

Tuomo Järvenpää
Kuovitie 12 A 1
90540 OULU
040-8407231

**BETONISILTOJEN SUUNNITTELU REVIT
STRUCTURE -TIETOMALLIN AVULLA**

Diplomityö, jonka aiheen Oulun yliopiston
Konetekniikan osasto on hyväksynyt
25.08.2010.

Työn ohjaaja
Mikko Malaska

TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Tuomo Järvenpää
Työn nimi:	Betonisiltojen suunnittelu Revit Structure -tietomallin avulla
Päivämäärä:	07.11.2010
Sivumäärä:	95 sivua, 9 liitettä (22 sivua)
Tiedekunta:	Teknillinen tiedekunta
Osasto:	Konetekniikan osasto
Laboratorio:	Rakennesuunnittelun ja rakentamisteknologian laboratorio
Valvoja:	Professori TkT Mikko Malaska
Ohjaajat:	DI Kari Kuusela TkL Timo Tirkkonen
Avainsanat:	sillat, mallit, mallintaminen, analyysi, rakennesuunnittelu, tietokoneavusteinen suunnittelu

Työn tavoitteena on tutkia miten Autodesk Revit Structure 2011 -ohjelmisto soveltuu Suomessa tyypillisten betonisiltojen tietomallintamiseen. Työssä mallinnetaan Liikenneviraston yksi Bul-tyyppipiirustussarjan silta ja tehdään havaintoja ohjelman soveltuvuudesta sillan mallintamiseen ja piirustusten tuottamiseen. Tietomallin avulla tuotetaan sillan kansirakenteen mitta- ja raudituspiirustukset, esimerkkiyleispiirustus sekä määrä- ja rauditusluettelot.

Työssä mallinnettava silta mitoitetaan uudestaan eurokoodien mukaisesti. Mitoituksen tuloksena saadaan rakenteen vaaditut teräsmäärät ja rakennepaksuudet, joita käytetään lähtötietoina siltaa mallinnettaessa. Mitoitus suoritetaan eurokoodien ja Liikenneviraston eurokoodeja koskevien sovellusohjeiden avulla. Mitoituksessa tarvittava rakennemalli pyritään luomaan suoraan tietomallin pohjalta. Työssä tutkitaan myös mitoitettavan sillan rakennemallin vaihtoehtoisia muodostamistapoja ja Autodesk Robot Structural Analysis 2011 -ohjelman soveltuvuutta siltojen analysointiin.

Tutkimusten perusteella Revit Structure 2011 -ohjelma soveltuu hyvin betonisiltojen yleissuunnitelmatasoiseen tietomallintamiseen ja erilaisten havainnekuvien tekemiseen. Ohjelmalla onnistuu hyvin sillan geometrian luominen sekä rakenteen mittojen parametrisointi. Tietomallin avulla saatiin muodostettua sillan kansirakenteen mitta- ja raudituspiirustukset, sillan esimerkkiyleispiirustus sekä rauditus- ja määräluettelot. Revit Structure 2011 -ohjelmalla mallinnettaessa voidaan maasto- ja väylägeometriaa hyödyntää tehokkaasti. Tietomalliin voidaan sisällyttää tietoa muun muassa rakennusosan materiaalista, pintakäsittelyistä ja sallituista mittapoikkeamista.

Ohjelma soveltuu hyvin ainoastaan yksinkertaisten siltarakenteiden rauditusten mallintamiseen. Luseeraavien ja kaarevien terästen muodostaminen on tällä hetkellä liian vaikeaa ja hidasta. Myös terästen ryhmittelymahdollisuuksissa on puutteita. Ohjelma tarvitsee vielä paljon kehitystyötä ennen kuin raudituksen mallintaminen ja raudituspiirustusten tuottaminen onnistuu niin hyvin, että ohjelmalla saadaan rauditettua geometrialtaan haastavimmatkin sillat. Ohjelman kehittämisessä tulisikin panostaa erityisesti rauditustyökaluihin, sillä tämä on selkeästi ohjelman suurin puute muodostettaessa rakennussuunnitelmatasoista tietomallia.

Sillan mitoitus eurokoodeilla onnistui hyvin. Sillan rakennepaksuudet ja teräsmäärät säilyivät lähes samoina kuin nykyisessä tyypisillassa. Sillan kansirakenteen taivutusteräksiä mitoitti kaikissa tarkastelupisteissä käyttörajatilan pitkäaikainen yhdistelmä. Työssä tehtyjen havaintojen ja vertailujen perusteella käyttörajatilan

pitkäaikaisen yhdistelmän liikennekuorman LM1 osavarmuuskertoimien lukuarvoja tulisi mahdollisesti laskea hieman, jotta pitkäaikainen yhdistelmä ei olisi liian mitoittava verrattuna tavalliseen yhdistelmään.

Robot Structural Analysis 2011 -ohjelma soveltuu huonosti eurokoodin mukaisten siltojen kuormitusyhdistelmien muodostamiseen. Ohjelman tapa tehdä yhdistelmiä johtaa erittäin suureen kuormitusyhdistelmämäärään, joka hidastaa ohjelman käyttöä liiaksi. Ohjelmaan täytyisi kehittää verhopintoihin perustuva kuormitusyhdistelmien muodostamistapa, jolloin se soveltuisi paremmin siltojen analysointiin.

Työssä käytetty rakennemallin pintakeskeinen muodostamistapa aiheuttaa suunnittelijalle ylimääräistä työtä syntyvien normaalivoimien takia. Kuormitusyhdistelmien muodostaminen monimutkaistuu, sillä yhdistelmistä täytyy hakea mitoitusmomenttia vastaavat normaalivoimat. Rakennemallivertailujen perusteella voidaan todeta, että yleisesti käytetty tapa mallintaa sillan kansilaatta yhdessä tasossa näyttää antava hieman varmallalla puolella olevia tuloksia verrattuna pintakeskeiseen malliin. Tämä mallintamistapa on erittäin suunnittelijaystävällinen ja sillä saadaan riittävän luotettavasti ja helposti hyödynnettäviä tuloksia, joiden perusteella teräsmäärät voidaan mitoittaa.

ABSTRACT

Author:	Tuomo Järvenpää
Title of thesis:	Concrete bridge design using the Revit Structure information model
Date:	07.11.2010
Number of pages:	95 pages, 9 appendices (22 pages)
Faculty:	Faculty of Technology
Department:	Department of Mechanical Engineering
Laboratory:	Structural Engineering and Construction Technology Laboratory
Supervisor:	Professor, DSc Mikko Malaska
Instructors:	MSc Kari Kuusela LicSc Timo Tirkkonen
Keywords:	bridges, models, modeling, analysis, structural design, computer-aided design

The purpose of this thesis is to determine whether the Autodesk Revit Structure 2011 software is suitable for the informational modeling of concrete bridges typical to Finland. In order to achieve this, a bridge will be modeled according to the Finnish Transport Agency's (FTA) Bul standard drawings, which will allow the evaluation of the suitability of the software for the modeling of the bridge and the creation of the structural drawings. The information model will be used to produce a sample general drawing, the general arrangement and reinforcement drawings for the bridge deck and the quantities and reinforcement lists.

The bridge will be designed according to Eurocode. This will provide information on the structural thickness and reinforcing bar requirements, which can then be used as starting data in the modeling process. The design will follow Eurocode and FTA's guidelines on using them, and the aim is to create the required structural analysis FEM model based directly on the bridge informational model. Alternative methods of creating structural analysis models for bridges will also be discussed, as well as the suitability of the Autodesk Robot Structural Analysis 2011 software for bridge analysis.

The results show that, on the general planning level, Revit Structure 2011 is well suited for the informational modeling of concrete bridges and for the creation of different types of conceptual drawings. It was also found to be suitable for designing bridge geometry and for the parametrization of structural measurements. The information model allowed the creation of the general arrangement and reinforcement drawings for the bridge deck, the sample general drawing and the quantities and reinforcement lists. The software also made it possible to efficiently utilize terrain and route geometry. The information model can include information on, for example, tolerances, the material of the structural component and the surface finish.

The software is, however, suited for modeling only simple bridge structure reinforcements. At the moment, modeling variable-length or arched rebars is too difficult and time-consuming. Rebar grouping possibilities are also limited. The software will require a lot of improvement before it can be used to create reinforcement drawings and models for more geometrically challenging bridges. Development efforts should be directed towards reinforcement tools, as this is clearly the greatest shortcoming on the software's part when creating information models on the construction plan level.

Designing the bridge using Eurocode was a success. The structural thickness and number of rebars remained nearly equal to those of the current standard bridge. The bending rebars of the bridge deck were defined by a quasi-permanent serviceability limit state combination in all tracking points. Based on the findings and comparisons made, the LM1 partial factors of the quasi-permanent serviceability limit state combination should possibly be altered slightly in order to prevent it from being too dominant compared to a frequent combination.

The Robot Structural Analysis 2011 software is ill-suited for creating load combinations for bridges following Eurocodes. The software's method of creating load combinations leads to a very large number of combinations, which causes it to become too slow to use. Developing an envelope-based load combination method would make the software better for bridge analysis tasks.

The surface-centric method of creating structural analysis models used in this paper requires some extra work on the part of the designer because of the normal forces generated. Creating load combinations becomes more complex, as the normal forces corresponding to the design moments need to be found. Based on the comparisons of structural models, it can be said that the commonly used method of modeling the bridge's deck slab as uniplanar appears to yield results that are slightly on the safe side compared to those given by the surface-centric method. The uniplanar modeling method is very designer-friendly and yields reasonably easy-to-use and reliable results.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Oulun yliopiston konetekniikan osastolla Rakennesuunnittelun ja rakentamisteknologian laboratoriossa. Työ on tehty yhteistyössä Liikenneviraston ja Insinööritoimisto Ponvian Oy:n kanssa. Työ on osa siltojen tietomallintamista sekä eurokoodin käyttöönottoa koskevaa tutkimustyötä.

Työn valvojana on toiminut professori TkT Mikko Malaska Oulun yliopistosta ja ohjaajina DI Kari Kuusela Ponvia Oy:stä sekä TkL Timo Tirkkonen Liikennevirastosta. Työn muun ohjausryhmän ovat muodostaneet DI Heikki Lilja, DI Juha Noeskoski ja DI Markku Nousiainen Liikennevirastosta sekä RI Janne Virtanen Virtual Systems Oy:stä. Taloudellisesta tuesta haluan kiittää Liikennevirastoa.

Haluan kiittää kaikkia diplomityössäni avustaneita sekä minua kannustaneita henkilöitä. Erityiskiitos kuuluu työkavereilleni Risto Kalliolle ja Olavi Kummalle työn mitoituspäivästä lähtevästä ohjauksesta.

Kiitos kuuluu myös vaimolleni Sailalle kärsivällisyydestä ja jatkuvasta kannustuksesta niin opiskelun kuin diplomityönkin aikana.

Oulussa 7.11.2010

Tuomo Järvenpää

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

KÄSITTEET JA LYHENTEET

1	JOHDANTO.....	12
1.1	Tausta	12
1.2	Tavoite.....	12
2	TIETOMALLINTAMINEN JA SIIHEN SOVELTUVAT OHJELMISTOT .	13
2.1	Tietomallintaminen	13
2.2	Tietomallinnusohjelmistot	14
2.2.1	Autodesk Revit Structure	14
2.2.2	Tekla Structures	15
2.2.3	Nemetschek Allplan Engineering.....	16
2.2.4	Bentley Microstation ja PowerRebar	16
2.2.5	Yhteenveto ohjelmistoista	16
3	TIETOMALLIPERUSTEINEN SILLANSUUNNITTELU	17
3.1	Yleistä	17
3.2	3D-suunnittelujärjestelmä	17
3.2.1	Yleistä	17
3.2.2	Lähtötiedot	17
3.2.3	Tietomallipohjainen suunnitteluprosessi.....	17
3.3	Suunnitteluprosessin vaiheet.....	20
3.3.1	Yleistä	20
3.3.2	Esisuunnittelu.....	20
3.3.3	Yleissuunnittelu.....	20
3.3.4	Siltasuunnitelma.....	21
3.3.5	Rakennussuunnitelma	21
3.4	Sillan tietomallintamisen edut ja haitat	21
4	3D-TIETOMALLI SOVELLETTUNA KOHDESILTAAN	23
4.1	Yleistä	23
4.2	Geometria	23
4.2.1	Sillan geometria	23
4.2.2	Varusteet ja laitteet.....	26
4.2.3	Maastomalli ja tiegeometria.....	28
4.3	Objektien sisältämä tieto	30
4.4	Raudoitus	31
4.5	Piirustukset.....	35
4.5.1	Yleispiirustus.....	35

4.5.2	Mittapiirustus	36
4.5.3	Raudoituspiirustus.....	37
4.6	Luettelot	39
4.6.1	Materiaaliluettelot	39
4.6.2	Betoniteräsluettelo.....	40
4.7	Revit Structure -tietomallin muut hyödyntämismahdollisuudet	40
4.8	Revit Structure Bridge Extensions	41
4.9	Rakenteen analysointi ja mitoitus tietomallin avulla	42
4.10	Revitillä tehtävän sillasuunnittelun ohjeistusta.....	43
4.11	Havaitut puutteet ja kehitysideat.....	43
5	EUROKOODIEN MUKAINEN MITOITUS	45
5.1	Yleistä	45
5.2	Kuormitukset.....	45
5.2.1	Kuormakaavio LM1	45
5.2.2	Kuormakaavio LM2	46
5.2.3	Kuormakaavio LM3	46
5.2.4	Kaistajako.....	47
5.2.5	Rakenteiden omapaino	47
5.2.6	Viruma.....	47
5.2.7	Kutistuma	48
5.2.8	Maanpaineet	50
5.2.9	Liikennekuorman maanpaine	51
5.2.10	Lämpötilakuormat.....	51
5.2.11	Tuulikuormat	53
5.2.12	Törmäyskuormat	54
5.2.13	Tukien siirtyminen	54
5.2.14	Jarrukuorma ja poikittaiset kuormat	54
5.3	Kuormitusyhdistelmät	54
5.3.1	Kuormaryhmät	54
5.3.2	Kuormitusyhdistelmät	55
5.4	Murtorajatila.....	57
5.4.1	Taivutus ja normaalivoima.....	57
5.4.2	Leikkaus	58
5.4.3	Lävistys	59
5.5	Käyttörajatila.....	60
5.5.1	Halkeilun rajoittaminen.....	60
5.5.2	Jännitysten rajoittaminen.....	61
5.5.3	Taipumien rajoittaminen	61
5.6	Minimiteräsmäärät	61
6	KOHDESILLAN MITOITUS	63

6.1	Yleistä mitoituksista	63
6.2	Rakennemalli.....	64
6.2.1	Perusteita rakennemallin muodostamisesta.....	64
6.2.2	Käytetty laskentamalli.....	65
6.3	Kuormitukset.....	68
6.3.1	Liikennekuormat	68
6.3.2	Rakenteiden omapaino	69
6.3.3	Viruma ja kutistuma.....	69
6.3.4	Maanpaineet	69
6.3.5	Kokonaislämpötilan muutos ja lineaarinen lämpötilaero	70
6.3.6	Tuulikuormat.....	70
6.3.7	Törmäyskuormat	71
6.3.8	Tukien siirtyminen	71
6.3.9	Jarrukuorma ja poikittaiset kuormat.....	71
6.4	Kuormitusyhdistelmät	71
6.5	Voimasuureet	72
6.5.1	Tarkastelupisteet	72
6.5.2	Voimasuureet	72
6.6	Mitoitus	79
6.6.1	Materiaaliarvot	79
6.6.2	Taivutusterästen mitoitus ja tulosten vertailu.....	79
6.6.3	Leikkausmitoitus	81
6.6.4	Lävistys	82
6.7	Eri laskentamallien vertailua.....	83
6.7.1	Käytetyt laskentamallit.....	83
6.7.2	Tulokset.....	84
6.7.3	Tulosten analysointi	87
6.7.4	Yhteenvedo mallien käytettävyydestä.....	88
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	90
	LÄHDELUETTELO	92
	LIITTEET.....	95

KÄSITTEET JA LYHENTEET

BIM (Building Information Model)	Rakennuksen tietomalli ks. tietomalli
BrIM (Bridge Information Model)	Sillan tietomalli ks. tietomalli
CAD (Computer Aided Design)	Tietokoneavusteinen suunnittelu
CIS/2 (CIMSteel Integration Standards)	Teräsalan integroimisstandardin toinen versio
DGN (design)	Tiedostomuoto, jota tukevat tietyt CAD-ohjelmistot.
DWG (drawing)	Tiedostomuoto, jota käytetään kaksi- ja kolmiulotteisten CAD-tietojen tallentamiseen.
DXF (Drawing Exchange Format)	Autodeskin kehittämä tiedostomuoto tietojen yhteentoimivuuden varmistamiseksi AutoCAD-ohjelmiston ja muiden ohjelmien välillä.
Family objekti	Revit malliin tuotava ulkoinen objekti, joka voidaan siirtää projektista toiseen.
FEA (Finite element analysis)	Elementtimenetelmällä suoritettu laskenta. Käytetään usein termin FEM sijasta.
FEM (Finite element method)	Elementtimenetelmä. Numeerinen rakenteiden analysointimenetelmä.
IFC (Industrial Foundation Classes)	Tietomalleissa yleisesti käytetty olioperustainen tiedostomuoto, jonka on kehittänyt International Alliance for Interoperability (IAI) tarkoituksenaan varmistaa yhteistyö rakennusallalla. Tiedonsiirron spesifikaationa IFC määrittelee yksittäisistä sovelluksista riippumattoman muodon tuotetiedoille, jossa muodossa tiedot siirretään sovellusten kesken. IFC:llä siirretään ainoastaan oliotietoa eli 3D-geometria ja parametreja, sillä ei voida siirtää piirustusmuotoista tietoa. Standardin uusin versio on IFC 2x3. IFC 2x4 on beetatestausvaiheessa.
LandXML	Infra-alan avoin XML-pohjainen tiedonsiirtoformaatti
LM1	Standardin SFS-EN 1991-2 liikennekuorma-kaavio 1
LM2	Standardin SFS-EN 1991-2 liikennekuorma-kaavio 2
LM3	Standardin SFS-EN 1991-2 liikennekuorma-kaavio 3
Referenssi	Viite, viittaus. Mallintamisessa referenssillä tarkoitetaan esim. ohjelmaan tuotua viitemallia, jolla voidaan tarkastaa yhteentörmäyksiä ja rakenteiden tilanvarauksia.

Revit Structure	Autodeskin rakenteiden tietomallintamiseen tarkoitettu ohjelmisto.
Robot Structural Analysis	Autodeskin rakenteiden analysointiin ja mitoituskehitetty elementtimenetelmään perustuva ohjelmisto.
Solid	Tilavuusmalli, tilavuuskappale, jähmö (kielitoimiston suositus)
Tietomalli	Rakennuksen ja rakennusprosessin elinkaaren aikaisten tuotetietojen kokonaisuus. Esim. Tietyn rakennuksen tiedot tallennettuna IFC-formaatin mukaiseen siirtotiedostoon.
Tuotemalli	Synonyymi sanalle tietomalli.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Tietomallien käyttäminen siltojen suunnittelussa on yleistymässä ja Suomessa onkin viime vuosien aikana suunniteltu useita siltoja tietomallipohjaisesti. Ohjelmistona on useimmiten käytetty kotimaista Tekla Structures -ohjelmistoa, joka soveltuukin siltojen tietomallintamiseen jo verrattain hyvin. Siltojen tietomallintamisesta on tehty useita lopputöitä ja muita tutkimuksia. Lähes kaikki tutkimukset ovat liittyneet tavalla tai toisella edellä mainittuun ohjelmistoon. On olemassa muitakin sillansuunnitteluun soveltuvia tietomallinnustyökaluja, joiden soveltuvuutta Suomessa tyypillisille silloille ei ole vielä tutkittu. Kilpailu on aina tervettä eikä kehitystyötä pidä jättää yhden ohjelman harteille.

Sillan geometrisen mallin ja rakenneanalyysimallin yhdistäminen tehostavat sillan suunnittelua ja mahdollistavat rakenteen tehokkaan optimoinnin. Tulevaisuudessa ohjelmistot kehittyvät tähän suuntaan eli suunnittelija voi käyttää yhtä tietomallia rakenneanalyysin, mitoituksen ja suunnitteluasiakirjojen tuottamiseen. Tämä on jo mahdollista talo- ja teollisuusrakenteiden suunnittelussa, mutta sillansuunnittelussa tätä ei ainakaan vielä ole yleisesti hyödynnetty.

1.2 Tavoite

Diplomityön tavoitteena on tutkia, miten Autodeskin Revit Structure -ohjelmisto soveltuu betonisiltojen 3D-tietomallin luomiseen. Tarkoituksena on suunnitella ja mallintaa esimerkiksi Revit Structure -ohjelmalla. Tietomallin avulla pyritään tuottamaan kaikki sillan rakentamisessa vaaditut piirustukset ja raudoitusluettelot.

Työn esimerkksiltana on Liikenneviraston teräsbetonisen ulokelaattasillan tyyppipiirustussarjan yksi siltavaihtoehto tyyppimerkinnältään Bul14105. Sillan jännemitta on 14 m ja hyödyllinen leveys 10,5 m. Silta mitoitetaan työssä eurokoodeilla ja sen tyyppipiirustukset päivitetään eurokoodien vaatimusten mukaisiksi tietomallia hyödyntäen. Tietomallin avulla pyritään muodostamaan sillan yleispiirustus, kannen mitta- ja raudoituspiirustukset sekä raudoitusluettelot.

Liikennevirastolla on tekeillä sovellusohjeita ohjeistamaan siltojen suunnittelua eurokoodeilla. Tämän työn mitoitusosiossa käytetään näitä, osittain keskeneräisiä, sovellusohjeita hyväksi. Tyypisillan mitoituksessa saadaan arvokasta tietoa sovellusohjeiden kehittämiseksi.

Työssä tutkitaan myös voidaanko kyseisen laattasillan rakenneanalyysimallia luotaessa hyödyntää tietomallia eli saadaanko tietomallista muodostettua suoraan rakenneanalyysimalli ja mitä hyötyjä tästä yhteistoiminnasta saadaan.

Työssä selvitetään lisäksi, missä muissa toiminnoissa Revit Structure -tietomallia voidaan hyödyntää. Tutkittavia asioita ovat aikataulutus, siltamallin siirtäminen väyläsuunnitteluun ja eri lähtötietojen hyödyntäminen.

2 TIETOMALLINTAMINEN JA SIIHEN SOVELTUVAT OHJELMISTOT

2.1 Tietomallintaminen

Tietomalli on tuotteen, eli rakennuksen tai infrakohteen, ja rakennusprosessin koko elinkaaren aikaisten tietojen kokonaisuus digitaalisessa muodossa. Tietomalli luodaan tyypillisesti kolmiulotteisella mallinnusohjelmistolla, jotta tiedon hyödyntäminen on helppoa. [1]

Perinteisessä 2D suunnittelussa muodostetaan viivoja ja muita graafisia elementtejä, joiden avulla rakenteista muodostetaan kuvantoja, esimerkiksi leikkauskuvanto. Kuvanto ei itsessään sisällä informaatiota, vaan ihminen tulkitsee ryhmitellyt piirustusobjektit tietosisällöksi. Tämän takia esimerkiksi FEM-ohjelmisto ei voi ymmärtää tätä suunnitelmaa suoraan, vaan tieto täytyy syöttää ohjelmaan uudestaan. Tietoa myös häviää suunnitteluprosessin aikana, esimerkiksi siirryttäessä suunnittelu-vaiheesta toiseen. [1]

Tietomalli sisältää tuotteen muodon kolmiulotteisesti määriteltynä ja lisätietoja tuotteen, siihen liittyvien prosessien ja rakennusosien ominaisuuksista. Tällöin rakenteesta voidaan muodostaa helposti kuvantoja sekä erilaisia kustannuslaskelmia, aikatauluja ja simulaatiota. Perinteisillä suunnittelumenetelmillä niiden luominen vaatisi paljon esivalmisteluja, tiedonkeruuta ja tietojen yhdistelyä. Mallista voidaan tuottaa erilaisia dokumentteja joko automaattisesti tai puoliautomaattisesti. Tietomalli itsessään varmistaa sen, että tuotetut dokumentit ovat keskenään ristiriidattomia. Tieto tallennetaan tietomalliin vain yhteen kertaan. Erityyppiset tulostukset ja näkymät tuotetaan samasta tietomallista eli tietomalliin tehdyt muutokset päivittyvät kaikkiin piirustuksiin, laskelmiin ja kuvantoihin. Perinteisessä suunnittelussa vaihtunut tieto olisi pitänyt päivittää manuaalisesti kaikkialle. Eri suunnittelualueiden tuottamien mallien yhteensopivuus varmistetaan yhdistelmämallin avulla ja mallien välinen tiedonsiirto hoidetaan yhteisellä tiedonsiirtomuodolla. Talonrakennuksessa tähän on kehitetty IFC-formaatti ja infrapuolella LandXML-formaatti. [1]

Tietomallinnus parantaa suunnittelun laatua, vähentää virheitä ja rakentamisen aikaisten muutostöiden tarvetta, parantaa suunnitelmien havainnollisuutta 3D-mallien myötä, tehostaa tehtävä-, aikataulu- ja kustannushallintaa sekä lisää elinkaaritietojen hallintaa ja käyttöä. Yhteistyö eri suunnittelijoiden välillä on helppoa tietomallin avulla. Tietomalli mahdollistaa myös nopeamman piirustusten tuottamisen, rakenteen parametrisoinnin sekä eri rakennevaihtojen helpomman vertailun. Tietomallin avulla mallintaminen, suunnittelu ja analysointi voidaan yhdistää ja rakenteiden optimointi on helpompaa. [2; 3]

Tietomallintamisen muita etuja ovat: [4]

- Suunnitelmien yhteensovitus helpottuu ja ristiriidat vähenevät.
- Kokonaissuunnittelu-aika tehostuu eri alojen suunnittelun yhtäaikaistumisen ansiosta.
- Suunnitelmien muunneltavuus paranee.
- Suunnitteluvirheet havaitaan ja korjataan nopeasti suunnitteluvaiheessa.
- Havainnollisuus ja ymmärrettävyys helpottuvat.
- Voidaan varmistua, että suunnitellut raudoitukset mahtuvat niille kuuluville paikoilleen, tarvittaessa voidaan tutkia myös niiden asennettavuutta.

- Mallista voidaan antaa xyz-koordinaattipohjaista tietoa työmaalle sekä digitaalista tietoa tuoteosa- ja elementtivalmistajan tarpeisiin.
- Rakenteen ylläpito- ja muutostehtävissä voidaan hyödyntää tietomallia.
- Tiedonkulku osapuolten välillä paranee.
- Rakennesuunnittelijan kustannustietous paranee.

2.2 Tietomallinnusohjelmistot

Tietomallintamiseen soveltuvia ohjelmistoja on markkinoilla kymmeniä. Suomessa yleisin ohjelmisto on kotimaisen Tekla Oyj:n valmistama Tekla Structures. Yhtiö onkin tehnyt alalla aktiivista kehitystyötä jo useiden vuosien ajan. Työssä kerrotaan yleisimmistä tietomallinnusohjelmistoista, joilla betonisiltojen tietomallinnus voisi olla mahdollista siinä määrin, että ainakin rakenteen mitta-, kokoonpano- ja raudituspiirustukset voidaan tuottaa. Ohjelmien tiedot ovat peräisin ohjelmistovalmistajien kotisivuilta eli ohjelmien ominaisuudet esitellään vain pintapuolisesti. Syvempi ohjelmien tutkiminen voisi paljastaa monenkin ohjelman soveltumattomuuden juuri siltojen tietomallintamiseen.

Sillansuunnittelu on teollisuus- ja talorakenteisiin verrattuna hyvin marginaalinen suunnitteluala. Tästä syystä tietomallinnusohjelmistot on kehitetty lähinnä talo- ja teollisuusrakenteiden suunnittelua silmälläpitäen. Siltojen mallintamisen perusongelmana on geometrian hallinta. Silloissa käytetään usein hyvinkin monimutkaista geometriaa, joka poikkeaa suuresti talorakenteissa tyypillisestä suorakaiteen muodosta. Jos halutaan yleispätevä ohjelmisto kaikkien siltojen mallinnukseen, niin ohjelmalla täytyy pystyä mallintamaan myös vaikeammat kansigeometriat. Monella ohjelmalla on ongelmia esimerkiksi kaksoiskaarevan eli samanaikaisesti pysty- ja vaakakaarevan tai muuttuvapoikkileikkauksisen siltakannen mallintamisessa. Ongelmia on myös sillan raudituksen mallintamisessa sillä sen mallintaminen on sitä vaikeampaa, mitä monimutkaisempi sillan geometria on.

Siltojen tietomallintamista on kokeiltu ja kehitetty eri kehityshankkeissa ainakin MicroStation ja Tekla Structures -ohjelmistoilla. Tässä työssä keskitytään Revit Structure -ohjelman ominaisuuksien tutkimiseen siltojen tietomallintamisen kannalta. Revit Structuurella on tehty siltojen yleissuunnitelmatasoisia tietomalleja ainakin Virossa Rõmeda-Haljala tieprojektin yhteydessä [5]. Ohjelman soveltuvuus siltojen yleissuunnitteluun on siis jo osoitettu.

Ohjelmistojen välinen vertailu on vaikeaa ilman ohjelmistojen asentamista ja niihin kunnollista perehtymistä. Seuraavassa onkin tyydytty esittämään jokaisen ohjelmiston ja kyseistä ohjelmistoa valmistavan yrityksen keskeiset tiedot. Lähdeluettelossa on linkki jokaisen ohjelman kotisivuille, josta voi käydä lukemassa lisätietoja.

2.2.1 Autodesk Revit Structure

Autodesk on monikansallinen ohjelmistoyritys, joka on keskittynyt kehittämään 2D- ja 3D-suunnitteluohjelmistoja eri tekniikan aloille. Yrityksen lippulaivaohjelmistona toimii AutoCAD. Autodesk on perustettu vuonna 1982 ja yhtiöllä on yli 7000 työntekijää ympäri maailman. Yhtiön pääkonttori sijaitsee Yhdysvalloissa ja yhtiön liikevaihto vuonna 2009 oli 2,3 miljardia Yhdysvaltain dollaria. [8]

Revit Technology Corporation -niminen yritys aloitti Revitin kehittämisen vuonna 2000. Autodesk osti yrityksen itselleen vuonna 2002. Tästä lähtien Revit-ohjelmisto on kuulunut osaksi Autodeskin ohjelmistovalikoimaa. Revit (Rev It = Revise Instantly) on alun perin kehitetty arkkitehtien työkaluksi, mutta vuonna 2005 ohjelmasta räätälöitiin

oma versio myös rakennesuunnittelijoille. Revit mainostaa itseään ainoana täysin parametrisena BIM työkaluna. [9]

Revit tuoteperheeseen kuuluu Revit Structuren lisäksi Revit Architecture arkkitehtisuunnitteluun ja Revit MEP LVI- ja sähköjärjestelmien sekä muun talotekniikan suunnitteluun. Kaikissa Revit tuoteperheen ohjelmistoissa on samat perusominaisuudet, mutta jokaiseen ohjelmistoon on lisätty kyseistä suunnittelualaa helpottavia lisäominaisuuksia. Kaikkien Revit ohjelmien mukana toimitetaan lisäksi kyseiselle suunnittelualalle räätälöity AutoCAD versio. Revit toimii AutoCADin kanssa yhteistyössä siten, että suunnittelija voi halutessaan tuottaa esimerkiksi detaljipiirustuksia räätälöidyllä AutoCADilla käyttäen Revit mallia lähtötietona.

Revit-ohjelmistolla onnistuu kaikki tietomallintamiseen liittyvät keskeiset toimenpiteet. Ohjelman tärkeimmät ominaisuudet tämän työn kannalta ovat [6]:

- Kaksisuuntainen linkki yleisimpien analysointiohjelmien kanssa
- Usean käyttäjän tuki
- Piirustusten ja detaljien tuottaminen
- Maaston mallintaminen ja väylämallin liittäminen projektiin
- Raudoituksen mallintaminen
- Materiaali- ja teräsluettelojen tuottaminen
- Usean tiedostoformaatin tuki: DWG, DXF, DGN, IFC, CIS/2
- Monen materiaalin tuki: teräs, paikallavalubetoni, betonielementti, tiili, puu
- Parametriset komponentit
- Mallien tarkastelu internet-selaimella
- Aikataulutus

Revit Structure -ohjelmaan on saatavissa erillinen Revit Extensions -lisäosa, joka sisältää pieniä apuohjelmia täydentämään alkuperäisen Revitin ominaisuuksia. Yksi näistä Revit Extensions -paketin mukana tulevista ohjelmista on Bridges-lisäosa, joka sisältää siltojen mallintamisessa helpottavia työkaluja. Lisäosan avulla voidaan helposti tuottaa ohjelmaan valmiiksi parametrisoitujen siltojen 3D-malleja. Bridges-lisäosaa käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.7.

2.2.2 Tekla Structures

Tekla Oyj on kansainvälisesti toimiva ohjelmistoyritys, jonka mallipohjaiset ohjelmistot on kehitetty rakentamisen, energian jakelun, yhdyskuntatoimen ja vesihuollon suunnittelijoille. Yhtiö on perustettu vuonna 1966 ja sillä on toimistoja 15 maassa. Yhtiön pääkonttori on Suomessa. Konsernin palveluksessa työskentelee yli 460 henkilöä. Teklan liikevaihto oli vuonna 2009 noin 50 miljoonaa euroa. [10]

Tekla Structures on Teklan rakennesuunnittelijoille tarkoitettu ohjelmisto. Ohjelmisto on saatavilla seuraavissa rakentamisen toimialoja vastaavissa ohjelmistokokoonpanoissa: steel detailing, precast concrete detailing, reinforced concrete detailing, engineering, construction management, project manager ja viewer. Tekla Structuresilla voidaan luoda ja hallita tarkasti detaljoituja, rakentamisen prosesseja tukevia kolmi- ja neliulotteisia rakennemalleja. Tekla-mallia voi hyödyntää rakennusprosessin kaikissa vaiheissa luonnossuunnittelusta valmistukseen, pystytykseen ja rakentamisen hallintaan. [7]

Tekla on ollut mukana Älykäs silta ja 5D-SILTA projekteissa jo usean vuoden ajan [14; 15]. Tällä hetkellä Tekla Structures onkin kehittynein siltojen tietomallintamiseen soveltuva ohjelmisto. Ohjelmalla on tehty useita pilottisiltoja ja ohjelman kehitys on jo

niin pitkällä, että osa siltasuunnittelijoista on ottanut ohjelman päivittäiseen käyttöön. Ehkä näyttävin Tekla Structuresilla mallinnettu silta on Helsinkiin rakennettava Crusellin silta. 5DSILTA -projektiin liittyvässä Custom Components -projektissa Tekla Structures -ohjelmistoon tehtiin erilaisia silloille tyypillisiä parametrisia komponentteja kuten kaiteita, valaisinlaitteita ja siirtymälaattoja. Nämä komponentit nopeuttavat suunnittelua ja ne lisäävät ohjelmiston soveltuvuutta siltojen suunnitteluun entisestään.

2.2.3 Nemetschek Allplan Engineering

Nemetschek Group on vuonna 1974 perustettu kansainvälinen ohjelmistoalan yritys, jonka pääkonttori on Belgiassa. Yhtiö on Euroopan suurin rakennusalan ohjelmistokehittäjä. Yhtiöllä on noin tuhat työntekijää ja liikevaihto oli vuonna 2009 135 miljoonaa euroa. Vuonna 2008 perustettu Nemetschek Allplan GmbH on Nemetschek Groupin tytäryritys, joka on keskittynyt Allplan tuoteperheen ohjelmistoihin. Nemetschek Allplanilla on noin 400 työntekijää. [11]

Allplan Engineering kuuluu Allplan tuoteperheeseen, joka sisältää rakennusalan ohjelmistoja mm. arkkitehti- ja rakennesuunnitteluun sekä kustannuslaskentaan. Allplan Engineering on integroitu rakennesuunnitteluohjelmisto, joka sisältää kaiken tarvittavan CAD-suunnittelusta lopullisten rakenne- ja raudoituspiirustusten tuottamiseen. Ohjelmalla onnistuu myös erittäin monimutkaisten raudoitusten mallintaminen ja raudoituspiirustusten tuottaminen. Ohjelmassa on kaikki tietomallintamisen keskeiset ominaisuudet mukana. Ohjelmisto on erittäin suosittu asemassa erityisesti Saksassa ja sen naapurimaissa.

2.2.4 Bentley Microstation ja PowerRebar

Bentley Systems Oy on vuonna 1984 perustettu kansainvälinen ohjelmistoalan yritys, jonka pääkonttori sijaitsee Yhdysvalloissa. Yhtiöllä on 2800 työntekijää ja sen liikevaihto on noin 450 miljoonaa Yhdysvaltain dollaria. [12]

MicroStation on Bentley Systemsin lippulaivaohjelmisto. Suomalainen Terrasolid Oy on kehittänyt ohjelmaan BridgeModeler lisäosaa, jolla siltojen mallintaminen helpottuu. PowerRebar on itsenäinen ohjelma raudoituksen tekemiseen. Sillä voidaan mallintaa MicroStation ohjelmalla luotuun kappaleeseen raudoitus sekä tuottaa raudoituspiirustukset ja -luettelot. Ohjelma soveltuu kuvien perusteella hyvinkin monimutkaisten raudoitusten mallintamiseen. [12]

2.2.5 Yhteenveto ohjelmistoista

Markkinoilla on suhteellisen laaja valikoima erilaisia ohjelmistoja, jotka vaikuttavat soveltuvan betonisiltojen tietomallintamiseen. Kriteerinä ohjelmia esitellessä oli se, että ohjelmilla täytyy pystyä mallintamaan sillan geometrian lisäksi myös raudoitus. Ilman tätä kriteeriä soveltuvien ohjelmien määrä olisi ollut moninkertainen. Kaikki ohjelmat mainostivat itseään BIM-ohjelmistoina eli jokaisella pystyy tekemään rakenteiden tietomalleja ainakin jossain määrin. Ohjelmien ominaisuudet vaihtelevat kuitenkin erittäin paljon. Jokaisella ohjelmalla voi todennäköisesti tehdä ainakin hyvin yksinkertaisen siltarakenteen tietomallin. Mitä monimutkaisempi geometria sillassa on, sitä monipuolisempia mallinnustyökaluja ohjelmilta vaaditaan.

3 TIETOMALLIPERUSTEINEN SILLANSUUNNITTELU

3.1 Yleistä

Kiinnostus siltojen tietomallintamista kohtaan on kasvanut voimakkaasti viime vuosina. Aiheeseen liittyen on tehty useita kehitysprojekteja, joissa on tutkittu tietomallin käyttöä ja niiden tuomaa hyötyä sillansuunnittelussa, mittauksissa ja laaduntarkastuksessa. Kehitysprojekteja ovat olleet muun muassa Älykäs silta, 5D-SILTA ja 5D-SILTA2 [14, 15]. Kiinnostus tietomallintamista kohtaan näyttää jatkuvan, sillä juuri päättyvälle 5D-SILTA2 projektille ollaan kehittämässä jo jatkoprojektia 5D-SILTA3.

Liikennevirasto tekee parhaitaan ohjeita tietomalliperusteista sillansuunnittelua varten. Ohjeita tarvitaan yhtenäisten toimintatapojen luomiseksi mallien käytössä, suunnittelussa, työmaavaiheessa ja ylläpidossa. Yhteisiä toimintatapoja tarvitaan, sillä ne edistävät uuden teknologian käyttöönottoa suunnittelijoiden, urakoitsijoiden ja viranomaisten yhteistyössä. Ohjeessa kerrotaan ne asiat, jotka tietomalliperusteisessa hankkeessa on sovittavat ja selvitettävä. Sovittavia asioita ovat muun muassa mallinluovutukseen liittyvät pelisäännöt ja lomakepohjat, jotta mallin käyttöön liittyvät asiat tulevat selväksi eri osapuolille. [13]

3.2 3D-suunnittelujärjestelmä

3.2.1 Yleistä

Älykäs silta -projektissa on kuvattu sillan suunnittelu-, mittaus- ja laadunvalvontaprosessin tulevaisuuden 3D-toimintamalli. Raportissa kuvataan muun muassa mallintamisprosessin vaatimat lähtötiedot sekä mallintamisen tavoitteet ja mallintamiseen liittyvää problematiikkaa. Raportissa annetaan myös ohjeistusta sillan ja sen ympäristön 3D-mallin muodostamisesta. [15]

3.2.2 Lähtötiedot

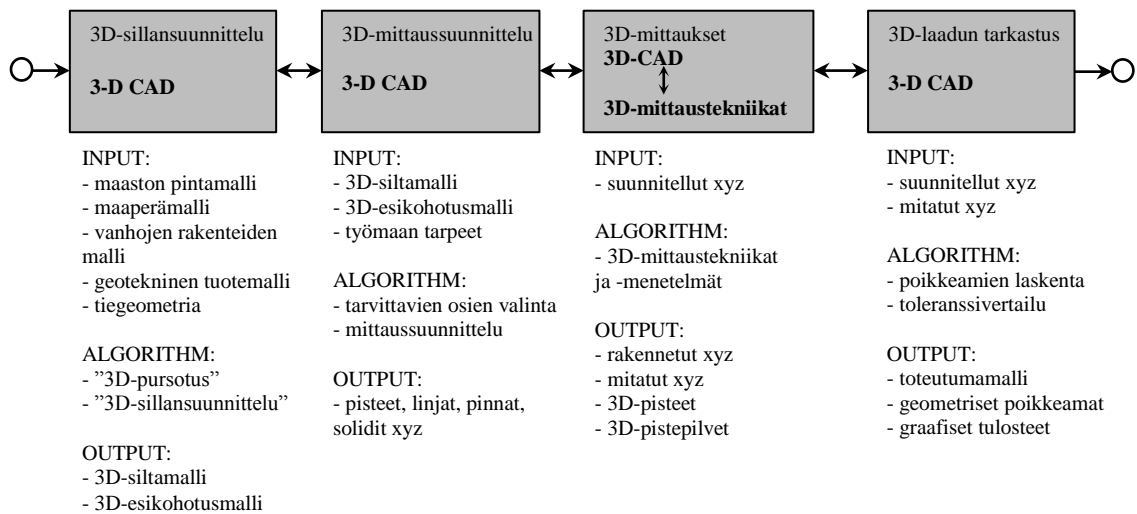
Tarkkojen ja kattavien geometrialähtötietojen saanti luo edellytykset sillan suunnittelun ja rakentamisen onnistumiselle. Lähtötietojen lukeminen suoraan kolmiulotteisesti toimivaan suunnitteluohjelmaan luo perinteisiin menetelmiin nähden tehokkaammat ja virheettömämmät onnistumismahdollisuudet suunnittelussa. [15]

Sillan suunnittelu alkaa lähtötietojen hankinnalla, jossa tavoitteena on saada riittävät lähtötiedot sillan mallintamista varten. Peruslähtötiedoiksi tarvitaan ainakin siltapaikan maastomalli, kolmiulotteinen tiegeometria sekä geotekninen tietomalli. Maastomalli sisältää maaston pintamallin sekä maaperämallin, joka kuvaa maakerroksia ja niiden rakennusteknisiä ominaisuuksia. Tiegeometriaan sisältyy tieto muun muassa mittalinjoista, taitelinjoista, luiskista, hyödyllisen leveyden reunalinjoista sekä tierakenteiden alapinnoista. Geotekninen tietomalli sisältää tiedot kairaustuloksista, kallionpinnasta, maakerroksista ja paalujen arvioidusta tunkeutumistasoista. Lisäksi tarvitaan tiedot siltapaikan nykyisistä rakenteista, putkista ja kaapeleista. Nämä tiedot esitetään niin sanotussa vanhojen rakenteiden mallissa. [16; 15]

3.2.3 Tietomallipohjainen suunnitteluprosessi

Sillan alus- ja päällysrakenteet on suunniteltava tarkasti sillan tiegeometrian mukaisesti ja siihen liittyväksi yhdeksi osaksi. Geometrian hallinta onkin perusedellytys siltojen suunnittelun ja rakentamisen onnistumiselle. Sillan 3D-geometrian muodostamisessa ja mittojen määrittämisessä hyödynnetään mahdollisimman monipuolisesti lähtötietoina saatavia tien-, maaston- ja maaperän kolmiulotteisia tietomalleja. [15]

Kuvassa 1 on esitetty mallintamalla tehtävä sillansuunnittelu- ja mittausprosessi, jossa käytetään hyväksi saatuja sähköisiä kolmiulotteisia lähtötietomalleja. Kuvassa INPUT tarkoittaa tarvittavia lähtötietoja ja ALGORITHM prosessin vaiheessa käytettävää toimintaa tai menetelmää. OUTPUT tarkoittaa prosessin tulosta. Prosessin eri vaiheet ovat siltasuunnittelu, mittaussuunnittelu, mittaukset ja laadun tarkastus.



Kuva 1. Malli siltojen tulevaisuuden 3D-suunnittelu ja -mittausprosessista [15].

3D-siltasuunnittelu

Sillan vaadittavaan pituuteen vaikuttavat muun muassa maaston pinnanmuodot, tiegeometria sekä sillan alittavan väylän vapaan aukon vaatimukset. Sillan pituutta määriteltäessä käytetään hyväksi tien ja maaston kolmiulotteisia malleja. Näiden mallien avulla voidaan havainnollisesti määrittää sillan pituus siten, että tarvittavat maaluiskat sekä siipi- ja tukimuurit saadaan hyvin rakennettua. [15]

Alusrakenteiden suunnittelussa hyödynnetään kolmiulotteista geoteknikon toimittamaa maaperämallia. Mallia voidaan hyödyntää esimerkiksi määriteltäessä paalujen pituuksia, sillä malli sisältää tiedon paalujen tavoitetasoista. Alusrakenteiden suunnittelussa kannattaa mallintaa myös tarvittavat kaivannot. Kaivantojen mallintaminen helpottaa sillan määrälaskentaa ja mallia voidaan käyttää tarvittaessa myös työkonlohjauksessa. [15]

Sillan mallintaminen tapahtuu parametrusten profiilien, tyyppikappaleiden (poikkileikkausten muodot, päätypalkit, siipimuurit, reunapalkit) ja tyyppielementtien (pinta-vesiputket, tippuputket, siirtymälaatat, kaiteet) avulla. 3D-mallinnustyökaluja tarvitaan sillan poikkileikkauksen ja reunapalkin määrittämiseen, kansirakenteen pursotustyyppiin mallintamiseen väylägeometrian avulla ja luiskien mallintamiseen. Mallinnustyökaluja käytetään myös siipimuurien sovittamiseen luiskiin ja erilaisten aukkovaatimusten tarkasteluun. Useimmat mallintamiseen liittyvät asiat, kuten aukkovaatimukset, luiskakaltevuudet ja siipimuurien pituudet on mahdollista automatisoida. 3D-mallintaminen onkin yksinkertaisimmillaan tilavuusmallin luomista poikkileikkausta pursottamalla. [16]

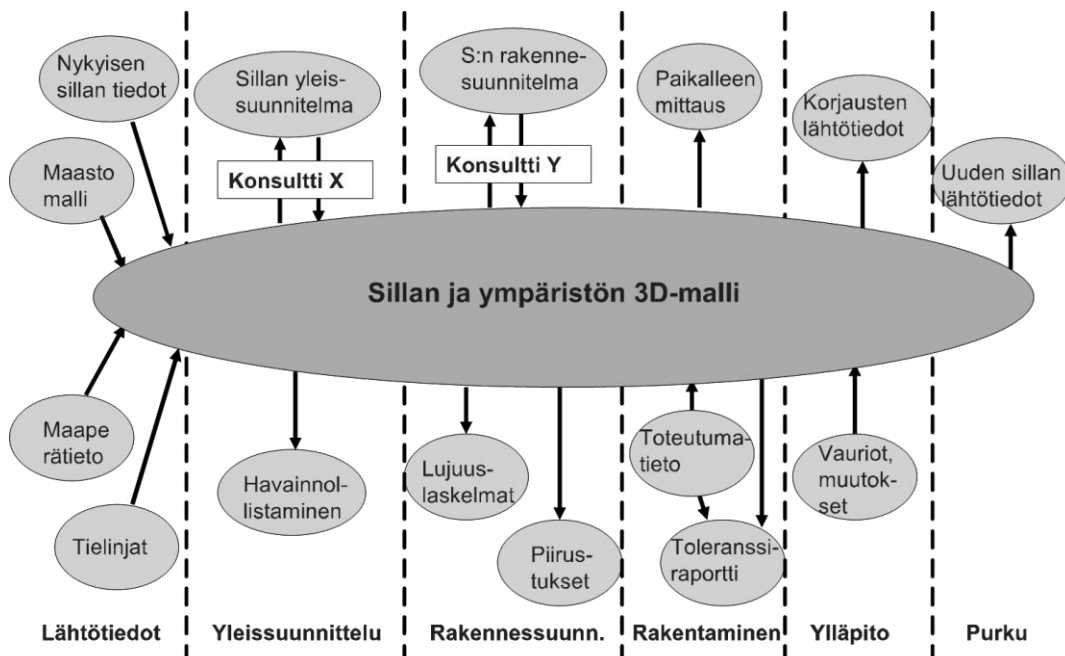
3D-suunnittelun tuloksena saadaan muodostettua tietomalli. Tietomalli sisältää geometria- ja määrätiedon lisäksi myös materiaalitietoa. Tietomalliin voidaan yhdistää erilaista rakentamista ohjaavaa tietoa kuten betonin lujuus ja pakkasenkestävyys, teräsosien laatu ja pintakäsittely, muotitettavat pinnat, vesieristysrakenne, pintarakenteet ja päällysrakenne, rakenteen muodonmuutoksesta johtuva esikohotusmuoto ja laadunvarmistus- ja toleranssijärjestelmää vastaavat attribuutit. Erilaisilla sovellustyyöka-

luilla tietomallista voidaan tulostaa eri osapuolien tarvitsemaa tietoa. Urakoitsijalle voidaan tuottaa esimerkiksi taulukkolaskentaan pohjautuvaa luettelotietoa kustannuslaskennan ja työsuunnittelun pohjaksi. Mallista voidaan helposti tuottaa myös sillan paikalleen mittausta varten tarvittavia mittapisteluetteloita suoraan geometrian avulla. Teräsosien valmistukseen käytettäviä numeerisia työstökoneita tai työmaalla käytettäviä automatisoituja työkoneita varten voidaan tuottaa tarvittavat koneohjausmallit. Tietomalli voidaan edelleen siirtää muihin tietomallinnusohjelmistoihin tai esimerkiksi rakennelaskentaan. [16; 15]

Mittaussuunnittelu, 3D-mittaukset ja 3D-laadun tarkastus

Tietomallin sisältämä geometrinen malli voidaan siirtää yleisimpiin työmaalla käytettäviin mittauslaitteisiin. Geometrinen malli korvaa erikseen tehtävän mittaus-suunnitelman. Tietomallista voidaan myös erottaa työnaikaiset esikohotusmallit, joita voidaan käyttää esimerkiksi muottisuunnitelman pohjana. Työmaan mittausteknikko voi tarpeen tullen täydentää geometrsta mallia esimerkiksi telineiden vaatimalla esikohotuksella. Hän voi myös poimia mallista haluamansa pisteen koordinaatin suoraan mittalaitteeseen. Muotin ja valmiin sillan geometrian tarkastuksessa käytetään kehittyneitä 3D-mittaustekniikoita kuten takymetriä ja laserkeilausta. Mittauksen tuloksena saadut pisteet siirretään analysointiohjelmaan, jossa mittauksia verrataan suunnitelmanmalliin. Ohjelma laskee mallien poikkeamat automaattisesti. Mittauksista muodostetaan myös sillan toteutumamalli, jota voidaan käyttää hyväksi sillan ylläpidossa. [15]

Kuvassa 2 on esitetty 3D-mallin hyödyntämismahdollisuuksia sillan elinkaaren aikana. 3D-tietomalliin lisätään tietoa sillan elinkaaren aikana, jolloin voidaan jo puhua sillan 5D-tietomallista. Malli voidaan hyödyntää koko sillan elinkaaren ajan ensimmäisistä suunnitelmista purkuun.



