



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Petri Jaakkonen

PUUKANTISEN TERÄSPALKKISILLAN RASITUSSUUREIDEN LASKENTA

Opinnäytetyö

Kevät 2022

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Talonrakennustekniikka

Tekijä: Petri Jaakkonen

Työn nimi: Puukantisen teräspalkkisillan rasitussuureiden laskenta

Ohjaaja: Martti Perälä

Vuosi: 2022

Sivumäärä: 50

Liitteiden lukumäärä: 6

Opinnäytetyön tarkoituksena on esittää peruskorjattavan sillan kansirakenteelle tulevien kuormien laskenta sekä mitoitus. Opinnäytetyöhön ei sisällytetä maatumien kallistusvalun uudelleen suunnittelua eikä muita kyseisen sillan peruskorjaukseen liittyviä suunnitelmia ja työtehtäviä.

Opinnäytetyössä on tutkittu vastaavanlaisia siltoja sekä perehdytty kyseisen sillan aiempiin korjauksiin ennen suunnittelun aloittamista. Sillan rakennemalli ja siihen kohdistuvat kuormat syötettiin FEM-laskentaohjelmaan ja laskentaohjelman tuloksia verrattiin käsin laskennalla saatuihin. Lopuksi silta mitoitettiin saatujen rasitusten perusteella.

Lopputuloksena saatiin valmis pohja SOFiSTiK Structure Desktop FEM-laskentaohjelmaan kyseiselle siltatyypille, joten seuraavat projektit ovat hieman nopeampia suunnitella. Varsinkin puusiltojen osalta suunnittelu-aikataulut tulevat hieman kiristymään johtuen nykyisen suolakyllästeisen puutavaran sienikasvuherkkyydestä. On siis aikataulullista etua, mikäli FEM-laskentaan on jo valmis pohja tarjolla.

¹ Asiasanat: sillat, FEM-laskentaohjelmat, teräsrakenteet, puurakenteet

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Construction

Specialisation: Building technology

Author: Petri Jaakkonen

Title of thesis: Timber-framed steel girder bridge calculation of stress values

Supervisor: Martti Perälä

Year: 2022

Number of pages: 50

Number of appendices: 6

This thesis is about calculation and dimensioning of the loads that come to the deck structure of the bridge which to be renovated. The thesis does not include the redesign of the ground supports or other renovation plans and tasks.

In the thesis, similar bridges have been studied and the previous repairs of the bridge have been examined before the design began. The structural model of the bridge and the loads applied to it were fed into the FEM calculation program. The results of the calculation program were compared with those obtained by manual calculation. The bridge was dimensioned based on the obtained stresses.

The result was a ready-made template for the SOFiSTiK Structure Desktop FEM calculation program for that bridge type. So the following projects are a little faster to plan. Especially for wooden bridges, the design schedules will be slightly tightened due to the fungal growth sensitivity of the current salt-saturated timber. There is a schedule advantage if a ready-made basis for FEM calculations is already available.

¹ Keywords: bridges, FEM calculation software, steel structures, wooden structures

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuvio- ja taulukkoluetelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	9
1 JOHDANTO	10
1.1 Taustaa	10
1.2 Toimeksiantaja	11
1.3 Opinnäytetyön rajaus	11
1.4 Opinnäytetyössä käytetty FEM-laskentaohjelma.....	11
1.5 Suunniteltava siltakohde	12
2 MITOITUSPERUSTEET	15
2.1 Kuormitusyhdistelyt murto- ja käyttörajatiloissa.....	15
2.2 Kuormitus	17
2.3 Kuormakaaviot	18
2.3.1 Kuormakaavio LM1	18
2.3.2 Kuormakaavio LM2	19
2.3.3 Kuormakaavio LM3	19
2.3.4 Väsytytkuormakaavio FLM3	20
2.4 Jarrutus ja kiihdytyskuormat.....	22
2.5 Tuulikuorma.....	24
2.6 Lämpötilakuorma.....	26
2.7 Teräspalkkien ja puukannen materiaaliominaisuudet.....	28
2.8 Materiaalien poikkileikkaustiedot.....	28
3 RAKENNEANALYYSIT	31
3.1 Rakennemallit.....	31
3.2 Kuormien sijoittelu	34
3.3 Mitoittavat voimasuureet ja siirtymät	39

3.4	Suuruusluokkatarkastelu	40
3.4.1	Omapaino + lisäpäälyste	40
3.4.2	Liikennekuorma LM1 UDL.....	41
3.4.3	Liikennekuorma LM1 telit	41
3.4.4	Omapaino ja LM1 telit + UDL yhdistelytarkastus murtorajatilassa	42
4	TERÄSPALKKIEN MITOITUKSESTA	43
4.1	Väsymistarkastelu FLM3	43
4.2	Käyttörajatila.....	46
5	SYRJÄLANKKUKANNEN MITOITUKSESTA	47
6	YHTEENVETO	48
	LÄHTEET	49
	LIITTEET.....	50

Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Sillan poikkileikkaus.....	13
Kuvio 2. Sillan tasopiirros.....	13
Kuvio 3. Sillan pituusleikkaus.....	14
Kuvio 4. Telikuormien pyörien sijoittelu.....	18
Kuvio 5. Pyöräkuorma LM2.....	19
Kuvio 6. Kuormakaavio LM3.....	20
Kuvio 7. Kuormakaavio FLM3.....	20
Kuvio 8. 3D-visualisointi rasituksista, kun yläpinta on alapintaa lämpimämpi.	27
Kuvio 9. Staattinen havainnollistava 3D-malli.	31
Kuvio 10. Staattinen rakennemalli tasokuvassa.....	32
Kuvio 11. Staattinen rakennemalli 3D-näkymässä.....	32
Kuvio 12. 3D-visualisointi, kuormitustapaus syötetyistä omista painoista.	33
Kuvio 13. 3D-visualisointi, kuormitustapaus LM1 telit, kaistasijoittelu jommankumman teliakselin toisen pään pyörät kulkevat reunimmaisen palkin keskellä.....	33
Kuvio 14. Omapaino sekä päällystevaraus koodattuna.	34
Kuvio 15. LM1 telit, kaistasijoittelu jommankumman teliakselin toisen pään pyörät kulkevat reunimmaisen palkin keskellä.	35
Kuvio 16. LM1 telit, kaistasijoittelu jommankumman teliakselin toisen pään pyörät kulkevat keskellä olevan palkin keskellä.	35
Kuvio 17. LM1, pintakuorma 9 kN/m ² koko kaistan leveydeltä.	36
Kuvio 18. LM3, pintakuorma 45 kN/m ² koko kaistan leveydeltä.	36

Kuvio 19. LM2, kaistasijoittelu 1.....	37
Kuvio 20. LM2, kaistasijoittelu 2.....	37
Kuvio 21. FLM3, kaistasijoittelu pyörät ajavat reunimmaisen palkin kohdalla.....	38
Kuvio 22. FLM3, kaistasijoittelu pyörät ajavat keskimmäisen palkin kohdalla.....	38
Kuvio 23. Reunimmaisen palkin taivutusvoimasuureet murtorajatilassa. Määräävä yhdistelmä on MRT1.....	39
Kuvio 24. Reunimmaisen palkin leikkausvoimasuureet murtorajatilassa. Määräävä yhdistelmä on MRT1.....	39
Kuvio 25. Päälysrakenteen pysyvä taipuma on 2,14 mm.....	39
Kuvio 26. Oma paino + lisäpäälyste.....	40
Kuvio 27. Liikennekuorma LM1 UDL.....	41
Kuvio 28. Liikennekuorma LM1 telit.....	42
Kuvio 29. Suurin taivutusmomentti väsytySKUORMAKAAVIOSTA FLM3.....	43
Kuvio 30. Kuormayhdistely KRT1b, päälysrakenteen maksimitaipuma.....	46
Kuvio 31. Syrjälankkukannen mitoitus.....	47
Taulukko 1. Kuormakaavion LM1 kuormien ominaisarvot α -kertoimilla kerrottuna.....	19
Taulukko 2. Ajoneuvojen lukumäärä väsytySKUORMAKAAVIOLE FLM3.....	21
Taulukko 3. Kuormakaavion ominaisarvot.....	22
Taulukko 4. Siltaan kohdistuva tuulen paine (kN / m ²) kun tuulen nopeus on 23 m/s.....	24
Taulukko 5. Siltakannen korkeuden määrittäminen.....	24
Taulukko 6. Lineaariset pystysuuntaiset lämpötilaerot.....	27

Taulukko 7. Teräspalkkien poikkileikkauksen materiaaliominaisuudet	29
Taulukko 8. Puukannen poikkileikkauksen materiaaliominaisuudet.....	30

Käytetyt termit ja lyhenteet

FEM-laskenta	Elementtimenetelmä-laskenta (Finite Element Method).
FLM1...FLM3	VäsytySKUORMAKAAVIOITA.
LM1...LM4	Kuormakaavio; sijoitettu niin, että saavutettu määräävä vaikutus.
HL	Hyötyleveys.
KL	Kiinteä laakeri.
Kreosootti	Tehokas, mutta myrkyllinen puun suojakäsittelyaine.
KRT	Käyttörajatila.
LL	Liikkuva laakeri.
Ortotrooppinen	Materiaali, jonka mekaaniset ominaisuudet toisiaan vastaan kohtisuorissa suunnissa ovat erilaiset.
Mk	Taivutusmomentti.
MRT	Murtorajatila.
NCCI	Väyläviraston eurokoodin soveltamisohjeita.
Rk	Leikkausvoima.
SILKO	Sillan korjausohjeet.
TOSS	Täydentäviä ohjeita siltojen suunnitteluun.
TSV	Tien tasausviiva.
UDL	Kuormakaavion tasainen kuorma.
VA	Vapaa-aukko.

1 JOHDANTO

Vaikka osa liikenteen infrastruktuuristamme on kaupunkien ja kuntien omistuksessa, niin kuitenkin valtaosa on valtio-omisteista. On perustettu liikenne- ja viestintäministeriön alainen Väylävirasto (entiseltä nimeltään Liikennevirasto). Väylävirasto huolehtii Suomen tie- ja rataverkosta sekä vesiväylistä. Ylläpito ja kehitys hoidetaan yhdessä alueellisten ELY-keskusten kanssa.

Liikenneverkosto vaatii toimiakseen myös taitorakenteita: esimerkiksi siltoja, tunneleita ja rautatierumpuja. Taitorakenne on rakenne, jonka suunnittelu- tai rakennusvirheiden seurauksena saattaa aiheutua merkittäviä ihmishenkien menetyksiä sekä suuria taloudellisia tappioita. Yhtenäistääkseen ja helpottaakseen suunnitteluyhteistyön sujuvuutta Väylävirasto on tuottanut suunnittelua auttavia eurokoodien soveltamisohjeita, joiden noudattamista on kaupunkien ja kuntien tilaajapuolikin alkanut suunnittelutoimistoilta vaatia. Seuraavat ohjeet ovat kaikille vapaasti saatavilla Väyläviraston verkkosivuilta.

Eurokoodin soveltamisohjeita:

- Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1
- Eurokoodin soveltamisohje Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2
- Teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu – NCCI 4
- Puurakenteiden suunnittelu – NCCI 5
- Geotekninen suunnittelu – NCCI7.

Ohjeistuksia päivitetään ajoittain. Lisäksi on myös täydentäviä ohjeita (TOSS), siltojen korjausohjeet (SILKO) sekä valmiita tyyppipiirustuksia yleisesti käytetyistä rakenneosista (mm. sillan teräskaitteet).

1.1 Taustaa

Työpöydällä voi olla joko uusi suunniteltava taitorakenne tai jokin korjattava kohde. Jokainen työ on yksilötapaus, joten kaikkea vastaavanlaisessa aiemmassa projektissa tehtyä ei voi hyödyntää – vaan aloitettava osittain puhtaalta pöydältä. Esimerkkikohteessa kansilankutuksen virkaa toimittanut A-luokan painekyllästetty puu oli jo reilussa kymmenessä

vuodessa lahonnut käyttökeltvottomaan kuntoon. Tästä johtuen sillan korjaussuunnitelmat tarvitsi tehdä melko nopealla aikataululla. Syy näin nopeaan puun homehtumiseen ovat tiukentuneet ympäristösäädökset, joilla on kielletty aiemmin painekyllästyksessä käytetyt kromi ja arseeni. Jäljelle on jäänyt pelkkä kupari, joka ei yksinään vastusta kaikkia lahottajasieniä.

Kreosoottikyllästetty puutavara on myrkyllistä, mutta ei herkkää lahoamaan. Sitä voidaan vielä tällä hetkellä käyttää ammatti- ja teollisuuskäytössä sellaisissa paikoissa, joihin ihminen ei pääse vahingossa koskemaan, kuten vaikkapa sillan syrjälankkukansi erillisen suojakerroksen alla. Tosin siitä huolimatta joka siltaan ei tämäkään sovellu – kreosoottikyllästetyn puutavaran käyttö on pohjavesialueella kielletty.

1.2 Toimeksiantaja

AFRY on suunnittelu- ja konsultointiyhtiö, joka on suuntautunut muun muassa rakennetun ympäristön, teollisuuden sekä energia-alojen alueelle. Pääkonttori sijaitsee Tukholmassa, ja toimipaikkoja löytyy ympäri maailman. AFRY Finland on maassamme toimiva 2300 toimihenkilön yksikkö, ja toimistot ovat levittäytyneet ympäri Suomen.

1.3 Opinnäytetyön rajaus

Sillan suunnittelussa sovitetaan monta asiaa yhteen. Suunnitteluprosessin kulkuun ei tässä oteta kantaa, koska se olisi ihan oma aiheensa. Opinnäytetyö on rajattu esittämään yksinkertaisen puukantisen teräspalkkisillan mitoittamiseen tarvittavien rasiussuureiden laskeminen. Työssä on osa käsin laskentaa, ja apuna on käytetty ajanmukaista FEM-laskentaohjelmaa. Lopuksi sivutaan hieman mitoittamista, ja mitoituslaskelmien tulokset löytyvät liitteistä.

1.4 Opinnäytetyössä käytetty FEM-laskentaohjelma

FEM-laskentaohjelmia ovat esimerkiksi SOFiSTiK, STRAP, RFEM jne. Näillä saadaan tarkasteltua rakenteeseen tulevia rasituksia. Ohjelma ottaa huomioon seikkoja, joiden määrittämiseen käsin laskemalla menisi kohtuuttoman kauan. Ohjelman avulla päästään

lähemmäs todellisia tilannetta, ja saadut arvot ovat silloin usein pienempiä kuin olisi laskettu käsin. Tällöin päästään vähemmällä materiaalin käytöllä. Laskentaohjelman etuna on myös toistettavuus – samantyyppiset kuormitustapaukset on vaivattomampi monistaa seuraavassa kohteessa.

Suunnittelutoimistomme on aiemmin käyttänyt STRAP-ohjelmaa, mutta on nyt pikkuhiljaa siirtymässä SOFiSTiK-ohjelman käyttöön. Esimerkkisillan mukaista vastaavaa rakennetta ei ole aiemmin kyseisellä ohjelmalla vielä tehty, joten työmäärä oli hieman suurempi kuin seuraavissa projekteissa.

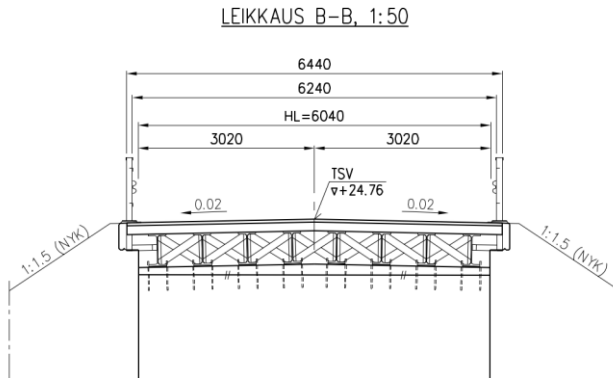
Laskentaohjelma sisältää kaksi osa: SOFiSTiK Structural Design ja SOFiPLUS. Structural Design sisältää materiaalitietojen, kuormitustapausten sekä yhdistelykertoimien syötön, itse laskennan, tulosten analysoinnin sisältäen graafiset tulosteet sekä 3D-visualisoinnin. Lisäksi ohjelmaan liittyvä SOFiPLUS on Autocad-liitäntä, jolla piirretään staattinen rakennemalli.

Kuormituksia voidaan syöttää koodina käsin ja/tai piirtää SOFiPLUS:an puolella. Käsin kirjoitetun koodin etu on se, että monet kuormitustapaukset ovat siirrettävissä helposti seuraavaan vastaavanlaiseen projektiin.

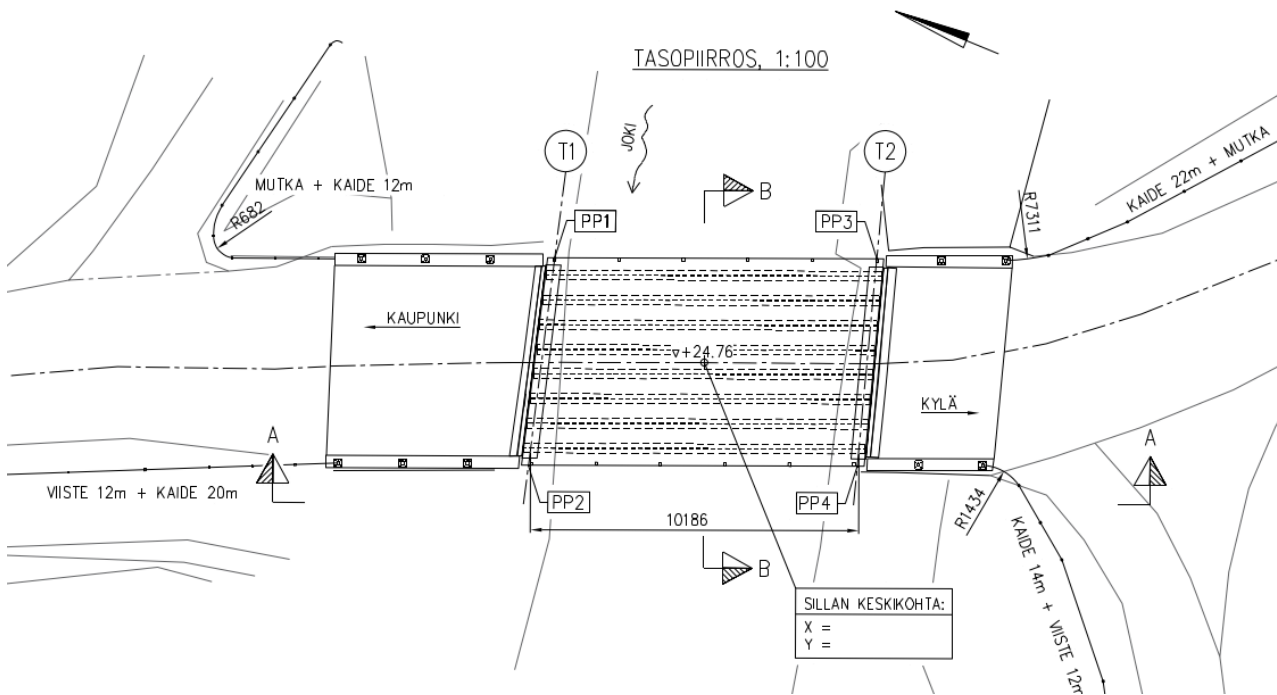
1.5 Suunniteltava siltakohde

Eräs vuonna 1961 valmistunut silta on peruskorjattu vuonna 1980 ja kansilankutus uusittu vuonna 2009. Sillan pääkannatinpalkit ovat teräspalkkeja. Näiden päällä on poikittaiset palkit sahatavarasta. Sillan päällysteenä on pituussuuntainen puulankutus.

