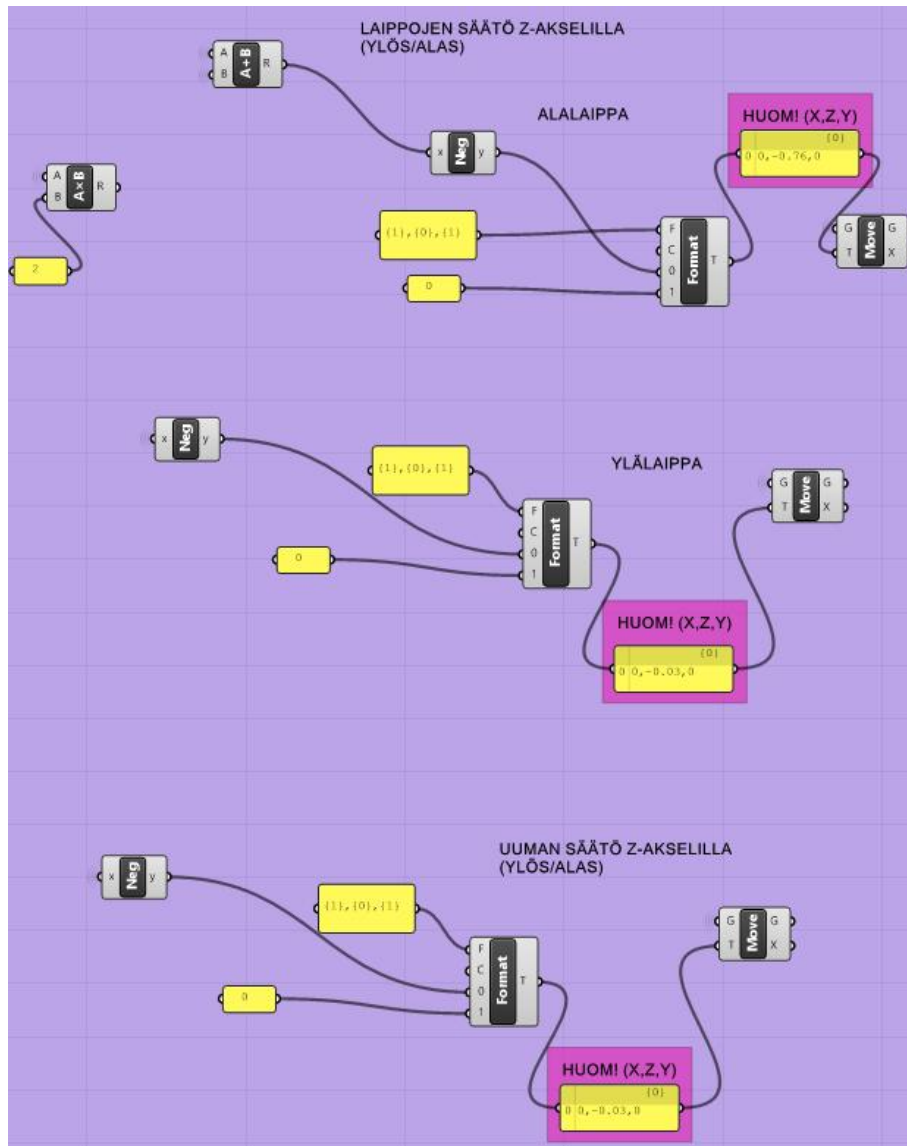
Kuva 15 Laippojen ja uuman säätö sillan poikkisuuntaan. Neg-komponenteilla on muunnettu arvot negatiivisiksi, jolloin ne toimivat x-akselin negatiivisella puolella.

Laippojen ja uuman toiminnot ovat hyvin samanlaiset, mutta niissä täytyy huomioida eri vahvuudet X-akselin suunnassa, jolloin Offset-komponenttiin syötetään eri arvoja.

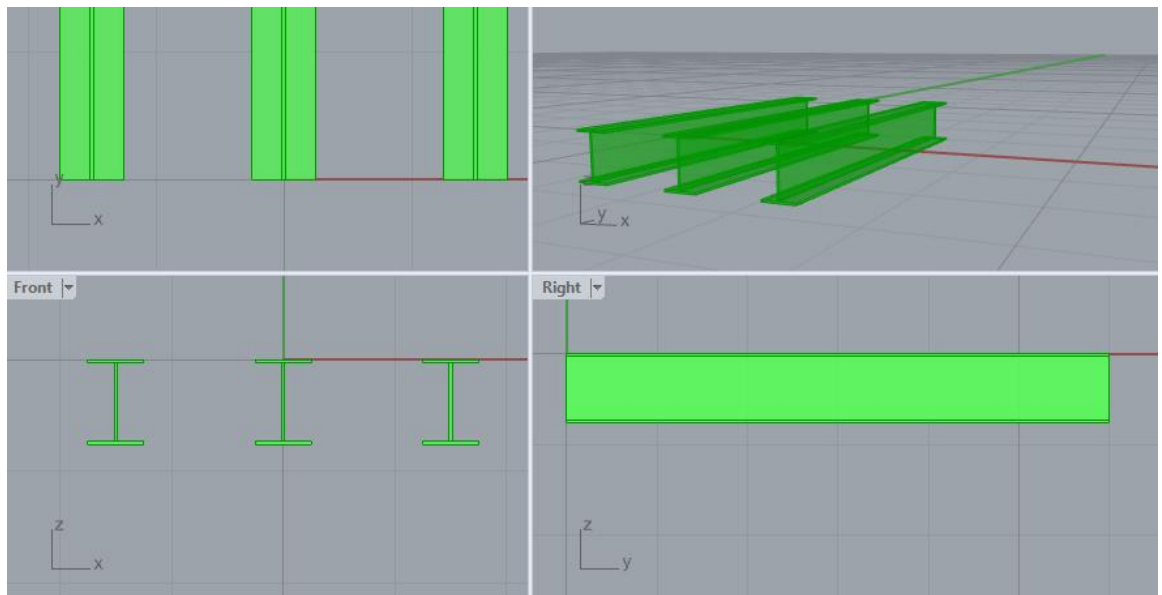


Kuva 16 Yhden laipan komponentteja. Vastaavia komponentti jonoja täytyy olla esim. 4 ja 4,5 m hyötyleveydelle yhteensä 6 kpl (ylä- ja alalaippa).

Hitsatuille profiileille tulee huomioida myös ainevahvuudet Z-akselin suhteen. Esimerkiksi jos Lai-
pan paksuus on 30 mm, niin täytyy uumaa pudottaa 30 mm ja alalaippaa uuman korkeuden sekä
laipan paksuuden verran. Lisäksi ylälaipan yläpinta täytyi saada oikealle tasolle, joka on tässä työ-
kalussa alussa syötetty TSV-linja. Näille tulee luoda automatiikka käyttäen hyväksi hitsattujen pro-
fiilien lähtötietoja, ja profiilia muuttaessa siirtyä myös alalaippa ja uuma syötettyjen lähtötietojen
perusteella Z-akselilla (ks. kuva 17).



Kuva 17 Laippojen ja uuman säätö Z-akselilla. Format-komponentti toimii sille annetun käskyn perusteella. Käsky annetaan Panel-komponentin avulla esim. $\{1\},\{0\},\{1\}$, jolloin se antaa koordinaattitiedot.



Kuva 18 Hitsattuprofiili Rhinossa eri koordinaatistoakseleilla ja 3D-näkymässä

4.5 Kaiteet

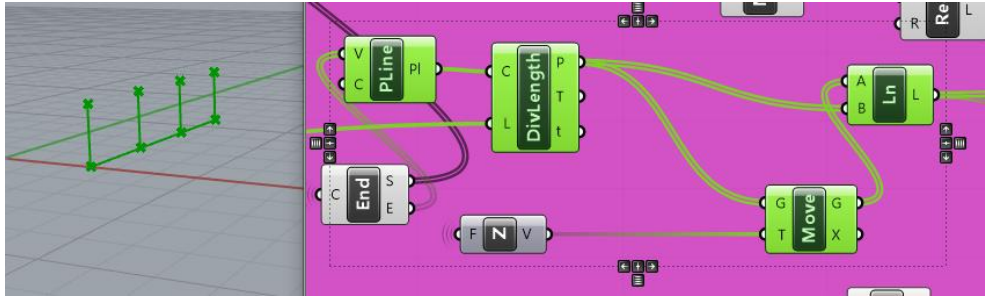
Kaiteiden määrittäminen on tehtävä vastaavalla tavalla kuin puukansisto, mutta profiilien suunnat ovat täysin erisuuntaiset kuin puukannella. Kaidetolpat ovat Rhinon Z-akselin suuntaisia ja johteet Y-akselin suuntaisia, jolloin joudutaan hyödyntämään eri komponentteja. Kuvassa 19 on nähtävillä koko kokonaisuus kaiteiden lähtötiedoista.

Kaiteiden määrittäminen on tehtävä vastaavalla tavalla kuin puukansisto, mutta profiilien suunnat ovat täysin erisuuntaiset kuin puukannella. Kaidetolpat ovat Rhinon Z-akselin suuntaisia ja johteet Y-akselin suuntaisia, jolloin joudutaan hyödyntämään eri komponentteja. Kuvassa 19 on nähtävillä koko kokonaisuus kaiteiden lähtötiedoista.

Kaidetolpan leveys [m] (sillan pituussuunta)	Välijohteen leveys [m]
0.1	0.05
Kaidetolpan leveys [m] (sillan poikkisuunta)	Välijohteen korkeus [m]
0.1	0.2
Kaidetolpan korkeus [m] (Kansilankun alapinnasta)	Välijohteen korkeus [m] kannen yläpinnasta johteen keskelle
1.4	0.5
Kaidetolppien k-jako [m]	Käsijohteen korkeus [m]
2	0.05
Kaidetolppien säätö sillan pituussuuntaan [m]	Käsijohteen leveys [m]
0	0.1
NIMI (K.TOLPAT)	NIMI (V.JOYTEET)
KAIDETOLPPA	VÄLIJOHDE
NIMI (K.JOYTEET)	KAITEIDEN MATERIAALI
KÄSIJOHDE	C30
KAITEIDEN PHASE	KAITEIDEN CLASS
600	32

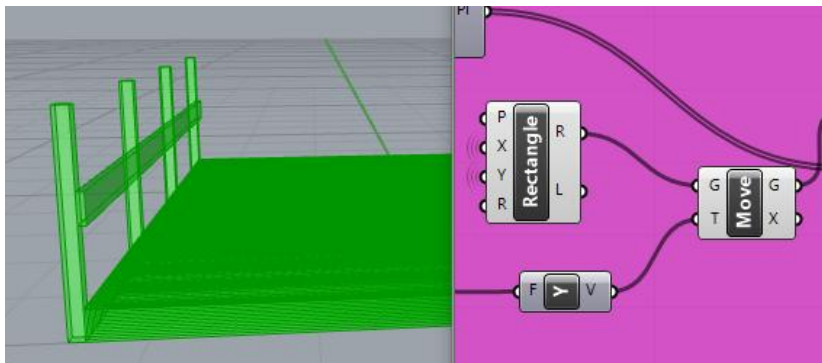
Kuva 19 Kaiteiden lähtötiedot

Kaidetolpille on hyödynnetty puukannelle määriteltyjä linjoja ja End-komponentille on tuotu tieto puukannan Line-komponentilta (ks. kuva 7). End-komponentilla saadaan käyttöön kyseisen linjan päätepisteet uudelleen. PLine-komponentilla muodostetaan yhtenäinen viiva pisteiden välillä sillan pituussuuntaan ja DivLenght-komponentilla jaetaan pisteet niin moneen osaan kuin tarvitaan. Tässä tapauksessa kaidetolppien jako on 2 m, jolloin pisteitä on 4 kpl rivissä. Pisteet kopioidaan Z-akselilla kaidetolppien korkeuden perusteella Move-komponentilla. Pisteet yhdistetään yhdeksi Line-komponentin avulla ja näin saadaan luotua kaidetolpille omat linjat. Kaidetolpille annetaan profiilitiedot vastaavalla tavalla Rectangle-komponentilla kuin puukannelle tai hitsatun teräspalkkiprofiilin laipoille ja uumalle (ks. kuva 20).