Kuva 2. 3D-mallin hyödyntämismahdollisuuksia sillan elinkaaren aikana [15].

3.3 Suunnitteluprosessin vaiheet

3.3.1 Yleistä

Sillansuunnittelun päävaiheet liittyvät vastaaviin tiensuunnittelun vaiheisiin. Nämä vaiheet ovat esisuunnittelu, yleissuunnittelu, siltasuunnitelman laatiminen ja rakennussuunnittelu. Yksittäisen sillan osalta suunnitteluvaiheiden laajuus määräytyy sillan koon ja hankkeen merkittävyyden mukaan. Isommissa hankkeissa kaikki edellä mainitut vaiheet käydään läpi, mutta pienemmissä yksittäisissä silloissa osa suunnitteluvaiheista voidaan tehdä yhtä aikaa. Sillan käyttöänsä aikana tapahtuva suunnittelu on korjaussuunnittelua. [17]

Seuraavaksi käydään läpi sillan suunnitteluprosessin eri vaiheet perinteisen sillansuunnittelun sekä tietomalliperusteisen sillansuunnittelun kannalta. Perinteisen suunnitteluprosessin kuvaus on peräisin Siltojen suunnitelmat -ohjeesta [17] ja vastaavat tietomalliperusteisen suunnittelun vaatimukset on esitetty Siltojen tietomalliohjeet -julkaisun esiversiossa [13].

3.3.2 Esisuunnittelu

Sillan esisuunnittelu on maankäyttöön ja liikenneväylän tarveselvitykseen liittyvä suunnitteluvaihe. Esisuunnittelussa selvitetään eri periaateratkaisuihin ja liikenneväylä-vaihtoehtoihin kuuluvien siltojen rakentamista ja niiden vaikutusta ympäristöön ja hankkeen kustannuksiin. Esisuunnittelua ei yleensä tarvita, jos sillan paikka on määrätty ja siltatyyppi on tavanomainen. Esisuunnittelun tavoitteena on selvittää eri väylien linjausvaihtoehtojen kannattavuus sekä löytää kokonaisuuden kannalta paras ratkaisu. Esisuunnittelussa luodaan lähtökohdat sillan yleissuunnittelua varten. Esisuunnittelua varten tarvitaan lähtötietoja siltapaikasta. Esisuunnittelun tuloksena laaditaan yleensä esisuunnitelmaraportti, luonnospiirustukset merkittävimmistä silloista ja muista rakenteista, kustannusarviot, havainnekuvat ja yhteenvedotaulukko silloista kussakin linjausvaihtoehdossa. [17]

Siltavaihtoehtoista ei yleensä tässä vaiheessa laadita malleja. Maastomallin, väylämallin ja siltavaihtoehtoista tehtyjen mallien avulla voitaisiin kuitenkin jo esisuunnitteluvaiheessa vertailla eri vaihtoehtoja havainnollisemmin. Esisuunnitteluvaiheen 3D-malleja ja havainnekuvia tehdään yleensä pelkästään merkittävimmistä kohteista. Monelta ohjelmistolta vaaditaan kuitenkin vielä kehittämistä ennen kuin väylä- ja siltamallien yhdistäminen on sujuvaa. Kehitystyötä tehdään muun muassa LandXML-tiedonsiirtoformaatin parissa. [13]

3.3.3 Yleissuunnittelu

Yleissuunnittelussa tutkitaan esisuunnittelun ja alustavien sillansuunnittelun lähtötietojen perusteella siltapaikalle sopivia siltavaihtoehtoja. Perustamisratkaisut määritetään alustavien pohjatutkimusten perusteella. Eri siltavaihtoehtoista laaditaan luonnokset esittelyä varten. Tavoitteena on laatia merkittävistä siltakohteista vaihtoehtoja ja tutkia rakentamisen vaikutuksia ympäristöön. Yleissuunnittelussa määritetään myös ulkonäkökysymyksiä ja päämittoja havainneaineistoa varten. Yleissuunnitelman tuloksena laaditaan muun muassa alustava pääpiirustus, kustannusarvio sekä havainnekuvat ja muu havainneaineisto. Perinteisesti yleissuunnittelu tehdään piirtämällä alustava yleispiirustus, sivukuva ja poikkileikkaus kaksikulotteisena tasopiirustuksena. [17]

Jos yleissuunnittelu tehdään mallintamalla, niin lähtötietoina voidaan käyttää väyläsuunnittelijalta saatua tiegeometriaa sekä esimerkiksi laserkeilattua maastomallia.

Väylä- ja siltamallit yhdistämällä ja mallista tuotettavalla visuaalisella aineistolla helpotetaan eri siltavaihtoehtojen tutkimista ja päätösten tekoa. Sillan 3D-mallista voidaan tuottaa muun muassa erilaisia 3D-esityksiä sekä havainnekuvia mallin liittymisestä ympäristöön. Havainnekuvien laatu ja käyttökelpoisuus riippuvat käytettävän ohjelman ominaisuuksista. [13]

Yleissuunnitteluvaiheessa sillasta mallinnetaan vähintään näkyvissä olevat pinnat, varusteet ja laitteet. Raudoitusta ei pääsääntöisesti mallinneta, mutta alustavat raudoitusmäärät voidaan ilmoittaa osien määrätietoina. Muitakaan piiloon jääviä rakenneosia ei vielä pääsääntöisesti mallinneta. Mallin hyötyarvo on kuitenkin suurempi, jos alusrakenteet ja päällysrakenteen piiloon jäävät osat mallinnetaan jo tässä vaiheessa. Parhaimmillaan mallissa on mukana myös väylä- ja maastotiedot vähintään pintamalleina mukaan lukien sillan päätyluiskat ja keilat. [13]

3.3.4 Siltasuunnitelma

Siltasuunnitelman laatiminen on tiehankkeen tiesuunnitelman laatimiseen ja vesistösilttojen vesilainmukaiseen käsittelyyn liittyvä suunnitteluvaihe. Sillan rakentamiselle haetaan tässä vaiheessa tarvittavat luvat. Tutkituista vaihtoehtoista valitaan hallinnolliseen käsittelyyn tavallisesti yksi vaihtoehto, jota kutsutaan siltasuunnitelmaksi. Siltasuunnitelmaan kuuluu muun muassa pääpiirustus, määräluettelo, kustannusarvio, toteutustapaehdotus ja havainnekuvat. Rakenteiden päämitat määritetään rakennelaskelmilla sellaisella tarkkuudella, etteivät muutokset rakennussuunnitelmaa tehtäessä vaikuta merkittävästi sillan kustannuksiin. Pääpiirustuksessa esitetään sillan ulkonäkö, päämitat sekä sovittaminen ympäristöön. [17]

Sillan tietomalli on siltasuunnitelmavaiheessa sisältövaatimuksiltaan laajempi kuin yleissuunnitelmavaiheessa. Viimeistään tässä vaiheessa sillan alus- ja päällysrakenteet mallinnetaan kokonaisuudessaan. Varusteet ja laitteet mallinnetaan tarkoituksenmukaisella tarkkuudella. Raudoituksia ei yleensä vielä mallinneta. Rakenneseaobjektien tietokenttiin voidaan kuitenkin syöttää alustavat teräsmäärät. Pieniä rakennedetaljeja ei vielä mallinneta. Edellisen vaiheen maasto- ja väylämallia voidaan tarkentaa esimerkiksi maaperätiedoilla, rakennekerroksilla ja tiedoilla kaivurajoista. [13]

3.3.5 Rakennussuunnitelma

Sillan rakennussuunnitelma laaditaan hyväksytyn siltasuunnitelman pohjalta siten, että silta voidaan rakentaa tämän suunnitelman perusteella. Rakennussuunnitelmassa annetaan sillan laatuvaatimukset sekä esitetään rakenteiden mitat ja rakennusaineet yksikäsitteisesti. Lopullisessa rakennussuunnitelmassa esitetään rakenteet sellaisina kuin ne toteutetaan. Sillan rakennussuunnitelma sisältää muun muassa yleispiirustuksen, rakennepiirustukset, määräluettelot ja kustannusarvion. [17]

Sillasta tehdään rakennussuunnitelmavaiheessa täydellinen tietomalli ottaen huomioon hankekohtaisesti sovitut poikkeukset. Silta mallinnetaan kokonaisuudessaan siten, että se sisältää kaikki varusteet, laitteet, raudoitukset ja detaljit. Rakennussuunnitelman edellytetään pääsääntöisesti sisältävän sillan lähiympäristön maasto- ja väylämallin osana sillan tietomallia käytettävän ohjelmiston ominaisuuksien puitteissa. [13]

3.4 Sillan tietomallintamisen edut ja haitat

Ari Kouvalainen on käsitellyt diplomityössään 3D-tietomallin vaikutusta betonisillan suunnitteluun [18]. Työssä vertailtiin 3D-tietomallintamista perinteiseen 2D-sillansuunnitteluun ja tehtiin havaintoja eri suunnittelutapojen hyvistä ja huonoista

puolista. Työn tulokset perustuvat tehtyihin haastatteluihin, kirjallisuustutkimukseen sekä työssä mallinnetuista kahdesta sillasta saatuihin kokemuksiin.

Perinteisen suunnittelutavan hyödyksi työssä mainitaan muun muassa tuttu ja turvallinen suunnittelutapa, helppo omaksuttavuus sekä piirustusten yksinkertainen ja helposti muokattava viivageometria. Haittapuolina pidetään ristiriitoja dokumenttien välillä, tietomäärän hajonneisuutta sekä viivapiirustustapaa eli objektit eivät sisällä älykkyyttä tai tietoa. [18]

Tietomalliperusteisen suunnittelun hyviä puolia ovat tiedon sijainti yhdessä paikassa, tietomäärän kumulatiivinen lisääntyminen, elinkaariajattelu, rakenneosien sisältämä tieto ja älykkyys, määräluetteloiden nopea generointi sekä nopea muutostenhallinta. Haittapuolina tietomalliperusteisessa suunnittelussa on uusi ja vieras suunnittelutapa, asennemuutosten tarve, uusien ohjelmistojen hankinta ja ongelmat mallintamisessa. [18]

Käytettäessä tietomallia suunnittelussa käytetty aika vähenee detaljoinnin ja pääpiirustusten tuottamisen osalta noin 10 %, määräluetteloissa ajan säästön on noin 70 % ja koko suunnittelun osalta ajan käyttö on noin 0,8-1,2 -kertainen 2D-suunnitteluun verrattuna. Tietomallintaminen lisää suunnittelun tehokkuutta myös tulevilla projekteilla, sillä malliin tehtyjä komponentteja voidaan käyttää hyödyksi seuraavissa malleissa joko suoraan tai mittoja muuttamalla. Tietomallia voidaan hyödyntää myös rakenteiden visualisoinnissa ja tilaajan ja suunnittelijan välisessä kommunikaatiossa sekä markkinoinnissa. [18]

4 3D-TIETOMALLI SOVELLETTUNA KOHDESILTAAN

4.1 Yleistä

Tämän työn keskeisin tarkoitus on tutkia Revit Structure -ohjelman soveltuvuutta Suomessa tyypillisten betonisiltojen tietomallintamiseen. Työssä pyritään tutkimaan miten ohjelmaa voidaan hyödyntää edellisessä luvussa 3.2 esitetyn 3D-suunnittelujärjestelmän eri vaiheissa. Tärkeimpänä tutkimuskohteena on tietomallin soveltuvuus sillan rakennussuunnitelman muodostamiseen.

Lähes 70 % Suomen silloista on betonirakenteisia siltoja [19]. Loput sillat ovat putkisilloja sekä teräs-, puu- tai kivisilloja. On siis perusteltua tutkia ensimmäisenä ohjelman soveltuvuutta betonisiltojen tietomallintamisessa. Tietomallintamista sovelletaan Liikenneviraston Bul-tyyppiirustussarjan yhteen siltavaihtoehtoon. Silta on tyyppimerkinnältään Bul14105 ja se on tyyppiltään teräsbetoninen ulokelaattasilta. Sillan jänneväli on 14 m ja kannen hyödyllinen leveys on 10,5 m. Tämänhetkinen tyyppisilta on suunniteltu vuonna 2003 Tiehallinnon sillansuunnitteluohjeiden ja Suomen rakentamismääräyskokoelman määräysten mukaisesti. Silta on mitoitettu tässä työssä uudestaan eurokoodien mukaisesti. Mitoitus on käsitelty tarkemmin luvussa 5.

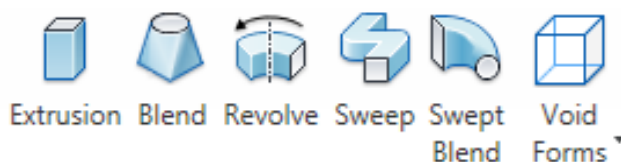
4.2 Geometria

4.2.1 Sillan geometria

Yleistä

Sillan geometrian luonnissa on käytetty mitoituksen tuloksena saatuja rakennepaksuuksia ja poikkileikkauksia. Myös sillan eri rakenneosien minimimitat ja muut vaatimukset on korjattu vastaamaan uusimpia Liikenneviraston ohjeita.

Revit Structure -ohjelma on alun perin kehitetty arkkitehtien työkaluksi. Ohjelmassa onkin perusgeometrian luontiin erittäin monipuoliset työkalut käsittäen muun muassa perinteisen Extrusion (pursotus) ja Revolve (pyöräytys) -työkalut. Näiden lisäksi ohjelmasta löytyy Blend, Sweep ja Swept-Blend -työkalut. Void-työkalulla tehdään reikiä ja muita massaa poistavia toimenpiteitä. Extrusion-työkalulla haluttua profiilia voidaan pursottaa suoraviivaisesti. Blend-työkalu on muuten samanlainen kuin Extrusion-työkalu, mutta pursotetulle kappaleelle voidaan käyttää eri profiilia kappaleen alku- ja loppupäässä. Revolve-työkalulla haluttua profiilia voidaan pyöräyttää akselin ympäri. Sweep-työkalulla profiilia voidaan pursottaa täysin vapaata 3-ulotteista ohjausviivaa pitkin. Swept-Blend -työkalu on Blend ja Revolve-työkalujen yhdistelmä, jossa muuttuvaa poikkileikkausta voidaan pursottaa vapaata ohjausviivaa pitkin. Kuvasta 3 saa hyvän käsityksen mainittujen työkalujen käyttötarkoituksesta. Eri työkaluilla tehtyjä muotoja voidaan myös vapaasti yhdistellä yhdeksi massaksi.



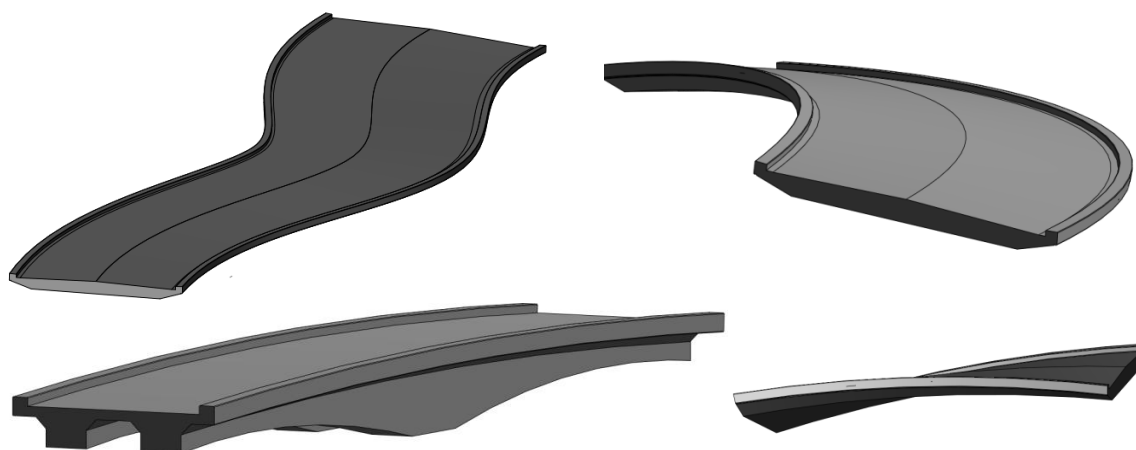
Kuva 3. Revit Structure -ohjelman muodonhallintatyökalut.

Ohjelmassa voidaan tehdä eri rakenneosista valmiita Family-komponentteja, joita voidaan helposti lisätä malliin joko komponentteina tai esimerkiksi pursottamalla komponenttia joltain ohjausviivaa pitkin. Family-editorin käyttö mahdollistaa erittäin monipuolisten parametrinen komponenttien luomisen.

Revitissä voidaan mallintaa objekteja joko suoraan projektitilassa tai tekemällä objektista erikseen Family-komponentti, joka tuodaan malliin. Järkevä mallinnustapa riippuu objektin käyttötarkoituksesta. Jos objektia aiotaan käyttää myös tulevissa projektissa, niin siitä kannattaa muodostaa erillinen Family-objekti, joka voidaan siirtää projektista toiseen. Eri tilavuuskappaleista muodostettu kansi voidaan määrätä yhdistämistyökaluilla yhtenäiseksi massaksi, jota käsitellään projektissa yhtenä komponenttina. Projektin puolella yhdistettyjä eri tilavuuskappaleita käsitellään omina objekteinaan. Objekteille voidaan antaa siis eri materiaalitiedot, lujuusluokat ja muut parametrit.

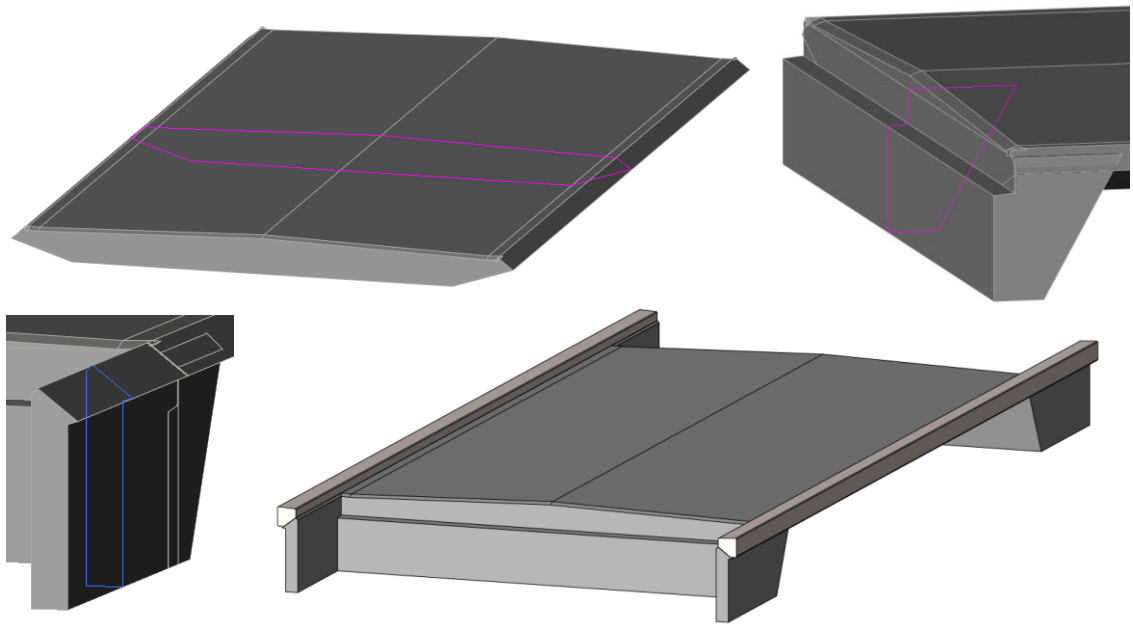
Kansi

Sillan kansi on helppo muodostaa Sweep-työkalulla antamalla ohjausviivaksi sillan kohdalla olevan tien tasausviiva, jolloin kansi saadaan seuraamaan tarkasti tien geometriaa. Kansi voidaan pursottaa täysin vapaata ohjausviivaa pitkin eli siitä voidaan tehdä myös kaksoiskaareva. Pursotuksessa käytetyn ohjausviivan tulee olla mielellään yhtenäinen viiva, jolloin kansi saadaan pursotettua kerralla oikean muotoiseksi. Kansi voidaan myös muodostaa useasta eri objektista, jotka seuraavat eri ohjausviivoja. Ohjausviivat voidaan parametrisoida eli kannen muoto voidaan sitoa esimerkiksi matemaattisiin kaavoihin ja pyöristyssäteisiin. Kansi voidaan mallintaa myös muuttuvalla poikkileikkauksella. Ohjelma mahdollistaa siis hyvin monimutkaisen kansirakenteen mallintamisen. Kuvassa 4 on esitetty muutama Revitillä muodostettu esimerkkikansi.



Kuva 4. Revit Structure -ohjelmalla muodostettuja sillan kansia.

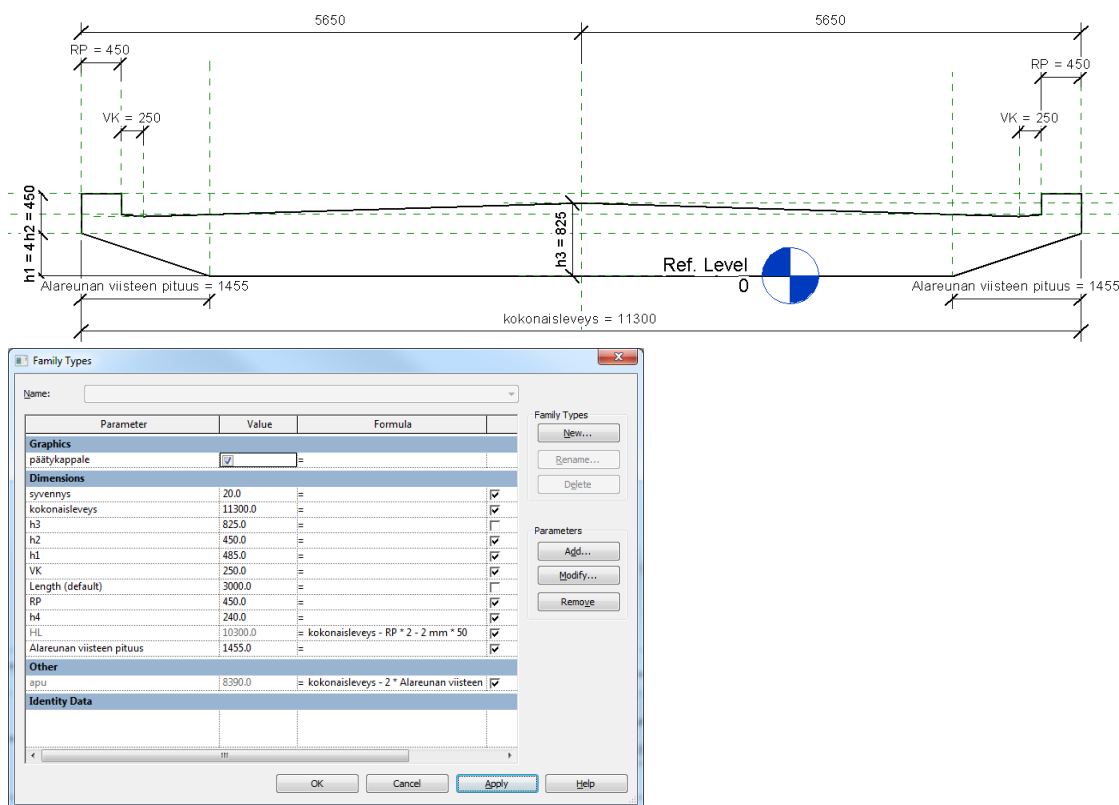
Kuvassa 5 on esitetty tietomallinnettavan betonisen ulokelaattasillan kansirakenteen mallintaminen. Kuvissa näkyy pursotettujen profiilien muoto. Sillan päällysrakenne mallinnettiin ilman reunapalkkia Family-editorissa, jossa kansi ja siipimuurit pursotettiin tien ohjausviivaa pitkin. Päätypalkit mallinnettiin pursottamalla ne kannen poikkisuunnassa. Kannen päästä poistettiin tämän jälkeen päätyviisteet ja kannen eri osat yhdistettiin samaksi massaksi yhdistämistyökalulla. Tämän jälkeen kansi tuotiin varsinaisen projektin puolelle.



Kuva 5. Kohdesillan kansirakenteen mallintaminen.

Reunapalkki lisättiin malliin vasta projektin puolella. Tämä tehtiin sen takia, että reunapalkin materiaaliominaisuudet voitaisiin määritellä erikseen. Reunapalkissa käytetään eri betoniluokkaa kuin muualla kannessa.

Revitin Family-editori mahdollistaa erittäin monipuoliset geometrian parametrisointimahdollisuudet. Kaikki rakenteen mitat voidaan täysin parametrisoida ja esimerkiksi eri rakenneosien paksuudet voidaan laittaa toisistaan riippuviksi. Kuvassa 6 on esitetty kannen poikkileikkauksen mittojen parametrisointia. Kun Family types -ikkunaan vaihdetaan osien mittoja, niin rakenne päivittyy saman tien annettujen arvojen mukaiseksi. Mitat voidaan myös laittaa toisistaan riippuviksi erilaisten kaavojen ja ehtolauseiden avulla.



Kuva 6. Mittaviivojen parametrisointia.

Eri osat voidaan myös sitoa toisiinsa siten, että esimerkiksi kannen pituutta ja leveyttä muuttamalla siipimuuri ja päätypalkki liikkuvan kannen mukana. Parametreihin voidaan liittää myös rajoituksia tai varoitusviestejä. Ohjelma voi esimerkiksi antaa varoitusviestin, jos kannen minimipaksuus alittuu.

Parametrisointi mahdollistaa teoriassa sen, että yhdestä parametrisesta kannen Family-objektista voidaan muodostaa kaikki Bul-tyyppisillä kansivaihtoehdot. Parametrisointi nopeuttaa tietomallin muokkaamista ja tuleva Bul-tyyppiinirustussarja tullaan mahdollisesti toteuttamaan ainakin osittain parametrisena tietomallina.

Pilarit ja peruslaatat

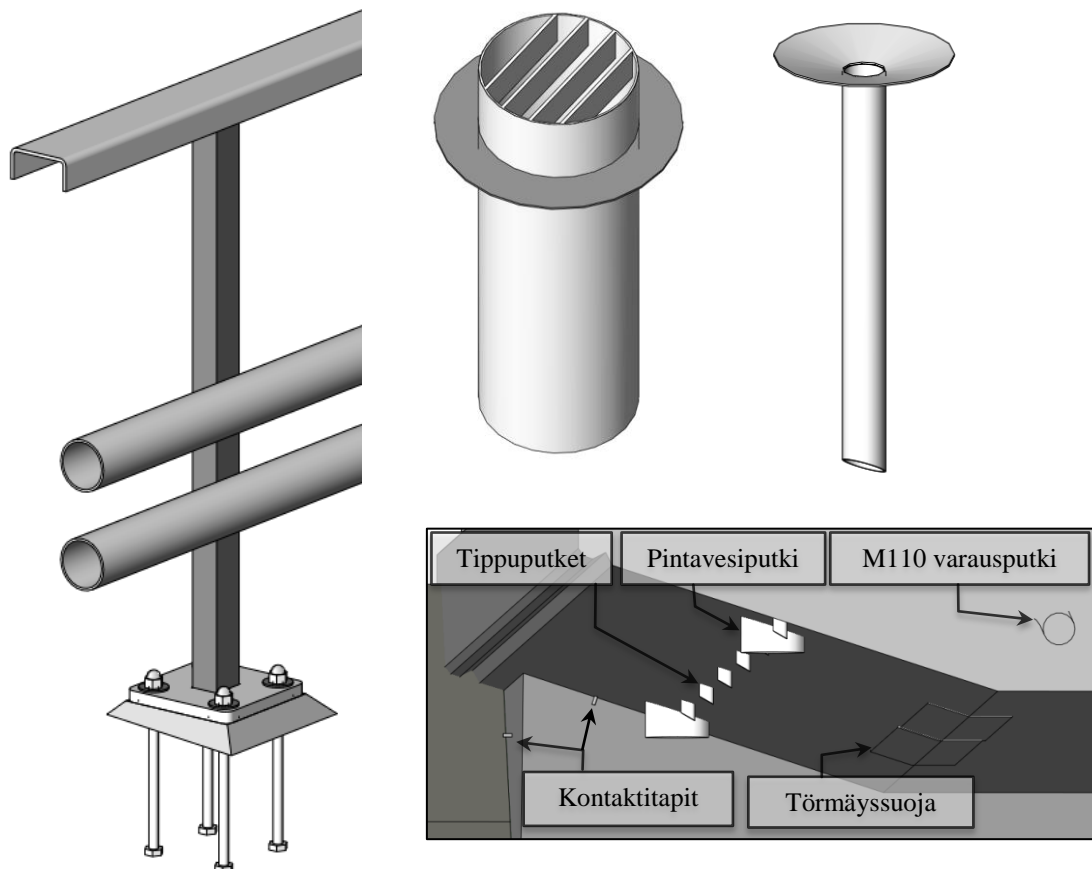
Sillan pilarit mallinnettiin Column-työkalulla ja peruslaatat Foundation-työkalulla. Valmista suorakaideperuslaattaa muokattiin sen verran, että peruslaatan yläosa muodostettiin viisteelliseksi vedenohjauksen takia. Pilareille ja perustelaatoille annettiin positionumerot ja materiaalitiedot.

4.2.2 Varusteet ja laitteet

5DSILTA -projektiin liittyvässä Custom Components -projektissa tehtyjä siltakomponentteja voidaan osittain hyödyntää myös Revit Structure -ohjelmalla. Osa komponenteista tehtiin dwg- tai sat-tiedostomuotoon, jotka voidaan ladata suoraan Revit Structure -ohjelmaan. Suurin osa komponenteista tehtiin Tekla Structures -ohjelman uel-tiedostomuotoon. Näiden komponenttien geometria voidaan tarvittaessa muuntaa Teklan Structures -ohjelman avulla dwg-muotoon ja siirtää edelleen Revittiin. Komponenttien parametrisuutta ei kuitenkaan voida siirtää ohjelmasta toiseen, sillä komponenttien parametrisuudelle ei ole olemassa yhtenäistä tiedostoformaattia.

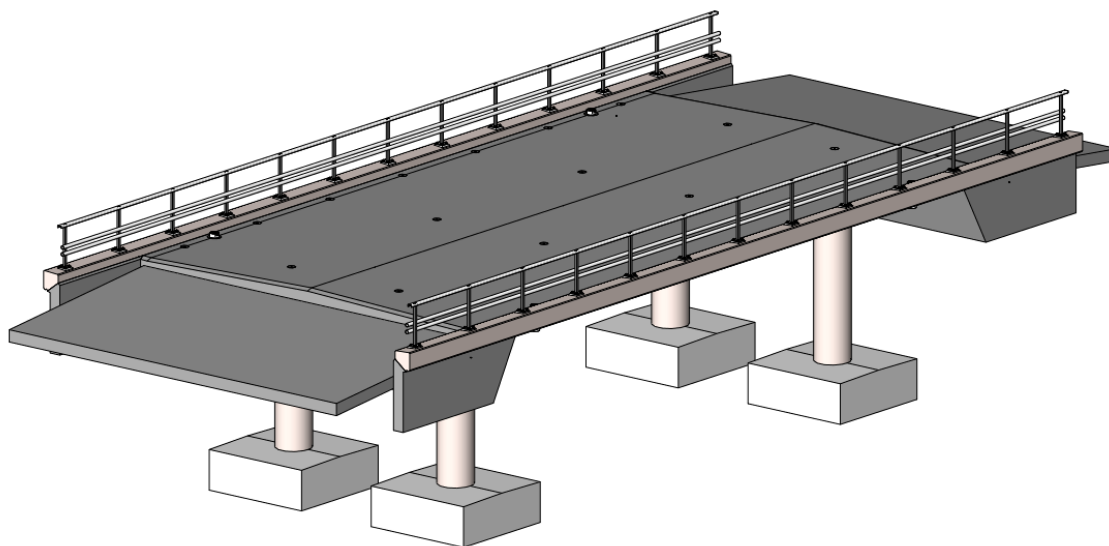
Kohdesiltaan luotiin muutama tarpeellinen peruskomponentti Family-editorin avulla. Mallinnetut komponentit ovat H2-kaide, pinta- ja tippuvesiputki, kolhaisusuoja, M110

varausputki sekä kontaktitappi. H2-kaide luotiin parametriseena siten, että kaiteen tolppien lukumäärä ja sijoittelu määräytyy automaattisesti reunapalkin pituuden mukaan. Siirtymälaatta lisättiin siltaan pelkkänä betonikappaleena eli sen raudoitusta ei mallinnettu. Komponenttien tietoihin lisättiin kyseisen osan pintamateriaali, jotta ohjelma osaa näyttää ne mahdollisimman realistisesti havainnekuvin. Osat numeroitiin ja nimettiin luetteloinnin helpottamiseksi. Kuvassa 7 on esitetty tehdyt Family-komponentit ja niiden sijoittelu siltaan.



Kuva 7. Sillan komponentteja: H2-kaide, pintavesiputki, tippuvesiputki, törmäyssuoja ja kontaktitappi.

Komponentit lisättiin siltaan oikeille paikoilleen, jonka jälkeen ne tulivat automaattisesti näkymään piirustuksissa ja luetteloissa. Komponenttien lisäämisen jälkeen sillan tietomalli on geometrian osalta valmis (ks. kuva 8) eli sillasta voitaisiin jo luoda mittapiirustukset.



Kuva 8. Sillasta luotu 3D-malli, johon on lisätty kaikki varusteet ja laitteet.

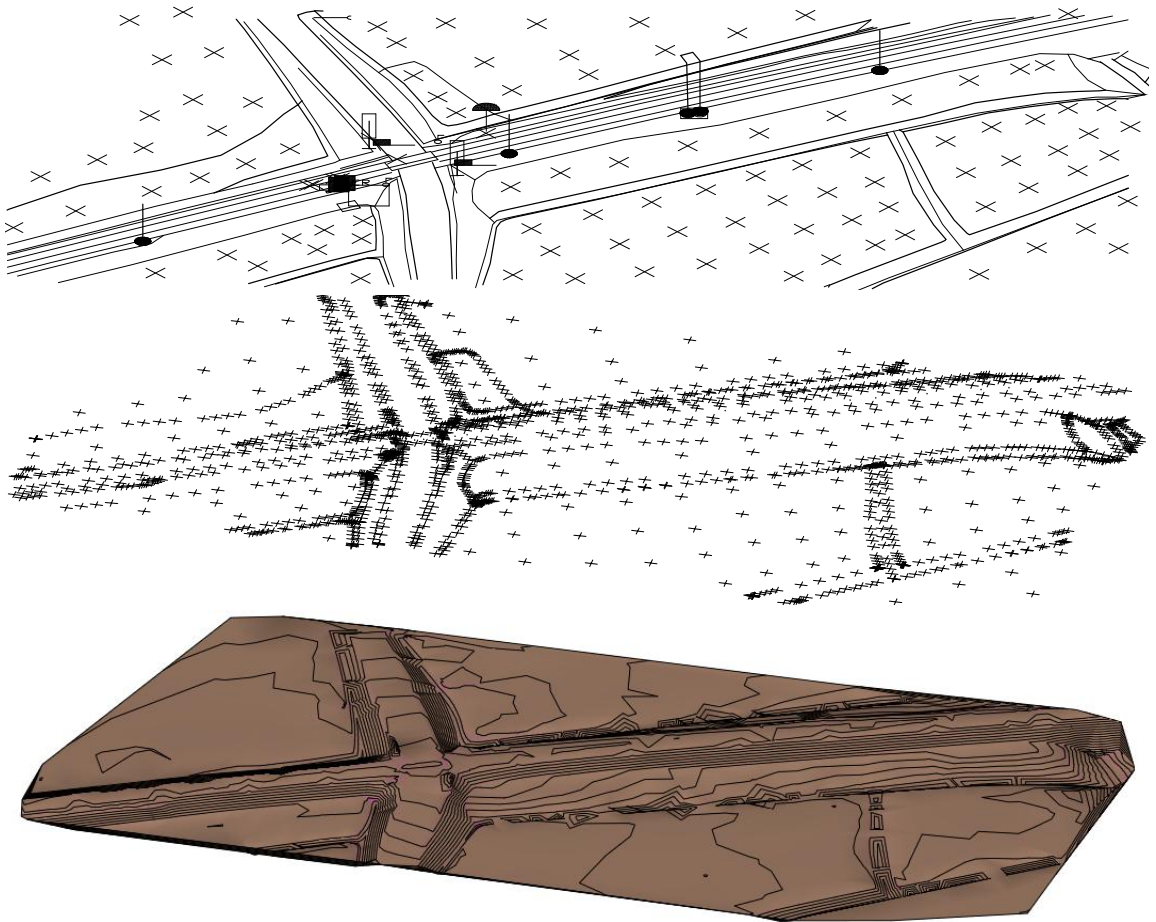
4.2.3 Maastomalli ja tiegeometria

Sillan suunnittelun lähtötietoina tarvitaan aina sillan kohdalla olevien väylien sekä ympäröivän maaston geometria. Maastomittauksen tuloksena saatu maastomalli toimitetaan yleensä kolmiulotteisena DWG-mallina, jossa maaston muoto on esitetty mittapisteiden sekä ojien ja teiden taiteviivojen avulla. Näitä maastomalleja voidaan suoraan hyödyntää Revitissä, sillä mittapisteistä voidaan muodostaa maaston pinnan muotoja kuvaava kolmioverkko.

Revitillä voidaan muodostaa pinnanmuotoja käyttäen lähtötietona DWG, DXF tai DGN tiedostoja. Ohjelmaan voidaan myös syöttää lähtöarvot tekstitiedostona, joka sisältää pisteiden x, y ja z koordinaatit. Maastomalli voidaan tuoda Revit Structure -ohjelmaan myös AutoCAD Civil 3D -ohjelman kautta, jolloin maasto- ja tiemalliin tehdyt muutokset voidaan edelleen päivittää tiesuunnittelijan tietomalliin.

Revit ei osaa käsitellä maaston lähtötietoina muita kuin pisteitä. Jos lähtötietotiedosto sisältää 3D-avaruudessa olevia viivoja, niin ohjelma osaa hyödyntää viivoista vain niiden taitepisteissä olevat koordinaatit. Parempaan lopputulokseen päästään, kun viivat hajotetaan esimerkiksi metrin välein oleviin pisteisiin. Tällöin pinnanmuodot vaihtuvat tasaisemmin. Hajotus voidaan tehdä esimerkiksi AutoCADin lisp-rutiineilla. Maastomalli kannatta useimmissa tapauksissa pyytää valmiina kolmioverkkona, jolloin se saadaan suoraan luettua ohjelmaan, eikä esimerkiksi viivojen hajottamista pisteisiin tarvitse tehdä.

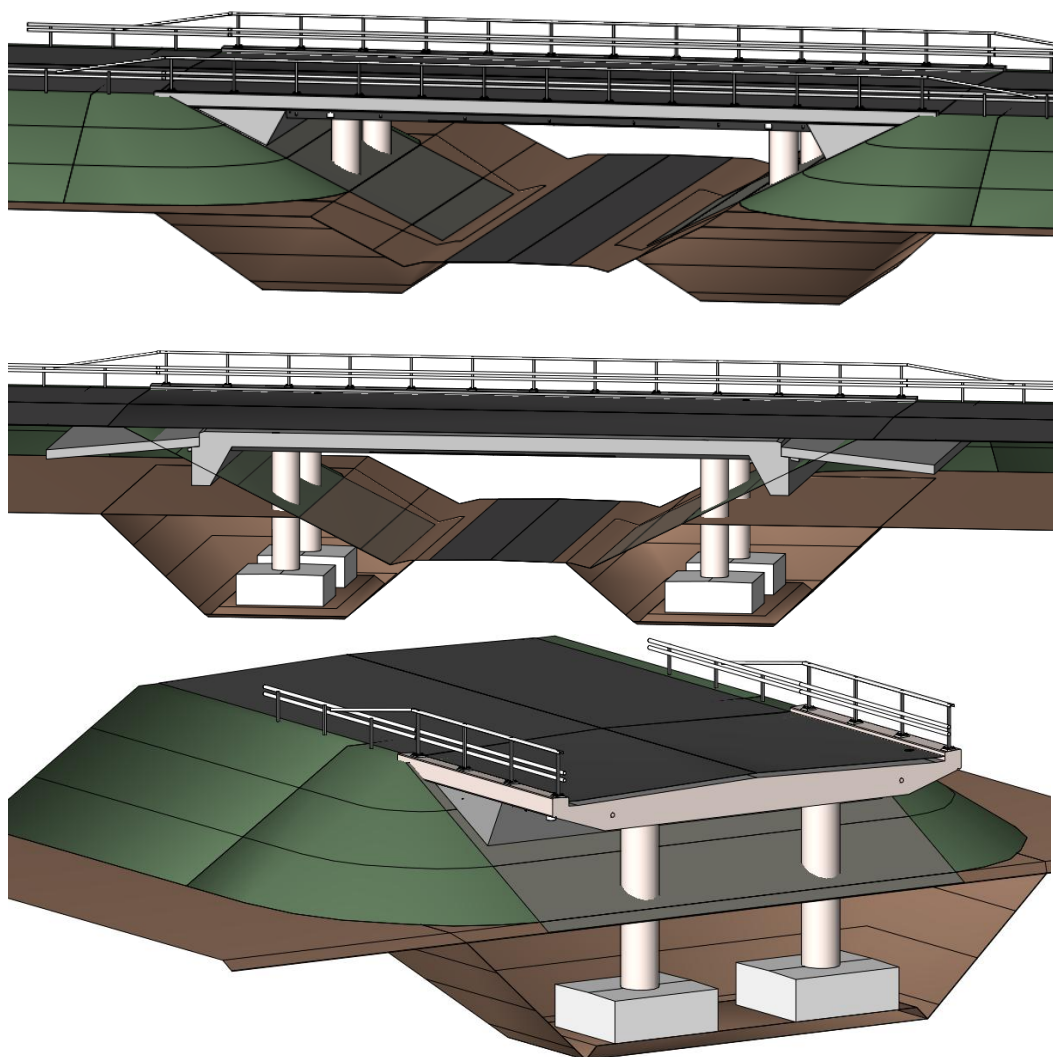
Kuvassa 9 on esitetty maastomallin muodostamisprosessi käyttäen lähtötietoina perinteisen maastomittauksen tuloksia. Ylimmässä kuvassa on esitetty maastomittajaalta saatu maastomalli. Maastomallissa on kuvattu tien ja ojien geometria viivojen avulla. Keskimmaisessä kuvassa maaston geometriaa kuvaavat viivat hajotetaan AutoCADin lisp-ruutiineilla pistejonoiksi. Maastomallista tulee näin tehtynä jouhevampi. Kolmannessa kuvassa pistejoukosta on muodostettu kolmiulotteinen maastomalli, jossa korkeuserot on esitetty tasa-arvokäyrinä.



Kuva 9. Siltapaikan lähtötietona saatu dwg-formaatissa oleva maastomalli, siitä muodostettu pistejoukko ja Revitin muodostama maastomalli.

Tehtyä maastomallia voidaan nyt hyödyntää sillan suunnittelussa. Maastomallia voidaan tarvittaessa muokata ja siihen voidaan yhdistää tiesuunnitelman mukainen väylägeometria, jonka avulla silta voidaan sijoittaa tarkasti paikalleen. Sillan pituuden määrittäminen ja istuvuus ympäristöön on helppo todeta kolmiulotteisten lähtötietomallien avulla. Ohjelma osaa myös laskea maastomallista poistettujen tai siihen lisättyjen maamassojen tilavuudet eli sillan maamassojen määrälaskenta helpottuu ja tarkentuu oleellisesti. Kun silta on sijoitettu paikalleen, siihen voidaan helposti lisätä myös sillan keilojen ja luiskien geometria. Yksinkertaisten maastonmuotojen lisääminen käy kätevimmin manuaalisesti eli ohjelmaan syötetään käsin esimerkiksi keilaa kuvaavan kartion koordinaatit.

Työssä mallinnettavan sillan maamassat ja väylägeometria on esitetty kuvassa 10. Kaikki sillan rakentamisessa vaadittavat kaivuut ja täytöt on mallinnettu käsin syöttämällä pisteiden koordinaatit ohjelmaan. Sillasta mallinnettiin perustusten kaivannot ja anturoiden alapuoliset tasaustäytöt sekä perusmaan yläpuoliset tiepenkkeet, luiskat ja keilat. Täytöille määriteltiin niiden pintamateriaalit, jotta ohjelma osaa näyttää ne oikein havainnekuvin. Myös etuluiskaan tuleva kiviverhous ja kannen sekä tien pintarakenteet on mallinnettu tietomalliin. Maamassojen mallinnamisessa on otettu huomioon sillan määrälaskentaan kuuluvien maamassojen rajat.



Kuva 10. Tietomallissa olevat maamassat ja maaston muodot.

Jotta ohjelma osaa laskea kaivut ja täytöt oikein, on sille kerrottava mikä on nykyinen maanpinta ja mitkä ovat sen jälkeen tulleet kaivantot tai täytöt. Näiden määrittysten jälkeen objektien ominaisuuksista nähdään suoraan kuinka monta kuutiota kyseistä täyttöä tai kaivantoa on muodostunut.

4.3 Objektien sisältämä tieto

Jokainen Revit Structure -ohjelman objekti sisältää tietomalliobjektille tyypilliset tiedot kuten tunnistetiedot, materiaalitiedot ja objektin tyypistä riippuen tiedon esimerkiksi betonin suojapeitteen paksuudesta. Objektien ominaisuuksia voidaan täydentää erilaisilla lisätiedoilla. Siltojen tietomallintamisessa tarpeellista lisätietoa ovat muun muassa betonin rasitusluokka ja pakkasluku. Toleranssijärjestelmän mukaiset sallitut mittapoikkeamat voidaan myös lisätä erillisinä tietokenttinä objekteihin.

Revit Structurella voidaan määritellä lisämääreitä objektin pinnoille Paint-työkalun avulla. Työkalun avulla voidaan esimerkiksi lisätä tieto muotitettavista tai suojakäsitteltävistä pinnoista. Nämä tiedot saadaan mukaan määräluetteloihin, jolloin pinta-alojen laskeminen tapahtuu automaattisesti.

Objektien tietokenttiin voidaan lisätä hyperlinkkejä. Näitä voidaan hyödyntää esimerkiksi linkittämällä rakenneosan rakennelaskelmien PDF-tiedosto suoraan

tietomalliin. Tämä helpottaa erityisesti tietomallin tarkastajan työtä. Objektien tietoihin voidaan myös linkittää esimerkiksi kyseisen osan laatuvaatimustiedosto, jolloin urakoitsijan on helppo tarkastaa sillan rakenteille asetetut vaatimukset.

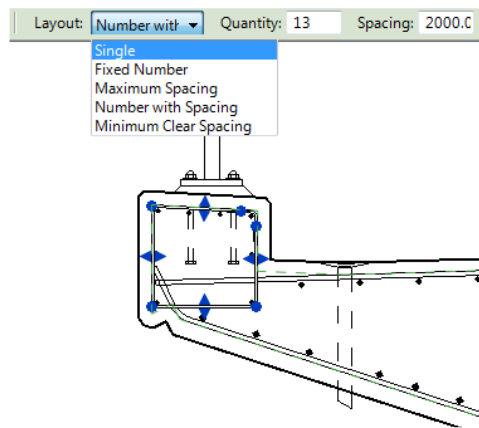
Muottisuunnittelijan täytyy huomioida kansirakenteen esikohotukset suunnitelmissaan. Tietomallissa oleva kansirakenne vastaa kuitenkin kannen lopullista muotoa eli kannesta täytyy muodostaa muottisuunnittelijaa ja muotin tarkistusta varten erillinen esikokohotusmalli. Esikohotusmallissa on huomioitu rakenteen pysyvien kuormien aiheuttaman taipuman kumoava ennakkokohotus, optinen esikohotus ja muotin painuman kumoava ennakkokohotus. Muotin painumasta aiheutuva ennakkokohotustieto tulee muottisuunnittelijalta, jonka siltasuunnittelija siirtää malliin. Esikohotusmalli voidaan helpoiten toteuttaa siten, että rakenteesta muodostetaan erillinen 3D-malli, joka on piilotettu kaikista näkymistä. Malli sijaitsee siis oikeassa koordinaatistossa ja se voidaan tarvittaessa ottaa tietomallista esille tai tallentaa erilliseen tiedostoon muottisuunnittelijaa varten.

4.4 Raudoitus

Raudoituksen lähtötietoina on käytetty sillan mitoitusperusteella saatuja raudoituksivaatimuksia. Raudoituksen ankkurointi ja jatkospituuksina on käytetty Betonisillat-sovellusohjeen liitteen 2 mukaisia arvoja. Myös muut raudoituksen yksityiskohdat, kuten minimihalkaisijat ja maksimijakovälit on toteutettu Betonisillat-sovellusohjeessa esitettyjen vaatimusten mukaisesti.

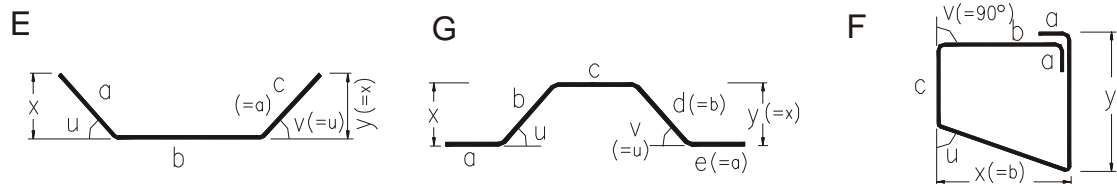
Revit Structure -ohjelmassa on olemassa perustyökalut raudoituksen mallintamiseen. Ohjelmassa on erikseen työkalut verkkoraudoituksen ja erillisiin raudoitustankoihin perustuvan raudoituksen tekemiseen. Siltojen raudoittamiseen soveltuu lähinnä yksittäisten tankoraudoitteiden työkalu. Raudoitus lisätään objektiin aina rakenneleikkauksen kautta. Ennen raudoituksen lisäämistä betonirakenteen eri pinnoille annetaan betonin suojapeite, jolloin raudoitus tarttuu automaattisesti oikealle kohdalleen. Suojapeite voidaan antaa joko koko rakenteelle tai pintakohtaisesti. Betonin suojapeitteessä pitää huomioida myös mahdollisten työterästen vaatima tila.

Sillan kannen raudoitusta mallinnettaessa kannesta tehdään poikkileikkaus, johon voidaan lisätä teräksiä joko poikkileikkauksen tasossa tai poikkileikkausta vastaan kohtisuorassa tasossa eli kannen pituussuunnassa. Poikkileikkauksen tasossa mallinnettiin reunapalkin hakaraudoitus, kannen leikkausraudoitus sekä kannen ylä- ja alapinnan poikkitausraudoitus. Poikkileikkausta vastaan kohtisuoraan tehtiin kannen pituussuuntaiset ylä- ja alapinnan sekä reunapalkin teräkset. Ohjelmassa on automatiikka, jonka avulla teräksiä voidaan ryhmitellä ja niiden määrää ja jakoväliä voidaan helposti kontrolloida. Ryhmittely toimii pituussuuntaisten terästen tapauksessa aina yhdelle poikkileikkauksen pinnalle. Yhden rauditusryhmän voi siis määritellä ainoastaan suorien pintojen suuntaisesti. Jos raudoitettava pinta kääntyy, kuten käy esimerkiksi reuna- ja keskileikkaukselle tultaessa, niin raudoitus pitää muodostaa taitoksen jälkeen uutena ryhmänä. Poikkileikkauksen tasossa oleville teräksille ryhmittely toimii kannen pituussuunnassa siten, että terästys kulkee suorassa linjassa. Automatiikan avulla teräkset voidaan syöttää yksittäin tai niitä voidaan lisätä kiinteä lukumäärä. Niille voidaan antaa myös maksimijakoväli, minimijakoväli tai maksimijakoväli kiinteällä teräslukumäärällä. Kuvassa 11 on esitetty reunapalkin lisähakaterästen määrittäminen automatiikalla. Ohjelma sijoittaa teräkset automaattisesti koko reunapalkin matkalle annettujen sääntöjen puitteissa. Automatiikalla on erittäin nopea raudoittaa yksinkertaisia rakenteita.