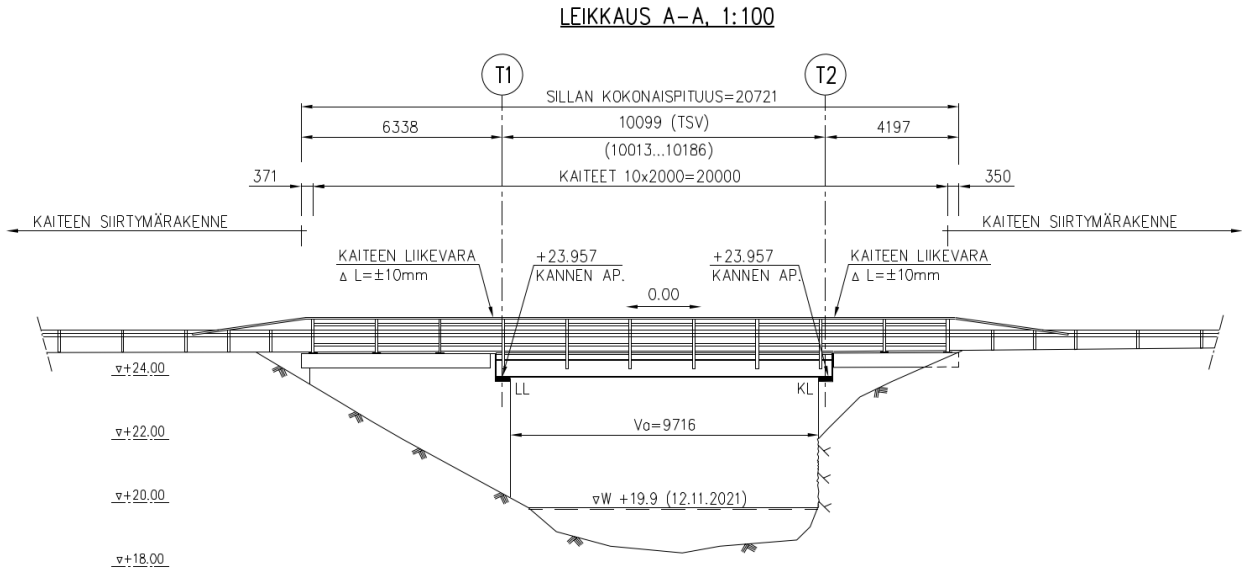
Yleistarkastuksessa on todettu palkkien ja puukannen vaihto tarpeelliseksi ja sillalle on asetettu samalla painorajoitus. Kuvissa 1–3 on esitetty sillan tasopiirros ja pituus- ja poikki-leikkaukset.



Kuvio 1. Sillan poikkileikkaus.



Kuvio 2. Sillan tasopiirros.



Kuvio 3. Sillan pituusleikkaus.

2 MITOITUSPERUSTEET

Mitoitusohjeet ovat muuttuneet esimerkissä olevan sillan valmistumisen jälkeen monta kertaa. Myöskään vastaavaa puumateriaalikokoa ei ole enää saatavilla. Rakenteen mitoitus päivitetään vastaamaan nykyisiä mitoitusohjeita. Ennen mitoittamista ratkaistaan sillalle tulevien kuormien tuomat rasitukset. Esitetyt laskelmat on laadittu seuraaviin ohjeisiin ja julkaisuihin perustuen: NCCI1, NCCI4, NCCI5 sekä NCCI-koodeissa viitattuihin eurokoodeihin.

2.1 Kuormitusyhdistelyt murto- ja käyttörajatiloissa

Kuormia, jotka eivät voi esiintyä samanaikaisesti, ei tarvitse ottaa huomioon kuormien yhdistelmissä, joista voimasuureet lasketaan. Tiesilloissa käytettävät yhdistelytaulukot murto- ja käyttörajatilassa löytyvät liitteistä. Seuraavassa listattuna jokaisen murtorajatilan kuormayhdistelmän määräävä muuttuva kuorma:

- MRT_0 = Omapaino (tulee aina), esijännitys
- MRT_1 = LM1 (telit, UDL, kevyt liikenne)
- MRT_2 = LM2
- MRT_3 = LM1 (telit, UDL + vaakakuorma)
- MRT_4 = Kevyt liikenne
- MRT_5 = Ruuhkakuorma
- MRT_6 = LM3
- MRT_7 = F_{wk} (tuulikuorma)
- MRT_8 = T_k (lämpötilakuorma)
- MRT_9 = BF (laakerikitka)
- MRT_10 = IL (jääkuorma)
- MRT_11 = TLEP (liikennekuorman maanpaine).

Suunnittelussa tarvitsee laskea vain ne kuormayhdistelyt, jonka sisältämiä kuormia voi sillalla esiintyä määrävänä. Tässä esitettävän sillan tapauksessa esimerkiksi kuormayhdistelmä MRT_11 jää pois, koska liikennekuorman maanpaine kohdistuu vain kannen molemmiin puolin sijaitseviin jo vuonna 1963 rakennettuihin otsamuureihin. Käytetyt murtorajatilan kuormayhdistelyt ovat liitteessä 1.

- MRT_0
- MRT_1
- MRT_2
- MRT_3
- MRT_6
- MRT_7
- MRT_8

On mahdollista, että lopulliseksi mitoittavaksi tekijäksi voi tulla myös käyttörajatilan jokin kuormayhdistelyistä (liite 2). Käyttörajatilan esimerkkisillassa mitoittavaksi kuormayhdistelyksi löytyi KRT_1b.

- KRT_1a
- KRT_2a
- KRT_3a
- KRT_6a
- KRT_7a
- KRT_8a
- KRT_1b
- KRT_7b
- KRT_8b
- KRT_1c

Numeroiden merkitys on käyttörajatioissa sama kuin murtorajatilassa. Kirjaintunnisteet:

a = ominaiskäyttörajatila (jännitykset, laakerien ja liikuntasauvojen liikkeet)

b = tavallinen käyttörajatila (halkeilu, taipumat)

c = pitkäaikainen käyttörajatila (halkeilu, pitkäaikaiset siirtymät).

2.2 Kuormitus

Siltojen kuormien ja suunnitteluperusteiden ohjeiden avulla on saatu seuraavat kuormat kyseiseen siltakohteeseen liittyen. Omien painojen arvot löytyvät suoraan ohjeistuksista (NCCI 1, 2017, s. 8). Käsin lasketut kuormien arvot esitetään myöhemmin.

- pysyvät kuormat
 - rakenteiden omapaino
 - teräs $78,5 \text{ kN/m}^3$
 - puu 6 kN/m^3
 - päällystevaraus 1 kN/m^2
- muuttuvat kuormat
 - liikennekuormat LM1, LM2 ja LM3
 - jarrukuorma = $389,7 \text{ kN}$
 - tuulikuormat
 - kun kannella on liikennettä $q_{wk} = 1,69 \text{ kN/m}^2$
 - kun kannella ei ole liikennettä $q_{wk} = 0,97 \text{ kN/m}^2$
 - lämpötilakuormat
 - lämpölaajenema $\Delta T_{M,exp} = +26 \text{ }^\circ\text{C}$
 - lämpökutistuma $\Delta T_{M,con} = -42 \text{ }^\circ\text{C}$
 - epätasainen lämpötila yläpinta $\Delta T_{M,heat} = 15 \text{ }^\circ\text{C} / \Delta T_{M,cool} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
- väsymistarkastelu
 - väsytykskaavio FLM3

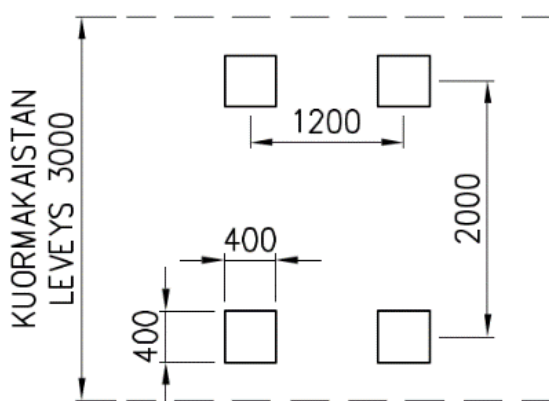
2.3 Kuormakaaviot

Kuormakaaviot voidaan jakaa kahteen kategoriaan: liikennekuormakaavioihin LM1...LM4 ja väsytytkuormakaavioihin FLM1...FLM5. Väsytytkuormakaavioita FLM1, FLM2 sekä FLM3 käytetään kuormakaavioiden aiheuttamien maksimi- ja minimijännitysten määrittämiseen. Kaaviot FLM4 ja FLM5 ovat jännitysvaihteluvälin spektrin määrittämiseen. Ensisijaisesti suositellaan käytettäväksi väsytytkuormakaavioita FLM3, niin tehtiin tässäkin työssä.

Esimerkin sillassa käytettiin kuormakaavioita LM1, LM2 ja LM3. LM4 on tungoskuorma, ja se rajattiin tässä merkityksettömänä pois. NCCI 1 -ohjeissa (2017, s. 10) sillan koko kansi mitoitetaan liikennekuormakaavioille. Kaistoja tulee se määrä mitä sillalle leveyssuunnassa mahtuu. Kansi jaetaan kolmen metrin leveisiin kuormakaistoihin. Mikäli hyödyllinen leveys on 5,4...6 metriä asetetaan kannelle kaksi yhtä leveää kuormakaistaa. Kun hyödyllinen leveys on vähemmän kuin 5,4 metriä, kannelle asetetaan yksi kolme metriä leveä kuormakaista. Kuormat sijoitetaan siten, että saavutetaan määräävä vaikutus.

2.3.1 Kuormakaavio LM1

Kuormakaavioilla LM1 mitoitetaan rakenteet murto- ja käyttörajatiloissa sekä tarkistetaan alusrakenteiden kantavuus. Kuormakaavio LM1 koostuu telikuormista sekä kuormakaistoille tasaisesti jakautuneista kuormista. Telien akseliväli on 1,2 metriä ja akselien rengasväli on 2,0 metriä. Kosketuspintana on 0,4 x 0,4 metrin kokoinen neliö. Kuviossa 4 on esitetty telikuormien pyörien sijoittelu.



Kuvio 4. Telikuormien pyörien sijoittelu.

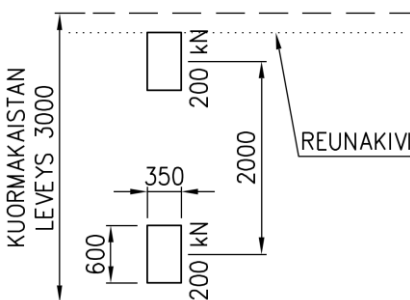
Tasaisesti jakautuneiden kuormien lyhenne on UDL. Esimerkkisillalle mahtuu kaksi kaistaa, joten taulukosta 1 poimitaan laskentaan kaista nro 1 ja 2.

Taulukko 1. Kuormakaavion LM1 kuormien ominaisarvot α -kertoimilla kerrottuna (NCCI 1, 2017, s. 11).

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

2.3.2 Kuormakaavio LM2

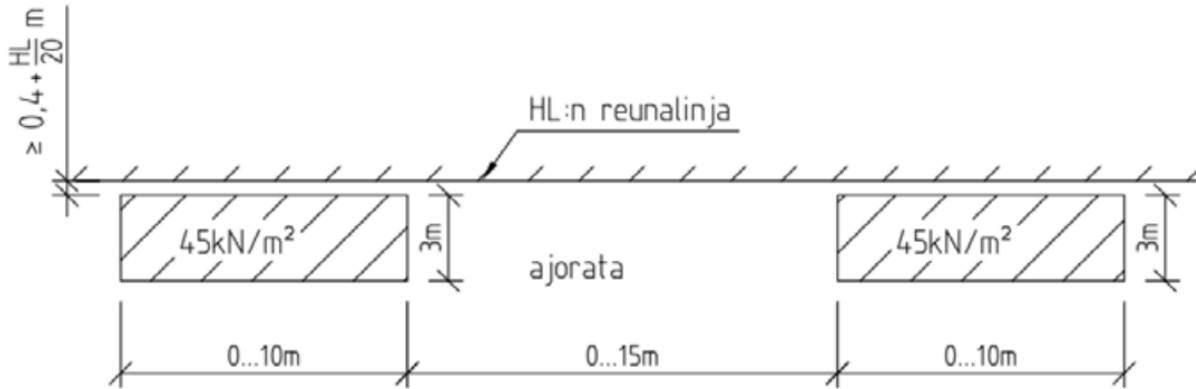
Kuormakaavio LM2 koostuu kuormakaistoille sijoitettavasta akselikuormasta, jossa yhden pyörän kuorma on 200 kN. Akseli koostuu kahdesta 2 metrin etäisyydellä toisistaan olevasta pyöräkuormasta. Kosketuspintana on 0,35 x 0,6 metrin kokoinen suorakulmio (kuvio 5). Pyöräkuorma voi sijaita reunakiven vieressä. LM2 harvemmin aiheuttaa suunniteltavissa silloissa mitoitettavaa vaikutusta, mutta siitä huolimatta se on yleensä kuitenkin laskettava.



Kuvio 5. Pyöräkuorma LM2.

2.3.3 Kuormakaavio LM3

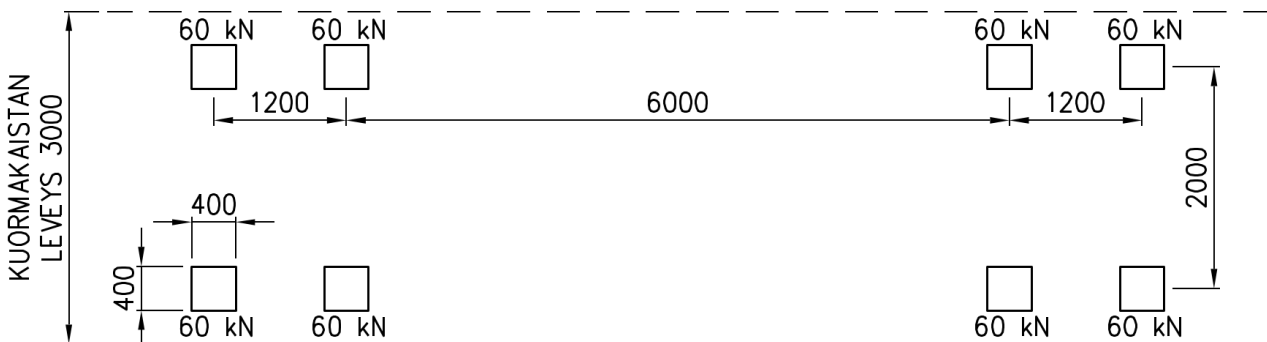
Kuormakaaviolla LM3 mitoitetaan rakenteet murtorajatilassa ja käyttörajatilassa (ominaisyhdistely) sekä tarkistetaan alusrakenteiden kantavuus. Kuormakaavio sijaitsee yhdellä kaistalla. Kaavio on esitetty seuraavalla sivulla kuviossa 6 (NCCI 1, 2017, s. 12).



Kuvio 6. Kuormakaavio LM3 (NCCI 1, 2017, s. 12).

2.3.4 Väsytkuormakaavio FLM3

NCCI 1:ssä (2017, s. 15) suositetaan käyttämään väsytkuormakaaviota FLM3 väsymismitoituksessa. Väsytkuormakaavio FLM3 koostuu kuormakaistoille sijoitettavasta neljästä akselikuormasta, jossa yhden pyörän kuorma on 60 kN. Akselivälit ovat 1,2 + 6 + 1,2 metriä ja akselien rengasväli on 2,0 metriä. Kosketuspintana on 0,4 x 0,4 metrin kokoinen neliö. (kuvio 7).



Kuvio 7. Kuormakaavio FLM3.

NCCI 1:ssä (2017, s. 15) väsytySKUORMAKAAVION aiheuttamat maksimi- ja minimijännitykset $\sigma_{FLM,max}$ ja $\sigma_{FLM,min}$ määritetään sijoittamalla kaavion kuormat sillalle siten, että ääriarvot saavutetaan. Saatuja jännityksiä verrataan kestävyysarvoihin materiaalikohtaisissa soveltamisohjeessa esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Esimerkin sillalla kulkee raskasta liikennettä 5 ajoneuvoa vuorokaudessa (Taitorakennerekisteri, 2018), joten se kuuluu liikenneluokkaan 4 (Taulukko 2).

Taulukko 2. Ajoneuvojen lukumäärä väsytySKUORMAKAAVIOLLE FLM3 (NCCI 1, 2017, s. 16).