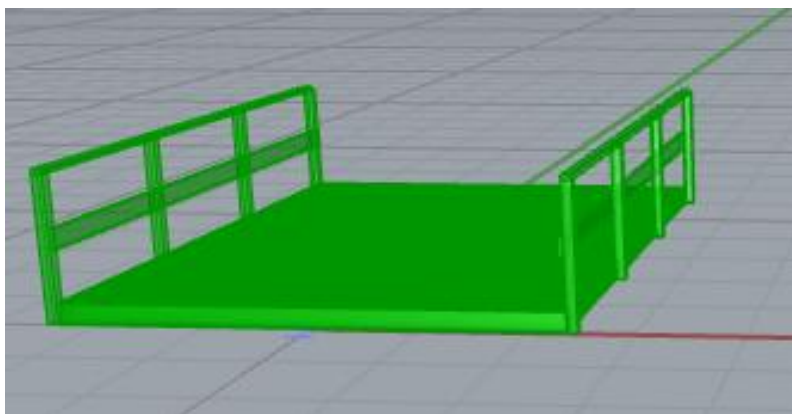
Kuva 20 Kaidetolppien pisteiden määrittäminen.

Välilohteilla on hyödynnetty TSV-linjaa ja puukannelle määritettyjä Offset-komponenttien arvoja. Välilohteelle annettua profiilia eli geometriaa on siirretty Move-komponentilla Z-akselilla, joka tässä tapauksessa on 0,5 m kansirakenteen yläpinnasta (ks. kuva 21).



Kuva 21 Välilohteen määrittäminen Z-akselin suuntaan. Kuvassa Rhinon esikatselussa on päällä kansirakenne, kaidetolpat ja välilohte.

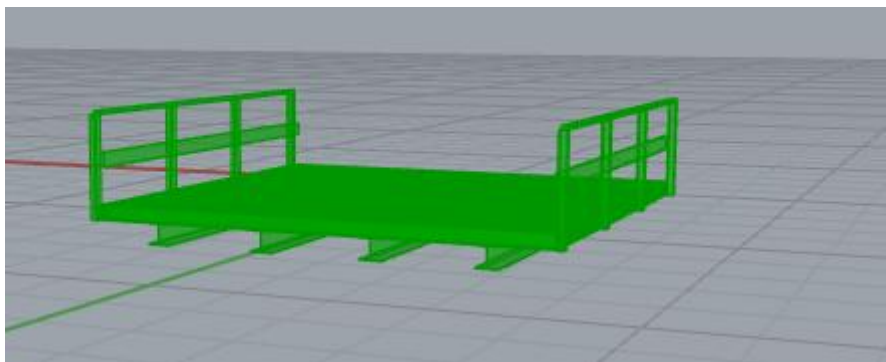
Käsijohteet on luotu samoin kuin välilohte. Käsijohteelle on annettu omat profiilitiedot Rectangle-komponentilla, koska se voi olla hyvinkin poikkeava kaidetolppiin tai välilohteeseen nähden. Kuvassa 22 esikatselu Rhino-ohjelmiston 3D-näkymässä.



Kuva 22 Esikatselu valmiista kansirakenteesta ja kaiteista.

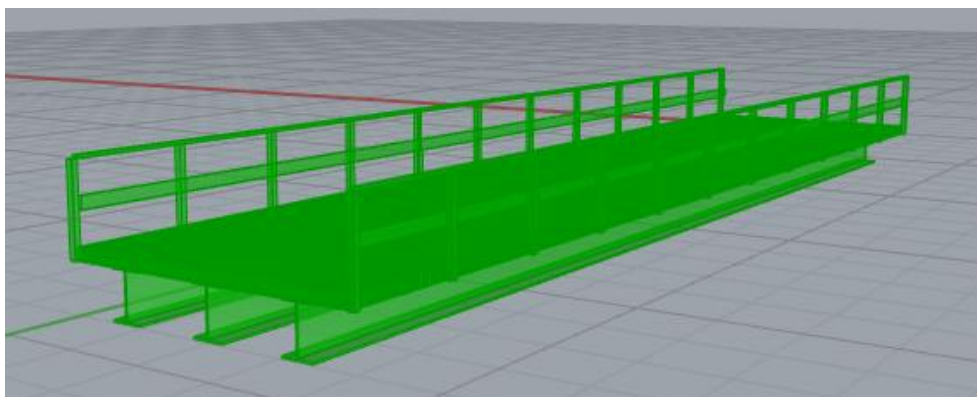
4.6 Grasshopperyhteenveto

Grasshopper työkaluun asetetuilla komponenteilla saadaan luotua haluttu geometria Rhino-ohjelmistoon. Alla olevassa esimerkkikuvassa (kuva 23) kansilankuiksi on valittu 200 x 50 mm profiili, kaidetolppien profiiliksi on valittu 100 x 100 mm, välijohteen 50 x 200 mm ja käsijohteen profiiliksi 100 x 50 mm. Lisäksi Rhinoon luodulla teräspalkistoprofiilikirjastolla saadaan tuotua HEB-palkkien geometria suoraan Grasshopper-puolelle ja XY-koordinaatteja kääntämällä profiili saadaan haluttuun suuntaan. Kuvassa profiili on HEB300. Kaidetolppien profiiliksi on valittu 100 x 100 mm, välijohteen 50 x 200 mm ja käsijohteen profiiliksi 100 x 50 mm.



Kuva 23 Esikatselu koko sillasta. Esikatselussa hyötyleveys 6 m ja sillan pituus 6 m.

Hitsatuille profiileille tuli määritellä geometria tiedot vastaavalla tavalla kuin puisille osille ja huomioida laippojen ja uuman sijaintia sillan poikkisuunnassa, sekä Z-akseliin nähden mm. ainevahvuuksien ja uuman korkeuden mukaan. Hitsatulla profiililla esikatseluun tuotu silta Rhinossa on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 24). Kuvassa teräspalkinprofiili: Laipat 500 x 30 mm, uuma 30 x 700 mm.

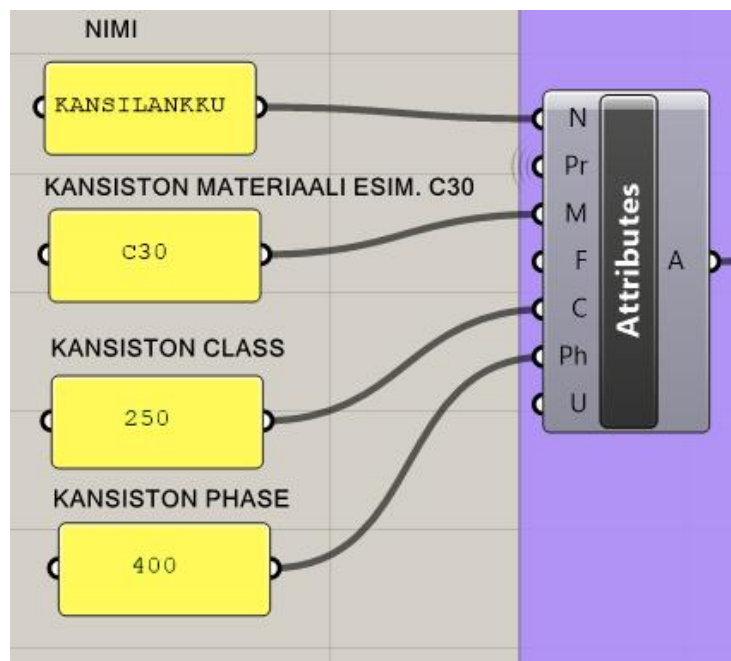


Kuva 24 Esikatselu koko sillasta. Esikatselussa hyötyleveys 4,5 m ja sillan pituus 22 m.

5 Grasshopper-työkalun vieminen Tekla Structures-ohjelmistoon

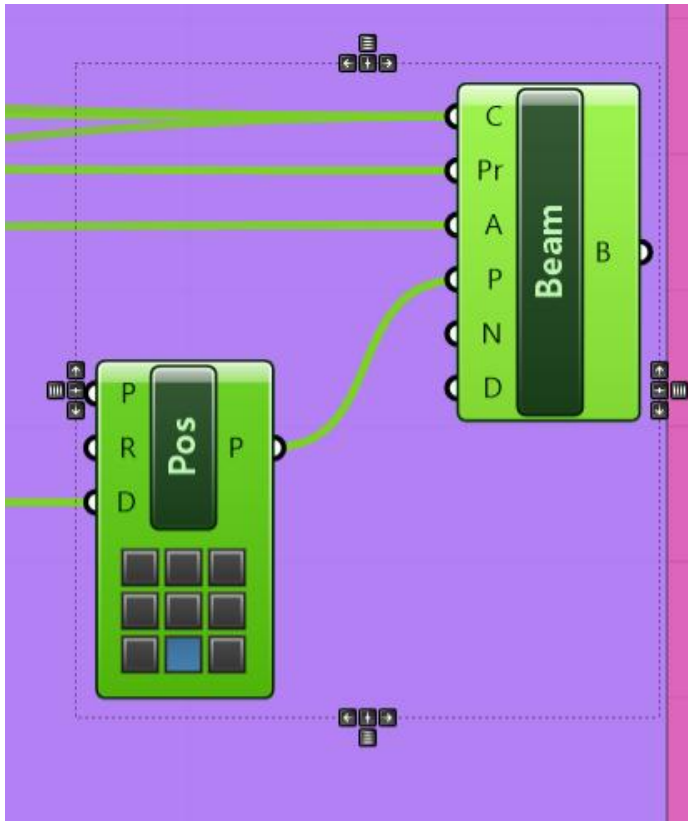
Grasshopper ja Tekla Structures toimivat erillisen lisäosan Tekla Live Linkin avulla. Grasshopperissa tapahtuva algoritminen mallinnus toimii saman aikaisesti myös Tekla Structures-ohjelmassa.

Rhinon Grasshopper työkaluun on sisään rakennettuja Tekla-komponentteja, joilla voidaan koota tarvittavaa tietoa tai dataa, joita Tekla tarvitsee luodessaan Grasshopperin geometriaa. Alla olevassa kuvassa (kuva 25) jo aiemminkin mainittu Attributes-komponentti, johon tuodaan kaikki tarvittavat tiedot. Class- ja Phase-tiedoilla saadaan eroteltua eri materiaalit ja rakenneosat toisistaan ja tätä toimintoa käytetään esimerkiksi piirustuksien luomisessa ja määrälaskennassa.