Kuva 11. Reunapalkin terästen määrittäminen.

Ohjelmalla pystytään muodostamaan yhdessä tasossa taiteltavia teräksiä sekä pilareiden spiraalihakojia. Revit Structure -ohjelmalla pystytään siis tekemään lähes kaikki tarvittavat rauditusmuodot lukuun ottamatta kolmiulotteisia raudoituksia, jossa raudoitettankoa taitetaan kahteen suuntaan. Tällaisia raudoituksia saatetaan käyttää esimerkiksi kaidetolppien kanteen ankkuroinnissa. Revitin mukana toimitetaan Liikenneviraston hyväksymät raudoitteiden taivutustyyppit eli perusraudoituksen tekeminen voidaan aloittaa suoraan valmiilla taivutustyypeillä. Taivutustyyppit ovat periaatteessa oikeita, mutta niistä puuttuu kulmaparametrit v ja u . Teräksistä saadaan tehtyä usein oikean muotoisia, mutta teräsluetteloihin ei tule näkyviin kulmien v ja u arvoja. Kuvassa 12 on esitetty muutama taivutustyyppi, jota ongelma koskee. Ohjelman taivutustyyppijä joudutaan siis korjaamaan ja täydentämään ennen, kun teräsluettelot saadaan käyttökelpoisiksi.

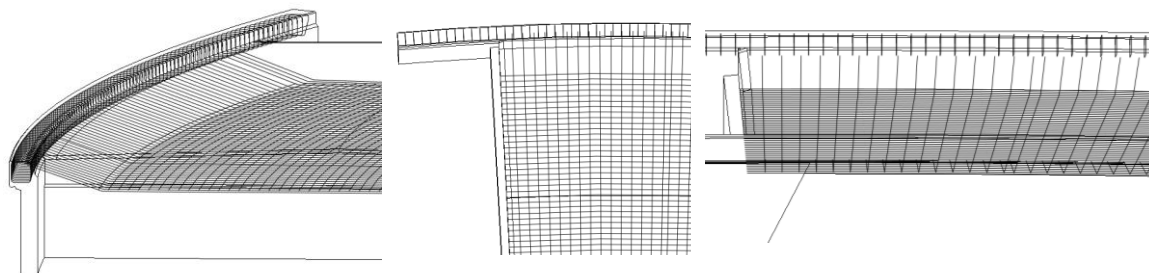


Kuva 12. Esimerkkejä taivutustyypeistä, joissa on kulmat v ja u .

Raudoitustyökalu on selvästi tarkoitettu lähinnä talo- ja teollisuusrakenteissa tyypillisten suorakaidemuotojen raudoittamiseen. Ohjelmalla ei pystytä helposti tuottamaan muunlaisia kuin suorassa linjassa kulkevia terästyksiä. Kaarevan siltakannen raudoituksessa tulee siis vastaan ongelmia. Ongelmia aiheuttavat erityisesti suorat sillan suunnassa kulkevat raudoitettangot, jotka eivät seuraa sillan muotoa eli ne tulevat päistään betonipinnan läpi. Ohjelmalla on mahdollista mallintaa ympyrän kaarella olevia teräksiä käyttämällä erikseen tätä varten tehtyä taivutustyyppiä. Kaarevien terästen käyttäminen on kuitenkin aika työlästä verrattuna suoriin teräksiin. Ohjelmaan täytyykin saada jokin kätevämpi keino kaarevan siltakannen raudoitukseen.

Kaarevuus aiheuttaa ongelmia myös kannen poikittaisissa teräksissä, kuten reunapalkin hakateräksissä, jos ne tehdään aiemmin mainitulla automatiikalla. Automaattinen ryhmittely kopioi teräksiä aina suorassa linjassa eli kaarevassa reunapalkissa teräkset tulevat jossain vaiheessa betonipinnan läpi. Hakateräkset ja muut kannen poikkisuunnassa sijaitsevat teräkset saadaan kuitenkin tehtyä yhdessä tasossa olevalle kaarelle kopioimalla niitä array-komennolla ympyrän kaarta pitkin. Tosin tällöin terästen muokkaaminen ei ole niin helppoa kuin ryhmittelytyökalulla sijoitettujen terästen. Kahden tason suhteen kaarevan pinnan raudoitukseen ei löytynyt kätevää keinoa. Tämä johtuu siitä, että ohjelmassa oleva rauditus toimii aina yhdessä tasossa eli raudoitusta

voidaan kopioida kaarelle tai taivuttaa vain yhdessä suunnassa. Yleensä sillan kaarevuus toisessa suunnassa on kuitenkin hyvin pientä eli teräkset voidaan mallintaa pieninä ryhmiä, joita voidaan siirrellä ja käännellä käsin oikealla paikalleen. Tämä on kuitenkin työlästä, joten ohjelmaan tarvitaan esimerkiksi kolmiulotteiseen ohjausviivaan perustuva terästen asettelurutiini.



Kuva 13. Kaarevan pinnan raudoitus Revit Structure -ohjelmalla.

Revit Structure -ohjelmasta ei löytynyt mahdollisuutta muodostaa luseeraavia eli vakioaskelluksella pituuttaan muuttavia betoniteräksiä. Monissa ohjelmissa tällaiset teräsryhmät voidaan muodostaa osoittamalla tangon muoto ryhmän alussa ja lopussa sekä antamalla terästen lukumäärä. Revitissä luseeraavat teräkset täytyy tehdä toistaiseksi käsin eli jokaisen teräksen pituus täytyy muokata yksitellen oikeaksi. Tämä hidastaa raudoittamista todella paljon. Luseeraavien teräsryhmien puute tarkoittaa myös sitä, että jokainen luseeraavan teräsryhmän teräs tulee näyttää erikseen teräsluetteloissa. Tämä kasvattaa teräsluettelon kokoa ja vaikeuttaa sen muodostamista ja käyttöä.

Revit Structure -ohjelmassa ei ole vakiona mukana terästen numerointiautomaatiikkaa. Ohjelmaan on kuitenkin saatavissa ilmainen Revit Extensions -lisäosa, joka sisältää objektien numerointiin tarkoitetun Element Positioning -apuohjelman. Raudoitus voidaan kätevästi numeroida tämän apuohjelman avulla. Apuohjelmaan voidaan määritellä terästen numerointijärjestys teräksen sijaintikoordinaattien perusteella. Numerointi kannattaa laittaa kasvamaan alhaalta ylöspäin, jolloin se kuvaa parhaiten terästen asennusjärjestystä. Numeroinnin automaatiikka ei kuitenkaan osaa päätellä asennusjärjestystä täydellisesti. Parhaaseen lopputulokseen päästään numeroimalla jokainen teräspositio käsin oikeassa asennusjärjestyksessä. Numerointiautomaatiikkaa kannattaa kuitenkin käyttää, vaikka muokkaisikin positionumeroita käsin, sillä automaatiikka osaa ryhmitellä samanmittaiset ja -paksuiset teräkset saman positionumeron alle.

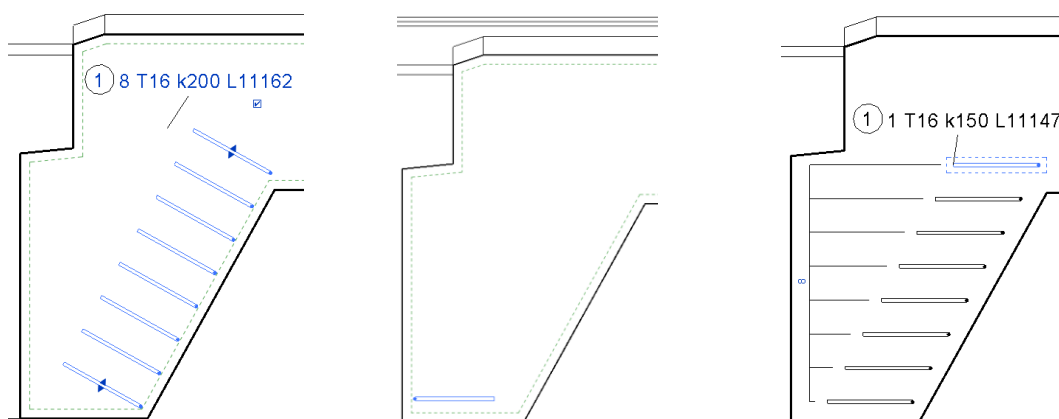
Ohjelmassa voidaan näyttää lisätty raudoitus joko viivamallina tai solideina. Solidiraudoituksen näyttäminen on paljon havainnollisempaa kuin viivamallin, sillä raudoitteiden yhteentörmäykset on tällöin helpompi havaita. Raudoitteiden saaminen näkyviin solideina on suhteellisen työlästä, sillä jokaisen raudoitteen asetuksesta täytyy käydä laittamassa solidimalli päälle. Varsinkin array-komennolla ryhmitellyille raudoituksille tämä on erittäin hidasta, sillä jokaiselle ryhmän raudoitteelle täytyy käydä laittamassa asetus erikseen päälle. Solidiraudoituksen näyttäminen onnistuukin kätevimmin hajottamalla kaikki ryhmät ja muokkaamalla koko sillan raudoituksen asetuksia kerralla. Tällöin tosin raudoitteiden muokkaaminen on jälkikäteen erittäin työlästä. Solidiraudoituksen harmaa perusväri tulee betoniteräksen materiaaliominaisuuksista. Jos teräksiä haluaa näyttää eri väreillä, niin jokaiselle taivutustyyppille tulisi määrittää omat materiaaliominaisuudet ja väri. Tämä on aika työlästä eli ohjelmaan olisi hyvä saada jokin automaattinen keino soliditerästen värien vaihtamiseen esimerkiksi taivutustyyppin tai teräsposition mukaan.

Ohjelmassa ei ole automatiikkaa teräsjonon tekemiseksi. Se ei siis osaa katkaista ylipitkää terästä eikä sille voi määritellä terästen jatkospituuksia. Terästen jatkaminen onkin tehtävä käsin. Helpoiten tämä onnistuu kopioimalla jatkettavaa terästä ja siirtämällä sitä teräksen halkaisijan verran sivuun.

Revit Extensions -lisäosan mukana tulee monta valmista apuohjelmaa tiettyjen rakenneosien raudoittamisen helpottamiseksi. Mukana tulevilla apuohjelmilla voidaan raudoittaa nopeasti pilarit, palkit, pilari- ja seinäanturat, betonikaiteet, tukimuurit, laattojen nurkat ja kulmat sekä aukkojen reunarauditus. Mukaan tulee myös Interferences of Reinforcing Bars -työkalu, jolla voidaan tarkastaa raudoitusten yhteentörmäykset. Siltojen raudoittamisessa näistä voidaan hyödyntää lähinnä pilarien ja anturoiden raudoitukseen soveltuvia apuohjelmia sekä yhteentörmäyksen tarkasteluohjelmaa. Raudoitteiden yhteentörmäykset on usein kätevämpi tarkistaa visuaalisesti suoraan raudoituksen solidimallista. Suurin osa ohjelman ilmoittamista yhteentörmäyksistä on sellaisia, mitkä oikeassa rakenteessa hoituvat itsestään esimerkiksi siirtämällä terästä 5 mm sivulle.

Raudoituksen mallintaminen on selvästi Revit Structure -ohjelman suurin heikkous, kun tutkitaan ohjelman soveltuvuutta siltojen rakennussuunnitelmavaiheen tietomallintamiseen. Raudoituksen käsittelyssä, havainnollistamisessa ja lisäämisessä on vielä paljon puutteita ja paranneltavaa ennen kuin ohjelmaa voidaan käyttää tehokkaasti kaikenmuotoisten siltojen raudoittamiseen.

Sovelluskohteena oleva silta on geometrialtaan erittäin yksinkertainen ja silta saatiinkin hyvin raudoitettua. Sillan tietomalli sisältää kaikki sillan betoniteräksiset, lukuun ottamatta työteräksiä. Ongelmakohtina raudoituksen lisäämisessä oli lähinnä viisteellisen päätypalkin takapinta, johon siivestä tulevat teräksiset päättyvät. Nämä teräksiset täytyi lisätä malliin yksi kerrallaan sillä, kuten aiemmin on mainittu, ohjelmassa ei ole työkalua luseeraavien teräsryhmien lisäämiseen. Ongelmia aiheutti myös vinoissa pinnoissa olevat L:n malliset teräksiset, joiden toinen pää pitäisi jäädä vaakasuoraan. Jos ohjelman automatiikalla lisätään terästys vinoon pintaan, niin ohjelma laittaa teräksen taitoksen kohtisuoraan pintaa vastaan eikä niitä saa mitenkään käännettyä. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 14. Ongelma ratkaistiin siten, että teräs mallinnettiin ensin pystysuoraan pintaa vasten, jolloin teräksen pää jäi vaakasuoraan. Tämän jälkeen teräs siirrettiin oikealle paikalleen ja monistettiin array-komennolla. Kuvasta nähdään kuitenkin, että ohjelma ei ymmärrä array-komennolla monistetun teräksen yhteislukumäärää eikä jakoväliä. Ongelmasta on kerrottu lisää raudoituspäätösten yhteydessä kappaleessa 4.5.3.



Kuva 14. Ongelma ja sen osittainen ratkaisu vinoon pintaan tulevan raudoituksen kääntämisessä.

Raudoitetun kansirakenteen avulla oli helppo tutkia muun muassa pintavesiputkien ja pilarista tulevan raudoituksen mahtuminen kansiraudoituksen väleihin. Siltaan tulevan raudoitteen suunnittelu olikin erittäin mielekästä, kun mallista nähtiin etukäteen kaikki mahdolliset ongelmakohdat, joita 2d-piirustuksista ei välttämättä pystyisi hahmottamaan.

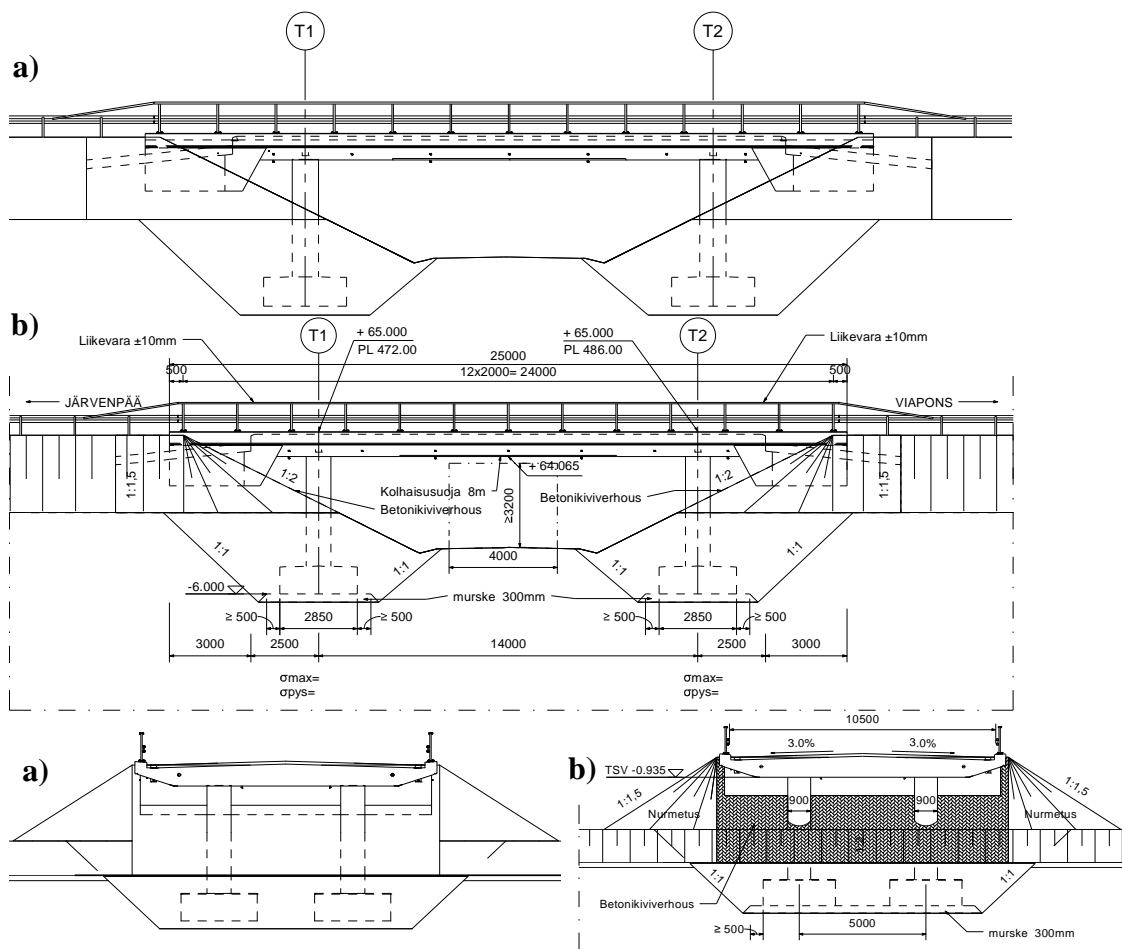
Liitteen 1 kuvissa 1-5 on esitetty sillan raudoituksen havainnekuvia.

4.5 Piirustukset

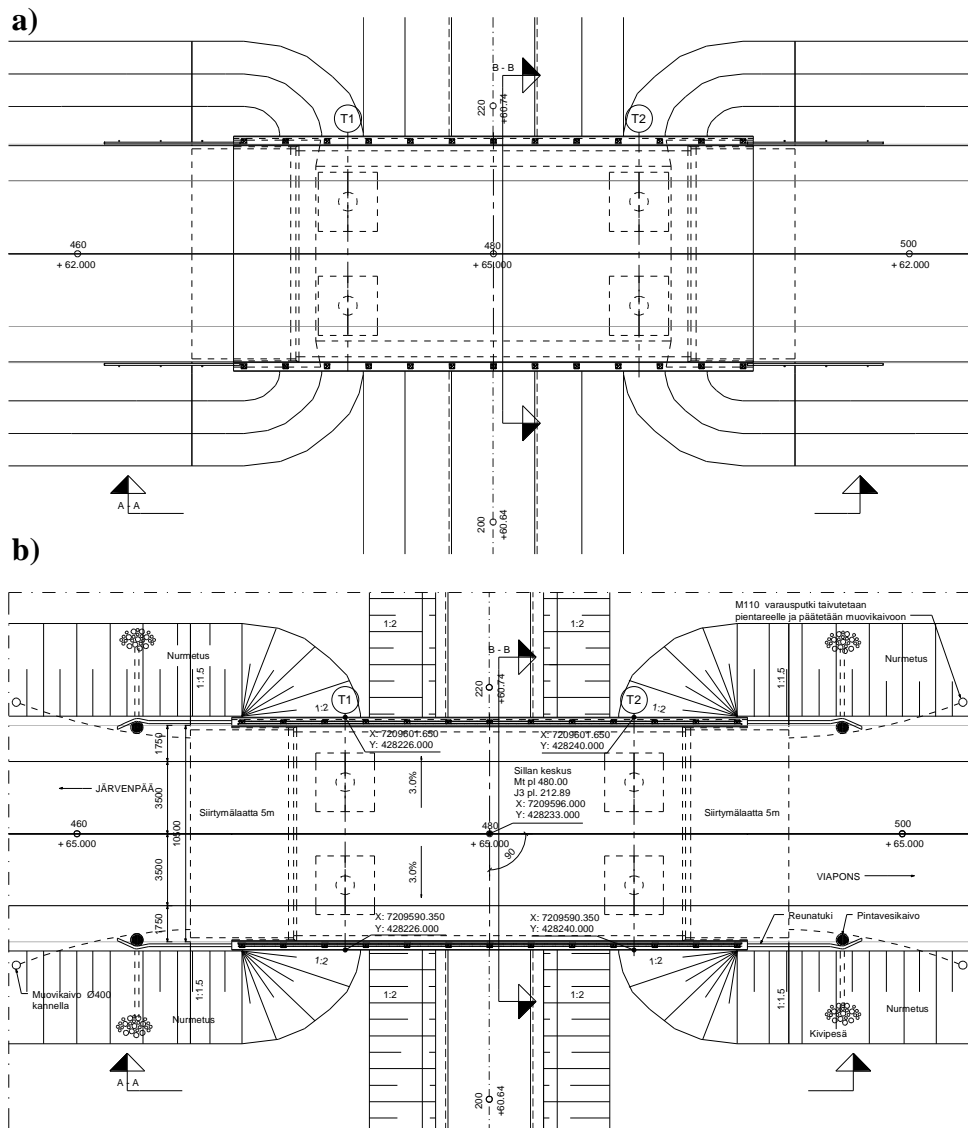
4.5.1 Yleispiirustus

Revit Structure -ohjelman kyky yhdistää maastomalli ja sillan geometrinen malli samaan tietomallin mahdollistaa myös yleispiirustuksen tekemisen suoraan Revitin piirustustilassa. Revitillä tehty yleispiirustus on aina geometrialtaan ajan tasalla, sillä piirustukseen otetaan rakenteen ja maaston muodot suoraan tietomallista.

Kohdesillan yleispiirustukseen on ladattu lähtötietoina yli- ja alimenevän väylän tasausviivat, joissa näkyy tien paalunumerot. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty yleispiirustuksen muodostamisprosessi. Tietomallista otettiin ensin siltaa ja maastoa kuvaava perusgeometria piirustuksen pohjaksi. Tämän jälkeen piirustukseen täydennettiin normaaleilla piirustustyökaluilla kaikki yleispiirustuksessa esitettävät asiat.



Kuva 15. Yleispiirustuksen pituus- ja poikkileikkauksen muodostaminen Revit Structure -ohjelmalla. a) Mallista otettu kuvanto, b) piirustusmerkinnöillä täydennetty yleispiirustus.



Kuva 16. Yleispiirustuksen tasokuvan muodostaminen Revit Structure -ohjelmalla. a) Mallista otettu kuvanto, b) piirustumerkinnoilla täydennetty yleispiirustus.

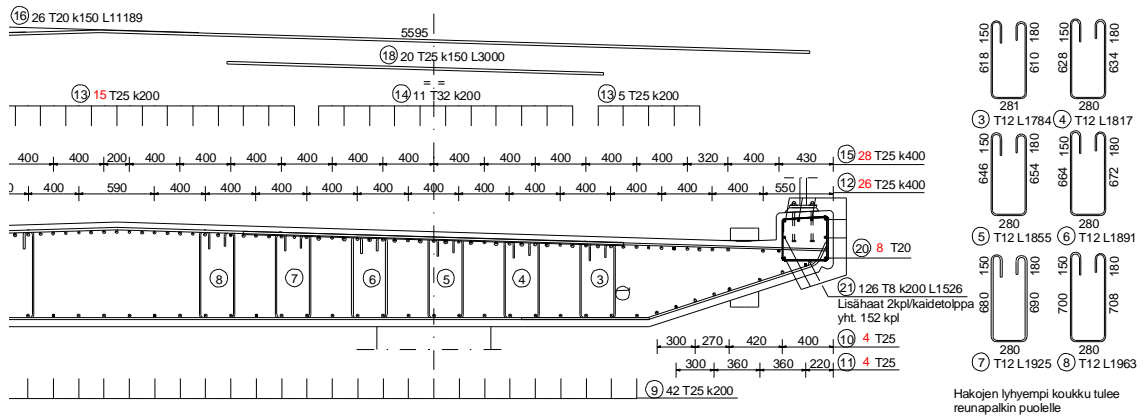
Kohdesillan malliyleispiirustus on pyritty tekemään Suomessa käytettävien piirustusmerkkintöjen mukaisesti. Tästä syystä maaston muotojen kuvaamisessa on käytetty nykyistä piirustustapaa eli kaltevat pinnat esitetään kaltevuuden suuntaisella viivoituksella. Revit mahdollistaisi maaston kuvaamisen myös tasa-arvokäyrien avulla, jolloin manuaalinen piirustustyö vähenisi.

Yleispiirustuksessa esitetty tieto on pääosin haettu tietomallista. Esimerkiksi korko- ja koordinaattilukemat päivittyvät malliin automaattisesti. Pelkillä piirustusobjekteilla on yleispiirustuksessa esitetty lähinnä siltapaikkaan liittyviä tarvikkeita ja laitteita, kuten kivipesät, muovikaivot ja reunakiveykset. Nämäkin objektit voidaan tarvittaessa mallintaa suoraan tietomalliin, jolloin yleispiirustuksen pohja saataisiin mallista valmiimpana.

Sillan malliyleispiirustus on esitetty liitteessä 2.

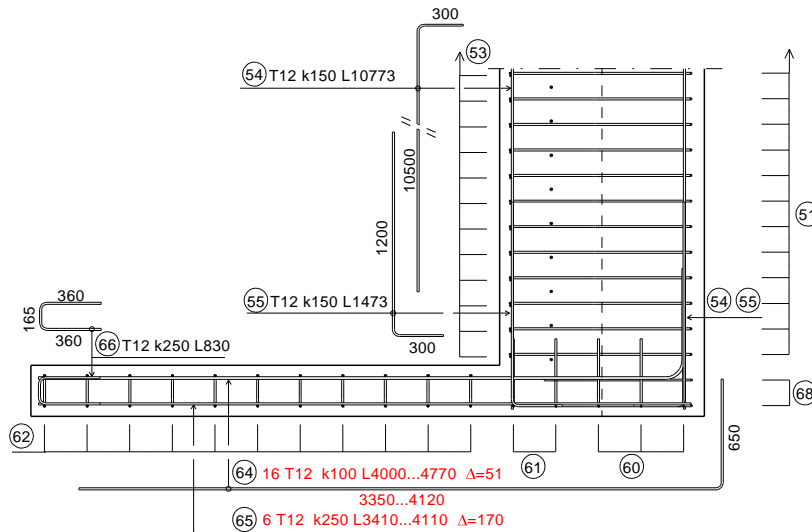
4.5.2 Mittapiirustus

Kannen mittapiirustus muodostettiin samalla periaatteella kuin yleispiirustuskin. Mallista muodostettiin rakennepoikkileikkaukset, taso- ja sivukuvat ja nämä ladattiin



Kuva 19. Kannen poikkileikkauksen raudoitus tuen kohdalla.

Kuvassa 20 on esitetty osa siipimuurin ja päätypoikkipalkin raudoituksesta. Kuvan teräspositiot 64 ja 65 ovat tyypiltään luseeraavia teräksiä. Teräsmerkinnät täytyy näiden terästen osalta syöttää ohjelmaan käsin, sillä Revitistä puuttuu täysin luseeraavien terästen tuki. Toinen vaihtoehto olisi ollut muodostaa jokaisesta luseeraavan teräsryhmän teräksestä oma positionumero ja tehdä jokaiselle teräkselle oma ulosveto.



Kuva 20. Siipimuurin ja päätypalkin raudoitusta.

Sillan raudituspiirustus on esitetty liitteessä 2.

4.6 Luettelot

4.6.1 Materiaaliluettelot

Sillan eri rakenneosien, tarvikkeiden ja laitteiden järkevä nimeäminen ja numerointi helpottavat materiaaliluetteloiden tekemistä suuresti, sillä luettelot muodostetaan erilaisten suodatin- ja ryhmitysääntöjen avulla. Suodattimien avulla saadaan helposti muodostettua luettelot vain halutuista asioista. Suodatuskriteerinä voi olla esimerkiksi rakenneosien numerointi tai vaikka betoniluokka. Ryhmitysääntöillä samantyyppiset osat saadaan luetteloissa helposti peräkkäin. Revitissä ei tule mukana osien numeroinnin automatiikkaa. Ohjelmaan ilmaiseksi saatavan Revit Extensions -lisäosan mukana toimitetaan kuitenkin Element Positioning -apuohjelma, jonka avulla voidaan automaattisesti numeroida tietomallissa olevat objektit.

Tietomallista saadaan kätevästi lueteltua sillan kannen, reunapalkkien, pilareiden, peruslaattojen ja siirtymälaattojen tilavuudet ja betoniluokat. Luetteloista nähdään myös

siltaan kuuluvien varusteiden ja laitteiden kappalemäärät ja pituudet sekä pintakäsittelyjen ja muotitettavien sillanosien pinta-alat. Luettelosta saadut tiedot voidaan siirtää käsin esimerkiksi sillan kustannus ja määrälaskentaohjelmaan.

4.6.2 Betoniteräsluettelo

Liitteessä 3 esitetty Revit Structure -ohjelmalla muodostettu betoniteräsluettelo. Luettelo muodostettiin Liikenneviraston Betoniraudoitteiden suunnittelu -ohjeen mukaisesti. Betoniteräsluettelo voidaan tallentaa Revitistä myös hyvin lähelle Raudoitusluettelo-ohjelman mukaista tiedonsiirtomuotoa. Tiedoston alkuun tulee ainoastaan lisätä raudoiteluettelon otsikkotiedot, jonka jälkeen tekstitiedosto voidaan ladata suoraan Raudoitusluettelo-ohjelmaan ja muuntaa esimerkiksi Betoniraudoitteiden suunnittelu -ohjeen mukaiseen tiedonsiirtomuotoon.

Betoniteräsluettelon muodostaminen on ohjelmalla suhteellisen helppoa erilaisten ryhmitys ja suodatintoimintojen avulla. Luettelossa esiintyviä terästen mittoja ja positionumeroita voidaan vapaasti muokata suoraan luettelosta, jolloin muutokset päivittyvät myös malliin. Tämä on erityisen kätevä toiminto, joka helpottaa terästen muokkausta. Luettelon avulla voidaan korjata käsin esimerkiksi samojen terästen pienet mittaeroavaisuudet.

Betoniteräsluettelon teossa ongelmia aiheutti terästen taivutustyypeistä puuttuvat kulmat v ja u. Nämä kulmat eivät tule näkyviin betoniteräsluettelossa eli ohjelman tulostamisessa luettelossa ei ole riittäviä tietoja betoniterästen muodostamiseksi. Sama kulmaongelma johti myös siihen, että ohjelma käytti muutamalle teräspositiolle väärää taivutustyyppiä. Revit Structure -ohjelmassa ei ominaisuutta luseeraavien teräsryhmien näyttämiseen eli jokainen luseeraavan teräsryhmän teräs näkyy betoniteräsluettelossa omalla rivillään.

4.7 Revit Structure -tietomallin muut hyödyntämismahdollisuudet

Revit Structure -ohjelman tuottamaa tietomallia voidaan hyödyntää myös rakennusprojektin aikataulutuksessa Phasing-työkalun avulla. Jokaiselle objektille voidaan määrittellä, mihin projektin vaiheeseen se kuuluu. Näkymiä ja luetteloita voidaan suodattaa projektivaiheiden perusteella. Aikataulutus on kätevä apukeino, jos tietomallia hyödynnetään myös sillan materiaalihankinnoissa. Ohjelmasta voidaan helposti listata kunkin työvaiheen vaatimat materiaalit, jolloin rakennusprojektin hallinta helpottuu. Tietomalliin saadaan myös näkyviin vain kyseiseen työvaiheeseen liittyvät rakenteet, jolloin työvaiheiden suunnittelu on helpompaa visuaalisen tarkastelun avulla.

Sillan alittavan väylän vaatima vapaa-aukko vaatimus kannattaa mallintaa tietomalliin esimerkiksi yksinkertaisena suorakaiteen muotoisena solidikappaleena, joka voidaan ottaa tarvittaessa näkyviin. Tämän solidikappaleen avulla on erittäin helppo tarkastaa visuaalisesti, että silta täyttää sille asetetut aukko vaatimukset.

Revitillä voidaan tehdä erittäin korkeatasoisia havainnekuvia sillasta ja sen ympäristöstä. Revit käyttää kuvien renderöimiseen samaa Mental Ray -renderöintimoottoria kuin esimerkiksi Autodesk 3D Studio MAX, joka on erittäin tunnettu ja laajasti käytetty mallintamis-, animointi- ja renderöintiohjelmisto. Ohjelmalla voidaan tehdä havainnekuvien lisäksi myös renderöityä videokuvaa mallista Walkthrough -toiminnon avulla. Tämä on erittäin havainnollinen tapa esittää sillan soveltuvuutta ympäristöön esimerkiksi sillan ylittävän tai alittavan ajoneuvon kyydistä katsottaessa.

4.8 Revit Structure Bridge Extensions

Revit Structure -ohjelmaan on saatavissa siltojen suunnitteluun tarkoitettu Bridge Extensions -lisäosa. Se kuuluu jo aiemmin mainittuun Revit Extension -lisäosapakettiin. Lisäosan mukana on seuraavat osat: Roads and Terrain Definition, Integration with AutoCAD Civil 3D, Bridge Definition – Concrete Slab, Bridge Definition – Concrete Box Girder, Bridge Definition – Concrete Slab with Girders, Documentation Generation for Bridges ja Customization of Bridge Families.

Roads and Terrain Definition

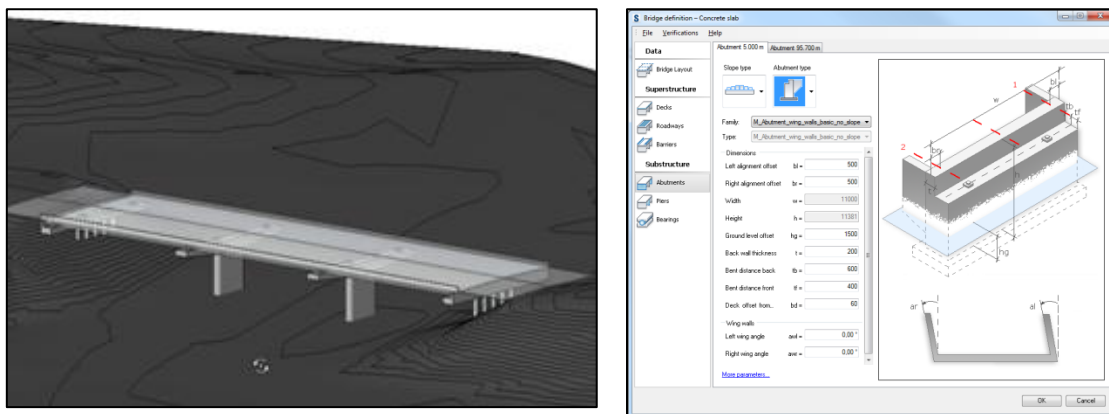
Roads and Terrain Definition -lisäosan avulla voidaan tuoda Revit Structureen tielinjauksia ja maaston topografiaa LandXML muodossa olevasta tiedostosta. Tieobjekteja voidaan luoda myös ilman lähtötietomallia. Lisäosa mahdollistaa ladatun tielinjauksen vaaka- ja pystygeometrian sekä poikkileikkauksen vapaan muokkaamisen. Lisäosaa voidaan hyödyntää varsinkin sillan yleissuunnitteluvaiheessa lataamalla tien- ja maaston mallit lähtötietoina ohjelmaan.

Integration with AutoCAD Civil 3D

AutoCAD Civil 3D on yhdyskunta- ja infrasuunnitteluun tarkoitettu ohjelmisto. Lisäosan avulla voidaan luoda kaksisuuntainen linkki Revit Structure ja AutoCAD Civil 3D -ohjelmien välille helpottamaan silta- ja tiesuunnittelijan välistä vuorovaikutusta. Sillä voidaan tuoda Civil 3D -ohjelmasta tiegeometria ja maastomalli suoraan Revit Structureen. Revitissä mallinnettu silta voidaan viedä Civil 3D -ohjelmaan tai Civil 3D:ssä luotu tielinjaukseen ja ympäristöön sovitettu sillan tilavuusmalli voidaan tuoda Revittiin rakennesuunnittelun pohjaksi.

Bridge Definition -lisäosat

Siltojen nopeaan mallintamiseen on olemassa kolme lisäosaa, joilla voidaan tehdä laattasiltoja, kotelopalkkisiltoja sekä elementtisiltoja. Lisäosan avulla voidaan luoda nopeasti yleissuunnitelmatasoisia siltamalleja käyttäen hyväksi olemassa olevaa tielinjausta. Silta voidaan luoda helposti valitsemalla ensin mallissa oleva tielinjaus ja määrittelemällä sen jälkeen sillan eri osien halutut muodot, sijainnit ja ainespaksuudet. Eri asetuksilla voidaan säätää muun muassa kannen muotoa, reunapalkkien mittoja ja tyyppiä, pääty- ja välitukien muotoja ja sijainteja sekä laakerien ja kannatinpalkkien mittoja. Tehtyä siltaa voidaan täysin vapaasti muokata eli sillan sovittaminen ympäristöön on erittäin nopeaa. Lisäosan automatiikka on erittäin hyvin toteutettu ja sillä voidaan muodostaa muutamassa minuutissa täysin tiegeometrian mukainen parametrisoitu silta. Kuvassa 21 on näytetty esimerkkinä parametrisoidun maatuen valintaikkuna ja lisäosalla tehty laattasilta. Lisäosa on tarkoitettu sillan yleissuunnitteluvaiheeseen, eikä kaikkia sen muodostamia kappaleita ole yleensä edes mahdollista raudoittaa. Tämä johtuu siitä, että osa objekteista muodostetaan sellaisella objektityypillä, johon ohjelman raudoitustyökalu ei toimi. [20]



Kuva 21. Revit Structuren Bridge Definition -lisäosalla voidaan helposti luoda parametrisoitu silta. [20]

Bridge Definition -lisäosan siltavaihtoehdot eivät vastaa muotoilultaan ja rakenneratkaisultaan Suomessa tyypillisiä siltoja. Tämän takia lisäosaa ei hyödynnetty tässä diplomityössä. Bridge Definition -lisäosa antaa kuitenkin erinomaisen esimerkin siitä, miten helpoksi sillan tietomallipohjainen yleissuunnittelu voidaan tehdä oikeilla työkaluilla ja riittävän monipuolisella apuohjelmalla.

Documentation Generation for Bridges -lisäosalla voidaan helposti tuottaa tehdystä siltamallista erilaisia näkymiä ja piirustuksia. Bridge Definition -lisäosaa voidaan myös itse täydentää. Tämä tapahtuu Customization of Bridge Families -lisäosan avulla, jolla voidaan luoda ja muokata sillan eri osien parametrisoituja Family-objekteja. Lisäosaan voidaan siis tehdä itse myös Suomessa tyypillisten siltojen rakenneosat, jolloin se soveltuisi myös Suomalaisten siltojen esisuunnitteluun. [20]

4.9 Rakenteen analysointi ja mitoitus tietomallin avulla

Työn yksi tarkoitus oli hyödyntää tehtyä tietomallia myös rakenteen analysoinnissa. Tarkoitus oli muodostaa tietomalli siten, että se sisältäisi rakenteen analyttisen mallin, joka voitaisiin siirtää suoraan Robot Structural Analysis -ohjelmistoon.

Revit Structure ohjelmalla ei kuitenkaan onnistuttu luomaan tarkoituksenmukaista kansirakenteen analyttistä mallia. Tämä johtui työssä käytetystä kansirakenteen mallintamistavasta. Kansi muodostettiin palkki-tyyppisenä Family-objektina pursottamalla kansilaatan profiilia tien ohjausviivaa pitkin. Ohjelma muodostaa palkkiobjektien analyttisen mallin automaattisesti niiden pursotuksessa käytettyä ohjausviivaa pitkin. Tästä johtuen laattasilan kansirakenne on kuvattu tietomallissa palkin analyttisellä mallilla. Laattasiltojen kunnollinen analysointi vaatii FEM-laskennassa laattaelementtien käyttöä, jolloin rakenteen poikki- ja pituussuuntainen käyttäytyminen tulee huomioitua oikein. Ohjelman muodostamaa palkkimallia ei voida siis hyödyntää laattasilan analysoinnissa eli rakenneanalyysimalli joudutaan muodostamaan analysointiohjelmaan alusta asti uudestaan.

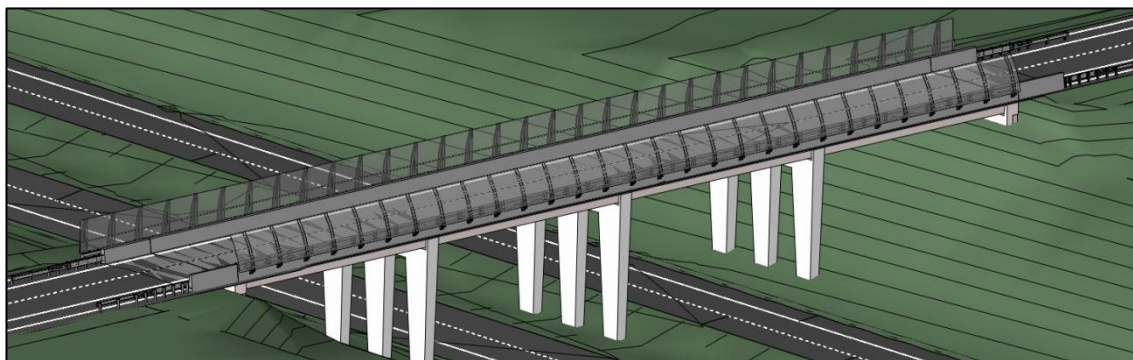
Analyysimallin muodostaminen FEM-ohjelmistoihin on kokeneelle suunnittelijalle verrattain yksinkertainen ja nopea prosessi. Tietomallista suoraan muodostettu analyysimalli ei siis säästäisi ajassa kuin korkeintaan muutamia tunteja. Ajansäästöä suurempi hyöty tulisi kuitenkin tietomallin ja rakenneanalyysiohjelman kaksisuuntaisesta tiedonvaihdosta. Ohjelmien välisestä tiedonsiirrosta olisi todellista hyötyä, jos rakenneanalyysiohjelma osaisi mitoittaa siltarakenteeseen tarvittavan raudoituksen luotettavasti. Valmis rauditus voitaisiin suoraan siirtää analysointi- ja mitoitusohjelmasta sillan tietomalliin. Markkinoilla on tuskin ainuttakaan mitoitusohjelmistoa, joka

soveltuu tähän tarkoitukseen hyvin. Erityisesti siltojen vaikea geometria ja rakennemallien monimutkaisuus asettaa haasteita ohjelmistoille.

4.10 Revitillä tehtävän sillansuunnittelun ohjeistusta

Paul Hellowell GHD Australia -yrityksestä on perehtynyt Revitillä tehtävään sillansuunnitteluun. Hän on mallintanut kymmeniä siltoja Revitillä ja tehnyt aiheesta PDF-ohjeen jossa on neuvottu yksityiskohtaisesti Revitillä tehtävän sillanmallinnuksen eri vaiheet. Ohjeessa on annettu erinomaisia käytännönvinkkejä ja -ohjeita lähtötietojen lataamisesta ja koordinaattien asettamisesta aina piirustusten tuottamiseen. Autodesk Universityn internetsivuilla on saatavilla hänen pitämä opetusluento, jossa käydään läpi kuvassa 22 esitetyn sillan suunnitteluprosessi alusta loppuun. Tämä on erittäin hyvä opetusvideo sellaiselle, joka aloittelee Revitillä tehtävää sillan suunnittelua. [21]

Autodesk'in internet-sivuilta on ladattavissa Bridge Toolkit for Autodesk Revit Structure 2010 dokumentaatio. Kyseinen paketti sisältää ohjeita, työkaluja sekä valmiiksi tehtyjä siltakomponentteja Revitillä tehtävän sillansuunnittelun avuksi. Paketin mukana on myös muutama esimerkkisilta, joita tutkimalla voi perehtyä tarkemmin muun muassa siltojen parametrisiin komponentteihin sekä siltojen eri mallinnustapoihin.



Kuva 22. Revit Structure -ohjelmalla tehty sillan tietomalli [22].

4.11 Havaitut puutteet ja kehitysideat


Piirustukset

- Astemerkintöihin tuki myös gooneille eli uusasteille (englanniksi gradian). Suomessa ilmoitetaan sillan vinous gooneina.

Raudoitus

Sillan tietomalliperusteisen suunnitteluprosessin aikana ilmenneistä ongelmista suurin osa liittyi tavalla tai toisella raudoitukseen. Seuraavassa on yhteenveto raudoituksen mallintamiseen ja raudoituspiirustuksiin liittyvistä ongelmista.

- Luseeraavien teräsryhmien puute hidastaa mallintamista ja raudoituspiirustusten tekemistä. Raudoitusluetteloihin tulisi saada oma merkintä luseeraavalle terästyypille, missä on ilmoitettu teräsryhmän ensimmäisen ja viimeisen teräksen pituus, terästen lukumäärä ja pituuden askellusväli. Kuvassa 23 on esitetty esimerkki, miten kohdesillan teräsposition 64 luseeraava teräsryhmä tulisi saada esitettyä teräsluetteloissa.

Taivutus- tyyppi	Nro	Kpl	D mm	L mm	ΔL mm	Paino yhteensä kg	TAIVUTUSMITAT mm										Huom. muutos
							a	b	c	d	e	u	v	x	y	r	
B 	64	1	12	4000	51	62,3	3350	650								30	
...		16		4770			4120										

Kuva 23. Esimerkki luseeraavan teräksen hyvästä esittämistavasta teräsluettelossa.

- Terästen automaattiset jatkospituudet nopeuttaisivat raudoitusta ja mahdollistaisivat raudoituksen mukautumisen parametrisesti luotuihin komponentteihin.
- Kaarevan pinnan raudoitukseen pitää kehittää parempi menetelmä. Teräksen osittainen kaarevuus täytyy mahdollistaa eli teräkset täytyy saada kulkemaan esimerkiksi jonkin sillan muotoon sidotun ohjausviivan perässä.
- Irtoteräket olisi hyvä saada ryhmiteltyä siten, että teräksen positiomerkintä osaa laskea ryhmiteltyjen terästen yhteislukumäärän sekä ilmoittaa kaikki teräsryhmässä olevien terästen eri jakovälit.
- Soliditeräksen väriä pitäisi voida muuttaa automaattisesti esimerkiksi teräksen taivutustyyppin mukaan. Tällöin terästen visuaalinen tarkastelu olisi havainnollisempaa.
- Ohjelmaan tulisi saada yhteinen asetus sille, että kaikki teräkset saadaan näky-mään 3D-mallissa solideina. Tällä hetkellä jokaisen teräksen asetuksista täytyy käydä laittamassa solidimalli erikseen päälle.
- Ohjelmaan tulisi saada tuki kahteen suuntaan taivutetulle raudoitukselle.
- Terästen taivutustyypeihin tulee lisätä kulmaparametrit v ja u, jotta nämä kulmat näkyvät myös teräsluetteloissa.
- Terästen tarkasteluun tulisi saada työkalu, joka näyttää suoraan päällekkäin olevat teräspositiot selkeästi.
- 3D-mallin käyttäminen alkaa pätkiä kun rakenteessa on paljon raudoitteita näkyvillä. Suorituskykyä tulisi parantaa, jotta ohjelman käyttäminen on miele-kästä ja tehokasta.
- Raudoitepiirustusten tekemiseen ei ole ohjelmassa juurikaan valmiita työkaluja. Ohjelmaan tarvitaan perustyökalut osoittamaan piirustuksessa olevat raudoite-tangot sekä tekemään automaattiset terästen ulosvedot.
- Betonin suojapeitteeseen päättyvä suora teräs tarttuu välillä liian automaattisesti suojapeitteen rajaviivaan. Tämä aiheuttaa sen, että teräksen pituutta ei voida käsin pyöristää eli teräspituuksista tulee välillä liian millimetritarkkoja.

Käytettävyys ja komponentit

- Ohjelmaan olisi hyvä saada Custom Components -projektissa luodut parametri-set siltakomponentit, jolloin siltojen suunnittelu nopeutuu.
- Ohjelma vaatii jonkin verran lokalisointia, jotta piirustusmerkinnät, nimiöt ja muut vastaavat asetukset vastaavat Suomen käytäntöjä. Ohjelmaan olisi siis hy-vä muodostaa silta-alalle tarkoitettu lokalisoitu Template-tiedosto.

5 EUROKOODIEN MUKAINEN MITOITUS

5.1 Yleistä

Suomessa otettiin eurokoodit käyttöön sillansuunnittelussa 1.6.2010. Liikennevirasto on julkaissut ensimmäiset versiot siltojen kuormia ja betonisiltoja koskevista eurokoodin mukaisista sovellusohjeista. Tässä työssä mitoitetaan tietomallintamisen sovelluskohteenä olevan tyyppisillan rauditus, niin että se täyttää eurokoodin vaatimukset. Työn tarkoitus on lisäksi tutkia laattasiltojen mitoitus eurokoodeilla ja tehdä huomioita mahdollisista sovellusohjeen ongelmakohdista ja lisäohjeistuksen tarpeista. Työ toimii esityönä myöhemmin tehtävälle Bul-tyyppipiirustussarjan päivittämiseksi eurokoodiaikaan. Diplomityön pääpaino on tietomallintamisessa eli mitoitus käsitellään yleisellä tasolla. Mitoituksessa esitetään käytetyt mitoitusmenetelmät ja yhteenvedot saaduista tuloksista.

Työssä käydään läpi myös laattasiltojen mitoituksessa esiintyviä ilmiöitä ja tutkitaan hieman tarkemmin rakennemallin muodostamista sekä eri rakennemallivaihtoehtoja.

Työssä ei selitetä kaikkia sillan mitoittamiseen liittyviä seikkoja, vaan lukijalla täytyy olla perustietämys silta-alaan liittyvistä termeistä ja lyhenteistä.

Tässä työssä käytetyt sovellusohjeet ovat vasta lausuntoversioita eli niissä olevan asiat, kuten kuormien osavarmuuskertoimet, tulevat mahdollisesti vielä muuttumaan ennen sovellusohjeiden lopullista julkaisua. [23; 26]

5.2 Kuormitukset

Tässä luvussa esitellään lyhyesti sillan mitoituksessa käytetyt kuormitukset. Eurokoodin mukaisista kuormituksista esitellään vain ne kuormat, jotka koskevat työn kohteena olevaa siltaa. Liikennevirasto on julkaissut Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet -sovellusohjeen lausuntoversion, jossa tarjotaan suunnittelijalle helposti kaikki oleellinen tieto Suomessa rakennettavien siltojen kuormituksista. Tässä työssä viitataan suoraan sovellusohjeen mukaisiin kaavoihin, sillä niihin on sijoitettu valmiiksi Suomessa valittujen kansallisten kertoimien valinnat.

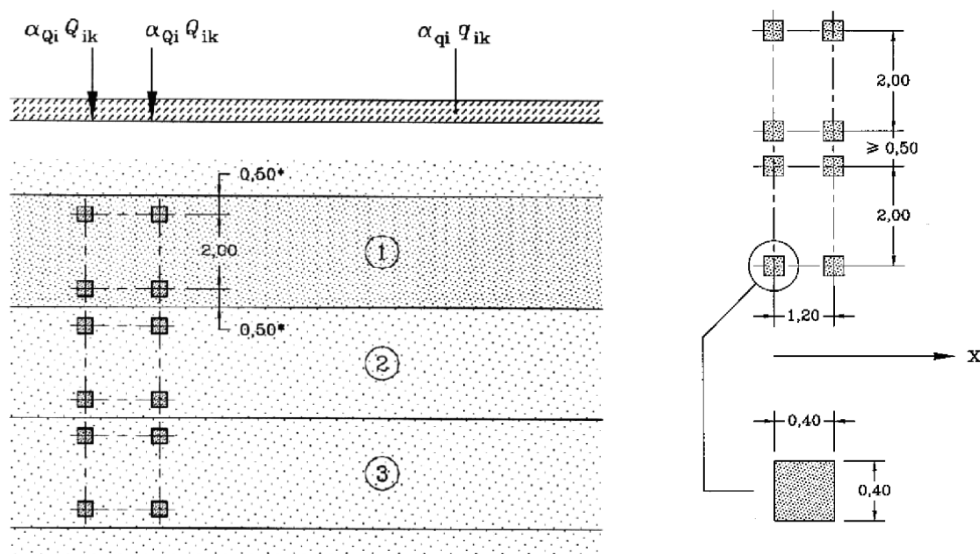
5.2.1 Kuormakaavio LM1

Kuormakaavio LM1 koostuu kuormakaistoille sijoitettavista tasaisesti jakautuneista kuormista sekä kahden akselikuorman muodostamista telikuormista. Telikuormien akseliväli on 1,2 m ja ne tulee sijoittaa sillalle siten, että saadaan mahdollisimman epäedullinen vaikutus. Akseli koostuu 2 m:n etäisyydellä toisistaan sijaitsevista pyöräkuormista. Taulukossa 1 on esitetty ominaisarvojen intensiteetit ja kuvassa 24 pyöräkuormien kosketuspinta-alat.