Liikenteen luokat (suluissa on esitetty kriteerit liikenteen luokan valinnalle: raskaiden ajoneuvojen määrä/vrk/suunta sillan käyttöiän alussa)		N_{obs} vuotta ja hitaan liikenteen kaistaa kohti (Laskennassa käytetty raskaiden ajoneuvojen määrä/vuosi/suunta)
1	Moottori-, moottoriliikenne- ja muut tiet, joilla suuntaa kohti on vähintään 2 kaistaa, ja joilla kuorma-autoista muodostuva liikennemäärä on suuri (> 1200 raskasta ajoneuvoa /vrk/suunta)	$2,0 \times 10^6$
2	Moottori-, moottoriliikenne- ja muut tiet, joilla kuorma-autoista muodostuva liikennemäärä on keskimääräinen (200...1200 raskasta ajoneuvoa /vrk/suunta)	$0,5 \times 10^6$
3	Päätiet, joilla kuorma-autojen liikennemäärä on vähäinen (50...200 raskasta ajoneuvoa /vrk/suunta)	$0,125 \times 10^6$
4	Paikallistiet, joilla kuorma-autojen liikennemäärä on vähäinen (< 50 raskasta ajoneuvoa /vrk/suunta)	$0,05 \times 10^6$

2.4 Jarrutus- ja kiihdytyskuormat

Ajoneuvon jarrutuksen ja kiihdytyksen aiheuttaman vaakasuora jarrukuorma Q_{lk} vaikuttaa pituussuuntaisesti ajoradalla. Kuorman oletetaan jakaantuvan tasaisesti koko ajoradan leveydelle. Kuormaa määrittäessä haetaan suurinta mahdollista arvoa. Kuorman ominaisarvo Q_{lk} lasketaan kaavalla 1 (NCCI 1, 2017, s.12) Kuormakaavion ominaisarvot löytyvät taulukosta 3.

Taulukko 3. Kuormakaavion ominaisarvot (SFS-EN 1991-2, 2004, s. 32).

Sijainti	Telikuorma	Tasan jakautunut kuorma
	Akselikuormat Q_{lk} (kN)	q_{lk} (tai q_{rk}) (kN/m ²)
Kuormakaista nro 1	300	9
Kuormakaista nro 2	200	2,5
Kuormakaista nro 3	100	2,5
Muut kuormakaistat	0	2,5
Kuormakaistojen ulkopuolinen alue (q_{rk})	0	2,5

$$Q_{lk} = 0,6 \alpha_{Q1} (2Q_{1k}) + 0,1 \alpha_{q1} q_{1k} w_1 L \quad (1)$$

Missä

$$\alpha_{Q1} = 1,0 \text{ (kuormakaistan nro 1 kerroin)}$$

$$Q_{1k} = 300 \text{ kN (kuormakaista nro 1)}$$

$$\alpha_{q1} = 1,0 \text{ (kuormakaistan nro 1 kerroin)}$$

$$q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2 \text{ (kuormakaista nro 1)}$$

$$w_1 = 3,0 \text{ m (kuormakaistanleveys)}$$

$$L = 11,0 \text{ m (sillan kannen pituus)}$$

Sijoitetaan kaavaan

$$Q_{lk} = 0,6 * 1,0 * (2 * 300 \text{ kN}) + 0,1 * 1,0 * 9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 3,0 \text{ m} * 11,0 \text{ m} = 389,7 \text{ kN}$$

Jarrukuorman kertoimet pysyvät aina samana, ja Suomessa käytetään jarrukuorman ylärajana 500 kN (NCCI 1, 2017, s. 12), joten kaavan voi tyypistää seuraavaan muotoon:

$$Q_{lk} = 360 \text{ kN} + 2,7 * L \text{ [kN]} = 360 \text{ kN} + 2,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 11,0 \text{ m} = 389,7 \text{ kN} \leq 500 \text{ kN}$$

Vinosta jarrutuksesta tai sivuluisusta aiheutuva poikittainen kuorma on 25 % pituussuuntaisesta jarru- tai kiihdytyskuormasta.

Edellä laskettu jarrukuorman arvo syötetään myöhemmin muodostettavaan rakennemalliin FEM-laskentaohjelmassa. Ohjelma laskee jarrukuormien tuomat rasitukset sekä mahdolliset rakenteiden siirtymät. Mitoituksessa jarrukuorman aiheuttama päällysrakenteen laskennallinen vaakasiirtymä saa olla enintään 20 mm.

2.5 Tuulikuorma

Tuulennopeuden modifioimattomalle perusarvolle $v_{b,0}$ käytetään arvoa 23 m/s.

Pienten ja keskisuurten tavanomaisten siltojen suunnittelussa tuulikuormat lasketaan seuraavalla tavalla. Siltaan kohdistuvan poikittaisen tuulenpaineen arvo saadaan maastoluokan, siltakannen leveyden ja korkeuden suhteen (b/d_{tot}) sekä siltakannen painopisteen etäisyyden maan pinnasta (z_e) mukaan (taulukko 4). Taulukon arvoista voidaan interpoloida tuulenpaineen arvo tarkasteltavan kohteen olosuhteita vastaavaksi. Yleensä voidaan käyttää maastoluokan II arvoja, ellei asianomainen viranomainen hankekohtaisesti toisin määrää. (NCCI 1, 2017, s. 42.)

Taulukko 4. Siltaan kohdistuva tuulen paine (kN / m^2) kun tuulen nopeus on 23 m/s. (NCCI 1, 2017, s. 40).

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

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

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

Kaiteiden tuulen läpäisevyys vaikuttaa siltaan kohdistuvaan tuulenpaineeseen. Siltakan-
nen korkeuteen d_{tot} huomioidaan myös kaiteet taulukon 5 mukaisesti.

Taulukko 5. Siltakannen korkeuden määrittäminen (NCCI 1, 2017, s. 41).

	toisella puolella	molemmilla puolin
Avoin kaide (> 50% avoin):	$d + 0,3$ [m]	$d + 0,6$ [m]
Umpikaide:	$d + d_1$ [m]	$d + 2 \times d_1$ [m]
Liikenteen kanssa:	$d + d^*$ [m]	

d = siltakannen korkeus, d_1 = umpikaiteen korkeus, d^* = liikenteen korkeus

Lasketaan siltaan kohdistuvan tuulenpaineen q_{wk} arvo interpoloimalla, kun kannella on liikennettä:

$$q_{wk} = 2,23 + \frac{0,93 - 2,23}{5 - 0,5} * (2,38 - 0,5) \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right] = 1,69 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

missä

$b = 6,54$ m siltakannen leveys

$d = 0,75$ m siltakannen korkeus

$d^* = 2,0$ m tieliikenteen korkeus

$d_{\text{tot}} = d + d^* = 0,75 \text{ m} + 2,0 \text{ m} = 2,75 \text{ m}$

$b / d_{\text{tot}} = 2,38$

$Z_e = 5,0$ m siltakannen painopisteen etäisyys maasta ≤ 20 m

Lasketaan siltaan kohdistuvan tuulenpaineen q_{wk} arvo interpoloimalla, kun kannella ei ole liikennettä:

$$q_{wk} = 2,23 + \frac{1,21 - 2,23}{4 - 0,5} * (4,84 - 0,5) \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right] = 0,97 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

missä

$b = 6,54$ m siltakannen leveys

$d = 0,75$ m siltakannen korkeus

$d_{\text{tot}} = d + 0,6 \text{ m} = 0,6 \text{ m} + 0,75 \text{ m} = 1,35 \text{ m}$

$b / d_{\text{tot}} = 4,84$

$Z_e = 5,0$ m siltakannen painopisteen etäisyys maasta ≤ 20 m

2.6 Lämpötilakuorma

Lämpökuormat riippuvat päällysrakenteen rakennetyypistä sekä siltapaikan varjolämpötilojen ääriarvoista.

Siltojen päällysrakenteet on jaettu seuraavasti:

- tyyppi 1: teräspäällysrakenne
- tyyppi 2: Liittopäällysrakenne
- tyyppi 3: Betonipäällysrakenne.

Esimerkissä olevan sillan rakennetyyppi on verrattavissa teräspäällysrakenteiseen, joten rakennetyypiksi valitaan tyyppi 1.

NCCI 1:n (2017, s. 42) mukaan liittopalkkisilloilla maksimilämpötila on 16 °C lämpimämpi kuin varjossa mitatut ilman maksimilämpötilat. Suomen lämpötilojen ääriarvot löytyvät dokumentin lopussa olevasta karttaliitteestä. Kartasta katsottuna siltapaikan ääriarvot ovat $T_{\max} = 32 \text{ °C}$ ja $T_{\min} = -36 \text{ °C}$.

Joten siltarakenteen ääriarvot ovat

$$T_{M,\max} = 32 \text{ °C} + 16 \text{ °C} = 48 \text{ °C}$$

$$T_{M,\min} = -36 \text{ °C} + 16 \text{ °C} = -20 \text{ °C}$$

Sillan alkulämpötilaksi T_0 voidaan otaksua suositusarvo (10 °C) kun alkulämpötila ei ole ennakoitavissa, muussa tapauksessa valitaan arvioitu alkulämpötila. (SFS-EN 1991-1-5, 2004, s. 54)

$$\Delta T_{M,\text{exp}} = 48 \text{ °C} - 10 \text{ °C} = -38 \text{ °C} \text{ (lämpölaajenemista aiheuttava lämpötilan muutos)}$$

$$\Delta T_{M,\text{con}} = -20 \text{ °C} - 10 \text{ °C} = -30 \text{ °C} \text{ (lämpökutistumista aiheuttava lämpötilan muutos)}$$

Kantavan rakenteen lisäksi myös kannen päällystepaksuuden vaikutus otetaan huomioon. Tässä yleensä voidaan käyttää lineaarista lämpötilaeroa. Lämpötilaero voidaan määrittää taulukon 6 mukaan. Taulukossa esitetyt arvot perustuvat 50 mm:n päällystepaksuuteen. Eri päällystepaksuuksille löytyy erillinen korjauskerrointaulukko (NCCI 1, 2017, s. 44). Esimerkkisillan syrjälankkukannen päällysteeksi on valittu 50 mm paksuinen kulutuslankutus, joten $\Delta T_{M,heat} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $\Delta T_{M,cool} = 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Taulukko 6. Lineaariset pystysuuntaiset lämpötilaerot (NCCI 1, 2017, s. 44).

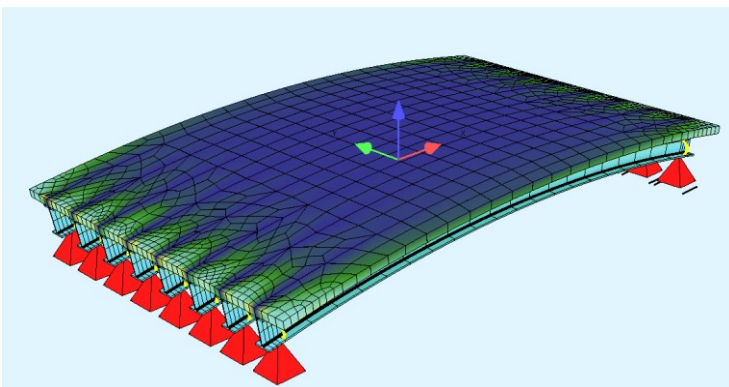
Päällysrakennetyyppi:	Yläpinta lämpimämpi $\Delta T_{M,heat}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Alapinta lämpimämpi $\Delta T_{M,cool}$ ($^{\circ}\text{C}$)
Tyyppi 1: Teräspäällysrakenne	18	13
Tyyppi 2: Liittöpäällysrakenne	15	18
Tyyppi 3:		
Betonipäällysrakenne		
betonikotelo	10	5
betonipalkki	15	8
betonilaatta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

Lämpötilan muutos ja lämpötilaero yhdistellään mitoitus varten kaavoilla 2 ja 3 (NCCI 1, 2017, s. 44).

$$\Delta T_{M,heat} \text{ (tai } \Delta T_{M,cool}) + 0,35 * \Delta T_{M,exp} \text{ (tai } \Delta T_{M,con}) \quad (2)$$

$$0,75 * \Delta T_{M,heat} \text{ (tai } \Delta T_{M,cool}) + \Delta T_{M,exp} \text{ (tai } \Delta T_{M,con}) \quad (3)$$

Yhdistelyt voidaan sijoittaa FEM-laskentaohjelmaan, joka ratkaisee rakenteelle tulevat voimasuureet. Kuviossa 8 on visualisoitu tilanne, jossa rakenteen yläpinta on alapintaa lämpimämpi.



Kuvio 8. 3D-visualisointi (SOFISTIK) rasiuksista, kun yläpinta on alapintaa lämpimämpi.

2.7 Teräspalkkien ja puukannen materiaaliominaisuudet

Osa suunnittelijan ammattitaitoa on, että hän osaa arvioida rakenteen kestävyuden kannalta riittävän rakennepaksuuden. Myöskin aiemmin suunnitellusta melkein vastaavasta kohteesta voi päätellä, millaisiin tuloksiin milläkin ratkaisulla saatetaan päästä. Mitä enemmän on aikaa kokeilla eri rakenteita, voi saavuttaa edullisempia rakenneratkaisuja ja sitä kautta suunnittelupöydällä on säästetty itse rakentamisen materiaalikustannuksissa.

Aiemman kokemuksen pohjalta valittiin kannen kantavaksi rakenteeksi seuraavasti:

- rakenneteräs HEB550
 - teräslaatu S355J2
 - hitsausluokka B
 - 8 kpl palkkeja 770 mm jaolla
- rakennepuutavara 150 x 50 mm
 - sahatavara C24
 - toteutetaan syrjälankkukantena
- kulutuslankutus 100 x 50 mm
 - sahatavara C24
 - ei mitoiteta kantavana rakenteena, tuo lisää omaa painoa.

Mikäli mitoituksessa todetaan jonkin rakennusosan olevan riittämätön kestävyuden kannalta, vaihdetaan se johonkin toiseen ja lasketaan uudelleen.

2.8 Materiaalien poikkileikkaustiedot

Käsin laskiessa haetaan tarvittavat tarkemmat materiaaliominaisuudet taulukoista. Laskentaohjelmissa yleisimmin käytetyt materiaalit löytyvät jo valmiiksi. ja ohjelma laskee niillä arvoilla suoraan.

Materiaalien arvoja löytyy alan kirjallisuudesta, valmistajilta sekä joistakin FEM-laskentaohjelmista. Seuraavassa taulukossa on SOFiSTiK-ohjelman valmiit materiaaliarvot teräspalkkien osalta.

Taulukko 7. Teräspalkkien poikkileikkauksen materiaaliominaisuudet (SOFiSTiK).

Mat 1 S 355 (EN 1993)

Young's modulus	E	210000	[N/mm ²]	Safetyfactor	1.00	[-]
Poisson's ratio	μ	0.30	[-]	Yield stress	fy	355.00 [MPa]
Shear modulus	G	80769	[N/mm ²]	Compressive yield	fyc	355.00 [MPa]
Compression modulus	K	175000	[N/mm ²]	Tensile strength	ft	490.00 [MPa]
Nominal Weight	γ	78.5	[kN/m ³]	Compressive strength	fc	490.00 [MPa]
Mean density	ρ	7850.0	[kg/m ³]	Ultimate strain		100.00 [o/oo]
Elongation coefficient	α	1.20E-05	[1/K]	relative bond coeff.		0.00 [-]
max. thickness	t-max	40.00	[mm]	EN 1992 bond coeff.	k1	0.00 [-]
Safety sectional design	γ -M0	1.00	[-]	Hardening modulus	Eh	0.00 [MPa]
Safety stability design	γ -M1	1.00	[-]	Proportional limit	fp	355.00 [MPa]
Safety rupture	γ -M2	1.25	[-]	Dynamic allowance	σ -dyn	0.00 [MPa]

Stress-Strain for serviceability	ϵ [o/oo]	σ -m[MPa]	E-t[N/mm ²]
Is also extended beyond the defined stress range	1000.000	490.00	
	100.000	490.00	
	1.690	355.00	13
	0.000	0.00	2100
	-1.690	-355.00	13
	-100.000	-490.00	
	-1000.000	-490.00	
Safetyfactor			1.

Stress-Strain for ultimate load	ϵ [o/oo]	σ -u[MPa]	E-t[N/mm ²]
Is also extended beyond the defined stress range	1000.000	490.00	
	100.000	490.00	
	1.690	355.00	13
	0.000	0.00	2100
	-1.690	-355.00	13
	-100.000	-490.00	
	-1000.000	-490.00	
Safetyfactor			1.

Materiaalien arvoja löytyy alan kirjallisuudesta, valmistajilta sekä joistakin FEM-laskentaohjelmista. Seuraavassa taulukossa on SOFiSTiK-ohjelman valmiit materiaaliarvot puumateriaalin osalta.

Taulukko 8. Puukannen poikkileikkauksen materiaaliominaisuudet (SOFiSTiK).