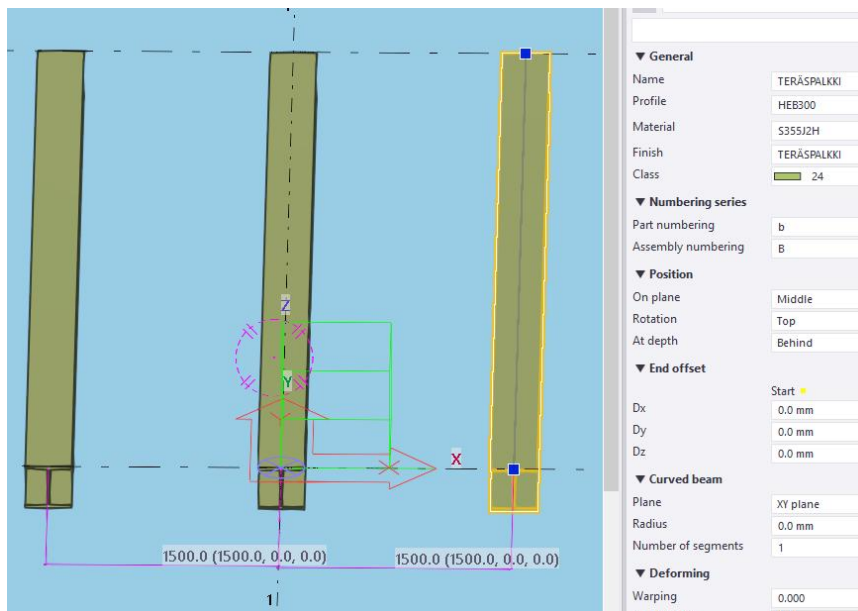
Kuva 25 Puukannen nimi, materiaali, class- ja phase-tiedot viedään Teklan Attributes-komponentille Grasshopper-työkalussa.

Kuvassa 26 näkyy Teklan Beam-komponentti, joka on tarkoitettu teräksisille palkeille. Komponentissa ylimmäiseen napaan C kytketään kaikki tarvittavat linjat, johon teräspalkki luodaan. Tässä tapauksessa on kyse 4,5 metrin hyötyleveydestä, jolloin palkkeja pitäisi olla kolme 1,5 metrin välein. Pr-napaan kytketään käytettävän profiilin tiedot. Napaan A kytketään kuvassa 25 nähty Attributes-komponentti. P-navalla ohjataan Teklaan luodun profiilin sijaintia. Kuvassa 28 on käsitelty hitsattua teräspalkkiprofiilia, jossa asiaa on tarkennettu.



Kuva 26 Teklan Beam- ja Position-komponentit

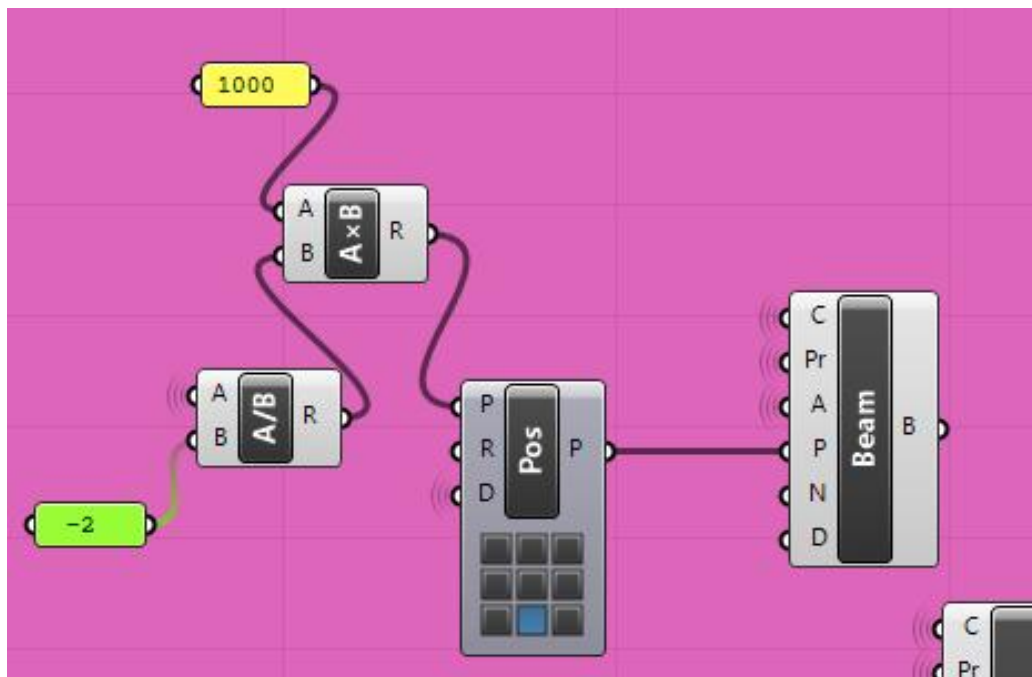
Alla olevassa kuvassa (kuva 27) esimerkki HEB300-palkistosta Teklassa.



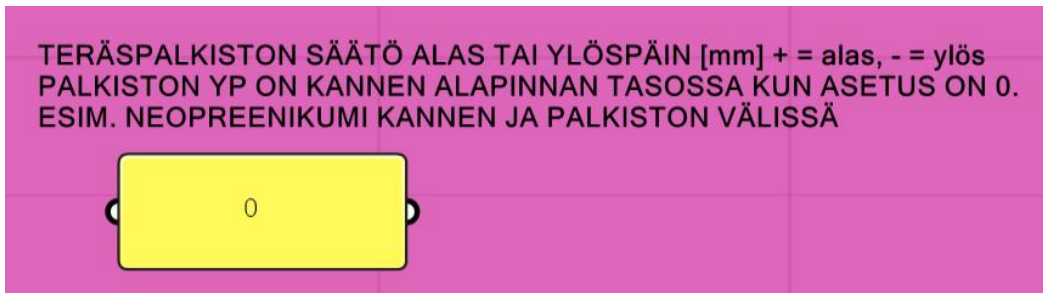
Kuva 27 Esimerkkikuva. Tekla on hakenut kaikki aiemmin mainitut tiedot, kuten nimen ja profiilin Grasshopper-työkalusta.

Hitsattujen profiilien luominen Teklaan ei onnistu suoraan esimerkiksi profiilikirjaston kautta ja tässäkin oli huomioitava muun muassa käytettävän profiilin ainevahvuuksia, jotta teräspalkit ovat varmasti kohdallaan, kun Grasshopper-työkalulla luodaan tietomalli.

Alla olevassa kuvassa (kuva 28) nähdään matemaattisia komponentteja, joilla teräspalkkien tarkka sijoittelu saadaan aikaiseksi. A/B-komponentilla on jaettu laipan leveys -2, jotta laippa liikkuu sillan poikkisuunnassa oikeaan suuntaan ja haluttuun kohtaan. Tästä saatu tulos on kerrottavalla 1000, koska Tekla toimii millimetrimaailmassa ja Grasshopper-työkalu on luotu käyttäen yksikköinä metrejä. Sama koskee myös Teklaan vietäviä profiilitietoja (kuva 30). Tulos vietään Position-komponentin P-napaan, jolla ohjataan tässä tapauksessa sillan poikkisuuntaista liikettä. D-napaan on kytketty syvyysäättö Z-akselin suuntaan (ks. kuva 29). Säätojen ollessa kohdallaan voidaan hitsattava teräspalkisto luoda Tekla Structures-ohjelmaan (ks. kuva 28).

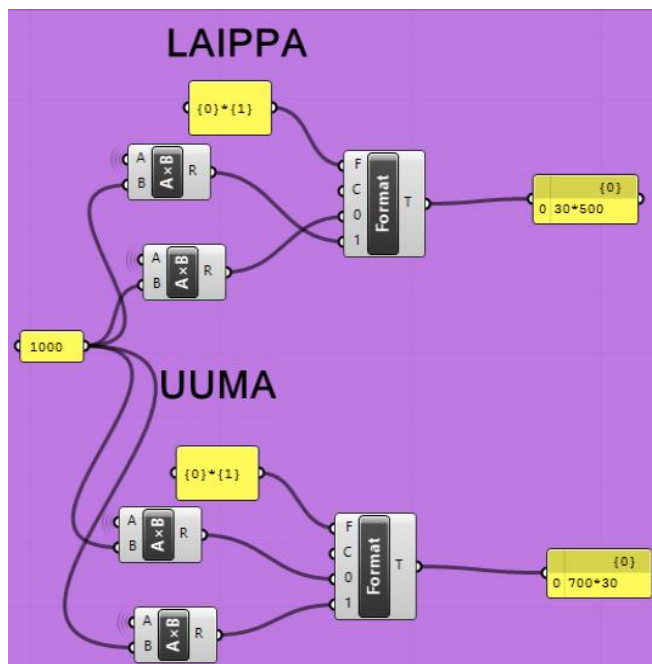


Kuva 28 Hitsatun profiilin ylälaipan säätäminen Tekla Structures ohjelmaan.



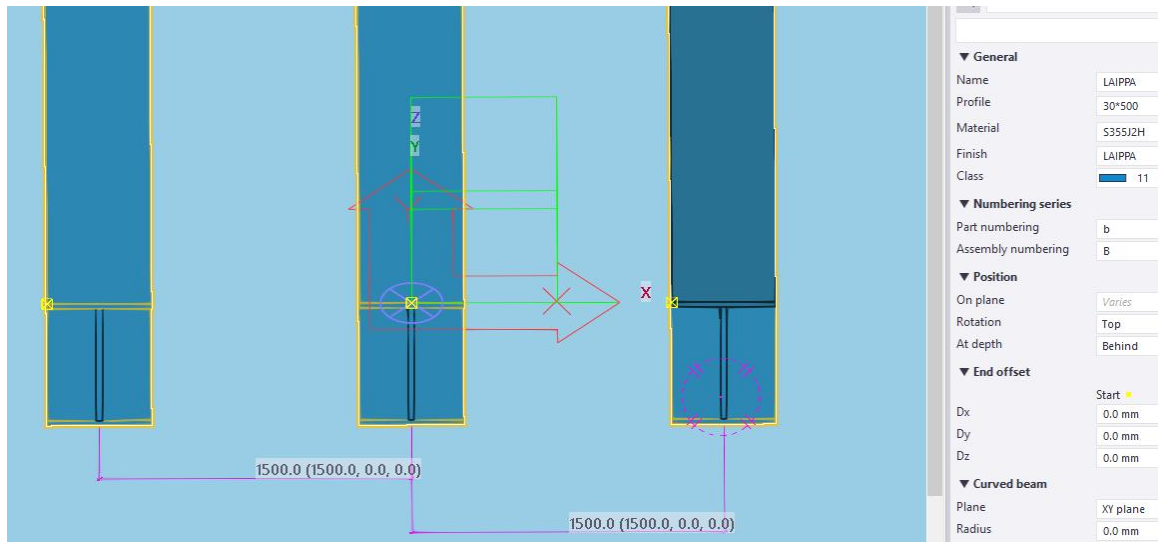
Kuva 29 Syvyyssäädön asetus.