Taulukko 1. Kuormakaavion LM1 ominaisarvot [23].

Sijainti	Yleiset tiedot	
	Telikuorma	Tasan jakautunut kuorma
	$2 \times Q_{ik}$ (kN)	q_{ik} (tai q_{rk}) (kN/m ²)
Kaista nro 1	2×300	9
Kaista nro 2	2×200	2,5
Kaista nro 3	2×100	2,5
Muut kaistat	-	2,5
Kaistojen ulkopuolinen alue (q_{rk})	-	2,5*

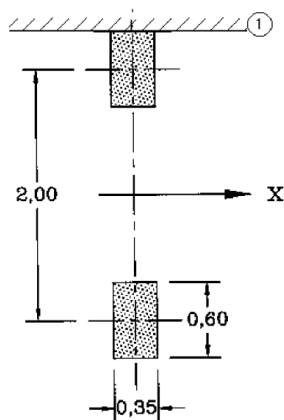
* kaistojen ulkopuolisen alueen tasainen kuorma voidaan jättää huomioimatta



Kuva 24. Kuormakaavion LM1 kuormittaminen [24].

5.2.2 Kuormakaavio LM2

Kuormakaavio LM2 koostuu yhdelle kuormakaistalle sijoitettavasta akselikuormasta, jossa yhden akselin kuormitus on 400 kN. Akseli koostu kuvan 25 mukaisesti kahdesta 2 m:n etäisyydellä toisistaan sijaitsevasta pyöräkuormasta. Pyöräkuorma voi sijaita reunakiven vieressä. [23]

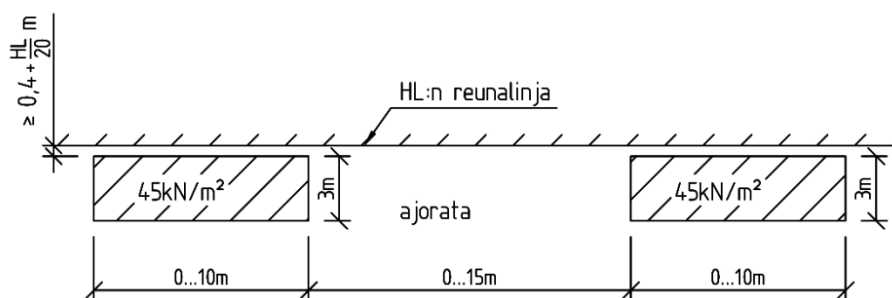


Selite
X sillan pituussuuntainen akseli
1 reunakiveys

Kuva 25. Kuormakaavio LM2 [24].

5.2.3 Kuormakaavio LM3

Kuormakaavio LM3 ottaa huomioon ylläskaiden erikoiskuormien vaikutukset. Sillä mitoitetaan rakenteet murtorajatilassa sekä alusrakenteiden kantavuus. Kuormakaavion valinta on jätetty kansallisesti päätettäväksi. Suomessa on päädytty kuvan 26 mukaisen kaavion käyttämiseen. Kuormakaaviota määriteltäessä tavoitteena on ollut erityisesti saada lisää kapasiteettia jatkuvien laattasiltojen välituille. [25]



Kuva 26. Kuormakaavio LM3 [23].

5.2.4 Kaistajako

Kuormakaavioiden LM1, LM2 ja LM3 oletetaan kuormittava sillan pituussuuntaista kuormakaistaa, jonka leveys on 3,0 m. Kuormakaistojen lukumäärä ja sijoittelu sillan poikkisuunnassa valitaan siten, että saavutetaan määräävä vaikutus. Kuormakaistojen lukumäärä on enintään se määrä, mikä mahtuu alueelle, minne ajoneuvoilla on pääsy. Käytännössä tämä alue on sillan hyödyllinen leveys. Hyödyllinen leveys jaetaan kahteen yhtä leveään kaistaan, mikäli sillan leveys on välillä 5,4–6,0 m. Jos leveys on alle 5,4 m niin kannelle asetetaan vain yksi 3 metrin kuormakaista. [23]

5.2.5 Rakenteiden omapaino

Materiaalien tilavuuspainot on lueteltu Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet -ohjeessa. Tilavuuspainot ovat raudoitettulle betonille 25 kN/m³ ja pengertäytteelle 20 kN/m³. [23]

Siirtymälaatta huomioidaan mitoituksessa vain jos se vaikuttaa mitoituskuormaa lisäävästi. Siirtymälaatan pysyviin kuormiin sisältyy laatan oman painon lisäksi laatan päällä olevien maakerrosten paino. Siirtymälaatan tukireaktio siltaan lasketaan otaksumalla se yksinkertaiseksi palkiksi, jonka jännemitta on 60 % siirtymälaatan pituudesta. Loppuosa siirtymälaatasta tukeutuu suoraan penkereeseen. [23]

5.2.6 Viruma

Viruman arvo määritetään Betonisillat -sovellusohjeen mukaisilla kaavoilla. Virumaluvun avulla määritellään betonin pitkäaikainen kimmokerroin, joka vaikuttaa muun muassa käyttörajatilan pitkäaikaisiin jännityksiin.

Virumaluvun laskenta

Virumaluku lasketaan kaavalla (1). [26]

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (1)$$

missä

φ_0 on nimellinen virumaluku
 $\beta_c(t, t_0)$ on kerroin, joka kuvaa virumisen kehittymistä ajan myötä kuormittumisen jälkeen.

Nimellinen virumaluku saadaan kaavasta (2).

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (2)$$

missä

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad \text{on betonin lujuuden vaikutuksen huomioon ottava kerroin}$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} \quad \text{on kerroin, jolla otetaan huomioon betonin kuormittumisen alkamisajankohdan } t_0 \text{ vaikutus}$$

$$\varphi_{RH} = \begin{cases} 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} & , \text{ kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \\ \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 & , \text{ kun } f_{cm} \geq 35 \text{ MPa} \end{cases}$$

missä edelleen

RH on ympäristön suhteellinen kosteus prosentteina. Ulkorakenteille käytetään arvoa RH 80 %.

$h_0 = 2A_c/u$ on poikkileikkauksen muunnettu paksuus. Pinta-alana A_c käytetään sitä osaa poikkileikkauksen pinta-alasta, joka vaikuttaa eniten tutkittavaan tapaukseen. Piiriin u otetaan vain ne osat poikkileikkauksesta, joista haihtumista pääsee tapahtumaan.

$$\alpha_1 = \left(\frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0,7} \quad \text{ja} \quad \alpha_2 = \left(\frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0,2}$$

Kaavassa (1) esiintyvä kerroin, joka ottaa huomioon virumisen kehittymisen ajan myötä, lasketaan kaavalla (3).

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right)^{0,3} \quad (3)$$

missä

t on betonin ikä vuorokausina tarkasteluajankohtana
 t_0 on betonin ikä vuorokausina kuormittumisen alkaessa

$$\beta_H = \begin{cases} 1,5 \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500 & , \text{ kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \\ 1,5 \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18} \right] h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3 & , \text{ kun } f_{cm} \geq 35 \text{ MPa} \end{cases}$$

missä edelleen

$$\alpha_3 = \left(\frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0,5}$$

5.2.7 Kutistuma

Sillan kokonaiskutistuma lasketaan Betonisillat -sovellusohjeen mukaisilla kaavoilla. Eurokoodin mukaan betonin kokonaiskutistuminen koostuu sisäisestä kutistumasta ja kuivumiskutistumasta. Sisäinen kutistuma tapahtuu betonin kovettuessa ja on suoraan verrannollinen betonin lujuuteen. Kuivumiskutistuma kehittyy hitaasti veden siirtyessä kovettuneen betonin läpi.

Kutistuman laskenta

Kokonaiskutistuma lasketaan kaavalla (4). [26]

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (4)$$

missä

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cd} & \text{ on kuivumiskutistuma} \\ \varepsilon_{ca} & \text{ on sisäinen kutistuma, eli autogeeninen kutistuma.} \end{aligned}$$

Kuivumiskutistuma ajanhetkellä t saadaan kaavasta (5).

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (5)$$

missä

$$k_h \text{ on kerroin, joka riippuu muunnetusta paksuudesta } h_0 \text{ alla olevan taulukon 2 mukaisesti. Väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti.}$$

Taulukko 2. Kerroin k_h [26].

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}}} \right] \cdot 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] \cdot 10^{-6}$$

joissa edelleen

$$\begin{aligned} t & \text{ on betonin ikä tarkasteluhetkellä vuorokausina} \\ t_s & \text{ on betonin ikä vuorokausina kuivumiskutistumisen alkaessa tavallisesti jälkihoitoajan pituus} \\ f_{ck} & \text{ on betonin lujuusluokka [MPa]} \\ h_0 = 2A_c/u & \text{ on poikkileikkauksen muunnettu paksuus ks. kappale 5.2.6} \\ \alpha_{ds1} = \begin{cases} 3 \\ 4 \\ 6 \end{cases} & \begin{cases} \text{, kun sementti on S-tyyppiä} \\ \text{, kun sementti on N-tyyppiä} \\ \text{, kun sementti on R-tyyppiä} \end{cases} \\ \alpha_{ds2} = \begin{cases} 0,13 \\ 0,12 \\ 0,11 \end{cases} & \begin{cases} \text{, kun sementti on S-tyyppiä} \\ \text{, kun sementti on N-tyyppiä} \\ \text{, kun sementti on R-tyyppiä} \end{cases} \\ RH & \text{ on ympäristön suhteellinen kosteus prosentteina. Ulkorakenteille käytetään arvoa RH 80 \%.} \end{aligned}$$

Sisäinen kutistuma lasketaan kaavalla (6).

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot 2,5(f_{ck} - 10\text{MPa}) \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

missä

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}}$$

Kutistuma saadaan syötettyä kuormituksena rakennemalliin muuttamalla se kokonaislämpötilan laskuksi. Lämpötilanlaskun arvo saadaan jakamalla saatu kutistuma betonin pituuden lämpötilakertoimella.

5.2.8 Maanpaineet

Siltojen geoteknisessä suunnitteluohjeessa annetaan ohjeet maan lepopaineen laskentaan. Ohjeen kaavat ovat käytännössä samoja kuin standardissa SFS-EN 1997-1 esitetyt kaavat. Lepopainekerroin saadaan maanpaineelle kaavasta (7). [27]

$$K_0 = (1 - \sin \varphi')(1 + \sin \beta) \quad (7)$$

missä

φ'	on leikkauskestävyyskulma (kitkakulma) tehokkaiden jännitysten perusteella
β	on maan kaltevuuskulma.

Kitkakulmana käytetään siltojen geoteknisessä suunnitteluohjeissa annettua arvoa 38° [27].

Eurokoodissa ohjeistetaan ottamaan taustatäytön lisäämisestä muodostuva lisäpaine huomioon lepopaineessa. Tätä asiaa ei ole ohjeistettu eurokoodissa tarkemmin, mutta Siltojen geoteknisessä suunnitteluohjeessa on neuvottu miten tiivistyslisä huomioidaan lepopaineessa. Tiivistyslisä kehittyy lineaarisesti arvoon 16 kN/m^2 $0,5 \text{ m}$ matkalla maanpinnasta. Tämän jälkeen se pysyy vakiona. [27]

Passiivinen maanpaine lasketaan kaavasta (8). [27]

$$\sigma_p(Z) = K_p [\gamma z + q] + 2c\sqrt{K_a} \quad (8)$$

missä

K_p	on vaakasuuntaisen passiivisen maanpaineen kerroin
γ	on tuetun maan tilavuuspaino
z	on etäisyys alaspäin seinän yläreunasta mitattuna
q	on pystysuuntainen pintakuorma
c	on maan koheesio
K_a	on aktiivisen maanpaineen kerroin.

Passiivisen maanpaineen määrittämisessä on otettava huomioon rakenteen siirtymän suuruus sekä pengermateriaalin laatu ja tiiveys. Nämä asiat huomioidaan Sillan geotekniset suunnitteluperusteet -ohjeen mukaisesti. Ohjeessa maanpainekerroin K_p riippuu sillan päädyn vaakasiirtymästä tulopenkereeseen päin. Kerroin K_p saadaan kaavasta (9). [27]

$$K_p = \frac{K_{p,max}}{3} + \frac{0,5K_{p,max}}{0,0075H} v \quad (9)$$

missä

$K_{p,max}$	on täyden passiivisen maanpaineen kerroin
H	on sillan päätypalkin korkeus
v	on vaakasiirtymä kohdassa z.

Maan ja rakenteen väliseksi seinäkitkakulmaksi voidaan Sillan geotekniset suunnittelu-perusteet -ohjeen perusteella valita kulma $\phi/2$ [27, s. 40]. Seinäkitkakulman avulla saadaan standardin SFS-EN 1997-1 liitteen C kuvan C.2 avulla määriteltä maksimi passiivipainekertoimen $K_{p,max}$ arvoksi 8, kun sillan päätyateriaalina on sora. [28]

Luiskassa sijaitsevaan sillan pilariin maanpaineen voidaan otaksua kohdistuvan pilarin kolminkertaiselta leveydeltä. [27]

5.2.9 Liikennekuorman maanpaine

Liikennekuorman maanpainetta laskettaessa pystysuoran liikennekuorman arvoksi penkereellä sillan takana oletetaan 20 kN/m^2 . Kuorma vaikuttaa koko hyödyllisellä leveydellä. Liikennekuorman maanpaine lasketaan aina lepopainekertoimella. [23]

Liikennekuorman maanpaine vaikuttaa myös siirtymälaatan kautta. Mitoituksessa otaksutaan siirtymälaatan päällä olevan tasainen liikennekuorma 20 kN/m^2 . Siirtymälaatan tukireaktio siltaan lasketaan, kuten kappaleessa 5.2.5 on esitetty. [23]

5.2.10 Lämpötilakuormat

Kokonaislämpötilan muutos

Eurokoodin mukainen kokonaislämpötilan muutos määritellään standardin SFS-EN 1991-1-5 kansallisen liitteen isotermikarttojen avulla. Betonisiltojen maksimilämpötilana $T_{e,max}$ pidetään lämpötilaa, joka on $2 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpimämpi, kuin varjossa mitatun ilman maksimilämpötila. Vastaavasti minimilämpötila $T_{e,min}$ on betonisilloilla $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ylempi, kuin ilman minimilämpötila. [23]

Sillan suurinta kutistumista ja laajenemista vastaavat keskilämpötilan muutokset saadaan kaavoista (10) ja (11). [29]

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} \quad (10)$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 \quad (11)$$

missä

T_0	on sillan alkulämpötila rakenteen valmistumishetkellä
$T_{e,max}$	on siltarakenteen korkein keskilämpötila
$T_{e,min}$	on siltarakenteen matalin keskilämpötila
$\Delta T_{N,con}$	on negatiivinen keskilämpötilan muutos
$\Delta T_{N,exp}$	on positiivinen keskilämpötilan muutos.

Sillan alkulämpötilaksi voidaan olettaa $T_0 = 10\text{ °C}$, kun alkulämpötila ei ole ennakoitavissa, muuten valitaan arvioitu alkulämpötila. [23]

Lämpötilaero

Eurokoodissa poikkileikkauksen ylä- ja alapinnan välinen lämpötilaero voidaan olettaa lineaarisesti tai epälineaarisesti jakautuneeksi. Tässä työssä käytetään lineaarista lämpötilaeroa. Lineaarisen lämpötilaero arvo saadaan taulukosta 3.

Taulukko 3. Lineaarinen pystysuuntainen lämpötilaero [23].

Päällysrakennetyyppi	Yläpinta lämpimämpi $\Delta T_{M,heat}$ (°C)	Alapinta lämpimämpi $\Delta T_{M,cool}$ (°C)
Tyyppi 1: Teräspäällysrakenne	18	13
Tyyppi 2: Liittopäällysrakenne	15	18
Tyyppi 3: Betonipäällysrakenne		
betonikotelo	10	5
betonipalkki	15	8
betonilaatta	15	8

Taulukon 3 arvot perustuvat 50 mm päällystepaksuuteen. Taulukossa 4 on esitetty lämpötilaerojen korjauskerroin k_{sur} eri päällystepaksuuksille.

Taulukko 4. Kertoimen k_{sur} suositusarvot, jolla otetaan huomioon päällysteen erilainen paksuus [23].

Päällysteen paksuus [mm]	Tyyppi 1		Tyyppi 2		Tyyppi 3	
	$\Delta T_{M,heat}$ (°C)	$\Delta T_{M,cool}$ (°C)	$\Delta T_{M,heat}$ (°C)	$\Delta T_{M,cool}$ (°C)	$\Delta T_{M,heat}$ (°C)	$\Delta T_{M,cool}$ (°C)
päällystämätön	0,7	0,9	0,9	1,0	0,8	1,1
vesieristetty *	1,6	0,6	1,1	0,9	1,5	1,0
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	0,7	1,2	1,0	1,0	0,7	1,0
150	0,7	1,2	1,0	1,0	0,5	1,0
750 (tukikerros)	0,6	1,4	0,8	1,2	0,6	1,0

* yläraja-arvo tummalla pinnalla

Lämpötilakuormien yhdistäminen

Keskilämpötilan muutos ja lineaarinen lämpötilaero voivat vaikuttaa rakenteeseen samanaikaisesti. Rakennemallissa saatavien lämpötilakuormien aiheuttamat voimasuureet yhdistellään alla olevilla kaavoilla (12) ja (13). Määrävimmin kaavan lämpötilakuormien yhteisvaikutusta käytetään varsinaisissa kuormitusyhdistelyissä. Kahdesta alla olevasta kaavasta saadaan siis muodostettua yhteensä 8 kaavavaihtoehtoa, joista määräävin haetaan. [23]

$$T_k = \Delta T_{M,heat} \text{ (tai } \Delta T_{M,cool} \text{)} + 0,35 \cdot \Delta T_{M,exp} \text{ (tai } \Delta T_{M,con} \text{)} \quad (12)$$

$$T_k = 0,75 \cdot \Delta T_{M,heat} \text{ (tai } \Delta T_{M,cool} \text{)} + \Delta T_{M,exp} \text{ (tai } \Delta T_{M,con} \text{)} \quad (13)$$

missä

$\Delta T_{M,cool}$ on lämpötilaero ylä- ja alapinnan välillä, alapinta lämpimämpi,

$\Delta T_{M.heat}$	on lämpötilaero ylä- ja alapinnan välillä, yläpinta lämpimämpi
$\Delta T_{N.con}$	on negatiivinen keskilämpötilan muutos
$\Delta T_{N.exp}$	on positiivinen keskilämpötilan muutos.

5.2.11 Tuulikuormat

Tuulenpaineen arvot on laskettu olettaen tuulennopeuden modifioimattomalle perusarvolle $v_{b,0}$ arvo 23 m/s. Tuulenpaineet lasketaan tyhjälle kannelle sekä kannelle, jossa on liikennekuormaa. Liikenneviraston sovellusohjeessa on käytetty eurokoodin eräistä tulkinnoista poiketen liikennekuorman kanssa samaan aikaan esiintyvälle tuulennopeuden modifioimattomalle perusarvolle $v_{b,0}^*$ samaa arvoa 23 m/s [23]. Sillan kanteen kohdistuva tuulikuorma lasketaan taulukosta 5 saatavien tuulenpaineiden avulla.

Taulukko 5. Siltaan kohdistuva tuulen paine [kN/m^2] [23].

Maasto- luokka	0		I		II		III		IV	
b/d _{tot}	$z_e \leq 20m$	$z_e = 50m$	$z_e \leq 20m$	$z_e = 50m$	$z_e \leq 20m$	$z_e = 50m$	$z_e \leq 20m$	$z_e = 50m$	$z_e \leq 20m$	$z_e = 50m$
$\leq 0,5$	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, 4	0,7

^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 eli projektiopinta-alasta alle 50 % on avointa.

missä	b	on siltakannen leveys
	d _{tot}	on siltakannen korkeus
	z _e	on siltakannen painopisteen etäisyys maan pinnasta.

Siltakannen korkeuteen d_{tot} lasketaan mukaan siltakannella olevan tieliikenteen korkeus d* = 2,0 m. Taulukon väliarvot voidaan interpoloida. Yleensä voidaan käyttää maastoluokan II arvoja, ellei toisin määrätä. Sillan pituussuuntaiset tuulikuormat ovat laattasilloilla 25 % poikittaisista tuulikuormista [23]. Siltakannen korkeus poikittaiselle tuulikuormalle A_{ref,x} saadaan taulukosta 6.

Taulukko 6. Siltakannen vaikutusalan korkeus [23].

Kaide	toisella puolella	molemmilla puolin
Avoin kaide	d + 0,3 [m]	d + 0,6 [m]
Umpinainen kaide	d + d ₁ [m]	d + 2 · d ₁ [m]
Liikenteen kanssa	d + d* [m]	

missä	d	on siltakannen korkeus
	d ₁	on umpikaiteen korkeus
	d*	on liikenteen korkeus.

Kannen poikittaiseksi tuulikuorma saadaan kaavasta (14).

$$F_{wk} = q_{wk} \cdot A_{ref,x} \quad (14)$$

missä	q _{wk}	on tuulenpaine
	A _{ref,x}	on kannen projektiotalan korkeus.

5.2.12 Törmäyskuormat

Törmäys alusrakenteisiin

Törmäyskuormat alusrakenteisiin saadaan Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - ohjeen taulukosta F.4. Törmäyskuorman suuruus riippuu sillan alittavan liikenteen luokasta. Kuorman suuruutta voidaan pienentää, jos alusrakenteet ovat riittävän kaukana ajoradan reunasta. Liikenteen suuntainen törmäyskuorma F_{dx} ja liikenteen suuntaa vastaan kohtisuora törmäyskuorma F_{dy} eivät vaikuta törmäystilanteessa samanaikaisesti. [23]

Törmäys päällysrakenteeseen

Törmäyskuormat päällysrakenteeseen saadaan Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - ohjeen taulukosta F.5. Törmäyskuorman suuruus riippuu sillan alittavan liikenteen luokasta ja sillan alarajakorkeudesta. Liikenteen suuntainen törmäyskuorma F_{dx} ja liikenteen suuntaa vastaan kohtisuora törmäyskuorma F_{dy} eivät vaikuta törmäystilanteessa samanaikaisesti. [23]

5.2.13 Tukien siirtyminen

Maanvaraisten tukien painumaeroksi oletetaan aina vähintään 10 mm. Painumaerot voidaan myös arvioida geoteknisten laskelmien perusteella. Tukipainuma otaksutaan pysyväksi kuormaksi. [23]

5.2.14 Jarrukuorma ja poikittaiset kuormat

Ajoneuvon jarrutuksen ja kiihdytyksen aiheuttama vaakasuora jarrukuorma Q_{lk} vaikuttaa pituussuuntaisesti ajoradan pinnan tasolla. Kuorma oletetaan jakaantuvan tasan koko ajoradan leveydelle. Kuorman ominaisarvo lasketaan kaavasta (15). [23]

$$\begin{aligned} Q_{lk} &= 360 + 2,7L \text{ [kN]} \\ Q_{lk} &\leq 500 \text{ kN} \end{aligned} \tag{15}$$

missä L on kannen yhtenäisen osan pituus [m].

Poikittainen jarrukuorma Q_{trk} vaikuttaa samanaikaisesti pituussuuntaisen jarrukuorman Q_{lk} kanssa. Poikittaisen jarrukuorman suuruus on 25 % pituussuuntaisen jarrukuorman arvosta.

5.3 Kuormitusyhdistelmät

5.3.1 Kuormaryhmät

Eurokoodissa liikennekuormia ei yhdistellä sellaisenaan muiden kuormien kanssa vaan liikennekuormista muodostetaan kuormaryhmiä. Kuormaryhmiä käsitellään yksittäisinä kuormina kuormitusyhdistelyissä. Kuormaryhmiä on yhteensä kuusi kappaletta taulukon 7 mukaisesti. Tässä työssä mitoitettavaan siltaan soveltuvat käytettäväksi liikennekuormaryhmät gr1a, gr1b, gr2 ja gr5.

Taulukko 7. Liikennekuormaryhmien määrittäminen [23].

AJORATA PIENTAREINEEN								Kevyen liikenteen väylä
Pystykuormat					Vaakakuormat			
LM1		LM2	LM3	LM4	Jarru- ja kiihdytyskuorma	Keskipakokuorma ja sivukuorma		
Teli	UDL	Yksittäinen akseli	Erikoiskuorma	Ruuhkakuormitus			Vain Pystykuorma	
[EN 1991-2 4.3.2]		[EN 1991-2 4.3.3]	[EN 1991-2 4.3.4]	[EN 1991-2 4.3.5]	[EN 1991-2 4.4.1]	[EN 1991-2 4.4.2]	[EN 1991-2 5.3.2.1]	
gr1a	Ominaisarvo						Yhdistelyarvo 3 kN/m ²	
	1	1						
gr1b			Ominaisarvo 1					
gr2	Tavallinen arvo (w1)				Ominaisarvo 1	Ominaisarvo 1		
	0,75	0,4						
gr3							Ominaisarvo 5 kN/m ²	
gr4				Ominaisarvo 1			Ominaisarvo 5 kN/m ²	
gr5			Ominaisarvo 1					

Liikennekuormaryhmä gr1 sisältää pystysuoran liikennekuorman LM1 ominaisarvolleen. Gr1a mitoittaa usein pääkannattimet ja kansilaatan poikittain. [23]

Liikennekuormaryhmä gr1b sisältää pystysuoran liikennekuorman LM2 ominaisarvolleen. Gr1b mitoittaa usein ortotrooppikannen tai ulokkeen. [23]

Liikennekuormaryhmä gr2 sisältää pystysuoran liikennekuorman LM1 tavallisella arvolla ja rakenteeseen kohdistuvat vaakakuormat ominaisarvolla. Telikuormat on kerrottu luvulla 0,75 ja tasainen kuorma luvulla 0,4. Tämä liikennekuormaryhmä mitoittaa usein alusrakenteet. [23]

Liikennekuormaryhmä gr5 sisältää erikoisraskaan erikoiskuorman LM3 ominaisarvolleen. Se mitoittaa mahdollisesti rakenteita murtorajatilassa. [23]

5.3.2 Kuormitusyhdistelmät

Yleistä

Taulukossa 8 on esitetty yhdistelykertoimien arvot. Taulukkoon on kirjoitettu sisään Suomen kansalliset valinnat sekä kansalliset lisäykset. Taulukkoa on hieman yksinkertaistettu käytännön mitoitusta ajatellen, eikä siinä esitetä kaikkia erikoistapauksia.

Taulukko 8. Tiesiltojen kuormien yhdistelykertoimien ψ arvot [23].

Kuorma			ψ_0 Yhdistelyarvo (combination)	ψ_1 Tavallinen arvo (frequent)	ψ_2 Pitkäaikaisarvo (quasi-permanent)
gr1a	gr1a	Liikennekuormat			
		Telit (LM1)	0,75	0,75	-
		UDL (LM1)	0,4	0,4	0,3
		Kevyen liikenteen kuorma (3kN/m)	0,4	0,4	-
		Aksellikuorma (LM2)	-	0,75	-
		LM1 + Vaakakuormat	-	-	-
gr1b	gr1b				
gr2	gr2				
gr3	gr3				
gr4	gr4				
gr5	gr5				
F_{wk}	tuulikuormat	$-F_{wk}$ Normaalisti vallitsevat mitoitusolot	0,6	0,2	-
T_k	lämpötilakuormat	T_k (ks. sovellusohje)	-	0,6	0,5
BF	laakerikitka	LK (ks. sovellusohje)	0,6	0,5	0,4
IL	jaakuormat	IL (ks. sovellusohje)	0,7	0,5	0,2
S	tukipainumat / -siirtymät	S (ks. sovellusohje)		pysyvä kuorma	
TLEP	liikennekuorman maanpaine	(ks. EN 1991-2 NA, 4.9.1 (1))	0,75	0,75	-

1) Liikennekuorman maanpaine:

- Kun siltakannella ei ole telikuormaa käytetään gr1a:n telikuorman psi-arvoa (0,75/0,75/0)
- Kun siltakannella on telikuorma käytetään gr1a:n tasaisen kuorman psi-arvoa (0,4/0,4/0)

Murtorajatila

Murtorajatilan rakenneosien kestävyyttä koskevat kuormitusyhdistelyt tehdään taulukon 9 mukaisesti. [23]

Taulukko 9. Kuormitusarvot (STR/GEO eli rakenneosien kestävyys ja geotekninen kantavuus) [23].

	Pysyvät kuormat		Esijännitys		Määrävä muuttuva kuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat
6.10a	1,35 / 0,90	G	1,10 / 0,90	P		
					tai	
	1,15 / 0,90	G	1,10 / 0,90	P	1,35 · (tieliikennekuorma) 1,35 · (kevyen liikenteen kuorma) 1,45 / 1,20 · (raideliikennekuorma)	1,50 · $\psi_{0,i}$ · (muut muuttuvat kuormat)
					tai	
6.10b	1,15 / 0,90	G	1,10 / 0,90	P	1,50 · (muu määrävä muuttuva kuorma)	1,35 · $\psi_{0,i}$ · (tieliikennekuorma) 1,35 · $\psi_{0,i}$ · (kevyen liikenteen kuorma) 1,45 / 1,20 · $\psi_{0,i}$ · (raideliikennekuorma) + 1,50 · $\psi_{0,i}$ · (muut muuttuvat kuormat)

Käyttörajatila

Käyttörajatilan kuormien mitoitusarvoina käytetään taulukon 10 arvoja. Taulukkoon on kirjoitettu sisään Suomen kansalliset valinnat.

Taulukko 10. Käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät [23].

	Pysyvät kuormat		Esijännitys		Määrävä muuttuva kuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat
Ominaisyhdistelmä 6.14	1,00	G	1,00	P	(määrävä muuttuva kuorma)	$\psi_{0,i}$ · (muut muuttuvat kuormat)
Tavallinen yhdistelmä 6.15	1,00	G	1,00	P	$\psi_{1,i}$ · (määrävä muuttuva kuorma)	$\psi_{2,i}$ · (muut muuttuvat kuormat)
Pitkäaikaisyhdistelmä 6.16	1,00	G	1,00	P	$\psi_{2,i}$ · (määrävä muuttuva kuorma)	$\psi_{2,i}$ · (muut muuttuvat kuormat)

Ominaisyhdistelmää käytetään palautumattomille rajatiloille eli käyttökelpoisuusvaatimuksen ylittävät kuormat eivät palaudu kuormien poiston jälkeen. Ominaisyhdistelmällä rajoitetaan mm. teräs ja betonijännityksiä. [26]

Tavallista yhdistelmää käytetään palautuville rajatiloille, jolloin käyttökelpoisuusvaatimuksen ylittävä kuormien vaikutus palautuu, kun kuormat poistetaan. Yhdistelmällä tutkitaan mm. rakenteen taipumaa ja halkeilua. [26]

Pitkäaikaisyhdistelmällä tutkitaan pitkäaikaisvaikutuksia rakenteen ulkonäön kannalta. Yhdistelmällä tutkitaan mm. vaadittava esikohotusta ja halkeilua. Sitä käytetään myös kun tarkastellaan poikkileikkauksen puristusjännityksen rajoittamista ja viruman vaikutuksia. [26]

Taulukoissa 8, 9 ja 10 esitetty tieto on esitetty työn liitteessä 6, joka sisältää kaikki mahdolliset kuormitusyhdistelyt siten, että kaikki standardin SFS-EN 1990 vaatimukset on huomioitu.

5.4 Murtorajatila

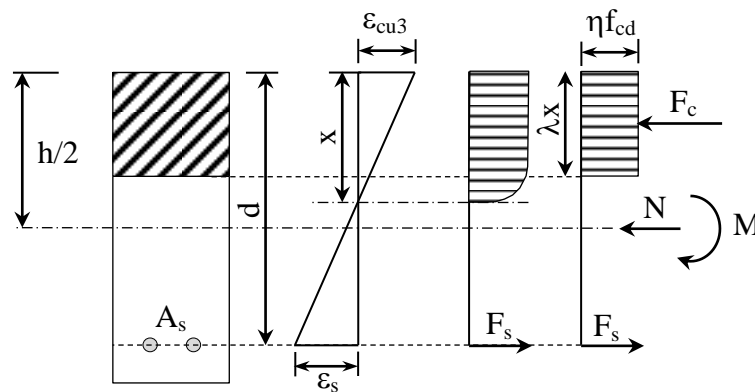
5.4.1 Taivutus ja normaalivoima

Poikkileikkauksen kapasiteetti murtorajatilassa lasketaan käyttäen eurokoodissa esitettyä suorakaiteen muotoista jännitysjakaumaa. Sitä käytettäessä tehdään seuraavat oletukset. [30]

- Poikkileikkaukset säilyvät tasoina.
- Betonin vetolujuutta ei oteta huomioon.
- Betonin todelliset puristusjännitykset voidaan korvata tasaisella jännityksellä.

Betonipoikkileikkauksessa tarvittavan taivutuskapasiteetin edellyttämä vetoraidoitusmäärä ei saa ylittää tasapainoraidoitettua poikkileikkauksen taivutusvetoraidoitusmäärää. Poikkileikkauksen murtumistavan tulee olla siis sitkeä. Teräsbetonirakenteen voidaan olettaa olevan sitkeä, kun rauditus myötää ennen kuin puristetun reunan betoni saavuttaa murtopuristuman arvon ε_{cu2} (3.5 %) tai poikkileikkauksen painopisteessä oleva betoni saavuttaa arvon ε_{c2} (2.0 %). [26]

Taivutuksen ja normaalivoiman alaisen betonipoikkileikkauksen murtorajatilan kapasiteetti saadaan johdettua kuvassa 27 esitetyn voimatasapainon avulla.



Kuva 27. Suorakaiteen muotoisen betonipoikkileikkauksen voimatasapaino.

$$F_s - N - F_c = 0 \quad (16)$$

$$M + N \cdot (h/2) - F_s \cdot d + F_c \cdot (\lambda \cdot x/2) = 0 \quad (17)$$

missä	F_s	on teräsjännitys $= A_s \cdot f_s$
	N	on poikkileikkauksen normaalivoima
	F_c	on betonijännitys $= (\lambda \cdot x) \cdot (\eta \cdot f_{cd}) \cdot b$
	h	on poikkileikkauksen korkeus
	d	on etäisyys vetoterästen keskeltä puristetun puolen reunaan

missä edelleen

A_s	on vetoteräksen pinta-ala
f_s	on betoniteräksen mitoituslujuus
λ	on tehollinen korkeus
x	on neutraaliakselin etäisyys puristetun puolen reunasta
η	on tehollisen lujuuden määrittävä kerroin
f_{cd}	on betonin mitoituslujuus

Kaavoista (16) ja (17) saadaan vaadittu murtorajatilän teräsmäärä ratkaisemalla yhtälöryhmä suureen A_s suhteen. Tietyn teräsmäärän momenttikapasiteetti saadaan ratkaisemalla yhtälöryhmä termin M suhteen.

5.4.2 Leikkaus

Leikkausmitoitus suoritetaan Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisesti kappaleessa 6.1 esitettyjen seikkojen takia. Leikkausvoiman maksimiarvona käytetään mitan d päässä tuelta olevaa arvoa tapauksissa, joissa pääosa kuormasta on tasan jakaantunutta kuormaa.

Leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyys saadaan kaavasta (18). [26]

$$V_{c0} = 0,3k(1 + 50\rho_1)f_{ctd}b_wd \quad (18)$$

missä

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

$$k = 1,6 - d \geq 0,8, \text{ kun } \rho \geq 2400 \text{ kg/m}^3$$

f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo. Laskennassa käytetään korkeintaan lujuusluokkaa C50/60.

d on etäisyys vetoterästen keskeltä puristetun puolen reunaan

missä edelleen

b_w on tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys

A_{sl} on vetorausdoitus, jonka tulee olla tarkasteltavassa kohdassa riittävän hyvin ankkuroitu

Leikkausraudoitetun rakenteen leikkauskestävyys saadaan kaavasta (19). [26]

$$V_u = V_s + 0,8V_c \quad (19)$$

missä $V_c = 0,50 \cdot b_w df_{ctd}$

$$V_s = 0,9 \frac{A_{sv}}{s} f_{yd} d (\sin \alpha + \cos \alpha)$$

missä edelleen

b_w on tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys

A_{sv} on leikkausraudoituksen leikkeiden yhteenlaskettu poikkileikkausala

s on leikkeiden jakoväli

α on leikkausraudoituksen kulma leikkausvoimaa vasten kohdistuoraan suuntaa vastaan.

Leikkauskestävyyden yläraja saadaan kaavasta (20).

$$V_{u,max} = 0,25b_w df_{cd}, \text{ kun } \rho \geq 2400 \text{ kg/m}^3 \quad (20)$$

missä

f_{cd} on betonin puristuslujuus. Lujuusluokkana käytetään korkeintaan C50/60.

Tuen lähellä betonin leikkauskestävyyttä V_c voidaan suurentaa kaavasta (21) saatavalla kertoimella.

$$\beta_2 = \frac{V_d}{V_{d,red}} \leq 2 \quad (21)$$

missä

$V_{d,red}$ on leikkausvoima, jota laskettaessa enintään $2d$ päässä tukilinjasta sijaitsevat kuormat on kerrottu luvulla $a/2d$, missä a on kuorman etäisyys tukilinjasta.

5.4.3 Lävistys

Lävistysmitoitus suoritetaan Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisesti kappaleessa 6.1 esitettyjen seikkojen takia. Lävistysmitoituksessa käytetään betonin lujuudelle korkeintaan lujuusluokkaa C50/60.

Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys saadaan kaavasta (22). [26]

$$V_c = k\beta(1+50\rho)udf_{ctd} \quad (22)$$

missä

$k = 1,6 - d$, kun $(\rho_c \geq 2400 \text{ kg/m}^3)$

$k = 0,8$, kun $(\rho_c < 2400 \text{ kg/m}^3)$

$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} \leq 8\%$

$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5e}{\sqrt{A_u}}}$

e on lävistysvoiman epäkeskisyys leikkautuvan alueen painopisteestä

A_u ja u on tuen reunasta etäisyydellä $0,5d$ olevan leikkauksen rajoittama pinta-ala sekä piiri.

Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys saadaan kaavasta (23).

$$V_u = 0,25V_c + V_s \leq 2 V_c \quad (23)$$

missä V_c lasketaan kaavan (22) mukaisesti.

Hakojen vaikutus otetaan huomioon kaavalla (24).

$$V_s = A_{sv}f_{yd} \sin \alpha \quad (24)$$

missä

f_{yd} on hakateräksen laskentalujuus, jonka arvona käytetään korkeintaan 300 MPa.

α on raudoituksen ja laatan tason välinen kulman, joka on oltava vähintään 30°

A_{sv} on leikkausraudoituksen pinta-ala tuen reunasta etäisyydelle $1,5 d$ tuen reunasta.

5.5 Käyttörajatila

5.5.1 Halkeilun rajoittaminen

Rakenne oletetaan haljenneeksi vetovyöhykkeessä, vaikka sen laskennallinen halkeilukestävyys ei ylittyisikään. [26]

Halkeamaleveyden laskenta

Halkeamaleveys w_k lasketaan kaavasta (25).

$$w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (25)$$

missä

$$s_{r,\max} = 3,4c + k_1 k_2 0,425 \varphi_{eq} / \rho_{p,eff}$$

$$\varphi_{eq} = \frac{\sum n_i \varphi_i^2}{\sum n_i \varphi_i}$$

missä edelleen

c	on vetoraidoituksen betonipeite
k_1	on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon lähinnä betonipintaa olevien tankojen tartuntaominaisuudet: = 0,8 tangot, joilla on hyvä tartunta (esim. A500HW) = 1,6 sileäpintaisilla tangoilla
k_2	on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon venymäjakauma: = 0,5 taivutukselle = 1,0 pelkälle vedolle Epäkeskisen vedon tapauksissa tai paikallisesti käytetään kertoimelle k_2 väliarvoja, jotka voidaan laskea suhteen $k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / (2\varepsilon_1)$ avulla, missä ε_1 on tarkasteltavan poikkileikkauksen reunalla vallitseva suurempi venymä ja ε_2 pienempi venymä halkeilleen poikkileikkauksen perusteella määritettynä.

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,eff}} \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \rho_{p,eff} \right)}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \text{ on venymien erotus}$$

missä

σ_s	on vetoraidoituksessa vaikuttava jännitys, kun poikkileikkauksen oletetaan halkeilleen.
f_{ctm}	on vetojännityksen alaisen betonialueen $A_{c,eff}$ vetolujuus
E_{cm}	on betonin kimmokerroin
k_t	on kerroin, joka riippuu kuorman vaikutusajasta = 0,6 lyhytaikaikuormitukselle = 0,4 pitkäaikaikuormitukselle
$\rho_{p,eff}$	= $A_s / A_{c,eff}$

missä edelleen

A_s	on halkeilua rajoittavan jännittämättömän raudoituksen määrä
$A_{c,eff}$	on betoniteräksiä tai jänneteräksiä ympäröivän, vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen pinta-ala, kun

alueen korkeus on $h_{c,ef}$, missä

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

Halkeilun rajoittaminen ilman suoraan laskentaa

Liikenneviraston Betonisillat -sovellusohjeessa annetaan mahdollisuus tarkastella betonin halkeilua yksinkertaisella betoniterästen jännityksiin perustuvalla menetelmällä. Menetelmän avulla saadaan nopeasti yksinkertaisen kaavan avulla selville poikkileikkauksen sallittu teräsjännitys. Menetelmää voidaan käyttää, jos seuraavat ehdot täyttyvät: $w_{\max} = 0,1 \dots 0,3 \text{ mm}$, $c_{\text{nom}} = 40 \text{ mm}$, $c_{\text{dev}} = 5 \text{ mm}$, $c_{\text{true}} \geq 52 \text{ mm}$, $c/c_{\text{min,dur}} = 1.4$ ja $f_{\text{ctm}} \geq 2.9 \text{ MPa}$ (C30/37). [26]

missä

w_{\max}	on sallittu halkeamaleveys
c_{nom}	on betonipeitteen paksuus
c_{dev}	on raudoituksen sijaintitoleranssi
c_{true}	on lähinnä betonipintaa olevan halkeilua rajoittavan jännittämättömän raudoituksen halkeamalevestarkastelussa käytettävä betonipeite
$c_{\text{min,dur}}$	on ympäristöolosuhteiden ja käyttöiän vaatima vähimmäisarvo

Raudoitetangon halkaisijasta riippumaton jännitys yhdessä kerroksessa olevalla raudoitukselle saadaan kaavasta (26).

$$\sigma_{s,lin} = (220 - 10 \cdot \frac{w_{k100}}{0,15} - 65 \cdot \frac{k - 50}{150}) \cdot \frac{w_{k100}}{0,15} [\text{MPa}] \quad (26)$$

missä

w_{k100}	on sallittu halkeamaleveys 100 vuoden käyttöiällä
k	on teräksen jakoväli.

5.5.2 Jännitysten rajoittaminen

Betonipoikkileikkauksen suurin sallittu puristusjännitys kuormien ominaisyhdistelyllä on enintään $0,6 \cdot f_{\text{ck}}$. [26]

Epälineaarinen viruma on otettava huomioon, jos betonin jännitys ylittää pitkäaikaisyhdistelmällä arvon $0,45 \cdot f_{\text{ck}}$. [26]

5.5.3 Taipumien rajoittaminen

Päällysrakenteen taipuma liikennekuormasta LM1 tai LM2 tavallisella yhdistelykertomella kerrottuna saa olla enintään $L/400$, missä L on ulokkeen pituus. Ulokkeen taipuma liikennekuormasta LM1 tai LM2 tavallisella yhdistelykertomella kerrottuna saa olla $L/200$ mutta enintään 20mm. [26]

5.6 Minimiteräsmäärät

Rakenteen täytyy toimia sitkeästi eli rakenteen molemmissa pinnoissa on oltava vähintään pääraudoitus, joka pystyy vastaanottamaan betonin halkeilukestävyysmukaisen taivutusmomentin. Jos halkeilukestävyyttä ei erikseen lasketa, niin vähimmäisraudoitusvaatimus saadaan kaavasta (27). [26]

$$A_{s,\min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \quad (27)$$

missä	f_{ctm}	on betonin vetolujuus
	f_{yk}	on betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo
	b_t	on tarkasteltavan pinnan leveys
	d	on poikkileikkauksen vetoterästen painopisteen etäisyys puristetusta reunasta

Pääraudoitusta ympäröivän hakaraudoituksen vähimmäismäärä saadaan kaavasta (28). [26]

$$A_{sv} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \cdot b_w \cdot \sin \alpha \text{ [mm}^2\text{/m]} \quad (28)$$

missä	α	on leikkausraudoituksen kulma leikkausvoimaa vasten kohtisuoraan suuntaa vastaan
	f_{ck}	on betonin puristuslujuus

Mitoitettavaa laattasiltaa koskevat raudoitesäännöt: [26]

- Jakoraudoitus on vähintään 20 % pääraudoituksesta.
- Pääraudoituksen vähimmäishalkaisija on 16 mm. Jos pinta on puristettuna tavallisella yhdistelmällä, niin pääraudoituksen vähimmäishalkaisija on 12 mm. Jakoraudoituksen vähimmäishalkaisija on 12 mm.
- Hakojen ja muiden raudoitettankojen vähimmäishalkaisija on 10mm.
- Pääraudoitetankojen enimmäisjakoväli 200 mm tai vähintään 0,75h. Tavallisella kuormitusyhdistelmällä puristetun rakenneosan enimmäisjakoväli on 300 mm tai enintään rakenneosan paksuus. Jakoraudoituksen enimmäisjakoväli on 300 mm.
- Leikkausraudoitetankojen enimmäisjakoväli on pituussuunnassa 400 mm tai vähintään 0,75d. Poikkisuunnassa enimmäisarvo on 600 mm ja poikkisuunnan lävistysalueilla 0,75d.
- Mikäli ei ole toisin ohjeistettu on muiden rakenneosien pinnoissa raudoitettankojen vähimmäishalkaisija 12 mm ja enimmäisjakoväli 300 mm tai korkeintaan rakenneosan paksuus.
- Murtorajatilassa vaadittavasta kenttäraudoituksesta viedään tuille vähintään 50 %.

6 KOHDESILLAN MITOITUS

6.1 Yleistä mitoituksesta

Kohdesillan mitoitus on suoritettu täysin liikenneviraston tekemien siltojen sovellusohjeiden mukaisesti. Siltaa ei kuitenkaan ole suunniteltu täysin puhtaasti eurokoodien mukaisesti, sillä sovellusohjeissa sallitaan käyttää leikkaus- ja lävistysmitoituksen osalta vanhoja Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisia menetelmiä. Lävistysmitoituksen osalta on havaittu vakavia puutteita eurokoodin mukaisessa menetelmässä. Eurokoodi SFS-EN 1992-1-1 Suomen kansallisessa liitteessä todetaankin, ettei lävistysmitoitusta toistaiseksi tehdä Eurocode 2 standardin mukaan, vaan Suomen rakentamismääräyskokoelman B4 kohdan 2.2.2.7 mukaan.

Eurokoodin leikkausmitoitusmenetelmä eroaa suuresti Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisesta menetelmästä. Merkittävimpänä erona eurokoodin menetelmässä on puristusdiagonaalin kulman vaihtelualue, joka johtuu puhtaasti ristikkoanalogian käytöstä leikkausmitoituksessa. Tällöin betonin leikkauslujuus jätetään huomioimatta ja kaikki voima otetaan vastaan teräksillä. Leikkausmitoituksen osalta on päädytty vanhaan menetelmään useammastakin syystä. Liikennevirastossa on tehty vertailulaskekelmia ja on havaittu, että Eurokoodin mukainen leikkausmitoitusta saattaa ohjata suunnittelua sitkeän murtumisen sijasta hauraaseen murtumiseen. Tämä johtuu siitä, että Eurokoodin mitoitusstavassa on mahdollista muuttaa leikkausraudoituksen puristuskaaren kulmaa ja lisätä vastaavasti sillan kannen pituussuuntaista raudoitusta. Puristuspaarten kulma voidaan valita väliltä $21,8\text{--}45^\circ$ ja raudoituksen täydellinen optimointi johtaa siltarakenteilla yleensä noin $30\text{--}35^\circ$ käyttöön puristuspaarten kulmana. Kun kulmaa pienennetään, leikkausraudoitus vähenee, mutta pituussuuntainen terästys lisääntyy. Tässä tapauksessa haurasmurtuma saattaa tulla ensisijaiseksi vauriomekanismiksi. Eurokoodien mukaista menetelmää on testattu vain pienillä palkeilla mitkä eivät ole siltapalkkien kokoluokkaa. Lisäksi nykyisten eurokoodien mallinormina toimineen CEB-FIB Model Coden uudessa vuoden 2010 versiossa on esitetty uusi leikkausmitoitusmenetelmä, joka on lähellä Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaista leikkausmitoitusmenetelmää. Tässä menetelmässä puristuspaarten kulma on vakio ja betonillakin on leikkauskapasiteettia. Voi olla että tulevaisuudessa tämä menetelmä otetaan Eurokoodeihin mukaan. Vanhan leikkausmitoitusmenetelmän käyttöä tukee myös se tosiasia, että Suomessa säädettiin ensin eurokoodin kuormien vaikutukset vastaamaan rakentamismääräyskokoelman mukaisia kuormavaikutuksia. Tällöin päädyttiin samoihin voimasuureisiin kuin nykyisilläkin kuormilla. On siis varsin turvallista mitoitaa vanhan menetelmän mukaan, vaikka kuormituksina käytetäänkin eurokoodin mukaisia kuormia. [32]

Mitoitettava silta on tyypisilta. Tämä tarkoittaa sitä, että suunnittelijalla on mahdollisuus käyttää sillan päällysrakennetta sellaisenaan ilman uusia rakennelaskelmia. Tämän ehtona on se, että sillan suunnittelussa noudatetaan tyypisillan ohjeessa annettuja reunaehtoja ja määräyksiä. Alusrakenteet tulee laskea aina tapauskohtaisesti.

Tyypisillan tulee soveltua käytettäväksi kaikkialla Suomessa, ellei toisin mainita. Tämä vaatimus vaikuttaa suuresti tyypisillan suunnitteluun. Betonirakenteille tulee käyttää pahinta mahdollista rasisluokkaa, mikä vaikuttaa mitoituksessa lähinnä betonin suojakerroksen paksuuteen. Luonnonkuormia, eli tuuli ja lämpötilakuormia, määriteltäessä kuormitusten suuruudet tulee määritellä suurimpien Suomessa esiintyvien arvojen mukaisesti. Sillan eri perustamisvaihtoehdot on huomioitava tukipainumana. Sillassa voidaan käyttää joko 3 m tai 5 m siirtymäläattaa ja kahdenlaista päätypalkkia. Käytettävät pilarit voivat olla joko laakeroituja tai kanteen kiinnitettyjä.

Pilareiden paksuus voi olla joko 900 mm tai 1100 mm. Kansi voi olla myös lievästi vino. Tyyppisillan mitoituksessa tulisi huomioida kaikki nämä edellä mainitut rakennevaihtoehdot.

Työssä mitoitettavaan siltaan valittiin 900 mm paksut monoliittisesti kanteen kiinnittyvät pilarit. Päätypalkkina käytetään viistettyä päätypalkkivaihtoehtoa. Tässä työssä ei ole siis tutkittu aivan kaikkia edellisessä kappaleessa mainittuja rakennemallivaihtoehtoja. Eri vaihtoehtojen tarkempi tutkiminen jätetäänkin tyyppipiirustussarjan päivittämisen yhteyteen.