Mat 2 D 24 C1.1 (EN 1995)

Young's modulus	E	10000	[N/mm ²]	Safetyfactor	1.30	[-]
Poisson's ratio	μ	0.00	[-]	Bending strength	fm,0	24.00 [MPa]
Shear modulus	G	630	[N/mm ²]	Bending strength	fm,90	24.00 [MPa]
Compression modulus	K	223	[N/mm ²]	Tensile strength	ft,0	14.00 [MPa]
Nominal Weight	γ	6.0	[kN/m ³]	Tensile strength	ft,90	0.60 [MPa]
Mean density	ρ	485.0	[kg/m ³]	Compress. strength	fc,0	21.00 [MPa]
Elongation coefficient	α	0.00E+00	[1/K]	Compress. strength	fc,90	4.90 [MPa]
Young's modulus	E-90	670	[N/mm ²]	Shear strength	fv,kcr	2.47 [MPa]
Shear modulus	G-90	630	[N/mm ²]	Shear strength	fv,T	3.70 [MPa]
Deformation coefficient	kdef	0.60	[-]	Shear strength	fv,p1	2.47 [MPa]
Permanent combination	kmod	0.60	[-]			
Long term combination		0.70	[-]			
Middle term combination		0.80	[-]			
Short term combination		0.90	[-]			
Very short term combination		1.10	[-]			

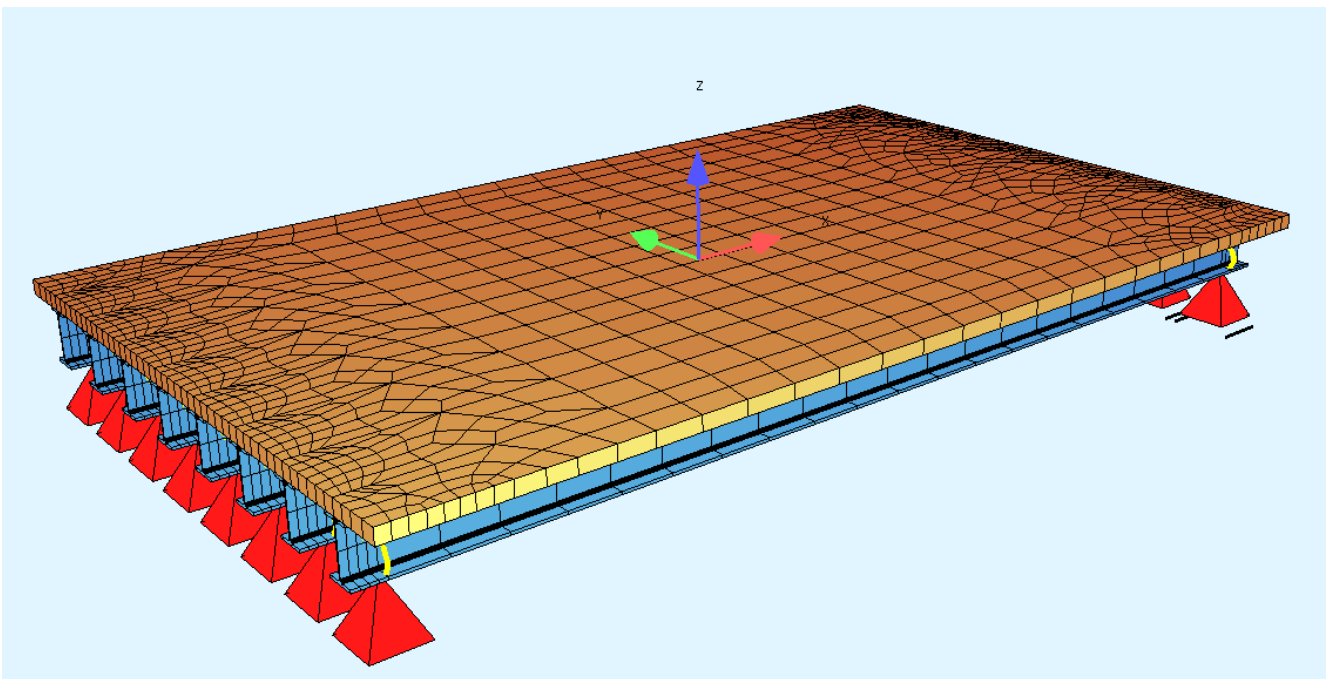
Stress-Strain for ultimate load	ε [o/oo]	σ-u [MPa]	E-t [N/mm ²]
Is only valid within the defined stress range	1.400	14.00	100
	0.000	0.00	100
	-2.100	-21.00	
	-1000.000	-21.00	
	Safetyfactor		1.

3 RAKENNEANALYYSIT

Rakenneanalyysi on kuormien vaikutusten määrittämistä fyysisille rakenteille ja niiden komponenteille. Rakenneanalyysillä tähdätään rakenteen kestävyys- ja käyttökelpoisuuden todentamiseen ilman fyysisiä testejä.

3.1 Rakennemallit

SOFiSTiK-rakennemallilla on ratkaistu teräspalkkien voimasuureet, taipumat ja tukireaktiot. Puukansi on mallinnettu ortotrooppisella laattaelementeillä siten, että sillä on taivutusjäykkyyttä vain sillan poikkisuunnassa. Ohjelmassa on mahdollista tarkastella luotua rakennemallia 3D-näkymässä (kuvio 9).



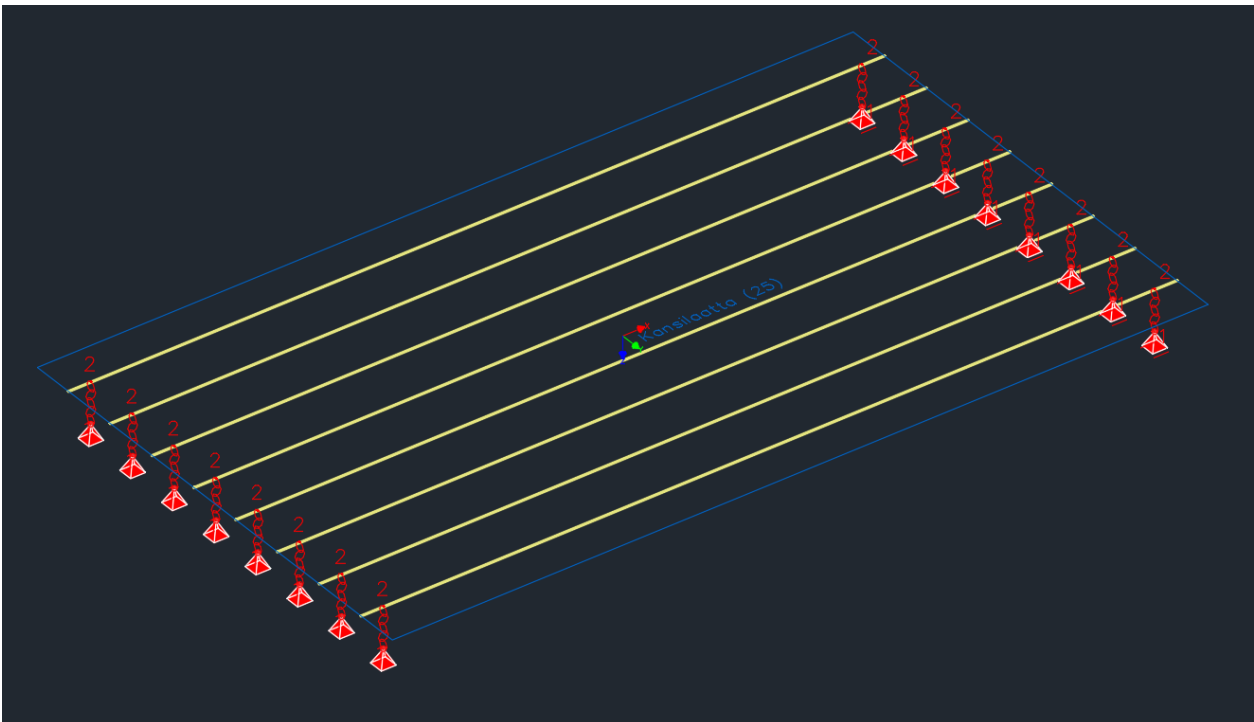
Kuvio 9. Staattinen havainnollistava 3D-malli (SOFiSTiK).

Mitoitettavan sillan pisimmän teräspalkin tukipisteiden väli on 10 186 mm ja palkki jatkuu 200 mm molemmin puolin tukipisteiden jälkeen. Rakennemallissa tukiväli on mitoitettu hieman pidempänä (10 400 mm). Samoin tukien jälkeen pituus todellista suurempi (300 mm). Joskus tukiväli voi syystä tai toisesta suunnittelussa muuttua, joten tällä tavalla ollaan mitoittamisen suhteen varmallalla puolella. Seuraavan sivun kuvissa 10–11 esitetty SOFiPLUS:lla piirretty rakennemalli.

Keltaiset viivat kuvastavat teräspalkkeja, sininen suorakaide puukantta ja punaiset ovat tukipisteitä. Toisen pään tuella sillan pituussuuntainen liike vapautettu.

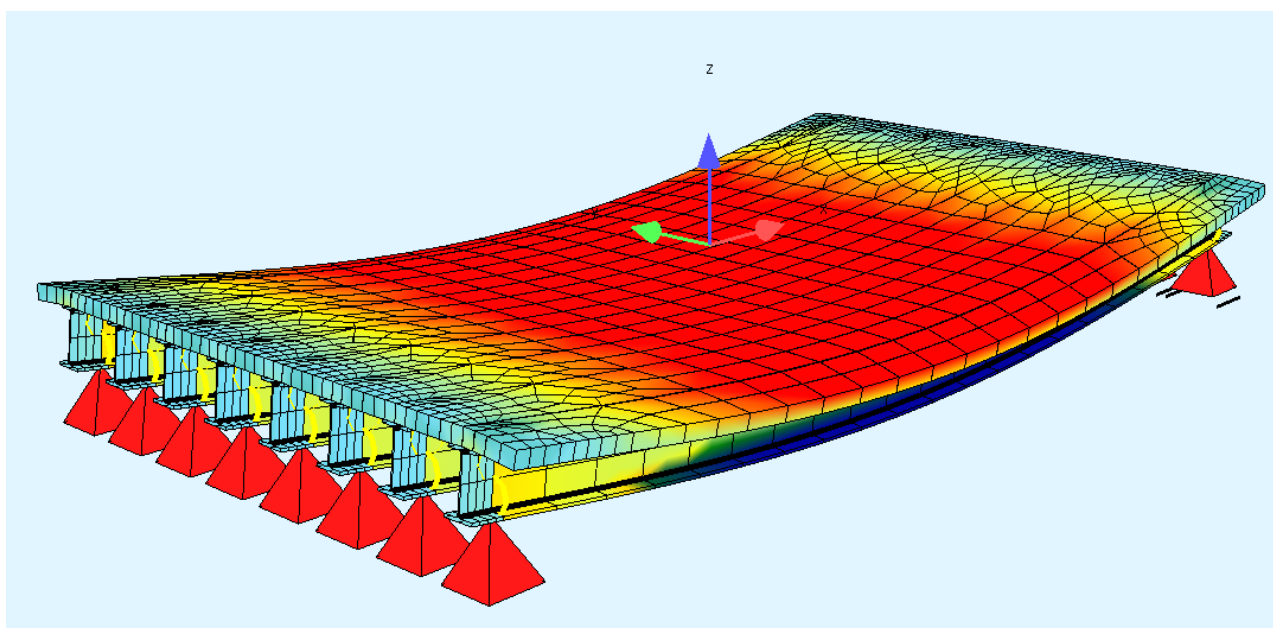


Kuvio 10. Staattinen rakennemalli tasokuvassa (SOFIPLUS).

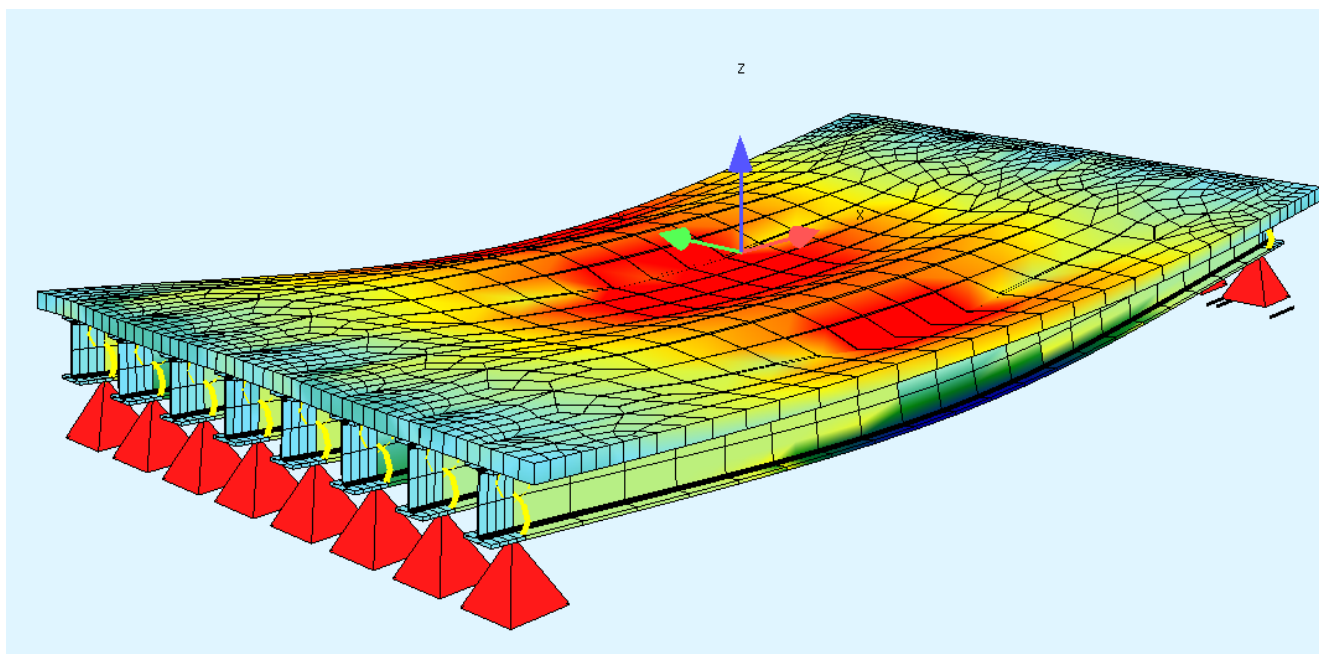


Kuvio 11. Staattinen rakennemalli 3D-näkymässä (SOFIPLUS).

Seuraavaksi rakennemalli ladetaan SOFiSTiK:iin ja tarkastellaan, onko rakennemalli toimiva. Ohjelmassa on animaatio-ominaisuus, jolla näkee rasitukset liioiteltuna. Animaatio havainnollistaa hyvin, onko muodostettu rakennemalli toimiva. (kuviot 12 ja 13.)



Kuvio 12. 3D-visualisointi, kuormitustapaus syötetyistä omista painoista (SOFiSTiK).



Kuvio 13. 3D-visaulisointi, kuormitustapaus LM1 telit, kaistasijoittelu jommankumman te-liakselin toisen pään pyörät kulkevat reunimmaisen palkin keskellä (SOFiSTiK).

3.2 Kuormien sijoittelu

FEM-laskentaohjelmiin on mahdollista koodata kuormien ylijuoksutus rakenteen yli. Siltojen tapauksissa ohjelma siis "ajelee" kannen päällä mahdollisilla annetuilla reunaehdoilla, ja lopuksi löydetään suurimmat rasitukset. Aikataulullisista syistä ei tälle suunniteltavalle sillalle yliajelua koodattu. Päättelämällä ja kokemuksen pohjalta kuormien sijoittelu valittiin siten, että saavutettiin määräävä vaikutus.

Liikennekuormat LM1, LM2 ja FLM3 ovat rengaskuorman mukaisina pistekuormina. Joskin kuormat olisi voinut määritellä myös annettujen kosketuspinta-alojen mukaan. Pistekuormat tuottavat kuitenkin varmemman lopputuloksen.

Rakennemalli on tehty siten, että rakenteiden omapaino + päällystevaraus 1 kN/m^2 on mukana automaattisesti kaikissa kuormitustapauksissa. Kuormat syötettiin ohjelmaan siten, että osa on rakennemalliin koodattua ja osa on piirretty SOFiPLUS:an puolella. Kuviossa 14 näkyy hieman esimerkkikoodia.

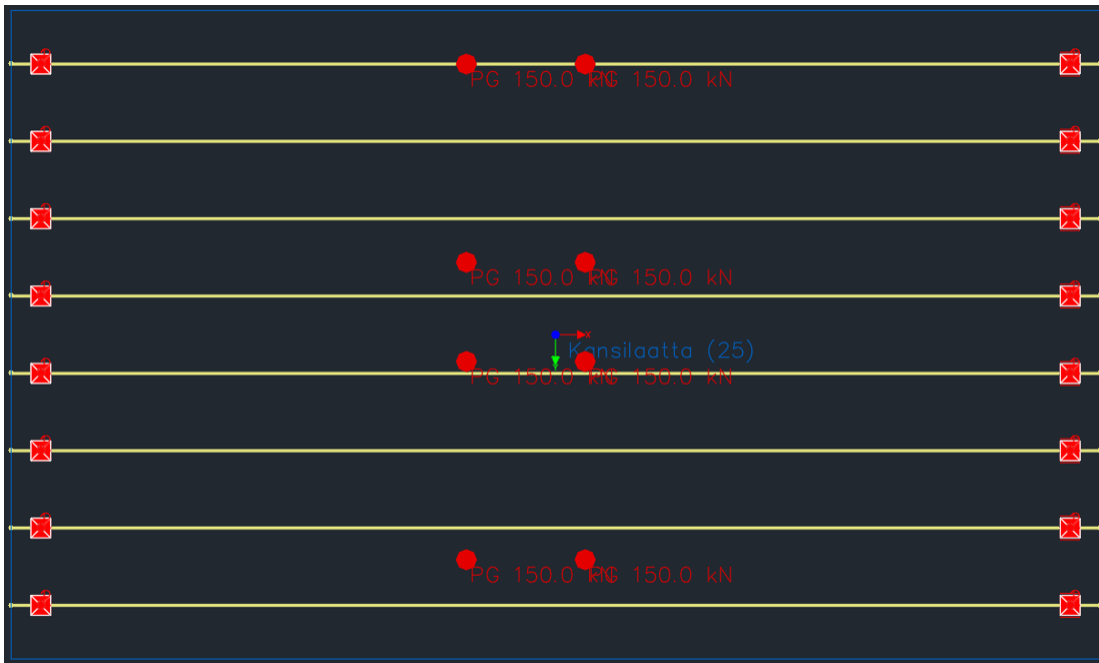
```

1 +prog sofiload urs:19.2
2 HEAD Muuttujat
3
4
5 sto#P1 (-(0.15+0.05)*0.575*6) $reunauloke (syrjalankkukansi+kansilautoitus)
6 sto#P2 (-0.5) $kaide
7 sto#P3 (-0.05*6) $kansilautoitus
8 sto#M1 (-(0.15+0.05)*0.575*6*(0.575/2)) $reunauloke momentti (syrjalankkukansi+kansilautoitus)
9 sto#M2 (-0.5*0.575) $kaide momentti
10 sto#L 11 $Sillan pituus
11 sto#HL 6.1 $Sillan hyotyileveys/ ajoneuvotien leveys
12
13
14 END
15
16
17 +prog sofiload urs:19.1
18 HEAD Kuormat
19
20 LC 99 type G1 titl 'Omapaino automaattinen' DLZ -1
21
22 LC 1 type G2 titl 'Omapaino muut'
23
24 beam grp 401 type PZZ #P1 reft null
25 beam grp 403 type PZZ #P1 reft null
26 beam grp 401 type MXX #M1 reft null
27 beam grp 403 type MXX -#M1 reft null
28
29 LC 2 type G3 titl 'Paallysteet'
30
31 quad grp 404 type PZZ #P3
32
33 LC 3 type G1 titl 'Kaiteet'
34 beam grp 401,403 type PZZ #P2 reft null
35 beam grp 401 type MXX #M2 reft null
36 beam grp 403 type MXX -#M2 reft null
37

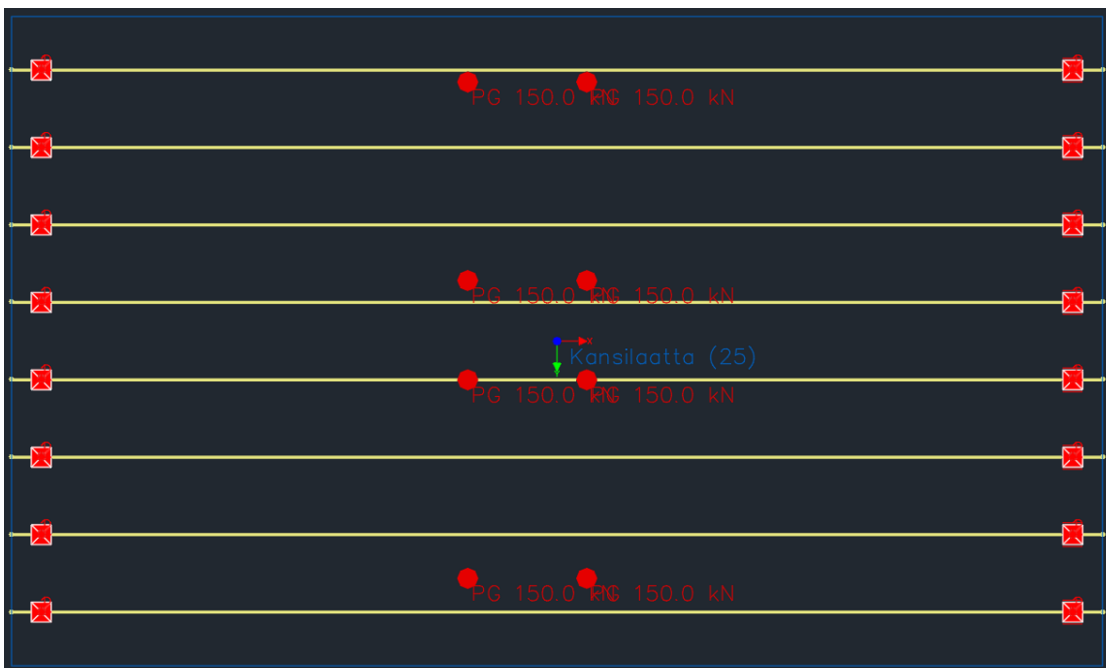
```