Kuvassa 30 on matemaattisten komponenttien avulla rakennettu profiilitieto. AXB-komponenteilla kerrotaan esimerkiksi laipan ainevahvuutta 0,03 m sekä uuman leveyttä 0,5 m 1000:lla ja Format-komponentille annetaan käsky $\{0\}*\{1\}$, jolloin komponentti kertoo navat 0 ja 1 keskenään. Tuloksena komponentista saadaan profiilitieto 30 x 500 mm, joka viedään Tekla-komponentille.

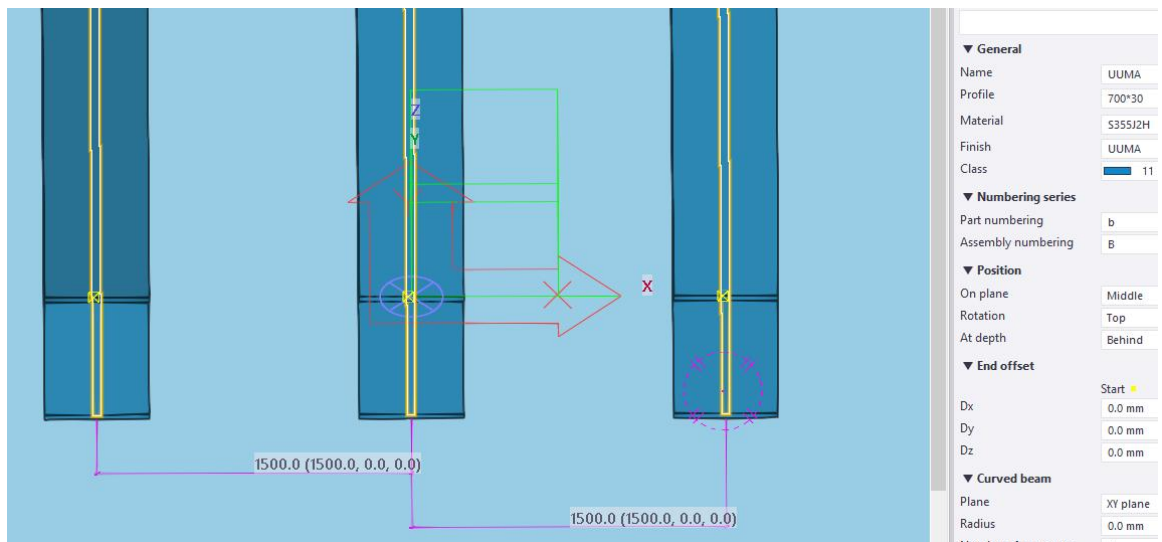


Kuva 30 Hitsatun profiilin mittatietojen muokkaus Teklaan vientiä varten.

Teklaan viedyt tiedot, kuten profiili, materiaali, class jne. siirtyvät automaattisesti vastaavalla tavalla kuin on aiemmin mainittu Attributes-komponentilla ja kuvassa 31 näkyvät laipat sekä kuvassa 32 uumat valittuina Tekla Structures-ohjelmassa.

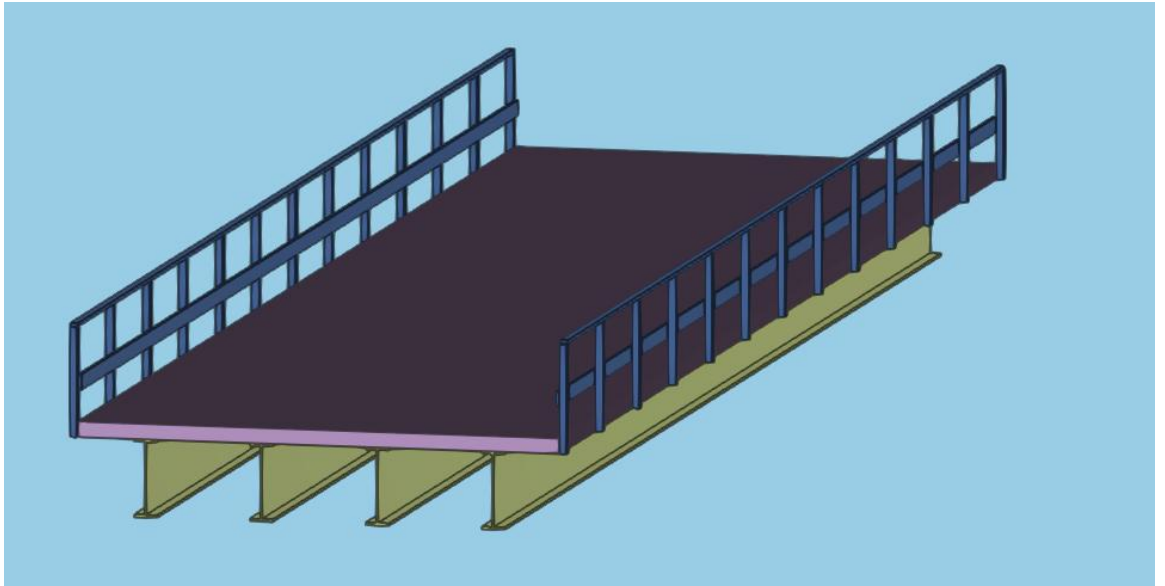


Kuva 31 Esimerkkikuva. Laipat Teklassa valittuna.



Kuva 32 Esimerkkikuva. Uumat Teklassa valittuna.

Kuvassa 33 kaikki määritellyt profiilit ja materiaalit on viety Teklaan ja se on luonut tietomallin asetettujen lähtötietojen perusteella. Kuvassa teräspalkkeina HEB1000, kansilankut ja välijohteet 50 x 200 mm, kaidetolpat 100 x 100 mm ja käsijohteet 100 x 50 mm.



Kuva 33 Esimerkkikuva työkalun luomasta sillasta. Sillan pituus 24 m ja hyötyleveys 6 m.

6 Rakenteiden staattinen mitoitus

Sillan mitoitus on suoritettu Eurokoodien ja Väyläviraston laatimien sovellusohjeiden mukaisesti. Mitoitus on suoritettu käyttö- ja murtorajatilalle. Käyttörajan mitoituksessa tarkistetaan rakenteiden käyttömukavuuteen sekä ulkonäköön liittyviä seikkoja ja murtorajan mitoituksessa tarkistetaan rakenteiden rakenteellista kestävyyttä, johon tässä työssä keskitytään pääsääntöisesti. Mitoitusta varten Hannes Kummala DI on luonut Excel-laskentapohjan, ja laskentapohjaa on käytetty tässä työssä sillan pääkannattimien mitoituksessa. Tulokset on taulukoitu niiden nopeaa käyttöä varten. Laskentapohjan käyttäminen edellyttää käyttäjältä hyvää tietämystä rakenteiden staattisesta mitoituksesta, jotta tuloksia voidaan pitää riittävän luotettavina.

Työstä on jätetty pois silloille tyypilliset rakenteiden mitoitukset, kuten laakerit ja siltojen alusrakenteet, koska ne tulee tarkistella aina tapauskohtaisesti.

6.1 Käytettävät mitoitusohjeet

Sillan kantavat teräsrakenteet on mitoitettu Eurokoodin 3 mukaisilla SFS-EN 1993-1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, SFS-EN-2 + AC Teräsrakenteiden suunnittelu osa 2: Terässillat, SFS-EN 1993-1-5 Levyrakenteet ja SFS 1993-1-8 Liitosten mitoitus standardeilla. Lisäksi työssä on sovellettu Väyläviraston sovellusohjeistusta NCCI 4 Teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu.

6.2 Suunnittelukuormat NCCI 1 mukaan

Määräävät kantavien rakenteiden suunnittelua koskevat kuormat perustuvat Eurokoodeihin sekä näitä koskeviin kansallisiin liitteisiin. Suomessa sovelletaan Väyläviraston laatimia Eurokoodien soveltamisohjeita sekä kansallisia liitteitä. Väyläviraston laatimat ohjeistukset selkeyttävät suunnittelua ja kaikki ohjeet ovat vapaasti saatavilla Väyläviraston omilta kotisivuilta.

Väyläviraston laatiman NCCI 1 Siltojen kuormat- ja suunnitteluperusteet-soveltamisohjeen mukaan on valittu määräävimmat kuormat tyypillisen teräspalkkisillan mitoitukseen.

Rakenteiden suunnittelussa kuormat jaetaan tyypillisesti pysyviin ja muuttuviin kuormiin. Sillan suunnittelussa pysyviksi kuormiksi huomioidaan rakenteiden omapaino ja muuttuviksi kuormiksi huomioidaan liikenteen aiheuttamat kuormat, tuulikuorma ja lämpötilakuorma. Lumikuorma huomioidaan, mikäli on mahdollista, että lumi kertyy sillan rakenteiden päälle esimerkiksi talvikunnossapidon puuttuttua tai siltaa käytetään latusiltana, kuten tässä työssä on huomioitu ja näiden määrittely on kerrottu tarkemmin kohdassa 5.2.1 Liikennekuormat.

Liikenteen aiheuttamista kuormista muodostetaan eri kuormaryhmiä ja niitä käsitellään mitoituksessa yksittäisinä kuormina. Kuormaryhmät käsitellään yhdessä muiden kuormien kanssa kuormitusyhdistelmissä. Kuormaryhmiä on kaksi kappaletta ja ne on esitetty taulukossa 1. Ryhmät eivät koskaan vaikuta yhtä aikaa rakenteilla.

Taulukko 1 Kuormaryhmät gr1 ja gr2 kevyen liikenteen sillassa [5, taulukko B.5]

	Pystykuormat		Vaakakuormat
	Tasainen kuorma	Huoltoajoneuvo Q_{serv} tai pistekuorma Q_{swk}	Q_{tk}
lähde	[EN 1991-2 5.3.2.1]	[EN 1991-2 5.3.2.3]	[EN 1991-2 5.4]
gr1	Ominaisarvo		Ominaisarvo
	1		1
gr2		Ominaisarvo	Ominaisarvo
		1	1

Alla olevassa taulukossa 2 on kuormitusyhdistelmien lyhenteiden selitykset. Taulukoissa 3 ja 4 ovat kuormitusyhdistelmä taulukot. Taulukot löytyvät NCCI 1 Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet liitteestä 1C.

Taulukko 2 Murto- ja käyttörajatilan kuormitusyhdistelmä taulukoiden lyhenteiden selitykset.