6.2 Rakennemalli

6.2.1 Perusteita rakennemallin muodostamisesta

Työn yksi tavoite oli tutkia voidaanko Revit Structure -ohjelmalla muodostetun laattasillan tietomallista muodostaa analyttinen rakenneanalyysimalli. Tavoitteena oli luoda kaksisuuntainen linkki tietomallin ja rakenneanalyysimallin välille käyttäen Robot Structural Analysis ohjelmistoa. Rakenneanalyysimallia ei kuitenkaan saatu muodostettua halutulla tavalla, kuten kappaleessa 4.9 on selitetty. Tämän takia rakenteen analysointiin täytyi ottaa toinen lähtökohta.

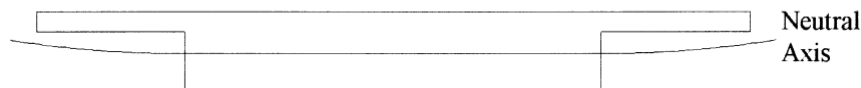
Laskentamallin muodostamisen lähtökohdaksi otettiin rakenteen todellisen käyttäytymisen mahdollisimman realistinen mallintaminen. Rakennemallin tulisi myös olla sellainen, joka voitaisiin mahdollisesti muodostaa joskus tietomallista, kunhan ohjelmiston ominaisuudet kehittyvät tarpeeksi. Kolmantena tavoitteena oli se, että yhden laskentamallin avulla saataisiin voimasuureet niin päällysrakenteen kuin alusrakenteenkin mitoitukseen. Mitoitettavia erillisiä rakenneosia ovat kansilaatta, siipimuuri, päätypalkki, pilari ja peruslaatta. Laskentamallille asetetut vaatimukset ajoivat väistämättä kolmiulotteisen FEM-laattamallin käyttämiseen.

Laattaelementin solmun vapausasteina on kolme siirtymää ja kolme kiertymää eli rakenteeseen voidaan syöttää suoraan piste- ja momenttikuormia. Laattamalli onkin ainoa käytännöllinen tapa analysoida laattamaisesti käyttäytyviä betonirakenteita, sillä mallista saadaan tulostettua suoraan mitoituksessa tarvittavat momentit, normaalivoimat ja leikkausvoimat. Tarkempi tapa olisi analysoida rakenne kolmiulotteista solidimallia käyttämällä, jolloin rakennemallin käyttäytyminen olisi lähimpänä todellista rakennetta. Solidimalli on käytännön mitoituksessa kuitenkin erittäin vaikeasti hyödynnettävissä, sillä solidielementin solmussa on vain kolme siirtymävapausastetta eli tulosteena saadaan pelkästään jännityksiä. Solidimalli soveltuukin lähinnä vertailukohdaksi, jos haluttaisiin tutkia esimerkiksi sitä miten lähellä eri laskentamallien käyttäytyminen on todellista rakennetta.

Lähteen [31] tutkimuksessa on vertailtu tasoarinamallin (Plane grillage model), pintakeskeisen arinamallin (Upstand grillage model), taso FEA-mallin (plane FEA) ja pintakeskeisen FEA-mallin (upstand FEA) soveltuvuutta kuvan 28 kaltaisten poikkisuunnassa ulokkeellisten laattojen mitoitukseen. Pintakeskeinen tarkoittaa sitä, että laatan rakennemallissa poikkitaiset ohuet ulokkeet on mallinnettu todelliselle korkeudelle ja liitetty äärettömän jäykällä palkeilla varsinaiseen kansilaattaan. Ne sijaitsevat siis eri tasolla kuin varsinainen laatta.

Todellisessa kuvan 28 mukaisessa kansilaatassa reunauloke pyrkii kiertymään oman pintakeskiönsä ympäri eli koko sillan neutraaliakseli nousee reunaulokkeen kohdalla ylöspäin. Tasomalli ei ota huomioon tätä ilmiötä, mutta se voidaan huomioida

käyttämällä pintakeskeistä rakennemallia, jossa siltakannen poikkileikkauksen elementit on mallinnettu todellisille tasoilleen. [19]



Kuva 28. Leveillä reuna-aulokkeilla varustettu kansilaatta ja neutraaliakselin muuttuminen [31].

Tutkimuksen vertailukohtana oli kolmiulotteinen solidimalli, jonka oletettiin toimivan kuten oikea rakenne. Tutkimuksessa vertailtiin eri rakennemallien tuottamia jännityksiä laatan eri kohdissa. Johtopäätöksenä oli, että pintakeskeinen FEA-laattamalli kuvasi parhaiten rakenteen todellista käyttäytymistä ja useimmissa tapauksissa tulokset olivat lähes identtiset solidimallin kanssa. Taso FEA-mallin tulokset olivat puolestaan hieman varmallalla puolella eli sen käyttö on yleensä turvallista. [31]

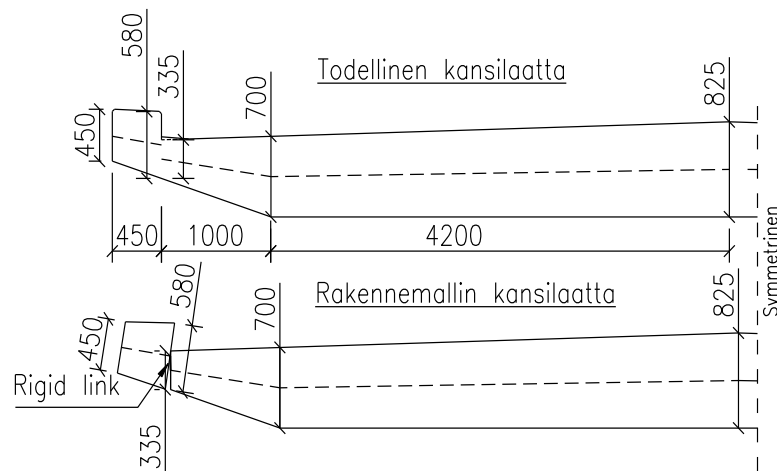
6.2.2 Käytetty laskentamalli

Arkipäiväisessä mitoituksessa täytyy usein tyytyä kompromisseihin rakennemallin tarkkuuden suhteen. Usein on järkevää mallintaa rakenne siinä tarkkuudessa, että siitä saadaan keskeiset tulokset nopeasti ulos. Tulosten täytyy myös olla riittävän luotettavia eli suunnittelijalla täytyy olla jonkinlainen käsitys saatavien tulosten suurusluokasta.

Tämä työ on tyypiltään diplomityö ja rakenteen analysointiin on käytössä enemmän aikaa kuin arkipäiväisessä mitoituksessa. Työssä oli mahdollisuus kokeilla laattasillan mitoittamista pintakeskeisen rakennemallin avulla. Kappaleessa 6.2.1 esitetyn tutkimuksen mukaan pintakeskeisen rakennemallin pitäisi kuvata rakenteen käyttäytymistä realistisemmin kuin tasomallin.

Rakennemalli muodostettiin siten, että kansilaatta mallinnettiin laattaelementeillä ja pilarit palkkielementeillä. Rakennemallin poikkileikkauksen pinta-ala on täsmälleen sama kuin todellisenkin rakenteen eli rakenteen jäykkyys ja omapaino on huomioitu mahdollisimman hyvin. Rakennemallissa on hyödynnetty myös reunapalkin vaikutus.

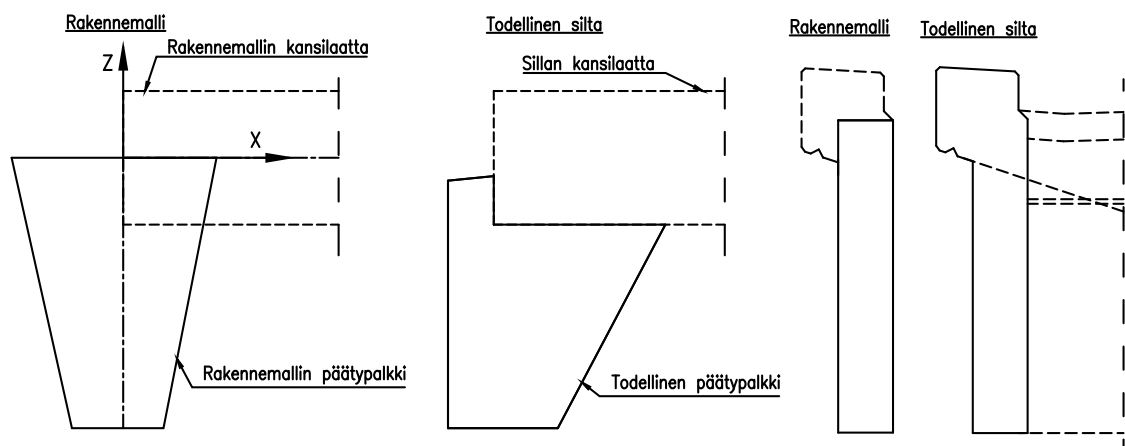
Kansilaatan mallintamisessa laattaelementti kuvattiin kannen todellisen poikkileikkauksen pintakeskiön mukaisesti, jotta laatan ylösnousevan viisteellisen reunavyöhykkeen reunaa jäykistävä vaikutus ja neutraaliakselin muuttuminen tulee huomioitua oikein. Kuvassa 29 on esitetty todellisen kannen sekä rakennemallin poikkileikkaus. Kuvaan on myös katkoviivalla merkitty kannen pintakeskiön paikka, jonka mukaan rakennemalli on muodostettu. Reunapalkin liittyessä kanteen pintakeskiöiden välille syntyy hyppy, joka huomioidaan mallissa muodostamalla osien välille taivutusjäykkä liitos Rigid Link-työkalulla. Edellä mainittuun mallintamistapaan päädyttiin myös siitä syystä, että tietomallista luotu rakennemalli tulisi hyvin todennäköisesti olemaan juuri samankaltainen. Kansi voitaisiin esimerkiksi muodostaa useammasta laattatyökalulla muodostetusta elementistä ja näin ollen myös analyyttinen malli muodostuisi todellisen rakenteen pintakeskiön mukaisesti.



Kuva 29. Todellinen ja rakennemallissa käytetty kansilaatta.

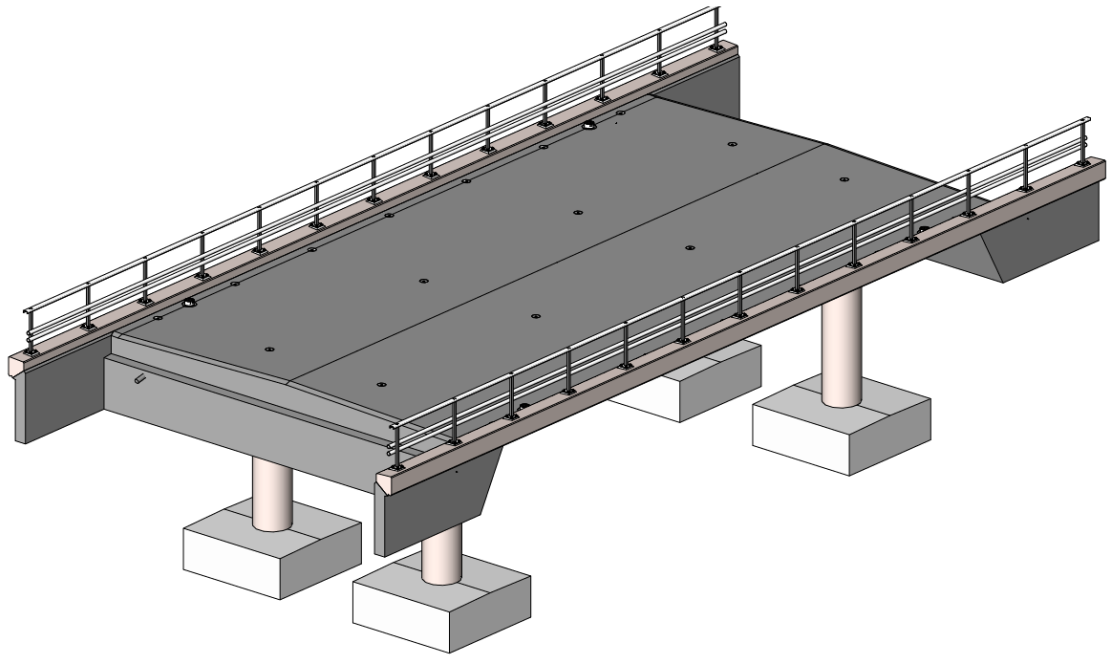
Kanteen kuuluvan päätypalkin mallintamiseen käytettiin laattaelementtiä, vaikka dimensioiden perusteella päätypalkki voitaisiinkin lukea ennemmin palkkeihin, kuin laattoihin kuuluvaksi. Laattaelementti oli kuitenkin ainoa vaihtoehto, jotta siipimuurit saataisiin kiinnitettyä luontevasti päätypalkkiin. Tämä ei olisi onnistunut palkkielementillä. Rakennemalliin luotiin päätypalkki kuvan 30 mukaisesti. Rakennemallin päätypalkin ja siipimuurin alareuna ovat todellisilla tasoillaan eli maanpaine kuormat voitiin antaa suoraan laattaelementeille. Päätypalkin poikkileikkauksen ylä- ja alapinnan leveys määritettiin siten, että palkin jäyhyysmomentti sillan kannen keskiakselin suhteen säilyy samana, kuin todellisellakin rakenteella. Tällöin päätypalkin kannen päätyä poikkisunnassa jäykistävä vaikutus tulee mallissa oikein huomioitua. Mallinnetun päätypalkin pinta-ala oli hiukan todellista päätypalkki suurempi. Eroavaisuus huomioitiin pienentämällä betonin tilavuuspainoa rakennemallin päätypalkissa.

Reunapalkkia kuvaavaa laattaelementti ei ulotu siipimuurin asti, sillä siipimuriin kohdistuvan taivutuksen suunta on täysin eri kuin laatasta. Siiven yläpintaan kiinnitetty siiven suuntaan lähes kohtisuora elementti söisi varsinaiseen siipimuriin kertyvää mitoitusmomenttia liikaa ja siipi ei toimisi mallissa oikealla tavalla. Siipimuri kuvattiinkin pelkästään tasapaksulla laatalla, joka liittyy päätypalkin kylkeen. Mallista pois jäävä siipimuurin reunapalkki syötettiin kuormituksena malliin.

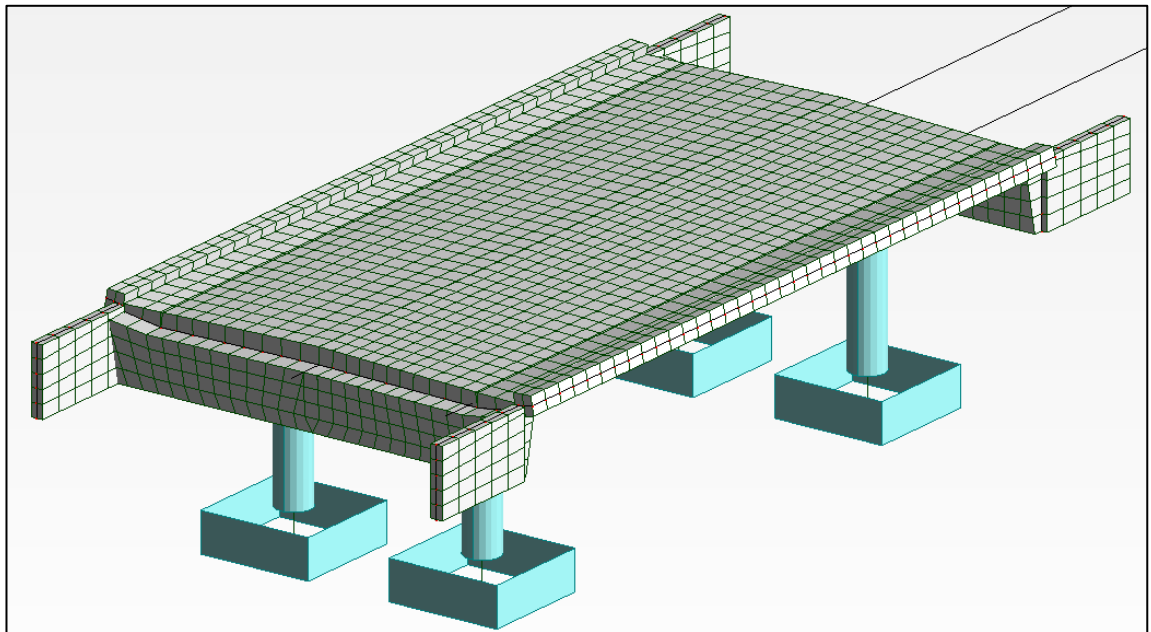


Kuva 30. Sillan päätypalkin ja siipimuurin rakennemallit.

Kuvassa 31 on esitetty Revit Structure -ohjelmalla tehty sillan 3D-malli. Kuvassa 32 on puolestaan esitetty mitoituksessa käytetty rakennemalli. Kuvista nähdään, että rakennemallista saatiin tehtyä hyvin samankaltainen kuin todellinenkin rakenne.

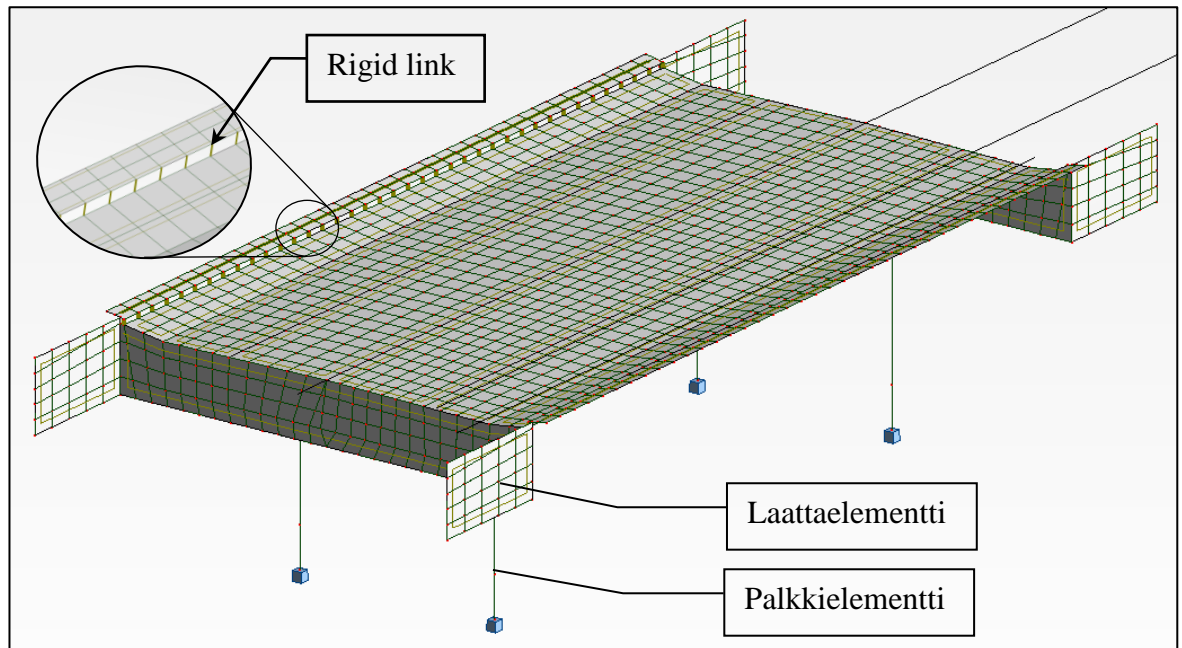


Kuva 31. Revit Structure -ohjelmalla tehty sillan 3D-malli.



Kuva 32. Sillan rakenneanalyysissä käytetty FEM-malli, jossa elementtien paksuudet ovat näkyvillä.

Kuvassa 33 on esitetty rakennemalli ilman elementtien paksuuksia. Kannen elementtijakona on noin 0,5 m kummassakin suunnassa. Samassa kuvassa on esitetty myös reunapalkin liittyminen kanteen taivutusjäykällä liitoselementeillä. Kuvissa näkyvät pitkät viivat kannen päällä ovat liikennekuormien ohjausviivoja, eivätkä ne siis liity sillan geometriaan. Pilarit on kiinnitetty jäykästi perustuksiin ja kanteen.

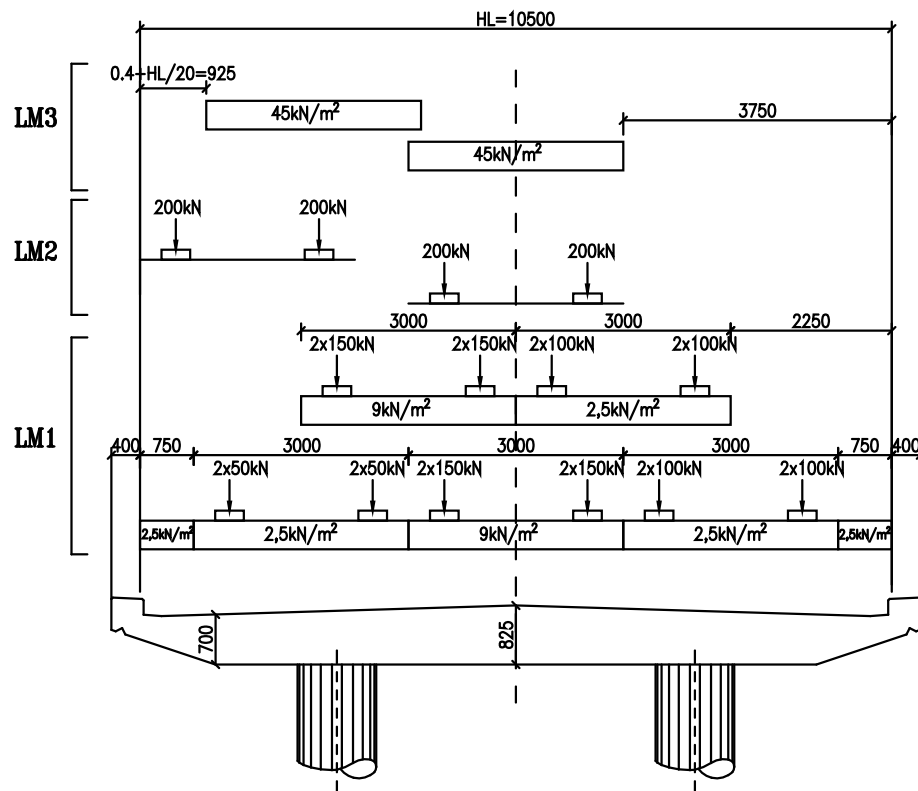


Kuva 33. Sillan rakenneanalyysissä käytetty FEM-malli ilman rakennepaksuuksia.

6.3 Kuormitukset

6.3.1 Liikennekuormat

Työn sovelluskohteena olevan silta on mitoitettu liikennekuormille LM1, LM2 ja LM3. Liikennekuormat on sijoitettu kannelle käyttäen kuvan 34 mukaisia kaistajakoja. Nämä kaistavalinnat antavat kokeilujen perusteella määräävimmit vaikutukset kyseisen sillan tapauksessa.



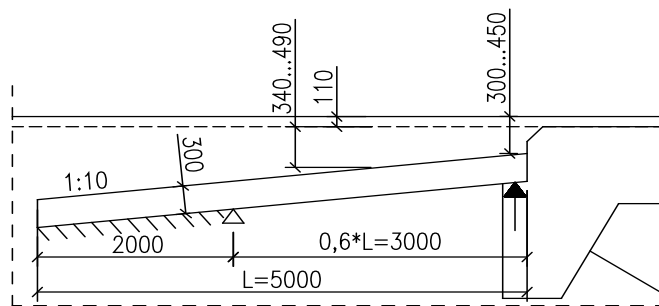
Kuva 34. Sillan mitoituksessa käytetyt kuormituskaistavaihtoehdot.

6.3.2 Rakenteiden omapaino

Betonirakenteiden omapaino tulee rakennemallissa automaattisesti huomioon otettua, sillä malliin syötettiin siltakannen, pilareiden ja peruslaattojen todelliset paksuudet ja materiaalit.

Siltaan tulevaksi pintarakenteeksi on valittu Siltojen suunnittelun täydentävien ohjeiden tyyppin 1a mukainen päällysrakenne, jonka paksuus on 110 mm. Päällyskerroksen paino on 250 kg/m^2 eli $2,45 \text{ kN/m}^2$ [33, Liite 4.1]. Päällysteen kuormitusta laskettaessa varaudutaan lisäpäällysteeseen, jonka paino on 1 kN/m^2 [23].

Kyseisessä tyyppisillassa voidaan käyttää joko 3 m tai 5 m siirtymälaattaa. Mitoituksessa siirtymälaataksi pituudeksi valittiin 5 m, sillä tämä antaa useimmiten määräävimmän vaikutuksen.



Kuva 35. Siirtymälaatan kuormat kannelle.

Siirtymälaatan pysyvä kuorma kannelle siirtymälaatan omasta painosta on $0,3 \text{ m} \cdot 0,6 \cdot 5 \text{ m} / 2 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 11,2 \text{ kN/m}$.

Maakerrosten ja päällysrakenteen painosta tuleva kuormitus on kannen reunalla

$$(0,34 \text{ m} \cdot 20 \text{ kN/m}^3 + 2,45 \text{ kN/m}^2 + 1 \text{ kN/m}^2) \cdot 0,6 \cdot 5 \text{ m} / 2 = 15,4 \text{ kN/m}$$

ja kannen keskialueella

$$(0,49 \text{ m} \cdot 20 \text{ kN/m}^3 + 2,45 \text{ kN/m}^2 + 1 \text{ kN/m}^2) \cdot 0,6 \cdot 5 \text{ m} / 2 = 19,9 \text{ kN/m}.$$

Oletetaan siltaan tulevan kaiteen tyyppiä H2 + korkea suojaverkko tyyppinen kaide, jonka kuormitus on matalan reunapalkin tapauksessa $0,73 \text{ kN/m}$. [34]

6.3.3 Viruma ja kutistuma

Viruman tarkka arvo on laskettu liitteessä 4. Virumaluvuksi saatiin $\varphi(t, t_0) = 1,568$.

Kutistuman tarkka arvo on laskettu liitteessä 4. Kutistumaksi saatiin $\epsilon_{cs} = 0,233$, joka muutetaan kuormitukseksi syöttämällä se rakenteeseen $-23,3 \text{ °C}$ kokonaislämpötilanlaskuna.

6.3.4 Maanpaineet

Maanpaine päätypalkille ja siipimuurille

Päätypalkin ja siipimuurin maanpaineet on laskettu liitteessä 5.

Maanpaine pilareille

Pilarille kohdistuva maanpaine on laskettu liitteessä 5.

Liikennekuorman maanpaine siirtymälaatalle

Liikennekuorman aiheuttama kuormitus siirtymälaatan kautta kannelle on $0,6 \cdot 5 \text{ m} / 2 \cdot 20 \text{ kN/m}^3 = 30 \text{ kN/m}$.

6.3.5 Kokonaislämpötilan muutos ja lineaarinen lämpötilaero

Kokonaislämpötilan muutos

Kyseessä on tyyppisilta eli haetaan standardin SFS-EN 1991-1-5 kansallisen liitteen isotermikartoista koko Suomen alueella esiintyvät ilman maksimi- ja minimilämpötilat. Lämpötilaksi valitaan $T_{\min} = -44 \text{ °C}$ ja $T_{\max} = 34 \text{ °C}$. Sillan minimi- ja maksimilämpötiloiksi saadaan siis betonisillalle $T_{e,\min} = -36 \text{ °C}$ $T_{e,\max} = 36 \text{ °C}$. Sillan alkulämpötila $T_0 = 10 \text{ °C}$.

Lämpötilanmuutokseksi saadaan kaavoista (10) ja (11) $\Delta T_{N,\text{con}} = -46 \text{ °C}$ ja $T_{N,\text{exp}} = 26 \text{ °C}$.

Lineaarinen lämpötilaero

Sillan kansi on betonilaatta eli se kuuluu taulukon 3 päällysrakennetyyppiin 3. Päällysrakenne on vesieristetty ja sen paksuus on 110 mm. Taulukosta 4 saadaan korjauskertoimeksi $k_{\text{sur}} = 0,7$, kun yläpinta on lämpimämpi ja $k_{\text{sur}} = 1,0$, kun alapinta on lämpimämpi. Lämpötilaeroksi saadaan sillalle $\Delta T_{M,\text{heat}} = 15 \text{ °C} \cdot 0,7 = 10,5 \text{ °C}$ ja $\Delta T_{M,\text{cool}} = 8 \text{ °C}$.

6.3.6 Tuulikuormat

Sillan kannen leveys $b = 11,3 \text{ m}$ ja korkeus $d = 0,94 \text{ m}$. Korkeudeksi d_{tot} saadaan siis liikenteen kanssa $d_{\text{tot}} = 0,94 \text{ m} + 2 \text{ m} = 2,94 \text{ m}$. Suhdeluvuksi saadaan

$$\frac{b}{d_{\text{tot}}} = \frac{11,3 \text{ m}}{2,94 \text{ m}} = 3,84. \text{ Kannen painopisteen etäisyys maan pinnasta on alle } 20 \text{ m eli}$$

taulukosta 5 saadaan interpoloimalla tuulenpaineeksi $q_{\text{wk}} = 1,26 \text{ kN/m}^2$. Siltakannen vaikutusalan korkeus on nyt $A_{\text{ref},x} = 0,94 \text{ m} + 2,0 \text{ m} = 2,94 \text{ m}$. Kannen poikittaiseksi tuulenpaineeksi liikenteen kanssa saadaan kaavasta (14) $F_{\text{wk}} = 1,26 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,94 \text{ m} = 3,7 \text{ kN/m}$.

Korkeus ilman liikennettä 1,2 m korkean sillan kummallakin reunalla sijaitsevan umpikaiteen kanssa on $d_{\text{tot}} = 0,94 \text{ m} + 1,2 \text{ m} = 2,14 \text{ m}$. Suhdeluvuksi saadaan

$$\frac{b}{d_{\text{tot}}} = \frac{11,3 \text{ m}}{2,14 \text{ m}} = 5,28. \text{ Kannen painopisteen etäisyys maan pinnasta on alle } 20 \text{ m eli}$$

taulukosta 5 saadaan interpoloimalla tuulenpaineeksi $q_{\text{wk}} = 0,93 \text{ kN/m}^2$. Siltakannen vaikutusalan korkeus on nyt $A_{\text{ref},x} = 0,94 \text{ m} + 2 \cdot 1,2 \text{ m} = 3,34 \text{ m}$. Poikittaiseksi tuulikuormaksi ilman liikennettä saadaan kaavasta (14) $F_{\text{wk}} = 0,93 \text{ kN/m}^2 \cdot 3,34 \text{ m} = 3,1 \text{ kN/m}$.

6.3.7 Törmäyskuormat

Törmäys alusrakenteisiin

Valitaan lähteen [23] taulukosta F.4 suurin törmäyskuorma eli $F_{dx} = 1000 \text{ kN}$ ja $F_{dy} = 500 \text{ kN}$. Kyseiset kuormat eivät vaikuta törmäystilanteessa samanaikaisesti.

Törmäys päällysrakenteeseen

Valitaan lähteen [23] taulukosta F.5 suurin törmäyskuorma eli $F_{dx} = 500 \text{ kN}$.

6.3.8 Tukien siirtyminen

Kyseessä on tyyppisilta, eli sillan perustamistapaa ei tiedetä etukäteen. Mitoituksessa on otaksuttu tasainen 10 mm tukipainuma koko tukilinjalle. Teoriassa on myös mahdollista, että vain yksi tuki painuu 10 mm. Tämä aiheuttaa kuitenkin vääntömomentin kautta niin suuret rasitukset kanteen, että se lisäisi kohtuuttomasti teräsmäärä. Tämän takia silta tulee perustaa siten, että perustuksiin ei pääse muodostumaan toispuoleista tukipainumaa. Jos geoteknisten laskelmien perusteella on aihetta olettaa, että toispuoleinen painuma on mahdollinen, tulee silta suunnitella kestäämään painumasta aiheutuvat lisärasitukset. Tyyppisillan raudoitusta tulee lisätä tarvittaessa.

6.3.9 Jarrukuorma ja poikittaiset kuormat

Sillan kannen yhtenäisen osan pituus on $L = 19 \text{ m}$. Jarrukuormiksi saadaan kaavasta (15) $Q_{lk} = 411 \text{ kN}$ ja $Q_{trk} = 103 \text{ kN}$.

6.4 Kuormitusyhdistelmät

Kuormitusyhdistelmät muodostettiin liitteen 6 mukaisesti. Kyseisen liitteen taulukot sisältävät kaikki kuormitusyhdistelmät murto- ja käyttörajatilassa.

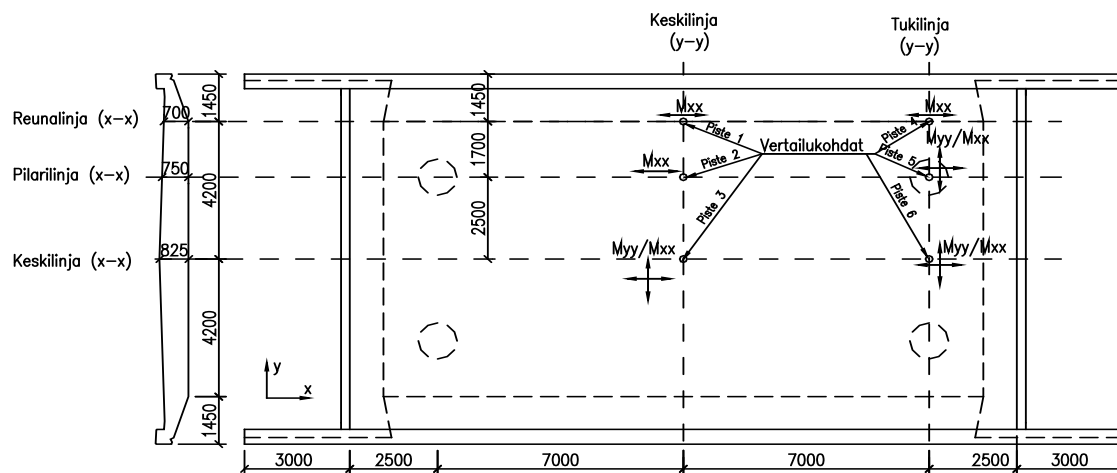
Kuormien yhdistely jouduttiin tekemään Excelissä sillä liikennekuormien yhdistely ei onnistunut Robot Structural Analysis -ohjelmiston kuormitusyhdistelmätyökaluilla. Ohjelma yhdistelee kuormitukset kuormitusyhdistelmäkaavojen ja erilaisten ehtolauseiden avulla. Jos liikennekuormaa käytetään kuormitusyhdistelyssä, niin ohjelma muodostaa jokaisesta liikennekuorman asennosta oman yhdistelmänsä kaikkien muiden kuormien kanssa. Erilaisia yhdistelmiä muodostuu siis helposti kymmeniä tuhansia. Yhdistelmien suuri määrä tekee ohjelman käytöstä hidasta ja käyttäjä joutuu jatkuvasti odotelemaan, että ohjelma latailee tuloksia näytölle. Parempi tapa olisi käyttää kuormien muodostamia verhopintoja hyväksi kuormitusyhdistelyissä. Tällöin voitaisiin tehdä oma verhopinta esimerkiksi kaikista lämpötilakuormista, jolloin niitä voitaisiin yhdistellä helposti esimerkiksi liikennekuormien verhopintojen kanssa. Ainakaan Robot Structural Analysis 2011 -ohjelma ei tue verhopintojen käyttöä kuormitusyhdistelyissä eli se ei sovellu kovinkaan hyvin siltojen kuormitusyhdistelmien tehokkaaseen muodostamiseen.

Excelin kuormitusyhdistelmät on muodostettu siten, että Robot Structural Analysis -ohjelmasta on haettu elementtien solmupisteiden voimasuuret kuvan 36 mukaisilta linjoilta. Jokaisen solmupisteen voimasuuret on yhdistelty automaattisesti erilaisten ehtolauseiden avulla ja ne muodostavat kaikki liitteen 6 kuormitusyhdistelmät. Taulukkolaskentarutiini on hakenut näistä kuormitusyhdistelmistä määräävimmän ja muodostanut niistä momentti- ja normaalivoimakuvajaat.

6.5 Voimasuureet

6.5.1 Tarkastelupisteet

Rakenteen voimasuureet on laskettu viideltä linjalta kuvan 36 mukaisesti. Tarkastelupisteiksi valittiin kyseisiltä linjoilta kuvaan merkityt kuusi pistettä, joiden perusteella poikkileikkausten teräsmäärät mitoitetaan.

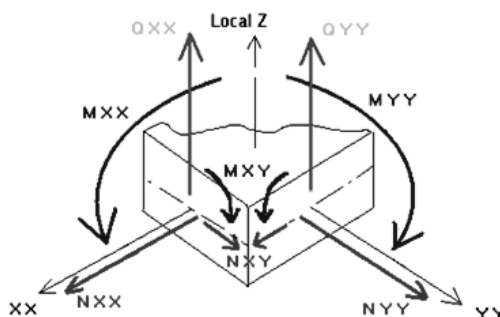


Kuva 36. Voimasuureiden laskentapistet.

6.5.2 Voimasuureet

Rakenne on analysoitu laattarakenteena FEM ohjelmaa käyttäen. Elementtimenetelmä-ohjelma laskee voimasuureet klassisen laattateorian mukaisesti eli ohjelma tulostaa momentit M_y , M_x ja M_{xy} . Vääntömomentti M_{xy} tulee huomioida terästen mitoitusmomentissa, jotta voimasuureiden ja ulkoisten voimien välillä vallitsee tasapainotila. Vääntömomentti on huomioitu Wood&Armer -menetelmällä, jossa vääntömomentti M_{xy} lisätään M_x ja M_y momentteihin siten, että voiman itseisarvo kasvaa. Myös mitoituksessa käytetty normaalivoima N_{xx} ja N_{yy} on laskettu Wood&Armer -menetelmällä. [36]

Kuvassa 37 on esitetty voimasuureiden suunnat. Positiivinen momentti tarkoittaa vetoa yläpinnassa ja negatiivinen vetoa alapinnassa. Positiivinen normaalivoima tarkoittaa vetoa ja negatiivinen voima puristusta.



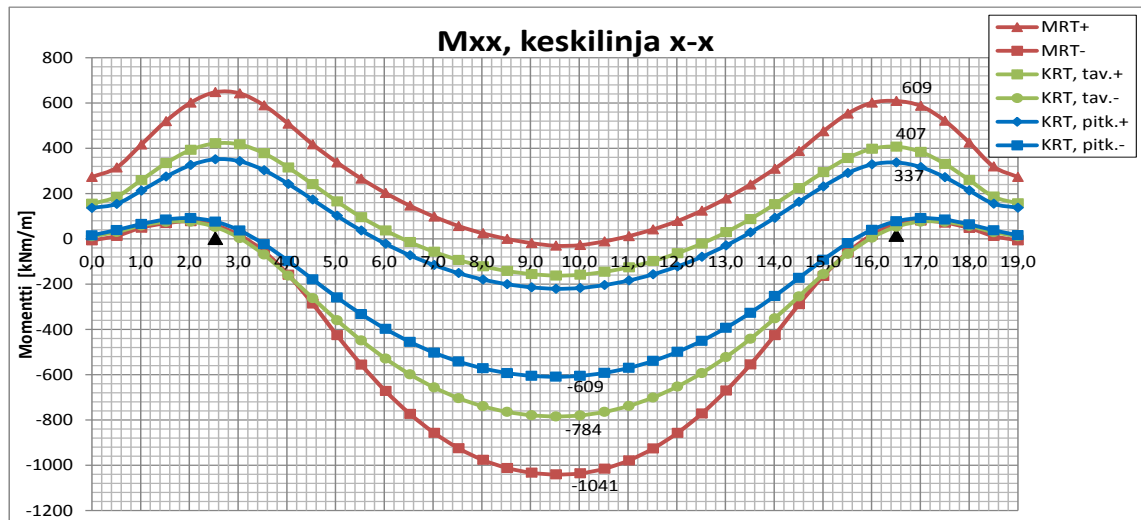
Kuva 37. Voimien suunnat.

Momentit ja normaalivoimat

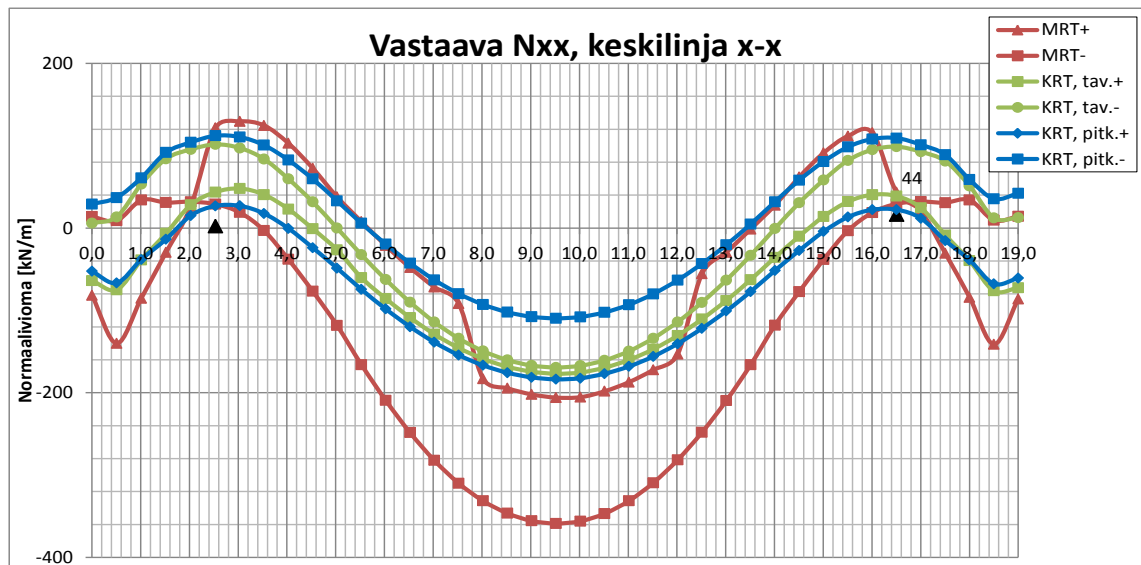
Taulukossa 11 on esitetty jokaisesta vertailupisteestä lasketut mitoitusmomentit ja niitä vastaavat normaalivoimat murto- ja käyttörajatilassa. Momentit ja normaalivoimat on

-sovellusohje kuitenkin rajoittaa muiden pyöristysmenetelmien käyttöä eli mitoituksessa päädyttiin käyttämään yllä olevaa kaavaa myös monoliittisesti kiinnitetylle pilarille.

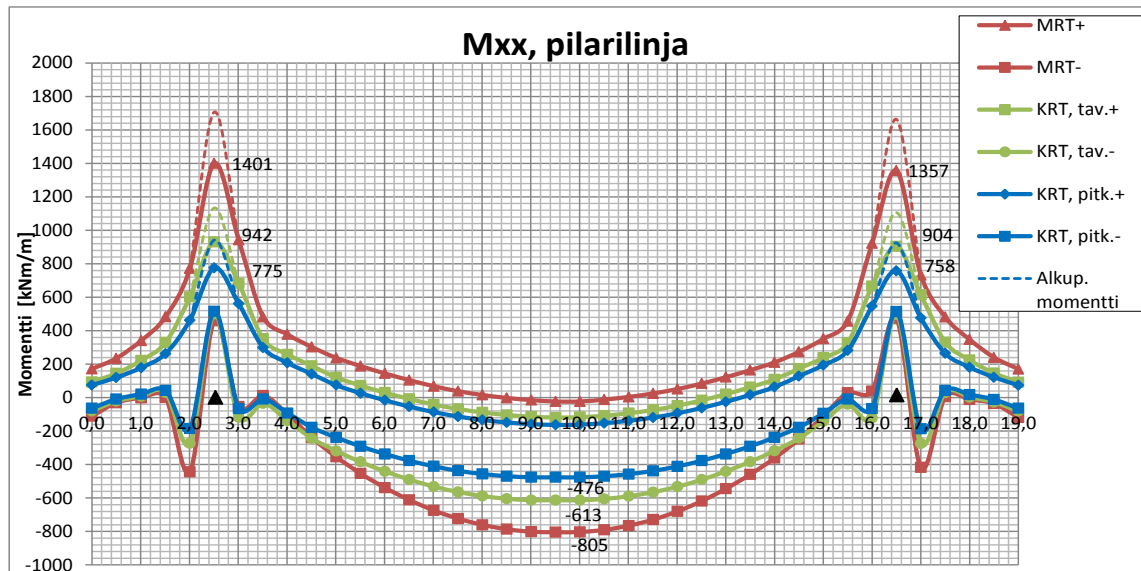
Kuvissa on peitetty harmaalla ei-mitoittava puoli sillasta, sillä liikennekuormat sijaitsivat rakennemallissa vain sillan toisella laidalla.



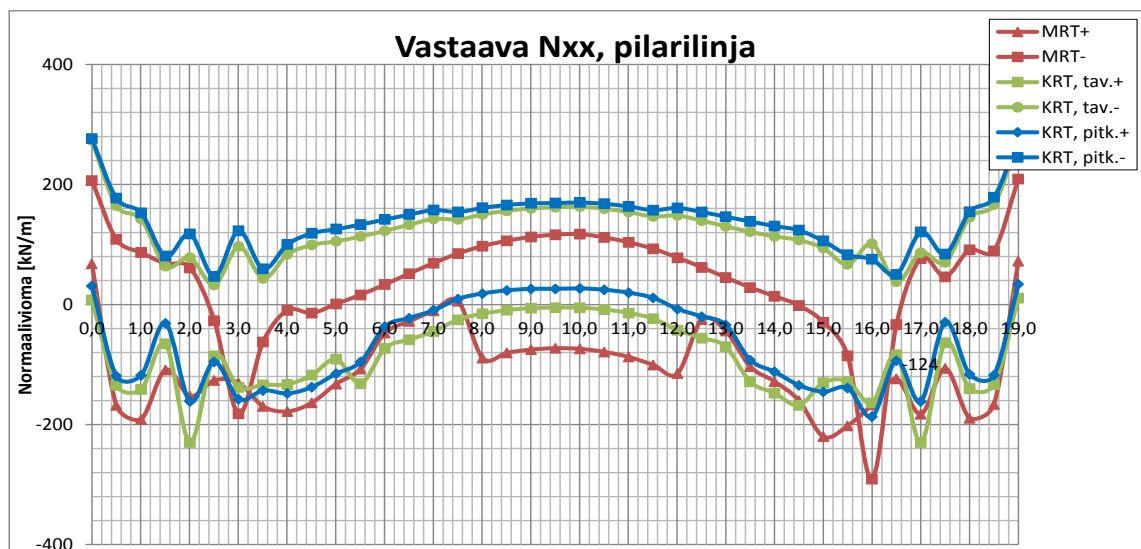
Kuva 38. Momentin M_{xx} jakauma sillan keskilinjaa pitkin.



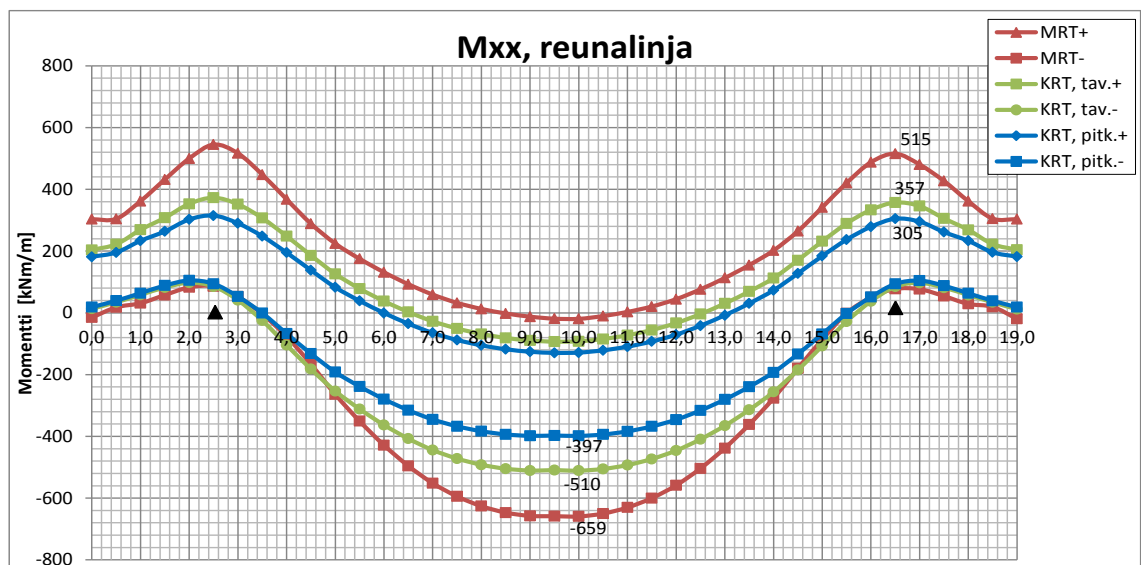
Kuva 39. Momenttia M_{xx} vastaavan normaalivoiman N_{xx} jakauma sillan keskilinjaa pitkin.



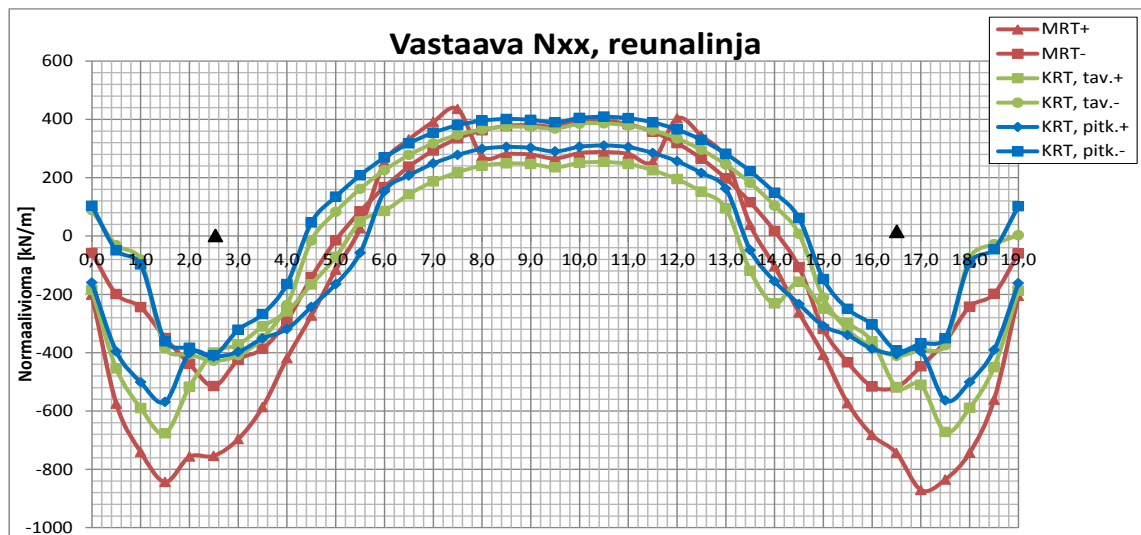
Kuva 40. Momentin M_{xx} jakauma pilarilinjalla.