Kuvio 14. Omapaino sekä päällystevaraus koodattuna (SOFiSTiK).

Ensimmäisellä sijoittelulla tarkastellaan LM1:n mukaisia telipyöräkuormien tuomia rasituksia kannen keskialueella. Kuviossa 15 telit on laitettu kulkemaan reunimmaisen palkin keskellä ja kuviossa 16 jonkin keskemällä olevan palkin keskelle.

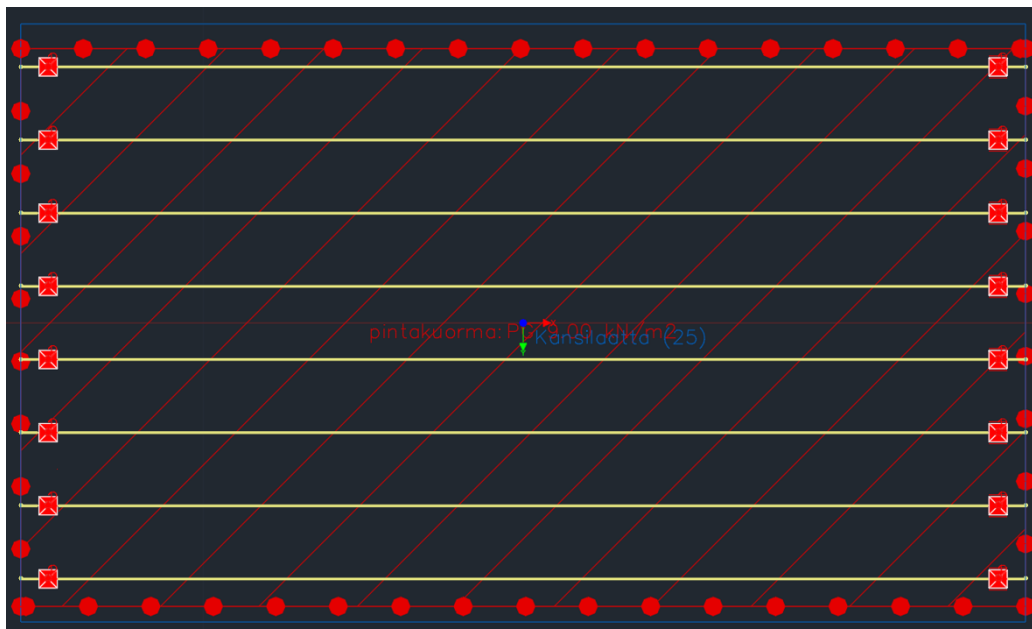


Kuvio 15. LM1 telit, kaistasijoittelu jommankumman teliakselin toisen pään pyörät kulkevat reunimmaisen palkin keskellä (SOFIPLUS).



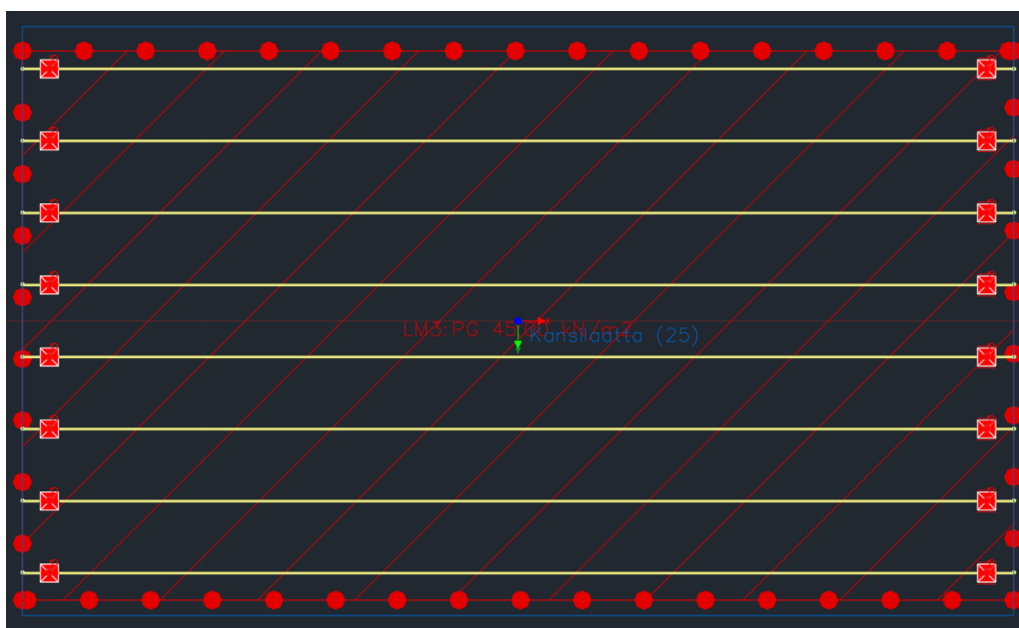
Kuvio 16. LM1 telit, kaistasijoittelu jommankumman teliakselin toisen pään pyörät kulkevat keskellä olevan palkin keskellä (SOFIPLUS).

Liikennekuorman LM1:n UDL-taulukon (taulukko 1) mukaan tulisi kaksi kuormakaistaa, toinen 9 kN/m^2 ja toinen kaista 6 kN/m^2 . Tässä hieman yksinkertaistettiin, joten asetettiin tasainen 9 kN/m^2 pintakuorma yhdelle kuusi metriä leveälle kaistalle (kuvio 17).



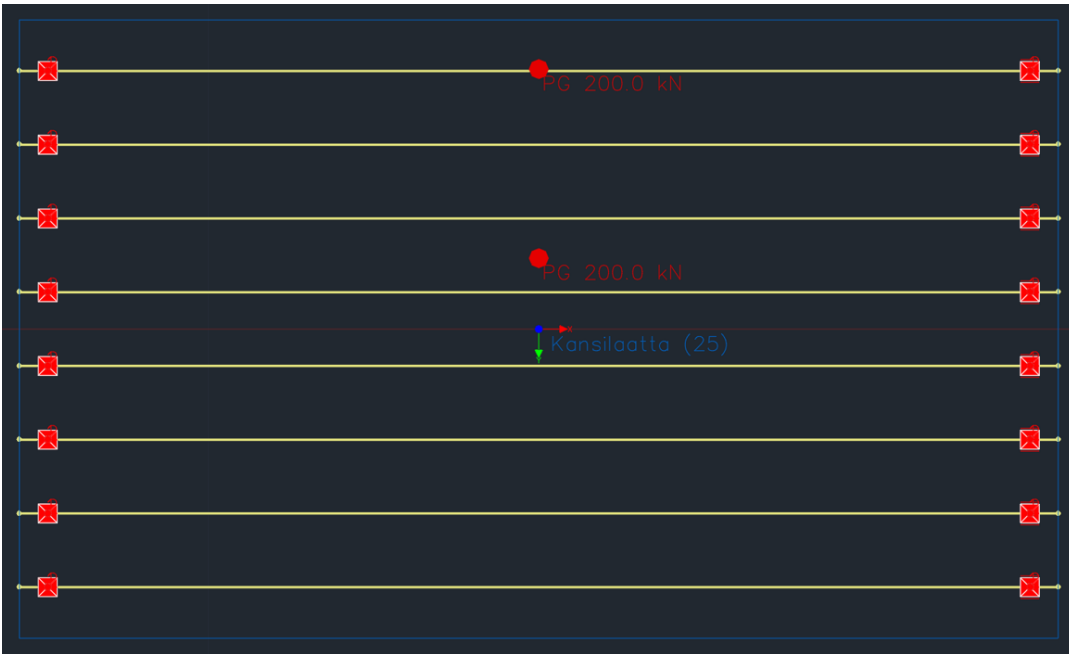
Kuvio 17. LM1, pintakuorma 9 kN/m^2 koko kaistan leveydeltä (SOFiPLUS).

Seuraavassa mentiin myös varman päälle (kuvio 18) asettamalla tasainen 45 kN/m^2 pintakuorma kuusi metriä leveälle kaistalle kolmen metrin kaistan sijaan.



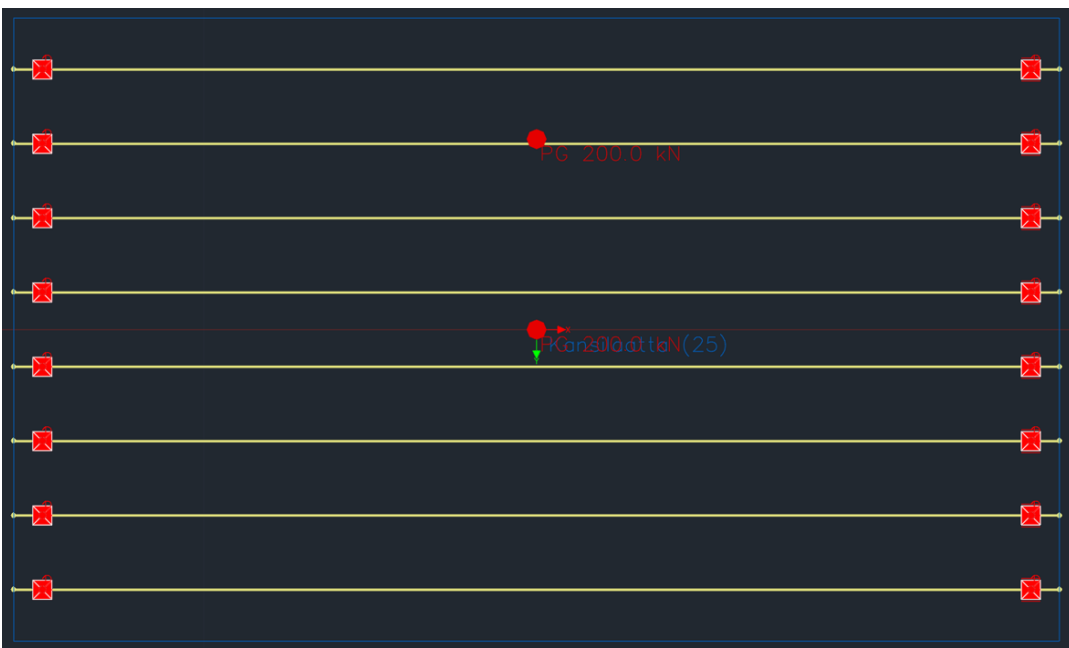
Kuvio 18. LM3, pintakuorma 45 kN/m^2 koko kaistan leveydeltä (SOFiPLUS).

Tällä sijoittelulla tarkastellaan LM2:n mukaisia yhden 400kN akselikuorman tuomia rasituk-
sia kannen keskialueella. Kuviossa 19 akseli on sijoitettu siten, että toinen pyörä kulkee
reunimmaisesta palkin keskellä.



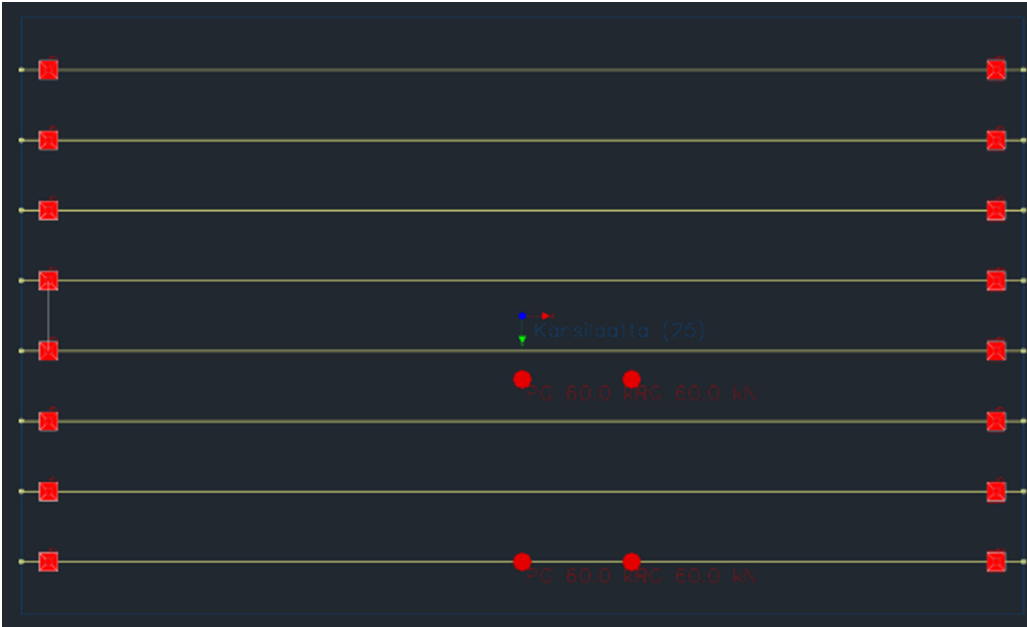
Kuvio 19. LM2, kaistasijoittelu 1 (SOFiPLUS).

Kuviossa 20 LM2:n mukainen 400 kN kuorma on sijoitettu keskimmäisten palkkien puo-
leen väliin.



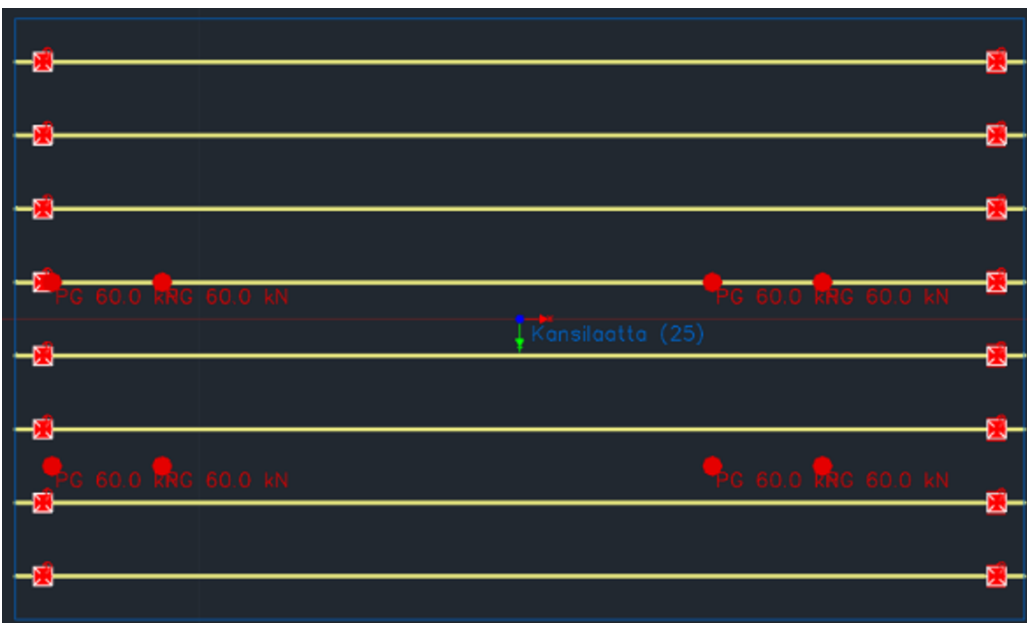
Kuvio 20. LM2, kaistasijoittelu 2 (SOFiPLUS).

Seuraavana haetaan pituussuunnassa sillan keskivaiheilta reunimmaisen palkin kohdalta suurinta arvoa, kuormitus on FLM3. Lyhyehköllä sillalla on mahdollinen tilanne, jossa vain ensimmäiset akselit ovat sillalla ja loput vielä kannen ulkopuolella. (kuvio 21).