TAULUKKOJEN MERKINNÄT	
gr1 ja gr2	Kuormaryhmät (kpl B.5.5)
F_{w}	Tuulikuorma (kpl C)
T_r	Lämpötilakuorma (kpl D)
BF	Laakerikitka (kpl H.3)
IL	Jääkuorma (kpl H.1)
S	Tukipainuma (kpl H.2)
TLEP	Liikennekuorman maanpaine (kpl H.4)
1...	Kuormitusyhdistelyn numero (murtorajatila)
1a...	Kuormitusyhdistelmän juokseva numero ('a' = käyttörajatilan ominaisyhdistelmä)
1b...	Kuormitusyhdistelmän juokseva numero ('b' = käyttörajatilan tavallinen yhdistelmä)
1c	Kuormitusyhdistelmän numero ('c' = käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmä)

Taulukko 3 Kevyen liikenteen sillat - murtorajatilan kuormitusyhdistelmät

KEVYEN LIIKENTEEN SILLAT - MURTORAJATILA - Set A: A2.4 (A), Set B: A2.4 (B)										
KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVA KUORMA (6.10b)										
YHDISTELYKAAVAT MRT_1 - MRT_7										
		MRT_0	MRT_1	MRT_2	MRT_3	MRT_4	MRT_5	MRT_6	MRT_7	
		6.10a	gr1	gr2	F _{wk}	T _k	BF	IL	TLEP	
SET A (EQU) & SET B (STR/EQU)	Omapaino	1.35	STR/GEO: 1,25 / 0,9			EQU: 1,15 / 0,9				
	Esijännitys	1,1 / 0,9 ¹⁾	STR/GEO: 1,1 / 0,9 ³⁾			EQU: 1,1 / 0,9 ²⁾				
SET A (EQU) & SET B (STR/EQU)	gr1	-	1.35	-	1.35 x 0.4	1.35 x 0.4	1.35 x 0.4	1.35 x 0.4	1.35 x 0.4	
	gr2	-	-	1.35	-	-	-	-	-	
	F _{wk}	-	1.5	0.3	1.5	0.3	1.5	1.5 x 0.3	1.5 x 0.3	1.5 x 0.3
	T _k ¹⁾	-	1.5	x 0.6	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
	IL	-	1.5	x 0.7	1.5	x 0.7	1.5	x 0.7	1.5	x 0.7
	S ¹⁾	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
	TLEP	-	1.35	x 0.4	1.35	x 0.4	1.35	x 0.4	1.35	x 0.4

1) Lämpötilakuorma/tukipainuma voidaan jättää pois murtorajatilayhdistelystä mikäli rakenteella on riittävästi muodonmuutoskykyä

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

3) Paikalliset vaikutukset 1,20 (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

= Määräävä muuttuva kuorma

Taulukko 4 Kevyen liikenteen sillat - käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät

KEVYEN LIIKENTEEN SILLAT - KÄYTTÖRAJATILA																
Ominaisyhdistelmä (6.14), Tavallinen yhdistelmä (6.15), Pitkäaikaisyhdistelmä (6.16), Pysyvät kuormat																
(6.14) (6.15) (6.16) Pysyvät																
KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVA KUORMA																
	KRT_1a - KRT_7a							KRT_1b - KRT_7b							KRT_1c	KRT_1d
	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	1b	3b	4b	5b	6b	7b	1c	1d	
	gr1	gr2	F _{wk}	T _k	BF	IL	TLEP	gr1	F _{wk}	T _k	BF	IL	TLEP	-	-	
Omapaino	1							1							1	1
Esijännitys	1							1							1	1
gr1	1	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	-	-	-	-	-	-	-	
gr2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
F _{wk}	0.3	0.3	1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	-	-	
T _k	0.6	0.6	0.6	1	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	-	
BF	0.6	0.6	0.6	0.6	1	0.6	0.6	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	1	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	-	
S ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
TLEP	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1	-	-	-	-	-	0.4	-	-	

1) Tukipainuma ja vedenpinnan asema yhdistellään pysyvän kuorman kanssa

- Passiivipaineen yhdistelykerroin aiheuttavan kuorman mukaan

= Määräävä muuttuva kuorma

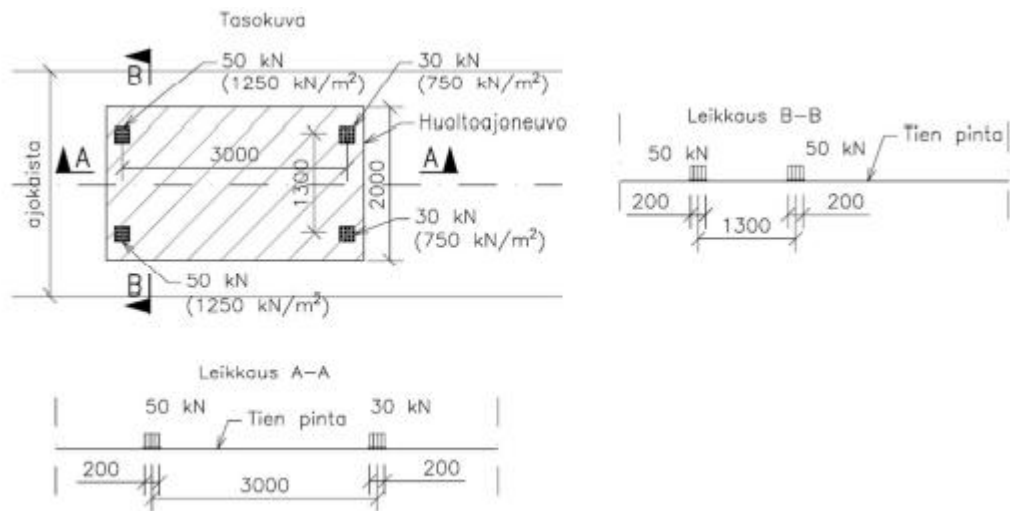
KVL-sillat	
Onnettomuusyhdistelmä	
Ad	1
Omapaino	1
Esijännitys	1
gr1	0.4
gr2	-
F _{wk}	-
T _k	0.5
BF	0.4
IL	0.2
S ¹⁾	-
TLEP	-

6.2.1 Liikennekuormat

Liikennekuormina huomioidaan kevyen liikenteen silloissa muuttuvat pystykuormat, jotka koostuvat tasaisesti jakautuneesta kuormasta ja tämän lisäksi huomioidaan huoltoajoneuvon aiheuttama kuormitus tai pistekuorma NCCI 1 kohdan B.5 Kevyen liikenteen siltojen kuormat mukaisesti. Tasaisesti jakautunut kuorma huomioidaan 5 kN/m^2 -suuruisena tungoskuormana sillan pitkittäis- ja poikittaissuunnassa. Huoltoajoneuvo huomioidaan silloin, kun ajoneuvolla on vapaa

pääsy sillalle, muussa tapauksessa sillalle määritellään tungoskuorman lisäksi pistekuorma 20 kN ja sen vaikutuspinta-ala on 0,2 m x 0,2 m (ks. kuva 34).

Huoltoajoneuvon kuormitus määritellään alla olevan kuvan mukaisella tavalla, jossa akselikuormitukset ovat 100 kN + 60 kN ja akseliväli on 3,0 m. Renkaiden vaikutuspinta-ala on 0,2 m x 0,2 m ja niiden välinen etäisyys on 1,3 m ajoneuvon leveyden ollessa 2,0 m.



Kuva 34 Huoltoajoneuvon kuormituksen määrittäminen [6].

Työn aiheena ollut tyyppisilta on mahdollista sijoittaa kuntoreitille, jolloin siltaa käytetään todennäköisesti myös talviaikaan latusiltana. Tällöin on huomioitava lumen aiheuttaman kuormituksen lisäksi mahdollisen latukoneen aiheuttama kuormitus, jonka Hannes Kummala on diplomityössään huomionnut 100 kN suuruisena, jolloin se on ollut varmallalla puolella mitoitusta, kun latukoneen maahantuoja ilmoittama kuormitus on ollut 75 kN. Latukoneen kuorman vaikutuspinta-ala on ollut 3 m x 5 m. [5]

6.2.2 Tuulikuorma

Tuulikuorman määrittämisessä on noudatettu Väyläviraston laatimaa soveltamisohjetta NCCI 1 sivua 40, joka pohjautuu standardiin SFS-En 1991-1-4. Kuorma määräytyy sillan rakennuspaikan ympäristön eli maastoluokan perusteella ja ne on esitetty taulukossa 5. NCCI 1-sovellusohjeen mukaan siltaan kohdistuva tuulenpaine lasketaan tuulennopeuden perusarvolla 23 m/s. [5]

Taulukko 5 Siltaan kohdistuva tuulen paine [kN/m^2], tuulen nopeus 23 m/s. [5, taulukko C.1]

Maasto- luokka	0		I		II		III		IV	
	$z_c \leq 20\text{m}$	$z_c = 50\text{m}$	$z_c \leq 20\text{m}$	$z_c = 50\text{m}$	$z_c \leq 20\text{m}$	$z_c = 50\text{m}$	$z_c \leq 20\text{m}$	$z_c = 50\text{m}$	$z_c \leq 20\text{m}$	$z_c = 50\text{m}$
$\leq 0,5$	3,58	4,18	2,54	3,02	2,23	2,75	1,73	2,28	1,30	1,86
$\geq 4^a$	1,94	2,26	1,37	1,64	1,21	1,49	0,94	1,24	0,71	1,01
$\geq 5^b$	1,49	1,74	1,06	1,26	0,93	1,15	0,72	0,95	0,54	0,77

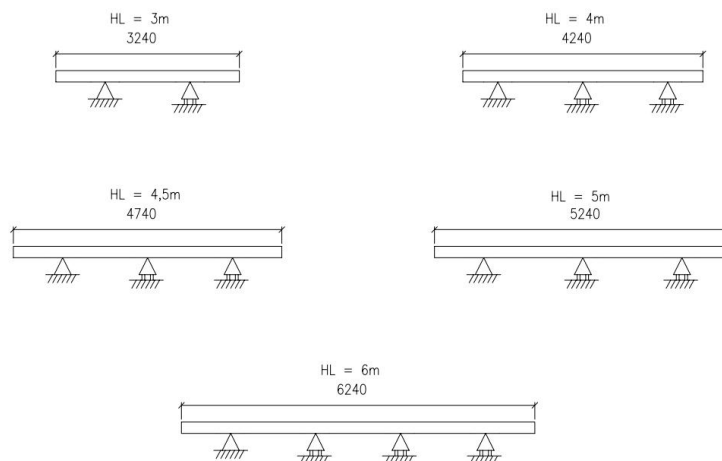
^a Koskee siltaa, jossa kaiteet ovat avoimet, ts. kaiteen projektiopinta-alasta yli 50 % on avointa.

^b Koskee siltaa, jossa on yhtä aikaan esiintyvä liikennekuorma tai kaiteet ovat suljetut (kysymyksessä on umpikaide tai kaide, jonka projektiopinta-alasta vähemmän kuin 50 % on avointa).

Taulukossa b on siltakannen leveys, d_{tot} on siltakannen korkeus ja Z_e on siltakannen painopisteen etäisyys maanpinnasta.

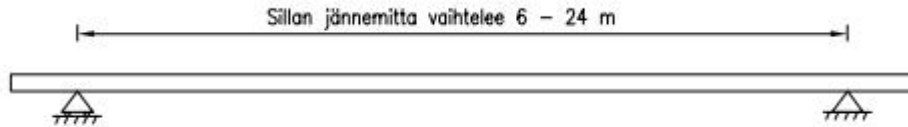
6.3 Staattiset mallit

Sillan kannen tuet ovat nivelellisiä tukia, jotka estävät sillan pystysuuntaisen liikkeen. Sillan päätyjen tuennat ottavat vastaan vaakasuuntaiset liikkeet. Hannes Kummalan luomilla staattisilla malleilla (kuva 35) voidaan kuvata kaikki tässä työssä mainitut sillan leveydet. Mallissa on oletettu, että pääpalkkien ylälaippa pääsee kiertymään ja kuormitus siirtyy teräspalkille uuman kohdalla.



Kuva 35 Sillan kannen staattinen rakennemalli poikkisuuntaan.

Pääpalkkien mitoitus on suoritettu kuvan 36 mukaiselle rakennemallille pituussuunnassa. Mallissa pääpalkki on huomioitu jänneväliä pidempänä, millä huomioidaan laakereiden vaatima tila.