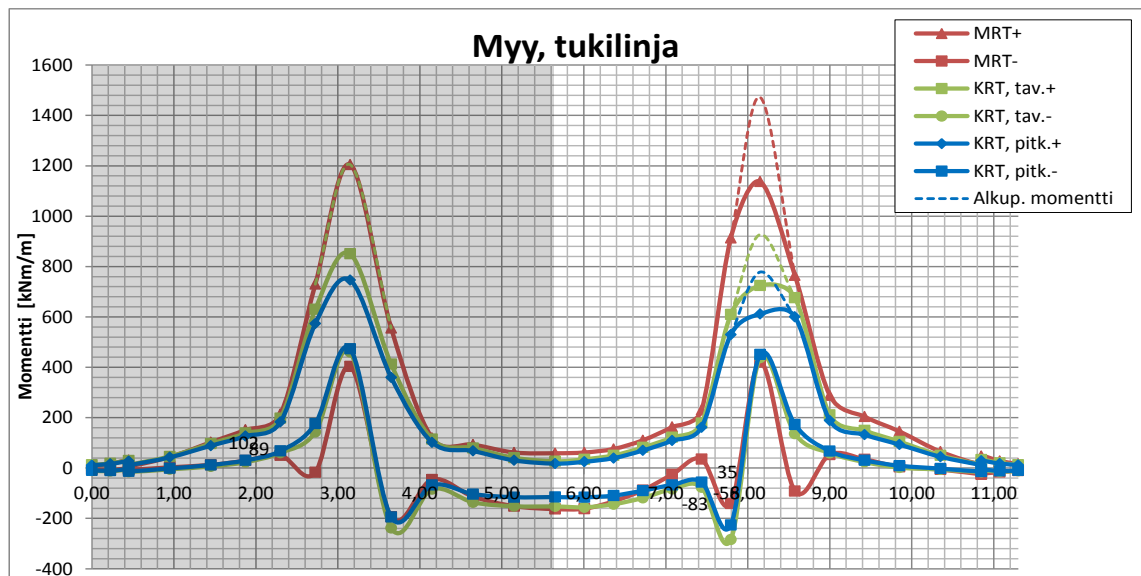
Kuva 41. Momenttia M_{xx} vastaavan normaalivoiman N_{xx} jakauma pilarilinjalla.



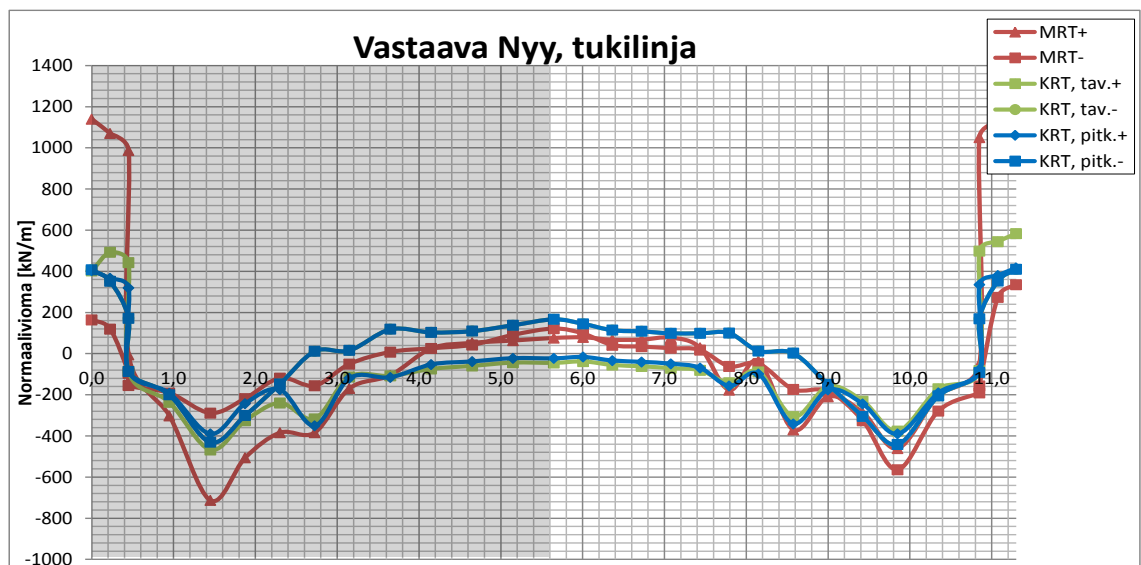
Kuva 42. Momentin M_{xx} jakauma reunalinjalla



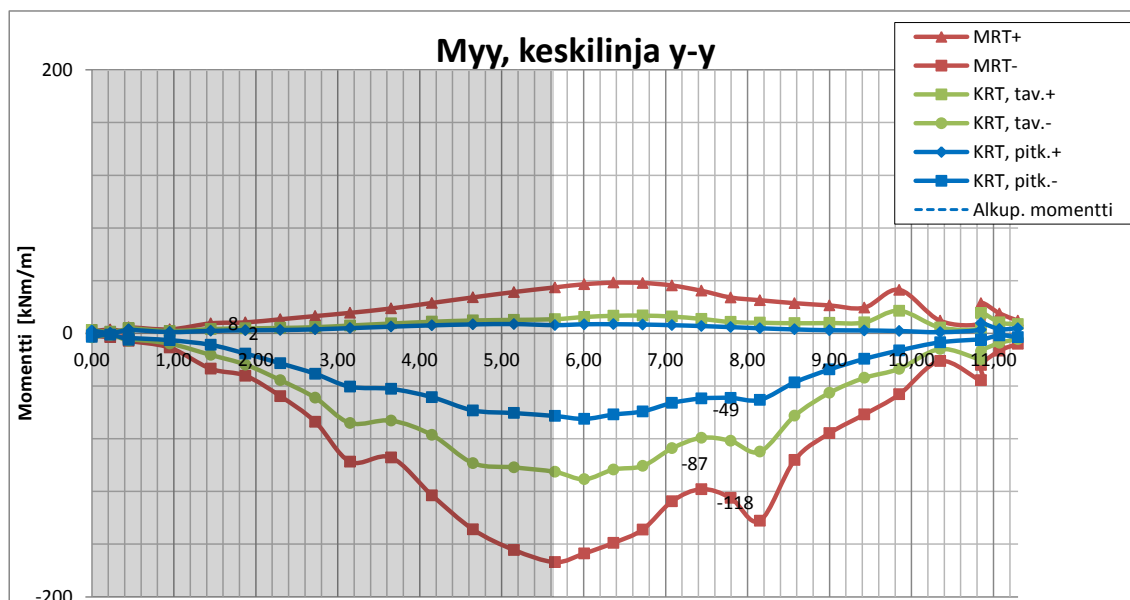
Kuva 43. Momenttia M_{xx} vastaavan normaalivoiman N_{xx} jakauma reunalinjalla.



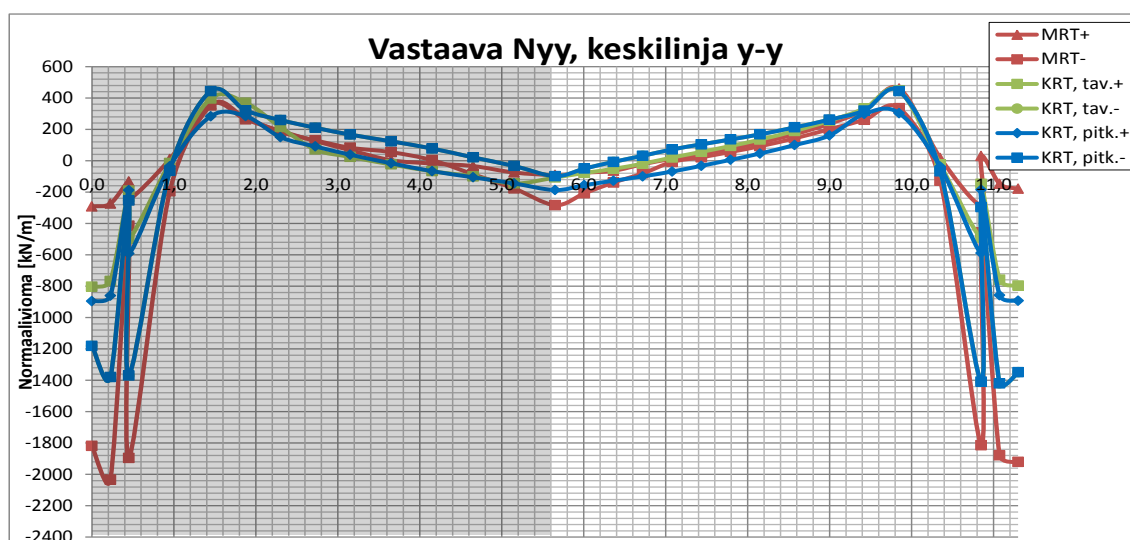
Kuva 44. Momentin M_{yy} jakauma tukilinjalla.



Kuva 45. Momenttia M_{yy} vastaavan normaalivoiman N_{yy} jakauma tukilinjalla.



Kuva 46. Momentin Myy jakauma keskilinjalla



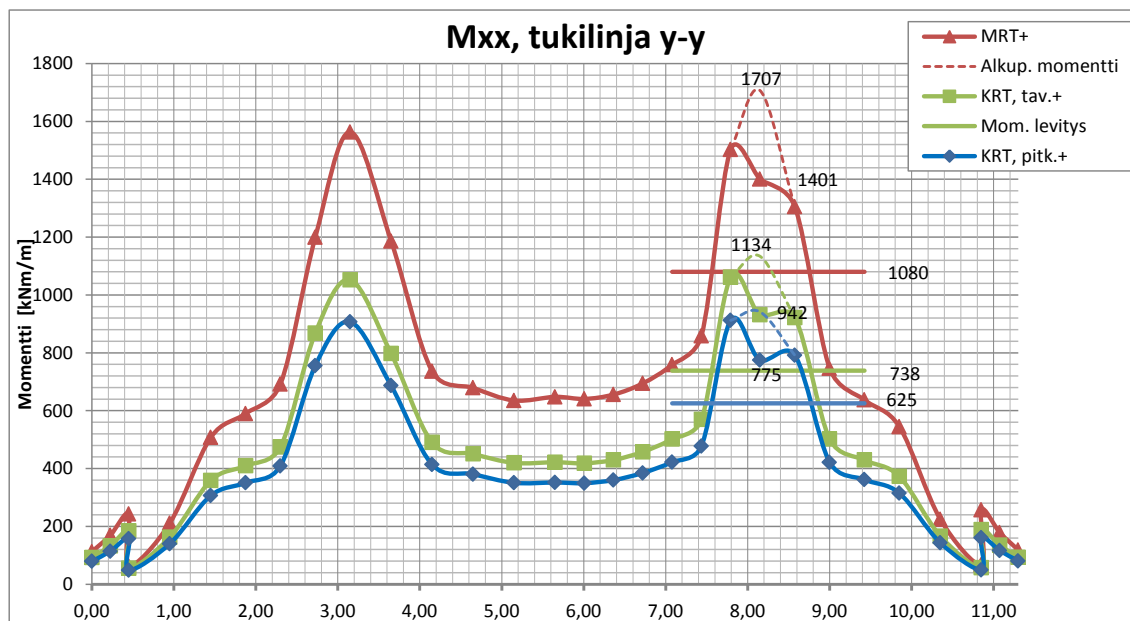
Kuva 47. Momenttia Myy vastaavan normaalivoiman Nyy jakauma keskilinjalla.

Kuvista 40 ja 44 nähdään, että momentin pyöritys pienentää tukimomenttia noin 18 % x-suunnassa ja noin 22 % y-suunnassa.

Pilarin mitoitusmomenttia ei ole levitetty voiman poikkisuunnassa mitenkään, sillä tähän ei löytynyt ohjeistusta. Osa suunnittelijoista on käyttänyt momentin levitykseen sellaista nyrkkikaavaa, että pilarin yllä olevaa momenttia voidaan levittää noin $3h$ levyiselle alueelle, missä h on kannen korkeus. Momentti siis kerättäisiin summaksi $3h$ matkalta ja jaettaisiin $3h$:lla, jolloin saataisiin $3h$ matkalle tasainen momentti, jolle teräkset mitoitetaan. Edellä mainittu $3h$ sääntö on todennäköisesti peräisin siitä ajatuksesta, että momentti levittyy pilarin kohdalla noin $D+2d$ levyiselle alueelle, missä D on pilarin halkaisija ja d on etäisyys vetoteräksistä puristettuun reunaan. Tämä mitta vastaa käytännössä usein noin $3h$ matkaa.

Kuvassa 48 on esitetty vertailun vuoksi kannen pituussuuntaisen momentin M_{xx} jakauma tukilinjalla eli sillan poikkisuunnassa. Kuvassa on katkoviivalla esitetty alkuperäinen momentti sekä numeroarvona pyöristetty momentti. Momentin pyöristystä ei ole tehty pilarin reunamomentille, minkä takia se jää kuvassa keskipisteen momenttia suuremmaksi. Kuvassa on lisäksi esitetty vaakasuuntaisella viivalla $D+2d$ matkalle

levitetty momentti. Kuvasta nähdään, että momentin levitys vaakasuunnassa pienentää tukimomenttia 20–23 % pyöristetystä arvosta. Alkuperäinen momenttipiikin mukainen arvo pienentyy siis momentin pyöristyksen ja levityksen johdosta 33–37 %. Tätä momentin levitystapaa ei kuitenkaan ole käytetty laskelmissa, sillä sille ei löytynyt ohjeistusta normeista tai sovellusohjeista.



Kuva 48. Momentin M_{xx} jakauma ja $D+2d$ levitys sillan poikkisuunnassa.

Leikkausvoimat

Rakenteen leikkausvoimajakauma on esitetty kuvan 36 Pilarilinja x-x ja Tukilinja y-y akseleita pitkin. Leikkausvoimat on esitetty suoraan voiman pääakselien suunnassa eli voimat Q_x ja Q_y on yhdistetty resultantiksi. Leikkausvoimajakaumat on esitetty yhdessä leikkausmitoituksen tulosten kanssa kuvissa 49 ja 50. Kuvan 50 leikkausvoima on toisella pilarilla suurempi, sillä liikennekuormia ajettiin sillalla toispuoleisesti.

Lävistysmitoitus

Taulukossa 12 on esitetty lävistysmitoitusta varten lasketut pilareiden yläpäiden tukireaktiot ja taivutusmomentit. Tarkastelun kohteeksi on otettu vain yksi pilari sillä rakenne on symmetrinen.

Taulukko 12. Pilarin yläpään tukireaktiot ja momentit.

	KY	Määräävä kuormitus					Vastaavat arvot			Mitoitus resultantit	
		Fx+	My-	My+	Mz-	Mz+	Fvast	Myvast	Mzvast	Fd	Md
Pilar 3, sauva 21	MRT_6	3510					-1052	-113		3510	1058
	MRT_1		-1440				2231	-55		2231	1441
	MRT_3			774			2345	151		2345	789
	MRT_6				-116		3322	-1173		3322	1179
	MRT_3					166	2220	374		2220	410

6.6 Mitoitus

6.6.1 Materiaaliarvot

Taulukossa 13 on esitetty laskennassa käytetyn betonin ja betoniteräksen ominaisuudet. Materiaaliarvot on laskettu eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 mukaisilla kaavoilla. [30]

Taulukko 13. Laskennassa käytetyn betonin ja betoniteräksen ominaisuudet.

Betoni	f_{ck} [MPa]	f_{cd} [MPa]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	$f_{ctk,0.05}$ [MPa]	f_{ctd} [MPa]	E_{cm} [MPa]
C30/37	30,0	18,89	38,0	2,90	2,03	1,50	32 837

Betoniteräs	f_{yk}	f_{yd}	E_s	γ_c	γ_s
A500HW	500	454,55	200 000	1,35	1,1

6.6.2 Taivutusterästen mitoitus ja tulosten vertailu

Taulukossa 14 on esitetty mitoituksen tuloksena saadut teräs- ja betonijännitykset sekä teräsmäärät. Taulukon teräs- ja betonijännitykset on laskettu rivillä 2 esitetyn rakenteeseen valitun teräsmäärän perusteella.

Murtorajatila ei ollut määräävä rajatila yhdenkään poikkileikkauksen mitoituksessa. Rivillä 7 on esitetty murtorajatilan käyttöaste, joka oli korkeimmillaan pilareiden yläpinnan raudoituksella noin 80 %.

Mitoituksessa ei ole huomioitu epälineaarista virumaa eli käyttörajan tilan pitkäaikaisyhdistelmän betonijännityksen tulee jäädä alle $0,45 \cdot f_{ck}$. Betonilla $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ tämä arvo on 13,5 MPa. Tämä jännitys ei ylitä yhdessäkään tarkastelupisteessä.

Betonipoikkileikkauksen suurin sallittu puristusjännitys on käyttörajan tilan ominaisyhdistelmällä $0,6 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot 30 \text{ MPa} = 18 \text{ MPa}$. Pilarin päällä oleva maksimijännitys on 18,8 MPa. Näin pieni paikallinen jännityksen ylitys ei ole vaarallista, koska tukimomenttia ei levitetty yhtään voiman poikkisuunnassa. Todellisessa rakenteessa jännityshuippu tasoittuisi hieman.

Rakenteelle ei tarvitse tehdä väsymismitoitusta, jos käyttörajan tilan ominaisyhdistelmän teräs jännitys jää alle 300 MPa. Raja-arvo on peräisin Ranskan tiehallinnon Sétran betonisilloja koskevasta sovellusohjeesta. Sama raja-arvo on otettu ainakin toistaiseksi myös Liikenneviraston Betonisillat -sovellusohjeeseen [26]. Ehto toteutuu rakenteessa, sillä teräksen maksimijännitys on ominaisyhdistelyllä 286 MPa.

Taulukossa on näytetty myös nykyisen tyyppisillan teräsmäärät vertailupisteistä. Näitä arvoja ei kuitenkaan voi pitää täysin vertailukelpoisina, sillä nykyisen sillan varsinaisia mitoitus tuloksia ei ollut käytettävissä.

Taulukko 14. Mitoituksen tulokset vertailupisteissä.

1				Piste 1 , x-x	Piste 2 , x-x	Piste 3 , x-x	Piste 3 , y-y	Piste 4 , x-x	Piste 5 , x-x	Piste 5 , y-y	Piste 6 , x-x	Piste 6 , y-y
2	Teräs	As	[mm²/m]	4909	4909	4909	1005	2454	6476	4909	3272	1340
3				T25 k100	T25 k100	T25 k100	T16 k200	T25 k200	T25 k200+ T32 k200	T25 k100	T25 k150	T16 k150
4	MRT	M	[kNm/m]	-659	-803	-1041	-174	545	1401	1137	648	-163
5		N	[kN/m]	397	117	-359	46	-754	-126	-36	122	-36
6		σc	[MPa]	-9	-10	-11	-4	-10	-15	-13	-7	-3
7		σs	[MPa]	285	286	283	261	244	356	371	207	149
8		KA		63 %	63 %	62 %	58 %	54 %	78 %	82 %	45 %	33 %
9	KRT, ominais.	M	[kNm/m]	-618	-743	-951	-143	487	1156	904	564	-207
10		N	[kN/m]	427	182	-211	46	-556	-120	-17	-38	92
11		σc	[MPa]	-12,0	-13,2	-14,6	-4,1	-13,8	-18,8	-15,7	-10,0	-5,0
12		σs	[MPa]	266	265	262	217	233	256	286	243	242
13	KRT, tavallinen	M	[kNm/m]	-511	-613	-784	-105	373	931	725	422	-153
14		N	[kN/m]	385	163	-169	43	-400	-85	-88	44	44
15		As.vaad	[mm²/m]	4442	4393	4320	1005	2356	5690	4565	2750	1206
16		σc	[MPa]	-10,0	-10,9	-12,0	-3,0	-10,6	-13,5	-12,6	-7,6	-3,7
17		σs	[MPa]	223	220	217	163	183	204	222	163	170
18		σs.sall	[MPa]	249	247	247	164	190	237	238	193	189
19		σs.sall2	[MPa]	247	247	247	189	189	247	247	218	218
20		KRT, pitkäaikainen	M	[kNm/m]	-399	-476	-609	-63	315	775	611	352
21	N		[kN/m]	405	170	-110	42	-414	-95	-98	27	61
22	As.vaad		[mm²/m]	4835	4663	4639	935	2381	6132	5081	3264	1287
23	σc		[MPa]	-4,8	-5,4	-6,2	-1,1	-6,5	-7,5	-7,4	-4,0	-1,7
24	σs		[MPa]	188	180	180	108	155	178	192	163	140
25	σs.sall		[MPa]	193	191	190	123	159	187	186	164	146
26	σs.sall2		[MPa]	188	188	188	145	145	188	188	167	167
28	Nyk. teräsmäärä	[mm²/m]	5454	5454	5454	1005	4908	5890	4909	3436	804	

missä

A_s	on siltaan valitun teräksen pinta-ala, halkaisija ja jakoväli
σ_c	on betonin puristusjännitys
σ_s	on teräksen vetojännitys
KA	on murtorajatilan käyttöaste
$A_{s.vaad}$	on vaadittu teräsmäärä kyseisen käyttörajatilan halkeamaleveyden perusteella
$\sigma_{s.sall}$	on sallittu teräs jännitys halkeamaleveyden perusteella
$\sigma_{s.sall2}$	on sallittu teräs jännitys kaavan (26) perusteella.

Taulukon rivillä 15 on esitetty käyttörajatilan tavallisen yhdistelmän vaatima teräsmäärä ja rivillä 22 vastaavasti pitkäaikaisen yhdistelmän vaatima teräsmäärä. Arvoista nähdään, että käyttörajatilan pitkäaikainen yhdistelmä mitoitti lähes jokaisessa tapauksessa. Ainoastaan pisteen 3 y-y suunnassa tavallinen yhdistelmä oli mitoittavampi. Liitteessä 6 esitetystä kuormien käyttörajatilan yhdistelytaulukosta nähdään, että pitkäaikaisella yhdistelmällä kuormakaavion LM1 telikuorma ja tasainen pintakuorma kerrotaan yhdistelykertoimella 0,3. Näitä kertoimia saatetaan vielä korjata Liikenneviraston toimesta, jos näyttää siltä, että toinen halkeamaleveydestarkastelu on liian mitoittava verrattuna toiseen. Kertoimien muokkaaminen on mahdollista sillä, Eurokoodin mukaan LM1 telikuormaa ei ole pakko huomioida pitkäaikaisessa yhdistelyssä.

Taulukossa 15 on laskettu uudestaan teräs jännitykset eri LM1 kertoimilla ja vertailtu vaadittuja teräspinta-aloja käyttörajatilan tavallisen yhdistelmän vaadittuihin teräspinta-

aloihin. Taulukon oikeaan laitaan on laskettu teräspinta-alojen prosentuaalinen eroavaisuus painotettuna vaaditulla teräspinta-alalla. Painotus karsii joukosta harvasti raudoitetun pisteen 3 y-y tuloksia, johon pienikin voimasuureen muutos aiheuttaa suuren jännityksen.

Taulukko 15. LM1 yhdistelykertoimen vaikutus käyttörajatilan pitkäaikaisen yhdistelmän vaatimaan teräsmäärään.

			Piste 1 , x-x	Piste 2 , x-x	Piste 3 , x-x	Piste 3 , y-y	Piste 4 , x-x	Piste 5 , x-x	Piste 5 , y-y	Piste 6 , x-x	Piste 6 , y-y	Painotettu KA
LM1 Akseli/Pinta	As [mm ² /m]		4909	4909	4909	1005	2454	6476	4909	3272	1340	
			T25 k100	T25 k100	T25 k100	T16 k200	T25 k200	T25 k200+ T32 k200	T25 k100	T25 k150	T16 k150	
0/0,3	M	[kNm/m]	-327	-390	-499	-36	278	676	540	307	-92	
	N	[kN/m]	423	176	-72	42	-426	-102	-105	15	74	
	As.vaad	[mm ² /m]	4246	3927	3878	720	2062	5445	4123	2994	1196	
	Ero		-4,6 %	-11,9 %	-11,4 %	-39,6 %	-14,3 %	-4,5 %	-10,7 %	8,1 %	-0,8 %	-7,5 %
	σs	[MPa]	163	151	147	69	123	154	153	141	123	
0,1/0,3	M	[kNm/m]	-351	-419	-536	-45	290	709	564	322	-100	
	N	[kN/m]	417	174	-85	42	-422	-100	-103	19	71	
	As.vaad	[mm ² /m]	4442	4172	4047	780	2160	5641	4271	3083	1237	
	Ero		0,0 %	-5,3 %	-6,7 %	-28,8 %	-9,1 %	-0,9 %	-6,9 %	10,8 %	2,5 %	-3,0 %
	σs	[MPa]	180	161	157	82	132	162	160	149	130	
0,2/0,3	M	[kNm/m]	-375	-448	-573	-54	303	742	588	337	-108	
	N	[kN/m]	411	172	-97	42	-418	-98	-100	23	68	
	As.vaad	[mm ² /m]	4639	4418	4344	860	2283	5901	4467	3240	1277	
	Ero		4,2 %	0,6 %	0,6 %	-16,9 %	-3,2 %	3,6 %	-2,2 %	15,1 %	5,6 %	2,2 %
	σs	[MPa]	198	170	168	94	142	169	168	160	138	
0,2/0,2	M	[kNm/m]	-369	-440	-563	-52	301	734	580	335	-106	
	N	[kN/m]	403	170	-94	41	-414	-97	-100	23	68	
	As.vaad	[mm ² /m]	4565	4344	4271	834	2258	5837	4418	3166	1267	
	Ero		2,7 %	-1,1 %	-1,1 %	-20,5 %	-4,3 %	2,5 %	-3,3 %	13,1 %	4,8 %	0,8 %
	σs	[MPa]	177	168	165	91	141	168	165	155	135	
0,3/0,3	M	[kNm/m]	-399	-476	-609	-63	315	775	611	352	-115	
	N	[kN/m]	405	170	-110	42	-414	-95	-98	27	61	
	As.vaad	[mm ² /m]	4835	4663	4639	935	2381	6132	5081	3264	1287	
	Ero		8,1 %	5,8 %	6,9 %	-7,5 %	1,0 %	7,2 %	10,2 %	15,7 %	6,3 %	8,8 %
	σs	[MPa]	188	180	180	108	155	178	192	163	140	

Taulukon termi ”Ero” tarkoittaa vaaditun teräspinta-alan eroa käyttörajatilan tavallisen yhdistelmän vaatimaan teräsmäärään, joka on esitetty taulukossa 14.

Taulukon arvoista nähdään, että tämänhetkisellä kerroinvalinnalla 0,3/0,3 pitkäaikainen yhdistelmä antaa lähes 9 % suuremmat teräspinta-alavaatimukset, kuin tavallinen yhdistelmä. Jos akseleita ei oteta ollenkaan mukaan, eli kertoimet ovat 0/0,3, niin tilanne menee päinvastaiseksi. Tällöin tavallinen yhdistelmä mitoittaa rakennetta yli 7 % enemmän. Paras tasapainotilanne näyttää olevan yhdistelmävalinnoilla 0,2/0,2 jolloin eroavaisuuksien keskiarvo on enää alle 1 %. Toiseksi paras vaihtoehto on yhdistelmävalinta 0,2/0,3 jolloin eroavaisuus on hieman yli 2 %.

Yllä olevan vertailun pistejoukko on kohtuullisen pieni eikä vertailussa ole mukana kuin kannen taivutusraudoitusta. Taulukon 15 tuloksista ei voi vielä tehdä lopullisia johtopäätöksiä, mutta ne ovat suuntaa antavia.

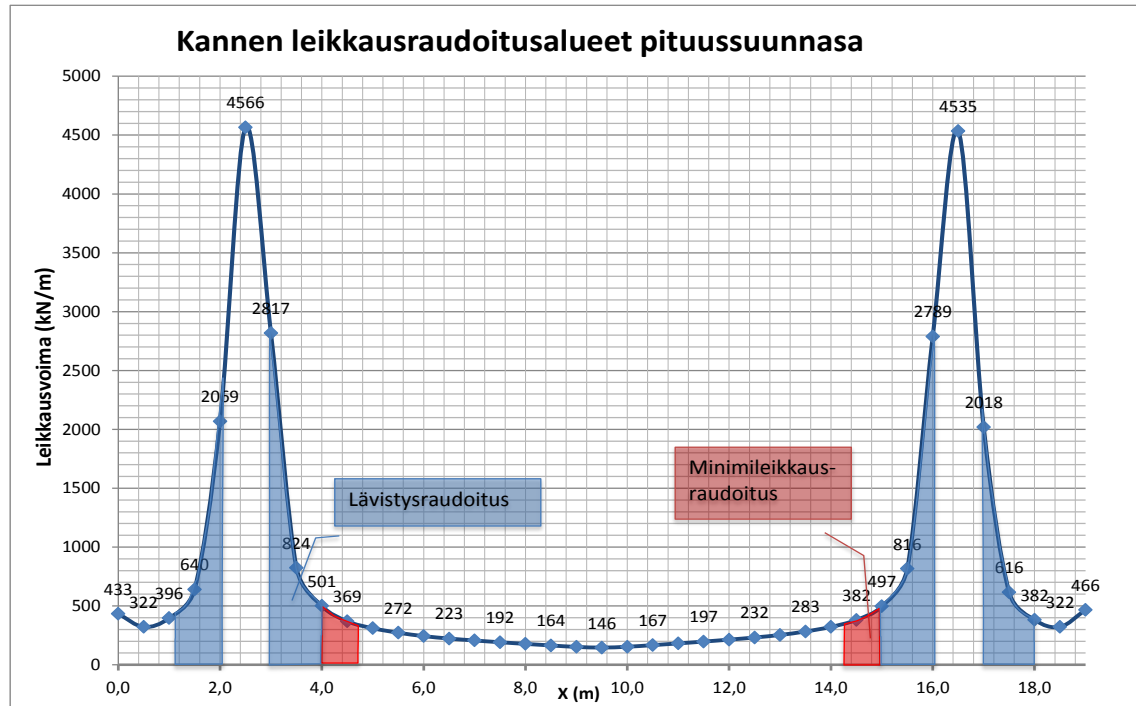
6.6.3 Leikkausmitoitus

Leikkausmitoitus on suoritettu liitteessä 7. Betonin leikkauskapasiteetiksi saatiin 333 kN/m. Minimileikkausraudoitetun betonin leikkauskapasiteetti on 768 kN/m. Mitoituksen perusteella maksimi leikkausvoima mitan d päästä reunasta on 734 kN/m. Leikkausraudoitukseksi riittävät siis minimileikkaushaajat niillä alueilla, missä betonin leikkauskapasiteetti ei riitä.

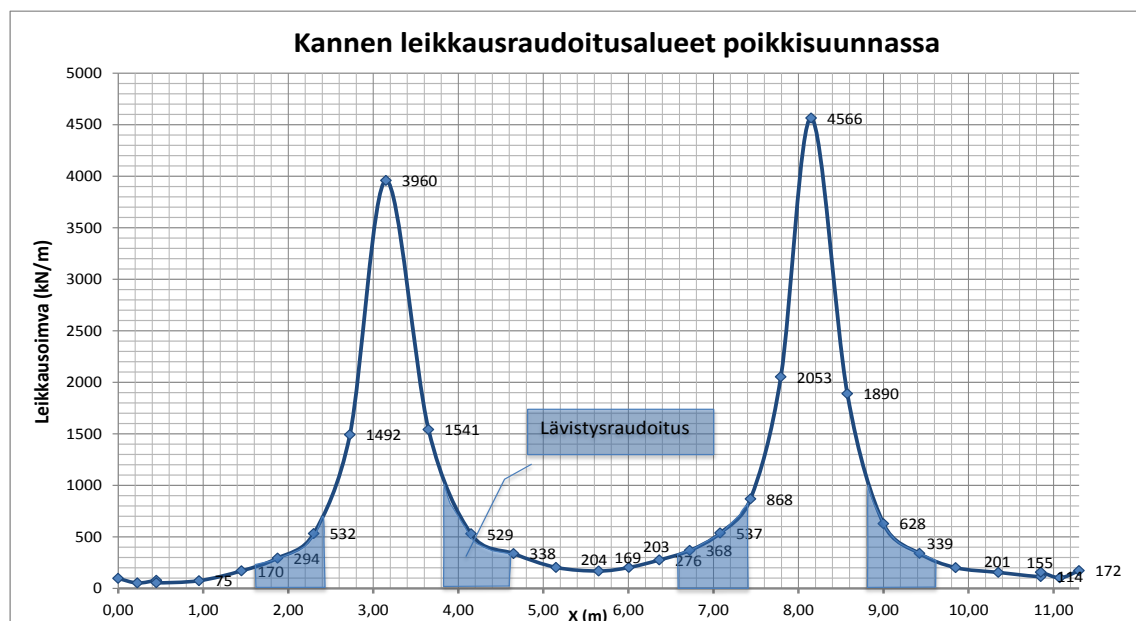
6.6.4 Lävistys

Liitteessä 8 on esitetty kannen lävistysmitoitus. Mitoituksessa pilarin halkaisijana käytettiin 900 mm ja pilarin liitos kanteen oletettiin monoliittiseksi. Mitoituksen perusteella pilarin ympärille tulee sijoittaa vähintään 88 kappaletta T12 hakoja välille 0-1,5d pilarin reunasta. Liitteen 8 kuvassa 1 on esitetty laatan leikkausraudoitusjärjestelyt.

Kuvissa 49 ja 50 on esitetty ne alueet joilla tarvitaan leikkaushakoja. Sinisellä alueella vaikuttavat lävistyshaat, jotka samalla toimivat leikkausraudoituksen miniraudoitukse-
na. Punaisella on merkitty lävistysalueen ulkopuolinen minimileikkausraudoitusalue. Suoraan pilarin päällä ei tarvitse olla leikkausraudoitusta.



Kuva 49. Sillan leikkausvoimajakauma ja leikkausraudoitusjärjestely pituussuunnassa pilareiden kohdalla.



Kuva 50. Sillan leikkausvoimajakauma ja leikkausraudoitusjärjestely poikkisuunnassa pilareiden kohdalla.

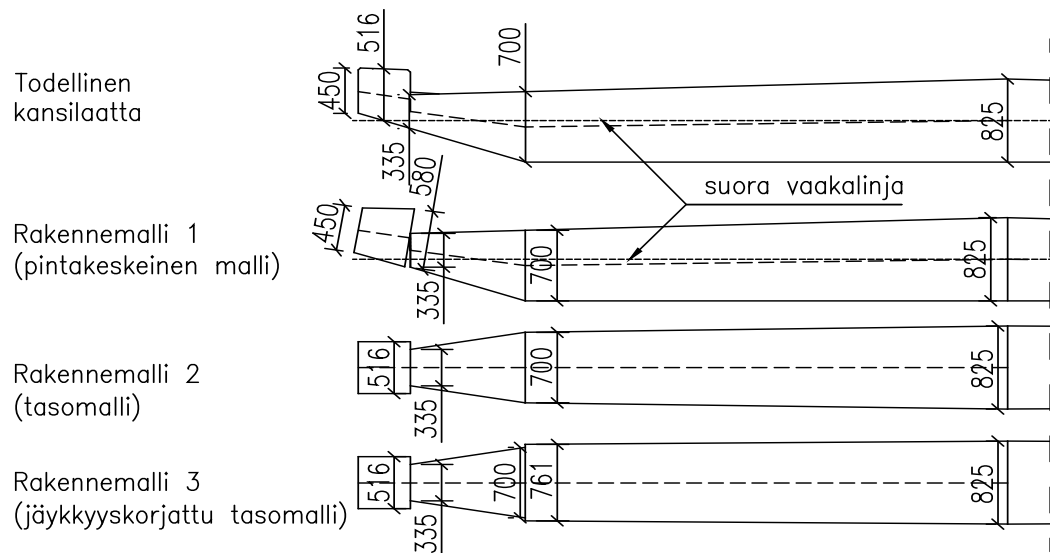
6.7 Eri laskentamallien vertailua

6.7.1 Käytetyt laskentamallit

Poikkileikkauksessa ylösnousevan reunapalkin ja reunaviisteen takia kannen reuna toimii todellisessa rakenteessa hieman palkkimaisesti. Rakenteen oman painon vaikutuksesta reunapalkkiin muodostuu puristusta kannen puolella välissä ja vetoa reunaviisteen alkamiskohdassa. Vastaavasti tukilinjan kohdalla reunapalkkiin muodostuu vetoa ja reunaviisteen alkamiskohtaan puristusta. Syntyvät normaalivoimat aiheuttavat sen, että laskentamallin tulosten hyödyntäminen on hieman työlästä. Poikkileikkauksen mitoituksessa täytyy nyt huomioida normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus, mikä vaikeuttaa oleellisesti poikkileikkauksen voimatasapainon ratkaisemista. Voimatasapainon hakemiseen täytyy käyttää yhtälöryhmää, jossa esimerkiksi betonin puristuspinnan korkeus ja betonin puristuma ratkaistaan kahden yhtälöryhmän tasapainosta. Käsinmitoituksessa tämä onnistuu järkevästi vain iteroimalla. Nykyiset matematiikan laskentaohjelmat, kuten Mathcad, osaavat ratkaista tämänkaltaiset ongelmat kuitenkin vaivatta.

Käytännön mitoituksessa ongelma vältetään muodostamalla rakennemalli yhdessä tasossa, jolloin siihen ei pääse muodostumaan suuria normaalivoimia. Kannen poikkileikkauksia voidaan tällöin tarkastella paljon helpommin käyttämällä taivutetun poikkileikkauksen yksinkertaisia kaavoja. Tällöin tosin ylösnousevan reunavyöhykkeen vaikutus laatan rasitukseen tulee ottaa huomioon muulla tavoin. Käytettyjä tapoja ovat ainakin reunavyöhykkeen jäykkyyden siirtäminen varsinaisten toimivien terästen alueelle olevalle laatalle tai reuna-alueelle kertyvän momentin lisääminen reunan lähellä sijaitsevien toimivien terästen mitoitusmomenttiin. Reuna voidaan myös tarkastella kokonaan omana poikkileikkauksenaan käyttämällä poikkileikkauksen mitoituksessa reuna-alueen todellista muotoa. Tässä työssä tutkitaan menetelmää, jossa reuna-alueen jäykkyyttä siirretään varsinaisen kansilaatan puolelle.

Tutkitaan kahta erilaista laskentamallia ja vertaillaan niiden eroavaisuuksia mitoituksessa käytettyyn laskentamalliin. Vertailussa käytetyt rakennemallit on esitetty kuvassa 51. Mitoituksessa käytetyn laskentamallin kansilaatta muodostettiin todellisen kansipoikkileikkauksen pintakeskiön avulla. Kansilaatta on kahteen suuntaan kalteva eli se on keskeltä paksumpi kuin reunoista. Tämä aiheuttaa sen, että laatan pintakeskiö laskee hieman laatan reunaa kohti. Asia on havainnollistettu kuvassa 51, johon on piirretty suora vaakalinja asian hahmottamiseksi. Kummankin vertailumallin, eli kuvan 51 rakennemallien 2 ja 3, kansilaatta on muodostettu yhteen tasoon eli kannen reuna-alue ei nouse muuta kantta ylemmäksi.



Kuva 51. Todellisen rakenteen poikkileikkaus sekä vertailussa olevat kolme rakennemallia.

Ensimmäisessä mallissa reuna-alueen jäykistävää vaikutusta ei ole huomioitu mitenkään. Poikkileikkauksen pinta-ala on siis täsmälleen sama kuin todellisellakin rakenteella. Laatan jäykkyyttä ei ole muutenkaan lisätty keinotekoisesti.

Toisessa mallissa reuna-alueen jäykistävä vaikutus on huomioitu lisäämällä mallista puuttuva jäykkyys kansilaattaan paksuntamalla sitä lineaarisesti reunasta keskelle päin. Kansilaatan omaa painoa on pienennetty kasvavan pinta-alan suhteessa. Jäykkyyskorjaus tehtiin tällä tavalla, koska Robot Structural Analysis -ohjelmalla olisi voinut kasvattaa korotuskertoimen avulla elementin toisen suunnan jäykkyyttä vain tasapaksuille elementeille. Kannen paksuus muuttuu kuitenkin lineaarisesti eli tätä vaihtoehtoa ei ollut helppo hyödyntää rakennemallissa. Kansilaattaa paksuntamalla kansi jäykistyy hieman myös toisessa suunnassa, sillä korkeuden kasvaessa jäyhyysmomentti kasvaa voimakkaasti. Tuloksista nähdään onko tällä suurta vaikutusta y-suunnan jännityksiin.

Todellisella kansilaatalla sekä rakennemalleilla 1 ja 3 on sama jäyhyysmomentti koko poikkileikkauksen painopisteakselin suhteen. Rakennemallin 2 kokonaisjäyhyysmomentti on muita rakennemalleja pienempi. Eri laskentamallien tuloksia vertaillaan keskenään ja arvioidaan niiden käyttökelpoisuutta käytännön mitoituksessa.

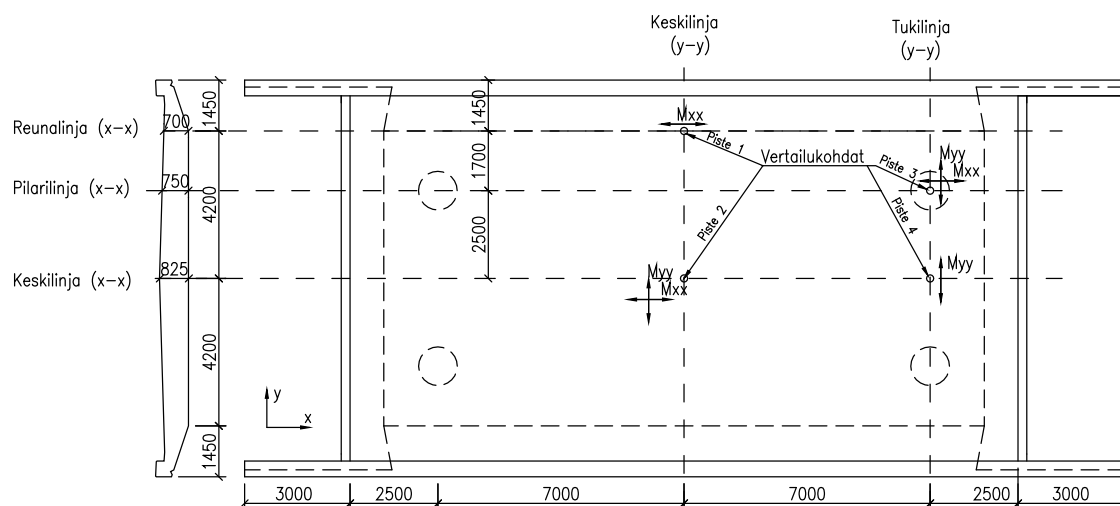
6.7.2 Tulokset

Liitteen 9 kuvissa 1–12 on esitetty rakennemalleihin muodostuvat pituus- ja poikittais-suuntaiset momentit sekä normaalivoimat, kun kuormituksena on rakenteen omapaino. Kuvasta 3 nähdään hyvin, että jäykkyyskorjatun kannen keskikohdan momentti on huomattavasti tasaisemmin jakautunut koko kannen leveydelle, kuin kuvassa 2 esiintyvän tasomallin vastaava momentti. Jäykkyyskorjaus toimii siis juuri halutulla tavalla. Kuvissa 4–6 näytetyt poikkisuunnan momentit ovat hyvin samankaltaisia eri rakennemallien välillä.

Kuvissa 7–9 esitetyt pituussuuntaiset normaalivoimat ovat pintakeskeisellä mallilla täysin erilaiset kuin tasomalleilla. Pintakeskeisessä mallissa reunapalkkiin muodostuu kannen puolella välissä voimakas puristus ja samassa kohdassa kannen reuna-alueeseen tulee vetoa. Tasomallissa on hyvin pieni ja tasainen puristus koko keskikannen leveydeltä. Kuvissa 10–12 on esitetty poikkisuunnan normaalivoimajakaumat. Mallien

välillä on jälleen hyvin suuria eroavaisuuksia. Pintakeskeisessä mallissa kannen keskialue on vedossa ja pilareiden väli puristuksessa. Tasomallissa tilanne on päinvastainen eli kannen keskialue on lievässä puristuksessa ja pilareiden väli vedossa. Kaikissa malleissa päätypalkin yläpäähän muodostuu voimakas puristus ja alapäähän veto.

Eri rakennemalleilla laskettiin voimasuureet kuvaan 52 merkityistä neljästä pisteestä. Mitoitusmomentin ja -normaalivoiman sekä jo aiemmin mitoitettujen terästen avulla laskettiin poikkileikkauksessa vallitseva betoni- ja teräsännitys käyttäen Mathcad-ohjelmaa poikkileikkauksen voimatasapainon hakemiseen.



Kuva 52. Rakennemallien vertailussa käytetyt voimasuureiden laskentakohdat sillan kannessa.

Taulukossa 16, 17 ja 18 on esitetty jokaisessa vertailupisteessä vaikuttavat mitoitusmomentit, normaalivoimat ja näistä lasketut jännitykset. Rakennemalleista 2 (tasomalli) ja 3 (jäykkyyskorjattu tasomalli) saatuja tuloksia on verrattu rakennemalli 1 (pintakeskeinen malli) tuloksiin. Jäykkyyskorjatun rakennemallin 3 tuloksista on lisäksi laskettu jännitykset ilman normaalivoiman vaikutusta, sillä yleensä normaalivoimaa ei huomioida laattarakenteissa sen vähäisen vaikutuksen takia. Tuloksista nähdään minkälainen merkitys normaalivoimalla on tasaisesti mallinnetun kansilaatan tapauksessa. Taulukossa on esitetty jännitysten prosentuaalinen eroavaisuus. Positiivinen prosentti tarkoittaa suurempaa jännitystä ja negatiivinen pienempää jännitystä verrattuna pintakeskeisen mallin tuloksiin.

Taulukko 16. Jännitysvertailua eri rakennemallien välillä. M_{xx}/N_{xx} alapinta.

		Mxx/Nxx alapinta, piste 1, h=700mm, d=615mm, d _c =69mm, T25k100(ap) / T25k200(yp)				Mxx/Nxx alapinta, piste 2, h=825mm, d=740mm, d _c =69mm, T25k100(ap) / T25k200(yp)			
	Rajatila	Rak.malli 1 (pintak.)	Rak.malli 2 (tasa)	Rak.malli 3 (jäyk.korj.)	Rak.malli 3 (jäyk.korj., ei N)	Rak.malli 1 (pintak.)	Rak.malli 2 (tasa)	Rak.malli 3 (jäyk.korj.)	Rak.malli 3 (ei N)
M [kN/m] (vetoterästen momentti)	MRT	659	727	845	845	1041	1100	1011	1011
	KRT, omin.	618	673	785	785	951	1000	927	927
	KRT, tav.	511	556	649	649	784	825	764	764
	KRT, pitk.	399	432	506	506	609	641	594	594
N [kN] + vetoa - puristusta	MRT	397	-97	-99	0	-359	-97	-85	0
	KRT, omin.	427	-36	-34	0	-211	1	6	0
	KRT, tav.	358	-27	-26	0	-169	7	11	0
	KRT, pitk.	405	-14	-11	0	-110	23	26	0
			Ero	Ero	Ero		Ero	Ero	Ero
Teräsjännitys σ_s [MPa]	MRT	287	262 -10 %	306 6 %	316 9 %	285	329 13 %	302 6 %	310 8 %
	KRT, omin.	269	241 -12 %	282 5 %	285 6 %	264	299 12 %	278 5 %	278 5 %
	KRT, tav.	223	199 -12 %	233 5 %	236 6 %	218	248 12 %	230 5 %	229 5 %
	KRT, pitk.	191	161 -19 %	189 -1 %	190 -1 %	178	200 11 %	186 5 %	184 3 %
Betonijännitys σ_c [MPa]	MRT	-9,3	-10,6 12 %	-12,0 23 %	-11,9 22 %	-11,3	-11,6 3 %	-10,8 -4 %	-10,8 -5 %
	KRT, omin.	-12,2	-13,9 12 %	-16,2 25 %	-16,2 25 %	-14,8	-15,3 4 %	-14,2 -4 %	-14,2 -4 %
	KRT, tav.	-10,1	-11,5 12 %	-13,4 25 %	-13,4 25 %	-12,2	-12,7 4 %	-11,7 -4 %	-11,7 -4 %
	KRT, pitk.	-4,9	-5,9 17 %	-6,9 29 %	-6,9 29 %	-6,2	-6,4 3 %	-5,9 -5 %	-6,0 -4 %

Taulukko 17. Jännitysvertailua eri rakennemallien välillä. M_{yy}/N_{yy} alapinta.

		Myy/Nyy alapinta, piste 2, h=825mm, d=760mm, d _c =48mm, T16k150(ap) / T16k150(yp)				Myy/Nyy alapinta, piste 4, h=825mm, d=760mm, d _c =48mm, T16k150(ap) / T20k150(yp)			
	Rajatila	Rak.malli 1 (pintak.)	Rak.malli 2 (tasa)	Rak.malli 3 (jäyk.korj.)	Rak.malli 3 (jäyk.korj., ei N)	Rak.malli 1 (pintak.)	Rak.malli 2 (tasa)	Rak.malli 3 (jäyk.korj.)	Rak.malli 3 (ei N)
M [kN/m] (vetoterästen momentti)	MRT	174	158	159	159	163	171	157	157
	KRT, omin.	143	128	133	133	207	208	200	200
	KRT, tav.	105	92	96	96	153	155	146	146
	KRT, pitk.	63	52	56	56	115	117	109	109
N [kN] + vetoa - puristusta	MRT	46	-14	-14	0	-36	11	14	0
	KRT, omin.	46	-24	-25	0	92	136	143	0
	KRT, tav.	43	-20	-21	0	44	86	91	0
	KRT, pitk.	42	-21	-21	0	61	100	104	0
			Ero	Ero	Ero		Ero	Ero	Ero
Teräsjännitys σ_s [MPa]	MRT	189	152 -24 %	153 -23 %	158 -20 %	149	173 14 %	160 7 %	156 4 %
	KRT, omin.	157	117 -34 %	122 -29 %	130 -20 %	236	253 7 %	247 5 %	196 -20 %
	KRT, tav.	118	83 -42 %	87 -37 %	94 -26 %	166	183 9 %	176 6 %	143 -16 %
	KRT, pitk.	78	45 -73 %	48 -61 %	56 -39 %	136	152 10 %	145 6 %	109 -25 %
Betonijännitys σ_c [MPa]	MRT	-3,2	-3,0 -8 %	-3,0 -7 %	-3,0 -7 %	-3,0	-3,0 3 %	-2,8 -5 %	-2,8 -5 %
	KRT, omin.	-3,5	-3,2 -10 %	-3,3 -6 %	-3,3 -6 %	-5,0	-4,9 -1 %	-4,7 -6 %	-4,9 -1 %
	KRT, tav.	-2,6	-2,3 -11 %	-2,4 -7 %	-2,4 -7 %	-3,7	-3,7 0 %	-3,5 -7 %	-3,6 -3 %
	KRT, pitk.	-0,9	-0,8 -11 %	-0,9 -3 %	-0,9 -5 %	-1,6	-1,6 -3 %	-1,5 -12 %	-1,6 0 %

Taulukko 18. Jännitysvertailua eri rakennemallien välillä. M_{xx}/N_{xx} ja M_{yy}/N_{yy} yläpinta.