Kuvio 21. FLM3, kaistasijoittelu pyörät ajavat reunimmaisen palkin kohdalla (SOFiPLUS).

VäsytySKUORMAKAAVIO FLM3:n mukaan akselivälit ovat 1,2 + 6 + 1,2 metriä, joten kaikki pyörät mahtuvat sillalle kerralla. Kuvion 22 sijoittelussa on kuormitettu siten, että viimeinen akseli on 0,1 m päässä tuelta. Tällä haetaan suurinta leikkausvoimaa.

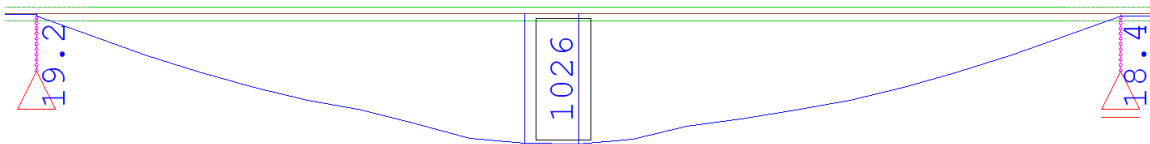


Kuvio 22. FLM3, kaistasijoittelu pyörät ajavat keskimmäisen palkin kohdalla (SOFiPLUS).

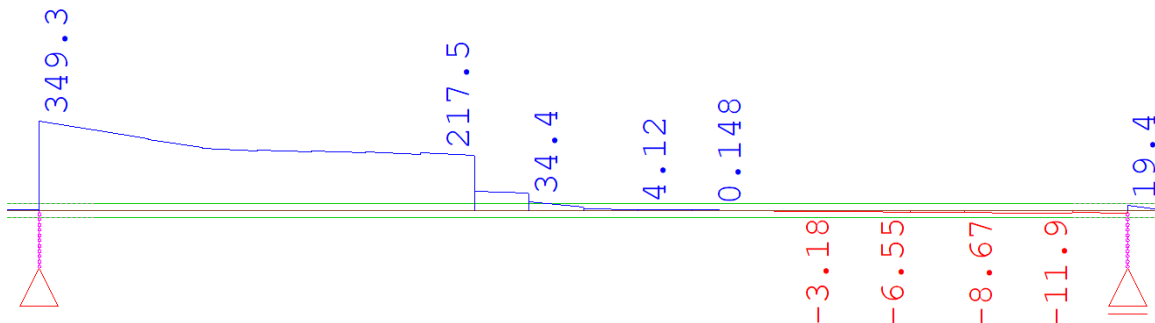
3.3 Mitoittavat voimasuureet ja siirtymät

Kun laskentaohjelmaan on syötetty kuormat ja kuormayhdistelyt, saadaan rakennemallille laskettuja rasituksia näkyviin. SOFiSTiK ohjelmoitiin laskemaan siten, että kuormayhdistelyjä laskiessa ohjelma hakee suurinta ja pienintä arvoa. Huomionarvoista on se, että mikäli rakennemallille olisi koodattu liikennekuormien ajelu kannen yli, tulosteet olisivat symmetrisemmät. Lopputuloksen kannalta sillä ei kuitenkaan ole merkitystä, koska liikennekuormat on kuitenkin aseteltu niihin paikkoihin, joista saadaan suurimmat rasitukset.

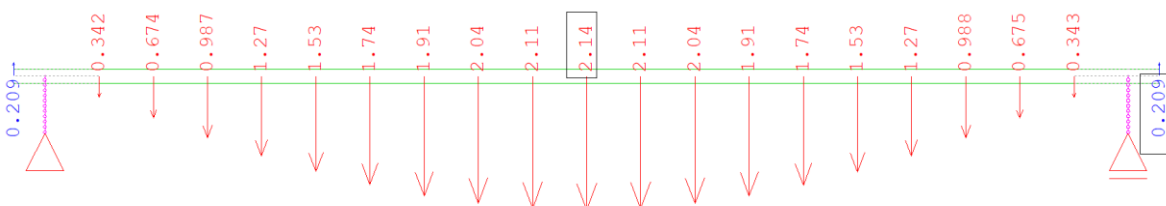
Määrävimmit voimasuureet ja siirtymät löytyivät reunimmaiselta palkilta (kuviot 23–25).



Kuvio 23. Reunimmaisesta palkista taivutusvoimasuureet murtorajatilassa. Määrävi yhdistelmä on MRT1 (SOFiSTiK).



Kuvio 24. Reunimmaisesta palkista leikkausvoimasuureet murtorajatilassa. Määrävi yhdistelmä on MRT1 (SOFiSTiK).



Kuvio 25. Päällysrakenteen pysyvä taipuma on 2,14 mm (SOFiSTiK).

3.4 Suuruusluokkatarkastelu

Suuruusluokkatarkastelussa on tarkoitus varmistua siitä, että FEM-laskennassa ei ole tapahtunut perustavanlaatuaista virhettä. Asia varmistetaan laskemalla käsin ja vertaamalla FEM-laskentaohjelman tuloksiin. Mikäli päästään noin 10% tarkkuuteen, voidaan pitää ohjelman laskemia tuloksia luotettavina.

3.4.1 Omapaino + lisäpäällyste

Lasketaan reunimmaisen HEB550 teräspalkin ja sille tulevan puukannen osuuden ja kai-
teiden paino sekä mahdollinen tuleva päällystevaraus. Rasitus on suurin reunimmaisella
palkilla.

$$g = 1,99 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 0,96\text{m} * 0,2\text{m} * 6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} + 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 0,96\text{m} * 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 4,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

missä $1,99 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ (HEB550 paino)

$$\frac{0,77\text{m}}{2} * 0,575\text{m} = 0,96\text{m} \text{ (kuormittava leveys)}$$

$$0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (kaide)}$$

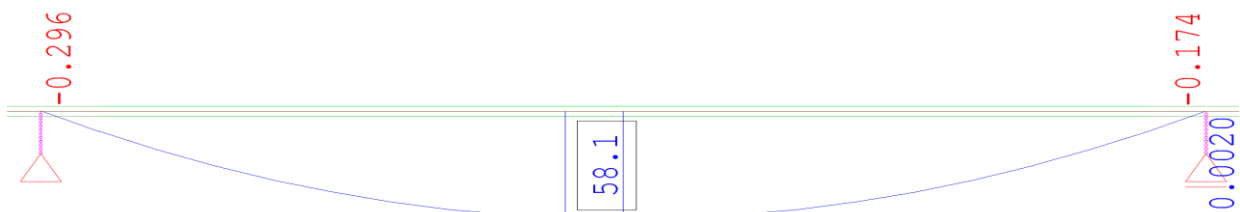
$$1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \text{ (päällystevaraus)}$$

$$R_k = \frac{4,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 10,4\text{m}}{2} = 23,9\text{kN}$$

$$R_{k\text{vertailu}} = \frac{\text{SOFiSTiK}}{\text{KÄSIN}} = \frac{23,4\text{kN}}{23,9\text{kN}} * 100\% \approx 98\%$$

$$M_k = \frac{4,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * (10,4\text{m})^2}{8} = 62,2\text{kNm}$$

$$M_{k\text{vertailu}} = \frac{\text{SOFiSTiK}}{\text{KÄSIN}} = \frac{58,1\text{kNm}}{62,2\text{kNm}} * 100\% \approx 93\%$$



Kuvio 26. Oma paino + lisäpäällyste (SOFiSTiK).

3.4.2 Liikennekuorma LM1 UDL

Vertaillaan myös reunimmaiselle palkille tuleva rasitus LM1 kuormakaavion tasaisen kuorman mukaan.

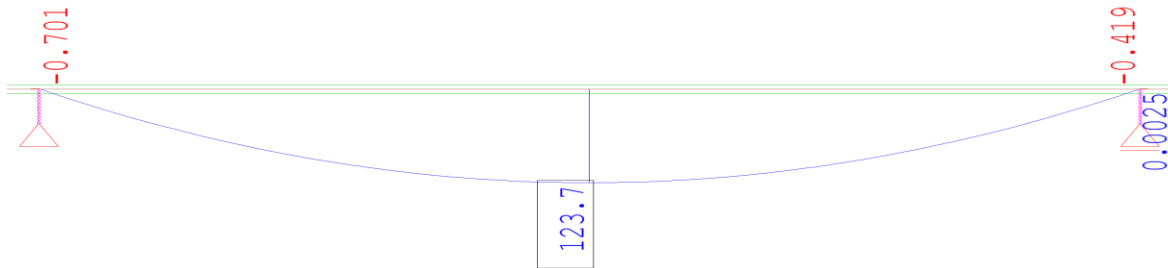
$$q = 0,96\text{m} * 9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 8,64 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$R_k = \frac{8,64 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 10,4\text{m}}{2} = 44,9\text{kN}$$

$$R_{k\text{vertailu}} = \frac{\text{SOFiSTiK}}{\text{KÄSIN}} = \frac{47,7\text{kN}}{44,9\text{kN}} * 100\% \approx 106\%$$

$$M_k = \frac{8,64 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * (10,4\text{m})^2}{8} = 116,8\text{kNm}$$

$$M_{k\text{vertailu}} = \frac{\text{SOFiSTiK}}{\text{KÄSIN}} = \frac{123,7\text{kNm}}{116,8\text{kNm}} * 100\% \approx 106\%$$



Kuvio 27. Liikennekuorma LM1 UDL (SOFiSTiK).

3.4.3 Liikennekuorma LM1 telit

Seuraavaksi reunimmaiselle palkille tuleva rasitus LM1 kuormakaavion telikuormien mukaan. Reunimmaista palkkia rasittaa vain akselin toisen pään renkaat, joten kuorma jaetaan kahdella. Käsin laskettuun hieman suurempi ero selittyy syrjäälankkukannen kuormaa jakavalla vaikutuksella, joka kykenee jakamaan pienen osan rengaskuormasta viereisille palkeille. FEM-laskentaohjelma ottaa tämän huomioon.

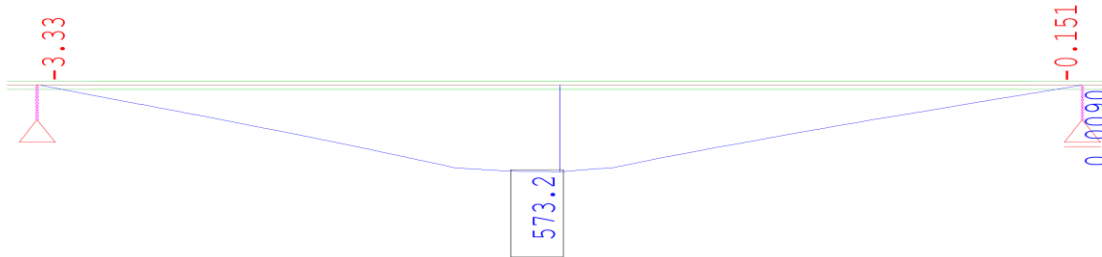
$$q = \frac{300\text{kN}}{2} * 0,96\text{m} = 144 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$R_k = \frac{2 * 144 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * (10,4\text{m} - 0,1\text{m})}{10,4\text{m}} = 285,2\text{kN}$$

$$R_{k\text{vertailu}} = \frac{\text{SOFiSTiK}}{\text{KÄSIN}} = \frac{271,0\text{kN}}{285,2\text{kN}} * 100\% \approx 95\%$$

$$M_k = 144 * \left(\frac{10,4\text{m}}{2} - 0,6\text{m} \right) = 662,4\text{kNm}$$

$$M_{k\text{vertailu}} = \frac{\text{SOFiSTiK}}{\text{KÄSIN}} = \frac{573,2\text{kNm}}{662,4\text{kNm}} * 100\% \approx 87\%$$



Kuvio 28. Liikennekuorma LM1 telit (SOFiSTiK).

3.4.4 Omapaino ja LM1 telit + UDL yhdistelytarkastus murtorajatilassa

Näin ollen todetaan vertailun tuottavan riittävän tarkan tuloksen, joten laskentaohjelman antamia tuloksia voidaan pitää luotettavina.

$$R_{d\text{vertailu}} = \frac{\text{SOFiSTiK}}{\text{KÄSIN}} = \frac{1,25 * 23,4\text{kN} + 1,35 * (47,7\text{kN} + 271,0\text{kN})}{1,25 * 23,9\text{kN} + 1,35 * (44,9\text{kN} + 285,2\text{kN})} * 100\% \approx 97\%$$

$$M_{d\text{vertailu}} = \frac{\text{SOFiSTiK}}{\text{KÄSIN}} = \frac{1,25 * 58,1\text{kN} + 1,35 * (123,7\text{kN} + 573,2\text{kN})}{1,25 * 62,2\text{kN} + 1,35 * (116,8\text{kN} + 662,4\text{kN})} * 100\% \approx 90\%$$

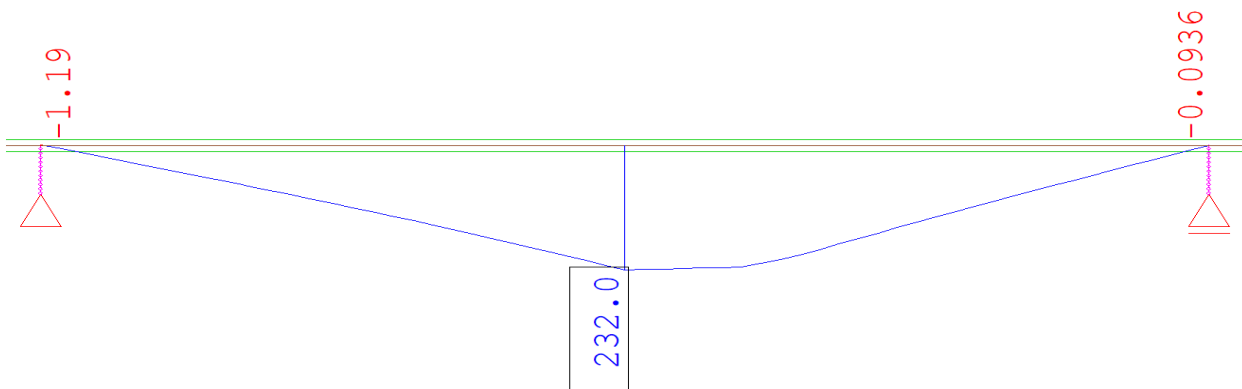
4 TERÄSPALKKIEN MITOITUKSESTA

Teräspalkkien rakennemitoitus on tehty MS Office Excel -ohjelmistolla, jolla on laskettu taivutus-, leikkaus-, veto-, vääntö-, puristus- sekä yhdistetyt rasituskestävyydet. Mitoituksessa on huomioitu uuman kiepahdustuenta kahden metrin välein (tukisiteet ja side-tangot). Mitoituslaskelmat löytyvät liitteestä 4.

Väsymistarkastelu sekä taipumarajan tarkastelu käyttörajatilassa on esitetty seuraavana erikseen.

4.1 Väsymistarkastelu FLM3

Väsymistarkastelussa käytetään murtorajatilassa osavarmuuslukuja. Kuviossa 29 on SOFiSTiK:sta poimittu suurin taivutusmomentti väsytytkuormakaaviosta FLM3. Taivutusmomentissa on mukana myös oma paino.



Kuvio 29. Suurin taivutusmomentti väsytytkuormakaaviosta FLM3 (SOFiSTiK).

Reunimmaisen palkin väsymiskestävyys on tarkistettu normaalijännitykselle NCCI 4 -ohjeen (2016, s. 94) mukaan ehdosta

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_M} \quad (4)$$

missä

$\gamma_{Ff} = 1,0$ on ekvivalenttien amplitudisten jännitysvaihteluiden osavarmuusluku

$\Delta \sigma_{E,2}$ = jännitysvaihtelu

$\Delta \sigma_c$ = teräksen ominaislujuus

γ_{mf} = väsymislajuuksien osavarmuusluku

SOFiSTiK:ssa rasituksia tutkiessa havaittu suurimman ja pienimmän jännityksen erotuksen kentässä olevan vähäistä, joten voidaan olettaa $M_{FLM,max} - M_{FLM,0} \sim \Delta \sigma_{FLM}$.

$$\sigma_{FLM,max} = \frac{M_{FLM,max}}{W_{el,y}} = \frac{232 * 10^6 \text{ Nmm}}{4971 * 10^3 \text{ mm}^3} = 46,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ekvivalentti vauriokerroin:

$$\lambda = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4 \text{ mutta } \lambda \leq \lambda_{max} \quad (5)$$

missä

$\lambda_1 = 2,55 - 0,7 * \frac{L-10}{70} = 2,546$ (liikenteen aiheuttama vauriovaikutuskerroin)

$\lambda_2 = 0,42$ on kerroin, joka ottaa huomioon liikenteen määrän (paikallisliikenne)

$\lambda_3 = 1,0$ on kerroin, joka ottaa huomioon sillan suunnitellun käyttöiän (100 vuotta)

$\lambda_4 = 1,0$ on kerroin, joka ottaa huomioon liikenteen muilla kaistoilla

$\lambda_{max} = 2,5 - 0,5 * \frac{L-10}{15} = 2,487$ (λ : n arvo, joka ottaa huomioon väsymisrajan)

sijoitetaan kaavaan

$$\lambda = 2,546 * 0,42 * 1,0 * 1,0 = 1,069 \leq \lambda_{max} = 2,487$$

Jännitysvaihtelu:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda * \Phi_2 * \Delta\sigma_{FLM,max} = 1,069 * 1,0 * 46,67 \frac{N}{mm^2} = 49,89 \frac{N}{mm^2} \quad (6)$$

missä

$$\Phi_2 = 1,0 \text{ dynaaminen suurennuskerroin}$$

Tarkistetaan ehto:

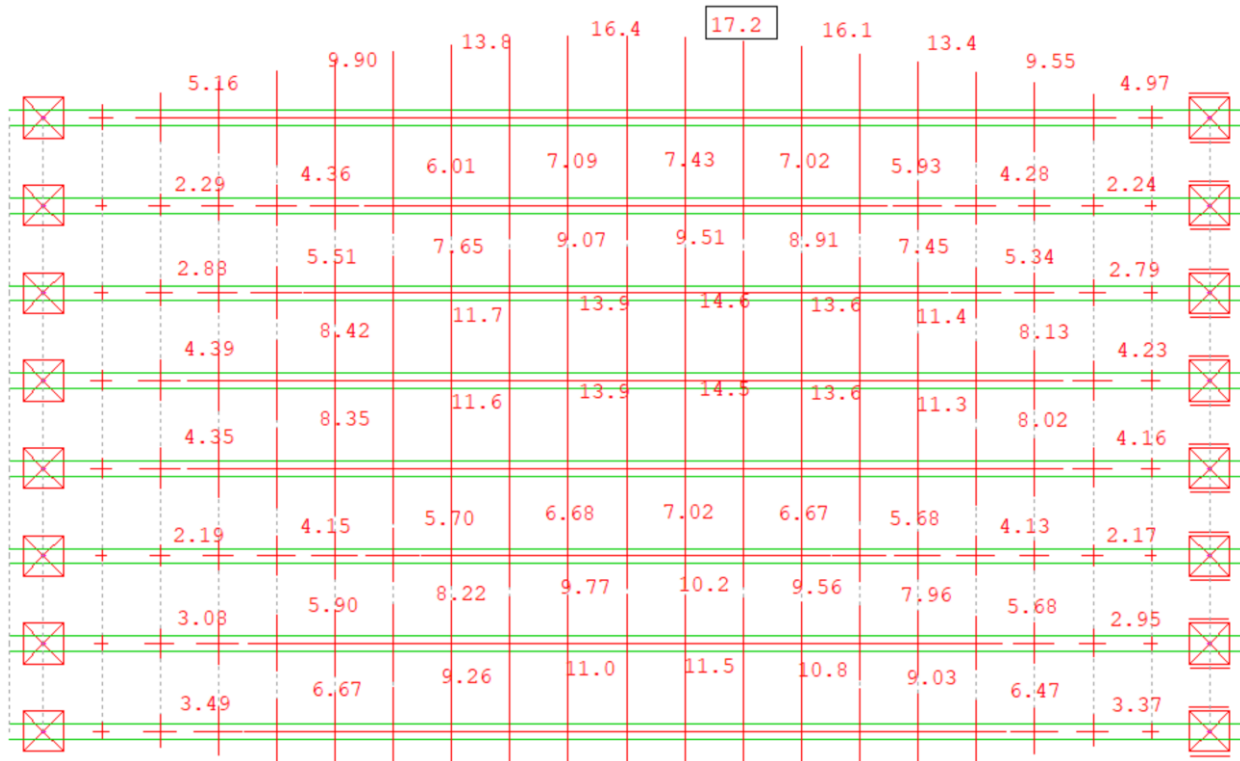
$$1,0 * 49,89 \frac{N}{mm^2} = 49,89 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{355 \frac{N}{mm^2}}{1,35} = 263 \frac{N}{mm^2} \quad \text{OK!}$$

Väsymiskestävyyden käyttöaste:

$$\frac{49,89 \frac{N}{mm^2}}{263 \frac{N}{mm^2}} * 100 \% = 19 \%$$

4.2 Käyttörajatila

NCCI 4:n (2016, s. 126) mukaan taipumaraja on $L/500$ käyttörajan tavalliselle kuormitusyhdistelmälle liikennekuormalla LM1 tai LM2. Lisäksi poikkileikkauksen kallistuma saa olla korkeintaan 1,0 %.



Kuvio 30. Kuormayhdistely KRT1b, päällysrakenteen maksimitaipuma (SOFiSTiK).

Suurin päällysrakenteen taipuma löytyy käyttörajan kuormitusyhdistelmästä KRT_1b. Kuvio 30 huomataan sen olevan 17,2 mm.

$$17,2\text{mm} \leq \frac{L}{500} = \frac{10400\text{mm}}{500} = 20,8\text{mm} \quad \text{OK!}$$

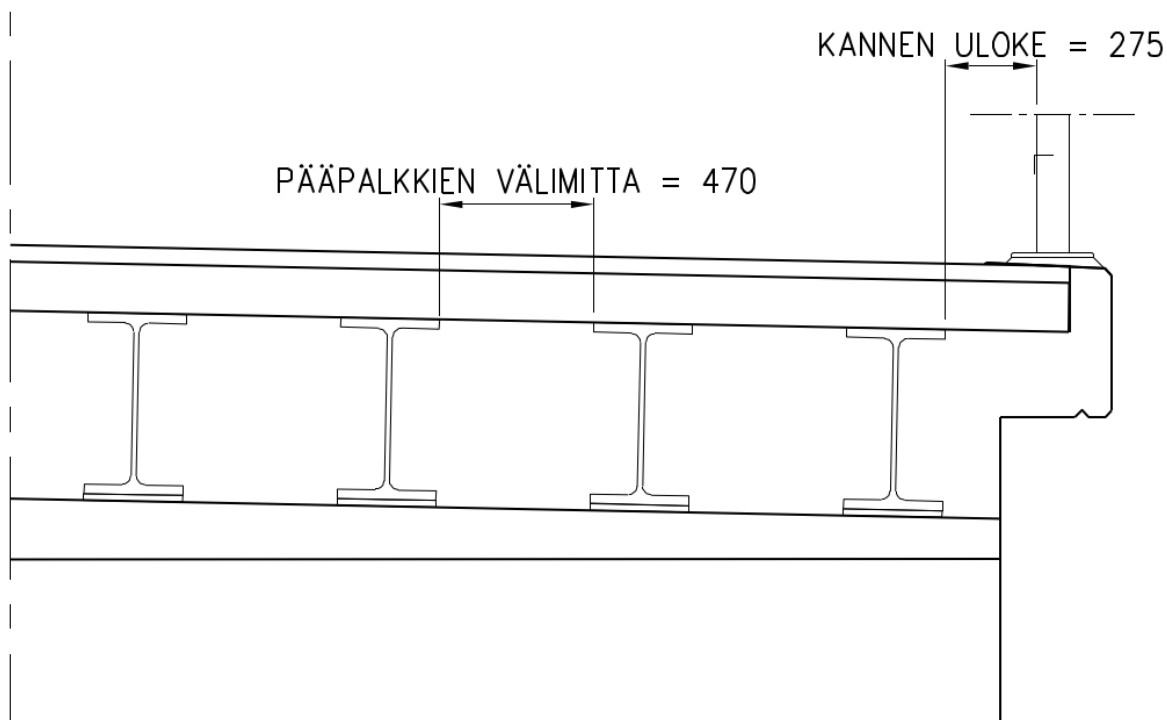
Kuviosta huomataan että poikkileikkauksen kallistuman olevan suurimmillaan suurimman taipuman kohdalla.

$$\frac{17,2\text{mm} - 11,5\text{mm}}{5390\text{mm}} * 100\% = 0,1\% \leq 1,0\% \quad \text{OK!}$$

5 SYRJÄLANKKUKANNEN MITOITUKSESTA

Syrjälankkukannen rakennemitoitus on tehty MS Office Excel -ohjelmistolla, jolla on laskettu taivutus- ja leikkauskestävyydet. Mitoituslaskelmat löytyvät liitteistä 5 ja 6.

Vierekkäisten teräspalkkien laippojen välimitta on 470 mm. Kannen ulokkeen pituus on valittu hieman varmemmalle puolelle kestävyden suhteen. Laskelmassa oletetaan suurimman MRT-yhdistelykuorman komponentti (pyöräkuorma) voi sijaita jopa sillan hyötyleveyttäkin reunemmalla, eli pahimmassa tapauksessa aivan kaiteessa kiinni. (kuvio 31.)



Kuvio 31. Syrjälankkukannen mitoitus.

6 YHTEENVETO

Taitorakennesuunnittelija joutuu useimmiten sovittamaan geosuunnittelijan, tie-/ratasuunnittelijan, tilaajan sekä urakoitsijan toiveet ja vaatimukset yhteen toteuttamalla niistä kustannustehokkaasti riittävän kestävästä lopputuloksesta. Joissain tapauksissa lopputuloksella on myös esteettisiä vaatimuksia. Talonrakennuspuolella kyseinen työ kuuluu arkkitehdille, mutta taitorakennesuunnittelija myös mitoittaa rakenteet.

On osattava rakentaa suunniteltava kohde mielessään työvaihe kerrallaan ja ymmärtää, mistä mikäkin kuorma tulee. Ohjeistuksia on samalla noudatettava. Lisäksi on hyvä osata erinäisiä suunnittelua tukevia ohjelmia. Sain tässä opinnäytetyössä pienen loikan osaamissani eteenpäin – niin laskemisen kuin ohjelmien osalta.

Kun yhden ohjelman oppii, niin seuraavan samantyyppisen ohjelman sisäistää helpommin. Ensimmäisen FEM-laskentaohjelman käyttöön tutustuin katselemalla videoita ennen työhön ryhtymistä – niin olin esimerkiksi tietomallien tekemisen osittain oppinut. Poiketen tietomalliohjelmien opetteluun, FEM-laskentaohjelmassa pääsin vasta henkilökohtaisen opastuksen kautta kunnolla käsitykseen mitä on oikeasti tekemässä ja miksi.

Opinnäytetyön olisi voinut rajata myös mahdollisimman suoraviivaisen ohjeen tekoon jostain pienestä osa-alueesta, mutta hahmottaakseni siltasuunnittelun prosessia itselleni koin tärkeämmäksi esittää edes pintaraapaisun siitä mitä tuli tehtyä. Se, mitä kokee osaavansa, punnitaan siinä vaiheessa, kun se pitäisi esittää jollekin toiselle. Ala kokee tällä hetkellä suunnittelijapulaa, joten työllisyysnäköymät ovat todella hyvät. Rohkaisenkin tulevaisuudessa valmistuvia rakennusinsinöörejä hakeutuvan suunnittelijaksi taitorakenteiden pariin.

LÄHTEET

- NCCI 1. 2017. Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1. [pdf-tiedosto]. Liikenneviraston ohjeita 24/2017. [VIITATTU 26.3.]. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-24_ncci1_web.pdf
- NCCI 4. 2016. Eurokoodin soveltamisohje, Teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu – NCCI 4. [pdf-tiedosto]. Liikenneviraston ohjeita 27/2016. [VIITATTU 26.3.]. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2016-27_ncci4_web.pdf

LIITTEET

Liite 1. Tiesillat – murtorajatilan kuormayhdistelytaulukko

Liite 2. Tiesillat – käyttörajatilan kuormayhdistelytaulukko

Liite 3. Lämpötilojen ääriarvot Suomessa

Liite 4. Teräspalkkien mitoitus

Liite 5. Syrjälankkukansi pääpalkkien välissä

Liite 6. Syrjälankkukansi ulokkeena

Liite 1. Tiesillat – murtorajatilan kuormayhdistelytaulukko (NCC 1, 2017, liite 1A / 2).

TIESILLAT - MURTORAJATILA - Set A: A2.4 (A), Set B: A2.4 (B)														
KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVA KUORMA (6.10b)														
YHDISTELYKAAVAT MRT_1 - MRT_11														
		MRT_0	MRT_1	MRT_2	MRT_3	MRT_4	MRT_5	MRT_6	MRT_7	MRT_8	MRT_9	MRT_10	MRT_11	
		6.10a	gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	F _{wk}	T _k	BF	IL	TLEP	
SET A (EQU) & SET B (STR/GEO)	Omapaino	1.35	LM1	LM2	LM1+vaaka	kevyt	ruuhka	LM3	Tuuli	Lämpötila	Laakerikitka	Jääkuorma	Lk-maanp.	
SET B (STR/GEO)	Esijännitys	1,1 / 0,9 ⁴⁾	STR/GEO: 1,25 / 0,9					EQU: 1,15 / 0,9						
		STR/GEO: 1,1 / 0,9 ⁴⁾												
		EQU: 1,1 / 0,9 ³⁾												
SET A (EQU) & SET B (STR/GEO)	gr1a (LM1)	Telit	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75
		UDL	1,35	-	-	-	-	-	-	-	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4
		Kevyt	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4
	gr1b (LM2)	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	gr2 (LM1+Vaaka)	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	gr3 (Kevyt)	-	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-
	gr4 (Ruuhka)	-	-	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-
	gr5 (LM3)	-	-	-	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-
	F _{wk} ¹⁾	-	1,5 x 0,6	-	-	-	-	-	-	1,5	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	T _k ²⁾	-	1,5 x 0,6	-	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	-	-	1,5 x 0,6	1,5	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	BF	-	1,5 x 0,6	-	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	-	-	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	IL	-	1,5 x 0,7	-	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	-	-	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5	1,5 x 0,7
	S 2)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	TLEP	-	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	-	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35

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

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

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

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

- Passiivipaineen yhdistelykerroin aiheuttavan kuorman mukaan ja varmuusluku pysyvän kuorman mukaan

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

= Määräävä muuttuva kuorma

Liite 2. Tiesillat – käyttörajatilan kuormayhdistelytaulukko (NCC 1, 2017, liite 1A / 3).

TIESILLAT - KÄYTTÖRAJATILA - Ominaisiyhdistelmä (6.14), Tavallinen yhdistelmä (6.15), Pitkäaikaisyhdistelmä (6.16), Pysyvät kuormat																					
(6.14)											(6.15)							(6.16)	Pysyvät		
KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVU KUORMA																					
KRT_1a - KRT_11a											KRT_1b - KRT_11b							KRT_1c	KRT_1d		
1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a	9a	10a	11a	1b	2b	5b	7b	8b	9b	10b	11b	1c	1d	
gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	F _{wk}	T _k	BF	IL	TLEP	gr1a	gr1b	gr4	F _{wk}	T	BF	IL	TLEP	-	-	
Omapaino	1											1							1	1	
Esijännitys	1											1							1	1	
gr1a	Telit	-	-	-	-	-	-	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	UDL	1	-	-	-	-	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	-	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-
	Kevyt	-	-	-	-	-	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
	gr1b	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-
T _k	0.6	-	0.6	0.6	0.6	-	0.6	1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	-	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
BF	0.6	-	0.6	0.6	0.6	-	0.6	0.6	1	0.6	0.6	0.6	0.4	-	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4
IL	0.7	-	0.7	0.7	0.7	-	0.7	0.7	0.7	1	0.7	0.7	0.2	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2
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 ⁴⁾	-

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

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

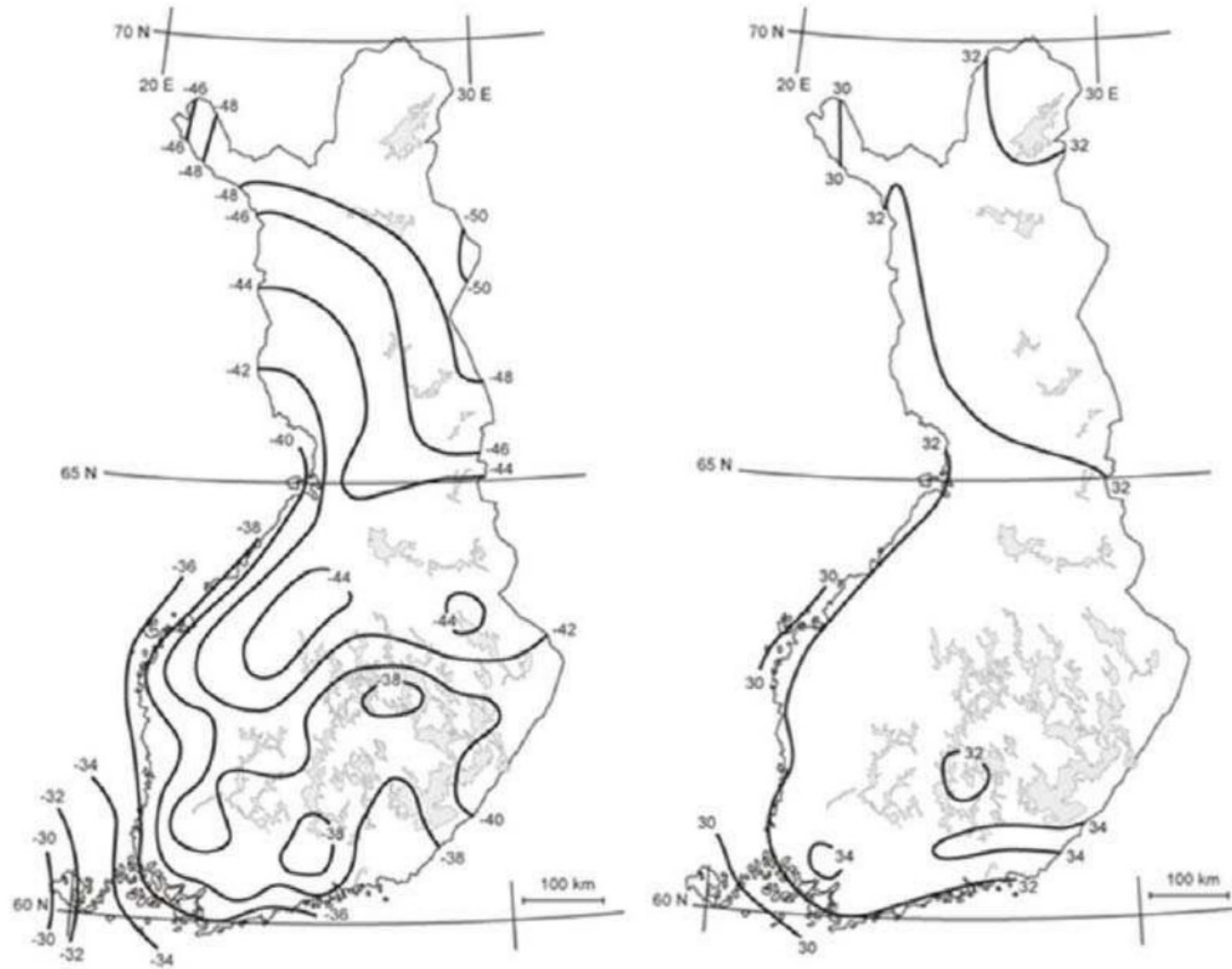
4) Liikenteen aiheuttaman vaakasuuntaisen maanpaineen tapauksessa voidaan käyttää arvoa 0.4

- Passiivipaineen yhdistelykerroin aiheuttavan kuorman mukaan

= Määräävä muuttuva kuorma

Tiesillat		
Onnettomuusyhdistelmä		
Ad	1	1
Omapaino	1	1
Esijännitys	1	1
gr1a ³⁾	Telit	0.75
	UDL	0.4
	Kevyt	-
gr1b	-	0.75
gr2	-	-
gr3	-	-
gr4	-	-
gr5	-	-
F _{wk} ¹⁾	-	-
T _k	0.5	-
BF	0.4	-
IL	0.2	-
S ²⁾	-	-
TLEP	-	-

Liite 3. Lämpötilojen ääriarvot Suomessa (NCC 1, 2017, s. 43).