Kuva 36 Sillan pääkannattimen rakennemalli pituussuunnassa. Sillan päissä on vakiomittaiset ulokkeet.

6.4 Pääpalkkien murtorajatilamitoitus

Teräspalkistolle lasketaan kuormituksista aiheutuvimmat määrävimmät momentit, leikkausvoimat ja tukireaktiot statiikan sääntöjen mukaisesti. Murtorajatilassa tarkistetaan teräspalkkien momenttikestävyys, leikkauskestävyys, leikkauslommahduskestävyys ja kiepahduskestävyys. Teräsrakenteiden kestävyteen vaikuttaa rakenneosan poikkileikkausluokka oleellisella tavalla. Kuinka paljon poikkileikkauksen lommahdus rajoittaa poikkileikkauksen kestävyttä ja kiertymistä.

6.4.1 Momenttikestävyys

Poikkileikkauksen momenttikestävyys lasketaan kaavan (1) mukaan

$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \leq 1 \quad (1)$$

missä $M_{c,Rd}$ on momenttikestävyys [Nmm], W on poikkileikkauksen taivutusvastus [mm^3], f_y on teräksen myötöraja [N/mm^2] ja γ_{M0} on poikkileikkauksen kestävyysosavarmuusluku.

Taivutusvastus määräytyy poikkileikkauksen mukaan ja momenttikestävyys ehto tarkistetaan ehdosta (2)

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \quad (2)$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo

6.4.2 Leikkauslommahduskestävyys

Leikkauslommahduskestävyys tarkistetaan uumista jäykistämättömille levyille ehdon (3) mukaan

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72}{\eta} \varepsilon \quad (3)$$

missä h_w on uuman korkeus [mm], t_w on uuman paksuus [mm], η on teräslaadusta riippuva kerroin ja ε teräksen myötörajasta riippuva kerroin. Mikäli ehto toteutuu, on leikkauslommahdus tarkistettava.

Leikkauslommahduksen uumasta jäykistetyille levyille tarkistetaan kaavalla (5.5.4)

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} \quad (4)$$

missä k_τ on leikkauslommahduskerroin. Jos ehto toteutuu, leikkauslommahdus on tarkistettava.

Kaavalla (5) voidaan laskea teräksen myötörajasta riippuva kerroin

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5)$$

NCCI 4, kohdan 6.1.3.5.1 Kestävyyden mitoitusarvo, mukaan leikkauslommahduskerroin levyille, jossa käytetään jäykkiä poikittaisjäykisteitä ilman pituusjäykisteitä, voidaan laskea kaavoilla (6 ja 7)

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \left(\frac{h_w}{a_j} \right)^2, \text{ kun } a_j/h_w \geq 1 \quad (6)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 \left(\frac{h_w}{a_j} \right)^2, \text{ kun } a_j/h_w \geq 1 \quad (7)$$

missä a_j on jäykisteiden välinen etäisyys [mm].

6.4.3 Leikkauskestävyys

Palkin leikkauskestävyys lasketaan kaavan (8) mukaisesti uuman ja laippojen leikkauskestävyyksien summana.

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (8)$$

missä $V_{b,Rd}$ on leikkauskestävyyden mitoitusarvo [N], $V_{bw,Rd}$ on uuman leikkauskestävyys [N], $V_{bf,Rd}$ on laippojen leikkauskestävyys [N], f_{yw} on uuman teräksen myötöraja [N/mm^2] ja γ_{M1} on osavarmuusluku stabiiliuden suhteen.

Uuman leikkauskestävyys lasketaan kaavalla (9).

$$V_{bw,Rd} = \frac{X_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (9)$$

missä X_w on uuman vaikutus leikkauslommahdukseen ja se määritellään taulukon 6 mukaan.

Taulukko 6 Kertoimen X_w määrittäminen [6, taulukko 6.12]

	Jäykkä päätyjäykiste	Ei-jäykkä päätyjäykiste
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\lambda_w$	$0,83/\lambda_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \lambda_w)$	$0,83/\lambda_w$

$\bar{\lambda}_w$ taulukossa tarkoittaa uuman muunnettua hoikkuutta ja se saadaan kaavan (10) avulla, jos poikittaisjäykisteitä käytetään vain tuilla.

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 * t_w * \epsilon} \quad (10)$$

Jos poikittaisjäykisteitä käytetään tuilla ja käytetään poikittaissuuntaisia välijäykisteitä tai pituus-suuntaisia jäykisteitä tai molempia, uuman muunnettu hoikkuus lasketaan kaavan (11) avulla.

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 * t_w * \epsilon * \sqrt{k_\tau}} \quad (11)$$

Mikäli laippojen kestävyyttä ei hyödynnetä täysin taivutuskestävyyttä laskettaessa, laippojen leikkausvoimakestävyys määritetään kaavasta (12).

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yf}}{c * \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad (12)$$

missä b_f on laipan leveys [mm], t_f on laipan paksuus [mm], f_{yf} on laipan teräksen myötöraja [N/mm^2], c on laippojen leikkauskestävyyden määrittämisessä tarvittava kerroin, M_{Ed} on taivutuskestävyyden mitoitusarvo [Nm] ja $M_{f,Rd}$ on laippojen mukaan laskettu poikkileikkauksen momenttikapasiteetti [Nm].

Kerroin c määritetään kaavalla (13)

$$c = \alpha_j \left(0,25 + \frac{1,6b_f * t_f^2 * f_{yf}}{t_w * h_w^2 * f_{yw}} \right) \quad (13)$$

Kaavalla (14) lasketaan laippojen mukainen poikkileikkauksen momenttikapasiteetti

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,k}}{\gamma_{M0}} \left(1 - \left(\frac{N_{Ed}}{\frac{(A_{f1} + A_{f2}) f_{yf}}{\gamma_{M0}}} \right) \right) \quad (14)$$

missä $M_{f,k}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo [Nm], N_{Ed} on aksiaalinen voima [N], A_{f1} on laipan 1 tehollinen pinta-ala [mm^2] ja A_{f2} on laipan 2 tehollinen pinta-ala [mm^2].

Poikkileikkauksen leikkauskestävyyden mitoitusehto on ehdon (15) mukaan

$$V_{Ed} \leq V_{b,Rd} \quad (15)$$

missä V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo [N].

6.4.4 Kiepahduskestävyys

Pääpalkkien kiepahdus on varmistettu SFS-EN 1993-1-1 kohdan 6.3.2.4 yksinkertaisella menetelmällä ja sitä voidaan käyttää sivusuunnassa tuetuille sauvoille. Kaavalla (16) varmistetaan kiepahdustarkistuksen tarve.

$$\bar{\lambda}_f - \frac{k_c \alpha_j}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \bar{\lambda}_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} \quad (16)$$

missä $\bar{\lambda}_f$ on ekvivalentin puristetun laipan muunnettu hoikkuus,

k_c on sivuttaistukien välisen momenttipinnan jakaantumaa huomioon ottava hoikkuuden korjaustekijä ja se määritellään alla olevan taulukon mukaan,

$i_{f,z}$ on ekvivalentin puristetun laipan, joka koostuu puristetusta laipasta ja 1/3-osasta uuman puristetusta alueesta. Hitaussäde poikkileikkauksen heikomman akselin suhteen [mm].

λ_1 on teräksen lujuusluokasta riippuva kerroin









$\bar{\lambda}_{c0}$ on ekvivalentin puristetun laipan muunnetun hoikkuuden raja-arvo, jonka suuruus on 0,2 NCCI 4, kohdan 6.1.2.2.4 mukaan.

$M_{c,Rd}$ on poikkileikkauksen taivutuskestävyys [Nm] ja

$M_{y,Ed}$ on suurin taivutusmomentin arvo sivuttaistukien välillä [Nm].

Mikäli kaavan (5.15) ehto ei toteudu on palkki tarkistettava kiepahdukselle. Taulukon 7 mukaan valitaan korjaustekijän kerroin k_c momenttipinnan perusteella.

Taulukko 7 Korjaustekijä k_c [6, taulukko 6.7]

Momenttipinnan muoto	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

Taulukossa oleva merkintä Ψ kuvaa jännityssuhdetta ja se määritetään tarkasteltavan osan ääripäässä esiintyvien jännitysten suhteena. Teräslaadusta riippuva kerroin λ_1 lasketaan kaavan (17) avulla.

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} = 93,3\varepsilon \quad (17)$$

missä E_s kuvaa teräksen kimmokerrointa ($210\,000\text{ N/mm}^2$).

Kaavan (16) ekvivalentin puristetun laipan muunnetun hoikkuuden $\bar{\lambda}_f$ ylittäessä ehdon mukaisen arvon voidaan kiepahduskestävyys laskea kaavan (18) mukaan

$$M_{b,Rd} = k_{f,l} \chi M_{c,Rd} \quad (18)$$

missä $M_{b,Rd}$ on kiepahduskestävyyden mitoitusarvo [Nm],

$k_{f,l}$ on muunnostekijä, jolle käytetään arvoa 1,0 NCCI 4, kohdan 6.1.2.2.4 mukaan, ja

χ on ekvivalentin puristetun laipan perusteella laskettua muunnettua hoikkuutta $\bar{\lambda}_f$ vastaava kiepahduksen pienennystekijä.

Kiepahduskestävyyden mitoitusarvon tulee toteuttaa seuraavan kaavan (19) ehdon

$$M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd} \quad (19)$$

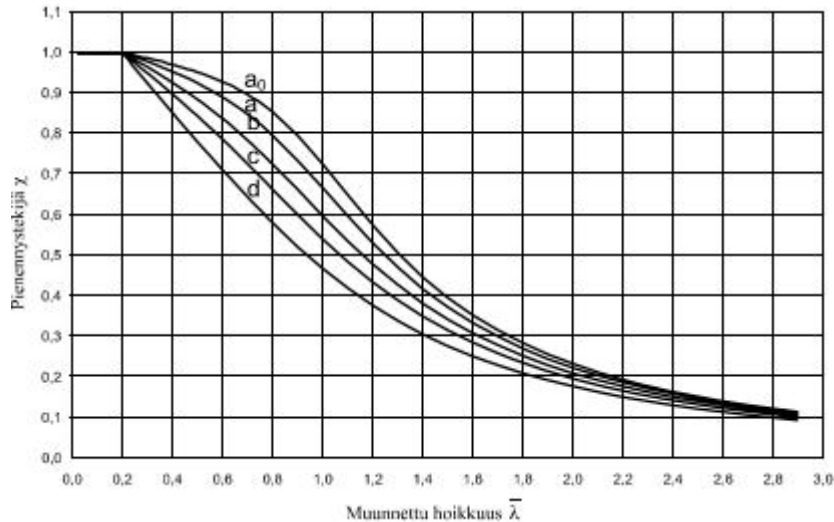
Muunnettua hoikkuutta vastaava kiepahduksen pienennystekijä saadaan kaavasta (20)

$$\chi = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (20)$$

missä ϕ_{LT} on pienennystekijän määrittämiseksi tarvittava kerroin ja se saadaan kaavalla (21)

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_f - 0,2) + \bar{\lambda}_f^2] \quad (21)$$

α_{LT} on epätarkkuustekijä, joka määräytyy kiepahduskäyrän mukaan, joka on tismalleen samanlainen kuin NCCI 4, kuvan 6.7 nurjahduskäyrä (ks. kuva 37). Käytettäessä tätä käyrästä on huomioitava, ettei koskaan valita käyrää α_0 .