		Mxx/Nxx yläpinta, piste 3, h=750mm, d=670mm, dc=69mm, T25k200(ap) / T25k200+T32k200(yp)				Myy/Nyy yläpinta, piste 3, h=750mm, d=686mm, dc=53mm, T16k150(ap) / T20k150+T25k150(yp)			
	Rajatilat	Rak.malli 1 (pintak.)	Rak.malli 2 (tasa)	Rak.malli 3 (jäyk.korj.)	Rak.malli 3 (jäyk.korj., ei N)	Rak.malli 1 (pintak.)	Rak.malli 2 (tasa)	Rak.malli 3 (jäyk.korj.)	Rak.malli 3 (ei N)
M [kN/m] (vetoterästen momentti)	MRT	1401	1439	1463	1463	1137	1164	1174	1174
	KRT, omin.	1156	1176	1195	1195	904	929	936	936
	KRT, tav.	931	945	960	960	725	719	724	724
	KRT, pitk.	775	785	796	796	611	607	611	611
N [kN] + vetoa - puristusta	MRT	-41	-8	-7	0	-57	22	21	0
	KRT, omin.	33	38	41	0	-56	26	26	0
	KRT, tav.	33	36	38	0	-75	44	44	0
	KRT, pitk.	47	43	45	0	-53	50	50	0
			Ero	Ero	Ero		Ero	Ero	Ero
Teräsjännitys σ_s [MPa]	MRT	366	379 3 %	385 5 %	386 5 %	328	343 4 %	346 5 %	344 5 %
	KRT, omin.	297	302 2 %	307 3 %	304 2 %	252	266 5 %	268 6 %	265 5 %
	KRT, tav.	239	243 2 %	247 3 %	244 2 %	199	208 4 %	209 5 %	205 3 %
	KRT, pitk.	208	210 1 %	213 3 %	210 1 %	175	183 4 %	184 5 %	180 2 %
Betonijännitys σ_c [MPa]	MRT	-14,8	-15,1 2 %	-15,3 3 %	-15,3 3 %	-13,1	-13,3 1 %	-13,3 2 %	-13,4 2 %
	KRT, omin.	-18,7	-19,0 2 %	-19,3 3 %	-19,4 3 %	-15,1	-15,5 2 %	-15,6 3 %	-15,6 3 %
	KRT, tav.	-15,1	-15,3 1 %	-15,5 3 %	-15,6 3 %	-12,2	-11,9 -2 %	-12,0 -1 %	-12,1 -1 %
	KRT, pitk.	-8,3	-8,4 1 %	-8,6 3 %	-8,6 3 %	-7,0	-6,8 -2 %	-6,9 -2 %	-6,9 -1 %

6.7.3 Tulosten analysointi

Teräsbetonisen laattasillan kansirakenteen mitoittavana rajatilana on nykyään lähes aina käyttörajatila. Tämä takia poikkileikkauksen mitoituksessa on tärkeintä tarkistaa käyttörajatilan teräsjännitys. Tulosten analysoinnissa keskitytäänkin teräsjännitysten vertailuun, sillä teräsjännitys vaikuttaa suoraan halkeamaleveyteen ja tätä kautta vaadittuun teräsmäärään. Taulukossa on mukana myös eri rakennemallien betonijännitykset.

Taulukon 16 tuloksista nähdään, että eri rakennemallien välille syntyi yllättävän suuria eroja mitoitusmomentteihin, normaalivoimiin ja jännityksiin. Taulukosta nähdään, että tasomallin antamat teräsjännitykset ovat melko kaukana pintakeskeisen mallin tuloksista. Erityisesti vertailupisteen 1 teräsjännitykset jäävät tasomallilla jopa 19 % pienemmiksi kuin pintakeskeisen mallin vastaavat jännitykset. Tämä oli odotettavaa, sillä tasomallista puuttui ylös nousevan reuna-alueen aiheuttama lisäjäykkyys ja näin ollen reuna-alue jää alimitoitetuksi pintakeskeisen mallin verrattuna. Jäykkyyskorjattu-malli parantaa tilannetta siten, että jäykkyyskorjatulla mallilla reuna-alueen teräsiin syntyy lähes sama vetojännitys kuin pintakeskeisessä mallissa. Jäykkyyskorjattu malli toimii siis tältä osin juuri halutulla tavalla. On mielenkiintoista huomata, että vaikka jäykkyyskorjauksella saadaan teräsjännitykset lähes samoiksi kuin pintakeskeisellä mallilla, niin betonin puristusjännitys jää jäykkyyskorjatussa mallissa noin 25 % suuremmaksi kuin pintakeskeisessä mallissa. Tämä johtuu siitä, että jäykkyyskorjatussa mallissa teräsjännityksen aiheuttaa pelkästään poikkileikkauksessa vaikuttava taivutusmomentti. Sama taivutusmomentti aiheuttaa puhtaasti betonin puristusjännityksen eli mitä suurempi taivutusmomentti, sitä suurempi jännitys teräksissä ja betonissa. Pintakeskeisessä mallissa samassa poikkileikkauksessa vaikuttaa paljon pienempi taivutusmomentti, mutta vastaavasti suurempi vetovoima. Tämä vetovoima aiheuttaa suuren teräsjännityksen, mutta myös pienentää betonin puristusjännitystä sillä teräsbetoni ottaa puristusjännityksen vastaan betonilla ja vetojännityksen teräksillä.

Taulukon 16 pisteen 2 tuloksista nähdään, että tasomalli on antanut yli 10 % suuremmat teräsjännitykset kuin pintakeskeinen malli. Tämä johtuu siitä, että pintakeskeisessä mallissa kannen keskelle muodostuu hieman tasomallia pienempi momentti ja poikkileikkauksessa vallitsee kohtuullinen puristusjännitys, joka pienentää osaltaan teräsjännitystä. Jäykkyyskorjattuun malliin muodostuu tasomallia pienempi kannen keskipisteen momentti ja tämä tasoittaa teräsjännityseron enää noin 5 % suuruiseksi.

Suurin prosentuaalinen ero rakennemallin jännityksissä muodostuu taulukon 17 mittapisteen 2 y-suuntaisiin jännityksiin. Tasomallin poikittaissuunnaisissa teräksissä vallitsee jopa 73 % pienempi teräsjännitys kuin pintakeskeisen mallin teräksissä. Tämä eroavaisuus johtuu siitä, että pintakeskeisen mallissa vaikuttaa noin 10 % suurempi taivutusmomentti kuin tasomallissa. Pintakeskeiseen malliin muodostuu lisäksi vetovoima kannen poikittaissuunnassa toisin kuin tasomalliin, jossa muodostuu puristusta. Vaikka vetovoima on melko pieni niin se aiheuttaa kohtuullisen suuren teräsjännityksen, sillä kannen poikittaisterästyksenä toimii käytännössä minimiterästys. Mitä pienempi teräspinta-ala poikkileikkauksessa on, sitä suuremman jännityksen vetovoima siihen aiheuttaa. Vaikka teräsjännityksillä onkin näin suuri ero, niin tämä tuskin vaikuttaisi rakenteen teräsmäärään millään tavalla, sillä poikittaissuunnan minimiteräspinta-ala on paljon suurempi kuin mitä poikkileikkaus oikeasti vaatisi. Jäykkyyskorjatussa mallissa jännitys pienenee hiukan lähemmäs pintakeskeisen mallin lukemia.

Vertailupisteen 4 jännitykset ovat sekä tasomallilla, että jäykkyyskorjatulla mallilla 5-14 % pintakeskeistä mallia suuremmat. Ero johtuu hieman eri suurista taivutusmomenteista ja normaalivoimista.

Pilareiden kohdalla vaikuttava momentti on sekä tasomallissa, että jäykkyyskorjatussa mallissa hyvin lähelle sama kuin pintakeskeisessä mallissa. Suurin eroavaisuus on 6 % luokkaa eli eri rakennemallivaihtoehdot käyttäytyvät hyvin samalla lailla tukialueella.

6.7.4 Yhteenveto mallien käytettävyydestä

Tasomallin tulokset eroavat pintakeskeisen mallin tuloksista kohtuullisen paljon. Jäykkyyskorjattu malli parantaa tilannetta ja rakenne käyttäytyy tällä mallilla enemmän pintakeskeisen mallin tavoin. Näyttää siltä, että jäykkyyskorjattu malli antaa lähes jokaisessa pisteessä suuremmat teräsjännitykset kuin pintakeskeinen malli. Tulokset ovat siis yleensä varmalla puolella. Pintakeskeisellä mallilla päädytäänkin todennäköisesti pienempään yhteisteräsmäärään.

Pintakeskeisen mallin hyödyntäminen mitoituksessa on paljon haasteellisempaa syntyvien normaalivoimien takia. Kuormitusyhdistelmät tulee muodostaa siten, että jokaista momenttia kohti haetaan vastaavat rakenteessa vaikuttavat normaalivoimat. Tämä on kohtuullisen työlästä ohjelmoida Excel kaavioihin, ellei analyysiohjelmassa ole tätä ominaisuutta valmiiksi. Jos kuormitusyhdistelmien teko onnistuu hyvin ja käytössä on poikkileikkauksenmitoitusohjelma, joka osaa ratkaista myös normaalivoimaa sisältävän poikkileikkauksen, niin pintakeskeisen mallin käyttäminen käytännön mitoituksessa on tietokoneohjelmien käytön hallitsevalle suunnittelijalle vain hiukan työläämpää kuin perinteisen yhteen tasoon mallinnetun rakennemallin.

Jos pintakeskeisen mallin hyödyntäminen tuntuu liian työläältä, niin jäykkyyskorjattu tasomalli on seuraavaksi paras vaihtoehto. Jäykkyyskorjauksen jälkeen tasomalli antoi hyvin samankaltaisia teräsjännityksiä kuin pintakeskeinen malli. Jäykkyyskorjatun mallin normaalivoimilla ei useimmissa tapauksissa ollut suurta merkitystä teräsjännityksiin. Ainoastaan pisteen 4 y-suunnaisissa jännityksissä normaalivoimalla oli

merkitystä. Tässäkin kohtaa jännityksen suuren vaihteluun vaikutti poikkileikkauksen pieni teräsmäärä eli kovinkaan suurta käytännön merkitystä tällä erolla ei ole.

Yleinen tapa käyttää laattasiltojen mitoitukseen tasomallia on mielestäni hyvä ja perusteltu mallintamistapa. Normaalivoimia ei useimmissa tapauksissa ole tarpeellista huomioida itse kansilaatan mitoituksessa. Jos suunnittelija kuitenkin haluaa analysoida rakenteen tarkasti ja optimoida käytetyn teräsmäärän, niin rakennemalli kannattaa muodostaa poikkileikkauksen pintakeskiön mukaisesti, vaikka tämä aiheuttaakin hieman lisätyötä.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kohdesillan tietomallin luominen onnistui suunnitellusti ja tehdyn tutkimuksen perusteella Revit Structure -ohjelma soveltuu hyvin betonisiltojen yleissuunnitelmatasoiseen tietomallintamiseen ja erilaisten havainnekuvien sekä animaatioiden tekemiseen. Revit Structure -ohjelman avulla sillan geometrian luominen, maasto- ja tiemallin hyödyntäminen sillansuunnittelussa sekä rakenteen mittojen parametrisointi onnistuvat hyvin. Siltapaikan kaivuiden ja täyttöjen mallintaminen helpottaa yleispiirustuksen luomista ja määrälaskentaa. Tietomalliin voidaan sisällyttää tietoa muun muassa rakennusosan materiaalista, pintakäsittelystä ja sallituista mittapoikkeamista. Tietomallin avulla saatiin muodostettua sillan kansirakenteen mitta- ja raudoituspiirustukset sekä sillan esimerkkiyleispiirustus. Myös raudoitus- ja määräluettelot voidaan tuottaa suoraan tietomallista.

Ohjelman käytön suurimmat ongelmat liittyvät sillan raudoituksen mallintamiseen ja raudoituspiirustusten muodostamiseen. Ohjelma on tehokas, kun mallinnetaan yksinkertaisten siltarakenteiden raudoitusta. Sillan kaarevuus ja viisteelliset osat aiheuttavat erilaisia ongelmia raudoituksessa. Luseeraavien ja kaarevien terästen muodostaminen on tällä hetkellä liian vaikeaa ja hidasta. Ohjelma tarvitsee vielä paljon kehitystyötä ennen kuin raudoituksen mallintaminen ja raudoituspiirustusten tuottaminen onnistuu niin hyvin, että ohjelmalla saadaan raudoitettua haastavimmatkin sillat. Ohjelman kehittämisessä tulisikin panostaa erityisesti raudoitustyökaluihin, sillä tämä on selkeästi ohjelman suurin puute, kun tutkitaan ohjelman soveltuvuutta rakennussuunnitelmatasoiseen tietomallintamiseen. Myös raudoituksen havainnollistamista erilaisilla väreillä ja ohjelman suorituskkyä raudoituksen näyttämisessä tulisi parantaa.

Ohjelman soveltuvuutta Suomessa tyypillisten siltojen suunnitteluun voidaan tehostaa tekemällä ohjelmaan valmiiksi erilaisia Suomen siltoihin liittyviä komponentteja. Tulevissa Liikenneviraston ohjaamissa komponenttien laatimisprojekteissa tulisikin huomioida myös Revit Structure -ohjelmisto.

Sillan mitoitus eurokoodeilla onnistui hyvin. Mitoituksen päätarkoituksena oli selvittää tarvittavat teräsmäärät ja rakennepaksuudet tietomallin muodostamista varten. Sillan rakennepaksuudet säilyivät samoina kuin vuonna 2003 Suomen rakentamismääräyskoelman määräysten mukaisesti tehdyssä suunnitelmassa. Myös mitoitettu teräsmäärä säilyi hyvin samankaltaisena verrattuna aikaisempaan suunnitelmaan. Eroavaisuuksia terästyksessä aiheutti lähinnä muuttunut betonin suojapeitteen paksuus ja minimiteräsmäärän kasvu.

Kuormitusyhdistelmien muodostaminen oli suhteellisen työlästä. Tämä johtui Robot Structural Analysis -ohjelman huonosta soveltuvuudesta siltojen eurokoodien mukaisten kuormitusyhdistelmien tekemiseen. Kuormitusyhdistelmien suuri määrä hidastaa ohjelman käyttöä liiaksi. Ohjelmaan täytyisi kehittää verhopintoihin perustuva kuormitusyhdistelmien muodostamistapa, jolloin se soveltuisi paremmin siltojen analysointiin.

Mitoituksen ohjeistus oli pääasiassa hyvää. Ainoa epäselväksi jäänyt asia oli laattasiltojen tukimomentin levitys. Liikenneviraston Betonisillat -sovellusohjeessa tulisi antaa ohjeita siihen, miten paljon tukimomenttia saa levittää voiman poikkisuunnassa vai täytyykö teräkset mitoittaa suoraan pyöristetylle momentille. Tämä asia ei vaikuta merkittävästi sillan kokonaisteräsmäärään, mutta suunnittelijat kaipaavat siihen kuitenkin yhtenäistä ohjeistusta. Yhtenäisten pelisääntöjen tarve korostuu tulevaisuu-

nessa, sillä Liikennevirasto on luopumassa siltojen suunnitelmien tarkastamisesta ja konsultit alkavat pian tarkastamaan toistensa suunnitelmia.

Sillan kansirakenteen taivutusterästen mitoituksessa määräävänä tekijänä oli kaikissa tarkastelupisteissä käyttörajatilan pitkäaikainen yhdistelmä. Työssä tehtyjen havaintojen ja vertailujen perusteella käyttörajatilan pitkäaikaisen yhdistelmän liikennekuorman LM1 osavarmuuskertoimia tulisi muokata, jotta pitkäaikainen yhdistelmä ei olisi liian määräävä verrattuna tavalliseen yhdistelmään. Tällä hetkellä LM1 teli-/pintakuorman kertoimet ovat 0,3/0,3. Jos kertoimia alennetaan arvoihin 0,2/0,2, niin käyttörajatilan yhdistelmät ovat vaikutuksiltaan samansuuruiset.

Työssä käytetty rakennemallin muodostamistapa aiheuttaa suunnittelijalle ylimääräistä työtä syntyvien normaalivoimien takia. Kuormitusyhdistelmien muodostaminen monimutkaistuu, sillä yhdistelmistä täytyy hakea mitoitusmomenttia vastaavat normaalivoimat. Rakennemallivertailujen perusteella yleisesti käytetty tapa mallintaa sillan kansilaatta yhdessä tasossa näyttää antava hieman varmallalla puolella olevia tuloksia. Tämä mallintamistapa on erittäin käytännönläheinen ja sillä saadaan riittävän luotettavia ja helposti hyödynnettäviä tuloksia, joiden perustella rakenteen teräsmäärät voidaan mitoittaa.

Diplomityön teon jälkeen tulleet oleelliset muutokset sovellusohjeisiin

Tämän diplomityön lukijan tulee huomioda, että työssä esitetyt asiat eivät välttämättä ole enää ajan tasalla sillä diplomityön mitoitusosion lähdemateriaalina (lähteet 23 ja 26) käytetyt Liikenneviraston sovellusohjeet päivittyivät juuri ennen kuin diplomityö valmistui.

Päivitetystä Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 -sovellusohjeessa on muutettu käyttörajatilan kuormitusyhdistelmäkertoimia siten, että käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmässä ei enää ole mukana liikennekuorman LM1 telikuormaa. Myös käyttörajatilan tavallisen kuormitusyhdistelmän niistä yhdistelmistä poistettiin LM1 telikuorma, missä LM1 ei ole määräävää muuttuva kuorma. Tämä muutos vaikuttaa oleellisesti työssä esitettyihin käyttörajatilan pitkäaikaisen yhdistelmän voimasuureisiin.

Myös Betonisillat -sovellusohje on päivittynyt. Ohjeen uusi nimi on Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. Sovellusohjeeseen on tullut tässäkin työssä kaivattu ohjeistus laattasiltojen tukimomenttien levitykselle. Laattasiltojen tukialueilla laatan pituussuunnan mitoitusmomenttina voidaan käyttää leveydelle b tasan jakautunutta taivutusmomenttia. Tasan jakautuneen momentin resultantin on oltava vastaava kuin rakennemallin kimmoteoreettisen momentin resultantti leveydellä b . Leveydelle b on annettu laskentakaava ohjeessa. Ohjeeseen on tullut myös kielto, että tukimomenttia ei saa pyöristää jos pilari on kiinnitetty monoliittisesti kanteen. Tukimomentin pyöristystä ei saa käyttää yhdessä momentin levityksen kanssa.

LÄHDELUETTELO

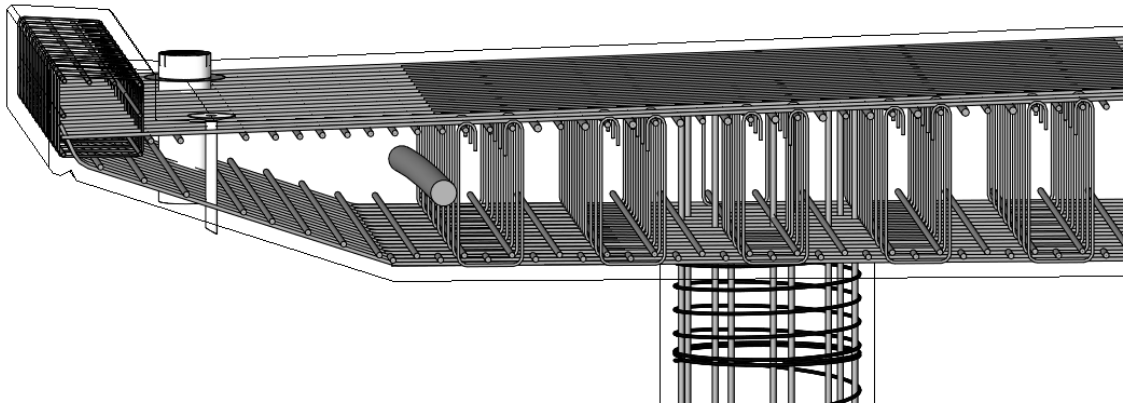
1. RIL tietomallitoimikunta. Tietomallinnus. Verkkodokumentti. Viitattu 25.5.2010. Saatavissa: <http://www.ril.fi/web/index.php?id=935>.
2. Finnmap Consulting Oy. Tietomallintaminen. Verkkodokumentti. Viitattu 25.5.2010. Saatavissa: <http://www.fmcgroup.fi/index.php?2758>.
3. BIM Wiki. Benefits at Design. Verkkodokumentti. Viitattu 17.8.2010. Saatavissa: http://bimwiki.com/About_BIM/Benefits_of_BIM#Benefits_at_Design.
4. Valjus J. et al. Tuotemallintaminen rakennesuunnittelussa: Perusteet ja ohjeita I. Verkkodokumentti. Julkaistu 29.09.2004. Viitattu 25.5.2010. Saatavissa PDF-tiedostona: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/proit/julkiset_tulokset/proit_rakennesuunnitteluohje_syyskuu2004.pdf.
5. Estonian Road Administrator, Ramboll. Rõmeda-Haljala road section project. Verkkodokumentti. Viitattu 23.9.2010. Saatavissa: <http://romeda-haljala.ramboll.ee/>.
6. Autodesk Revit Structure kotisivut. Verkkodokumentti. Viitattu 21.8.2010. Saatavissa: <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?siteID=123112&id=8447065>.
7. Tekla Structures kotisivut. Verkkodokumentti. Viitattu 17.8.2010. Saatavissa: <http://www.tekla.com/fi/products/tekla-structures/full/Pages/Default.aspx>.
8. Autodesk Investors sivusto. Verkkodokumentti. Viitattu 21.8.2010. Saatavissa: <http://www.autodesk.com/investors>.
9. The History of Revit – The Future of Design. Verkkodokumentti. Viitattu 21.8.2010. Saatavissa: http://bimboom.blogspot.com/2007/02/revit-history_11.html.
10. Tekla Oyj Faktasivu. Verkkodokumentti. Viitattu 21.8.2010. Saatavissa: <http://tools.euroland.com/factsheet/sf-tla/factsheethtml.asp?lang=finnish>.
11. Nemetschek Allplan GmbH. Allplan 2009. Verkkodokumentti. Viitattu 21.8.2010. Saatavilla: <http://www.allplan.com>.
12. Bentley Ssystems kotisivut. Verkkodokumentti. Viitattu 21.8.2010. Saatavilla: <http://www.bentley.com/fi-FI/Corporate/>.
13. Liikennevirasto. Siltojen tietomalliohjeet. Julkaisematon lausuntoversio 04.06.2010. Helsinki, Liikennevirasto, 2010. 22 s
14. Heikkilä R. Siltojen tuotemallintamisen ja rakentamisautomaation kehittäminen (5D-SILTA). Tiehallinnon selvityksiä 22/2008. Verkkodokumentti. Helsinki, Tiehallinto, 2008. 47 s. ISSN 1459-1553. ISBN 978-952-221-049-4. TIEH 3201101-v. Viitattu 20.9.2010. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://oci oulu.fi/5D/Julkaisut/5DSilta-loppuraportti-05112008.pdf>
15. Heikkilä R. et al. Siltojen 3D-suunnittelu ja -mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönotto (Älykäs silta). Tiehallinnon selvityksiä 12/2005. Verkkodokumentti. Helsinki, Tiehallinto, 2005. 62 s. ISSN 1457-9871. ISBN 951-803-459-1. TIEH 3200924. Viitattu 20.9.2010. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://oci oulu.fi/ouluconstructioninnovations/Tiedostot/Alykassilta.pdf>.
16. Heikkilä R. et al. Siltojen 3D-suunnittelu ja -mittausjärjestelmän kehittäminen (Älykäs silta) väliraportti. Tiehallinnon selvityksiä 26/2004. Verkkodokumentti.

- Helsinki, Tiehallinto, 2004. 61 s. ISSN 1457-9871. ISBN 951-803-303-x. TIEH 3200886. Viitattu 19.9.2010. Saatavissa PDF-tiedostona: http://oci.oulu.fi/5D/Julkaisut/%C3%84S_v%C3%A4liraportti.pdf.
17. Tielaitos. Siltojen suunnitelmat. Verkkojulkaisu. Helsinki, Tielaitos, 2000. 30 s. ISBN 2172067-2000. TIEL 2172067-2000. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/silsuu00.pdf>.
 18. Kouvalainen, A. 3D-tuotemallin vaikutus betonisillan suunnitteluun. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, 2008. 54 s.
 19. Tiehallinto. Tiehallinnon siltojen rakenne, palvelutaso ja kunto. Tiehallinnon sisäisiä selvityksiä 38/2009. Verkkodokumentti. Helsinki, Tiehallinto, 2009. ISSN 1459-1561. TIEH 4000713-v. Viitattu 10.9.2010. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/sillat090101.pdf>.
 20. Autodesk. Revit Extensions for Autodesk Revit Structure 2010. Verkkodokumentti. Viitattu 22.9.2010. Saatavissa: <http://www.extensions4revit.com/>.
 21. Hellowell, P. Bridge Modeling Approach and Methodology using Revit Structure. Autodesk University verkkoluento. Verkkodokumentti. Viitattu 23.9.2010. Saatavilla: http://au.autodesk.com/?nd=class&session_id=3788.
 22. Autodesk. Bridge toolkit for Autodesk Revit Structure 2010. Verkkodokumentti. Julkaistu 16.4.2009. Saatavissa Autodesk Subscription tunnuksilla: <http://subscription.autodesk.com/sp/servlet/download/item?siteID=11564774&id=13124629>.
 23. Liikennevirasto. Liikenneviraston eurokoodien sovellusohje: Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet. Julkaisematon lausuntoversio 1.7.2010. Helsinki, Liikennevirasto, 2010. 59 s.
 24. SFS-EN 1991-2. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 2: siltojen liikennekuormat. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2004. 143 s.
 25. Saarivirta, K. Siltojen pystysuorien liikennekuormien kansalliset valinnat Eurocodeen. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2006. 64 s.
 26. Liikennevirasto. Liikenneviraston eurokoodien sovellusohje: Betonisillat. Julkaisematon lausuntoversio 5.7.2010. Helsinki, Liikennevirasto, 2010. 74 s.
 27. Tiehallinto. Sillan geotekniset suunnitteluperusteet. Verkkojulkaisu. Helsinki, Tiehallinto, 2008. 84 s. ISBN 978-951-803-896-5. TIEH 2100053-07. Saatavissa PDF-tiedostona: http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/sillan_geosuunn.pdf.
 28. SFS-EN 1997-1. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2005. 147 s.
 29. SFS-EN 1991-1-5. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Lämpötilakuormat. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2004. 68 s.
 30. SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2005. 221 s.
 31. O'Brien E.J., Keogh, D.L. Upstand finite element analysis of slab bridges. Computers and Structures 69, 1998. s. 671-683. ISSN 0045-7949. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00457949>.
 32. Lilja, H. Sähköpostikysely. Sähköposti heikki.lilja@liikennevirasto.fi. 26.8.2010.

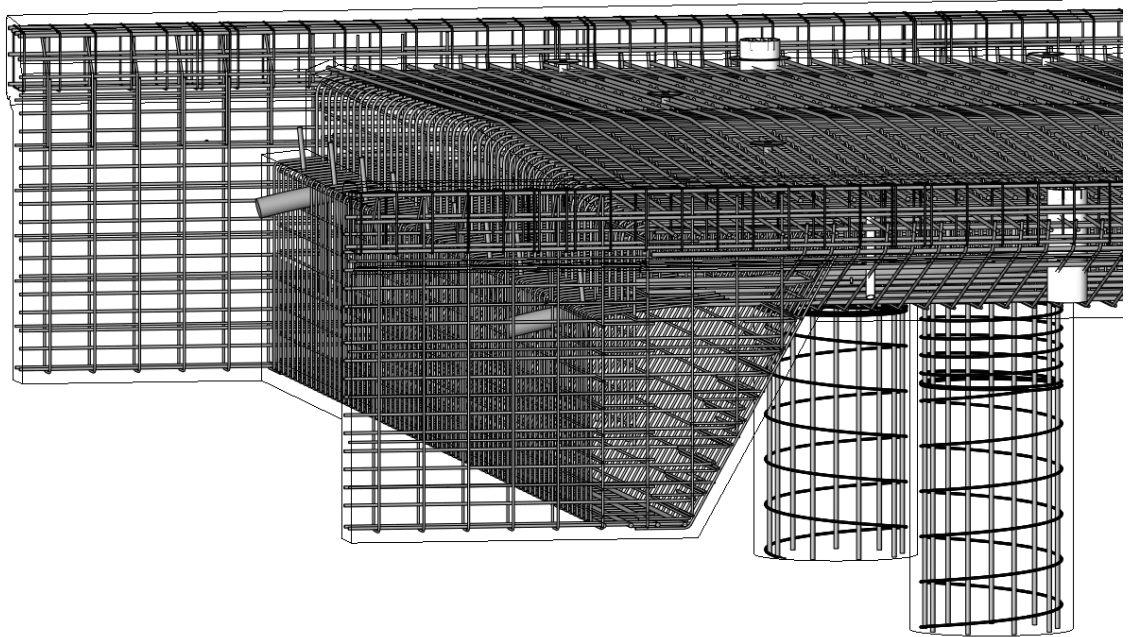
33. Tiehallinto. Sillansuunnittelun täydentävät ohjeet. Verkkojulkaisu. Helsinki, Tiehallinto, 2008. ISBN 978-952-221-035-7. TIEH 2100003-v-08. Saatavissa PDF-tiedostona: http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/ssto_2008.pdf.
34. Tiehallinto. Teräksinen sillankaide H2 tyyppipiirustussarja. Verkkojulkaisu. Tiehallinto, 2006. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://alk.tiehallinto.fi/sillat/tyyppipiirustukset/sillanosat/dk-h2\(2006\)kuvat_\(31.12.2009\).pdf](http://alk.tiehallinto.fi/sillat/tyyppipiirustukset/sillanosat/dk-h2(2006)kuvat_(31.12.2009).pdf).
35. Ympäristöministeriö. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990 Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Muutos A1. Liite A2: Soveltaminen siltoihin. Helsinki, 2009. 12 s.
36. John Li. Reinforced Plate Design. Design for Mxy Twisting moment. Verkkojulkaisu. Hong Kong, Solution Research Center, 2002. Viitattu 7.9.2010. Saatavissa: <http://www.src-asia.com/Technical%20Notes/SAFE%20TN%20-%20Twisting.pdf>.

LIITTEET

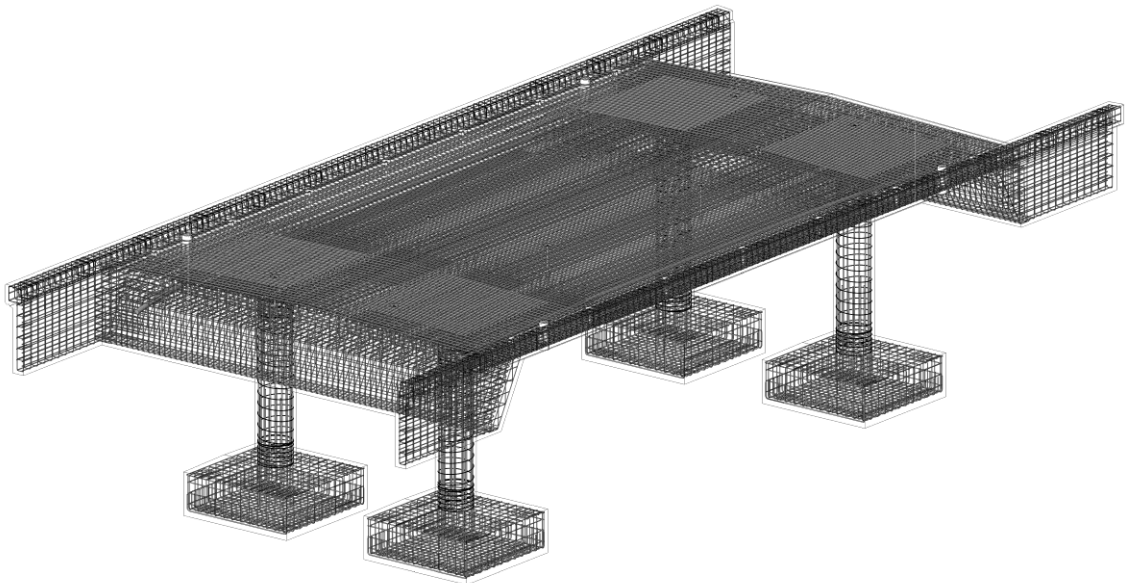
Liite 1	Sillan raudoituskuvia
Liite 2	Piirustukset
Liite 3	Betoniteräsluettelo
Liite 4	Viruman ja kutistuman laskenta
Liite 5	Maanpaineen laskenta
Liite 6	Kuormitusyhdistelmät murto- ja käyttörajatilassa
Liite 7	Leikkausmitoitus
Liite 8	Lävistysmitoitus
Liite 9	Rakennemallien voimasuurevertailua



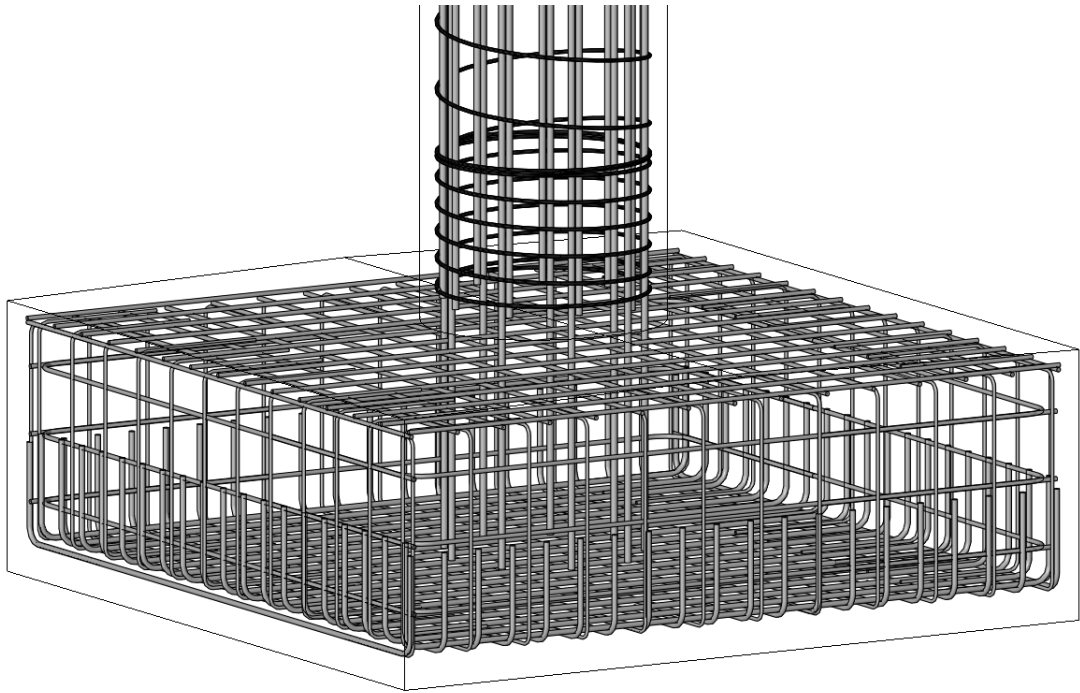
Kuva 1. Kannen poikkileikkauksen raudoitusta.



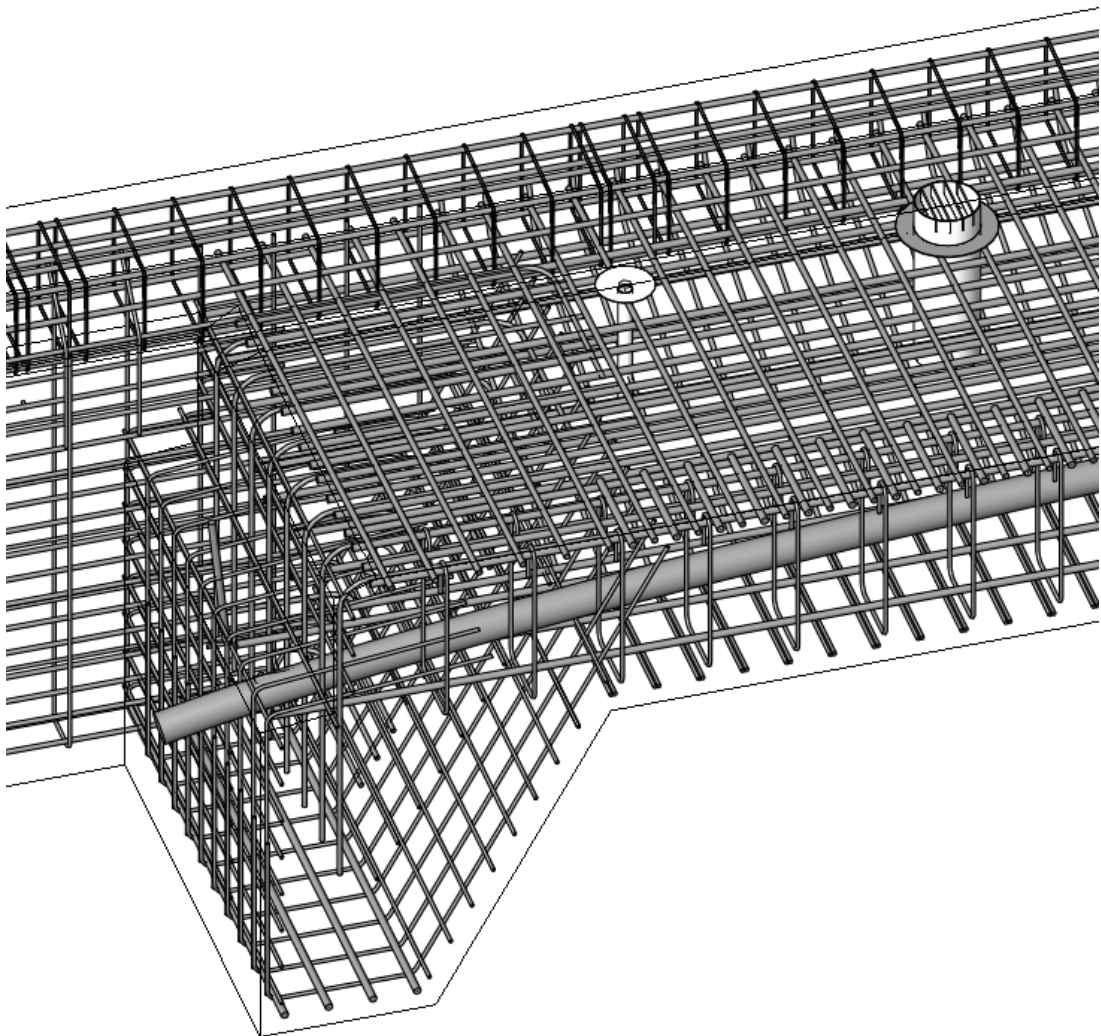
Kuva 2. Siipimuurin ja kannen päädy raudoitusta.



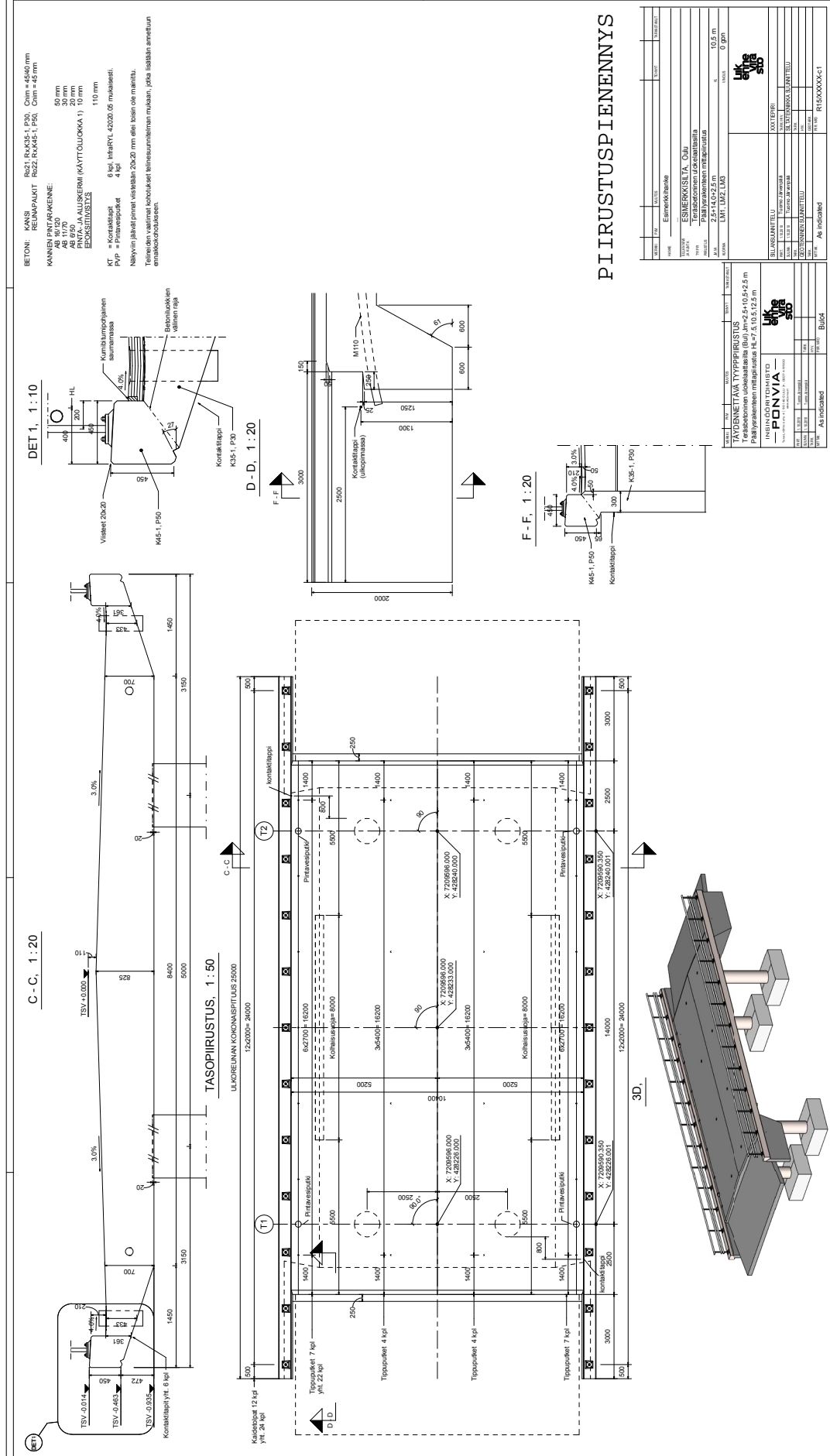
Kuva 3. Koko kannen raudoitus.

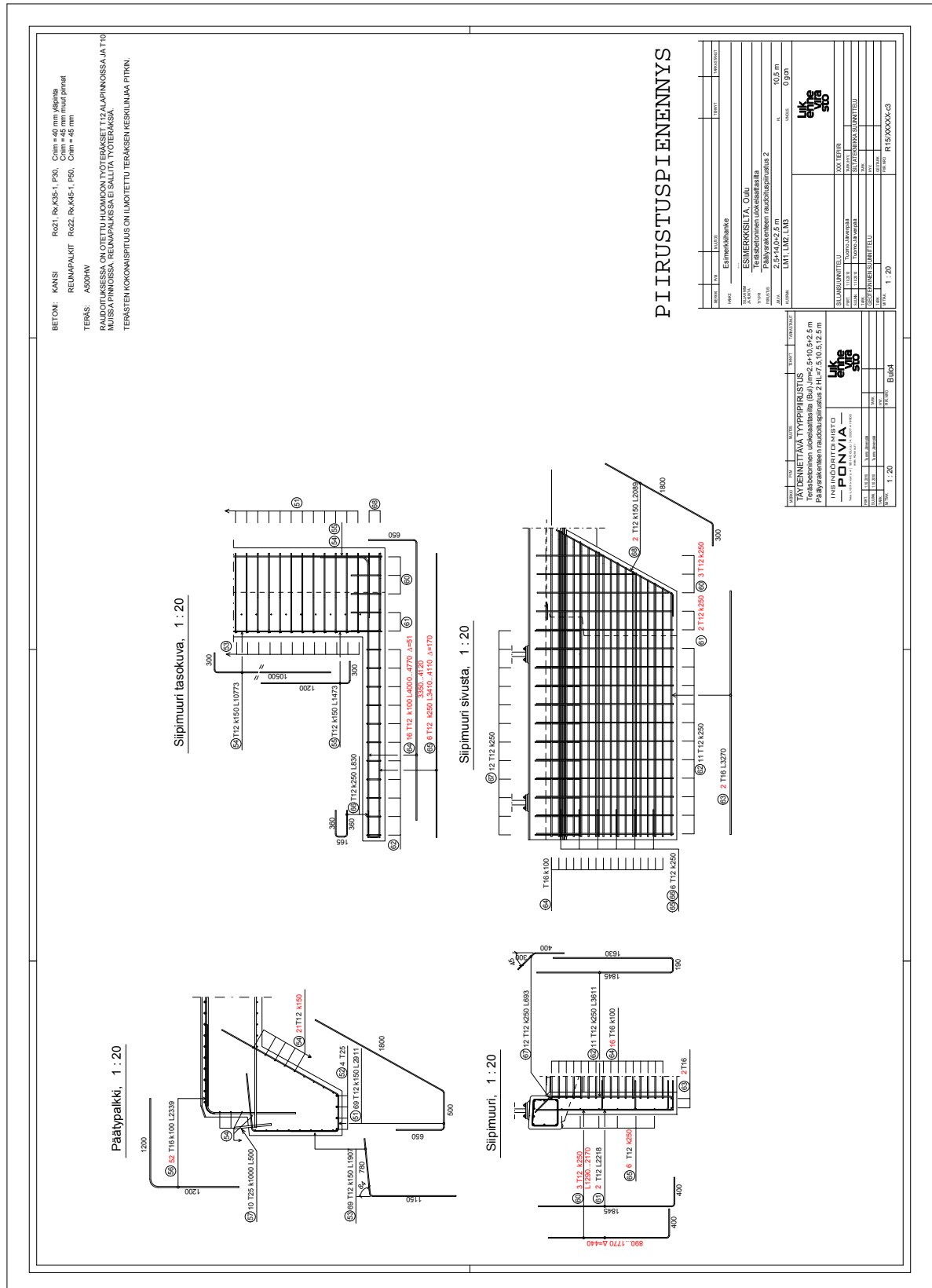


Kuva 4. Peruslaatan raudoitus.



Kuva 5. Kannen päädyn raudoitusta.





Raudoitusluettelo																
Taivutus- tyyppi	Nro	D [mm]	Kpl	L [mm]	Paino yhteensä [kg]	a	b	c	d	e	u	v	x	y	r	
A	1	16	115	8390	1523	8390	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
E	2	16	230	2572	934	187	1400	1000	128		0.00°	0.00°	136		192	
W	3	12	72	1784	116	180	618	281	610	150	0.00°	0.00°	0	0	60	
W	4	12	96	1817	152	150	628	280	634	180	0.00°	0.00°	0	0	60	
W	5	12	68	1855	116	150	646	280	654	180	0.00°	0.00°	0	0	60	
W	6	12	96	1891	164	150	664	280	672	180	0.00°	0.00°	0	0	60	
W	7	12	72	1925	124	150	680	280	690	180	0.00°	0.00°	0	0	60	
W	8	12	72	1963	124	150	700	280	708	180	0.00°	0.00°	0	0	60	
A	9	25	85	15000	4913	15000	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
A	10	25	16	6200	384	6200	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
A	11	25	16	14000	864	14000	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
A	12	25	54	6000	1248	6000	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
A	13	25	50	4500	868	4500	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
A	14	32	44	4500	1252	4500	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	224	
A	15	25	54	14200	2954	14200	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
C	16	20	52	11189	1434	5595	5595	5585	0	0	0.00°	0.00°	335	0	100	
C	17	16	73	11190	1289	5595	5595	5585	0	0	0.00°	0.00°	335	0	192	
A	18	25	80	3000	924	3000	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
A	19	16	16	12000	304	12000	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
A	20	20	32	7300	576	7300	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	100	
Rebar Shape 1	21	8	304	1526	184	359	350	360	331						32	
Rebar Shape 3	51	12	138	2911	356	650	500	1800							60	
A	52	25	8	10770	332	10770	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
C	53	12	138	1907	234	780	1150	114	0	0	0.00°	0.00°	1145	0	60	
B	54	12	42	10773	412	10500	300	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
B	55	12	42	1473	48	1200	300	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
B	56	16	104	2339	416	1200	1200	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
A	57	25	20	500	38	500	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	175	
B	60	12	4	1263	4	891	400	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
B	60	12	4	1702	8	1330	400	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
B	60	12	4	2143	8	1770	400	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
B	61	12	8	2218	16	1845	400	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
D	62	12	44	3611	140	1845	190	1630	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
A	63	16	8	3270	40	3270	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	3939	24	3350	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	3994	24	3405	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4049	24	3460	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4104	24	3515	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4159	28	3570	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4214	28	3625	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4269	28	3680	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4324	28	3735	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4379	28	3790	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4434	28	3845	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4489	28	3900	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4544	28	3955	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4511	28	4010	561	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4654	28	4065	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4709	28	4120	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
B	64	16	4	4764	32	4175	650	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	192	
A	65	12	4	3410	12	3410	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
A	65	12	4	3550	12	3550	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
A	65	12	4	3690	12	3690	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
A	65	12	4	3830	12	3830	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
A	65	12	4	3970	16	3970	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
A	65	12	4	4110	16	4110	0	0	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
D	66	12	24	830	16	360	165	360	0	0	0.00°	0.00°	0	0	60	
C	67	12	48	693	28	400	300	212	0	0	0.00°	0.00°	212	0	60	
C	68	12	8	2089	16	300	1800	870	0	0	0.00°	0.00°	1576	0	60	
Grand total			2429		23075											

Materiaalitiedot ja osavarmuusluvut

Apumerkinnot:

$$f_{ck} := 30 \text{ MPa}$$

Kannen betoniluokka

$$\text{‰} := 10^{-3} \text{ promille}$$

$$\text{kNm} := \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 38 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0.3} \cdot \text{GPa}$$

Betonin kimmokerroin

Kutistuman laskenta

Kutistuman laskennassa on sementtityyppinä N (Lujuusluokat CEM 32,5 R, CEM 42,5 N).
/SFS-EN 1992-1-1 Liite B/

$$t := \frac{70 \text{ yr}}{\text{day}} = 25567$$

Betonin ikä vuorokausina tarkasteluajankohtana

$$t_s := \frac{7 \text{ day}}{\text{day}} = 7$$

Betonin ikä vuorokausina kuivumiskutistumisen alkaessa
(jälkihoitoaika)

Sisäinen kutistuma:

$$\beta_{as}(t) := 1 - e^{-0.2 \cdot \sqrt{t}}$$

$$\beta_{as}(t) = 1000 \cdot \text{‰}$$

$$\epsilon_{ca}(t) := \beta_{as}(t) \cdot 2.5 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6}$$

$$\epsilon_{ca}(t) = 0.050 \cdot \text{‰}$$

Kuivumiskutistuma:

$$\alpha_{ds1} := 4$$

N-tyypin sementti

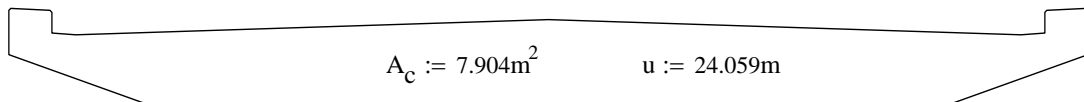
$$\alpha_{ds2} := 0.12$$

N-tyypin sementti

$$\text{RH} := 80$$

Ulkoilman suhteellinen kosteus [%]

$$\epsilon_{cd,0} := 0.85 \cdot \left[\left(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1} \right) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}}} \right] \cdot 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{\text{RH}}{100} \right)^3 \right] \cdot 10^{-6} \quad \epsilon_{cd,0} = 0.269 \cdot \text{‰}$$



$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 657 \cdot \text{mm}$$

$$h_0 = 657 \cdot \text{mm}$$

$$k_h := \begin{cases} \text{interp} \left[\begin{pmatrix} 100 \text{ mm} \\ 200 \text{ mm} \\ 300 \text{ mm} \\ 500 \text{ mm} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0.85 \\ 0.75 \\ 0.70 \end{pmatrix}, h_0 \right] & \text{if } 100 \text{ mm} \leq h_0 < 500 \text{ mm} \\ 0.70 & \text{if } h_0 > 500 \text{ mm} \\ 1.0 & \text{if } h_0 < 100 \text{ mm} \end{cases}$$

$$k_h = 0.7$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) := \frac{t - t_s}{(t - t_s) + 0.04 \cdot \sqrt{\left(\frac{h_0}{\text{mm}} \right)^3}}$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = 0.97$$

$$\epsilon_{cd}(t, t_s) := \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0}$$

$$\epsilon_{cd}(t, t_s) = 0.183 \cdot \text{‰}$$

Kokonaiskutistuma:

$$\varepsilon_{cs} := \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t)$$

$$\varepsilon_{cs} = 0.233 \cdot \text{‰}$$

Kokonaiskutistumista vastaava lämpötilanlasku rakenteessa:

$$\alpha_c := 10 \cdot 10^{-6}$$

Betonin pituuden lämpötilakerroin

$$T_\varepsilon := -\left(\frac{\varepsilon_{cs}}{\alpha_c}\right)$$

$$T_\varepsilon = -23.3$$

Viruminen

Viruman arvo määritetään virumaluvun avulla seuraavasti, kun betonin puristusjännitys on pitkäaikaikuormien vaikuttaessa alle $0,45 \cdot f_{ck}$.

$$t_0 := 28 \text{ day}$$

Betonin ikä vuorokausissa kuormittumisen alkaessa

$$t := 70 \text{ yr}$$

Betonin ikä vuorokausissa tarkasteluajakohtana

Suhteellisen kosteuden vaikutus virumalukuun

$$\varphi_{RH} := \begin{cases} \left(1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{\frac{h_0}{\text{mm}}}} \right) & \text{if } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \\ \left[\left(1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{\frac{h_0}{\text{mm}}}} \cdot \left(\frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.7} \right) \cdot \left(\frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.2} \right] & \text{if } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\varphi_{RH} = 1.197$$

Betonin lujuuden vaikutus virumalukuun

$$\beta_{fcm} := \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}}}$$

$$\beta_{fcm} = 2.725$$

Betonin kuormittumisen alkamiskohdan vaikutus nimelliseen virumalukuun

$$\beta_{t0} := \frac{1}{0.1 + \left(\frac{t_0}{\text{day}} \right)^{0.20}}$$

$$\beta_{t0} = 0.488$$

Suhteellisen kosteuden ja muunnetun paksuuden yhteisvaikutus

$$\beta_H := \begin{cases} \min \left[\left[1.5 \cdot \left[1 + (0.012 RH)^{18} \right] \cdot \frac{h_0}{\text{mm}} + 250 \right], 1500 \right] \cdot \text{day} & \text{if } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \\ \min \left[\left[1.5 \cdot \left[1 + (0.012 RH)^{18} \right] \cdot \frac{h_0}{\text{mm}} + 250 \cdot \left(\frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.5} \right], 1500 \cdot \left(\frac{35 \text{ MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.5} \right] \cdot \text{day} & \text{if } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\beta_H = 1440 \cdot \text{day}$$

Virumisen kehittyminen ajan myötä kuormittumisen jälkeen

$$\beta_c(t, t_0) := \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0.3}$$

$$\beta_c(t, t_0) = 0.984$$

$$\varphi_0 := \varphi_{RH} \cdot \beta_{fcm} \cdot \beta_{t0}$$

Nimellinen virumaluku

$$\varphi_0 = 1.594$$

$$\varphi_{t0} := \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$$

Virumaluku

$$\varphi_{t0} = 1.568$$

$$E_{c,eff} := \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{t0}}$$

Betonin tehollinen kimmokerroin
/SFS-EN 1992-1, 7.4.3.(5)/

$$E_{c,eff} = 12788 \cdot \text{MPa}$$

Lähtöarvot**Sillan mitat**

$$L := 2.5\text{m} + 14\text{m} + 2.5\text{m} = 19\text{m} \quad \text{kannen kokonaispituus}$$

$$HL := 10.5\text{m} \quad \text{kannen hyödyllinen leveys}$$

Materiaalien tilavuuspainot ja kitkakulma

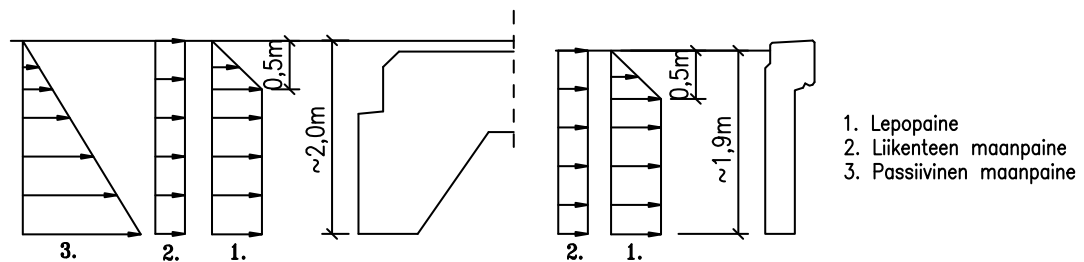
$$\rho_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \text{betonin tilavuuspaino}$$

$$\gamma_k := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \text{maan tilavuuspaino}$$

$$\varphi_k := 38^\circ \quad \text{kitkakulman ominaisarvo (sora)}$$

Pilareiden ja siipimuurin maanpaine

Päätypalkin maanpaine koostuu 3 komponentista ja siipimuurin 2 komponentista kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. Päätypalkin ja siipimuurin maanpaineet.