Liite 4. Teräspalkkien mitoitus

TERÄSPROFIILI:

Teräslaatu =	HEB 550
$Y_{M0} =$	S355 ----
$Y_{M1} =$	1,00 ----
$Y_{M2} =$	1,10 ----
$Y_{M3} =$	1,25 ----
Myötölujuus $f_y =$	355 N/mm ²
Vetomurtolujuus $f_u =$	510 N/mm ²
Kimmokerroin $E_s =$	210 000 N/mm ²
Liukumuoduli $G =$	80 769 N/mm ²
Lujuukskerroin $\epsilon = \sqrt{(235 / f_y)} =$	0,814 ----
Sauvan pituus $L =$	10,400 m

PROFIILIN MITAT:

corr. =	0,0 mm
Korkeus $h =$	550,0 mm
Leveys $b =$	300,0 mm
Uuman paksuus $t_w =$	15,0 mm
Laipan paksuus $t_f =$	29,0 mm
Pyöristyssäde $r =$	27,0 mm
Laippojen väli $h_w =$	492,0 mm
Uuman suora korkeus $d =$	438,0 mm
Metripaino $g =$	1,994 kN/m
Ulkopinta-ala/metri $A_k =$	2,224 m ² /m
Ulkopinta-ala/tonni $A_G =$	11,15 m ² /t

MITOITAVAT VOIMASUURET:

Taivutus $M_{y,Ed} =$	1 026,0 kNm
Taivutus $M_{z,Ed} =$	75,3 kNm
Veto $N_{t,Ed} =$	0,0 kN
Puristus $N_{c,Ed} =$	0,0 kN
Leikkaus $V_{y,Ed} =$	41,0 kN
Leikkaus $V_{z,Ed} =$	349,3 kN
Vääntö $T_{Ed} =$	9,4 kNm

LEIKKAUSKESTÄVYYS:

$\tau_{y,d} = V_{y,Ed} / A_{v,y} =$	5,6 N/mm ²
$\tau_{y,Rd} = f_y / (\sqrt{3} * Y_{M0}) =$	205,0 N/mm ²
$V_{y,Rd} = \tau_{y,d} * A_{v,y} =$	1 512,6 kN
Käyttöaste y-suunnassa =	0,03 OK!
$\tau_{z,d} = V_{z,Ed} / A_{v,z} =$	20,1 N/mm ²
$\tau_{z,Rd} = f_y / (\sqrt{3} * Y_{M0}) =$	205,0 N/mm ²
$V_{z,Rd} = \tau_{z,d} * A_{v,z} =$	3 566,3 kN
Käyttöaste z-suunnassa =	0,10 OK!
Uuman leikkauslommahdustarkistus:	OK!
$h_w / t_w = 32,80 \leq 72/\eta * \epsilon = 48,82$	

VETOKESTÄVYYS:

$\sigma_{t,d} = N_{t,Ed} / A_{tot} =$	0,00 N/mm ²
$N_{t,Rd} = f_y * A_{tot} / Y_{M0} =$	9 019,1 kN
Käyttöaste =	0,00 OK!

PURISTUSKESTÄVYYS:

$\sigma_{c,d} = N_{c,Ed} / A_{tot} =$	0,00 N/mm ²
$N_{c,Rd} = f_y * A_{tot} / Y_{M0} =$	9 019,1 kN
Käyttöaste =	0,00 OK!

Y-SUUNTA: Nurjahtaa vai Ei ?

$l_{cr,y} = 1,00 * L =$	10,400 m
Nurjahduskäyrä = a	$\alpha = 0,21$
$\lambda_{y,max} = 0,896$	$\phi_y = 0,974$ ----
Nurjahduskerroin $\chi_y =$	0,737 ----
Nurjahduskestävyys $N_{b,y,Rd} =$	6 041,5 kN
Käyttöaste (nurjahdus) =	0,00 OK!

Z-SUUNTA: Nurjahtaa vai Ei ?

$l_{cr,z} = 1,00 * L =$	10,400 m
Nurjahduskäyrä = b	$\alpha = 0,34$
$\lambda_{z,max} = 1,897$	$\phi_z = 2,588$ ----
Nurjahduskerroin $\chi_z =$	0,230 ----
Nurjahduskestävyys $N_{b,z,Rd} =$	1 885,5 kN
Käyttöaste (nurjahdus) =	0,00 OK!

POIKKILEIKKAUSSUURET:

Poikkileikkauspinta-ala $A_{tot} =$	254,06 cm ²
Leikkauspinta-ala $A_{v,y} =$	73,80 cm ²
Leikkauspinta-ala $A_{v,z} =$	174,00 cm ²
Taivutusvastus $W_{el,y} =$	4970,58 cm ³
Taivutusvastus $W_{pl,y} =$	5590,61 cm ³
Taivutusvastus $W_{el,z} =$	871,79 cm ³
Taivutusvastus $W_{pl,z} =$	1341,14 cm ³
Neliömomentti $I_y =$	13 6690,88 cm ⁴
Neliömomentti $I_z =$	1 3076,90 cm ⁴
Jäyhyysäde $i_y =$	23,20 cm
Jäyhyysäde $i_z =$	7,17 cm
Vääntöjäyhyys $I_T =$	610,17 cm ⁴
Käyräjäyhyys $I_w =$	8 874 016 cm ⁶

POIKKILEIKKAUSLUOKAT:

Taivutettu, Puristettu, Määräävä ?	M
Uuman PL-luokka =	2 ----
Laippojen PL-luokka =	1 ----
Kokonaisuuden PL-luokka =	2 ----
Klimoteorialla vai PL-luokalla ?	K

TAIVUTUSKESTÄVYYS:

$\sigma_{m,y,d} = M_{y,Ed} / W_y =$	206,41 N/mm ²
$M_{y,Rd} = f_y * W_y / Y_{M0} =$	1 764,55 kNm
Käyttöaste y-suunnassa =	0,58 OK!
$\sigma_{m,z,d} = M_{z,Ed} / W_z =$	86,37 N/mm ²
$M_{z,Rd} = f_y * W_z / Y_{M0} =$	309,49 kNm
Käyttöaste z-suunnassa =	0,24 OK!
Yhteiskäyttöaste =	0,82 OK!

Y-SUUNTA: Voiko Kiepahtaa vai Ei ?

Kiepahduspituus $L_{cr} =$	2,000 m
$k_z = 1,00$	$k_w = 1,00$
$C_1 = 2,770$	$C_2 = 1,000$
Kiepahduskäyrä = a	$\alpha_{LT} = 0,21$
$z_g = h/2$	$M_{cr} = 21 261,0$ kNm
$\lambda_{LT,Mc} = 0,288$	$\phi_{LT} = 0,551$ ----
Kiepahduskerroin $\chi_{LT} =$	0,980 ----
Kiepahduskestävyys $M_{b,y,Rd} =$	1 572,5 kNm
Käyttöaste (kiepahdus) =	0,65 OK!

VÄÄNTÖKESTÄVYYS:

$\tau_{t,w,Ed} = T_{Ed} * t_w / I_T =$	23,18 N/mm ²
Uuman vääntökäyttöaste =	0,07 OK!
Leikkauskestävyys $V_{y,T,Rd} =$	1 442,54 kN
Redusoitu leikkaus-y [K.A.] =	0,03 OK!
$\tau_{t,Ed} = T_{Ed} * t_f / I_T / 2 =$	22,41 N/mm ²
Laippojen vääntökäyttöaste =	0,06 OK!
Leikkauskestävyys $V_{z,T,Rd} =$	3 406,76 kN
Redusoitu leikkaus-z [K.A.] =	0,10 OK!

YHDISTETYT RASITUKSET:

Aksiaalikestävyys $N_{Rd,V,red} =$	9 019,1 kN
Taivutuskestävyys $M_{y,Rd,V,red} =$	1 764,6 kNm
Taivutuskestävyys $M_{z,Rd,V,red} =$	309,5 kNm
Taivutus ja leikkaus =	0,82 OK!
Taivutus ja aksiaalinen =	0,82 OK!
Taiv., leik. ja aks. =	0,82 OK!
Taiv., leik. ja aks. $\chi_y, \chi_{LT} =$	0,90 OK!
Taiv., leik. ja aks. $\chi_z, \chi_{LT} =$	0,90 OK!
Von Mises -summayhtälö =	0,72 OK!
$k_{yy} = 1,000$	$C_{my} = 1,000$
$k_{yz} = 1,000$	$C_{mz} = 1,000$
$k_{zy} = 1,000$	$C_{mLT} = 1,000$
$k_{zz} = 1,000$	

Liite 5. Syrjälankkukansi teräspalkkien välissä

KANSIRAKENTEEN TIEDOT:

Korkeus h =	<input type="text" value="150"/>	mm
Leveys b =	<input type="text" value="50"/>	mm
Pinta-ala A =	75,00	cm ²
Taivutusvastus W_y =	187,50	cm ³
Neliömomentti I_y =	1 406,25	cm ⁴

Pääpalkkien väli L =	<input type="text" value="470"/>	mm
<i>(palkkien ulkopinoista mitattuna, ei k/k)</i>		

LIIKENNEKUORMAT:

LM1 pyöräkuorma =	<input type="text" value="150,0"/>	kN
*pinta-ala	400	400 mm x mm
*tasainenkuorma	<input type="text" value="9,0"/>	kN/m ²
LM2 pyöräkuorma =	<input type="text" value="200,0"/>	kN
*pinta-ala	350	600 mm x mm
LM3 erikoiskuorma =	<input type="text" value="45,0"/>	kN/m ²

PUUTUOTTEEN TIEDOT:

Puutuote =	<input type="text" value="C24"/>
Materiaalivarmuus γ_M =	1,40
Käyttöluokka =	<input type="text" value="3"/>
Kuorman aikaluokka =	<input type="text" value="H"/>
<i>(G pysyvä, P itkä, K eski, L yhyt, H etkel)</i>	

k_{mod} =	0,900	k_{def} =	2,000
$k_{h,taivutus}$ =	<input type="text" value="1,000"/>	$k_{i,veto}$ =	<input type="text" value="1,000"/>

Taivutus	$f_{m,y,k}$ =	24,00 N/mm ²
Taivutus	$f_{m,z,k}$ =	24,00 N/mm ²
Veto	$f_{t,0,k}$ =	14,00 N/mm ²
Puristus	$f_{c,0,k}$ =	21,00 N/mm ²
Leikkaus	$f_{v,y,k}$ =	4,00 N/mm ²
Leikkaus	$f_{v,z,k}$ =	4,00 N/mm ²
Kimmomoduuli	E_{mean} =	11 000,00 N/mm ²
Kimmomoduuli	$E_{0,05}$ =	7 400,00 N/mm ²

MITOITAVA TAIVUTUSRASITUS: *(rasiukset yhtä syrjälankkukannen palkkia kohden)*

Viivakuorma LM1	$q = Q_{LM1} / A_{LM1} * b =$	46,88 N/mm	$c_{max} =$	400	mm
Taivutusrasitus LM1	$M_{LM1} = q * c^3 / (24 * L) - 3 * q * c * L / 24 + M_{UDL} =$	0,844	kNm		
Viivakuorma LM2	$q = Q_{LM2} / A_{LM2} * b =$	47,62 N/mm	$c_{max} =$	470	mm
Taivutusrasitus LM2	$M_{LM2} = q * c^3 / (24 * L) - 3 * q * c * L / 24 =$	0,877	kNm		
Viivakuorma LM3	$q = UDL * b =$	2,25 N/mm	$c_{max} =$	470	mm
Taivutusrasitus LM3	$M_{LM3} = q * c^3 / (24 * L) - 3 * q * c * L / 24 =$	0,041	kNm		
Mitoittava taivutusmomentti (MRT-arvo) ($\gamma = 1,35$)		$M_{Ed} =$	1,183	kNm	

MITOITAVA LEIKKAUSRASITUS: *(rasiukset yhtä syrjälankkukannen palkkia kohden)*

Tuen reunasta etäisyydellä "h" sijaitsevaa kuormaa ei tarvitse huomioida leikkausmitoituksessa.

Tehollisen leikkauskuorman leveydeksi saadaan siis :	$L_{eff} = L - 2 * h =$	170	mm			
Leikkausrasitus LM1	$V_{LM1} = q * c / 2 + L_{eff} * UDL =$	4,061	kN	$c_{max} =$	170	mm
Leikkausrasitus LM2	$V_{LM2} = q * c / 2 =$	4,048	kN	$c_{max} =$	170	mm
Leikkausrasitus LM3	$V_{LM3} = q * c / 2 =$	0,191	kN	$c_{max} =$	170	mm
Mitoittava leikkausvoima (MRT-arvo) ($\gamma = 1,35$)		$V_{Ed} =$	5,482	kN		

LEIKKAUSKESTÄVYYS:

$\tau_{y,d} = 1,5 * V_{Ed} / A_v =$	1,10	N/mm ²
$f_{v,y,d} = k_{mod} * f_{v,y,k} / \gamma_M =$	2,57	N/mm ²
Käyttöaste =	0,43	OK!

TAIVUTUSKESTÄVYYS:

$\sigma_{m,y,d} = M_{Ed} / W_y =$	6,31	N/mm ²
$f_{m,y,d} = k_{mod} * f_{m,y,k} / \gamma_M =$	15,43	N/mm ²
Käyttöaste =	0,41	OK!

SYRJÄLANKKUKANNEN

Taivutuksessa: 100,0 % käyttöaste Kuluma = 54,1 mm

KULUMISVARA:

Leikkauksessa: 99,9 % käyttöaste Kuluma = mm

Liite 6. Syrjälankkukansi ulokkeena

KANSIRAKENTEEN TIEDOT:

Korkeus h =	150 mm
Leveys b =	50 mm
Pinta-ala A =	75,00 cm ²
Taivutusvastus $W_y =$	187,50 cm ³
Neliömomentti $I_y =$	1 406,25 cm ⁴

Väli [HL-palkin reuna] $L_1 =$ mm
(pääpalkin ulkopinnasta mitattuna, ei keskeltä)

LIIKENNEKUORMAT:

LM1 pyöräkuorma =	150,0 kN
*pinta-ala	400 400 mm x mm
*tasainenkuorma	9,0 kN/m ²
LM2 pyöräkuorma =	200,0 kN
*pinta-ala	350 600 mm x mm
LM3 erikoiskuorma =	45,0 kN/m ²

MITOITAVA TAIVUTUSRASITUS: (rasiukset yhtä syrjälankkukannen palkkia kohden)

Viivakuorma LM1	$q = Q_{LM1} / A_{LM1} * b =$	46,88 N/mm	$c_{max} =$	275 mm
Taivutusrasitus LM1	$M_{LM1} = q * c * (L - c / 2) + M_{UDL} =$			1,789 kNm
Viivakuorma LM2	$q = Q_{LM2} / A_{LM2} * b =$	47,62 N/mm	$c_{max} =$	275 mm
Taivutusrasitus LM2	$M_{LM2} = q * c * (L - c / 2) =$			1,801 kNm
Viivakuorma LM3	$q = UDL * b =$	2,25 N/mm	$c_{max} =$	275 mm
Taivutusrasitus LM3	$M_{LM3} = q * c * (L - c / 2) =$			0,085 kNm
Mitoittava taivutusmomentti (MRT-arvo) ($\gamma = 1,35$)			$M_{Ed} =$	2,431 kNm

MITOITAVA LEIKKAUSRASITUS: (rasiukset yhtä syrjälankkukannen palkkia kohden)

Tuen reunasta etäisyydellä "h" sijaitsevaa kuormaa ei tarvitse huomioida leikkausmitoituksessa.				
Tehollisen leikkauskuorman leveydeksi saadaan siis :		$L_{eff} = L - h =$	125 mm	
Leikkausrasitus LM1	$V_{LM1} = q * c / 2 + L_{eff} * UDL =$	5,916 kN	$c_{max} =$	125 mm
Leikkausrasitus LM2	$V_{LM2} = q * c / 2 =$	5,952 kN	$c_{max} =$	125 mm
Leikkausrasitus LM3	$V_{LM3} = q * c / 2 =$	0,281 kN	$c_{max} =$	125 mm
Mitoittava leikkausvoima (MRT-arvo) ($\gamma = 1,35$)			$V_{Ed} =$	8,036 kN

LEIKKAUSKESTÄVYYS:

$\tau_{v,d} = 1,5 * V_{Ed} / A_v =$	1,61 N/mm ²
$f_{v,y,d} = k_{mod} * f_{v,y,k} / \gamma_M =$	2,57 N/mm ²
Käyttöaste =	0,63 OK!

PUUTUOTTEEN TIEDOT:

Puutuote =	C24
Materiaalivarmuus $\gamma_M =$	1,40
Käyttöluokka =	3
Kuorman aikaluokka =	H
(<u>G</u> pysyvä, <u>P</u> itkä, <u>K</u> eski, <u>L</u> yhyt, <u>H</u> etkel)	

$k_{mod} =$ 0,900 $k_{def} =$ 2,000
 $k_{h,taivutus} =$ 1,000 $k_{l,veto} =$ 1,000

Taivutus	$f_{m,y,k} =$	24,00 N/mm ²
Taivutus	$f_{m,z,k} =$	24,00 N/mm ²
Veto	$f_{t,o,k} =$	14,00 N/mm ²
Puristus	$f_{c,o,k} =$	21,00 N/mm ²
Leikkaus	$f_{v,y,k} =$	4,00 N/mm ²
Leikkaus	$f_{v,z,k} =$	4,00 N/mm ²
Kimmomoduuli	$E_{mean} =$	11 000,00 N/mm ²
Kimmomoduuli	$E_{0,05} =$	7 400,00 N/mm ²

SYRJÄLANKKUKANNEN

Taivutuksessa: 100,0 % käyttöaste Kuluma = 12,5 mm

KULUMISVARA:

Leikkauksessa: 99,8 % käyttöaste Kuluma = mm