Kuva 37 Standardin SFS-En 1993-1-1 mukaiset nurjahduskäyrät [6, kuva 6.7]

Kiepahduskäyrä voidaan valita poikkileikkauksen (ks. taulukko 8) perusteella.

Taulukko 8 Kiepahduskäyrän valinta poikkileikkauksen perusteella [6, taulukko 6.5]

Poikkileikkaus	Rajat	Kiepahduskäyrä
Valssatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Hitsatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Muut profiilit	-	d

Mikäli käytetään kaavan (19) mukaista kiepahduskestävyyden mitoitusarvoa, hitsatuilla profiileilla kiepahduskäyräksi valitaan d, kaavan (22) ehdon täytyessä,

$$\frac{h}{t_f} \leq 44\varepsilon \quad (22)$$

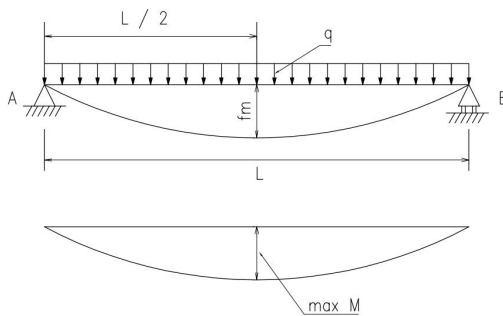
missä h on poikkileikkauksen kokonaiskorkeus [mm] ja t_f on laipan seinämän paksuus [mm]. Mikäli kaavan (22) ehto ei toteudu, käyräksi valitaan c. Epätarkkuustekijä valitaan alla olevasta taulukosta kiepahduskäyrän perusteella.

Taulukko 9 Kiepahduskäyrien epätarkkuustekijät SFS-EN 1993-1-1 mukaan [6, taulukko 6.4]

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

6.5 Palkin käyttörajanmitoitus

Pääpalkkien taipuma arvioidaan kuvan mukaisen staattisen mallin avulla. Taipuman lasketaan käyttörajan kuormitusyhdistelmillä. Rakenteiden oman painon aiheuttamat taipumat pyritään ottamaan huomioon jo suunnitteluvaiheessa siten, että palkeille otetaan huomioon esikorotus siltarakenteilla ja se on lasketun taipuman suuruinen. Tasaisella kuormalla aiheutuva taipuma lasketaan alla olevan kuvan 38 mukaisella staattisella mallilla.



Kuva 38 Palkin staattinen malli [7]

Suurin taipuma voidaan laskea kaavan (23) mukaan palkin keskellä. [7]

$$f_m = \frac{5q_0L^4}{384EI} \quad (23)$$

missä f_m on palkin taipuman maksimi [mm], q_0 on tasainen jatkuva kuorma palkilla [N/mm], L on palkin jänneväli [mm], E on teräksen kimmokerroin [N/mm^2] ja I poikkileikkauksen neliömomentti [mm^4].

Väyläviraston sovellusohjeen NCCI 4 mukaan ajoneuvo- ja kevyenliikenteen silloille on määritelty taipumarajaksi maksimissaan $L/500$ tavallisella kuormitusyhdistelmällä sekä lisäksi poikkileikkauksen kallistuma saa olla vain 1 % ajoneuvoliikenteellä. Lisäksi kevyen liikenteen sillalle on määritelty rakenteiden värähtelystä NCCI 1 kohdassa G.4.3.2 ominaistaajuuksien raja-arvot ja ne täyttyvät tällä siltatyyppillä.

7 Yhteenveto ja pohdinta

Rhinon Grasshopper-työkalulla voidaan luoda isoja sekä toimivia kokonaisuuksia. Grasshopper-työkalun luominen vie aikaa, mutta se maksaa itsensä ns. takaisin, kun ollaan esimerkiksi suunnittelemassa kyseisen mukaista kevyenliikenteen siltaa. Esimerkiksi Teklassa mallintaminen veisi huomattavasti pidemmän ajan, jotta saataisiin vastaavat rakenteet luotua kuin Grasshopper-työkalulla on luotu. Työkaluun lähtötietojen syöttäminen ei vie kuin muutaman minuutin ja tietomalli saadaan millitarkasti paikalleen siltapaikalle, jolloin tietomallin luominen on todella kustannustehokasta. Lisäksi tietomallia voidaan esitellä jo suunnittelun alkuvaiheessa esimerkiksi työn tilaajalle tai mikäli tarvitaan eri alojen yhteensovitusta siltapaikalla.

Grasshopper-työkalun käyttö helpottui sitä mukaa, kun työ eteni ja huomasin joitain seikkoja, joita olisi voinut tehdä joko yksinkertaisemmin tai toisella tavalla. Esimerkiksi säätämiseen tarkoitettujen komponenttien toistuvat samoilla arvoilla monta kertaa eri hyötyleveyksien työkalukokonaisuuksissa ja näitä olisi voinut yhdistellä, mutta toisaalta hyötyleveyksiä on tässä työkalussa viisi kappaletta niin on viisaampaa määritellä jokaiselle työkalukokonaisuudelle omat säätämiseen tarkoitettujen komponenttinsa. Lisäksi Rhinoon luotu profiilikirjasto kasvoi aika laajaksi tähän työkaluun ajatelluksi, kun puhutaan vain HEB-teräspalkkistosta. Alkuun olisi ollut hyvä määritellä laskevilla käytettävät profiilit, mutta laaja kirjasto tarjoaa jatkokehittelyyn hyvän pohjan. Mainittakoon, ettei Rhinon esikatselua välttämättä olisi ollut tarpeellista luoda ollenkaan, vaan tehdä pelkkä algoritmi suoraan Teklaan käytettäväksi, jolloin työkalusta olisi tullut yksinkertaisempi.

Tälle työlle määritellyt HEB-teräspalkkiprofiilit listattiin ottamalla Excel-laskentapohjasta käyttöasteet kullekin mahdollisesti käytettävälle profiilille. Lista on mielestäni toimiva ja helppokäyttöinen. Lisäksi HEB-teräspalkkien profiili tiedot ovat helposti saatavilla, jolloin ne antavat suuntaa myös hitsattavien profiilien käyttöön.

Yhdessä Grasshopper-työkalu ja HEB-profiilista luovat toimivan kokonaisuuden, kun halutaan saada nopeasti luotua tietomalli ja sillan laskelmat. Profiilistasta katsotaan haluttu sillan pituus ja hyötyleveys, minkä jälkeen katsotaan sopiva teräspalkkiprofiili. Esim. Halutaan 12 metrin pituinen silta 6 metrin hyötyleveydellä niin teräspalkkiprofiiliksi valikoituu tällöin HEB500, HEB550 tai HEB600. Kansirakenteet mitoitetaan samaa Excel-laskentapohjaa käyttäen, joten sekin on nopeaa, kun luodaan laskelmat halutulle profiilille. Toimeksiantaja oli tyytyväinen työn lopputulokseen ja sitä on helppo jatkokehittää mm. jäykisteiden mallintamiseen, sekä konepajamallin tekoon, jossa huomioidaan silloille tyypillinen esikohotus

Lähteet

- 1 Väyläviraston ohjeita 41/2022, Siltojen inframalliohje
[Tietomalliohjeistus - Väylävirasto \(vayla.fi\)](#)
- 2 Grasshopper3d 2020
[Tutorial - Videos - Grasshopper \(grasshopper3d.com\)](#)
- 3 Rhino3d
[Rhino - New in Rhino 7 \(rhino3d.com\)](#)
- 4 Liikenneviraston ohjeita 24/2017, Eurokoodien soveltamisohje Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI1
[lo_2017-24_ncci1_web.pdf \(vaylapilvi.fi\)](#)
- 5 Liikenneviraston ohjeita 27/2016, Eurokoodien soveltamisohje Teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu - NCCI4
[Microsoft Word - LO 27-2016_NCCI_4_25.8.2016 \(vaylapilvi.fi\)](#)
- 6 Hannes Kummala, Diplomityö kuva 6
- 7 Esko Valtanen, Tekniikan taulukkokirja 2019 s. 317, taulukko 5

Työssä mainittuja standardeja:

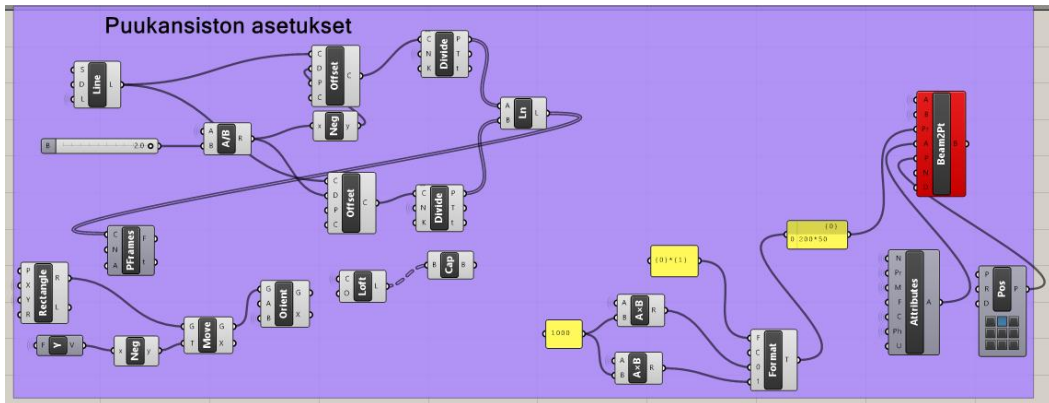
Eurokoodi 3:

- SFS-EN 1993-1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
- SFS-EN 1993-2 + AC Teräsrakenteiden suunnittelu, Osa2: Terässillat
- SFS-EN 1993-1-5 Levyrakenteet
- SFS 1993-1-8 Liitosten mitoitus

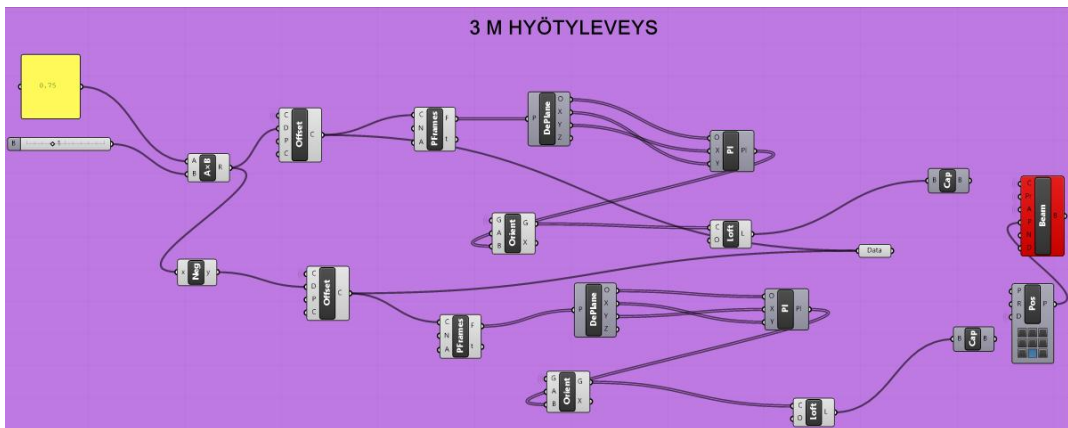
Liitteet

Liite 1 Taulukot lasketuista HEB-profiileista. Taipuma on laskettu vain liikennekuormalle. (salassa pidettävä)