1. Lepopaine

Kuvassa 2 on esitetty lepopaineen muodostuminen siipimuurille ja päätypalkille.

$$K_0 := (1 - \sin(\varphi_k)) \quad \text{lepopaine kerroin}$$

$$K_0 = 0.384$$

$$P_{0m.0} := K_0 \cdot (\gamma_k \cdot 0\text{m}) \quad \text{lepopaine syvyydellä 0 m}$$

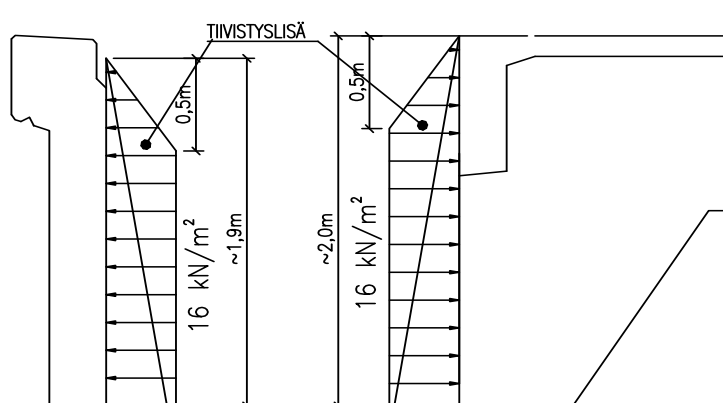
$$P_{0m.0} = 0$$

$$P_{0m.0.5} := 16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{lepopaine syvyydellä 0,5 m}$$

$$P_{0m.0.5} = 16 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$P_{0m.2} := \max[P_{0m.0.5}, K_0 \cdot (\gamma_k \cdot 2.0\text{m})] \quad \text{lepopaine syvyydellä 2,0 m}$$

$$P_{0m.2} = 16 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$



Kuva 2. Lepopaine siipimuurille ja päätypalkille.

2. Liikennekuorman maanpaine

$$q_{\text{liik}} := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Liikennekuorman maanpaine}$$

$$P_{0l} := K_0 \cdot q_{\text{liik}}$$

$$P_{0l} = 7.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

3. Passiivipaine päätypalkille, sillan liiketilasta riippuen

Mitoitetaan passiivipaineen suuruus 30°C lämpötilanmuutokselle.

$$\Delta T := 30$$

Siirtymä lämpötilanmuutoksesta $\Delta 30^\circ\text{C}$

$$\alpha_c := 10 \cdot 10^{-6}$$

Pituuden lämpötilakerroin /SFS-EN 1992-1-1, 3.1.3.(5)/

$$L = 19 \text{ m}$$

Kannen kokonaispituus

$$\Delta L := 30 \cdot \alpha_c \left(\frac{L}{2} \right)$$

Kannen pituuden muutos

$$\Delta L = 2.85 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Nyt } v := \frac{\Delta L}{2.0 \text{ m}} \cdot H = 0.00142 H < 0.002 \cdot H \text{ eli täysi passiivipaine ei pääse muodostumaan.}$$

$$K_{p,\max} := 8.0$$

Passiivipaine kerroin kun seinäkitkakulma $\delta_{pk} = 1/2 \cdot \varphi_k$

/SFS-EN 1997-1, kuva C.2.1/

$$K_p := \frac{K_{p,\max}}{3} + \frac{0.5 \cdot K_{p,\max}}{0.0075 H} \cdot v \text{ Liiketilän mukainen passiivipaine kerroin}$$

$$K_p = 3.43$$

$$\sigma_p := K_p \cdot (\gamma_k \cdot 2.0 \text{ m})$$

Passiivipaine 2m syvyydellä.

$$\sigma_p = 137 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Pilareiden maanpaine

Huomioidaan maan ja liikenteen nettolepopaineet luiskassa sijaitsevaan tukeen. Käytetään laskennallisena luiskakaltevuutena 1:2. Maanpaine kerätään pilarille 3*Pilarin halkaisija levyiseltä alueelta. Kuvassa 3 on esitetty pilareille tuleva maanpaine.

Alkuarvot

$$\beta := \text{atan}\left(\frac{1}{2}\right) = 26.6 \cdot \text{deg}$$

maan kaltevuuskulma

$$K_0 = 0.38$$

lepopaine kerroin

$$K_{0\beta 1} := K_0 \cdot (1 + \sin(\beta)) = 0.56$$

lepopaine kerroin kaltevalle maalle, maanpinta laskee pilaria kohti

$$K_{0\beta 2} := K_0 \cdot (1 + \sin(-\beta)) = 0.21$$

lepopaine kerroin kaltevalla maalla, maanpinta laskee pilarista pois päin

$$\gamma_k = 20 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

maan tilavuuspaino

$$\rho_c = 25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

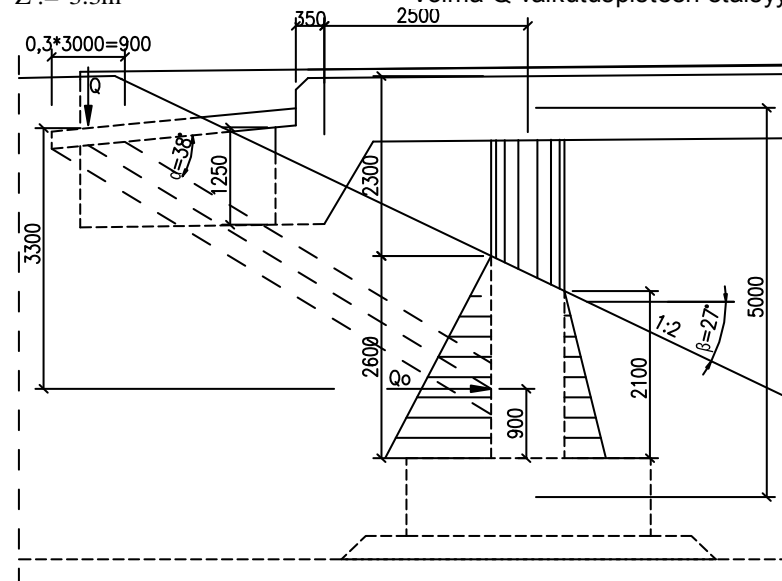
betonin tilavuuspaino

$$D := 0.9 \text{ m}$$

pilarin halkaisija

$$Z := 3.3 \text{ m}$$

Voima Q vaikutuspisteen etäisyys siirtymälaatasta



Kuva 3. Pilareiden maanpaine.

Lepopaineet

$$P_{0\gamma.\text{etu}} := K_0 \beta_1 \cdot \gamma_k \cdot 2.6 \text{ m}$$

lepopaine pilarin juuressa, luiskan puoli

$$P_{0\gamma.\text{etu}} = 28.9 \cdot \text{kPa}$$

$$P_{0\gamma.\text{taka}} := 0.7 (K_0 \beta_2 \cdot \gamma_k \cdot 2.1 \text{ m})$$

lepopaine pilarin juuressa, aukon puoli

$$P_{0\gamma.\text{taka}} = 6.2 \cdot \text{kPa}$$

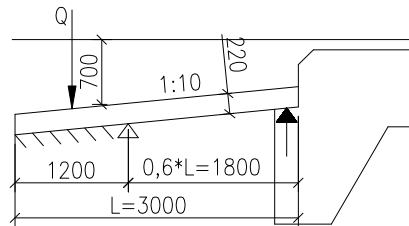
$$P_{0\gamma} := (P_{0\gamma.\text{etu}} - P_{0\gamma.\text{taka}}) \cdot 3D$$

nettolepopaine pilarille, viivakuormana

$$P_{0\gamma} = 61.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Siirtymälaatan maalle tukeutuva kuorma Q

Maanpaineekuormassa Q on huomioitu paineen poikittaissuuntainen 2:1 jakautuminen maaperässä. Lasketaan kuorma 3 m siirtymälaatalta, sillä tämä on määräävämpi tässä tapauksessa kuin 5 m laatta. Kuvassa 4 on esitetty siirtymälaatalta tuleva kuormitus Q.



Kuorma Q tulee alueelta:

$$L_Q := \frac{1}{2} \cdot 0.6 \cdot 3 \text{ m} + 0.4 \cdot 3 \text{ m} = 2.1 \text{ m}$$

Poikittaisuuntaisesta 2:1 jakautumasta johtuva piennyskerroin:

$$K_Z := \frac{HL}{HL + Z} = 0.76$$

Kuva 4. Siirtymälaatalta tulevat kuorma Q.

Betoni ja maakerrokset: $g_{slQ} := (0.22 \text{ m} \cdot \rho_c + 0.70 \text{ m} \cdot \gamma_k) \cdot \frac{L_Q}{2} = 20.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

$$Q_g := (K_0 \cdot g_{slQ} \cdot 3D) \cdot K_Z$$

$$Q_g = 16.2 \cdot \text{kN}$$

Liikennekuorma: $q_{slQ} := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot L_Q = 42 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

$$Q_q := (K_0 \cdot q_{slQ} \cdot 3D) \cdot K_Z$$

$$Q_q = 33.2 \cdot \text{kN}$$

Taulukko 1. Sillansuunnittelussa tarvittavat kuormitusyhdistelmät murtorajatilassa Liikenneviraston Siltolajien kuormat ja suunnitteluperusteet – sovellusohjeen liitteen 1 mukaisesti. [23]

TAULUKKOJEN MERKINNÄT	
gr1,gr5	Kuormaryhmä
F _{sk}	Tuulikuorma
T _k	Lämpönlakuorma
BF	Laakerikita
IL	Jääkuorma
S	Tuulipainuma
TLEP	Liikennekuorman maapaine
I.	Kuormitusyhdistelyn julkseva numero (murtorajilla)
Ia.	Kuormitusyhdistelyn julkseva numero ('a' = käyttöraajitilan ominaisyhdistelmä)
Ib.	Kuormitusyhdistelyn julkseva numero ('b' = käyttöraajitilan tavallinen yhdistelmä)
c	Kuormitusyhdistelyn numero ('c' = käyttöraajitilan pitkäaikasyhdistelmä)

TIESILLAT - MURTORAJATILA - Set A: A.2.4 (A), Set B: A.2.4 (B)

KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVA KUORMA (6.10b)											
YHDISTELYKAAVAT MRT. 1 - MRT. 14											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	F _{vk}	T _k	BF	IL	TLEP
6.10a	LM1	LM2	LM1+vaaka	kevyt	ruuhka	LM3	Tuuli	Lämpötila	Laakerikitta	Jääkuorma	Lk-maanp.
-	1,1 / 0,9										
-	1,1 / 0,9 ^{a)}										

[illegible]

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

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

3) stabiliteetti 1,30 [EN 1992-1-1: 2.4.2.2 (2) Huom)]

4) paikalliset vaikutukset 1,20 [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 2. Sillansuunnittelussa tarvittavat kuormitusyhdistelmät käyttörajatilassa Liikenneviraston Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet –sovellusohjeen liitteen 1 mukaisesti. [23]

TIESILLAT - KÄYTTÖRAJATILA - Ominaisyhdistelmä (6.14), Tavallinen yhdistelmä (6.15), Pitkäaikaishdistelmä (6.16)																									
(6.14)													(6.15)												
KUORMITUSYHDISTELYN MAARAAVA MUUTTUVA KUORMA																									
KRT_1a - KRT_14a													KRT_1b - KRT_14b												
1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a	9a	10a	11a	1b	2b	3b	4b	5b	6b	7b	8b	9b	10b	11b	KRT_1c			
gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	F _{wk}	T _k	BF	IL	TLEP	gr1a	gr1b	gr4	F _{wk}	T	BF	IL	TLEP							
Oma paino						1									1							1			
Esiännitys						1									1							1			
gr1a	1	-	-	-	-	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
gr1b	-	1	-	-	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	
gr2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
gr3	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
gr4	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
gr5	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
F _{wk 1)}	0,6	-	-	-	-	-	1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
T _{k 2)}	0,6	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
BF	0,6	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
IL	0,7	-	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
S 2)																									
TLEP	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	

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

2) tukipainuma ja vedenpinnan asema yhdistellään pysyvän kuorman kanssa siten että saavutetaan määräävä yhdistely - passiivipaineen yhdistelykerroin aiheuttavan kuorman mukaan

= Määräävä muuttuva kuorma

Tiesillat	
Onnettomuusyhdistelmä	
Ad	1
Ompaino	1
Esiännitys	1
gr1a	0,75 0,4 0,4
gr1b	-
gr2	-
gr3	-
gr4	-
gr5	-
F _{wk 1)}	-
T _{k 2)}	0,5
BF	0,4
IL	0,2
S 2)	-
TLEP	-

Tiesillat		
Onnetomuusyhdistelmä		
Ad	1	
Ompaino	1	
Esiännitys	1	
gr1a	0,75	
	0,4	
	0,4	
gr1b	-	
gr2	-	
gr3	-	
gr4	-	
gr5	-	
F _{wk 1)}	-	
T _{k 2)}	0,5	
BF	0,4	
IL	0,2	
S 2)		
TLEP	-	

Leikkausmitoitus**Lähtötiedot:** Toteutusluokka 3:n osavarmuusluvut.

Betoni: $f_{ck} = 30\text{MPa}$ $\gamma_c = 1.35$ $f_{cd} = 18.9\cdot\text{MPa}$ $f_{ctk0.05} = 2.0\cdot\text{MPa}$ $f_{ctd} = 1.50\cdot\text{MPa}$

Betoniteräs: $f_{yk} := 500\cdot\text{MPa}$ $\gamma_s := 1.1$ $f_{yd} := \min\left(\frac{f_{yk}}{\gamma_s}\right) = 455\cdot\text{MPa}$

$\phi_x := 25\text{mm}$ yläpinnan teräs, laatan suunta (x-suunta)

$\phi_y := 20\text{mm}$ yläpinnan teräs, poikkisuunta (y-suunta)

$s_x := 200\text{mm}$ teräksen jakoväli, x-suunta

$s_y := 200\text{mm}$ teräksen jakoväli, y-suunta

$\alpha := 90\text{deg}$ leikkasraudoituksen ja laatan tason välinen kulma

Betonipeite: $c_{nom} := 40\text{mm}$

Mitat: $h := 750\text{mm}$ laatan korkeus mitoitussleikkausvoiman kohdalla

$b := 1\text{m}$

$D := 900\text{mm}$ pilari halkaisija

$d_x := h - c_{nom} - \phi_y - \frac{1}{2}\phi_x = 678\cdot\text{mm}$ laatan tehollinen korkeus, x-suunta

$d_y := h - c_{nom} - \frac{1}{2}\phi_y = 700\cdot\text{mm}$ laatan tehollinen korkeus, y-suunta

$d := \sqrt{d_x \cdot d_y} = 689\cdot\text{mm}$ laatan keskimääräinen tehollinen korkeus

Leikkasraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyys:

Valitaan leikkauskestävyydeksi suurempi x- tai y-suunnan arvoista.

$$n_x := \frac{b}{s_x} \quad A_{s,x} := \frac{n_x \cdot \pi \cdot \phi_x^2}{4} = 2454\cdot\text{mm}^2 \quad \rho_{1,x} := \min\left(\frac{A_{s,x}}{b \cdot d_x}, 0.02\right) = 0.0036$$

$$n_y := \frac{b}{s_y} \quad A_{s,y} := \frac{n_y \cdot \pi \cdot \phi_y^2}{4} = 1571\cdot\text{mm}^2 \quad \rho_{1,y} := \min\left(\frac{A_{s,y}}{b \cdot d_y}, 0.02\right) = 0.0022$$

$$k_x := \max\left(1.6 - \frac{d_x}{m}, 0.8\right) = 0.92$$

$$k_y := \max\left(1.6 - \frac{d_y}{m}, 0.8\right) = 0.90$$

$$V_{c0,x} := 0.3 \cdot k_x \cdot (1 + 50 \cdot \rho_{1,x}) \cdot f_{ctd} \cdot d_x = 333 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_{c0,y} := 0.3 \cdot k_y \cdot (1 + 50 \cdot \rho_{1,y}) \cdot f_{ctd} \cdot d_y = 316 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_{c0} := \max(V_{c0,x}, V_{c0,y})$$

$$V_{c0} = 333 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

kun $h = 700\text{mm}$ $V_{c0} = 329\text{ kN/m}$

Minimiraudoitetun alueen leikkauskestävyys:

$$A_{sv,\text{min.vaad}} := \frac{0.08 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa}}{f_{yk}} \cdot \sin(\alpha)$$

$$A_{sv,\text{min.vaad}} = 876 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2}$$

Valitaan minimiraudoitukseksi haka T12 kx300/ky300

$$A_{sv,\text{min}} := \left[\frac{\pi \cdot (12\text{mm})^2}{4} \right] \cdot \left[\left(\frac{1000}{300} \right) \cdot \left(2 \cdot \frac{1000}{600} \right) \right] \cdot \frac{1}{\text{m}^2}$$

$$A_{sv,\text{min}} = 1257 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2}$$

$$V_{s,\min} := 0.9 \cdot A_{sv,\min} \cdot f_{yd} \cdot d \cdot (\sin(\alpha) + \cos(\alpha))$$

$$V_{s,\min} = 354 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_c := 0.5 \cdot d \cdot f_{ctd}$$

$$V_c = 517 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_{u,\min} := \min(0.8 \cdot V_c + V_{s,\min}, 0.25 \cdot d \cdot f_{cd})$$

$$V_{u,\min} = 768 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

kun $h = 700 \text{ mm}$ $V_{u,\min} = 712 \text{ kN/m}$

Leikkausraudoitus mitan d päästä pilarin reunasta

Leikkausvoiman mitoitusarvo haetaan mitan d päästä tuen reunasta. Tarvittavan kohdan leikkausvoimaa ei ole suoraan saatavilla eli interpoloidaan mitoituskohta ja haetaan määrävän pilarin voimasuure x tai y -suunnasta.

Tarkastelupisteen etäisyys pilarin päästä: $\frac{D}{2} + d = 1.139 \text{ m}$

$$Q_{11} := \text{interp}\left[\left(\begin{pmatrix} 1.0\text{m} \\ 1.5\text{m} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 640 \\ 396 \end{pmatrix}, \frac{D}{2} + d\right) \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 572 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{12} := \text{interp}\left[\left(\begin{pmatrix} 1.0\text{m} \\ 1.5\text{m} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 824 \\ 501 \end{pmatrix}, \frac{D}{2} + d\right) \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 734 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{21} := \text{interp}\left[\left(\begin{pmatrix} 1.07\text{m} \\ 1.43\text{m} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 537 \\ 368 \end{pmatrix}, \frac{D}{2} + d\right) \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 505 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{22} := \text{interp}\left[\left(\begin{pmatrix} 0.85\text{m} \\ 1.28\text{m} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 628 \\ 339 \end{pmatrix}, \frac{D}{2} + d\right) \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 434 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_d := \max(Q_{11}, Q_{12}, Q_{21}, Q_{22})$$

$$Q_d = 734 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nyt miniraudituksen kapasiteetti $V_{u,\min} = 768 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ on suurempi kuin suurin leikkausvoima

$Q_d = 734 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ eli minirauditus riittää leikkaukselle.

Läivistysmitoitus**Lähtötiedot:** Toteutusluokka 3:n osavarmuusluvut.

Laskuja..

Betoni: $f_{ck} = 30\text{MPa}$ $\gamma_c = 1.35$ $f_{cd} = 18.9\text{MPa}$ $f_{ctk0.05} = 2.0\text{MPa}$ $f_{ctd} = 1.50\text{MPa}$

Betoniteräs: $f_{yk} := 500\text{MPa}$ $\gamma_s := 1.1$ $f_{yd} := \min\left(\frac{f_{yk}}{\gamma_s}, 300\text{MPa}\right) = 300\text{MPa}$

$\phi_x := 25\text{mm}$ yläpinnan teräs, pituussuunta (x-suunta)

$\phi_y := 25\text{mm}$ yläpinnan teräs, poikkisuunta (y-suunta)

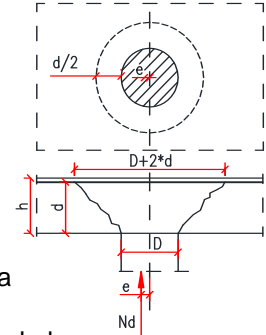
$s_x := 100\text{mm}$ yläpinnan teräksen jakoväli, x-suunta

$s_y := 100\text{mm}$ yläpinnan teräksen jakoväli, y-suunta

$\phi_{ht} := 12\text{mm}$ hakateräksen halkaisija

$n := 88$ hakateräksen leikkeiden lkm tuen reunasta etäisyydelle $1,5d$ tuen reunasta

$\alpha := 90\text{deg}$ leikkasraudoituksen ja laatan tason välinen kulma



Betonipeite: $c_{nom} := 40\text{mm}$

Voimasuureet: $N_d := 3510\text{kN}$ $M_d := 1058\text{kN}\cdot\text{m}$ voimaa N_d vastaava momentti pilarin yläpäässä

Mitat: $h := 750\text{mm}$ laatan korkeus pilarin kohdalla

$D := 900\text{mm}$ pilarin halkaisija

$d_x := h - c_{nom} - \phi_y - \frac{1}{2}\phi_x = 673\text{mm}$ laatan tehollinen korkeus, x-suunta

$d_y := h - c_{nom} - \frac{1}{2}\phi_y = 698\text{mm}$ laatan tehollinen korkeus, y-suunta

$d := \sqrt{d_x \cdot d_y} = 685\text{mm}$ laatan keskimääräinen tehollinen korkeus

Laatan yläpinnan teräsmäärät:

$$b_x := D + 2 \cdot \frac{1}{2}d = 1585\text{mm} \quad n_x := \frac{b_x}{s_x} = 15.8 \quad A_{sx} := \frac{n_x \cdot \pi \cdot \phi_x^2}{4} = 7780\text{mm}^2$$

$$b_y := D + 2 \cdot \frac{1}{2}d = 1585\text{mm} \quad n_y := \frac{b_y}{s_y} = 15.8 \quad A_{sy} := \frac{n_y \cdot \pi \cdot \phi_y^2}{4} = 7780\text{mm}^2$$

Mitoitus:

$$\rho_x := \frac{A_{sx}}{d_x \cdot b_x} = 0.0073 \quad \rho_y := \frac{A_{sy}}{d_y \cdot b_y} = 0.00704 \quad \rho := \min(\sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}, 0.008) = 0.00717$$

$$k := \max\left(1.6 - \frac{d}{m}, 1\right) = 1 \quad A_u := \frac{\pi}{4} \cdot (D + d)^2 = 1.973\text{m}^2 \quad u := \pi \cdot (D + d) = 4.979\text{m}$$

$$e := \frac{M_d}{N_d} = 301.4\text{mm} \quad \beta := \frac{0.4}{1 + \frac{1.5e}{\sqrt{A_u}}} = 0.303$$

Leikkausraudoittamattoman betonin leikkauskapasiteetti:

$$V_c := k \cdot \beta \cdot (1 + 50\rho) \cdot u \cdot d \cdot f_{ctd} = 2105\text{kN} \quad V_c \geq N_d = 0$$

Leikkausterästen kapasiteetti:

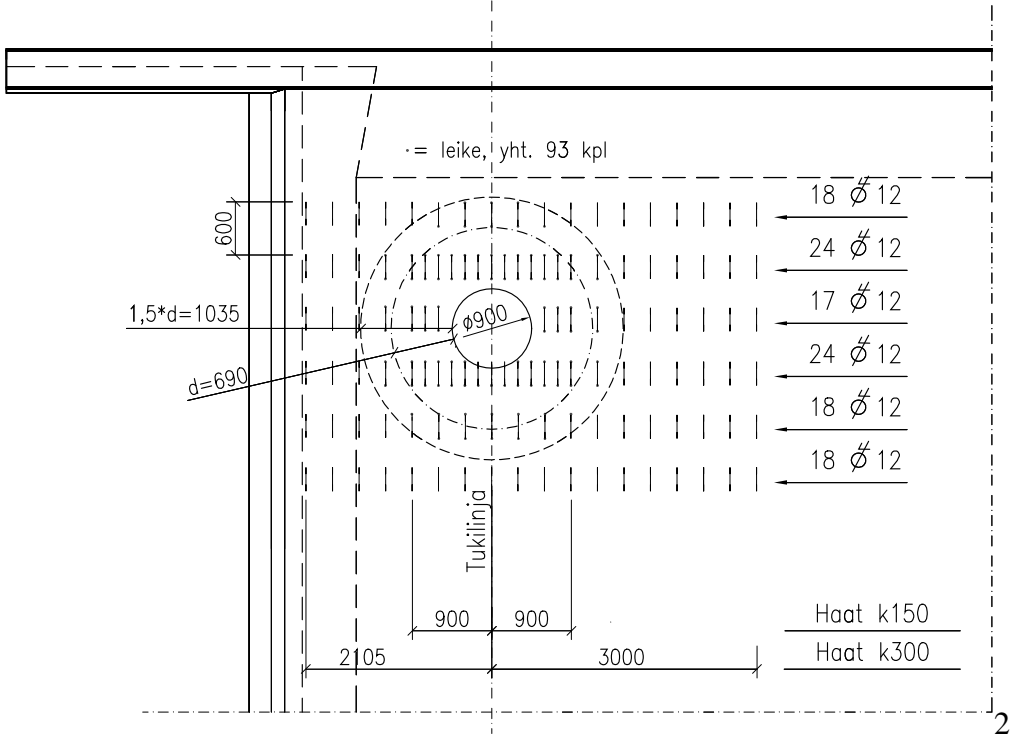
$$A_{sv} := \frac{n \pi \phi_{ht}^2}{4} = 9953\text{mm}^2 \quad V_s := A_{sv} \cdot f_{yd} \cdot \sin(\alpha) = 2986\text{kN}$$

Läivistyskapasiteetti:

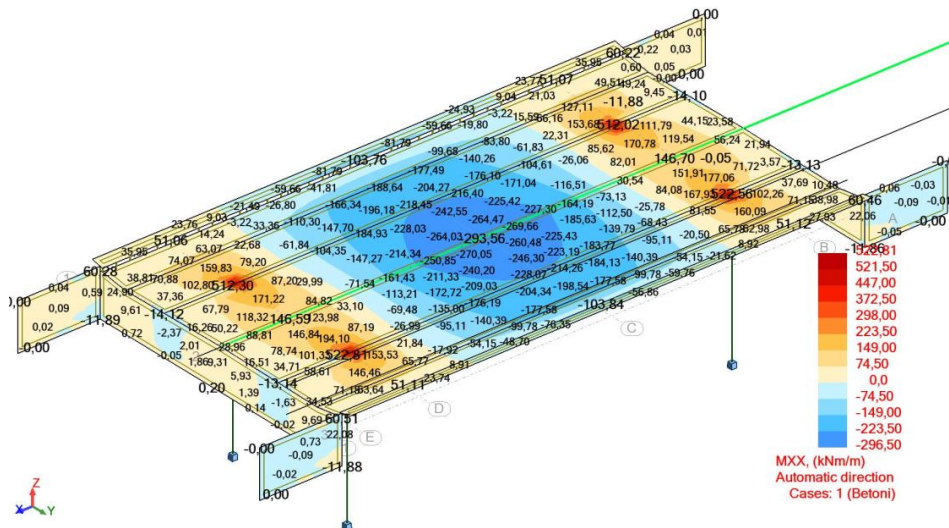
$$V_u := \min(0.25 \cdot V_c + V_s, 2 \cdot V_c) \quad V_u = 3512\text{kN} \geq N_d = 3510\text{kN}$$

OK!

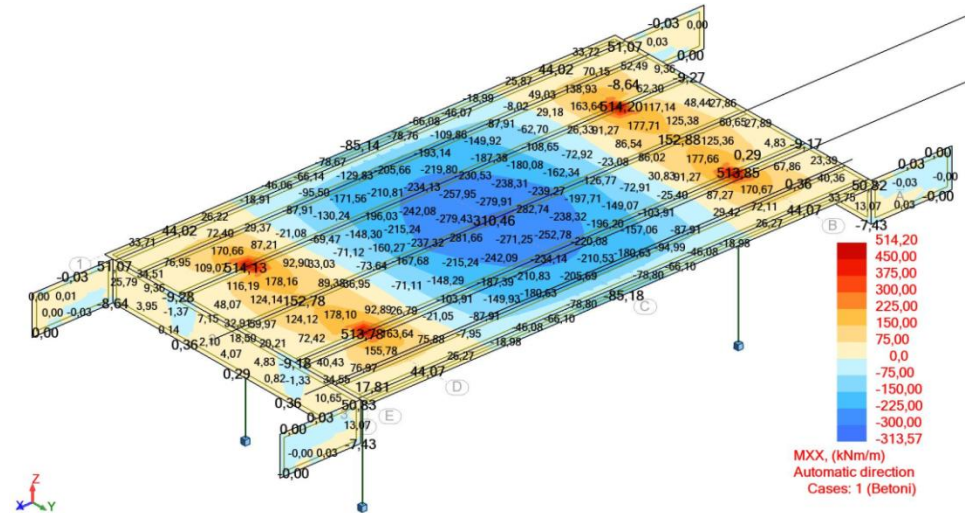
Tarvitaan vähintään $n = 88$ kpl halkaisijaltaan $\phi_{ht} = 12\text{mm}$ olevaan leikkaushaahan leikettä etäisyydelle $1,5d$ tuen reunasta.



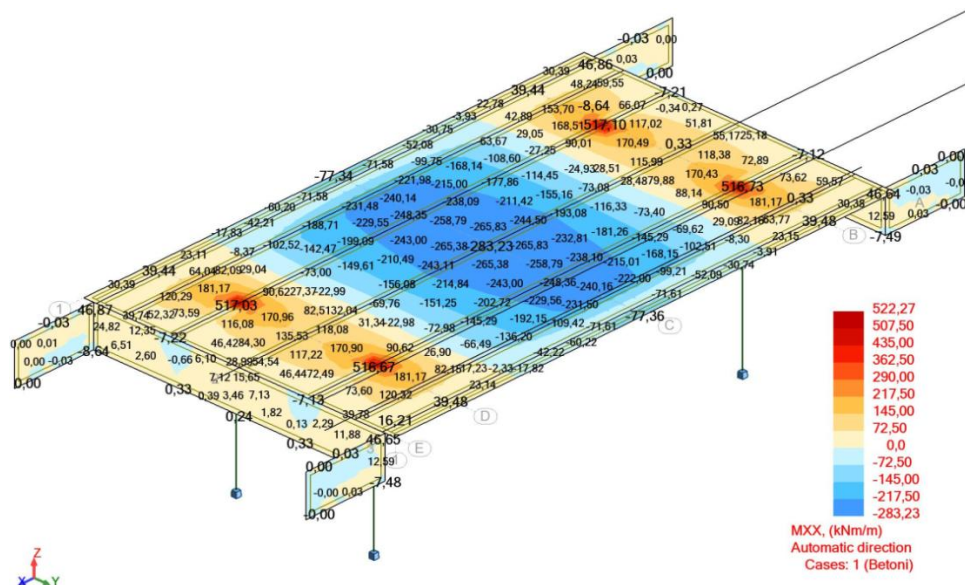
Kuva 1. Laatan leikkausraudoitusjärjestelyt.



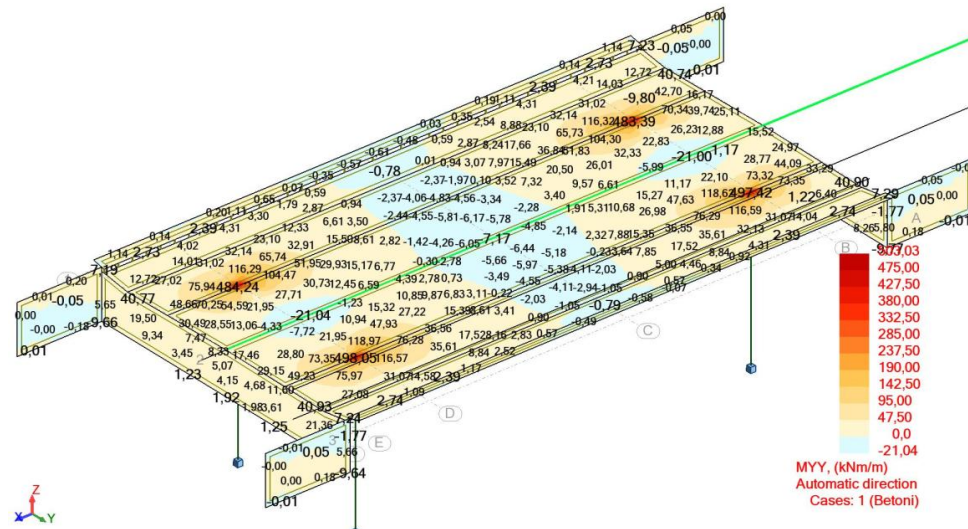
Kuva 1. Rakennemalli 1, pintakeskeinen malli. Pituussuuntaisen momentin MXX jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



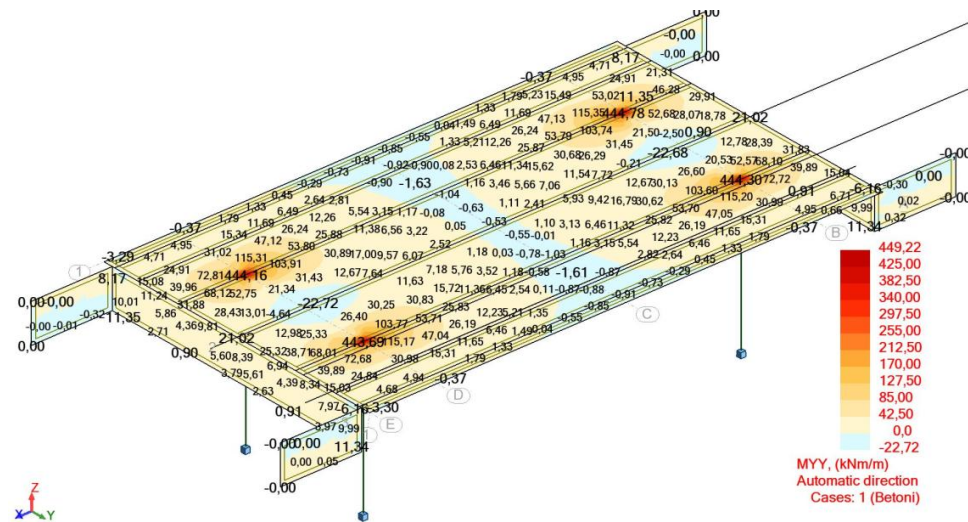
Kuva 2. Rakennemalli 2, tasomalli. Pituussuuntaisen momentin MXX jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



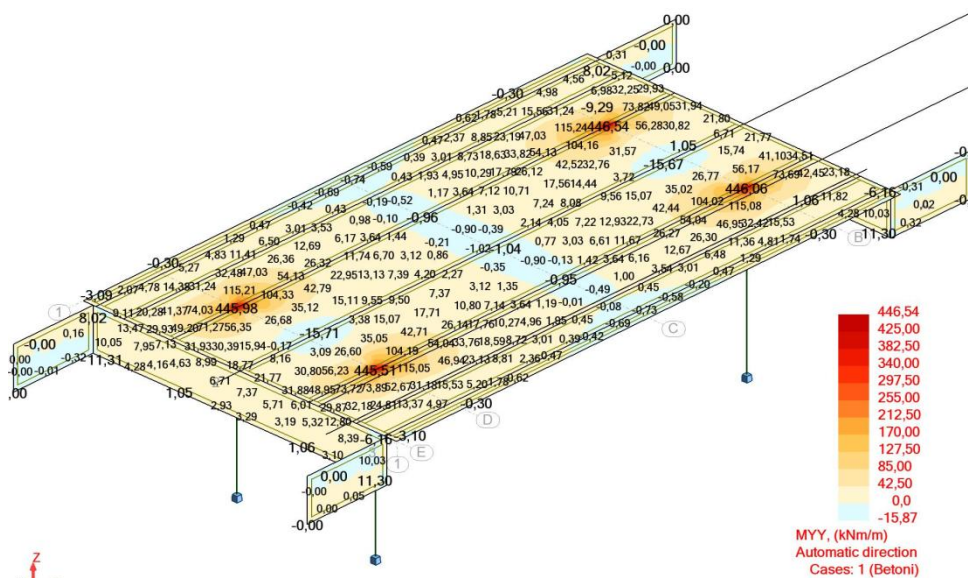
Kuva 3. Rakennemalli 3, jäykkyyskorjattu tasomalli. Pituussuuntaisen momentin MXX jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



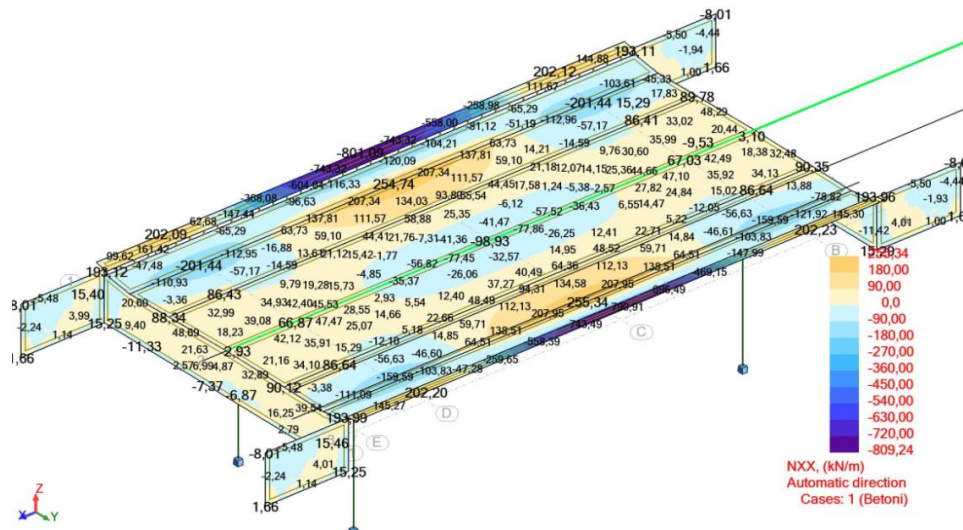
Kuva 4. Rakennemalli 1, pintakeskeinen malli. Poikittaissuuntaisen momentin MYY jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



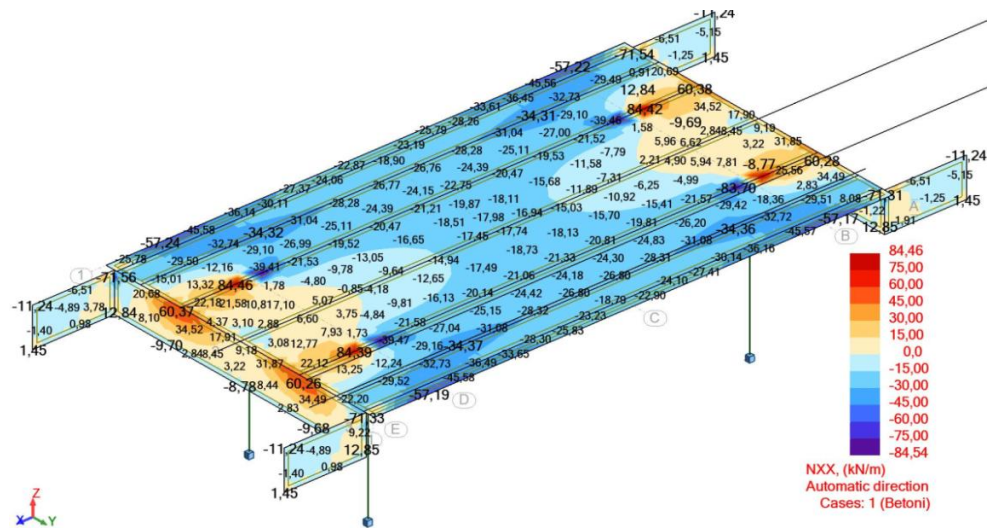
Kuva 5. Rakennemalli 2, tasomalli. Poikittaissuuntaisen momentin MYY jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



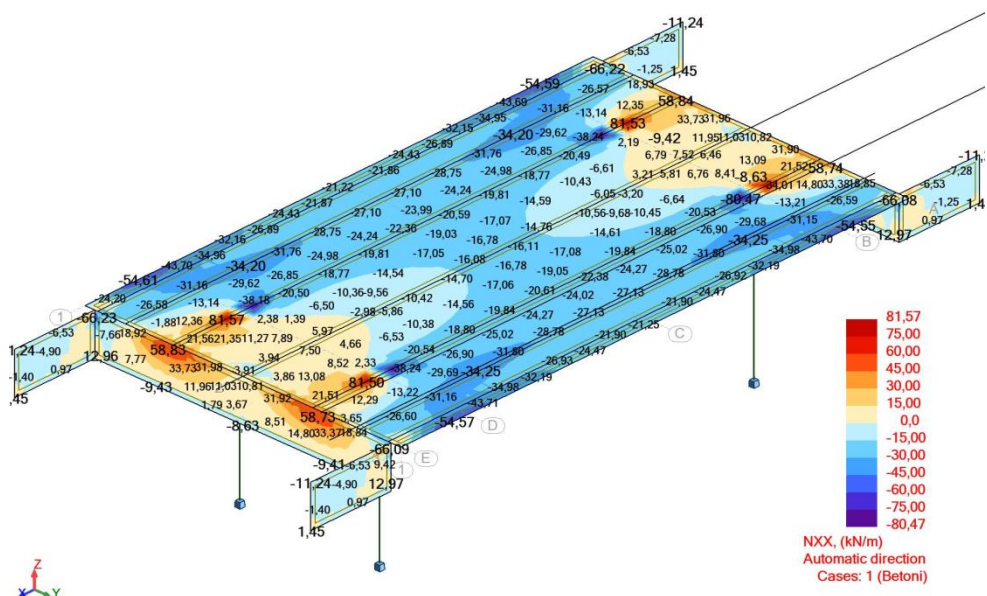
Kuva 6. Rakennemalli 3, jäykkyyskorjattu tasomalli. Poikittaissuuntaisen momentin MYY jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



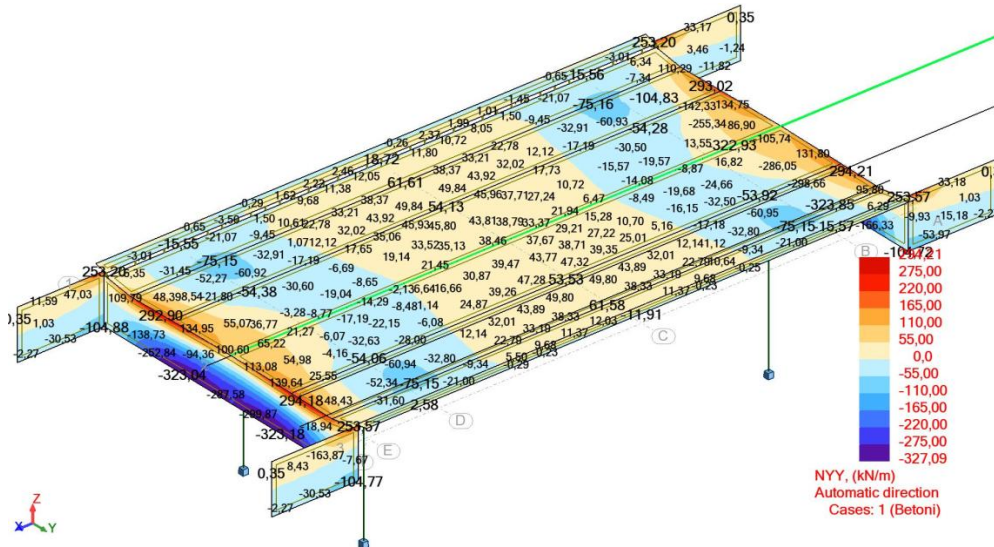
Kuva 7. Rakennemalli 1, pintakeskeinen malli. Pituussuuntaisen normaalivoiman NXX jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



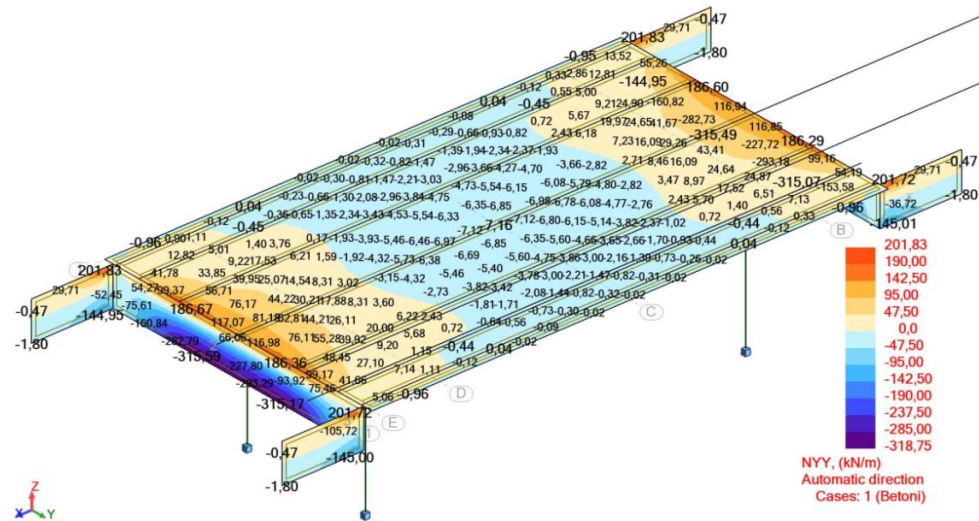
Kuva 8. Rakennemalli 2, tasomalli. Pituussuuntaisen normaalivoiman NXX jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



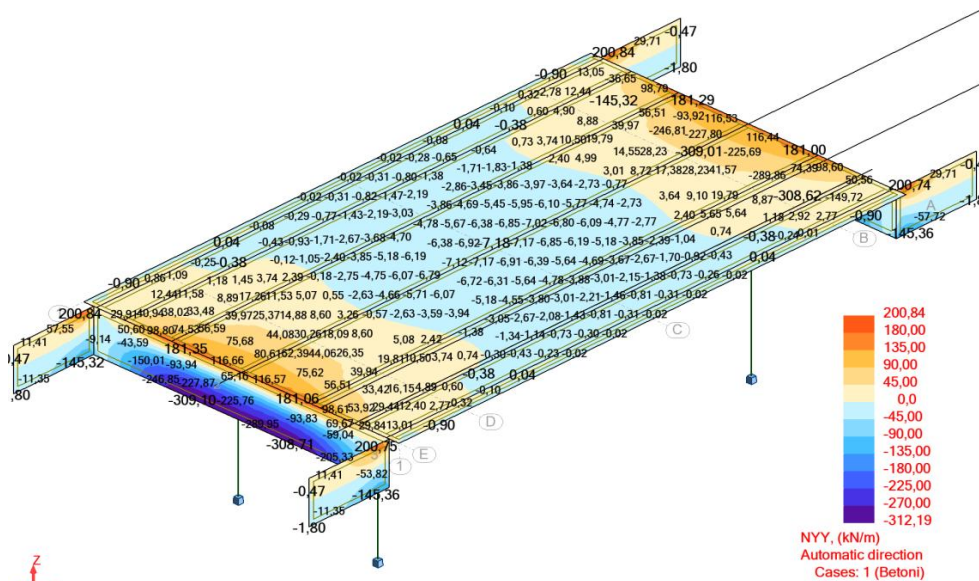
Kuva 9. Rakennemalli 3, jäykkyyskorjattu tasomalli. Pituussuuntaisen normaalivoiman NXX jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



Kuva 10. Rakennemalli 1, pintakeskeinen malli. Poikittaissuuntaisen normaalivoiman NYY jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



Kuva 11. Rakennemalli 2, tasomalli. Poikittaissuuntaisen normaalivoiman NYY jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.



Kuva 12. Rakennemalli 3, jäykkyyskorjattu tasomalli. Poikittaissuuntaisen normaalivoiman NYY jakauma kannessa rakenteen omalla painolla.