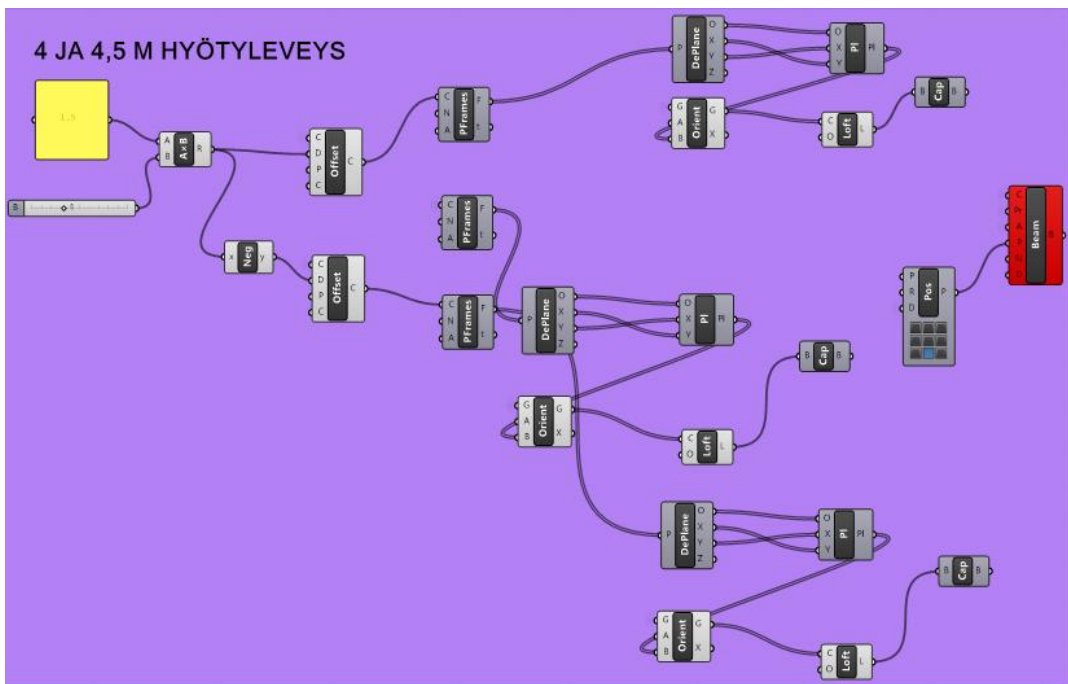
Liite 2.1 Puukansiston asetukset



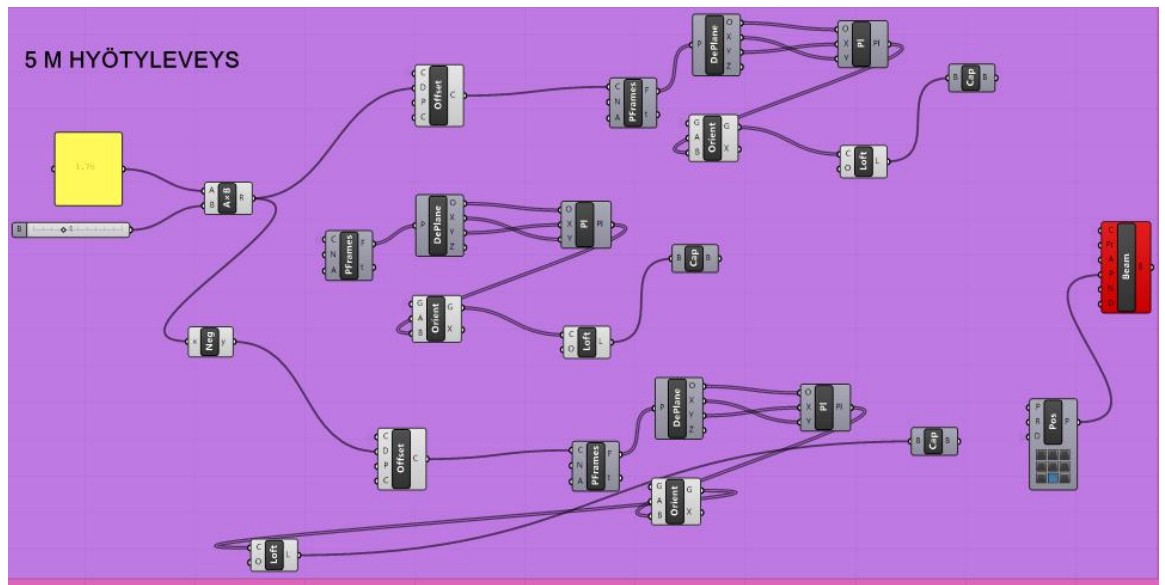
Liite 2.2 Valssattujen teräsprofiilien asetukset 3 m hyötyleveydellä



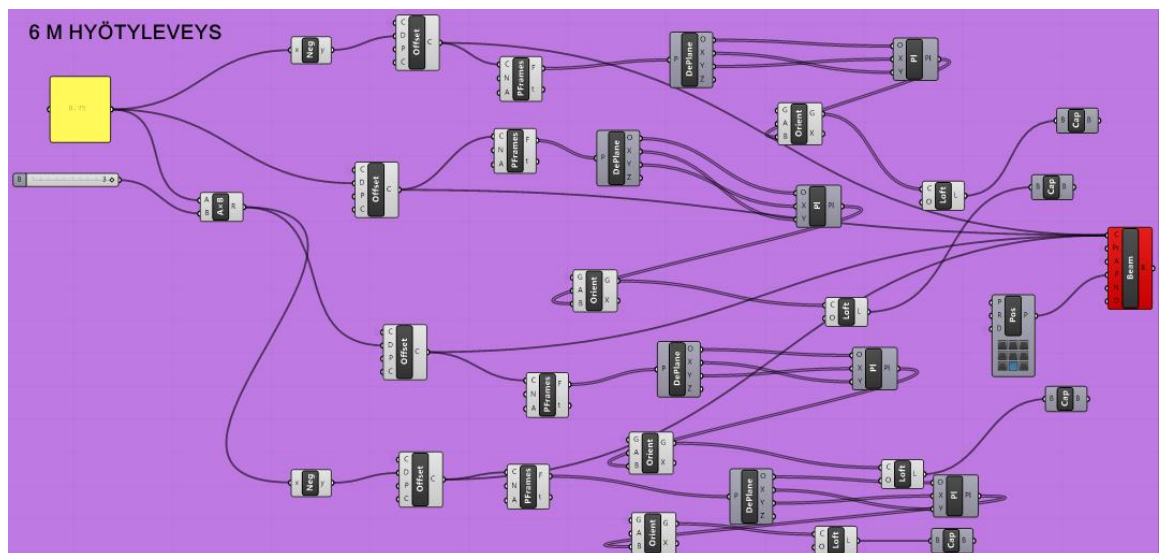
Liite 2.3 Valssattujen teräsprofiilien asetukset 4 ja 4,5 m hyötyleveydellä



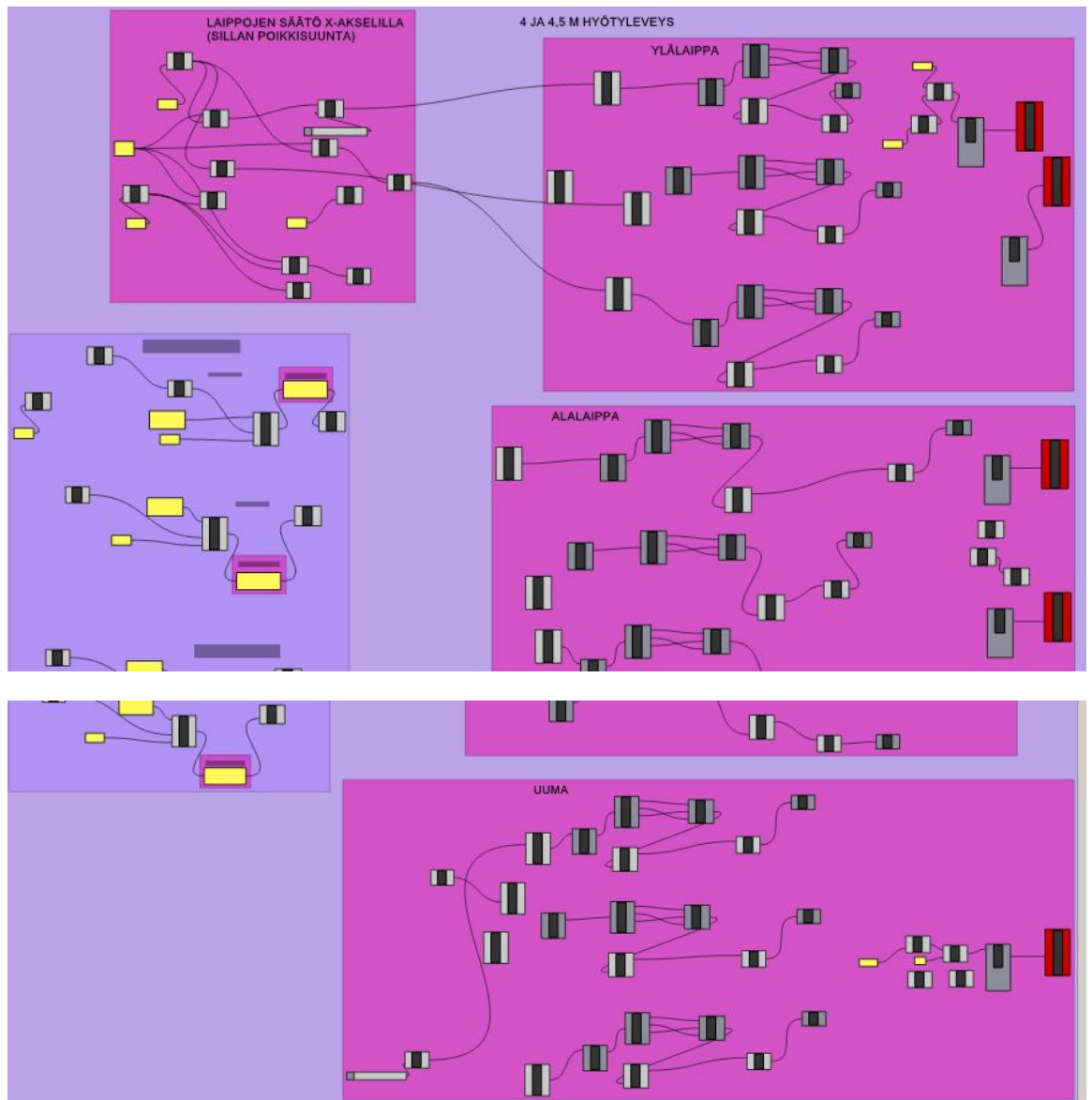
Liite 2.4 Valssattujen teräsprofiilien asetukset 5 m hyötyleveydellä



Liite 2.5 Valssattujen teräsprofiilien asetukset 6 m hyötyleveydellä



Liite 2.6 Hitsattavien teräsprofiilien asetukset 4 ja 4,5 m hyötyleveydellä



Liite 2.7 Kokonaiskuva koko Grasshopper-työkalun laajuudesta

